

LO SCRIGNO DI PROMETEO

COLLANA DI DIDATTICA, DIVULGAZIONE E STORIA DELLA FISICA

Direttore

Ettore GADIOLI

Università degli Studi di Milano

Piero Caldirola International Centre for the Promotion of Science

Comitato scientifico

Sigfrido BOFFI

Università degli Studi di Pavia

Giovanni FIORENTINI

Università degli Studi di Ferrara

Marco Alessandro Luigi GILIBERTI

Università degli Studi di Milano

LO SCRIGNO DI PROMETEO

COLLANA DI DIDATTICA, DIVULGAZIONE E STORIA DELLA FISICA



La conoscenza completa delle leggi fisiche è la meta più alta a cui possa aspirare un fisico, sia che essa abbia uno scopo puramente utilitario... sia che egli vi cerchi la soddisfazione di un profondo bisogno di sapere e la solida base per la sua intuizione della natura.

Max PLANCK

La Fisica ha come scopo capire il rapporto tra l'uomo e la natura, non solo da un punto di vista scientifico, ma anche filosofico, e ha cambiato in modo irreversibile la nostra vita tramite le sue ricadute tecnologiche.

La spiegazione e la divulgazione dei concetti che stanno alla sua base, dati quasi per scontati, ma lungi dall'essere noti o compresi da molti, e l'evoluzione delle tecniche sperimentali, che hanno permesso di scoprire le leggi che regolano i fenomeni naturali e delle teorie via via elaborate, sono perciò argomenti di studio e riflessione di rilevanza primaria.

Questa collana si rivolge a chi abbia desiderio di approfondire o discutere questi temi ed è aperta a chi voglia collaborarvi con contributi originali.

Angelo Tartaglia

Enigmi cosmici

Prefazione di
Andrea Possenti



Copyright © MMXVI
Aracne editrice int.le S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Quarto Negroni, 15
00040 Ariccia (RM)
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-9641-3

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: settembre 2016

Indice

- 9 *Prefazione*
di Andrea Possenti
- 13 *Introduzione*
- 15 *Capitolo I*
Excursus
1.1. L'antichità: miti e leggende, 15 – 1.2. Guardando il cielo, secolo dopo secolo, 18 – 1.2.1. *Il paradosso di Olbers*, 21 – 1.2.2. *Morte termica*, 22 – 1.2.3. *Propagazione istantanea dell'interazione gravitazionale*, 23 – 1.2.4. *L'etere luminifero*, 25 – 1.3. I tempi sono maturi, 26
- 27 *Capitolo II*
Un nuovo paradigma
2.1. La situazione iniziale, 27 – 2.2. Lo spazio e il tempo prima di Einstein, 28 – 2.2.1. *Lo spazio*, 28 – 2.2.2. *Il tempo*, 30 – 2.3. Lo spazio e il tempo, 31 – 2.4. Gravità e spazio-tempo, 37 – 2.4.1. *Relatività ed elettromagnetismo*, 40 – 2.5. Le equazioni di Einstein, 42 – 2.6. Il primo pilastro dell'universo, 45 – 2.A. Appendice: il linguaggio universale dei tensori, 46
- 51 *Capitolo III*
L'universo secondo Einstein nonostante Einstein
3.1. Un universo omogeneo e isotropo?, 51 – 3.2. La prima cosmologia relativista, 53 – 3.2.1. *La geometria dello spazio*, 56 – 3.2.2. *Le equazioni di Einstein*, 58 – 3.3. Le soluzioni di Friedmann e di Lemaitre, 61 – 3.3.1. *L'universo chiuso*, 61 – 3.3.2. *L'universo aperto*, 63 – 3.3.3. *Lo spazio piatto*, 64 – 3.3.3. *Il più grande svarione della vita di Einstein*, 64 – 3.4. Il modello standard: prima parte, 68

- 69 **Capitolo IV**
Meccanica quantistica
4.1. Ruolo della meccanica quantistica per la cosmologia, 69 – 4.2. Quanti e probabilità, 70 – 4.3. Teoria quantistica dei campi, 78 – 4.4. Quantizzare la gravitazione, 81 – 4.5. Da micro a macro, 83
- 85 **Capitolo V**
Il lato oscuro dell'universo
5.1. La massa mancante, 85 – 5.2. L'energia oscura, 88 – 5.3. Un modello cosmologico standard, 92
- 95 **Capitolo VI**
Un universo duale?
6.1. Due ingredienti, 95 – 6.2. L'energia del vuoto, 96 – 6.2.1. *Uno spazio-tempo elastico*, 97 – 6.2.2. *Il ruolo dei difetti topologici*, 103 – 6.3. Limiti della teoria SST, 108
- 113 **Capitolo VII**
Universo o multiuniverso?
7.1. L'universo visibile, 113 – 7.2. Le costanti universali sono davvero costanti? 114 – 7.3. Il multiverso classico, 117 – 7.4. Evoluzione temporale delle "costanti", 118 – 7.5. Il problema delle masse, 119 – 7.6. Un universo a bolle, 120 – 7.7. Universo infinito e proprietà statistiche, 122 – 7.8. Cosmologia quantistica, 125 – 7.8.1. *La teoria dei "molti mondi"*, 127 – 7.9. Universo ed *entanglement*, 130
- 135 **Capitolo VIII**
La divina lagrangiana
8.1. Il principio di minima azione, 135 – 8.2. Da dove viene la lagrangiana? 139 – 8.3. La lagrangiana dell'universo, 141 – 8.4. La lagrangiana dello spazio-tempo, 143 – 8.5. Ingegneria lagrangiana, 146
- 151 *Conclusioni*

Prefazione

di Andrea Possenti¹

In letteratura sono tanti gli esempi di saggi a tematica scientifica scritti per indirizzare il lettore attraverso un facile cammino alla scoperta delle basi di una teoria, di un esperimento o di un paradigma scientifico. Sull'altare della semplificazione - spacciata per chiarezza - si introducono ardite analogie legate al cosiddetto senso comune e si costruiscono acrobatiche similitudini con esperienze quotidiane dall'interpretazione apparentemente semplice. La chiave di scrittura di questi testi spesso consiste nel fornire al lettore informazioni il più possibile predigerite, snocciolate come i sassolini di Hänsel e Gretel in un percorso i cui ostacoli sono stati smussati fino alla piattezza e tutto sembra risolto e compreso. Così si riduce al minimo la fatica del lettore e si instilla la sensazione di avere finalmente capito. Scopo finale: stimolare interesse e fascinazione di fronte ad argomenti considerati altrimenti troppo ostici. Obiettivi chiari - e per certi versi anche commendevoli - in tempi in cui il metodo scientifico è quotidianamente messo in discussione da maghi e da ciarlatani e l'analfabetismo scientifico e matematico sembra tornare ad essere di moda. Questo approccio è però davvero il meglio che si può praticare per servire il lettore?

Angelo Tartaglia, in questo volume, ha scelto di seguire un'altra strada, adottando un registro di scrittura molto diverso. Scrivere un saggio sulla relatività generale e sulla meccanica quantistica, nonché sulle loro applicazioni in Cosmologia, che coniughi l'intuizione col rigore, che si appelli alla logica e alla matematica, e che presenti le molte conquiste al fianco dei tanti problemi aperti. Un lavoro che è stato approntato pensando a tutti i lettori possibili, ossia non mirato a iniziati, scienziati o ad addetti ai lavori. A ogni passaggio, Tartaglia ragiona in primis per convincere se stesso, e in questo percorso si fa accompagnare dal lettore, che non può più limitarsi alla sensazione di avere capito, ma deve compiere il medesimo sforzo del redattore,

¹ Direttore dell'Osservatorio Astronomico di Cagliari.

accettando ad esempio il fatto che taluni concetti della fisica non sono catturabili appieno senza l'appoggio di un almeno minimale linguaggio matematico.

Nei saggi o nei libri di taglio umanistico, in presenza di frasi in lingue antiche o diverse, è considerato del tutto normale riportare affiancati il testo originale e la sua traduzione: non tutti son tenuti a conoscere il Greco antico o l'Inglese, e quindi la traduzione è più che opportuna, ma senza il testo originale la musicalità dei versi di Lesbo o di Yates sarebbe perduta. È dunque ingiustificabile la riottosità mostrata dai media nel pubblicare equazioni o formule matematiche in testi di taglio scientifico, indirizzati a un pubblico generico.

Tartaglia per fortuna non si lascia intimorire da remore di gretto mercato librario e pensa invece al lettore che lo accompagna attraverso i 9+1 capitoli della sua storia di conoscenza. Ogni volta che serve, fornisce dunque al lettore la versione originale – scritta nella lingua della matematica – dei concetti di cui offre altresì una traduzione affiancata.

E ben si guarda, Tartaglia, dal guidare il lettore in un percorso ove le difficoltà sono state tutte surrettiziamente spianate. Al contrario, lo guida - e si addentra con lui - proprio laddove gli ostacoli si ergono più impervi, per rendersi conto, in prima persona e sul campo, che nessuno al momento è in grado di scavalcarli.

Ne esce un ritratto di grande spessore delle dicotomie finora insanate della fisica fondamentale, a partire da quella più fondamentale di tutte, l'incomunicabilità fra il mondo discreto dei quanti e quello continuo dello spazio-tempo einsteiniano. Queste sono le problematiche che fanno da sfondo all'intero volume, che, dopo aver introdotto i termini della diatriba, ne mostra le conseguenze sul nostro modo attuale di interpretare l'evoluzione dell'intero Universo. Vengono dunque esplorati alcuni degli aspetti più intriganti della Cosmologia moderna: dalla costante cosmologica all'epoca dell'inflazione; dalle fluttuazioni quantistiche del vuoto all'ipotesi (direttamente indagata dall'autore negli ultimi anni) di uno spazio-tempo elastico; dalle variegate ipotesi sull'esistenza di multiversi alle teorie delle stringhe e delle membrane; dalla funzione d'onda dell'Universo alla sua lagrangiana e alla quintessenza. Il tutto passando per le due grandi incognite attuali della cosmologia osservativa, ovvero la natura della materia oscura e della energia oscura.

Non è un viaggio in prima classe quello compiuto in compagnia di Tartaglia, ma un trekking sui sentieri più accidentati della fisica moderna. Un'avventura dove, ogni tanto, bisogna accamparsi per recuperare energie e lucidità di ragionamento. Ma dietro alcune curve, o al di là di alcuni valichi, si aprono squarci a sorpresa sulla Natura dell'Universo e alla fine del cammino si capisce – davvero e coscientemente – di essere solo al suo inizio.

Introduzione

La cosmologia in senso lato è una branca estremamente affascinante del sapere e ha anch'essa, come gran parte della fisica dell'ultimo secolo, fatto progressi enormi. Le nostre capacità odierne di osservazione erano inimmaginabili cent'anni fa e anche i nostri strumenti interpretativi si sono enormemente affinati. Potremmo a questo punto aspettarci di riuscire, in tempi non troppo lontani nel futuro, a cucire in un unico quadro coerente tutte le conoscenze che abbiamo acquisito in ambiti diversi della scienza fisica, costruendo un quadro riassuntivo coerente della vastissima fenomenologia che descrive l'universo nel suo insieme.

Tuttavia più si procede e più emergono elementi contraddittori nel quadro provvisorio che si viene costruendo, anzi, è proprio la nostra grandissima capacità di raccogliere informazioni dall'osservazione e dall'esperimento che porta in primo piano le incongruenze.

L'obiettivo principale di questo testo non è quello di riassumere lo stato dell'arte nella comprensione dell'universo e dei fondamenti della fisica: per questo esiste una vasta e ottima letteratura. L'obiettivo invece è proprio quello di andare in cerca dei punti deboli e delle loro caratteristiche strutturali, delle contraddizioni e dei "piedi d'argilla" di un gigante che mostra in ogni altra sua parte forza e splendore, continuando a crescere.

A chi è destinato questo libro? A chiunque possieda già i fondamenti di una cultura scientifica, ma vorrei poter dire a chiunque e basta. In effetti almeno una parte delle questioni aperte che emergeranno confinanano con la filosofia e non dobbiamo dimenticare che la fisica di oggi è l'erede della filosofia naturale del passato. Tuttavia è vero che, col passare del tempo e col raffinarsi dei metodi di osservazione e misurazione e degli strumenti interpretativi, anche la complessità tecnica dei problemi è cresciuta e si è sviluppato un linguaggio specializzato, anzi un insieme di "dialetti" specializzati propri di ogni sottobranca del sapere. Tutto ciò costituisce per i più una barriera difficile da superare per arrivare all'essenza di quel sapere su cui vorremmo ragionare.

È risaputo che il linguaggio, quanto più diviene iniziatico, tanto più costituisce un recinto protettivo contro incursioni altrui che rischierebbero, sotto il manto di formule che incutono un reverenziale timore, di scoprire le debolezze di questa o quella comunità di iniziati.

D'altra parte sarebbe stato impensabile, posto che ne fossi capace, mettersi a redigere una sorta di trattato universale a partire dai rudimenti di base della fisica, per approdare solo alla fine, dopo un lungo (e noioso) viaggio, alle questioni interessanti. Stando così le cose ho tentato la via del compromesso, il quale, come spesso accade, rischia di essere insoddisfacente per tutti. Ho provato insomma a scrivere avendo in mente un lettore che disponga di quelle conoscenze scientifiche di base sufficienti per non trovarsi in imbarazzo col linguaggio (matematico) in cui le teorie fisiche sono formulate; oppure che sia in grado di reperire altrove l'illustrazione di quegli strumenti che eventualmente gli mancassero.

Nello stesso tempo ho provato a riesporre le basi consolidate dei due grandi paradigmi della fisica del Novecento: la relatività (generale) e la meccanica quantistica. Anche perché è proprio la contraddizione tra questi due grandi paradigmi uno dei problemi conoscitivi su cui riflettere.

Tutto ciò premesso, sono andato a caccia dei dubbi, piuttosto che delle certezze, confidando nel fatto che è il dubbio il motore della ricerca e che il risultato viene spesso dall'umiltà più che dal trionfalismo. Parafrasando il Socrate raccontato da Platone, posso ricordare che il più grande dei sapienti è chi sa di non sapere e il peggiore degli ignoranti è chi crede di sapere.

Il dubbio maggiore cui arriveremo, per chi avrà la pazienza di seguire fino in fondo questo cammino, sarà se la nostra ragione sia o meno uno strumento sufficiente ed adeguato per capire l'universo, anche nei suoi aspetti fisici.

Giudicherà il lettore se e quanto io sia riuscito ad avvicinarmi agli obiettivi dichiarati e se questo lavoro sarà stato utile.

1.1. L'antichità: miti e leggende

Fin dagli albori del pensiero umano possiamo trovare traccia di riflessioni sul tutto, o sull'universo, come diciamo oggi. Questi echi lontani ci giungono al fondo di una lunga catena di trasmissione che approda alla forma scritta, o almeno raffigurata, nel secondo millennio prima di Cristo. Ciò che a noi interessa qui è ricercare le tracce di intuizioni che, con linguaggi e formalismi estremamente diversi, hanno raggiunto l'età contemporanea e sono di fatto inglobate nel sapere scientifico, o quanto meno nel dibattito scientifico, attuale.

L'umanità pensante dei primi tempi era colpita dall'osservazione di quanto le accadeva intorno, nell'apparentemente illimitata varietà e mutevolezza di forme dell'ambiente terrestre e nell'apparente regolarità e stabilità del cielo al di sopra dei fenomeni meteorologici. L'esperienza di sé era quella di un essere animato e dall'essere noi animati scaturiva la diversità dei comportamenti; così la maggior parte dei fenomeni naturali di cui non si comprendeva la causa erano letti come "comportamenti" di qualcuno e di conseguenza il mondo intero era dominato e determinato da un gran numero di agenti animati molto al di sopra della comune umanità e, in questo senso, divini. Il vento, le nubi, le piogge, le sorgenti, il mare, le stesse montagne, etc.: tutto vive e non è comprensibile, ma tutt'al più propiziabile attraverso riti particolari. Di questo approccio si possono occupare psicanalisi, sociologia, etnologia e altre scienze umane; a monte però, sia pure non formulata nei modi più tardi del pensiero filosofico, aleggia una domanda: da dove viene tutto questo mondo, comprensibile o meno che sia? Perché e come ha assunto questa forma?

Un tratto comune a tutte le maggiori cosmogonie dei tempi antichi è quello di assumere, in un tempo indefinito del passato, l'esistenza di

una sorta di materia primordiale, la cui connotazione è quella di essere indifferenziata. Per la tradizione greca si tratta del caos primigenio; la cultura cinese antica lo chiama il *qi*; nella Bibbia si parla genericamente delle “acque”; anche la tradizione egizia si rifà ad un oceano primordiale.

Per lo più, insomma, si parte da qualcosa che c'è e che è indifferenziato e ha in sé le radici di tutto quello che verrà in seguito. Al di là del linguaggio immaginifico del mito, questa idea di un ingrediente primordiale informe ha una curiosa assonanza con almeno una delle teorie moderne che riguardano i primissimi istanti dell'evoluzione dell'universo: quella dell'inflazione cosmica. Secondo tale teoria, proposta inizialmente da Alan Guth (Guth, Alan H., 1981) e Andrei Linde (Linde, Andrei D., 1983), in una certa fase della sua esistenza l'universo era permeato da un campo scalare chiamato “inflatone”, inizialmente in uno stato di “falso vuoto”. Queste espressioni, su cui torneremo a tempo debito, possono risultare piuttosto oscure a chi non si occupi di fisica teorica. Per ora contentiamoci di dire che questo ingrediente dal nome certamente molto più buffo di quelli usati nelle antiche cosmogonie, si trovava in una condizione di altissima densità di energia in cui tutte le future interazioni fondamentali (gravità, forza debole, elettromagnetismo, forza forte) erano indistinguibili e in cui non erano presenti eccitazioni (cioè particelle) proprie del campo: insomma precisamente uno stato indifferenziato in cui c'è già tutto quello che ci sarà in seguito, ma nulla è distinguibile per via dell'altissima densità di energia. L'espansione dello spazio e le fluttuazioni quantistiche daranno poi luogo ad una incredibilmente rapida transizione (con una durata dell'ordine di 10^{-34} secondi) che, espandendo in maniera inflazionaria¹ lo spazio (di lì il nome del campo), separerà le quattro forze fondamentali e farà comparire a cascata tutte le particelle che popolano l'universo.

Nelle antiche cosmogonie, a un certo punto, in un tempo indefinito, qualcosa accade e “nascono” le prime entità divine che a loro volta ne generano altre. Un posto a parte è rappresentato dalla Bibbia in cui Dio non è parte dell'universo, ma, con un atto di volontà, crea dal nulla ogni cosa. Per quanto nel Genesi, riecheggiando qualcosa della cosmogonia mesopotamica, si parli dello spirito di Dio che «aleggia sulle acque», chiaramente Dio non scaturisce da qualcosa e quanto viene

¹Cioè con legge esponenziale nel tempo.

dopo non viene indicato come tratto dalle “acque”. Insomma il nulla da cui avviene la creazione è proprio il nulla; non è il “vuoto” della meccanica quantistica, che in realtà è qualcosa.

Tornando ai miti delle origini di quasi tutte le civiltà antiche, dopo i primi indistinti ed inspiegati eventi, le vicende successive prendono un andamento variegato, spesso con connotazioni truculente (specie per le leggende mesopotamiche, ma in varia misura anche nelle tradizioni egizie, greche, nordiche, centroamericane...): genitori divini crudeli verso i figli, figli divini che “uccidono” padri o madri (sempre divini) e magari li smembrano, e così via. Di fatto viene proiettata in cielo l’umanità di ogni giorno con i suoi contrasti e le sue connotazioni. Queste storie sono state qualche volta analizzate dal punto di vista della psicanalisi; tuttavia in qualche caso vi si può leggere qualcosa che rimanda a intuizioni che oggi si ritrovano nel dominio della fisica, dopo essere passate per quello della filosofia.

Sia nel pensiero greco arcaico che in quello indiano vi è l’idea di un progressivo decadere del mondo. Nel racconto di Esiodo si sono succedute cinque età: dell’oro, dell’argento, del bronzo, degli eroi e infine la presente, del ferro. Ognuna, per vari rispetti, è risultata peggiore della precedente.

Il pensiero indiano arcaico descrive un universo ciclico, in cui ogni ciclo è composto di quattro età o *yuga*, ognuna peggiore della precedente, fino a quella finale, il *kali yuga*, cui segue la distruzione del mondo, prima dell’inizio di un nuovo ciclo o *kalpa*. Anche altre tradizioni arcaiche (dei popoli delle Americhe, delle tradizioni nordiche) contemplanò un progressivo decadimento con una qualche fine del mondo, con o senza successiva rinascita. Potremmo vedere in tutto ciò una rappresentazione della “freccia del tempo” e magari del secondo principio della termodinamica?

Non è il caso di insistere e viceversa è il caso di avvicinarci a quello che oggi sappiamo e pensiamo dell’universo. Non seguirò in generale un percorso storico, ma tenterò di far precedere i fatti alle interpretazioni, anche se, come vedremo, a questa scala e su questa materia non è così facile separare i fatti dalle interpretazioni. Mi sforzerò di fare un uso limitato del formalismo matematico, il quale in qualche caso serve a sintetizzare in maniera efficace i concetti, ma qualche altra può anche servire ad oscurarli.