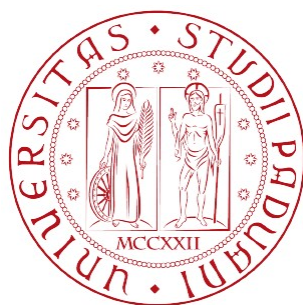




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Epistemologia del tempo e interpretazioni cosmologiche

Relatore
Prof. Enrico Maria Corsini

Laureando
Andrea Brussi

Anno Accademico 2024/2025

Time is what keeps everything from happening at once.
Ray Cummings¹

*So fängt denn alle menschliche Erkenntnis
mit Anschauungen an, geht von da zu Begriffen
und endigt mit Ideen.*
Immanuel Kant²

*Call me Ishmael.
Some years ago -never mind how
long precisely- having little or no
money in my purse, and nothing particular
to interest me on shore, I
thought I would sail about a little
and see the watery part of the world.*
Herman Melville³

¹ Frase citata da molti, fu scritta in origine da Ray Cummings (1887-1957), autore americano di letteratura e fumetti di fantascienza, in *All-Story weekly* (The Frank Munsey Company, New York) Vol 95 pag. 20, 1919; nell'approfondimento sono sempre tradotte le citazioni in qualsiasi lingua tranne l'inglese, lingua franca

² «È così che inizia tutta la conoscenza umana con le intuizioni, va da lì ai concetti e termina con le idee», Immanuel Kant (1724-1804) in *Kritik der reinen Vernunft* (*Critica della ragion pura*, Insegnamento Elementare 2° T. 2° Dip, 1781), citato da David Hilbert (1862-1943) in epigrafe del suo *Grundlagen der Geometrie* (*Fondamenti di geometria*, Teubner, Leipzig, 1899)

³ Herman Melville (1819-1891) nel famoso incipit di *Moby-Dick, or the Whale* (prima edizione americana Bentley, 1851, il titolo citato è quello definitivo della edizione londinese Harper & Brothers, 1851); sostituendo “watery” con “cosmological” e a prescindere dalle condizioni economiche, si può trovare una parte dello spirito motivante il personale viaggio metaforico rappresentato dal percorso di studi intrapreso e dal presente approfondimento; viaggio che si concluderà sempre metaforicamente nell'*Epilogo*

<i>Premessa</i>		5
I	SIGNIFICATO DEL TEMPO	
A	Panoramica sul tempo nella <i>scienza classica</i>	§ 1 11
B	Panoramica sul tempo agli inizi della <i>scienza moderna</i>	§ 2 29
	<i>Presentismo ed eternalismo</i>	§ 3 34
C	Asimmetria del tempo	
	Freccia del tempo	§ 4 38
	Tempo, termodinamica, evoluzione	§ 5 41
D	Ruolo del tempo nel <i>paradigma</i> di espansione dell'universo	
	Redshift	§ 6 47
	Interpretazione del redshift	§ 7 48
	Ipotesi sulle cause del redshift	§ 8 52
	Espansione dell'universo	§ 9 54
II	TEMPO E RELATIVITÀ RISTRETTA	
E	<i>Simultaneità</i> e presente oggettivo	§ 10 57
	<i>Simultaneità e relatività ristretta</i>	§ 11 58
	Congettura di Gödel sull'irrealtà del tempo	§ 12 63
	<i>Simultaneità</i> e meccanica quantistica	§ 13 65
F	Incompletezza della <i>relatività ristretta</i>	
	Postulato della velocità <i>unidirezionale</i> della luce	§ 14 73
	<i>Trasformazioni di ε-Lorentz</i>	§ 15 76
	<i>Trasformazioni di ξ-Lorentz</i>	§ 16 79
G	<i>Tempo specifico</i> nello spaziotempo di Minkowski	
	Legge di Hubble-Lemaître	§ 17 81
	Misura del tempo	§ 18 84
III	FUNZIONE DEL TEMPO SPECIFICO $\xi(t_0)$ ED EQUAZIONI DI FRIDMAN	
H	Funzione del <i>tempo specifico</i> e <i>fattore temporale di scala</i>	§ 19 93
I	Equazioni della dinamica cosmica	
	Equazioni di Fridman modificate	§ 20 96
	Approfondimento qualitativo su energia e parametri cosmologici	§ 21 99
	Nuovi modelli di universo, parametro di curvatura ζ	§ 22
<i>Conclusioni</i>	<i>epistemologiche</i>	107
	<i>sociologiche</i>	112
	<i>cosmologiche</i>	117
<i>Epilogo</i>		121
Allegati	A1 Epistemologia della ricerca scientifica	123
	A2 <i>La struttura delle rivoluzioni scientifiche</i> di Kuhn in nuce	132
	A3 Sulla causalità	137
	A4 Nuovo <i>eterε</i> e <i>congettura URD</i>	
	.1 Altre congetture sul redshift senza espansione	142
	.2 Nuovo <i>eterε</i> e radiazione MCR	144
	.3 Funzione di distribuzione dei fotoni	150
	.4 Equazioni <i>congettura URD</i>	153
	.5 Stima distanza sorgenti remote	164
	A5 Sui pregiudizi antropici	170
	A6 Unità di misura e parametri cosmologici di riferimento	176
Letteratura e fonti		177

Premessa

*Quanto dura un attimo?
Il tempo che si è disposti ad aspettare.⁴*

Gli intenti di questo approfondimento sul *tempo* sono in primis esplorarne il significato *ontologico*⁵ negli sviluppi storici che ne hanno accompagnato l'evoluzione interpretativa, quindi esaminarne alcune criticità teoriche proposte dalla recente letteratura e, con alcune tesi originali, analizzare delle spiegazioni alternative all'espansione dell'universo, che l'interpretazione corrente pretende osservata sperimentalmente, per mezzo di un modello basato sul *tempo specifico* dei fotoni alternativo al *tempo universale*⁶ e di un modello che consideri la presenza di una densità energetica nel *fluido cosmico* che interagisca con la radiazione incidente e determini un effetto di redshift nella lunghezza d'onda, quindi ancora un maggior tempo per la diffusione della radiazione stessa.

L'opportunità, se non la *necessità*, di sviluppare in questo approfondimento un quadro interpretativo affatto *altro* rispetto alle teorie evolutive basate sul *modello cosmologico standard*⁷ si basa sulla visione, condivisa, del filosofo Paul Karl Feyerabend (1924-1994) sulla necessità dello 'sviluppo anarchico' della scienza:

Questa libertà di azione [...] non è solo un *fatto* della storia della scienza. Esso è sia ragionevole sia *assolutamente necessario* per la crescita del sapere. Più specificamente, si può dimostrare

⁴ Spiegazione data ai propri figli quando da bambini hanno richiesto una *risposta precisa*

⁵ Il termine filosofico *ontologia* fu usato per la prima volta nel 17° secolo per designare la scienza dei caratteri universali dell'ente, corrispondente alla filosofia del più maturo Aristotele (384-322), chiamata poi metafisica, che si proponeva lo studio dell'ente in quanto ente. [adattato da enciclopedia Treccani online]

In epoca moderna, Martin Heidegger (1889-1976) fece dell'ontologia «uno dei cardini del suo ripensamento della tradizione filosofica occidentale: questa, privilegiando il senso dell'essere come “presenza”, cioè come tutto ciò che è stabile, visibile, dato, ha tematizzato gli enti concreti (l'*ontico*) a scapito di tutto ciò che, pur non essendo presente, concreto e visibile, è radicalmente diverso dagli enti (l'*ontologico*)» [enciclopedia Treccani online], corsivo aggiunto. Nel contesto del presente approfondimento, «*ontologico* significa ciò che concerne gli aspetti essenziali dell'essere, *ontico* ciò che riguarda l'ente concreto, empirico» [enciclopedia Treccani online]

⁶ Si conviene che il *tempo specifico* sia il tempo associato al viaggio dei fotoni tra sorgente e osservatore (definirlo 'tempo proprio' creerebbe ambiguità con il tempo associato agli orologi lungo la timeline di un evento che si usa considerare nella *relatività ristretta*); il *tempo universale* è invece inteso come tempo virtuale, utilizzato nelle metriche spaziotemporali e nei modelli cosmologici, o associato al clock dei moderni orologi quando riferito all'osservatore (reale o virtuale)

⁷ Il *principio cosmologico* sostiene che l'universo sia omogeneo e isotropo considerato a grande scala; questo limita in modo significativo le teorie cosmologiche possibili, attualmente focalizzate sul *modello cosmologico standard*, caratterizzato dalle seguenti assunzioni (le prime due non sono condivise e sono oggetto del presente approfondimento, le seconde due non sono analizzate nel presente approfondimento):

- «. The redshifts of the galaxies are due to the expansion of the Universe
- . The cosmic microwave background radiation and its anisotropies come from the high energy primordial Universe
- . The abundance pattern of the light elements is to be explained in terms of the primordial nucleosynthesis
- . The formation and evolution of galaxies can only be explained in terms of gravitation in the cold dark matter theory of an expanding Universe» [López-Corredoira, 2017] pag. 712

quanto segue: data una norma qualsiasi, per quanto “fondamentale” o “necessaria” essa sia per la scienza, ci sono sempre circostanze nelle quali è opportuno non solo ignorare la norma, ma adottare il suo opposto. [...]”⁸

La condizione della coerenza, la quale richiede che le nuove ipotesi siano in accordo con *teorie* accettate, è irragionevole, in quanto preserva la teoria anteriore, non la teoria migliore. Le ipotesi in contraddizione con le teorie ben affermate ci forniscono materiali di prova che non possono essere ottenuti in alcun altro modo. La proliferazione delle teorie è benefica per la scienza, mentre l’uniformità ne menoma il potere critico. L’uniformità danneggia anche il libero sviluppo dell’individuo.⁹

Un’altra significativa visione alternativa sulla ricerca e sul processo di scoperta è quella del geniale matematico Alexander Grothendieck (1928-2014):

Nella nostra conoscenza delle cose dell’Universo (che siano matematiche o meno), il nostro potere di innovazione non è altro che l’innocenza. È l’innocenza originale che tutti abbiamo ricevuto in sorte alla nascita e che riposa in ciascuno di noi, oggetto spesso del nostro disprezzo, e delle nostre paure più segrete. Essa sola riunisce in sé l’umiltà e l’audacia che ci fanno penetrare al cuore delle cose.¹⁰

Del *tempo specifico* è stata verificata la consistenza con lo spaziotempo¹¹ di Minkowski (1864-1909), con i principi della *relatività ristretta* di Albert Einstein (1879-1955) e con le equazioni della dinamica cosmica di Aleksandr Aleksandrovič Fridman (1888-1925)¹². Dimostrata la fallacia di questa ipotesi del *tempo specifico*, si è tratto come risultato positivo la non-necessità di postulare un tempo universale considerato che, definitone uno, se ne può dimostrare l’unicità o universalità (nei limiti dei modelli adottati).

A integrazione dell’approfondimento, sono state analizzate possibili cause del redshift¹³ alternative alle dinamiche espansive dell’universo e si è considerata l’ipotesi che l’universo stesso si comporti come un *corpo nero*¹⁴ emettendo una radiazione, identificata con la den-

⁸ [Feyerabend, 1975] edizione italiana pag. 21; nel merito si cita il pragmatico commento dell’eclettico musicista Frank Zappa (1940-1993) in una intervista (<https://www.youtube.com/watch?v=mOHCv-QO5HA> pagina visitata il 5/1/2025): «Well I think progress is not possible without deviation, and I think it’s important that people be aware of some of the creative ways in which some of their fellow men are deviating from the norm. In some instances they may find these deviations inspiring and might suggest further deviations which might cause progress. You never know.»

⁹ [Feyerabend, 1975] edizione italiana pag. 30; l’accento finale ha una portata di natura sociologica che sarà ripresa nelle *Conclusioni sociologiche*

¹⁰ Grothendieck in *Récoltes et semailles* (1986), citato in [Giorello et al., 2014] pag. 61-62

¹¹ Si adotta come Lee Smolin (1955-), cfr [Smolin, 2019], Roger Penrose (1931-), in [Penrose, 2004] edizione italiana pag. 449 e altri, la convenzione di scrivere “spaziotempo” e “spaziotemporale” senza trattino tra le due parole, per sottolineare l’unità della quadridimensionalità ed evitare ambiguità

¹² Nota generale: l’approfondimento degli argomenti scientifici è stato sviluppato sulla base delle competenze acquisite nel percorso di studi della laurea triennale, con esclusione quindi della *relatività generale* di Einstein, della quale sono presenti solo cenni

¹³ Il redshift z (spostamento verso il rosso della radiazione visibile, in generale aumento della lunghezza d’onda della radiazione stessa attribuito all’espansione dell’universo) secondo il *modello cosmologico standard* si può considerare conseguente all’effetto Doppler per la recessione della sorgente per valori di $z \ll 1$, oppure conseguente alla variazione del *fattore di scala* cosmologico (cfr § 19) per valori superiori

¹⁴ Il *corpo nero* è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione in esso incidente, senza rifletterla; per la conservazione dell’energia irradia tutta l’energia che riceve, con uno spettro caratteristico che dipende unica-

sità di energia U^* , che possa interagire con i fotoni delle sorgenti remote attenuandone l'energia e determinandone un redshift, dopo aver ricavato una sezione d'urto per i fotoni che consenta le interazioni fotone-fotone (*congettura $\gamma\gamma$*). A fondamento delle congetture sono state considerate le evidenze osservative dirette, non interpretate per mezzo di teorie¹⁵. Il modello adottato si basa su congetture non dimostrate ma si riporta l'intero approfondimento come Allegato A4 *Nuovo etere e congettura URD*, ritenendo che possa rappresentare un potenziale riferimento per futuri approfondimenti.

In una visione ampia, si osserva come le difficoltà interpretative conseguenti alle attuali teorie cosmologiche mettano in crisi l'aspetto *ontico* del tempo, un ente che spesso è stato, da un punto di vista scientifico (ma anche empirico, storicamente), limitato in modo semplicistico al clock di orologi vieppiù di maggior precisione; ma non ci si può accontentare di considerare *il tempo* ciò che viene misurato con un orologio. Come scrive Carlo Rovelli (1956-), non si perviene a una risposta esaustiva nemmeno grazie alle conoscenze contemporanee: «Il crescere del nostro sapere ha portato a un lento sfaldarsi della nozione di tempo. Quello che chiamiamo 'tempo' è una complessa *collezione* di strutture, di strati. Studiato via via più in profondità, il tempo ha perso questi strati.»¹⁶, fino alla sua scomparsa nelle equazioni della *gravità quantistica*¹⁷. La personale visione, riportata nelle *Conclusioni epistemologiche*, è similmente radicale.

Nella parte I, *Significato del tempo*, in una panoramica storica informale sul tempo nella scienza, classica e moderna, sono affrontate alcune interpretazioni epistemologiche¹⁸ di correnti di pensiero che hanno scosso sia le precedenti posizioni metafisiche¹⁹ sia quelle positiviste²⁰. Sono analizzate le posizioni filosofiche *presentiste* ed *eternaliste* rispetto al tempo stesso e alla *relatività ristretta* e, da un punto di vista scientifico, la sua asimmetria che sembra determinare un verso preferenziale di evoluzione. Nell'approfondimento del

mente dalla temperatura e non dalla sostanza che costituisce l'oggetto o dalla sua forma. La distribuzione della intensità di radiazione segue la legge di Planck (cfr sezione A4.3 *Funzione di distribuzione dei fotoni* e le leggi di distribuzione [A4.3-8] e [A4.3-9])

¹⁵ A parte l'emissione della radiazione termica di *corpo nero*, di consolidata e fondativa interpretazione

¹⁶ [Rovelli, 2017b] pag. 15

¹⁷ La teoria della *gravità quantistica*, riassunta da Rovelli in [Rovelli, 2008] e divulgata in [Rovelli, 2017a] non è a tutt'oggi una teoria completa, confermata da evidenze osservative

¹⁸ Il termine *epistemologia* fu coniato nel 1854 dal filosofo scozzese James Frederick Ferrier (1808-1864); nell'accezione corrente s'intende per epistemologia «l'indagine critica intorno alla struttura e ai metodi (osservazione, sperimentazione e inferenza) delle scienze, riguardo anche ai problemi del loro sviluppo e della loro interazione, sinonimo quindi di *filosofia della scienza*» [vocabolario Treccani online]. Nell'Allegato A1 *Epistemologia della ricerca scientifica* è riportata una personale panoramica storica di alcune correnti epistemologiche e di alcuni dibattiti, gnoseologici e scientifici, che le hanno alimentate

¹⁹ Per *posizioni metafisiche* si intendono le correnti filosofiche che si occupano «"delle cose prime", logicamente e ontologicamente collocate in rapporto fondante e subordinante rispetto alle altre scienze.» [enciclopedia Treccani online]

²⁰ Il *positivismo* è stato un orientamento filosofico (sorto in Francia nella prima metà del 1800) caratterizzato dal rifiuto della speculazione "metafisica" e dall'attribuzione alle scienze empiriche della funzione di fornire i contenuti e i metodi della conoscenza, riservando alla filosofia il compito di raccogliere, sistematizzare e generalizzare le leggi naturali scoperte dalle scienze, sulla base dell'esame obiettivo dei fatti empirici, con un conseguente atteggiamento empiristico e scientificistico [adattato da vocabolario Treccani online]

contesto generale è dato rilievo ai *paradigmi*²¹ della ricerca cosmologica, nel significato attribuito da Thomas Kuhn (1922-1996) che comprende il contesto sociale e psicologico, associati ad esempio all'interpretazione dell'espansione dell'universo a séguito della conferma di Edwin Hubble (1889-1953) delle velocità di recessione di alcune galassie o all'interpretazione *antirealista* della meccanica quantistica da parte di Niels Bohr (1885-1962) e discepoli, e alle conseguenti correnti di ricerca.

Nella parte II, *Tempo specifico e relatività ristretta*, sono approfonditi (da un punto di vista epistemologico) gli aspetti logici e di coerenza della *simultaneità*, nelle visioni *realiste* e *antirealiste*; in particolare la simultaneità è analizzata rispetto alla *relatività ristretta*, nelle criticità conseguenti all'impossibilità della verifica sperimentale della velocità *unidirezionale* della luce e all'incompatibilità della *relatività ristretta* con la *simultaneità assoluta*, che emerge dalla meccanica quantistica (paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen²²). È considerata la congettura di Kurt Gödel (1906-1978) sull'esistenza di un tempo cosmico universale.

È approfondita la *relatività ristretta modificata* da John Winnie²³, che intende superare il postulato di Einstein sulla velocità *unidirezionale* della luce. È infine analizzata la tesi originale che ipotizza l'espansione dell'universo, evidenziato dal redshift secondo le teorie correnti, come *effetto apparente* conseguente al *rallentamento* del tempo dei fotoni che giungono da distanze cosmiche. L'ipotesi considerata è l'esistenza di un *tempo specifico* t_s associato alle particelle, alternativo al *tempo universale* t_u ed espresso dalla relazione $t_s = \xi t_u$, con $\xi = 1 + z$, dove z è il redshift. Questo *tempo specifico* t_s è dimostrato coerente con la *relatività ristretta modificata* con velocità della luce potenzialmente non costante in un percorso *round-trip*, per mezzo di un algoritmo che traduce le *trasformazioni di ϵ -Lorentz* della relatività modificata da Winnie in *trasformazioni di ξ -Lorentz* associate al *tempo specifico*. L'analisi nello spaziotempo di Minkowski del *tempo specifico*, ipotizzato anche come *funzione* del *tempo universale*, $t_s = \xi(t_u)$, porta alla conclusione che esso debba essere uguale a t_u , pertanto un *tempo specifico* non può essere causa del redshift nello spaziotempo di Minkowski.

Nella parte III, *Funzione del tempo specifico ed equazioni di Fridman*, l'interpretazione del redshift legata al tempo, alternativa all'espansione cosmica, è analizzata per mezzo delle equazioni della dinamica cosmica, semplificate rispetto a quelle derivate dalla *relatività generale* (non approfondita) in quanto ottenute dalla gravitazione newtoniana, riscritte nei termini del *fattore temporale di scala*, una personale ridefinizione del *fattore (spaziale) di scala*, considerata in due diverse formulazioni; in questo contesto il *tempo specifico* è ipotizzato come funzione del *tempo universale*, $t_s = \xi(t_u)$. Le possibili soluzioni alle equazioni differenziali modificate della dinamica cosmica determinano nuovi modelli di universo;

²¹ *Paradigma* è scritto in corsivo perché inteso nel significato dato da Kuhn (cfr Allegato A2, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* in nuce, [Kuhn, 1962] e [Kuhn, 1997]); nelle citazioni è sempre riportato come nell'originale; 'modernamente' si intende (discutibilmente) semplice sinonimo di 'teoria' o 'modello'

²² Boris Podolsky (1896-1966), Nathan Rosen (1909-1995), [EPR, 1935]

²³ John Winnie, University of Hawaii, non reperito l'anno di nascita, il suo paper [Winnie, 1970] è stato presentato nel 1968

l'analisi di queste soluzioni per le diverse possibili curvature della metrica spaziotemporale di Robertson-Walker²⁴ (modificata) individua alcune violazioni alle definizioni e alle condizioni di esistenza dello stesso *tempo specifico*, per le quali si conclude che questo non possa esistere. Pertanto risulta falso ipotizzare che il tempo non sia universale anche con queste metriche spaziotemporali, oltre che nello spaziotempo di Minkowski, da cui consegue la non necessità di postularlo come attualmente fa (indirettamente) il *principio cosmologico*.

Nell'allegato A4 *Nuovo etere e congettura URD* è sviluppato un modello interpretativo alternativo al *modello cosmologico standard*. Le congetture considerate a supporto non consentono di giustificare pienamente tale modello ma rappresentano comunque una base di sviluppo che può essere oggetto di ulteriori approfondimenti. Riassumendo, è analizzata la cosiddetta *congettura URD*, che ipotizza l'esistenza di un *fluido* cosmico nell'*etere*²⁵ rappresentato da una densità diffusa di energia U^* costituita da particelle, campi ed energia emessi dalle sorgenti e dall'universo stesso inteso come *corpo nero*, che interagisca con i fotoni delle sorgenti remote (sulla base della *congettura $\gamma\gamma$ sulle interazioni fotone-fotone*) determinando un effetto di assorbimento e di redshift; i parametri associati a queste interazioni possono essere utilizzati per stimare la distanza delle sorgenti.

Per orientarsi nello sviluppo di ipotesi e congetture, è opportuno uno schema riassuntivo:

<i>circostanze redshift</i>	<i>espansione universo</i>	<i>ipotesi causa redshift</i>	<i>congetture</i>	<i>ok</i>
[η]	sì	recessione sorgenti	legge di Hubble-Lemaître	?
		[a] rallentamento <i>tempo specifico</i>	[1] $t_s = \xi t_u$ [2] $t_s = \xi(t_u)$	no no
[σ]	no	[b] interazioni gravitazionali		no
		[c] interazioni fluido cosmico	URD $\gamma\gamma$ α_{U^*}	? !

Alcune riflessioni personali finali riassumono i temi principali approfonditi, i risultati dimostrati e i loro limiti, riportate separatamente come *Conclusioni epistemologiche*, *Conclusioni sociologiche* e *Conclusioni cosmologiche*.²⁶

²⁴ Howard Robertson (1903-1961), Arthur Walker (1909-2001)

²⁵ Di questo *nuovo etere*, chiamato *etere* per distinguerlo dai precedenti, in sostanza un *campo*, si ricostruisce con una ricerca quasi filologica una paternità direttamente ascrivibile ad Albert Einstein

²⁶ Per come è costruito l'approfondimento, dopo questa *Premessa* potrebbero essere lette direttamente subito le *Conclusioni*, quindi *prima* del resto dell'approfondimento, che si può considerare come lettura *a supporto* oltre che dimostrativa, evitando quindi alcune 'passeggiate teleologiche', seppur guidate da un coerente finalismo

I **SIGNIFICATO DEL TEMPO**

A § 1 **Panoramica sul tempo nella scienza classica**

*Io stimo più il trovar un vero, benché di cosa leggiera,
che 'l disputar lungamente delle massime questioni
senza conseguir verità nissuna.*
Galileo Galilei²⁷

*Neque enim leges intellectui aut rebus damus ab arbitrium nostrum,
sed tanquam scribes fideles ab ipsius naturae voce
latas et prolatas ecipimus et describimus*
Georg Cantor²⁸

In questa introduzione si vogliono evidenziare alcuni aspetti storicamente rilevanti sul *tempo* nella ricerca scientifica e filosofica, rinviando all'Allegato A1 per una personale analisi più strutturata dell'*epistemologia della ricerca scientifica*.

Il tempo è stato da sempre una sorta di *misura* dell'esistenza umana. «Nelle culture pagane l'idea del tempo fu fortemente influenzata dalle osservazioni dell'ambiente. Il continuo ripetersi di fenomeni naturali suggerì l'idea della sua ciclicità»²⁹: i giorni, i mesi e le stagioni, ma anche i fenomeni astronomici, davano un ritmo ciclico che trovava corrispondenza nelle maree e nel ciclo di fertilità delle donne, influenzandone l'interpretazione come intimamente legata alla Natura ma anche alla percezione personale.

Prima del periodo d'oro ellenico, come testimoniato da un numero «congruo e significativo di tavolette di contenuto esclusivamente matematico [che] risale a un'età molto più antica, compresa tra il 1800 e il 1600 a.C.»³⁰, prima della 'astronomia scientifica' babilonese, lo studio dei fenomeni celesti era di tipo matematico, come sottolinea Paolo Zellini (1946-):

I babilonesi erano tipicamente interessati ai fenomeni del sorgere e tramontare della Luna, come dei pianeti e delle costellazioni. La rappresentazione di questi eventi, così legati all'esperienza visiva, era affidata tuttavia non tanto alle immagini, quanto all'elaborazione arida e astratta dei dati numerici che servivano a definirli e a prevederli. Solo con l'avvento dell'astronomia greca e

²⁷ Galileo Galilei (1564-1642) in *Scritti letterari* a cura di Alberto Chiari (Felice Le Monnier, Firenze 1943) pag. 360; un pensiero che ne caratterizza la filosofia sperimentale, indirizzato "Al padre Campanella", il filosofo Tommaso Campanella (1568-1639), ammiratore di Galilei

²⁸ Georg Cantor (1845-1918), «Non inventiamo ad arbitrio le leggi del pensiero e del mondo, ma le riceviamo, come scribi fedeli, trasmesse dalla voce della natura», motto latino premesso a una delle ultime pubblicazioni di Cantor, tradotto in [Zellini, 1980] pag. 214

²⁹ Pippo Battaglia (1947-) in [Battaglia, 2005] pag. 63

³⁰ [Zellini, 1999] pag. 109-110; la seguente citazione è a pag. 112, 113; la fonte citata è Otto Neugebauer (1899-1990), in *A History of Ancient Mathematical Astronomy* e in *The Exact Sciences in Antiquity*

con la ricerca i modelli geometrici e cinematici, ha osservato Neugebauer, il fenomeno del primo apparire, come altri fenomeni cruciali quali l'opposizione, la congiunzione o i momenti di passaggio dal moto diretto a quello retrogrado [dei pianeti], persero gradualmente il loro interesse primario, assieme alla loro aura di prodigio, acquistando una fisionomia di semplici eventi occorrenti per valori astratti di una «variabile tempo». Sarebbe allora prevalsa l'immagine complessiva di un universo geometrico, di contro al precedente modello numerico costruito per la previsione di quei singoli e portentosi fenomeni dell'apparire e del tramontare che si mostravano sulla linea dell'orizzonte.³¹

Nell'interpretazione di Aristotele il tempo era associato al movimento e al cambiamento, era la *misura* del cambiamento:

Quando, dunque, percepiamo l'ora come uno, e non come anteriore e posteriore nel movimento o come il medesimo ma con qualcosa di anteriore e posteriore, non sembra che sia passato alcun tempo, poiché 'non sembra che si sia verificato' alcun movimento. Quando, invece, 'percepiamo' l'anteriore e posteriore, allora parliamo di tempo. Questo, infatti, è il tempo: numero del movimento secondo l'anteriore e il posteriore.³²

Una misura che «Plotino³³ [...] interpretava non nel senso di una misura compiuta a posteriori, bensì come una misura che definisce il movimento stesso.»³⁴ Anche se fu Eudosso di Cnido (408-355 o 353) «il primo a definire il tempo come "grandezza" e ad attribuirgli le proprietà del continuo»³⁵, pochi decenni dopo Aristotele si mostra più profondo e più cauto:

Riferendosi quindi al moto uniforme di un punto su una linea, egli afferma che il tempo non è la *somma* degli istanti, se questi sono definiti da generico punto immateriale che, muovendosi, divide il passato dal futuro, ma piuttosto della grandezza percorsa dal punto materiale, punto che rimane invariato nel moto. La definizione di tempo viene quindi ad appoggiarsi a quella di un oggetto empirico (il punto materiale) e della sequenza delle sue posizioni. La persistenza di un oggetto attraverso il fluire del tempo divenne così un assunto fondamentale per la nozione di tempo, contro l'opinione dei Sofisti che affermavano il contrario.

In sostanza Aristotele precisa:

che il tempo è una grandezza che noi enumeriamo (*quod enumeratur*) e non una realtà con una metrica intrinseca come lo spazio (*quod numeramus*) e, nell'ultimo capitolo [di *Fisica*, IV], egli arriva così a concludere che solo il moto possiede una realtà *per sé*, mentre il tempo, quale *mensura motus*, non esisterebbe se non esistesse l'anima e l'intelletto.

Il ruolo del soggetto nella valutazione del tempo fu poi ripreso da Agostino d'Ippona (354-430), che «cercherà, infatti, il principio della continuità del tempo non nell'istante, ma

³¹ «Quello che può apparire come il più arido elenco di cifre è in realtà la prova di un possibile ruolo di decifrazione 'razionale', da parte della matematica antica, di ciò che Heidegger chiamava 'essere'», osservazione di [Zellini, 1999] a pag. 119

³² Aristotele, *Fisica*, IV, 219a1 30-219b1; questa visione è ancora viva nell'800, se si legge «Non siamo in grado di *misurare* i mutamenti delle cose rapportandoli al *tempo*. Al contrario il tempo è un'astrazione, alla quale arriviamo proprio attraverso la constatazione del mutamento, grazie al fatto che per la dipendenza reciproca delle cose non siamo costretti a servirci di una *determinata* misura.» in [Mach, 1883] edizione italiana pag. 241; questa visione e quella di Aristotele verranno riprese nelle *Conclusioni epistemologiche*

³³ Plotino (circa 203-270)

³⁴ [Horn, 1995] edizione italiana pag. 99

³⁵ [Ronchi, 2010] pag. 146-147, anche per le seguenti tre citazioni

nell'identità del soggetto che rappresenta a sé stesso il tempo»³⁶.

A proposito della simultaneità, Max Jammer (1915-2010) ha osservato:

whether it is intended to serve as a definition, Aristotle's statement that temporal simultaneity means 'being in the same now' has no operational content. It does not tell us how to find out, or how to verify, whether spatially separated occurrences happen in the same 'now'.³⁷

La visione di Aristotele sul tempo è ripresa da Tito Lucrezio Caro (circa 110-55):

Tempus item per se non est, sed rebus ab ipsis consequitur sensus, transactum quid sit in aevo, tum quae res instet, quid porro deinde sequatur. Nec per se quemquam tempus sentire fatendumst semotum ab rerum motu placidaque quiete.³⁸

Analoga ad Aristotele, per il tempo 'lontano' dalla Terra, misura del movimento, la posizione di Giordano Bruno (1548-1600), che si differenzia però sulla visione dei 'corpi semplici' aristotelici, composti dai quattro elementi elementari di Empedocle (V secolo a.e.v.³⁹) più l'etere che costituivano i pianeti che si muovevano di moto circolare, riempiendo l'universo (infinito) di *vacuo*:

Non vi è tempo; perché il tempo è numero di moto; il moto non è se non di corpo; però dove non è corpo, non è moto, non v'è numero, né misura di moto; dove non è questa, non è tempo.⁴⁰

Per la tradizione giudaico cristiana il tempo era legato a un processo storico (un inizio nella *creazione* e una fine nell'*apocalisse*), quindi soggetto a una interpretazione *lineare* che implica la *freccia del tempo*⁴¹ e

le conseguenze [...] si riflettono nella concezione della storia. Gli avvenimenti e le persone assumono la prerogativa dell'irripetibilità e dell'unicità. L'idea biblica di un tempo lineare [...] ha mutato la visione della vita rendendola un *unicum* assoluto nonché ha fatto divenire l'eternità una peculiarità di luoghi metafisici, il paradiso e l'inferno.⁴²

Una percezione non ciclica della nostra vita mortale è poeticamente espressa da Shakespeare nel famoso verso: «We are such stuff as dreams are made on; and our little life is rounded with a sleep.»⁴³

Invece «in Cina coesistevano la concezione del tempo ciclico e lineare. Nell'antico libro *I*

³⁶ Cfr [Agostino, 401] XI, 28-36 pag. 595

³⁷ [Jammer 2006] pag. 41

³⁸ Dal *De Rerum Natura*, Libro I, 459-463; «Invece il tempo non esiste di per sé. Sono i corpi e la loro posizione nello spazio a dare senso a quanto è successo in passato, succede nel presente e succederà nel futuro. E non si può percepire il tempo di per sé, indipendentemente dalla quiete o dal moto dei corpi.» Traduzione di Piergiorgio Odifreddi (1950-) in [Odifreddi, 2013] pag. 45

³⁹ a.e.v. è acronimo di ante era volgare, ovvero prima di 2025 anni fa, senza riferimenti a una particolare religione

⁴⁰ [Bruno, 1548b], edizione Enigma pag. 165

⁴¹ «L'espressione "freccia del tempo" si deve a Arthur Eddington [1882-1944] in *The Nature of the Physical World* [nel quale egli] prevede che il futuro potrebbe vedere la fine della preminenza in fisica delle leggi "primarie" (deterministiche) a vantaggio delle leggi "secondarie" (statistiche, e che danno senso all'irreversibilità termodinamica).» [Prigogine e Stengers, 1988] edizione italiana pag. 214; Ilya Prigogine (1917-2003), Isabelle Stengers (1949-)

⁴² [Battaglia, 2005] pag. 66

⁴³ William Shakespeare (1564-1616), *La tempesta*, Atto IV, 156

Ching sono descritti i due modelli antitetici dell'idea di tempo.».⁴⁴ In genere le dottrine mistiche orientali non davano e non danno importanza alla 'materializzazione' di spazio e tempo, che rappresentano solo parole di uso comune, non entità dal significato fisico indipendente. Le ragioni sono evidenziate da Fritjof Capra (1939-):

Come i fisici moderni, i Buddhisti vedono tutti gli oggetti come processi in un flusso universale e negano l'esistenza di qualsiasi sostanza materiale. Questa negazione è uno dei tratti più caratteristici di tutte le scuole di filosofia buddhista. Essa è anche tipica del pensiero cinese, che ha elaborato una concezione analoga delle cose, intese come stadi transitori nel *Tao* in perenne fluire, ed era interessato alle interrelazioni fra le cose piuttosto che alla loro riduzione a una sostanza fondamentale. «Mentre la filosofia europea tendeva a trovare la realtà nella sostanza, [...] la filosofia cinese tendeva a trovarla nella relazione.».⁴⁵

Non era dissimile la posizione di Ernst Mach (1838-1916), che nel confronto tra somiglianza (relazione che sussiste tra due oggetti fisici) e analogia (relazione fra due concetti), afferma che essi siano «i motivi guida della ricerca»⁴⁶:

Concepire analogie si rivela per Mach di fondamentale ausilio nell'indagine scientifica soprattutto quando non è presente una solida base empirica: in tal caso, la fantasia può supplire alle rappresentazioni mancanti fornite dai dati sensibili. [...] la componente di fantasia presente nell'attività scientifica si esplica in maniera esemplare nell'esperimento mentale. [...] Somiglianza e analogia imprimono perciò un impulso alla scoperta scientifica, alla quale si giunge partendo dalla formulazione d'ipotesi e in tale fase l'uomo di scienza non deve provare vergogna nell'ammettere di avvalersi anche della fantasia per integrare la rappresentazione dei fatti soltanto parzialmente compresi.⁴⁷

In sintonia con il pensiero di Einstein «la più bella sensazione è il lato misterioso della vita. È il sentimento profondo che si trova sempre nella culla dell'arte e della scienza pura»⁴⁸, una nota di Rovelli sottolinea l'importanza dell'atteggiamento, si potrebbe forse dire emotivo, se non culturale, che porta al progresso della conoscenza:

L'Occidente ha saputo usare efficacemente la creatività del pensiero analogico, per costruire concetti nuovi a ogni generazione, fino a lasciare in eredità all'odierna civiltà globale la magnificenza del pensiero scientifico. Ma è l'Oriente che ha riconosciuto prima e con più chiarezza che il pensiero cresce per analogie, non per sillogismi. [...] Il pensiero scientifico fa buon uso della rigidità della logica e matematica, ma questa è solo una delle due gambe che l'hanno portato al successo: l'altra è la creatività liberata dall'evoluzione continua della sua struttura concettuale, e *questa* si nutre di analogie e ricombinazioni.⁴⁹

Il fluire del tempo è stato coinvolto nell'analisi dell'infinito e degli infinitesimi, in

⁴⁴ [Battaglia, 2005] pag. 63

⁴⁵ [Capra, 1975] edizione italiana pag. 236-237, la citazione nella citazione è di Joseph Needham, *Science and civilization in China* (Cambridge University Press, Cambridge 1956), nella traduzione italiana (Einaudi, Torino, 1982)

⁴⁶ [Teghil, 2016] pag. 38-39, che cita Mach in *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung* (Leipzig, 1905), edizione italiana *Conoscenza ed errore. Abbozzo per una psicologia della ricerca* (Einaudi, 1982)

⁴⁷ [Teghil, 2016] pag. 45-47

⁴⁸ [Einstein, 1934] edizione italiana pag. 22

⁴⁹ [Rovelli, 2023] pag. 57-58; corsivo originale

particolare

l'esposizione di Spinoza [Baruch Spinoza, 1632-1677] e quella di Hegel [Georg Wilhelm Friedrich Hegel, 1770-1831]⁵⁰ già affermano quell'esigenza di staticità che deve soddisfare l'infinito per cessare di esistere come puro sinonimo del divenire temporale. Forse Leibniz [Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716)], pur credendo nell'infinito attuale, non aveva altrettanto insistito su questo punto. È pur vero che l'infinito potenziale trova nelle serie una naturale conclusione nel finito e quindi in qualcosa di fermo e statico, ma l'insistenza di Leibniz è tutta sul movimento, sull'istante della sua germinazione: il differenziale, commentò G. Milhaud [Gaston Milhaud (1858-1918)], non è altro che il «momento infinitesimale di ogni divenire»⁵¹, e il finito è l'atto finale di una generazione dinamica dominata dal tempo.⁵²

Questa visione interpretativa fu in séguito superata «nel periodo dell'800 che fu caratterizzato dall'invenzione di un linguaggio matematico che dell'infinito intese formare una totalità attuale e statica, non governata dal divenire temporale»; il riferimento è al linguaggio della «teoria degli insiemi che intese giustificare, accanto all'infinito potenziale o sincategorematico⁵³ delle successioni infinite, l'infinità attuale di tutti i sottoinsiemi di tali successioni come collezione chiusa di oggetti esistenti di per se stessi»⁵⁴.

In questa linea di pensiero, Cantor definì la priorità dell'idea del continuo rispetto alla nozione di tempo (delineando la crisi dell'apriorismo kantiano):

Debbo dichiarare innanzitutto che a mio avviso l'introduzione della nozione di tempo e dell'idea di tempo non deve servire a spiegare la nozione molto più primitiva e generale del continuo; il tempo, a mio avviso, è un'idea che presuppone, per essere chiaramente spiegata, la nozione di continuità, indipendente da quella del tempo, e che anche con tale nozione di continuità non può essere concepito né oggettivamente come sostanza né soggettivamente come un'idea necessaria a priori; quest'idea di tempo non è che un'idea ausiliaria e relativa, utile a stabilire il rapporto tra i diversi movimenti che hanno luogo nella natura e che noi percepiamo. Così nulla si presenta mai nella natura che assomigli al tempo oggettivo o assoluto, e di conseguenza non si può assumere il tempo come misura del movimento, ma al contrario si potrebbe considerare il movimento come misura del tempo, se non si fosse impediti dal fatto di non aver guadagnato nulla a considerare il tempo come un'idea soggettiva necessaria a priori.⁵⁵

Contro Kant era schierato anche il matematico positivista Hans Hahn (1879-1934), che in un saggio degli anni '20, *The crisis in Intuition*, scrisse: «It is not true, as Kant urged, that intuition is a pure a priori means of knowledge, but rather that it is a force of habit rooted in psychological inertia.»⁵⁶

⁵⁰ Rispettivamente in *XII Lettera* e in *Scienza della logica*

⁵¹ Citato da L. Brunschvicg in *Les étapes de la Philosophie mathématique* (Paris, 1929) pag. 209

⁵² [Zellini, 1980] pag. 187-188

⁵³ Nella logica formale, si dice sincategorematico di termine che preso isolatamente non ha un significato suo proprio ma lo acquista solo in unione ad altri termini, detti categorematici (cioè tali che di per sé significano qualcosa), e agisce sul significato di questi ultimi dando luogo a una nuova espressione [enciclopedia Treccani online]

⁵⁴ [Zellini, 1980] pag. 197 per le due frasi citate; il concetto è citato in [Weyl, 1927] edizione italiana pag. 46; Hermann Weyl (1885-1955)

⁵⁵ [Zellini, 1980] pag. 199, traduzione da *Fondements d'une théorie générale des ensembles*, Georg Cantor in *Acta Mathematica*, Tome 2, 1883, pag. 403 royalty free edition; sulla continuità, Zellini ha pubblicato anche il saggio *Discreto e continuo. Storia di un errore* [Zellini, 2022]

⁵⁶ Citato in [Yourgrau, 2005] pag. 50

È interessante la posizione di Weyl sugli enti invarianti, che implicano l'esistenza di una mutabilità temporale alla quale fa fronte

[...] il compito della matematica, ma anche della fisica e della geometria, [ovvero] quello di render conto di quel certo grado di variazione nella configurazione sia dei processi matematici che dei fenomeni [identificando] gli aspetti di tali configurazioni che nella variazione rimangono inalterati, gli invarianti; [...] tale invarianza rende la variabilità descrivibile e rappresentabile attraverso simboli, preservandola dalle variazioni nell'arco temporale. [...] La conoscenza scientifica può confrontarsi con la realtà, sebbene sotto un profilo esclusivamente problematico, solo attraverso la mediazione di simboli.⁵⁷

In epoca moderna, Heidegger ha legato il tempo indissolubilmente all'essere:

Se la temporalità costituisce il senso d'essere originario dell'esserci, [...] allora la cura⁵⁸ ha per forza bisogno 'di tempo' e quindi di tener conto 'del tempo'. La temporalità dell'esserci dà luogo al 'calcolo del tempo'. [...] Il progetto di un senso dell'essere in assoluto può compiersi nell'orizzonte del tempo.⁵⁹

Un originale precursore dei più famosi astronomi dell'era moderna fu Nicola Cusano⁶⁰ (1401-1464), filosofo e matematico che con il suo *De docta ignorantia* (pubblicato nel 1440) si oppose alla concezione aristotelica con il suo principio dell'ignoranza dotta, ovvero il desiderio dell'intelletto di conoscere una verità indiscutibile. Secondo Cusano

la nostra mente non può conoscere Dio perché Egli è infinitamente lontano da ogni ente conosciuto e quindi non è possibile stabilire alcuna proporzione tra questo essere e le cose conosciute. [...] Ci si può avvicinare alla natura di Dio servendosi della congettura, cioè di un processo basato sull'ipotesi e sulla similitudine. [...] Allora Dio non lo si può mai conoscere, come succede in matematica, ove non vi è nessun rapporto tra l'infinito e il finito⁶¹.

Cusano ha un «concetto totalizzante di infinito» e «paragona Dio e anche l'universo ad un cerchio il cui centro è dappertutto e la circonferenza in nessun luogo, un concetto quanto mai moderno e attuale»⁶².

⁵⁷ [Weyl, 2011] dalla introduzione di Marta Perego (1981-), pag. 35; la funzione dell'intuizione, caratterizzata dalla limitatezza delle sequenze di intuizioni che non possono essere infinite, portò Weyl ad allontanarsi dalla fenomenologia di Edmund Husserl (1859-1938) e a considerare «ogni stadio della sequenza infinita così originata (stadio che ci è dato come scelta di tale sequenza, coerente con la legge d'origine), [come raffigurazione di] un modo di un infinito "divenire" connesso alla natura della legge, non la specificità di un oggetto.» [Weyl, 2011] dalla introduzione di Marta Perego, pag. 21-22; per fenomenologia si intende oggi «l'indirizzo filosofico [...] che, mettendo fra parentesi l'esistenza del mondo, lo riduce a un insieme di fenomeni che si danno alla coscienza e possono essere colti nella loro 'essenza' logica, universale e necessaria. Per Heidegger, allievo di Husserl, fenomenologia significa così "lasciar vedere in sé stesso ciò che si manifesta", liberandolo dall'occultamento in cui rischiano di farlo cadere i nostri pregiudizi.» [da enciclopedia Treccani online]

⁵⁸ Secondo la visione di Heidegger, la cura è una condizione che accompagna la vicenda esistenziale dell'uomo, è il suo modo di essere nel mondo e col quale definisce relazioni con sé stesso, con gli altri e con la Natura; può significare sollevare gli altri dalle cure, rendendoli così *dominati*, oppure prendersi cura di loro, aiutandoli a essere *liberi*. [Heidegger, 1926] edizione italiana pag. 179 e capitolo 26, passim

⁵⁹ [Heidegger, 1926] edizione italiana pag. 332-333

⁶⁰ Nome latinizzato di Nikolaus Krebs (o Kryffs), di origini germaniche

⁶¹ [Romano, 2010] pag. 55; Giuliano Romano (1923-2013)

⁶² [Romano, 2010] pag. 57, che cita *De docta ignorantia* I,1, § 3: «L'infinito, in quanto infinito, poiché sfugge ad ogni proporzione, ci è ignoto»; riconoscere l'esistenza degli enti solo in quanto esprimibili in termini proporzionali era una posizione dei geometri greci ellenistici (oltre che conseguenza della necessità delle costru-

È interessante l'estensione di questo concetto di conoscibilità al finito, una sorta di anticipazione filosofica del *principio di indeterminazione* di Heisenberg⁶³ (oltre che dell'incertezza nelle misurazioni di grandezze):

anche nel finito è impossibile ogni conoscenza precisa, o una verità assoluta. La conoscenza, infatti, è il risultato di un confronto. Poiché non si può conoscere se non ponendo in relazione una cosa con un'altra, ricordiamo che ogni relazione non è che approssimativa, poiché di due cose simili se ne possono pensare altre ancora più simili, e così via. Pertanto, stando così le cose, l'essenza della verità è irraggiungibile. I risultati delle misure quindi non possono che essere approssimati; nell'universo vi è dunque l'assenza di una precisione assoluta.⁶⁴

Come osserva Zellini in un suo saggio, «Nell'antichità i concetti matematici - tanto straordinario e abbagliante doveva risultare il loro potere di collegare le cose e di rendere uguale il diverso - erano stati pensati come un *logos* divino. Gli uomini se ne impossessarono solo al prezzo di una trasgressione (di cui racconta il mito di Prometeo) e della conseguente inevitabile difficoltà di discriminare e di cogliere l'esatto valore delle misure.»⁶⁵

Altre interessanti congetture di Cusano sono che la Terra non può essere al centro dell'universo (*machina mundi*) essendo questo in nessun luogo e non può essere ferma perché non c'è un riferimento rispetto al quale dovrebbe essere ferma, che la posizione di un qualunque corpo è sempre relativa al punto di osservazione, che la mancanza di un punto fisso implica che le orbite dei corpi celesti non possano essere perfettamente circolari e che l'universo sia omogeneo e isotropo.⁶⁶

Merita di essere ricordato anche Geminiano Montanari (1633-1687), che operò a Padova ed è ritratto, con un cannocchiale in mano come Galilei, in un affresco della Sala delle Figure⁶⁷ alla Specola patavina; un astronomo dei primi passi dell'astronomia osservativa moderna fermo oppositore delle credenze astrologiche⁶⁸, non condannate nemmeno da Galilei che anzi nel corso della propria vita le utilizzò per finanziarsi producendo oroscopi sia a scopo economico sia a scopo politico, per blandire i potenti con previsioni positive⁶⁹.

Nell'epoca delle prime scoperte e teorie cosmologiche moderne, dopo Niccolò Copernico

zioni solo per mezzo di riga e compasso), fu Cartesio (René Descartes, 1596-1650) con l'invenzione della matematica analitica a superare i limiti di queste costruzioni geometriche, anche se si dovette attendere le teorie dei limiti di Leibnitz e la sistematizzazione del calcolo differenziale e integrale di Isaac Newton (1643-1727) per sperimentarne davvero le potenzialità

⁶³ Werner Heisenberg (1901-1976)

⁶⁴ [Romano, 2010] pag. 57

⁶⁵ [Zellini, 1999] pag. 475-476; corsivo originale; una sorta di anticipazione nel mito antico del principio di indeterminazione di Heisenberg

⁶⁶ [Romano, 2010] pag. 58-59 passim, il quale evidenzia che si tratta di interpretazioni puramente filosofiche e non sperimentali, ovvero non supportate da osservazioni astronomiche nemmeno approssimate

⁶⁷ La Sala delle Figure si trova alla sommità della torre della Specola e raccoglie ritratti a grandezza naturale di scienziati del tempo nel campo dell'astronomia e della meteorologia, realizzati dal pittore Giacomo Ciesa nel 1773

⁶⁸ Montanari ad esempio pubblicò nel 1685, oltre a varie originali opere scientifiche: *Astrologia convinta di falso col mezzo di nuove esperienze e ragioni fisico-astronomiche, o' sia La caccia del frugnuolo*

⁶⁹ Galileo però non ci credeva, come confessò ad esempio a Tommaso Campanella nel 1630, inoltre ovviamente non le indovinava sempre... «calcolò, ad esempio, l'oroscopo del granduca di Toscana Ferdinando I su richiesta della moglie. Sembra che fosse molto favorevole. [Però] il nobile signore morì due settimane dopo!»; da <https://www.astronomia.com/progetti/locchio-infinito-di-galileo/chi-era-galileo-galilei/galileo-astrologo> consultato il 16 gennaio 2025

(1473-1543), Johannes Kepler (1571-1630), Galileo Galilei e naturalmente Isaac Newton, si sviluppò il metodo scientifico ovvero l'interpretazione della Natura in relazione ai fenomeni realmente osservati e misurati. Fu anche grazie a un atteggiamento filosofico le cui radici risalgono a Talete di Mileto (circa 640-circa 548) e alle prime scuole che superarono le diffuse superstizioni, come ricorda Erwin Schrödinger (1887-1961) in un saggio sugli antichi greci:

La grande idea che animò questi uomini [gli Ioni] era che il mondo intorno a essi *potesse essere compreso* da chi si desse la pena di osservarlo nel modo dovuto; che esso non fosse la scena delle azioni più o meno arbitrarie di dèi, fantasmi e spiriti in preda agli impulsi del momento [...]. Quegli uomini [...] si liberarono da ogni superstizione. Essi consideravano il mondo come un meccanismo piuttosto complicato, che agiva in base a leggi intrinseche esterne, ed erano curiosi di scoprirle. Questo è senza dubbio l'atteggiamento fondamentale della scienza, che si è protratto fino ai giorni nostri.⁷⁰

La conoscenza razionale basata su osservazioni ed esperimenti si è sempre scontrata con le *verità rivelate* imposte 'ex cathedra' dalle autorità religiose, in particolare quella cattolica, che soprattutto nel periodo dei secoli più bui dell'inquisizione non si fece problemi a trucidare i liberi pensatori, pericolosi per il loro primato di conoscenza. Si ricorda ad esempio come nel 1600 il visionario Bruno sia stato condannato a morte sul rogo a Roma in Campo de' Fiori per le sue esplicite posizioni critiche verso la chiesa di Roma, in particolare con i suoi *De la causa, principio et uno*, il cui pensiero è fatto esprimere da Teofilo nel Dialogo quinto:

È dunque l'universo uno, infinito, immobile. Una, dico, è la possibilità assoluta, uno l'atto, una la forma o anima, una la materia o corpo, una la cosa, uno lo ente, uno il massimo ed ottimo; il quale non deve poter essere compreso; e però infinibile e interminabile, e per tanto infinito e interminato, e per conseguenza immobile. Questo non si muove localmente, perché non ha cosa fuor di sé ove si trasporte, atteso che sia il tutto. Non si genera; perché non è altro essere, che lui possa desiderare o aspettare, atteso che abbia tutto lo essere. Non si corrompe; perché non è altra cosa in cui si cange, atteso che lui sia ogni cosa. Non può sminuire o crescere, atteso che è infinito; a cui come non si può aggiungere, così è da cui non si può sottrarre, per ciò che lo infinito non ha parte proporzionabili.⁷¹

e *De l'infinito, universo e mondi*, con le parole di Filoteo nel Dialogo primo, in un confronto dell'infinità dell'universo con l'infinità di Dio:

Io dico l'universo tutto infinito, perché non ha margine, termino, né superficie; dico l'universo non essere totalmente infinito, perché ciascuna parte che di quello possiamo prendere, è finita, e de mondi innumerabili che contiene, ciascuno è finito. Io dico Dio tutto infinito, perché da sé esclude ogni termine ed ogni suo attributo è uno ed infinito; e dico Dio totalmente infinito, perché tutto lui è in tutto il mondo, ed in ciascuna sua parte infinitamente e totalmente: al contrario dell'infinità de l'universo, la quale è totalmente in tutto, e non in queste parti (se pur,

⁷⁰ [Schrödinger, 1958] edizione italiana pag. 212; si osserva come i "giorni nostri" di Schrödinger fossero 70 anni fa; ai 'giorni nostri attuali', invece, la scienza sembra piuttosto orientata ad andare oltre l'osservazione, basandosi su teorie indimostrate o indimostrabili! Cfr le *Conclusioni sociologiche*

⁷¹ [Bruno, 1548a], edizione ebook pag. 60

referendosi all'infinito, possono esser chiamate parti) che noi possiamo comprendere in quello.⁷²

Considerando l'uomo partecipe della Natura infinita, ne viene trasferita l'innata tensione verso la tradizionale concezione cristiana di propensione dell'anima verso 'Dio creatore' a un piano naturalistico-immanente, rendendo l'intermediazione della chiesa e del sacrificio di Cristo superflui, ferma posizione di Bruno che l'inquisizione valutò esiziale.

Per concludere, possiamo dire che Bruno è il primo ad elaborare una teoria cosmologica moderna fondata sull'eliocentrismo copernicano e sostenuta dall'idea che l'universo è infinito e che è il primo a dare una nuova collocazione all'uomo, posto non più in mezzo ma ai margini di un universo senza centro e senza fine, all'interno del quale la sfera celeste e il mondo terrestre son intimamente connessi da una natura simile.⁷³

Si evidenzia però come il pensiero di Bruno in *De l'infinito, universo e mondi* riprendesse in realtà le visioni di Cusano (citato da Bruno anche nel testo stesso) e prima ancora di Lucrezio: «Praeterea cum materies est multa parata, cum locus est praesto nec res nec causa moratur ulla, geri debent nimirum et confieri res.»⁷⁴ Nel merito, Lucio Russo (1944-) osserva come «tra le idee ellenistiche non incluse nell'*Almagesto*⁷⁵ vi sono, se non altro, l'eliocentrismo, l'infinità dell'universo e la relatività del moto.»⁷⁶

Ma si ricorda anche l'abiura alla quale fu costretto Galilei per aver raccontato e acutamente analizzato quello che vedeva con il suo *cannocchiale*, strumento peraltro che sembra essere stato già analizzato da Marco Antonio de Dominis (1560-1624), insegnante di ottica a Padova negli anni di Galilei, e addirittura noto allo scienziato inglese Roberto Grossatesta (1175-1253), come suggerisce la conoscenza del fenomeno della rifrazione e della 'legge di Snell' già nel 983 da parte dell'ottico e matematico persiano Ibn Sahl (940-1000), se non già in epoca ellenistica⁷⁷; addirittura uno scritto del 1024 di Alhacen (965-1040), un naturalista vissuto al Cairo

[...] illustra le proprietà delle sorgenti luminose e delle loro immagini prodotte da specchi sferici. Nella sua opera intitolata *La Grande Ottica*, Alhacen sviluppò una teoria della riflessione e della rifrazione della luce. La sua ipotesi di partenza era che la luce consistesse in un'onda che si propaga a velocità finita, che varia con la natura del mezzo trasparente. [...] Benché la sua intuizione precorresse la moderna teoria della luce, Alhazen non si avvale in questo suo modello

⁷² [Bruno, 1548b], edizione Enigma pag. 52

⁷³ Nota dell'editore in [Bruno, 1548b], edizione Enigma pag. 9

⁷⁴ *De Rerum Natura*, Libro II, 1057-1059: «Quando ci sono infinita materia, infinito spazio e infinito tempo a disposizione, e niente che si opponga, è obbligatorio che prima o poi si formino cose inanimate ed esseri animati», traduzione libera di [Odifreddi, 2013] pag. 101

⁷⁵ Opera di Claudio Tolomeo (circa 100-circa 168) rimasta un riferimento per le conoscenze astronomiche per 14 secoli, escluse quelle ellenistiche indicate che sono state 'riscoperte' da Copernico nel XVI secolo (eliocentrismo) e da Galilei nel XVII secolo (relatività del moto), mentre sull'infinità dell'universo non ci sono risposte 'certe' nemmeno oggi

⁷⁶ [Russo, 2021] pag. 267; Russo considera l'inizio dell'epoca ellenistica nel 323 a.C. con la morte di Alessandro Magno e la fine orientativamente nel 30 a.C. con l'annessione dell'Egitto all'Impero romano, in [Russo, 2021] pag. 21-23

⁷⁷ Osservazioni di [Russo, 2021] pag. 422-423 e pag. 312-315

di alcun procedimento matematico (il suo libro non contiene un solo numero), deducendo le proprietà della rifrazione attraverso complicatissime costruzioni e dimostrazioni geometriche.⁷⁸

Galilei sperimentò anche l'utilizzo dello strumento ottico come microscopio, per indagare le cose molto piccole, chiamandolo per questo scopo *perspicillum*, ma non approfondì queste ricerche.

È interessante osservare che il metodo scientifico basato sulle osservazioni, come descritto di seguito alle prossime due citazioni, non sia nato come viene comunemente considerato con Galilei⁷⁹ bensì fosse già diffuso ancora in epoca ellenistica, come testimoniato ad esempio da un brano di Filone di Bisanzio (circa 280-circa 220) nel suo *Belopoietica* (50, 21-29) che commenta il perfezionamento della costruzione di catapulte⁸⁰:

[...] Questo risultato fu raggiunto per la prima volta dai tecnici alessandrini, forniti di ricchi mezzi da re che amavano la fama e la tecnologia. Che non tutto si possa ottenere con il ragionamento e con i metodi della meccanica, ma che molto debba essere scoperto con esperimenti, risulta chiaro sia da molte altre cose sia, in particolare, da ciò che dirò in seguito [...].

In particolare è notevole la figura di Erofilo (335-280), medico e anatomista, del quale Russo scrive:

Erofilo, per l'introduzione del metodo sperimentale in medicina, per il contributo dato a una nuova concezione della lingua e, soprattutto, per la sua consapevolezza metodologica, emerge dalle testimonianze come uno dei fondatori del metodo scientifico.⁸¹

Erofilo fondò una scuola che fu attiva fino al I secolo d.C.. Tra i suoi discepoli diretti troviamo, secondo il racconto di Igino⁸², la prima donna che osò sfidare l'esclusione del proprio sesso dalla professione medica: Agnodice. Secondo Igino, in seguito al successo professionale di Agnodice la proibizione alle donne di esercitare la medicina fu abolita. È un esempio del ruolo svolto dalle donne nella civiltà ellenistica.⁸³

Il saggio [Russo, 2021] compie una robusta rivalutazione di tutta la scienza ellenistica, poi dimenticata nei secoli della dominazione imperiale del Mediterraneo da parte di Roma e riscoperta solo in epoca recente o recentissima; Russo considera *teoria scientifica* non solo ciò che riguarda un profondo pensiero astratto che ricorra a modelli teorici ma che abbia anche una struttura rigorosamente deduttiva e che trasferisca le proprie conclusioni al mondo reale, potremmo dire della fenomenologia e della tecnologia, per mezzo di regole di corrispondenza tra gli enti astratti e gli oggetti concreti⁸⁴. Nel merito Russo osserva anche come «la scienza di Descartes, Kepler e Newton, nonostante la sua potenziale superiorità,

⁷⁸ [Ronchi, 2020] pag. 47

⁷⁹ Un precursore delle idee galileiane fu Giovanni Battista Benedetti (1530-1590), un matematico che con il suo pensiero aprì la strada al superamento della fisica aristotelica come ricordato anche in [Mach, 1883] edizione italiana pag. 152, che cita Giovanni Vailati (1863-1909), un altro matematico che diede contributi nell'analisi storica ma anche logica e filosofica di molti autori 'classici'

⁸⁰ Eric Marsden, *Greek and Roman artillery: technical treatises* (Clarendon, Oxford 1971) citato da [Russo, 2021] pag. 138

⁸¹ [Russo, 2021] pag. 187

⁸² Gaio Giulio Igino (circa 64-17), scrittore e bibliotecario romano

⁸³ [Russo, 2021] pag. 188

⁸⁴ [Russo, 2021] pag. 25-28 passim

dovuta alla sua base fenomenologica più vasta, fosse metodologicamente inferiore a quella antica». ⁸⁵

Ad esempio è significativa la misura della *precessione degli equinozi* ⁸⁶ che ottenne Ipparco di Nicea (190-120), stimandola 0.10° rispetto al valore reale di circa 0.014° , risultato «impensabile se non fosse basato su misure angolari di precisione» ⁸⁷.

Tornando al tempo, come ricorda Paul Davies (1946-):

Il presupposto fondamentale della scienza è che esiste un mondo esterno reale, che noi possiamo comprendere ⁸⁸, e quel mondo reale include il tempo. Dato un universo razionale, possiamo cercare delle risposte a questioni razionali sul tempo, come l'origine della freccia del tempo, e la data in cui l'universo ebbe origine, se davvero ebbe un'origine. Tuttavia, la cosmologia razionale basata sul modello newtoniano dell'orologio ⁸⁹, così come la successiva cosmologia termodinamica di un universo morente, erano fondate su una concezione del tempo altamente semplicistica. Anche se funzionò per due secoli, la concezione di Newton del tempo era essenzialmente imperfetta. C'era bisogno del genio di Albert Einstein per mostrarne i difetti. ⁹⁰

La concezione del tempo e dello spazio assoluti di Newton era ben distinta dalla percezione umana, come precisato nel *Principia mathematica*:

Tempo, spazio, luogo e moto sono notissimi a tutti. Si deve tuttavia rilevare che tali quantità vengono comunemente concepite soltanto in relazione alle cose sensibili. E da ciò sorgono alcuni pregiudizi, per togliere i quali conviene distinguere le quantità stesse in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e comuni. I. Il tempo assoluto, vero e matematico, in sé e per sua natura senza relazione a qualcosa di esterno, scorre uniformemente, e con un altro nome si chiama durata. Il tempo relativo, apparente e comune è una qualsiasi misura (accurata o meno) della durata per mezzo del moto, che di solito viene impiegata al posto del tempo vero, come l'ora, il giorno, il mese e l'anno. ⁹¹ II. Lo spazio assoluto, vero e matematico, in sé e per sua natura senza relazione a qualcosa di esterno, rimane sempre omogeneo e immobile. Lo spazio relativo è la misura di quello assoluto, ossia una qualsiasi dimensione mobile che i nostri sensi definiscono per la sua posizione rispetto ai corpi, ed è comunemente usata al posto dello spazio immobile. ⁹²

⁸⁵ [Russo, 2021] pag. 479; Russo sottolinea come un'analisi anche non approfondita degli scritti di Kepler e di Newton evidenzia come le basi delle loro deduzioni siano quantomeno influenzate da teologia e filosofia pre ellenistica o aristotelica, lungi dall'essere basate su una struttura teorica; René Descartes (1596-1650)

⁸⁶ Fenomeno di lento spostamento dell'asse di rotazione terrestre dovuto alla forma non perfettamente sferica della Terra stessa

⁸⁷ [Russo, 2013] pag. 125

⁸⁸ Questo postulato proviene, come già osservato, dalla cultura greca

⁸⁹ [Davies, 1995] edizione italiana pag. 21 afferma che si deve a Galilei il «considerare il tempo come quantità misurabile essenziale nell'attività ordinata del cosmo» ma in realtà gli orologi ad acqua che misuravano lo scorrere del tempo riportandolo in unità di lunghezza risalgono al periodo ellenico; sono noti gli orologi di Archimede (circa 287-212) e di Ctesibio (contemporaneo di Archimede nel III secolo a.e.v.), che risolvevano i problemi dei più antichi dispositivi, imprecisi perché non tenevano conto della diversa pressione dell'acqua nei contenitori; Galileo li aveva sicuramente studiati, perché cita e utilizza un lemma di Archimede nel suo *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*; [Russo, 2019] pag. 71-74

⁹⁰ [Davies, 1995] edizione italiana pag. 37

⁹¹ In questa distinzione Newton precisa come fosse errata la descrizione che del tempo aveva fatto Descartes, associandolo alla 'durata delle cose', nel suo *Principia Philosophiae*; osservazione di Franco Giudice, curatore dell'edizione italiana di [Newton, 1687]

⁹² [Newton, 1687] Definizione VIII, Scolio, edizione italiana pag. 29-30; è evidente come questa visione di Newton sia influenzata dalla religione e dall'idea della presenza di un dio

Nonostante queste posizioni di Newton siano tra le più discusse dal punto di vista filosofico⁹³, Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) nel suo [Chandrasekhar, 1995] non ritiene di approfondirle:

[...] concerning the notions of *absolute time* and *absolute space* on which Newton bases his dynamics, it will suffice to say that, in current terminology, the space-time manifold that is assumed is the Cartesian product, $t \times$ Euclidean 3-space, where t is Newton's *equable time*.⁹⁴

Anche Ludwig Boltzmann (1844-1906) in qualche modo 'lascia correre' nel merito, si ritiene peccando di superficialità, scrivendo nel 1899:

La stessa difficoltà⁹⁵ si incontra nell'introdurre il concetto di tempo. Anche questo viene introdotto da Newton come assoluto, mentre a noi non è mai dato un tempo simile: sperimentiamo solo la contemporaneità del corso di più eventi. Però qui è più facile trovare rimedio partendo da un avvenimento che si ripete sempre, periodicamente, nelle stesse condizioni. Certo non è possibile creare l'assoluta uguaglianza delle condizioni, ma si può fare in modo che sia estremamente probabile che tutte le condizioni influenti sui processi essenziali siano uguali. Questo *metodo* può essere rafforzato confrontando fra loro fenomeni di diverso tipo che hanno questa proprietà (la rotazione terrestre, la rotazione del pendolo e quelle della molla di un cronometro). L'accordo di tutti questi fenomeni nell'indicazione di tempi uguali fa escludere ogni dubbio sull'utilità del *metodo*.⁹⁶

La posizione di Newton sull'analisi delle cause (della gravità) è dichiarata con la sua solita rigidità, in questo caso esempio di pseudo-coerenza⁹⁷ intellettuale ma anche filosoficamente in netta opposizione agli insegnamenti di Platone che «nutriva un deciso disprezzo per l'indagine empirica, sostenendo che sminuiva l'obiettivo che la filosofia deve perseguire, ossia arrivare a capire la natura dell'universo attraverso la logica e la ragione»⁹⁸:

Non sono tuttavia ancora riuscito a dedurre dai fenomeni la causa di queste proprietà della gravità, e non fingo ipotesi ["hypoteses non fingo"]. Qualunque cosa infatti non si deduce dai fenomeni deve essere chiamata *ipotesi*; e le ipotesi, sia metafisiche, sia fisiche, sia delle qualità occulte, sia meccaniche, non hanno spazio nella *filosofia sperimentale*. In questa filosofia le proposizioni si deducono dai fenomeni e sono rese generali per induzione.⁹⁹

⁹³ [Mach, 1883] edizione italiana pag. 241-242, con riferimento al tempo assoluto di Newton: «Allo stesso modo non si può parlare di "tempo assoluto" (indipendente da ogni mutamento). Infatti questo tempo assoluto non può essere commisurato ad alcun moto, e perciò non ha valore né pratico né scientifico. Nessuno può pretendere di sapere alcunché al riguardo di esso. È dunque un inutile concetto "metafisico".»

⁹⁴ [Chandrasekhar, 1995] pag. 22

⁹⁵ Boltzmann si riferisce alla ipotetica meccanica associata all'etere luminoso, anch'esso ipotetico, immaginato come riferimento per rappresentare lo spazio assoluto al quale si riferiva Newton

⁹⁶ Dal testo delle lezioni tenute nel 1899 alla Clark University (Massachusetts, US), dal titolo *Über die Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik (Sui principi e le equazioni fondamentali della meccanica)*, in [Boltzmann, 1905] edizione italiana pag. 132, corsivo aggiunto; Boltzmann definisce quindi l'utilizzo del tempo un *metodo*, analogamente all'interpretazione alla quale si giunge nelle *Conclusioni epistemologiche*

⁹⁷ Si afferma questa critica concordando con quanto espresso da Ernst Mach citato da [Teghil, 2016] a pag. 189, che cita lo stesso Mach in *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung* (opera già citata in questo paragrafo): «Preso senza nessuna cautela, l'espressione "hypoteses non fingo" suonerebbe così: "Non congetturo nulla al di là di quel che vedo, non mi faccio assolutamente idee che oltrepassino l'osservazione". In ogni pagina dei suoi scritti Newton contraddice questa interpretazione. Egli spicca proprio per la ricchezza di congetture.»

⁹⁸ [Lindley 2020] edizione italiana pag. 28

⁹⁹ [Newton, 1687] Scolio generale al libro III, edizione italiana pag. 95

Questa posizione di Newton non era molto lontana da Lucrezio:

Nam quid in hoc mundo sit eorum ponere certum difficile est; sed quid possit fiatque per omne in variis mundis varia ratione creatis, id doceo plurisque sequor disponere causas, motibus astrorum quae possint esse per omne; e quibus una tamen siet hic quoque causa necessest quae vegeat motum signis; sed quae sit earum praecipere haudquaquamst pedetemptim progredientis.¹⁰⁰

che a sua volta riprendeva un pensiero di Epicuro (341-270):

Nel caso in cui si accetti una spiegazione rifiutandone un'altra, altrettanto concordante con il *fenomeno*¹⁰¹, è chiaro che si cadrebbe al di fuori di ogni discorso di filosofia della natura e si scivolerebbe nel mito.¹⁰²

Lo spazio newtoniano fu criticato, da un punto di vista fisico, in particolare da Gottfried Leibnitz e da Ernst Mach¹⁰³. Da un punto di vista filosofico fu criticato da Immanuel Kant, con un tentativo di rifondare la scienza newtoniana definendo lo spazio come una forma a priori della nostra intuizione («noi non possiamo pensare al mondo se non in forma spaziale»), in qualche modo sottraendo l'entità *spazio* e riportandolo a come «lo percepiamo», una forma a priori nella nostra mente¹⁰⁴. Kant sbaglia quando afferma che tutta la fisica newtoniana è un a priori, dice giusto sul fatto che dipenda dal modo in cui «lo comprendiamo» ma questa comprensione non è un a priori come egli sostiene¹⁰⁵.

Henri Poincaré (1854-1912) partecipò al dibattito sostenendo il *convenzionalismo*, per il quale le idee fondamentali della fisica non appartengono al mondo se non in modo convenzionale, quali descrizioni utili solo all'organizzazione e rappresentazione dell'esperienza. In séguito, l'intuizione di Einstein fu di associare il campo gravitazionale allo spazio definito da Newton, generando uno spazio mobile, che può curvarsi anche se normalmente è piano: lo spazio e il tempo di Newton sono il campo gravitazionale.

A proposito dell'infinito, così Weyl ne commenta il punto di vista scientifico e soggettivo:

[...] nelle scienze naturali siamo in contatto con una sfera che è inaccessibile all'evidenza intuitiva: qui necessariamente la conoscenza diviene costruzione simbolica.

[...] L'infinito completo può solo essere rappresentato con l'aiuto di simboli e da tale relazione

¹⁰⁰ *De Rerum Natura*, Libro V, 526-533. «È difficile dire quale possibilità sia quella vera. Ma io ti espongo non soltanto le cose come sono, quando so come sono, ma anche come possono essere, quando non lo so. Naturalmente, la causa del moto delle stelle è una sola, ma in mancanza di prove a favore non possiamo fingere che le nostre ipotesi siano delle tesi.»; traduzione libera di [Odifreddi, 2013] pag. 207

¹⁰¹ Sul concetto di *fenomeno* cfr anche § 13

¹⁰² Epicuro in Lettera a Pitocle, riportato in Diogene Laerzio, *Vitae philosophorum*, X, § 87, 5-8, Citato da [Russo, 2021] pag. 220

¹⁰³ «Leggendo questi passi si ha l'impressione che Newton sia ancora sotto l'influenza della filosofia medievale, e non abbia mantenuto il proposito di attenersi al *fattuale*.» [Mach, 1883] edizione italiana pag. 241; corsivo originale

¹⁰⁴ In particolare nella *Critica della ragion pura*, dove tempo e spazio sono *forme a priori*, intuizioni pure della sensibilità umana, ma il tempo è «condizione formale di tutti i fenomeni in generale» (pag. 74-79 versione italiana UTET, Torino 1967 dell'originale *Kritik der reinen Vernunft*, Hartknoch, Riga, 1787 seconda edizione)

¹⁰⁵ Pareri espressi da [Rovelli, 2018] citato liberamente in questo capoverso e nel successivo

ogni atto creativo dell'uomo riceve la propria profonda consacrazione e la propria dignità; ma solo in matematica e in fisica, per quanto posso vedere, la costruzione simbolico-teorica ha acquisito sufficiente solidità per apparire convincente a chi si ponga di fronte a queste scienze in modo non dogmatico.¹⁰⁶

Per il ruolo del tempo è interessante l'osservazione di Davies, ancorché lontana dalle conclusioni personali (cfr le *Conclusioni epistemologiche*):

Prima di Galileo e di Newton, il tempo era qualcosa di organico, di soggettivo, e non un parametro da misurare con precisione geometrica. Era parte integrante della natura. Newton lo isolò, attribuendogli una esistenza astratta, indipendente, privandolo degli elementi che tradizionalmente gli appartenevano. Venne incluso nella rappresentazione newtoniana del mondo solo come strumento per la descrizione matematica del moto. [...] Einstein gli riassegnò il suo ruolo nel cuore della natura, come parte integrante del mondo fisico.¹⁰⁷

L'intento iniziale del presente approfondimento era quello di 'andare oltre' questa posizione, ipotizzando che il tempo antropicamente osservato si manifestasse come proprietà della singola particella in viaggio (come *tempo specifico*), piuttosto che essere un ente esterno (un *tempo universale* come quello newtoniano). Lo studio e le conclusioni non hanno supportato però questa ipotesi, come risulta nelle analisi delle parti II e III.

A proposito della 'visione del mondo' di Einstein, si riportano dei pensieri di Wolfgang Pauli (1900-1958):

[...] Questi primi lavori di Einstein sulla teoria della relatività ristretta mostravano già il successo di un metodo, nel campo della fisica, che non procede da un sapere ricevuto per autorità riguardo a quel che le cose sono in sé e per sé. Einstein ci ha nuovamente fatto vedere come il fisico debba imparare a nuotare, senza sostegni del genere e senza regole fisse, in un mare sconfinato di idee, alle quali egli può ben essere ispirato da un mare egualmente sconfinato di materiale empirico, ma che a loro volta non possono essere dedotte da questo in modo puramente logico.¹⁰⁸

Come ricorda Schrödinger, in quegli anni, «la filosofia positivista afferma[va] che noi non dobbiamo distinguere tra la conoscenza che possiamo ottenere di un oggetto fisico e il suo stato reale. Le due cose s'identificano»¹⁰⁹.

In questa parte I introduttiva e un po' 'naïf' si riporta un pensiero di Giacomo Leopardi (1798-1837) sulla relatività soggettiva del tempo:

Quanto più del tempo si tiene a conto, tanto più si dispera d'averne che basti, quanto più se ne gitta, tanto par che n'avanzi.¹¹⁰

e la personalizzazione di Lewis Carrol (1832-1898) nelle parole del Cappellaio Matto:

¹⁰⁶ Dal saggio *L'infinito*, in [Weyl, 2011] pag. 81-83

¹⁰⁷ [Davies, 1995] edizione italiana pag. 7

¹⁰⁸ [Pauli, 1958] edizione italiana pag. 90, saggio su *Albert Einstein, La teoria della relatività e la scienza* (1955-1958)

¹⁰⁹ [Schrödinger, 1958], edizione italiana pag. 258

¹¹⁰ Giacomo Leopardi (1798-1837) in *Pensieri di varia filosofia e di bella letteratura* (detto *Zibaldone*, Le Monnier, Firenze, 1898, 43,2) volume 1, pag. 143

“If you knew Time as well as I do,” said the Hatter, “you wouldn’t talk about wasting *it*. It’s *him*.” “I don’t know what you mean,” said Alice. “Of course you don’t!” the Hatter said, tossing his head contemptuously. “I dare say you never even spoke to Time!”¹¹¹.

Un ostacolo allo sviluppo dell'algebra e del simbolismo matematico, che «rimaneva rudimentale e arbitrario [era l'utilizzo dell'abaco¹¹² e del sistema di numerazione] romano a base bi-quinaria. Quando Leonardo Fibonacci (1170-1250) a metà del sec. XIII propose il sistema decimale indo-arabo con il posizionamento delle cifre dallo 0 al 9 e, nel suo *Liber Abaci*, ne dimostrò la praticità con numerosi esempi, ottenne il plauso e l'assenso immediato [anche se] gli abacisti continuarono a prevalere fino al tardo Rinascimento.»¹¹³

A proposito del metodo scientifico, fu Leibnitz «il primo ad auspicare una logica modellata sulla struttura formale della matematica (che chiamò *mathesis universalis* o *logica matematica*)»¹¹⁴, successivamente formalizzata da George Boole (1815-1864) che «con la sua *Analisi matematica della logica* riuscì per la prima volta a tradurre in equazioni la logica tradizionale.»¹¹⁵ Lo stesso Boole nella introduzione al suo saggio scrisse:

Ciò che rende possibile la logica è l'esistenza, nella nostra mente, di nozioni generali: la nostra capacità di concepire una classe e designare con un nome comune gli individui che ne sono membri. La teoria della logica è in tal modo intimamente connessa con quella del linguaggio.¹¹⁶

La frase successiva

Nella misura in cui riuscisse il tentativo di esprimere proposizioni logiche mediante simboli le cui leggi di combinazione si fondassero sulle leggi dei processi mentali che tali simboli rappresentano, si compirebbe un passo avanti verso un linguaggio filosofico¹¹⁷

sembra essere un preambolo alle posizioni di Ludwig Wittgenstein (1889-1951). Infatti il suo *Tractatus logico-philosophicus*¹¹⁸ influenzò il gruppo che prese il nome di *Circolo di Vienna* (*Wiener kreis*) e che si oppose fermamente alla metafisica, fondando sulla logica simbolica una interpretazione (detta anche neopositivismo) che si poneva criticamente rispetto alle filosofie empiriste e positiviste. L'intento fu quello di superarle sia adottando un empirismo radicale sia estremizzando la logica simbolica, per diffondere una concezione scientifica del mondo e contrastare il pensiero metafisico e teologizzante. Si evidenzia come il circolo fosse inizialmente intitolato *Verein Mach*, in onore di Ernst Mach, che pur essendo ormai scomparso, ancora esercitava forte influenza nell'approccio alla filosofia della scienza e in generale della conoscenza per il suo spirito illuministico e la mentalità liberale¹¹⁹.

¹¹¹ Lewis Carroll, *Alice's Adventures in Wonderland*, first edition 1865; chapter VII

¹¹² Strumento di calcolo per effettuare semplici operazioni matematiche, basato su una tavoletta con scanalature o aste sulle quali scorrono delle palline (forate) rappresentanti le cifre; modernamente trasformato nel *pallo-toliere* (in base 10) utilizzato per l'apprendimento di numeri e primi calcoli nell'infanzia; lo strumento continuò quindi a essere utilizzato per secoli

¹¹³ [Ronchi, 2010] pag. 50

¹¹⁴ [Musso, 2004] pag. 40

¹¹⁵ [Musso, 2004] pag. 41

¹¹⁶ [Boole, 1847] edizione italiana pag. 6

¹¹⁷ [Boole, 1847] edizione italiana pag. 6-7

¹¹⁸ [Wittgenstein, 1921]

¹¹⁹ Lo studio di Mach, stimato tra gli altri anche dallo stesso Einstein come uno dei suoi maestri (sicuramente

Non fu però possibile superare alcune criticità implicite, ad esempio che la logica fosse

rigorosamente deduttiva quindi in grado di costruire il sistema sempre e soltanto dall'alto verso il basso e mai viceversa [...] attribuendo a ogni proposizione teorica così riformulata un significato che poteva realmente apparire come la mera somma delle proposizioni da essa derivanti *ma non spiegava come si era giunti alle proposizioni teoriche stesse*¹²⁰,

oppure superare la necessità di creare enunciati atomici 'protocollari' che finivano per perdere universalità.

Una diversa critica alla matematica (espressione della logica), si potrebbe dire dal punto di vista del contenuto semantico della realtà stessa, è portata da Federico Faggin (1941-) in epoca contemporanea:

Nella metodologia corrente, abbiamo sostituito la comprensione della realtà con la comprensione della teoria matematica della realtà, come se le due fossero uguali. Pertanto, la comprensione della realtà oggi si esaurisce dicendo: "È così perché la matematica dice così". Questa attitudine sarebbe quasi corretta, se fossimo sicuri che la teoria matematica della realtà descrive accuratamente la realtà, ma sappiamo invece che le teorie correnti lasciano fuori la vita, la coscienza e il libero arbitrio. La matematica può descrivere solo l'aspetto simbolico della realtà, non quello semantico. La matematica è solo descrittiva, non prescrittiva, come diffusamente si crede.¹²¹

Una posizione che supera le discussioni fondazionali sulla assiomatizzazione e la formalizzazione della matematica di inizio Novecento, con posizioni estreme rappresentate da un lato da Giuseppe Peano (1858-1932) e dall'altro forse da Federigo Enriques (1871-1946)¹²², nel mezzo David Hilbert, uno dei sostenitori dell'assiomatizzazione della matematica nonché uno dei padri della matematica moderna, per l'ampiezza e il peso dei suoi contributi, anche nell'ambito della Fisica teorica.

«Al culmine del positivismo logico, Hilbert credeva che non esistessero enunciati indimostrabili»¹²³ ma Gödel con il suo *teorema di incompletezza* dimostrò

che qualsiasi sistema abbastanza potente da formalizzare almeno l'aritmetica, se è coerente, allora è incompleto (cioè dai suoi assiomi non possono essere dedotte tutte le proposizioni vere che in esso possono essere espresse)¹²⁴,

si potrebbe dire determinando quindi l'impossibilità logica del predominio assoluto della logica, per quanto anche questa affermazione possa essere criticata come auto-contraddittoria. «What Gödel proved is that mathematical truth is not reducible to (formal or mechanical proof). Syntax cannot supplant semantics»¹²⁵. In positivo, il fatto che tali

per la convinzione «che dalla fisica dovessero essere eliminati tutti i concetti che non abbiano una base empirica», non certo per la visione delle teorie scientifiche, per Mach «solo un modo economico per descrivere una vasta collezione di fatti» e non per interpretare le leggi della Natura), merita un approfondimento ad esempio in *Le ragioni di una rilettura di Ernst Mach*, di Massimo Debernardi, in [Mach, 1923], edizione italiana a cui si è fatto riferimento in questo capoverso, pag. 93-103 passim

¹²⁰ [Musso, 2004] pag. 56

¹²¹ [Faggin, 2022] pag. 287

¹²² Considerazioni in [Lolli, 2016] pag. 63; Gabriele Lolli (1942-2025)

¹²³ [Faggin, 2022] pag. 269

¹²⁴ [Musso, 2004] pag. 44

¹²⁵ Palle Yourgrau (1950-) in [Yourgrau, 2005] pag. 57

proposizioni possano essere riconosciute come vere, ma non possano essere dimostrate come tali, implica che «la ragione umana ha una capacità di comprensione che va al di là dell'aspetto puramente logico formale.»¹²⁶ A conferma di questo, Alan Turing (1912-1954) concepì nel 1936 «una 'macchina universale' con un esperimento mentale volto a dimostrare che il cosiddetto *problema della decisione* posto dal matematico David Hilbert nel 1928 era irrisolvibile»¹²⁷, gettando peraltro le basi con il suo modello astratto per «una classe di macchine universali in grado di eseguire qualsiasi algoritmo generale», poi diventate gli odierni hardware e software. L'evoluzione della tecnologia informatica ha portato alla cosiddetta *intelligenza artificiale* e alla credenza che gli algoritmi potranno sostituire gli umani in tutte le loro attività, non solo in quelle meccaniche ripetitive, posizione analizzata e criticata in [Faggin, 2022] dal creatore dei processori degli elaboratori elettronici¹²⁸. Si osserva nel merito come l'espressione *intelligenza artificiale* sia fuorviante, non replicando gli elaboratori e gli algoritmi in alcun modo le attività umane normalmente classificate come 'intelligenti', eppure superando queste nei risultati (incluso l'autoapprendimento di giochi o test), in modo anche notevole, basandosi sulla conoscenza di enormi quantità di dati e trattandoli in modo 'semplicemente' statistico.¹²⁹

Al Circolo di Vienna parteciparono (direttamente o indirettamente) anche matematici e logici (tra cui Gödel), oltre ai filosofi, ma il gruppo di studio si sciolse all'avvento del nazismo e delle persecuzioni di alcuni suoi membri. Si cita per l'importanza anche un altro importante centro di sviluppo scientifico, nato nel dopoguerra con intenti enciclopedici e di 'rifondazione' dell'intera matematica su nuove basi assiomatiche, il gruppo 'Nicolas Bourbaki'¹³⁰, fondato a Parigi nel 1952 da grandi matematici dell'epoca¹³¹ e in séguito origine di una gloriosa produzione scientifica (matematica).

Nel contesto epistemologico del periodo prebellico, nel 1929 furono pubblicate con grande risonanza pubblica (soprattutto negli Stati Uniti, mentre in Europa si sviluppava il dominio nazista in Germania e stavano nascendo le premesse della seconda guerra mondiale) le

¹²⁶ [Musso, 2004] pag. 47

¹²⁷ [Faggin, 2022] pag. 63-64 anche per l'altra citazione nel capoverso, corsivo aggiunto; «Il 'problema della decisione' di David Hilbert era il seguente: dato un enunciato all'interno di un sistema assiomatico, esiste un algoritmo in grado di stabilire se esso sia vero o falso? Turing dimostrò che esistono enunciati per i quali un tale algoritmo non esiste, perché andrebbe avanti all'infinito senza poter mai prendere una decisione. Il risultato di Turing è simile al teorema di incompletezza di Gödel e pone un limite a ciò che è calcolabile con un algoritmo.» [Faggin, 2022] pag. 269

¹²⁸ La biografia e le realizzazioni di Federico Faggin, fondamentali per il mondo contemporaneo, sono da lui raccontate in *Silicio* [Faggin, 2019]

¹²⁹ Il saggio [Cristianini, 2023] è interamente dedicato a delineare le caratteristiche dell'intelligenza artificiale come strumento affatto alternativo di analisi e conoscenza

¹³⁰ Nome scherzoso forse ispirato al nome di un generale francese dell'800

¹³¹ Tra i fondatori André Weil (1906-1998), Jean Dieudonné (1906-1992), Henri Cartan (1904-2008) ma in séguito partecipò anche Alexander Grothendieck, un genio del calibro dei grandi matematici dell'800 come Richard Dedekind (1831-1916) o Bernhard Riemann (1826-1866), che produsse una discontinuità nella concezione globale della matematica, come fu il caso di Einstein; egli stesso scrive nel suo *Récoltes et semelles* (1986) che sono entrambi autori di un'opera che «trova compimento attraverso un cambiamento dell'idea che abbiamo dello "spazio" (in senso matematico in un caso, in quello fisico nell'altro) [...] e che prende la forma di una visione unificatrice, in grado di abbracciare un'ampia moltitudine di fenomeni e di situazioni che fino a quel momento apparivano separati gli uni dagli altri». In [Giorello et al., 2014], pag. 49-50 e passim

rivoluzionarie osservazioni di Hubble sulle distanze di alcune galassie, sicuramente esterne alla nostra che si riteneva all'epoca costituire l'intero universo, e sulle velocità di recessione delle galassie stesse, stimata sulla base dell'effetto Doppler associato al redshift, interpretate come una prova dell'espansione dell'intero universo, oggetto di analisi nell'intero approfondimento.

B § 2 Panoramica sul tempo agli inizi della scienza moderna

*La scienza naturale non descrive e spiega semplicemente la natura;
essa è una parte dell'azione reciproca tra noi e la natura;
descrive la natura in rapporto ai sistemi usati da noi per interrogarla.*
Werner Heisenberg¹³²

Si intende come *moderna* la scienza sviluppata in séguito alla *teoria quantistica* di Max Planck (1858-1947) sull'emissione non continua di radiazione, sviluppata agli inizi del Novecento¹³³. La crisi della scienza classica non mancò di creare dei *contrast* nei gruppi di scienziati che aderivano o meno alle nuove teorie¹³⁴, come lucidamente analizzato in séguito anche da Kuhn¹³⁵, determinando forse una *apertura mentale* alla creazione di teorie che da una parte ponevano il massimo accento sulla logica e la matematica, dall'altra sfidavano affatto il senso comune e le conoscenze fisiche consolidate.

Nello sfondo del contesto scientifico di inizio secolo era infatti presente una nuova visione della realtà fisica, sintetizzata da Heisenberg in epigrafe ma anche in una sua pubblicazione precedente:

[...] the new mathematical formulae no longer describe nature itself but *our knowledge* of nature. We have had to forego the description of nature which for centuries was considered an obvious aim of all exact science. [...]

When we speak of the picture of nature in the exact science of our age, we do not mean a picture of nature so much as a *picture of our relationships with nature*.¹³⁶

Per la logica è necessario ricordare il fondamentale contributo di un *continuatore* degli studi di Boole, Gottlob Frege (1848-1925), la cui *Begriffsschrift (Scrittura per concetti)* del 1879 «rappresenta un tentativo di costruzione di un linguaggio formalizzato, ossia di un sistema simbolico sulla base del criterio di verità e validità delle preposizioni.»¹³⁷ Da un punto di vista filosofico, assunto

¹³² Heisenberg in *Fisica e Filosofia* [Heisenberg, 1958] edizione italiana pag. 85; questa posizione *antirealista* di Heisenberg, basata sulla meccanica quantistica che caratterizza la scienza moderna, è approfondita nella sezione E

¹³³ Anche se il termine 'Fisica moderna' è solitamente associato alla meccanica quantistica e ai suoi sviluppi

¹³⁴ Il periodo di transizione dalla scienza classica alla scienza moderna è efficacemente raccontato in forma romanzata in [McCormmach, 1982]

¹³⁵ Il tema è approfondito nell'Allegato A2

¹³⁶ [Heisenberg, 1955] edizione inglese pag. 25 e 29

¹³⁷ [Danielis, 1996] pag. 4; si ricordano anche gli altri due importanti lavori di Frege per la fondazione su basi logiche dell'aritmetica, il *Die Grundlagen der Arithmetik (I Fondamenti dell'Aritmetica)* e il *Grundgesetze der Arithmetik (I Principi dell'Aritmetica)*; da un punto di vista pragmatico, si devono a Frege i concetti di *variabile*, *costante*, *funzione*, *contenuto concettuale* e l'adozione di una notazione simbolica per la costruzione degli enunciati; prima di Frege un determinante sviluppo nel simbolismo dell'aritmetica fu dato da François Viète (1540-1603), come ricorda anche Weyl nella conferenza del 1940 *Il modo di pensare matematico* in [Weyl, 2011] pag. 102

un certo concetto di scienza, come episteme¹³⁸, il criterio di verità è fornito dall'immediata denotazione delle premesse (il vero), ossia che ciò che viene detto è così e non altrimenti. La verità sarà dunque, da un lato, la *necessità del porsi a noi in contraddittorio del dato* e, dall'altro, *in quanto riferita al vero, fondante la coerenza per la quale da quelle premesse seguono preposizioni vere*. L'essere fondante e l'essere coerente, come necessità rispettivamente ontologica e logica, sono la scientificità del sapere che in tale portata sintetica supera l'apparente tautologia o il carattere "chiuso" del sistema. L'uso del linguaggio simbolico, consentito dal contenuto che è stato precedentemente attribuito ai segni, ossia a quel riferimento al vero, permetterà inoltre la formulazione di proposizioni rigorose e immuni da equivocità.¹³⁹

Senza togliere meriti al lavoro di Frege, non bisogna dimenticare come una certa affinità tra la logica proposizionale stoica (del periodo ellenistico) e quella formulata da Frege ricordi come molte idee ellenistiche siano alla base di altrettante idee moderne che non sono quindi nate da zero ma che probabilmente sono state ispirate dalla lettura diretta o indiretta (grazie alle citazioni) degli autori ellenistici, purtroppo abbandonati e dimenticati in seguito al tracollo culturale conseguente alla conquista romana del Mediterraneo nel II secolo a.e.v.¹⁴⁰.

Per la fisica i riferimenti sono almeno i rivoluzionari lavori sulla relatività di Einstein ma anche il suo studio su inerzia ed energia [Einstein, 1905b] e sulla corretta interpretazione dell'effetto fotoelettrico (per la quale gli fu assegnato il premio Nobel nel 1921); questi lavori si basano anche sui risultati di altri scienziati, i contributi dei quali sono stati fondamentali: tra questi, per la relatività sicuramente Mach, Bernhard Riemann, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), Poincaré. Essi singolarmente produssero corrette intuizioni su modelli che superavano la visione tradizionale consolidata ma ci volle il genio di Einstein per sistematizzare tutto in una teoria completa, come fu esplicitamente riconosciuto dagli stessi (a parte Riemann, deceduto prima della nascita di Einstein).

L'apprezzamento della teoria della relatività all'inizio non fu affatto unanime, anche per ragioni diverse dalle potenziali criticità meramente scientifiche, come ricorda Andrea Oppo (1970-):

Nel 1932 apparve in Unione Sovietica – ad opera di Vladimir G. Friedman, autore di articoli sulla storia della fisica da un punto di vista marxista – una critica devastante della teoria della relatività di Einstein, accusata di essere una fisica borghese e parzialmente idealista che rifletteva in pieno la crisi del capitalismo moderno. La fisica di Einstein veniva esplicitamente paragonata dall'autore al genere di 'fantasie' metafisiche e religiose espresse da Florenskij negli *Immaginari in geometria*. [...] Molti fisici sostenitori delle idee di Einstein morirono nelle prigioni politiche.¹⁴¹

¹³⁸ Nel linguaggio filosofico greco, *episteme* indicava l'aspetto rigoroso e teorico della conoscenza; nella filosofia contemporanea il termine comprende l'insieme delle conoscenze positive e delle teorie scientifiche che caratterizzano una data epoca [adattato da enciclopedia Treccani online]; «conoscenza più alta delle verità generali e necessarie» secondo [Pauli, 1958] edizione italiana pag. 125, nel saggio *La scienza e il pensiero occidentale* (1958)

¹³⁹ [Danielis, 1996] pag. 4-5; corsivo originale

¹⁴⁰ Processo ampiamente analizzato e dimostrato in [Russo, 2022]; il commento su Frege è a pag. 234-235

¹⁴¹ Andrea Oppo, nell'Introduzione (pag. 15-16) a Pavel Florenskij (1882-1937), *Gli immaginari in geometria, estensione del dominio delle immagini bidimensionali nella geometria* (Mimesis, Milano, 2021), edizione italiana di *Mnimosti v geometrii. Rassirenje oblasti dvuchmernykh obrazov geometrii (Opyt novogo istolkovanija mnimostej)* (Pomor'e, Mosca, 1922); lo stesso Florenskij fu fucilato dopo quattro anni trascorsi in un

Negli Stati Uniti uno dei principali oppositori alla *relatività (ristretta)* fu Dayton Miller (1866-1941), sostenitore della teoria dell'*etere* e autore di presunte misurazioni interferometriche della sua deriva, con le quali intendeva confutare la teoria di Einstein, rivelatesi poi frutto di errore sperimentale¹⁴².

E mentre «il tempo è sempre rimasto al di fuori del dominio della fisica quantistica, e i tentativi di inglobarlo finiscono, paradossalmente, per eliminarlo»¹⁴³, «Einstein ancorò l'esperienza del tempo all'osservatore individuale»¹⁴⁴, come analizzato rispetto alla *relatività ristretta* nel § 3, nel § 11 e nella parte II dell'approfondimento. La cosmologia derivante dalla *relatività generale* postula invece l'esistenza di un *tempo universale*, sul quale si basa l'evoluzione del *fattore (spaziale) di scala* nelle equazioni di Aleksandr Fridman della dinamica cosmica; il *tempo universale* in questo contesto è oggetto di analisi parziale (con le equazioni di Fridman semplificate) nella parte III dell'approfondimento.

In un certo senso la *relatività ristretta* ha superato la *visione antropica* del tempo, legato a una universalità che ne poneva però il centro nel sistema di riferimento umano, spostando di fatto il concetto di *ora* ('il mio tempo') a quello di *contemporaneità* o di *sincronizzazione* di eventi, annullando il senso tradizionale della sequenza temporale degli eventi riferita a un solo osservatore.

The bold concept of a universal now has been replaced with the more modest 'here and now', the *event*, which associates an instant of time only with a single point in space.¹⁴⁵

Una delle conseguenze del punto di vista antropico è il *percepito psicologico* dello scorrere del tempo, che dà origine al malinteso che legittima il concetto di *asimmetria* del tempo stesso; Rosolino Buccheri (1943-) la chiama *freccia del tempo psicologica*¹⁴⁶, approfondita nella sezione C.

Come precisa Davies:

A closer inspection reveals that it is more appropriate to regard the asymmetry as a collective property of physical systems *in* (space-)time. In this sense, time as such does not possess any *intrinsic* orientation, asymmetry, movement, direction or arrow. In an empty universe such things do not exist. Time asymmetry is here taken to mean the basic fact of nature that the contents of the world possess a structural distinction between past and future facing orientations.¹⁴⁷

Quindi la freccia del tempo, anche relativamente all'entropia, è in qualche misura sopravvalutata come importanza, essendo

gulag con l'accusa di anti-modernismo da parte del governo sovietico.

¹⁴² Thomas J. Roberts, *An Explanation of Dayton Miller's Anomalous 'Ether Drift' Result* (Illinois Institute of Technology, Chicago US, 2006)

¹⁴³ [Davies, 1995] edizione italiana pag. 9

¹⁴⁴ [Davies, 1995] edizione italiana pag. 24

¹⁴⁵ [Davies, 1974] pag. 2

¹⁴⁶ [Buccheri, 2005] pag. 140

¹⁴⁷ [Davies, 1974] pag. 3-4; corsivo originale

an explanation of what is *actually observed* by macroscopic human beings, and *not* an attempt at a theoretical description of a special quality with an independent existence. Contrary to widespread belief, time asymmetry is only a *type of description*, relevant to macroscopic worldview of the physicist, rather than an extra *physical* ingredient to be added to the laws of mechanics.¹⁴⁸

Tra gli importanti contributi teorici significativi fino agli anni '80, quando le conoscenze cosmologiche consentivano molti modelli di universo ancora possibili, quello di Richard Chace Tolman (1881-1948) fu

the discovery that *gravitation* provides the ultimate and inexhaustible reservoir of negative entropy for the universe, and such lies at the very foundation of the subject of time asymmetry.”¹⁴⁹

Come approfondito nel § 5 a proposito dell'entropia, le teorie evolutive stellari non comprendono esplicitamente la variabile tempo e la direzione evolutiva implicita verso un aumento della stessa sembra essere conseguenza di un valore iniziale incredibilmente basso, che sembra suggerire una non casuale visione antropica del *tutto*, da interpretare semplicemente come la (fortuita!) possibilità che il *tutto* sia antropicamente osservato, *non* la necessità! (Cfr anche l'Allegato A5 *Sui pregiudizi atropici*).

Davies approfondisce come

the event referred to as the *beginning* of the universe (in the big-bang sense) may be described as the temporal extremity at which there is a *mismatch* between the boundary conditions on the global dynamical motion as determined by gravity, and the microscopic particle motion of the cosmological material, as determined by electromagnetic, weak and strong interaction. [...] Therefore this mismatch might be regarded as the ultimate origin of time asymmetry in the world, and for the ever expanding big-bangs models, the mismatch simply accepted as a fact of nature, like the mass of proton.¹⁵⁰

Uno dei fondamentali contributi di Einstein, «che le leggi della natura devono essere espresse in una forma che non presuppone che lo spazio abbia una geometria fissa»¹⁵¹ (principio dell'*indipendenza dal background*), significa che lo spazio e il tempo emergono dalle leggi stesse, più che rappresentare il *luogo* dove si verificano gli eventi.

Un altro aspetto dell'*indipendenza dal background* è che non esiste un tempo privilegiato. La relatività generale descrive la storia del mondo più che altro in termini di eventi e relazioni tra gli eventi. Le relazioni principali hanno a che vedere con la causalità; un certo evento può appartenere alla catena di cause che portano ad un altro evento. Da questo punto di vista, lo spazio è un concetto secondario, perché la realtà è totalmente dipendente dal concetto di tempo.¹⁵²

¹⁴⁸ [Davies, 1974] pag. 4; corsivo originale

¹⁴⁹ Citato da [Davies, 1974] pag. 6

¹⁵⁰ [Davies, 1974] pag. 7; corsivo originale

¹⁵¹ [Smolin, 2006] edizione italiana pag. 82

¹⁵² [Smolin, 2006] edizione italiana pag. 82

Pertanto

non esiste un modo privilegiato di registrare il tempo. Va bene ogni sorta di orologio, purché mostri che le cause precedono gli effetti. Tuttavia, poiché la definizione dello spazio dipende dal tempo, esistono tante definizioni diverse dello spazio quante ne esistono del tempo. Poc'anzi ho parlato della geometria dello spazio che si evolve nel tempo. Questo è vero non per un unico concetto universale del tempo, ma *per ogni possibile concetto del tempo*.¹⁵³

Si osserva che, pur essendo «l'idea dell'indipendenza dal background nella sua accezione più ampia [...] un saggio suggerimento su come fare scienza»¹⁵⁴, nello sviluppo delle teorie quantistiche e della fisica delle particelle elementari questo principio fondante sia stato abbandonato nel corso del Novecento dalla maggior parte dei ricercatori, certamente influenzati dagli aspetti di convenienza sociale del rimanere *nel paradigma* corrente (cattedre e finanziamenti di ricerca piuttosto che incarichi post-doc a scadenza) che vincolava la direzione della ricerca, indirizzata verso sviluppi più 'promettenti' legati alle particelle elementari e agli acceleratori. Le ricerche dei primi pionieri nello studio della gravità quantistica (teoria unificatrice di gravità e fisica quantistica quindi indipendente dal background), come il russo Matvei Petrovič Bronstein (1906-1938) o il francese Jacques Solomon (1908-1942), anche a causa della loro morte prematura (per coinvolgimento politico e bellico) non hanno avuto séguito fino alla fine del secolo. Solo abbandonando le idee, dimostratesi errate, che la geometria di background fosse fissa e che gli oggetti che si muovono nella geometria di background fossero particelle, si ottennero buoni risultati verso la teoria della gravità quantistica.¹⁵⁵

Quanto affermato nel precedente capoverso è relativo ai *paradigmi* e alle loro implicazioni nello sviluppo della conoscenza scientifica¹⁵⁶.

In una visione completa dello spaziotempo, la gravità, conseguenza della presenza di massa o energia, non solo distorce lo spazio ma rallenta anche il tempo e si potrebbe affermare che «un sasso cade perché segue una traiettoria diritta nello spaziotempo distorto dal rallentamento locale del tempo»¹⁵⁷.

L'*eliminazione* del tempo alla quale accenna Davies nella citazione relativa alla *fisica quantistica* si riferisce alla sua granularità, come precisa Rovelli:

La granularità è ubiqua in natura: la luce è fatta di fotoni, particelle di luce. L'energia degli elettroni negli atomi può prendere solo certi valori e non altri. [...] Una volta capito che spazio e tempo di Newton sono entità fisiche come le altre, è naturale aspettarsi che anch'essi siano granulari. La teoria conferma questa idea: la gravità quantistica a loop prevede che i salti

¹⁵³ [Smolin, 2006] edizione italiana pag. 82-83, corsivo aggiunto; con motivazioni diverse, il concetto è ripreso nelle personali *Conclusioni epistemologiche*

¹⁵⁴ [Smolin, 2006] edizione italiana pag. 83-86 e passim per le osservazioni del paragrafo

¹⁵⁵ [Smolin, 2006] edizione italiana pag. 98

¹⁵⁶ Si vedano anche le opinioni citate nel § 13, oltre all'Allegato A2 e le *Conclusioni sociologiche*

¹⁵⁷ [Rovelli, 2023] pag. 43

temporali elementari siano piccoli, ma finiti.¹⁵⁸

Esiste una scala minima per tutti i fenomeni¹⁵⁹. Per il campo gravitazionale questa si chiama 'scala di Planck'. Il tempo minimo è chiamato 'tempo di Planck'¹⁶⁰.

La natura continua o discontinua della materia e dell'energia è stata oggetto di un approfondimento anche storico già da Luis de Broglie (1892-1987), che ne evidenziò la dipendenza delle interpretazioni quantistiche¹⁶¹, inclusa la sovrapposizione ondulatoria e corpuscolare, precisando nella conclusione che

Quando, discendendo la scala delle grandezze, il fisico affronta il mondo atomico, il mondo dei corpuscoli, vi incontra un elemento interamente nuovo e irriducibile, il quantum d'azione, il cui intervento trascina seco le importanti conseguenze che abbiamo cercato di analizzare. Il valore finito della costante di Planck, permettendo di definire e di opporre la scala microscopica a quella macroscopica, ha per effetto che, nel mondo fisico, l'infinitamente piccolo non è affatto una riduzione omotetica dell'infinitamente grande.¹⁶²

Inoltre, tornando così in qualche modo all'interpretazione aristotelica, è necessario

pensare il mondo come un insieme di eventi, di processi, è il modo che ci permette di meglio coglierlo, comprenderlo, descriverlo. È l'unico modo compatibile con la relatività. Il mondo non è un insieme di cose, è un insieme di eventi.¹⁶³

L'assenza del tempo non significa quindi che tutto sia gelato e immoto. Significa che l'incessante accadere che affatica il mondo non è ordinato da una linea del tempo, non è misurato da un gigantesco tic-tac. Non forma neppure una geometria quadridimensionale. È una terminata e disordinata rete di eventi quantistici.¹⁶⁴

¹⁵⁸ [Rovelli, 2017b] pag. 76

¹⁵⁹ «Non è possibile localizzare un grado di libertà in una regione del suo spazio delle fasi con un volume più piccolo della costante di Planck.» [Rovelli, 2017b] pag. 189

¹⁶⁰ [Rovelli, 2017b] pag. 75; il tempo di Planck corrisponde a 10^{-44} secondi

¹⁶¹ In particolare nella raccolta di scritti [de Broglie, 1937]

¹⁶² [de Broglie, 1937] edizione italiana pag. 253

¹⁶³ [Rovelli, 2017b] pag. 87

¹⁶⁴ [Rovelli, 2017b] pag. 92; una visione analoga anche se 'meno disordinata' viene ripresa nelle personali *Conclusioni epistemologiche*

§ 3 *Presentismo ed eternalismo*

L'avenir est comme le reste: il n'est plus ce qu'il était.
Paul Valéry¹⁶⁵

Il tempo della nostra esperienza quotidiana, per il quale il passato esiste solo nella memoria e il futuro solo come anticipazione (o aspettativa), è quello che più si avvicina alla tesi metafisica del *presentismo*, per il quale tutto ciò che esiste in modo concreto (ovvero esclusi gli enti astratti) esiste solo nel presente¹⁶⁶. L'immutabilità (o irrecuperabilità) del passato e lo scorrere del tempo, insieme alla *causalità* degli eventi, sono altre caratteristiche che si scontrano con una interpretazione fisica del tempo, ovvero con l'impossibilità di definire un *tempo presente* in modo oggettivo.

Considerando la *relatività ristretta* come riferimento per l'invarianza delle leggi della Fisica (nelle cosiddette simmetrie o trasformazioni di simmetria), è noto che coppie di eventi simultanei per un osservatore inerziale O , non lo sono per un altro osservatore inerziale O' (in moto rettilineo uniforme rispetto a O). Questo può portare a diverse interpretazioni della *causalità* tra eventi¹⁶⁷, non più univocamente determinata in mancanza di un fluire universale o oggettivo del tempo, quindi la mancanza di uno stesso *tempo presente* che affermi la realtà di un evento per tutti gli osservatori fisici; ne sembra conseguire la necessità di abbandonare il *presentismo*.

Se un evento a non è simultaneo a un evento b per un osservatore O , gli eventi non coesistono per O , quindi b non è nel presente relativo di O , se egli osserva a . Non si può però da questo concludere che b non sia reale rispetto ad a , potendo essere simultaneo ad a per un altro osservatore O' e il ragionamento si potrebbe ripetere per qualunque evento. «Ne segue che passato, presente e futuro “esistono allo stesso modo” (eternalismo) e la loro differenza (ontologica) è illusoria»¹⁶⁸.

L'*eternalismo* implica però alcune criticità, che si riassumono brevemente.

Immaginare che tutti gli eventi possano essere simultanei o coesistenti è fuorviante, perché una separazione spaziotemporale tra gli osservatori e gli eventi esiste oggettivamente.

Tenendo presente i concetti fondamentali della *relatività ristretta*, questa definizione di

¹⁶⁵ «Il futuro è come il resto: non è più quello che era»; frase molto citata anche in forme diverse, fu originariamente scritta da Paul Valéry (1871-1945), scrittore, poeta e filosofo francese, in *Regards sur le monde actuel* (*Sguardi sul mondo attuale*), 1931

¹⁶⁶ Questa posizione ebbe sostenitori già in Agostino d'Ippona, e in Thomas Hobbes (1588-1679), citati da [Dorato, 2013] al quale si fa riferimento in questo paragrafo; si conserva per chiarezza la distinzione tra eventi e osservatori ma nello spaziotempo di Minkowski nel quale è considerata la *relatività ristretta*, le coordinate sono tutte associate a eventi; Minkowski pubblicò nel 1908 *Das Relativitätsprinzip* (Il principio della relatività), che definiva la metrica dello spaziotempo come costituita da quattro dimensioni, tre spaziali e una temporale; si definisce 'diagramma di Minkowski' la rappresentazione su un piano cartesiano di una dimensione spaziale sull'asse delle ascisse e della quantità ct (per opportunità dimensionale il tempo è considerato così una lunghezza) sull'asse delle ordinate

¹⁶⁷ Sulla *causalità* cfr § 4, § 11, Allegato A3

¹⁶⁸ [Dorato, 2013] pag 33

eternalismo va interpretata in analogia allo spazio: come esiste un 'qui / là', esiste un 'presente / non presente' che occupa delle coordinate nello spaziotempo di Minkowski¹⁶⁹.

Il problema del libero arbitrio, derivato ad esempio dall'immaginare che un evento che potrà essere causato dall'osservatore O , ma non ancora da questo deciso quindi appartenente al suo futuro, possa 'ora' essere già nel presente di un osservatore O' (quindi già determinato prima della effettiva decisione di O), in realtà non si pone considerando che O' non si può comunque trovare nel presente di O , se assiste al suo futuro, e la contemporaneità dell'evento osservato è per così dire illusoria.

Questo banale paradosso sulla contemporaneità ha una criticità analoga a quello sull'espansione dell'universo nel § 6, ovvero il considerare l'universo come osservato *da fuori*, cioè prescindendo dai limiti fisici che connettono gli osservatori O e O' *da dentro* l'universo *reale*.

Brian Greene (1963-) fa nel merito un parallelo con un filone di pane, che rappresenta lo spaziotempo e può essere 'tagliato' ad angoli diversi rispetto al fluire del tempo stesso per mettere in relazione gli eventi: «Due osservatori che si muovono uno rispetto all'altro hanno concezioni diverse di ciò che esiste in un determinato momento, pertanto hanno concezioni diverse della realtà.»¹⁷⁰ L'angolo di taglio rappresenta la velocità relativa degli osservatori e per piccoli angoli la differenza nella 'fetta' è minima ma per grandi angoli anche le differenze diventano molto grandi. Estendendo il concetto a misure infinite, ovvero a 'fette' arbitrariamente grandi, si dimostra facilmente che la loro unione racchiude tutti i punti del filone dello spaziotempo (è sufficiente pensare a una 'fetta' che includa un punto qualsiasi e che intersechi la nostra fetta con un angolo minore di 45° , quindi l'*adesso* del punto qualsiasi in movimento appartiene al nostro presente):

se accettate l'idea che la realtà sia composta da ciò che la vostra immagine mentale fissa contiene adesso, e se concordate sul fatto che il vostro 'adesso' sia alla pari con quello di tutti gli altri osservatori, a varia distanza da voi e in vario stato di moto, allora la realtà racchiude tutti gli eventi dello spazio-tempo. In altre parole, l'intero filone *esiste*.¹⁷¹

Probabilmente non solo alla luce di queste considerazioni, pochi giorni prima di morire Einstein scrisse, in una lettera indirizzata alla sorella dell'amico di una vita Michele Besso (1873-1955) appena deceduto, che Michele era partito un po' prima di lui ma non significava nulla, perché «people like us, who believe in physics, know that the distinction between past, present, and future is only a stubbornly persistent illusion.»¹⁷²

Si può affermare che il presente sia una sorta di entità dipendente dalla mente umana, una proiezione antropomorfa collegata alla coscienza, oppure sia indipendente dalla mente ma allora la fisica sarebbe incompleta perché non riuscirebbe a distinguere tra passato, presente e futuro.¹⁷³

¹⁶⁹ Adottando lo spaziotempo di Minkowski, per 'distanza' si intende 'intervallo spaziotemporale tra eventi'; si osserva che per confrontare la posizione degli oggetti cosmologici è naturale prendere come riferimento la nostra posizione di osservatori (Terra, Sole o centro galattico della Milky Way), senza che questa debba rivestire ruoli di riferimento assoluto, intrinsecamente privo di significato

¹⁷⁰ [Greene, 2004] edizione italiana pag. 159

¹⁷¹ [Greene, 2004] edizione italiana pag. 165, corsivo aggiunto

¹⁷² Frase citata dal fisico Freeman Dyson (1923-2020) in *Disturbing the Universe*, 1979, pag. 193

¹⁷³ Interpretazione di [Dorato, 2013] pag. 40; la visione personale è fondata sul principio di causalità, piuttosto

In modo formale, si può dimostrare la tesi dell'*eternalismo* nel quale la differenza ontologica tra passato, presente e futuro è illusoria, come affermato da Einstein, sulla base:

- dell'analisi di due premesse associate al *presentismo*, dove a, b, e sono eventi

$$b S a | O \Rightarrow b R a | O \quad [3_1]$$

se due eventi sono simultanei (presenti) per O , allora sono reali (coesistono) per O ¹⁷⁴

$$- e S a | O \Rightarrow - e R a | O \quad [3_2]$$

se due eventi non sono simultanei per O , allora non sono reali (non coesistono) per O

- della transitività della relazione R di realtà o esistenza tra diversi sistemi di riferimento inerziali, per un osservatore.

Accettando tutte tre le premesse si ottiene una contraddizione, perché dalla [3_1] si ha

$$e S b | O' \Rightarrow e R b | O'$$

$$b S a | O \Rightarrow b R a | O$$

quindi il principio di transitività implica

$$(b R a | O \ \& \ e R b | O') \Rightarrow e R a | O \quad [3_3]$$

ma la [3_3] è in contraddizione con la [3_2], perché e non è simultaneo ad a e si ottiene

$$(- e R a | O \ \& \ e R a | O) .$$

Non potendo accettare tutte tre le premesse si deve rinunciare alla più 'debole', la [3_2] perché dal fatto che un evento e non sia simultaneo a un evento a non si può concludere che e non sia reale rispetto ad a .

Da questa scelta consegue quindi che passato presente e futuro 'esistono allo stesso modo', la tesi dell'*eternalismo*.

Si rimanda l'approfondimento di alcuni tentativi per introdurre un presente oggettivo nella teoria della *relatività ristretta* al § 11.

che sul fluire del tempo, ed è riportata nelle *Conclusioni epistemologiche*

¹⁷⁴ L'espressione si legge "se b è simultaneo ad a per l'osservatore (o il sistema inerziale) O , allora b è reale (o esiste) per a rispetto all'osservatore (o al sistema inerziale) O "

C Asimmetria del tempo

*Il presente non contiene niente di più del passato,
e ciò che si trova nell'effetto
era già presente nella causa.*
Henri Louis Bergson¹⁷⁵

*"It's a poor sort of memory that only works backwards,"
the Queen remarked.*
Lewis Carrol¹⁷⁶

§ 4 Freccia del tempo

La *causalità* citata da Bergson, in sostanza la *causa efficiens* della fisica di Aristotele (fonte da cui ha origine il cambiamento o la quiete, cfr Allegato A3 *Sulla causalità*), è dedotta in modo logico¹⁷⁷ ma non tiene conto che quasi tutte le leggi della Natura sono invece simmetriche rispetto all'inversione del tempo, quindi l'asimmetria che individua una direzione evolutiva *nel tempo*, o anche una freccia *del tempo*, deve essere indagata per le diverse classi di fenomeni che la caratterizzano.

Le principali, alcune in séguito approfondite¹⁷⁸, sono:

- a) diffusione della radiazione - «In most situations, fields interacting with local sources are appropriately described by retarded (outgoing or defocusing) solutions. For example, a spherical wave is observed *after* a point-like source event, and propagating away from it. [...] For example, one may easily find 'spontaneous' emission (without any incoming radiation), while absorption without any outgoing radiation is hardly ever found.»¹⁷⁹
- b) termodinamica - cfr § 5
- c) evoluzione - cfr § 5
- d) misurazioni in meccanica quantistica - «The probability interpretation of quantum mechanics is usually understood as a fundamental indeterminism of the future. Its interpretation and relation to the symmetrical deterministic Schrödinger equation constitutes a long-standing open problem of modern physics, and it is often dynamically described as a collapse of the wave function, in particular during the process of measurement. Without a collapse, quantum interactions lead to growing entanglement

¹⁷⁵ Henri Louis Bergson (1859-1941) in [Bergson, 1907] edizione italiana pag. 17

¹⁷⁶ Lewis Carrol, *Through the Looking-Glass and What Alice Found There* (first edition 1871) chapter V

¹⁷⁷ In origine «the idea of reducing time order to causal order was first conceived by Leibniz», Hans Reichenbach (1891-1953) in [Reichenbach, 1956] pag. 25

¹⁷⁸ In questa sezione C si fa riferimento a Dieter Zeh (1932-2018) in [Zeh, 1999]

¹⁷⁹ [Zeh, 1999] pag. 4

(quantum nonlocality).»¹⁸⁰ A proposito della freccia del tempo e il problema delle misurazioni in meccanica quantistica, sono molto esplicite le osservazioni di Landau (1908-1968) e Lifšits (1915-1985):

Noi vediamo che il processo di misura presenta in meccanica quantistica un duplice aspetto: il suo ruolo rispetto al passato e al futuro è diverso. Rispetto al passato, la misura verifica la probabilità dei diversi risultati possibili che si possono prevedere partendo dallo stato creato dalla misura precedente. Rispetto al futuro, essa crea un nuovo stato [...]. Il processo di misura è quindi, per sua natura, profondamente irreversibile. Questa irreversibilità ha un'importanza fondamentale. [...] Le equazioni fondamentali della meccanica quantistica godono di per sé di simmetria rispetto al cambiamento di segno del tempo; sotto questo aspetto, la meccanica quantistica non differisce dalla meccanica classica. L'irreversibilità del processo di misura introduce però nei fenomeni quantistici un'inequivalenza fisica delle due direzioni del tempo, cioè porta ad una differenziazione tra futuro e passato.¹⁸¹

e) gravità - «Gravity seems to 'force' all matter to contract. However, this is another prejudice about the *causal* action of forces. Gravity leads to the acceleration of contraction (or deceleration of expansion) in *both* directions of time, since acceleration is a second time derivative.»¹⁸² Nelle stelle l'equilibrio è termodinamico e mantenuto dalla *negative heat capacity* e sulla base della loro capacità di contrarsi senza limite in accordo con la seconda legge della termodinamica, valida anche per l'orizzonte degli eventi nei black hole (che sembrano possedere temperatura ed entropia). Si osserva però che secondo le teorie correnti l'intero universo sembra espandersi *contro* la gravità, che rappresenta un fenomeno unico e non una classe di fenomeni, costituendo, in questa visione, la freccia principale del tempo dalla quale dipendono le altre.

A proposito della teoria causale del tempo, un contributo decisivo deriva dalla teoria della *relatività ristretta* e dal conseguente concetto di simultaneità (cfr § 11), con l'applicazione delle trasformazioni di Lorentz:

It is well known that the Lorentz transformations, which express Einstein's special principle of relativity, permit the reversal of the time order of certain events, namely of those which cannot be connected by causal chains. Time order is invariant under Lorentz transformations only if the events in question can be connected by signals, that is, by causal chains. It follows that if time order were more than causal order the Lorentz transformations and Einstein's relativity could not be accepted¹⁸³.

Dalla definizione di Reichenbach degli eventi come *causalmente connessi* quando uno è causa dell'altro o un terzo è causa di entrambi, si può spiegare una correlazione tra gli eventi *a* e *b* da un punto di vista probabilistico, postulando una causa comune *c* passata, che genera un'asimmetria, detta *fork asymmetry* perché è una biforcazione che genera eventi tra loro correlati (nel futuro). In questo modo si può risalire nel passato a un ipotetico evento iniziale che può aver generato tutti gli altri, ad esempio il *Big Bang*.

¹⁸⁰ [Zeh, 1999] pag. 5

¹⁸¹ [Landau e Lifšits, 1947b] edizione italiana pag. 42

¹⁸² [Zeh, 1999] pag. 5-6

¹⁸³ [Reichenbach, 1956] pag. 25

Sulla base di questo principio di *causalità*, Reichenbach ha analizzato i processi di tipo meccanico e quelli di tipo termodinamico, concludendo «that only irreversible processes define a unidirectional causality»¹⁸⁴.

Si difende il punto di vista che la freccia del divenire, approfondita anche nei seguenti due paragrafi, sia primitiva e connessa all'asimmetria causale, quindi oltre il semplice ordine degli eventi, con le seguenti considerazioni¹⁸⁵:

- la causalità presuppone il divenire temporale (principio sostenuto anche da Gödel nella sua congettura sul tempo); grazie al divenire assoluto le cause possono essere concepite come generatrici dei loro effetti
- grazie a questo divenire, una ontologia di eventi puntiformi presuppone il loro divenire assoluto, come accade nella *relatività ristretta* e nella *relatività generale*, nelle quali gli eventi sono separati da intervalli di tipo tempo
- «gli eventi *accadono* per definizione, perché *esistere e accadere sono per essi la medesima cosa*. Poiché l'accadere è una caratteristica fondamentale associata all'ontologia su cui poggia la fisica relativistica, ne segue un argomento a favore del carattere primitivo o fondamentale del divenire rispetto alla causalità.»¹⁸⁶ Si può quindi riassumere che «è solo quando si hanno varietà spaziotemporali nelle quali si può distinguere il passato dal futuro [...] che la topologia dello spaziotempo si può *ridurre* alla relazione di connettibilità causale tra eventi»¹⁸⁷.

Su causalità e freccia del tempo si riassumono le conclusioni citando [Dorato, 2013]:

In conclusione, la freccia del divenire fonda quella causale, mentre quest'ultima fonda quelle della nostra esperienza e, tramite il principio della causa comune, anche quelle fisiche dell'entropia e della radiazione. In una parola, l'asimmetria fondamentale dalla quale tutte le altre direttamente o indirettamente dipendono è quella del venire in essere in successione [...] presupposto anche dall'ontologia della fisica relativistica classica.¹⁸⁸

Non si può dimenticare la precisazione di Rovelli nel merito della causalità:

La distinzione fra cause e effetti non ha significato nella descrizione microscopica dei fenomeni. Al livello dei fenomeni microscopici si hanno regolarità, leggi fisiche, probabilità, e queste nozioni non distinguono fra passato e futuro. La distinzione fra passato e futuro è una proprietà della storia dell'universo descritta dalle variabili che chiamiamo macroscopiche. Solo per queste possiamo parlare di cause.¹⁸⁹

¹⁸⁴ [Reichenbach, 1956] pag. 24-32 passim

¹⁸⁵ [Dorato, 2013] pag. 113-117 passim

¹⁸⁶ [Dorato, 2013] pag. 115

¹⁸⁷ [Dorato, 2013] pag. 116; su questa posizione di Dorato si mantengono delle riserve, considerando che l'esistenza di varietà spaziotemporali è una realtà antropica, della quale sicuramente la Natura può fare tranquillamente a meno, presupponendo la causalità piuttosto che l'esistenza del tempo, cfr le *Conclusioni epistemologiche*

¹⁸⁸ [Dorato, 2013] pag. 117

¹⁸⁹ [Rovelli, 2023] pag. 137; probabilmente Rovelli si riferisce a un principio interpretativo della realtà su basi deterministiche di causa ed effetto; sul concetto di *causa* cfr le *Conclusioni epistemologiche* e l'Allegato A3 *Sulla causalità*

Si osserva come non sia tanto irreversibile il tempo quanto piuttosto lo siano i processi che si svolgono *nel* tempo, quantomeno nella prospettiva antropica (cfr le *Conclusioni epistemologiche*).

§ 5 Tempo, termodinamica, evoluzione

Una articolata ricostruzione degli scenari evolutivi dell'universo, sempre conseguenti a un *Big Bang* iniziale, è sviluppata da [Penrose, 2004], basata sull'occupazione di 'cellette' di diverso volume in uno spazio delle fasi a 6 dimensioni contenente le velocità e le posizioni (non il tempo) ad esempio di barioni. In particolare si osserva che la gravitazione ha un comportamento peculiare rispetto all'entropia, considerata come misura della 'casualità' di un sistema¹⁹⁰. Concettualmente il commento di Boltzmann fu: «it is extremely probable that H is very near to its minimum value; if it is greater, it may increase or decrease, but the probability that it decreases is always greater.»¹⁹¹

Ad esempio se si considera l'energia del Sole ricevuta dalla Terra tramite fotoni ad alta energia, questa viene poi diffusa tramite un maggior numero di fotoni termici a bassa energia, pertanto il minor numero di fotoni del Sole significa un numero minore di gradi di libertà, ovvero una regione più piccola dello spazio delle fasi, quindi un'entropia più piccola dei fotoni restituiti nello spazio dalla Terra. La bassa entropia del Sole è anche una indicazione della sua distanza dall'equilibrio termico nella regione che occupa.

Il fatto che la gravità sia solo attrattiva descrive un comportamento dell'entropia opposto rispetto ad esempio a quello di un gas, che se concentrato in piccole regioni equivale a bassa entropia, disperso in un volume equivale ad alta entropia. Invece un sistema uniformemente distribuito di corpi gravitanti rappresenta un'entropia relativamente bassa, mentre si ottiene entropia alta quando i corpi gravitanti si agglomerano. In particolare, nel caso del collasso gravitazionale di una stella in un buco nero, l'entropia raggiunge valori considerevoli ma non diverge, essendo proporzionale all'area finita dell'orizzonte degli eventi del buco nero stesso¹⁹².

¹⁹⁰ L'entropia definita da Boltzmann può essere espressa dalla relazione $S = k_B \ln V$, dove k_B è la costante di Boltzmann, V è il volume che contiene il punto descritto dalle 6 coordinate nello spazio delle fasi considerato; in questo paragrafo si fa riferimento a [Penrose, 2004], edizione italiana capitolo 27 passim

¹⁹¹ [Boltzmann, 1895] pag. 415; l'entropia di un sistema è stata indicata originariamente con la lettera H , nell'ambito del c.d. *Teorema H*. Si evidenzia nel merito l'osservazione di [Mach, 1883] edizione italiana pag. 243: «[...] l'entropia dell'universo, se potesse essere determinata, costituirebbe una specie di misura assoluta del tempo.»

¹⁹² Secondo la formula di Bekenstein (1947-2015) - Hawking (1942-2018), l'entropia di un buco nero è $S_{BH} = \frac{A}{4} \frac{k_B c^3}{G \hbar}$, dove A è l'area superficiale dell'orizzonte degli eventi del buco nero, k_B è la costante di Boltzmann, c è la velocità della luce, G è la costante gravitazionale universale, $\hbar$ è la costante di Planck ridotta. La relazione si può esprimere anche in funzione della massa m del buco nero $S_{BH} = 2\pi m^2 \frac{k_B G}{\hbar}$ ([Penrose, 1989] edizione italiana pag. 436-437). «L'orizzonte degli eventi non è una superficie materiale, è soltanto una particolare (iper)superficie dello spaziotempo che separa i posti da cui possono sfuggire segnali da quelli da cui nessun segnale può sfuggire, essendo inesorabilmente catturato dal buco nero.» [Penrose, 2004],

La gravità ha avuto un comportamento diverso dagli altri campi, nelle fasi iniziali dell'ipotizzato *Big Bang*, perché non è stata 'termalizzata', ovvero non ha subito quella forte riduzione termica che ha interessato la materia - energia, rimanendo «in disparte, con i suoi gradi di libertà in attesa: la seconda legge [della termodinamica, relativa all'entropia] entrerebbe quindi in gioco quando questi gradi di libertà iniziano a essere impegnati. Questo non ci dà soltanto una seconda legge, ma ce ne dà una nella forma particolare che osserviamo in Natura»¹⁹³.

In realtà l'origine dell'universo associata a un *Big Bang* cela un paradosso: l'inizio è associato a uno stato termico estremo in stato di equilibrio termodinamico in espansione, che però si riferirebbe a uno stato di massima entropia, mentre la seconda legge richiede che l'entropia iniziale sia a una sorta di minimo, non di massimo. Una risposta, probabilmente non corretta, è suggerita da Penrose stesso:

È vero, all'inizio il globo di fuoco era effettivamente in equilibrio termico, ma l'universo a quell'epoca era molto piccolo, Il globo di fuoco rappresentava lo stato di massima entropia possibile per un universo di dimensioni tanto piccole, ma quell'entropia era piccola rispetto a quella consentita per un universo delle dimensioni attuali. Nel corso dell'espansione, l'entropia massima consentita aumentava con le dimensioni dell'universo, ma l'entropia reale dell'universo rimase molto indietro rispetto al massimo consentito. La seconda legge ha origine in conseguenza del fatto che l'entropia reale tende sempre a raggiungere questo massimo consentito.¹⁹⁴

Questa risposta non sembra corretta perché «nel caso di un modello di universo (spazialmente chiuso) che infine invertisse la sua espansione per concludere la sua esistenza in un *big crunch* tornerebbe ad applicarsi in definitiva lo stesso ragionamento, nella direzione del tempo inversa [... e] dovremmo imbatterci in un grosso conflitto con la seconda legge della termodinamica!» In realtà, a prescindere dal modello evolutivo dell'universo, il punto critico sarebbe rappresentato anche dai buchi neri, un sorta di 'riserva' di massima entropia difficilmente ignorabile.

Una nota probabilmente poco interessante per l'universo ma molto interessante dal punto di vista antropico è che noi esseri biologici siamo basati su una bassa entropia, le piante impiegando l'energia a bassa entropia del Sole nella fotosintesi (riducendo così la propria), gli animali mangiandole o mangiando qualcosa che mangia le piante e respirando l'ossigeno che esse rilasciano. La nostra principale attività energetica è la sostituzione dell'energia termica che diffondiamo, ad alta entropia, con energia a più bassa entropia (cibo e ossigeno), quindi più che dover aggiungere energia dobbiamo lottare con il secondo principio della termodinamica, espellendo energia ad alta entropia.¹⁹⁵

Da questo punto di vista Bucheri osserva:

L'irreversibilità dei fenomeni macroscopici naturali è sperimentalmente evidente e anche noi

edizione italiana pag. 771

¹⁹³ [Penrose, 2004], edizione italiana pag. 793

¹⁹⁴ [Penrose, 1989] edizione italiana pag. 421, anche per la citazione seguente

¹⁹⁵ Osservazioni da [Penrose, 2004], edizione italiana pag. 765-766 e [Penrose, 1989] edizione italiana pag. 407-408

esseri umani, sistemi macroscopici reali, ci evolviamo attraverso un processo vitale irreversibile durante il quale sviluppiamo il senso del fluire del tempo. La direzione di questo fluire, così per come la percepiamo (*la nostra freccia del tempo psicologica*), sembra accordarsi con la irreversibilità dei fenomeni, scandendo il prima e il dopo di ogni evento macroscopico, mentre a livello di una singola particella il tempo descritto dalla fisica non sembra avere alcuna direzione definita.¹⁹⁶

L'interpretazione di Barbour sull'entropia, peraltro critica sulla possibilità di applicare all'intero cosmo, che si pensa in espansione, i principi termodinamici sviluppati per ambienti delimitati ("box") ancora da Sadi Carnot (1796-1832) e da Boltzmann, è «that the history of the universe is not one of increasing disorder but rather of the growth of structure».¹⁹⁷ Un punto di vista affatto meno pessimista della annunciata 'morte termodinamica' come viene normalmente considerato il 'futuro ineluttabile'.

La visione di Rovelli a proposito della sequenza temporale nella meccanica quantistica o nella gravità quantistica almeno nei principi generali supera la visione iniziale di Boltzmann, ovvero l'ordine del tempo, il flusso o freccia del tempo sarebbe una sfocatura macroscopica che gli umani interpretano come disordine perché ignorano i dettagli dei sistemi.

La bassa entropia iniziale dell'universo potrebbe essere semplicemente una questione di prospettiva, in definitiva una questione antropica, che rappresenta il nostro punto vista attuale in un universo, tra tutti quelli che possono esistere o essere esistiti, che aveva la configurazione iniziale di bassa entropia che ha portato alla situazione attuale in una sua evoluzione verso livelli di entropia maggiori. Sempre Rovelli osserva come il nostro vivere e il nostro ricordare il passato, siano dirette conseguenze dell'aumento di entropia, ovvero il suo passaggio, discontinuo, da stati di entropia minore a stati di entropia maggiore. In definitiva in un mondo costituito

a livello fondamentale [... da] un insieme di accadimenti *non* ordinati nel tempo. [...] Ciascuna parte del mondo interagisce con una piccola parte di tutte le variabili il cui valore determina «lo stato del mondo rispetto a questo sottosistema». Per ogni parte del mondo ci sono quindi configurazioni del resto del mondo indistinguibili. L'entropia le conta. Gli stati con più configurazioni indistinguibili sono più frequenti, e quindi gli stati di massima entropia sono quelli che genericamente descrivono 'il resto del mondo' visto da un sottosistema. In maniera naturale, a questi stati è associato un flusso rispetto al quale appaiono in equilibrio. Il parametro di questo flusso è il tempo termico.¹⁹⁸

Le conclusioni di Rovelli sono:

Fra le innumerevoli parti del mondo, ce ne saranno di particolari per le quali gli stati associati a una estremità del tempo termico hanno *poche* configurazioni. Per *questi* sistemi il flusso non è

¹⁹⁶ [Buccheri, 2005] pag. 140

¹⁹⁷ Julian Barbour (1937-) in [Barbour, 2020] pag. 14

¹⁹⁸ [Rovelli, 2017b] pag. 135

simmetrico; l'entropia aumenta. Questa crescita è ciò che noi sentiamo come fluire del tempo.¹⁹⁹

Il tempo nel nostro pensiero è orientato perché il nostro pensiero è esso stesso un fenomeno irreversibile. Perché noi siamo fenomeni irreversibili.²⁰⁰

Il motivo per cui ricordiamo il passato, e non il futuro, sta interamente nel fatto che l'universo era più lontano dall'equilibrio in un momento del passato di quanto non lo sia ora. Se un sistema raggiunge poi l'equilibrio completo, non vi sono più tracce, non vi è più memoria, non vi è nulla che distingua il passato dal futuro.²⁰¹

Poiché quindi «in un sistema in equilibrio nessun fenomeno permetterebbe di distinguere il passato dal futuro, non potremmo dire in che direzione va il tempo²⁰²» e si ritornerebbe al concetto di Aristotele sul tempo come misura del movimento e del cambiamento (cfr § 1), considerando movimento e cambiamento riferiti all'entropia, e al suo non esistere in loro assenza.

Nel saggio *Tra il Tempo e l'Eternità* [Prigogine e Stengers, 1988] gli autori descrivono la creazione dell'universo conseguente a *fluttuazioni quantistiche del vuoto* inizialmente proposto in [Brout, Englert e Gunzig²⁰³, 1978] e concludono che debba esistere «un tempo irreversibile latente, presupposto dalle fluttuazioni di questo vuoto. [...] Il tempo precede l'esistenza»²⁰⁴. Si osserva personalmente una criticità in questa impostazione, perché attribuisce al vuoto una esistenza necessaria ma il vuoto non è il *nulla*, cioè l'inesistente, quindi il problema dell'inizio dell'universo sembra semplicemente *spostato*. In effetti il problema era più quello dell'*inizio* del tempo, che gli autori trattano come segue senza avanzare una proposta conclusiva, come invece si propone nelle proprie *Conclusioni epistemologiche*:

Non possiamo pensare a una nascita assoluta del tempo. Possiamo parlare del tempo della nostra nascita, di quello della fondazione di Roma, o di quello della comparsa dei mammiferi, e anche quello della nascita dell'universo. Ma il problema di sapere «quando è iniziato il tempo» sfugge più che mai alla fisica, così come sfugge senza dubbio anche alle possibilità del nostro linguaggio e della nostra immaginazione. Non possiamo pensare l'origine del tempo, ma solo le «esplosioni entropiche» che lo presuppongono e che sono creatrici di nuove temporalità, produttrici di nuove esigenze caratterizzate da tempi qualitativamente nuovi. Il tempo «assoluto», che precede ogni esistenza e ogni pensiero, ci colloca dunque in questo luogo enigmatico che assilla la tradizione filosofica, tra il tempo e l'eternità.²⁰⁵

Sulla base delle conoscenze cosmologiche di fine XIX secolo, Boltzmann scrisse una risposta alle critiche di Ernst Zermelo (1871-1953) al *Teorema H*, basate sul *teorema di ricorrenza* di Poincaré²⁰⁶, che può essere interpretata ancor oggi come una possibile con-

¹⁹⁹ [Rovelli, 2017b] pag. 135 e passim

²⁰⁰ [Rovelli, 2023] pag. 121

²⁰¹ [Rovelli, 2023] pag. 114

²⁰² [Rovelli, 2023] pag. 120

²⁰³ Robert Brout (1928-2011), François Englert (1932-), Edgar G. S. (1938-)

²⁰⁴ [Prigogine e Stengers, 1988] edizione italiana pag. 160

²⁰⁵ [Prigogine e Stengers, 1988] edizione italiana pag. 161

²⁰⁶ Il *teorema di ricorrenza* «dimostra che l'evoluzione di un sistema dinamico lo farà sempre passare nuovamente attraverso stati vicini quanto si vuole al suo stato iniziale» [Prigogine e Stengers, 1988] edizione italiana pag. 214; Zermelo sosteneva che poiché il comportamento antitermodinamico è tanto consistente con

gettura sulle configurazioni entropiche della ‘nostra parte’ di universo, come normalmente osserviamo che *localmente* l’entropia può diminuire²⁰⁷:

Noi - scrive Boltzmann - abbiamo la scelta di due tipi di immagine. O assumiamo che l’intero universo è al momento attuale in uno stato assai improbabile. Oppure assumiamo che gli eoni durante i quali si svolge questo stato improbabile, e la distanza da qui a Sirio, sono *minuscoli* a confronto con l’età e la grandezza dell’universo intero. In tale universo, che nel suo insieme si trova in un equilibrio termico, e perciò è morto, si possono trovare qua e là delle regioni relativamente piccole della grandezza della nostra galassia²⁰⁸, regioni (che possiamo chiamare “mondi”) che deviano in modo significativo dall’equilibrio termico per tratti relativamente brevi di quegli “eon” di tempo. Entro questi mondi, le probabilità del loro stato (cioè l’entropia) aumenteranno con la stessa frequenza con cui diminuiscono. Nell’universo nel suo insieme le due direzioni del tempo sono indistinguibili, esattamente nello stesso modo in cui nello spazio non c’è un sopra e un sotto. [...] A me pare che questo modo di vedere le cose è il solo che ci permetta di capire la validità della seconda legge, e la morte termica di ogni singolo mondo, senza invocare un mutamento unidirezionale dell’intero universo da un definito stato iniziale ad uno stato finale.²⁰⁹

Il considerare una direzione evolutiva privilegiata nell’universo *sembra* suggerire una freccia del tempo ma potrebbe in realtà essere semplicemente una *freccia logica di evoluzione causale degli eventi*²¹⁰, la misura ‘antisimmetrica’ dei quali potrebbe essere proprio l’entropia stessa, un parametro che riguarda la scarsità di energia sfruttabile per ulteriori evoluzioni ma non il tempo, in nessun modo nemmeno indiretto.

Il punto di vista di Prigogine, basato sugli studi delle strutture dissipative nei sistemi termodinamici lontani dall’equilibrio²¹¹, è basato su una sorta di dialettica tra entropia e gravitazione, l’esito della quale può generare una complessità che ancora non è alla portata della nostra interpretazione, che l’autore lega in modo un po’ funambolico al concetto di ‘vita’ nel senso di ‘essere vivente’²¹²:

Non possiamo prevedere l’avvenire della vita o della nostra società o dell’universo. La lezione del secondo principio è che questo avvenire rimane aperto, legato com’è a processi sempre

le leggi microscopiche quanto quello termodinamico, nessuno dei due può essere spiegato da queste leggi; l’obiezione non tiene però in debito conto i tempi associati alla probabilità che questo accada, lo stesso Boltzman calcolò che il tempo medio necessario al ritorno nel macrostato di partenza era dell’ordine di $10^{10^{23}}$ quantità impressionante a prescindere che si tratti di anni o secondi, quindi l’obiezione di Zermelo era, nella realtà, inconsistente

²⁰⁷ Parere personale; mutatis mutandis a proposito delle dimensioni, sulla base della teoria del *Big Bang*, con un universo ‘giovane’ e soprattutto ‘unico’ al quale si potrebbe estendere lo stesso stato di equilibrio termodinamico, la congettura di Boltzmann non regge ma può reggere nell’ipotesi di un universo infinito sia spazialmente sia temporalmente, come personalmente considerato; le posizioni di Penrose sulle condizioni locali degli stati di improbabilità sono analoghe ma diverse perché presuppongono un’unica espansione di tutto l’universo

²⁰⁸ Al tempo in cui scriveva Boltzmann e fino alle pubblicazioni di Hubble nel 1929, si considerava la nostra galassia come intero universo, sembra quindi fondato interpretare il ragionamento nella risposta di Boltzmann come un ‘isolare’ l’universo conosciuto da un universo infinito o smisuratamente più grande dell’universo conosciuto

²⁰⁹ [Prigogine e Stengers, 1988] edizione italiana pag. 31 e 214

²¹⁰ Cfr Allegato A3 *Sulla causalità*

²¹¹ Studi che gli valsero il premio Nobel per la Chimica nel 1977

²¹² Questo punto di vista non viene approfondito ma la seguente citazione ne conserva traccia

nuovi di trasformazione e di aumento della complessità. Gli sviluppi recenti della termodinamica ci propongono dunque un universo in cui il tempo non è né illusione né dissipazione, ma nel quale il tempo è creazione.²¹³

In una visione quasi poetica, Weyl scrisse:

Il mondo oggettivo semplicemente è, non accade. Solo allo sguardo della mia coscienza, che striscia verso l'alto lungo la linea della vita del mio corpo, una sezione di questo mondo prende vita come un'immagine fugace nello spazio che cambia continuamente nel tempo.²¹⁴

Per chiudere il paragrafo sulla posizione antropica si cita Douglas Adams (1952-2001):

The fact that we live at the bottom of a deep gravity well, on the surface of a gas covered planet going around a nuclear fireball 90 million miles away and think this to be normal is obviously some indication of how skewed our perspective tends to be.²¹⁵

²¹³ [Prigogine, 1988] pag. 81

²¹⁴ [Weyl, 1927] edizione italiana

²¹⁵ [Adams, 2002] citazione di uno speech tenuto al convegno “Digital Biota 2”, Cambridge, settembre 1998

D Ruolo del tempo nel *paradigma* di espansione dell'universo

*La relazione tra spostamento verso il rosso e distanza che Hubble vide nelle nebulose ha preso il nome di legge di Hubble. Per lo stesso motivo [...] la relazione tra periodo e luminosità che gettò le basi per le scoperte di Hubble andrebbe giustamente rinominata legge di Leavitt.*²¹⁶

Dava Sobel

§ 6 Redshift

Utilizzando il più grande dei telescopi di Mount Wilson in California, verso la fine degli anni venti del Novecento Edwin Hubble divenne famoso per aver stimato le distanze approssimative di un gruppo di *nebulose* (così venivano chiamate le galassie) grazie allo studio delle curve di luce delle stelle variabili Cefeidi²¹⁷, scoprendo anche che le galassie erano costituite da miliardi di stelle e con misure paragonabili alla nostra galassia, che quindi non poteva costituire l'intero universo come si credeva al tempo. Confermò inoltre, misurando lo spostamento verso il rosso delle righe di emissione negli spettri (*redshift*), che queste *nebulose* sembravano allontanarsi da noi, con una velocità che aumentava con la distanza, secondo un parametro di proporzionalità $H(t_u)$ funzione del tempo, detto *parametro di Hubble*, indicato come H_0 e considerato costante se calcolato al valore attuale²¹⁸ (cfr anche § 17).

Lo scopritore del redshift di sorgenti cosmologiche e delle prime stime delle velocità di recessione (e di avvicinamento, per Andromeda) fu però Vesto Slipher (1875-1979) al Lowell Observatory in Arizona, che pubblicò nel 1913 il lavoro *The radial velocity of the Andromeda Nebula*, anche se non riuscì a dare una interpretazione sistematica delle velocità che aveva osservato. Le stime furono ripetute e ampliate in séguito anche da altri astronomi e analizzate teoricamente nei modelli cosmologici da Georges Lemaître (1894-1966).

Lemaître pubblicò nel 1927, in francese, le sue congetture sulla singolarità iniziale e i modelli cosmologici di Einstein e di Willem De Sitter (1872-1934) e sull'espansione dell'universo come interpretazione del redshift²¹⁹; il lavoro di Lemaître divenne noto solo quando fu

²¹⁶ [Sobel, 2016] pag. 327-328; la citazione dell'ottima Dava Sobel (1947-) vuole essere un omaggio a Henrietta Leavitt (1868-1921), che scoprì la legge di variazione di luminosità delle stelle Cefeidi, utilizzata da Hubble per la determinazione delle distanze quindi fondamentale per poter ricavare la legge omonima, senza però che egli riconoscesse mai l'importanza della scoperta e la professionalità della ricercatrice

²¹⁷ Le Cefeidi possono essere utilizzate come *standard candle* (sorgenti di luminosità nota) perché il loro periodo è proporzionale alla luminosità quindi alla magnitudine assoluta (M), che insieme a quella apparente (m) consente di ottenere la stima della distanza (d , in parsec) con il cosiddetto *modulo di distanza* (salvo assorbimento della radiazione da parte del mezzo intergalattico): $m - M = 5 \lg(d) - 5$

²¹⁸ [Hubble, 1929]

²¹⁹ [Lemaître, 1927]; egli le pubblicò dopo aver cercato invano di coinvolgere Einstein, che nella sua convinzione dell'universo statico lo respinse con la famosa affermazione: «I suoi calcoli sono corretti ma la parte fisica è abominevole»; citato da George Smoot (1945-) in [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 49

ripubblicato in inglese nel 1931 da Arthur Eddington (1882-1944) col titolo *The expanding universe*, quando Eddington (uno degli astronomi più influenti dell'epoca) cambiò parere sulle idee di Lemaître che aveva inizialmente respinto senza approfondire²²⁰.

§ 7 Interpretazione del redshift

Il redshift z , spostamento verso il rosso che si osserva nelle righe spettroscopiche di sorgenti cosmologiche, è definito come

$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1 \quad [7_1a]$$

$$z \equiv \frac{\nu_e - \nu_0}{\nu_0} = \frac{\nu_e}{\nu_0} - 1, \quad [7_1b]$$

dove la lunghezza d'onda λ_e e la frequenza ν_e sono relative al momento dell'emissione del fotone e λ_0 e ν_0 sono quelle osservate²²¹; tale redshift è comunemente interpretato come effetto Doppler lungo la LOS (line of sight), dovuto al movimento con velocità v della sorgente rispetto all'osservatore in un universo in espansione (*circostanza del redshift* $[\eta]$, definito alla fine del presente paragrafo)²²²

$$z \approx \beta = v/c \quad \beta \ll 1 \text{ ovvero } v \ll c \quad [7_2a]$$

$$z = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1 \quad \forall v < c. \quad [7_2b]$$

Nell'universo locale (circostanza mantenuta nella parte I e nella parte II dell'approfondimento), ovvero a distanze significativamente inferiori al raggio di Hubble (circa 4.3 Gpc , cfr [17_1c]), la metrica applicabile è quella euclidea di Minkowski (cfr nota sullo spaziotempo di Minkowski nel § 18), dove gli effetti di curvatura sono localmente trascurabili, la coordinata temporale si suppone universale²²³ e il redshift è interpretato come effetto Doppler; per distanze maggiori si adotta la metrica spaziotemporale di Robertson-Walker (cfr § 20), che considera le variazioni con il *fattore spaziale di scala* cosmico [7_3a], che portano al tradizionale redshift cosmologico

²²⁰ Racconto di [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 49-51

²²¹ Si adotta la convenzione che il pedice $_o$ si riferisca sempre al tempo attuale e/o all'osservatore

²²² Per velocità non trascurabili rispetto a c , il redshift deve essere corretto moltiplicandolo per il fattore di Lorentz $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ e dalla [7_2a], sommando 1 a entrambi i membri, si ottiene $1+z = (1+v/c)\gamma$ da cui la relazione [7_2b], che si ottiene anche dalla relazione relativistica $\nu_e = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \nu_0$, conseguente alla relazione più generale $\nu_e = \gamma(1+\beta \cos \theta) \nu_0$ tra le frequenze osservate ed emesse tra sorgenti in reciproco moto inerziale con velocità v , dove θ è l'angolo tra la LOS e la direzione di movimento della sorgente ($\theta=0$ per LOS cosmologica)

²²³ Questi concetti sono approfonditi nel sèguito

$$z = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} - 1 \quad \text{ovvero} \quad a(t_u) = \frac{R(t_u)}{R_0} = \frac{1}{1+z} \quad [\text{adimensionale}] . \quad [7_2c]$$

Poiché tutti gli oggetti cosmologici remoti sono visti allontanarsi, salvo moti propri, le osservazioni sono state considerate la conferma che l'universo fosse in espansione, quindi che tutte le distanze aumentassero e ne conseguissero le velocità misurate. La spiegazione classica (in due dimensioni) di questa interpretazione utilizza l'analogia del palloncino sul quale siano indicati dei riferimenti, che all'espandersi del palloncino si allontanano tutti reciprocamente (o in tre dimensioni l'analogia del panettone con l'uvetta, quando lievita).

Nella cosmologia tradizionale formalmente si presuppone, in base al *principio cosmologico*, un universo isotropo e omogeneo costituito da un *fluido cosmico* e l'esistenza di un *tempo universale* t_u per gli osservatori fondamentali comoventi (cfr § 19 per l'interpretazione associata all'ipotesi [a] come causa del redshift); in questo universo si definisce un *fattore spaziale di scala* $a(t_u)^{224}$, funzione adimensionale del tempo t_u , che rappresenta la proporzionalità tra le grandezze $R(t_u)$ e R_0 quindi l'espansione relativa dell'universo

$$a(t_u) \equiv \frac{R(t_u)}{R_0} \quad [\text{adimensionale}] , \quad [7_3a]$$

dove R_0 è il valore della lunghezza $R(t_u)$ per $t_u = t_0$ (il tempo attuale).

Una espansione radiale, ovvero una *distanza propria* tra eventi separati nel tempo, sarà espressa come

$$R(t_u) = r a(t_u) \quad [\text{m}] \quad [7_3b]$$

con r *coordinata comovente*²²⁵.

Per una trattazione formale si rimanda a [Landau e Lifšits, 1947a], edizione italiana pag. pag. 470 e pag. 478-480, nel quale si evidenzia anche matematicamente come, in un universo euclideo infinito, la parziale *regione visibile* dello spazio rappresenti la sezione dello spaziotempo quadridimensionale tagliata dal *cono di luce*, che rappresenta quindi un orizzonte degli eventi conoscibili.

Il paradosso dovuto alla necessità di considerarsi al di *fuori* da quell'universo per poter valutare l'aumento delle distanze tra i riferimenti all'espansione, perché per chi è *dentro* quell'universo le distanze non aumenterebbero (o diminuirebbero, procedendo verso il passato), se anche il *metro campione* (che sia il metro di 100 cm, l'AU oppure il Mpc) fosse intrinsecamente legato a quello spazio e aumentasse, o diminuisse, anch'esso all'aumentare (o diminuire) dello spazio, è evitato considerando che «only distances between clusters of galaxies and greater distances are subject to expansion. Only at this gigantic scale of averaging does the notion of homogeneity make sense. Not so at smaller distances.»²²⁶ In

²²⁴ Comunemente detto *fattore di scala*

²²⁵ La distanza comovente tra due osservatori fondamentali è costante, mentre la distanza propria tra due osservatori fondamentali varia col tempo, secondo il fattore spaziale di scala $a(t_u)$

²²⁶ Charles Misner [1932-2023], Kip Thorne [1940-], John Archibald Wheeler [1911-2008] in *Gravitation* [Misner, Thorne, Wheeler, 2017] pag. 719

particolare, uno studio²²⁷ approfondisce le conseguenze dell'espansione a livello atomico, considerando un modello costituito da oscillatori armonici per simulare il comportamento di atomi o strutture a scala atomica in un universo spazialmente piatto descritto dalle equazioni di Robertson-Walker, concludendo

Our model is so simple that it lends itself to a full and exact quantum treatment. This, in spite of the model's crudeness, permits a clear analysis of to what extent a bound system grows influenced by the overall cosmic expansion. It turns out that the degree of expansion of a bound system appears to be fundamentally determined by a characteristic time scale associated with the system. Of course such a time scale is strongly correlated to the size of the bound structure, and our elementary model indicates that even galaxy clusters essentially do not grow in response to the general Hubble flow.²²⁸

Riflettendo su questa criticità, si è pensato di cercare una interpretazione affatto alternativa per il *redshift* osservato che potesse reggere, sulla base della fisica nota, al confronto con i dati osservativi. Lo stesso Hubble in realtà non era del tutto convinto dall'interpretazione dell'espansione dell'universo con la recessione delle sorgenti, quando analizzando i risultati delle osservazioni con il telescopio da 100 pollici (con lo scopo di promuovere la realizzazione di uno da 200 pollici) scrisse:

it seems likely that red-shifts may not be due to an expanding universe, and much of the current speculation on the structure of the universe may require re-examination. The significant data, however, were necessarily obtained at the very limit of a single instrument, and there were no possible means of checking the results by independent evidence. Therefore the results must be accepted for the present as suggestive rather than definitive.²²⁹

e nello studio pubblicato con Richard Tolman (1881-1948), sul fatto di attribuire il redshift a un moto di recessione della galassia («the most obvious explanation»):

Nevertheless, the possibility that the redshift may be due to some other cause, connected with the long time or distance involved in the passage of light from nebula to observer, should not be prematurely neglected²³⁰.

Nei decenni successivi al consolidamento della teoria di Hubble sono state sviluppate molte teorie alternative all'effetto Doppler per la spiegazione del redshift osservato, un paper di Henri Rebol di oltre quarant'anni fa²³¹, cataloga e classifica addirittura 770 pubblicazioni (elenco aggiornato al 1980) di spiegazioni alternative²³². Nel presente approfondimento si è voluto esplorare alcune nuove congetture, non incluse in quell'elenco ed esaminate analiticamente nel séguito, ad esempio ipotizzando che il fluire del tempo non sia costante ma vari in funzione del tempo stesso, oppure che si verifichi una dissipazione dell'energia associata a una particella in viaggio a séguito di interazione con una densità di energia diffusa, come di

²²⁷ [Lemos, 2018]

²²⁸ [Lemos, 2018] pag. 6

²²⁹ [Hubble, 1947] pag. 165-166

²³⁰ [Hubble, Tolman, 1935] pag. 1-2

²³¹ [Rebol, 1981]

²³² L'autore precisa di considerare *classical*, or *trivial*, «a redshift which can be easily explained by a combination of the three following effects: Doppler, Schwarzschild, Friedmann.» [Rebol, 1981] pag. 129

séguito considerato a proposito dei fotoni, essendo peraltro intrinsecamente il redshift stesso una perdita di energia del pacchetto d'onda originario (ipotesi formalizzate nel § 8), ovvero una interazione della radiazione lungo il percorso del fotone (ipotesi analizzata nell'Allegato A4, nel quale sono anche approfondite alcune di queste congetture pubblicate che considerino le interazioni fotone-fotone).

Come ribadito anche nel séguito, si condivide del tutto il punto di vista di Martín López-Corredoira (1970-):

Perhaps Hubble was not so convinced by the idea of the expansion of the Universe, but following generations decided to claim that Hubble's discovery is a proof of the expansion, due mainly to the absence of a good theory which explains the possible phenomenological fact of alternative proposals. [...] The expansion was preferred and the phenomenological approaches which were not supported by present-day theory would be doomed to be forgotten. This position would be right if our physics represented all the phenomena in the Universe, but from a deductive-empiricist point of view we should deduce theories from the observations, and not the opposite.²³³

Se si considera un fotone che proviene da una transizione energetica, in una sorgente considerata priva di moto proprio, corretto anche per l'osservatore, ipoteticamente giunto senza 'altre' interazioni lungo il percorso, esso sarà

$$\begin{aligned} \text{- generato con} \quad \lambda_e &= \frac{c}{\nu_e} = c T_e = c \Delta(t_u)_e \\ \text{- osservato con} \quad \lambda_0 &= \frac{c}{\nu_0} = c T_0 = c \Delta(t_u)_0 = c \xi \Delta(t_u)_e \end{aligned}$$

da cui si ricava

$$\lambda_0 = \xi \lambda_e, \quad [7_4]$$

definendo ξ un parametro adimensionale²³⁴ che determina un aumento dell'intervallo di tempo Δt_u associato al periodo dell'onda elettromagnetica del fotone (un *allungamento* o *rallentamento* rispetto al tempo t_u); poiché si osserva $\lambda_0 > \lambda_e$, per ogni istante successivo a quello iniziale dovrà essere

$$\xi > 1. \quad [7_5]$$

Si possono ipotizzare due circostanze nelle quali si può sviluppare lo spostamento redshift delle lunghezze d'onda nelle sorgenti cosmologiche remote osservate²³⁵:

circostanza del redshift $[\eta]$ l'universo è in espansione: la sorgente si muove allontanandosi con velocità di recessione v e da [7_1a] e da

²³³ [López-Corredoira, 2019] pag. 2

²³⁴ Il parametro ξ avrebbe lo stesso segno dello scorrere del tempo ordinario dal passato al futuro (dalla sorgente all'osservatore) ma viene comunemente considerato positivo il tempo a partire dal tempo attuale, quando è evidente se sia un intervallo verso il passato o verso il futuro

²³⁵ Circostanze chiamate η per 'Espansione' e σ per 'Statico', con riferimento all'universo

[7_2a] , poiché $\lambda_0 > \lambda_e$, si ricava, come abitualmente considerato, il redshift

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1 \quad v = cz > 0$$

circostanza del redshift [σ] l'universo non è in espansione quindi è statico: l'effetto del redshift osservato è interpretato come se si trattasse di una velocità ma la sorgente non è in allontanamento, le ipotesi sviluppate riguardano potenziali spiegazioni del fenomeno; da [7_1a] e [7_2a] , considerata la [7_5] si ricava il redshift

$$z_\xi = (\xi - 1) \quad v = cz_\xi > 0 \quad v = c(\xi - 1) > 0 \quad [7_6]$$

con v velocità osservata di recessione *apparente*.

Riassumendo tutte le relazioni precedenti, a prescindere dalle circostanze e dalle cause del redshift, si può scrivere la relazione generale

$$\xi = \frac{\Delta t_0}{\Delta t_e} = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} = \frac{v_e}{v_0} = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} = \frac{a(t_0)}{a(t_e)} = 1 + z = 1 + z_\xi \geq 1 . \quad [7_7]$$

§ 8 Ipotesi sulle cause del redshift

Considerando l'energia E_e associata al fotone al momento della sua emissione (da parte di una sorgente considerata priva di moto proprio) e l'energia E_0 al momento del suo arrivo e misurazione (al netto dei moti propri del misuratore), senza interazioni lungo il percorso, si ha

$$E_e = \frac{hc}{\lambda_e} \quad \text{e} \quad E_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{hc}{\xi \lambda_e} ,$$

da [7_4] e [7_5] si conclude che $E_0 = \frac{E_e}{\xi} \leq E_e$ quindi $\Delta E = \frac{hc}{\lambda_e} \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \leq 0$.

Il fotone sembra aver perso una quantità misurabile di energia ΔE viaggiando per un periodo significativo di tempo, rispetto all'energia nota del processo di emissione considerato, fenomeno inizialmente attribuito nel 1929 da Fritz Zwicky (1898-1974) a collisioni dei fotoni con altre particelle *materiali* e chiamato *tired light*, approfondito nell'Allegato A4.

Ma se in questo tempo il periodo della sua oscillazione associato alla sua energia è passato da T_e a T_0 , ovvero con la differenza $\Delta(t_u)_0 = \xi \Delta(t_u)_e$ con $\xi \geq 1$, significa anche che l'intervallo di tempo associato alla sua energia appare aumentato di un fattore ξ , ovvero il fluire del tempo intrinseco alla particella appare più lento rispetto al trascorrere del tempo universale.

Considerando valido il principio di conservazione dell'energia, è possibile pensare che l'energia sia stata dissipata ad esempio per interazione gravitazionale (con materia barionica

o altre sorgenti gravitazionali) oppure nell'attraversamento del *fluido cosmico* considerato *non vuoto* (ipotesi approfondita nell'Allegato A4).

Si considerano tre personali interpretazioni 'di massima':

- ipotesi [a]* ξ rappresenta un rallentamento del *tempo specifico* della particella
- ipotesi [b]* ξ è conseguenza delle interazioni gravitazionali lungo il percorso, che dissipano l'energia della particella, e non del trascorrere del tempo
- ipotesi [c]* ξ è conseguenza delle interazioni con il *fluido cosmico* lungo il percorso, considerato *non vuoto*, e non del trascorrere del tempo.

L'*ipotesi [b]* dovrebbe implicare comportamenti diversi lungo percorsi diversi, ovvero una sostanziale verificabile anisotropia di comportamento rispetto alle nostre osservazioni, in considerazione della non isotropia e non omogeneità della massa barionica quantomeno alla scala dell'universo locale (dove il redshift è comunque sempre presente), se si considera l'interazione gravitazionale conseguente solo alla presenza di massa barionica. In queste condizioni, l'esame dei valori corrispondenti a diversi percorsi dei fotoni (diverse sorgenti) dovrebbe poter dare indicazioni sulla validazione dell'*ipotesi [b]*, ad esempio confrontando sorgenti a pari distanza (misurata con *standard candle*) e diversa presenza barionica osservata (o stimata) lungo il percorso (lungo la LOS). In ultima analisi, una eventuale uniformità delle misure a prescindere dalla presenza barionica potrebbe viceversa indicare che le interazioni gravitazionali dovute a sorgenti non barioniche e non visibili (ad esempio la dark matter o concentrazioni di energia) sono prevalenti, nonché omogenee e isotrope (aspetti da approfondire). Oppure che valgono le *ipotesi [a]* o *[c]*.

Una criticità di questa ipotesi emerge anche dalla considerazione che un campo gravitazionale è conservativo e il potenziale di una particella interagente subisce un aumento, avvicinandosi alla buca di potenziale della sorgente, pari alla diminuzione al suo allontanarsi, a prescindere dalle traiettorie della particella, quindi la variazione complessiva dovuta all'interazione gravitazionale è nulla. Se l'interazione gravitazionale fosse relativa solo alla sorgente (il cosiddetto *redshift gravitazionale*²³⁶), sarebbero evidenti le anisotropie determinate dalle diverse caratteristiche gravitazionali delle sorgenti, a parità di distanza; l'effetto è stato osservato sperimentalmente ma come componente marginale del redshift, che in ogni caso presenta una proporzionalità con la distanza della sorgente, non direttamente correlabile con l'interazione gravitazionale ipotizzabile.

Riassumendo:

L'*ipotesi [a]* è approfondita nella sezione G e nella parte III sulla base di due congetture associate alla *circostanza del redshift* $[\sigma]$ e alle relazioni $[7_4]$, $[7_5]$ e $[7_6]$.

²³⁶ Il redshift gravitazionale non è considerato in questo approfondimento

L'ipotesi [b] è scartata direttamente per quanto sopra considerato.

L'ipotesi [c] è approfondita nell'Allegato A4, nella quale il ritardo dei segnali delle sorgenti remote, esclusa la responsabilità diretta dell'ente tempo, è attribuita al mezzo cosmico attraverso il quale i segnali di diffondono, l'etero (che nella congettura URD prende il posto dello spazio vuoto) e il suo contenuto di energia.

§ 9 Espansione dell'universo

All'epoca in cui Hubble misurò le velocità di recessione delle sorgenti cosmologiche, i modelli di universo erano pura speculazione teorica, non esistendo dati osservativi adeguati per verificarli. Una forte influenza era esercitata, all'inizio del secolo, da una concezione statica dell'universo, una sorta di *paradigma* condizionato dalla visione classica; perfino Einstein si fece influenzare e introdusse inizialmente la *costante cosmologica* Λ nelle equazioni di campo della *relatività generale* per impedire l'espansione dell'universo prevista dalle equazioni stesse originali²³⁷.

A questo *paradigma* seguì quello dell'espansione dell'universo, nel quale la *matrice disciplinaria*²³⁸ era fortemente legata all'autorità 'ex cathedra' di cui godevano Hubble prima e il suo erede spirituale Allan Sandage (1926-2010) in seguito, non solo nell'ambiente della ricerca astronomica ma anche nell'opinione pubblica grazie al giornalismo che fece di loro delle celebrità dell'astronomia. Queste circostanze oscurarono i meriti delle prime scoperte e delle deduzioni dei ricercatori citati nel § 6 e resero la vita difficile ad altri non allineati al *paradigma* del modello corrente dell'espansione, tra questi ad esempio il già citato Zwicky e negli anni '50 e '60 Fred Hoyle (2015-2001), Hermann Bondi (2019-2005), Thomas Gold (1920-2004) con la loro *steady state cosmology*, in contrasto con le teorie promosse inizialmente da Lemaître che prevedevano un iniziale *Big Bang* (termine peraltro coniato dallo stesso Hoyle).²³⁹

La *steady state cosmology* si ispirava a un *principio cosmologico perfetto*, per il quale l'universo deve apparire identico per qualunque osservatore fondamentale in qualunque tempo, quindi il *parametro di Hubble* [17_2] (cfr § 17) deve essere indipendente dal tempo.

²³⁷ Come noto, poi Einstein la ritrattò dichiarandola il suo errore più grande (come riferito da George Gamow, 1904-1968); di recente Λ è stata nuovamente adottata nei modelli cosmologici per giustificare la presunta accelerazione dell'espansione: è un termine positivo che viene attribuito all'*energia oscura* ovvero all'*energia del vuoto*, si ottiene dall'equazione di campo gravitazionale ponendo a zero le sorgenti del campo stesso (la distribuzione della materia e le sue proprietà fisiche descritte dal tensore energia-impulso $T_{ij} = 0$) ed esplicitandolo come tensore energia-impulso del vuoto, ottenendo $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \Lambda g_{ij}$; [Franceschini, 2018] pag.

7/20-21, 10/9-10

²³⁸ Cfr Allegato A2 e le interpretazioni di Kuhn

²³⁹ Molti 'dietro le quinte' del mondo dell'astronomia del Novecento sono narrati in dettaglio e con testimonianze anche dirette nell'interessante libro [Overbye, 1991]

Integrando la conseguente relazione

$$H(t_u) = \frac{\dot{a}(t_u)}{a(t_u)} = \frac{\dot{R}(t_u)}{R(t_u)} = \text{const}$$

si ottiene la soluzione $R(t_u) \propto e^{t/\tau}$ (dove τ rappresenta il tempo di Hubble [17_1b] utilizzato come tempo scala), ovvero una curva che tende a 0 per $t \rightarrow -\infty$ e che, non avendo origine nel tempo, esclude la possibilità del *Big Bang*.

Il fabbisogno di creazione di materia per compensare l'espansione è stato stimato in 1 atomo per m^3 per miliardo di anni, una quantità non osservabile. Il modello ha avuto un certo séguito anche perché non coinvolgeva il delicato problema filosofico della *creazione* e in fondo la necessità della creazione continua relativamente modesta di materia era più accettabile dell'ipotesi della creazione istantanea di tutta la materia dell'universo, come nella teoria del *Big Bang*.²⁴⁰ In merito agli elementi più pesanti dell'elio, la teoria dell'universo stazionario ne sosteneva la creazione nelle fornaci delle stelle, ma non spiegava l'abbondanza osservata di idrogeno ed elio, mentre la teoria del *Big Bang* ne sosteneva la creazione nell'istante iniziale, ma non spiegava la presenza degli elementi più pesanti che non avrebbero potuto sopravvivere in forma isotopica per il tempo considerato e dei quali non si osservava la distribuzione omogenea conseguente.²⁴¹ Grazie alla scoperta e allo sviluppo della radioastronomia²⁴², l'indecisione sui modelli fu superata a séguito delle analisi di conteggi di sorgenti (radio galassie) che hanno escluso gli scenari non evolutivi delle curve di luminosità, come quelli previsti nel modello dello stato stazionario.²⁴³ In particolare Jim Peebles (1935-) precisa:

«[...] if the universe were postulated to be opaque enough at radio wavelenghts to have caused the radiation background to relax to the observed very nearly thermal spectrum of the [MCR], space would be predicted to have been too opaque to have allowed the observations of distant radio sources».²⁴⁴

Queste criticità della *steady state cosmology* devono essere considerate nell'ipotesi di non espansione (circostanze del redshift $[\sigma]$, cfr § 7) della *congettura URD* (cfr Allegato A4), associata a un *fluido cosmico* non vuoto ma omogeneo e isotropo.

²⁴⁰ [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 60-65

²⁴¹ [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 65-68

²⁴² A opera di Karl Jansky (1905-1950), mentre stava sviluppando un progetto di antenne a onde corte (10-20 m) per il servizio telefonico atlantico per conto di Bell Telephone Laboratories, quando osservò un forte segnale che si ripeteva quotidianamente con un ritardo di 4 minuti, conseguenza evidentemente dell'origine cosmica, considerata la corrispondenza col giorno siderale

²⁴³ [Franceschini, 2018] pag. 7/16-17, 9/7-10

²⁴⁴ [Peebles, 1993] pag. 204

II TEMPO E RELATIVITÀ RISTRETTA

E § 10 *Simultaneità e presente oggettivo*

L'approfondimento in questa sezione E sulla *simultaneità* è di natura storica ed epistemologica.

Nelle lingue antiche erano assenti il termine *simultaneità* e le misure del tempo

were used primarily to tell *how long* a process lasted rather than *when* it occurred. Indeed, reviewing the whole history of science in antiquity, we recognize that hardly any need existed to employ the notion of simultaneity in an operationally significant way²⁴⁵.

Fecero eccezione le misure astronomiche, in particolare di Aristarco da Samo (circa 310-250) per la stima delle dimensioni e distanze del Sole e della Luna, ed Eratostene di Cirene (circa 267-194) per la stima della circonferenza terrestre.

Come accennato nel § 1, la posizione di Aristotele nel non voler parlare dello svolgimento del tempo è stata molto influente, se ancora Wittgestein scriveva nel suo *Tractatus*:

Non possiamo confrontare alcun processo con lo 'scorrer del tempo' - esso non v'è -, ma solo con un altro processo (ad esempio, con il movimento del cronometro). Quindi la descrizione del decorso temporale è possibile solo se ci basiamo su un altro processo.²⁴⁶

Un uso implicito della *simultaneità* si trova nei famosi paradossi di Zenone di Elea (489-431)²⁴⁷, un discepolo di Parmenide (circa 510-450), fondatore della scuola eleatica per la quale le nozioni di pluralità, moto, cambiamento e flusso del tempo contraddicevano la ragione e quindi erano illusioni. Nel merito, Bertrand Russel (1872-1970) ne enfatizzò l'importanza osservando che essi «have afforded grounds for all theories of space and time and infinity which have been constructed from this day to our own»²⁴⁸.

Si possono individuare due eventi fondamentali che hanno segnato un cambio radicale di interpretazione del concetto di *simultaneità*²⁴⁹:

- la scoperta della velocità finita della luce da parte di Ole Rømer (1644–1710) nel 1676²⁵⁰, dieci anni prima della pubblicazione dei *Principia mathematica* di Newton, che rendeva

²⁴⁵ [Jammer, 2006] pag. 18-19

²⁴⁶ [Wittgestein, 1921] proposizione 6.3611

²⁴⁷ Il paradosso dello stadio, il paradosso di Achille e la tartaruga, il paradosso della freccia, il paradosso del percorso di gara

²⁴⁸ Russel in *Our Knowledge of the External World* (George Allen & Unwin, London, 1926) pag. 183, citato da [Jammer, 2006] pag. 23

²⁴⁹ [Jammer, 2006] pag. 295-296

²⁵⁰ Rømer calcolò l'ordine di grandezza della velocità della luce (disponendo di una stima errata dell'unità astronomica AU) dal ritardo di 22 minuti, osservato già da Giovanni Cassini (1625-1712), nell'osservazione del transito della luna Io di Giove, osservato dalla Terra lungo la propria orbita nelle posizioni di congiunzione e di opposizione a Giove (dovendo la luce percorrere la maggiore distanza di 2 AU)

simultanei gli eventi solo se osservati dalla stessa distanza

- la pubblicazione della *Special Theory of Relativity* da parte di Einstein nel 1905²⁵¹, che rendeva la *simultaneità* dipendente dal sistema di riferimento inerziale considerato.

Nei paragrafi seguenti sono approfonditi alcuni aspetti della *simultaneità* rispetto ad alcune teorie della fisica, in termini moderni di analisi logiche e fisiche, nel § 14 è approfondita la sincronizzazione degli orologi necessaria per poter trattare la *simultaneità*.

§ 11 *Simultaneità e relatività ristretta*

Con diretto riferimento al § 3, senza prendere posizione in merito alla ipotizzata incompletezza della fisica, si approfondiscono alcuni tentativi per introdurre un presente oggettivo nella teoria della *relatività ristretta*; a parte il primo, presuppongono tutti un presente locale non cosmicamente esteso²⁵².

a) Presente rispetto a O = simultaneo rispetto a O

Premesso che il concetto di *simultaneità* traduce relativisticamente la comune nozione di *presente*, si può affermare che la *simultaneità* per un osservatore O relativamente al suo sistema di riferimento coincide con ciò che è presente per O . Sulla base della premessa [3_1] del presentismo se qualcosa è presente allora esiste, essendo

$$b \text{ S } a | O \Rightarrow b \text{ Pres } a | O \quad \text{e} \quad b \text{ Pres } a | O \Rightarrow b \text{ R } a | O .$$

La difficoltà da superare è che il concetto di *presente* è *assoluto*, mentre la *simultaneità* è *relativa* al sistema di riferimento. Poiché l'argomento pro *eternalismo* è una riduzione all'assurdo basata sul *presentismo* (cfr § 3), deve assumere esplicitamente tutto quello che questo assume, quindi anche il carattere assoluto del presente.

Non basta però, in quanto la *simultaneità* nella *relatività ristretta* presuppone sempre la scelta arbitraria di un sistema di riferimento inerziale, che quindi condiziona la nostra valutazione di un evento in base a una scelta, non in modo oggettivo. Come scrisse Gödel «the concept of existence, however, cannot be relativized without destroying its meaning completely»²⁵³.

La premessa [3_1] è quindi quantomeno controversa e indebolisce anche l'argomento a favore della tesi eternalista (cfr § 3).

²⁵¹ [Einstein, 1905a]

²⁵² In questo paragrafo si fa riferimento a [Dorato, 2013] cap. 4 passim

²⁵³ [Gödel, 1949] pag. 558

b) Presente = evento puntiforme

Si suppone che un presente reale non sia cosmicamente esteso ma appaia solo tale e che un evento presente in relatività non si estenda oltre sé stesso, cioè la realtà si esaurisca letteralmente in un punto (coordinata dell'evento, sulla base della sottostante metrica minkowskiana), affermando però che «degli eventi spazialmente e temporalmente remoti nulla si può affermare, né che esistono né che non esistono, e che solo l'evento qui-ora esiste in modo definito»²⁵⁴.

A vantaggio si può affermare che «se il presente deve essere oggettivo e assoluto, come vuole il presentismo, un punto-evento è un invariante e un punto-evento fisico può assolvere al compito di rendere oggettivo il presente».

Le criticità sono:

- il limite del presente istantaneo, che in genere non è o non ci appare tale e il presente fisico non si concilierebbe con quello della nostra esperienza
- l'identificazione degli eventi con un punto porterebbe tutti gli eventi a essere reali e presenti dal loro punto di vista, non essendo nessuno privilegiato, facendo di fatto sparire la differenza tra *presentismo* ed *eternalismo*
- la riduzione del presente a un punto sarebbe eccessivamente riduttiva e insufficiente a ricostruire tutta la nostra conoscenza del reale.

c) Presente = regione causalmente non connettibile

L'interpretazione di Hilary Putnam (1926-2016) in [Putnam, 1967], per la quale i punti esterni al cono di luce sono tutti da considerare ugualmente reali anche se non simultanei e non causalmente connettibili, è sostenuta anche da Robert Weingard (1942-1996) in [Weingard, 1972] per ragioni diverse, di séguito analizzate ma approfondite matematicamente nel § 15, nell'ambito di una interpretazione estesa dei postulati della *relatività ristretta*.

Con riferimento al diagramma di Minkowski della *Figura 1a*, la relazione tra gli eventi in P e quelli esterni al cono di luce (ad esempio a , b) è da considerarsi convenzionale, perché per l'impossibilità di misurare la velocità della luce se non in un percorso chiuso (*round-trip*), si possono considerare le velocità medie di andata e di ritorno lungo la stessa direzione definite rispettivamente come²⁵⁵

$$\bar{c} = \frac{c}{2\varepsilon} \quad \text{e} \quad \bar{c} = \frac{c}{2(1-\varepsilon)} \quad \text{con } 0 < \varepsilon < 1 \quad [11_1]$$

e per l'intero percorso a una distanza d si conferma l'indipendenza da ε

²⁵⁴ [Dorato, 2013] pag. 47, anche per la citazione seguente

²⁵⁵ [Weingard, 1972] pag 119 per queste relazioni e le tesi del punto c), cfr § 15 per i dettagli matematici

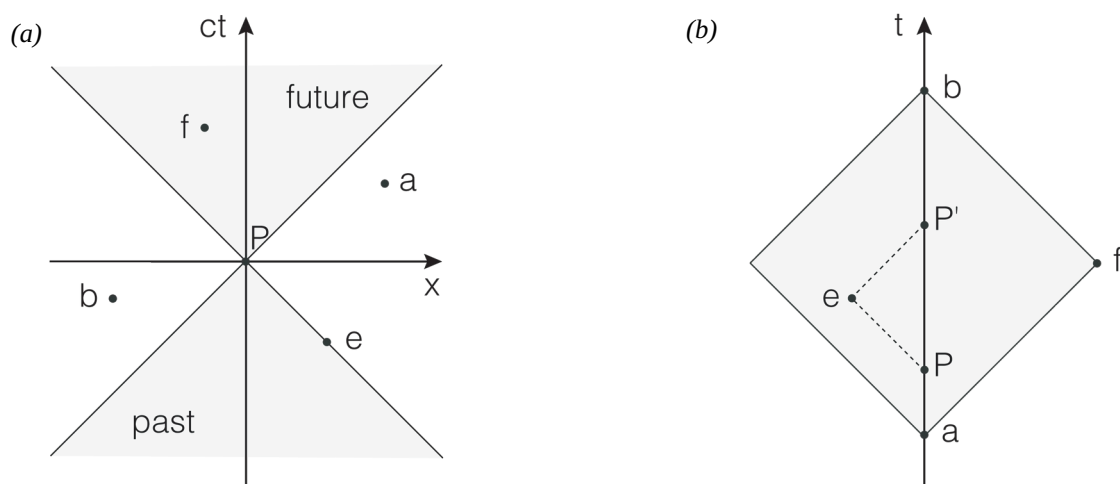
$$\text{velocità della luce} = \frac{2d}{t} = \frac{2d}{\frac{d}{c_1} + \frac{d}{c_2}} = \frac{2}{\frac{2\varepsilon}{c} + \frac{2(1-\varepsilon)}{c}} = c. \quad [11_2]$$

Questa convenzionalità condiziona la *simultaneità* e fa mancare il significato fisico delle relazioni di passato, presente e futuro di P con punti esterni al cono di luce, poiché scegliendo opportunamente ε , ognuno di questi punti, ad esempio il punto a nella *Figura 1a*, può essere considerato simultaneo a P in quel sistema di riferimento. Il fatto che ogni punto esterno al cono di luce possa essere considerato reale non è più questione di convenzione ma di *realtà*. Il ragionamento si può ripetere ad esempio per lo stesso punto a , esterno al cono di luce di P , rispetto al punto f , esterno al cono di luce di a , ottenendo che qualunque punto sia reale per qualunque altro punto, indipendentemente dal sistema di riferimento, ovvero la tesi del *presentismo*.

La criticità della tesi di [Putnam, 1967] è che adottando il valore usuale $\varepsilon = \frac{1}{2}$ in tutti i sistemi di riferimento, la relazione tra P e i punti esterni al suo cono di luce non è relativisticamente invariante (ovvero la stessa per ogni sistema di riferimento).

Le criticità della tesi di [Weingard, 1972] sono che il presente di P può contenere coppie di punti (o eventi) separati da distanze temporali arbitrarie e che «un osservatore collocato in P non può percepire il presente! La regione di tipo spazio rispetto a P è infatti non causalmente connettabile con P e percepire implica certamente interagire causalmente con il percepito»²⁵⁶.

Figura 1



Nella *figura (a)* il classico diagramma di Minkowski con alcuni punti ai quali si riferiscono gli approfondimenti; nella *figura (b)* il 'presente di Alexandrov' o 'presente fisico oggettivo' costituito dai punti in mutua interazione causale (che rappresentano eventi fisici che vengono percepiti come simultanei in base alla percezione dell'osservatore) con punti appartenenti al segmento $a - b$

²⁵⁶ [Dorato, 2013] pag. 49

d) Presente = superficie del cono di luce

Questa tesi suggerisce di considerare presenti tutti i punti che si trovano sulla superficie del cono di luce passato rispetto a P , come il punto e nella *Figura 1a*; quindi eventi avvenuti miliardi di anni fa sono presenti, quindi esistenti, quando la relativa informazione arriva a noi in P . D'altra parte, qualunque evento si percepisca è un evento avvenuto nel passato, per quanto breve possa essere il tempo che la luce impiega per giungere ai nostri occhi, che siano le lettere di questa pagina («che vediamo com'erano un miliardesimo di secondo fa»²⁵⁷), un lampione o la luce dalla Luna. È una elaborazione antropica il rappresentare nella nostra mente questi eventi come presenti, non una realtà fisica.

Si potrebbe giustificare questa interpretazione di simultaneità come una scelta convenzionale, come Einstein definì simultanei gli eventi ortogonali alla linea di universo nel punto P (la linea di universo è l'insieme dei punti descritti nel tempo dal punto P), con riferimento alla *Figura 1a*. Ne consegue però una criticità dal fatto che due osservatori a breve distanza non potrebbero condividere il proprio presente, problema probabilmente trascurabile in termini di percepito ma non accettabile in una costruzione metafisica che si vuole basare sul *presentismo*.

Queste prime quattro ipotesi smentiscono la possibilità delle tesi del *presentismo*, soprattutto per la limitazione della velocità c di propagazione della luce, che trasmette l'informazione.

Si considera un'ulteriore proposta che considera un *presente fisico oggettivo*, inteso come presente con la possibilità di essere condiviso in modo oggettivo da osservatori inerziali, in una prospettiva antropica ovvero di capacità di percepire i nessi causali.

e) Presente = presente interattivo di Alexandrov²⁵⁸

Considerando i coni di luce rappresentati nella *Figura 1b* come cono futuro del punto a e cono passato del punto b lungo il segmento $a - b$ di una linea di universo, si definisce una regione invariante (perché i coni che la delimitano lo sono) nella quale i punti sono in mutua interazione causale con i punti appartenenti al segmento $a - b$, ovvero per ogni punto e della regione esiste un punto P appartenente ad $a - b$ che è causa di e , e almeno un punto P' appartenente ad $a - b$ che è effetto di e . Questa regione è anche definita *presente di Alexandrov* o *presente fisico oggettivo*, ovvero l'insieme dei punti che può influenzare l'osservatore e che l'osservatore può influenzare nell'intervallo di tempo corrispondente al segmento $a - b$, in grado di spiegare come il presente percepito possa essere spazialmente esteso.

In corrispondenza del punto f nella *Figura 1b*, la larghezza della regione definita da un intervallo temporale $a - b$ ad esempio di 1 secondo, è 300.000 Km, maggiore di quella che normalmente separa gli osservatori umani dagli oggetti terrestri con i quali interagiscono e quindi si giustifica la condivisione di un presente esperito tra osservatori umani anche per

²⁵⁷ [Greene, 2004] edizione italiana pag. 158

²⁵⁸ Pavel Sergeevič Aleksandrov (1896-1982), matematico noto per i contributi in topologia

brevi intervalli temporali.

Non si approfondiscono gli aspetti neurologici e psicologici della percezione²⁵⁹ ma si osserva come il fatto che questa regione sia invariante e oggettiva, sia di sostegno alle tesi presentiste.

Facendo un passo ulteriore nella precedente ipotesi e), si può considerare l'intervallo di tempo di elaborazione umana della visione, circa 30 ms , che definisce una massima distanza di circa 9.000 Km , togliendo così l'arbitrarietà alla durata temporale $a - b$ e definendo una sfera nella quale gli eventi siano percepiti come simultanei da un osservatore umano.

La simultaneità definita dal *presente di Alexandrov* non può però costituire il *presente* in fisica, le cui teorie

non possono postulare un istante di tempo ontologicamente privilegiato, causa le simmetrie postulate riguardanti le traslazioni temporali. *Il ruolo del presente in fisica è al massimo pragmatico*, ovvero, legato all'applicazione o al nostro uso di una teoria fisica per riferirsi alla realtà.²⁶⁰

La regione di Alexandrov non può nemmeno dimostrare le tesi *presentiste*, perché si tratta di un presente relativo e non assoluto, perché non funziona in caso di intervalli $a - b$ infinitesimi e perché limita i punti ai soli che sono in mutuo nesso causale. È inoltre limitato a e da l'esperienza umana cosciente e non può quindi rappresentare «la struttura metafisica portante del *presentismo*. Tale flessibilità fa infatti pensare alla dipendenza dalla mente del presente e non alla robustezza ontologica che un'ipotesi metafisica deve avere»²⁶¹.

Peraltro gli stessi presentisti non sono in accordo sulla estensione o inestensione temporale che il presente dovrebbe avere, ovvero se possa essere accettabile una *bolla di simultaneità* dovuta alle nostre caratteristiche psicofisiche. Che si ritenga *presente* qualcosa a distanze cosmiche è una banale illusione antropica.

È ancora più incisivo il parere di Dieks:

Both according to special and general relativity, applied to our *actual* universe, a plausible global time cannot be defined by reference to what happens on the small scale of human experience and local physical experiments. Such a global time *can* probably be defined through theoretical considerations on the cosmic scale, but such definitions involve an unavoidable element of arbitrariness, and the resulting t is irrelevant to our time experience and the description of local processes.²⁶²

In realtà ogni linea di universo sperimenta un proprio tempo invariante ma non generalizzabile ad altre linee di universo, due orologi che si sincronizzassero reincontrandosi misurerebbero ore diverse, conseguenza della loro accelerazione necessariamente intervenuta nel frattempo, quindi il tempo segnato da un orologio dipende dal suo percorso. Si può individuare un riferimento privilegiato che contribuisca a individuare anche un presente metafisico ricorrendo alla Cosmologia e alla radiazione di microonde MCR

²⁵⁹ Ma nel merito cfr la penultima nota delle *Conclusioni epistemologiche* e le relative congetture

²⁶⁰ [Dorato, 2013] pag. 59

²⁶¹ [Dorato, 2013] pag. 61

²⁶² Dennis Dieks (1949) in [Dieks, 2006] pag. 168

(comunemente detta CMB), che costituisce un elemento temporalmente confrontabile per qualunque osservatore in qualunque epoca (nella quale la radiazione sia osservabile, cfr Nota sulla MCR nel § 18), ovviamente con le relative incertezze associate alle misure. A questa scala cosmica è quindi possibile individuare una successione temporale non più legata all'osservatore e agli eventi casualmente connettabili come nella *relatività ristretta*. Naturalmente il riferimento è valido nell'ambito della teoria del *Big Bang* conseguente all'espansione dell'universo, che non viene considerata nel presente approfondimento (che sviluppa piuttosto congetture alternative, cfr Allegato A4).

Si osserva, anticipando le *Conclusioni epistemologiche*, che restringere l'esistenza del tempo al solo significato antropico porta a 'superare' tutte le problematiche legate alla simultaneità dal punto di vista della Natura, limitandole al contesto delle convenzioni antropiche, che comunque devono essere coerenti affinché il tempo (antropico) stesso abbia significato e utilizzo.

§ 12 Congettura di Gödel sull'irrealtà del tempo²⁶³

Gödel si stabilì con la moglie a Princeton, dove l'Institute for Advanced Study raccoglieva le eccellenze tra gli scienziati dell'epoca, soprattutto fisici e matematici, e dove anche Einstein aveva accettato di risiedere e studiare. All'inizio degli anni '40 si stabilì tra i due una solida amicizia nonostante i caratteri affatto diversi: erano soliti passeggiare quotidianamente insieme discutendo di filosofia, se non di relatività e fondamenti della conoscenza.

Nel 1949, Paul Arthur Schilpp (1897-1993) propose a Gödel di scrivere un contributo per il volume *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (per la collana *The Library of Living Philosopher*), confidando che nonostante la sua ritrosia per qualunque incarico, avrebbe accettato, trattandosi di Einstein. Infatti accettò ma rifiutò l'argomento proposto (*The Realistic Standpoint in Physics and Mathematics*), essendo orientato piuttosto a *The theory of relativity and Kant*, per tentare di dimostrare che Kant avesse anticipato Einstein, pur essendo noto che nella *Critica della Ragion Pura* Kant avesse cercato di stabilire a priori che Newton rappresentasse la verità ultima della fisica, come Euclide della geometria, entrambi che consideravano il tempo e lo spazio come entità distinte, quindi a dir poco smentiti dalla *relatività generale*. Il lavoro di Gödel si sviluppò quindi sulla realtà del tempo, con «a mathematical approach to the philosophy of time, and a philosophical assessment of the mathematics of relativity»²⁶⁴, con il titolo finale *A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy*²⁶⁵.

²⁶³ In questo paragrafo si fa riferimento a [Yourgrau, 2005]

²⁶⁴ [Yourgrau, 2005] pag. 111

²⁶⁵ I filosofi idealisti a cui si riferiva erano Parmenide, Platone, Kant, a quali Gödel attribuiva un tempo 'prerelativistico'

Nel saggio di contributo al volume su Einstein²⁶⁶

Gödel would construct a world model for the equation of general relativity whose geometry was so extreme that the temporal component of the resulting space-time structure could not reasonably be seen as representing intuitive time. [...] He] would then demonstrate mathematically that in the world model he had constructed, there were continuous timelike world lines connecting any two events, so that even if B were observed occurring after A, one could undertake a journey -in a very fast spaceship- that would take one to B before one reached A. From this, Gödel would conclude that the space-time structure in such a world was clearly a space, not a time, and therefore that t , the temporal component of space-time, was in fact another spatial dimension -not time as we understand it in ordinary experience.²⁶⁷

In definitiva una sostanziale irrealtà del tempo, «a merely geometrical fact»²⁶⁸. Nel senso intuitivo il tempo era qualcosa «whose essence is that only the present really exists, [...] in particular it] means (or is equivalent to the fact) that reality consists of an infinity of layers of “now” which come into existence successively.»²⁶⁹

Si osserva che i vari presenti che “vengono a esistere in successione” sono già tutti reali, quindi per Gödel la realtà è costituita dal passaggio del tempo, o dal venire in essere in successione di eventi presenti, non con il passaggio del momento presente su eventi pre-esistenti (ovvero una sorta di interpretazione *presentista eternalista*)²⁷⁰. In sostanza, tra un mondo nel quale esiste il tempo e un mondo nel quale c'è l'esistenza, Gödel sceglie l'unica scelta razionale: un mondo senza tempo²⁷¹.

Questa interpretazione è criticata ad esempio da Dieks che respinge l'ipotesi di un «account according to which a mysterious ‘now’ travels through spacetime in an incomprehensible way while doing something unintelligible over and over again to events on its way»²⁷². Una ulteriore critica a Gödel in [Dieks, 2006] riguarda il carattere statistico del calcolo del moto medio della materia nell'universo, necessario alla costruzione del tempo cosmico, statistiche che possono risultare diverse in base alla scelta delle regioni cosmiche considerate, richiedendo l'adozione di ‘convenzioni arbitrarie’ analoghe alla scelta di un sistema preferenziale di coordinate inerziali in *relatività ristretta* e che minano l'universalità del tempo cosmico.

²⁶⁶ [Gödel, 1949a] ma anche [Gödel, 1949b]

²⁶⁷ [Yourgrau, 2005] pag. 115; una conseguenza di questa dimostrazione è aver dimostrato che i viaggi nel tempo sono consistenti con la teoria della relatività

²⁶⁸ [Yourgrau, 2005] pag. 123

²⁶⁹ [Gödel, 1949a]

²⁷⁰ È interessante confrontare questa interpretazione, conseguente a una impostazione logica (secondo Gödel, naturalmente) con la visione di Agostino d'Ippona, che nel tentare di rispondere alla domanda «Che faceva Dio prima di creare il cielo e la terra?» ([Agostino, 401] XI 10.12 pag. 584) conclude che «a Dio compete solo l'eternità "sempre stabile (*semper stans aeternitas*)", non la temporalità "mai stabile (*tempora numquam stantia*)" [[Agostino, 401] XI 11.13 pag. 585] La domanda di partenza, dunque, si rivela assurda, poiché per Dio non vi è alcuna successione di momenti temporali.» [Horn, 1995] edizione italiana pag. 97. Personalmente si ritiene le deità estranee a ogni discorso sulla Natura, come la famosa risposta a Napoleone Bonaparte (1769-1821) di Simon Laplace (1749-1827), quando l'imperatore osservò, avendo letto *la Exposition du système du monde*, «Newton a parlé de Dieu dans son Livre. J'ai déjà parcouru le vôtre et je n'y ai pas trouvé ce nom une seule fois» [Newton ha parlato di Dio nel suo Libro. Ho già sfogliato il vostro e non ho trovato questo nome una sola volta]; Laplace rispose «Dieu? Sire, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse» [Dio? Sire, non ho avuto bisogno di questa ipotesi] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre-Simon_de_Laplace pagina visitata il 5/5/25]

²⁷¹ [Yourgrau, 2005] pag. 132

²⁷² [Dieks, 2006] pag. 157

Il volume di Schilpp ebbe successo ma all'epoca non ci fu nessun séguito alla proposta interpretativa di Gödel sulla irrealtà del tempo, solo una pubblicazione²⁷³ nel 1961 di Chandrasekhar e James Wright, che rilevarono un errore (sostanzialmente nel merito della soluzione fisica, sulla possibilità di viaggiare lungo una geodetica, date le condizioni di esistenza della soluzione proposta), alla quale peraltro lui non rispose. Solo ai viaggi nel tempo ci fu un minimo interesse da parte dell'opinione pubblica ma non dei filosofi, che tralasciarono completamente lo scetticismo sulla oggettiva realtà del tempo, derivato dalla *relatività generale*, di uno dei più acuti pensatori esistenti.

La personale conclusione sull'esistenza del tempo in Natura (cfr *Conclusioni epistemologiche*) supera tutte queste posizioni.

§ 13 *Simultaneità e meccanica quantistica*

Una significativa criticità sulla *simultaneità* emerge dalla meccanica quantistica, per la difesa della quale Bohr propose una nuova epistemologia, che chiamò *complementarietà*²⁷⁴, che ebbe e ha ancora un certo séguito. Da allora si può fare una distinzione tra scienziati *realisti*, con principali esponenti storici Einstein, Schrödinger, Planck, Louis de Broglie, Paul Ehrenfest (1880-1933) per i quali come sosteneva Einstein:

science aimed to capture the true essence of the world, and that essence is independent of us and can have nothing to do with what we believe or know about it²⁷⁵,

e *antirealisti*, con principali esponenti storici Bohr e Heisenberg, il quale scrisse:

Da nun der statistische Charakter der Quantentheorie so eng an die Ungenauigkeit aller Wahrnehmung geknüpft ist, könnte man zu der Vermutung verleitet werden, daß sich hinter der wahrgenommenen statistischen Welt noch eine "wirkliche". Welt verberge, in der das Kausalgesetz gilt. Aber solche Spekulationen scheinen uns, das betonen wir ausdrücklich, unfruchtbar und sinnlos. Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben. Vielmehr kann man den wahren Sachverhalt viel besser so charakterisieren: Wer alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik und damit der Gleichung $[p_1 q_1 \sim h]$ unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.²⁷⁶

²⁷³ [Chandrasekhar e Wright, 1961]

²⁷⁴ «Secondo la complementarietà, una descrizione causale è possibile solo se si rinuncia a ogni rappresentazione degli oggetti atomici come esistenti nello spazio ed evolvendo nel tempo. L'alternativa sarebbe, insomma, fra una causalità in un mondo sconosciuto e una descrizione priva di cause nello spazio-tempo!»; [Selleri, 2001] pag. 2

²⁷⁵ Parere di Lee Smolin (1955-) sul pensiero di Einstein, in [Smolin, 2019] pag. 9

²⁷⁶ «Poiché il carattere statistico della teoria quantistica è così strettamente legato all'imprecisione di ogni percezione, si potrebbe essere indotti a supporre che dietro il mondo statistico percepito esista ancora un mondo "reale" in cui si applica la legge causale. Ma tali speculazioni ci sembrano, lo sottolineiamo, sterili e inutili. La fisica dovrebbe descrivere solo formalmente la connessione tra le percezioni. Piuttosto, si possono caratterizzare molto meglio i fatti veri in questo modo: se tutti gli esperimenti sono soggetti alle leggi della meccanica quantistica e quindi all'equazione $(p_1 q_1 \sim h)$ [il suo *principio di indeterminazione*], allora l'invalidità della legge causale è definitivamente stabilita dalla meccanica quantistica.»; Heisenberg, *Über den*

Per la posizione di Bohr si cita Smolin:

For Bohr, science is not about nature. It does not and cannot give us an objective picture of what nature is. That would be impossible, because we never interact with nature directly. We gain knowledge about the nature world only through intermediaries, which are experimental devices we invent and construct. [...] Science is rather an extension of a common language we use to describe to each other the results of our interventions into nature.²⁷⁷

e Bohr stesso:

La rinuncia alla intuitività e alla connessione causale, cui siamo costretti nella descrizione dei fenomeni atomici, [...] la dobbiamo considerare [...] come un essenziale progresso della nostra conoscenza. [...] Come abbiamo visto, ogni osservazione comporta un'interferenza sul decorso del fenomeno, di natura tale da toglierci ogni base per la descrizione causale. [...] Dobbiamo essere preparati alla necessità di un sempre maggior allontanamento dalle nostre abituali esigenze di una descrizione immediatamente intuitiva della natura.²⁷⁸

Più pragmatica nel merito la posizione di Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984):

[...] se l'indeterminazione nelle leggi fondamentali della fisica vi provoca disagio, non siete i soli a sentirvi così. Molti provano disagio. Io stesso. Schrödinger e Einstein vi si sono opposti sempre. Ma occorre accettarla come il meglio che si possa fare allo stato attuale delle nostre conoscenze.²⁷⁹

A margine di queste posizioni, si evidenzia come già per i greci ellenistici la parola *φαινόμενα* significasse «*apparenze, ciò che si osserva, che si percepisce*»²⁸⁰; diversamente dall'utilizzo generico del termine *fenomeno* in tempi moderni per designare «fatti che si verificano indipendentemente dall'osservatore», «il termine greco si riferisce invece all'interazione tra soggetto e oggetto costituita dalla percezione», come testimonia Sesto Empirico (circa 160-circa 210) riferendosi alla concezione degli Stoici (III-II secolo), «secondo i quali perché si abbia un'apparenza (*φαινόμενον*) non basta l'impressione sensibile (passiva) ma è essenziale anche l'assenso [...] del soggetto».

Stando alla visione di Einstein, i greci ellenistici si ponevano quindi in una sorta di *antirealismo* ante litteram.

È interessante osservare, a conferma di quanto efficacemente teorizzato da Kuhn nel suo modello di *paradigma*²⁸¹, il modo in cui l'ortodossia sostenuta dal gruppo dei discepoli di

anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik (Sul contenuto descrittivo delle teorie quantistiche della cinematica e della meccanica, Zeitschrift für Physik, 1927); nel merito cfr le posizioni personali nelle *Conclusioni epistemologiche* e nell'Allegato A3 *Sulla causalità*

²⁷⁷ [Smolin, 2019] pag. 85

²⁷⁸ *La teoria atomica e i principi fondamentali della descrizione della natura* (1929) nella raccolta [Bohr, 1958] edizione italiana pag. 21-22; si evidenzia la differenza tra l'impossibilità di descrivere la causalità in modi deterministici, alla quale accennano Bohr e Heisenberg nella precedente citazione, e la non esistenza in Natura della stessa causalità, differenza approfondita nelle *Conclusioni epistemologiche*

²⁷⁹ In [Dirac, 2019] pag. 106, dal saggio *Lo sviluppo della concezione della natura del fisico* (1973)

²⁸⁰ [Russo 2021] pag. 216-217, anche per le seguenti citazioni nel capoverso

²⁸¹ Tale modello (cfr Allegato A2) si ritiene 'sociologicamente' ancor oggi valido e applicabile ad esempio alle correnti di ricerca della materia oscura, dell'energia oscura, della teoria delle stringhe e del multiverso, della gravità quantistica, settori nei quali sono predominanti aspetti non noti o non conoscibili e che si possono

Bohr abbia condizionato sensibilmente lo sviluppo interpretativo della scienza (come nel caso di Hubble, cfr § 9); nel merito si riporta il pensiero di Franco Selleri (1936-2013)

La grande autorevolezza di questi fisici [*antirealisti*], assieme alla complessità concettuale e/o matematica dei teoremi di impossibilità [della descrizione causale realistica] impedirono a lungo che i fisici favorevoli alla causalità comprendessero limiti e difetti di complementarità, indeterminazione [...] ed ebbero come conseguenza pratica la messa al bando delle idee causali. Sociologicamente, queste proibizioni hanno funzionato molto bene nel mondo della ricerca, ottenendo in pratica lo scopo per cui erano state avanzate: indebolire fortemente gli studi nella direzione della causalità. Questo dimostra che razionalità e consenso sono due cose molto diverse anche nel mondo della ricerca scientifica.²⁸²

e di Smolin

In just few years a generation of students championing a dangerous new idea are elevated by an initial success into professorship. From these positions of influence they form a powerful network of academic power brokers, which they use to ensure the continuation of the revolution. Such was the case of the generation of quantum revolutionaries. In 1920 Heisenberg was a student, as were Dirac, Pauli, and Jordan [Pascual Jordan (1902-1980)]; 1925 found them young researcher fully engaged in the invention of quantum theory; by 1930 they were senior professors, and the revolution was over. The fact that there remained a handful of defectors -Einstein and Schrödinger from the older generation, and de Broglie among their contemporaries- did nothing to diminish their triumph. For students knew which way the wind blew and followed the ascendant orthodoxy. For the next half century, the antirealism of the Copenhagenists would be the only version of quantum theory taught.²⁸³

Al giorno d'oggi la situazione della ricerca è forse ancora più critica, come sottolineato recentemente da Penrose:

A further important factor is that graduated student, when in search of a problem to work on for a doctorate degree, tend to be highly constrained with regard to appropriate topics of research. Research students working in unfashionable areas, even if leading to successful doctoral degrees, may well find extreme difficulty in obtaining academic jobs afterwards, no matter how talented, knowledgeable, or original they may be. [...] Research supervisor are, more likely than not, interested mainly in developing ideas that they themselves had been involved in promoting, and these are likely to be in the areas that are already fashionable. [...]

Projects that deviate too much from the currently accepted norms, even if well thought through and highly original, are very likely to be left without support. [...]

It is very possible that some radically different set of ideas, departing significantly from what is currently fashionable, may remain untested even though some definitive answer might actually lie hidden in the existing data, being unrevealed because the statistical procedures that physicists have adopted are too directly tuned to current theory.²⁸⁴

Quest'ultima considerazione non è lontana da quella conclusiva di Bell riportata nel secondo seguente capoverso, in definitiva della necessità di poter fare più ricerca e sperimentazione

associare a interpretazioni antirealiste, ovvero *paradigmi antirealisti*, che includono i loro 'sostenitori'

²⁸² [Selleri, 2001] pag. 2

²⁸³ [Smolin, 2019] pag. 94 e pag. 75-76 e 84-86, passim

²⁸⁴ [Penrose, 2016] pag. 8-10

anche al di fuori dai *paradigmi* correnti, incoraggiando anziché limitando *de facto* l'azione soprattutto di giovani ricercatori e di nuove visioni della realtà. Questioni che diventano più politiche che scientifiche, anziché essere più di visione del futuro che programmatiche (quindi in ultima analisi più etiche che economiche), riconoscendo alla scienza lo scopo (fine a sé stesso) dell'interpretazione della Natura e del progredire della conoscenza, più che il raggiungimento di 'obiettivi antropici' (oltre che non personali!).

Tornando alla meccanica quantistica, questa si occupa di *osservabili* in quanto grandezze prodotte da un esperimento o una osservazione, senza pensare che questi possano aver avuto un valore prima dell'osservazione, senza in definitiva che debbano esistere prima di essere osservati. Questi enti, una sorta di noùmeno platonico, sono chiamati *beables* (*esseribili*) da John Bell (1928-1990) per indicare ciò che si crede esistere, che si misuri oppure no, anche se «le "osservabili" devono discendere, in qualche modo, dalle *esseribili*. La teoria delle *esseribili* locali dovrebbe contenere l'algebra delle osservabili locali, nonché darne un preciso significato fisico»²⁸⁵, ricordando che «quantum mechanics speaks not in term of what is, but only of what has been observed»²⁸⁶. Nel 1935 Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen pubblicarono un articolo (noto come *paradosso EPR*) sulla incompletezza della meccanica quantistica (ovvero immaginando la presenza di variabili nascoste), dimostrando, in un 'esperimento mentale',

that either (1) the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete or (2) when the operators corresponding to two physical quantities, cannot have simultaneous reality. Starting then with the assumption that the wave function does not give a complete description of the physical reality, we arrive at the conclusion that two physical quantities, with noncommuting operators, can have simultaneous reality. Thus the negation of (1) leads to the negations of the only other alternative (2). We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete.²⁸⁷

Bell considerò le tesi di EPR e nel teorema omonimo sostenne il carattere intrinsecamente non locale e non causale della meccanica quantistica, non potendo contenere le variabili nascoste ipotizzate da EPR a séguito di restrizioni sulle correlazioni statistiche tra *esseribili*, che quindi doveva essere accettata come tale o non accettata del tutto²⁸⁸.

[Il punto di vista] di Bell riflette alla perfezione il «realismo robusto» di Einstein - la convinzione che il sistema di due particelle debba consistere di due entità separate che possiedono ben determinate proprietà prima di qualsiasi misurazione. Da questo presupposto, Bell procedette a derivare alcune disuguaglianze, giustamente famose, che pongono limiti superiori al grado delle correlazioni che tali entità «classiche» possono presentare (correlazioni più strette sarebbero semplicemente un'impossibilità logica). Bell mostrò anche che la meccanica quantistica può violare queste disuguaglianze: il mondo quantistico può essere correlato più strettamente di qualsiasi «mondo classico» immaginabile. Gli esperimenti di Aspect²⁸⁹ verifi-

²⁸⁵ [Bell, 2004] edizione italiana pag. 70

²⁸⁶ [Smolin, 2019] pag. 27, passim

²⁸⁷ [EPR, 1935] pag. 780

²⁸⁸ [Bell, 2004] edizione italiana cap. 7, passim

²⁸⁹ Alain Aspect (1947-) negli anni '80, nel 1998 Anton Zeilinger (1945-) e John Clauser (1942-), che hanno

carono in modo specifico le disuguaglianze di Bell e confermarono trionfalmente le previsioni quantistiche.²⁹⁰

Gli esperimenti provarono che il mondo quantistico non obbedisce al principio di località nell'entanglement²⁹¹, che sembra presupporre una *simultaneità* che viola la teoria della *relatività*, come teorizzato in EPR, ma corrisponde alla *realtà*. Pertanto, se la fisica non è locale come emerge dagli esperimenti, anche il tempo (oltre allo spazio) dovrà essere riconsiderato in nuove teorie che riescano a dare una descrizione *reale* della Natura soprattutto nella sua descrizione cosmologica, se si condivide la visione *realista* della scienza.

L'analisi dovrebbe forse soffermarsi maggiormente sulle correnti filosofiche idealiste e materialiste nel periodo dello sviluppo iniziale della meccanica quantistica e sul concetto di *realtà*, di séguito riportato come definito in EPR, ma il rischio è di allontanarsi troppo dal focus sul tempo e la cosmologia

*If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e. with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.*²⁹²

Da un punto di vista filosofico, Yourgrau osserva:

Einstein's objections, in turn, to the new quantum mechanics -in particular his formulation of the EPR paradox- reflected a rejection of the kantian turn in epistemology in its simplified reconstruction by positivists like Mach. [...] For Einstein, as for Godel, philosophy without ontology was an illusion, and physics without philosophy reduced to engineering.²⁹³

Nel merito, Bell scrisse:

il concetto di verità 'reale', considerato come distinto da una verità che al momento è sufficientemente buona per noi, ha giocato un ruolo positivo nella storia della scienza. Così Copernico trovò uno schema più comprensibile ponendo il Sole, anziché la Terra, al centro del sistema solare. Io posso ben immaginare una fase futura in cui ciò accadrà ancora, una fase in cui l'universo diventerà più comprensibile agli esseri umani, perfino ai fisici teorici, quando non immagineranno più di esserne al centro²⁹⁴.

L'idea di Einstein è che fosse necessario procedere con una teoria affatto nuova che partisse dai fondamenti per descrivere al meglio la Natura senza l'indeterminatezza della meccanica quantistica:

There is no doubt that quantum mechanics has seized hold of a beautiful element of truth and that it will be a touchstone for a future theoretical basis in that it must be deducible as a limiting

condiviso il premio Nobel per la fisica nel 2022 «for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science» [nobelprize.org]

²⁹⁰ [Barbour, 1999] edizione italiana pag. 221

²⁹¹ Fenomeno che associa in modo esatto e complementare lo stato quantico di particelle correlate, con una azione *istantanea* a prescindere dalla loro distanza 'fisica'

²⁹² [EPR, 1935] pag. 777, corsivo originale

²⁹³ [Yourgrau, 2005] pag. 107

²⁹⁴ [Bell, 2004] edizione italiana pag. 166

case from the basis, just as electrostatics is deducible from the Maxwell²⁹⁵ equations of the electromagnetic field or as thermodynamics is deducible from statistical mechanics.

I do not believe that quantum mechanics will be the starting point in the search for this basis, just as one cannot arrive at the foundations of mechanics from thermodynamics or statistical mechanics.²⁹⁶

Infatti egli mantenne sempre una posizione realista, pensando che la meccanica quantistica dovesse derivare dalla *relatività generale*, non basarsi su autonomi postulati, come osservò in occasione di un tributo a Maxwell:

I incline to the belief that physicists will not be permanently satisfied with ... an indirect description of Reality, even if the [quantum] theory can be fitted successfully to the General Relativity postulates. They would then be brought back in the attempt to realize that programme which may suitably be called Maxwell's: the description of Physical Reality by fields which satisfy without singularity a set of partial differential equations.²⁹⁷

Sull'interpretazione generale della meccanica quantistica Einstein aveva una posizione non troppo negativa ma ferma rispetto all'approccio probabilistico (analoga anche quella di Schrödinger):

I admire to the highest degree the achievements of the younger generation of physicists which goes by the name quantum mechanics and believe in the deep level of truth of that theory; but I believe that the restriction to statistical laws will be a passing one.²⁹⁸

Il punto di vista di Einstein è stato narrato in forma romanzata, in un singolare libro, da Benjamín Labatut (1980-):

[Einstein] non era disposto ad accettare le restrizioni imposte dal giovane tedesco [Heisenberg], che per vedere più lontano sembrava volersi cavare gli occhi. Einstein intuiva che, spingendo questa linea di pensiero alle sue ultime conseguenze, l'oscurità avrebbe potuto contagiare tutta la fisica: decretare la vittoria di Heisenberg significava accettare che una parte fondamentale dei fenomeni del mondo obbedisse a regole inaccessibili, come se il caso si fosse insinuato nel cuore della materia. Qualcuno doveva fermarlo. Qualcuno doveva far uscire l'atomo dalla gabbia in cui Heisenberg lo aveva rinchiuso. E, secondo Einstein, questo qualcuno era un giovane francese, timido, ricercato e stravagante: il principe Louis-Victor Pierre Raymond, settimo duca de Broglie.²⁹⁹

Relativamente alle interpretazioni della meccanica quantistica si cita Chad Orzel (professore di fisica e ricercatore) intervistato da Sabine Hossenfelder (1976-):

There's a divide between the epistemological and the ontological camps. In the ontological camp

²⁹⁵ James Clerk Maxwell (1831-1879)

²⁹⁶ [Pais, 1982] pag. 461, citazione da J. Franklin Inst., 221, 313 (1936)

²⁹⁷ [Pais, 1982] pag. 463, citazione da *James Clark Maxwell* (Macmillan, New York, 1931) pag. 66

²⁹⁸ [Pais, 1982] pag. 31; citazione da un discorso (*Forschungen und Fortschritte*) tenuto nel 1929 da Einstein, in occasione della consegna della 'Planck medal' da parte dello stesso Planck

²⁹⁹ [Labatut, 2019] edizione italiana pag. 106; anche se Einstein non accettò mai pienamente la teoria quantistica di Bohr e Heisenberg (come descritta dal *modello standard* definito alla conferenza Solvay del 1927, cfr le *Conclusioni sociologiche*), questi riuscirono a mettere insieme le equazioni d'onda di de Broglie con le matrici di Heisenberg (scoperte prima ma inefficacemente complesse), per mezzo di una interpretazione probabilistica, e a descrivere una sorta di complementarità ondulatoria - corpuscolare, all'origine del famoso principio di indeterminazione di Heisenberg

the wave function is a real thing that exists and changes, and in the epistemological camp the wave function really just describes what we know -it's just quantifying our ignorance about the world. And you can put everybody on a continuum between these two interpretations.³⁰⁰

In parole più semplici, con un riferimento alla definitezza degli oggetti materiali che si può estendere metaforicamente anche alle teorie sulla conoscenza, si esprime Rovelli:

La solidità della visione classica del mondo non è che nostra miopia. Le certezze della fisica classica sono solo probabilità. L'immagine del mondo nitida e solida della vecchia fisica è un'illusione.³⁰¹

Similmente a Einstein, nemmeno Schrödinger accettò mai interamente le interpretazioni del *modello standard* quantistico, considerandolo «solo una teoria statistica che riassume accadimenti elementari e deterministici a un livello più riposto e per ora non accessibile»³⁰²; Schrödinger pubblicò anche un breve saggio (*La scienza dipende dall'ambiente?*³⁰³) nel quale evidenziava alcuni aspetti della fisica (non solo moderna) connessi con elementi psicologici o sociali, ovvero in qualche modo una visione non lontana dalla *matrice disciplinaria* di Kuhn (cfr Allegato A2).

Tra le interpretazioni cosmologiche alternative a una visione tradizionale, si accenna all'esistenza della 'teoria dei molti mondi' (MWI, Many Worlds Interpretation) di Hugh Everett (1930-1982), una interpretazione alternativa a quella di Copenaghen che intende superare il collasso della funzione d'onda e le possibili sovrapposizioni di stati immaginando che questi descrivano una realtà in cui si realizzino entrambi gli esiti (di una osservazione con esito binario), che costituiscono quindi una descrizione completa della realtà, costituita da mondi paralleli; in tal modo questi mondi paralleli si moltiplicherebbero a ogni evento quantistico e non solo in una misurazione, volendo essere *realisti*.³⁰⁴

Invece l'interpretazione affatto alternativa di Julian Barbour del tempo si potrebbe definire la «quantum theory of cosmology that has many moments rather than many worlds»³⁰⁵. La sua costruzione di un universo privo di tempo, chiamato «Platonia»³⁰⁶, non sembra possa rappresentare una alternativa (ad esempio) a uno spaziotempo di Minkowski, nemmeno da un punto di vista filosofico, e non viene approfondita.

³⁰⁰ [Hossenfelder, 2018] pag. 135

³⁰¹ [Rovelli, 2020] pag. 117

³⁰² [Schrödinger, 1958], edizione italiana pag. 5, dalla presentazione di Bruno Bertotti (1930-2018), fisico e ricercatore, che loda i saggi di epistemologia e di filologia di Schrödinger, «un'opportunità che capita assai di rado nelle moderne comunità scientifiche, preoccupate soprattutto del successo tecnico e formale»

³⁰³ Contenuto in [Schrödinger, 1958], edizione italiana pag. 37-63; "ambiente" è da intendersi nel significato sociale e culturale

³⁰⁴ [Smolin, 2019] cap. 10, passim

³⁰⁵ [Smolin, 2019] pag. 201

³⁰⁶ Come osserva [Barbour, 1999] edizione italiana pag. 208-211 passim, una astrazione analoga a questa «Platonia» la portò lo *spazio delle configurazioni* nella interpretazione di Schrödinger, in particolare si nota che l'equazione reativistica d'onda non dipende dal tempo quindi non richiede condizioni al contorno, anche se deve rispettare delle *regole di buon comportamento*, quali essere continua, avere un solo valore in ogni punto, rimanere finita dappertutto (osservazioni di [Barbour, 1999] edizione italiana pag. 253)

Alcuni autori, tra cui originariamente Heisenberg e recentemente Ruth Kastner, Stuart Kauffman e Michael Epperson hanno proposto:

that quantum mechanics evinces a reality that entails both actualities (*res extensa*) and potentia (*res potentia*), wherein the latter are as ontologically significant as the former, and not merely an epistemic abstraction as in classical mechanics. On this proposal, quantum mechanics IS about what exists in the world; but what exists comprises both possibles and actuals.³⁰⁷

In questa visione gli esperimenti sono i processi che trasformano le potenzialità in condizioni reali: «*res potentia* is transformed into *res extensa* through measurement»³⁰⁸, quindi «not everything that is possible is real. But a small part of the possible has definite properties that justify assigning it to a new category of the real and possible»³⁰⁹.

³⁰⁷ [Kastner, 2018] pag. 8

³⁰⁸ [Kastner, 2018] pag. 9

³⁰⁹ [Smolin, 2019] pag. 201

F Incompletezza della relatività ristretta

§ 14 Postulato della velocità unidirezionale della luce

Al punto c) del § 11 si è interpretata da un punto di vista logico la *simultaneità* in relazione a una velocità unidirezionale della luce che può essere immaginata dipendente da un parametro (ϵ), per l'impossibilità di misurarne la velocità se non in un percorso chiuso (*round-trip*). Questa tesi sulla convenzionalità della simultaneità (*conventionality of simultaneity, CS thesis*), di seguito approfondita, si deve a Reichenbach³¹⁰ e Adolf Grünbaum (1923-2018).

In epoche recenti sono stati fatti vari esperimenti per tentare di dimostrare che la velocità *one-way* della luce coincide effettivamente con c ma non hanno avuto successo, come riassunto in [Zhang, 1997], libro dedicato alle prove sperimentali di test della *relatività ristretta*. Uno dei problemi non superabili è la sincronizzazione dei due orologi da utilizzare, che presentano uno scorrere del tempo diverso in base alla posizione nella quale si trovano: anche immaginando che uno si sposti rispetto all'altro a velocità non relativistiche per mantenere una iniziale sincronizzazione, il problema resterebbe rispetto a effetti gravitazionali diversi che condizionerebbero lo scorrere locale del tempo dei due orologi posti in posizioni diverse o rispetto a un terzo osservatore che non concorderebbe sulla loro sincronizzazione.

Si riportano per completezza in *Figura 2* i prospetti con i risultati (a tutto il 1997) di questi test sulla costanza della velocità della luce e sull'indipendenza dalla sorgente della velocità della luce.

Nello stesso riassunto dei risultati di [Zhang, 1997] pag 171:

[...] We have shown that the *two-way* velocity of light has been proven to be constant by means of the experiments and at the same time the *one-way* velocity of light has been proven to be independent of the motion of light source. It is needed to point out that the "independence" does not mean that either the *one-way* velocity c_r of light is equal to the *two-way* velocity c of light or the *one-way* velocity of light is isotropic.

La velocità c resta quindi un postulato, come l'isotropia dello spazio.

³¹⁰ [Reichenbach, 1956] pag. 123-128 per le relazioni sul tempo

Figura 2

Table 8.1. Summary of Experiments on the Constancy of the Light Velocity

Year	Experiment	Method used	Upper limit on "ether drift" (km/s)
1881	Michelson [6]	Optical technique	21.1
1887	Michelson and Morley [7]	Optical technique	4.7
1926	Kennedy [46]	Optical technique	5.1
1927	Illingworth [47]	Optical technique	2.3
1930	Joos [48]	Optical technique	1.5
1932	Kennedy and Thorndike [56]	Optical technique	null effect
1955	Essen [52]	Micro-waves	2.5
1964	Jaseja, Javan, Murray and Townes [53]	Two He-Ne masers	0.95
1972	Silvertooth [54]	Laser interferometer (frequency-double)	null effect
1973	Trimmer, Baierlein, Faller, and Hill [55]	Interferometer (with a glass piece)	null effect
1958	Cedarholm, Bland, Havens, and Townes [59]	Two masers (bit frequency)	0.03
1963	Champney, Isaak, and Khan [60]	Rotated rotor (Mössbauer effect)	0.0016
1972	Cialdea [62]	Two lasers (bit frequency)	0.0009
1979	Brillet and Hall [40]	Laser resonator	0.03

Table 8.2. Summary of Experiments on the Independence of the Light Speed of the Source Velocity

Year	Experiment	Moving source	Source speed	Limit on k
1913	de Sitter [64]	Double stars		$k \leq 0.002$
1914	Zurhellen [65]	Double stars		$k \leq 10^{-6}$
1960	Heckmann [68]	Stars & Nebulae	$\sim 10^{-1}c$	null effect
1910	Tolman [71]	Limbs of the Sun	$\sim 10^{-5}c$	null effect
1919	Majorana [69]	Mercury plasma	$\sim 10^{-7}c$	null effect
1924	Tomaschek [70]	Stars	$\sim 10^{-4}c$	null effect
1960	Bonch-Bruewich [73]	Limbs of the Sun	$\sim 10^{-5}c$	$k = 0.02 \pm 0.07$
1965	Beckmann and Mandies [76]	Rotating Reflection mirror	$1.52 \times 10^{-7}c$	$k \leq 0.05$
1962	Kantor [77]	Rotating glass-plate	$1.56 \times 10^{-7}c$	$k = 0.67$ (?)
1963	James and Sternberg [80]	Rotating glass-plate		$k \leq 0.025$
1963	Rotz [81]	Rotating glass-plate	$2 \times 10^{-7}c$	$k \leq 0.1$
1964	Babcock and Bergman [78]	Rotating glass-plate	$1.25 \times 10^{-7}c$	$k \leq 0.01$
1964	Beckmann and Mandies [79]	Rotating glass-plate		$k \leq 0.1$
1965	Waddoups, Edwards and Merrill [82]	Rotating mica-window		$k \leq 0.14$
1963	Sadeh [86]	e^+e^-	$0.5c$	$k \leq 0.3$
1963	Alvåger, Nilsson and Kjellman [87]	C^{12}	$0.03c$	$k \leq 0.1$
1964	Fillippas and Fox [88]	π^0	$0.2c$	$k \leq 0.4$
1964	Alvåger, Farley, Kjellman, and Wallin [89]	π^0	$0.99975c$	$k \leq 10^{-4}$

Risultati dei test sulla velocità della luce da [Zhang, 1997] pag. 170-171.

Note: «the velocity of light source in [the left] table are found by means of Einstein's theory of special relativity. There is no problem for small velocities compared to c , while it is not suitable for high velocities. However the values of the velocities of light sources given in [the right] table are not essential to the conclusion, but just show the fact that the velocities of light sources could be compared with c .»

Analizzando la citata *CS thesis*, si immaginano due orologi A e B posti in due sistemi di riferimento inerziali dei quali si considera solo l'asse x , e si esamina un segnale che parte da A all'istante t_1 , viene ricevuto in B all'istante t_2 quindi torna in A all'istante t_3 .

Se la velocità fosse costante, si potrebbe scrivere la relazione definita da Einstein, nella quale B è il punto mediano del tempo in cui la luce partita da A è poi tornata in A

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{2}(t_3 - t_1); \quad [14_1]$$

ma in mancanza della certezza sulla velocità³¹¹, si può solo stimare che l'orologio in B segni un tempo t_2 intermedio tra t_1 e t_3

$$t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1) \quad [14_2a]$$

$$\text{con } 0 < \varepsilon < 1. \quad [14_2b]$$

³¹¹ La velocità di propagazione resta comunque la stessa per ogni sistema di riferimento inerziale, cioè non dipende dalle velocità relative dei sistemi di riferimento inerziali coinvolti

Indicati con $\vec{c}$ la velocità della luce positiva lungo l'asse $\vec{x}$ e con $\overleftarrow{c}$ la velocità negativa lungo lo stesso asse, per la definizione di Einstein dalla [14_1] si può scrivere

$$c = \frac{2AB}{t_3 - t_1}$$

a dalla [14_2a] si ottengono le relazioni³¹² già viste nella [11_1]

$$\vec{c} = \frac{c}{2\varepsilon} \quad \text{e} \quad \overleftarrow{c} = \frac{c}{2(1-\varepsilon)} \quad \text{con } 0 < \varepsilon < 1 \quad [14_3]$$

dalle quali si ricavano anche

$$\varepsilon = \frac{c}{2\vec{c}} \quad \text{e} \quad \varepsilon = 1 - \frac{c}{2\overleftarrow{c}}. \quad [14_4]$$

Poiché qualunque scelta di ε nell'intervallo ammesso dà lo stesso valore per c in una misura *round-trip* (cfr [11_2]), secondo la *CS thesis* anche la teoria della *relatività ristretta* contiene forti tracce di convenzionalità.

Altre convenzioni di sincronizzazione degli orologi sono quelle di [Edwards, 1963], una generalizzazione di quelle di Einstein, e di [Mansouri e Sexl, 1976], una generalizzazione di quelle di [Robertson, 1949]³¹³.

Nella formulazione standard della *relatività ristretta*, Einstein fissa due principi, che potrebbero essere definiti *principio di unidirezionalità della luce* e *principio di relatività ristretta*. Il primo afferma che la velocità unidirezionale della luce è una costante in tutte le direzioni in tutti i sistemi inerziali, il secondo, nelle parole di Einstein:

If, relative to K , K' is a uniformly moving co-ordinate system devoid of rotation, then natural phenomena run their course with respect to K' according to exactly the same general laws as with respect to K .³¹⁴

Questo secondo principio può essere esplicitato nei due seguenti³¹⁵:

- *Reciprocity of relative velocities*: If inertial frame K' has a relative velocity v with respect to inertial frame K , then frame K has a relative velocity $-v$ with respect to frame K'
- *Reciprocity of relative lengths*: Given two inertial frames K and K' in relative motion and standard orientation, then the length in K of a rod s units long in K' is equal to the length in K' of a rod s units long in K – provided that both rods have the same orien-

³¹² Da $c = \frac{2AB}{t_3 - t_1} = \frac{2AB\varepsilon}{t_2 - t_1} = 2\vec{c}\varepsilon$ e da $c = \frac{2AB}{t_3 - t_1} = \frac{2AB}{(t_3 - t_2) + (t_2 - t_1)} = \frac{2}{\frac{(t_3 - t_2)}{AB} + \frac{(t_2 - t_1)}{AB}} = \frac{2}{\frac{1}{\vec{c}} + \frac{1}{\overleftarrow{c}}} = \frac{2}{\frac{1}{\vec{c}} + \frac{2\varepsilon}{c}}$

³¹³ Analizzate in [Zhang, 1997] pag. 8-16; le differenze sostanzialmente consistono nelle diverse definizioni del tempo misurato dagli orologi e delle componenti della velocità *round-trip* di c , tutte leggermente diverse da quelle riassunte nelle [14_1] e [14_3]

³¹⁴ [Einstein, 1961] 100th anniversary edition pag. 24

³¹⁵ [Winnie, 1970] pag. 229-231, anche per i seguenti principi citati; in questa sezione di fa riferimento al lavoro [Winnie, 1970], scelto rispetto a [Edward, 1963] per le impostazioni delle trasformazioni di Lorentz modificate (generalizzate)

tation in their respective rest-frames.

La proposta di Winnie per una teoria modificata è la *ridefinizione* di questi princìpi fondamentali come segue:

- *Round-Trip Light Principle*: The average round-trip speed of any light-signal propagated (in vacuo) in a closed path is equal to a constant c in all inertial frames of reference.
- *Principle of Equal Passage-Times*: Let K and K' be two inertial frames in relative motion, and let A and A' be arbitrary points on the x -axes of K and K' respectively. Let Δt be the time-interval in K of the passage of a rod at rest in K' of rest length s past the point A in K , and let $\Delta t'$ be the time-interval in K' of the passage of a rod at rest in K of rest length s past the point A' in K' . Then $\Delta t = \Delta t'$.
- *Principle of Linearity*: For any two inertial frames K and K' , regardless of the choices of ε in K and K' , any point P in constant straight line motion with respect to K is also in constant straight-line motion with respect to K' , and conversely.

§ 15 Trasformazioni di ε -Lorentz

Su queste basi, Winnie dimostra nel suo studio che la convenzionalità della velocità della luce unidirezionale implica la convenzionalità di tutte le velocità unidirezionali e dallo studio della contrazione delle lunghezze e della dilatazione dei tempi tra sistemi inerziali ottiene le trasformazioni di Lorentz legate al parametro ε , dette *trasformazioni di ε -Lorentz*. Considerati i sistemi di riferimento inerziali K e K' , con i rispettivi valori di ε ed ε' , le velocità unidirezionali della luce $\vec{c}$, $-\vec{c}$ e $\vec{c}'$, $-\vec{c}'$, con velocità $\vec{v}_\varepsilon$ di K' rispetto a K e velocità $\vec{v}_{\varepsilon'}$ di K rispetto a K' , e considerate valide per ogni sistema di riferimento inerziale le relazioni [14_3] e [14_4], le *trasformazioni di ε -Lorentz* sono³¹⁶

$$x' = \frac{x - \vec{v}_\varepsilon t}{\alpha} \quad [15_1]$$

$$t' = \frac{\left[\left(\frac{\vec{v}_\varepsilon}{c} \right) (1 - \varepsilon - \varepsilon') + 1 \right] t - \left[\frac{2c(\varepsilon - \varepsilon') + 4\vec{v}_\varepsilon(\varepsilon)(1 - \varepsilon)}{c^2} \right] x}{\alpha} \quad [15_2]$$

dove

$$\alpha = \sqrt{\frac{\left(c - \vec{v}_\varepsilon (2\varepsilon - 1) \right)^2 - \vec{v}_\varepsilon^2}{c^2}}. \quad [15_3]$$

Si osserva che per il valore $\varepsilon = 1/2$, per il quale si eguagliano le velocità *round-trip* della luce,

³¹⁶ [Winnie, 1970] pag. 231-235

si ottiene per la [15_3] il valore originale del fattore di contrazione di Lorentz

$$\alpha = \sqrt{1 - v^2/c^2} = 1/\gamma$$

e da [14_1] e [14_2] si ottengono per [15_1] e [15_2] i valori originali delle trasformazioni spaziale e temporale

$$x' = \frac{x - vt}{\alpha} = \gamma(x - vt)$$

$$t' = \frac{1}{\alpha} \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) .$$

Con le ε -trasformazioni si ricavano le relazioni relativistiche modificate per la contrazione delle lunghezze e la dilatazione dei tempi

$$\Delta x = \Delta x' \alpha = \frac{\Delta x'}{\gamma}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\alpha} = \gamma \Delta t' .$$

I risultati si dimostrano³¹⁷ cinematicamente equivalenti a quelli della *relatività ristretta*, come previsto dalla tesi della *conventionality of simultaneity* e, come afferma Michael Tooley (1941-):

la teoria modificata evita un assunto proprio delle formulazioni standard della teoria speciale della relatività, ma che non ha sostegno sperimentale, e che rischia di non essere verificabile nemmeno in linea di principio, e cioè l'assunto per cui la velocità unidirezionale della luce è una costante in tutte le direzioni e in tutti i sistemi inerziali³¹⁸.

Il maggior potere predittivo della teoria della relatività modificata, la mancanza dell'assunto probabilmente indimostrabile della velocità unidirezionale della luce e il riscontrare l'esigenza che nasce dalla meccanica quantistica relativamente alla *simultaneità assoluta* (cfr § 12) rendono secondo Tooley la teoria relativistica modificata superiore alla teoria originale. Includendo una legge di conservazione dello spazio, la teoria modificata può affermare che «data una qualunque regione spaziotemporale temporalmente circoscritta [...] l'esistenza di tale regione è stata causata dall'esistenza di una regione spaziotemporale precedente»³¹⁹; analogamente si può predire che ci saranno successive regioni spaziotemporali, spiegazioni causali che la teoria originale non è in grado di dare.

Il postulato che la velocità unidirezionale della luce sia uguale in tutte le direzioni, in ogni sistema inerziale, è una sorta di «assunto metafisico gratuito»³²⁰ a tutt'oggi indimostrabile e chiaramente più vincolante rispetto alla velocità della luce unidirezionalmente non limitata, se non dal processo *round-trip* (ovvero definita dalle relazioni [14_3]). Già nel 1898 Poincaré scrisse: «Questo è un postulato in mancanza del quale sarebbe impossibile iniziare una qualsiasi misura di questa velocità. Resterà per sempre impossibile verificare la validità

³¹⁷ [Winnie, 1970] pag. 237

³¹⁸ [Tooley, 1997] edizione italiana pag. 305

³¹⁹ [Tooley, 1997] edizione italiana pag. 317-318

³²⁰ Parere di [Tooley, 1997] edizione italiana pag. 319

di questo postulato con degli esperimenti.»³²¹.

Si accenna solamente all'esistenza di un approfondito studio di Sonogo e Pin, *Foundations of anisotropic relativistic mechanics* (Journal of Mathematical Physics, 50, 042902, 2009), che riscrive le equazioni fondamentali della dinamica (lagrangiana, energia e momento) in modo compatibile con una relatività che tenga conto dell'anisotropia dello spazio.

Poiché secondo la teoria modificata lo spazio assoluto è una entità duratura e le parti temporali sono connesse tramite relazioni causali non ramificate, la luce ha una velocità uniforme rispetto allo spazio assoluto stesso. Quindi la velocità unidirezionale in una particolare direzione e verso, rispetto al sistema inerziale, dipende da velocità, direzione e verso di questo sistema inerziale rispetto allo spazio assoluto³²². La composizione delle velocità di andata e ritorno del segnale luminoso, misurate all'interno del sistema, tenuto conto della dilatazione temporale e della contrazione delle lunghezze, sarà $\frac{c^2}{c+v}$ e $\frac{c^2}{c-v}$, quindi le velocità unidirezionali sarebbero differenti tra loro e diverse da c .

Se fosse possibile misurare la velocità unidirezionale della luce e questa risultasse sempre uguale a c , sarebbe smentita la teoria modificata, se invece si verificassero velocità diverse sarebbe possibile determinare la velocità di qualunque sistema inerziale rispetto allo spazio assoluto, una conclusione che farebbe contento Newton, probabilmente (se mai sia stato contento di qualche risultato, nella sua vita³²³). Nel merito si riporta anche l'opinione di W. F. Edwards, uno dei precursori delle formulazioni della trasformazione di Lorentz alternativa, nel caso in cui lo spazio sia anisotropo, che 'mette il cuore in pace' dei fan della formulazione originale³²⁴:

Concerning the necessity of taking on faith the isotropy of space, may I preliminarily remark that if the adoption of one definition of simultaneity (or, which is equivalent, the one-way speed of light) could in any way lead to different observable results than those predicted by the adoption of another, then a test of the isotropy of space *would* exist. If, however, no experiment can be devised to make this test, the surely it makes no difference what one assumes about the simultaneity of clocks so long as the two-way speed of light equals c .³²⁵

³²¹ Citazione di Poincaré da Review of Metaphysic Journal. Morale, 6, 1898, 1, in [Selleri, 2001] pag.166

³²² [Tooley, 1997] edizione italiana pag. 328-329, anche per le successive considerazioni del paragrafo

³²³ Newton fu sempre molto scontroso e riservato, sempre insoddisfatto di tutto, oltre che delle sue ricerche; i biografi narrano che rise una sola volta in vita sua «quando qualcuno gli chiese a che cosa servivano gli *Elementi* di Euclide» [Piergiorgio Odifreddi, *Sulle spalle di un gigante* (Longanesi, 2014) pag. 17]

³²⁴ [Edwards, 1963] pag. 482

³²⁵ Si osserva che Piotr Kosiński (1959-) in una analisi recente, [Kosiński, 2006], fa un inquadramento nel formalismo relativistico tensoriale delle originali trasformazioni di Edwards, precisando il loro significato teorico grupale, ferme restando le conclusioni generali

§ 16 Trasformazioni di ξ -Lorentz

Utilizzando la notazione di Reichenbach e di Winnie, immaginando una sorgente in A in un tempo t_1 (e virtualmente t_3 in un processo *round-trip*) e un osservatore in B in un tempo t_2 , poiché si osserva sempre un aumento del *tempo specifico* dei fotoni delle sorgenti remote, al netto dei moti propri delle sorgenti, si deve variare la [14_2b] e considerare il parametro ε limitato a $\frac{1}{2} < \varepsilon < 1$, quindi per mezzo della seguente relazione tra ε e il parametro $\xi > 1$ associato al tempo (cfr § 7)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{1}{2\xi}\right), \quad [16_1]$$

che rispetta le nuove condizioni poste su ε al variare di ξ ³²⁶, si può riscrivere la [14_2a] ottenendo

$$t_2 - t_1 = \left(1 - \frac{1}{2\xi}\right)(t_3 - t_1)$$

per il *tempo specifico* osservato conseguente alla velocità della luce unidirezionale $\vec{c}$, e un teorico tempo associato a $\vec{c}$ pari a

$$t_3 - t_2 = (1 - \varepsilon)(t_3 - t_1) = \frac{1}{2\xi}(t_3 - t_1),$$

coerentemente inferiore a metà del tempo complessivo di percorrenza associato alla velocità della luce $\vec{c}$.

Immaginando che le differenze associate ai tempi non siano imputabili a diverse velocità della luce ma a un diverso scorrere del *tempo specifico* dei fotoni rispetto a un *tempo universale* di riferimento come nell'*ipotesi* di lavoro [a] (cfr § 8), si può utilizzare la relazione [16_1] per sostituire i valori ε ed ε' per i due sistemi di riferimento inerziali K e K' , con velocità $\vec{v}$ di K' rispetto a K , e modificare le *trasformazioni di ε -Lorentz* [15_1, 2, 3] ottenendo le seguenti, che si definiscono *trasformazioni di ξ -Lorentz*:

$$x' = \frac{x - \vec{v}t}{\alpha} \quad [16_2]$$

$$t' = \frac{\left[\vec{v} \left(\frac{1}{\xi} + \frac{1}{\xi'} - 2 \right) + c \right] t - \left[\left(\frac{1}{\xi'} - \frac{1}{\xi} \right) + \frac{\vec{v}}{c} \left(\frac{2\xi - 1}{\xi^2} \right) \right] x}{c\alpha} \quad [16_3]$$

dove

$$\alpha = \sqrt{\frac{\left[c - \vec{v} \left(1 - \frac{1}{\xi} \right) \right]^2 - \vec{v}^2}{c^2}}. \quad [16_4]$$

³²⁶ Essendo $\lim_{\xi \rightarrow 1+} \left(1 - \frac{1}{2\xi}\right) = \frac{1}{2}$ e $\lim_{\xi \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{2\xi}\right) = 1$

Si osserva che per il valore limite $\xi = 1$, corrispondente al valore $\varepsilon = 1/2$, si ottiene anche per la [16_4] il valore originale del fattore di contrazione di Lorentz

$$\alpha = \sqrt{1 - v^2/c^2} = 1/\gamma$$

e per la [16_2] e la [16_3] si ottengono i valori originali delle trasformazioni spaziale e temporale

$$x' = \frac{x - vt}{\alpha} = \gamma(x - vt)$$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right).$$

Quindi anche con le ξ -trasformazioni si ricavano le relazioni relativistiche modificate per la contrazione delle lunghezze e la dilatazione dei tempi di K rispetto a K'

$$\Delta x = \Delta x' \alpha = \frac{\Delta x'}{\gamma}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\alpha} = \gamma \Delta t'.$$

A prescindere dalle conclusioni finali negative in merito all'esistenza del *tempo specifico* dei fotoni provenienti da sorgenti remote (cfr § 18) conseguente alla *circostanza del redshift* $[\sigma]$ (cfr § 7) e all'*ipotesi* $[a]$ (cfr § 8) sul rallentamento del tempo della particella e la non espansione dell'universo, le relazioni [15_4] e [15_5] possono essere utilizzate per mettere in relazione misure di tempo, espresse in funzione del parametro ξ , tra i due sistemi di riferimento inerziali K e K' , rimanendo validi i principi della *relatività ristretta* come modificati da Winnie (cfr § 14).

In altre parole il *tempo specifico* ipotizzato, espresso utilizzando il parametro ξ (o una delle equivalenti espressioni riassunte nella [7_7]), si può considerare coerente con la *relatività ristretta* modificata.

G Tempo specifico nello spaziotempo di Minkowski

§ 17 Legge di Hubble-Lemaître³²⁷

La legge empirica concepita da Hubble [Hubble, 1929], considerata come una congettura basata sull'effetto Doppler come causa del redshift nella *circostanza del redshift* $[\eta]$ di espansione dell'universo (cfr § 6 e § 7), individua una relazione tra la velocità osservata degli oggetti cosmologici e la loro distanza, una proporzione diretta secondo il parametro $H(t_u)$ detto *parametro di Hubble* ed espresso in $\text{Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$

$$v_{obs} = H(t_u) d_{Mpc} \quad \text{ovvero} \quad v_{obs} = H_0 d_{Mpc} \quad [17_1a]$$

dove H_0 corrisponde al valore attuale del *parametro di Hubble*, v_{obs} è la velocità osservata espressa in Km s^{-1} e d_{Mpc} la distanza espressa in Mpc .

Si ha inoltre (con riferimento alle stime di [Riess, 2021])

$$\tau = \frac{1}{H_0} \quad \approx 13.3 \text{ Gyr} \quad \text{detto tempo di Hubble,} \quad [17_1b]$$

che rappresenta una stima approssimativa dell'età dell'universo³²⁸;

$$R_H = \frac{c}{H_0} \quad \approx 4.3 \text{ Gpc} \quad \text{detto raggio di Hubble,} \quad [17_1c]$$

che corrisponde alla distanza dall'osservatore alla quale la velocità di recessione è pari alla velocità della luce, quindi rappresenta il raggio dell'universo *osservabile*.

Il valore inizialmente individuato da Hubble era $H_0 \sim 530 \text{ Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, molto sovrastimato (a causa di errori di valutazione nella distanza delle Cefeidi considerate), in séguito il valore venne valutato in $H_0 = 50 \text{ Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ e $H_0 = 100 \text{ Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, secondo le scuole di pensiero rispettivamente di Sandage e di Gerard de Vaucouleurs (1918-1995).

Le stime recenti si basano su parametri astrofisici

$$H_0 = 73.2 \pm 1.3 \text{ Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad [\text{Riess, 2021}] \text{ Cefeidi e Supernova 1A}$$

$$H_0 = 69.8 \pm 0.6 (\text{stat}) \pm 1.6 (\text{sys}) \text{ Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad [\text{Friedmann, 2021}] \text{ TRGB}^{329}$$

o su parametri cosmologici

$$H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ Km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad [\text{Planck, 2020}] \text{ anisotropie MCR}^{330}.$$

³²⁷ Benché nota col nome di "Legge di Hubble", la relazione lineare tra il redshift, interpretato come velocità di recessione, e la distanza delle sorgenti fu osservata e intuita qualche anno prima di Hubble da Georges Lemaître (cfr § 6), al quale sarebbe corretto attribuire almeno ex aequo il nome della relazione, come si cerca di fare nell'approfondimento

³²⁸ Ovviamente secondo il *modello cosmologico standard* che prevede il *Big Bang* iniziale

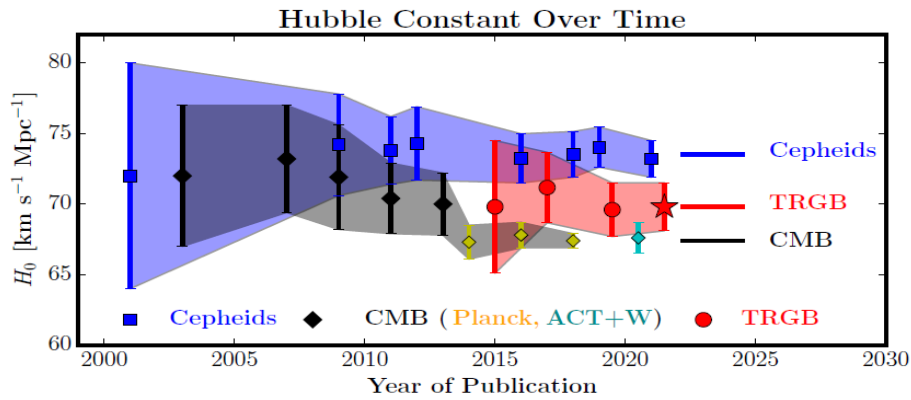
³²⁹ Stima ottenuta col metodo di calibrazione del Tip of the Red Giant Branch (TRGB), con i dati del telescopio spaziale Gaia dell'ESA (European Space Agency)

³³⁰ Stima ottenuta con il telescopio spaziale Planck dell'ESA misurando le anisotropie della radiazione cosmica

Nel confronto dei risultati è importante considerare come i valori siano basati sulla misurazione di processi molto diversi (stima dei periodi tra i picchi di luminosità delle Cefeidi, stima dei valori massimi del ramo delle giganti rosse e analisi delle anisotropie della MCR sulla base di modelli cosmologici), basati comunque su modelli; la sostanziale convergenza è già un indicatore positivo ma non determina alcun valore 'risolutivo'.

Nella *Figura 3* sono evidenziate le stime del valore di H_0 effettuate dall'anno 2000 per i citati parametri di valutazione³³¹.

Figura 3



A summary of Hubble constant values in the past two decades, based on Cepheid variables (blue squares), the TRGB (red filled circles and star), and estimates based on measurements of fluctuations in the CMB (WMAP: black filled diamonds; Planck: yellow diamonds; ACT + WMAP: cyan diamond). The CMB H_0 values assume a flat Λ CDM model. The CMB and Cepheid results straddle a range of 67 to 74 km s⁻¹ Mpc⁻¹, with the TRGB results falling in the middle, and overlapping the CMB results. The tension between the CMB and TRGB results amounts to only 1.3σ .

Secondo l'interpretazione corrente, considerando una espansione radiale quindi la distanza $R(t_u) = r a(t_u)$ espressa dalla [7_3b], dalla [17_1a] si ottengono le relazioni

$$v(t_u) = \dot{R}(t_u) = r \dot{a}(t_u) = \frac{R(t_u)}{a(t_u)} \dot{a}(t_u) = H(t_u) R(t_u)$$

e infine il *parametro di Hubble* espresso in funzione del *fattore spaziale di scala* (cfr § 7)

$$H(t_u) \equiv \frac{\dot{a}(t_u)}{a(t_u)} \quad \text{ovvero} \quad H(t_u) \equiv \frac{\dot{R}(t_u)}{R(t_u)} \text{ [s}^{-1}\text{]}. \quad [17_2]$$

Secondo la propria interpretazione alternativa, basata sull'*ipotesi [a]* (cfr § 8) e senza presupporre l'espansione dell'universo: più lontano si osserva, più il tempo è variato secondo ξ (cfr § 18) e maggiore è l'effetto 'velocità di recessione', come si nota considerando la [7_6] e scrivendo la [17_1a] come

a microonde, basandosi sul modello Λ CDM con parametro di densità della materia $\Omega_m = 0.315 \pm 0.007$

³³¹ [Freedman, 2020] pag. 43

$$v_{obs} = c(\xi_{obs} - 1) = H_0 d_{Mpc}$$

da cui

$$d_{Mpc} = \frac{c}{H_0}(\xi_{obs} - 1) . \quad [17_3]$$

Riscrivendo la relazione [17_3] con ξ_{obs} espresso in funzione di d_{Mpc} si ottiene

$$\xi_{obs} = \frac{H_0}{c} d_{Mpc} + 1 , \quad [17_4a]$$

che nel piano (d_{Mpc}, ξ_{obs}) rappresenta una retta con pendenza $\frac{H_0}{c} = \frac{1}{R_H}$ al variare della distanza, dove R_H è il raggio di Hubble [17_1c], ma in particolare si ottiene la formulazione tradizionale della *legge di Hubble-Lemaître* (cfr § 19 e § 21 per un approfondimento)

$$z_\xi = \xi_{obs} - 1 = \frac{H_0}{c} d_{Mpc} . \quad [17_4b]$$

Considerando una sorgente dell'universo locale e le relazioni $d = ct_s$ e $d = c\xi t_u$, si può scrivere la [17_4a] come

$$\xi = H_0 t_s + 1 \text{ e } \xi = H_0 \xi t_u + 1$$

ottenendo t_s e t_u in funzione di ξ e di H_0 oppure di z_ξ e H_0

$$t_s = \frac{\xi - 1}{H_0} = \frac{z_\xi}{H_0} \quad \text{e} \quad z_\xi = t_s H_0 = t_s H_{0,\xi}^{332} ;$$

$$t_u = \frac{1}{H_0} \left(1 - \frac{1}{\xi} \right) = \frac{1}{H_0} \left(\frac{z_\xi}{1 + z_\xi} \right) .$$

Per avere un ordine di grandezza delle quantità di cui si tratta, si può considerare la galassia Sb NGC658³³³, per la quale la misura di redshift della riga $H\alpha$ dell'idrogeno ionizzato HII relativa al centro galattico è

$$\xi = 1 + z = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} \approx \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right)^{1/2} = \frac{6628.5 \text{ \AA}}{6562.8 \text{ \AA}} = 1.01001$$

e corrisponde, secondo l'interpretazione corrente, a una velocità osservata lungo la LOS (corretta anche per i moti locali dell'osservatore) $v_{obs} = 3.024 \text{ Km/s}$ ovvero $v'_{obs} = 2.986 \text{ Km/s}$ ($0.01 c$) utilizzando la relazione relativistica [7_2b]; sulla base della [18_1] si misura quindi $t_s = 1.01001 t_u$, un rallentamento del tempo che, in considerazione della distanza stimata $d_{obs} = 40.8 \text{ Mpc}$ pari a 133 Mlyr , equivale a 1.33 Myr .

³³² Cfr questa espressione con la [21_12] ricavata nell'*Approfondimento sulla legge di Hubble-Lemaître*

³³³ Oggetto di osservazione al telescopio 'Galileo' di 122 cm dell'Osservatorio di Asiago e personale riduzione e analisi dei dati osservativi; si omettono nella stima qualitativa le incertezze sulle misure

§ 18 Misura del tempo

Agostino d'Ippona un po' si 'perse' nelle aporie³³⁴ sul tempo (passato, futuro, presente) e non in grado di concepirne una *misura* reale del presente finì per attribuirlo all'anima, affermando che «è l'anima a cogliere la lunghezza di un'estensione presente di tempo»³³⁵.

Galilei, più pragmatico, misurava il tempo con dei dispositivi ad acqua (che gocciolava scandendo degli intervalli più o meno costanti), come i dispositivi già costruiti secoli prima dagli ellenici³³⁶. Per ottenere delle misure più oggettive e precise si ricorse alla legge gravitazionale di Newton, ipotizzata valida per i pianeti, usando «la Luna come lancetta di un orologio formato dal sistema solare»³³⁷, definendo un tempo chiamato *tempo delle effemeridi*³³⁸.

In epoca contemporanea, le misure *tradizionali* di tempo vengono effettuate con orologi atomici ad altissima precisione³³⁹ che sfruttano le frequenze di risonanza di atomi (rubidio, cesio, mercurio, alluminio ecc.), per intervalli brevissimi, che poi vengono estesi ad libitum per misurare qualsiasi intervallo temporale. Si tratta di misure di tempo riferite a sorgenti di *eventi continuamente rinnovati*, ad esempio impulsi laser ad intervalli di un femtosecondo [10^{-15} s], non a intervalli nei quali una particella resti a lungo senza interagire, come negli spazi intergalattici. Un esempio su scala cosmica di un intervallo temporale brevissimo potrebbe essere $1.33 \cdot 10^8$ s, pari a circa 4.22 anni, 1.29 pc, distanza della stella più vicina a noi, Proxima Centauri, già questo 23 ordini di grandezza superiore al clock di un orologio atomico.

Un metodo assai più complesso fa affidamento sulle accuratissime misure dei periodi delle stelle Pulsar, quindi una 'sorgente astronomica esterna', una versione moderna dell'antica *osservazione del cielo*, con utilizzo di tecnologie molto avanzate: «The incredible stability of millisecond pulsar rotation leads to the possibility of developing a time scale based on the pulsar rotation which is analogous to the free atomic scale, Échelle Atomique Libre (EAL). The Ensemble Pulsar Scale (EPS) can be used to detect fluctuations in atomic timescales and therefore can lead to a new realisation of TT [Terrestrial Time].»³⁴⁰

Il fatto che una particella isolata, in assenza di interazioni elettromagnetiche lungo il percorso e di moti relativi tra sorgente e osservatore, manifesti un fluire del *tempo specifico* t_s

³³⁴ «Difficoltà di fronte alla quale viene a trovarsi il pensiero nella sua ricerca, sia che di tale difficoltà si ritenga raggiungibile la soluzione sia che essa appaia intrinseca alla natura stessa della cosa e quindi ineliminabile» [vocabolario Treccani online]

³³⁵ [Agostino, 401] edizione italiana pag. 100; in [Agostino, 401] XI, 27.36 pag. 595 «È in te, o anima mia, che io misuro il tempo.»

³³⁶ «Il principale strumento ellenistico per la misura del tempo era l'orologio ad acqua. L'antenato di questo strumento era la clessidra ad acqua dell'Egitto faraonico [...] I primi veri orologi sorgono ad Alessandria, nella prima metà del III secolo a.c., grazie a Ctesibio, che trasformò l'antica clessidra in un vero strumento di misura.» [Russo, 2021]

³³⁷ [Barbour, 1999] edizione italiana pag. 105

³³⁸ Le *effemeridi* sono tabelle che contengono varie grandezze astronomiche calcolate per particolari intervalli di tempo, utilizzabili ad esempio per ottenere la propria posizione o misurare il tempo stesso

³³⁹ L'accuratezza può essere dell'ordine di una parte su 10^{18} [Ludlow et al., 2015]

³⁴⁰ [Hobbs, 2012] pag. 207

esattamente uguale a t_u , ovvero che il fluire del tempo sia *universale*, viene *postulato* (nel *principio cosmologico*).

Ci si esprime in questi termini con un caveat, in quanto osservando un fotone si potrebbe pensare che per lui il tempo non trascorra. Alla velocità della luce, il rallentamento relativistico del tempo previsto per una particella materiale (o un osservatore, quindi in realtà non un fotone, massless), all'aumentare della propria velocità, porta un intervallo di tempo, con un passaggio logico al limite, ad incrementarsi sempre più, quindi il tempo stesso a non trascorrere, in definitiva a non esistere, per un osservatore inerziale esterno. Analogamente, per la contrazione relativistica delle lunghezze, il fotone non sarebbe nemmeno in movimento, essendo azzerato il suo percorso: se i fotoni fossero aristotelici non dovrebbero esistere! (cfr § 1). *Dal punto di vista del fotone*, fermo nel proprio sistema inerziale di riferimento, sarebbe il cosmo ad andargli incontro a velocità c , quindi le distanze sarebbero azzerate e il nostro tempo 'fermo', per lui la sua generazione da parte della sorgente e il rilevamento del CCD nel nostro telescopio, anche a miliardi dei nostri anni luce di distanza, sono eventi simultanei.

Quando ci si riferisce al *tempo specifico* manifestato, si intende sempre come rilevato *da fuori* del fotone da parte di un osservatore (con velocità inferiore a quella della luce, tenuto conto che la velocità della luce è sempre la stessa a prescindere dalla velocità della sorgente e dell'osservatore come previsto dalla *relatività ristretta* (salvo eventualmente quanto considerato per la *relatività ristretta modificata*, cfr sezione F).

Le analisi dell'*ipotesi [a]*, ovvero che il tempo non sia universale e l'universo non sia in espansione (cfr § 8), si basano sulle seguenti congetture sul fluire del tempo, ipotizzando per entrambe l'assenza di interazioni elettromagnetiche lungo il percorso e di moti relativi di sorgente e osservatore:

congettura [1] il tempo specifico t_s della particella in viaggio è *proporzionale* a t_u

$$t_s = \xi t_u \quad [18_1]$$

dove ξ è il parametro adimensionale definito nel § 7

congettura [2] il tempo specifico t_s della particella in viaggio è *funzione*³⁴¹ di t_u

$$t_s = \xi(t_u) \quad [18_2]$$

dove $\xi(t_u)$, dimensionalmente $[s]$, è la funzione definita nel § 19.

Sulla base dell'*ipotesi [a]*, il tempo universale t_u è un tempo virtuale che si utilizza nelle teorie metriche e nei modelli cosmologici ma nelle osservazioni dovrebbe essere modificato per ottenere il *tempo specifico* t_s dei fotoni ricevuti. Si potrebbe definire t_u un *tempo co-*

³⁴¹ Si intende una qualsiasi funzione reale continua, finita, derivabile (almeno due volte), monotona crescente; condizioni sempre rispettate nelle successive congetture

movente tra sorgente e osservatore (tra due osservatori fondamentali) che prescinde dalle comunicazioni, ovvero dalla trasmissione di fotoni a distanza.

Oltre all'ipotesi $[a]$, è ipotizzabile anche un modello nel quale avvenga l'espansione dell'universo e ogni sorgente che appartenga alla stessa superficie di simultaneità (cfr il *postulato di Weyl*, nel seguente capoverso) abbia lo stesso tempo t_u ma si debba tener conto del *tempo specifico* t_s dei fotoni che hanno viaggiato tra sorgente e osservatore, che misura una distanza relativa.

Sulla base del *postulato di Weyl* applicato al modello cosmologico fluido (in un universo in espansione),

the world lines of galaxies form a 3-bundle of non-intersectiong geodesics orthogonal to a series of spacelike hypersurfaces. [...] This time coordinate is called the *cosmic time*. It is easily seen that the spacelike hypersurfaces in Weyl's postulate are the surfaces of simultaneity with respect to the cosmic time. Moreover, t is the proper time kept by any galaxy.³⁴²

Considerando questo postulato applicato alle coordinate temporali, le geodetiche temporali si intersecano in un unico punto iniziale, che può essere virtualmente utilizzato per sincronizzare un tempo cosmologico tra osservatori comoventi; ad esempio la variabile temporale potrebbe essere associata alla temperatura del fondo cosmico a microonde (considerato nella sua interpretazione standard descritta nella nota)³⁴³. Il *momento* di generazione di questa radiazione non corrisponde all'intersezione delle geodetiche temporali, cioè a un *inizio del tempo*, ma solo a un evento condiviso e universalmente riconoscibile da qualunque osservatore (a grandi distanze temporali, attualmente 13.3 Gyr , cfr [17_1b], nell'ambito della teoria del *Big Bang*).

L'osservazione di Narlikar sul tempo proprio mantenuto da ogni galassia va associato alle superfici di simultaneità, non al *tempo specifico* dei singoli fotoni in viaggio oggetto dell'approfondimento, se non per la loro origine da coordinate che possono essere in relazione con l'osservatore tramite le superfici di simultaneità stesse.

Per sviluppare una verifica della congettura finalizzata alla valutazione del *tempo specifico* dei fotoni, si ipotizza che anche nel caso di non espansione dell'universo, quindi senza singolarità iniziale o dopo una fase inflattiva senza più una significativa inerzia espansiva, ci sia stato un momento iniziale nel quale la diffusa temperatura, alla soglia di $T \approx 3300 \text{ K}$, abbia dato origine all'emissione di radiazione che oggi si osserva come MCR (Microwave Cosmic Radiation, detta CMB). Si suppone inoltre che il *postulato di Weyl* sia applicabile anche nello spaziotempo di Minkowski, privo di curvatura (o con curvatura nulla).

³⁴² Jayant Vishnu Narlikar (1938-) in [Narlikar, 2002] pag. 107-109

³⁴³ Secondo la teoria del *Big Bang*, si ipotizza che la radiazione cosmica di microonde MCR, detta comunemente CMB, abbia avuto origine all'*epoca della ricombinazione*, circa 380 Kyr dopo 'la creazione', che corrisponde al redshift $z \approx 1080$, quando la diminuzione della temperatura non ha più consentito l'equilibrio termico tra fotoni e materia e l'universo è diventato progressivamente trasparente con l'emissione dei fotoni, alla temperatura $T \approx 3300 \text{ K}$, che attualmente sarebbero rilevati da una planckiana con il picco che corrisponde a $\lambda_{MCR} = 1,9 \text{ mm}$ quindi alla temperatura $T_{MCR} = 2.725 \text{ K}$; la radiazione MCR «fu predetta nel 1948 dal fisico e astronomo russo-americano George Gamow [1904-1968] sulla base del quadro oggi standard del *Big Bang*. Essa fu osservata per la prima volta (accidentalmente) nel 1965 da Penzias [Arno Penzias (1933-)] e Wilson [Robert Woodrow Wilson (1936-)]», [Penrose, 1989]

Sulla base della *congettura* [1] il tempo dei fotoni emessi da sorgenti cosmologiche e ricevuti dall'osservatore è il *tempo specifico* [18_1] ; sulla base di questo si può definire l'intervallo spaziotemporale (detto *elemento di linea*) secondo la metrica di Minkowski³⁴⁴, applicabile sicuramente in un universo locale, ovvero a distanze significativamente inferiori al raggio di Hubble [17_1c] , ma anche oltre se si suppone che l'universo non possieda curvatura (come nelle seguenti congetture):

$$ds^2 = c^2 \xi^2 (dt_u)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2 , \quad [18_3]$$

tra due eventi in un universo privo di gravità dove sia invariante la velocità della luce c , e $dx^1 dx^2 dx^3$ siano gli incrementi delle coordinate spaziali.

Analogamente, sulla base della *congettura* [2] e del *tempo specifico* [18_2] , l'intervallo spaziotemporale secondo la metrica di Minkowski si può scrivere

$$ds^2 = c^2 (d\xi(t_u))^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2 . \quad [18_4]$$

Si schematizza nella *Figura 4* una superficie di simultaneità (tracciata in grigio), una sorgente remota α e un osservatore β , posti rispettivamente alle coordinate comoventi spaziali $A_I(x_A^1, x_A^2, x_A^3)$ e $B_I(x_B^1, x_B^2, x_B^3)$, che si considerano appartenenti allo stesso sistema di riferimento (o in sistemi di riferimento diversi ma in quiete uno rispetto all'altro), separati dall'intervallo spaziotemporale ds (come definito dalla [18_3]) e appartenenti alla stessa superficie di simultaneità nell'istante $t_{u1} \equiv A_I \equiv B_I$. Si considera quindi il percorso di un fotone emesso dalla sorgente α alla coordinata A nell'istante A_I che raggiunga l'osservatore β alla coordinata B nell'istante B_I . Dopo l'emissione in α si associa al fotone il *tempo specifico* t_s , mentre per l'osservatore β si considera il tempo universale t_u per fare una *reductio ad absurdum*.

In base alla [18_1] (e alla [7_5]) si ipotizza quindi, come in *Figura 4a*,

$$t_{s(A_1 \rightarrow B_2)} = \xi t_{u(A_1 \rightarrow B_2)} > t_{u(B_1 \rightarrow B_2)} . \quad [18_5]$$

Immaginando che la superficie di simultaneità sia sempre più remota, fino a coincidere con il momento della diffusione della radiazione oggi osservata come MCR³⁴⁵, posto quindi O_{MCR} come *inizio del tempo osservabile*, da

$$t_{u(O_{MCR} \rightarrow A_1)} + t_{s(A_1 \rightarrow B_2)} = t_{u(O_{MCR} \rightarrow B_1)} + t_{u(B_1 \rightarrow B_2)}$$

si ottiene, per $t_{u(O_{MCR} \rightarrow A_1)} \rightarrow 0$ quindi anche $t_{u(O_{MCR} \rightarrow B_1)} \rightarrow 0$,

$$t_{s(A_1 \rightarrow B_2)} = \xi t_{u(A_1 \rightarrow B_2)} = t_{u(B_1 \rightarrow B_2)}$$

³⁴⁴ L'elemento di linea originale di Minkowski, cfr [Minkowski, 1909], si indica come $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, utilizzando la convenzione di Einstein della sommatoria sugli indici ripetuti, dove $\eta_{\mu\nu}$ rappresenta il tensore metrico dello spaziotempo minkowskiano quadridimensionale (si adotta la segnatura $1, -1, -1, -1$); il tensore metrico è costante e lo spazio è di tipo euclideo, piatto, quindi la componente spaziale del tensore corrisponde alla matrice unità in $\mathbb{R}^3$, a parte il segno; l'intervallo ds^2 è un invariante relativistico, ovvero assume lo stesso valore in qualsiasi sistema di riferimento inerziale, ed è detto di tipo *tempo*, di tipo *luce* o di tipo *spazio* a seconda che il suo valore sia negativo, nullo o positivo

³⁴⁵ Questa congettura è concepita nel *modello cosmologico standard* e ottiene alla fine il risultato della non necessità di postulare che il tempo sia universale

come in *Figura 4b*, e poiché il tempo di generazione della MCR è effettivamente quello misurato dall'osservatore β , si può concludere

$$t_{s(O_{MCR} \rightarrow B_2)} = \xi t_{u(O_{MCR} \rightarrow B_2)} = t_{u(O_{MCR} \rightarrow B_2)} = t_{MCR}, \quad [18_6]$$

$$\text{quindi } \xi = 1 \quad \text{e} \quad t_s = t_u, \quad [18_7]$$

contraddicendo la [18_5] che risulta una falsa ipotesi.

Queste costruzioni valgono sia per l'universo in espansione sia nell'ipotesi sopra considerata di non espansione (a prescindere quindi dalla circostanza di generazione del redshift).

L'immagine in ipotesi nella *Figura 4a* quindi non è corretta, l'immagine nella *Figura 4b* rispecchia invece questa conclusione.

Con un ragionamento più formale, sempre nell'ipotesi di simultaneità dell'evento iniziale (ad esempio la generazione della MCR), si considerano le distanze 4-dimensionali (intervalli spaziotemporali) ds tra le coordinate spaziotemporali (eventi) A_1 , B_1 e B_2 , espresse nelle circostanze dell'ipotesi in studio in base alla [18_3] (cfr *Figura 4a*), che si possono scrivere³⁴⁶

$$ds_{(A_1 \rightarrow B_2)}^2 = c^2 dt_{s(A_1 \rightarrow B_2)}^2 - \left(dx_{(A_1 \rightarrow B_2)}^1\right)^2 - \left(dx_{(A_1 \rightarrow B_2)}^2\right)^2 - \left(dx_{(A_1 \rightarrow B_2)}^3\right)^2; \quad [18_8]$$

$$ds_{(B_1 \rightarrow B_2)}^2 = c^2 dt_{u(B_1 \rightarrow B_2)}^2 \quad [18_9]$$

considerato che l'osservatore β è fermo alla coordinata B , quindi

$$\begin{aligned} dx_{(B_1 \rightarrow B_2)}^1 &= dx_{(B_1 \rightarrow B_2)}^2 = dx_{(B_1 \rightarrow B_2)}^3 = 0; \\ ds_{(A_1 \rightarrow B_1)}^2 &= -\left(dx_{(A_1 \rightarrow B_1)}^1\right)^2 - \left(dx_{(A_1 \rightarrow B_1)}^2\right)^2 - \left(dx_{(A_1 \rightarrow B_1)}^3\right)^2 \end{aligned} \quad [18_{10}]$$

considerato che gli eventi nelle coordinate spaziotemporali A_1 e B_1 sono simultanei, quindi

$$dt_{s(A_1 \rightarrow B_1)} = dt_{u(A_1 \rightarrow B_1)} = 0.$$

Si osserva inoltre che α e β sono posizionati in coordinate comoventi, quindi i differenziali spaziali nella [18_8] e nella [18_{10}] sono uguali

$$dx_{(A_1 \rightarrow B_2)}^1 = dx_{(A_1 \rightarrow B_1)}^1, \quad dx_{(A_1 \rightarrow B_2)}^2 = dx_{(A_1 \rightarrow B_1)}^2, \quad dx_{(A_1 \rightarrow B_2)}^3 = dx_{(A_1 \rightarrow B_1)}^3.$$

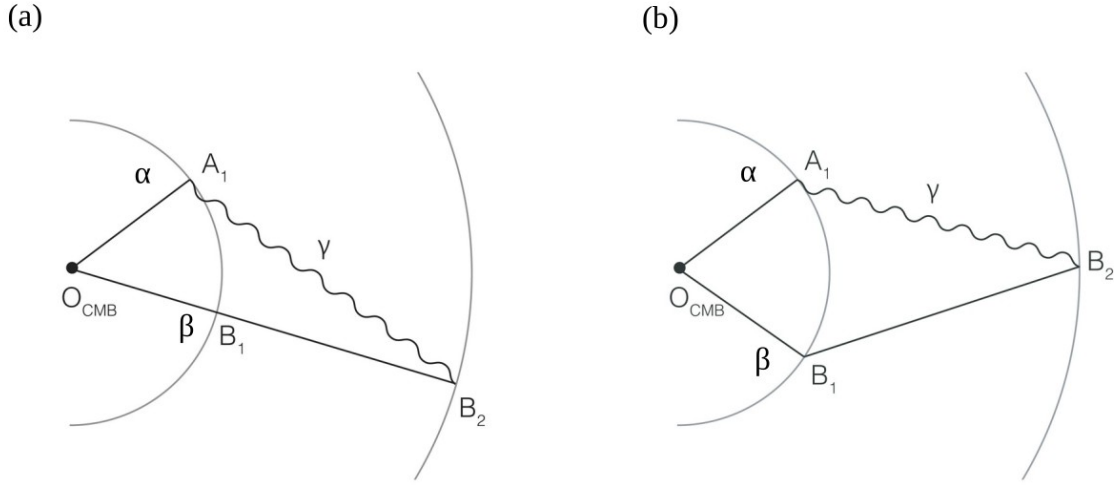
Nelle premesse indicate, data l'ortogonalità delle geodetiche temporali in base al *postulato di Weyl*, in particolare della superficie di simultaneità nella coordinata B_1 rispetto alla geodetica $B_1 \rightarrow B_2$ nello spazio hermitiano³⁴⁷ nel quale si considera la metrica di Minkowski, si può applicare il teorema di Pitagora 4-dimensionale al triangolo 4-dimensionale definito dalle coordinate A_1 , B_1 , B_2 , ottenendo la relazione

$$ds_{(A_1 \rightarrow B_2)}^2 = ds_{(A_1 \rightarrow B_1)}^2 + ds_{(B_1 \rightarrow B_2)}^2.$$

³⁴⁶ Non si considera nullo a priori questo intervallo di tipo luce, come previsto dalla *relatività ristretta*, perché è ciò che si vuole dimostrare

³⁴⁷ Spazio vettoriale euclideo reale o complesso nel quale sia definito un prodotto interno, detto prodotto hermitiano, che permette di definire una nozione di distanza e di angolo

Figura 4



Le circonferenze in grigio nella figura schematizzano superfici di simultaneità, si tratta dell'unica dimensione della coordinata temporale del tempo universale t_u (raggio delle circonferenze), non di un piano nello spazio; le coordinate temporali si sarebbero potute rappresentare anche con segmenti paralleli ma le circonferenze visualizzano meglio le ipotesi in studio (CMB = MCR)

Sostituendo i valori delle relazioni [18_8] , [18_9] , [18_10] , ricordando che le misure di tempo sono tutte positive, si ottiene

$$dt_{s(A_1 \rightarrow B_2)} = \xi dt_{u(A_1 \rightarrow B_2)} = dt_{u(B_1 \rightarrow B_2)} , \quad [18_{11}]$$

ovvero si può trarre la conclusione [18_7], che il *tempo specifico* ipotizzato proporzionale al *tempo universale* debba essere uguale al *tempo universale* stesso in uno spaziotempo definito dalla metrica di Minkowski per un evento appartenente a una superficie di simultaneità condivisa con l'osservatore.

Questo risultato è generalizzabile partendo dalla relazione [18_4] , per la quale da un ragionamento uguale al precedente, utilizzando sempre le relazioni [18_8] , [18_9] , [18_10] si ottiene

$$dt_{s(A_1 \rightarrow B_2)} = \frac{d\xi(t_u)_{(A_1 \rightarrow B_2)}}{dt_{u(A_1 \rightarrow B_2)}} dt_{u(A_1 \rightarrow B_2)} = dt_{u(B_1 \rightarrow B_2)}$$

ma essendo $dt_{u(A_1 \rightarrow B_2)} = dt_{u(B_1 \rightarrow B_2)}$ per la [18_11] , si conclude

$$d\xi(t_u) = dt_u \quad \text{ovvero} \quad \xi(t_u) = t_u ,$$

che porta alla conclusione analoga alla [18_7] , $t_s = \xi(t_u) = t_u$ ovvero che il *tempo specifico* ipotizzato come funzione del *tempo universale* debba essere uguale al *tempo universale* stesso in uno spaziotempo definito dalla metrica di Minkowski per un evento appartenente a una superficie di simultaneità condivisa con l'osservatore.

Immaginando queste osservazioni applicate alla sorgente α associata all'emissione della radiazione MCR, da un punto di vista logico sarebbe più corretto affermare che sia il *tempo universale* t_u a essere uguale al *tempo specifico* t_s , piuttosto che il contrario, in quanto quest'ultimo è quello effettivamente misurato con le osservazioni del redshift della radiazione MCR; rimane comunque da dimostrare cosa può accadere al *tempo specifico* t_s per tutti gli eventi più recenti di $t_{sMCR} = t_{uMCR}$, preso come riferimento iniziale, rispetto allo scorrere virtuale del tempo universale t_u .

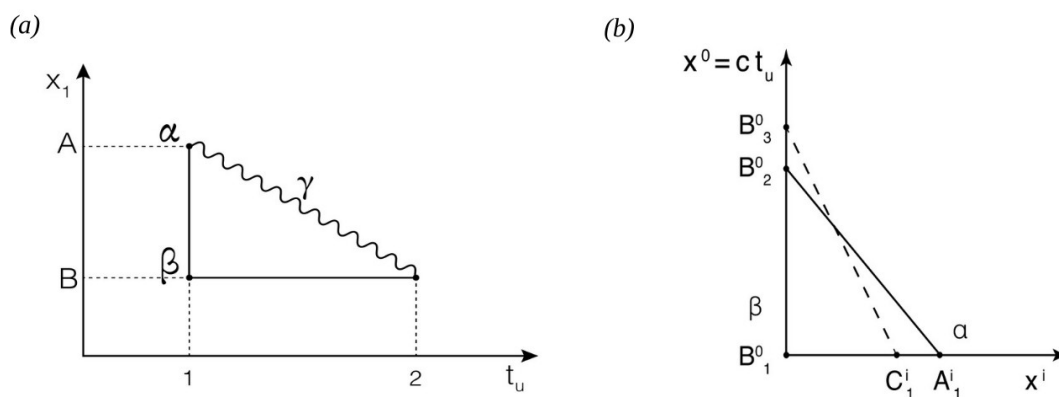
Tracciando un diagramma di Minkowski (*Figura 5b*), considerato un cono luce originato dalla sorgente α che al momento dell'emissione dei fotoni di MCR si trova alla coordinata spaziale A^i_1 dell'asse x^i (dove $i = 1, 2, 3$), che coinvolga nella coordinata $B^0_2 = x^0_2$ un osservatore β fermo nell'origine del sistema di riferimento ($B^0_1 = x^0_1 = 0$), ovvero rispetto all'osservatore β un ipercono luce che interseca in A^i_1 gli assi x^i definendo quindi una ipersfera con centro in B^0_2 , si osserva come questo ipercono rappresenti nella sua intersezione con i piani definiti dagli assi x^i la massima misura rilevabile di tempo e di distanza (tramite l'osservazione di fotoni) nell'universo visibile per l'osservatore β (l'evento MCR, una sorta di 'origine' confrontabile della coordinata temporale, sempre nel contesto del *modello cosmologico standard*).

Se i fotoni di una sorgente C^i_1 , posta a minor distanza di A^i_1 dall'origine ma non lontana da A^i_1 e simultanea ad A^i_1 , impiegassero il tempo $t_{sB_3} > t_{uB_2}$ per raggiungere l'osservatore β in B^0_3 , sarebbero più vecchi dei fotoni della MCR originati da α , ovvero $t_{sMCR} = t_{sB_3} > t_{uMCR}$, generando un paradosso che metterebbe in crisi la simultaneità (o la sequenza causale degli eventi), presupponendo l'evento α sorgente dei fotoni MCR il 'primo' osservabile.

Quindi è necessario concludere che il tempo non può scorrere a ritmi diversi, ovvero che

$$t_s = t_u \quad \forall \quad t_s. \quad [18_{-}12]$$

Figura 5



Nella *figura (a)* è riportato in ascissa il *tempo universale* t_u e in ordinata x^i , una delle dimensioni spaziali sulle quali si basa il ragionamento applicato alle coordinate comoventi A e B , formalmente x^i_A e x^i_B , dove si trovano la sorgente α e l'osservatore β . Nella *figura (b)* il diagramma di Minkowski riporta l'ipercono luce per la sorgente α in A^i_1 sull'asse x^i che raggiunge l'osservatore β in B^0_2 sull'asse $x^0 = ct_u$ e l'ipotetico percorso da C^i_1 di fotoni che giungano all'osservatore β in B^0_3 creando contraddizioni

In uno spaziotempo di Minkowski, la falsità dell'*ipotesi [a]* associata alle *congetture [1] e [2]*, ovvero la conclusione che il *tempo specifico* corrisponda al *tempo universale*, o in altre parole che esista un solo tempo chiamato universale, implica che il ritardo osservato nel tempo dei fotoni è misurato dal parametro ξ (cfr anche le relazioni [7_7]) o dalla funzione $\xi(t_u)$ non sia causato dal rallentamento di un *tempo specifico* dei fotoni in un universo non in espansione (*circostanza del redshift [σ]*).

La *congettura [2]* conseguente all'*ipotesi [a]* per uno spaziotempo definito da una metrica non euclidea è analizzata nella seguente parte III.

III FUNZIONE DEL TEMPO SPECIFICO $\xi(t_u)$ ED EQUAZIONI DI FRIDMAN

H § 19 Funzione del tempo specifico e fattore temporale di scala

Le analisi del § 18 in uno spaziotempo definito dalla metrica (piatta, euclidea) di Minkowski, basate sulla proporzionalità [18_1] tra *tempo specifico* e *tempo universale* (congettura [1] § 18), hanno portato alla dimostrazione della falsità dell'ipotesi [a] (cfr § 8) sul rallentamento del *tempo specifico*; in questa parte III si affronta questa ipotesi analizzando le equazioni ottenute in analogia alle equazioni della dinamica cosmica dello spaziotempo definito dalla metrica di Robertson-Walker, semplificate in una derivazione ottenuta dalla dinamica newtoniana.

La semplice considerazione che *qualunque* misura di lunghezza o distanza, che non sia fatta *manualmente* da una persona confrontando materialmente un metro campione, sia in realtà la misura di un tempo nel quale si spostano dei fotoni da una sorgente a un rilevatore (un osservatore), porta a considerare il tempo come variabile di riferimento per *ogni* misura di lunghezza $R(t_u)$.

Lo spostamento dei fotoni avviene alla velocità della luce c , che nel vuoto rappresenta un limite fisico alla propagazione (come previsto dalla *relatività ristretta* di Einstein) e non un rapporto tra distanza e tempo; si conserva questa costante fondamentale (pur nella possibilità dell'interpretazione della diversa velocità unidirezionale, cfr sezione F) e si osserva che le misure cosmologiche di tempo o di distanza sono stime conseguenti alla costanza di c , piuttosto che misure della stessa.

Le *coordinate comoventi* e le *distanze comoventi* [7_3b] sono originariamente considerate in relazione al *fattore spaziale di scala* [7_3a]. Sulla base della *congettura* [2] si considera la *distanza specifica* come

$$R(t_u) = ct_s = c\xi(t_u) \text{ [m]} \quad [19_1]$$

e una *coordinata comovente* come

$$r(t_u) = ct_u \text{ [m]}. \quad [19_2]$$

Le condizioni vincolanti per la funzione $\xi(t_u)$, conseguenti al significato di *tempo specifico* e a quanto considerato per il redshift nel § 7, sono

$$t_u \geq 0 \quad [19_3a]$$

$$\xi(t_u) = 0 \text{ se } t_u = 0, \text{ ovvero } \xi(0) = 0 \quad [19_3b]$$

$$\xi(t_u) \geq t_u. \quad [19_3c]$$

In analogia al *fattore spaziale di scala* [7_3a] si può quindi definire, sulla base della *congettura* [2] e delle considerazioni iniziali di questo paragrafo, un *fattore temporale di scala* $a_\xi(t_u)$

$$a_{\xi}(t_u) \equiv \frac{R(t_u)}{r(t_u)} \equiv \frac{c \xi(t_u)}{c t_u} = \frac{\xi(t_u)}{t_u} \text{ [adimensionale]}. \quad [19_4a]$$

Dalla [19_1], in analogia alla [7_3b], si può scrivere la coordinata radiale, ovvero una *distanza specifica* (maggior distanza apparente) tra eventi separati nel tempo, come

$$c \xi(t_u) = c t_u a_{\xi}(t_u) \quad \text{da cui} \quad \xi(t_u) = t_u a_{\xi}(t_u). \quad [19_4b]$$

Il rapporto $a_{\xi}(t_u)$ [19_4a] rappresenta la frazione di scostamento del *tempo specifico* dal *tempo universale* e determina quindi la frazione di *distanza specifica* conseguente al tempo $\xi(t_u)$ del fotone rispetto alla *coordinata comoviente* determinata con il tempo t_u . Esso rappresenta un fattore di scala in quanto la (maggior) distanza è interpretabile come un fattore dinamico, pur rimanendo nell'ipotesi di non espansione dell'universo (*circostanza del redshift* $[\sigma]$, cfr § 7).

Sulla base della condizione [19_3c] e del suo significato implicito, dalla [19_4a] consegue

$$a_{\xi}(t_u) \geq 1, \quad [19_5]$$

ovvero il *fattore temporale di scala* segue il verso della 'coordinata tempo' e gli eventi passati fanno riferimento al momento di emissione del fotone, piuttosto che alla sua osservazione.

L'utilizzo della funzione $\xi(t_u)$ per definire il *fattore temporale di scala* [19_4a] è coerente con l'*ipotesi* [a] e il *postulato di Weyl* (cfr § 18) qualora si intenda che il *tempo universale* t_u sia quello associato alle galassie e che esso rappresenti la geodetica temporale.

In stretta analogia con il *fattore spaziale di scala* [7_3a], dove viene fissata al tempo scala $t_{u,0}$ (indicato come t_0) la distanza $R(t_{u,0}) = R_0$, il *fattore temporale di scala* [19_4a] diventa

$$a_{\xi,0}(t_u) \equiv \frac{R(t_u)}{R_0} \equiv \frac{c \xi(t_u)}{c \xi(t_0)} = \frac{\xi(t_u)}{\xi_0} \text{ [adimensionale]} \quad [19_6]$$

con $\xi(t_u)$ *tempo specifico*, t_u *tempo comoviente*.

Il valore del tempo scala ξ_0 , come quello di R_0 , è una costante arbitraria e può essere considerato ad esempio pari al tempo di Hubble, $\xi_0 = \tau$ ([17_1b]), tenendo presente la condizione [19_3c] rispetto a t_0 .

In questa interpretazione, il fattore temporale di scala $a_{\xi,0}(t_u)$ non ha vincoli come [19_5], potrà essere sia maggiore sia minore di 1, analogamente al *fattore spaziale di scala* [7_3a], per il quale può essere $a(t_u) < 1$ se $R(t) < R_0$.

Sulla base della *congettura* [2] per il *tempo specifico* ($t_s = \xi(t_u)$) e della [17_1a] (legge di Hubble-Lemaître), derivando la [19_1] per ottenere la *velocità specifica* dalla *distanza specifica*, dalla relazione

$$v(t_u) = c \dot{\xi}(t_u) = H_{\xi}(t_u) c \xi(t_u) \text{ [m s}^{-1}] \quad [19_7]$$

si ricava il *parametro di Hubble* $H_{\xi}(t_u)$ in relazione al *tempo specifico* $\xi(t_u)$, che rappresenta il tasso di espansione del *tempo specifico*

$$H_{\xi}(t_u) \equiv \frac{\dot{\xi}(t_u)}{\xi(t_u)} [\text{s}^{-1}], \quad [19_8]$$

analoga all'espressione [17_2] basata sul *fattore spaziale di scala*.

La relazione [19_8] può essere riscritta in termini del *fattore temporale di scala* [19_4a], ricordando la [19_4b] $\xi(t_u) = t_u a_{\xi}(t_u)$, da cui $\dot{\xi}(t_u) = t_u \dot{a}_{\xi}(t_u)$, essendo nulla la derivata rispetto al tempo della coordinata temporale comovente, rapporto di due valori costanti in base alla [19_2], ottenendo

$$H_{\xi}(t_u) = \frac{\dot{a}_{\xi}(t_u)}{a_{\xi}(t_u)} [\text{s}^{-1}], \quad [19_9]$$

analoga all'espressione [17_2] basata sul *fattore spaziale di scala*, mantenendo la corretta dimensione.

La [19_8] e la [19_9] calcolate al tempo attuale determinano la costante di Hubble $H_{0,\xi}$ basata sul valore odierno $t_u = t_0$ della funzione $\xi(t_u)$ e del fattore $a(t_u)$

$$H_{0,\xi} \equiv \frac{\dot{\xi}(t_0)}{\xi(t_0)} = \frac{\dot{\xi}_0}{\xi_0} [\text{s}^{-1}] \quad [19_10a]$$

$$H_{0,\xi} = \frac{\dot{a}_{\xi}(t_0)}{a_{\xi}(t_0)} = \frac{\dot{a}_{0\xi}}{a_{0\xi}} [\text{s}^{-1}]. \quad [19_10b]$$

Si osserva che di conseguenza alla [19_8] e [19_9] valgono le relazioni

$$\frac{\dot{\xi}(t_u)}{\xi(t_u)} = \frac{\dot{a}(t_u)}{a(t_u)} \quad \text{e} \quad \frac{\ddot{\xi}(t_u)}{\xi(t_u)} = \frac{\ddot{a}(t_u)}{a(t_u)}; \quad [19_11a]$$

di conseguenza alla [19_10a] e [19_10b] valgono le relazioni

$$\frac{\dot{\xi}_0}{\xi_0} = \frac{\dot{a}_{0\xi}}{a_{0\xi}} \quad \text{e} \quad \frac{\ddot{\xi}_0}{\xi_0} = \frac{\ddot{a}_{0\xi}}{a_{0\xi}}. \quad [19_11b]$$

Le relazioni evidenziate in questo paragrafo saranno utilizzate nell'analisi qualitativa dei parametri cosmologici nel § 21.

I Equazioni della dinamica cosmica

§ 20 Equazioni di Fridman modificate

Sulla base della *congettura* [2] (cfr § 18) il tempo dei fotoni emessi da sorgenti cosmologiche e ricevuti dall'osservatore è il loro *tempo specifico* [18_2] ; sulla base di questo si può riscrivere la metrica di Robertson-Walker³⁴⁸ (cfr [Robertson, 1929]), considerando la *coordinata comoviente* [19_2] e il *fattore temporale di scala* [19_4a] :

$$ds_{\xi}^2 = [d\xi(t_u)]^2 - \frac{\xi^2(t_u)}{t_u^2} \left[\frac{(dt_u)^2}{1 - k c^2 t_u^2} + t_u^2 [d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\varphi^2] \right] [s^2] \quad [20_1a]$$

oppure, considerando la *coordinata comoviente* [19_2] e il *fattore temporale di scala* [19_6] al tempo scala ξ_0 :

$$ds_{\xi,0}^2 = [d\xi(t_u)]^2 - \frac{\xi^2(t_u)}{\xi_0^2} \left[\frac{(dt_u)^2}{1 - k c^2 t_u^2} + t_u^2 [d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\varphi^2] \right] [s^2] \quad [20_1b]$$

dove, con riferimento alla *Figura 6*, considerati la superficie di una sfera con coordinata radiale il raggio di curvatura R_c , un osservatore posto in un polo O e un punto P sulla superficie stessa, si definiscono: ds un elemento di distanza propria ortogonale alla coordinata radiale misurato da P ; $c t_u = r$ [m] e $c dt_u = dr$ la distanza radiale tra O e P ; θ l'angolo al centro descritto dal raggio di curvatura tra O e P ; φ la coordinata angolare ortogonale a r (si osserva che le quantità r , θ , φ sono quantità proprie, non comovienti); k un parametro legato al raggio di curvatura R_c dalla relazione $k = 1/R_c^2$ [m⁻²] che può essere considerato come $k(t_u) = 1/c^2 t_{u,c}^2$ [m⁻²] .

Figura 6

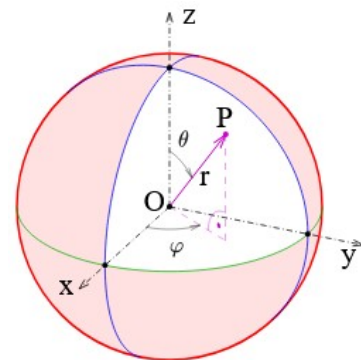


Figura di riferimento per le coordinate sferiche adottate; per semplicità non sono indicati i rispettivi differenziali, il raggio di curvatura R_c può essere immaginato sovrapposto a r ; fonte cleanpng.com (free)

³⁴⁸ Una delle espressioni della metrica originale è $ds^2 = dt_u^2 - \frac{1}{c^2} a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 [d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\varphi^2] \right] [s^2]$; nella cosmologia tradizionale, per convenzione la grandezza r è adimensionale e $a(t)$ ha la dimensione di una lunghezza, in tal modo se si normalizza il parametro $|k| = 1$ si ha $0 \leq r < 1$; in questo approfondimento si mantiene la dimensione di lunghezza per r e $a(t)$ adimensionale, cfr nota alle relazioni [20_6]

In una derivazione rigorosa si dovrebbe applicare la metrica di Robertson-Walker, come rideterminata in funzione del *tempo proprio*, alla teoria di campo della *relatività generale*; nella presente trattazione semplificata si considera una derivazione delle equazioni della dinamica cosmica dalle equazioni gravitazionali di Newton³⁴⁹; questa derivazione trova legittimazione nel *teorema di Birkhoff*³⁵⁰, che dimostra che un campo gravitazionale sfericamente simmetrico nello spazio vuoto è sempre descritto da una metrica di Schwarzschild; esso è analogo al *teorema di Newton* (basato sull'applicazione del *teorema di Gauss* al campo gravitazionale) per il quale il campo gravitazionale all'esterno di un corpo sfericamente simmetrico sarebbe lo stesso se la massa del corpo fosse tutta concentrata al centro del medesimo.

La *circostanza del redshift* $[\sigma]$ (cfr § 7), sulla quale si basa la *congettura* [2] per mezzo dell'*ipotesi* [a], suppone che l'universo non sia in espansione quindi si potrebbe considerarne la densità di massa costante, essendo costanti sia la massa sia il volume³⁵¹

$$\rho(t_s) = \rho_\xi(t_u) = \rho_0 \text{ [Kg m}^{-3}\text{]},$$

si ipotizza dunque una variazione *apparente* di densità associata all'aumento *apparente* delle distanze quindi del volume, analogamente alle *apparenti* velocità di recessione, parametri tutti associati al *fattore temporale di scala* [19_4a] e basati sulla relazione

$$\rho_\xi(t_u) = \rho_0 [a_\xi(t_u)]^{-3} = \rho_0 \left[\frac{\xi(t_u)}{t_u} \right]^{-3} \text{ [Kg m}^{-3}\text{]}, \quad [20_2a]$$

oppure, considerando il *fattore temporale di scala* [19_6] e il tempo scala ξ_0 ,

$$\rho_{\xi,0}(t_u) = \rho_0 [a_{\xi,0}(t_u)]^{-3} = \rho_0 \left[\frac{\xi(t_u)}{\xi_0} \right]^{-3} \text{ [Kg m}^{-3}\text{]}. \quad [20_2b]$$

Sulla base di queste considerazioni e delle relazioni del § 19 si può derivare dalla gravità newtoniana una equazione analoga alla *prima equazione della dinamica cosmica*³⁵²

$$\ddot{\xi}(t_u) = - \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi^2(t_u)} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad [20_3a]$$

oppure, considerando il tempo scala ξ_0 ,

³⁴⁹ Sviluppato in analogia allo studio dei parametri cosmologici tradizionali, con riferimento a [Franceschini, 2018] pag. 7/1-3

³⁵⁰ George David Birkhoff (1884-1944)

³⁵¹ Si osserva che già ipotizzare costante la densità di massa porterebbe a concludere sulla base della relazione [20_2a] che $\rho_\xi(t_u) / \rho_0 = 1$ quindi $\xi(t_u) = t_u$ ma per completezza si procede con l'analisi delle equazioni di Fridman parallela a quella tradizionale

³⁵² La prima equazione 'newtoniana' originale della dinamica cosmica è $\ddot{R}(t_u) = - \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{R_0^3}{R^2(t_u)} \text{ [m s}^{-2}\text{]}$; si

osserva che dimensionalmente le espressioni sono diverse, essendo le [20_3] espressioni di tempo derivato (due volte) rispetto al tempo e non di lunghezza derivata (due volte) rispetto al tempo (la derivata del tempo rispetto al tempo è adimensionale); per ottenere una equivalenza dimensionale alle espressioni originali si può moltiplicare $\ddot{\xi}(t_u)$ per c , ottenendo $\text{[m s}^{-2}\text{]}$

$$\ddot{\xi}_0(t_u) = - \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{\xi_0^3}{\xi^2(t_u)} \text{ [s}^{-1}\text{]}. \quad [20_3b]$$

Queste relazioni si ricavano direttamente dalla seconda legge della dinamica di Newton e dalla legge di gravitazione universale

$$F_g = m \ddot{R}(t_u) \text{ [Kg m s}^{-2}\text{]}$$

che, considerata la densità di massa [20_2a] e la *distanza specifica* [19_1] , si può riscrivere

$$- G m \rho_0 \left[\frac{\xi(t_u)}{t_u} \right]^3 \frac{4\pi}{3} [c \xi(t_u)]^3 \frac{1}{[c \xi(t_u)]^2} = m c \ddot{\xi}(t_u) \text{ [Kg m s}^{-2}\text{]}$$

ottenendo la [20_3a] oppure, considerata la densità di massa [20_2b] , la *distanza specifica* [19_1] e il tempo scala ξ_0 , si può riscrivere

$$- G m \rho_0 \left[\frac{\xi(t_u)}{\xi_0} \right]^3 \frac{4\pi}{3} [c \xi(t_u)]^3 \frac{1}{[c \xi(t_u)]^2} = m c \ddot{\xi}(t_u) \text{ [Kg m s}^{-2}\text{]}$$

ottenendo la [20_3b] .

Una primitiva della [20_3a] (ponendo sempre nulla la costante arbitraria di integrazione) è

$$\xi(t_u) = - \left(\frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{9}{10} \right)^{\frac{1}{3}} (t_u)^{\frac{5}{3}} \text{ [s]}, \quad [20_4]$$

pertanto possiamo indicarne il quadrato della derivata prima (così considerata per omogeneità con le espressioni originali della dinamica cosmica) come

$$\dot{\xi}^2(t_u) = -10 \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi(t_u)} \text{ [adimensionale]}; \quad [20_5a]$$

similmente una primitiva della [20_3b] si può indicare con il quadrato della sua derivata prima come

$$\dot{\xi}_0^2(t_u) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{\xi_0^3}{\xi(t_u)} \text{ [adimensionale]}. \quad [20_5b]$$

Sommando una costante arbitraria di integrazione si ottiene una equazione analoga alla seconda equazione della dinamica cosmica (detta *equazione di Fridman*³⁵³), rispettivamente dalla [20_5a]

$$\dot{\xi}^2(t_u) = -10 \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi(t_u)} - \zeta \text{ [adimensionale]} \quad [20_6a]$$

³⁵³ L'equazione di Fridman originale è $\dot{R}^2(t_{\square}) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{R_0^3}{R(t)} - k c^2 \text{ [m}^2 \text{ s}^{-2}\text{]}$; ricordando la [19_2] , il parametro $k = 1/R_c^2 \text{ [m}^{-2}\text{]}$ può essere scritto come $k(t_u) = \frac{1}{c^2 t_{u,c}^2} \text{ [m}^{-2}\text{]}$ e di conseguenza $k c^2$ avrebbe dimensione $\text{[s}^{-2}\text{]}$ ma nell'espressione originale k viene utilizzato come parametro adimensionale (cfr nota alle [20_1]); analogamente, poiché $\dot{\xi}(t_u)$ è adimensionale, per coerenza si sostituisce k con il parametro adimensionale ζ

e dalla [20_5b]

$$\ddot{\xi}_0^2(t_u) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{\xi_0^3}{\xi(t_u)} - \zeta \text{ [adimensionale]}. \quad [20_6b]$$

Per analizzare i diversi modelli di universo basati sulle equazioni della dinamica modificate è necessario considerare i valori $[0; +1; -1]$ per il parametro di curvatura ζ in presenza di massa ($\rho > 0$), analoghi ai valori di k della cosmologia tradizionale³⁵⁴; l'approfondimento è nel successivo § 22.

§ 21 Approfondimento qualitativo su energia, parametri cosmologici e legge di Hubble-Lemaître

Approfondimento qualitativo sull'energia³⁵⁵

Nel caso della relazione [20_3b] legata al tempo scala ξ_0 , la costante di integrazione ζ nella relazione [20_6b] può anche essere interpretata diversamente, come proporzionale all'energia totale di una particella comovente, descrivendo la dinamica di un volume in espansione con conservazione dell'energia.

Considerando il *fattore temporale di scala* [19_6] $a_{\xi,0}(t_u) = \frac{\xi(t_u)}{\xi_0}$ si può riscrivere la

[20_3b] come $\ddot{a}_{\xi,0}(t_u) = -\frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{1}{a_{\xi,0}^2(t_u)}$, e moltiplicando entrambi i membri per

$2\dot{a}_{\xi,0}(t_u) \text{ [s}^{-1}\text{]}$, essendo $\frac{d}{dt_u}(\dot{a}_{\xi,0}^2(t_u)) = 2\dot{a}_{\xi,0}(t_u)\ddot{a}_{\xi,0}(t_u)$ e $\frac{d}{dt_u}\left(\frac{-1}{a_{\xi,0}(t_u)}\right) = \frac{\dot{a}_{\xi,0}(t_u)}{a_{\xi,0}^2(t_u)}$, da

$2\dot{a}_{\xi,0}(t_u)\ddot{a}_{\xi,0}(t_u) = -2\frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{\dot{a}_{\xi,0}(t_u)}{a_{\xi,0}^2(t_u)}$ ovvero $\frac{d}{dt_u}(\dot{a}_{\xi,0}^2(t_u)) = 2\frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{d}{dt_u}\left(\frac{1}{a_{\xi,0}(t_u)}\right)$,

integrando si ottiene³⁵⁶

$$\dot{a}_{\xi,0}^2(t_u) = 2\frac{4\pi}{3}\rho_0\frac{G}{a_{\xi,0}(t_u)} - \zeta \text{ [s}^{-2}\text{]}, \quad [21_1]$$

con ζ costante arbitraria di integrazione. Moltiplicando entrambi i membri per $c^2/2$ e ricordando la [19_6], la [20_2b], la [19_1] e la [19_7], dalla

³⁵⁴ Cfr note alle [20_1] e alle [20_6]

³⁵⁵ Analisi analoga a quella di [Schneider, 2006] pag. 147, adottando il *parametro temporale di scala* $a_{\xi,0}(t_u)$ [19_6]

³⁵⁶ Si nota che, per coerenza dimensionale, in questa relazione ζ deve essere espressa come [s⁻²]

$$\frac{c^2}{2} a_{\xi,0}^2(t_u) = \frac{c^2}{2} 2 \frac{4\pi}{3} \rho_{\xi}(t_u) a_{\xi,0}^3(t_u) G \frac{1}{a_{\xi,0}(t_u)} - \frac{c^2}{2} \zeta, \text{ ovvero}$$

$$\frac{c^2}{2} \frac{\dot{\xi}^2(t_u)}{\xi_0^2} = \frac{c^2}{2} 2 \frac{4\pi}{3} \rho_{\xi}(t_u) \frac{\xi^3(t_u)}{\xi_0^3} G c \frac{\xi_0}{c \xi(t_u)} - \frac{c^2}{2} \zeta, \text{ si ottiene infine}$$

$$\frac{1}{2} v^2 - \frac{GM}{R} = - \frac{\xi_0^2 c^2}{2} \zeta \text{ [m}^2 \text{ s}^{-2} \text{]}. \quad [21_2]$$

L'espressione [21_2] è interpretabile come somma di energia cinetica ed energia potenziale per unità di massa, costante sulla superficie sferica a meno del parametro ζ , descrive quindi la conservazione dell'energia; ζ è proporzionale all'energia della particella comovente e caratterizza il comportamento qualitativo dell'evoluzione, apparente essendo sempre nell'ipotesi di non espansione dell'universo (*circostanza del redshift* [σ]).

Analizzando i possibili valori di ζ , si ottiene:

Se $\zeta < 0$ il membro di destra della [21_1] sarebbe sempre positivo (anche per la condizione [19_5]); poiché oggi si osserva $\frac{d}{dt_0}(a_{\xi,0}(t_u)) > 0$, allora

$\frac{d}{dt_u}(a_{\xi,0}(t_u))$ rimarrebbe positivo per sempre, ovvero l'universo sembrerebbe espandersi per sempre.

Se $\zeta = 0$ il membro di destra della [21_2] è nullo, l'energia cinetica e potenziale gravitazionale si equilibrano quindi la velocità di espansione dovrebbe essere o apparire nulla, quantomeno il redshift avrebbe necessariamente bisogno di una spiegazione alternativa alla recessione delle sorgenti remote.

Se $\zeta > 0$ il membro di destra della [21_2] è nullo se $a_{\xi,0}(t_u) = \frac{4GM}{t_0^3 c^3 \zeta}$ [adimensionale] e

per questo valore si ha $\frac{d}{dt_0}(a_{\xi,0}(t_u)) = 0$ ovvero l'espansione sembrerebbe fermarsi, per valori superiori si avrà un collasso.

Approfondimento qualitativo sui parametri cosmologici³⁵⁷

Il primo dei parametri cosmologici, il *parametro di Hubble* $H_{\xi}(t_u)$ [19_8], dimensionalmente [s^{-1}], è già stato ricavato e fornisce il tasso apparente di espansione cosmica in base al tempo t_u ; il valore della costante di Hubble $H_{0,\xi}$ ([19_10a] e [19_10b]) rappresenta il valore del parametro al tempo attuale.

³⁵⁷ Sviluppato in analogia allo studio dei parametri cosmologici tradizionali, con riferimento a [Franceschini, 2018] pag. 7/9-12

Il *parametro di accelerazione* o meglio di decelerazione (apparente, sulla base della non espansione dell'universo) è determinato da $q_\xi(t_u)$, derivata temporale seconda del *fattore temporale di scala*³⁵⁸ (reso adimensionale moltiplicandolo per $\xi(t_u)$ e dividendolo per $\dot{\xi}^2(t_u)$ per opportunità algebrica)

$$q_\xi(t_u) \equiv - \frac{\xi(t_u) \ddot{\xi}(t_u)}{\dot{\xi}^2(t_u)} \text{ [adimensionale] ,} \quad [21_3]$$

dal quale, ricordando la [19_8], si ricava la relazione

$$H_\xi^2(t_u) = - \frac{\ddot{\xi}(t_u)}{q_\xi(t_u) \xi(t_u)} \text{ [s}^{-2}\text{] .} \quad [21_4]$$

Per definire il *parametro di densità* è necessario ricavare la *densità critica* $\rho_{\xi,c}$ considerata come quella densità di materia che bilancia l'energia potenziale gravitazionale e quella cinetica (conseguente all'espansione, apparente nell'ipotesi in analisi, quindi la densità non apparente dovrebbe essere considerata costante) nella valutazione dell'energia cosmica totale E_T (costante), che ricordando la [19_7] e la [19_1] può essere scritta come

$$\begin{aligned} E_T &= \frac{1}{2} m v^2 - G m M \frac{1}{r} = \frac{1}{2} m H_\xi^2(t_u) c^2 \xi^2(t_u) - G m \frac{4}{3} \pi c^3 \xi^3(t_u) \rho_{\xi,c}(t_u) \frac{1}{c \xi(t_u)} = \\ &= m c^2 \xi^2(t_u) \left[\frac{1}{2} H_\xi^2(t_u) - \frac{4 \pi G}{3} \rho_{\xi,c}(t_u) \right] \text{ [Kg m}^2 \text{ s}^{-2}\text{]} \end{aligned}$$

e ponendola a zero si ottiene

$$\rho_{\xi,c}(t_u) = \frac{3 H_\xi^2(t_u)}{8 \pi G} \text{ [Kg m}^{-3}\text{] .} \quad [21_5]$$

Ricordando la [20_2a] e la [21_5] si definisce *parametro di densità* il rapporto³⁵⁹

$$\Omega_\xi(t_u) \equiv \frac{\rho_\xi(t_u)}{\rho_{\xi,c}(t_u)} = \frac{8 \pi G \rho_\xi(t_u)}{3 H_\xi^2(t_u)} \text{ [adimensionale] .} \quad [21_6]$$

Utilizzando nella [21_6] la [20_2a], la [21_4] e l'equazione della dinamica cosmica [20_3a] si ottiene

$$\Omega_\xi(t_u) = \frac{8 \pi G}{3} \rho_0 \frac{t_u^3}{\xi^3(t_u)} \frac{-q_\xi(t_u) \xi(t_u)}{\ddot{\xi}(t_u)} = 2 \frac{4 \pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi^2(t_u)} \frac{3}{4 \pi G \rho_0} \frac{\xi^2(t_u)}{-t_u^3} - q_\xi(t_u) = 2 q_\xi(t_u) ;$$

³⁵⁸ Il *parametro di accelerazione* originale basato sul *fattore metrico di scala* è $q(t) \equiv - \frac{R(t) \ddot{R}(t)}{\dot{R}^2(t)}$, dove la derivata seconda è moltiplicata per $R(t) / \dot{R}^2(t)$ per rendere il parametro adimensionale; il valore approssimativo comunemente accettato è $q_0 = 0.5$

³⁵⁹ Il *parametro di densità* originale basato sul *fattore metrico di scala* è $\Omega(t) \equiv \frac{8 \pi G \rho(t)}{3 H^2(t)}$ [adimensionale]

come ci si poteva attendere, il *parametro di densità* $\Omega_\xi(t_u)$ è legato al *parametro di accelerazione* $q_\xi(t_u)$, in modo del tutto analogo a quello originale³⁶⁰ $\Omega_\xi(t_u) = 2q_\xi(t_u)$.

Approfondimento qualitativo sulla *legge di Hubble-Lemaître*³⁶¹

Con un'espansione di Taylor arrestata al secondo ordine della funzione del fattore temporale di scala [19_4a], si ottiene per un recente passato (intorno di t_0) la relazione

$$a_\xi(t_u) = a_{0,\xi}(t_0) + \dot{a}_{0,\xi}(t_0) (t-t_0) + \frac{1}{2} \ddot{a}_{0,\xi}(t_0) (t-t_0)^2 + [...] \quad [21_7]$$

Considerata la [19_11a], la [21_4] può essere riscritta $H_\xi^2(t_u) = -\frac{\ddot{a}(t_u)}{q_\xi(t_u) a(t_u)}$, da cui $\ddot{a}(t_u) = -q_\xi(t_u) a(t_u) H_\xi^2(t_u)$; la [19_9] può essere riscritta $\dot{a}_\xi(t_u) = a_\xi(t_u) H_\xi(t_u)$; quindi per $t_u = t_0$ si ha

$$\ddot{a}_{0,\xi}(t_0) = -q_{0,\xi}(t_0) a_{0,\xi}(t_0) H_{0,\xi}^2(t_0) \text{ e } \dot{a}_{0,\xi}(t_0) = a_{0,\xi}(t_0) H_{0,\xi}(t_0). \quad [21_8]$$

Pertanto, utilizzando le [21_8], in un intorno di t_0 la [21_7] può essere riscritta

$$a_\xi(t_u) = a_{0,\xi}(t_0) \left[1 + H_{0,\xi}(t_0) (t_u - t_0) - \frac{1}{2} q_{0,\xi}(t_0) H_{0,\xi}^2(t_0) (t_u - t_0)^2 + [...] \right]$$

e trascurando gli infinitesimi di ordine superiore, ovvero considerando l'espansione di Taylor arrestata al termine quadratico, si ottiene

$$a_\xi = a_{0,\xi} \left[1 + H_{0,\xi} (t_u - t_0) - \frac{1}{2} q_{0,\xi} H_{0,\xi}^2 (t_u - t_0)^2 \right]. \quad [21_9]$$

Dall'equazione del redshift [7_7] si ricava $1 + z_\xi = \frac{a_{0,\xi}}{a_\xi}$, che con la [21_9] diventa

$$1 + z_\xi = \left[1 + H_{0,\xi} (t_u - t_0) - \frac{1}{2} q_{0,\xi} H_{0,\xi}^2 (t_u - t_0)^2 \right]^{-1}, \quad [21_{10}]$$

della quale si ricava una espansione in serie di Taylor arrestata al secondo ordine³⁶² che consente di riscrivere la [21_10] come³⁶³

³⁶⁰ La relazione originale tra i parametri è $\Omega(t) = 2q(t)$

³⁶¹ Sviluppato in analogia allo studio dei parametri cosmologici tradizionali, con riferimento a [Coles e Lucchin, 2002] pag. 16-17

³⁶² Per calcolare l'espansione di Taylor, definito $f(\Delta t) = (1+a\Delta t+b\Delta t^2)^{-1}$ il secondo membro della [21_10], si ha $df/d\Delta t = -(1+a\Delta t+b\Delta t^2)^{-2} (a+2b\Delta t)$ e $d^2f/d\Delta t^2 = 2(a+2b\Delta t)^2 (1+a\Delta t+b\Delta t^2)^{-3} - (1+a\Delta t+b\Delta t^2)^{-2} (2b)$, dalle quali conseguono $\left. \frac{df}{d\Delta t} \right|_{\Delta t=0} = -a$ e $\left. \frac{d^2f}{d\Delta t^2} \right|_{\Delta t=0} = \frac{1}{2!} (2a^2-2b) = a^2-b$, quindi la [21_11]; da [Tissino, Mentasti, Vanzan, 2020] pag. 22

³⁶³ Adottando la convenzione che siano positivi i tempi valutati a partire dal tempo dell'osservatore, l'intervallo di tempo tra emissione e ricezione $-\Delta t = t_0 - t = \xi(t_u)$ sarebbe negativo ma nella valutazione della [21_7] non è stata applicata la convenzione, quindi i valori di $\xi(t_u)$ sono positivi

$$1 + z_\xi = 1 - H_{0,\xi} (t_u - t_0) + \frac{1}{2} q_0 H_{0,\xi}^2 (t_u - t_0)^2 + H_{0,\xi}^2 (t_u - t_0)^2 \quad [21_11]$$

dalla quale si ottiene

$$z_\xi = H_{0,\xi} \xi(t_u) + \left(1 + \frac{1}{2} q_0\right) H_{0,\xi}^2 \xi^2(t_u) . \quad [21_12]$$

Per una derivazione della legge di Hubble-Lemaître che espliciti la distanza si rimanda a testi specialistici³⁶⁴, riportando il risultato tradizionale e quello in funzione di $\xi(t_u)$

$$D_{Mpc} = \frac{c}{H_0} \left[z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 + [...] \right] \quad [21_13a]$$

$$D_{Mpc} = \frac{c}{H_0} \left[-\frac{1}{2} (1 + q_0) + q_0 \xi + \frac{1}{2} (1 - q_0) \xi^2 + [...] \right] . \quad [21_13b]$$

§ 22 Nuovi modelli di universo, parametro di curvatura ζ

Con riferimento al precedente § 20, si considerano i valori normalizzati ammessi per il parametro di curvatura ζ in presenza di massa ($\rho > 0$), per analizzare i diversi modelli di universo basati sulle equazioni della dinamica modificate.

Caso $\zeta = 0$

Il modello di Einstein-De Sitter considera il parametro di curvatura nullo, ovvero il raggio di curvatura $R_c \rightarrow \infty$ per $k \rightarrow 0$, nel caso in studio il parametro $\zeta \rightarrow 0$.

Integrando la prima interpretazione delle equazioni della dinamica [20_6a], basata sul *fattore temporale di scala* [19_4a], si ottiene la primitiva [20_4]

$$\xi(t_u) = - \left(\frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{9}{10} \right)^{\frac{1}{3}} (t_u)^{\frac{5}{3}} \text{ [s]}, \text{ ovvero}$$

$$t_s = \xi(t_u) \propto - t_u^{\frac{5}{3}} \text{ [s]}, \quad [22_1]$$

espressione coerente con le proprie equazioni differenziali [20_6a] e [20_3a]. La soluzione matematica viola però la condizione [19_3c], poiché risulta sempre $\xi(t_u) < 0$ con $t_u > 0$, infatti non ha significato un *tempo specifico* negativo.

Poiché la relazione [22_1] è in contraddizione con le proprie definizioni iniziali, è necessario concludere che questa interpretazione delle equazioni della dinamica non sia valida.

Considerando le equazioni differenziali basate sul *fattore temporale di scala* [19_6] e il tempo scala t_0 , integrando la [20_6b], con $\zeta = 0$ si ottiene

³⁶⁴ Ad esempio [Ciufolini e Wheeler, 1995] pag. 205-206, [Tissino, Mentasti, Vanzan, 2020] pag. 22-24

$$\xi(t_u) = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{8\pi G \rho_0 \xi_0^3}{3}\right)^{\frac{1}{3}} (t_u)^{\frac{2}{3}} \text{ [s]}, \text{ ovvero} \quad [22_2]$$

$$t_s = \xi(t_u) = 1.47 \cdot 10^5 (t_u)^{\frac{2}{3}} \text{ [s]},$$

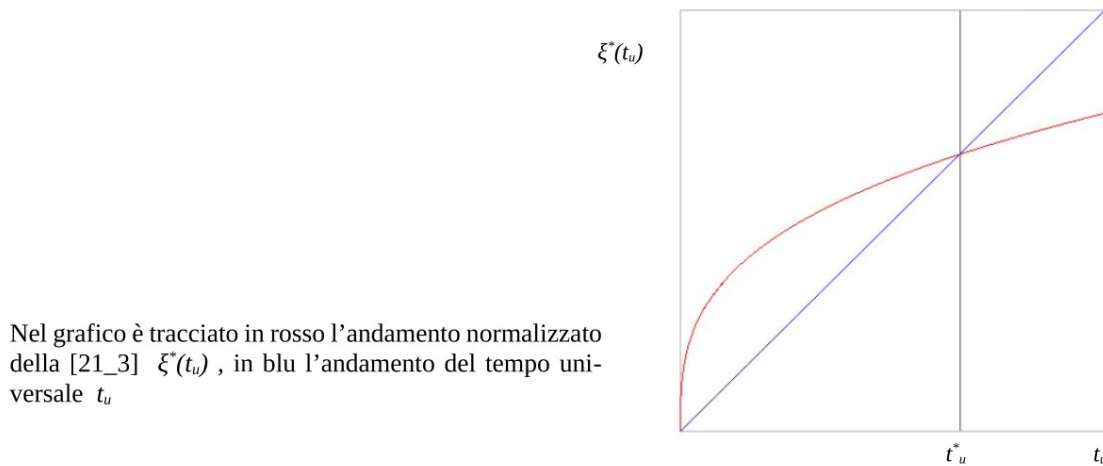
considerando per ξ_0 il tempo di Hubble τ [17_1b]. Quindi una espressione da analizzare nel suo andamento, monotono crescente senza flessi per $t_u > 0$, tracciato in *Figura 7* insieme all'andamento del tempo universale, per $\xi(t_u) = (t_u)$ (bisettrice del quadrante, tracciata con linea blu), condizione utilizzata per normalizzare i dati, quindi la [22_2] diventa (tracciata con linea rossa, per la stima cfr Allegato A6):

$$t_s^* = \xi^*(t_u) = 5.62 \cdot 10^7 t_u \text{ [s]}. \quad [21_3]$$

Il *tempo specifico* risulta maggiore del tempo universale ma dopo un tempo di circa 1.8 anni risulta uguale allo stesso e poi diverge significativamente minore rispetto allo stesso.

Ma sarebbe sufficiente evidenziare che dalla [20_3b] si avrà sempre $\ddot{\xi}(t_u) < 0$ quindi la concavità della funzione del tempo è rivolta verso il basso, ed escluso il valore $\xi(t_u) = 0$ (presente nel denominatore della [20_3b]), questo significa che prima o poi sarà violata la condizione [19_3c], che definisce la bisettrice del primo quadrante, a prescindere dall'andamento della funzione del tempo. Pertanto la relazione [22_2] non è accettabile e quindi non lo è l'ipotesi $\zeta = 0$ per la [20_6b].

Figura 7



Caso $\zeta = 1$

Considerando la [20_6a] con $\zeta = 1$, per avere soluzioni reali il secondo membro deve essere sempre positivo, quindi

$$-10 \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi(t_u)} > 1, \text{ ovvero } 10 \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi(t_u)} < -1$$

ma essendo $t_u > 0$ per la condizione [19_3a], perché sia verificata la relazione dovrebbe aversi $\xi(t_u) < 0$ sempre ma questo violerebbe la condizione [19_3c], quindi non è accettabile l'ipotesi $\zeta = 1$ per la [20_6a].

Considerando la [20_6b] con $\zeta = 1$, per avere soluzioni reali il secondo membro deve essere sempre positivo, quindi deve verificarsi sempre la condizione (per la stima cfr Allegato A6, considerando per ξ_0 il tempo di Hubble τ [17_1b])

$$\frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{\xi_0^3}{\xi(t_u)} > 1 \text{ ovvero } \xi(t_u) < \frac{8\pi G \rho_0}{3} \xi_0^3 = 1.12 \cdot 10^5 \text{ [s]},$$

rispettando le [19_3a] e [19_3c], però il limite di validità per $t_s = \xi(t_u)$ è decisamente basso (pari a poco più di un giorno), quindi la condizione praticamente non è quasi mai verificata, e l'ipotesi $\zeta = 1$ non è una opzione accettabile per la [20_6b].

Caso $\zeta = -1$

La [20_6a] con $\zeta = -1$ può essere riscritta come $\dot{\xi}^2(t_u) = -10 \frac{4\pi G \rho_0}{3} \frac{t_u^3}{\xi(t_u)} + 1$, ovvero

$$\dot{\xi}(t_u) = \sqrt{\alpha t_u^{4/3} + 1} \text{ [adimensionale]}, \quad [22_4]$$

$$\text{posto } \alpha = 10 \left(\frac{4\pi G \rho_0}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{10}{9} \right)^{1/3} > 0,$$

e affinché l'argomento della radice quadrata sia reale, la [22_4] impone la condizione $\alpha t_u^{4/3} + 1 > 0$; riscrivendo tale disequazione come $t_u^4 > -\frac{1}{\alpha^3}$, si osserva che essa ha soluzioni reali per $\alpha < 0$, ma α è invece positivo; si conclude che l'ipotesi $\zeta = -1$ non è una opzione accettabile per la [20_6a].

Considerando la [20_6b] con $\zeta = -1$, per avere soluzioni reali il secondo membro deve essere sempre positivo, quindi deve verificarsi sempre la condizione

$$\frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{\xi_0^3}{\xi(t_u)} > -1 \text{ ovvero } \xi(t_u) > -\frac{8\pi G \rho_0}{3} \xi_0^3 = -1.4 \cdot 10^{15} \text{ [s]}$$

(per la stima cfr Allegato A6, considerando per ξ_0 il tempo di Hubble τ [17_1b]), che è sempre soddisfatta poiché la funzione del tempo ha sempre valori positivi, ma deve essere verificata anche la [19_3c].

Poiché si avrà sempre $\ddot{\xi}(t_u) < 0$ (cfr [20_3b]), la concavità della funzione del tempo è rivolta verso il basso, ed escluso il valore $\xi(t_u) = 0$ (presente nel denominatore della [20_3b]), questo significa che prima o poi sarà violata la condizione [19_3c], che definisce la bisettrice del primo quadrante, a prescindere dall'andamento della funzione del tempo, pertanto l'ipotesi $\zeta = -1$ non è una opzione accettabile per la [20_6b].

È necessario concludere che per le due interpretazioni delle equazioni della dinamica co-

smica, completate da tutti i valori normalizzati ammessi per il parametro ζ associato alla curvatura dello spaziotempo, non possa essere accettabile la funzione $t_s = \xi(t_u)$ per la descrizione di modelli cosmologici; viene invalidata ipso facto l'*ipotesi [a]* associata alla *congettura [2]*, ovvero l'esistenza di un tempo non universale valido per tutte le scale cosmiche per giustificare il redshift in assenza di espansione, nei limiti dei modelli adottati, derivati dalla dinamica newtoniana.

Pertanto le circostanze del redshift rimangono fin qui quelle del *modello cosmologico standard* associate all'espansione dell'universo, ma si è dimostrata, sempre nei limiti dei modelli adottati, la *non necessità* di postulare l'esistenza di un tempo che sia universale, considerato che, definitone uno (cfr anche le *conclusioni epistemologiche*), se ne può dimostrare l'unicità o universalità.

Con questo risultato termina la parte 'dimostrata' dell'approfondimento, nei limiti considerati.

Le seguenti *conclusioni epistemologiche, sociologiche, cosmologiche* completano il quadro interpretativo e introducono una sezione finale, l'Allegato A4, che azzarda congetture affatto alternative a quelle del *modello cosmologico standard*, consapevolmente non del tutto supportate dalle attuali interpretazioni della fisica ma che, sviluppate, evidenziano una notevole correlazione con i dati osservativi, come testimoniato dai grafici qualitativi proposti, basati su dati estratti dai database pubblici della Nasa.

Conclusioni

*The time is gone the song is over,
thought I'd something more to say³⁶⁵*
Roger Waters

Si riassumono gli approfondimenti svolti e si aggiungono delle conclusioni personali, considerando separatamente le argomentazioni *epistemologiche*, *sociologiche* e *cosmologiche*.

Conclusioni epistemologiche

La disamina delle molte posizioni storiche, filosofiche e scientifiche sul tempo ha portato alla conclusione personale³⁶⁶: ***in Natura il tempo non esiste***.

Vige però il *principio di causalità*³⁶⁷, che determina anche una sequenza di svolgimento negli eventi (in sostanza un *prima* e un *dopo*, intesi in senso non temporale ma che individuano un'evoluzione nei processi), ad esempio come conseguenza dell'evolversi termodinamico dell'entropia (una conseguenza delle particolari condizioni iniziali del nostro universo, cfr § 5).

Il concetto di causalità in una prospettiva storica e filosofica focalizzata sui fenomeni naturali è approfondito nell'Allegato A3 *Sulla Causalità*, alla quale si rimanda per la completezza delle argomentazioni.

Con principio di causalità si intende quindi che ogni fenomeno fisico sia determinato da circostanze o da altri fenomeni fisici, che esso sia l'effetto di una certa causa³⁶⁸, e *non* che l'interpretazione antropica, per mezzo di leggi o di osservazioni, sia sempre in grado di determinare esattamente questa causa o in quali precise circostanze o in quale istante si verifichi il fenomeno; conoscere queste informazioni è un'esigenza antropica, non della Natur-

³⁶⁵ Pink Floyd, *Time, Dark side of the moon* (EMI Records, 1973), testo Roger Waters (1943-)

³⁶⁶ Conclusione non molto diversa dalla posizione di Lucrezio, cfr § 1, e da quella espressa da [Barbour, 1999] edizione italiana pag. 137: «L'importante però è liberarsi dall'idea che il tempo sia *qualcosa*. Il tempo non esiste. Esistono solo le cose che cambiano. Ciò che chiamiamo tempo è -almeno nella fisica classica- soltanto un complesso di regole che governano il cambiamento.»; con buona pace del premio Nobel per la Chimica Walther Nernst (1864-1941) che affermò «Negare la durata infinita del tempo sarebbe tradire i principi fondamentali della scienza», citato in [Giudice, 2023] pag. 40

³⁶⁷ Cfr § 4 e Allegato A3 *Sulla causalità*; non erano di questo parere Heisenberg (cfr inizio § 13) e gli *antirealisti* (cfr le seguenti *Conclusioni sociologiche*); in certi fenomeni spontanei, come il decadimento radioattivo o l'emissione non stimolata di radiazione, misurati probabilisticamente, non si ravvisa una causa specifica se non le proprietà delle particelle e le circostanze nelle quali si verificano i fenomeni, ma sono comunque *proprio quelle* che li determinano, anche se *non in un tempo preciso* (appunto!)

³⁶⁸ Era opposta la visione di Mach, per il quale «la necessità delle leggi naturali non risiede affatto nella natura stessa, ma è solo un'esigenza psicologica della nostra mente.», Debernardi in [Mach, 1923], edizione italiana pag. 71

a³⁶⁹.

Quindi **in Natura le cose accadono quando le circostanze le determinano**, una tautologia necessariamente da sottolineare, se si arrivò a sostenere che non esiste il rapporto causa-effetto perché non si è in grado di determinarlo esattamente: questo è un limite antropico, non un'anomalia o una peculiarità della Natura.

Lo scorrere della sequenza causale si potrebbe chiamare *tempo logico*, svolgendosi, a parte inevitabili aspetti probabilistici o statistici che non cambiano la sostanza, con una logica booleana³⁷⁰; il tempo di cui si ha antropicamente necessità diventa una forzatura di questo *tempo logico* alle esigenze di predittività delle 'leggi' scientifiche, entro limiti confrontabili con le nostre esigenze antropiche, gestiti dai nostri clock antropici (nel senso di costruiti arbitrariamente³⁷¹).

Si osserva che le interazioni fisiche non sono tutte invarianti per le trasformazioni di parità spaziotemporali, ad esempio la forza nucleare debole dei decadimenti non lo è (le leggi dell'elettromagnetismo invece sono invarianti per inversioni sia spaziali sia temporali), cioè non tutte le leggi della fisica sono invarianti per il gruppo di Poincaré³⁷²; la personale interpretazione di questa sorta di 'freccia del tempo', conseguente alla mancata invarianza, è una asimmetria di una *sequenza causale*, non che sia trascorso (ovvero si sia modificato) un *ente tempo*.

Il tempo è quindi un'invenzione antropica, necessaria agli umani per *misurare* la causalità ma non alla Natura per il suo evolversi. Associando la misura del tempo a fenomeni fisici³⁷³ se ne ricava una sequenza di successioni causali con la quale per comodità si ordinano gli eventi e se ne stimano le variazioni delle grandezze fisiche associate, ma la Natura non ne ha bisogno. Esemplificando, i fenomeni si verificano quando le circostanze li determinano, non quando è trascorso 'un determinato tempo': **il tempo non causa nulla**³⁷⁴.

³⁶⁹ La priorità dell'interpretazione antropica era quella corrente ai tempi del congresso Solvay sulla meccanica quantistica del 1927 (cfr le seguenti *Conclusioni sociologiche*)

³⁷⁰ Cfr [Boole, 1847]

³⁷¹ Osservazione di Rovelli in [Rovelli, 2008] pag. 3: «How do we know that a clock measures time, if we can only check it against another clock?», dimenticandosi forse che il confronto si può fare anche con sorgenti non antropiche o controllate antropicamente, come le pulsar, cfr § 18; nel paper (pag. 1) Rovelli sostiene anche «that we must forget the notion of time altogether, and build a quantum theory of gravity where this notion does not appear at all.»

³⁷² Gruppo delle isometrie (funzioni fra spazi metrici che conservano distanze, angoli, aree, lunghezze) dello spaziotempo di Minkowski

³⁷³ Cfr [Ludlow et al., 2015], § 18

³⁷⁴ Si analizzino due semplici esempi potenzialmente critici rispetto a questa affermazione, senza considerare che possano essere valutate come relazioni a-causali: la densità di corrente elettrica ($\vec{j} = \rho \vec{v}$) e la seconda legge di Newton ($\vec{F} = m \vec{a}$).

Da un punto di vista antropico la densità di corrente è il prodotto della densità delle cariche elettriche ρ per la *velocità* di deriva $\vec{v}$ (ovvero una variazione di posizione *nel tempo*) dei portatori di carica, ma dal punto di vista della Natura, la densità di corrente elettrica si genera al transito dei portatori di carica semplicemente in modo proporzionale alla loro quantità (maggiori sono le loro densità e *velocità* antropicamente concepite, maggiore sarà la loro quantità).

Nella seconda legge di Newton, nella quale dal punto di vista antropico è presente una *accelerazione* $\vec{a}$, variazione *nel tempo* della *velocità* che è una variazione *nel tempo* della posizione, posta nella forma $m = \vec{F} / \vec{a}$, si può considerare la massa m , dal punto di vista della Natura, come una resistenza alla applicazione di una sollecitazione (forza $\vec{F}$), quindi l'*accelerazione* si può intendere come variazione, reale o virtuale, della posizione della massa m da 'in quiete in una posizione' a 'in movimento rispetto a quella posizione' (analogamente a come originariamente la considerò Newton, in particolare nella sue Definizioni III

Ne hanno invece bisogno le *temporanee regole interpretative* umane, spesso associate ad arbitrarie condizioni iniziali o al contorno³⁷⁵.

Questa interpretazione è coerente con la visione filosofica di Kant, che immaginava il tempo tra le intuizioni umane *pure a priori* quindi non esistente in modo indipendente dal soggetto conoscente, ma forse la supera perché non lo prevede come rappresentazione necessaria a fondamento di tutte le intuizioni, ma solo strumento tecnico per misurare il cambiamento, in questo si potrebbe dire di ispirazione aristotelica.

Poiché «la relatività ci costringe a trattare il tempo alla stregua di una dimensione spaziale, con conseguenze importanti sulla possibilità di concepire l'universo come qualcosa che avviene nel tempo, [...] diventa [...] necessario interrogarsi sulla possibilità che molte caratteristiche temporali che noi attribuiamo al mondo non siano in realtà null'altro che il frutto di proiezioni di strutture soggettive, dovute alla peculiare natura temporale della nostra esperienza»³⁷⁶, come sostiene anche Huw Price (1953-) in [Price, 1996], che dopo aver provato a considerare il punto di vista *nowhen*, fuori dal tempo, arriva a una conclusione più ampia delle sole interpretazioni scientifiche ma che le include (per ovvie ragioni antropiche):

We cannot step outside time, but we can try to understand how the way in which we are situated within time comes to be reflected in the ways in which we talk and think and conceptualize the world around us. What we stand to gain is a deeper understanding of ourselves, and hence -by subtraction, as it were- a deeper understanding of what is external to us. This is a reflective kind of knowledge: we reflect on the nature of the standpoint from within, and thereby gain some sense -albeit, ultimately, a sense-from-within- of what it would be like from without.³⁷⁷

Federico Laudisa (1965-) analizza se possa esistere la causalità “in natura” o sia «soltanto nei nostri modi di conoscere la natura», data «la centralità della nozione di *legge* a scapito di quella di causalità, considerata nella migliore delle ipotesi come una sorta di epifenomeno della prima»³⁷⁸.

L'a-causalità del tempo (e dello spazio) è un principio sostenuto anche da Robin Le Poide-

e IV in [Newton, 1687] edizione italiana pag. 25-26), senza coinvolgere il *tempo*. In altre parole, *misurare* è una esigenza antropica, non della Natura, come candidamente ribadito anche in [Misner, Thorne, Wheeler, 2017] a pag. 23: «Time is defined so that motion looks simple.»

³⁷⁵ La necessità antropica della pervasiva gestione del tempo, soprattutto nella civiltà occidentale, potrebbe essere collegata a una sorta di iniziale *ansia di predittività temporale* delle leggi interpretative della scienza, a sua volta determinata psicologicamente dal procedere del proprio personale invecchiamento e in generale dalla breve permanenza individuale sul pianeta, breve rispetto ai tempi cosmici; nelle parole di Heinrich Hertz (1857-1894): «The most direct, and in a sense the most important, problem which our conscious knowledge of nature should enable us to solve is the anticipation of future events, so that we may arrange our present affairs in accordance with such anticipations.» citato in [Heisenberg, 1955] pag. 154, da *Gesammelte, Werke* (1895) tradotto come *Electric Waves and the Principles of Mechanics*; oppure nelle parole di de Broglie in [de Broglie, 1937] edizione italiana pag 269: «Questa corrispondenza globale fra le cose e la nostra ragione è in un certo senso un cosa mirabile, ma dobbiamo notare che, se non esistesse, la nostra vita sarebbe indubbiamente impossibile perché, non esistendo alcun legame fra il nostro intelletto ed i fatti, saremmo incapaci di prevedere le conseguenze delle nostre azioni»; ferma restando la necessità di moltissime applicazioni tecnologiche di gestire precise sequenze temporali (non solo logiche) nei propri processi, ipso facto *non naturali*

³⁷⁶ Mauro Dorato (1960-) in [Allori, Dorato, Laudisa, Zanghì, 2005] pag. 21

³⁷⁷ [Price, 1996] pag. 267

³⁷⁸ Federico Laudisa in [Allori, Dorato, Laudisa, Zanghì, 2005] pag. 396-397

vin (1962-), che peraltro a proposito del tempo conclude:

The fact that the temporal properties of enduring states can be causally efficacious does not entail that the intrinsic properties of times are causally efficacious³⁷⁹.

Nella personale visione, la causalità è proprio la ragione per la quale si susseguono gli eventi (i fenomeni) in Natura, quindi con esclusione di qualunque presupposto antropico. A volte si riesce a interpretarla, a volte no; comunque questo non la rende di esclusiva pertinenza antropica (cfr anche Allegato A3 *Sulla causalità*).

Si osserva che l'energia (massa-energia) e la carica elettrica non dipendono dal tempo e non possono essere considerate 'fantasie antropiche': la creazione della massa iniziale (primordiale) di protoni e di neutroni, alla quale è seguita la formazione degli atomi di idrogeno e di elio (e in minima parte di litio e altri elementi) che ha impedito il decadimento dei neutroni³⁸⁰, risale ai primi istanti di sviluppo nel nostro universo (secondo la teoria del *Big Bang*³⁸¹); la successiva continua creazione degli elettroni e del loro quanto di carica elettrica negativa nelle coppie elettrone-positrone da parte di un fotone ad alta energia non dipende dal tempo. Nei nuclei delle stelle l'idrogeno brucia per formare elio, che in séguito brucia a sua volta per formare carbonio, ossigeno e altri elementi più pesanti³⁸² e nel caso di esito distruttivo per la stella, altri elementi sono formati nelle esplosioni di supernova, in processi che non dipendono dal tempo ma dalle circostanze evolutive, infatti le equazioni interpretative della dinamica stellare, in tutte le fasi evolutive, non contengono la variabile tempo.

La fisica quantistica secondo il *modello standard* è probabilistica, con il 'vincolo' della indeterminazione di Heisenberg che può rappresentare un segnale sul limite delle teorie correnti o sul limite intrinseco della conoscibilità (antropica), oltre il quale un *cambio di regole non noto*³⁸³ rende vano l'utilizzo dei concetti normalmente utilizzati (ad esempio la simultaneità³⁸⁴, la distanza, forse anche la stessa 'ordinaria' causalità).

In effetti, come sostenuto da Freeman Dyson³⁸⁵, le due grandi rivoluzioni concettuali del ventesimo secolo sono stati il rovesciamento della fisica classica di Heisenberg e il rovesciamento dei fondamenti della matematica di Gödel, entrambi tracciando fondamentali conclusioni ontologiche sui limiti della conoscenza partendo da premesse epistemologiche. Non è inoltre secondario che il fluire del tempo, come comunemente inteso, sia sensibile alla gravitazione (ovvero alla presenza di massa-energia), come consegue dalla *relatività gene-*

³⁷⁹ [Le Poidevin, 1992] pag. 150

³⁸⁰ Il neutrone al di fuori di un nucleo atomico ha una vita media di circa 15 minuti (la stima precisa è $880.2 \pm 1,0$ s in [Tanabashi et al., 2018] pag. 377), quindi il processo detto di decadimento β^- lo porta a trasformarsi in un protone, un elettrone e un antineutrino ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)

³⁸¹ In assenza di *Big Bang* sarà necessario trovare una spiegazione alle abbondanze atomiche 'iniziali', questione non lontana dalla spiegazione della presenza anche 'di tutto il resto', *risolta* personalmente con la propria visione dell'universo come infinito (anche in senso temporale), cfr Allegati A4 e A5

³⁸² Anch'essi bruciano in sequenza, se la massa della stella lo consente, fino a formare nuclei di ferro (numero atomico 26, massa atomica 55.85 amu), al quale elemento si arrestano i processi di fusione atomica

³⁸³ *O non ancora noto*, cfr opinione di Einstein nel § 13, una sorta di sfida al superamento dei noùmeni kantiani oltre l'attuale limite di conoscibilità definito dal principio di indeterminazione di Heisenberg

³⁸⁴ Cfr § 13

³⁸⁵ Citato in [Yourgrau, 2005] pag. 141, come il concetto successivo

rale, da cui deriva l'impossibilità di considerare un *tempo universale* in località diverse, ovvero in epoche diverse, soggette a diverse influenze di massa-energia³⁸⁶. Ma, in analogia alla valutazione dell'universo piatto su grande scala ma non localmente (o similmente per le variazioni locali di entropia, non sempre in aumento come accade invece su grande scala), anche per il tempo si può considerare *a grande scala* un tempo universale (con riferimento all'osservazione antropica) anche se certamente non lo sia localmente, come dimostrato nel presente approfondimento (nei limiti precisati).

Rimane comunque valida l'osservazione di Einstein, a proposito dell'esistenza di «[...]a present state of the entire universe» nello spaziotempo: «The four-dimensional continuum is now no longer resolvable objectively into sections, all of which contain simultaneous events; "now" loses for the spatially extended world its objective meaning.»³⁸⁷ Questo condivisibile concetto toglie anche significato reale alla stima dell'*età* dell'universo stesso, non potendo nemmeno essere immaginato un tempo che lo riguardi interamente, pur all'interno di una teoria come quella del *Big Bang*, se non come proiezione antropica che pretenda una simultaneità incompatibile con la realtà (oltre che con la teoria). Nel rispetto delle premesse, la dimostrazione sviluppata sfrutta la radiazione di fondo associata al *Big Bang* e il concetto di *tempo universale* ma quanto sopra precisato la supera 'ontologicamente', ammessa la validità della *relatività speciale* di Einstein.

Il tempo è comunque indubbiamente indispensabile alla scienza umana per poter scrivere una parte delle *regole* per mezzo delle quali si immagina il comportamento e l'evoluzione della Natura stessa³⁸⁸. Questo non significa che il tempo debba *esistere* nella realtà della Natura, come non si pensa ad esempio che debba esistere in Natura la *densità* (nel senso di grandezza scalare), se non come rapporto tra grandezze fisiche, utile nei calcoli antropici. In ogni caso, il fatto di poterli *pensare* come noùmeno³⁸⁹ non aggiunge conoscenza all'essenza della Natura stessa, come a dire che non si può confondere la *realtà* della Natura con un *algoritmo* utile per una sua interpretazione o misura³⁹⁰.

³⁸⁶ Ad esempio, nello studio [Lewis e Brewer, 2023], con dati raccolti nel corso di una ventina d'anni di circa 200 sorgenti quasar ad alto redshift ($0.2 < z < 4$), si conclude che le sorgenti presentano emissioni variabili (derivanti da un disco di accrescimento relativistico che circonda un buco nero supermassivo) compatibili con un *time dilation* dell'ordine di $(z+1)^n$ con $n = 1.28^{+0.28}_{-0.29}$, consistente con la dipendenza cosmologica attesa per $n = 1$, sulla base delle correnti teorie

³⁸⁷ [Einstein, 1961] pag. 149

³⁸⁸ Forzando la visione di Kant nell'*Estetica trascendentale* della *Critica alla ragion pura* (1781), per il quale il tempo è una forma soggettiva di sensibilità che si utilizza per conoscere, si potrebbe pensare al tempo come sensibilità antropica generale, utilizzata per acquisire conoscenza (conoscere la Natura) attraverso una mediazione *soggettiva* non a livello di individuo ma a livello genericamente antropico (riflessione stimolata dal capitolo ottavo di [Russel, 1912]); anche questa visione rende il tempo non parte della realtà della Natura

³⁸⁹ Si intende noùmeno kantiano; l'espressione *noùmeno* risale alla metafisica di Platone, di cui è l'idea fondante, rappresentando ciò che è pensabile dal puro intelletto indipendentemente dall'esperienza sensibile, mentre il noùmeno kantiano rappresenta l'essenza pensabile, ma inconoscibile, della realtà in sé, in contrapposizione a fenomeno (prodotto secondo Kant dal rapporto 'fra noi e la cosa in sé' e del quale costituisce il fondamento) [adattato da enciclopedia Treccani online]; principi trattati nel § 1

³⁹⁰ Questa interpretazione risponde indirettamente alla domanda di fondo di Planck: «la nostra immagine fisica del mondo è esclusivamente una più o meno arbitraria creazione del nostro spirito, oppure rispecchia fenomeni naturali reali, assolutamente indipendenti da noi?», in [Planck, 1941] pag. 38; la conclusione di Planck è che i fenomeni naturali si svolgano indipendentemente dalle nostre sensazioni, in questo criticando in particolare la visione di Mach e rimanendo quindi nello spirito dei fisici *realisti* (cfr § 13)

Recenti studi di neuroscienza³⁹¹ sembrano confermare che il meccanismo della visione è predittivo, nel senso che è il cervello che proietta un'immagine di quello che si aspetta e gli occhi confermano o confutano in base a quello che effettivamente vedono. Immaginando sia un modo generale di operare del cervello, pienamente giustificato dall'ottimizzazione dello scambio di informazioni, è più facile capire perché molte delle interpretazioni che diamo della Natura tendano a rispecchiare un bias antropico:

La scienza in fondo è solo un'estensione del modo in cui vediamo: cerchiamo discrepanze fra quanto ci aspettiamo e quanto riusciamo a raccogliere del mondo. Abbiamo visioni del mondo e, se non funzionano, proviamo a cambiarle. L'intero sapere umano si è costruito così.³⁹²

La conclusione che il tempo non esista in Natura, ma sia uno strumento antropico di interpretazione del comportamento della Natura stessa, consente di trattarlo liberamente senza la necessità di associarlo a una specifica realtà fisica. La coerenza interna (ad esempio rispetto alle proprie definizioni di esistenza) ed esterna (ad esempio rispetto alle evidenze osservative), sia per l'analisi di modelli locali sia per l'analisi di modelli generali, è però indispensabile allo strumento per gli scopi interpretativi assegnati, in modo da evitare qualunque contraddizione logica che lo renderebbe uno strumento inutile.

In questo approfondimento si è analizzato il *tempo* come strumento interpretativo delle dinamiche cosmologiche, senza smentire queste *Conclusioni epistemologiche*, considerate anzi come premessa alle successive *Conclusioni cosmologiche*.

Conclusioni sociologiche

Si considera *sociologica* l'analisi essenziale che è stata fatta dei *paradigmi* nei quali si sono trovati negli ultimi cento anni circa i principali gruppi di ricerca della Fisica Teorica e dell'Astronomia, con riferimento alle posizioni di Kuhn³⁹³ nel merito.

Come evidenziato anche nello sviluppo dell'approfondimento, storicamente si sono affermate per la struttura atomica le interpretazioni definite *modello standard*, proposte e caldeggiate da Bohr in quella che fu chiamata l'*interpretazione di Copenaghen* (congresso Solvay a Bruxelles dell'ottobre 1927, cfr *Figura 8*, dopo il primo convegno, a Como un mese prima, di presentazione pubblica delle interpretazioni), che prevalse sulle interpretazioni *realiste*.

In quell'epoca i gruppi sociali di ricerca erano condizionati da forti personalità che accentravano e guidavano la ricerca come Niels Bohr, Edwin Hubble, Allan Sandage (1926-2010)³⁹⁴; in epoche successive hanno prevalso invece gli elementi di convenienza e opportunità nel mantenere vivi i progetti di ricerca (finanziabili e finanziati) e le teorie associate

³⁹¹ Ad esempio Clark, *Whatever next? Predictive brains, Situated Agents, and the future of cognitive science* (Behavioral and Brain sciences, 36, 2013), Rudrauf et al., *A Mathematical Model of Embodied Consciousness* (Journal of Theoretical Biology, 428, 217), Williford et al., *The Projective Consciousness Model and Phenomenal Selfhood* (Frontiers in Psychology, 2018), citati da [Rovelli, 2020] pag. 189-191

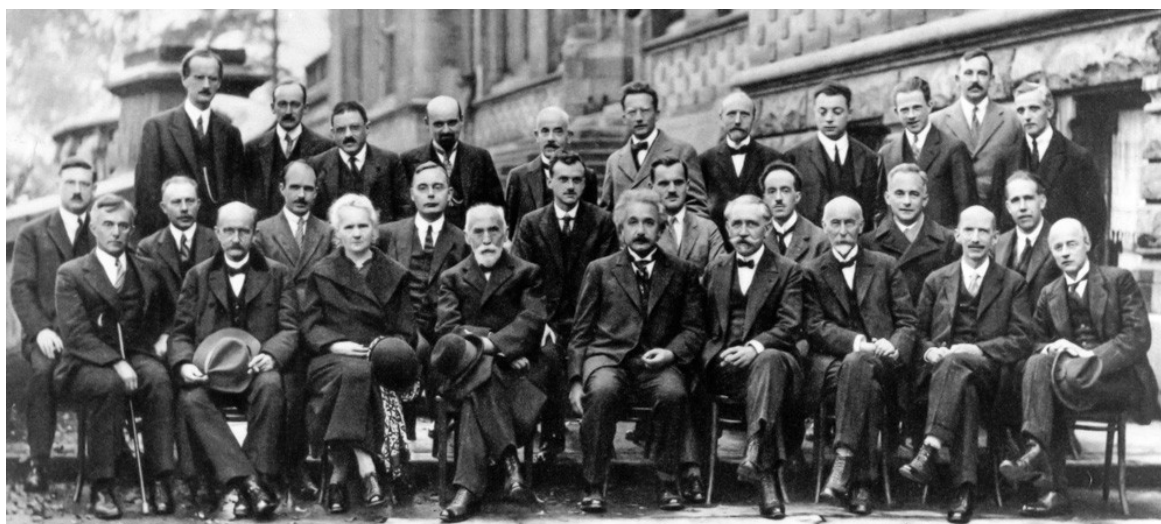
³⁹² [Rovelli, 2020] pag. 192

³⁹³ Cfr Allegato A2 *La struttura delle rivoluzioni scientifiche di Kuhn in nuce*

³⁹⁴ Cfr § 9 e § 13

anche se non raggiungevano i risultati promessi (o nessun risultato), o una certa avversione alla libera ricerca da parte dei docenti che ostacola gli studenti (cfr parere di Penrose nel § 13).

Figura 8



Conferenza Solvay sulla meccanica quantistica del 1927 (foto di Benjamin Couprie, Institut International de Physique Solvay, Bruxelles, Belgium). Da dietro, da sinistra verso destra: Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr, Irving Langmuir, Max Planck, Marie Skłodowska Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson

Già quarant'anni fa Peter Medawar (1915-1987) criticava le associazioni che dovrebbero promuovere la ricerca e lo sviluppo scientifico, ad esempio la Royal Society:

How, exactly, do the Royal Society and comparable bodies provide for the advancement of science? A clue to the answer is given by the fact that a large part of their private business provides for the candidature and election of potential members, for self-perpetuation is a principal function [...]³⁹⁵

Negli ultimi trent'anni circa si sono consolidati i *paradigmi* associati alla 'materia oscura', alla 'teoria delle stringhe', alla 'gravità quantistica', alla 'supersimmetria' ('susy'), che hanno ottenuto e ottengono finanziamenti anche molto ingenti per realizzare grandi piattaforme sperimentali, senza raggiungere però nessun risultato o conferma delle sottostanti teorie o modellizzazioni; a parte l'individuazione del bosone di Higgs nel 2012, ipotizzato dal fisico teorico Peter Higgs (1929-1924), che risale comunque a una teorizzazione degli anni '60, e delle onde gravitazionali nel 2015, teorizzate da Einstein nel contesto della *relatività generale* pubblicata nel 1915.

³⁹⁵ [Medawar, 1984] pag. 38

L'atteggiamento di molti cosmologi contemporanei rispetto alle loro attività è quella di «refining small details of the standard model and do not worry about the foundations»³⁹⁶, trascurando criticità anche significative, come ribadisce López-Corredoira:

Cosmologists do not usually work within the framework of alternative cosmologies because they feel that these are not at present as competitive as the standard model. Certainly, they are not so developed, and they are not so developed because cosmologists do not work on them. It is a vicious circle. The fact that most cosmologists do not pay alternative theories any attention and only dedicate their research time to the standard model is to a great extent due to the sociological phenomenon known as the “snowball effect” or “groupthink”³⁹⁷.

Come osserva anche Sabine Hossenfelder in un saggio piuttosto critico sulla ricerca contemporanea:

Scientists are human. Human are influenced by the communities they are part of. Therefore, scientists are influenced by the communities they are part of. [...] physicists don't reflect on the influence that belief sharing has on their opinions. Worse, they sometimes use appeals to popularity instead of scientific arguments to support their convictions...³⁹⁸.

Ovvero, come sottolinea ancora López-Corredoira in un saggio ancora più critico:

The professional activities on those who dedicate their lives to natural or social science usually overlook the fact that, after all, human beings do not move because of *reasons* but because of *emotions*. [...] Science] is made by men whose motivations stem from factors other than a mere pursuit of knowledge. We are not machines, we are not gods; we are just animals, very peculiar animals and very intelligent and curious, that make scientific enterprises work, but subject to multiple internal and external conditions³⁹⁹.

Il ricercatore Pavel Kroupa (1963-) dichiara esplicitamente, a proposito della difficoltà di fare ricerca non appartenendo a un *paradigma* (sociale) corrente (in particolare quello della dark matter): «Le reazioni della comunità internazionale alle ipotesi di Milgrom⁴⁰⁰ sono ascientifiche. I ricercatori che sostengono la teoria MOND vengono malvisti e osteggiati al punto di non concedere loro la possibilità di svolgere ricerche con i necessari finanziamenti o negando posizioni di lavoro nei centri di ricerca»⁴⁰¹.

Non aderendo allo sviluppo delle rivoluzioni scientifiche ipotizzato da Kuhn, Jürgen Renn (1956-) analizza la storia della scienza da un punto di vista storico-culturale ma non manca di evidenziare il fattore umano come autorità di riferimento:

³⁹⁶ [López-Corredoira, 2017] pag. 712, anche per la citazione successiva

³⁹⁷ «Groupthink is a psychological and sociological phenomenon in which members of a group will conform to majority opinion to maintain group harmony rather than stating their own opinions» [fonte studocu.com], un meccanismo psicologico - sociale che blocca le rivoluzioni scientifiche nei *paradigm*

³⁹⁸ [Hossenfelder, 2018] pag. 156-157

³⁹⁹ [López-Corredoira, 2013] pag. 8; resta pertanto sempre sottinteso che le ‘condizioni al contorno’ necessariamente condizionano l’attività di scienziati e ricercatori, quindi anche della ricerca stessa

⁴⁰⁰ Kroupa si riferisce alla teoria MOND di Mordehai Milgrom (1946-), [Milgrom, 1983a] e [Milgrom, 1983b], della gravità modificata (non newtoniana), che dimostrerebbe (in modo ancora incompleto) il comportamento gravitazionale delle masse galattiche senza necessità di postulare la dark matter; sulla teoria MOND è interessante la recente pubblicazione [Merit, 2020]

⁴⁰¹ Citazione e traduzione non letterali di una parte della video intervista a Pavel Kroupa pubblicata nel sito Inaf.it in data 12/12/2023 e reperibile al link <https://www.youtube.com/watch?v=cUccExCdLC0> (pagine visitate il 20/12/23)

Ogni caso di studio, che metta sotto la lente di ingrandimento una personalità o una scoperta della storia della scienza considerandone il contesto culturale, tecnico e sociale, alimenta inevitabilmente non solo dubbi in relazione ai miti tradizionali, ma anche relativamente all'autorità della scienza, che tuttavia sembra dipendere ancora dal concetto di autorità. Quanto più precisa è la risoluzione della lente, tanto più compaiono il puro caso e l'elemento umano troppo umano e tanto meno la scienza si lascia separare dal proprio contesto.⁴⁰²

Le conseguenze anche sociali del conformismo e dei contesti dei *paradigmi* di ricerca sono state analizzate da Feyerabend, già citato nella *Premessa*, che in modo lungimirante ha posto il problema anche dello sviluppo dei singoli ricercatori, oltre che della scienza, come rilevato anche nel precedente capoverso nella citazione di Kroupa.

I programmi di ricerca non basati su solide evidenze osservative permangono nonostante la lucida visione con un secolo di anticipo di Poincaré, che forse pensava che *quel giorno* non sarebbe venuto, quando all'inizio del secolo scorso scriveva:

Fra tutte le spiegazioni possibili, come possiamo operare una scelta per cui non abbiamo il sostegno dell'esperienza? Verrà un giorno, forse, in cui i fisici si disinteressarono di tali questioni, inaccessibili ai metodi positivi, abbandonandole ai metafisici. Ma quel giorno non è ancora venuto: l'uomo non si rassegna tanto facilmente a ignorare in eterno la realtà profonda delle cose.⁴⁰³

Si ricorda come la scienza ellenistica fosse fondata sui φαivόμενα, ovvero «ciò che era direttamente osservabile e che, in quanto tale, era inconfutabile»⁴⁰⁴, e come la tecnologia fosse strettamente in relazione con le teorie scientifiche e alla loro natura ipotetico-deduttiva, mentre in séguito alla dominazione romana le teorie scientifiche fossero poi state disprezzate come inutili astruserie (perché i romani non erano in grado di capirle).⁴⁰⁵ Anche questo portò al tracollo culturale che determinò la perdita delle fonti originali ellenistiche e una crisi, che si trascina tutt'oggi, della «teoria dell'argomentazione, [del] metodo dimostrativo e [della] comprensione del complesso rapporto tra teorie e fenomeni»⁴⁰⁶.

Questa crisi contemporanea della ricerca, teorica e di conseguenza anche osservativa, evidente anche nella tendenza a voler imporre teorie non sostenute (o addirittura non sostenibili) dalle evidenze osservative⁴⁰⁷, nasce probabilmente anche dalla chiusura dei *paradigmi* sociali sopra citati, ancora prima che tecnico-scientifici, e potrebbe essere grave se

⁴⁰² Jürgen Renn in *Auf den Schultern von Riesen und Zwergen, Einsteins unvollendete Revolution (Sulle spalle di giganti e nani, la rivoluzione incompiuta di Einstein)*, Wiley-WCH Weinheim, 2006) pag. 24, citato in [Mach, 1923], edizione italiana pag. 116

⁴⁰³ [Poincaré, 1905] pag. 204

⁴⁰⁴ [Russo, 2022] pag. 132; «Per gli scienziati ellenistici la validità dei postulati (o principi) consisteva nella loro capacità di fondare teorie in grado di “salvare i *phainomena*”; dai postulati dovevano cioè potersi dedurre i fenomeni osservabili», in [Russo, 2022] pag. 132-133

⁴⁰⁵ [Russo, 2022] pag. 133 e capitolo 6 passim; affermazioni ampiamente dimostrate da Russo nel saggio stesso

⁴⁰⁶ [Russo, 2022] pag. 252; in questa conclusione Russo si riferisce in generale al degrado culturale della società contemporanea, nella quale auspica si possa nuovamente *insegnare* quanto indicato

⁴⁰⁷ Come temeva Poincaré, in particolare per la 'susy' o le ipotesi del multiverso o dell'universo matematico, per citarne alcune, in palese contrasto con il concetto consolidato di 'scientificità', tema ampiamente sviluppato in [Hossenfelder, 2018] ma anche in [Hossenfelder, 2022] e in [López-Corredoira, 2013]; nel suo classico [Dirac, 1958], pag. 10, egli ribadisce «[...] the main object of physical science is not the provision of pictures, but is the formulation of laws governing phenomena and the application of these laws to the discovery of new phenomena»

non si riuscirà a superarla⁴⁰⁸. Più di un secolo fa, sempre Poincaré ammoniva:

La libertà è per la Scienza ciò che l'aria è per l'animale; privata di questa libertà, muore per soffocamento, come un uccello privato dell'ossigeno. E questa libertà deve essere illimitata, in quanto, se si volessero imporle limiti, si otterrebbe solo una mezza scienza, e mezza scienza non è più scienza, perché può essere, anzi è necessariamente, una scienza falsa. Il pensiero non deve mai essere subordinato a qualsiasi dogma, partito politico, passioni, interessi, idee precostituite, a tutto perciò, tranne che ai fatti stessi, perché, per la scienza, essere subordinata significa morire.⁴⁰⁹

Un'altra significativa criticità evidente nel contesto dei *paradigmi* correnti, come già lucidamente teorizzata da Kuhn (cfr Allegato A3), è il trascurare gli elementi che manderebbero in crisi la teoria basata sulla *scienza normale*, anche qualora questa fosse in realtà una 'mancata rivoluzione' diventata nel tempo *scienza normale* 'honoris causa', come nel caso della inconclusiva ricerca quarantennale delle particelle di dark matter, per la quale si è vista fare (con l'eccezione significativa della teoria MOND, cfr [Meritt, 2020]) 'qualunque' ipotesi (inclusa la possibilità di 'nuova fisica') tranne la considerazione che la dark matter stessa non esista e che le cause delle anomalie gravitazionali osservate siano dovute ad altra ragione⁴¹⁰.

Si riporta una condivisibile lucida analisi di Claudio Ronchi (1940-) sulla situazione contemporanea della ricerca:

La domanda su cosa sia affidabile e che cosa sia valido nei risultati della ricerca scientifica prima che una risposta richiede un interlocutore. La struttura gerarchica piramidale, che nel passato rifletteva una concentrazione di competenze verso l'apice, è stata sostituita da una struttura manageriale, in cui i livelli gerarchici superiori sono esclusivamente rivolti a quello che possiamo chiamare marketing degli obiettivi e dei risultati, con criteri analoghi a quelli che regolano la domanda e l'offerta.

La ricerca, sia quella finanziata pubblicamente che quella condotta nell'industria, è quasi totalmente orientata da progetti, il cui obiettivo consiste in una realizzazione pratica, per lo più di carattere tecnologico. [...] Nella maggioranza dei casi, la verifica di una nuova scoperta non viene effettuata attraverso un controllo dettagliato delle sue prove, ma piuttosto attraverso le conseguenze della sua considerazione nel contesto di diverse conoscenze e applicazioni. [...] Non ci troviamo davanti a criteri di valutazione basati su rigorose dimostrazioni logico / mate-

⁴⁰⁸ Con una generale osservazione sociologica realistica, si evidenzia come questi gruppi sociali condizionati e condizionanti riflettano una realtà assai diffusa nella società contemporanea, affatto dominata da opportunismi più e meno dissimulati, più che da principi

⁴⁰⁹ Discorso di Poincaré pronunciato in occasione della laurea honoris causa conferitagli dall'Università libera di Bruxelles in occasione dei festeggiamenti per il 75° anniversario della fondazione; in [Nastasi, 2012]

⁴¹⁰ Ad esempio, basata su un personale studio in corso, l'ipotesi che le anomalie gravitazionali siano dovute all'energia complessiva delle grandi strutture, compresa negli halo galattici o di cluster di galassie, che si manifesti come massa (sulla base della nota relazione $E = mc^2$, [Einstein, 1905b]); energia complessiva dovuta a tutta la cinematica coinvolta, alla presenza di radiazione emessa localmente in forma di fotoni che si diffondono 'lentamente', considerate le distanze coinvolte (alla velocità della luce), neutrini, raggi cosmici, onde gravitazionali, o 'in transito' in quanto emessa da sorgenti esterne al soggetto cosmologico

matiche, ma a constatazione di risultati plausibili che hanno per sé stessi un valore dimostrativo.⁴¹¹

anche se non si condividono per niente le sue conclusioni positive, quantomeno per la criticità di poter considerare "conoscenza" (e non pre-giudizio, ad esempio) quanto non sia rigorosamente e scientificamente dimostrato:

Esiste quindi un aspetto sociale del progresso della conoscenza nella civiltà moderna, che nel passato ebbe solo un ruolo marginale. Genialità, intuizione e fantasia, da una parte, e interesse e competenza, dall'altra, contribuiscono insieme a far germinare e crescere *nuova conoscenza* fino a integrarla nel patrimonio comune.

Uno scenario potenzialmente inquietante, almeno per un 'tradizionalista' che associ il progresso scientifico al riscontro delle evidenze osservative di teorie fondate su un costrutto logico e fisico, è quello rappresentato dagli sviluppi della ricerca e della modellizzazione associati all'*intelligenza artificiale* (AI), una entità non ancora ben compresa e sicuramente non conosciuta nemmeno nelle caratteristiche principali; la prima caratteristica è che questa *intelligenza* non sia quella che normalmente attribuiamo ai soggetti antropici e non si basi su nessuno dei costrutti logici in base ai quali i soggetti antropici agiscono.

Si tratta per lo più di output statistici funzione di (auto)ottimizzazioni statistiche prive di *regole* ma basate solo sull'elaborazione di grandi numeri di dati, ipso facto *impossibili da controllare*.⁴¹²

L'utilizzo di software di simulazione potenzia la ricerca ma l'utilizzo di software che sfrutti l'AI (che se ne sia più o meno consapevole) cela (potenziali) perdite di controllo nelle analisi e nella consapevolezza dei risultati ottenuti.

Si osserva come non sia evidente come questo sviluppo della AI possa far superare la crisi contemporanea della ricerca⁴¹³ rispetto ai limiti dei *paradigmi* sociali, guidati da soggetti e intenzioni (per ora) apparentemente lontani dagli algoritmi automatici.

Ma non ci si sbilancia sulle visioni futuriste.

Conclusioni cosmologiche

Come presentato nella *Premessa*, il primo intento di interpretare il redshift in modo diverso dal consolidato modello di espansione dell'universo (cfr schema riassuntivo nella pagina seguente) ha ipotizzato che lo scorrere del tempo non fosse quello universale ma uno *specifico* associato al percorso del fotone dalla sorgente remota all'osservatore. Questa

⁴¹¹ [Ronchi, 2010] pag. 191-192, anche per la citazione successiva; corsivo aggiunto

⁴¹² Il saggio [Cristianini, 2023] approfondisce la tematica; l'osservazione nel testo, consapevole della crisi della fisica teorica contemporanea, nasce da un'importante nota a pag. 122 del saggio stesso: «Tutte le volte che dobbiamo fare delle previsioni in campi per cui non c'è teoria, l'Intelligenza Artificiale guidata dai dati può essere d'aiuto»

⁴¹³ «We can use one adjective to describe the status of science at present and in the near-future: decadent.» [López-Corredoira, 2013] pag. 125; l'affermazione ovviamente è ampiamente dimostrata e sostenuta da condivisibili analisi

ipotesi è stata dimostrata falsa, nei limiti delle assunzioni adottate: ovvero il tempo (antropico) è dimostrabile che sia uno solo (universale), quindi non è necessario postulare che lo sia, nel *principio cosmologico*.

Il 'rallentamento' dei fotoni nel lungo percorso, altra interpretazione del fenomeno del redshift, non si ritiene attribuibile nemmeno a interazioni gravitazionali (escluso eventuale redshift gravitazionale ab origine, indipendente dal successivo percorso quindi non generalizzabile a tutte le sorgenti o a segnali provenienti da diverse parti della stessa sorgente, come le regioni esterne degli aloni galattici).

Si riporta lo schema riassuntivo dell'approfondimento, per orientarsi tra le ipotesi e le congetture:

<i>circostanze redshift</i>	<i>espansione universo</i>	<i>ipotesi causa redshift</i>	<i>congetture</i>	<i>ok</i>
[η]	sì	recessione sorgenti	legge di Hubble-Lemaître	?
		[a] rallentamento tempo specifico	[1] $t_s = \xi t_u$ [2] $t_s = \xi(t_u)$	no no
[σ]	no	[b] interazioni gravitazionali		no
		[c] interazioni fluido cosmico	URD $\gamma\gamma$ α_U^*	? !

In una struttura interpretativa affatto alternativa al *modello cosmologico standard*, si è infine ipotizzato, nell'Allegato A4, che l'universo sia statico (ovvero non in espansione e senza originario *Big Bang*), spazialmente e temporalmente infinito (temporalmente dal punto di vista antropico), omogeneo e isotropo a grande scala, nel quale valga il principio di conservazione dell'energia.

La *relatività generale* prevede per la struttura del cosmo solo soluzioni dinamiche, con il grado di libertà rappresentato dal fattore di scala (cfr [7_3a]), ma in un universo infinito, quanto siamo in grado di osservare con gli attuali strumenti può essere considerato un 'contesto locale', quindi l'ipotizzata staticità 'locale' non viola la necessità di soluzioni dinamiche alle equazioni della *relatività generale*. Si tratta di considerare la *scala* che ci compete: è presuntuoso voler descrivere l'infinito dal nostro punto di vista locale, finito. Quello che si può realisticamente fare è descrivere la nostra parte di universo, conoscibile. Le ipotesi sostenute di omogeneità, isotropia, staticità e conservazione dell'energia, sostanzialmente confermate dalle osservazioni (nell'ambito delle congetture approfondite nell'Allegato A4) riguardano pertanto "il nostro particolare"⁴¹⁴ e non hanno pretese di universalità infinita (cfr anche l'Allegato A5 *Sui pregiudizi antropici*).

⁴¹⁴ Espressione rubata a Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) dal celebre aforisma «Finché rimaniamo generici chiunque può imitarci, mentre *il nostro particolare* non può imitarlo nessuno, perché gli altri non lo hanno vissuto.» (nella raccolta *Maximen und Reflexionen* pubblicata postuma nel 1833); corsivo aggiunto

In questo universo infinito, nell'*etere* (cfr sezione A4.2 *Nuovo etere e radiazione MCR*), è presente una densità di energia uniformemente diffusa $U^\star$ che è supposta interagire con i fotoni delle sorgenti remote che la attraversano fino all'osservatore (cfr nella sezione A4.4 la *congettura $\gamma\gamma$ sulle interazioni fotone-fotone*).

Spectral energy distribution of a typical late-type galaxy. The blue hatched area shows the power absorbed by dust. Typical diffuse interstellar band (DIB), extended red emission (ERE), and anomalous microwave emission (AME) spectra are shown, together with the most relevant gas lines. The free-free continuum is emitted by the deceleration of free electrons scattering off ions in ionized regions. The synchrotron continuum is emitted by electrons spiraling through the magnetic field. Here, ν is the radiation frequency and L_{ν} is the electromagnetic power emitted per unit frequency.

$U^\star$ è costituita dalla radiazione chiamata MCR (Microwave Cosmic Radiation) emessa dall'universo stesso inteso come *corpo nero*⁴¹⁶ e da fotoni, onde gravitazionali, campi elet-

⁴¹⁵ [López-Corredoira, 2022] pag. 1-8, anche per la citazione successiva, questa tratta da Kerzsberg, 1986, *The Cosmological question in Newton's science* (Osiris 2, 69-106)

⁴¹⁶ Sulla base del *teorema di Kirchhoff* (Gustave Robert Kirchhoff 1824-1887), in condizioni di equilibrio termico (che si può supporre a grande scala), i poteri emissivo e assorbente sono universali, ovvero non dipendono dal tipo di corpo e dalla composizione chimica, e la densità di radiazione non dipende dal tipo di

tromagnetici e gravitazionali, neutrini, raggi cosmici emessi da sorgenti remote, nonché polveri e gas, in primis l'idrogeno neutro.

Per completezza si riporta nella *Figura 9* uno schema della *spectral energy distribution*⁴¹⁷ di una galassia tipo, a spirale (chiamata late-type⁴¹⁸); si osserva come le sorgenti che compongono l'emissione complessiva siano le più diverse e coprano l'intero spettro delle lunghezze d'onda, verosimilmente giustificando a grande scala lo spettro di *corpo nero* osservato nella MCR, emesso dall'insieme di tutte le componenti l'universo stesso.

Le interazioni tra $U^\star$ e i fotoni delle sorgenti remote, possibili grazie a una sezione d'urto associata all'onda elettromagnetica dei fotoni stessi (ricavata nella sezione A4.4 *Equazioni congettura URD*), sono ipotizzate determinare una perdita di energia e quindi una maggiore lunghezza d'onda per il fotone incidente.

Si è verificato questo modello con una analisi di dati reali confrontati con l'equazione risultante dalla congettura e i risultati che conseguono sono significativi: considerando un redshift dovuto alle interazioni dei fotoni incidenti con $U^\star$ e non all'espansione dell'universo, si possono fare previsioni di stima di distanze significativamente *migliori* di quelli della legge di Hubble-Lemaître, rispetto ai dati ottenuti da modelli di stima che non considerano il redshift per la determinazione della distanza⁴¹⁹.

Come anticipato, i modelli di spiegazione fisica considerati si rifanno a congetture non dimostrate ma tutto lo studio è riportato nell'Allegato A4 come riferimento per potenziali futuri approfondimenti.

cavità (ovvero dalla forma spaziale del *corpo nero*); tale *corpo nero* emette la densità di radiazione $u_\nu(T)$ (cfr [A4.3_8a]) rigorosamente planckiana, detta MCR, le anisotropie della quale trovano potenziali spiegazioni nella congettura stessa, cfr *Considerazioni sulle anisotropie della MCR* in A4.2

⁴¹⁷ Fonte [Galliano et al., 2018], grafico leggermente modificato (è stato tolto un ulteriore grafico interno)

⁴¹⁸ Nomenclatura eredità della classificazione originale di Hubble, che evidenziava graficamente le galassie a disco (e a spirale, barrate e non) come 'successive' a quelle ellittiche, dette early-type

⁴¹⁹ Tutti i dati considerati sono stati estratti dal database NED della Nasa

Epilogo

*The drama's done.
Why then here does any one step forth?
Because one did survive the wreck.⁴²⁰
Herman Melville*

La sensazione personale a valle dell'approfondimento (incluso l'Allegato A4!) è quella di aver 'pulito la lavagna', e ora davanti a una lavagna vuota tranne le due fondamentali indicazioni osservazionali *non* dipendenti da teorie: **densità diffusa di energia** e **redshift**, è necessario (ri)costruire modelli dettagliati che spieghino 'l'universo osservato', dalla bariogenesi alle abbondanze di leptoni, dalla cinematica delle galassie a disco ai cluster di galassie, peraltro senza vincoli temporali. Ad esempio iniziando criticamente dalle ipotesi avanzate nel presente approfondimento, bozza di congetture affatto 'alternative' che sono state avanzate per supportare la 'pulizia della lavagna'.

Confidando che questo studio possa aggiungere un piccolissimo contributo all'interpretazione della Natura, nei limiti descritti, a conclusione del lavoro si riporta una citazione del filosofo e scienziato arabo Al-Kindi (circa 801-circa 873) che 1150 anni fa scrisse:

Non dobbiamo vergognarci di riconoscere la verità e di assimilarla, da qualunque parte essa provenga. Per colui che cerca di conquistare la verità non c'è nulla che valga più della verità stessa; questa ricerca non lo sminuisce né lo umilia mai.⁴²¹

Dovuti ringraziamenti sono rivolti al relatore professore Enrico Maria Corsini, soprattutto per la pazienza e la disponibilità dimostrate.

L'ultimo pensiero è un ancora un riconoscente ringraziamento al professore Enrico Maria Corsini quale mentore instancabile in questi ultimi anni, senza l'incoraggiamento del quale *tutto questo* forse non sarebbe mai esistito.

⁴²⁰ Herman Melville nell'epilogo di *Moby-Dick, or the Whale*, che dopo aver dato l'incipit ora chiude questo approfondimento, sempre metaforicamente, in un naufragio di 'certezze teoriche' che lascia come sopravvissuta solo la Natura e la necessità di studiarla "in re ipsa", non 'antropicamente'

⁴²¹ Citazione di Abdus Salam (1926-1996) in [Salam, 1984] edizione italiana pag. 373; la frase è contenuta nel discorso di presentazione alla cerimonia del premio Nobel per la Fisica, assegnato a Salam nel 1979. Di analogo parere Ernst Mach, che in *Die geschwindigkeit des lichtes*, conferenza pubblicata in *Zwei populäre vorträge über Optik* (Fuschner & Lubensky, Univ. Buchhandlung, Graz, 1867), scrisse: «nessuna fatica del pensiero è inutile. [...] E come nel pensiero di un individuo nulla è inutile, così in quello dell'umanità.». Come ultima chiosa epistemologica, si riporta una nota di Einstein nell'ultima bozza autografa prima della morte (in una osservazione sull'unificazione della teoria classica dei campi e i fenomeni quantistici), «Lessing's comforting word stay with us: the aspiration to truth is more precious than its assured possession.» [Pais, 1982] pag. 468 che cita *Helle Zeit, dunkle Zeit* (C. Seelig Ed, Europa Verlag Zürich, 1956); Einstein non ha citato testualmente il filosofo Gotthold Ephraim Lessing (1729-1781) ma ha riportato una interpretazione del pensiero dello stesso

Allegato A1 Epistemologia della ricerca scientifica

Il progresso della conoscenza sembra condurre a una *verità*, in greco *ἀλήθεια*, *svelamento*, come ha evidenziato Heidegger⁴²², quella che gli uomini incatenati nel ‘mito della caverna’ di Platone⁴²³ potrebbero conoscere solo girandosi, facendo una *rivoluzione*.

Ma queste suggestioni devono confrontarsi con la realtà di chi osserva la Natura e per mezzo di criteri di *spiegazione* vuole arrivare alla *conferma* o *accettabilità* di *teorie* esplicative.

A fondamento della struttura logica del ragionamento va ricordata l’eredità di Aristotele⁴²⁴, pur essendo le sue impostazioni assiomatiche già in crisi verso la fine del sedicesimo secolo e poi definitivamente superate con Galilei, Kepler e le loro attività osservative; di fatto queste hanno ‘spento’ la filosofia naturale aristotelica che non poté essere riformata, non potendo spiegare e prevedere i fenomeni come invece faceva la nuova fisica matematica⁴²⁵.

A integrazione di questa considerazione, si osserva però come Newton conservasse ancora “una concezione sostanzialmente aristotelica dello spazio”⁴²⁶ che non gli ha consentito di recepire il concetto di relatività del moto, che era stato parzialmente recuperato da Galilei dopo l’oblio della scienza ellenistica, conseguente alla conquista romana del Mediterraneo (cfr [Russo, 2022]).

Aristotele ha utilizzato il processo di *induzione*, dal particolare al generale, per la spiegazione del concetto di *atto* in relazione a quello di *potenza*⁴²⁷: «La *potenza* è la capacità che ha un ente di produrre un mutamento in un altro ente»⁴²⁸, «la forma è *atto* per eccellenza [e] il sinolo [unione di materia e forma] è in *atto* perché le sue parti materiali (e quindi potenziali) sono attualizzate nella forma.»⁴²⁹

Il principio di identità - non contraddizione approfondito da Aristotele:

è impossibile che la stessa cosa convenga e insieme non convenga a una stessa cosa e per il medesimo rispetto⁴³⁰

diventò, in realtà già a partire da Parmenide che per primo lo enunciò, fondamento di ogni possibile sapere. In una riformulazione del principio, Aristotele stesso ha precisato:

Se dunque è impossibile che l’affermazione e la negazione siano insieme vere, è anche

⁴²² Heidegger in *La dottrina platonica della verità*, nella raccolta *Segnavia* (Adelphi, 1987)

⁴²³ Platone nel libro settimo de *La Repubblica*

⁴²⁴ Senza nulla togliere ad Aristotele, Russo sottolinea in [Russo, 2021] pag. 247, che «sulla base delle testimonianze rimaste è Crisippo [Crisippo di Soli, circa 280-circa 208] ad apparire il fondatore della *teoria scientifica della logica proposizionale*. Mentre Aristotele aveva usato variabili solo per rappresentare termini generici delle proposizioni, Crisippo rappresentò le proposizioni stesse con variabili e costruì una teoria dell’inferenza logica basata su cinque postulati.»; corsivo aggiunto

⁴²⁵ [Grant, 1996] edizione italiana pag. 249-250

⁴²⁶ [Russo, 2021] pag. 472

⁴²⁷ «Ciò che vogliamo dire diventa chiaro per induzione nei casi particolari: infatti non bisogna cercare definizione di tutto, ma bisogna accontentarsi di comprendere intuitivamente certe cose mediante l’analogia», Aristotele in *Metafisica*, IX 6, citato da [Reale, 1997] pag. 149

⁴²⁸ [Reale, 1997] pag. 147

⁴²⁹ [Reale, 1997] pag. 143 passim

⁴³⁰ Aristotele in *Metafisica*, IV 5, citato in [Severino, 1959] pag. 32, il quale specifica come il principio possa essere formulato in altri modi: «L’essere non è non essere», ovvero «È impossibile che il medesimo sia e non sia»

impossibile che i contrari si trovino insieme, a meno che entrambi si realizzino in una certa maniera soltanto, oppure l'uno in una certa maniera soltanto e l'altro semplicemente.⁴³¹

Mentre è immediato riconoscere la coerenza logica di questo principio considerando le affermazioni in astratto, non sempre lo è quando si tratta di affermazioni normative che, ancora prima di violare le leggi esistenti, rischiano di contraddirsi conducendo a conclusioni che potrebbero violarne le premesse.

Anche sulla base di queste esigenze si sviluppò alla fine del XIX secolo il metodo ipotetico-deduttivo, così chiamato al tempo, come spiega Lolli:

Così [...] ci si riferiva al metodo assiomatico, nella incerta sensazione che si trattasse di qualcosa di nuovo, dove i punti di partenza dei ragionamenti erano solo ipotesi, ma senza il coraggio di dire che l'idea delle verità necessarie doveva andare in soffitta. Si ricordi che, per Aristotele, i significati di 'postulato' e di 'ipotesi' erano collegati, precisamente l'ipotesi era un'affermazione condivisa dal discente, il postulato poteva o doveva essere accettato anche senza o contro il suo assenso.⁴³²

Il debito della civiltà occidentale verso il pensiero e la cultura greca resta tutt'oggi sottostimato e si condivide il pensiero di John Burnet (1863-1928) anche se risale a oltre un secolo fa:

[...] it is an adequate description of science to say that it is "thinking about the world in the Greek way". That is why science has never existed except among peoples who came under the influence of Greece.⁴³³

La considerazione finale dello stesso Kuhn nel suo saggio del 1962, in merito al processo conoscitivo, ha un significato anche metodologico, oltre che filosofico:

È veramente d'aiuto immaginare che esista qualche completa, oggettiva, vera spiegazione della natura e che la misura appropriata della conquista scientifica è la misura in cui essa si avvicina a questo scopo finale? Se impareremo a sostituire l'evoluzione verso ciò che vogliamo conoscere con l'evoluzione a partire da ciò che conosciamo, nel corso di tale processo un gran numero di problemi inquietanti può dissolversi.⁴³⁴

È opportuno un approfondimento dei significati, secondo le epistemologie classiche e contemporanee, dei termini *spiegazione*, *conferma*, *accettabilità* e *teoria*.

Sulla *spiegazione*

Il punto di vista 'classico' della teoria della spiegazione scientifica, formatosi agli inizi del secolo scorso, è stato definito *empirismo logico*, a sottolineare come fosse basato su una

⁴³¹ Aristotele in *Metafisica*, IV 18, citato in [Severino, 1959] pag. 71, che ne spiega i significati: "si trovino insieme" = convengano allo stesso termine, "in una certa maniera soltanto" = in potenza, "l'uno in una certa maniera soltanto e l'altro semplicemente" = l'uno in potenza e l'altro in atto

⁴³² [Lolli, 2016] pag. 153

⁴³³ Citazione da [Schrödinger, 1956] pag. 96; da *Nature and the Greeks*, una serie di lezioni all'University College di Dublino tenute da Schrödinger nel febbraio 1950

⁴³⁴ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 205

spiegazione in gran parte *formale* per descrivere l'attività scientifica e sul carattere fortemente *empirico* della scienza stessa.

Un enunciato ha significato cognitivo nella misura in cui è possibile verificarlo, almeno in linea di principio. Al contrario, se un enunciato non può essere verificato, o se non esiste alcun insieme di osservazioni sulla base delle quali una parola è applicata correttamente o scorrettamente, allora l'enunciato (o la parola) è privo di significato.⁴³⁵

Nonostante le critiche successive si siano concentrate sulla debolezza delle affermazioni relative ai concetti di spiegazione e costruzione di teorie, oppure sul carattere rivoluzionario del progredire scientifico, resta tuttora valida l'impostazione sopra riportata come fondamento gnoseologico, coerente con la posizione di Galilei citata nella sezione A di questo approfondimento.

Una visione pragmatica del metodo assiomatico fu quella di Ennio de Giorgi (1928-1996)

«in funzione non della ricerca della certezza ma della prospettiva di “elaborare ambiti concettuali al cui interno la ricerca e l'insegnamento della matematica e delle altre discipline possano trovare uno svolgimento pienamente rigoroso, ma anche naturale e privo di quei vincoli artificiosi che derivano da un riduzionismo esasperato e da una totale formalizzazione”».⁴³⁶

Nella teoria classica, una spiegazione è composta da alcune *asserzioni explanans* (che esprimono la spiegazione), tra le quali una *normativa* e una che stabilisca le *condizioni iniziali*, e un'*asserzione explanandum* (che descrive la situazione concreta da spiegare); una spiegazione equivale pertanto a *sussunzione*⁴³⁷ *deduttiva*⁴³⁸ *sotto leggi generali*. Ogni spiegazione è quindi una argomentazione, in grado di predire un evento perché 'la Natura funziona in modo ordinato'⁴³⁹. L'aspetto delle asserzioni *normative*, relativa a *leggi generali*, è approfondito nel séguito.

L'aspetto deduttivo logico è rilevante per i modelli interpretativi della Natura, poiché come formulato da Alan Donagan (1925-1991)⁴⁴⁰:

Se il vostro compito è quello di spiegare perché un dato evento E si è verificato, invece che non verificato, il vostro *explanans* deve escludere la possibilità che E non si verifichi; ma se la vostra spiegazione non è deduttiva, cioè se il suo *explanans* non implica logicamente l'*explanandum*, essa non escluderà tale possibilità e quindi non spiegherà perché E si sia verificato.

In altre parole è necessario dimostrare la *necessità* che *E* accada, affinché la spiegazione sia completa.

⁴³⁵ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 15; un principio a volte, ahinoi, disatteso dalla ricerca scientifica contemporanea (cfr le *Conclusioni sociologiche*)

⁴³⁶ [Lolli, 2016] pag. 53, la citazione nella citazione è di M. Forti in *Il valore sapienziale del metodo assiomatico* (2002, Glauco, 2, pag 169-180)

⁴³⁷ Sussunzione: «riconduzione di un noema (ossia un qualsiasi contenuto di pensiero, 'termine' di giudizio o di sillogismo) nell'ambito di quello nella cui estensione esso è compreso»; da vocabolario Treccani online

⁴³⁸ Deduzione: «Nella logica, termine indicante il rapporto di derivazione che in un ragionamento lega la conclusione alle premesse»; da vocabolario Treccani online

⁴³⁹ Di tutt'altro parere il filosofo David Hume (1711-1776) che dal punto di vista induttivista sosteneva di fatto l'impossibilità di fare previsioni sul futuro

⁴⁴⁰ Donagan (1925-1991) in *The Popper-Hempel Theory reconsidered* (Harper & Row, New York 1966) citato da [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 29

In un contesto di spiegazione fisica, è opportuno osservare anche come nella valutazione di un 'condizionale materiale' ($P \rightarrow Q$, "se P , allora Q ", vera se o P è falsa o Q è vera⁴⁴¹) il condizionale debba essere vero-funzionale (P non è mai falso) altrimenti il controfattuale sarebbe sempre vero.

Il modello classico di spiegazione prevede in genere anche un criterio temporale, in quanto una *spiegazione* equivale anche a una *predizione*.

Le asserzioni normative dovranno non solo essere vere ma anche rappresentare una legge causale, per evitare spiegazioni fittizie.

Nella teoria basata sulla sussunzione deduttiva, una spiegazione è causale se a) è una spiegazione di eventi individuali, b) gli eventi descritti nelle asserzioni explanans precedono l'evento in questione, c) le leggi cui si fa appello sono di carattere causale.⁴⁴²

Si riporta la posizione di Planck in uno scritto del 1926 sui *Caratteri generali delle leggi fisiche*:

[...] la scienza è costretta ad ammettere l'esistenza di leggi causali come un postulato o, per dirla con Kant, ad annoverare il concetto di causa fra le categorie date a priori, senza le quali non è possibile l'acquisto di qualsiasi conoscenza. Ne consegue che non è possibile penetrare l'essenza delle leggi fisiche colla pura riflessione; non resta altro che rivolgersi alla natura, raccogliervi numerose e svariate esperienze, confrontarle fra loro e dar loro forma generale condensandole in principî semplici e di larga portata. È questo il metodo dell'induzione.⁴⁴³

Pur essendo controverse e legate a una visione 'classica', si riportano le condizioni che caratterizzano una legge causale, indispensabili per descrivere l'attività scientifica, come riassunte da Nagel (1901-1985)⁴⁴⁴:

- asserire una relazione invariante tra eventi
- collegare eventi che avvengono in momenti successivi
- gli eventi collegati sono spazialmente contigui
- la relazione causale implicata è asimmetrica⁴⁴⁵.

I fenomeni quantistici o di *weak interaction*, ad esempio, non rispettano tutte queste condizioni e le predizioni possono essere solo di natura statistica ma l'impianto logico deduttivo rimane valido; si aggiunge la considerazione "anche se 'modernamente' i modelli realizzati con software costituiscono sempre più la base di sviluppo e primo test, ad esempio delle nuove teorie fisiche e cosmologiche".

Tralasciando le analisi relative alle scienze probabilistiche e facendo una 'scelta di campo' ponendosi in un ambito logico-filosofico pienamente deduttivistico, il contesto nel quale si sviluppa la ricerca scientifica può essere ancora considerato quello teorizzato da Kuhn, il *paradigma*, integrato con analisi e posizioni di altri epistemologi.

⁴⁴¹ In generale si può dire che $P \rightarrow Q$ è sempre vera tranne quando Q è falsa

⁴⁴² [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 31

⁴⁴³ [Planck, 1941] edizione italiana pag. 157-158

⁴⁴⁴ [Nagel, 1968] edizione italiana pag. 79-85

⁴⁴⁵ Se A causa B , B non può essere la causa di A

Sulla conferma e accettabilità

Il principio di accettare le ipotesi scientifiche che hanno il maggior numero di prove a specifico favore non tiene adeguatamente conto delle considerazioni sul *principio di falsificazione*, basato sulla asimmetria tra verificabilità e falsificabilità, che Karl Popper (1902-1994) mise a fondamento della propria epistemologia⁴⁴⁶, facendone un criterio di demarcazione tra scienza e non scienza⁴⁴⁷, poiché «Da una asserzione autocontraddittoria⁴⁴⁸ può essere validamente dedotta qualsiasi asserzione»⁴⁴⁹.

Secondo Popper «Le teorie non possono essere verificate⁴⁵⁰, ma possono essere *corroborate*»⁴⁵¹, intendendo con questo termine una loro ‘resistenza a prove di falsificazione’, che non costituisce però un loro ‘grado di verità’⁴⁵²; sono piuttosto le predizioni delle teorie che possono essere ‘confermate’ da prove di correttezza. La conoscenza secondo Popper procede da questo processo continuo di congetture e confutazioni, in una visione chiamata ‘razionalismo critico’, sostanzialmente diversa da quella di Kuhn.

Inoltre, «il fatto che uno scienziato *tenti* o meno di *falsificare* un’ipotesi dipende in parte dalle sue intenzioni [e ...] il concetto di esame a sua volta non può essere inteso indipendentemente dal retroterra di informazioni»⁴⁵³, «necessario per scegliere ipotesi legittime, cioè per scegliere i condizionali universali⁴⁵⁴ *suscettibili* di conferma da parte dei loro esempi positivi.»⁴⁵⁵ In questo modo il ‘fattore umano’, che anche Kuhn considera come parte della *matrice disciplinaria* soprattutto tra i *valori*, può giocare un ruolo nello sviluppo sia della ricerca sia della *falsificazione* della teoria corrente.

Un esempio tratto dalla storia riguarda le irregolarità osservate nell’orbita del pianeta Urano verso la metà del diciassettesimo secolo, non spiegabili con la gravitazione universale di Newton applicata alle informazioni disponibili; si svilupparono tre diverse interpretazioni:

- la teoria newtoniana era stata contraddetta, quindi non era più valida
- la teoria newtoniana funzionava solo fino a distanze pari a quella di Urano

⁴⁴⁶ Nel merito, Kuhn in [Kuhn, 1962] edizione italiana a pag. 38, cita l’acuta osservazione metodologica di Francis Bacon (1561-1626) in *Novum Organum*: «La verità emerge più facilmente dall’errore che dalla confusione»; come osservato in [Russo, 2021] a pag. 490, l’idea della ‘falsificabilità’ delle teorie scientifiche normalmente attribuita a Popper che ne aveva scritto nel suo *Logik der Forschung* del 1934, è in realtà di Pierre Duhem (1861-1916), intellettuale conoscitore delle fonti classiche

⁴⁴⁷ [Popper, 1935] edizione italiana pag. 66-84

⁴⁴⁸ L’autocontraddittorietà rappresenta l’analogo, per la scienza in generale, della *falsificabilità* per la scienza empirica, [Popper, 1935] edizione italiana pag. 348

⁴⁴⁹ [Popper, 1935] edizione italiana pag. 82; Albert Einstein, in *Geometrie und Erfahrung* (1921), scrisse «Nella misura in cui parlano della realtà, le asserzioni della geometria non sono certe [cioè sono falsificabili]; nella misura in cui sono certe [cioè non sono falsificabili], non parlano della realtà.»

⁴⁵⁰ Come invece aveva creduto Newton, nella sua visione mista a posizioni dogmatiche classiche, cfr [Russo, 2021] pag. 469-490 passim

⁴⁵¹ [Popper, 1935] edizione italiana pag. 275

⁴⁵² [Popper, 1935] edizione italiana pag. 302-305

⁴⁵³ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 68

⁴⁵⁴ I condizionali generalizzati, o condizionali universali, sono rappresentati da Nagel nel caso semplice come «per ogni x , se x è A , allora x è B (o, come alternativa, tutti gli A sono B).»; [Nagel, 1968] edizione italiana pag. 53. Le *prove dirette* di un’ipotesi consistono nei suoi *esempi positivi* (nel caso precedente x è un *esempio positivo*) e *negativi* (nel caso ‘per ogni x , se x è A allora x non è B ’, x è un *esempio negativo*); le *prove indirette* «derivano dalle connessioni teoriche che un’ipotesi ha con altri principi, leggi e ipotesi a loro volta fortemente confermate.»; [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 62-63

⁴⁵⁵ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 73

- esisteva un pianeta non osservato che determinava le irregolarità di Urano.

Fino a quando non fu scoperto il pianeta Nettuno⁴⁵⁶ la prima ipotesi era la meno consistente, infatti

in assenza di una teoria alternativa che possa spiegare i fenomeni in modo almeno tanto soddisfacente quanto la teoria predominante, noi esitiamo ad abbandonare quest'ultima. È tipico il fatto che ipotesi o teorie ben radicate vengano respinte solo nel contesto di alternative rivali.⁴⁵⁷

Sulle teorie

La posizione dell'empirismo logico sulla natura delle teorie, chiamata 'posizione acquisita', considera una teoria scientifica come «un insieme di enunciati formulati in un linguaggio avente un vocabolario e una struttura chiaramente specificati»⁴⁵⁸; gli enunciati sono i principi teorici della teoria, organizzati in modo deduttivo ed espressi da formule matematiche; le 'regole di corrispondenza' assegnano contenuto empirico ai principi teorici. A questi enunciati corrispondono termini *teorici* e *osservativi*. Tale posizione classica sostiene che una teoria abbia significato empirico solo se ha conseguenze verificabili.

Nel merito dell'empirismo, Gaston Bachelard (1884-1962) ha introdotto una sorta di dialettica tra empirismo e razionalismo:

L'empirismo ha bisogno di essere capito; il razionalismo ha bisogno di essere applicato. [...] Pensare scientificamente significa situarsi in quel campo epistemologico che si pone all'intersezione fra teoria e pratica, fra matematica ed esperienza. Conoscere scientificamente una legge naturale significa conoscerla contemporaneamente come fenomeno e come noùmeno.⁴⁵⁹

E ancora:

Chiederò inoltre ai filosofi di abbandonare l'ambizione di trovare un unico punto di vista e un punto di vista immutabile per giudicare l'insieme di una scienza tanto vasta e tanto mutevole come la fisica. Arriverò quindi a caratterizzare la filosofia delle scienze con un pluralismo filosofico. [...] Si dovrebbe fondare una filosofia del dettaglio epistemologico, una filosofia scientifica *differenziale* che farebbe riscontro alla filosofia *integrale* dei filosofi. [...] Dialettizzare il pensiero, significa aumentare la garanzia di creare scientificamente *fenomeni completi*, di rigenerare tutte le variabili degenerate o soffocate che la scienza, così come il pensiero ingenuo, aveva trascurato nel suo primo studio.⁴⁶⁰

Secondo Feyerabend la posizione classica presuppone due condizioni: la *condizione di coerenza* e la *condizione di invarianza di significato*. La prima richiede che ogni nuova teoria sia coerente con una teoria precedentemente accettata o un'estensione di essa (trattata come caso limite o speciale), la seconda richiede che il significato dei termini scientifici non cambi quando si descrivono fenomeni nuovi. Ma queste condizioni non sono conformi ai

⁴⁵⁶ Il 23 settembre 1846 da Johann Gottfried Galle (1812-1910) e Heinrich Louis d'Arrest (1822-1875) con il telescopio dell'Osservatorio astronomico di Berlino

⁴⁵⁷ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 85

⁴⁵⁸ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 92

⁴⁵⁹ [Bachelard, 1962] edizione italiana pag. 37

⁴⁶⁰ [Bachelard, 1962] edizione italiana pag. 41-44

fatti, essendo violate nella realtà da ciò che caratterizza una *rivoluzione scientifica*, quindi lo sviluppo di una metodologia veramente empirica significa abbandonare la posizione classica.⁴⁶¹

Kuhn è il più autorevole rappresentante degli epistemologi chiamati ‘soggettivisti’, per il loro approccio antropologico⁴⁶²; le tesi soggettiviste non sono state tutte pienamente condivise tra i soggettivisti ma possono essere così rappresentate⁴⁶³:

- le teorie sono «modi di vedere il mondo»
- «il significato dei termini fondamentali di una teoria è determinato dai vari principi che li contengono, e quindi se i principi variano, come accade passando da una teoria all'altra, variano anche i significati dei termini»
- «i fatti sono *impregnati di teoria*⁴⁶⁴, ossia ciò che conta come *fatto* è almeno in parte determinato dalle teorie che si usano.»

Si possono anche distinguere le *leggi sperimentali* o empiriche, legate alla ‘osservabilità’ dei fenomeni, normalmente descrittive e che si riferiscono a un enunciato singolo, dalle leggi teoriche o *teorie*, costituite da più enunciati connessi, non induttivi e di portata più generale, che possono evidenziare connessioni sistematiche tra leggi sperimentali e ispirarne di nuove⁴⁶⁵.

I componenti di una *teoria* secondo Thomas Nagel (1937-) sono:

- lo scheletro logico che definisce le nozioni fondamentali del sistema
- un insieme di regole che assegna il contenuto empirico al calcolo astratto
- una interpretazione o modello del calcolo astratto⁴⁶⁶.

Limiti della spiegazione scientifica

Le preposizioni matematiche *pure*, utilizzate come *linguaggio della scienza* in quanto «ci dice che cosa consegue dal significato dei termini usati», sono considerate *analitiche* (a priori) in quanto vere o false indipendentemente dal riferirsi a *fatti* e rappresentano uno studio ‘privo di oggetto’, mentre le preposizioni di matematica applicata, che potremo considerare ‘asserzioni scientifiche empiriche’, sono al contrario dette *sintetiche* (a posteriori)⁴⁶⁷.

Quando si considera una legge naturale affermandola in formula matematica (ad esempio $F = ma$) è necessario porre attenzione a come questa venga considerata, perché

⁴⁶¹ Feyerabend in *I problemi dell'empirismo* (1965) (Lampugnani Nigri Editore, Milano 1971) citato da [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 103-104; cfr nel merito anche quanto riportato all'inizio della *Premessa* all'approfondimento, da [Feyerabend, 1975]

⁴⁶² «La scienza dipende [...] non da intuizioni individuali ma dall'esistenza di comunità legate tra loro da concetti, ipotesi e metodi comuni.», [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 106; altre scuole di pensiero, qui non approfondite, sono state il realismo e lo strumentalismo

⁴⁶³ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 107 per i tre punti evidenziati

⁴⁶⁴ *Theory-laden*, letteralmente ‘carichi di teoria’

⁴⁶⁵ [Nagel, 1968] edizione italiana pag. 79-85

⁴⁶⁶ [Nagel, 1968] edizione italiana pag. 97

⁴⁶⁷ Le considerazioni di questo paragrafo si riferiscono alle posizioni di John G. Kemeny (1926-1992) [Kemeny, 1959] cap. II *La matematica*, in particolare alle pag. 39-53 dell'edizione italiana

La verità o falsità dell'asserzione non è determinata semplicemente dalla sua forma o dal suo contenuto, ma piuttosto dal ruolo che essa ha nelle teorie in cui compare.⁴⁶⁸

Le asserzioni *analitiche* rimarranno costanti ma le asserzioni *sintetiche* saranno oggetto di validazione ed eventuale revisione.

È ragionevole pensare che queste distinzioni teoriche non siano prioritarie per chi si occupa quotidianamente dello sviluppo delle leggi empiriche o delle teorie; a fronte della complessità nella quale normalmente si opera e della mole di informazioni da gestire, le 'condizioni filosofiche al contorno' hanno poco spazio o vengono forse considerate 'ragioni implicite' per le quali lo sviluppo vada in una certa direzione.

In questo modo però lo sviluppo di una teoria verso un obiettivo preannunciato potrebbe diventare una sorta di 'profezia autoavverante'.

Un deciso commento, a margine della pubblicazione nel 1917 dei *Recuerdos de mi vida* di Ramón y Cajal⁴⁶⁹, è quello di Paolo Mazzarello (1955-) che la descrive come «apoteosi di una concezione dionisiaca dell'impresa scientifica, dove la *competizione* regnava sovrana; un modo di far ricerca che diventerà dominante nel corso del secolo.»⁴⁷⁰

A proposito della matematica e della filosofia della matematica, si riporta un quadro generale di visioni relativamente alle posizioni sul metodo assiomatico:

il discorso matematico non concerne gli oggetti, ma le relazioni tra enti di diverso tipo determinati dagli assiomi: “[La forma dei postulati è quella di] relazioni aventi un significato indipendente dal particolare contenuto dei concetti” (Enriques), “un concetto può essere logicamente definito solo attraverso le sue relazioni con altri concetti” (Hilbert), “le conseguenze [sono] indipendenti dal senso dei concetti geometrici” (Pash), “noi non potremmo mai identificare le idee, ma potremmo solo affermare che tra esse sussistono certe relazioni” (Beppo Levi). Il discorso matematico non si struttura intorno agli oggetti o ai concetti rappresentati dai nomi del linguaggio, ma a un livello superiore, quello delle loro relazioni determinate dagli assiomi.⁴⁷¹

Il premio Nobel Eugene Wigner (1902-1995) ha definito *irragionevole* l'efficacia della matematica nelle scienze naturali, definendola la *legge empirica dell'epistemologia*:

Insieme alle leggi di invarianza essa è un fondamento imprescindibile delle teorie fisiche. Senza leggi di invarianza le teorie fisiche non avrebbero alcun fondamento concreto. Se la *legge empirica dell'epistemologia* non fosse corretta, verrebbe meno il necessario sostegno emotivo senza il quale le 'leggi di natura' non potrebbero essere indagate efficacemente.⁴⁷²

L'irragionevolezza deriverebbe anche dal fatto che i concetti matematici vengono scelti per la loro flessibilità e con *criteri estetici*, non perché siano gli unici applicabili, portando però a misurazioni e a risultati fisici estremamente in accordo con i fenomeni naturali osservati. I criteri estetici hanno influenzato anche la fisica moderna, non solo gli inizi delle

⁴⁶⁸ [Lambert e Brittan, 1979] edizione italiana pag. 143

⁴⁶⁹ Ramón y Cajal (1852-1934) medico e ricercatore spagnolo, condivise il premio Nobel per la medicina con Camillo Golgi (1843-1926)

⁴⁷⁰ [Mazzarello, 2006] pag. 562

⁴⁷¹ [Lolli, 2016] pag. 65; Moritz Pash (1843-1930), Beppo Levi (1875-1961)

⁴⁷² [Wigner, 1960] edizione italiana pag. 32, corsivo aggiunto

teorizzazioni nel periodo ellenico, esaltati da scienziati come Dirac in [Dirac, 2019] ma anche disapprovati da scienziati come Schrödinger che nel merito dei criteri estetici commenta:

I tentativi di generalizzare questa felice concezione [...] sono informati alla speranza d'"indovinare" in larga misura come la natura operi veramente, lasciandoci guidare dal principio di semplicità e dalla bellezza. Effettivamente tracce di quest'atteggiamento pervadono la moderna fisica teorica - *forse un po' troppo*, ma non è qui il luogo di avanzare critiche.⁴⁷³

A conclusione, alcune osservazioni del filosofo Bertrand Russel su conoscenza e filosofia, la prima su una delle *funzioni* della filosofia, la seconda sulla necessità della conoscenza per mezzo della speculazione teorica, riflessioni di un secolo fa ma si ritiene ancora valide:

Come tutti gli altri studi, la filosofia mira in primo luogo alla conoscenza. E la conoscenza a cui essa mira è il genere di conoscenza che dà unità e ordine all'insieme delle scienze; il genere che risulta dall'esame critico dei fondamenti delle nostre convinzioni, pregiudizi e credenze.⁴⁷⁴

Ad onta della nostra incapacità di conoscere verità non interamente composte di termini sperimentati per conoscenza diretta, possiamo conoscere attraverso la descrizione cose di cui non abbiamo mai avuto esperienza. Dato il raggio molto limitato dell'esperienza immediata, questo risultato è di importanza vitale, e, finché non lo si sia ben capito, gran parte della nostra conoscenza rimarrà misteriosa e dubbia.⁴⁷⁵

⁴⁷³ *La natura e i greci* in [Schrödinger, 1958] edizione italiana pag. 188, corsivo aggiunto

⁴⁷⁴ [Russel, 1912] edizione italiana pag. 182-183

⁴⁷⁵ [Russel, 1912] edizione italiana pag. 70

Allegato A2 *La struttura delle rivoluzioni scientifiche di Kuhn in nuce*

Il primo saggio di Thomas Kuhn *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* ([Kuhn, 1962]) ha rappresentato una pietra miliare nella filosofia della scienza, portando una interpretazione dei processi evolutivi scientifici che ha determinato un radicale cambiamento della concezione stessa di *rivoluzione scientifica*.

L'elemento innovativo introdotto da Kuhn è il concetto di *paradigma*, come meglio precisato nel poscritto del 1969 al saggio e nei successivi scritti raccolti in *La tensione essenziale* ([Kuhn, 1997]), che rappresenta l'elemento filosofico centrale della interpretazione delle *rivoluzioni scientifiche*, in contrasto con il comune sentire dell'epoca, che le attribuiva a un cambiamento 'cumulativo'.

Per Kuhn «Una rivoluzione è una specie molto particolare di cambiamento che comporta una sorta di ricostruzione dei dogmi condivisi dal gruppo»⁴⁷⁶, dove per gruppo si intende un gruppo di ricercatori.

Definito il *paradigma* come costituito da quattro principali elementi (di séguito descritti): *generalizzazioni simboliche*, *modelli*, *valori* ed *esemplari*, Kuhn osserva come esso possa essere messo in crisi da *anomalie* che non trovano risposte nel contesto delle attività di *scienza normale* che lo caratterizzano, ovvero

di un'attività che [...] mira a raffinare, estendere e articolare un paradigma che già esiste⁴⁷⁷,

in definitiva una attività che mira alla conservazione del *paradigma* stesso, non alla sua evoluzione.

Il *paradigma* rappresenta una *promessa di successo* (che in parte si realizza nella *scienza normale*⁴⁷⁸) e vive in un contesto in qualche modo sociale e psicologico, come si capisce dagli elementi che lo costituiscono⁴⁷⁹:

- le *generalizzazioni simboliche* sono espressioni formulabili in forma logica che rappresentano la struttura tecnica delle interpretazioni scientifiche, che hanno comunque un margine interpretativo soggettivo in quanto possono essere intese sia come leggi sia come definizioni
- i *modelli* adottati, sia euristici (che non seguono percorsi rigorosi per la soluzione dei problemi) sia ontologici (che definiscono in modo esplicito i concetti, le loro relazioni e la relativa semantica), costituiscono riferimenti preferenziali per il gruppo nelle spiegazioni e interpretazioni dei fenomeni
- i *valori* condivisi, ad esempio l'accuratezza delle previsioni, la coerenza, la plausibilità delle spiegazioni, contribuiscono al senso di comunità del gruppo
- gli *esemplari* (nel senso di 'esempi') rappresentano dei riferimenti interpretativi acquisiti nella propria formazione che possono agire con *relazione di similarità* per orientare il ri-

⁴⁷⁶ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 218

⁴⁷⁷ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 151

⁴⁷⁸ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 44; *scienza normale* nella quale i risultati restano comunque 'aperti'

⁴⁷⁹ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 221-226

cercatore nell'individuazione di soluzioni alle problematiche scientifiche (*intuizioni* come conseguenze di *tacita conoscenza*).

Quando questa *matrice disciplinaria* è fortemente condivisa in un gruppo di ricercatori, le attività di *scienza normale*, come sopra definita, tendono a confermare e consolidare il *paradigma* stesso, senza metterne alla prova i limiti interpretativi o analizzarne le criticità.

Con le parole di Kuhn:

[la *scienza normale*] è uno strenuo e devoto tentativo di forzare la natura entro le caselle concettuali fornite dall'educazione professionale, [...] è affermata sulla base della assunzione che la comunità scientifica sa che cosa è il mondo [e il suo successo] deriva dalla volontà della comunità di difendere quella assunzione, [ad esempio sopprimendo] spesso novità fondamentali, perché esse sovvertono necessariamente i suoi impegni basilari.⁴⁸⁰

Come osserva Vasco Ronchi (1897-1988): «Il sorvolare sui punti scabrosi è uno dei “metodi” della scienza e della filosofia. È la tattica di chi abbraccia un'opinione e ne fa una fede. Chi non vuole fare così è condannato a nuotare nel dubbio e nella insoddisfazione.»⁴⁸¹

Questa tendenza ha un parallelo nella letteratura di supporto alla ricerca, come osservato da Russo: «la feconda idea di Kuhn che i fenomeni incompatibili con i *paradigmi* correnti sono sistematicamente ignorati deve evidentemente essere applicata non solo alla scienza, ma anche alla storiografia scientifica.»⁴⁸²

Nel merito della ricerca, Kuhn osserva:

Nella misura in cui è impegnato nella ricerca normale, il ricercatore ha il compito di risolvere rompicapo, non di mettere alla prova i *paradigmi*⁴⁸³,

ovvero le ‘regole del gioco’. Probabilmente va in questa direzione l'osservazione ‘conservativa’ di Dirac:

Credo che in futuro serviranno molte idee nuove, e queste vadano ricavate una alla volta, per risolvere le singole difficoltà. Bisognerebbe accontentarsi di poter risolvere una piccola difficoltà e ottenere una teoria che rappresenti un miglioramento limitato, anziché coltivare ambizioni eccessive nella speranza di spiegare tutto in un colpo solo.⁴⁸⁴

In questo contesto, le *scoperte* (novità di fatto) o *invenzioni* (novità teoriche) emerse dalle difficoltà interpretative, portano alla

⁴⁸⁰ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 23-24

⁴⁸¹ [Ronchi, 1983] pag. 193

⁴⁸² [Russo, 2021] pag. 418; Russo si riferisce in particolare all'incapacità dei ri-scopritori dell'antica scienza ellenistica (soprattutto in epoca medievale) di interpretarne la teoria sottostante, essendo privi del concetto di ‘teoria scientifica’ e anche per questo trascurando particolari che avrebbero messo in discussione il quadro di riferimento, oppure trattandosi di concetti contrari al *paradigma* corrente, ad esempio l'apparizione di nuove stelle o il moto di comete, incompatibili con il *paradigma* tolemaico; il concetto è estendibile però anche a posizioni contemporanee, che ‘fingono’ di non vedere l'‘elefante nella stanza’ (ad esempio nel caso della dark matter)

⁴⁸³ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 176

⁴⁸⁴ [Dirac, 2019] pag. 54, dal saggio *La mia vita da Fisico* (1983)

presa di coscienza di una anomalia, ossia col riconoscimento che la natura ha in un certo modo violato le aspettative suscitate dal paradigma che regola la *scienza normale*.⁴⁸⁵

In questa consapevolezza può aver luogo la *rivoluzione scientifica*, che porterà a un nuovo *paradigma* interpretativo e a nuova *scienza normale*, se rappresenta una valida capacità di rispondere alla *crisi* del *paradigma* precedente. Quindi non come conseguenza dei risultati delle teorie precedenti ma piuttosto dell'abbandono dei precedenti schemi interpretativi.⁴⁸⁶ Le fasi di una crisi sono individuate nello «sfocamento del paradigma e [il] conseguente allentarsi delle regole che governano la ricerca normale» e nell'«emergere di un nuovo candidato per il paradigma con la conseguente battaglia per la sua accettazione».

Durante il periodo di transizione, vi sarà una sovrapposizione abbastanza ampia, ma mai completa, tra i problemi che possono venire risolti col vecchio paradigma e quelli che possono essere risolti col nuovo. Ma vi sarà una netta differenza nei rispettivi modi di risolverli.⁴⁸⁷

Si osserva inoltre che testare la *scienza normale* risolvendo le anomalie non testa la teoria del *paradigma* ma solo l'anomalia.

E' interessante l'osservazione di Feyerabend che ritiene le *anomalie* vengano individuate

non attraverso l'elaborazione sempre più approfondita di un dato paradigma, ma attraverso l'elaborazione di un paradigma *alternativo* e fornendo, con il suo aiuto, delle previsioni controllabili che, se confermate, mostrano come il primo paradigma sia nei guai.⁴⁸⁸

Sempre in [Feyerabend, 1975], egli spiega:

it is the competition among diverse viewpoints and research programs that drives the progress of science, especially through critical periods when the evidence is not sufficient to decide which approach will ultimately yield the best explanations.⁴⁸⁹

Theories should not be changed unless there are pressing reasons for doing so. The only pressing reason for changing a theory is disagreement with facts. Discussion of incompatible facts will therefore lead to progress. Discussion of incompatible hypotheses will not.⁴⁹⁰

⁴⁸⁵ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 76

⁴⁸⁶ Si può azzardare una analogia parallela con quando accade nel settore delle industrie tecnologiche relativamente alle innovazioni, ottimamente descritto da [Christensen, 1997]; facendone una analogia parallela, si evidenzia come le innovazioni dirompenti (le nuove scoperte o invenzioni) tendano a non essere inizialmente ben accolte dalla maggioranza dei clienti (dalle organizzazioni e dai ricercatori del paradigma corrente), inducendo le imprese che dominano il mercato (i finanziatori della ricerca scientifica e le gerarchie burocratiche) a non investire in esse. Il risultato di tale scelta è che queste aziende (questi gruppi di ricerca che si limitano al paradigma corrente) finiscono con il precludersi la possibilità di crearsi nuovi mercati per i prodotti del futuro (ottenere finanziamenti per sviluppare le nuove teorie scientifiche); trascurando le opportunità offerte dai rapidi e continui cambiamenti che caratterizzano la nostra epoca (i nuovi filoni di ricerca), lasciano aperta così la strada ad aziende (ricercatori) più intraprendenti (meno vincolati)... che però difficilmente otterranno i finanziamenti o le risorse per andare contro il *paradigma* corrente!... una sorta di spirale negativa che rallenta o blocca lo sviluppo, sia industriale sia scientifico; cfr anche le *Conclusioni sociologiche*

⁴⁸⁷ [Kuhn, 1962] edizione italiana pag. 111 per le tre citazioni del paragrafo

⁴⁸⁸ Feyerabend in *Dogma contro critica*, a cura di S. Gattei (Raffaello Cortina, Milano 2000) pag. 251, citato da [Kuhn, 1997] edizione italiana pag. XVI

⁴⁸⁹ Citato da [Smolin, 2019] pag. 173

⁴⁹⁰ [Feyerabend, 1975] versione originale, revised edition, pag. 26

Per questa ragione il filosofo Imre Lakatos (1922-1974)

recommended investing in research programs that are progressive, by which he meant that they are rapidly developing and have the potential to lead to a breakthrough.⁴⁹¹

In tutti i casi, la capacità di gestire gli aspetti burocratici resta uno degli elementi critici, al di là delle scoperte già fatte o dell'importanza della ricerca, come conferma Smoot: «È così che funziona la scienza alla fine del ventesimo secolo: il tempo necessario per trovare finanziamenti e riempire moduli corrisponde, per quantità, a quello trascorso in laboratorio»⁴⁹².

Una considerazione sull'interesse iniziale per una teoria viene dal cosiddetto *principio metodologico del Credito iniziale*:

Una teoria più in linea con il senso comune e il linguaggio ordinario gode di un credito iniziale che la rende preferibile ad altre che se ne discostano maggiormente, almeno fino a quando alla luce dell'analisi filosofica e dell'indagine scientifica la teoria non si riveli inadeguata e una teoria alternativa sia in grado di sostituirla.⁴⁹³

Criticità e critiche

Si riportano alcune critiche portate al saggio di Kuhn che ne hanno evidenziato alcune criticità ma non ne hanno sminuito l'importanza e l'originalità:

- mancanza di spiegazioni sul *perché* avvengano le rivoluzioni, spiegando solo *come* avvengano, col pregio però di radicare saldamente l'interpretazione di queste trasformazioni nella storia del pensiero scientifico
- mancanza di precisione nella definizione originale di *paradigma*, poi integrata con l'adozione della *matrice disciplinaria* nel poscritto del 1969, che in parte orienta la teoria verso una analisi sociale della scienza ma che lo lascia ancora non sufficientemente definito; a tale mancanza si può probabilmente sopperire considerandolo applicato a un contesto scientifico specifico più che a teorie generali, come si è fatto nel presente approfondimento
- ruolo secondario e 'pigro' della *scienza normale*, definita da Popper «vergognosa»⁴⁹⁴
- presunzione che le nuove teorie 'scartino' le precedenti; ad esempio, come evidenzia Rovelli a proposito di Einstein:

La rivoluzione di Einstein [...] non è basata sullo scartare delle teorie e provarne altre. Al contrario è basata sul *prendere sul serio* le teorie esistenti e scartare qualcosa nella concettualizzazione a priori del mondo, qualcosa che era considerato insospettabile fino a quel momento. Non fa un nuovo gioco all'interno delle regole esistenti: cambia pro-

⁴⁹¹ Citato da [Smolin, 2019] pag. 175

⁴⁹² [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 131

⁴⁹³ [Orilia, 2012] pag. 68

⁴⁹⁴ Questo forte punto di vista di Popper si può capire nella sua quasi marxista visione della scienza come "rivoluzione permanente", antagonista quindi della visione di Kuhn proprio nelle fasi di sviluppo 'non rivoluzionario' della *scienza normale*; anche se gli attacchi critici a Kuhn da parte di Popper e dei suoi allievi rappresentarono proprio un caso di *scienza normale*!

prio le regole del gioco. Il *tempo* non è quella cosa che assumevamo come ovvia. Non ha la forma che Kant considerava una condizione a priori necessaria per conoscere. È il senso comune che va modificato [...].⁴⁹⁵

Elementi di attualità

La tendenza contemporanea non è il superamento della *scienza normale* con nuovi modelli o teorie ma piuttosto la loro trasformazione in congetture che richiedano apparati sperimentali per verificarle sempre più costosi in termini di risorse non solo economiche per essere giustificate, ovvero congetture che addirittura nemmeno teoricamente possano avere riscontro sperimentale, allontanando quindi la ‘scienza’ dal riscontro con la realtà e le osservazioni, trasformandola in ‘altro’, fonte di perplessità in ogni ricercatore ‘realista’ e fedele alle basi ‘tradizionali’ della ricerca. Sono però processi ampiamente dispensatori di carriere e stipendi e di un notevole indotto industriale e tecnologico, almeno per questo si confida in un ritorno di utilità sociale se non scientifica.⁴⁹⁶

⁴⁹⁵ [Rovelli, 2014] pag. 119

⁴⁹⁶ Cfr anche le *Conclusioni* sociologiche; per una ampia analisi piuttosto critica della scienza contemporanea si vedano [Hossenfelder, 2018] e [López-Corredoira, 2013]

Allegato A3 Sulla causalità

In considerazione dell'importanza che la *causalità* riveste nelle personali *Conclusioni epistemologiche* e in generale nelle interpretazioni dei fenomeni naturali, condividendo l'opinione di Schrödinger «una legge naturale è dunque per noi nient'altro che una regolarità accertata con sufficiente sicurezza nello svolgimento d'un fenomeno, *in quanto si consideri una regolarità necessaria nel senso del suddetto postulato* [il principio di causalità]»⁴⁹⁷. In questo approfondimento si ricordano alcune note storiche e filosofiche con riguardo agli aspetti legati a fenomeni o *eventi* fisici, escludendo le problematiche tipicamente antropiche, come *le cause prime, le cause ultime o il libero arbitrio*⁴⁹⁸.

Il filosofo di riferimento per il concetto di causalità, non solo per l'importanza storica ma anche per la vicinanza interpretativa con la filosofia moderna, è Aristotele, quantomeno per l'ideale aristotelico di scienza come ricerca delle cause. Egli individuò per le cause quattro diverse tipologie, delle quali solo la *causa efficiente* è pertinente a questo approfondimento. Per completezza di trattazione e considerata l'importanza del filosofo greco, si riportano tutte le cause aristoteliche:⁴⁹⁹

Causa materiale: «ora, in un modo è detto causa ciò da cui, come costituente interno, una cosa viene a essere: per esempio, il bronzo è causa della statua, l'argento del calice.»

Causa formale: «in un altro modo sono detti causa la forma e il modello, cioè la definizione di ciò in cui consiste l'essere, e i generi di questa (per esempio il rapporto due a uno, e in generale il numero, sono causa dell'ottava).»

Causa efficiente: «altrimenti ancora, è detto causa ciò da cui è dato l'inizio del cambiamento o della quiete: per esempio, è causa chi ha deliberato, il padre del figlio, in generale ciò che produce di ciò che è prodotto e ciò che cambia.»

Causa finale: Altrimenti ancora è detto causa il fine, cioè "ciò in vista di cui" per esempio, la salute del passeggiare. Infatti, perché uno passeggia? Rispondiamo: "per essere sano", e così dicendo riteniamo di aver reso la causa.⁵⁰⁰»

Alla causa efficiente si riferiva anche Newton con il suo "hypoteses non fingo" (cfr § 1), anche se poi smentiva costantemente nei suoi scritti questo intento. Lo stesso Kant difendeva «la relazione causale come condizione della possibilità di successioni oggettive di eventi»⁵⁰¹. Così si è sviluppato il concetto modernamente, ovvero che «la relazione tra una

⁴⁹⁷ [Schrödinger, 1958] edizione italiana pag. 12, corsivo originale; fu analoga la posizione di de Broglie: «Senza arrivare ad affermare in modo assoluto che il determinismo è universale, penso che la ricerca della causalità che collega i fenomeni fisici successivi è sempre stata e ancora rimane la guida più sicura nella ricerca scientifica» in *Recherches d'un demi-siècle* (A. Michel, Paris, 1976) pag.49, citato in [Selleri, 2001] pag. 21

⁴⁹⁸ In questo Allegato A3 si fa riferimento in particolare a Federico Laudisa in [Laudisa,1999]

⁴⁹⁹ Aristotele in *Fisica* (II 3, 194b 25-35) citato da [Laudisa, 1999] pag. 28

⁵⁰⁰ «Secodo Aristotele [...] non si poteva sostenere di aver compreso veramente un oggetto, naturale o artificiale, finché non se ne fosse capita anche la "causa finale", ovvero lo scopo per cui esiste.» [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 50; con la sua visione finalistica, Aristotele fu infatti uno dei più autorevoli esponenti della concezione teleologica (cfr anche Allegato A5)

⁵⁰¹ [Laudisa, 1999] pag. 16, che cita lo stesso Kant nella *Critica della ragion pura*: «La regola per determinare

causa e il suo effetto sia una relazione di *necessitazione*, vale a dire che la presenza della causa determini con necessità l'occorrere dell'effetto»⁵⁰². Da questa necessitazione si è sviluppata, forse già con Hume nel diciottesimo secolo, una teoria *regolarista*, in contrapposizione a una teoria *singularista*, che non estende il concetto oltre i singoli eventi determinati che si ritengono casualmente connessi. Questa teoria singularista, sostenuta un secolo fa da Curt John Ducasse (1881-1969) ma con fondamenti già in John Locke (1632-1704), definiva la relazione causale fondata «sul significato intuitivo che il linguaggio comune attribuisce all'idea di causa, [...] formulata nei termini di una *singola* successione di eventi determinati, e [che] il riferimento alla ricorrenza della successione non [sia] parte costitutiva della definizione. [...] Se la relazione causale viene definita in questi termini, allora [...] essa è direttamente osservabile nella stessa misura di tanti altri fatti comuni.»⁵⁰³ Posizioni che non sembrano pertinenti al campo di approfondimento ristretto ai fenomeni naturali.

Con riferimento alle posizioni regolariste, nel merito delle 'successioni regolari' si distinguono due interpretazioni:

«una *epistemica*, che comporta la tesi secondo la quale la regolarità della successione è tutto ciò che possiamo conoscere della causalità, e una *ontologica*, nella quale si sostiene che la regolarità delle successioni è tutto ciò che di causale *esiste negli oggetti e nei fenomeni*.»⁵⁰⁴.

«Nella concezione epistemica la causalità ha a che fare essenzialmente con i nostri modi di organizzare coerentemente i materiali dell'esperienza, mentre nella concezione ontologica la causalità ha piuttosto a che fare con i modi di essere della realtà, naturale ma non solo.»⁵⁰⁵

Anche in questo caso ci si limita al contesto ontologico per la scelta di base fatta per l'approfondimento (cfr l'incipit). A partire dalle condizioni iniziali di un sistema, la sua evoluzione fisica 'autonoma' delinea il principio del *determinismo*, secondo il quale esiste un solo futuro compatibile con il presente.

Le 'incomprensioni' nel merito della causalità, al tempo del congresso Solvay del 1927⁵⁰⁶ sulla meccanica quantistica, sono probabilmente nate proprio dalla mancata distinzione tra *determinismo*, *causalità* e *predicibilità*: «la nozione di *causalità* si esprime [...] in una relazione di dipendenza tra (classi di) eventi [...]; la nozione di *determinismo* è invece relativa a una precisa modalità di evoluzione degli stati di un sistema fisico *in funzione del tempo* e di

qualcosa nella successione temporale, è la seguente: in ciò che precede deve ritrovarsi la condizione sotto cui l'evento segue sempre (ossia necessariamente).» Si osserva che Kant considera la causa una condizione inerente all'esperienza, non alle cose, attraverso leggi che dovrebbero regolare le connessioni tra i vari fenomeni, non leggi empiriche della Natura ma condizioni stesse della conoscenza, trasformando il problema della causalità spostandolo dal campo della *cosa in sé* ai principi dell'*intelletto puro* (osservazione di Giovanni Iorio Giannoli in *La riduzione causale*, Università Tor Vergata, Roma, 2007)

⁵⁰² [Laudisa, 1999] pag. 16, che cita anche [Galilei, 1632] (pag. 828 edizione Rizzoli, rif. 471) «Se è vero che di un effetto una sola [sia] la cagion primaria, e che tra la causa e l'effetto sia una ferma e costante connessione, necessaria cosa è che qualunque volta si vegga alterazione ferma e costante nell'effetto, ferma e costante alterazione sia nella causa.»

⁵⁰³ [Laudisa, 1999] pag. 91, che cita Ducasse in *On the Nature and Observability of the casual relation*, in Sosa e Tooley, *Causation* (Oxford University Press, 1993, pag 125)

⁵⁰⁴ [Laudisa, 1999] pag. 84

⁵⁰⁵ [Laudisa, 1999] pag. 94

⁵⁰⁶ Famoso congresso nel quale è stato dibattuto e definito un primo *modello standard* quantistico (cfr le *Conclusioni sociologiche*)

certe particolari condizioni presenti ad un certo istante 'iniziale'»⁵⁰⁷. Il determinismo non implica il sussistere di una relazione di causalità da un punto di vista logico, la sovrapposizione delle nozioni è forse dovuta a una relazione di necessitazione presente in entrambe che le rende equivalenti⁵⁰⁸, oltre alla mancata distinzione, secondo le personali *Conclusioni epistemologiche*, tra 'visione naturale' (priva del tempo) e 'visione antropica'. La filosofa britannica Elizabeth Anscombe (1919-2001) non negò che la necessità debba essere parte dell'analisi della causalità, tuttavia

la necessità sarà quella delle leggi di natura; attraverso di essa *noi* saremo in grado di derivare una conoscenza dell'effetto dalla conoscenza della causa, o viceversa, ma questo non ci mostra la causa come fonte dell'effetto. La causalità non deve dunque essere identificata con la necessitazione.⁵⁰⁹

L'influenza del determinismo di Pierre-Simon Laplace portò a confondere il determinismo anche con la *predicibilità*, un'altra equivalenza infondata (si pensi ad esempio all'impossibilità di predire con precisione gli stati dei sistemi dinamici non lineari come il caso di tre corpi in interazione gravitazionale).

In termini kantiani, si potrebbe affermare che «la legge di causalità è un dato a priori, una legge trascendentale», come afferma d'Elia in *Ernst Mach*⁵¹⁰, anche se nell'interpretazione personale nelle *Conclusioni epistemologiche* non si tratta di causa come categoria (kantiana) dell'intelletto ma piuttosto come *necessità del regolare svolgimento* della Natura, nel senso dato da Schlick⁵¹¹; la visione di Kant sulla causalità è naturalmente più complessa e prosegue la ricerca iniziata in epoca illuministica da Hume che la analizzava a partire dalle leggi empiriche della Natura ma anche quando Kant riconosce la causalità come 'caratteristica intrinseca', la considera sempre in relazione alla sua conoscibilità (cfr nota su Kant a fine della prima pagina del presente Allegato A3), in questo modo quasi subordinando il comportamento della Natura alle 'potenzialità' o alle 'competenze' antropiche. Un approccio che si ritiene affatto fuorviante, soprattutto nell'ottica del presente Allegato di approfondimento; inoltre prima si dovrebbero riconoscere nella Natura le sue 'regolarità', poi analizzare quali tra queste sia possibile conoscere (antropicamente) in dettaglio e in che termini, con la consapevolezza di dover essere spettatori e non artefici della Natura stessa⁵¹².

Il determinismo viene meno anche nelle considerazioni sul principio di indeterminazione di Heisenberg e in generale sulla fisica statistica a partire dalle leggi dei gas e delle funzioni di distribuzione di Boltzmann (e Maxwell-Boltzmann), se non si accettano i limiti della

⁵⁰⁷ [Laudisa, 2002] pag. 36, corsivo aggiunto; si fa riferimento (anche) a questa fonte in tutto il capoverso

⁵⁰⁸ Tesi sostenuta da Moritz Schlick in *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik*, nell'edizione italiana *La causalità nella fisica contemporanea*, Appendice in *Tra realismo e neo-positivismo* (Il Mulino, 1974)

⁵⁰⁹ Anscombe in *Causality and Determination* (Cambridge University Press, 1971), pag. 92, citata da [Laudisa, 1999] pag. 102

⁵¹⁰ Alfonsina d'Elia (1924-1993) in *Ernst Mach* (La nuova Italia, 1971) pag. 56-57, citata in [Teghil, 2016] pag. 89

⁵¹¹ Moritz Schlick (1882-1936) in *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik*, testo citato tre note sopra

⁵¹² Il vizio antropico di mettersi al centro dell'universo è duro a morire!

conoscibilità e si pretende di estendere la conoscenza 'dettagliata' (e rigidamente deterministica) al comportamento elementare delle costituenti della materia-energia, come osservato in precedenza. Nel merito si ricorda anche il teorema contenuto nel trattato sui *Fondamenti matematici della meccanica quantistica*⁵¹³ di John von Neumann (1903-1957) in base al quale una certa reinterpretazione deterministica della meccanica quantistica (una sorte di 'riduzione deterministica' analoga alla 'riduzione meccanica' della termodinamica, con lo sviluppo della meccanica statistica) è in contraddizione con la formulazione matematica di quest'ultima. Una posizione che ha contribuito alla decadenza del 'concetto di causalità' (si ribadisce 'per gli scopi interpretativi antropici'), anche se nel 1965 John Bell ne evidenziò alcune criticità che ne riducevano l'ambito di applicazione e in sostanza si dimostrò che «le conclusioni antideterministiche basate sul teorema di Von Neumann erano infondate»⁵¹⁴. Il Dirac anziano rivide profondamente le proprie posizioni giovanili, arrivando «a pronosticare che la fisica futura dimostrerà che Einstein ha avuto ragione con la sua difesa intransigente del principio di causalità».

Un tentativo di riconciliazione della causalità con l'interpretazione statistica fu fatto da Wesley Salmon (1925-2001), considerando la struttura causale come basata su interazioni descritte da condizioni probabilistiche (riassunte nella definizione di "biforcazione interattiva" che separa le condizioni "congiuntive" da quelle "di sfondo") che danno luogo a *processi*, quindi non più eventi separati ma uniti da una 'world line' spaziotemporale⁵¹⁵.

A proposito di spaziotempo, è interessante una 'vecchia' dimostrazione di Christopher Zeeman (1925-2016), [Zeeman, 1964], sul fatto che la causalità implichi necessariamente il gruppo delle trasformazioni di Lorentz, ovvero la simmetria fondamentale per lo spazio e il tempo in tutte le trasformazioni della Natura, nelle quali le trasformazioni siano invarianti in un contesto di spazio minkowskiano, nel quale sia applicabile la *relatività ristretta*.

La nozione di causalità è stata analizzata storicamente anche da Kuhn in un articolo del 1966, distinguendo «tra un concetto 'ristretto' di causa, che veniva identificato con il concetto aristotelico di causa efficiente, e un concetto 'ampio' di causa, che veniva identificato con il più generale concetto di *spiegazione*. [...] Con l'evoluzione della fisica moderna il concetto di causa - nel suo senso ristretto - subì un processo graduale di dissolvenza nel concetto di *spiegazione*»⁵¹⁶.

Il moderno approccio ontologico (una delle interpretazioni del regolarismo) è condizionato dalla visione antropica, legata ad esempio all'importanza (vincolante) dell'*ente tempo* proiettato sulle sequenze causali in una realtà naturale che quasi mai ne distingue la direzione di svolgimento (creando quindi potenziale imbarazzo interpretativo), ma sottratto il tempo dalla *realtà* attribuita alla Natura (cfr le *Conclusioni epistemologiche*), si toglie anche l'ambiguità e la necessità di eliminare le teorie causali, conservando ovviamente la necessità

⁵¹³ Titolo originale *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer, Berlin, 1932)

⁵¹⁴ Cfr [Selleri, 2001] pag. 7 e capitolo 1 passim, a pag. 23 la citazione seguente

⁵¹⁵ Salmon in *Probabilistic Causality* (Pacific Philosophical Quarterly, 61, pag. 50-74) citato da [Laudisa, 1999] pag. 106-107

⁵¹⁶ [Laudisa, 2002] pag. 25-26, corsivo aggiunto; osservazioni approfondite anche nell'edizione originale di Kuhn de *La tensione essenziale* [Kuhn, 1997]; cfr anche nell'Allegato A1 la sezione *Sulla spiegazione*

di costruire l'*ente tempo* in modo da preservare la coerenza delle leggi interpretative antropiche, come magistralmente fa, ad esempio, la relatività einsteniana.

In altre parole, l'approccio ontologico è ovviamente viziato dalla visione antropica (l'effetto di *selezione* implicito nella nostra esistenza, cfr anche Allegato A5 *Sui pregiudizi antropici*) ma il problema dovrebbe restare di competenza della costruzione antropica dell'*ente tempo* e non della struttura della Natura stessa, per la quale, si ritiene, valga sempre il principio di causalità, come precisato nelle *Conclusioni epistemologiche*.

Allegato A4 Nuovo *étere* e congettura URD (densità di energia, Redshift, Distanza)

A4.1 Altre congetture sul redshift senza espansione

I dubbi interpretativi sul redshift come conseguenza dell'espansione dell'universo e della recessione delle sorgenti cosmologiche sono stati introdotti nel § 6 e nel § 7.

Storicamente ci sono stati studi che hanno ipotizzato le interazioni *tra fotoni* per tentare di dare spiegazioni al redshift alternative all'effetto Doppler, nonostante gli autorevoli pareri contrari di Landau⁵¹⁷ o Dirac⁵¹⁸; si approfondisce qualche caso di confronto per esplorare le criticità delle ricerche effettuate ed evitarle nella personale ricerca di una congettura alternativa.

Negli anni '50 fu ipotizzata da Erwin Finlay-Freundlich (1885-1964) una interazione tra i fotoni delle sorgenti remote e i fotoni interposti al loro percorso fino all'osservatore, che determinasse un effetto di redshift; non era associata a dettagliate interpretazioni fisiche ma semplicemente immaginava una relazione associata al redshift gravitazionale relativo a singole stelle (di classe *B*, *O*, supergiganti *M* e *Wolf Rayet*) che potesse essere utilizzata anche per il redshift cosmologico. La formula era⁵¹⁹ $\Delta\nu/\nu = -AT^4l$, con la costante di accoppiamento $A \sim 2 \cdot 10^{-29} \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-4}$ ricavata dall'analisi delle singole stelle citate e con l lunghezza del percorso attraverso il campo di radiazione. Benché la relazione si riferisse in origine a campi intensi di radiazione, fu applicata al redshift cosmologico, ottenendo una stima per la temperatura del campo di radiazione di circa 1.5 K , compatibile con quella osservata per la radiazione cosmica a microonde⁵²⁰. Non si ritiene però così scontata la legittimità dell'associazione del parametro A sia al caso stellare sia al caso cosmologico, peraltro senza una teorizzazione fisica interpretativa⁵²¹. Si evidenzia inoltre come manchi

⁵¹⁷ «La linearità delle equazioni dell'elettrodinamica riflette il fatto che i fotoni non interagiscono tra loro (principio di sovrapposizione per il campo elettromagnetico).»; [Landau e Lifšits, 1972] edizione italiana pag. 209-216; nella sezione citata si chiama l'emissione di radiazione *irraggiamento nero* e si evidenzia come «la presenza di una pur piccola quantità di materia è in generale indispensabile perché l'equilibrio termico possa stabilirsi nell'irraggiamento, in quanto si può considerare completamente assente l'interazione tra i fotoni»; nell'*étere* è presente questa quantità di materia (raggi cosmici, atomi, molecole, neutrini) ma in merito all'interazione tra fotoni si osserva che le condizioni nelle quali la densità di energia U^* potrebbe interagire con i fotoni incidenti si ritengono fondate, come ipotizzato in A4.4 e qualitativamente verificato in A4.5

⁵¹⁸ [Dirac, 1958] § 3 *Interference of photons*, pag. 9: «Each photon then interferes only with itself. Interference between two different photons never occurs.»

⁵¹⁹ [Finlay-Freundlich, 1954] pag. 192

⁵²⁰ Microwave Cosmic Radiation, MCR, detta comunemente CMB associandola alla teoria del *Big Bang*; si tratta di una osservazione a posteriori, non essendo ancora stata scoperta questa radiazione all'epoca della pubblicazione del paper

⁵²¹ In [Cohen e Wertheim, 1973], Ralph Louis Cohen (1952-) e Gunther Klaus Wertheim (1927-2014) osservano che esperimenti di laboratorio in cavità a microonde avevano ottenuto, negli anni successivi, un valore di circa quattro ordini di grandezza più piccolo di quello inizialmente stimato per il coefficiente di accoppiamento tra il fotone incidente e il campo di radiazione, quindi non più compatibile con l'ipotesi di utilizzo

un'ipotesi esplicita sulla presenza di questa radiazione che interagisca coi fotoni incidenti, necessariamente omogenea e isotropa, oltre che permeante tutto il cosmo; a parziale scusante il fatto che la MCR sia stata scoperta una decina di anni dopo. Una revisione critica di questo studio fu pubblicata da Mael Avrami Melvin (1913-2014) in [Melvin, 1955], che evidenziava delle imprecisioni nella valutazione dei percorsi attraverso le atmosfere solari e stellari e ricavava il valore più corretto per il parametro $A' \sim 2 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^{-1} \text{ K}^{-4}$, tre ordini di grandezza più piccolo, affermando: «there is no longer any possibility of correlating the solar shift values with those found in *O* and *B* stars - that is this if one adheres to the temperature fourth power (radiation density) dependence, or any reasonable modification thereof.»⁵²² Il successivo studio [Pecker, Roberts, Vigier, 1972]⁵²³ ha modificato la relazione originale come $Z = A(T) T^3 \delta l$, risolvendo i problemi del dimensionamento del parametro A ma ricorrendo a una interazione di urto anelastico «in which the energy lost goes into a soft photon pair», oltre a richiedere una massa a riposo per i fotoni, $< 10^{-48} g$.

Anche se i valori calcolati per la radiazione di fondo $1.2 K < T < 2.7 K$ in questo caso sono compatibili con quella misurata $T = 2.73 K$, gli autori osservano «that even if an inelastic process were established for the effects discussed above [la consistenza dei risultati con varie osservazioni cosmologiche,] would need to be applied with caution to a temperature in so different a range, that is to the scattering of photons so much less energetic.»⁵²⁴

Altri modelli sono stati sviluppati immaginando «interactions between nonzero-mass photons and light scalar bosons»⁵²⁵ o l'introduzione di una «very light neutral particle ϕ »⁵²⁶ che alla fine determinano un effetto *tired light* ma non sembrano rilevanti in quanto non connessi alla presenza della MCR, che resterebbe priva di conseguenze che si ritengono fondamentali, oltre a presentare potenziali criticità su tutte le teorie elettromagnetiche consolidate, avendo aggiunto una massa, per quanto esigua, ai fotoni stessi.

Con riferimento all'approfondimento personale, sono state analizzate due congetture originali, di seguito riassunte.

Una prima congettura considera la sola interazione dei fotoni remoti con i fotoni della MCR (cfr sezione A4.4), quindi per avere una sezione d'urto disponibile si è cercato di ottenere una dimensione fisica dei fotoni. Nel caso di fotoni più energetici (ad esempio quelli emessi per la prima transizione della serie di Balmer⁵²⁷, la riga $H\alpha$ a circa $6563 \text{ \AA}$ di circa 0.19 eV) che interagiscano con quelli della MCR (emessi circa a 1.9 mm di circa $6.5 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$), con la

cosmologico.

⁵²² [Melvin, 1955] pag. 887

⁵²³ Jean-Claude Pecker (1923-2020), Andrew Roberts (1965-), Jean-Pierre Vigier (1920-2004); lo studio intende spiegare, tra le altre analisi, «the unresolved discrepancy in the solar redshift at the limb, [...] the energy-loss parameter derived from the solar data [who] can explain the galactic redshift anomalies in terms of variation in source temperature [...]»

⁵²⁴ [Pecker, Roberts, Vigier, 1972] pag. 228

⁵²⁵ Ad es [Jaakkola et al., 1975], [Pecker e Vigier, 1988], criticati in particolare da Hans-Hürgen Treder

⁵²⁶ [Marič et al., 1977], uno studio che basa le anisotropie del redshift sulle sorgenti remote

⁵²⁷ Conseguente al frequente salto di livello di un elettrone dal secondo al primo livello eccitato in un atomo di idrogeno

possibile cessione di energia a favore dei secondi, non ci sono problemi. Invece nel caso dei fotoni meno energetici (ad esempio quelli emessi dalla transizione dell'idrogeno neutro nella riga a 21 cm^{528} di circa $5.9 \cdot 10^{-6}\text{ eV}$) che interagiscano con quelli della MCR (in questo caso più energetici) si potrebbe ravvedere un problema nello scambio di energia, salvo la validità della *congettura sulle interazioni fotone-fotone* nella sezione A4.4, che evita il problema.

Una seconda congettura prevede l'applicazione delle leggi della rifrazione per un mezzo assorbente (quindi con indice complesso), senza cambio di mezzo, dove la parte reale del coefficiente determina la velocità del segnale attraverso il mezzo e la parte complessa l'assorbimento: il primo giustificerebbe il ritardo del segnale quindi il redshift, il secondo l'estinzione del segnale a grandi distanze; si osserva che la legge di rifrazione vale per tutte le lunghezze d'onda, non solo quelle ottiche. Purtroppo però secondo le teorie correnti la congettura non è accettabile, come approfondito nella sezione A4.4.

A4.2 Nuovo etere e radiazione MCR

Ferma restando la necessità ancora oggi di definire fisicamente in dettaglio il *fluido cosmico*, per il quale anche la Cosmologia non scende nei particolari, storicamente la necessità di riempire i puri strati superiori dell'aria che riempivano lo spazio, che non poteva essere vuoto (inizialmente con la *quintessenza*, incorruttibile ed eterna rispetto agli altri quattro elementi che invece potevano trasformarsi uno nell'altro) è trattata già da Platone (circa 428-348) e Aristotele. Detto anche

«*pneuma* (πνεῦμα), secondi gli Stoici si trattava di una sostanza permeante l'universo, la cui principale funzione consisteva nell'assicurare la coesione del cosmo e la trasmissione delle azioni a distanza tra le sue diverse parti: in particolare esso permetteva la trasmissione della luce. Il *pneuma*, che spesso era scarsamente distinguibile dall'*etere* (αἰθήρ), svolgeva il suo ruolo grazie alla propagazione di un suo particolare moto locale, che vari autori chiamano *moto tensionale* [...] e a volte è descritto come un moto simultaneo in versi opposti [...]. L'idea fu trasmessa agli scienziati moderni da autori come Descartes (che usò il termine *etere*, che finì col prevalere) e Newton (che preferì *spiritus*, calco latino di πνεῦμα)⁵²⁹.

Nel medioevo la quintessenza divenne quinto elemento e *quinta essentia*, acquisendo connotazioni teologiche; diventò poi parte della filosofia meccanicistica a partire da Cartesio e nel XVIII secolo fu descritto da Newton come mezzo per la trasmissione della gravità e per descrivere le proprietà della luce⁵³⁰. Nel XIX secolo varie 'interpretazioni' di etere divennero

⁵²⁸ Conseguente alla transizione di cambio di spin parallelo - antiparallelo di un elettrone rispetto al protone in un atomo di idrogeno non eccitato, emissione molto debole e infrequente (è stimata verificarsi ogni 10^7 anni) ma che genera un notevole segnale, dato l'enorme numero di atomi di idrogeno neutro nel mezzo interstellare

⁵²⁹ [Russo, 2020] pag. 25-26; naturalmente Russo cita anche le fonti dalle quali ha reperito le informazioni riportate

⁵³⁰ Come osserva Max Jammer (1915-2010) nell'introduzione di [Kostro, 2000], le diverse concezioni di etere

funzionali alle spiegazioni delle teorie elettromagnetiche e ottiche (ondulatorie) ed emersero teorie che lo associarono allo spazio stesso. Einstein considerava solo l'idea di etere formulata da Hendrik Lorentz che superava secondo lui tutte le altre interpretazioni, rappresentando però un sistema in riposo assoluto, quindi era di fatto incompatibile con la *relatività ristretta*, pertanto Einstein lo esclude dalla sua teoria, togliendolo di scena dal panorama interpretativo della fisica. Fu poi sperimentalmente dimostrato (in particolare da Michelson e Morley⁵³¹) come non individuabile.

Lo stesso Einstein però, pochi mesi dopo la pubblicazione della *relatività generale*, introdusse nel 1916 un etere diverso, una sorta di «costituente geometrodinamico dello spaziotempo che determina il comportamento inerziale e gravitazionale della materia»⁵³², anzi ne introdusse tre diversi ma analoghi, uno per la *relatività ristretta*, uno per la *relatività generale* e uno per la teoria sull'unificazione delle forze gravitazionali ed elettromagnetiche sulla quale lavorò negli ultimi anni della sua vita (e che non portò a compimento).

«La distinzione fra i tre tipi di 'etere' trova la sua espressione matematica nelle diverse proprietà dei corrispondenti potenziali gravitazionali $g_{\mu\nu}$ del tensore metrico fondamentale: l'etere della teoria della *relatività ristretta* è caratterizzato dalla condizione che $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$ dove l'ultimo termine è il tensore metrico di Minkowski⁵³³, l'etere della teoria Generale da $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$ della metrica di Riemann⁵³⁴, e l'etere della teoria unificata da $g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu}$.»⁵³⁵ In epoche recenti ci sono stati diversi sviluppi di un etere associato alla metrica spaziotemporale, noti con il nome di "Einstein-aether theory"⁵³⁶, nell'ambito degli studi sulla violazione dell'invarianza di Lorentz per effetti di gravità quantistica; nel presente approfondimento non si considerano queste teorie.

A proposito del 'ripensamento' di Einstein in merito alle proprie prime posizioni sull'etere del XIX secolo si possono citare due significativi pensieri:

(soprattutto nel XIX secolo, quando ne coesistevano almeno 14 diversi concetti) convivevano e non erano l'evoluzione delle precedenti

⁵³¹ Einstein dichiarò in *The meaning of Relativity* (Princeton University Press, N.Y. 1955, V edition) che quello di Michelson e Morley era stato «il più importante di tutti gli esperimenti nulli sulla deriva dell'etere»; Albert Abraham Michelson (1852-1931), Edward Williams Morley (1838-1923)

⁵³² [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 7-8

⁵³³ «Dato che nei sistemi di riferimento in cui $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$ il comportamento dei corpuscoli è quello dettato dal primo principio della dinamica newtoniana, cioè sono a riposo o si muovono su linee rette con velocità costante, Einstein chiamò l'etere della *relatività ristretta* "etere inerziale" e fece notare che aveva questa proprietà in comune con "l'etere della meccanica di Newton". Per via della sua piattezza l'etere inerziale è estendibile all'infinito. È anche rigido e assoluto, cioè la presenza della materia e dei suoi movimenti non esercita alcuna influenza sulla sua struttura.»; [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 225; si veda anche l'Allegato A1 *Epistemologia della ricerca scientifica*

⁵³⁴ «Einstein lo identificò con il continuo spaziotemporale della stessa teoria e affermò che lo strumento più importante per descriverlo era il tensore metrico simmetrico g avente le componenti $g_{\mu\nu}$ funzioni continue di un sistema di coordinate arbitrariamente introdotte. Nel modello della Relatività Generale esso ha una metrica pseudo-riemanniana e può pertanto essere finito, per quanto riguarda la sua estensibilità, sebbene rimanga illimitato [...]. L'etere della Relatività Generale non è né rigido né assoluto. La presenza della materia con i suoi movimenti esercita sulla sua struttura una influenza che è variabile nel tempo. Quindi si può dire che l'intera struttura sia in qualche modo flessibile. Einstein chiamò questo tipo di etere "etere gravitazionale" (Gravitationsäther); [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 226

⁵³⁵ [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 8

⁵³⁶ Ad esempio [Jacobson e Mattingly, 2004]

Deshalb war ich in 1905 der Ansicht, dass man von dem Äther in der Physik überhaupt nicht mehr sprechen dürfe. Dieses Urteil war aber zu radical, wie wir bei den folgenden Überlegungen über die allgemeine Relativitätstheorie sehen werden. Es bleibt vielmehr nach wie vor erlaubt, ein raumerfüllendes Medium anzunehmen als dessen Zustände man die elektromagnetischen Felder (und wohl dann auch die Materie) ansehen kann.⁵³⁷

Es wäre richtiger gewesen, wenn ich in meinen früheren Publikationen mich darauf beschränkt hätte, die Nicht-Existenz des Äthers überhaupt zu vertreten. Denn ich sehe ein, dass der Raum als Träger physikalischer Qualitäten aufgefasst werden muss.⁵³⁸

Nel presente approfondimento si considera un etere come quello associato da Einstein alla *relatività ristretta*; in ogni caso 'etere' è un nome 'compromesso', se non ambiguo, quindi in questo approfondimento viene chiamato *nuovo etere*, o meglio *etere*, l'ente che costituisce il substrato cosmico (ovvero la forma dominante di sostanza), il *campo*, al quale si riconosce la proprietà di possedere una *densità di energia* (in un universo mediamente piatto, non in espansione e infinito). Questa *densità di energia*, indicata U^* , è costituita da particelle, campi ed energia emessi dalle sorgenti e dall'universo stesso inteso come *corpo nero* (cfr la seguente sezione *Sulla natura della radiazione MCR*), che interagisce con i fotoni delle sorgenti remote determinando un effetto di assorbimento e di redshift; i parametri associati a queste interazioni possono essere utilizzati per stimare la distanza delle sorgenti remote.

A proposito di *etere* come *campo*, si riporta la posizione di Einstein nelle parole di Jammer e dello stesso Einstein:

La vittoria sul concetto di spazio assoluto o su quello di sistema inerziale divenne possibile solo in quanto il concetto di oggetto materiale fu gradualmente sostituito, nel suo ruolo di concetto fondamentale della fisica, da quello di campo. Sotto l'influenza delle idee di Faraday e Maxwell si sviluppò la nozione che l'intera realtà fisica avrebbe potuto forse essere rappresentata come un campo le cui componenti dipendono dai quattro parametri spazio-temporali. Se le leggi di questo campo sono generalmente covarianti, non dipendono cioè da una particolare scelta di un sistema di coordinate, allora l'introduzione di uno spazio indipendente (assoluto) non è più necessaria. Ciò che, pertanto, costituisce il carattere spaziale della realtà, è semplicemente la natura quadridimensionale del campo. Non esiste allora alcuno spazio «vuoto» cioè non esiste alcuno spazio senza campo.⁵³⁹

Possiamo ancora continuare a servirci della parola etere, ma soltanto allo scopo di designare le proprietà fisiche dello spazio. Nel processo di sviluppo della scienza la parola etere ha più volte

⁵³⁷ Albert Einstein, *Gründgedanken und Methoden der relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt* (Manoscritto Morgan), citato e tradotto in [Kostro, 2000], edizione italiana pag. 12, 253: «[...] nel 1905 ero del parere che in generale non si potesse più parlare di etere in fisica. Questa opinione era però troppo radicale, come vedremo con le seguenti considerazioni sulla teoria di relatività generale. Resta permesso proprio come prima di accettare un mezzo che riempia lo spazio, nei cui stati si possano riconoscere i campi elettromagnetici (e quindi anche la stessa materia).»

⁵³⁸ Albert Einstein, *Lettera a H. Lorentz* (15/11/1919), citata e tradotta in [Kostro, 2000], edizione italiana pag. 12, 253: «Sarebbe stato più corretto se nelle mie prime pubblicazioni mi fossi limitato a sottolineare l'irrealtà della velocità dell'etere, invece di sostenere la sua totale non esistenza. Ora comprendo che con la parola etere non si intende niente altro che la necessità di rappresentare lo spazio come portatore di proprietà fisiche.»

⁵³⁹ [Jammer, 1954] edizione italiana pag. 11-12

cambiato significato. Attualmente non sta più a denotare un mezzo che sia in qualche modo costituito da particelle materiali. La sua storia non è però in alcun modo terminata e continua nella teoria della relatività.⁵⁴⁰

[...] non potremo fare a meno dell'etere, cioè di un continuo fornito di proprietà fisiche, perché la teoria della relatività generale, i cui punti di vista generali i fisici di certo terranno sempre ben fermi, esclude un'azione a distanza diretta. Ma ogni teoria di azione per contatto presuppone dei campi continui, dunque anche l'esistenza di un «etere».⁵⁴¹

In *Campo e materia*, nel libro *L'evoluzione della Fisica*, Einstein e Leopold Infeld (1898-1968) sottolinearono che non poteva esistere alcuna differenza qualitativa fra campo e materia⁵⁴²:

La teoria della Relatività insegna che la materia rappresenta un enorme serbatoio di energia, e che energia significa materia. In questa situazione non possiamo separare qualitativamente materia e campo, perché la distinzione fra massa ed energia non è affatto qualitativa. [...] Non ha alcun senso considerare materia e campo come due qualità interamente diverse. Non possiamo immaginare alcun settore in cui campo e materia siano nettamente separati. [...] Dopo il riconoscimento dell'equivalenza fra massa ed energia la classificazione in materia e campo è qualcosa di artificiale e di non chiaramente definito. [...] *La materia c'è là dove esiste una grande concentrazione di energia, il campo esiste dove la concentrazione di energia è piccola*. Ma se le cose stanno così la distinzione fra materia e campo è quantitativa piuttosto che qualitativa.

Riportando le conclusioni di Ludwik Kostro:

Il "vuoto" non è più un vero vuoto ed è per questo che Einstein era del parere che dovesse essere chiamato "pieno" dato che costituisce un mezzo materiale, sui generis ma fondamentale, che possiede una struttura reale assieme ad altre proprietà fisiche. Dal momento che il vuoto ha proprietà fisiche effettive e, come campo fondamentale, contiene una certa distribuzione di energia, abbiamo buone ragioni per chiamarlo "nuovo etere".⁵⁴³

Sulla natura della radiazione MCR

L'ipotesi che la radiazione MCR osservata sia la radiazione di *corpo nero* emessa dall'universo stesso, ovvero dai suoi costituenti, entro il raggio di Hubble⁵⁴⁴, è supportata dalle congetture di un recente studio che analizza i contributi locali (a livello galattico) alla

⁵⁴⁰ Albert Einstein, *L'evoluzione della fisica*, citato e tradotto in [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 252

⁵⁴¹ Albert Einstein, *Über den Äther* (raccolta scritti scientifici di Albert Einstein, riferimento Schilpp 186, 1924), citato in [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 252

⁵⁴² Citazione e traduzione del libro di Einstein e Infeld in [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 195, corsivo aggiunto

⁵⁴³ [Kostro, 2000] edizione italiana pag. 250

⁵⁴⁴ La nostra è in realtà una posizione 'qualsiasi' nell'universo, significativa solo per il fatto che noi siamo qui ora a osservare; in effetti il raggio di Hubble si considera solo perché è il limite fisico dell'universo osservabile *da noi* ma questo volume di universo include anche tutta la radiazione che l'universo oltre il raggio di Hubble può aver propagato all'interno di questa 'sfera antropica', sempre nei tempi compatibili con la 'cosmicamente lenta' velocità della luce. Noi effettivamente vediamo solo i fotoni che giungono a noi ma l'energia nella porzione considerata comprende anche quelli che 'vedremo' (ad esempio) tra alcuni Gyr

radiazione stessa⁵⁴⁵, ipotizzando che la sua natura non sia quella di radiazione fossile del *modello standard* cosmologico, criticato anche perché «As is now realized, the standard model with its given dynamical parameters is not able to predict the present temperature of this background. The observed value of 2.726 K is taken as an additional parameter of the theory [...], a free parameter arbitrarily set at its present value.»⁵⁴⁶ Il modello sostenuto dalle congetture è quello della radiazione re-irradiata dalla polvere, quindi *non-scattered*; con riferimento a uno studio che stima il flusso di radiazione stellare della nostra galassia ricevuto dalla Terra basato su dati Hipparcos⁵⁴⁷, quindi su osservazioni dirette di circa $2.5 \cdot 10^9$ stelle, la termalizzazione resa isotropa dalle re-emissioni risulta dell'ordine di quella effettivamente misurata come MCR, col valore medio $\langle T_0 \rangle \approx 2,81 \text{ K}$. Il modello adottato QSSC (Quasi Steady State Cosmology) considera questa termalizzazione della radiazione stellare come diffusa in tutto l'universo, che quindi presenta la temperatura di 2.7 K ovunque⁵⁴⁸. Una debolezza del modello *standard* della MCR è che per spiegare le differenze con l'interpretazione legata alla radiazione stellare deve fare «assumptions about non-baryonic dark matter and dark energy, for which no independent direct evidence exists so far.» Una ulteriore criticità è dettagliata nel capoverso seguente:

[...] we wish to draw attention to the features in the COBE and WMAP data which seem to have generally been ignored. In the domain relative to the Galactic plane, there exist [figura di riferimento omessa] two well-known conspicuous reddish-yellow regions and one conspicuous blue region, both of which are essentially not included in the power spectral analysis as published, but which are both located in the Galactic plane. The images of the whole sky are corrected for the Galactic non-blackbody (stellar) radiation. However, if there is a Galactic blackbody component, the correction procedure will not get rid of it. Therefore, what we observe may well have a blackbody component with a Galactic origin. In which case, one may wonder if the observed small scale fluctuations are indicative of turbulent patterns in our Galaxy rather than being the signature of galaxy formation in some early epoch.

Anche senza il supporto scientifico di questi studi, il fatto di non presupporre il *Big Bang* rende la presenza della radiazione MCR *autoevidenza* del fatto che l'universo sia considerabile come un *corpo nero*.

Considerazioni sulle anisotropie della MCR

Lo studio delle anisotropie di intensità presenti nella radiazione MCR osservata, secondo il *modello cosmologico standard*, ha individuato delle irregolarità interpretate come conseguenza di inhomogeneità al momento del *last scattering* all'epoca del rilascio primordiale dei fotoni quando la temperatura ha consentito il disaccoppiamento tra materia ed energia, facendo diventare l'universo trasparente per i fotoni. Altri studi⁵⁴⁹ hanno rilevato una

⁵⁴⁵ [Pecker et al., 2015]

⁵⁴⁶ [Pecker et al., 2015] pag. 462

⁵⁴⁷ [Pecker e Narlikar, 2006]

⁵⁴⁸ [Pecker et al., 2015] pag. 467, anche per le due seguenti citazioni

⁵⁴⁹ Ad esempio [Rubin, Ford e Rubin, 1973], [Jaakkola e Pecker, 1976]

anisotropia nella distribuzione angolare del redshift delle sorgenti in alcune regioni della sfera celeste, attribuibile a un aumento della luminosità, o a un eccesso di redshift, quando le sorgenti sono osservate con interposti cluster di galassie, quindi associando le anisotropie a cause affatto diverse. Naturalmente ci sono stati anche studi che hanno smentito queste tesi attribuendo l'effetto a una distribuzione non omogenea delle galassie nella regione considerata e non ad anisotropie intrinseche del redshift⁵⁵⁰, oppure a effetti di *gravitational lensing* di cluster di galassie⁵⁵¹. Si può concludere che esistevano interpretazioni anche diverse da quelle del *modello cosmologico standard*, quando questo non era ancora 'predominante'.

Nel contesto della personale interpretazione, la prima considerazione sulle anisotropie della MCR è associata all'omogeneità dell'emissione (continua) di radiazione di *corpo nero*, che potrebbe presentare delle variazioni correlate alla distribuzione di massa-energia sorgente, omogenea a grande scala ma non a scale minori, quelle in definitiva responsabili 'localmente' dell'emissione della radiazione stessa.

Una seconda causa di anisotropia della radiazione osservata potrebbe essere conseguenza dell'assorbimento parziale dei fotoni incidenti da parte di $U^\star$, anche questo in funzione della distribuzione delle sorgenti, in questo caso remote.

Si osserva che le sorgenti che possono influenzare $U^\star$ in una specifica regione sono quelle comprese in un volume delimitato dal raggio di Hubble centrato nella regione considerata (non quello relativo all'osservatore), quindi coinvolgente anche sorgenti che potrebbero non essere visibili all'osservatore, e comunque non necessariamente coinvolte dalla LOS, considerazione che attenua l'influenza dei contributi se considerati solo nelle componenti 'sovrapponibili' alle anisotropie, ovvero lungo la LOS stessa.

La correlazione da individuare in entrambi i casi, ad esempio confrontandone la distribuzione angolare rispetto alla LOS, è tra la distribuzione delle sorgenti e quella delle anisotropie (forse l'unico confronto possibile, nonostante la considerazione del precedente capoverso). Il confronto dovrebbe essere fatto in un volume tridimensionale ma poiché le anisotropie sono misurate come proiettate sul piano del cielo (cioè non se ne valuta la distanza), altrettanto dovrebbe essere fatto per la distribuzione delle sorgenti. I software attualmente utilizzati per rimuovere dalle misurazioni i contributi di polveri e altri componenti in foreground dovrebbero essere in grado di gestire questo confronto. Una mancata correlazione individuerebbe una criticità mancando una giustificazione alle anisotropie stesse, quantomeno nei termini delle ipotesi anzidette.

⁵⁵⁰ Ad esempio [Hartwick, 1974], [Fall e Jones, 1976]

⁵⁵¹ [Karoji e Nottale, 1976]

A4.3 Funzione di distribuzione dei fotoni⁵⁵²

Nonostante la presenza ipotizzabile anche di altre forme di energia non direttamente massiva come neutrini, onde gravitazionali e campi magnetici, oltre ai fotoni, si ipotizza che uno dei componenti principali della *densità di energia* $U^\star$ possa essere rappresentata da un rarefatto *gas di fotoni* nel quale i fotoni si comportino analogamente a un gas perfetto (con atomi non interagenti), per il quale sia applicabile la statistica di Bose⁵⁵³-Einstein con potenziale chimico nullo.

La funzione di distribuzione delle particelle, ovvero il modo in cui i fotoni sono distribuiti in direzione e in energia, si ricava partendo dal *numero di occupazione* $f(\vec{x}, \vec{p}, t)$, che fissa il numero medio di particelle che in un certo istante sono contenute in una cella di volume h^3 dello spazio delle fasi $\mathcal{F}[\vec{x}, \vec{p}]$ ⁵⁵⁴.

La densità degli stati dei fotoni viene scritta nella forma

$$\frac{d^2 N}{(d^3 x)(d^3 p)} = \frac{2}{h^3} f(\vec{x}, \vec{p}, t), \quad [\text{A4.3}_1]$$

dove il fattore 2 tiene conto dei 2 possibili stati di polarizzazione.

La densità differenziale dei fotoni che si propagano all'interno dell'angolo solido $d\Omega$ centrato nella direzione di propagazione $\vec{k}$ della particella, che hanno momento $p^i = [p/c, \vec{p}] = h\nu/c [1, \vec{k}]$ ed energia nell'intervallo $h d\nu$, è quindi data da

$$d^2 n_\nu = \frac{2}{h^3} f(\vec{p}) p^2 dp d\Omega = \frac{2}{c^3} f(\vec{k}, \nu) \nu^2 d\nu d\Omega, \quad [\text{A4.3}_2]$$

omettendo la dipendenza dalle coordinate x^i .

Diversamente dai fermioni, sottoposti al principio di esclusione di Pauli, il numero di occupazione dei bosoni non è limitato superiormente poiché più particelle possono occupare il medesimo stato.

Integrando la [A4.3_2] nelle direzioni spaziali e in energia si ottiene la densità totale

$$n = \frac{2}{c^3} \int \nu^2 d\nu \int f(\vec{k}, \nu) d\Omega \quad [\text{A4.3}_3a]$$

e integrando sulla sfera unitaria per una radiazione isotropa si ottiene

$$n = \frac{8\pi}{c^3} \int \nu^2 f(\nu) d\nu. \quad [\text{A4.3}_3b]$$

⁵⁵² Per la teoria sulla radiazione si fa riferimento a [Rybicki e Lightman, 1979] e ad altri 'standard textbook'

⁵⁵³ Satyendra Nath Bose (1894-1974)

⁵⁵⁴ Queste congetture non tengono conto dell'estensione spaziale dei singoli fotoni (considerati puntiformi), che sarà valutata nella sezione A4.4 *Equazioni congettura URD*

Poiché ogni fotone trasporta un'energia $h\nu$, moltiplicandola per la densità differenziale [A4.3_2] si ottiene la densità di energia dei fotoni che si propagano nell'angolo solido $d\Omega$, con frequenza nell'intervallo $d\nu$

$$d^2 u_\nu = h\nu d^2 n_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^3} f(\vec{k}, \nu) d\nu d\Omega . \quad [A4.3_4]$$

Integrando infine la [A4.3_4] si ottiene la densità totale di energia del campo radiativo⁵⁵⁵

$$u = \frac{2h}{c^3} \int \nu^3 d\nu \int f(\vec{k}, \nu) d\Omega \quad [A4.3_5a]$$

e integrando sulla sfera unitaria per una radiazione isotropa si ottiene

$$u = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty \nu^3 f(\nu) d\nu . \quad [A4.3_5b]$$

Quindi in un campo isotropo l'energia media dei fotoni è data dal rapporto

$$\langle h\nu \rangle = \frac{u}{n} = \frac{\int h\nu^3 f(\nu) d\nu}{\int \nu^2 f(\nu) d\nu} .$$

Nel caso in cui il sistema si trovi in equilibrio termodinamico a una data temperatura, la meccanica statistica mostra che la distribuzione dei fotoni è isotropa e il numero di occupazione medio assume la forma di equilibrio

$$f_{eq}(\nu) = \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} . \quad [A4.3_6]$$

Rispetto alla analoga relazione di equilibrio dei fermioni⁵⁵⁶, si osserva l'assenza del potenziale chimico μ , che infatti deve essere nullo, potendo i fotoni essere creati e distrutti, e affinché possano avere l'energia F minima all'equilibrio, una delle condizioni è $\partial F / \partial N = 0$ dove N è il numero di particelle, ma essendo $(\partial F / \partial N)_{T, V} = \mu$ si ricava che⁵⁵⁷ $\mu = 0$.

All'equilibrio i fotoni sono quindi ripartiti tra le frequenze secondo l'equazione

$$\frac{dn^p}{d\nu} = \frac{8\pi}{c^3} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/k_B T} - 1} , \quad [A4.3_7]$$

nota come *distribuzione di Planck*.

Analogamente, la distribuzione nello spettro dell'energia segue dalla [A4.3_4] e all'equilibrio è data dalla *legge di corpo nero*, che rappresenta la densità di energia (secondo la distribuzione di Planck) espressa in frequenza del campo elettromagnetico

⁵⁵⁵ Poiché la densità di energia non può divergere e gli integrali si devono mantenere finiti, è necessario che per $\nu \rightarrow \infty$ la funzione $\nu^3 f(\nu)$ tenda a zero più velocemente di ν^{-1} ; formalmente, ponendo $\lim_{\nu \rightarrow \infty} f(\nu) \propto \nu^{-a}$ dovrà essere $a > 4$; analogamente nel caso $\nu \rightarrow 0$ ponendo $\lim_{\nu \rightarrow 0} f(\nu) \propto \nu^{-b}$ dovrà essere $b < 4$

⁵⁵⁶ La relazione di equilibrio dei fermioni ha espressione $f_p = \frac{1}{e^{E-\mu/k_B T} + 1}$, dove μ è il potenziale chimico

⁵⁵⁷ [Landau e Lifšits, 1972] edizione italiana pag. 209

$$u_v^P(T) = hv \frac{dn}{dv} = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \frac{1}{e^{hv/k_B T} - 1}, \quad [A4.3_8a]$$

che corrisponde all'energia emessa

$$E_v^P(T) = \frac{u_v^P(T) c}{4} = \frac{2\pi h v^3}{c^2} \frac{1}{e^{hv/k_B T} - 1}, \quad [A4.3_8b]$$

ovvero, dove $v = \frac{c}{\lambda}$ e $dv = \left| \frac{c}{\lambda^2} \right| d\lambda$, come densità di energia (secondo la distribuzione di Planck) espressa in lunghezza d'onda del campo elettromagnetico

$$u_\lambda^P(T) = \frac{8\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T\lambda} - 1} \quad [A4.3_9a]$$

e come energia emessa

$$E_\lambda^P(T) = \frac{u_\lambda^P(T) c}{4} = \frac{2\pi h c^3}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T\lambda} - 1}. \quad [A4.3_9b]$$

Con una congettura alternativa, secondo lo sviluppo dell'ipotesi originale di Plank l'energia associata ai modi oscillatori del campo elettromagnetico può assumere soltanto valori multipli del quanto fondamentale di energia $h\nu$, quindi la probabilità che ogni modo di oscillazione nella cavità di *corpo nero* abbia energia pari a $n h\nu$ (con $n=1,2,3,\dots$) è

$$P_{nv} = \frac{e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}}}{\sum_{n'=0}^{\infty} e^{-\frac{n'h\nu}{k_B T}}}. \text{ Nella funzione di partizione } z_v(T) = \sum_{n'=0}^{\infty} e^{-\frac{n'h\nu}{k_B T}} = z_v(\beta) = \sum_{n'=0}^{\infty} (e^{-\beta h\nu})^{n'}, \text{ dove}$$

$\beta = 1/k_B T$, si riconosce una serie geometrica con somma $z_v(\beta) = \frac{1}{1 - e^{-\beta h\nu}}$ (dove

$e^{-\beta h\nu} < 1$), si determina l'energia media $\bar{E}_v = -\frac{\partial}{\partial \beta} [\ln(z_v(\beta))] = -\frac{\partial}{\partial \beta} \left(\ln \frac{1}{1 - e^{-\beta h\nu}} \right) = \frac{h\nu}{e^{\beta h\nu} - 1}$

e calcolando il numero di modi ammessi nella cavità (parallelepipedo) di *corpo nero* come

$$n_v dv = \frac{4\pi}{c^3} L^3 v^2 dv, \text{ considerando le 2 diverse polarizzazioni possibili per il campo}$$

elettromagnetico si ottiene la densità di energia $u_v^P(T) = \frac{n_v 2 \bar{E}_v}{L^3} = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \frac{1}{e^{hv/k_B T} - 1}$, la

stessa [A4.3_8a] già ricavata nello spazio delle fasi.

A4.4 Equazioni congettura URD

Fondamenti interpretativi della congettura URD

Sulla base delle *circostanze* $[\sigma]$ del redshift valutate nell'approfondimento, l'universo si considera statico (ovvero non in espansione e non si presuppone un 'recente' *Big Bang*), spazialmente e temporalmente infinito (temporalmente dal punto di vista antropico, cfr le *Conclusioni Epistemologiche*), omogeneo e isotropo a grande scala e nel quale valgano le leggi della termodinamica (ovvero il sistema sia conservativo e valga la legge della conservazione dell'energia, cfr le *Conclusioni cosmologiche*).

Una facile obiezione a questa premessa è che a séguito dell'evoluzione durata per un periodo infinito (fino a oggi) ci si dovrebbe trovare in una situazione estrema, ad esempio l'impossibilità per le stelle di bruciare (per fusione) elementi più pesanti del ferro, dato l'aumento della metallicità nell'evoluzione stellare, oppure generali questioni di aumento di entropia, quindi ci si dovrebbe trovare in una sorte di 'morte cosmica' e non invece in una situazione ricca anche di 'frizzanti e giovani attività', cosmologicamente parlando, come osserviamo 'ora'.

Il problema di fondo è analogo a quello che si finge di non vedere nel *modello cosmologico standard*, nel quale in un 'istante' dal *nulla* (senza presupporre un *prima*) è apparso il *tutto*, con meccanismi basati su una fisica misteriosa non spiegabile; un tutto che si sta espandendo accelerando verso un futuro infinito (nel tempo e nello spazio) dove una galassia si troverà isolata in uno spazio del raggio di Hubble senza possibilità di 'osservare' nient'altro, perché 'tutto il resto' sarà stato trascinato dall'espansione oltre il limite di allontanamento a velocità superiori a quella della luce. Ma il principio antropico ci consola di esistere nel momento giusto (cfr l'allegato A5 *Sui pregiudizi antropici*).

Se questa visione non crea imbarazzo, allora non dovrebbe crearlo una qualsiasi 'giustificazione' per la situazione attuale nella nostra porzione di universo, parte di un universo spazialmente e temporalmente infinito, dove i problemi evolutivi o degenerativi si possano 'risolvere' immaginando eventi a livello cosmologico associati a una fisica 'qualsiasi' che riportino periodicamente la situazione in condizioni di evoluzione come la conosciamo⁵⁵⁸. Oppure, al raggiungimento di condizioni critiche, una *naturale* periodica 'inversione' del funzionamento delle leggi della fisica tale per cui i processi funzionino al contrario e ciclicamente l'universo 'involva' fino alla successiva evoluzione; quindi un universo infinitamente 'ciclico'.

⁵⁵⁸ Soluzioni di questa natura (ma che prevedono l'espansione dell'universo) sono state ipotizzate dal matematico e fisico Roger Penrose, premio Nobel per la Fisica, nella teoria della *Conformal Cyclic Cosmology* (CCC): «La cosa difficile da capire sulla CCC è proprio questa: in ogni eone l'universo si espande "da zero a infinito", ma l'infinito futuro di ogni eone coincide esattamente con il Big Bang dell'eone successivo. Questo processo anti-intuitivo è possibile grazie alla scomparsa della massa – ovvero, delle masse a riposo delle particelle – negli estremi iniziale e finale dei due eoni. Senza massa a riposo non è possibile nessuna misura del tempo, e pertanto nessuna misura dello spazio.» Roger Penrose, *Dal Big Bang all'eternità* (Bur Rizzoli, 2023)

Chiaramente non si teorizza quanto sopra ma si giustifica la sostenibilità su un piano filosofico dell'ipotesi di base di un universo sostanzialmente statico (ovvero non in espansione), spazialmente e temporalmente infinito, si ritiene con pari dignità di quello sostenuto dalla teoria del *modello cosmologico standard*.

Un universo alternativo (il riferimento è sempre alla nostra porzione di universo conoscibile, anche se nel séguito non viene precisato) per il quale è necessario trovare spiegazioni a quanto si osserva 'ora', come si prova a fare in questo approfondimento.

D'altra parte, come osserva Konrad Rudnicki (1926-2013) a proposito della necessità dei principi cosmologici su cui si fonda il *modello cosmologico standard*, nella personale visione semplicemente 'uno dei modelli possibili':

Cosmological principles are not laws of nature, but are a kind of high-order rules concerning the physical world, which allow us to fill the blanks within our cosmological knowledge. [...] we cannot consider cosmological principles as something extraneous to cosmology, pertaining rather to philosophical interpretation of scientific result. On the contrary, one must agree that without any cosmological principle no statement about the Universe as a whole would be possible unless the Universe were finite and accessible for direct and indirect observations in all its parts and all epochs. That could hardly be the case.⁵⁵⁹

In questo universo, come anticipato nella sezione A4.2, si ipotizza l'esistenza di un *fluido* cosmico nell'*etere*⁵⁶⁰ rappresentato da una densità diffusa di energia U^* costituita da particelle, campi ed energia emessi dalle sorgenti e dall'universo stesso inteso come *corpo nero*⁵⁶¹, che interagisca con i fotoni delle sorgenti remote, con una modalità analizzata nella seguente sezione *Congettura sull'interazione della radiazione incidente con U^** , determinando un redshift, ovvero una attenuazione dell'energia. Il coefficiente associato a queste interazioni può essere utilizzato per stimare la distanza delle sorgenti, sulla base di una stima empirica ricavata nelle seguenti sezioni.

È evidente che la sostenibilità di tutte queste congetture debba essere verificata in modo più approfondito, anche da un punto di vista teorico⁵⁶².

Riassumendo, si considerano gli enti principali della *congettura URD* definiti come segue:

etere il *campo*, l'ente che costituisce e permea *interamente* il substrato cosmico (ovvero la forma dominante di sostanza) al quale si riconosce la proprietà di possedere una *densità di energia*; l'*etere* quindi è inteso come presente *ovunque*, non solo in regioni interposte o irregolari

⁵⁵⁹ [Rudniki, 1987] pag. 313

⁵⁶⁰ Di questo *nuovo etere*, chiamato *etere* per distinguerlo dai precedenti, in sostanza un *campo*, si è ricostruita con una ricerca quasi filologica una paternità direttamente ascrivibile ad Albert Einstein

⁵⁶¹ Cfr nota relativa nella sezione *Conclusioni cosmologiche*; cfr anche *Figura 9*

⁵⁶² Le *congetture* sulle interazioni tra i fotoni e la densità di energia U^* sono *ipotesi* e come tali devono essere sottoposte a verifica, come suggerito anche da [Poincaré, 1905] pag. 147, rappresentando comunque una fonte di informazioni anche in caso di esito negativo. Le circostanze della verifica hanno suggerito di confrontare solo una prima serie di misurazioni che si riferiscono al fenomeno generale ipotizzato, rimandando a uno studio futuro una verifica più approfondita

- $U^\star$** la *densità di energia* omogenea e isotropa che permea tutto il volume cosmico (l'*etere*), costituita da particelle, campi ed energia emessi dalle sorgenti e dall'universo stesso inteso come *corpo nero*; pur essendo ovvio pensare che esistano diverse *densità di energia*, ad esempio in prossimità di sorgenti galattiche, in prima valutazione questa densità di energia viene ipotizzata come omogenea e mediamente uniforme, in considerazione delle enormemente maggiori distanze percorse dai fotoni incidenti in assenza di altre perturbazioni significative; $U^\star$ interagisce con i fotoni delle sorgenti remote che si osservano dopo averla attraversata
- redshift** il rapporto tra la lunghezza d'onda di una radiazione osservata e la lunghezza d'onda della radiazione emessa dalla stessa sorgente nota a riposo, indicato anche ξ per semplificare il riferimento, formalmente⁵⁶³ $\lambda_o / \lambda_e = \xi = 1 + z$
- MCR** la radiazione cosmica a microonde, omogenea e con alto grado di isotropia con il massimo di emissione corrispondente a $\lambda_{MCR} = 1.9 \text{ mm}$, che può essere rappresentata da un gas di fotoni rarefatto in equilibrio termodinamico descritto dalla statistica di Bose-Einstein, relativo alla temperatura di *corpo nero* $T_{MCR} = 2.726 \text{ K}$, misurata in tutto il cosmo osservabile (il raggio di Hubble [17_1c]), cfr nel merito la prima nota nella sezione *Sulla natura della radiazione MCR* nella sezione A4.2; questa radiazione viene considerata in prima istanza come parte osservata di energia irradiata di *corpo nero*, dove il *corpo nero* è l'universo stesso, tralasciando le informazioni che dipendono dalle teorie attualmente associate (*Big Bang* e conseguenti, come l'effetto Sachs-Wolfe integrato e non integrato⁵⁶⁴).

Congettura sull'interazione della radiazione incidente con $U^\star$ - Sezione d'urto dei fotoni

La congettura prevede l'ipotesi dell'interazione dei fotoni incidenti γ_i delle sorgenti remote con i fotoni della densità di energia $U^\star$. Per giustificare questa interazione, premesso che una fattibilità reale è stata verificata e oggetto di misurazioni sia a bassa sia ad alta energia

⁵⁶³ Cfr anche § 7

⁵⁶⁴ La MCR, chiamata comunemente CMB, viene considerata una delle prove principali della teoria del *Big Bang*, incluse le piccole anisotropie misurate nella radiazione stessa, attese come conseguenza di originarie fluttuazioni quantistiche della materia in uno spazio ristretto che si siano poi espanse fino alla dimensione dello spazio attualmente osservabile; sono state effettuate molte misurazioni accurate delle anisotropie primarie, secondarie e di dipolo, con sonde spaziali (ad es. COBE, WMAP, Planck), sonde su palloni (ad es. BOOMERANG, Archeops) e osservatori terrestri (ad es. DAS in Antartide), in un contesto di oggettiva difficoltà nell'analisi dei dati grezzi, pesantemente disturbati da molti segnali estranei alla radiazione MCR stessa; l'effetto Sachs-Wolfe è una proprietà ipotizzata della MCR per la quale questa dovrebbe subire un redshift gravitazionale in grado di spiegare alcune fluttuazioni nella scala angolare di ultimo scattering (o in séguito a questo scattering); in questo approfondimento non si considerano né il *Big Bang* né l'espansione dell'universo né le citate interpretazioni sulla MCR

negli acceleratori⁵⁶⁵, è necessario sviluppare una stima della misura fisica dei fotoni stessi⁵⁶⁶, non più considerati come puntiformi, per poter disporre di una sezione d'urto a loro associata in condizioni cosmologiche, 'naturali'.

Nel caso in cui le densità di particelle siano elevate o molto elevate, si potrebbe immaginare che questa interazione ancorché debole tra i fotoni sarebbe dovuta emergere da tempo nelle osservazioni, sia in ambiente 'naturale' sia in laboratorio, ma questo non risulta osservato e potrebbe rappresentare una criticità ma è facilmente attribuibile alla debolezza degli scambi energetici, come evidenziato nella seguente sezione *Congettura $\gamma\gamma$ sulle interazioni fotone-fotone*.

In merito alla determinazione di una sezione d'urto per i fotoni, la considerazione alla base è che la meccanica quantistica «has no methods to describe the path of a photon between source and destination. QM also has no way to describe size and shape of a photon. The reason for the construction of quantum mechanics was the handling of the quantized energy.»⁵⁶⁷ Pertanto per una descrizione dimensionale dei fotoni è necessario rifarsi alle onde elettromagnetiche, sfruttando le relazioni che descrivono dal punto di vista quantistico e da quello elettromagnetico classico le stesse quantità fisiche. Ne risultano un 'raggio' e una 'lunghezza' dell'onda stessa associata al fotone che sono interpretati come riferimento per indagare la densità di interazioni in uno spazio tridimensionale. La congettura teorica sviluppata riguarda solo lo studio della possibilità che il fenomeno si verifichi, non una sua vera stima quantitativa, per la quale sarebbe comunque necessario ricavare un valore empirico di verifica dalle misure osservative in un esperimento che escluda o tenga conto delle altre particelle presenti.

Alle onde elettromagnetiche e ai fotoni è associato un impulso⁵⁶⁸ $\vec{p}$, con direzione coincidente con quella di propagazione, espresso dalla relazione quantistica⁵⁶⁹

$$p_{QM} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c} \text{ [kg m s}^{-1}\text{]}, \quad [\text{A4.4}_1]$$

che descrive un singolo fotone ma non contiene indicazione sul volume del fotone stesso, quindi non è possibile valutarne una sezione d'urto.

Per un'onda elettromagnetica l'impulso è

$$\vec{p}_{CL} = \epsilon_0 \int_V \vec{E} \times \vec{B} dV = \epsilon_0 \mu_0 \int_V \vec{S} dV \text{ [kg m s}^{-1}\text{]} \quad [\text{A4.4}_2]$$

dove $\vec{E}$ è il vettore campo elettrico, $\vec{B}$ è il vettore campo magnetico, $\vec{S} = \epsilon_0 E^2 c$ è il vettore di Pointing, che descrive il flusso di energia attraverso una superficie Σ perpendicolare alla direzione di propagazione e dà la potenza istantanea [J s⁻¹ m⁻²] attraverso Σ stessa. Lontano

⁵⁶⁵ [Brodsky, 2005]

⁵⁶⁶ In questa sezione si fa riferimento a [Weidner, 2015] per il contesto delle congetture e a [Weidner, 2014] per la valutazione delle misure fisiche dei fotoni

⁵⁶⁷ [Weidner, 2015] pag. 6

⁵⁶⁸ In un sistema dinamico, l'impulso corrisponde alla variazione della quantità di moto in un intervallo temporale; la quantità di moto per particelle non materiali è espressa dalla congettura di de Broglie [A4.4_1]

⁵⁶⁹ Si indicano le relazioni quantistiche con il pedice $_{QM}$, quelle dell'elettromagnetismo classico col pedice $_{CL}$

dalla sorgente i campi $\vec{E}$ e $\vec{B}$ sono ortogonali e la [A4.4_2] si può esprimere come

$$p_{CL} = \frac{\varepsilon_0}{c} \int_V E^2 dV \quad [\text{kg m s}^{-1}] \quad [\text{A4.4}_3]$$

quindi, poiché il pacchetto d'onda trasporta la stessa energia determinata dalla relazione quantistica, uguagliando [A4.4_1] e [A4.4_3] (dimensionalmente coerenti) segue

$$h\nu = \varepsilon_0 \int_V E^2 dV = \varepsilon_0 E^2 \pi r_y^2 L_y \quad [\text{J}]. \quad [\text{A4.4}_4]$$

Un elemento chiave della [A4.4_4] è l'estensione spaziale del pacchetto d'onda, la cui ampiezza è esprimibile come $A = A_0 \sin(kx - \omega t)$, che può definire una quantità finita di energia solo assumendo pacchetti d'onda di estensione finita.

Un'onda piana polarizzata trasporta *momento angolare*, la meccanica quantistica prevede per ogni fotone lo spin, parallelo alla direzione di propagazione

$$J_{QM} = s = \frac{h}{2\pi} \quad [\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}]. \quad [\text{A4.4}_5]$$

Il *momento angolare* del campo elettromagnetico è calcolato integrando sul volume totale il pacchetto d'onda

$$\vec{J}_{CL} = \varepsilon_0 \int_V \vec{r}_y \times (\vec{E} \times \vec{B}) dV = \varepsilon_0 \mu_0 \int_V \vec{r}_y \times \vec{S} dV \quad [\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}]. \quad [\text{A4.4}_6]$$

Nel campo lontano, il pacchetto d'onda di un'onda elettromagnetica polarizzata circolarmente è simmetrico rispetto alla rotazione ed è costituito da una sequenza finita di fronti d'onda planari e circolari di estensione finita trasversali al vettore d'onda. Poiché un'onda polarizzata circolarmente non può essere sferica, il pacchetto d'onda deve avere una direzione di propagazione predefinita: quella della direzione dei fotoni.

Si suppone che il pacchetto d'onda sia un cilindro di raggio r_y e lunghezza L_y , con asse di simmetria la direzione di propagazione; è verosimile che i campi elettrico e magnetico dell'onda siano al loro massimo nel centro del pacchetto d'onda, decrescano verso il bordo e siano nulli all'esterno dal pacchetto. Per questa ragione la stima del raggio del fotone è solo indicativa e nelle considerazioni sulla sezione d'urto si dovrebbe tener conto dell'intensità decrescente dei campi stessi.

Gli integrali per la quantità di moto e l'energia totale e il momento angolare dell'onda devono avere valori finiti. L'intensità dell'onda stessa ha valore costante S all'interno del cilindro ed è nulla all'esterno. Il calcolo con coordinate cilindriche della [A4.4_6] risulta

$$\vec{J}_{CL} = \varepsilon_0 \mu_0 S \int_0^{L_y} \int_0^{r_y} \int_0^{2\pi} r^2 dx dr d\varphi = \frac{2\pi}{3} \varepsilon_0 \mu_0 S L_y r_y^3 = \frac{2\pi}{3c} \varepsilon_0 E^2 L_y r_y^3 \quad [\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}]. \quad [\text{A4.4}_7]$$

Poiché la descrizione quantistica ed elettromagnetica riguardano lo stesso fenomeno fisico, si possono uguagliare la [A4.4_5] e la [A4.4_7] (dimensionalmente coerenti), per i momenti

angolari, ottenendo $\frac{h}{2\pi} = \frac{2\pi}{3c} \varepsilon_0 E^2 L_y r_y^3$, da cui

$$3hc = 4\pi^2 \epsilon_0 E^2 L_y r_y^3 . \quad [A4.4_8]$$

Sostituendo il valore di h dalla [A4.4_4] nella [A4.4_8], si ottiene il raggio dei fotoni associati all'onda elettromagnetica, direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda di questa

$$r_y = \frac{3}{4\pi} \frac{c}{v} = \frac{3}{4\pi} \lambda \approx 0.24 \lambda \text{ [m]}, \quad [A4.4_9]$$

un valore che trova riscontro nelle misure con le usuali antenne riceventi⁵⁷⁰.

Dalle formule non si ottiene alcuna lunghezza del pacchetto d'onda, quindi si interpreta la lunghezza L_y come *lunghezza di coerenza*, intervallo spaziale entro il quale la radiazione si può considerare perfettamente sinusoidale, valutata sperimentalmente dalla larghezza delle righe spettrali osservate in spettroscopia, e assume valori nell'intervallo indicativo⁵⁷¹ $10^3 \lambda < L_y < 10^8 \lambda$.

Considerando il principio di indeterminazione di Heisenberg $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ e sostituendo la lunghezza Δx con $L_y = n \lambda_y = n \frac{c}{v_y}$, poiché $\Delta p = \frac{h \Delta v_y}{c}$ si ottiene $\frac{nc}{v_y} \frac{h \Delta v_y}{c} \geq \hbar$,

ovvero $n \geq \frac{v_y}{\Delta v_y} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \lambda_y}{\lambda_y}$: il pacchetto d'onda di un fotone con lunghezza d'onda λ_y non può essere più corto di $n \lambda_y$.

Ad esempio⁵⁷² per la riga $\lambda = 21 \text{ cm}$ dell'idrogeno neutro HI risulta una FWHM (Full Width at Half Maximum) di $\Delta v \approx 20 \text{ KHz}$ che corrisponde a $L_y \approx 1.5 \cdot 10^4 \text{ m}$ ovvero $L_y \approx 1.1 \cdot 10^4 \lambda$; per la riga D del sodio a $5890 \text{ \AA}$, la FWHM risulta $\Delta v \approx 61.4 \text{ MHz}$ quindi $L_y \approx 4.8 \text{ m}$ ovvero $L_y \approx 1.3 \cdot 10^6 \lambda$.

In realtà la lunghezza dell'onda non è importante per le stime statistiche delle interazioni, considerato che comunque i fotoni proseguono le loro traiettorie nella direzione di questa lunghezza, rendendo di fatto l'estensione spaziale del fotone in movimento come un 'tubo' di raggio r_y percorso dal fotone. La stima del numero di interazioni equivale alla densità numerica per unità di lunghezza delle intersezioni tra questi 'tubi'.

È necessario tener conto che il raggio dei 'tubi' varia notevolmente e che, considerati ad esempio dal punto di vista del fotone incidente, i 'tubi' degli altri fotoni hanno qualsiasi angolo di incidenza e le sovrapposizioni delle rispettive sezioni d'urto (normalizzate rispetto alla sezione del fotone incidente) possono avere valore da quasi zero (per incroci con minima sovrapposizione) a 1 (nel caso di piena sovrapposizione e direzioni parallele); mediamente le sezioni d'urto saranno in realtà una intersezione tridimensionale dei due 'tubi', dipendenti da angolo di incidenza e raggio del fotone, con sovrapposizioni ovviamente variabili rispetto alla sezione d'urto del fotone incidente (circolare dal suo punto di vista, una sezione del suo 'tubo'), complessivamente una sezione d'urto che possiamo chiamare σ_λ .

⁵⁷⁰ [Weidner, 2014] pag. 3; il valore individuato da Weidner per queste valutazioni (0.338λ), è leggermente diverso ma dello stesso ordine di grandezza

⁵⁷¹ Il valore è stimato su [Weidner, 2014] pag. 3; nei capoversi seguenti una spiegazione e due esempi

⁵⁷² [Weidner, 2015] pag. 7, utilizzando però una formula non semplificata, con $\hbar = h/2\pi$

Queste condizioni non consentono di stimare una statistica attendibile, in ogni caso non si può predeterminare l'esito dal punto di vista energetico, quindi si ribadisce che la congettura è volta solo alla fattibilità dell'interazione stessa.

Dal punto di vista classico, ogni perdita di energia è equivalente a una riduzione dell'ampiezza e della forza del campo elettrico del pacchetto d'onda, mentre la frequenza resta costante. La meccanica quantistica non si occupa della forza del campo elettrico del pacchetto d'onda e ogni perdita di energia corrisponde a una riduzione della frequenza, ovvero un allungamento della lunghezza d'onda, ovvero il redshift!

Congettura $\gamma\gamma$ sulle interazioni fotone-fotone

Sulla base delle premesse, la criticità descritta nella sezione A.4.1 sulle transizioni energetiche potrebbe trovare una giustificazione, rispettando il principio di conservazione della energia, nella seguente

congettura $\gamma\gamma$ Nelle interazioni tra i fotoni (ad esempio quelli incidenti osservati e quelli della CMR) non si considera che essi si *scambino* energia ma che venga generato un nuovo debole fotone (senza ipotizzare nuove particelle) oppure due, uno da ogni fotone originale, con energia pari all'effetto della interazione; in tal modo i due originali diventano leggermente meno energetici (quindi con un effetto di *redshift* misurabile per il fotone della sorgente remota osservato, nel complesso di tutte le minime interazioni avvenute lungo il percorso) ma l'energia totale si conserva:

$$\gamma_{CMR} + \gamma_i = \gamma_{CMR}^R + \gamma_i^R + \gamma_{\Delta} \quad \text{oppure} \quad \gamma_{CMR} + \gamma_i = \gamma_{CMR}^R + \gamma_i^R + \gamma_{\Delta CMR} + \gamma_{\Delta i}$$

dove $\gamma_{\Delta}, \gamma_{\Delta i}, \gamma_{\Delta CMR} \ll \gamma_{CMR}, \gamma_i$ e l'apice ^R indica il fotone redshiftato.

Le differenze di energia per ogni interazione sono minime (si ricorda anche che ogni interazione è diversa e genera quindi un effetto di redshift diverso e un'emissione diversa) tanto da non influire sulle direzioni dei fotoni iniziali (e comunque le direzioni random delle interazioni si compenserebbero) ma il fenomeno ripetuto per una enorme quantità di volte (ovvero di parsec) genera il redshift osservato. Questi fotoni della differenza di energia con quelli originali incidenti non possono essere osservati per la loro debolezza⁵⁷³ e comunque non potrebbero nemmeno nell'insieme essere correlati al fotone incidente non avendo una direzione coerente con lo stesso⁵⁷⁴ ma contribuiscono globalmente alla radiazione CMR, preservando il principio di conservazione dell'energia totale e giustificando anche la completezza dello spettro planckiano osservato per la stessa CMR.

⁵⁷³ È pensabile che non siano stati osservati nemmeno in laboratorio per questa ragione, ad esempio potrebbero avere un'energia molti ordini di grandezza inferiore a quella del fotone originale, quindi uscire anche dal range osservativo degli strumenti utilizzati nello studio del fotone principale o essere al di sotto della soglia di incertezza associata alla sensibilità degli strumenti stessi

⁵⁷⁴ Si può immaginare che nell'interazione i fotoni deboli vengano emessi in direzioni appartenenti all'intero angolo solido, considerando la direzione random della quantità di moto dei fotoni della CMR con i quali interagiscono i fotoni incidenti

Quindi a maggior ragione questa radiazione sarebbe una somma di innumerevoli diverse energie continuamente '*rigenerate*' (conservandone il totale) e non un residuo fossile di una unica emissione primordiale risalente alla prima trasparenza del cosmo (come prevede la teoria del *Big Bang*).

Si ipotizza quindi che i fotoni incidenti interagiscano con le particelle del fluido di $U^\star$ con la conseguente alterazione della loro energia ovvero della lunghezza d'onda e potenzialmente anche una rifrazione ovvero una modifica della velocità di propagazione della radiazione nel fluido stesso, effetti che vengono 'accorpati' nel *coefficiente di assorbimento* $\alpha_{U^\star}$ nel primo caso e nel *coefficiente di rifrazione* nel secondo caso, di séguito analizzati.

Coefficiente di assorbimento

Poiché la *funzione sorgente* (funzione rapporto tra i coefficienti emissivi e di assorbimento) è trascurabile nella circostanze considerate, la variazione dI_S del flusso incidente di radiazione della sorgente remota lungo la distanza percorsa dl (poi integrata da 0 a D , distanza dalla sorgente all'osservatore) è espressa dalla legge di attenuazione di Lambert-Beer

$$\frac{dI_S}{dl} = -\alpha_{U^\star} I_S , \quad [A4.4_{10}]$$

dove $\alpha_{U^\star}$ definisce il *coefficiente di assorbimento* della densità di energia $U^\star$ diffusa (in $[m^{-1}]$, espresso per praticità in $[Mpc^{-1}]$), ipotizzato non dipendente dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente della sorgente⁵⁷⁵ I_S ; quindi $\alpha_{U^\star} dI_S$ rappresenta la perdita di intensità di radiazione conseguente all'assorbimento per unità di lunghezza.

Questa perdita di intensità viene chiamata *assorbimento* per l'effetto che ne consegue ma sulla base della *congettura $\gamma\gamma$ sulle interazioni fotone-fotone* si tratta di innumerevoli minime *emissioni* conseguenti alle interazioni stesse, singolarmente deboli e disperse da poter non essere considerate nello studio dei fotoni incidenti.

Questo *coefficiente di assorbimento* potrebbe essere collegato alla sezione d'urto complessiva di assorbimento σ_λ ($[m^2]$), conseguente alle rispettive sezioni d'urto funzioni del raggio delle particelle e delle traiettorie, oltre che ovviamente alle rispettive densità numeriche.

Per la valutazione dell'assorbimento della radiazione della sorgente remota si può integrare la [A4.4_10], che presenta variabili separabili, dalla radiazione emessa $I_{\lambda e S}$ alla radiazione osservata $I_{\lambda o S}$ e lungo la distanza D

⁵⁷⁵ Si osserva che è sperimentalmente noto che il redshift finora osservato non presenti questa dipendenza

$$\int_{I_{\lambda e S}}^{I_{\lambda 0 S}} \frac{dI'_{\lambda S}}{I'_{\lambda S}} = -\alpha_{U\star} \int_0^D dl \quad \text{ovvero} \quad \ln\left(\frac{I_{\lambda 0 S}}{I_{\lambda e S}}\right) = -\alpha_{U\star} D . \quad [\text{A4.4}_{11}]$$

Per la valutazione dell'assorbimento di radiazione *monocromatica*, che è quella dei singoli fotoni o dei *pacchetti di fotoni coerenti* osservati, considerata l'intensità di radiazione come il flusso energetico per unità di superficie e di tempo, essendo l'energia esprimibile come $E = hc/\lambda$ e il redshift come $\xi = 1+z = \lambda_0/\lambda_e$, la [A4.4_{11}] si può direttamente riscrivere come

$$\boxed{D_{URD} = \frac{\ln(\xi)}{\alpha_{U\star}} \quad \text{Mpc}} , \quad [\text{A4.4}_{12}]$$

dove D_{URD} rappresenta la stima della *distanza della sorgente in Mpc* determinata in base alla *congettura URD*, sorgente della quale si riceve con lunghezza d'onda λ_0 la radiazione emessa alla lunghezza d'onda λ_e .

Per la una più completa valutazione dell'assorbimento di radiazione *non monocromatica*, ovvero legata a tutto lo spettro emesso dalla sorgente, è opportuno considerare l'intensità specifica media di radiazione $\langle I_\lambda \rangle = B_\lambda$, legata alla densità di energia dalla relazione

$$u_\lambda(T) = \frac{4\pi}{c} \langle I_\lambda \rangle , \quad \text{quindi l'equazione di Planck per la densità di energia}^{576}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T \lambda} - 1} \quad \text{diventa} \quad \langle I_\lambda(T) \rangle = \frac{2hc^3}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T \lambda} - 1} \quad \text{e sulla base della}$$

[A4.4_{11}] si ottiene

$$\ln\left(\frac{I_{\lambda 0 S}}{I_{\lambda e S}}\right) = \left[\ln\left(\frac{\lambda_{e S}^5}{\lambda_{0 S}^5}\right) + \ln \frac{\exp\left(\frac{hc}{k_B T_{e S} \lambda_{e S}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T_{0 S} \lambda_{0 S}}\right) - 1} \right] = -\alpha_{U\star} D . \quad [\text{A4.4}_{13}]$$

Posto $\eta_0 = \frac{hc}{k_B T_{0 S}} > \frac{hc}{k_B T_{e S}} = \eta_e$ [m], che per una stella di sequenza principale con temperature che variano nel range $3 \cdot 10^3 K \lesssim T_s \lesssim 20 \cdot 10^3 K$ assumono valori nel range $7.2 \cdot 10^{-7} m \lesssim \eta \lesssim 4.8 \cdot 10^{-6} m$, dalla [A4.4_{13}] si ottiene

$$D_{URD} = -\frac{1}{\alpha_{U\star}} \left[5 \ln\left(\frac{\lambda_{e S}}{\lambda_{0 S}}\right) + \ln \frac{\exp\left(\frac{\eta_e}{\lambda_{e S}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{\eta_0}{\lambda_{0 S}}\right) - 1} \right] . \quad [\text{A4.4}_{14}]$$

Per lunghezze d'onda della radiazione sorgente e osservata comprese tra i raggi X e gli UV,

⁵⁷⁶ In [Planck, 1900], equazione ricavata anche in A4.3 considerando lo spazio delle fasi, cfr [A4.3_{8b}], e anche con procedura analoga a quella originale di Planck

ovvero $10^{-11} m \lesssim \lambda \lesssim 10^{-8} m$, si ha $e^{\frac{\eta}{\lambda_s}} \gg 1$ e la [A4.4_14] si può semplificare

$$D_{URD} = \frac{1}{\alpha_{U^*}} \left[5 \ln \left(\frac{\lambda_{0S}}{\lambda_{eS}} \right) + \left(\frac{\eta_0}{\lambda_{0S}} - \frac{\eta_e}{\lambda_{eS}} \right) \right]. \quad [A4.4_{15}]$$

Tralasciando il caso misto, per lunghezze d'onda della radiazione sorgente o osservata maggiori degli UV, ovvero $10^{-7} m \lesssim \lambda$, la [A4.4_14] diventa

$$D_{URD} = \frac{1}{\alpha_{U^*}} \left[5 \ln \left(\frac{\lambda_{0S}}{\lambda_{eS}} \right) + \ln \frac{\exp \left(\frac{\eta_0}{\lambda_{0S}} \right) - 1}{\exp \left(\frac{\eta_e}{\lambda_{eS}} \right) - 1} \right]. \quad [A4.4_{16}]$$

Si osserva, poiché è sempre $\lambda_0 > \lambda_e$ e $\xi \geq 1$, che il valore D_{URD} risultante dalla [A4.4_12], dalla [A4.4_15] e dalla [A4.4_16] è correttamente sempre positivo⁵⁷⁷ e in assenza di redshift (quando $\lambda_0 = \lambda_e$ e $\xi = 1$) la distanza risulta coerentemente nulla.

Ancora prima di eseguire confronti con i dati osservativi, si nota che la dipendenza della distanza stimata D_{URD} dal redshift (o dal parametro ξ) secondo la [A4.4_12], che stima il caso della radiazione monocromatica, non è lineare, mentre lo è la legge di Hubble-Lemaître tradizionale (cfr [17_3]), quindi necessariamente le risultanze non potranno concordare se non per valori del redshift prossimi a zero entro i range di approssimazione delle misure.

Facendo un confronto tra la legge di Hubble-Lemaître espressa nella [21_13a], considerato il parametro di accelerazione $q(t) \equiv -\frac{R(t)\ddot{R}(t)}{\dot{R}^2(t)}$ al valore attuale $q_0 = 0.5$ (come considerato nel *modello cosmologico standard*, cfr § 21), quindi la relazione

$$D_{Mpc} = \frac{c}{H_0} \left[z + \frac{1}{4} z^2 + \dots \right], \quad [A4.4_{17}]$$

e la relazione [A4.5_3] espansa in serie di Taylor in un intorno di $z = 0$:

$$D_{URD} = \frac{1}{\alpha_{U^*}} \left[z - \frac{1}{2} z^2 + \dots \right] [\text{Mpc}^{-1}], \quad [A4.4_{18}]$$

si può ottenere un'indicazione di riferimento per il valore di α_{U^*} , sempre per un intorno del

⁵⁷⁷ Per controllare che la condizione di positività sia verificata per la [A4.4_15], si osserva dai grafici delle funzioni relative ai due membri che è sempre verificata la relazione $5 \ln \left(\frac{\lambda_{0S}}{\lambda_{eS}} \right) > \frac{\eta_e}{\lambda_{eS}} - \frac{\eta_0}{\lambda_{0S}}$ ovvero $\text{const} \ln(\xi) \geq 1 - \frac{\text{const}'}{\xi}$, essendo η_e e λ_{eS} due costanti; analogamente per la [A4.4_16] è sempre verificata la

relazione $5 \ln \left(\frac{\lambda_{0S}}{\lambda_{eS}} \right) > \ln \frac{\exp \left(\frac{\eta_e}{\lambda_{eS}} \right) - 1}{\exp \left(\frac{\eta_0}{\lambda_{0S}} \right) - 1}$ ovvero $\xi^5 > \frac{\exp \left(\frac{\eta_e}{\lambda_{eS}} \right) - 1}{\exp \left(\frac{\eta_0}{\lambda_{0S}} \right) - 1} = \frac{\text{const}}{\exp \left(\frac{\text{const}' \eta_0}{\xi} \right) - 1}$, considerati per le costanti i

valori ipotizzati nei range indicati (quindi per valori realistici, non del tutto arbitrari)

valore $z = 0$ (o $\xi = 1$), considerando che arrestando lo sviluppo di Taylor al primo termine non nullo si ottiene la formulazione della legge di Hubble-Lemaître (cfr [17_4b]) da confrontare con $D_{URD} = \frac{1}{\alpha_{U^*}}(\xi - 1)$. Dalle [A4.4_17] e [A4.4_18] si ottiene pertanto la stima

$$\alpha_{U^*} \approx \frac{H_0}{c} \approx 2.44 \cdot 10^{-4} \text{ [Mpc}^{-1}\text{]}. \quad [\text{A4.4}_{19}]$$

In altre parole, per le distanze alle quali è valida la legge di Hubble-Lemaître, anche la *congettura URD* dà le medesime stime, nell'approssimazione dell'espansione di Taylor arrestanda al termine di primo grado (e per valori prossimi a 1 di ξ).

Coefficiente di rifrazione

L'intento è di analizzare la possibilità di associare un coefficiente al fenomeno della rifrazione, ovvero la trasmissione di una radiazione attraverso un mezzo non trasparente, nel caso in studio un mezzo assorbente rappresentato da U^* .

La rifrazione si verifica per ogni lunghezza d'onda, quindi il fenomeno è applicabile a tutto lo spettro. Nel caso cosmologico non si verifica un cambio di mezzo attraversato, quindi non si applica la legge di Snell per la deviazione della direzione di propagazione del segnale, che, se è giunto allo strumento di osservazione, è arrivato direttamente dalla sorgente; la parte di percorso interessata dai 'dintorni' della sorgente è trascurabile rispetto all'intera distanza.

In queste circostanze la rifrazione è un fenomeno assai complesso, semplificandone molto l'interpretazione ci si può riferire a un coefficiente di rifrazione $n^* = n + n'$ composto da una parte reale e una parte immaginaria. La parte immaginaria è legata all'assorbimento del segnale, riconducibile a una legge di attenuazione di Lambert-Beer analoga alla [A4.4_10], che giustificerebbe l'estinzione del segnale stesso. La parte reale è associabile alla *velocità di fase* del segnale elettromagnetico. Ipotizzare che questa variazione di velocità di fase determini un maggior tempo di percorrenza della distanza è fuorviante in quanto essa ha un significato analitico, non fisico, la propagazione del segnale è legata alla *velocità di gruppo*, non coinvolta in questa componente della rifrazione.

Inoltre una criticità rilevante è che tali componenti del coefficiente di rifrazione dipendono comunque dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente, quindi non possono essere utilizzati essendo il redshift osservato sempre indipendente dalla lunghezza d'onda della radiazione stessa.

Questa congettura pertanto deve essere abbandonata.

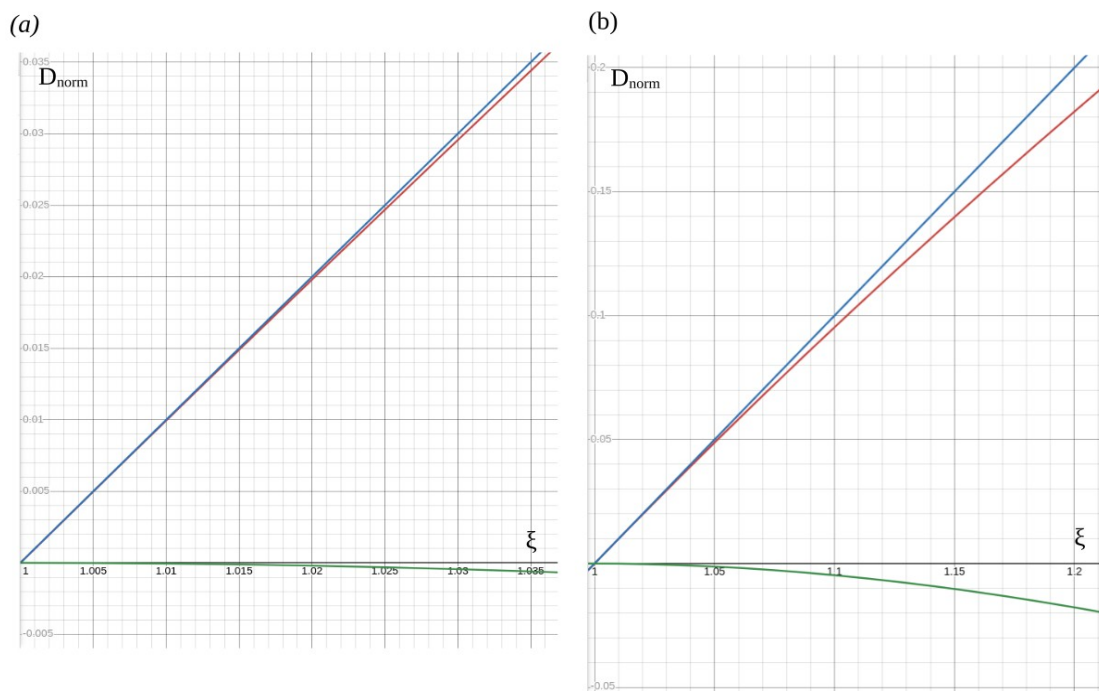
A4.5 Stima distanza sorgenti remote

Per valutare l'efficacia della relazione [A4.4_12] sono state considerate alcune sorgenti (prese a caso da grandi elenchi (con decine di migliaia di record) estratti dal database NED della Nasa⁵⁷⁸), delle quali i dati cosmologici sono stati poi confrontati con i dati elaborati utilizzando il valore stimato [A4.4_19].

Nella *Tabella 1* sono riportati i risultati e gli scostamenti tra i valori determinati con la legge di Hubble-Lemaître (ex database NED) e i valori della *congettura URD*. Sono galassie a media distanza, da circa 800 Mpc a circa 2200 Mpc , con valori di redshift da circa 0.18 a circa 0.50 , per le quali non sono disponibili stime di distanza diverse da quelle basate sui dati di redshift. Non si riportano i grafici di queste misure perché l'andamento è quello lineare della legge di Hubble-Lemaître (bisettrice del quadrante), utilizzata per la loro determinazione. Gli scostamenti tra le due curve teoriche sono notevoli, come si può osservare nella *Figura 10b*, nella quale sono tracciate le curve normalizzate⁵⁷⁹ per le due funzioni (Hubble e URD), oltre alla curva differenza delle stesse, per evidenziare come gli scostamenti siano contenuti entro circa il 2,9% per valori $z \approx 0.035$ (*Figura 10a*) ed entro il 9% per valori $z \approx 0.2$ (*Figura 10b*).

I valori delle *Tabelle 1 e 2* sono coerenti con questi andamenti.

Figura 10



Nei grafici sono tracciate, normalizzate: in blu la curva relativa alla legge di Hubble-Lemaître [17_3], in rosso la curva relativa alla *congettura URD* [A4.4_12], in verde la differenza tra le due curve. In ascissa sono riportati i valori di $\xi = z+1 \geq 1$, in ordinata i valori di distanza normalizzata (ovvero che renda la retta blu con pendenza di 45°).

⁵⁷⁸ <https://ned.ipac.caltech.edu>

⁵⁷⁹ Per normalizzarle si moltiplica il valore di distanza per α_U

Tabella 1

a) <i>Ref</i>	b) $\xi = 1+z$	c) D_{H_0} [Mpc]	d) $D_{no H_0}$ [Mpc]	e) D_{URD} [Mpc]	f) ΔD (H_0/URD) / %	g) ΔD ($no H_0/URD$) [Mpc] / %	h) <i>Note</i>
OGC0144	$1.18016 \cdot 10^{-6}$	801 ± 56		679	-122 -15.2		G
WISEA J100714.16 +500136.3	$1.4917 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	2177 ± 152		1.639	-538 -24.7		G
SDSS J000621.49 +161105.1	$1.496081 \pm 2 \cdot 10^{-6}$	2188 ± 153		1651	-537 -24,5		G
WISEA J142825.47 +061343.3	$1.50222 \pm 9 \cdot 10^{-5}$	2224 ± 155		1668	-556 -25.0		G
WISEA J092250.15 +295443.8	$1.50504 \pm 7 \cdot 10^{-5}$	2237 ± 156		1675	-562 -25.1		G
RCS 03210301712	1.506	2240 ± 156		1678	-562 -25.1		G
a) oggetto considerato, ex database NED b) redshift (dove $\xi = z+1 = \lambda_0/\lambda_e$), ex database NED c) Hubble distance con $H_0 = 73 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ex database NED d) redshift-independent distance (mean distance), ex database NED, quando disponibili e) distanza calcolata in base a [A4.4_12] e [A4.4_19] f) scostamento tra le distanze c) ed e) in Mpc e in % g) scostamento tra le distanze d) ed e) in Mpc e in % g) note specifiche sull'oggetto considerato, ex database NED							

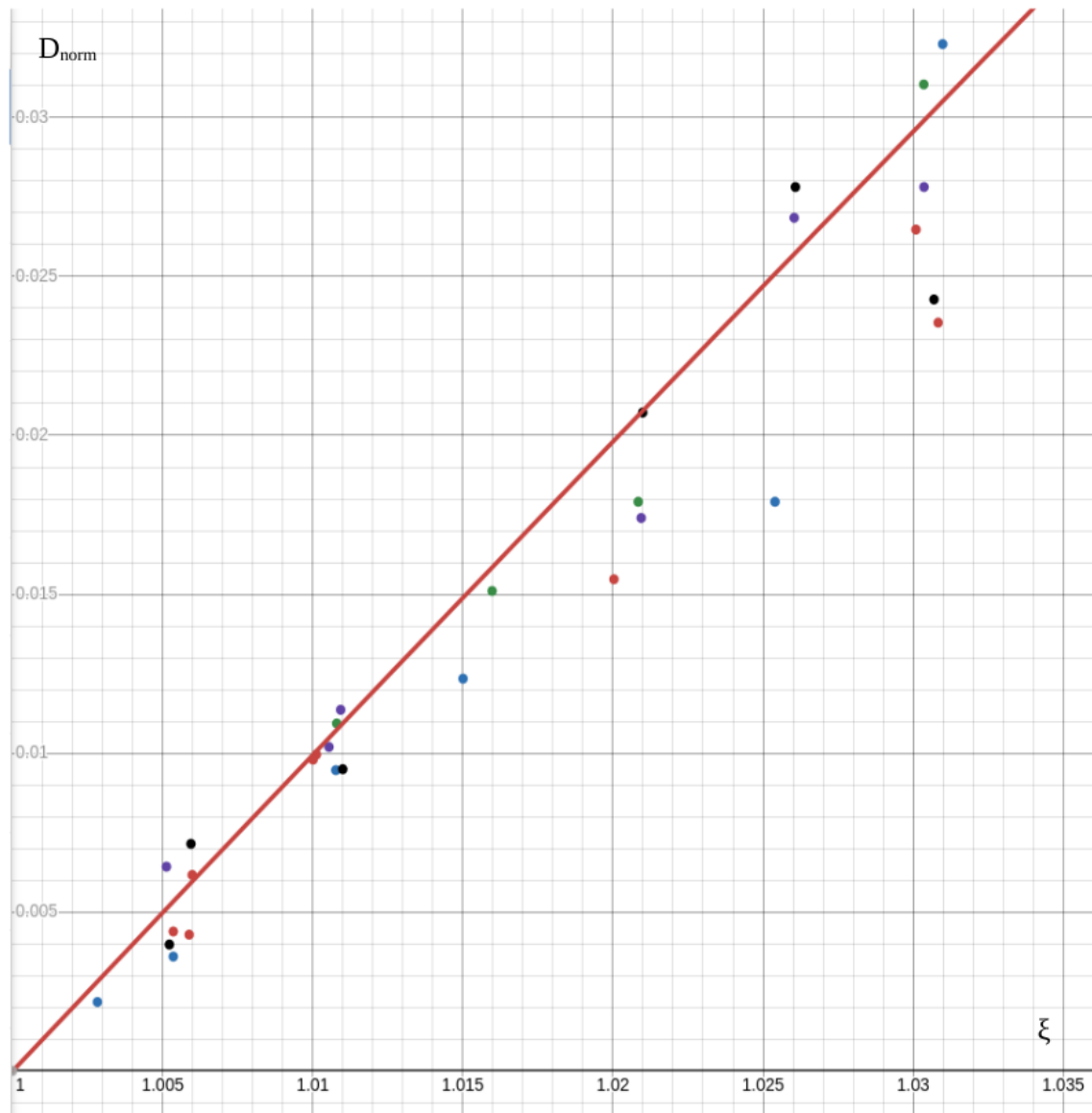
Nella successiva *Tabella 2* le galassie considerate sono più ‘vicine’, con distanze da circa 9 *Mpc* a circa 130 *Mpc*, con redshift da circa 0.002 a circa 0.03. Per queste sono disponibili stime di *redshift-independent distance*, ovvero di distanza come media di molte misure ottenute con metodi indipendenti dalla valutazione del redshift (secondo i modelli Tully-Fisher, Faber-Jackson, D-sigma ecc.). Sono quindi state analizzate le differenze in valore assoluto e in percentuale anche con queste distanze, poi riportate in *Figura 11*, con misure normalizzate.

Tabella 2

a) <i>Ref</i>	b) $\xi = 1+z$	c) D_{H_0} [Mpc]	d) D_{noH_0} [Mpc]	e) D_{URD} [Mpc]	f) ΔD (H_0/URD) / %		g) ΔD ($no H_0/URD$) [Mpc] / %		h) <i>Note</i>
NGC 1487	$1.002829 \pm 3 \cdot 10^{-6}$	11.65 ± 0.82	8,90	11.58	-0.07	-0.06	2.68	30.1	Gpair
NGC 3021	$1.005120 \pm 9 \cdot 10^{-6}$	26.52 ± 1.88	26.3 ± 0.7	20.93	-5.59	-21.1	-5.42	-20.6	SA(rs)bc?
NGC 4775	$1.005224 \pm 2 \cdot 10^{-6}$	28.05 ± 1.99	16.3 ± 3.6	21.35	-6.70	-23.9	5.05	31.0	SA(s)d
NGC 1640	$1.005350 \pm 1 \cdot 10^{-5}$	23.23 ± 1.63	14.8 ± 1.3	21.87	-1.36	-5.9	7.1	48.1	SB(r)b
NGC 7406	$1.00535 \pm 2 \cdot 10^{-5}$	18.37 ± 1.35	18..0	21.87	3.50	19.0	3.87	21.5	Sc
NGC 0450	$1.005884 \pm 5 \cdot 10^{-6}$	21.37 ± 1.53	17.6 ± 0.5	24.04	2.67	12.5	6.44	36.6	SAB(s)cd?
NGC 2852	$1.005941 \pm 2 \cdot 10^{-5}$	29.53 ± 2.08	29.3	24.28	-5.25	-17.8	-5.02	-17.1	SAB(r)a?
NGC 4462	$1.00598 \pm 1 \cdot 10^{-5}$	31.40 ± 2.23	25.3 ± 1.9	24.44	-6.96	-22.2	-0.86	-3.4	SB(r)ab
NGC 5022	$1.01001 \pm 2 \cdot 10^{-5}$	48.90 ± 3.44	40.1 ± 1.5	40.82	-8.08	-16.52	0.67	1.7	SBb pec edge-on
NGC5370	$1.010124 \pm 6 \cdot 10^{-6}$	46.21 ± 3.24	40.8	41.28	-4.93	-10.07	0.48	1.2	SB0^0(r)
NGC 5011	$1.01054 \pm 6 \cdot 10^{-5}$	50.47 ± 3.57	41.8 ± 1.8	42.97	-7.50	-14.9	1.17	2.8	E1-2
ESO 270- G 006	$1.01077 \pm 2 \cdot 10^{-5}$	51.29 ± 3.60	38.8 ± 1.7	43.90	-7.39	-14.4	5.09	13.1	Sb? edge-on
NGC 4811	$1.0108 \pm 1.5 \cdot 10^{-4}$	52.06 ± 3.77	44.80	44.02	-8.04	-15.4	-0,78	-1.7	SAB0^+(rs) pec
NGC 3449	$1.01093 \pm 2 \cdot 10^{-5}$	53.23 ± 3.74	46.6 ± 1.2	44.55	-8.68	-16.3	-2.05	-4.4	SA(s)ab?
NGC 5996	$1.010998 \pm 7 \cdot 10^{-6}$	50.30 ± 3.52	38.9 ± 2.3	44.83	-5.47	-10.9	5.93	15.2	S?
NGC 0668	$1.015004 \pm 5 \cdot 10^{-6}$	62.53 ± 4.39	50.6 ± 3	61.04	-1.49	-2.4	10.44	20.6	Sb
NGC 0019	$1.015971 \pm 7 \cdot 10^{-6}$	65.85 ± 4.62	61.9 ± 3	64.94	-3.91	-5.7	3.04	4.9	SB(r)bc
NGC 0496	$1.02003 \pm 1 \cdot 10^{-5}$	84.38 ± 5.91	63.4 ± 2	81.28	-3.10	-3.7	17.88	28.2	Sbc
NGC 7832	$1.02084 \pm 4 \cdot 10^{-5}$	86.92 ± 6.10	73.4	84.53	-2.39	-2.7	11.13	15.2	cD
NGC 2206	$1.020938 \pm 5 \cdot 10^{-6}$	94.22 ± 6.60	71.3 ± 2.2	84.93	-9.29	-9,9	13.63	19.1	SAB(rs)bc?
NGC 4565C	$1.020994 \pm 7 \cdot 10^{-6}$	97.08 ± 6.80	84.9 ± 2.1	85.15	-11.93	-12.3	0.25	0.3	Sd? edge-on
NGC 4558	$1.026034 \pm 9 \cdot 10^{-6}$	119.33 ± 8.36	110	105.33	-13.67	-11.5	-4.67	-4.2	S?
NGC 3138	$1.02608 \pm 3 \cdot 10^{-5}$	120.58 ± 8.45	114 ± 7	105.52	-15.06	-12.5	-8.48	-7.4	Sbc
NGC 5671	$1.0301 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	133.59 ± 9.39	108.5 ± 3	121.54	-12.05	-9.0	13.4	12.0	SB(r)b
NGC 6166	$1.030354 \pm 3 \cdot 10^{-5}$	134.58 ± 9.42	127.2 ± 10.2	122.55	-12.03	-8.9	-4.65	-3.7	CD2pec
NGC 6033	$1.03036 \pm 4 \cdot 10^{-5}$	135.86 ± 9.52	114.0	122.57	-13.29	-9.8	8.57	7.5	SA(s)bc?
NGC 1564	$1.030698 \pm 9 \cdot 10^{-5}$	134.81 ± 9.45	99.5	123.92	-10.89	-8.1	24.42	24.5	G
NGC 1630	$1.03083 \pm 8 \cdot 10^{-5}$	135.78 ± 9.52	96.5	124.44	-11.34	-8.3	27.94	29.0	SB0^+pec?
NGC 4172	$1.030983 \pm 3 \cdot 10^{-6}$	139.37 ± 9.76	132.4 ± 4.4	125.05	-14.32	-10.3	-7.35	-5.5	S?
a) oggetto considerato, ex database NED b) redshift (dove $\xi = z+1 = \lambda_0/\lambda_e$), ex database NED c) Hubble distance con $H_0 = 73 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ex database NED d) redshift-independent distance (mean distance), ex database NED, quando disponibili e) distanza calcolata in base a [A4.4_12] e [A4.4_19] f) scostamento tra le distanze c) ed e) in Mpc e in % g) scostamento tra le distanze d) ed e) in Mpc e in % h) note specifiche sull'oggetto considerato, ex database NED									

Una considerazione qualitativa sulla seguente *Figura 11* è che la curva [A4.4_12] abbia un andamento leggermente superiore alle distanze determinate con metodi non legati al redshift, quindi sia sottostimato il valore di [A4.4_19].

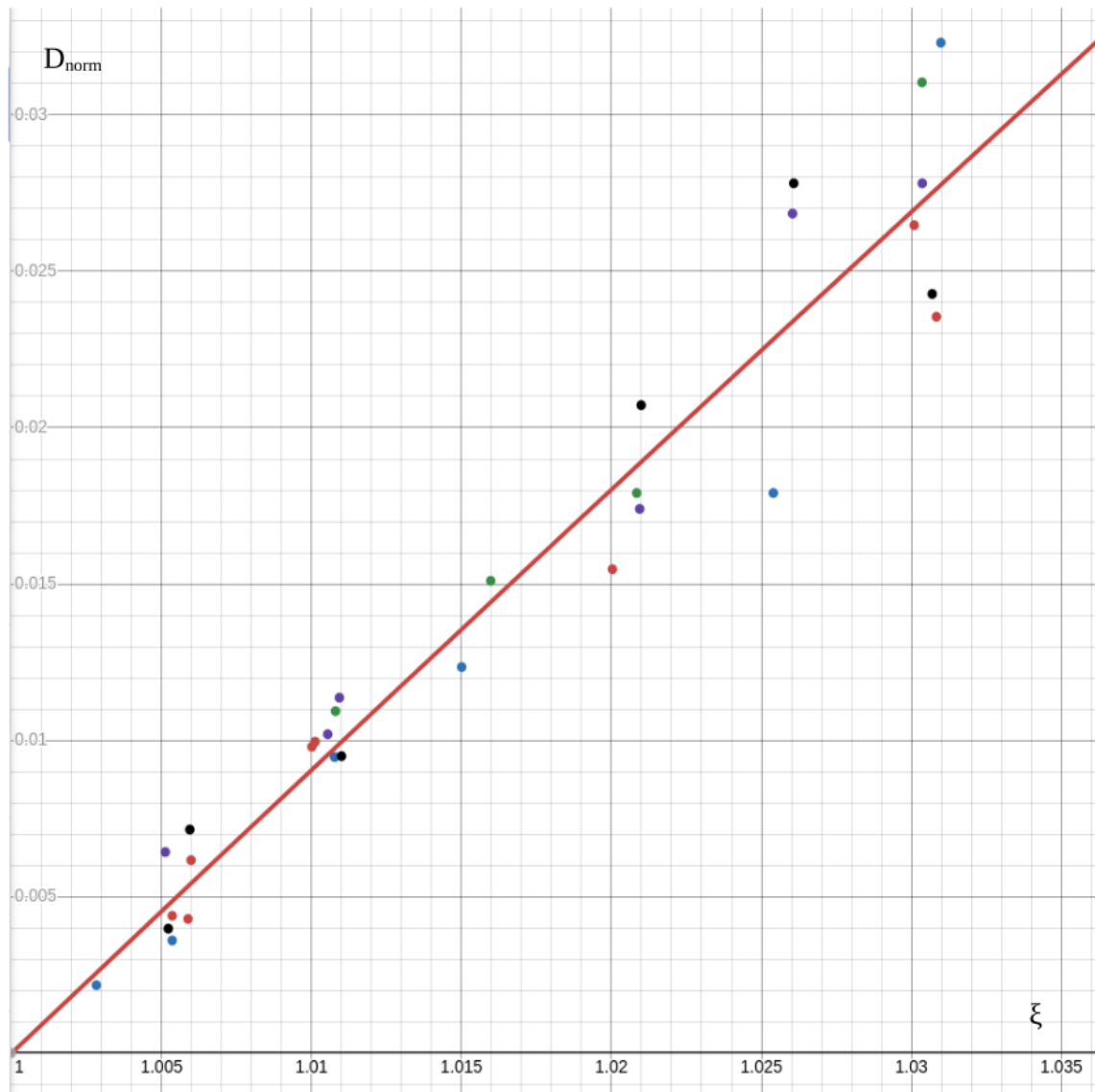
Figura 11



Nel grafico è tracciata in rosso la curva [A4.4_12] relativa alla *congettura URD*, con i punti colorati sono indicate le posizioni (normalizzate) che avrebbero nello stesso grafico le galassie in base alla distanza determinata con metodi non legati al redshift (cfr *Tabella 2*)

Mentre rispetto alla legge di Hubble-Lemaître la sottostima non può essere corretta con il valore di [A4.4_19], legato alla costante H_0 , nel caso delle distanze calcolate con metodi non legati al redshift la pendenza della curva [A4.4_12] può invece essere modificata correggendo il parametro α_{U^*} per interpolare al meglio le relative misure.

Figura 12



Nel grafico è tracciata come nella *Figura 10* in rosso la curva [A4.4_12] normalizzata relativa alla *congettura URD* utilizzando il parametro [A4.5_1], con i punti colorati sono indicate le posizioni (normalizzate) che avrebbero nello stesso grafico le galassie in base alla distanza determinata con metodi non legati al redshift (cfr *Tabella 2*)

Modificandolo in modo qualitativo, si ottiene il valore

$$\alpha'_{U\star} \approx 1.099 \quad \alpha_{U\star} \approx 1.099 \frac{H_0}{c} \approx 2.68 \cdot 10^{-4} \text{ [Mpc}^{-1}\text{]}, \quad [\text{A4.5}_1]$$

un valore che in effetti conferma la sottostima di circa il 10% del parametro H_0 che si può osservare anche prima facie rispetto alle distanze misurate con tecniche diverse dal redshift.

Per una conclusione sulla bozza di verifica della *congettura URD* alla prova dei dati osservativi, sempre mantenendo un profilo qualitativo pur trattandosi di misure, si osserva che il coefficiente di riferimento [A4.4_19] è stato utile per approcciare inizialmente i dati ma un valore più soddisfacente è rappresentato dal coefficiente [A4.5_1]⁵⁸⁰.

Con la consapevolezza dell'approssimazione delle verifiche effettuate, si può però affermare che la [A4.4_12] e il coefficiente [A4.5_1] possono essere utilizzati con i dati di redshift (senza ipotizzare l'espansione dell'universo) per stimare la distanza di sorgenti almeno fino a $z \sim 0.035$ ottenendo risultati *migliori* della legge di Hubble-Lemaître (che utilizza dati di redshift e l'ipotesi di espansione dell'universo), se confrontati con le distanze ottenute senza utilizzare il redshift; la legge di Hubble-Lemaître è rappresentata dalla retta $D_{norm} = \xi - 1$, non tracciata in *Figura 11* e in *Figura 12* ma facilmente immaginabile con pendenza di 45° , e risulta scostata dalle misure.

Questi confronti non costituiscono ancora una dimostrazione se non qualitativa delle congetture adottate (cfr sezione A4.4) ma possono essere una base iniziale sulla quale effettuare verifiche più ampie e approfondite.

⁵⁸⁰ Considerato il carattere affatto qualitativo delle misure, non è stato utilizzato un algoritmo matematico di interpolazione dei dati per ottenere il parametro α_{U^*} , necessario per una stima più precisa insieme a un campione più numeroso di dati osservativi

Allegato A5 Sui pregiudizi antropici

La consapevolezza della peculiarità dei punti di vista adottati nell'approfondimento, 'alternativi' rispetto alle opinioni o 'visioni' comuni, suggerisce l'opportunità di una sezione nella quale si approfondiscano i principali pregiudizi antropici che si ritiene abbiano influenzato (e tutt'ora influenzino) le questioni cosmologiche. L'integrazione di una breve panoramica storica supporta la loro definizione e le congetture proposte.

Il pregiudizio principale è la credenza, di origine psicologica o religiosa, che esista un creatore dell'universo. In qualche modo correlata a questa convinzione, «la rappresentazione che noi diamo dell'universo e delle sue leggi è influenzata da un inevitabile effetto di selezione: la nostra esistenza⁵⁸¹». Mentre è evidente la nostra esistenza, non lo è l'esistenza di principi finalistici e di priorità delle 'vicende' antropiche rispetto al resto dell'universo, come approfondito nel séguito. In generale si condivide il pensiero di Erwin Schrödinger, alla base di molti bias culturali:

What does happen often is that science suffices to jeopardize popular religious convictions, but not to replace them by anything else. This produces the grotesque phenomenon of scientifically trained, highly competent minds with an unbelievably childlike -undeveloped or atrophied- philosophical outlook.⁵⁸²

A proposito della creazione, la criticità non dipende dalla forma di questa entità creatrice, dalla sua bontà o malignità o nel fatto che si interessi personalmente dei destini individuali umani, ma nel fatto che esista, che *debba esistere* un'entità creatrice, la *causa prima*⁵⁸³. Questo bisogno, affatto umano nel senso che la Natura non ne ha bisogno⁵⁸⁴, sembra che abbia condizionato e condizioni anche la modellistica cosmologica, nella necessità di definire un *inizio* in un tempo finito, stimabile.

Effettivamente questo inizio, il *Big Bang* o la precedente inflazione, si ritiene causi più problemi ontologici di quelli che potrebbe risolvere, non dando risposte credibili⁵⁸⁵ principalmente su cosa esistesse prima, su cosa possa averli attivati, sui meccanismi di sviluppo

⁵⁸¹ [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 17

⁵⁸² [Schrödinger, 1956] pag. 96; da *Nature and the Greeks*, una serie di lezioni all'University College di Dublino tenute da Schrödinger nel febbraio 1950

⁵⁸³ Questione posta già dai pre-socratici e da Platone, affrontata poi da Aristotele nella sua analisi della causalità (cfr Allegato A3)

⁵⁸⁴ Si nota come sia assai diffusa da sempre (dalle antiche mitologie) la 'umanizzazione' dei bisogni esistenziali della Natura, ovvero l'attribuzione alla Natura delle necessità tipicamente umane, cfr le *Conclusioni epistemologiche* a proposito del tempo

⁵⁸⁵ Ad esempio il nuovo libro [Giudice, 2023] vorrebbe superare (in modo non chiaro) il problema della creazione, raccontando con grande sicumera molte interpretazioni del prima / durante / dopo il *Big Bang*, che dipendono ovviamente dalle attuali conoscenze sulle componenti del cosmo, salvo ricordare nella stessa pagina che non si sa cosa sia la materia oscura né l'energia oscura, la quasi totalità delle componenti l'universo, secondo le sue stesse congetture; e affermare sempre nella stessa pag. 110 che «non credere al Big Bang è come sostenere che la terra è piatta»; questo atteggiamento satura tutto il libro, nonostante la sua distanza con il *modello cosmologico standard*, e probabilmente raccoglie 'consensi' in un pubblico acritico sensibile alle 'pronunce' ex cathedra, rappresentando un esempio di quei *paradigmi* analizzati nelle *Conclusioni sociologiche*

iniziale, sullo stato dell'universo attuale (finito?). Il fatto che l'attuale modellistica lo 'spieghi' con maggiore o minore corrispondenza di parametri e congetture, appare una 'teoria non falsificabile', nel senso che è interamente costruita sulle osservazioni note (quando ci sono), non predice qualcosa di non noto, come dovrebbe fare una teoria scientifica. Si tratta sostanzialmente di complesse tautologie, dal personale punto di vista.

Una potenziale criticità sulla difficoltà implicita nel poter verificare scenari evolutivi (non avendo a disposizione miliardi di anni per le osservazioni) è facilmente risolvibile considerando la disponibilità di nuovi e più potenti mezzi esplorativi di ricerca (ad esempio il James Webb Space Telescope, JWST) che potrebbero verificare *previsioni* teoriche in ambiti precedentemente non esplorati. Si nota piuttosto il contrario, con la scoperta continua di galassie e sorgenti molto remote (nel senso spaziale e soprattutto temporale) in situazioni evolutive non compatibili con la loro 'posizione' nella scala temporale dettata dal *modello cosmologico standard*, negli studi che per giustificare le nuove osservazioni spesso ipotizzano (a posteriori) errori nella modellizzazione evolutiva stellare o galattica ma non del modello cosmologico⁵⁸⁶, o addirittura la necessità di nuova fisica⁵⁸⁷.

Anche senza addentrarsi nelle varianti delle teorie inflazionistiche riassunte da Giudice, davvero 'creative', si potrebbe obiettare che il *Big Bang* è una conseguenza anche dell'attuale *presunta* espansione dell'universo, che quindi *deve* aver avuto un inizio ma più che una prova a favore si ritiene una criticità⁵⁸⁸ e comunque senza l'*esigenza pregiudiziale* di un inizio si sarebbero potuti pensare anche modelli diversi, probabilmente costruiti anch'essi sui dati noti quindi 'verosimilmente funzionanti'.

La propria visione, descritta in particolare nell'Allegato A4 al punto 4.4, immagina un universo infinito, senza particolari limitazioni temporali, nel quale valgono i principi della termodinamica, seppure con la criticità rappresentata dai fattori evolutivi, che palesemente non possono essere in atto, come li conosciamo ora, 'da un tempo infinito'. A parte questo non secondario aspetto (analizzato nel citato Allegato A4), viene evitata la 'necessità' della creazione.

Da un punto di vista puramente logico, attribuire un'esistenza eterna al cosmo o presupporre una sua remota creazione (divina o meno) in un contesto di eternità fa ben poca differenza.

A proposito della creazione, premesso che la teoria del *Big Bang* (nata negli anni '60) di fatto non spiega la creazione in sé, in epoca moderna oltre alle teorie dell'universo stazionario (cfr § 9) ci furono alcune proposte molto alternative:

Edward Tryon [1940-2019, ...] suggested in 1973 that the universe has appeared from 'nowhere' without violating any conservation laws. [...] By suggesting that the net energy of the universe was indeed zero, Tryon could produce a long-lived universe from a quantum fluctuation. The zero net energy came about because the positive mass-energy of a piece of matter mc^2 would be cancelled by its contribution to the negative gravitational energy [...]

⁵⁸⁶ Cfr ad esempio [McGaugh et al., 2024] e [Wright, 2024], un articolo che analizza una serie di altri studi sulle osservazioni di JWST

⁵⁸⁷ Un approfondimento molto ampio dell'argomento è presentato in [di Valentino et al., 2025] nella sezione *JWST anomalies*, pag. 104

⁵⁸⁸ Si ritiene una criticità perché introduce più problemi di quelli che risolve, come appena affermato, oltre a dipendere a sua volta fortemente da una congettura, l'espansione dell'universo, che potrebbe essere falsificata

[...] In the wake of inflation theory, Alexander Vilenkin proposed in 1982 that the universe was created by a kind of tunnel effect, as known from quantum mechanics. [...] Vilenkin's model did not have a *Big Bang* singularity and did not require any initial conditions.

[... In 1983] James Hartle (1939-2023) and Hawking developed a wave function of the universe and argued that it represented the amplitude of the universe coming into existence from a finite quantum fuzz. There would be no problem of creation, because near $t=0$ in the quantum fuzz, the very notion of space and time would lose its meaning. By being self-contained, the universe would be neither created nor destroyed.

[...] Some of the cosmological scenarios proposed by string theorists have in common with the Hartle-Hawking model that they avoid the troublesome cosmic beginning. Quantum strings have a non zero size and cannot collapse to an infinitesimal point, which provides a way to eliminate the initial singularity.⁵⁸⁹

Facendo un breve excursus storico sul coinvolgimento antropico, limitato sostanzialmente alle considerazioni cosmologiche⁵⁹⁰, si ricorda il primo filosofo che immaginò la Natura governata da leggi che potessero essere studiate, Anassimandro⁵⁹¹ (610-546), discepolo di Talete (640 circa-540 circa) ma le prime idee che testimoniano l'attribuzione di ordine e armonia naturali a un *disegno intelligente* piuttosto che al caso risalgono probabilmente ad Anassagora (496-428 circa), che attribuisce la causa iniziale a una sorta di 'mente cosmica'⁵⁹² ma non si sofferma sulle finalità dell'esistente.

Nell'approfondimento delle interpretazioni, si possono «distinguere argomenti *teleologici*, secondo i quali l'esistenza di leggi causali implica che l'ordine debba avere un fine, e argomenti *eutassiologici*, in base ai quali l'ordine deve avere una causa, che è pianificata. Mentre i primi si fondano sulla nozione che il mondo è stato progettato per nostro beneficio immediato o per qualche fine ultimo, i secondi si limitano a sottolineare l'armonia della sua composizione.»⁵⁹³

Platone (427-347) sosteneva che l'ordine della materia proveniva da una intelligenza ed era mantenuto da essa, con un modello cosmologico basato su sfere concentriche messe in moto da una divinità, ma nel contempo immaginava l'universo come una struttura organica, teleologicamente ordinata. La successiva diversa visione di Aristotele, fondata sul principio di una Natura intelligente che opera secondo un disegno prestabilito e non su cause esterne, era sicuramente legata ai suoi studi sul mondo animale e vegetale e tra le sue *cause* quella principale era la causa finale (cfr Allegato A3). Anche Aristotele immaginava il cosmo come una serie di gusci sferici con al centro la Terra, immobile.

Si devono omettere molti contributi storici per limiti di spazio, ma si ricorda il ruolo di Francis Bacon (1561-1626), secondo il quale «le cause finali possono avere un ruolo nella

⁵⁸⁹ [Kragh, 2007] pag. 240-242

⁵⁹⁰ Per limiti di spazio si deve rinunciare all'interessante analisi della teleologia moderna relativa alla biologia e in genere alla vita (non solo 'intelligente'), a partire dal biologo Jacques Monod (1910-1976) che scrisse nel 1970 *Le hasard et la nécessité* (Il caso e la necessità)

⁵⁹¹ Cfr l'interessante saggio [Rovelli, 2014]

⁵⁹² In questa sezione si fa riferimento ai capitoli introduttivi di [Barrow e Tipler, 1986]

⁵⁹³ [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 51; terminologia introdotta da Lewis Ezra Hicks (1839-1921) nel 1883

metafisica, ma l'esperienza ci porta a escluderle nello studio della natura. Le sue idee segnano l'inizio di una tendenza che è comune alla maggioranza dei moderni scienziati; che è di non considerare le domande "ultime" per concentrarsi su questioni più circoscritte e sulla connessione tra cause materiali e cause efficienti.»⁵⁹⁴ Si ritiene che questo non impedisca loro di essere condizionati nello sviluppo di modelli che, se non cercano esplicitamente una *causa prima*, però la presuppongono.

Sempre Francis Bacon, rifacendosi anche al *Novum Organum* del suo omonimo Roger Bacon (1214 circa-1292 circa) individuava "idoli" di origine umana «che potevano far deviare il cammino che porta alla vera conoscenza. [...] Gli *idola tribus*, errori genericamente inerenti al nostro modo di pensare, come la tendenza a ricercare regolarità e ordine in natura anche dove non ve ne sono, e gli *idola theatri*, feticci costruiti da sistemi di pensiero tramandati e venerati.»

L'attualità e fondatezza di queste critiche di quasi otto secoli fa è notevole, pensando alle criticità dei *paradigmi* evidenziate nelle proprie *Conclusioni sociologiche*.

Per trovare un forte oppositore ai principi finalistici bisogna giungere a Baruch Spinoza (1632-1677), quasi contemporaneo di Isaac Newton, che invece era difensore della 'teleologia antropocentrica' (come potrebbe essere definita più modernamente), di un ordine creato da un dio (che non era quello della dottrina cristiana) e mantenuto identico fino ai nostri giorni; Newton era critico anche verso Cartesio per l'omissione da parte di costui delle cause finali nella sua fisica.

Nel secolo seguente Immanuel Kant esaminò dettagliatamente *il progetto*, definito "fisico-teologico", nella sua *Critica della ragion pura*, sostenendo però che il fine ultimo della natura fosse l'*ordine morale*, individuabile solo da una "teleologia etica", non potendo le cause meccaniche spiegare l'origine della vita e l'organizzazione degli esseri viventi.

La teoria evoluzionista sviluppata da Charles Darwin (1809-1882) nell'*Origine delle specie* (pubblicato nel 1859) rappresentò sia un colpo alla precedente teleologia sia una possibilità di conciliazione tra la meccanica deterministica e una teleologia che spostasse l'attenzione alle cause iniziali, per le quali c'era sempre bisogno di un creatore. Oppositori dell'evoluzionismo furono sia Lord Kelvin (1824-1907) che riteneva sottovalutato l'aspetto progettuale nella teoria evoluzionista e troppo breve l'età della Terra (assai sottostimata all'epoca) per consentire all'evoluzione di generare le specie esistenti, sia James Clerk Maxwell per il quale l'immutabilità delle *molecole*⁵⁹⁵ non avrebbe potuto giustificare un cambiamento continuo.

Non si approfondiscono le interessanti analisi di Paul Janet (1823-1899) nel suo *Les causes finales*⁵⁹⁶ ma si osserva come esse rappresentino «la fine dell'approccio premoderno al pro-

⁵⁹⁴ [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 73, anche per la citazione successiva

⁵⁹⁵ Venivano chiamate così «le pietre fondamentali dell'universo materiale», come scrisse Maxwell stesso in una pubblicazione del 1873, trent'anni prima che Thomson cominciasse a sperimentare davvero le interazioni su scala atomica e a ipotizzare i primi modelli che tenessero conto degli esperimenti; vi fu però, tra gli scienziati, anche chi non si convinse mai dell'esistenza degli atomi, come Ernst Mach (che morì nel 1916, quando l'esistenza degli atomi era stata ormai dimostrata dagli esperimenti)

⁵⁹⁶ (Librairie Germer Baillière et Cie, 1876)

blema delle cause finali»⁵⁹⁷. Nell'esaminare le conseguenze delle varie teorie della conoscenza per la sua dottrina delle cause finali, egli approfondisce anche la posizione «[...] kantiana secondo la quale la conoscenza del mondo è una proprietà dell'osservatore e non dell'osservato», per concludere «con Kant che il fine supremo dell'universo non può essere che il fine morale.» Diverso era il pensiero di Russel: «The universe may have a purpose, but nothing that we know suggests that, if so, this purpose has any similarity to ours.»⁵⁹⁸

La connessione fra teleologia e ordine sociale spontaneo, sottolineata da pensatori come Friedrich von Hayek (1899-1992) e altri di formazione socio-economica, attraverso considerazioni sul comportamento cooperativo analizzato anche dalla *teoria dei giochi*, evidenziano «da un punto di vista speculativo [...] l'importanza della teleologia per la formazione dell'ordine [e] suggeriscono che, nella misura in cui l'universo fisico è assimilabile a un modello biologico o sociale (idea base del principio antropico partecipatorio di Wheeler), il suo *stato* a un dato istante non è determinato solo da quello in un tempo immediatamente precedente, che è quanto si suppone di solito in fisica, ma dipende da tutti gli stati precedenti e da tutti quelli futuri.»⁵⁹⁹

Una delle più diffuse 'prove teologiche' è l'*argomento cosmologico*, basato su due ipotesi: esiste qualcosa e deve esserci un motivo per tutto ciò che esiste; ricorrendo in genere a una gerarchia di cause intese come 'ragioni' alla base degli eventi percepiti dalla mente umana. Ma come osservano Barrow e Tipler, il principale pregiudizio antropico (che si potrebbe dire 'presunzione antropica') è sempre lo stesso:

Insistendo su una gerarchia di cause isomorfa alla piramide delle cause costruite dagli esseri umani, l'argomento cosmologico è analogo a quello teleologico, poichè anche questo postula un isomorfismo tra l'ordine osservato nell'universo e quello creato dagli esseri umani nella produzione di artefatti. Entrambi i ragionamenti usano l'attività mentale degli esseri umani come modello per tutto l'universo.⁶⁰⁰

Inoltre la domanda sul 'perché esista qualcosa anziché il nulla' ammette risposta solo se c'è qualcosa la cui esistenza è logicamente necessaria, ovvero qualcosa la cui non-esistenza sarebbe una contraddizione logica; di fatto si ritorna alla prova ontologica, variamente accettata dai filosofi, dalla sua introduzione da parte di Anselmo d'Aosta (1033-1109)⁶⁰¹, modernamente considerata non valida come espresso da Kant: «l'esistenza non è una proprietà ma un presupposto perché qualcosa possa avere proprietà».⁶⁰²

⁵⁹⁷ «L'opera di Janet è caratterizzata da un'ampia e aperta discussione di possibili obiezioni a un sistema di cause finali impostato in modo corretto [...]»; [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 109 per entrambe le citazioni, pag. 111 per la successiva e pag. 112 per quella dopo

⁵⁹⁸ Bertrand Russel in *Why I am not a Christian* (Unwin, London, 1957) pag. 75, citato da [Kragh, 2007] pag. 239

⁵⁹⁹ [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 123

⁶⁰⁰ [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 125

⁶⁰¹ Si tratta di un ragionamento a priori, basato sul poter pensare a dio come a "qualcosa di cui non si può pensare nulla di più grande"; Anselmo sosteneva che questo concetto, applicabile solo alla 'perfezione massima', implicava l'esistenza di tale entità, poichè un'entità esistente solo nel pensiero sarebbe inferiore a un'entità esistente anche nella realtà

⁶⁰² [Barrow e Tipler, 1986] edizione italiana pag. 127; ovvero non è possibile dedurre l'esistenza di un ente in base alla sua definizione

Ciò non ostante, la necessità dell'esistenza dell'universo (se non di un dio che lo abbia creato) e della sua finalità (a favore antropico) viene ancora sostenuta; si conviene che esulando dalla logica e sconfinando nella credenza *tutto* possa valere nel pensiero individuale, ma ciò non riguarda questo approfondimento e la ricerca scientifica con *logica oggettiva*⁶⁰³.

⁶⁰³ Logica oggettiva che si può pensare nell'interpretazione hegeliana, indipendente dalla coscienza individuale: «Il compito della logica è quindi quello di ricostruire i concetti o categorie nel pensiero e attraverso il pensiero, senza fare alcun riferimento alla sensibilità o alla natura.» [dal dizionario di filosofia Treccani online]

Allegato A6 Unità di misura e parametri cosmologici di riferimento⁶⁰⁴ [SI]

Anno	yr	$3.156 \cdot 10^7$ s
Carica elementare dell'elettrone [☆]	e	$-1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C
Costante dello spostamento di Wien	b_W	$2.898 \cdot 10^{-3}$ m K
Costante di Boltzman [☆]	k_B	$1.380649 \cdot 10^{-23}$ J K ⁻¹
Costante di gravitazione universale	G	$(6.6741 \pm 0.0003) \cdot 10^{-11}$ m ³ Kg ⁻¹ s ⁻²
Costante di Hubble	H_0	73.2 ± 1.3 Km s ⁻¹ Mpc ⁻¹ [Riess, 2021]
Costante di struttura fine	α	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} = 7.297 \cdot 10^{-3} \sim 1/137$
Costante di Planck [☆]	h	$6.62607015 \cdot 10^{-34}$ J s J Hz ⁻¹
Costante dielettrica del vuoto	ϵ_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$ C ² N ⁻¹ m ⁻²
Densità di massa barionica universo locale	ρ_0	$3.4 \cdot 10^{-29}$ Kg m ⁻³ [Franceschini, 2018]
Lunghezza d'onda Compton	λ_C	$\frac{h}{m_0 c}$ m_0 massa della particella
Massa dell'elettrone	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$ Kg
MCR picco lunghezza d'onda di <i>corpo nero</i>	λ_{MCR}	$1.9 \cdot 10^{-3}$ m
MCR temperatura di <i>corpo nero</i> ⁶⁰⁵	T_{MCR}	2.73 K
Numero di Avogadro	N_A	$6.022 \cdot 10^{23}$ mol ⁻¹
Parsec	pc	$3.08 \cdot 10^{16}$ m (3.1 lyr)
Raggio di Bohr	a_0	$\frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{m_e c \alpha} = 0.529 \cdot 10^{-10}$ m
Raggio di Hubble [17_1c]	R_H	$4.3 \cdot 10^9$ pc
Tempo di Hubble [17_1b]	τ	$13.3 \cdot 10^9$ yr = $4.2 \cdot 10^{17}$ s
Velocità (<i>round-trip</i>) della luce nel vuoto [☆]	c	$2.99792458 \cdot 10^8$ m s ⁻¹

⁶⁰⁴ A parte i valori esatti per definizione, indicati con "☆", le altre quantità (esprese nel SI) si considerano valori di riferimento per le simulazioni delle congetture, più che misure effettive

⁶⁰⁵ Entrambe le misure della radiazione MCR (temperatura e picco lunghezza d'onda) sono basate sullo spettrofotometro FIRAS (Far-Infrared Absolute Spectrophotometer) appositamente installato sul satellite COBE (Cosmic Background Explorer) dedicato a queste misurazioni

Letteratura e fonti

Adams, 2002 - Douglas Adams, *The salmon of doubt* (Completely Unexpected Production, 2002)

Agostino, 401 - Aurelio Agostino d'Ippona, *Confessiones* (*Confessioni*, edizione italiana a cura di Aldo Moda)

Allori, Dorato, Laudisa, Zanghi, 2005 - Valia Allori, Mauro Dorato, Federico Laudisa, Nino Zanghi, *La natura delle cose, Introduzione ai fondamenti e alla filosofia della fisica* (Frecce, 2005; edizione considerata Carocci Editore, 2019)

Bachelard, 1962 - Gaston Bachelard, *La filosofia del non. Saggio di una filosofia del nuovo spirito scientifico* (Armando Editore, Roma, 1998); edizione originale *La philosophie du non, Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique* (Press Universitaires de France, Paris, 1962)

Barbour, 1999 - Julian Barbour, *La fine del tempo. La rivoluzione fisica prossima ventura* (Einaudi, 2000); edizione originale *The End of Time. The Next Revolution in Physics* (1999)

Barbour, 2020 - Julian Barbour, *The Janus Point: A New Theory of Time* (Bodley Head, 2020)

Barrow e Tipler, 1986 - John Barrow e Frank Tipler, *Il principio antropico* (edizione aggiornata Adelphi Edizioni spa, 2002); edizione originale *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford University Press, 1986);

Battaglia, 2005 - Pippo Battaglia, *Il tempo nelle cosmogonie e nelle cosmologie*, in *L'idea del tempo*, raccolta di scritti di Margherita Hack, Pippo Battaglia, Rosolino Buccheri (Utet, Torino, 2005)

Bell, 2004 - John Stewart Bell, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica* (Adelphi, Milano, 2010); edizione originale (II ed) *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 2004)

Bergson, 1907 - Henri Louis Bergson, *L'evoluzione creatrice* (La scuola Editrice, Brescia, 1979); edizione originale *L'Évolution créatrice* (Alcan, 1907)

Bohr, 1958 - Niels Bohr, *I Quanti e la Vita* (Bollati Boringhieri, 2012), raccolta di testi divulgativi di Niels Bohr, originariamente pubblicati nei volumi *Atomtheorie und Naturbeschreibung* (Springer 1931), *Atomic Physics and Human Knowledge* (Wiley, 1958), *Essay 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge* (1963)

Boltzmann, 1895 - Ludwig Boltzmann, *On certain questions of the theory of gases* (Nature, pag. 413-415, 1895)

Boltzmann, 1905 - Ludwig Boltzmann, *Modelli matematici, fisica e filosofia. Scritti divulgativi* (Bollati Boringhieri, 1999); edizione originale *Populäre Schriften* (Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1905)

Boole, 1847 - George Boole, *L'analisi matematica della Logica* (Universale Bollati Boringhieri, Torino 1993); edizione originale *The Mathematical Analysis of Logic* (Macmillan, Barclay & Macmillan, Cambridge, 1847)

Brodsky, 2005 - Stanley Brodsky, *Photon Photon Collisions. Past and Future* (Acta Physica Polonica Series B, 2005)

Brout, Englert e Gunzig, 1978 - Robert Brout, François Englert ed Edgard Gunzig, *The creation of the universe as a quantum phenomenon* (Annals of Physics, 78-106, 1978)

Bruno, 1584a - Giordano Bruno, *De la causa, principio et uno*, secondo dialogo filosofico del ciclo dei *Dialoghi cosmologici londinesi* (stampato a Londra nel 1584; ebook edizione liberliber.it tratto dalla edizione Einaudi, 1973)

Bruno, 1584b - Giordano Bruno, *De l'infinito, universo e mondi*, terzo dialogo filosofico del ciclo dei *dialoghi cosmologici londinesi* (stampato a Londra nel 1584; Enigma edizioni, 2021)

Buccheri, 2005 - Rosolino Buccheri, *Le frecce del tempo*, in *L'idea del tempo*, raccolta di scritti di Margherita Hack, Pippo Battaglia, Rosolino Buccheri (Utet, Torino, 2005)

Capra, 1975 - Fritjof Capra, *Il Tao della fisica* (Adelphi Edizioni spa, 1982); edizione originale *The Tao of Physics* (1975)

Chandrasekhar e Wright, 1961 - Subrahmanyan Chandrasekhar e James Wright, *The geodesics in Gödel's universe* (Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Vol. 47, No. 3, 1961)

Chandrasekhar, 1995 - Subrahmanyan Chandrasekhar, *Newton's Principia for the common reader* (Oxford University Press, Inc., 1995)

Christensen, 1997 - Clayton Christensen, *Il dilemma dell'innovatore* (Franco Angeli, 2001); edizione originale *The innovator's dilemma, When New Technologies cause Great Firm to Fail* (Harvard Business School Press, 1997)

Ciufolini e Wheeler, 1995 - Ignazio Ciufolini and John Archibald Wheeler, *Gravitation and Inertia* (Princeton University Press, 1995)

Cristianini, 2023 - Nello Cristianini, *La scorciatoia - Come le macchine sono diventate intelligenti senza pensare in modo umano* (Il Mulino, Bologna, 2023)

Cohen e Wertheim, 1973 - Ralph Louis Cohen e Gunther Klaus Wertheim, *A Limit on the Redshift due to Interaction with Electromagnetic Radiation* (Nature Vol. 241 109, 1973)

Coles e Lucchin, 2002 - Peter Coles e Francesco Lucchin, *Cosmology - The Origin and Evolution of Cosmic Structure* (John Wiley and Sons Ltd, second edition 2002)

Danielis, 1996 - Adriana Danielis, *Per una lettura istituzionale del 'Begriffsschrift' di Frege* (Edizioni Lint, Trieste, 1996)

Davies, 1974 - Paul Davies, *The Physics of Time Asymmetry* (University of California Press Berkeley and Los Angeles, 1974)

Davies, 1995 - Paul Davies, *I misteri del tempo. L'universo dopo Einstein* (Mondadori 1996); edizione originale *About Time* (1995)

de Broglie, 1937 - Louis de Broglie, *Materia e luce* (Bompiani, Milano, 1940), edizione originale *Matière et lumière* (Albin Michel, Paris, 1937)

di Valentino et al., 2025 - Eleonora di Valentino et al., *The CosmoVerse White Paper: Addressing observational tensions in cosmology with systematics and fundamental physics* (astro-ph.co, arXiv 2504.01669V2)

Dieks, 2006 - Dennis Dieks, *Becoming, Relativity and Locality in The Ontology of Spacetime* (Elsevier, 2006)

Dirac, 1958 - Paul Adrien Maurice Dirac, *The principles of Quantum Mechanics* IV Edition (Clarendon Press, Oxford, UK, 1958)

Dirac, 2019 - Paul Adrien Maurice Dirac, *La bellezza come metodo, Raccolta di saggi e riflessioni su fisica e matematica di P.A.M. Dirac*, a cura di Vincenzo Barone (Raffaello Cortina Editore, 2019)

Dorato, 2013 - Mauro Dorato, *Che cos'è il tempo? Einstein, Gödel e l'esperienza comune* (Carrocci Editore, Roma, 2013)

Edwards, 1963 - W.F. Edwards, *Special Relativity in Anisotropic Space* (American Journal of Physics, 31, 482–489, 1963)

Einstein, 1905a - Albert Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Annalen der Physik, 17:891, 1905), tradotto come *On the Electrodynamics of Moving Bodies* (George Baker and Wilfrid Perret, 1923)

Einstein, 1905b - Albert Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?* (Annalen der Physik, 18:639, 1905), tradotto in *The Principle of Relativity* (Methuen and Co. Ltd, London 1923), col titolo *Does the inertia of a body depend upon its energy-content?*

Einstein, 1934 - Albert Einstein, *Come io vedo il mondo* (Newton Compton Editori, 1975); edizione originale *Mein Weltbild* (1934)

Einstein, 1961 - Albert Einstein, *Relativity: the Special and the General Theory* (Princeton University Press, 100th anniversary edition, 2015; edizione originale Hebrew University of Jerusalem, 1961)

EPR, 1935 - Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality considered complete?* (Physical Review, 1935, pag. 777-80)

Faggin, 2019 - Federico Faggin, *Silicio* (Mondadori, 2019)

Faggin, 2022 - Federico Faggin, *Irriducibile, La coscienza, la vita, i computer e la nostra natura* (Mondadori Libri spa, 2022)

Fall e Jones, 1976 - Michael Fall e Bernard Jones, *Isotropic cosmic expansion and the Rubin-Ford effect* (Nature, Vol. 262 457-160, 1976)

Feyerabend, 1975 - Paul Karl Feyerabend, *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza* (Giangiacomo Feltrinelli Editore, Milano, 1979); edizione originale *Against method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* (New Left books, 1975, revised edition published by Verso, London, 1988)

Finlay-Freundlich, 1954 - Erwin Finlay-Freundlich, *Red-Shifts in the Spectra of Celestial Bodies* (Proceedings of the Physical Society, A, vol 67, n. 2, 1954)

Franceschini, 2018 - Alberto Franceschini, *Corso di Cosmologia* (Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia, dispensa anno accademico 2018-19)

Freedman, 2021 - Wendy Freedman, *Measurements of the Hubble Constant: Tensions in Perspective* (Astrophysical Journal, 2021, June 23)

Galilei, 1632 - Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (edizione originale 1632; prima edizione Rizzoli BUR, Mondadori 2008)

Galliano et. al, 2018 - Frédéric Galliano, Maud Galametz, Anthony Jones, *The Interstellar Dust Properties of Nearby Galaxies* (Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 56, pag. 673-713)

Giorello et al., 2014 - Giulio Giorello et al., *Matematica ribelle. Le due vite di Alexander Grothendieck* (RCS MediaGroup spa, 2014)

Giudice, 2023 - Gian Francesco Giudice, *Prima del Big Bang. Come è iniziato l'universo e cosa è avvenuto prima* (BUR Rizzoli, 2023)

Gödel, 1949a - Kurt Gödel, *A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy*, in *Albert Einstein - Philosopher-Scientist* (Schilpp, Evanston, 1949, pag. 557-562)

Gödel, 1949b - Kurt Gödel, *A New Type of Cosmological Solutions of Einstein's Field Equations of Gravitation* (Review of Modern Physics, n. 21, 447, 1949)

Grant, 1996 - Edward Grant, *Le origini medievali della scienza moderna* (Einaudi editore, Torino, 2001); edizione originale *The foundations of Modern science in the Middle Ages, Their Religions, Institutional, and Intellectual Contexts* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996)

Greene, 2004 - Brian Greene, *La trama del cosmo* (Giulio Einaudi Editore, 2004); edizione originale *The Fabric of Cosmos: Space, Time and the Texture of Reality* (Alfred A. Knopf, New York, 2004)

Goldhaber, 2001 - Gerson Goldhaber et al., *Timescale Stretch Parameterization of Type Ia Supernova B-band Light Curves*, (The Astrophysical Journal, 2001)

Hartwick, 1974 - F. D. A. Hartwick, *Interstellar Absorption and an apparent anisotropy in the Hubble expansion* (The Astrophysical Journal, 195: L7-L9, 1975)

Heidegger, 1926 - Martin Heidegger, *Essere e tempo* (Mondadori, 2016); edizione originale *Sein und Zeit* (1926)

Heisenberg, 1955 - Werner Heisenberg, *The physicist's Conception of Nature* (Beaverbrook Newspaper, London 1962); edizione originale *Das Naturbild der Heutigen Physik* (Rowohlt, 1955)

Heisenberg, 1958 - Werner Heisenberg, *Fisica e Filosofia* (Il Saggiatore, Milano 1961); edizione originale *Physics and Philosophy* (1958)

Hobbs, 2012 - George Hobbs, *Developing a pulsar-based time standard* (Highlights of Astronomy, Vol. 16, 2012)

Horn, 1995 - Cristoph Horn, *Sant'Agostino* (Il Mulino, Bologna, 2024); edizione originale *Augustinus* (Beck, Munchen, 1995)

Hossenfelder, 2018 - Sabine Hossenfelder, *Lost in Math. How beauty leads physics astray* (Basic books, New York, 2018)

Hossenfelder, 2022 - Sabine Hossenfelder, *Existential Physics: A Scientist's Guide to Life's Biggest Questions* (Atlantic Books, 2022)

Hubble, 1929 - Edwin Hubble, *A Relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae* (National Academy of Sciences of the USA, Volume 15, Issue 3, pp. 168-173, 1929)

Hubble e Tolman, 1935 - Edwin Hubble, Richard Tolman, *Two methods of investigating the nature of the nebular red-shift* (Astrophysical Journal, vol. 82, pp. 302-337, 1935)

Hubble, 1947 - Edwin Hubble, *The 200 inch telescope and some problems it may solve* (Astronomical Society of the Pacific, Vol. 59, No. 349, August 1947)

Jacobson e Mattingly, 2004 - Ted Jacobson e David Mattingly, *Einstein-Aether Waves* (Physical Review, D70:024003, 2004)

Jaakkola et al., 1975 - Tommi Jaakkola, M. Moles, Jean-Pierre Vigier, Jean-Claude Pecker e Wolfgang Yourgrau, *Cosmological Implications of Anomalous Redshifts. A Possible Working Hypothesis* (Foundations of Physics, Vol. 5, No. 2, 1975)

Jaakkola e Pecker, 1976 - Tommi Jaakkola, M. Moles e Jean-Claude Pecker, *Additional evidence and possible interpretation of angular redshift anisotropy* (Royal Astronomical Society 177, 191-213, 1976)

Jammer, 2006 - Max Jammer, *Concept of Simultaneity, from Antiquity to Einstein and Beyond* (The John Hopkins University Press, Baltimore, 2006)

Jammer, 1954 - Max Jammer, *Storia del concetto di spazio* (Feltrinelli, Milano 1963); edizione originale *The History of Theories of Space in Physics* (Harvard University Press, Cambridge Mass., 1954)

Karoji e Nottale, 1976 - H. Karoji e Laurent Nottale, *Possible implications of the Rubin-Ford effect* (Nature, Vol. 259, 31-33, 1976)

Kemeny, 1959 - John George Kemeny, *Il filosofo e la scienza* (Il Saggiatore, Milano 1972); edizione originale *Philosopher looks at Science* (Van Nostrand Company, 1959)

Kastner, 2018 - Ruth Kastner, Stuart Kauffman e Michael Epperson, *Taking Heisenberg's potential seriously* (International Journal of Quantum Foundations, 2018, arXiv: 1709.03595)

Kosiński, 2006 - Piotr Kosiński, *Note on clock synchronization and Edwards transformations* (Foundations of Physics Letters, Vol. 19, No. 4, 2006)

Kostro, 2000 - Ludwik Kostro, *Einstein e l'etere* (edizioni Dedalo, Bari, 2001) edizione originale *Einstein and the Ether* (Apeiron, 2000)

Kragh, 2007 - Helge Kragh, *Conceptions of Cosmos. From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology* (Oxford University Press, UK, 2007)

Kuhn, 1962 - Thomas Samuel Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (Giulio Einaudi Editore spa, Torino 2009); edizione originale *The Structure of Scientific Revolutions* (The University of Chicago, 1962 e 1970)

Kuhn, 1997 - Thomas Samuel Kuhn, *La tensione essenziale*, a cura di C.Bartocci e G.Giorello, (Giulio Einaudi Editore spa, Torino 2006); edizione originale *The Essential Tension* (The University of Chicago 1997) e per lo scritto *Che cosa sono le rivoluzioni scientifiche*, *The road since structure* (The University of Chicago, 2000)

Lambert e Brittan, 1979 - Karel Lambert e Gordon Brittan, *Introduzione alla Filosofia della Scienza* (Universale Scientifica Boringhieri, Torino 1981); edizione originale *An introduction to the Philosophy of Science* (Ridgeview Publishing, Reseda California, 1979)

Landau e Lifšits, 1947a - Lev Landau e Evgenij Lifšits, *Fisica Teorica II, Teoria dei campi* (prima edizione Editori riuniti, 2076); edizione originale (Nauka, Mosca, 1947)

Landau e Lifšits, 1947b - Lev Landau e Evgenij Lifšits, *Fisica Teorica III, Meccanica quantistica* (terza edizione Editori riuniti, 1975); edizione originale *Теоретическая физика, Квантовая механика* (Nauka, Mosca, 1947)

Landau e Lifšits, 1972 - Lev Landau e Evgenij Lifšits, *Fisica Teorica V, Fisica Statistica parte prima* (prima edizione Editori riuniti, 2010); edizione originale (Nauka, Mosca, 1972)

Laudisa, 1999 - Federico Laudisa, *La causalità* (Carocci editore, Roma, 1999); seconda edizione Carocci editore, 2010

Laudisa, 2002 - Federico Laudisa, *La causalità nella fisica del XX secolo: una prospettiva filosofica* (Annuario di storia della metafisica, 2, pag. 25-48, 2002)

Le Poidevin, 1992 - Robin Le Poidevin, *On the Acausality of Time, Space, and Space-Time* (Analysis, vol. 52 n. 3, pag. 146-154, 1992)

Lemaître, 1927 - Georges Lemaître, *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* (Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, 1927, A47, p. 49-59)

Lewis e Brewer, 2023 - Geraint Lewis e Brendon Brewer, *Detection of the Cosmological Time Dilation of High Redshift Quasars* (Nature, 2023)

- Lolli, 2016** - Gabriele Lolli, *Tavoli, sedie, boccali di birra. David Hilbert e la matematica del Novecento* (Raffaello Cortina Editore, 2016)
- Longo, 2017** - Anna Rita Longo (a cura di), *Galileo Galilei, La matematica, linguaggio della Natura* (National Geographic su licenza Out of Nowhere srl, 2017)
- López-Corredoira, 2013** - Martín López-Corredoira, *The Twilight of the Scientific Age* (BrownWalker Press, Florida Usa, 2013)
- López-Corredoira, 2017** - Martín López-Corredoira, *Tests and Problems of the Standard Model in Cosmology* (Foundations of Physics Vol 47:711-768, 2017)
- López-Corredoira, 2019** - Martín López-Corredoira, *Observational Cosmology: caveats and open questions in the standard model* (Recent Research Developments in Astronomy & Astrophysics, vol. 1, S. G. Panadalai, Ed., Research Signpost, Kerala, pp. 561-589, 2019)
- López-Corredoira, 2022** - Martín López-Corredoira, *Fundamental Ideas in Cosmology. Scientifica, philosophical and sociological critical perspectives* (IOP Publishing Ltd, Bristol, 2022)
- Ludlow, 2015** - Andrew Ludlow et al, *Optical atomic clocks* (Reviews of Modern Physics, 2015)
- Mach, 1883** - Ernst Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* (Universale Scientifica Boringhieri, 1977); edizione originale *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* (F.A. Brockhaus, Leipzig 1883)
- Mach, 1923** - Ernst Mach, *L'evoluzione della scienza, Nove "lezioni popolari"* (raccolta di scritti con ampia introduzione critica di Massimo Debernardi, edizioni Melquiades, Milano, 2010); edizione originale *Populär- wissenschaftliche Vorlesungen* (Lipsia, 1923)
- Mansouri e Sexl, 1976** - Reza Mansouri e Roman U. Sexl, *A test Theory of Special Relativity: I. Simultaneity and Clock Synchronization* (General Relativity and Gravitation, Vol. 8 No. 7, 497-513, 1977)
- Marič et al., 1977** - Zanko Marič, M. Moles e Jean-Pierre Vigier, *Red-Shifting of Light Passing through Clusters of Galaxies: A New Photon Property?* (Lettere al nuovo cimento, vol. 18 n. 9, 1977)
- Mazzarello, 2006** - Paolo Mazzarello, *Il Nobel dimenticato, la vita e la scienza di Camillo Golgi* (Bollati Boringhieri, 2006)
- McCormmach, 1982** - Russel McCormmach, *Pensieri notturni di un fisico classico* (Editori Riuniti, 1990); edizione originale *Night thoughts of a classical physicist* (Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London, 1982)
- McGaugh et al., 2024** - Stacy McGaugh, James Schombert, Federico Lelli, Jay Franck, *Accelerated Structure Formation: The Early Emergence of Massive Galaxies and Clusters of Galaxies* (The Astrophysical Journal, 976:13, 2020)
- Medawar, 1984** - Peter Medawar, *The limits of science* (Oxford University Press, 1986; first edition Harper & Row, 1984)
- Melvin, 1955** - Mael Avrami Melvin, *Freundlich Red-Shift Formula* (Physical Review, vol 98 n. 4, 1955)
- Merrit, 2020** - David Merrit, *A Philosophical Approach to MOND. Assessing the Milgromian Research Program in Cosmology* (Cambridge University Press, 2020)
- Milgrom, 1983a** - Mordehai Milgrom, *A modification of the newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis* (The Astrophysical Journal, 270:365-370, 1983a)
- Milgrom, 1983b** - Mordehai Milgrom, *A modification of the newtonian dynamics: implications for galaxies* (The Astrophysical Journal, 270:371-383, 1983b)

Minkowski, 1909 - Hermann Minkowski, *Spazio e tempo* (Il Nuovo Cimento, vol. 18, pp. 333-352, 1909)

Misner, Thorne, Wheeler, 2017 - Charles Misner, Kip Thorne, John Archibald Wheeler, *Gravitation* (Princeton University Press, 2017)

Musso, 2004 - Paolo Musso, *Forme dell'epistemologia contemporanea* (Urbaniana University Press, Città del Vaticano, 2004)

Nastasi, 2012 - Nastasi Pietro, *Henri Poincaré a 100 anni dalla morte (1854-1912)*, Unibocconi (pagina visitata il 4/10/24) <https://matematica.unibocconi.eu/articoli/henri-poincar%C3%A9-100-anni-dalla-morte-1854-1912>

Nagel, 1968 - Ernest Nagel, *La struttura della scienza* (Feltrinelli Editore, Milano 1968); edizione originale *The Structure of Science* (Harcourt, Brace & World, 1961)

Narlikar, 2002 - Jayant Vishnu Narlikar, *An introduction to Cosmology* (Cambridge University Press, UK, Third Edition, 2002)

Newton, 1687 - Isaac Newton, *Principi matematici della filosofia naturale* (Piccola Biblioteca Einaudi, Torino 2018); edizione originale *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (London, 1687)

Lemos, 2013 - Nivaldo Lemos, *On what does not expand in an expanding universe: a very simple model* (Brazilian Journal of Physics, 2013)

Odifreddi, 2013 - Piergiorgio Odifreddi, *Come stanno le cose, Il mio Lucrezio, la mia Venere* (RCS Libri spa, Milano, 2013)

Overby, 1991 - Dennis Overby, *Cuori solitari del cosmo* (Rizzoli Libri spa, Milano 1992), edizione originale *Lonely hearts of cosmos* (Harper & Row, New York, 1991)

Orilia, 2012 - Francesco Orilia, *Filosofia del tempo. Il dibattito contemporaneo* (Carocci Editore, Roma, 2012)

Pais, 1982 - Abraham Pais, *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, 1982)

Pauli, 1958 - Wolfgang Pauli, *Fisica e conoscenza* (Paolo Boringhieri, 1964), edizione originale *Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie* (come raccolta a cura dell'autore 1933-1958)

Pecker, Roberts, Vigier, 1972 - Jean-Claude Pecker, Andrew Roberts, Jean-Pierre Vigier, *Non-velocity Redshift and Photon-Photon Interactions* (Nature Vol. 237, p. 227-229, 1972)

Pecker e Vigier, 1988 - Jean-Claude Pecker e Jean-Pierre Vigier, *A Possible Tired-Light Mechanism* (Apeiron, n.2 pag 19-23, 1988)

Pecker e Narlikar, 2006 - Jean-Claude Pecker, Jayant Narlikar, *Stellar and Extragalactic Radiation at the Earth's Surface* (Journal of Astrophysics and Astronomy, 27, 1-6, 2006)

Pecker et al., 2015 - Jean-Claude Pecker, Jayant Narlikar, Francois Ochsenbein and Chandra Wickramasinghe, *The local contribution to the microwave background radiation* (Research in Astronomy and Astrophysics, vol. 15, n. 4, 461-474, 2015)

Peebles, 1993 - Phillip James Edwin Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton University Press, 1993)

Penrose, 1989 - Roger Penrose, *La mente nuova dell'imperatore* (Bur Rizzoli, 1992); edizione originale *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, 1989)

Penrose, 2004 - Roger Penrose, *La strada che porta alla realtà: le leggi fondamentali dell'universo* (Bur Rizzoli, 2005); edizione originale *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe* (Jonathan Cape, 2004)

Penrose, 2016 - Roger Penrose, *Fashion Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe* (Princeton University Press, 2016)

Planck, 1900 - Max Planck, *On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum*; traduzione inglese dell'originale *Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung*, (Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen 2 pag. 237-245, 1900)

Planck, 1941 - Max Planck, *La conoscenza del mondo fisico* (raccolta di scritti dal 1908, Giulio Einaudi Editore, Torino, 1942)

Planck, 2020 - Planck Collaboration, *Planck 2018 results* (Astronomy & Astrophysics, 2020, Volume 641, A6)

Poincaré, 1905 - Jules Henri Poincaré, *La scienza e l'ipotesi* (Edizioni Dedalo, edizione 2012); edizione originale *Science et l'hypothèse* (Flammarion, 1905)

Popper, 1935 - Karl Popper, *Logica della scoperta scientifica* (Giulio Einaudi Editore, Milano 1995); edizione inglese *The Logic of Scientific Discovery*, 1959; edizione originale tedesca *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft* (1935)

Price, 1996 - Huw Price, *Time's Arrow and Archimedes' Point* (Oxford University Press, 1996)

Prigogine, 1988 - Ilya Prigogine *La nascita del tempo* (Edizioni Theoria srl, Roma, 1988)

Prigogine e Stengers, 1988 - Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, *Tra il tempo e l'eternità* (Bollati Boringhieri 1989); edizione originale *Entre le temps et l'éternité* (Librairie Arthème Fayard, Parigi, 1988)

Putnam, 1967 - Hilary Putnam, *Time and Physical Geometry*, (The Journal of Philosophy, 64/8, 1967, pag. 240-247)

Reale, 1997 - Giovanni Reale, *Guida alla lettura della Metafisica di Aristotele* (G. Laterza & Figli, Roma, 1997)

Reboul, 1981 - Henri Reboul, *Untrivial redshifts: a bibliographical catalogue* (Astronomy and Astrophysics Supplement, Ser. 45, 129-144, 1981)

Reichenbach, 1956 - Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space & Time* (Dover Publications Inc, New York, 1956)

Rybicki e Lightman, 1979 - George Rybicki e Alan Lightman, *Radiative Processes in Astrophysics* (Wiley and Sons, Inc, 1979)

Riess, 2021 - Adam Riess et al., *Cosmic Distances Calibrated to 1% Precision with Gaia EDR3 Parallaxes and Hubble Space Telescope Photometry of 75 Milky Way Cepheids Confirm Tension with Λ CDM* (The Astrophysical Journal, 2021, Volume 908:L6)

Robertson, 1929 - Howard Percy Robertson, *On the foundation of relativistic Cosmology* (Proceedings of the National Academy of Sciences, 1929 15: 822-829)

Robertson, 1949 - Howard Percy Robertson, *Postulate versus Observation in the Special Theory of Relativity* (Reviews of modern physics, 21 Num. 3, 378-382, 1949)

Romano, 2010 - Giuliano Romano, *I primi giganti dell'astronomia moderna, da Cusano a Newton* (Ateneo di Treviso, 2010)

Ronchi, 1983 - Vasco Ronchi, *Storia della luce da Euclide a Einstein* (Biblioteca Universale Laterza, 1983)

Ronchi, 2010 - Claudio Ronchi, *L'albero della conoscenza. Luci e ombre della scienza* (Jaca Book, Milano, 2010)

Rovelli, 2008 - Carlo Rovelli, *Forget time* (Foundations of Physics, 41, 2011, pp 1475-90)

Rovelli, 2014 - Carlo Rovelli, *Che cos'è la scienza. La rivoluzione di Anassimandro* (Arnoldo Mondadori Editore, Milano, 2014)

Rovelli, 2017a - Carlo Rovelli, *Reality Is Not What It Seems: The Journey to Quantum Gravity* (Rivendish Books, 2017)

Rovelli, 2017b - Carlo Rovelli, *L'ordine del tempo* (Adelphi, Milano, 2017)

Rovelli, 2018 - *Il successo empirico della relatività generale e le sue implicazioni anche filosofiche per la comprensione della natura dello spazio e del tempo* (Lettura Corsiniana Accademia nazionale dei Lincei del 3/6/2018, www.lincei.it/en/node/4616, visitato 15/1/23)

Rovelli, 2020 - Carlo Rovelli, *Helgoland* (Adelphi, Milano, 2020)

Rovelli, 2023 - Carlo Rovelli, *Buchi bianchi, dentro l'orizzonte* (Adelphi, Milano, 2023)

Rubin, Ford e Rubin, 1973 - Vera Rubin, Kent Ford jr e Judith Rubin, *A curious distribution of radial velocities of ScI Galaxies with $14.0 \leq m \leq 15.0$* (The Astrophysical Journal, 183:L111-L115, 1973)

Rudnicki, 1987 - Konrad Rudnicki, *Alternatives to the present-day cosmological principles* (in *New Ideas in Astronomy*, proceedings of a conference held in honor of the 60th birthday of Halton Arp, Venice, May 5-7 1987, Cambridge University Press)

Russel, 1912 - Bertrand Russel, *I problemi della filosofia* (Feltrinelli Editore, 2023); edizione originale *The problems of philosophy* (1912)

Russo, 2013 - Lucio Russo, *L'America dimenticata, I rapporti tra le civiltà e un errore di Tolomeo* (Mondadori Università, collana Scienza e Filosofia, 2013)

Russo, 2019 - Lucio Russo, *Archimede, un grande scienziato antico* (Carocci Editore, Roma, 2019)

Russo, 2020 - Lucio Russo, *Flussi e Riflussi. Indagine sull'origine di una teoria scientifica* (prima edizione Feltrinelli 2003, edizione completamente rivista Mondadori Educational spa, Milano 2020)

Russo, 2021 - Lucio Russo, *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna* (prima edizione Feltrinelli 1996, edizione completamente rivista Feltrinelli, Milano, 2021)

Russo, 2022 - Lucio Russo, *Il tracollo culturale. La conquista romana del Mediterraneo (146-145 a.C.)* (Carocci Editore, Roma, 2019)

Salam, 1984 - Abdus Salam, *Ideali e realtà*, raccolta di saggi di Abdus Salam (Edizioni Lint, Trieste, 1986); edizione originale *Ideals and Realities* (World Scientific Publishing, Singapore, 1984)

Schneider, 2006 - Peter Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology* (Springer, 2006)

Schrödinger, 1956 - Erwin Schrödinger, *What is life?* (raccolta di lezioni universitarie e saggi risalenti al periodo 1944-1952, Doubleday & Co., 1956)

Schrödinger, 1958 - Erwin Schrödinger, *La mia visione del mondo* (raccolta di saggi pubblicati tra il 1929 e il 1958, pubblicata con variazioni da Bollati Boringhieri come *L'immagine del mondo*, Torino, 2017)

Selleri, 2001 - Franco Selleri, *La fisica tra paradossi e realtà. Le critiche dei fisici realisti alla teoria dei quanti* (Progedit, Bari, 2001)

Severino, 1959 - Emanuele Severino, *Il principio di non contraddizione, Aristotele Libro IV della Metafisica* (Morcelliana-Scholé, 1959)

Smolin, 2006 - Lee Smolin, *L'universo senza stringhe* (Giulio Einaudi Editore, Torino, 2007); edizione originale *The trouble with physics. The rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes next* (Houghton Mifflin Harcourt, Boston, 2006)

Smolin, 2019 - Lee Smolin, *Einstein's Unfinished Revolution* (Penguin Press, New York, 2019)

Smoot, 1993 - George Smoot e Keay Davidson, *Nelle pieghe del tempo. La scoperta dell'universo neonato* (CDE spa, 1995); edizione originale *Wrinkles in Time* (1993)

Sobel, 2016 - Dava Sobel, *Le stelle dimenticate* (Rizzoli, Milano, 2017); edizione originale *The Glass Universe: How the Ladies of the Harvard Observatory Took the Measure of the Stars* (Viking, 2016)

Sorrel, 2008 - Wilfred Sorrel, *The cosmic microwave background radiation in a non-expanding universe* (Astrophys Space Sci, 2008, 317: 59-70)

Tanabashi et al., 2018 - Masaharu Tanabashi et al., 2018 *Review of particle physics* (Physical Review, D98, 030001, 2018)

Teghil, 2016 - Alberto Teghil, *La concezione dell'esperimento mentale in Ernst Mach* (Editrice Universitaria Udinese, Forum 2016)

Tissino, Mentasti, Vanzan, 2020 - Jacopo Tissino, Giorgio Mentasti, Eleonora Vanzan, *Astrophysics and Cosmology notes* (Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia, *lecture notes of the course "Fundamentals of Astrophysics and Cosmology"* by professor Sabino Matarrese in 2019)

Tooley, 1997 - Michael Tooley, *La natura del tempo* (McGraw-Hill Libri Italia, Milano, 1999); edizione originale *Time, Tense, and Causation* (Oxford University Press Inc., New York, 1997)

Yourgrau, 2005 - Palle Yourgrau, *A World Without Time: The Forgotten Legacy of Godel And Einstein* (Basic Books, 2005)

Weidner, 2014 - Herbert Weidner, *The size and energy loss of a wave packet* (Aschaffenburg University of Applied Sciences, 2014)

Weidner, 2015 - Herbert Weidner, *On the Size of a Photon* (Aschaffenburg University of Applied Sciences, 2015)

Weingard, 1972 - Robert Weingard, *Relativity and the Reality of Past and Future Events* (British Journal for the Philosophy of Science, 23/2 1972, pag. 119-121)

Weyl, 1927 - Hermann Weyl, *Filosofia della matematica e delle scienze naturali* (Boringhieri editore, 1967); edizione originale *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft* (Oldenbourg Verlag, München, 1927)

Weyl, 2011 - Hermann Weyl, *Pensare la matematica, Saggi e Prolegomeni* (raccolta di scritti a cura e con ampia introduzione di Marta Perego, Edizioni Melquiades, 2011)

Wigner, 1960 - Eugene Wigner, *L'irragionevole efficacia della matematica nelle scienze naturali* (Adelphi edizioni, 2017); edizione originale *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences* (Wiley Periodicals, Inc, 1960)

Winnie, 1970 - John Winnie, *Special relativity without one-way velocity assumptions* (Philosophy of Science, vol. 37, n. 1 pag. 81-99, n. 2 pag. 223-238, 1970)

Wittgestein, 1921 - Ludwig Wittgestein, *Tractatus Logico-Philosophicus* (Einaudi, 1995); edizione originale *Logisch-philosophische Abhandlung* (Annalen der Naturphilosophie, 1921)

Wright, 2024 - Katherine Wright, *JWST Sees More Galaxies than Expected* (American Physical Society, physics.asp.org, Physics 17,23, 2024)

Zangh, 1997 - Yuan Zhong Zangh, *Special relativity and its experimental foundation: 4 (Advanced Series on Theoretical Physical Science* (World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore, 1997)

Zeeman, 1964 - Christopher Zeeman, *Causality Implies the Lorentz Group* (Journal of Mathematical Physics, vol. 5, pp. 490-493, 1964)

Zeh, 1999 - Dieter Zeh, *The Physical Basis of The Direction of Time* (third edition, Springer, Berlin, 1999; first edition 1989)

Zellini, 1980 - Paolo Zellini, *Breve storia dell'infinito* (Adelphi Edizioni, 1980)

Zellini, 1999 - Paolo Zellini, *Gnomon. Una indagine sul numero* (Adelphi Edizioni, 1999)

Zellini, 2022 - Paolo Zellini, *Discreto e continuo. Storia di un errore* (Adelphi Edizioni, 2022)

