

TEMPORA SUNT TRIA

Luiz Roberto Evangelista

Campobasso - Circolo Sannitico

29 giugno 2017

Luiz Roberto Evangelista, brasiliano di nascita e dei bisnonni molisani e lombardi, è professore ordinario di fisica teorica presso il Dipartimento di Fisica, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasile (lre@dfi.uem.br). Lavora con i problemi di fisica-matematica, svolgendo ricerca nel campo dei cristalli liquidi (teoria elastica e effetti di superficie) e si occupa della descrizione teorica dei fenomeni di diffusione anomala, per mezzo delle equazioni di diffusione frazionarie.

*Dedicato alla memoria dei miei genitori,
Irma Trassi e Luiz Evangelista,
e di mia sorella, Aparecida Maria.*

*Il dovere di amare gli uomini che vediamo
non può cessare perché la morte li
separa da noi, poiché il dovere di amare è eterno.
(Kierkegaard, Gli atti dell'amore)*

*La vita fugge, et non s'arresta una hora,
et la morte vien dietro a gran giornate,
et le cose presenti et le passate
mi dànno guerra, et le future anchora;
(Petrarca, Canzoniere, CCLXXII)*

*Oggi, il pane.
Ieri, il ricordare.
Domani, il ricominciare.
Oggi, ieri, domani.
L'arcolaio dipana la matassa,
s'aggomitola il filo e scorre e passa.
Passano le giornate lunghe e corte,
passano a una a una estati e inverni.
È un succedere che non sembra vero
questa vita che cammina
a riabbracciare la morte.
Oggi e domani: ieri.
In eterno.
(Eugenio Cirese, In eterno)*

Contents

1	Error! Bookmark not defined.
Ringraziamenti	6
Prefazione	8
La Nascita di Beethoven	12
2 Memoria	16
1 Eraclito.....	17
2 Gli eleatici	20
3 E la fisica?	22
4 Platone, Aristotele e Agostino	26
3 Contuitus (Percezione)	31
1 La dinamica classica	31
Newton e Leibniz.....	38
2 La seconda legge della termodinamica	39
2.1 Carnot e la seconda legge	40
2.2 Clausius.....	42
2.3 Maxwell	44
2.4 Boltzmann	47
2.4.1 Il paradoxo della reversibilità	49
2.4.2 La curva–H e il Paradosso della Ricorrenza	51
3 Einstein e le teoria della relatività	58
3.1 La relatività speciale	58
3.2 La relatività generale	62
4 La teoria dei quanti	66
5 Il miracolo segreto	69
4 Expectatio (Aspettativa)	72

1	L'entropia rivisitata	73
2	Il viaggio nel tempo	77
3	L'emergenza del tempo	80
4	Il giardino dei sentieri che si biforcano	85
	Finis	87

Ringraziamenti

Questa memoria è il testo di base della presentazione tenuta al *Museo degli Orologi da Torre*, di San Marco dei Cavoti, Provincia di Benevento, il 16 dicembre del 2016, festeggiando il 246° anniversario di nascita di Ludwig van Beethoven (1770-1827).

L'evento – *Il Suono del Tempo* – è stato organizzato dal Dipartimento di Geologia dell'Università degli Studi del Sannio, di Benevento, con l'appoggio del CNR - Consiglio Nazionale della Ricerca, del Comune di San Marco dei Cavoti e della Associazione Log01.

I miei più sinceri ringraziamenti al Comune di San Marco dei Cavoti (BN), nella persona del sindaco, Giovanni Rossi, per l'accoglienza e ospitalità nel Museo e nel Comune. L'iniziativa dell'Università degli Studi del Sannio, di Benevento, io ringrazio nella persona del Rettore, Professore Filippo de Rossi. Ringrazio al CNR - Consiglio Nazionale della Ricerca, nella persona del Professore Paolo Mauriello, Direttore ITABC/CNR.

Ringrazio la Dottoressa Maria Incoronata Fredella, presidente dell'Associazione Log01 che, instancabile, ha lavorato sodo con il suo entusiasmo e la sua fede incrollabile affinché l'evento diventasse realtà. Sin dall'inizio, lei è stata appoggiata e incentivata dal Professore Massimo Squillante, prorettore dell'Università del Sannio, e dall'Assessore alla Cultura e al Turismo di San Marco dei Cavoti, Carla Cocca, ai quali io ringrazio vivamente. Il bel lavoro da “squadra” svolto da loro, con pazienza e dedizione, mi ha incentivato a concludere il testo e ha prodotto una serata indimenticabile, dedicata alla scienza, alla filosofia, alla poesia e alla musica.

Il libro ha raggiunto sua stesura finale mentre mi trovavo in un soggiorno sabbatico, autorizzato dal Dipartimento di Fisica, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasile, e parzialmente finanziato dall'agenzia brasiliana CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Durante il soggiorno in territorio italiano, sono stato ospite dall'INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione Bologna, invitato da Paolo Pasini e Cesare Chiccoli, e dal DISAT – Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, del Politecnico di Torino, invitato da Giovanni Barbero. L'amicizia duratura e una proficua collaborazione con questi due gruppi di ricerca mi hanno permesso un soggiorno ricco di idee, produttivo

scientificamente e molto stimolante dal punto di vista umano e intellettuale.

Agli amici che hanno letto attentamente il manoscritto, nelle sue diverse fasi di stesura, io vorrei ringraziare in maniera speciale, cioè a Silva Ponti (Torino), che l'ha letto quando era ancora parzialmente concluso e mi ha incentivato a continuare la sua stesura con i suoi fertili commenti; a Vittorio Penna (Torino), che l'ha apprezzato fin dall'inizio e ha fatto una lettura paziente e generosa: un vero lavoro di orologeria, e a Francesca di Nunzio (Campobasso), per la lettura attenta e la diligenza con cui ha trattato il testo. Loro mi hanno offerto inestimabili suggerimenti per migliorarlo e, soprattutto, hanno dedicato uno sforzo eroico cercando di trasformare il mio "italiano portoghese", con qualche sfumatura dell'inglese, in italiano. Evidentemente, nessuno di loro è responsabile per le imperfezioni del testo finale.

Ringrazio mia famiglia per il continuo appoggio e affetto, e per sopportare la mia lunga assenza durante la stesura delle poche pagine di questo libro.

Prefazione

Il tempo è il nostro tema.

Probabilmente, è l'argomento più difficile da essere trattato seriamente da qualsiasi relatore. Diceva Borges che il tempo è il problema essenziale; che, risolto questo problema, tutto sarebbe stato risolto; aggiungeva, però, che non c'è nessun pericolo che esso sia risolto e, così, rimarremo sempre ansiosi¹.

La nostra riflessione allora sarà rivolta ad un problema che, in partenza, sappiamo che ci sconfigge. Un problema che riguarda la vita, quella dell'uomo in particolare, e la storia dell'universo. Questo spiega perché tutte le aree della conoscenza hanno a che fare con il tempo!

La poesia e la letteratura concedono al tempo un posto d'onore; la religione cristiana gli attribuisce un ruolo doppio, cruciale, ma anche complementare: bisogna che ci sia il tempo finché non ci sia più. Bisogna che ci sia un tempo per far storia, appunto la storia della salvezza, con l'uomo in *status vie*, volto a raggiungere un tempo dove non c'è più tempo: la definitiva soppressione del tempo, la visione beatifica dell'eternità, là dove l'alta fantasia mancò possa (il termine del viaggio dantesco).

La filosofia è stata sconfitta dal tempo su tutti i fronti. La fisica si vanta di aver risolto il problema per mezzo delle leggi della natura. In un primo momento, si potrebbe accettare la soluzione considerata dai matematici, cioè quella banale: il tempo non esiste, è un'illusione! Una volta risolto il problema della sua esistenza, negandola, bisogna tuttavia considerarlo come esistente, perché comunque lo si vedi nel mondo macroscopico, cioè nella vita!

Il tempo deve esistere perché ci sono gli orologi e dunque, per forza, si deve dare a loro un ruolo anche nella sfera del pensiero astratto, giacché sono cruciali per gli esperimenti!

E il tempo, così, da illusione diventa reale; rinasce!

Le poche righe appena scritte sono una sorta di riassunto di queste riflessioni, che prendono titolo da una frase celebre di Sant'Agostino, nelle sue ugualmente celebri

¹ J. L. Borges, *Oral*, Il Tempo (Editori Riuniti, Roma, 1981).

*Confessioni*²:

Sed fortasse proprie diceretur: tempora sunt tria, praesens de praeteritis, praesens de praesentibus, praesens de futuris. Sunt enim haec in anima tria quaedam et alibi ea non video, praesens de praeteritis memoria, praesens de praesentibus contuitus, praesens de futuris expectatio.

I tempi sono tre come tre sono i capitoli di questa memoria.

Il primo capitolo è dedicato al tempo passato, appunto la memoria, rievocando il pensiero dei greci e di Sant'Agostino.

Lì si scopre subito che la soluzione trovata da loro è la stessa trovata dalla scienza moderna e contemporanea e cioè nessuna. Con il permesso di commettere degli anacronismi, si dimostra brevemente che i pensieri di Eraclito e di Parmenide – per non parlare del punto di vista dominante di Platone e della profonda intuizione di Sant'Agostino – mostrano un sorprendente risveglio come spunti di riflessione nel panorama della cosmologia scientifica del Ventunesimo secolo.

Il secondo capitolo è dedicato alla percezione. Si rivisitano brevemente le concezioni della fisica classica e contemporanea rispetto al tempo.

Il capitolo parte dalla dinamica classica, per sottolineare il determinismo “newtoniano” o “laplaciano”, presentato in maniera riassuntiva per mezzo di alcuni postulati. Nel prosieguo, una rapida incursione storica sulla formulazione della seconda legge della termodinamica è presentata, dando enfasi all'avvento del concetto di entropia, introdotto da Clausius e reinterpretato da Boltzmann in termini probabilistici.

Questa via ormai consacrata (anche se erronea, quando vien presa in senso assoluto) di associare una “freccia del tempo” alla termodinamica viene anche discussa in un primo momento, per illustrare un aparente contrasto fra la descrizione microscopica dei sistemi fisici e la sua descrizione macroscopica.

La seconda metà del capitolo è dedicata alle teorie fisiche microscopiche del Ventesimo secolo, la relatività e la meccanica quantistica.

² A. Agostino, *Confessioni* XI, 20, 26. Il brano si potrebbe tradurre così: *Ma più corretto sarebbe forse dire che i tempi sono tre in questo senso: presente di ciò che è passato, presente di ciò che è presente e presente di ciò che è futuro. Sì, questi tre sono in un certo senso nell'anima e non vedo come possano essere altrove: il presente di ciò che è passato è la memoria, di ciò che è presente la percezione, di ciò che è futuro l'aspettativa.*

Nel discutere la relatività speciale, si sottolinea l'esistenza di un modello di universo, il cosiddetto universo-blocco, reso possibile dall'interpretazione geometrica dello spazio-tempo di Minkowski, viene sottolineato.

Secondo alcune interpretazioni, in questo universo-blocco il tempo non ha un ruolo speciale. Nello stesso contesto, il tempo "relativo" della relatività generale ci permette di speculare sul ritmo degli orologi nel campo gravitazionale.

La reversibilità della meccanica quantistica viene interrotta da un *collasso*, quello della funzione d'onda, che avviene con il processo di misura.

Secondo il punto di vista prevalente nella meccanica quantistica – denominato interpretazione di Copenaghen – la partecipazione dell'osservatore nel processo di misura è cruciale. L'azione del soggetto per ritrovare il tempo nella natura sembra di nuovo imprescindibile, come era per Aristotele e il medioevo – che aveva per divisa il lemma: *se non essit anima, non essit tempus!*

Il terzo capitolo è dedicato ad analizzare lungo linee molto generali come il tempo è trattato dalla letteratura scientifica nel Ventunesimo secolo.

Il punto di partenza è una rivisitazione del concetto di "freccia del tempo" e la sua associazione al concetto di entropia. La prima sezione è dedicata a smontare questa associazione che, per i motivi storici descritti nella Sezione 2, è stata fatta soprattutto a partire dall'enunciato della seconda legge della termodinamica presentato da Clausius, estendendola a tutto l'universo. Siccome l'entropia dell'universo non è ben definita, parlare di aumento di questa entropia è, come minimo, problematico e, molto probabilmente, assurdo.

L'aspetto più delicato, comunque, è associare l'entropia con il concetto di disordine. L'associazione può essere corretta per alcuni sistemi e anche per diverse trasformazioni, ma non è sempre valida. Alla luce dell'enunciato di Clausius, questo ci può indurre a pensare che esista un'associazione tra entropia e tempo – il che non è assolutamente vero.

La seconda sezione analizza in modo riassuntivo l'argomento assai stimolante del "viaggio nel tempo". Partendo da una soluzione molto particolare trovata dal logico Kurt Gödel per le equazioni di campo di Einstein – e traendo indubbiamente ispirazione dal notevole libro di H. G. Wells sulla *machina del tempo* – tutto un campo speculativo dedicato a questi viaggi si è sviluppato; evidentemente, a dispetto di certe possibilità

scientifiche fornite dalla teoria della relatività generale, l'argomento è stato attentamente considerato assai più nella fantascienza che non dalla scienza sperimentale stessa.

Il ruolo del tempo nella meccanica quantistica è di nuovo analizzato in connessione con il problema dell'*entanglement* – una proprietà caratteristica della natura quantistica di un sistema fisico a più componenti – che tra l'altro ci permette di considerare il tempo come una proprietà “emergente” del sistema fisico.

Gli sforzi di unificazione della meccanica quantistica – nella quale il tempo ha diversi ruoli – con la relatività generale sfruttano le proprietà più caratteristiche dei sistemi fisici quantistici. Questi stessi sistemi, descritti da una funzione d'onda che porta con sé un fascio di probabilità, hanno evocato interpretazioni e conclusioni talvolta estreme o poco giustificate sul ruolo del ricercatore – del soggetto – nel processo di misura delle proprietà quantistiche. Si arriva dunque a delle posizioni estreme in cui, per spiegare ipotetiche situazioni paradossali, l'universo si biforca in molti mondi possibili.

A questo punto delle nostre riflessioni è meglio addentrarsi direttamente nel campo della letteratura. Così procediamo e visitiamo la metafora sul tempo che magistralmente ci regala Borges, con il suo giardino dei sentieri che si biforcano.

Torino, 11 dicembre 2016.

Premesse

La nascita di Beethoven

*Duratura deve essere, io spero,
la mia risoluzione di resistere fino alla fine,
finché alle Parche inesorabili
piacerà spezzare il filo.*
(Beethoven - Il Testamento di Heiligenstadt)

Ludwig van Beethoven è nato il 16 dicembre 1770. Questo è quanto leggiamo nel testo di riferimento di Barry Cooper³, che sottolinea che “ci sono ancora dei dubbi sul giorno esatto”. Va notato, però, che Beethoven è stato battezzato il 17 dicembre 1770, nella Chiesa di San Remigio, a Bonn.

L’Enciclopedia Britannica, edizione 1961, ci insegna che Beethoven “was baptized (probably, as was usual, the day after birth) on December 17, 1770, at Bonn”⁴.

Lo studioso Maynard Solomon, in una monografia che ha acquisito grande importanza nella letteratura dedicata a Beethoven, presenta esauriente documentazione sul battesimo di Beethoven, avvenuto il giorno 17. Ma non soltanto: Solomon ci fa sapere che Beethoven – volendo sembrare più giovane di quanto lo era (fosse?) infatti – contestava il certificato di battesimo (che è peraltro vero) come appartenente al suo fratello Ludwig Maria, nato e morto il 1769, che fu battezzato il 02 aprile 1769. Gli amici più vicini hanno criticato questo inopportuno atteggiamento del Maestro⁵.

³ *The Beethoven Compendium (A Guide to Beethoven’s Life and Music)*, B. Cooper (org.), (Thames and Hudson Ltd, London, 1991).

⁴ *Encyclopaedia Britannica*. (William Benton, Chicago, 1961), vol. 3.

⁵ M. Solomon, *Beethoven* (Schirmer G Books, New York, 1977).

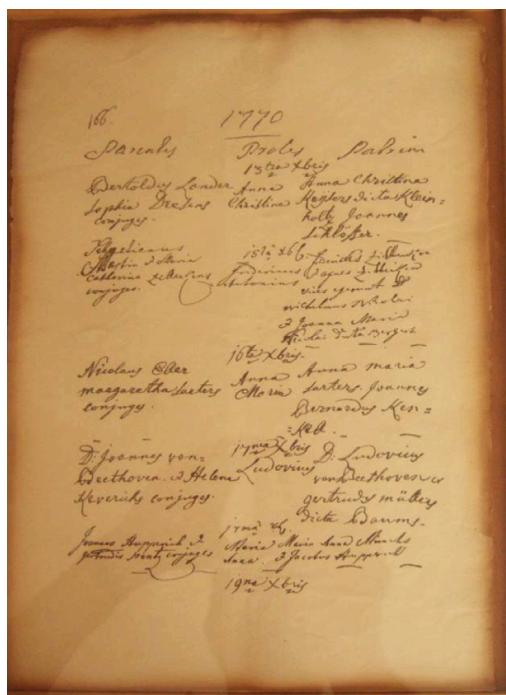


Figure 1: *Copia del certificato di battesimo di Ludwig van Beethoven (1770-1827).*

L'informazione sul battesimo si trova anche nell'opera di Kerman & Tyson, che affermano (senza discussione) che il secondo figlio della coppia Maria Magdalena Keverich (1746-1787) e Johann van Beethoven (1740-1792) “fu battezzato il 17 dicembre 1770”⁶.

Jean Massin, noto musicologo e storico francese, nel capitolo della monumentale *Storia della Musica Occidentale* dedicato al Maestro, afferma semplicemente che “Ludwig van Beethoven nacque il 16 dicembre 1770, a Bonn, allora capitale del Principato dell'Arcivescovo Elettore di Colonia”⁷.

Il sito web della Beethoven-Haus Bonn registra “1770 – Ludwig van Beethoven is baptized on 17 December”⁸.

Un altro sito molto conosciuto⁹ pone la domanda: “When was Beethoven born? December 16th uncertain in Bonn, Germany; December 17th: Baptized at Bonn” e ci fornisce una copia del certificato di battesimo (come si vede nella Fig. 1).

⁶ J. Kerman and A. Tyson, *Beethoven in The New Grove Dictionary of Music* (McMillan, London, 1980).

⁷ Jean & Brigitte Massin (org.) *Histoire de la Musique Occidentale* (Messidor - Temps Actuels, Paris, 1983).

⁸ <http://www.beethoven-haus-bonn.de>.

⁹ <http://www.lvbeethoven.com>.

Io ho scoperto Beethoven quando avevo quattordici anni. Da allora, tutti i giorni 16 dicembre io festeggio la sua memoria (e tutti i giorni 26 marzo ricordo la sua morte). E lo faccio nella maniera più semplice che trovo e che, credo, sia l'unica vera maniera di rendere omaggio a un artista di questa grandezza: ascoltando la sua musica!

Possiamo lasciare il compito di stabilire con precisione la sua data di nascita agli specialisti (e ce ne sono tanti: sono legione!) e festeggiare oggi, in questo posto dedicato al tempo, la memoria del Maestro!

Tante volte, in questi anni – sono ormai più di quarant'anni –, ho evocato mentalmente una scena di sconfitta mentre ascoltavo il terzo movimento della *Sonata Hammerklavier* (Sonata n. 29, opus 106, in si bemolle maggiore) che Beethoven stesso considerava la sua più grande sonata. È un'opera complessa, difficile da eseguire e anche difficile all'ascolto.

Qualcuno ha detto che con l'*Adagio sostenuto – Appassionato e con molto sentimento*, che può avere una durata di più di venti minuti, Beethoven abbia portato il suo ascoltatore così lontano che è dovuto, dopo, scrivere un altro movimento in forma fugata per farlo tornare ai paraggi più conosciuti.

L'*Adagio* è un movimento nel quale uno deve riscoprire la “complessità” nella “semplicità”; è comunque una vera esperienza spirituale!

Il terzo movimento mi ha fatto sempre pensare ad una perdita infinita, che riecheggia quella riportata da Borges, invocando Dante (Paradiso XXXI, 108): “Quién, al andar por el crepúsculo o al trazar una fecha de su pasado, no sintió alguna vez que se había perdido una cosa infinita?”¹⁰.

Il movimento può evocare una scena da Sabato Santo: sconfitta, tristezza, perdita, ma, in qualche modo, anche attesa degli avvenimenti della domenica. Questa sarebbe l'evocazione di una scena presente, però impregnata dell'attesa di un'altra, ancora da venire, della quale si sa o si sospetta qualcosa. Essendo così - e qui è la sensibilità dell'ascoltatore a dettare la scelta – l'*Adagio* evocherebbe lamentazione, senz'altro, ma non porterebbe con sé la disperazione, o, almeno, non una disperazione completa.

Per noi, oggi, l'*Adagio* potrebbe essere pensato come una dimostrazione molto

¹⁰ ‘Signor mio Gesù Cristo, Dio verace, or fu sì fatta la sembianza vostra?’, Paradiso, XXXI 107-108, J. L. Borges, *El Hacedor*, 1960.

toccante della *praesens de praeteribus*, perché la sensazione presente della perdita avvenuta è reale, lancinante. La forza che ci spinge ad andare avanti si fa presente per mezzo della *praesens di futuris*, cioè come attesa di quella mattina di Resurrezione nel futuro. Tutto questo accade per noi gli ascoltatore che viviamo nell'evanescente *praesens de presentibus*. È la forza della musica, riflettendo magistralmente l'impronta incancellabile del tempo nella vita dell'uomo!

Sia la benvenuta questa coincidenza di parlare del tempo, nel museo dedicato all'arte di registrarlo, proprio nel giorno della nascita del Maestro!

Capitolo 1

Memoria

*Because I know that time is always time
And place is always and only place
And what is actual is actual only for one time
And only for one place.
(T. S. Eliot, Ash-Wednesday, 1930.)*

Il tempo è un problema centrale sia della fisica che della filosofia. La scienza, e più specificamente la fisica, nasce cosmologica. Anche la metafisica nasce cosmologica! La fisica e la metafisica nascono cosmologiche; ma non soltanto: entrambe nascono cercando una risposta al problema del divenire.

All'inizio della nostra storia – naturalmente partendo dai greci –, troveremo chi rifiuta l'esistenza del divenire e troveremo anche chi crede radicalmente alla sua esistenza!

Cominceremo il nostro percorso da questi.

1 Eraclito

Uno dei brani più citati di Eraclito è il frammento in cui egli dice che “non si può discendere due volte nel medesimo fiume”¹¹ e la sua estensione radicale fatta dal discepolo Cratilo, affermando che non solo non ci si può immergere due volte nello stesso fiume, ma neanche una singola volta, poiché l'acqua che bagna la punta del piede non sarà quella che bagna il tallone.

Questa è l'immagine del divenire in Eraclito ed è questo campo del divenire il palcoscenico dove si svolge lo scontro fra gli opposti; uno scontro che oscilla tra affermazione e negazione¹²:

Noi scendiamo e non scendiamo nello stesso fiume, noi stessi siamo e non siamo.

¹¹ H. Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker* (Weidmannsche Buchhandlung, Berlin, 1906). Frammento 49a, p. 69: *In dieselben Fluten steigen wir und steigen wir nicht: wir sind und sind nicht.*

¹² H. Diels, op. cit., Frammento 91, p. 75: *Man kann nicht zweimal in denselben Flub steigen.*

Lo scontro non è lineare nel tempo; al contrario, è un processo ciclico perché¹³
[...] *il fuoco vive della morte della terra e l'aria vive della morte del fuoco;*
l'acqua vive della morte dell'aria, la terra della morte dell'acqua.

Tutto si trova in continua trasformazione. È il famoso *Pánta rēi* (“tutto scorre”) attribuito (erroneamente) ad Eraclito, che può essere riassunto con questo frammento¹⁴:

La stessa e unica cosa sono il vivente e il morto, lo sveglio e il dormiente, il giovane e il vecchio; questi infatti mutando sono quelli e quelli di nuovo mutando son questi.

Secondo Eraclito, l'intero mondo è destinato ad un incendio di grandi proporzioni. Dopodiché, verrà chiamato a rinascere dalle ceneri, come la Fenice. Tutto questo accadrà nel periodo di un *Grande Anno* che durerebbe 10800 anni solari, ovvero, l'intervallo di tempo trascorso fra la nascita del mondo e la sua dissoluzione nel fuoco. Questo calcolo potrebbe essere il risultato del prodotto di $360 \times 30 = 10800$, cioè il numero dei giorni in un anno per il numero dei giorni in un mese¹⁵.

Qui troviamo tutta la forza del carattere ciclico del tempo nella filosofia greca. Quest'ordine ciclico non permette l'idea di progresso, o di finalità. La visione di progresso e di dominio della natura è un'idea che proviene dalla Bibbia. È da questo punto di vista biblico che nascono le concezioni del tempo come storia e della tecnica come risultato del progresso storico¹⁶.

Una contrapposizione tra queste due visioni – la greca ciclica e la nostra lineare, progressista – può essere illustrata da un brano del poeta brasiliano Murilo Mendes (di Minas Gerais), amante dell'opera di Dante e Ambasciatore del Brasile a Roma, nel suo

¹³ Ibidem, Frammento 76, p. 73: *Feuer lebt der Erde Tod und Luft des Feuers Tod; Wasser lebt der Luft Tod und Erde den des Wassers.*

¹⁴ Ibidem, Frammento 88, p. 74: *Und es ist immer ein und dasselbe was in uns sohnt: Lebendes und Totes und das Wache und das Schlafende und Jung und Alt Wenn es umschlägt, ist dieses jenes und jenes wiederum, wenn es umschlägt, dieses.*

¹⁵ J. Burnet, *Early Greek Philosophy* (A & C Black, London, 1920). Si veda anche J. Brun, *Les Présocratiques* (Presses Universitaires de France, Paris, 1968).

¹⁶ U. Galimberti, *Psiche e Techne – O Homem na Idade da Técnica* (Paulus, São Paulo, 2006), p. 305. In italiano: *Psiche e techne. L'uomo nell'età della tecnica*, (Feltrinelli, Milano, 2000).

Poema dialético, quando scrisse¹⁷:

Todas as formas ainda se encontram em esboço,

Tudo vive em transformação:

Mas o universo marcha

Para a arquitetura perfeita.

Prima di proseguire con il pensiero dei greci presocratici, conviene fare un salto ai nostri tempi di cosmologia scientifica per cercar di vedere come va la risoluzione di questo problema così antico che riguarda la natura del tempo (si veda anche la Sezione 3.2). Constateremo che l'intuizione greca appena abbozzata ritiene ancora il suo fascino, ma anche la sua plausibilità nel campo della fisica sperimentale.

Torneremo all'argomento più avanti, ma possiamo subito stabilire che ci sono almeno tre differenti futuri per il nostro universo in espansione – ovviamente condizionando la nostra concezione del tempo¹⁸:

1. L'espansione che si osserva adesso può cessare dopo un intervallo temporale finito, l'universo si ritira e, dopo il collasso, esplose ripetendo il ciclo. Ritroviamo allora l'universo ciclico. In questo caso, il tempo non ha avuto inizio e non avrà fine!

2. L'espansione attuale finirà dopo un intervallo finito in un requiem. In questo caso, si ammette che il tempo cominciò (e qui il passato remoto è doveroso!) nel *Big Bang*, circa 13.7 milioni di anni fa, e finirà tra qualche mila miliardi di anni in futuro;

3. L'espansione dell'universo continuerà per un tempo infinito. Il tempo cominciò nel *Big Bang*, circa 13.7 milioni di anni fa, e non finirà mai più!

Quest'ultima prospettiva sembra sia la visione dominante nei mezzi scientifici. Il punto di vista di Eraclito, se vogliamo accettare l'anacronismo, è compatibile con tutte e tre possibilità presentate sopra.

In questa prospettiva, esiste un divenire; anzi, tutto diviene, ma può capitare che questo divenire poi finisca in un grande incendio, nel quale l'universo perirà e da dove

¹⁷ M. Mendes, *O Menino Experimental* (Summus Editorial, São Paulo, 1979), p. 103. In traduzione libera si può leggerlo così: *Tutte le forme si trovano in abbozzo, / tutto vive in trasformazione: / ma l'universo marcia / nella direzione dell'architettura perfetta.*

¹⁸ P. Frampton, *Did Time Begin? Will Time End?* (World Scientific, Singapore, 2010).

rinascerà. Se è così, possiamo essere sicuri che durante il ciclo tutto cambia; ma il ciclo è così lungo che in una vita – ma anche nelle vite di decine di generazioni - non si è in grado di percepire questa ciclicità. Per Eraclito e per la cosmologia contemporanea è possibile che ci sia un divenire, potenzialmente, con o senza un *Eterno Ritorno*.

2 Gli eleatici

Parmenide di Elea (l'area archeologica di Elea è localizzata nella Provincia di Salerno), che viene denominato da Platone "Il grande Parmenide"(Sofista, 237A), è il fondatore della scuola eleata e fu contemporaneo di Eraclito, con cui non aveva grandi affinità. La cosmologia di Parmenide è radicalmente diversa da quella dei suoi predecessori ed è considerata più una "ontologia" (perché tratta dell'essere) che una cosmologia¹⁹:

Resta solo un discorso della via: che "è". Su questa via ci sono segni indicatori assai numerosi: che l'essere è ingenerato e imperituro, infatti è un intero nel suo insieme, immobile e senza fine. Né una volta era, né sarà, perché è ora insieme tutto quanto, uno, continuo. Quale origine, infatti, cercherai di esso? Come e da dove sarebbe cresciuto? Dal non-essere non ti concedo né di dirlo né di pensarlo, perché non è possibile né dire né pensare che non è. Quale necessità lo avrebbe mai costretto a nascere, dopo o prima, se derivasse dal nulla? Perciò è necessario che sia per intero, o che non sia per nulla.

L'essere è immutabile e immobile. Questo è il punto centrale nella riflessione di Parmenide. La creazione è impossibile perché una cosa non può essere concepita come proveniente dal nulla, o l'essere dal non-essere. Inversamente, la distruzione è impossibile, perché una cosa non può, subitamente, diventare nulla. Il cambiamento stesso è impossibile, perché una cosa non può sorgere da un'altra che non ha nulla a che vedere con essa!

Tutte le apparenze di cambiamento, di diversità e di molteplicità, di tempo e spazio che vediamo, o pensiamo di vedere nella natura, sono nient'altro che impressioni false dei nostri sensi; e i sensi non ci possono condurre alla verità; soltanto il pensiero può farlo.

¹⁹ Parmenide, *Poema sulla natura*, trad. Giovanni Reale (Bompiani, Milano, 1991).

L'unica via per la certezza e per la verità è la via della mente²⁰:

[...] Infatti lo stesso è pensare ed essere.

Per toccare la realtà dobbiamo eliminare tutte le differenze fra i corpi di modo a restare una singola essenza uniforme. La realtà è una, eterna e immutabile, limitata per se stessa, sferica e eternamente estesa. L'elevato pensiero di Parmenide è molte volte denominato di "monismo statico".

Questo pensiero porta con se un messaggio sorprendente: il cambiamento non esiste, non può essere reale. È soltanto apparenza!

Zenone di Elea (nato attorno al 500 a. C.), discepolo di Parmenide, fu, secondo Aristotele, il padre della dialettica, perché prendeva una delle ipotesi essenziali della tesi dell'avversario e riusciva a estrarre da essa conclusioni contraddittorie. Nel dialogo *Parmenide, o delle Idee*, di Platone, possiamo leggere che ²¹:

[...] Parmenide era già assai vecchio, i capelli completamente bianchi, l'aspetto bello e nobile, e si trovava intorno ai sessantacinque anni; Zenone allora era vicino ai quarant'anni, alto di statura ed elegante a vedersi [...]

Nel pensiero di questa scuola eleatica, il movimento, i cambiamenti e le trasformazioni fisiche non erano se non illusioni provocate dai nostri sensi. Per proporre che il movimento non esiste, Zenone ha concepito i notissimi argomenti o paradossi che sinora sono oggetto di molta discussione tra filosofi e scienziati. Potevamo dedicare tutta la nostra riflessione sul tempo ad uno studio più approfondito di questi paradossi, cosa che non faremo. Invece, bisogna sottolineare che inseguendo il suo metodo dialettico, Zenone ha cercato di trasformare gli argomenti degli avversari di Parmenide – che volevano ridicolizzare il maestro per la negazione del movimento – in argomenti ancora più ridicoli. È da questo sforzo che nascono le aporie di Zenone, che sono arrivate a noi per mezzo dell'opera di Aristotele.

²⁰ H. Diels, op. cit., Frammento 5, p. 117: *Denn das Seiende denken und sein ist dasselbe.*

²¹ Platone, *Parmenide*, a cura di F. Ferrari (Bur, Milano 2004).

Paul Valéry (1871-1945), un poeta che aveva un interesse per la musica, la matematica e la filosofia, si è incantato con i giochi intellettuali di Zenone. Nel suo celebre poema “Le cimetière marin” (*Il cimitero marino*), Valéry invoca il paradosso della freccia in ammirabili decasillabi²²:

*Zénon! Cruel Zénon! Zénon d'Élée!
M'as-tu percé de cette flèche ailée
Qui vibre, vole, et qui ne vole pas!
Le son m'emporte et la flèche me tue!*

Zenone difendeva il punto di vista di Parmenide, combattendo l'idea di pluralità. Inseguendo il pensiero del suo maestro, che affermava l'unità dell'essere, ha concepito altri paradossi contro la pluralità perché questi paradossi, anche se vengono usati contro l'esistenza del movimento, possono anche essere invocati contro la pluralità.

Il mondo eleatico è allora un universo-blocco nel quale il cambiamento è un'illusione umana o quasi²³.

3 E la fisica?

Chi, legato alla fisica, si sente a disagio con questo pensiero, conviene ricordarsi del carattere reversibile delle equazioni della meccanica, sia quella classica che la relativistica. L'invarianza delle equazioni fondamentali della fisica davanti alla cosiddetta inversione temporale ci mostra che, dal punto di vista microscopico, la direzione lungo la quale il tempo fluisce non ha importanza. Si può dire anche che queste equazioni sono le stesse se cambiamo il tempo t in un tempo $-t$.

In parole un po' più tecniche, si può dire che dal punto di vista matematico è possibile stabilire un insieme di condizioni finali (anziché di condizioni iniziali!), nel futuro, per studiarci come il sistema si move a ritroso nel tempo. Le condizioni finali sono

²² *Zenone! Crudele Zenone! Zenone d'Elea! / Mi hai trafitto con questa freccia alata, / Che vibra vola e tuttavia non vola! / Il suono mi dà vita / E la freccia mi uccide!* Traduzione di Paolo Pettinari.

²³ Per una discussione di queste idee in connessione alla storia della scienza antica, si veda il mio libro *Perspectivas em História da Física - Volume 1 – Dos Babilônios à Síntese Newtoniana* (Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2011) (in Portoghese).

buone come le condizioni iniziali²⁴.

L'argomento vale per la relatività e il punto di vista di Einstein. Non a caso, Karl Popper l'ha chiamato Einstein-Parmenide perché il padre della relatività vedeva l'universo come un blocco tetradimensionale nel quale i cambiamenti sembrano illusori²⁵. Egli stesso ha cercato di convincere Einstein che se “gli uomini e gli altri organismi possono sperimentare il cambiamento e l'autentica successione nel tempo, allora questo era reale”. Più avanti, Popper dice che ha argomentato che noi “non dobbiamo lasciarci dominare dalle nostre teorie e essere portati ad abbandonare il senso comune con tanta facilità”.

In un altro testo, discutendo il problema del realismo, Popper invocherà anche un argomento che egli stesso classifica come *ad hominem*, cioè non si può concepire che gli avvenimenti legati all'esplosione della bomba atomica in Giappone e tutte le sofferenze da essa derivate siano illusorie²⁶.

Poco tempo prima di questa discussione con Einstein, il grande logico Kurt Gödel aveva scritto un articolo nel quale impiegava, contro la realtà del tempo e del cambiamento, argomenti delle due teorie della relatività (la speciale e la generale)²⁷.

Tutto questo ha contribuito affinché l'immagine di Einstein fosse associata a una teoria fisica con la quale si pretende di attingere una realtà che va oltre il reale stesso, una realtà intelligibile ma anche non soggetta al tempo²⁸:

Senza dubbio, Einstein è quello che meglio incarna l'ideale che definisce questa nuova vocazione della fisica, ideale di una conoscenza che sveste la nostra concezione del mondo da quello che, per egli, era soltanto la marca della soggettività umana.[...] I mistici cercavano di vivere questo mondo come una illusione; Einstein, dal suo lato, pretende di dimostrare che esso è un'illusione e che la verità è un universo trasparente e intelligibile, purificato da tutto quello che riguarda la vita degli uomini, la memoria nostalgica o dolorosa del passato, il timore o la speranza del futuro.

²⁴ Si veda, ad esempio, O. Penrose, *The Road to Reality* (Vintage Books, New York, 2005).

²⁵ K. R. Popper, *The Open Universe* (Hutchinson, London, 1982).

²⁶ K. Popper, *La Teoria dei Quanti e lo Scisma nella Fisica* (Il Saggiatore, Milano, 2012).

²⁷ K. Gödel, *A remark about the relationship between relativity theory and idealistic philosophy* in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, edited by P. A. Schilpp (MJF Books, New York, 1949).

²⁸ I. Prigogine and I. Stengers, *Entre le temps et l'éternité* (Librairie Arthème Fayard, Paris, 1988).

Le leggi della fisica microscopica, sia la dinamica classica, sia la dinamica relativistica ma anche la meccanica quantistica, ci propongono la descrizione di un universo atemporale. In esso, il tempo può fluire dal passato al futuro o dal futuro al passato. La reversibilità temporale è una caratteristica matematica delle equazioni fondamentali, e la nostra conoscenza del reale, basata su questi equazioni, può essere costruita tenendo conto il loro carattere reversibile.

Non è questa la forma come noi sperimentiamo il tempo.

Noi ci muoviamo inesorabilmente dal passato al futuro; ricordiamoci del passato ma del futuro abbiamo soltanto aspettative. E questo è quanto troviamo nel mondo dei fenomeni macroscopici, dei grandi sistemi; della vita, infine.

Secondo il punto di vista tradizionale, nella descrizione fisica del mondo macroscopico fatta dalla termodinamica, la simetria di inversione temporale che abbiamo descritto non vale. Nella termodinamica, il tempo fluisce sempre nella direzione dell'aumento dell'entropia, inseguendo la seconda legge. L'entropia, interpretata in termini di organizzazione, di ordine, ha a che fare con probabilità, cioè con informazione, con conoscenza. Ciò vuol dire che conosciamo meno circa un sistema di elevata entropia che circa un altro di minore entropia.

Secondo alcuni, noi viviamo l'esperienza inconfutabile della "freccia del tempo" – espressione introdotta da A. Eddington²⁹:

Userò la frase "freccia del tempo" per esprimere questa proprietà di mano unica del tempo che non ha un analogo nello spazio. È una proprietà singolarmente interessante dal punto di vista filosofico. Dobbiamo notare che:

(1) Essa è vividamente riconosciuta dalla coscienza.

(2) È altrettanto rinforzata dalla nostra facoltà di ragionamento, che ci dice che un'inversione della freccia renderebbe il mondo esterno privo di senso.

(3) Non compare nella scienza tranne che nello studio dell'organizzazione de un certo numero di individui. Qui la freccia indica la direzione della progressiva crescita dell'elemento aleatorio.

D'altro lato, la fisica dei sistemi microscopici è caratterizzata dall'assenza di questa "freccia del tempo" mentre nel mondo dei fenomeni macroscopici la "freccia"

²⁹ A. Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge University Press, Cambridge, 1948), p. 35.

sembra essere un dato sperimentale. Nel mondo dei processi evolutivi il tempo fluisce inesorabilmente verso il futuro.

Come accennato sopra, l'equazione di Schrödinger, che descrive il comportamento della funzione d'onda, come l'equazione di Newton è reversibile nel tempo. In questo senso specifico, lo stesso abisso separerebbe la descrizione quantistica e la descrizione dinamica classica dalla descrizione di tipo evoluzionista associata all'entropia³⁰.

Nella meccanica quantistica è il processo di misura che introduce questa rottura della simmetria. La simmetria di inversione temporale si rompe quando la funzione d'onda – l'oggetto che descrive il sistema fisico o, meglio ancora, l'oggetto che contiene tutte le informazioni disponibili sul sistema fisico – viene ridotta in un processo di misura³¹.

Più precisamente, quando si effettua una misura su un sistema fisico descritto da questa funzione d'onda, essa subisce un “collasso”, cioè si riduce a una delle tante componenti che ha in partenza o prima della misura.

E questo è un processo a una sola direzione: appunto, la direzione di riduzione della funzione d'onda. È un processo anch'esso che ha a che fare con probabilità giacché la funzione d'onda viene interpretata come un'ampiezza di probabilità. Dal processo di misura quello che si guadagna è più informazione (più conoscenza) sul sistema. In maniera simile, l'entropia fornisce informazione sul sistema fisico sotto indagine.

Nella meccanica quantistica, da una parte, abbiamo l'equazione di Schrödinger, che è un'equazione deterministica e reversibile; d'altra parte, abbiamo la “riduzione” o il “collasso” della funzione d'onda, che è irreversibile e ci permette soltanto di predire le probabilità dei risultati delle nostre misure. Di conseguenza, la meccanica quantistica sembra attribuire un ruolo essenziale all'atto di osservazione e potrebbe indicare che siamo noi, gli osservatori, che, per mezzo delle nostre misure, introduciamo le probabilità e l'irreversibilità in un mondo altrimenti deterministico e reversibile³².

Ritorniamo nel prossimo capitolo (Sezione 4) a queste questioni cruciali. Adesso, dobbiamo finire l'incursione molto breve per il mondo dei greci, parlando di quei due che sono al centro dell'affresco *La Scuola di Atene*, di Raffaello Sanzio, situato nella *Stanza*

³⁰ I. Prigogine, *La fin des certitudes. Temps Chaos et les lois de la nature* (Éditions Odile Jacob, Paris, 1996).

³¹ A. Jaffe, *Finding the Time*, *Nature* **537**, 616 (2016).

³² Per una discussione più dettagliata si veda I. Prigogine and I. Stengers, *Entre le temps et l'éternité* (Librairie Arthème Fayard, Paris, 1988).

della Segnatura.

4 Platone, Aristotele e Agostino

Quando Platone affronta la questione del tempo, egli cerca il suo corrispondente nel mondo delle idee. Cosa sarebbe il tempo? Leggiamo nel *Timeo*:³³

Poiché il padre (Demiurgo), che l'aveva generato, vide muoversi e vivere questo mondo divenuto immagine degli eterni dei, se ne compiacque, e pieno di letizia pensò di farlo ancor di più somigliante al suo modello. Come dunque questo è un animale eterno, così anche quest'universo egli cercò, secondo il suo potere, di renderlo tale. Ora, la natura dell'anima era eterna, e questa proprietà non era possibile conferirla pienamente a chi fosse stato generato: e però pensa di creare un'immagine mobile dell'eternità, e ordinando il cielo crea dell'eternità che rimane nell'unità un'immagine eterna che procede secondo il numero, quella che abbiamo chiamato tempo.

Il tempo si trasforma, allora, in un'immagine mobile dell'eternità (che cioè corrisponde al tempo o alla sua assenza nel mondo delle idee) e fu generato congiuntamente al cielo e d'accordo con un modello. Così, se il cielo perisce, anche il tempo perisce; se il cielo dura, anche il tempo "dura".

Quest'intuizione che il tempo sorge con l'universo fu riformulata, in maniera magistrale e in un contesto religioso, da Sant'Agostino, nel famoso Capitolo XI del suo non meno famoso libro *Le Confessioni*³⁴:

Quel tempo precedente, appunto, l'avresti istituito tu, e non un solo momento di tempo poteva passare, prima che tu istituissi il tempo. Se invece non esisteva il tempo prima che fossero fatti il cielo e la terra, perché chiedersi che cosa tu facessi allora? Non c'è un allora dove non c'è il tempo.

Invece, se c'è un allora possiamo dedurre anche che ci sia un "ora" e perciò una

³³ Platone, *Timeo*, a cura di Emilio Piccolo (Selecio, Napoli, 2009).

³⁴ A. Agostino, *Le Confessioni* (BUR, Milano, 2012), trad. Carlo Vitali.

durata o un intervallo fra questo “allora” e questo “ora”. In poche parole, c’è un “anteriore” e un “posteriore” e l’intervallo fra loro deve essere misurabile.

Per misurarlo, Aristotele usa il movimento.

Nel mondo reale, secondo lui, il concetto di tempo è legato a quello di movimento. È nel libro della *Fisica* che troviamo le sue profonde analisi del concetto di tempo. La definizione che egli dà è molto famosa e la sua discussione occupa una buona parte del libro IV³⁵:

Che, dunque, il tempo è numero del movimento secondo l’anteriore e posteriore, e che è continuo (infatti è di ciò che è continuo) è evidente.

Questa percezione del prima e del poi, che è la responsabile della misura del movimento, deve essere fatta da qualcosa o da qualcuno che percepisce, cioè dall’anima. La stessa idea è rinforzata da un altro brano, dove possiamo leggere³⁶:

[...] Ma se nulla è per natura tale da poter numerare a parte l’anima e, dell’anima, l’intelletto, è impossibile che il tempo sia se l’anima non è, a meno che non sia ciò che, qualsiasi cosa sia, il tempo è, ad esempio se è possibile che vi sia movimento senza anima.

Sul ruolo dell’anima nel misurare il tempo è d’accordo anche Sant’Agostino³⁷:

In te, anima mia, misuro il tempo.

Da questo può anche derivare l’adagio della scolastica: *Si non esset anima non essit tempus.*

Dunque, questo tempo ha una realtà oggettiva? O per esistere dipende da un osservatore, da un’anima che lo percepisce e lo misura?

In Aristotele, leggiamo anche che³⁸:

³⁵ Si veda, ad esempio, Aristotele, *Fisica*, IV, 220a1, 24-25, Introduzione, traduzione e commento di Laura M. Castelli (Carocci, Roma, 2012), testo al quale faremo riferimento nel seguito.

³⁶ *Ibidem*, IV, 223a1, 21-26.

³⁷ A. Agostino, op. cit., IV, 27, 36.

³⁸ *Ibidem*, IV, 223a1, 27-29.

[...] Anteriore e posteriore sono nel movimento; ed il tempo sono queste cose in quanto sono numerabili.

La difficoltà che è radicata nell'idea che il tempo possa essere l'istante è discussa (e viene rifiutata) quando, discorrendo sul sospetto che il tempo forse non esista assolutamente, egli si manifesta dicendo che “una parte di esso, infatti, è stata e non è, una parte sarà e non è ancora”. E da queste “parti” è costituito sia il tempo infinito sia quello che si consideri di volta in volta. Ma sembrerebbe impossibile che ciò che è costituito da cose che non sono partecipi dell'essere!

Egli prosegue affermando che “del tempo, però, alcuni parti sono state e altre saranno, mentre nessuna è, pur essendo esso divisibile in parti. E l'ora non è una parte: la parte, infatti, funge da misura e bisogna che l'intero sia costituito dalle parti; ma il tempo non sembra essere costituito dagli ora”.

Difficoltà simili compaiono nelle riflessioni di Sant'Agostino menzionate sopra. Ancora nel celebre Capitolo XI delle sua *Confessioni*, discorrendo sulle divisioni del tempo, egli argomenta che “arde la mente che vuol penetrare l'intrico foltissimo di questo enigma” e cioè ³⁹:

[...] noi misuriamo il passare del tempo, e se qualcuno mi chiede come faccio a saperlo rispondo: so che noi misuriamo, e so che non possiamo misurare ciò che non esiste, e il passato e il futuro non esistono. Ma il tempo presente in che modo lo misureremmo, se non ha estensione? Lo si misura dunque mentre passa, e una volta passato non lo si misura perché non c'è più nulla da misurare. Ma da dove viene e per dove passa e dove va, quando lo si misura? Da dove se non dal futuro? Per dove se non attraverso il presente? Dove se non nel passato? Dunque: da ciò che non è ancora, attraverso ciò che non ha estensione, verso ciò che non è più. [...] Ma ciò che ancora non è non ha misura. Allora nel presente, per cui passa? Ma ciò che non ha estensione non ha misura. O nel passato, verso cui va? Ma ciò che non è più non ha misura.

Non si può parlare di una soluzione del problema, soprattutto se pensiamo allo

³⁹ Santo Agostinho, *op. cit.*, 21-27.

sviluppo della scienza nei secoli posteriori, ma qui possiamo registrare due atteggiamenti che sono ancora presenti nella concezione contemporanea del tempo.

Quando lo si vuole concepire in termini delle strutture dell'universo, cioè a partire dai suoi fondamenti, la soluzione è negarlo; quando si guarda la realtà macroscopica, allora il tempo sembra trovare esistenza reale e sembra essere caratterizzato da una "freccia" puntando chiaramente in direzione al futuro (almeno una "freccia psicologica").

Nel pensiero platonico, il tempo segnalato nella direzione della "freccia" è soltanto un riflesso, imperfetto, tipico di questo nostro mondo di conoscenze imperfette, di qualcosa di perfetta, esistente nel mondo delle idee: l'eternità. La realtà, in fondo, è atemporale.

Per Aristotele, il tempo esiste ed è una "durata" che viene misurata dal movimento. Allora, si può usare un certo movimento per avere un numero da attribuire al tempo. Implicita qui è la possibilità degli orologi, cioè di una misura della durata perché questo "anteriore" e questo "posteriore" possono perfettamente riferirsi alla lancetta degli orologi.

Anche qui non siamo completamente liberi da un certo senso di eternità. Per Aristotele, l'unità di misura del tempo deve essere cercata nel movimento uniforme e perfetto, ossia nel movimento circolare e uniforme, che è caratteristico dei corpi celesti. Allora, si vede sempre innescarsi l'eternità del movimento e, in certo senso, anche "l'eternità del tempo", cioè la sua inesistenza, perché il riferimento assoluto che permette di misurarlo è collegato a dei movimenti eterni, che accadono in quel cielo "immutabile" del mondo sopra lunare della fisica aristotelica.

L'universo di Aristotele è comunque spaccato in due e il tempo è una realtà nel mondo sublunare. I cieli continuano ad essere eterni.

Per Agostino, invece, l'eternità appartiene a Dio, che non è soggetto al tempo, anzi lo ha creato. Come detto sopra, è l'anima che percepisce il tempo, che lo "misura"⁴⁰:

Almeno questo ora è limpido e chiaro: né futuro né passato esistono, e solo impropriamente si dice che i tempi sono tre, passato, presente e futuro, ma più corretto sarebbe forse dire che i tempi sono tre in questo senso: presente di ciò che è passato, presente di ciò che è presente e presente di ciò che è futuro. Sì, questi tre sono in un certo senso nell'anima e non vedo come possano essere altrove: il presente di ciò che è passato è

⁴⁰ Ibidem, 20-26.

la memoria, di ciò che è presente la percezione, di ciò che è futuro l'aspettativa.

Il tempo è reale nell'anima e la freccia del tempo siamo noi che la costruiamo quando cerchiamo di capire la durata della nostra vita e degli eventi. Inoltre, il tempo non è movimento, ma inversamente, è il tempo che passa che ci permette di constatare lo spostamento⁴¹:

Misuro il movimento di un corpo per mezzo del tempo, ma non misuro ugualmente anche il tempo? Potrei misurare il movimento di un corpo, la sua durata, la durata del suo spostamento da un luogo all'altro, se non misurassi il tempo in cui si muove? Ma questo tempo con che lo misuro?

Anche se la soluzione sembra un po' grossolana, in questi pensieri uno sente il bisogno di un soggetto per rendersi conto dell'esistenza del tempo nel mondo macroscopico.

È sorprendente, ma questo ci riporta a quanto afferma la meccanica quantistica, quando in fondo ci insegna che la "freccia del tempo" è costruita nel processo di misura, essendo reale per il soggetto che effettua la misura, potendo, probabilmente, non esistere in "realtà", cioè non esistere nel mondo microscopico descritto dalle sue equazioni fondamentali.

Qui troviamo le radici della distinzione fra le descrizioni della realtà che hanno a che vedere con il tempo, che sembrano ammettere l'esistenza della "freccia", come la termodinamica, e quelle più "fondamentali" che, sostanzialmente, lo negano, come la meccanica quantistica, la teoria della relatività e la dinamica classica.

Per registrare questo contrasto quando si passa dal "micro" al "macro", il libro di Prigogine e Stengers citato sopra ha preso il rappresentativo titolo "tra il tempo e l'eternità", tra il tempo del mondo macroscopico e l'eternità della dinamica!

⁴¹ Ibidem, IV 24, 31. (Conferir)

Capitolo 2

Contuitus (Percezione)

*Un año entero había solicitado
de Dios para terminar su labor:
un año le otorgaba su omnipotencia.*
(J. L. Borges, *El milagro secreto*, Ficciones, 1944.)

1 La dinamica classica

La dinamica classica si è consolidata nell'opera di Newton, che rappresenta una sintesi, l'unione dei problemi della *physica coelestis* con quelli della *physica terrestris*. Così si possono spiegare fenomeni molto diversi come il moto diurno e annuale delle stelle, l'appiattimento della Terra nei suoi poli, il comportamento del giroscopio, le maree, i venti alisei, i vortici, ecc. Tutto questo non avrebbe trovato una spiegazione molto semplice in un modello geocentrico. Come afferma Koyré⁴²:

Il legame sempre più stretto che si è stabilito, nei primordi dei tempi moderni, tra la physica coelestis e la physica terrestris costituisce la propria origine della scienza moderna.

L'auge della Rivoluzione Scientifica iniziata nel secolo XVI, consistendo di una intensa successione di rapidi cambiamenti nella conoscenza della natura e nel modo di studiare i fenomeni naturali, la rivoluzione che ha prodotto nostra moderna scienza, si chiama Rivoluzione Newtoniana. Questa rivoluzione fu multipla nelle sue manifestazioni: fu una rivoluzione nella matematica e diverse altre nelle cosiddette scienze fisiche.

Una delle rivoluzioni nella fisica è accaduta nella meccanica razionale. Ci basta menzionare le famose "leggi di Newton" e siamo subito convinti della veracità di questa

⁴² *O Significado da Síntese Newtoniana*, in *Newton – Textos, Antecedentes, Comentários*, I. Bernhard Cohen e Richard S. Westfall (orgs.) (Contraponto, Rio de Janeiro, 2002), p. 87.

affermazione. Fu in questo contesto che apparso il moderno concetto di massa e il riconoscimento – fondamentale sotto tutti gli aspetti per la teoria della relatività generale – dell'esistenza di due masse, l'inerziale e la gravitazionale. Tutto questo è stato ottenuto a partire da un brillante uso del metodo assiomatico della geometria euclidea. Newton ha compiuto una completa formulazione della meccanica in termini di principi matematici generali.

I *Principia* – l'opera più nota di Newton e una delle più importanti della scienza – sono strutturati in tre libri. Nel primo libro, dopo la presentazione di otto definizioni – tra e quali quella di massa e di quantità di moto –, ne segue uno *Scolio* nel quale Newton espone quello che ritiene come i suoi concetti di spazio e tempo. Egli scrisse⁴³:

Non definisco, invece, tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti. Va notato tuttavia, come comunemente non si concepiscano queste quantità che in relazione a cose sensibili. Di qui nascono i vari pregiudizi, per eliminare i quali conviene distinguere le medesime cose in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e volgari.

I. *Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata; quello relativo, apparente e volgare, è una misura (accurata oppure approssimativa) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno.*

Ne seguono le definizioni di spazio assoluto, di luogo e di moto assoluto.

Il moto vero e reale non può essere definito se non per mezzo di uno spazio reale, vero e assoluto, e di un tempo assoluto, vero e matematico. Nello *Scolio Generale*, alla fine dei *Principia*, Newton afferma che Dio, con la Sua eternità e ubiquità, costituisce lo spazio assoluto e il tempo assoluto. In un'altra opera, *Ottica*, Newton chiamerà lo spazio e il tempo *sensorium Dei*.

Nel carteggio Leibniz–Clarke – nel quale Clarke è, in verità, il porta-voce delle idee di Newton – si affermerà che lo spazio e il tempo sono attributi divini, identificandosi lo

⁴³ I. Newton, *op. cit.*, p. 14.

spazio assoluto con l'immensità e il tempo con l'eternità⁴⁴.

La sezione successiva del libro è dedicata agli assiomi o leggi di movimento.

La prima legge, che esprime il “Principio di Inerzia” – la persistenza del moto nell'assenza di un agente che lo possa interrompere – porta implicita l'idea di eternità del moto. Questo, a sua volta, può implicare un universo infinito – un'idea che non ha ispirato paura in Newton, come ha ispirato in altri grandi saggi della storia.

Il ruolo di Newton in questo grande quadro della Rivoluzione Scientifica fu chiarito da Koyré quando ha identificato, nel flusso di questa rapida trasformazione nella storia della conoscenza umana, il posto che gli è assegnato e l'eredità alla quale è potuto accedere. Scrisse Koyré⁴⁵:

Nel 1543 – cent'anni prima della nascita di Newton – Copernico ha strappato la Terra dalle sue basi e l'ha gettata nel cielo. All'inizio del secolo XVII (nel 1609 e nell'1619) Kepler formulò le sue leggi dei moti celesti e, così, ha distrutto gli orbi e le loro sfere che racchiudevano il mondo e lo mantenevano unito; e l'ha fatto nella stessa epoca in cui Galileo, creando i primi strumenti scientifici e mostrando all'umanità cose che l'occhio umano non aveva mai guardato, ha svelato per la ricerca scientifica i due mondi connessi dell'infinitamente grande e dell'infinitamente piccolo.

Inoltre, per “soggettare il moto al numero”, Galileo ha aperto la strada per la formulazione di nuovi concetti di materia e movimento [...] che costituirono la base della nuova scienza e cosmologia; concetti con i quali – identificando materia e spazio – Descartes, nel 1637, ha tentato senza riuscire di ricostruire il mondo; concetti che – tornando a distinguere materia e spazio – Newton ha usato, in maniera così brillante e così bene riuscita, nella sua ricostruzione stessa.

Quindi, nella prospettiva newtoniana il quadro è più ampio. C'è la materia e c'è il movimento. Ma c'è anche lo spazio vuoto (non il *plenum* di Descartes), infinito e

⁴⁴ Una discussione più approfondita della questione può essere trovata in A. Koyré, *Dal mondo chiuso all'universo infinito* (Feltrinelli, Milano, 1988) e anche in F. Selvaggi, *Filosofia del mondo. Cosmologia filosofica* (Pontificia Università Gregoriana, Roma, 1996).

⁴⁵ A. Koyré, *O Significado da Síntese Newtoniana*, in I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall, *op. cit.* pp. 84-85.

omogeneo. È uno spazio nel quale, secondo la prima legge, se i corpi non trovano resistenza o opposizione, eseguiranno il suo moto per sempre.

C'è anche, nel cosmo newtoniano, un quarto elemento: la gravità, l'attrazione gravitazionale onnipresente, che corrisponde all'azione di Dio nel mondo. In questo mondo newtoniano⁴⁶, “la natura passò a essere pensata dalla mente essenzialmente come il dominio delle masse, muovendosi d'accordo con leggi matematiche nello spazio e nel tempo, sotto l'influenza di forze definite e affidabili”.

Si arriva dunque alla completa geometrizzazione dello spazio, di uno spazio dimensionale e omogeneo – quello della geometria euclidea. Non si tratta perciò di quello spazio strettamente legato alla posizione dei corpi, di uno spazio fisico particolare, caratteristico della fisica e dei sistemi di mondo anteriori a Galileo, Descartes, Kepler, Huygens e lo stesso Newton.

Dopo la sintesi newtoniana, il quadro concettuale della dinamica classica può essere riassunto per mezzo di un insieme di postulati che evidenziano il suo carattere deterministico, ma anche il ruolo dello spazio e del tempo nella descrizione generale del fenomeno fisico⁴⁷.

Il primo dei postulati tratta della realtà oggettiva del mondo e cioè del realismo, del fatto che l'osservatore non interferisce nel mondo che gli è strano ed indipendente. Nell'ambito della fisica classica si può trovare il “realismo ingenuo” per il quale:

1. Il mondo esiste oggettivamente, indipendentemente dall'osservatore.

La situazione non rimarrà così nella fisica quantistica. In effetti, come vedremo più avanti, la teoria quantistica, secondo l'interpretazione di Copenhagen, insiste nel carattere soggettivo del processo di misura. In questa prospettiva, sono validi gli enunciati che tengono in conto osservatore e cosa osservata.

Nell'universo mentale di Einstein, invece, il realismo è un dato scontato. La teoria della relatività, sia la speciale che la generale, non cambia questa prospettiva oggettiva della dinamica classica.

⁴⁶ E. A. Burt, *The Metaphysical Foundations of Modern Science*, (Dover, New York, 1954).

⁴⁷ J. P. Vigièr, *Determinism and Indeterminism in a New “Level” Conception of Matter*, *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics* **44**, 262-264 (1966).

Nel secondo postulato si evidenzia un'altra delle caratteristiche della dinamica classica, che distingue prettamente il ruolo dello spazio e del tempo e, di conseguenza, anche dell'osservatore:

2. *Qualsiasi movimento può essere descritto nella “arena” dello spazio-tempo: il movimento si descrive come l'insieme di posizioni successive occupate in tempi differenti.*

Il termine “arena dello spazio-tempo” vuole dire che spazio e tempo intervengono come delle entità distinte che sono usate per formare un singolo ente geometrico dove si definiscono le configurazioni del mondo fisico. L'insieme di posizioni successive occupate in tempi diversi è nient'altro che la definizione precisa della *traiettoria classica*. Sia la fisica quantistica sia quella relativistica cambieranno il senso di questo postulato.

Per la fisica quantistica questo concetto di traiettoria non regge più; il principio di incertezza di Heisenberg non ci permette di stabilire con precisione arbitraria la posizione e il momento della particella in un dato istante di tempo. Invece, l'evoluzione temporale della funzione d'onda ci permette soltanto di predire con quale probabilità una certa posizione potrà essere occupata dal sistema in quell'istante.

La fisica relativistica affermerà che questa “arena” dello spazio-tempo è in verità un *continuum* quadridimensionale formando un'entità. In questo spazio-tempo come un'entità singola, quello che avviene è appunto definito come un *evento*.

Un evento è quindi caratterizzato da tre coordinate spaziali e da una quarta “coordinata”, definita per mezzo del prodotto della velocità della luce nel vuoto e del tempo.

Nella dinamica classica, la geometrizzazione dello spazio verrà accompagnata da un mondo formato da particelle senza volume o di punti materiali che si muovono in risposta alle forze che su di essi agiscono, d'accordo con delle leggi matematiche rigorose, che sono le leggi della natura. Tutto questo si esprime per mezzo dei due postulati:

3. *Un sistema fisico qualsiasi può essere considerato come un insieme di punti materiali (senza dimensioni, dotati di un numero finito di proprietà).*

4. Il movimento dei punti risulta da forze indipendenti da questi punti; le forze sono governate dalle equazioni differenziali che rappresentano le leggi della natura (in altre parole: le leggi esistono indipendentemente dagli oggetti e se conoscessimo le posizioni, le velocità e le forze di un sistema, potremmo prevedere la sua evoluzione).

La fisica quantistica conserva l'idea implicita nel postulato 3, ma mette in discussione il carattere oggettivo della particella.

Cosa è una particella?

Una vera rivoluzione avviene in questo concetto con la scoperta della dualità onda-particella. La natura duale della materia introduce nel senno della fisica quantistica la necessità di tenere in conto le proprietà corpuscolari e ondulatorie in maniera complementare.

La teoria della relatività in certa maniera unifica i postulati 3 e 4 affermando che le forze (e le leggi che le governano) riflettono le proprietà locali di un campo, e questo campo deve essere considerato come un'entità singola.

La meccanica quantistica invece modifica il significato di "legge": le leggi saranno applicate deterministicamente alle probabilità di distribuzione e governano il suo comportamento nello spazio-tempo.

È un modo più ricco di mantenere il determinismo: si possono fare delle predizioni rigorose sull'evoluzione temporale di una densità di probabilità!

Il quinto postulato è quello della completezza:

5. Il sistema di leggi è completo, il numero delle leggi è finito e ben determinato. Questo, in particolare, fa sì che se fossero note le velocità, le posizioni e le forze in un preciso instante, allora il futuro sarebbe prevedibile con sicurezza e senza errori.

Se il sistema di leggi è completo anche la teoria è completa, evidentemente. E se questo è vero, anche la descrizione che ne segue dalla teoria può essere considerata come la definitiva. Era quanto pensava Heisenberg sulla meccanica quantistica.

Secondo lui e la scuola di Copenaghen, la teoria quantistica era "la fine del percorso" (*endgultig*), la teoria definitiva. L'interpretazione ortodossa della meccanica

quantistica preserva l'essenza del postulato 5, ma il prezzo che si paga è che la teoria deve fare a meno della località. È una questione profonda, come si sa, ed è al centro del dibattito Bohr-Einstein sulla completezza della teoria dei quanti. Questo forte dibattito ha generato il cosiddetto argomento EPR - Einstein, Podolsky e Rosen, proposto da Einstein e collaboratori nel 1935, e la sua replica, pubblicata da Bohr poco tempo dopo, sulla stessa rivista⁴⁸, e tutta la letteratura che ne segue. Il dibattito è anche simbolicamente alla base di quello che Popper chiamerà lo scisma nella fisica⁴⁹.

La teoria della relatività invece preserva integralmente il postulato: il sistema di leggi è completo. Nel contesto della teoria della relatività è proprio questa completezza che forma le fondamenta di un universo-blocco dove il tempo non gioca un ruolo fondamentale, come si vedrà più avanti (Sezione 3).

Il quinto postulato traduce in maniera lapidaria l'essenza del determinismo classico: “se lo stato del sistema isolato è noto in un dato istante, esso potrà essere calcolato in un altro istante qualsiasi”. Il prototipo di un sistema di questo genere fu considerato, per lungo tempo, il Sistema Solare.

In effetti, Laplace, studiando il problema di tre corpi, per mezzo di un'analisi perturbativa che trascurava termini del secondo ordine o più alti nella massa e ammetteva piccoli valori per l'eccentricità dell'orbita dei pianeti (tenendo, però, i termini del secondo ordine), ha enunciato il suo principio di stabilità (migliorato grandemente dopo per i metodi di Lagrange e Poisson, fra altri) come segue:⁵⁰

Il sistema del mondo, perciò, oscilla attorno uno stato medio dal quale mai si allontana, se non di una quantità molto piccola. Esso gode, per conto di sua costituzione e della legge di gravità, di una stabilità che non può essere distrutta se non per cause esterne; e noi siamo sicuri che l'azione di queste non è rilevabile anche considerando le osservazioni dall'antichità fino ai nostri giorni. Questa stabilità del sistema del mondo, che garantisce la sua durata, è uno dei fenomeni più degni d'attenzione, giacché mostra nei

⁴⁸ A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* Physical Review **47**, 777 (1935); N. Bohr, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* Physical Review **48**, 696 (1935)

⁴⁹ K. R. Popper, op. cit., 2012.

⁵⁰ P. S. Laplace, *Sur l'équation séculaire de la lune*, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris, année 1786, 243–271 (1788).

cieli, per mantenere l'ordine dell'universo, la stessa intenzione che la natura ha osservato in maniera ammirevole nella Terra, di conservare gli individui e perpetuare le specie.

Questa stabilità laplaciana è alla base di una concezione del tipo “macchina del mondo”, che va avanti per sempre, secondo le leggi della natura. Evidentemente, il problema è molto più complicato e non è stato risolto fino ad oggi. Una analisi più completa di questa stabilità fino ai nostri giorni va fuori dello scopo di queste modeste riflessioni. Comunque, le potenti tecniche numeriche delle ultime decadi hanno permesso di concludere che il movimento dei pianeti nel Sistema Solare è, in verità, caotico, il che, evidentemente, proibisce qualsiasi predizioni su come sarà questo stesso movimento dopo una decina di milioni d'anni – molto poco tempo in una scala astronomica e cosmologica⁵¹.

Newton e Leibniz

Una famosa controversia attorno le teoria dello spazio e del tempo e attorno i principi metafisici possiamo trovarla nel dibattito tra Newton e Leibniz menzionato prima. Questo dibattito è contenuto nel carteggio Leibniz-Clarke e il suo argomento centrale è legato al cosiddetto “funzionamento del mondo” secondo le concezioni più metafisici, rappresentate dal punto di vista di Leibniz, e le concezioni di una “filosofia matematica”, rappresentata da Newton. Ci sono diversi argomenti di grande importanza in questo dibattito, che tiene conto della relazione tra Dio e Natura, tra Dio e lo spazio, la natura dello spazio e del tempo, il principio di ragion sufficiente, l'idea di Leibniz rispetto l'identità degli indiscernibili, la natura della gravità, la possibilità di esistenza del vuoto e degli atomi, tra tanti temi importanti.

Qui vogliamo soffermarci brevemente su un punto più specifico ma di grande importanza per queste riflessioni, cioè la questione del tempo assoluto e del tempo relativo.

Come abbiamo visto, dal punto de vista newtoniano, tutti gli orologi e tutti i calendari ci mostrano una misura del tempo, di un tempo relativo. Ma Newton difende anche l'esistenza di un tempo assoluto, percepito da Dio soltanto. Quindi, esiste un tempo universale, assoluto, indipendente dalla nostra partecipazione o dalla nostra percezione.

⁵¹ Cf. J. Laskar, *Le Système solaire est-il stable?*, Séminaire Poincaré **XIV**, 221–246 (2010).

Questo tempo – sia quello che sia – fluisce senza la nostra conoscenza!

Secondo Leibniz, Dio è perfettamente razionale e allora tutte le cose che accadano al mondo devono avere una ragione, una spiegazione razionale. La famosa domanda “perché esiste qualcosa e non il nulla?” deve ricevere una risposta perfettamente razionale.

Questo ragionamento può essere illustrato per mezzo di un esempio⁵² : se domandiamo “perché l’universo cominciò quando cominciò e non dieci minuti dopo?” non possiamo che dare una risposta razionale.

Leibniz risponde che non ci può essere una ragione per cui dobbiamo preferire la storia dell’universo come è invece di un’altra in cui tutto accade dieci minuti dopo. Questo perché i tempi relativi sarebbero tutti uguali in questi due universi con inizi diversi; soltanto un tempo assoluto potrebbe permettere una scelta fra questi due ipotetici scenari.

Però, attenzione: le leggi della natura riguardano soltanto i tempi relativi! La conseguenza è chiara: se non c’è una ragione per cui uno deve preferire l’inizio dell’universo in un tempo assoluto o nell’altro, allora non ha senso definire un tempo assoluto. Il tempo che misuriamo con gli orologi è il tempo relativo, cioè, è l’unico tempo!

Di conseguenza, anche la definizione di moto relativa diventa più chiara e doverosa nel senno della dinamica classica. Le posizioni sono relative, vengono misurate rispetto ad un oggetto o punto di riferimento (potrebbero essere le stelle “fisse”!), durante un intervallo di tempo misurato esso stesso da un orologio.

Troviamo subito un contrappunto netto fra due pensieri sul movimento; uno assoluto, di ceppo newtoniano; l’altro, relazionale, come eredità necessaria del principio di ragion sufficiente di Leibniz.

2 La seconda legge della termodinamica

Nella seconda metà del secolo XIX, la scienza dei fenomeni termici sarebbe stata denominata termodinamica⁵³. La sua elaborazione storica parte dalla genesi del concetto di temperatura e passa, dopo, dai processi e dagli strumenti fabbricati per misurarla. Questa

⁵² Si veda anche la discussione in L. Smolin, *Time Reborn* (Mariner Books, Boston, 2014).

⁵³ Questa sezione è una versione modificata, tradotta all’italiano, di una parte del mio libro *Perspectivas em História da Física - Volume 2 – Da Física dos Gases à Mecânica Estatística* (Livraria da Física, São Paulo, 2015). Ringrazio l’editore José Roberto Marinho per il permesso di usare liberamente parte di quel testo.

tappa fu preliminare all'intenso sforzo impiegato nel chiarire il concetto di calore, accompagnato da un uguale sforzo nella formulazione del concetto di energia, al quale ha contribuito in maniera decisa. Allo stesso tempo, però, si presentava una visione più dettagliata della struttura della materia.

La formulazione del principio di conservazione dell'energia generalizzato può essere considerata come il punto alto di uno sforzo concettuale, di varie generazioni, per la comprensione dei concetti di calore e energia.

Lo studio del calore e dell'energia ha dovuto ampliarsi per soddisfare le esigenze molto concrete del funzionamento delle macchine termiche. Una prospettiva più collegata agli sviluppi tecnologici deve essere adottata nello studio delle basi storiche della termodinamica. Dobbiamo considerare i problemi pratici che occupavano gli scienziati applicati e gli ingegneri, se vogliamo capire meglio l'origine delle leggi che governano le trasformazioni dei sistemi macroscopici e la prestazione delle macchine termiche.

È proprio nello studio di questi problemi che troveremo le radici storiche e anche concettuale della seconda legge della termodinamica. È questo che ci interessa qui perché si è solito associare (correttamente e incorrettamente) la seconda legge con il problema del tempo⁵⁴.

2.1 Carnot e la seconda legge

Ci sono poche dubbi sul fatto che Sadi Carnot (1796 –1832) abbia scoperto la seconda legge della termodinamica, che abbia introdotto il processo ciclico noto come ciclo di Carnot e che abbia riconosciuto l'importanza dei processi reversibili in generale⁵⁵. Come succede frequentemente nella storia della fisica (e nella storia in generale) questo riconoscimento non fu immediato.

Il lavoro di Carnot era virtualmente sconosciuto prima che un articolo di Émile Clapeyron (1799 – 1864) descrivesse chiaramente il ciclo di Carnot. L'articolo di Clapeyron fu pubblicato nel 1834, due anni dopo la morte di Carnot e dieci anni dopo la pubblicazione del suo lavoro fondamentale. L'unica opera pubblicata da Carnot è la

⁵⁴ A. Ben-Naim, *The Briefest History of Time* (World Scientific, Singapore, 2016).

⁵⁵ È quanto afferma con grande sicurezza lo storico Y. Elkana: *La scoperta della conservazione dell'energia*, (Feltrinelli, Milano, 1977), p. 125.

memoria *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco e sulle macchine adatte a sviluppare tale potenza). Allora si può dire che la pubblicazione delle *Riflessioni* segnala l'inizio della termodinamica classica. Del lavoro di Clapeyron – e, di conseguenza, anche dell'opera di Carnot – hanno preso conoscenza, tra altri, William Thomson (Lord Kelvin) e Rudolf Clausius, quando l'importanza del lavoro di Carnot sulla seconda legge della termodinamica era diventata indiscussa.

In poche parole Carnot ha pensato allo schema più semplice di macchina termica: questa ha quattro fasi ma solo in due di esse prende e poi cede calore sfruttando due serbatoi a temperature diverse; nelle altre due fasi produce lavoro senza scambi di calore (macchina reversibile di Carnot). Egli ha provato correttamente che era impossibile che una macchina reale qualsiasi, operante tra gli stessi serbatoi, fosse più efficiente della macchina di Carnot⁵⁶.

In questo processo, egli ha capito l'importanza del trasferimento reversibile di calore e ha stabilito la connessione con il processo di operazione di una macchina termica. Inoltre, ha mostrato quale era l'efficienza (il rendimento) di una macchina di Carnot operante con un differenza di temperatura fissa tra i due serbatoi.

Queste analisi, fatte nelle macchine a vapore, mostrano che il processo di uguaglianza della temperatura per mezzo del flusso di calore dai corpi più caldi ai corpi più freddi avviene costantemente, non soltanto nelle macchine, ma in tutta la natura. Questa conclusione è, sicuramente, la più importante di tutta la sua analisi, perché proviene da considerazioni di principii di natura generale ed è accompagnata da calcoli quantitativi. E questa conclusione ci permette un'altra, con delle conseguenze ancora più gravi: l'energia si “dissipa”. In altre parole: la quantità totale di energia di un sistema chiuso è costante, ma tende a trasformarsi in forme di energia sempre meno utilizzabili.

Si arriva dunque a una specie di “legge della dissipazione dell'energia”. Questa legge esprime l'idea che la tendenza del flusso di calore dai corpi caldi ai corpi freddi rende impossibile ottenere la quantità massima di lavoro da una determinata quantità di calore.

Alcuni anni dopo, queste conclusioni di Carnot furono incorporate alle nuove teorie

⁵⁶ Si veda, anche, H. Erlichson, *Sadi Carnot, 'Founder of the Second Law of Thermodynamics'*, European Journal of Physics **20**, 183–192 (1999).

dal calore con il nome di secondo principio o seconda legge della termodinamica. Il cambiamento decisivo di prospettiva sull'opera del ragazzo francese dipenderà ancora dal fatto che essa dovrà farsi conoscere e subire alcuni sviluppi cruciali. La seconda legge della termodinamica, nella forma come la conosciamo attualmente, richiede il concetto di “entropia”, introdotto da Clausius più tardi.

2.2 Clausius

Nel 1854, Rudolf Clausius (1822 – 1888) pubblicò un importante lavoro dedicato alla teoria meccanica del calore⁵⁷ nel quale sviluppò il concetto di entropia. Non riceverà ancora questo nome, ma la parola trasformazione compare ed il titolo del lavoro potrebbe essere tradotto come “Su una forma modificata del secondo teorema della teoria meccanica del calore”.

In un lavoro quase una decade dopo, l'entropia verrà “battezzata” come tale. Trattasi del classico articolo *Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie* (Su alcune forme convenienti dell'equazione fondamentale della teoria meccanica del calore)⁵⁸.

La prima definizione di entropia introdotta nella storia della fisica viene fatta in questi termini:

Potremmo chiamare la variabile S con il nome di contenuto trasformazionale della sostanza, così come abbiamo chiamato la variabile U con il nome di contenuto termico o ergonale. Ma dal momento che io ritengo più opportuno, per le grandezze importanti, suggerire dei termini presi a prestito dalle lingue antiche, in modo che possano essere adottati nelle lingue moderne senza cambiamenti, allora suggerisco per S il termine entropia del corpo, dalla parola greca τροπή', trasformazione. Ho formato intenzionalmente la parola entropia di modo a essere il più somigliante alla parola

⁵⁷ R. Clausius, *Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie*, *Annalen der Physik und Chemie* **169** (1854). Traduzione inglese: *On a modified form of the second fundamental theorem in the mechanical theory of heat*. *Philosophical Magazine* (4) **12**, 81 (1856).

⁵⁸ È la memoria di numero nove nel lavoro R. Clausius, *The Mechanical Theory of Heat*, (John van Voorst, London, 1867), p. 327, che fu presentata davanti alla Società di Fisica di Zurigo, il 24 aprile 1865.

energia; le due grandezze denotate per queste parole sono così vicine nei suoi significati fisici che una certa somiglianza nel designarle sembra desiderabile.

Dopo aver analizzato anche altre forme del calore, come il calore radiante, in una memoria pubblicata posteriormente, Clausius dirà che la questione non si è esaurita, ma che egli può enunciare un altro risultato di grande importanza. Ancora una volta troviamo uno dei suoi più famosi brani (le maiuscole sono dell'originale)⁵⁹:

Se per l'universo intero concepiamo la stessa grandezza da essere determinata, consistentemente e con la dovuta cura a tutte le circostanze, quello che per un semplice corpo ho chiamato di entropia, e se allo stesso tempo introduciamo l'altra e più semplice concezione di energia, possiamo esprimere nella seguente maniera i due teoremi fondamentali della teoria del calore.

1. L'ENERGIA DELL'UNIVERSO È COSTANTE.
2. L'ENTROPIA DELL'UNIVERSO TENDE AD UN MASSIMO.

È istrutivo osservare che Clausius ha impiegato quindici anni (1850 – 1865) per incorporare in una semplice parola il più completo significato della seconda legge della termodinamica e, possibilmente, ha impiegato altri venticinque anni (1850 – 1875) per fare la stessa cosa con la prima legge, che è nient'altro che la legge di conservazione dell'energia. Nel 1875, egli finalmente riassumerà i due principi fondamentali della teoria meccanica del calore in due equazioni molto semplici⁶⁰.

A partire dell'opera di Clausius si trovavano formulate, in maniera chiara e convincente, nel senno della cosiddetta teoria meccanica del calore, le due leggi della termodinamica.

L'enunciato dei due principi riprodotto sopra è ancora più rivoluzionario di quanto sembra al primo sguardo. Clausius ha esteso questi principi all'universo!

In una prospettiva più generale, la sua opera evidenzierà un fatto di grande importanza negli anni successivi e anche per la nostra riflessione, cioè che il primo

⁵⁹ R. Clausius, op. cit., p. 365.

⁶⁰ Cf. I. K. Howard, *S is for entropy. U is for energy. What was Clausius thinking?*, Journal of Chemical Education **78**, 505 (2001).

principio è un principio di conservazione; il secondo principio è un principio di evoluzione.

L'applicazione dei due principi all'universo produrrà una connessione inattesa tra termodinamica e cosmologia. Uno dei risultati centrali in questa connessione può essere conseguito per mezzo dell'estensione dei risultati validi per i sistemi chiusi ai sistemi aperti, dove accade la creazione di materia con la conseguente generazione di entropia cosmologica. Processi di questa natura seguono la seconda legge della termodinamica e possono essere termodinamicamente possibili⁶¹.

L'universo di Clausius contrasta con il sistema di mondo di Laplace, almeno nella maniera in cui questo sistema veniva interpretato alla fine del secolo XVIII. In questo universo di Clausius possono accadere nascita e morte, e la macchina del mondo, definitivamente, non potrà funzionare per sempre!

Nel 1878, Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) definirà l'entropia come dipendente dalle probabilità delle distribuzioni molecolari: essa potrà variare anche quando non ha flusso di calore; ad esempio, quando il sistema diventa più aleatorio o più disordinato. Ma su questo punto torneremo dopo uno sguardo generale sull'interpretazione data da Maxwell alla seconda legge.

2.3 Maxwell

Nel 1870, James Clerk Maxwell (1831–1879) pubblicò un libro del titolo *Theory of Heat* (Teoria del Calore) che ha avuto diverse edizioni e dettagliate revisioni⁶². L'ultimo capitolo dell'opera tratta della teoria molecolare della costituzione dei corpi. La penultima sezione del capitolo esibisce un titolo intrigante: “Limitazione della seconda legge della Termodinamica”.

Maxwell apre la sezione dicendo che, prima di concludere l'opera, egli desidera chiamare attenzione ad un aspetto della teoria molecolare che merita considerazione. In partenza, offre un riassunto del contenuto della seconda legge⁶³:

⁶¹ Si veda, ad esempio, I. Prigogine, *Thermodynamics and Cosmology*, International Journal of Theoretical Physics **28**, 927 (1989).

⁶² J. C. Maxwell, *Theory of Heat*, with corrections and additions (1891) by Lord Rayleigh, (Longmans, Green and Co., London, 1902).

⁶³ *Ibid.*, p. 338.

Uno dei fatti ben stabiliti in termodinamica è che è impossibile, in un sistema racchiuso in un contenitore che non permette né cambiamento di volume né passaggio di calore, e nel quale la temperatura e la pressione sono le stesse in tutti i punti, produrre qualsiasi differenza di temperatura e pressione senza utilizzare lavoro. Questa è la seconda legge della termodinamica, ed è indubbiamente vera quando si ha a che vedere con i corpi soltanto in massa, e che non hanno il potere di percepire o di manipolare le molecole delle quale sono fatti.

Egli mostra che la situazione implicitamente ammessa nel brano sopra sarebbe diversa se un “essere finito” – il famoso “demone di Maxwell”, come fu chiamato dopo da Lord Kelvin – potesse vedere le molecole individuali e manipolarle in una certa maniera molto particolare. L’essere sarebbe in grado di creare un flusso di calore da un corpo più freddo ad un corpo più caldo senza realizzare lavoro. Ecco una traduzione libera del brano⁶⁴:

Ma se concepiamo un essere le cui facoltà sono così argute che egli riesce a seguire ogni molecola nel suo corso, tale essere, i cui attributi sono ancora essenzialmente finiti come i nostri, sarebbe in grado di fare quello che ci è attualmente impossibile di fare. Abbiamo visto che le molecole in un recipiente pieno d’aria ad una temperatura uniforme si muovono con velocità che non sono affatto uniformi, anche se la velocità media di un grande numero di esse, selezionati a caso, è quasi che esattamente uniforme. Ora, supponiamo che tale recipiente sia separato in due porzioni, A e B, per mezzo di una parete nella quale c’è un piccolo orifizio, e che un essere, che può vedere le molecole individuale, apra e chiuda questo orifizio, di modo a permettere che soltanto le molecole più veloci passino da A a B, e soltanto le più lenti passino di B ad A. Egli, senza realizzare lavoro, potrà aumentare la temperatura di B e diminuire quella di A, in contraddizione con la seconda legge della termodinamica.

Quello che Maxwell afferma è che se ci fosse un modo di scegliere le molecole individualmente per ispezione, la seconda legge potrebbe essere violata! Il demone di

⁶⁴ J. C. Maxwell, op. cit., pp. 338–339.

Maxwell opera creando ordine nel livello molecolare – mettendo le molecole veloci (circoli pieni) in una scatola e le molecole lente (circoli vuoti) nell'altra, come illustrato dalla Fig. 2.

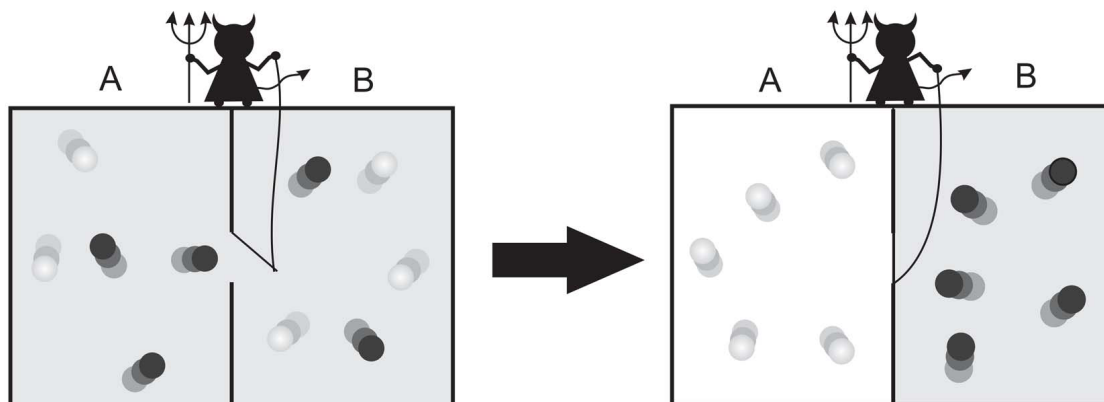


Figure 2: *Illustrazione dell'azione del diavoletto di Maxwell operando nel livello molecolare. Egli apre e chiude l'orifizio che separa le porzioni del gas, di modo che le molecole più rapide passino di A a B, e le molecole più lente passino da B ad A. Questo dispositivo permette di aumentare la temperatura di B e di diminuire la temperatura di A senza realizzare lavoro.*

La conclusione fondamentale che ne segue (in verità, la più comune ma non consensuale come vedremo più avanti) è che il processo di dissipare energia può avere a che fare con l'aumento del disordine o dell'aleatorietà in un sistema⁶⁵.

Questa conclusione si consoliderà a partire dal lavoro di Boltzmann puntando sull'interpretazione meccanica della seconda legge della termodinamica, che richiederà considerazioni probabilistiche.

Il “diavoletto”, operando nel livello molecolare, sottolinea, così, il carattere statistico della seconda legge. Le sue attività sono collegate al problema della reversibilità, del quale parleremo più avanti.

⁶⁵ Analisi dettagliate di questa connessione si possono trovare nelle opere di A. Ben-Naim: *Entropy Demystified: The Second Law Reduced to Plain Common Sense* (World Scientific, New Jersey, 2008); *A Farewell to Entropy: Statistical Thermodynamics Based on Information* (World Scientific, New Jersey, 2008); *Discover Entropy and The Second Law of Thermodynamics* (World Scientific, New Jersey, 2010) and *The Briefest History of Time* (World Scientific, New Jersey, 2016).

Trattasi perciò di riconciliare l'aumento irreversibile dell'entropia dell'universo – richiesto dalla seconda legge nell'interpretazione di Clausius - con le leggi dinamiche del movimento delle particelle che lo compongono, che sono dotate di proprietà di reversibilità temporale.

2.4 Boltzmann

In un lavoro fondamentale del 1872, dal titolo *Weitere Studien über das Warmegleichgewicht unter Gasmolekülen* (Altri studi sull'equilibrio termico tra le molecole del gas)⁶⁶, Boltzmann ha usato la teoria cinetica per affrontare il difficile problema della distribuzione delle velocità in un gas, dallo stato iniziale a un stato di equilibrio, che caratterizza i cosiddetti processi *irreversibili*.

Il contributo decisivo di Boltzmann in questo contesto fu l'introduzione della funzione E (chiamata funzione H nella decade 1890) che dipende dalla distribuzione delle velocità $f(x)$. Egli dimostra che quando $f(x)$ assume la forma della distribuzione di Maxwell, allora la funzione E (in verità, la funzione H) è l'entropia di Clausius, a meno di un fattore costante. Perciò, la funzione H è un'estensione dell'entropia termodinamica agli stati di non equilibrio. In una forma molto riassunta, così si esprime il contenuto del teorema-H de Boltzmann.

Nel 1877, in un articolo dal titolo *Über die Beziehung der Diffusionsphänomene zum zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie* (Sulla relazione tra il fenomeno di diffusione e la seconda legge della termodinamica)⁶⁷, Boltzmann ha impiegato l'approccio di analisi combinatoria per spiegare l'esistenza di una entropia della miscela per due gas.

Queste idee del lavoro del 1877, collegando argomenti di probabilità con l'entropia, sono magnificamente espresse dalla semplice equazione:

$$S = k \log W, \tag{1}$$

⁶⁶ In L. Boltzmann, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, edited by Fritz Hasenöhl (Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1909), p. 317. D'ora in poi, il testo in tre volumi verrà citato come WA I, II o III.

⁶⁷ L. Boltzmann, WA I, 22, p. 289.

in cui S è l'entropia del sistema, W è la probabilità ottenuta con degli argomenti di analisi combinatoria (legati al numero dei microstati accessibili che sono compatibili con il macrostato) e k è una costante universale chiamata, da Planck, costante di Boltzmann.

La legge, il cui contenuto fisico-matematico fu scoperto e enunciato da Boltzmann, ha ricevuto questa forma matematica semplice da Planck, e adesso si trova scritta sulla tomba di Boltzmann, nel *Cimitero Centrale di Vienna*, come si vede nella Fig. 3.



Figure 3: *Pietra tombale (tumulare) di Boltzmann al Zentralfriedhof, di Vienna. Il busto di marmo bianco fu realizzato nel 1933, da Ambrosi. (Foto dell'autore).*

È curioso osservare che precisamente Max Planck (1858 – 1947), all'inizio un oppositore della teoria cinetica, fu quello che applicò la formula logaritmica al problema della radiazione del calore, le cui proprietà egli credeva fossero spiegabili senza i metodi statistici. Egli pensava che l'interpretazione data da Boltzmann alla seconda legge non poteva essere vera, perché la riduceva a una legge soltanto statistica (come si vedrà più avanti in connessione agli argomenti di Zermelo).

2.4.1 Il paradosso della reversibilità

Il lavoro di Boltzmann fu criticato da Maxwell e da William Thomson (Lord Kelvin), nel 1874, perché loro avevano notato che il risultato era difficile da riconciliare con la simmetria di reversione temporale della dinamica.

In poche parole, nella meccanica il tempo è una variabile per cui il ritorno agli stati iniziali è possibile. Un buon esempio può essere trovato nella rivoluzione dei pianeti attorno al Sole, come abbiamo visto. Queste rivoluzioni possono accadere durante lunghi periodi con le stesse costellazioni comparando nei cieli. I sistemi meccanici sono in grado di realizzare dei processi ciclici nei quali gli stati iniziali possono essere di nuovo raggiunti. Un altro esempio estremo è il pendolo semplice, senza attrito, che può oscillare per sempre!

Come sottolineato prima, è possibile stabilire un insieme di condizioni finali (anziché condizioni iniziali) e studiare come il sistema evolve a ritroso nel tempo. Condizioni finali allora sono tanto buone come quelle iniziali. La meccanica è, perciò, reversibile.

Josef Loschmidt, grande amico di Boltzmann dal tempo di studenti, che fu anche il primo a calcolare il numero di Avogadro, menzionò il problema la prima volta nel 1876, in un articolo intitolato “Sulla condizione di equilibrio termico di un sistema di corpi rispetto alla gravità”⁶⁸. È la famosa “obiezione della reversibilità” (dalla parola tedesca *Umkehrinwand*) come fu chiamata più tardi da Paul e Tatyana Ehenfest.

Per capirla in termini più specifici, ammettiamo che in un gas fuori dall’equilibrio gli atomi inizino a muoversi a ritroso, cioè scambiando il passato con il futuro. Come abbiamo detto, il sistema risultante obbedirà alle leggi della meccanica così come il sistema originale. In un esperimento ipotetico, tutti gli atomi del gas che vanno verso l’equilibrio si muoverebbero al contrario e un aumento in H sarebbe atteso, anziché una diminuzione, come stabilisce il teorema-H di Boltzmann. Dal punto di vista della meccanica nulla sarebbe cambiato, il che implica una contraddizione.

È una contraddizione tipica di una teoria molecolare basata sulla meccanica classica e il principio della dissipazione dell’energia, e fu Boltzmann il primo a mostrarla.

⁶⁸ J. Loschmidt, *Über den Zustand des Warmegleichgewichtes eines Systemes von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft*, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Wien, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse **73**, 128-142 (1876).

Boltzmann considerò il paradosso come concepito “molto astutamente” e se ne occupò in un lavoro che trattava della distribuzione spaziale di sfere dure, dal titolo *Bemerkungen über einige Probleme der mechanischen Wärmetheorie* (Osservazioni su alcuni problemi della teoria meccanica del calore)⁶⁹, affermando che⁷⁰:

Non si può provare che per tutte le posizioni e velocità iniziali possibili delle sfere, le loro distribuzioni diventino uniformi dopo un lungo tempo; si può soltanto provare che il numero degli stati iniziali che conducono ad uno stato uniforme è infinitamente maggiore che il numero degli stati iniziali che conducono ad uno stato non-uniforme dopo un lungo tempo; nell'ultimo caso, la distribuzione diventerebbe nuovamente uniforme dopo un tempo ancora più lungo.

Di conseguenza, esiste un numero infinitamente più grandi di stati iniziali che evolvono producendo aumento dell'entropia semplicemente perché la grande maggioranza di tutti gli stati possibili sono stati di equilibrio.

Usando un linguaggio di meccanica statistica più attuale, si potrebbe dire che il numero dei microstati accessibili, compatibili con il macrostato uniforme del sistema, è infinitamente maggiore che il numero dei microstati compatibili con un macrostato non uniforme. In questo modo, una evoluzione del gas che conduca ad una uniformità crescente è immensamente più probabile⁷¹.

Questo accade non perché lo stato di equilibrio è speciale o unico, ma perché esso è semplicemente quello stato che può essere raggiunto in un numero più grande di maniere. Un semplice esempio può essere utile per illustrare questo fatto.

Consideriamo quello che accade nel lanciare un dado.

Un numero qualunque tra 1 e 6 è atteso con uguale probabilità in un singolo lancio. Quando si lanciano due dadi, la soma dei numeri ottenuti può variare tra 2 e 12. Però, una soma che risulti in 7 accade un numero più grande di volte, perché essa può essere ottenuta in diverse maniere (1+6, 2+5, 4+3, 3+4, 5+2, 6+1), mentre il 2 e il 12 possono essere

⁶⁹ L. Boltzmann, WA II, 39, p. 112-148 (1877).

⁷⁰ *Ibid.*, p. 120.

⁷¹ O. Darrigol and J. Renn, *The Emergence of Statistical Mechanics*, in *The Oxford Handbook of The History of Physics*, eds. J. Z. Buchwald and R. Fox, (Oxford University Press, Oxford, 2014), p. 775.

soltanto ottenuti in una singola maniera (1+1 e 6+6, rispettivamente). Ma la probabilità che esca o 1 o 6 con un singolo dado continua ad essere uguale (cioè 1/6). È possibile concludere che in un gas con un numero enorme di molecole ci sono delle combinazioni molto più probabili delle altre. Ma si può anche concludere che il fatto di occorrere qualcosa nella natura presuppone l'esistenza di uno stato improbabile, cioè lo stato di equilibrio.

Più tardi, riferendosi al suo opponente William Ostwald, Boltzmann commenterà⁷²:

Il Signor Ostwald conclude che la concezione meccanica del mondo non può spiegare perché processi naturali sempre accadono preferentemente in una direzione, partendo dalla circostanza che si può cambiare il segno del tempo nelle equazioni differenziali della meccanica senza che subiscano qualunque modifiche. Ma una tale concezione mi sembra non tenere in conto che gli eventi meccanici sono determinati non soltanto dalle equazioni differenziali, ma anche dalle condizioni iniziali. In opposizione al Signor Ostwald, io considero come una delle più brillanti conferme della concezione della natura la presentazione di una buona immagine della dissipazione dell'energia, una volta si ammetta che il mondo cominciò in uno stato iniziale soddisfacendo certe condizioni. Ho chiamato questo stato di stato improbabile.

Questa discussione ha dato a Boltzmann l'opportunità di elaborare con più libertà i concetti probabilistici usati nella sua interpretazione, poiché la sua risposta a Loschmidt l'ha portato a un metodo alternativo di calcolare il numero degli stati accessibili.

2.4.2 La curva-H e il Paradosso della Ricorrenza

Un'altra obiezione che può essere fatta al lavoro di Boltzmann, legato al teorema-H, è che a una funzione H decrescente in un certo gas isolato deve corrispondere una funzione H crescente nello stesso gas, con l'inversione temporale. Questo equivale ad affermare che gli stati con H crescente e gli stati con H decrescente devono essere

⁷² Nello scritto *Ein Wort der Mathematik an die Energetik (Una considerazione matematica sull'energetica)*, pubblicato la prima volta negli *Annalen der Physik und Chemie* **57**, 39 (1896). Abbiamo confrontato la nostra traduzione con quella spagnola di F. J. Odón Ordóñez Rodríguez, op. cit., p. 98. Si veda anche E. Broda, *Ludwig Boltzmann – Man, physicist, philosopher, biologist* (Ox Bow Press, Woodbridge (CN), 1983), p. 74, per una versione in inglese.

ugualmente frequenti.

Una risposta ben precisa fu data da Boltzmann nel corto articolo *On certain questions of the theory of gases* (Su certe questioni della teoria dei gas), pubblicato nel 1895, su *Nature*⁷³. In essenza, la risposta sarà centrata nei seguenti argomenti⁷⁴. Per un dato macrostato iniziale fuori dall'equilibrio e per un tempo finito di evoluzione, il numero dei microstati compatibili per i quali H decresce è molto maggiore che il numero dei microstati compatibili per i quali H cresce. Questa affermazione è perfettamente compatibile con la simmetria di reversione temporale.

Nel lavoro, Boltzmann invoca la curva- H per il caso di un gas di molecole contenuto in un recipiente con pareti perfettamente lisce e perfettamente elastiche. Dice egli⁷⁵:

Costruiamo la curva- H , i.e., prendiamo il tempo come l'asse degli ascisse e tracciamo la curva, le cui ordinati sono i valori corrispondenti di H . La grande maggioranza delle ordinati di questa curva sono molto approssimativamente uguali a H (min.). Siccome valori maggiori di H non sono matematicamente impossibili, ma soltanto improbabili, la curva ha certi, anche se pochi, picchi o ordinati massime che eccedono di molto il valore di H (min.).

Ma questa situazione è più rara. Durante un lungo intervallo di tempo, H è, nella maggior parte del tempo, molto prossimo allo zero, e la frequenza delle sue fluttuazioni decresce molto rapidamente con la sua intensità. Però, qualsiasi valore significativo di H starà probabilmente vicino a un picco della curva- H . A partire di questo punto, vicino al picco, H può crescere durante un certo tempo, ma questo tempo tende ad essere più corto e sarà seguito da un tempo più lungo nel quale accade una decrescita uniforme di H . A lungo tempo, allora, predomina una tendenza chiara e statisticamente inevitabile di una decrescita di H . E tutto questo compatibilmente con la simmetria di inversione temporale.

Il paradosso della ricorrenza, legato all'obiezione della ricorrenza (dal tedesco *Widerkehrwand*, sempre d'accordo con Paul e Tatyana Ehenfest), si riferisce a un

⁷³ L. Boltzmann, *Nature* **51**, 413–415 (1895). Il lavoro fu ristampato in *WA III*, 112, pp. 535-544.

⁷⁴ O. Darrigol and J. Renn, op. cit., p. 777.

⁷⁵ L. Boltzmann, *WA III*, 112, p. 540.

teorema enunciato dal matematico francese Jules Henri Poincaré (1854–1912), pubblicato nel lavoro *Sur le problème de trois corps et les équations de la dynamique* (Sul problema a tre corpi e le equazioni della dinamica)⁷⁶ e noto, giustamente, come “teorema del ritorno”.

D'accordo con il teorema, un sistema meccanico qualsiasi, isolato, mantenuto in un volume fisso, con energia totale fissa, con il passare del tempo ritornerà ad una configurazione iniziale specificata.

Un esempio comunemente invocato per spiegare il contenuto del teorema, in questo contesto della teoria cinetica, consiste nel considerare quello che accade in un esperimento in una scatola contenente le molecole di un gas e dotata di una partizione che la separa in due parti, di uguali volumi, come nella Fig. 4.

Si riuniscono, inizialmente, tutte le molecole in un unico lato della scatola, di volume $V/2$. Dopo, la partizione è rimossa. Il teorema del ritorno stabilisce che se si attende un tempo sufficientemente grande, tutte le molecole potranno, eventualmente, tornare ad occupare quella metà originale della scatola.

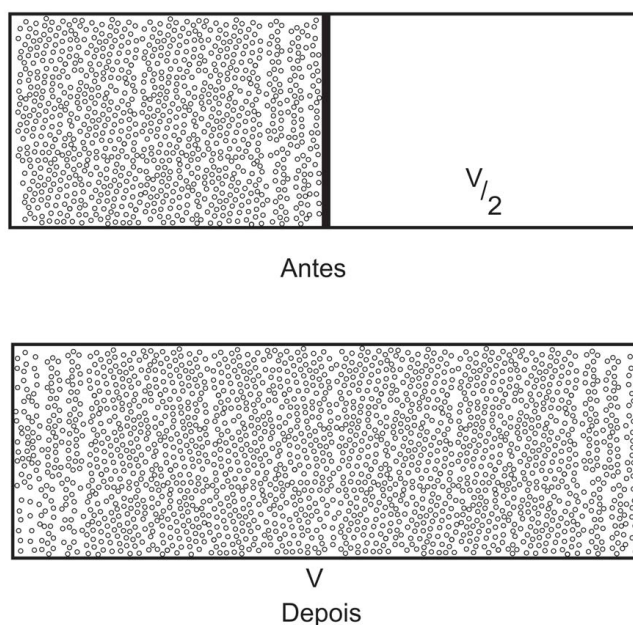


Figure 4: La probabilità che le N molecole del gas siano contenute nel volume $V/2$, ossia, che tornino alla metà sinistra della scatola è data da $((V/2)/V)^N = (1/2)^N$. Quando

⁷⁶ H. Poincaré, Acta Mathematica **13**, 67 (1903).

si considera N come essendo dell'ordine del numero di Avogadro, la probabilità che questo accada è veramente molto piccola!

Trattasi perciò di considerare che, nella teoria cinetica dei gas, quando le interazioni tra le molecole dipendono soltanto dalle loro posizioni nello spazio, il sistema si comporterà come un sistema quasi-periodico: potrà adottare una qualunque configurazione.

Il teorema mostra che qualsiasi modello meccanico – come di solito si trova nella teoria cinetica – è incompatibile con la seconda legge della termodinamica, perché se a tutte le configurazioni del sistema meccanico si associa un certo valore di entropia (ma questo è controverso), allora l'entropia non potrà aumentare continuamente con il tempo, ma dovrà eventualmente diminuire per tornare al suo valore iniziale. Se questo accade, allora il teorema–H non potrà essere sempre valido.

L'obiezione fu sollevata in maniera incisiva da un allora giovane studente di Max Planck, Ernst Zermelo (1871–1953), più tardi un matematico di fama riconosciuta. Egli è considerato come il fondatore della teoria assiomatica degli insiemi e noto come il primo a formulare l'assioma della scelta. Ci sono quattro lavori, due di Zermelo e due di Boltzmann, nei quali il dibattito acquista i suoi contorni più significativi.

Il primo lavoro di Zermelo si intitola *Über einen Satz der Dynamik und die mechanischen Wärmetheorie* (Su una legge dinamica e la teoria meccanica del calore)⁷⁷ e fu pubblicato nel 1896. In poche parole, gli argomenti iniziali sono i seguenti⁷⁸.

Un recipiente chiuso, adiabatico, limita le posizioni e le velocità disponibili per le molecole: il numero delle posizioni di questo sistema nello spazio di fase deve essere finito. Eventualmente, un sistema che passa da un precedente insieme di coordinate ad un nuovo insieme può ritrovarsi a dover assumere una nuova configurazione che non corrisponde a nessuna tra quelle disponibili; quindi dovrà adattarsi ad una di quelle precedenti. Le leggi della dinamica lo forzeranno a seguire la stessa traiettoria lungo differenti arrangi. Il sistema allora presenterà un comportamento ciclico. Ma, in questo caso, se l'insieme di masse puntiformi deve ritornare ad una configurazione già assunta, qualsiasi funzione che dipenda unicamente dalle sue coordinate dovrà anch'essa riassumere il valore relativo a

⁷⁷ E. Zermelo, *Annalen der Physik* [Leipzig] **47**, 485 (1896).

⁷⁸ V. E. Steckline, *American Journal of Physics* **51**, 894 (1983).

quella configurazione. Come Zermelo ammette che l'entropia sia questa funzione, essa non potrà crescere indefinitamente, ma, come sottolineato sopra, dovrà tornare eventualmente al suo valore iniziale e, perciò, diminuire.

La risposta di Boltzmann è apparsa sulla stessa rivista e nello stesso anno, con il lavoro *Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo* (Risposta alle considerazioni sulla teoria del calore del Sig. E. Zermelo)⁷⁹. Boltzmann dice che quel lavoro di Zermelo ha mostrato che i suoi propri lavori pertinenti non erano stato compresi, ma che l'articolo lo "aveva reso felice perché era la prima evidenza che il suo lavoro era stato notato in Germania".

Boltzmann ammette che il teorema di Poincarà è ovviamente corretto, ma la sua applicazione alla teoria del calore non lo è. Egli ammette anche che la ricorrenza può accadere, ma calcola l'estensione del tempo necessaria perché un centimetro cubo di un gas ritorni alla sua configurazione originale. Il numero di secondi necessari per un ciclo ha "molti mila miliardi di cifre". Nell'ultima pagina dell'articolo, egli scrisse⁸⁰:

Se tutte le stelle visibili con i migliori telescopi fossero circondate dallo stesso numero di pianeti che il nostro Sole; e se ognuno di questi pianeti avesse tanta gente quanto la nostra Terra; e se ognuna di queste persone visse mila miliardi di anni... allora tutti i secondi sperimentati (vissuti) da queste persone sarebbero (un numero) ancora minore delle cinquanta cifre.

Riassumendo, la ricorrenza di uno stato particolare è una fluttuazione che può accadere se si attende un tempo sufficiente. Ma il tempo necessario è enorme. Non c'è contraddizione con il punto di vista della meccanica!

Però Zermelo insiste nella sua argomentazione.

Nel secondo lavoro, *Über die mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge – Eine Antwort auf Hrn. Boltzmann's Entgegnung* (Sulle spiegazioni meccaniche dei processi irreversibili – una risposta alla risposta del Sig. Boltzmann)⁸¹ egli torna ad affermare che "sistemi meccanici sono periodici e, perciò, non sono irreversibili".

⁷⁹ L. Boltzmann, *Annalen der Physik* **47**, 773 (1896). Veja também WA III, 119, p. 567.

⁸⁰ *Ibid.*, p. 578.

⁸¹ E. Zermelo, *Annalen der Physik und Chemie* **59**, 793 (1896).

Secondo lui, le idee di Boltzmann riducono la seconda legge della termodinamica a una “semplice legge di probabilità valida soltanto per un tempo limitato”, anche se egli riconosce che l’argomento di Boltzmann è corretto nell’indicare la necessità di un tempo molto grande perché sia osservata la ricorrenza⁸².

D’altra parte, Zermelo argomenta che in qualsiasi curva che ripetutamente torna ad un massimo, deve esserci una parte di salita e l’altra di discesa. In questo caso, perché non si vede mai la parte di salita della curva – H? Perché avendo tante cose da osservare, vediamo sempre soltanto il lato della crescita dell’entropia?

Boltzmann risponde, ancora una volta, sempre sulla stessa rivista, nel lavoro *Zu Hrn. Zermelos Abhandlung “Über die mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge”* (Sul saggio del Sig. Zermelo “Sulle spiegazioni meccaniche dei processi irreversibili”)⁸³ pubblicato nel 1897. Boltzmann insiste sulla natura inesatta della probabilità. Dice egli⁸⁴:

Se, di 100 mila oggetti, 100 bruciano in un dato anno non possiamo concludere che altri 100 bruceranno l’anno dopo. Al contrario, se continuiamo le osservazioni per i prossimi 10^{10} anni, potrà accadere che tutti i 100 mila si bruciassero in un unico giorno, o che nessuno si bruciasse in un anno intero. A dispetto di queste difficoltà, le compagnie di assicurazione si fidano nella teoria della probabilità.

La maggior parte dell’articolo è dedicata al problema dell’universo. Su questo punto scrisse⁸⁵:

Pertanto, le due direzioni del tempo sono indistinguibili nell’universo, nello stesso modo che non c’è un “su” e un “giù” nello spazio. Ma così come noi, in alcuni punti della superficie della Terra, chiamiamo la direzione verso il centro di “giù”, un essere vivente in un certo periodo di tempo particolare del suo mondo darà differenti nomi alla direzione del tempo verso gli stati più improbabili e alla direzione opposta – la prima verrà chiamata di passato, l’inizio; l’ultima, il futuro, la fine. A causa di questa terminologia, piccole aree

⁸² V. E. Steckline, op. cit., p. 896.

⁸³ L. Boltzmann, *Annalen der Physik und Chemie* **60**, 392 (1897). Ristampato in *WA III*, 120, p. 579.

⁸⁴ *Ibid.*, p. 580.

⁸⁵ *Ibid.*, pp. 583–584. Si veda, anche, la traduzione inglese in E. Broda, op. cit., p. 87.

che un essere vivente può immaginare di isolare dall'universo circostante saranno sempre in uno stato improbabile cioè "iniziale" per quell'essere. Questo metodo sembra essere l'unico che permette di pensare la seconda legge e la morte termica di mondi individuali senza ammettere un cambiamento unidirezionale dell'universo intero da un certo stato iniziale verso uno stato finale. Non vedo valore nell'obiezione che questo quadro è poco economico e, perciò, non appropriato perché richiede tante parti morte nell'universo per tenere conto di così poche parti viventi.

In una regione ristretta dello spazio, come una galassia, un essere vivente percepirà la differenza tra la direzione del tempo per il quale l'entropia aumenta e la direzione opposta (sarebbe il nostro caso, ad esempio). Ma questa regione è frutto, precisamente, di una fluttuazione dove questo è diventato possibile.

L'universo, nella sua totalità, si trova in uno stato di equilibrio termico e non è possibile distinguere una direzione assoluta del tempo, cioè tra il tempo che scorre in una direzione o in quella opposta. Perciò, processi locali irreversibili sarebbero compatibili con la reversibilità e la ricorrenza cosmica⁸⁶.

Per concludere questa breve esposizione di idee così stimolanti, prendiamo una frase di Boltzmann, alla fine del paragrafo 90, del suo libro *Lectures on Gas Theory*⁸⁷:

Bene, tu sorridi di tutto questo; ma tu devi ammettere che il modello di mondo sviluppato qui è come minimo possibile, libero di contraddizioni interne, e anche utile giacché ci fornisce molti punti di vista. Esso incentiva, non soltanto la speculazione, ma anche degli esperimenti (ad esempio, sul limite della divisibilità, la dimensione della sfera di azione, e le deviazioni risultanti dalle equazioni della idrodinamica, diffusione, e conduzione del calore) che non sono stimolati da qualsiasi altra teoria.

È chiaro che le risposte di Boltzmann non hanno chiuso la discussione. Comunque, secondo lui la fisica non ha bisogno di fare una scelta, come voleva Zermelo, tra la seconda legge della termodinamica e l'interpretazione meccanica della natura.

⁸⁶ S. G. Brush, op. cit., p. 310.

⁸⁷ L. Boltzmann, op. cit., p. 448.

A partire dal lavoro di Boltzmann, la seconda legge fu stabilita su basi statistiche ed la sua validità risultò quindi fondata sulla validità delle leggi statistiche.

Senza dubbio, questa è una nuova specie di legge fisica.

3 Einstein e le teoria della relatività

Nel 1915, Einstein aveva finito di creare la “teoria generale della relatività”, in contrapposizione alla “teoria speciale della relatività”, che viene considerata da molti fisici come la più perfetta e esteticamente più bella creazione della storia della fisica. La teoria sostituisce la gravitazione universale, di Newton.

La teoria della relatività è una delle grandi rivoluzioni nella fisica del Ventesimo secolo e, in maniera molto generale, può essere pensata come una profonda trasformazione nei concetti di spazio e tempo nel campo scientifico, con notevoli influenza nel campo filosofico e nel pensiero in generale. Uno studio sul tempo non può prescindere di analizzarla (sia nella sua formulazione speciale che in quella generale) anche se soltanto negli aspetti più noti e in maniera semplificata come faremo di seguito.

3.1 La relatività speciale

Verso la metà del mese di maggio del 1905 – quasi nel bel mezzo di quell’anno mirabile – Einstein concepì la teoria della relatività speciale (più tardi dirà che ha sottoposto il lavoro cinque o sei settimane dopo che gli era venuta l’idea). Il lavoro è stato inviato agli *Annalen der Physik* con il titolo “Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento”. Ricevuto il 30 giugno, verrà pubblicato il 26 settembre. L’opera è quella che ha lanciato la base della teoria della relatività dello spazio e del tempo. Nel’articolo ormai classico, i postulati della teoria della relatività speciale furono presentati e la teoria rivoluzionaria diventò parte della grande svolta nel pensiero della fisica del ventesimo secolo.

Prima di enunciare i postulati, Einstein discusse il concetto di *simultaneità*. In questa discussione compare un’idea radicalmente nuova: se si definisce una coppia di eventi A e B come simultanei in un dato sistema inerziale, non si può dedurre che gli eventi siano simultanei rispetto a un altro sistema di riferimento inerziale!

Se nel punto A dello spazio si trova un orologio, un osservatore che si trovi in A misurerà un tempo t_A dell'evento; se, analogamente, nel punto B dello spazio si trova un altro orologio (con le stesse proprietà di quello che si trova in A), un osservatore in B misurerà un tempo t_B . Il problema rimanente sarà quello di definire un “tempo” per A e B complessivamente.

Secondo Einstein, “quest'ultimo tempo può essere definito soltanto quando si ammetta per definizione che il ‘tempo’ che la luce impiega per andare da A a B sia uguale al ‘tempo’ che essa impiega per andare da B a A”⁸⁸. Questo fatto empirico è utilizzato per sincronizzare i due orologi. Einstein definisce il “tempo” di un evento come l'indicazione simultanea con l'evento di un orologio a riposo che si trova nella posizione dell'evento, che cammina sincrono con un determinato orologio a riposo.

Il primo postulato è il *Principio di Relatività di Einstein*: le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Non esiste un sistema di riferimento preferenziale, come potrebbe accadere se l'esistenza dell'etere predetta dall'elettrodinamica classica fosse necessaria. Questo principio va oltre la relatività di Galileo e Newton, che si riferisce alle leggi della meccanica, e include tutte le leggi della fisica. Ne segue che si può soltanto parlare di moto relativo di due sistemi.

Il secondo postulato stabilisce che la velocità della luce deve essere la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

La teoria della relatività speciale è derivata da questi due principi, che sono semplici e generali, e sono anche profondamente collegati all'unità della fisica. I principi hanno come conseguenza una radicale maniera di guardare gli eventi e il tempo registrato da essi o collegati ad essi.

La teoria della relatività speciale, per mezzo dei suoi diagrammi geometrici dello spazio-tempo, fornisce una buona rappresentazione della relazione tra tempo e eternità.

È possibile dimostrare, anche usando una semplice rappresentazione bidimensionale dello spazio-tempo, che eventi temporalmente diversi in un sistema possono essere simultanei ad un dato punto E senza essere simultanei tra di loro⁸⁹.

Il punto E è allora un punto di eternità, cioè l'eternità è rappresentata da un punto,

⁸⁸ A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik* **17**, 891 (1905).

⁸⁹ M. Jammer, *Einstein and Religion: physics and theology*, (Princeton University Press, Princeton, 1999).

come pensava Boezio, che ha descritto la relazione tra tempo e eternità come quella che esiste tra un cerchio e il suo centro⁹⁰.

La matematica della relatività può essere formulata come quella di uno spazio a quattro dimensioni dove, oltre alle coordinate spaziali, si considera una quarta “coordinata” definita tramite il tempo t e la velocità della luce nel vuoto, c . Questa formulazione permette di generalizzare la teoria e di dargli un’interpretazione molto più profonda. Fu Hermann Minkowski (1864 - 1909) a introdurre questa trattazione più formale, nel 1908, e la presentò dicendo⁹¹:

I concetti di spazio e tempo che desidero presentarvi hanno germogliato dal suolo della fisica sperimentale, e in questo risiede la loro forza. D’ora in poi lo spazio di per se stesso o il tempo di per se stesso sono condannati a svanire in pure ombre, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.

La formulazione di Minkowski propone l’unione spazio-tempo come se spazio e tempo fossero proiezioni di una nuova entità spazio-temporale invariante; le proiezioni cambiano quando si cambia il sistema di riferimento, ma l’intervallo tra due eventi è sempre lo stesso e non cambia con il cambiare il sistema di riferimento.

Questa struttura matematica dello spazio-tempo ha permesso di guardare l’universo come un blocco (come abbiamo accennato prima). Il matematico Hermann Weyl diceva che⁹²

[...] il mondo oggettivo semplicemente è, non accade. Soltanto per lo sguardo della mia coscienza [...] è che un taglio di questo mondo acquista vita come un’immagine fugace, in uno spazio che si modifica continuamente nel tempo.

Lo spazio-tempo è statico. I concetti di “prima”, “poi”, “simultaneo”, così come le

⁹⁰ S. Boezio, *Consolatio philosophiae*, Liber IV, Prosa 4P6: “... ad aeternitatem tempus, ad punctum medium circulus...”

⁹¹ H. Minkowski, *Space and Time in Minkowski’s Papers on Relativity* (Minkowski Institute Press, Montreal, 2012), p. 37.

⁹² H. Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (Princeton University Press, Princeton, 2009). Citato nell’opera di M. Jammer.

nozione di “passato”, “presente” e “futuro” non hanno una realtà oggettiva, sono invece delle definizioni “operaziotive” nello spazio-tempo. Dire “prima” o “dopo” equivale a definire una certa relazione geometrica in questo blocco statico.

Facciamo adesso un ragionamento usando questa definizione di simultaneità⁹³.

Definiamo come reale un evento presente. Nulla sappiamo sul passato e neanche sul futuro: non sappiamo se essi siano reali. Ammettiamo ora che due eventi A e B accadano simultaneamente per un osservatore nel presente. Allora questi due eventi sono reali. Se altri due eventi, diciamo B e C, sono simultanei, sono ugualmente reali; in questa maniera, anche A e C sono reali.

Supponiamo adesso che ci siano due eventi tali che uno (A) sia la causa dell'altro (B). Esiste un osservatore, Delicata, che vede A simultaneo a X. Ma esiste ugualmente un altro osservatore, Fonzo, che vede X simultaneo a B.

La relatività della simultaneità è piena di conseguenze di grande impatto. Essa ci dice che se due eventi sono simultanei per un osservatore, tutti gli altri osservatori li giudicheranno non causalmente connessi; viceversa, se due eventi non sono casualmente connessi, allora ci sarà un osservatore che gli vedrà come simultanei.

Nel nostro esempio, A e X sono simultanei e, perciò, reali: A è tanto reale quanto X; ma X e B sono simultanei; perciò, X è tanto reale quanto B. Allora A e B sono reali! Ma A e B sono due eventi (qualsiasi) causalmente connessi nella storia dell'universo (ricordiamoci che, per ipotesi, A è la causa di B). In questo caso, non esiste differenza tra passato e futuro nell'universo della teoria della relatività speciale!

Basta l'ipotesi che il presente sia reale. La relatività ci induce a credere che il passato e il futuro siano tanto reali quanto il presente. Ma non soltanto: essa ci permette di dedurre che il presente non è più speciale del passato o del futuro, che non sono né più né meno reali che il presente stesso. Così, si arriva ad una specie di eternità in un *continuum* quadridimensionale che sarebbe l'universo in cui viviamo!

Diversi altri scrittori tra filosofi e fisici hanno espresso l'idea che la teoria della relatività implica un determinismo rigoroso e, di conseguenza, la negazione del libero arbitrio. Se le conseguenze sono vere, allora ci troviamo di nuovo davanti alle idee di un Einstein-Parmenide che propone il mondo come un “blocco” dove il divenire non accade in

⁹³ L. Smolin, *Time Reborn* (Mariner Books, Boston, 2014).

realtà; al contrario, soltanto l'essere esiste e il tempo sembra fluire mentre, in realtà, è soltanto "un'illusione persistente", come afferma Einstein nella lettera che scrisse alla famiglia di Michele Besso, quando dalla sua mancanza, il 15 marzo 1955 - poche settimane prima della sua propria scomparsa, accaduta il 18 aprile:

Michele è partito da questo strano mondo, un poco prima di me. Questo non significa nulla. Le persone come noi, che credono nella fisica, sanno che la distinzione fra passato, presente e futuro non è altro che una persistente cocciuta illusione.

La domanda cruciale che si pone adesso è se quest'immagine dell'universo come blocco è la corretta descrizione della natura proprio perché nega il trascorrere del tempo, cioè nega appunto la distinzione tra passato, presente e futuro.

La risposta è chiara: la teoria della relatività speciale non può essere applicata a tutto l'universo perché non corrisponde a tutta la fisica. Infatti, essa non contiene la gravità!

3.2 La relatività generale

L'estensione della teoria della relatività speciale che contiene la gravità è la teoria della relatività generale, i cui fondamenti sono stati presentati da Einstein verso la fine del 1915. In un lavoro del 1917, intitolato *Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale*⁹⁴, Einstein ha applicato la teoria della gravitazione all'universo su larga scala.

La teoria della relatività generale è molto elegante e ben fondata fisicamente. Trattasi di una teoria che non fu imposta dalla Natura, cioè tutto indica che la struttura matematica è nella Natura, cosicché la teoria rivela qualcosa che esiste – la natura dello spazio-tempo!

Nella sua formulazione matematica, richiede l'uso delle geometrie non-euclidee, cioè di curve anziché di superficie piane. In questa teoria, esistono delle onde – appunto le recentemente scoperte onde gravitazionali – che si propagano attraverso la geometria dello

⁹⁴ A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie* Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften 170 (1917), Berlin. La versione inglese compare nella raccolta *The Principle of Relativity* (Dover, New York, 1923).

spazio-tempo.

La geometria dello spazio-tempo è distorta quando passano queste onde. È la geometria dello spazio stesso che oscilla nella loro presenza. La causa di queste onde è il cambiamento rapido nel moto di corpi di grandi massa, come due stelle di neutroni o due buchi neri. La scoperta sperimentale di queste onde è un fatto recentissimo e il primo segnale registrato è stato interpretato come prodotto dalla coalescenza di due buchi neri di masse pari a 29 e 36 volte la massa solare⁹⁵.

Più recentemente ancora, un altro segnale di queste onde è stato interpretato come prodotto della fusione di due buchi neri con masse pari a 14 e 8 volte quella del Sole, localizzati circa 1.4 mila miliardi di anni luce dalla Terra⁹⁶. Queste masse legate al secondo segnale registrato sono più vicine ai valori tipici delle masse inferite dalle osservazioni convenzionali dei buchi neri, mentre quelle masse della prima osservazione avevano valori più alti.

I risultati della scoperta sperimentale delle onde gravitazionale sono la conferma di una delle conseguenze (o predizioni) più spettacolari delle equazioni della teoria della relatività generale. La teoria, già testata con la maggiore esattezza che ci sia conosciuta, con questa conferma sperimentale acquista così un ulteriore grado di precisione e affidabilità.

E questo ci porta di nuovo a indagare come il concetto di tempo sia modificato nel contesto di questa teoria. In effetti, diversamente da quanto predetto nel quadro classico della descrizione della natura, una configurazione del mondo non è data dalle particelle occupando una posizione in uno spazio, come in una “arena”. Al contrario, qui la configurazione coinvolge la geometria dello spazio stesso. Allora, i postulati 3 e 4 che abbiamo introdotto nella Sezione 1 vengono unificati dalla teoria della relatività. Le “forze” (e le leggi che le governano) riflettono le proprietà locali del “campo”, che deve essere considerato come un’entità.

L’attrazione gravitazionale, ad esempio, non è pensata come essendo dovuta a una forza che agisce a distanza fra i due corpi bensì come risultante dalle deformazioni che avvengono nell’intorno dei corpi massivi. La tessitura dello spazio-tempo in queste regioni viene deformata dalla presenza del corpo; un altro corpo che si avvicina descriverà una

⁹⁵ B. P. Abbot et al., *Physical Review Letters* **116**, 061102 (2016).

⁹⁶ B. P. Abbot et al., *Physical Review Letters* **116**, 241103 (2016).

traiettoria che è affetta da questa deformazione. L'interazione dunque risulta da un effetto locale.

Nella teoria della relatività generale, la relatività della simultaneità rimane valida anche in un contesto più ampio, cosicché l'immagine di un universo-blocco è quella vincente.

La relatività generale ci insegna che gli orologi hanno un ritmo diverso a secondo la loro posizione nel campo gravitazionale. In poche parole: il campo gravitazionale influenza l'orologio; l'orologio, nel campo gravitazionale, va più lentamente.

Se il campo gravitazionale terrestre fosse più intenso, allora due gemelli identici – uno che visse nell'alto della catena montuosa dell'Himalaya, a più di ottomila metri – e l'altro rimasto sotto invecchierebbero in maniera diversa. Quello nella vetta più alta del mondo, dove il campo gravitazionale è meno intenso, invecchia ad un ritmo più rapido dell'altro, sotto, dove il campo è più intenso. In pratica, dove il campo è più intenso gli orologi hanno un ritmo più lento. Vicino a un buco nero, gli orologi letteralmente si fermano!

Possiamo sempre festeggiare il fatto che siamo nati in un mondo con un campo gravitazionale tale che gli orologi hanno un ritmo che ci permette di vivere quello che viviamo. Meno intenso fosse il campo, meno vivremmo, mentre, se fosse più intenso, diventeremmo pressoché immortali, perché il tempo passerebbe molto più lentamente.

Nella teoria della relatività si considera che il sistema di leggi è completo, che il numero delle leggi (usiamo il termine per accostarci all'uso che abbiamo fatto nella Sezione 1) è finito. Vale così il determinismo: date le condizioni iniziali, le equazioni di Einstein determinano il futuro; determinano, più precisamente, la geometria futura de un particolare spazio-tempo e tutto quanto esso contiene di materia e radiazione.

L'oggetto matematico rappresentato dallo spazio-tempo nella teoria della relatività generale è più complicato di quello della teoria speciale. Ma questo non cambia il fatto di fondo, cioè il quadro che identifica l'universo con un blocco di spazio-tempo e di conseguenza ci propone un universo eterno o, più precisamente, atemporale, nel quale il passato, il presente e il futuro non si distinguono.

Poco dopo la proposta della sua teoria della relatività, Einstein l'ha applicata alla descrizione dell'universo. Ma l'universo concepito da Einstein era spazialmente chiuso, per

accordare la sua teoria della relatività basata sulle geometrie non-euclidee, e risultava anche statico; quindi, l'immagine era quella di un universo spazialmente finito, con una curvatura di tipo positiva. Così facendo, introduceva la famosa “costante cosmologica”, che, dal punto di vista fisico, può essere concepita come la causa di una forza repulsiva che bilancia l'attrazione gravitazionale.

Un cambiamento importante è avvenuto nei primi anni del 1930, quando la comunità scientifica ha cominciato a riconoscere che la teoria e i dati dall'osservazione – soprattutto quelli ottenuti da Edwin Hubble e concernenti alla velocità di recessione delle galassie – indicavano fortemente che l'immagine di un universo statico non si poteva sostenere.

Pochi anni prima, il fisico russo Alexander Friedmann aveva formulato teoricamente la possibilità di un universo in espansione, usando anche degli argomenti contrari al modello di un universo statico.

Nel 1927, il religioso cattolico e fisico belga Georges Lemaître sviluppò un modello di un universo in espansione. Provando a richiamare l'attenzione di Einstein sui suoi risultati durante la V Conferenza Solvay di fisica, svolta a Bruxelles (dal 24 al 29 ottobre 1927), questi gli rispose: “I suoi calcoli sono corretti, ma la sua fisica è abominevole”. In quegli anni nasceva la cosiddetta cosmologia del *Big Bang*⁹⁷.

Se la teoria della relatività generale è una descrizione accettabile dell'universo, la conclusione che il tempo non può essere fondamentale si impone. Se, invece, si cerca di dare un ruolo fondamentale al tempo, certe questioni difficilissime ritornano come, ad esempio, la domanda classica: “cosa accadeva prima che il tempo cominciasse?”, oppure la domanda cosmologica per eccellenza: “come è incominciato l'universo?”, o domande ancora molto più difficili: “se le leggi della fisica sono atemporali, che ruolo avevano prima che ci fosse un universo che loro potessero governare?”.

La risposta è che non c'era tempo prima dell'universo – il che implica che le leggi devono costituire un aspetto dell'universo molto più profondo del tempo⁹⁸.

Possiamo tornare agli scenari tracciati nella Sezione 1. Le soluzioni delle equazioni del campo ci permettono di concludere che il tempo, una volta incominciato, va avanti per

⁹⁷ Cf. L. R. Evangelista, *Il Big Bang e la Teologia* (Classi, Parigi, 2016).

⁹⁸ L. Smolin, op. cit., p. 74.

sempre; l'universo si espande per sempre e diventa progressivamente sempre più diluito. Altre soluzioni indicano che l'universo si espande fino a raggiungere un'espansione massima; dopodiché collassa in un "Big Crunch". In questa soluzione, il tempo ha una fine. A metà strada tra queste soluzioni si trova sempre quella dell'eterno ritorno, cioè la soluzione periodica.

Il fatto che il tempo abbia un inizio o una fine o si alterni tra inizio e fine non è un problema per la fisica dell'universo in forma di blocco. Questa eventuale scoperta rinforza l'idea che le leggi fisiche sono molto più importanti del tempo. Il tipo di universo descritto dalla teoria della relatività (speciale e generale) è comunque atemporale.

4 La teoria dei quanti

Nelle sezioni precedenti abbiamo accennato ad alcuni aspetti che caratterizzano la descrizione quantistica della natura. Un'esposizione dei fondamenti di questa importante area della fisica va molto oltre ai nostri scopi in queste riflessioni. Ci limiteremo dunque a esporre, senza approfondirli, alcuni degli elementi centrali di questa teoria che ci permettono di riprendere la discussione sul tempo e la sua concezione nella fisica contemporanea.

Cominciamo con l'elencare alcune cose o alcuni fenomeni che la meccanica quantistica può spiegare. In primo luogo, essa spiega la stabilità degli atomi; infatti, atomi classici stabili non esistono perché la teoria della radiazione classica prevede che la carica in moto accelerato (come accadrebbe all'elettrone attorno al nucleo in una visione classica) deve emettere energia e, quindi, perderla; questo porterebbe alla catastrofe del collasso degli elettroni con il nucleo atomico, e la materia, nella forma stabile come la conosciamo, non potrebbe sussistere.

La spiegazione in termini di principi primi del fenomeno di radiazione è data dalla fisica quantistica, che riesce a determinare con grande precisione sia la presenza che la costituzione e i dettagli numerici delle linee spettrali trovate sperimentalmente nei sistemi atomici e molecolari. Ugualmente, la radiazione di corpo nero può essere spiegata soltanto se la radiazione è quantizzata. Le forze che tengono unite le molecole sono di natura quantistica, cioè si tratta di considerare le interazioni di natura elettromagnetica nel

contesto della teoria quantistica. L'esistenza (e il funzionamento, si capisce) dei lasers dipende dalle transizioni quantistiche stimulate tra gli stati quantizzati delle molecole. Anche l'affidabilità dell'ereditarietà dipende dalla fisica quantistica nel livello molecolare (DNA).

Altri fenomeni forse meno noti ma che ugualmente rappresentano una sfida si spiegano soltanto con l'uso dei concetti della teoria dei quanti.

Sono così i fenomeni che si verificano a temperature molto basse e sono legati alle correlazioni quantistiche, come la superconduttività e la superfluidità, che sono entrambi fenomeni quantistici macroscopici. Ma tutta la fisica dello stato solido dipende dai concetti quantistici per trovare la sua spiegazione più profonda; questo equivale a dire che tutta l'elettronica dei nostri tempi è basata su questa conoscenza, dalla vecchia e piccola radio a pila ai moderni smartphone e computers.

A un livello ancora più avanzato dal punto di vista concettuale, la teoria relativistica dei campi – una combinazione della teoria della relatività con la teoria dei quanti – è essenziale per capire la fisica delle particelle e l'origine dell'universo. È su questa combinazione che si basa, ad esempio, il funzionamento del *Large Hadron Collider* – LHC, il grande laboratorio europeo di fisica delle alte energie (CERN), nei dintorni di Ginevra, in Svizzera, la cui circonferenza è di 27 chilometri.

In questo grande laboratorio, un modello per la fisica delle particelle elementari – il *Modelo Standard* – viene testato frequentemente. Si tratta, nientemeno, che di cercare risposte ad un'altra domanda fondamentale, formulata dai greci presocratici, cioè: “di che sono fatte le cose?” Il bello è, comunque, che la fisica contemporanea dà una risposta molto dettagliata a questa domanda. Questo però è di un altro argomento, che va affrontato in altra sede!

Riassumendo per tornare al nostro problema, la fisica dei quanti fa parte del patrimonio della cultura umana ed è una acquisizione recente della scienza. Nella sua forma di meccanica ondulatoria, ad esempio, è stata formulata verso la metà degli anni venti del secolo scorso, e la sua grandezza centrale, come riferito prima, è la funzione d'onda (cf. Sezione3).

La funzione d'onda è tipicamente formata da sovrapposizione di onde di diverse lunghezze d'onda. Questo oggetto si comporta come un pacchetto di onde che soddisfa

un'equazione molto famosa, l'equazione di Schrödinger, che è del primo ordine nel tempo, mentre l'equazione d'onda dell'elettromagnetismo è del secondo ordine.

Il fatto di essere del primo ordine nel tempo implica immediatamente che se si conosce una soluzione in un dato istante di tempo particolare, diciamo t_0 , allora è possibile prevedere quale sarà la funzione d'onda in un tempo posteriore (e, ugualmente, si può dedurre come era questa funzione un tempo prima). In poche parole, come abbiamo detto prima, l'evoluzione di questa soluzione è un processo rigorosamente deterministico.

Ed ecco che qui sorge una caratteristica nettamente distinta del comportamento classico. La funzione d'onda non è un oggetto osservabile; anzi, trattasi di una quantità definita nel campo matematico delle variabili complesse. Prevedere il suo sviluppo temporale vuol dire sapere come sarà la forma matematica di questo oggetto ad un istante successivo. L'interpretazione più comune è quella che ritiene la funzione d'onda come una ampiezza di probabilità. La fisica dei quanti ha a che fare con l'evoluzione temporale di una densità di probabilità.

Possiamo dire, con una certa libertà nell'esprimerci, che l'equazione di Schrödinger descrive come si comportano le ampiezze di probabilità e, in certo senso, le potenzialità del sistema. Per passare dalla potenzialità a un determinato valore di una variabile dinamica (la posizione o l'energia, ad esempio) si devono realizzare delle misure. L'atto di misurare allora acquista un ruolo centrale in questo formalismo.

Tutto funziona come se l'atto di misura realizzasse le potenzialità, cioè letteralmente se un'attualizzazione di queste potenzialità accadesse durante la misura!

Il processo è però drastico: dalle diverse (infinite) potenzialità del sistema che evolve nel tempo, governato dall'equazione di Schrödinger, la misura ne sceglie un valore e, subito dopo, il sistema quantistico si trova nello stato fisico al quale corrisponde quel valore (chiamato di autovalore in maniera più formale). È come se una drastica interruzione nel processo evolutivo avvenisse durante il processo di misura. A questa interruzione abbiamo dato, in precedenza, il nome di *collasso* della funzione d'onda (Cf. Sezione 3).

L'equazione che governa l'evoluzione temporale nella meccanica quantistica è reversibile temporalmente. Anche qui esiste l'eternità poiché sia nella meccanica quantistica che nella relatività, così come nella dinamica classica, l'evoluzione temporale è reversibile e determinista.

L'irreversibilità – cioè la temporalità secondo alcune interpretazioni – è collegata all'atto di osservazione.

In questa prospettiva, molti scienziati e filosofi sono portati a includere il soggetto nel formalismo. Questa forte intromissione dell'individuo nell'interpretazione dei risultati della teoria dei quanti ci conduce tante volte a delle soluzioni veramente estreme. Si arriva ad affermare che è la coscienza umana che promuove il collasso della funzione d'onda e perciò crea la realtà! La particella acquista le proprietà trovate nella misura soltanto quando l'osservatore processa (a modo suo) il risultato di questa misura.

Esiste un dibattito da ormai decenni attorno alle diverse interpretazioni della meccanica quantistica. Il nodo del dibattito è stato stabilito dal punto di vista filosofico nell'opera già citata del filosofo della scienza K. R. Popper. Esiste ugualmente una letteratura più tecnica sterminata che è dedicata a questi problemi, e perciò non è il caso qui di affrontarli.

Ci basta per proseguire aver percepito il ruolo discontinuo e sorprendente del processo di misura per introdurre l'irreversibilità nel contesto della teoria quantistica.

5 Il miracolo segreto

Nel racconto di J. L. Borges, "Il miracolo segreto" (Ficciones, 1944), lo scrittore Jaromir Hladík è condannato a morte e si trova davanti ai fucili pronti a fare fuoco. Chiede a Dio un tempo per finire la sua opera, un dramma teatrale. Il tempo si dilata per volere divino. Dio ha operato per lui un "miracolo segreto": egli morirà dal fuoco tedesco, all'ora stabilita ma, nella sua mente, un anno trascorrerà tra l'ordine di esecuzione e l'esecuzione propriamente detta.

La narrativa quasi cinematografica ci fa pensare al punto di eternità di Boezio, il punto *E* menzionato prima, a partire del quale un osservatore può vedere come simultanei degli eventi che verranno compresi anche come non connessi da un altro osservatore. Il potere divino conosce l'eternità, ma Jaromir lavora con la sola memoria durante un anno intero per finire il suo dramma. Il tempo per lui si dilata, mentre per Dio non passa, conformemente a quanto detto nella Bibbia: "davanti al Signore un giorno è come mille

anni e mille anni come un giorno solo”(2Pt 3, 8).

Il quadro complessivo abbozzato in questo capitolo ha insistito sul carattere reversibile delle leggi fondamentali della fisica microscopica. Probabilmente, l'esempio più sorprendente è l'universo puramente spazio-temporale, vuoto, di Minkowski nel quale il punto E può essere geometricamente definito. Questo universo è eterno, immutabile.

La seconda legge della termodinamica invece, nella sua interpretazione abituale (probabilmente sbagliata o che sicuramente necessita di essere ripensata, come vedremo nel terzo capitolo), ci propone un universo eterno, ma destinato alla morte termica, cioè in evoluzione verso una morte che dovrà porre un fine alla storia.

Il problema dell'irreversibilità e il trattamento che gli ha dato Boltzmann (Cf. Sezione 2.4) deve essere affrontato tenendo conto del teorema della ricorrenza di Poincaré, che stabilisce che tutti i sistemi dinamici stabili finiranno per tornare a passar per uno stato tanto vicino quanto si voglia del suo stato iniziale. Il teorema può essere pensato come un fondamento matematico dell'idea del “eterno ritorno” della filosofia greca e di Nietzsche, con la differenza che, secondo i ragionamenti di Boltzmann nella sua discussione con Zermelo, il *Grande Anno* sarebbe di una durata molto, molto più lunga.

Per far nascere il tempo che spiegherebbe (dai primi principi) la condizione temporale della nostra vita (almeno finché le Parche inesorabili non decidano di farla finita) si propongono diverse soluzioni. Nessuna di esse, evidentemente, può essere considerata come interamente soddisfacente.

Il punto di vista di chi studia i processi dissipativi e irreversibili vede questo difendere le grandi leggi della dinamica (classica o relativistica) in parte come un'ideologia⁹⁹. In effetti, l'esito concettuale ma anche sperimentale di queste leggi sono notevoli. Allora si dovrebbe cercare di generalizzare queste leggi in modo tale che queste tenessero in conto il tempo, o una “freccia del tempo” se è vero che questa “freccia” possa esistere.

In questa linea di pensiero, i sistemi caotici e i sistemi dinamici instabili devono far parte di qualsiasi formalismo che si presenti come candidato a descrivere la realtà.

La scuola di pensiero sviluppata attorno all'opera di Ilya Prigogine e il suo gruppo pensa di risolvere il problema introducendo una differenza essenziale nella descrizione

⁹⁹ I. Prigogine and I. Stengers, *Entre le temps et l'éternité* (Librairie Arthème Fayard, Paris, 1988).

dell'universo. I sistemi dinamici caotici hanno una scala di tempo propria, e allora sfuggono alla ricorrenza che avviene in un tempo di Poincaré, quel tempo calcolato da Boltzmann. Questi sarebbero sempre sottoposti all'irreversibilità e quindi a un senso o ad una direzione di cambiamento del tempo.

In questo sforzo teorico e sperimentale esistono proposte di cambiare anche la descrizione cosmologica data dalla teoria del Big Bang in favore di un approccio in cui la "freccia del tempo" viene inclusa. Come sottolineato da loro nell'opera citata, sarebbe bello avere, allo stesso tempo, l'universo di Eraclito, che ci permette di accedere alla realtà sensibile del divenire, con l'universo di Parmenide in cui l'intelligibilità d'essere è accessibile al pensiero puro.

Per questa scuola di pensiero, le leggi atemporalì della dinamica continuano a valere in tutta la sua generalità, ma devono incorporare i segni dell'entropia che è associata alla "freccia del tempo" e, perciò, è la differenza che va presa in considerazione.

Per la rinascita del tempo invece, c'è chi sostiene la necessità di cambiare proprio il carattere atemporale delle leggi¹⁰⁰. In parole molto semplici questo punto di vista si riassume così: se le leggi fondamentali sono atemporalì, allora l'universo stesso è atemporale. L'irreversibilità che troviamo nei processi – anche nei processi viscosi e dissipativi che, peraltro, possono essere sempre riportati alla dinamica classica – può essere sempre spiegata nel contesto delle leggi della dinamica, come ha fatto Boltzmann per il caso della dinamica classica e come viene descritto dall'universo-blocco della relatività à la Minkowski. In questo caso, bisogna concludere che il tempo è una illusione!

Inversamente, se il tempo è reale e non è un'illusione, allora le leggi – che sono più fondamentali del tempo – non valgono tutto il tempo, cioè le leggi della natura evolvono nel tempo. Il tempo reale determina come evolvono queste leggi che vengono applicate ai processi e all'universo. Questo ci permette di pensare ad una nuova cosmologia, tenendo conto di quello che sappiamo adesso sulle leggi che reggono il funzionamento dell'universo.

Ad esempio, le leggi che conosciamo non si applicano agli istanti veramente iniziali dell'universo (se ammettiamo la descrizione che richiede il Big Bang) perché esso si trovava in condizioni estremi. La teoria della relatività generale, a dispetto della sua

¹⁰⁰ É la proposta filosofica, ma anche tecnica di L. Smolin, nell'opera citata.

precisione e del suo straordinario successo predittivo, è ancora una teoria incompleta perché non ci permette di sapere come l'universo di fatto cominciò.

Capitolo 3

Expectatio (Aspettativa)

*Dejo a los varios porvenires (no a todos)
mi jardín de senderos que se bifurcan.*
(J. L. Borges, *El jardín de senderos
que se bifurcan* (1941), Ficciones, 1944)

1 L'entropia rivisitata

Come abbiamo discusso nella Sezione 2.2, Clausius ha introdotto il concetto di entropia in una maniera innovativa e ha enunciato la seconda legge della termodinamica, applicandola a sistemi ben definiti.

Dal punto di vista tecnico, egli ha definito la “funzione di Carnot” e ha riconosciuto che l'entropia è una funzione di stato. Questo vuole dire, tra l'altro, che essa contiene tutte le informazioni termodinamiche che si possono acquistare su un dato sistema; che la sua variazione da uno stato di equilibrio all'altro dipende soltanto dallo stato iniziale e dallo stato finale; che il suo valore assoluto non si conosce.

Il senso stretto della seconda legge allora può essere riassunto così: quando dei processi spontanei accadono in modo tale che il sistema è isolato, l'entropia di questo sistema o rimane la stessa o cresce, ma mai decresce.

Quello che si è solito studiare è la variazione dell'entropia, che è stata definita da Clausius per un sistema specifico. La termodinamica è in grado di calcolare soltanto la variazione dell'entropia da uno stato ben definito all'altro, ma non è in grado di determinare il valore assoluto dell'entropia di un sistema in uno stato ben definito¹⁰¹. Inoltre, la termodinamica non prevede un'interpretazione molecolare dell'entropia come

¹⁰¹ A. Ben-Naim, *The Briefest History of Time* (World Scientific, New Jersey, 2016), pp. 72-73. Tutta la discussione sulla “freccia del tempo” e la seconda legge sviluppata in questa sezione è ispirata nel trattamento presentato in quest'opera, che verrà citata con frequenza.

quella data da Boltzmann e discussa nella sezione 2.4.

L'estensione dell'entropia a tutto l'universo, fatta da Clausius quando enuncia la seconda legge, non può essere corretta, poiché l'entropia dell'universo non è definita¹⁰²:

Clausius generalizzò questa legge dicendo che l'entropia dell'universo cresce sempre. Questa generalizzazione non è garantita. Prima, non sappiamo se l'universo è finito o infinito. Se è infinito, allora forse la sua entropia sarà anch'essa infinita. In questo caso, non ha senso dire che l'entropia dell'universo cresce - cresce oltre l'infinito? Secondo, e ancora più importante, non sappiamo come definire gli stati di tutto l'universo [...]. Perciò, non possiamo definire l'entropia dell'universo.

L'argomento è molto generale e semplice: l'entropia dell'universo non è determinabile sperimentalmente e non è calcolabile teoricamente. Così, noi dobbiamo trattenerci dal parlare di entropia di tutto l'universo. Dobbiamo limitarci a parlare di entropia di un sistema termodinamico ben definito, contenente un numero fisso di particelle, un'energia fissa e un volume ben determinato. In un sistema di questo tipo ha senso parlare di crescita (o di costanza) dell'entropia.

Inoltre, entropia non è sinonimo di disordine, come di solito si afferma. Non è una misura della disorganizzazione o del caos. Un sistema può diventare disordinato e avere la stessa entropia. Un esempio semplice ci basta: le carte possono essere ordinate in un mazzo e avere una certa entropia; quando il mazzo è disfatto, le carte possono essere disordinate, ma il sistema ha la stessa entropia!

L'entropia non è neanche una misura della libertà o dell'informazione. Entropia è un caso speciale della misura dell'informazione di Shannon (SMI). Così, per un sistema termodinamico, l'entropia è proporzionale a SMI definita su una distribuzione specifica rilevante al sistema¹⁰³.

La SMI può essere quantificata per mezzo di una formula matematica:

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i, \quad (2)$$

¹⁰² A. Ben-Naim, op. cit., pp. 96-97 et passim.

¹⁰³ Ibidem, p. xiv.

dove p_i è la probabilità dell'evento i . Il valore massimo di SMI all'equilibrio è legato all'entropia del sistema. Ma questo valore massimo non è una funzione del tempo. Allora, l'entropia non è una funzione del tempo. Perciò non esiste una “freccia del tempo” per quanto riguardano la termodinamica, l'entropia e la seconda legge della termodinamica.

La proposta di una “freccia del tempo” legata al concetto di entropia è frutto di confusioni del tipo¹⁰⁴:

1. Identificare entropia con tempo;
2. Identificare entropia con disordine;
3. Interpretare la seconda legge della termodinamica come l'indicazione di una tendenza verso un maggior disordine.

Sono queste associazioni ingiustificate che ci inducono a pensare che l'entropia dell'universo (ovvero: il disordine, in questa prospettiva sbagliata) sempre cresce (con il tempo) e conduce l'universo alla morte termica. In alcuni casi, le variazioni di entropia possono essere legate all'aumento del disordine, o allo spreco di energia o gradi di libertà, ma queste correlazioni non valgono in generale¹⁰⁵.

In conclusione, possiamo sempre dire che, per quanto riguarda la termodinamica, certamente esistono i processi irreversibili, nei diversi sensi di questa parola, ma non la si può definire una “freccia del tempo”! E non ci si può definire perché i processi si riferiscono tutti a dei sistemi ben definiti e questo non è il caso dell'universo.

Estrapolare l'aumento di entropia a tutto l'universo porta con sé la tentazione di vedere un legame fra l'entropia e il tempo. Stando alla termodinamica dei sistemi reali e ben definiti per mezzo di specifiche variabili termodinamiche (ad esempio, energia, volume e numero di particelle), l'entropia non dipende dal tempo e non è lecito supporre questo legame. Allora, non è lecito pensare che il flusso del tempo abbia una direzione dovuta all'aumento dell'entropia.

Allo stesso modo, una freccia del tempo cosmologico è un concetto ancora più problematico. Essa è definita come la direzione del tempo nella quale l'universo si espande e non si contrae¹⁰⁶. Questo potrebbe far pensare che se l'universo subisse una contrazione allora il tempo avrebbe la sua direzione invertita!

¹⁰⁴ Ibidem, p. 137.

¹⁰⁵ Ibidem, p. 73.

¹⁰⁶ Ibidem, p. 173.

Noi sappiamo che il tempo passa nella nostra vita e, senz'altro, possiamo parlare di una direzione del tempo (non nel senso di una variabile matematica di natura vettoriale, come la velocità o la forza).

Una freccia del tempo di tipo psicologico esiste, perché noi sentiamo il tempo che effettivamente passa. Questi concetti di passato, presente e futuro sono entrati nella nostra vita a causa della nostra esistenza fisica. Il ritmo di notte e giorno, di sonno e di veglia, di crescita, di invecchiamento, la necessità di lavorare per guadagnarci il sostegno, tutto questo ci fa rispettare il tempo. È vero anche che l'esperienza dell'amore, della gioia, della ricerca della verità non accadano nel tempo, ma bensì in questo momento, in questo posto dove siamo. Questo "qui" e "ora" costituisce l'eternità, l'assenza di tempo¹⁰⁷.

Un concetto così, però, non può essere scientifico, perché cambia da persona a persona e cambia anche per la persona stessa, dipendendo dalla situazione vissuta.

Certamente possiamo parlare simbolicamente di una direzione per il tempo, che va dal passato al futuro. E possiamo, anzi dobbiamo, farlo perché gli orologi continuano a funzionare!

L'avvento delle teorie fisiche del Ventesimo secolo come la relatività e la meccanica quantistica ci ha permesso di speculare (tante volte anche oltre o al di fuori di quello che è considerato come appartenente al cosiddetto metodo scientifico) su diverse possibilità che riguardano il tempo.

Un esempio di queste speculazioni sono i viaggi nel tempo che, da argomento di letteratura di finzione, sembrano acquistare qualche possibilità matematica nel contesto della teoria della relatività generale.

Un altro esempio prevede il tempo come una quantità che emerge dai processi. Nel caso della meccanica quantistica dei sistemi "entangled" o "aggrovigliati", la percezione

¹⁰⁷ Una bella riflessione a riguardo si trova in E. Fromm, *To Have or To be?* (Harper & Row, New York, 1976). Ci sono anche diversi studi sul "tempo psicologico" e la nostra percezione del tempo. Si veda, ad esempio, R. V. Levine, *A Geography of Time: The Temporal Misadventures of a Social Psychologist* (Basic Books, New York, 1998); P. Zimbardo and J. Boyd, *The Time Paradox* (Free Press, New York, 2008); C. Hammond, *Time Warped: Unlocking the Mysteries of Time Perception* (Harper Perennial, New York, 2013); M. Wittmann, *Felt Time: The Psychology of How We Perceive Time* (MIT Press, Boston, 2016).

del tempo potrebbe cambiare, a secondo la posizione di chi lo misura, da esistente a non esistente.

2 Il viaggio nel tempo

Come detto sopra, una delle più popolari speculazioni collegata alla teoria della relatività si riferisce ai viaggi nel tempo¹⁰⁸.

Forse l'esempio letterario più famoso di questa finzione sia il libro di H. G. Wells, *The Time Machine: An Invention*, pubblicato nel 1895 e diventato film alcune volte. Il personaggio è il viaggiatore nel tempo e va in direzione futura (nell'anno 802 701) in cui trova l'umanità divisa in due tronconi differenti, gli Eloi (creature fragili, infantili, gentili e pacifiche) e i Morlocchi, esseri mostruosi e ripugnanti che vivono nelle viscere della terra, che si cibano della carne degli Eloi.

Il libro ha suscitato comunque un grande interesse (critica e entusiasmo) ed è normalmente menzionato come uno dei primi ad aver portato nella fantascienza il concetto di viaggio nel tempo basato su un mezzo meccanico. Il filone da esso inaugurato ha avuto molta fortuna nel Ventesimo secolo¹⁰⁹.

Per quanto riguarda i viaggi al futuro, esperimenti con gli orologi atomici dimostrano che essi infatti accadono! Il fenomeno è legato alla "dilatazione temporale" e l'esempio più famoso è collegato al "paradosso dei gemelli".

Supponiamo che Delicata e Fonzo siano dei gemelli¹¹⁰. Delicata parte in una nave velocissima in direzione ad una stella prossima; dopo circondarla, torna a Terra. Per lei è passato un periodo di un anno. Fonzo, che è rimasto a casa, ha visto che sono passati dieci anni quando torna sua sorella! Adesso, loro non hanno la stessa età anche se sono nati nello stesso giorno. È come se Delicata avesse fatto un viaggio nel futuro. Lei ha guadagnato altri nove anni sulla Terra!

Questo fatto è più di una teoria (con gli esseri umani l'effetto è piccolissimo!). I

¹⁰⁸ J. Gleick, *Time Travel - A History* (Pantheon Books, New York, 2016). Si veda anche A. Everett and T. Roman, *Time Travel and Warp Drives* (The Chicago University Press, Chicago, 2012).

¹⁰⁹ Si veda, ad esempio, l'editoriale *Time Machine*, *Nature* **537**, 137 (2016).

¹¹⁰ La scelta dei nomi si è ispirata nella vicenda di Fonzo Mastrangelo e Delicata Civerra, gli amanti (e non gemelli!) di Campobasso che non riuscirono a coronare il loro sogno d'amore, nella fine del Cinquecento. Sembra che la storia abbia ispirato Shakespeare nel suo "Romeo e Giuletta".

fondamenti dell'effetto, però, vengono testati con frequenza nei grandi acceleratori e nei diversi laboratori. Un esperimento molto famoso è fatto con il muone. Quando esso è a riposo nel laboratorio, il suo tempo di vita è di circa 2.2 micro secondi. Quando viaggia a una velocità di $0.9994 c$ (dove c è la velocità della luce nel vuoto), il suo tempo di vita si estende a 63.5 micro secondi¹¹¹.

Così, come detto sopra, esperimenti nei quali degli orologi atomici sono trasportati a diverse velocità, nelle diverse direzioni, hanno prodotto dei risultati che confermano la teoria della relatività e il paradosso dei gemelli.

Il grande logico Kurt Gödel, amico di Einstein e suo leggendario compagno di passeggiata per il campus di Princeton, nel 1949 pubblicò un lavoro dal titolo "Un esempio di un nuovo tipo di soluzioni cosmologiche delle equazioni di campo di Einstein della gravitazione"¹¹². Il lavoro fa parte di un numero speciale di questa importante rivista, dedicato a festeggiare il settantesimo anniversario di Albert Einstein ed è formato da un notevole insieme di articoli.

Gödel presentò un calcolo sorprendente, nel quale mostrava che le equazioni di campo di Einstein per la relatività generale permettevano una soluzione cioè un "universo" in cui il tempo è ciclico. In termini più tecnici, alcune delle linee di mondo possono tornare sopra se stesse, in una forma chiusa. Sono le chiamate linee di *tipo tempo*. Una curva così si può piegare e tornare su se stessa, sfidando la nozione di causa ed effetto; gli eventi possono diventare la causa di se stessi. Un brano del lavoro è particolarmente chiaro a riguardo:

In particolare, se P e Q sono due punti qualsiasi sopra una linea di mondo di materia, e P precede Q in questa linea, esiste una linea di tipo tempo connettendo P e Q nella quale Q precede P ; i.e., in questi mondi è teoricamente possibile viaggiare al passato, o ad ogni modo influenzare il passato.

È chiaro che si tratta di una soluzione molto particolare. La geometria

¹¹¹ R. C. Lasky, *Time and the Twin Paradox in A Question of Time - The Ultimate Paradox* (Scientific American, New York, 2012).

¹¹² K. Gödel, *An Example of a New Type of Cosmological Solutions of Einstein's Field Equations of Gravitation*, *Reviews of Modern Physics* 21, 447 (1949).

dell'universo analizzata è cilindrica; l'universo intero è in un moto di rotazione rispetto all'asse di inerzia (*compass of inertia*); l'universo non è in espansione, anche se la cosmologia contemporanea quasi tutta sostenga questa espansione. Le linee di tipo tempo considerate da Gödel dovrebbero inoltre essere molto lunghe, dell'ordine di molti miliardi di anni luce¹¹³.

Ogni soluzione delle equazioni di campo può essere associata ad un universo possibile. Infatti, molti concludono che se l'esistenza di un certo universo – che corrisponde dunque ad una soluzione possibile – non contraddice le leggi della fisica, allora questo universo è reale. Se le cose stanno così, in conclusione, il viaggio nel tempo è possibile!

Einstein non era molto entusiasta di questa idea. Egli pensava che anche se la soluzione fosse matematicamente buona (e perfino elegante), essa poteva sempre essere esclusa per ragioni fisiche. La gente, in generale, non si è molto preoccupata per le riserve di Einstein al riguardo, e neanche di guardare le condizioni molto particolari della soluzione proposta da Gödel. Così, il viaggio nel tempo ha lasciato il campo della fantascienza per entrare definitivamente nella letteratura scientifica contemporanea (anche negli articoli scientifici di riviste di innegabile qualità).

Da allora, una successione di studi dedicati ai *wormholes*, che sono dei tunnel che collegano due buchi neri distanti, sono apparsi. Questi possono piegare lo spazio e il tempo. Il sistema così formato è un tipo di “scorciatoia” da un punto dell'universo all'altro, che permetterebbe di viaggiare tra di essi più velocemente, in un tempo molto minore di quanto impiegherebbe la luce a percorrere la distanza attraverso lo spazio.

Così, ipoteticamente, per mezzo di questi *wormholes* si possono pensare i viaggi nel tempo, i viaggi agli universi paralleli (se esistessero) e altri “viaggi”. Per quanto siano compatibili con le teorie scientifiche bene stabilite – essendo allora doveroso per fedeltà al metodo scientifico studiare nel dettaglio le loro proprietà fisiche e matematiche – usarli per speculare su viaggi nel tempo e sull'esistenza di altri mondi è sempre rischioso dal punto di vista del metodo scientifico stesso, per la stessa fedeltà. Una fedeltà che ci obbliga a studiare tutte le conseguenze delle teorie fisiche ma che ci obbliga anche a rimanere dentro lo scopo del metodo scientifico se si vuole che il risultato della ricerca abbia credibilità

¹¹³ L'anno luce è un'unità di misura della lunghezza e corrisponde alla distanza percorsa dalla luce nello spazio vuoto nell'intervallo di un anno. Il suo valore è di circa $9,461 \times 10^{12}$ km.

nell'ambito della scienza.

I viaggi nel tempo (al passato) non sono veramente impossibili ma implicano una serie di paradossi logici. È divertente (ma anche preoccupante) scoprire quanta gente scientificamente seria perde tempo discutendo questo genere di viaggi. Un esempio è certamente il bel film *Interstellar*, del 2014, per il quale ha servito come produttore esecutivo il fisico e cosmologo Kip Thorne. Da molti anni, egli è interessato di scoprire se le leggi della fisica potrebbero permettere a una civiltà più avanzata di costruire e di mantenere *wormholes* per garantire i viaggi nel tempo. In questo tipo di *wormhole* si permette un trasporto istantaneo tra due distanti regioni dello spazio, violando tante volte le leggi della fisica conosciute.

L'argomento, per essere conciso, dovrebbe tornare ai libri di fantascienza o al cinema.

3 L'emergenza del tempo

Nella Sezione 4 abbiamo visto che anche la teoria dei quanti è tale che l'inversione temporale si applica alle sue equazioni fondamentali. È necessario sottolineare ancora una volta, però, che il tempo ha molti ruoli nella meccanica quantistica.

La funzione d'onda evolve con continuità nel tempo e porta con sé un'informazione probabilistica. Sul comportamento di un elettrone lanciato su un dispositivo che può defletterlo verticalmente verso l'alto o verso il basso (per mezzo di un campo applicato appositamente) la meccanica quantistica non ci può fornire con certezza una descrizione di cosa accadrà; ci può fornire soltanto la probabilità di un certo risultato. Ci può dire, ad esempio, che c'è una probabilità del 25% che l'elettrone vada su e 75% che vada giù. Tutti i risultati degli esperimenti sono probabilistici!

Inoltre, l'ordine temporale di due misure possono dare dei risultati molto diversi. In uno esperimento del tipo Stern-Gerlach, vengono misurate le componenti del momento angolare. Questo tipo di esperimento evidenzia il carattere non commutativo degli operatori della meccanica quantistica. Se il processo di misura può essere pensato temporalmente, allora la sequenza temporale dei risultati è molto influenzata dall'ordine con la quale le misure sono fatte.

Una delle sfide della fisica negli ultimi decenni è la proposta di una teoria unificata tra la gravitazione e la meccanica quantistica. Evidentemente, il ruolo del tempo in questo scenario unificato diventa molto importante dal punto di vista concettuale. Pensare il tempo è cruciale per avere una teoria capace di unificare tutte e due.

Ricordiamoci che la rivoluzione relativistica fu soprattutto un cambiamento nel concetto di tempo, o nel modo di trattarlo. Adesso, il conflitto tra il tempo della fisica e il tempo della nostra esperienza sta arrivando a una conclusione nell'ambito di questo processo di unificazione: il tempo, fondamentalmente, non esiste!

Però, anche se non esiste fondamentalmente, il tempo può apparire, può “emergere”, in un livello più alto. L'analogia è quella di un solido. Un tavolo, ad esempio, è solido. Intanto, è formato da atomi che, in fondo, sono vuoti nella loro totalità (quasi). In questo senso, la solidità è una proprietà collettiva emergente della particella. Nessuna delle particelle è solida, senza dubbio; comunque, messe insieme per formare il tavolo, una proprietà nuova emerge: la solidità.

Il tempo sarebbe allora una proprietà emergente di un qualcosa di basilico che compone l'universo¹¹⁴.

Per avanzare nella questione, fermiamoci un momento ad analizzare uno degli ingredienti che la fisica quantistica ci fornisce. Parliamo di “entanglement” (intreccio, aggrovigliamento), che è una proprietà caratteristica della natura quantistica di un sistema fisico a più componenti¹¹⁵. Essa comporta che si possano costruire stati quantistici composti ben definiti i quali non corrispondono a stati ben definiti delle loro parti costituenti.

Fra i sistemi “entangled” gli stati EPR (da Einstein, Podolsky and Rosen) hanno un ruolo molto importante. Un esempio è un sistema a due elettroni, che sono emessi in direzioni opposte da un nucleo di momento angolare zero. Un osservatore può misurare lo spin di uno degli elettroni e trovarlo in una data direzione (chiamiamola “up”); questa misura fa sì non solo che questo “collapsi”(come abbiamo visto che accade secondo le predizioni della teoria della misura) a questo valore, ma che l'altro elettrone, per effetto di questa stessa misura, vada necessariamente a porsi nello stato di spin opposto di quello

¹¹⁴ C. Callender, *Is Time an Illusion? in A Question of Time - The Ultimate Paradox* (Scientific American, New York, 2012).

¹¹⁵ M. Rasetti, *Il calcolo quantistico: una sfida per la matematica del 2000* (La Matematica nella Società e nella Cultura, *Bollettino della Unione Matematica Italiana* 8, 3A, 201-222 (2000)).

osservato (chiamiamolo “down”), affinché sia rispettata la conservazione del momento angolare pari a zero.

Per l’osservatore che effettua la misura è possibile allora ricavare informazione sull’elettrone che si trova fuori della sua portata (anche, per esagerare, se esso stesse sulla superficie della Luna!). Questa proprietà è una conseguenza della *non località* della meccanica quantistica.

L’informazione quantistica si può trasferire per teletrasporto grazie al processo di “entanglement”. Tipicamente, questo processo richiede tre oggetti A, B, C e può essere pensato così. B e C sono “entangled”. Supponiamo di mettere B a contatto con A; B promuove uno *scanning* di A, di modo che tutta l’informazione contenuta in A sia trasferita a B. Allora, come conseguenza dell’entanglement, l’informazione contenuta in A è trasferita a C. Così, C diventa una replica di A. Esperimenti così con i fotoni sono stati fatti a distanza di più di cento chilometri. Con gli atomi del berillo, è stato fatto nel 2005¹¹⁶. In questo processo, l’oggetto originale è distrutto (A è distrutto nel processo descritto prima). Siccome il processo richiede un terzo oggetto, l’informazione è trasmessa con velocità inferiore a quella della luce nel vuoto, come richiesto dalla teoria della relatività.

Con i mezzi a disposizione oggi, il teletrasporto di un essere umano impiegherebbe un tempo pare all’età dell’universo!

E il tempo, dove entra in tutto questo?

Nel formulare la versione quantistica della teoria della relatività – come passo necessario al processo di unificazione e definizione di una gravitazione quantistica – esiste il cosiddetto “problema del tempo”. Secondo una ben nota tecnica per realizzare questo processo, chiamata di *quantizzazione canonica*, si prevede l’esistenza di un universo-blocco statico, dove il tempo non avrebbe nessun ruolo.

Però, grazie all’entanglement, un sistema statico può descrivere un universo in “evoluzione”. Se A è un sistema usato come “orologio” ed è “entangled” con il resto dell’universo, un osservatore esterno (ipotetico) vede l’universo statico, ma un osservatore interno vede un universo in evoluzione¹¹⁷.

¹¹⁶ Il teletrasporto di atomi è stato una materia di copertina della prestigiosa rivista Nature: Nature **429** (2004).

¹¹⁷ Si veda, ad esempio: D. N. Page and W. K. Wootters, Physical Review D **27**, 2885 (1983); W. K. Wootters, International Journal of Theoretical Physics **23**, 701 (1984); D. N. Page, in *Physical Origins of Time*

In questa prospettiva, il tempo diventa una proprietà emergente dei sottosistemi dell'universo come conseguenza del processo di "entanglement". Un esperimento che illustra questo fenomeno fu realizzato molto recentemente usando un sistema "entangled" di due fotoni. Più precisamente, lo stato di polarizzazione di questi fotoni era "entangled". Uno dei fotoni fu usato come "orologio" per "calibrare" l'evoluzione del secondo. In effetti, un osservatore "interno" che diventa correlato al fotone orologio vede l'altro sistema evolvere, mentre un osservatore "esterno" che osserva soltanto le proprietà globale dei due fotoni può provare che il sistema è statico¹¹⁸.

Possiamo dire che almeno in un modello molto semplice di universo (formato da due fotoni!), il passaggio del tempo è percepito come una proprietà che "emerge" dal sistema, sfruttando la strana (a dir poco) proprietà quantistica dell'entanglement.

Molto recentemente, una sorprendente proposta teorica di collegamento tra questi due concetti apparentemente molto dissimili, l'entanglement e i *wormholes*, fu presentata¹¹⁹. La proposta nasce nel contesto di un tentativo di unificazione tra la meccanica quantistica e la relatività generale¹²⁰. In questa unificazione, l'entanglement quantistico crea una connessione geometrica tra due buchi neri, il che è sorprendente perché l'entanglement ha a che vedere con correlazioni ma senza collegamento fisico. In questo scenario, i due buchi neri distanti sarebbero fisicamente collegati all'interno e allora diventerebbero vicini per mezzo dei *wormholes*.

C'è anche una coincidenza da essere registrata: i due concetti, l'entanglement quantistico e i *wormholes* nascono da due articoli scritti da Einstein e i suoi collaboratori nel 1935. Il primo, quello del mese di maggio, diede origine all'argomento EPR discusso nella sezione 3; il secondo, che diede origine ai *wormholes* o ai ponti di Einstein-Rosen - ER, come sono anche chiamati, fu pubblicato nel mese di luglio¹²¹.

Asymmetry, edited by J. J. Halliwell et al. (Cambridge University Press, Cambridge, 1993); R. Gambini, R. A. Porto, J. Pullin, and S. Torterolo, *Physical Review D* **79**, 041501(R) (2009); A. Peres, *American Journal of Physics* **48**, 552 (1980); C. Rovelli, *International Journal of Theoretical Physics* **35**, 1637 (1996).

¹¹⁸ E. Moreva, G. Brida, M. Gramegna, V. Giovannetti, L. Maccone, and M. Genovese, *Time from quantum entanglement: An experimental illustration*, *Physical Review A* **89**, 052122 (2014).

¹¹⁹ J. Maldacena, *Black holes, wormholes and the secrets of quantum spacetime*, *Scientific American* **315**, 20 (2016).

¹²⁰ Si veda anche J. Maldacena and L. Susskind, *Cool horizons for entangled black holes*, *Fortschritte der Physik* **61**, 781 (2013).

¹²¹ A. Einstein and N. Rosen, *The particle problem in the general theory of relativity*, *Physical Review* **48**, 73 (1935).

È probabile che Einstein non sospettasse che un collegamento tra di loro si potesse trovare. In effetti, questa è una idea molto recente e deve ancora essere esplorata in tutte le sue conseguenze. Se si dimostrasse che questi due fenomeni possono in effetti essere equivalenti, sicuramente una nuova visione quantistica dello spazio-tempo ne verrebbe fuori, insieme a una ben riuscita unificazione tra la meccanica quantistica e la relatività generale.

Secondo R. Penrose, l'entanglement, o più precisamente, la non località fa parte di un "mistero" quantistico di tipo Z (dall'Inglese puZZle). Questi misteri fanno parte della natura delle cose; sono strani, ma reali e possono essere spiegati nel contesto della teoria. Invece, esistono anche dei misteri quantistici di tipo X (dall'Inglese paradoX), che sono appunto paradossali; questi forse richiedono un cambiamento nella teoria! Come esempio, abbiamo il problema del gatto di Schrödinger. La descrizione originale è come segue¹²²:

Si possono anche costruire casi del tutto ridicoli. Si rinchiuda un gatto in una scatola d'acciaio insieme alla seguente macchina infernale (che occorre proteggere dalla possibilità d'essere afferrata direttamente dal gatto): in un contatore Geiger si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegrerà, ma anche, in modo parimenti probabile, nessuno; se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato, mentre la prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione Ψ dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono degli stati puri, ma miscelati con uguale peso.

La situazione è detta paradossale perché il gatto si trova in uno stato fisico (descritto da un "vettore di stato") che è una sovrapposizione di un stato in cui è vivo e un altro stato in cui è morto. Questo paradosso ha suscitato una serie di risposte e implicazioni estreme e non sarà oggetto della nostra discussione qui. Ho voluto richiamarlo

¹²² E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik* [La situazione attuale della meccanica quantistica], *Die Naturwissenschaften* **23** (1935) 807-812, 823-828, 844-849; citazione a pag. 812. Ar

per illustrare una di queste implicazioni estreme: l'interpretazione dei molti mondi¹²³

L'interpretazione, proposta nella tesi di dottorato di Hugh Everett, il cui supervisore era John Wheeler, nel classico esempio del gatto implica che, se l'esperimento fosse realmente intrapreso, l'universo si dividerebbe in due: in uno di questi universi quello che effettua la misura, aprendo la scatola, troverebbe un gatto morto, mentre nell'altra realtà, un altro osservatore identico al primo, in un altro mondo, troverebbe un gatto vivo.

Questa conseguenza estrema è dovuta all'assunzione che segue da un'interpretazione della funzione d'onda secondo la scuola di Copenhagen: se essa comporta che tutte le possibilità quantistiche siano contemporaneamente reali allora la spiegazione diventa funzionante.

In ogni processo di misura, l'universo si divide e si biforca!

Ed ecco che si arriva all'interpretazioni di molti mondi, nella quale il ruolo del ricercatore (di quello che fa le misure) diventa cruciale. Sarebbe la coscienza umana a promuovere il collasso della funzione d'onda e creare la realtà! In poche parole, il sistema acquista le proprietà che escono dal processo di misura soltanto quando questo risultato viene processato dalla coscienza dell'osservatore¹²⁴.

Questa sarebbe una visione estrema, antropocentrica, della natura. Evidentemente, qui siamo fuori dell'ambito della sana tradizione scientifica di Galileo, Newton, Boltzmann, Einstein e tanti altri e dobbiamo abbandonare questa strada in queste riflessioni, lasciando agli studiosi dei processi di misura in meccanica quantistica il compito di trovare una via di uscita da queste interpretazioni estreme, oppure di dimostrarle in base più solide.

L'idea di un universo che si biforca ci fa pensare al tempo, ad una metafora nella quale il tempo si biforca creando nuove realtà e perciò nuovi mondi. E con questo entriamo (torniamo) al campo della letteratura!

4 Il giardino dei sentieri che si biforcano

La biforcazione dei vari mondi ci ha ispirato a pensare alla biforcazione del tempo,

¹²³ B. S. De Witt, and N. Graham (eds): *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton., 1973).

¹²⁴ Non mancano speculazioni che vanno molto oltre i dati sperimentali e il rigore richiesto dal metodo scientifico. Si veda, ad esempio, l'opera di R. E. Reed & M. Goswami – *The Self-Aware Universe: How consciousness creates the material world*. (Tarcher/Putnam, New York, 1993).

un tema trattato nel racconto *Il giardino dei sentieri che si biforcano* di J. L. Borges, scritto nel 1941 e successivamente raccolto in *Finzioni*¹²⁵. Il racconto, secondo Borges stesso, è poliziesco poiché alla fine un crimine viene commesso. Il tema centrale, però, sono quelli che piacciono di più al grande poeta e scrittore argentino: labirinti, tempo e libri. Ed ecco che questo racconto è costruito proprio con queste tre cose!

Nel racconto si narra di come Yu Tsun, una spia dell'Impero tedesco, incalzata dall'avversario Richard Madden e cercando invano di sfuggire all'inevitabile destino, si sia imbattuto in una scoperta sull'antenato Ts'ui Pên e sul suo romanzo incompiuto, concepito e strutturato come un inestricabile labirinto letterario. Questa spia trova il famoso sinologo Stephen Albert, che gli mostra il libro del suo antenato e gli spiega come ha capito trattarsi di un romanzo.

Spiega il monaco sinologo Stephan Albert che Ts'ui Pên avrà detto qualche volta: "Mi ritiro a scrivere un libro". E qualche altra volta: "Mi ritiro a costruire un labirinto". Tutti pensarono a due opere, nessuno pensò che libro e labirinto fossero una cosa sola. Stephen Albert, però, ha capito. E aggiunge:

Mi colpì la frase: "Lascio ai diversi futuri (non a tutti) il mio giardino dei sentieri che si biforcano". Quasi immediatamente compresi; il giardino dei sentieri che si biforcano era il romanzo caotico; le parole ai diversi futuri (non a tutti) mi suggerirono l'immagine della biforcazione nel tempo, non nello spazio.

Avendo compreso che il labirinto di Ts'ui Pên era un libro, più avanti nel racconto l'immagine del labirinto formato dal tempo è esplicitamente identificata dal sinologo al labirinto dell'universo stesso:

La spiegazione è ovvia: Il giardino dei sentieri che si biforcano è una immagine incompleta, ma non falsa, dell'universo quale lo concepiva Ts'ui Pên. A differenza di Newton o di Schopenhauer, il suo antenato non credeva in un tempo uniforme, assoluto. Credeva in infinite serie di tempo, in una rete crescente e vertiginosa di tempi divergenti, convergenti e paralleli. Questa trama di tempi che s'accostano, si biforcano, si tagliano o

¹²⁵ Si veda, ad esempio, J. L. Borges, *Finzioni* (Adelphi, Milano, 2003).

s'ignorano per secoli, comprende tutte le possibilità. Nella maggior parte di questi tempi noi non esistiamo; in alcuni esiste lei e io no; in altri io e non lei; in altri, entrambi.

In questa magnifica metafora letteraria, ci sono diversi tempi, come ci sono diversi tempi nella nostra quotidianità. Che ci sia o non un labirinto nel tempo come sognato da Borges non lo sappiamo e dobbiamo lasciare la questione all'arte, alla letteratura. Questo aveva capito l'autore biblico quando nel libro dell'Ecclesiastes (Capitolo 3) scrisse:

Per ogni cosa c'è il suo momento, il suo tempo per ogni faccenda sotto il cielo.

C'è un tempo per nascere e un tempo per morire,

un tempo per piantare e un tempo per sradicare le piante.

Un tempo per uccidere e un tempo per guarire,

un tempo per demolire e un tempo per costruire.

Un tempo per piangere e un tempo per ridere,

un tempo per gemere e un tempo per ballare.

Un tempo per gettare sassi e un tempo per raccogliarli,

un tempo per abbracciare e un tempo per astenersi dagli abbracci.

Un tempo per cercare e un tempo per perdere,

un tempo per serbare e un tempo per buttar via.

Un tempo per stracciare e un tempo per cucire,

un tempo per tacere e un tempo per parlare.

Un tempo per amare e un tempo per odiare,

un tempo per la guerra e un tempo per la pace.

Così arriviamo alla fine di questa nostra incursione nel problema insolubile del tempo. Dal punto di vista della scienza dura (la fisica, soprattutto), il problema richiede ancora tanti sforzi e probabilmente non verrà risolto mai in maniera soddisfacente.

Ci sono però gli orologi e ci sono gli specchi. I primi ci indicano quanto tempo è passato; i secondi illustrano come il tempo è passato nella nostra vita!

Finis

Noi sentiamo che il tempo fluisce in una direzione e anche con una variabile velocità. Quando siamo in compagnia gradita, il tempo sembra passare molto in fretta; quando aspettiamo un messaggio importante o quando siamo in sofferenza, il tempo sembra passare molto lentamente. Nostra esperienza psicologica con il tempo è evidentemente inseparabile della nostra vita. In questo senso, anziché dire con Sant'Agostino che i tempi sono tre, dovremmo dire che i tempi sono molti, una legione. I tempi sono tanti e mai sono gli stessi. Di sicuro sappiamo soltanto che gli orologi hanno *tutti* una funzione comune: misurarli!

È possibile che non saremmo mai d'accordo su quanto tempo sia passato tra un'evento e l'altro finché non misuriamo questo intervallo con un orologio. Abbiamo imparato che anche questo, dal punto di vista fisico, va trattato con molta attenzione, perché la durata tra due eventi dipenderà dallo stato di moto di chi misura il tempo trascorso. In più, sappiamo adesso che questa durata può dipendere anche dalla posizione nel campo gravitazionale occupata da chi lo misura.

Questi risultati che ci dà la scienza fanno parte del campo della fisica sperimentale. È certo dunque che questa consapevolezza fornita dalla scienza ci può aiutare a guardare il tempo da un'altra prospettiva, aggiungendoli anche un certo rigore formale. E ci permette letteralmente di “viaggiare”, ma più nella nostra immaginazione che veramente nel tempo!

La nostra ignoranza però rimane. Tutti noi sappiamo cos'è il tempo ma siamo nella posizione classica di Sant'Agostino quando qualcuno ci domanda cosa sia: non lo sappiamo più, *nescio!* Quindi, non possiamo parlare veramente di un progresso nel tentativo di rispondere alle domande cruciali che formuliamo sul tempo. Invece, come sappiamo, un vero e notevole progresso si è fatto nell'arte di misurarlo, di registrarlo. E continuiamo, molto probabilmente, senza trovare una definizione accettabile per “ora”. Cos'è “ora”? Sul “prima” o “poi” crediamo di poter dire qualcosa, anche se non è affatto vero perché sono domande ugualmente difficili.

La cosmologia contemporanea crede di poter rispondere alle domande del tipo: “Il

tempo ha avuto un inizio?” e “il tempo avrà una fine”? Come detto prima, sono grandi domande! Noi probabilmente conosciamo le risposte possibili poiché, per deduzione logica, possono essere di quattro tipi¹²⁶:

1. Il tempo ha avuto un inizio, e avrà una fine;
2. Il tempo ha avuto un inizio, e non avrà una fine;
3. Il tempo non ha avuto un inizio, ma avrà una fine;
4. Il tempo non ha avuto un inizio, e non avrà una fine.

Non sappiamo però quale è la risposta corretta, anche se i cosmologi credono che con i modelli attuali si possa dire qualcosa di concreto, di misurabile, cioè nel campo scientifico, a riguardo. È notevole, comunque, il progresso scientifico fatto dalla fisica nel far passare la riflessione dei presocratici dal campo speculativo al campo (anche se ancora limitato) della fisica sperimentale. L'universo è stato sottoposto ad indagine sperimentale e questo non è poco.

La teoria più accettata sull'origine dell'universo – la cosiddetta Teoria del Big Bang – è una combinazione ben riuscita della relatività generale (che, come abbiamo visto, è una teoria molto solida sulla gravità, sullo spazio e il tempo) con la fisica delle particelle. In questa teoria o modello, l'universo nasce da una grande esplosione radioattiva di un “atomo primordiale” con una densità molto alta, e si espande a una velocità altissima in modo da arrivare al presente Universo che ha una densità molto bassa.

Il modello di espansione dell'universo che trova un consenso più ampio si vale delle misure precisi della radiazione di fondo di microonde fatte nel 2006, usando il satellite WMAP (dall'inglese Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) lanciato dalla NASA. In questo scenario, il tempo trascorso dopo il Big Bang è stato determinato e ci indica un universo con un'età di 13.77 miliardi di anni!

Da confermarsi questo scenario, la risposta corretta sul problema del tempo dovrebbe trovarsi tra quelle di numero 1 o 2 proposte prima! Il tempo ha avuto un inizio! Lo scenario però non è confermato e l'indagine continua, evidentemente. E così capiamo anche perché ci siano ancora le speculazioni sulla fine del tempo, sui tempi ciclici e tanti altre¹²⁷. E capiamo anche la tentazione molto evidente negli scritti scientifici contemporanei

¹²⁶ A. Ben-Naim, op. cit., p. 216.

¹²⁷ R. Penrose, *Cycles of Time – An Extraordinary New View of the Universe* (Alfred A. Knopf, New York,

sull'argomento di abbandonare i limiti stabiliti dal "metodo scientifico".

Sembra, però, doveroso finire queste non pretenziosi riflessioni sul tempo invocando l'argomento impiegato da Karl Popper nel suo dialogo con Einstein, al quale abbiamo accennato nella Sezione3: *non dobbiamo lasciarci dominare dalle nostre teorie e essere portati ad abbandonare il senso comune con tanta facilità.*

Il problema del tempo dell'universo esiste ed è quello che forse interessava di più a Einstein; ma esiste un problema reale, molto concreto, innegabile, urgente, che è il tempo della nostra vita, che "fugge, et non s'arresta una hora"!