



Maurizio Consoli
Alessandro Pluchino

IL VUOTO

UN ENIGMA TRA FISICA E METAFISICA

Prefazione di
Attilio Agodi



A02

Maurizio Consoli
Alessandro Pluchino

Il vuoto

Un enigma tra fisica e metafisica

Prefazione di
Attilio Agodi



Copyright © MMXV
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-XXXX-X

*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 2015

«Esiste una materia diffusa come un continuum nella totalità dello spazio cosmico, la si chiami etere o calorico etc. , che non è un elemento ipotetico (per spiegare certi fenomeni ed escogitare, per effetti dati, cause più o meno verosimili), ma può essere postulata e riconosciuta a priori come un elemento appartenente necessariamente al passaggio dai principi metafisici della scienza della natura alla fisica. Di una tale materia originaria, priva di forma, penetrante tutti gli spazi e garantita solo dalla ragione, di cui noi non pensiamo nulla di più che semplici forze motrici diffuse nello spazio ed onnipresenti, si può postulare la realtà anche prima dell'esperienza e pertanto a priori»

Immanuel Kant, Opus Postumum

Prefazione

Il tema del libro è ‘il vuoto’ in quanto ‘enigma’ tra fisica e metafisica.

Gli autori presentano l’enigma dal punto di vista della fisica delle particelle di oggi delineando, nella prima parte del testo, una guida alla lettura che associa suggestioni intuitive di senso comune a termini del linguaggio scientifico (introducendo il ‘campo di Higgs’), ma anche anticipando l’interesse per quel fenomeno di solito chiamato ‘deriva dell’etere’ (*ether-drift*) e le sue possibili implicazioni.

Propongono poi una sorta di antologia di riferimenti al vuoto, al ‘nulla’ e all’‘etere’, riscontrati in culture ed epoche diverse, mostrando come la riflessione sull’esperienza umana, pur nella varietà delle sue determinazioni, pervenga ad intuizioni ricche di suggestive mutue analogie. Il passaggio dalla *physis* alla fisica è schematizzato con citazioni di Platone, Aristotele, Newton, Cartesio e Kant .

Il successivo passaggio ad una descrizione di alcuni storici esperimenti effettuati per misurare il ‘vento dell’etere’ (*ether-wind*) corredata da dati sperimentali, introduce un esempio di analisi che ne pone in questione l’interpretazione generalmente adottata. La proposta di un nuovo esperimento, con l’impiego di dispositivi oggi disponibili, che ne garantiscono migliore significatività, conclude molto bene il capitolo.

La singolare originalità di questo libro, per me, si trova nel suo essere un saggio semi-divulgativo che cerca di rendere accessibile al grande pubblico una sorta di percezione critica del ‘fare fisica’, mostrando la complessa ricerca richiesta per distinguere il ‘segnale’ (cercato) dal ‘rumore’ (che ne ostacola il riconoscimento).

Ricordo che la radiazione cosmica di fondo è stata scoperta come un ‘rumore’ che non si riusciva ad eliminare (si potrebbe chiamare ‘il rumore del big bang’). Poiché le misure effettuate sulla radiazione cosmica di fondo (CMB = *Cosmic Microwave Background*) mediante il satellite COBE (*COsmic Background Explorer*) hanno mostrato evidenze di fluttuazioni e di anisotropia, il nuovo esperimento di cui si riferisce in questo libro sarebbe particolarmente interessante anche perché consentirebbe il confronto dei dati ottenuti sulla superficie terrestre con quelli raccolti a quote molto diverse da U2 (20 km) e dallo stesso COBE (900 km) (effetti gravitazionali? differenze di sensibilità dei dispositivi o d’intensità dei segnali?).

Per un testo divulgativo la puntuale indicazione dei riferimenti bibliografici cui rinviano le citazioni è una caratteristica eccezionale e particolarmente pregevole. Chi legge può farsi un’idea degli studi da cui ha tratto origine il libro e sa in quale dei riferimenti cercare di scoprire altre notizie su un argomento cui sia interessato.

Se si usa il linguaggio comune per fare conoscere concetti o fenomeni specificati in un qualche ‘gergo’ scientifico, è quasi istintivo il valersi di metafore, per esempio un fluido ‘speciale’ per un ‘condensato di quanti’. In queste condizioni è un’opera d’arte suggerire i limiti dell’analogia. Pertanto è improbabile che due esperti concordino nella scelta.

Il fatto che chi scrive la prefazione possa apprezzare questo lavoro pur dissentendo da alcune tesi o opinioni degli autori, vorrei desse al lettore un’intuizione sul dialogo tra esperienze di ricerca diverse da cui trae origine l’evoluzione della conoscenza, in fisica come nelle altre scienze.

Cito un caso di dissenso sulla relatività (‘ristretta’): mi sembra riduttivo ricondurla al confronto tra l’interpretazione di Lorentz e quella di Einstein del 1905, non tanto per le metamorfosi indotte dalle sue innumerevoli ‘applicazioni’ quanto per il suo coinvolgimento nell’evoluzione delle idee sulle leggi fisiche. Nelle lezioni di Chicago (1929) Heisenberg riconduceva le origini della relatività all’analisi critica delle misure di distanze e di intervalli di tempo.

Altri casi di dissenso riguardano le connessioni tra logica e semantica nella ‘traduzione’ del discorso scientifico nei termini del ‘senso comune’ (‘il bene più diffuso al mondo’ diceva ironicamente Cartesio). Uno di questi lo trovo nelle Conclusioni dove, dopo il richiamo di Confucio a ‘dare il nome giusto alle cose’, si considera, come esempio che ‘balza subito agli occhi’, il vuoto “che viene chiamato ‘vuoto’ ma che, come abbiamo cercato di illustrare, ‘vuoto’ non è”. Mi chiedo: si pone in questione la distinzione tra ‘vuoto’ come sostantivo e come aggettivo, o si propone qualcosa da indovinare? Può darsi sia un appello all’intuizione del lettore.

Si dice che Socrate motivasse il rifiuto di scrivere un libro asserendo che ‘un libro, se lo interroghi, austeramente tace’: forse ogni libro, ma certo uno come questo, andrebbe letto lasciandosi interrogare dal discorso che propone alla creatività dell’intelligenza.

Il ‘lasciarsi interrogare’ può tradursi in una riflessione che metta in questione ciò che si comprende per intendere ciò che non si comprende. Metafora ‘enigmatica’: la luce ci fa vedere le cose perché ne viene riflessa, ne rivela i colori se solo in parte ne viene assorbita.

Attilio Agodi¹, Maggio 2015

¹Attilio Agodi è professore emerito di Fisica Teorica dell’Università di Catania. E’ stato presidente dell’Accademia Gioenia delle Scienze di Catania.

Indice

1	Introduzione	11
2	Il vuoto nella fisica di oggi	15
2.1	Il vuoto ed il campo di Higgs	15
2.2	Il vuoto e l'etere	19
2.3	Il vuoto come una forma di fluido turbolento	21
3	L'idea dell'ether-drift e le sue implicazioni	27
3.1	L'idea di rivelare l'ether-drift	28
3.2	Implicazioni del rivelare l'ether-drift	31
4	Antiche concezioni della natura	37
4.1	Brevi cenni al primo pensiero greco	38
4.1.1	La Scuola Ionica	40
4.1.2	Eraclito	44
4.1.3	Parmenide	45
4.1.4	Melisso di Samo	48
4.1.5	Pitagora e la sua scuola	49
4.1.6	Empedocle	50
4.1.7	Anassagora	51
4.1.8	I primi atomisti: Leucippo e Democrito	53
4.2	Brevi cenni all'antico pensiero orientale	56
4.2.1	Il Taoismo	58
4.2.2	L'Induismo delle Upanisad	61
4.2.3	Il Buddhismo ed alcuni suoi sviluppi	63
4.3	Sintesi: il vuoto come origine di tutto?	68
5	Dalla <i>chora</i> di Platone all'etere di Kant	81
5.1	Platone	81
5.2	Aristotele	83
5.3	Cartesio	85
5.4	Newton	87
5.5	Kant	89
6	L'etere ottocentesco e la nascita della relatività	95
6.1	I primi esperimenti di ether-drift	97
6.2	La prima relatività	99
6.3	La relatività speciale di Einstein nel 1905	100
6.4	Einstein e l'etere	103

7	Esperimenti di ether-drift: una visione moderna	109
7.1	La velocità della luce in un mezzo gassoso	110
7.2	L'esperimento originale di Michelson-Morley del 1887	114
7.3	Rivelare l'ether-drift in laboratorio?	122
7.4	Altri esperimenti di ether-drift	126
7.5	L'esperimento di Joos	138
7.6	Sommario e sviluppi futuri	145
7.7	Appendice A	151
7.8	Appendice B	152
7.9	Appendice C	155
7.10	Appendice D	158
8	Idealizzazione del vuoto e conclusioni	163
8.1	Il mondo in una visione idealizzata	164
8.2	Il vuoto e la relatività	166
8.3	Il vuoto e la fisica quantistica	168
8.4	Conclusioni	170

1. Introduzione

Durante il suo ultimo viaggio in Italia, poco prima della sua morte avvenuta nel 1954, fu chiesto ad Enrico Fermi quale sarebbe stata la fisica del futuro. Si racconta [1] che a questa domanda il grande scienziato abbia risposto senza esitazione: «Lo studio del vuoto». In questo modo, voleva indicare quanto importante sarebbe stato concentrarsi su questa enigmatica entità, il vuoto appunto, che per definizione sfugge ad indagini o misurazioni dirette. Poiché le sue caratteristiche sono deducibili solo indirettamente, dal comportamento osservato delle forme di materia ed energia conosciute, Fermi intendeva dunque dire che la nostra capacità di penetrare nei segreti della natura dipenderà dialetticamente sempre di più dalla sua parte più elusiva, quella che, per differenza, continueremo a chiamare ‘vuoto’.

Questa complementarità suggerisce anche che l’indagine fisica, nel tempo, possa finire con il trascendere quello che storicamente è stato il suo ambito tradizionale avvicinandosi così ad altre problematiche e ad altre forme di conoscenza. Infatti l’idea generale che la comprensione ultima di quello che vediamo dipende da qualcosa che *non* vediamo esprime una concezione filosofica ed è alla base di tutte le religioni.

Partendo da questa visione profetica di Fermi, gli scopi di questo volume sono essenzialmente due.

Il primo scopo è mettere in evidenza le interessanti analogie tra la concezione del vuoto nella fisica di oggi ed alcuni concetti-chiave che si ritrovano in epoche e culture diverse. Per arrivare a questi collegamenti, si deve prima capire che il vuoto di oggi non è il puro ‘nulla’ ma, piuttosto, è lo stato di minima energia. Per questo, sarebbe forse meglio chiamarlo ‘stato fondamentale’ o, in inglese, *ground state*. Ora, tenendo conto dell’equivalenza tra massa ed energia e delle varie forme di interazione, ci si è convinti che l’energia risulta minima non quando lo spazio è banalmente vuoto ma piuttosto quando viene uniformemente riempito di quanti elementari. Questo fenomeno, detto comunemente ‘condensazione del vuoto’ o, in inglese, *vacuum condensation*, viene oggi introdotto per spiegare alcuni aspetti essenziali della fisica. Per esempio, l’origine della massa o la non-osservabilità di quarks isolati.

In questa descrizione, i quanti che condensano, o non possiedono alcuna qualità specifica (per esempio hanno tutti individualmente momento spaziale zero, carica elettrica zero, spin zero,..), come i quanti del ‘campo di Higgs’ introdotto per spiegare la massa, o se, come negli altri casi, hanno caratteristiche definite (per esempio valori non nulli del momento spaziale, dello spin, della carica,...), popolano il vuoto disponendosi in modo da cancellarle reciprocamente. Questo implica, per esempio, che, nei condensati, insieme a particelle con una certa carica elettrica, con un certo momento spaziale ed un certo spin ci sarebbero anche le loro antipar-

ticelle con carica, momento spaziale e spin opposti. A causa della fondamentale indistinguibilità degli oggetti quantistici identici, vengono così a prodursi infinite combinazioni equivalenti ed intercambiabili nelle quali si azzerano i possibili contrari. In questa rappresentazione, le particelle che compongono la materia nota (ed anche quegli stati effimeri che vengono creati solo per brevissimo tempo negli acceleratori) vanno pensate come eccitazioni del vuoto al variare dell'energia e degli altri parametri (carica, spin...) ad esse associati.

Dunque, il vuoto sarebbe difficile da percepire non perché è il 'nulla' ma perché è un substrato che non mostra alcun carattere definito. Un qualcosa che, potremmo dire, risulta incolore, insapore, inodore... perché include in sé tutti i possibili colori, sapori, odori... Per questo suo aspetto di assoluta neutralità, il vuoto si propone allora come la vera sorgente e termine ultimo di tutte le cose suggerendo, anche se con varie differenze e sfumature, interessanti collegamenti con il primo pensiero greco (si pensi al *Chaos* di Esiodo, l'*apeiron* di Anassimandro, l'*essere* di Parmenide, la *chora* di Platone,...) e con alcune antiche filosofie orientali (Taoismo, Induismo, Buddhismo,...).

Il secondo scopo è far capire che questa visione della fisica di oggi, per quanto certamente diversa da quella del vecchio etere di fine Ottocento, è dunque differente da quell'idea di 'spazio vuoto' (*leeren raum* nell'originale tedesco, *empty space* nelle traduzioni inglesi) che Einstein aveva in mente nel 1905. La condensazione dei quanti elementari della teoria è un processo macroscopico che introduce implicitamente un certo sistema di riferimento Σ , quello nel quale viene a determinarsi globalmente un momento spaziale uguale a *zero*. Questo sistema caratterizza la versione *fisicamente realizzata* di relatività e potrebbe essere in qualche modo 'privilegiato'. Cioè, lo stato fisico del vuoto condensato, per un osservatore in quiete in Σ , potrebbe non essere *esattamente* identico a quello visto da ogni altro osservatore, per esempio da un osservatore posto nel laboratorio terrestre.

Ora, nella teoria quantistica, questa esatta identità ha un ruolo cruciale e rappresenta la base fisica indispensabile per il Principio di Relatività di Einstein, ovvero per la completa equivalenza di tutti i sistemi in moto traslatorio uniforme. Come vedremo, però, questa identità dipende da una quantità poco capita, l'energia del vuoto, che dovrebbe anch'essa avere valore *zero*. Senza motivazioni teoriche valide, quindi, questa particolare quantità potrebbe fare eccezione a quella richiesta di assoluta neutralità rendendo il vuoto, o meglio il moto rispetto ad esso, in qualche modo osservabile. Per la sua importanza, questo aspetto andrebbe dunque attentamente verificato con test eseguiti in molteplici condizioni sperimentali.

Proprio partendo da questo, abbiamo rianalizzato [2, 3, 4], gli esperimenti classici di 'ether-drift', quelli nei quali si cercava con precise misure di ottica di osservare un moto di deriva ('drift') della Terra nell'etere e che sono stati fondamentali per la nascita della relatività. Il motivo di questo nostro interesse sta nel fatto che

alcuni grandi esperti [5, 6], nel tempo, avevano posto l'accento su alcuni minuscoli effetti irregolari non compresi. Secondo loro, questi effetti, pur essendo molto più piccoli del valore aspettato nella fisica classica, non avrebbero dovuto essere ignorati. Tuttavia, per il grande successo tributato alla teoria di Einstein, nella quale non esiste riferimento privilegiato, sono stati sempre interpretati come meri artefatti strumentali e quindi considerati superati dal progredire della moderna tecnologia. Oggi, invece, tenendo conto della possibile non-invarianza dello stato di vuoto, si capisce che la differenza con gli esperimenti moderni potrebbe non dipendere dal progresso tecnologico ma, piuttosto, dal fatto che questi ultimi sono eseguiti in *condizioni fisiche diverse*. In condizioni tali, cioè, per cui ogni possibile effetto dovuto al moto dell'osservatore diventa invisibile. Proprio per questo, i piccoli residui riscontrati nei vecchi esperimenti sono cruciali.

Ora, come faremo vedere, quando rianalizzati in una prospettiva moderna, questi effetti residui diventano altrettante indicazioni per quella velocità della Terra di 370 km/s che *oggi* si ottiene dalle osservazioni del fondo di radiazione cosmica o *Cosmic Microwave Background* (CMB), per cui Mather [7] e Smoot [8] hanno avuto il Premio Nobel nel 2006. Questo accordo sorprendente, tra osservazioni astronomiche da un lato e misure eseguite dentro un laboratorio dall'altro, richiederebbe ulteriori test con una nuova generazione di apparati dedicati a ricreare, con la tecnologia di oggi, le condizioni di quei primi esperimenti. Una conferma definitiva favorirebbe un'interpretazione della relatività più simile a quella proposta da Lorentz nella quale il CMB verrebbe a giocare il ruolo di sistema privilegiato. Tuttavia, le implicazioni ultime trascendono il mero ambito della fisica poiché, come discuteremo in seguito, riuscire a rivelare in laboratorio un 'ether-wind' (vento d'etere) finirebbe con il modificare sostanzialmente il nostro modo di concepire la realtà.

Trattandosi di un saggio semidivulgativo, nella nostra esposizione abbiamo cercato di mettere in evidenza nei capitoli 2 e 3, gli aspetti più intuitivi di questa problematica. L'unica parte realmente tecnica è quella del capitolo 7 e delle sue appendici. Essa è destinata a chi voglia approfondire i dettagli degli esperimenti di ether-drift, anche da un punto di vista matematico. Allo stesso tempo, i capitoli 4, 5 e 6, di carattere storico-filosofico, danno alla trattazione una prospettiva più ampia e possono risultare di interesse anche per lettori di formazione prettamente umanistica. Infine, il capitolo 8 contiene una discussione generale sulle prospettive future e le conclusioni.

References

- [1] L. Bonolis e M. G. Melchionni, *Fisici italiani del tempo presente*, Marsilio Editore, Venezia 2003.
- [2] M. Consoli, C. Matheson and A. Pluchino, *Eur. Phys. J. Plus* **128** (2013) 71.
- [3] M. Consoli and A. Pluchino, *The classical ether-drift experiments: an enigma for physics and history of science*, Relazione su invito al Convegno della Società Italiana di Storia della Fisica e dell'Astronomia (SISFA), Proceedings SISFA 2014.
- [4] M. Consoli, *Found. of Physics*, **45** (2015) 22.
- [5] W. M. Hicks, *Phil. Mag.* **3** (1902) 9.
- [6] D. C. Miller, *Rev. Mod. Phys.* **5** (1933) 203.
- [7] J. C. Mather, *Rev. Mod. Phys.* **79** (2007) 1331.
- [8] G. F. Smoot, *Rev. Mod. Phys.* **79** (2007) 1349.

2. Il vuoto nella fisica di oggi

Per parlare del vuoto, cominciamo pensando ad una cosa molto semplice, una scatola ritrovata in soffitta. Essa contiene molti oggetti di natura diversa che vi avevamo riposto negli anni, vecchie chiavi, monete, fotografie ... Selezionando i vari oggetti secondo il loro tipo, possiamo progressivamente eliminare prima tutte le chiavi, poi tutte le monete, le fotografie e così via. Ad ogni passo la scatola si svuota completamente di qualcosa ma rimane ancora piena di qualcos'altro. Solo alla fine, una volta tirati fuori tutti gli oggetti, si può dire che la scatola è veramente vuota. Ma è proprio così? Certamente la scatola è adesso vuota di tutti gli oggetti che noi vi avevamo inserito. Ma, per esempio, contiene ancora un grandissimo numero di molecole di aria, dunque non si può certo dire che essa sia vuota in assoluto. Ora, questo non sembra un problema irrisolvibile. Se la scatola fosse ermetica ed avesse pareti molto robuste, potremmo collegarla ad una pompa da vuoto e tentare, in linea di principio, di aspirare tutta l'aria al suo interno. Potremmo allora dire che la scatola, adesso, è 'veramente' vuota? La risposta è ancora negativa. Infatti essa sarebbe sempre attraversata da radiazione elettromagnetica di origine terrestre e vari tipi di raggi cosmici. Si dovrebbe dunque cercare di schermarla in modo opportuno. Eppure, anche avendo preso tutte le misure del caso, non potremmo concludere che la scatola, adesso, è 'veramente' vuota. Una risposta definitiva richiederebbe, infatti, una conoscenza completa dei costituenti ultimi della materia e delle loro interazioni con le pareti della scatola. In questo senso, si può solo concludere con Maxwell che «Il vuoto è ciò che rimane in un recipiente dopo che tutto quello che si può rimuovere è stato rimosso», intendendo così che la nozione di vuoto ammette solo definizioni relative, cioè compatibili con le conoscenze e le tecnologie al momento disponibili.

2.1 Il vuoto ed il campo di Higgs

Fatta questa premessa, cerchiamo di capire il punto di vista di oggi. A questo scopo, partiamo dalla recente scoperta del 'Bosone di Higgs' al CERN di Ginevra. Si tratta di quella particella priva di spin (che dunque segue la statistica di Bose) necessariamente associata ad un valore non nullo del cosiddetto 'campo di Higgs'. L'idea di questo campo di forze fondamentale fu introdotta per la prima volta nel 1964 da Brout, Englert ed Higgs [1, 2], che per questo hanno ricevuto il premio Nobel 2013 per la fisica. Essi, per primi, avevano notato come un suo valore medio $\phi \neq 0$ nel vuoto poteva essere utilizzato per generare le masse di tutte le particelle che interagiscono direttamente con il campo di Higgs. Usando questo meccanismo universale (detto 'meccanismo di Higgs'), si potevano così risolvere alcuni problemi di consistenza della teoria delle interazioni deboli. Successivamente, questa idea originaria è stata perfezionata ed oggi forma la base di quello che viene chiamato 'Modello Standard' delle particelle elementari.

Ora, questo valor medio non nullo si spiega se il valore minimo dell'energia si ottiene

per $\phi \neq 0$ invece che per $\phi = 0$. Secondo l'interpretazione usuale, questo fenomeno si sarebbe cominciato a manifestare in uno stadio primordiale dell'universo, quando la temperatura scese al di sotto di una certa soglia critica T_c determinando così un cambiamento dello stato di vuoto, vedi figura 1.

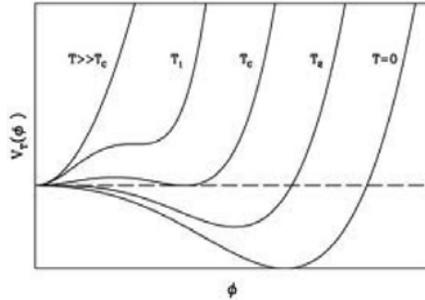


Figure 1: *Variation dell'energia in funzione del valor medio del campo per diversi valori della temperatura. La situazione di oggi dovrebbe corrispondere ad una temperatura appena superiore allo zero assoluto. La figura è presa dalla ref.[3].*

Tuttavia, giustificare completamente questa origine del campo di Higgs, inserendola in uno scenario cosmologico consistente, richiederebbe prima di riconciliare fisica delle particelle elementari e gravità. A questa sintesi si fa anche risalire la possibilità di dar conto di quelle forme 'oscure' di materia ed energia che oggi è necessario introdurre per spiegare osservazioni cosmologiche altrimenti incomprensibili. Allo stato attuale, per quello che riguarda l'origine del campo di Higgs, si potrebbe allora semplicemente assumere, come dato di fatto 'atemporale', che l'energia risulta minimizzata per $\phi \neq 0$ rinviandone ad una teoria futura l'inserimento in uno scenario di evoluzione cosmologica. Detto questo, vediamo allora cosa si intende con il termine 'vuoto' al livello della fisica fondamentale.

In una teoria quantistica e relativistica, ogni specie di materia ed energia viene descritta da unità discrete in forma di particelle elementari. Esse rappresentano i quanti associati ai possibili campi di forze che si trovano diffusi nello spazio; si pensi, per esempio, ai fotoni che sono i quanti del campo elettromagnetico. Quindi, possiamo introdurre dei numeri interi \mathbf{n}_i per indicare il numero di quanti di un certo tipo i (per esempio fotoni, elettroni, neutrini ...) che, in media, sono presenti in un certo stato. In questa rappresentazione, un primo concetto naturale di vuoto corrisponde alla nozione intuitiva di uno stato 'privo di tutto', cioè in cui tutti i numeri \mathbf{n}_i sono zero. In quasi tutti gli articoli scientifici scritti in inglese, un tale stato viene chiamato con il termine latino *vacuum* che, appunto, significa vuoto.

Un secondo concetto corrisponde invece allo stato per cui l'energia assume il suo valore minimo. Come anticipato nell'Introduzione, questo viene chiamato di solito

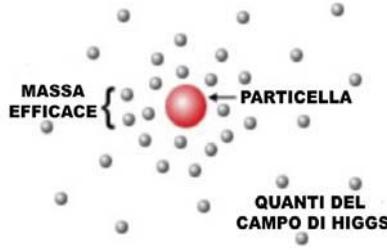


Figure 2: Una raffigurazione pittorica del meccanismo di Higgs. La figura è presa dalla ref.[5].

‘stato fondamentale’ (in inglese *ground state*). Eppure, in fisica delle particelle, viene anch’esso spesso chiamato *vacuum*. Perché? Il motivo è che la condizione di energia minima, per un sistema isolato, corrisponde a quello che potremmo definire uno stato di ‘quiete assoluta’, uno stato che si caratterizza, cioè, per la totale assenza di qualunque forma di disturbo o di eccitazioni (si pensi ad un mare completamente piatto e privo di onde). Poiché, come già detto, le possibili energie di eccitazione sono associate a particolari stati discreti ed hanno lo status di particelle, lo stato di minima energia potrebbe anch’esso essere chiamato ‘vuoto’, vuoto appunto di ogni particella che rappresenti una forma di eccitazione.

La peculiarità della visione attuale è che, a differenza di altri tipi di particelle (fotoni, elettroni, neutrini ...), i quanti associati al campo di Higgs non rappresentano una forma di eccitazione. Invece, lo stato di minima energia si ottiene quando essi riempiono uniformemente lo spazio formando un condensato, il ‘condensato di Higgs’. Il modo più chiaro per esprimere questo concetto è dire che [4] «quello che noi vediamo come spazio vuoto non è altro che la configurazione del campo di Higgs di energia minima. Se traduciamo dal linguaggio del campo a quello delle particelle, questo significa che quello che vediamo come spazio vuoto è in realtà riempito di particelle del campo di Higgs che sono condensate» (G.’t Hooft, premio Nobel 1999 per la fisica). E’ proprio questo fenomeno di condensazione che si pensa essere all’origine della massa, vedi figura 2.

Infine, il collegamento tra le due descrizioni (quella in termini del campo e quella in termini delle particelle) viene illustrato mediante la seguente serie di passaggi. Consideriamo il valor medio ϕ del campo di Higgs ed assumiamo che l’energia assuma il suo minimo assoluto per un certo valore $\phi \neq 0$. La traduzione dal linguaggio del campo a quello delle particelle si ottiene introducendo prima $n_{\mathbf{k}}$, il numero medio di quanti con un certo momento spaziale \mathbf{k} . Poiché, in un certo sistema di riferimento Σ , il fenomeno della condensazione può essere ben approssimato come avvenire tutto nel modo di momento nullo $\mathbf{k} = 0$, per la loro densità media

ρ_Σ in un certo volume Ω_Σ si trova $\rho_\Sigma \sim \frac{n_0}{\Omega_\Sigma}$. Da questo, in virtù della relazione $\rho_\Sigma = \rho(\phi^2) \sim \text{cost. } \phi^2$ [6], possiamo dedurre che un minimo dell'energia per $\phi \neq 0$ equivale ad un condensato di particelle.

Ma, come può uno stato che contiene un condensato di particelle avere un'energia minore di quello che ne è totalmente privo? A questo scopo, consideriamo i quanti elementari del campo di Higgs. Essi hanno spin zero e carica zero ed, in una rappresentazione intuitiva, potrebbero essere paragonati a delle 'sferette rigide', cioè impenetrabili, un po' come nella visione degli antichi atomisti. A causa della loro natura quantistica, la loro interazione è repulsiva quando sono molto vicine ma diventa attrattiva quando si allontanano [6]. Quindi, l'energia potenziale di attrazione tra le sferette, che è negativa, potrebbe dominare sulla repulsione e sul termine di massa a riposo dando così luogo al fenomeno della condensazione. In questo caso, le sferette verrebbero a generarsi spontaneamente finendo con il riempire tutto lo spazio sino a raggiungere il valore di densità per cui l'energia è minima.

In tale descrizione viene naturale domandarsi quanto fitto sia il riempimento dello spazio da parte delle sferette. In altre parole, quante sferette ci dovrebbero essere in un dato volume Ω ? Per capire questo aspetto, ricordiamo che il processo di condensazione delle sferette serve, alla fine, a spiegare l'origine della massa di tutte le particelle elementari che interagiscono direttamente con il campo di Higgs. Così, lo spazio deve essere riempito dalle sferette in modo estremamente uniforme. In caso contrario, le particelle elementari, per esempio gli elettroni, non avrebbero sempre la stessa massa al variare del posto e la natura non mostrerebbe quel carattere stabile che conosciamo. In termini quantitativi questo implica, quindi, che la distanza media d tra le sferette deve essere molto minore delle dimensioni degli atomi (circa 10^{-8} cm) o anche di quella dei nuclei (circa 10^{-13} cm). Dunque, il condensato di Higgs risulta estremamente denso se pensassimo di contare quante sferette sono contenute in un volume atomico $\Omega \sim 10^{-24}$ cm³ o in quello nucleare $\Omega \sim 10^{-39}$ cm³. In questo senso, il mondo fisico andrebbe, considerato sostanzialmente 'pieno', pieno appunto di sferette.

Tuttavia c'è una sottigliezza poiché la distanza media d tra le sferette risulta, alla fine, essere enormemente maggiore [6] della loro dimensione tipica a (quella che in fisica quantistica viene detta la loro 'lunghezza di collisione'). Quindi, paradossalmente, se potessimo essere rimpiccioliti fino ad assumere la dimensione a il mondo ci apparirebbe sostanzialmente 'vuoto'. Per apprezzare pienamente questo aspetto, si pensi al limite (che non può essere visualizzato) in cui la distanza media tra le sferette nella figura 2 fosse circa centomila volte maggiore del loro raggio. Si noti come questa situazione sia tipica di molte forme di organizzazione gerarchica della materia che, a prima vista, ci sembrano dense, quando viste globalmente da lontano, ma risultano poi molto diluite quando cominciamo ad esplorarne l'interno. Questo vale per una galassia, dove la distanza tra le stelle che la compongono

è enormemente maggiore delle loro dimensioni, ma si estende anche agli atomi dove, appunto, la dimensione del nucleo è estremamente più piccola di quelle orbite elettroniche che fissano la scala atomica e fissano anche la distanza media tra gli atomi nella materia condensata. Questo stesso fenomeno si verifica nel condensato di Higgs.

Rimandando alla ref.[6] per maggiori dettagli, qui vorremmo solo sottolineare due aspetti di carattere generale. Da un lato, la condensazione del campo di Higgs potrebbe essere considerata la risposta della fisica moderna alla vecchia domanda: «Perché c'è qualcosa piuttosto che il nulla?». Dall'altro, nell'ambito di questo modello, diventa naturale rappresentare quello che ci appare come spazio vuoto come un tipo di 'mezzo' sottostante, un substrato elusivo che, in condizioni ordinarie, si manifesta solo in modo indiretto, per il fatto cioè di produrre quella proprietà della materia che chiamiamo massa.

Altrimenti, per potere osservare direttamente il condensato si deve eccitarlo utilizzando le enormi energie del gigantesco 'Large Hadron Collider' (LHC) del CERN. Si arriva così a capire cosa sia il Bosone di Higgs. Esso rappresenta l'eccitazione quantizzata di questo condensato (*non* i quanti condensati) e può essere intuitivamente paragonato ad uno di quei fenomeni, come onde di compressione, fenomeni vorticosi, dislocazioni elastiche..., che si verificano nella materia condensata quando viene perturbata dal suo stato di equilibrio. In particolare, facendo dei calcoli [7], si vede che una specie di vortice, come quelli che si propagano nei liquidi, potrebbe essere una discreta approssimazione.

2.2 Il vuoto e l'etere

Come si sa, l'idea che quello che ci appare come spazio vuoto sia permeato da un substrato fondamentale non è certo nuova. A questo tipo di spazio strutturato fu dato storicamente il nome di 'etere'. Questa entità, rappresentata in molteplici forme in epoche diverse, ha influenzato tutto il pensiero filosofico e scientifico moderno da Cartesio in poi. L'origine ultima del termine risale però ad un passato molto più remoto ed affonda le sue radici nell'antico pensiero greco. Nel 'De Caelo' di Aristotele, l'etere viene introdotto come quella sostanza di cui sono fatti i cieli. Esso si trova in un perenne stato di moto circolare e si caratterizza per la sua incorruttibilità, non essendo soggetto ad invecchiamento, alterazioni o altre affezioni che caratterizzano la materia ordinaria. Per questo motivo, Aristotele lo chiama 'corpo primo' e fa risalire l'origine del termine ad un passato ancora più antico: «Considerando il corpo primo come un'altra sostanza oltre a terra, fuoco, aria e acqua, gli antichi chiamarono il luogo eccelso etere (*aither*) e gli diedero questo nome perché esso scorre sempre nell'eternità del tempo» (da *aei*=sempre e *thein*=scorrere).

Il ruolo dell'etere era fondamentale nella fisica dell'Ottocento, dove veniva identifi-

cato come mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche ed era il fondamento di una vera e propria teoria, detta appunto ‘teoria dell’etere’. I problemi nacquero, alla fine dell’Ottocento, con una serie di esperimenti, i cosiddetti esperimenti di ‘ether-drift’, quelli cui abbiamo già accennato nell’Introduzione. Infatti, secondo la fisica galileiana, l’etere avrebbe dovuto rappresentare un sistema di riferimento assoluto rispetto al quale mettere in evidenza il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole. Invece, nessuno di tali esperimenti sembrava in grado di rivelare questo moto mettendo in crisi i fondamenti della fisica di allora: le trasformazioni di Galileo e/o la stessa esistenza dell’etere. Allo stesso tempo, però, questi esperimenti stimolarono le prime formulazioni di nuovi effetti relativistici, la dilatazione dei tempi e la contrazione delle lunghezze, da parte di studiosi come Larmor, Fitzgerald, Lorentz e Poincaré [8]-[10]. Essi continuavano a vedere nell’etere l’elemento di base per comprendere i fenomeni elettromagnetici e arrivarono a scoprire le trasformazioni di simmetria di Lorentz cercando di spiegare come mai il moto rispetto ad esso risultasse apparentemente inosservabile.

Tale punto di vista ‘Lorentziano’, che potremmo considerare un ulteriore esempio del famoso detto di Eraclito «la natura ama nascondersi», dopo il 1905, finì col risultare minoritario. La teoria della relatività speciale di Einstein [11], infatti, proponeva una visione radicalmente nuova che non richiedeva più l’ipotesi dell’etere. Al contrario, partendo dall’idea di uno spazio assolutamente vuoto, derivava gli stessi effetti relativistici postulando l’equivalenza di tutti i riferimenti in moto traslatorio uniforme (Principio di Relatività). Di conseguenza, anche per motivi che vedremo più avanti avere ben poco a che fare con la fisica, per una larga parte del Novecento, l’etere sembrò finire nel dimenticatoio. L’unica eccezione degna di nota è un lavoro di Dirac del 1951 [12], nel quale egli sosteneva che «...alla luce delle nostre conoscenze di oggi ci sono buone ragioni per postulare un etere», che comunque non ebbe grande seguito.

Oggi, invece, l’idea dell’etere ricompare, sotto altre specie, tramite la nozione di un condensato che pervade uniformemente lo spazio e fa da sfondo ai processi fisici osservabili. Peraltro, come ricordato nell’Introduzione, il campo di Higgs non è l’unica forma di etere che viene introdotta. Infatti, a parte l’origine della massa, altre proprietà fondamentali, come per esempio la non-osservabilità di quarks isolati, vengono anche ricondotte a fenomeni di condensazione del vuoto. In questo caso, la condensazione coinvolge altre particelle, i ‘gluoni’ e gli stessi quarks, che sono i componenti elementari delle particelle ad interazione forte (come i protoni ed i neutroni). Questi processi sono più complessi di quelli dei quanti del campo di Higgs (che hanno spin e carica zero). Tuttavia, globalmente, nella condensazione si produce uno stato dalle caratteristiche simili. Infatti, l’energia risulta minima quando questi altri quanti popolano il vuoto in combinazioni tali da azzerare reciprocamente le loro proprietà individuali (momento spaziale, spin, carica,...). In questa rappresentazione, il vuoto diventa così un tutto indistinto, un serbatoio inesauribile da cui ogni cosa può scaturire, a patto di trasferirgli

sufficiente energia.

Alla luce di questo, si potrebbe allora concludere [13] che «con i progressi del XX secolo, il ruolo dell'etere nella fisica fondamentale è solo aumentato. Al presente, opportunamente rinominato e sottilmente qualificato, esso domina le leggi della fisica» (F. Wilczek, premio Nobel 2004 per la fisica). Il termine 'etere' ed il termine 'vuoto' possono dunque essere usati come sinonimi per indicare quello che ci appare come spazio vuoto ma che, in realtà, sappiamo essere lo stato di minima energia. Questo è quello fisicamente realizzato e, come tale, dotato dei requisiti necessari perché in esso si possano propagare le particelle e le loro interazioni.

2.3 Il vuoto come una forma di fluido turbolento

Al di là dei possibili dettagli tecnici di questi fondamentali fenomeni di condensazione, ci si potrebbe allora domandare: esiste qualche aspetto di questa moderna visione del vuoto che potrebbe avere un interesse culturale più generale, cioè anche per non addetti ai lavori? In altre parole, è possibile pensare lo spazio che ci sembra vuoto (ma vuoto non è) in modo intuitivo e, se sì, paragonandolo a che cosa?

Vorremmo premettere che ogni paragone non esaurisce certo le possibili analogie che si potrebbero stabilire tra il vuoto e sistemi fisici conosciuti. Anzi, non esiste un unico sistema fisico, per quanto complesso e sofisticato, che possa riassumere in sé tutti i possibili aspetti del vuoto. Come abbiamo ricordato nell'Introduzione, questo deriva innanzitutto dalla sua natura di mezzo nel quale si azzerano tutti i possibili contrari. Ma si può anche dedurre guardando alle molteplici rappresentazioni dell'etere nella storia del pensiero scientifico [14, 15]. In certi casi veniva raffigurato come un gas, in certi altri come un liquido, in altri ancora sembrava comportarsi come un mezzo solido. In questo senso, il vuoto, pensato come etereo mezzo fisico, oltre che inesauribile è anche multiforme, ineffabile.

Questa pluralità di rappresentazioni non deve troppo sorprendere. Per esempio, come abbiamo ricordato, uno stesso sistema può apparire molto denso quando guardato globalmente da lontano ed estremamente diluito quando esplorato al suo interno. Allo stesso tempo, un liquido, quando viene osservato su una scala non troppo piccola, sulla quale non riusciamo a risolvere il moto delle singole particelle che lo compongono, può anche apparirci come un solido (si pensi ad un getto d'acqua ad altissima pressione). In queste condizioni, i vortici formati dalle particelle del fluido sarebbero visti come strutture solide (come delle 'molle') e l'energia *cinetica* immagazzinata nel moto vorticoso diventerebbe una specie di energia *potenziale* rendendo il fluido simile ad un mezzo elastico. Nell'Ottocento, questa analogia risultava particolarmente utile per rendere il fluido capace di trasmettere onde trasversali, come quelle elettromagnetiche (per cui cioè l'oscillazione del mezzo dovrebbe essere perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda), e portò al modello dell'etere come fluido turbolento [14]. Questa vecchia rappresentazione

ha alcuni aspetti interessanti che meritano di essere discussi. Inoltre, nel contesto degli esperimenti di ether-drift, fornisce, in modo naturale, un modello alternativo per l'interpretazione dei dati sperimentali.

Per cominciare, ricordiamo che l'idea dello spazio apparentemente vuoto come un fluido si ritrova, per esempio, anche in Hermann Weyl [16]: «Lo spazio della vecchia geometria euclidea è paragonabile ad un cristallo, che è costituito da atomi uguali ed immutabili, disposti regolarmente ed invariabilmente nei punti di un reticolo; lo spazio della nuova geometria di Riemann-Einstein è invece paragonabile ad un liquido, composto dei medesimi atomi uguali ed immutabili, ma in posizioni ed orientazioni mobili dipendendo dalle forze agenti».

La stessa idea è stata anche riscoperta più recentemente in connessione con uno dei problemi associati a quella difficile sintesi tra fisica delle particelle elementari e gravità che abbiamo ricordato. Questo problema, detto della 'costante cosmologica', riguarda una caratteristica fondamentale del vuoto, la sua energia, e si può spiegare così. Secondo la teoria della relatività generale di Einstein, ogni forma di energia dovrebbe produrre effetti di curvatura dello spazio. Invece, considerando i valori tipici di energia del vuoto che si trovano nella fisica delle particelle elementari, gli ipotetici effetti teorici aspettati risultano essere enormemente maggiori di quelli sperimentalmente osservati. In altre parole, l'energia del vuoto sembra *non* curvare lo spazio o curvarlo in modo debolissimo rispetto a quello che ci si aspetterebbe dal suo valore se confrontato con le altre forme di massa e/o energia.

Su questa base, alcuni sono stati indotti a seguire il suggerimento di Feynman (premio Nobel 1965 per la fisica) secondo cui, nel costruire una teoria quantistica consistente, «la prima cosa da capire è come formulare la gravità in modo che essa non interagisca con l'energia del vuoto» [17]. A tale scopo si possono immaginare diverse soluzioni. Una delle più semplici consiste, appunto, nel paragonare il vuoto ad un liquido [18] che, nel suo ideale stato di equilibrio, dove la sua energia è minima, si 'auto-sostiene' poiché, in ogni suo punto, tutte le forze si cancellano identicamente. In questo modo, ricordando le parole di Weyl, nello stato di equilibrio non ci potrebbero essere effetti di curvatura. Tale analogia porterebbe, in modo naturale, a considerare gli effetti di curvatura come deviazioni del vuoto dal suo stato di equilibrio, ovvero come un fenomeno emergente [19, 20]. La curvatura, infatti, non esisterebbe al livello microscopico più fondamentale ma, appunto, emergerebbe su distanze maggiori a causa di disomogeneità, un po' come avviene con la curvatura dei raggi luminosi che si osserva nello spazio euclideo all'interno di un mezzo a densità variabile. Nella rappresentazione del vuoto, questo regime di distanze corrisponderebbe al suo limite idrodinamico, associato cioè a scale di lunghezza molto maggiori delle dimensioni dei suoi costituenti elementari.

Naturalmente, per potere riprodurre il vuoto, un tale liquido non solo dovrebbe essere assolutamente neutro ma non dovrebbe neppure opporre resistenza al moto dei

corpi, dovrebbe cioè corrispondere al caso ‘ideale’ di viscosità zero. Un fluido ideale incomprimibile, infatti, nel quale la velocità fosse anche derivabile da una funzione potenziale (il cosiddetto flusso ‘irrotazionale’ senza vorticità), non opporrebbe alcuna resistenza a corpi in moto a velocità costante. Invece in un fluido reale, se si prende il limite nel quale la viscosità tende a zero, il problema diventa più complesso poiché la velocità del fluido acquista un carattere irregolare.

Questa particolarità del limite di viscosità zero viene raccontata, per esempio, nelle lezioni di Feynman [21] dove l’equazione che governa la velocità \mathbf{v} di un fluido reale (equazione di Navier-Stokes) viene riscritta in forma adimensionata in termini della vorticità $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$. In questo caso, si ottiene

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \nabla \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = \frac{1}{\mathcal{R}} \Delta \boldsymbol{\omega} \quad (1)$$

dove \mathcal{R} è il numero di Reynolds. Ora il limite per viscosità che tende a zero equivale ad un numero di Reynolds $\mathcal{R} \rightarrow \infty$, quindi ci si aspetterebbe di poter semplicemente trascurare il termine in $\frac{1}{\mathcal{R}}$ e riottenere così l’equazione di Eulero. Invece, c’è una sottigliezza. Nel termine viscoso, $\frac{1}{\mathcal{R}}$ moltiplica $\Delta \boldsymbol{\omega}$ che contiene le derivate seconde. Questo è il termine con le derivate di ordine più alto. Quindi, sebbene $\frac{1}{\mathcal{R}}$ diventi sempre più piccolo, ci possono essere soluzioni con rapide variazioni di $\boldsymbol{\omega}$ che producono valori molto grandi di $\Delta \boldsymbol{\omega}$ e compensano il piccolo valore del coefficiente. Si spiega così perché il comportamento dei fluidi reali non si riduca banalmente al caso ideale nel limite di viscosità zero.

Tuttavia, un flusso irrotazionale, in un fluido incomprimibile, si mantiene tale *quasi ovunque*, cioè con l’eccezione di piccole regioni intorno ai corpi dove si formano complesse strutture vorticosi (si veda per es. [22]). Questo semplice modello si può allora confrontare con gli esperimenti di ether-drift. Infatti, pur non potendo descrivere con precisione il moto del fluido, si possono utilizzare metodi statistici assumendo fluttuazioni casuali attorno ai parametri che descrivono il moto del corpo nella sua globalità. Ne segue che, in questo modello, eventuali effetti legati al moto dell’osservatore non avrebbero quel carattere regolare che ci si è sempre aspettato e ci potrebbero essere modifiche sostanziali nell’interpretazione dei dati sperimentali. Questa visione del vuoto come una forma di etere turbolento non ha dunque solo interesse speculativo ma potrebbe essere cruciale per la nostra comprensione della relatività. Nel capitolo successivo, ne spiegheremo il perché.

References

- [1] R. Brout and F. Englert, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321.
- [2] P. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 508.
- [3] A. Gangui, *Topological Defects in Cosmology*, arXiv:astro-ph/0110285.
- [4] G. 't Hooft, *Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge Univ. Press, 1997.
- [5] Il sito web si trova all'indirizzo:
<http://boldimagination.hubpages.com/hub/The-Higgs-Boson-And-The-Real-Possibility-Of-Living-On-Other-Worlds-Within-A-Lifetime>
- [6] M. Consoli and P. M. Stevenson, Int. J. Mod. Phys. A **15** (2000) 133.
- [7] M. Consoli and E. Costanzo, Eur. Phys. J. C33 (2004) 297.
- [8] J. Larmor, *Aether and Matter*, Cambridge University Press, 1900.
- [9] H. A. Lorentz, Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam, 6, 1904;
 H. A. Lorentz, *The Theory of Electrons*, Leipzig 1909, B. G. Teubner Ed.
- [10] H. Poincaré, *La Science et l'Hypothese*, Flammarion, Paris 1902; Comptes Rendue Acad. Sci. Paris **140** (1905) 1504.
- [11] A. Einstein, Annalen der Physik, **17** (1905) 891.
- [12] P. A. M. Dirac, Nature **168** (1951) 906.
- [13] F. Wilczek, *The persistence of the Ether*, Physics Today, Gennaio 1999, p.11.
- [14] E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Dover Publications, Inc. New York 1989.
- [15] *Conceptions of ether*, Edited by G. N. Cantor and M. J. S. Hodge, Cambridge University Press 1981.
- [16] H. Weyl, *Analisi Matematica del Problema dello Spazio*, Traduzione italiana e note a cura di A. Loinger, Zanichelli, Bologna 1990.
- [17] R. P. Feynman, in *Superstrings: A Theory of Everything?*, P. C. W. Davies and J. Brown Eds., Cambridge University Press, 1997, pag. 201.
- [18] G. E. Volovik, Phys. Rep. **351** (2001) 195.
- [19] C. Barcelo, S. Liberati and M. Visser, Class. Quantum Grav. **18** (2001) 3595.
- [20] M. Consoli, Class. Quantum Grav. **26** (2009) 225008.

- [21] R. P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, Publ. Co. 1963, Vol.II, Chapt.41.
- [22] A. Sommerfeld, *Mechanics of Deformable Bodies*, Academic Press New York and London, 1964. Si veda la sezione VI.33.

3. L'idea dell'ether-drift e le sue implicazioni

Come abbiamo ricordato nel Cap.2, nella prima forma di relatività, le trasformazioni di Lorentz, che descrivono gli effetti del moto di un osservatore, furono derivate cercando di spiegare come mai gli esperimenti di ether-drift non dessero il risultato aspettato nella fisica classica. In questa prima interpretazione 'Lorentziana', gli effetti relativistici, piuttosto che essere dovuti al moto *relativo* di una qualunque coppia di osservatori, come sostenuto da Einstein più tardi, venivano visti come conseguenza del loro moto *individuale* rispetto ad un sistema assoluto (o 'privilegiato') identificato con l'etere. Allo stesso tempo, per le notevoli proprietà formali delle trasformazioni di Lorentz (in matematica si dice che esse formano un *gruppo*), le due interpretazioni risultano del tutto equivalenti rispetto a tutti gli altri esperimenti. Dunque, l'origine fisica degli effetti relativistici sembrerebbe porci di fronte ad una 'doppia verità' destinata a permanere per sempre.

Ora, data l'importanza del problema, questa situazione non è soddisfacente per almeno due motivi. Innanzitutto, da un punto di vista puramente logico, non riuscire a rivelare il nostro moto rispetto ad una qualche forma di etere non equivale certo a negarne l'esistenza. Poi, ci si potrebbe domandare quanto il Principio di Relatività, che esclude ogni possibile modo di rivelare l'ether-drift, abbia lo status di principio fisico senza eccezioni. I dati sperimentali escludono certamente la previsione classica. Ma, tenuto conto che ogni misurazione fisica è affetta da errori sperimentali, fino a che punto possiamo essere sicuri che gli effetti osservabili di un ether-drift siano *esattamente zero*?

Qui, la situazione diventa più tecnica ma, secondo noi, anche più interessante. Infatti rivelare una qualunque forma di ether-drift falsificherebbe la visione di Einstein. Però non è vero il viceversa. Cioè, l'interpretazione Lorentziana non risulterebbe falsificata dal *non* riuscire a rivelarlo. Anzi, come ricordato, i due fenomeni relativistici fondamentali, la contrazione delle lunghezze di Fitzgerald-Lorentz e la dilatazione dei tempi di Larmor, erano stati scoperti proprio tentando di rendere inosservabile il moto rispetto all'etere. Tuttavia, potrebbero esserci dei piccoli residui cui non si è fatta attenzione. Questo, dopo tutto, sembra essere il vero pensiero di Lorentz che rimase sempre convinto che il Principio di Relatività, proposto da Einstein, ma prima ancora da Poincaré, contenesse un qualcosa di arbitrario: «Non posso non considerare l'etere come dotato di un certo grado di sostanzialità, per quanto diverso possa essere dalla materia ordinaria. Per questo, sembra naturale non assumere come punto di partenza che non possa mai fare alcuna differenza se un corpo si muove rispetto all'etere o no»[1]. Tale punto di vista, dello studioso che forse più di tutti è andato a fondo nella comprensione dei fenomeni elettromagnetici, ci fa capire quanto la questione possa diventare sottile e quanto sia importante considerare gli esperimenti di ether-drift più da vicino. L'analisi più dettagliata sarà riportata nel Capitolo 7. Qui riassumeremo solo gli aspetti principali.

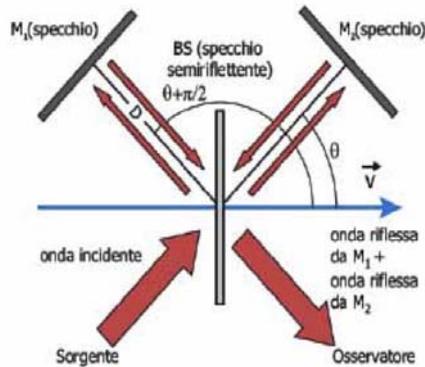


Figure 3: Il tipico schema dell'interferometro di Michelson.

3.1 L'idea di rivelare l' ether-drift

L'apparato che si usava in origine era l'interferometro di Michelson con il quale si studiava la figura di interferenza tra due raggi luminosi perpendicolari (vedi figura 3). Tale figura di interferenza dipende dai tempi che la luce impiega a percorrere i due diversi cammini ottici e si dovrebbe spostare, ruotando tutto l'apparato, se la luce si propagasse con velocità leggermente diverse nelle varie direzioni a causa di un ether-drift.

Definendo $\chi = \chi(\theta)$ l'anisotropia della luce, cioè la funzione che descrive la differenza relativa di velocità, al variare dell'angolo θ rispetto alla direzione del moto, ed introducendo la lunghezza d'onda λ della luce utilizzata, gli spostamenti della figura di interferenza $\Delta\lambda(\theta)$ sarebbero dati dalla relazione

$$\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} = \chi(\theta) \frac{D}{\lambda} \quad (2)$$

dove D è il cammino ottico. Poiché $\chi(\theta)$ dovrebbe dipendere dalla velocità v della Terra, uno spostamento delle frange di interferenza si tradurrebbe alla fine in un valore di v .

Il precursore di questi esperimenti fu quello realizzato da Michelson e Morley [2] nel 1887. Esso fu eseguito quando la relatività e la fisica quantistica non erano ancora state formulate e dunque il modello con cui confrontare i dati era quello della fisica classica nel quale l'anisotropia era data dalla relazione $\chi_{\text{class}}(\theta) \sim (v/c)^2 \cos(2\theta)$, dove v dà la proiezione della velocità della Terra nel piano dell'interferometro e c è la velocità della luce nel vuoto pari a circa 300.000 km/s. Quindi l'anisotropia predetta era molto piccola, $\chi_{\text{class}} \sim 10^{-8}$, adottando il valore $v \sim 30$ km/s dovuto quantomeno al moto di rivoluzione orbitale della Terra. Il valore di (D/λ) era

però circa $2 \cdot 10^7$ per l'interferometro originale di Michelson e Morley. Così, come ordine di grandezza, ci si aspettavano spostamenti di frange dell'ordine di 0.200 che sarebbero stati ben misurabili in base alla sensibilità dell'apparato, circa ± 0.004 . Invece, gli spostamenti osservati, circa $0.010 \div 0.025$, risultarono molto minori di quelli aspettati. Utilizzando la formula classica, essi indicavano velocità molto piccole, circa $6 \div 10$ km/s, che non corrispondono a nessun moto della Terra conosciuto.

Successivamente, in esperimenti eseguiti nel più leggero elio gassoso, gli spostamenti di frange osservati diventarono ancora più piccoli e, usando sempre la relazione $\chi_{\text{class}} \sim (v/c)^2$, le velocità che si ottenevano scesero a circa $2 \div 3$ km/s. Va anche detto che si è sempre considerato il moto della Terra nell'etere come quello di un corpo in un fluido in moto regolare (il cosiddetto 'regime laminare'). Un tale modello, dove le proprietà globali del moto coincidono con quelle che si osservano localmente, portava ad aspettarsi durante il giorno precise modulazioni temporali del segnale dovute alle variazioni di v indotte dalla rotazione terrestre. I dati presi durante il giorno mostravano invece carattere molto irregolare. Analogamente, eseguendo misurazioni alla stessa ora in giorni consecutivi, per cui la velocità della Terra, con ottima approssimazione, non avrebbe dovuto variare, gli spostamenti di frange, molto spesso, differivano sostanzialmente. La presenza simultanea di queste due caratteristiche, cioè dati sperimentali piccoli ed irregolari, ha sempre fornito un forte argomento per interpretare ogni misura come un puro effetto strumentale, un risultato, appunto, nullo.

Per questi motivi, non sorprende che, per il grande successo tributato alla teoria di Einstein, nella quale non esiste riferimento privilegiato e quindi gli effetti dell'ether-drift devono essere sempre ed inevitabilmente nulli, la comunità scientifica abbia rapidamente finito con il considerare questi esperimenti come qualcosa di ormai superato, su cui non c'è più nulla da dire o da approfondire. In particolare, non si sono mai studiati i possibili effetti fisici derivanti dalla scelta, adottata negli anni, di far propagare la luce in mezzi gassosi sempre più rarefatti.

Ora, nonostante il consenso generale, grandi esperti [3, 4], nel tempo, hanno seriamente questionato la tradizionale interpretazione nulla di questi esperimenti. Quindi, dopo aver sottoposto a verifica queste affermazioni [5, 6], diventa naturale domandarsi se esista uno schema alternativo in cui quei dati piccoli ed irregolari possano acquistare un significato fisico definito. Questo è tanto più importante oggi, alla luce della concezione del vuoto come condensato di quanti fondamentali. Infatti, per quanto non sia certamente l'etere pensato da Lorentz, se possibile, esso differisce anche di più da quello spazio-tempo completamente vuoto che Einstein aveva in mente nel 1905. Per questo motivo, la formulazione di relatività fisicamente realizzata, in seguito al processo di condensazione del vuoto, potrebbe essere più simile a quella originaria concepita da Lorentz.

Partendo da queste osservazioni, ci sono diversi motivi [7, 8, 9] per dubitare che il vuoto della fisica di oggi sia esattamente ‘Lorentz-invariante’. Cioè, per un osservatore in moto, applicando una trasformazione di Lorentz, esso potrebbe non rimanere esattamente identico a quello definito dall’osservatore Σ che vede la condensazione produrre globalmente uno stato con momento spaziale $\mathbf{P} = 0$. Come vedremo nel Cap. 7 (in particolare nell’appendice B) questa identità dipende da una quantità poco capita, l’energia del vuoto, che dovrebbe anch’essa avere valore *zero*. Poiché non vi sono motivazioni teoriche che garantiscono questo annullarsi, l’esatta Lorentz-invarianza del vuoto può essere messa in discussione con alcune importanti conseguenze. La più semplice sarebbe che, in un qualunque altro sistema S' (per es. la Terra) in moto rispetto a Σ , ci dovrebbe essere un flusso di energia nella direzione del moto. Esso si comporterebbe come un gradiente termico fondamentale che, essendo presumibilmente molto piccolo, potrebbe alterare le proprietà della materia in modo differente. Per esempio, in sistemi debolmente legati come i gas, potrebbe generare correnti convettive delle molecole del gas (rispetto alle pareti del contenitore) così modificando leggermente la velocità della luce nelle varie direzioni. D’altro canto, per sistemi fortemente legati, come i dielettrici trasparenti liquidi o solidi, dovrebbe dissipare mediante pura conduzione termica senza generare alcun moto di particelle ed anisotropia della luce. Questa situazione complessa, nella quale il sistema S' non potrebbe più essere usato per definire un vero stato di quiete, sarebbe ancora consistente con l’interpretazione della relatività di Lorentz ma non con quella di Einstein.

E’ precisamente lungo questa linea alternativa di ricerca che si è mossa la nostra analisi basandosi su due ingredienti fondamentali.

Da un canto, la comprensione che, in una forma di relatività Lorentziana, l’effetto del drift sulla velocità della luce si annulla esattamente solo quando la luce si propaga in un mezzo ideale con indice di rifrazione $\mathcal{N} = 1$, per il quale cioè la velocità della luce c_γ coincide con il fondamentale parametro c che entra nelle trasformazioni di Lorentz. Invece, in un mezzo gassoso, ed in presenza di deboli correnti convettive delle molecole del gas generate dal moto del riferimento, l’anisotropia della luce sarebbe

$$\chi_{\text{rel}}(\theta) \sim 2(\mathcal{N}_{\text{gas}} - 1)(v/c)^2 \cos(2\theta) \quad (3)$$

(e non $\chi_{\text{class}}(\theta) \sim (v/c)^2 \cos(2\theta)$ come nella fisica classica). Da questo segue che la rarefazione del mezzo gassoso in un interferometro di Michelson può avere un effetto fisico fondamentale. Per esempio, per l’aria a pressione atmosferica, dove $\mathcal{N}_{\text{aria}} \sim 1.000293$, le *stesse* misure che con la formula classica davano 8 km/s ora darebbero una velocità di circa 330 km/s. Analogamente, dalle misure nell’elio gassoso, dove $\mathcal{N}_{\text{elio}} \sim 1.000035$, dati sperimentali che secondo la formula classica davano 3 km/s ora darebbero circa 360 km/s. Questi valori sono quelli della maggior parte dei moti cosmici della Terra e spiegherebbero così la riduzione progressiva dell’anisotropia in esperimenti in mezzi sempre più rarefatti sino a quelli eseguiti nel vuoto più spinto ottenibile in laboratorio dove $\mathcal{N} = 1$ con grande accuratezza.

Dall'altro, le implicazioni di un modello del vuoto come etere turbolento. In questo caso, i parametri di velocità associati al moto macroscopico della Terra non descriverebbero più in modo deterministico il segnale che si dovrebbe osservare in laboratorio ma fisserebbero solo i limiti di un campo di velocità microscopico che fluttua in modo casuale. Addirittura, come in certi modelli idrodinamici, gli effetti di turbolenza, alle piccole scale del laboratorio, potrebbero risultare statisticamente isotropi. Allora, facendo sempre più misure, la direzione del drift, misurata ad ogni dato tempo delle osservazioni, fluttuerebbe in modo da dare sempre valor medio nullo. Questo significa che non si possono semplicemente mediare gli spostamenti di frange come si è sempre fatto. Invece, si dovrebbero analizzare i dati prima in fase (quella che dà la direzione del drift) ed ampiezza (quella che dà il modulo della velocità) concentrandosi infine sulla seconda che è una quantità definita positiva ed esibisce un comportamento più regolare.

La combinazione di questi due ingredienti introduce differenze sostanziali rispetto alle vecchie analisi. Infatti, gli esperimenti del passato, confrontati con le nostre simulazioni numeriche [7], mostrano un'ottima consistenza con quella velocità della Terra di 370 km/s che, come ricordato nell'Introduzione, viene *oggi* dedotta dalle osservazioni del fondo di radiazione cosmica o, in inglese, *Cosmic Microwave Background* (CMB), che verrebbe così a giocare il ruolo del sistema privilegiato Lorentziano. Questa sorprendente coincidenza tra misure di laboratorio ed osservazioni astronomiche richiede una conferma definitiva, che potrebbe arrivare da una nuova generazione di apparati, costruiti allo scopo di riprodurre le condizioni sperimentali di quei primi esperimenti in cui la luce si propagava in un mezzo gassoso (e non come oggi nel vuoto dove $\mathcal{N} = 1$). Tali esperimenti, discussi nel Cap. 7, avrebbero un costo relativamente modesto (circa 300 mila euro) se confrontato con le loro possibili implicazioni. Se, infatti, le prime indicazioni da noi ottenute fossero confermate, ne deriverebbero alcune conseguenze fondamentali.

3.2 Implicazioni del rivelare l' ether-drift

La prima conseguenza immediata del rivelare un ether-drift consisterebbe nell'adottare un'interpretazione Lorentziana degli effetti relativistici. Come sottolineato da diversi autori [10, 11, 12], questo potrebbe essere importante per l'interpretazione di quei fenomeni quantistici nei quali sembra esserci una connessione permanente tra certi microsistemi fisici anche quando essi sono arbitrariamente distanti. Questo tipo di connessione, che in inglese viene definita *entanglement* (si veda per es. [13, 14]), ha grande interesse perché, se interpretata come dovuta allo scambio di qualche segnale fisico, richiederebbe segnali superluminali, cioè segnali che si propagano a velocità maggiore di c . Nella relatività speciale, dove non esiste alcun sistema di riferimento privilegiato, questo porterebbe a contraddizioni insanabili con la nozione di causalità. Dunque, la formulazione assiomatica di Einstein potrebbe oscurare aspetti fondamentali della natura.

Come seconda conseguenza, si metterebbe ulteriormente in questione la nozione di 'sistema isolato'. Sappiamo che questa è sempre e comunque un'approssimazione (l'unico sistema completamente isolato sarebbe, a rigore, solo l'universo nel suo complesso). Però, se quanto detto sopra risultasse vero, questa approssimazione diventerebbe, inevitabilmente, molto meno soddisfacente di quanto comunemente si pensa. Infatti, rivelare un ether-drift in laboratorio significherebbe che non tutti gli effetti del vuoto vengono riassorbiti nelle leggi della fisica quantistica e della relatività [15, 16]. A causa del nostro continuo moto, in esso rimarrebbe comunque un debole flusso residuo di energia in grado di modificare leggermente la materia e quindi la velocità della luce che si propaga al suo interno. Questo flusso, che per quanto detto avrebbe una natura irregolare, rappresenterebbe una sorta di rumore di fondo inevitabile che interferirebbe con l'evoluzione dinamica di ogni sistema fisico. La possibilità dell'esistenza di un tale effetto rivestirebbe un notevole interesse nell'ambito delle ricerche sull'origine della complessità in natura, in quanto sta diventando sempre più evidente il fatto che molti sistemi classici e quantistici possono aumentare la loro efficienza in presenza di un rumore di fondo genuinamente casuale [17]-[23].

Va anche sottolineato che un fluido turbolento con viscosità zero, pur comportandosi per molti aspetti come 'vuoto', potrebbe allo stesso tempo essere considerato come un 'non-vuoto'. In questo senso, la sua esistenza fornirebbe una risposta esplicita all'enigma che aveva tormentato molti dei primi pensatori greci e che può essere riassunto nella seguente domanda: come è possibile che, in uno stesso ente, possano coesistere caratteristiche apparentemente contraddittorie? Questa sintesi degli opposti è, peraltro, perfettamente in linea con la rivoluzione scientifica del XX secolo che, attraverso le fondamentali scoperte della relatività e della meccanica quantistica, ha profondamente modificato la nostra visione del mondo abituandoci, ad esempio, a non considerare più come indipendenti le categorie kantiane di spazio e tempo, o come contraddittorie le descrizioni corpuscolare e ondulatoria della materia e della radiazione. Questa rivoluzione ha un grande valore concettuale e può essere riassunta nella frase di Niels Bohr secondo cui «Ci sono due tipi di verità: le verità semplici, dove certi opposti sono chiaramente assurdi, e le verità profonde, riconoscibili dal fatto che l'opposto è a sua volta una profonda verità». Da essa sembra emergere addirittura la possibilità di introdurre una nuova logica, in grado di superare l'usuale principio aristotelico del 'tertium non datur', all'interno della quale il presentarsi di caratteristiche in apparente contraddizione non va rigettato *a priori* ma può anche far parte del progresso della conoscenza. Per questo motivo, riuscire a rivelare una qualche forma irregolare di ether-drift potrebbe avere altre conseguenze di carattere generale. Tra queste, vorremmo segnalarne una che ci sembra particolarmente affascinante: l'ulteriore rafforzamento delle analogie tra la visione della fisica moderna e quella di alcune antiche filosofie orientali.

Come ricordato, il dualismo quantistico tra proprietà corpuscolari ed ondulatorie della materia porta a concepire una sintesi degli opposti che, in ultima analisi,

dipende dalla profonda interconnessione della realtà a livello quantistico. Questa cornice concettuale appare in perfetta sintonia con le interpretazioni 'olistiche' proprie di svariate filosofie orientali (Induismo, Taoismo, Buddhismo), le quali considerano la natura come un tutto unitario la cui superiore armonia non può essere colta con modalità di pensiero vincolate da rigide categorie logiche. Queste analogie erano già state notate da alcuni dei padri fondatori della fisica quantistica. Niels Bohr, ad esempio, quando fu nominato cavaliere nel 1947, scelse come suo stemma il famoso diagramma cinese che esprime la complementarità tra Yin e Yang, i due principi fondamentali del Taoismo. Erwin Schrödinger fu molto influenzato dalla filosofia indiana dei Veda [24], mentre Wolfgang Pauli ebbe un lungo scambio epistolare con Carl Gustav Jung [25], essendo entrambi attratti, per motivi diversi, dalla visione del mondo che emerge dal 'Libro dei Mutamenti' (*I Ching*), punto di riferimento del Taoismo cinese. Meno noti, ma altrettanto illuminanti, sono anche i dialoghi tra David Bohm, autore di una interpretazione alternativa della meccanica quantistica, e il filosofo e mistico indiano Jiddu Krishnamurti. Queste connessioni tra scienza e spiritualità hanno poi avuto larga diffusione attraverso l'opera di notevoli divulgatori, primo fra tutti il fisico Fritjof Capra con il suo celebre saggio 'Il Tao della fisica' [26].

Ebbene, la nostra sensazione è che le radici di questa contaminazione tra fisica moderna e misticismo orientale andrebbero, prima di tutto, ricercate in quella entità particolare che ci appare come spazio vuoto. Non a caso, come accade nella fisica moderna, anche nel Taoismo, nell'Induismo e nel Buddhismo il vuoto non è visto come un mero 'nulla'. Al contrario, queste antiche filosofie orientali hanno colto la sua duplice natura di essere qualcosa ('vuoto') ed anche il suo contrario ('non-vuoto'). Come tale, il vuoto rappresenta un qualcosa di totalmente indefinibile da cui tutte le cose scaturiscono secondo regole fondamentalmente inaccessibili ad una mente puramente razionale. Si richiede allora quella particolare condizione esistenziale di *vacuità*, intesa come assenza di sollecitazioni e stimoli, anche di natura intellettuale, che sola può permettere di coglierne la sottile essenza. Quindi, se, da un lato, cercare di paragonare questa concezione filosofica ad un qualche sistema fisico definito potrebbe sembrare contraddittorio, dall'altro questa inaccessibilità di fondo del vuoto presenta comunque alcuni aspetti, come l'indifferenziazione e l'imprevedibilità, che trovano riscontro nell'idea di un fluido neutro turbolento. In questo senso, una conferma sperimentale diretta del nostro modello fisico potrebbe costituire un rafforzamento della base comune su cui poggiano le analogie appena discusse e, dunque, rappresentare un importante punto di svolta nei rapporti tra la scienza e le tradizioni filosofiche e religiose orientali.

D'altra parte, rivelando sperimentalmente una qualche forma di etere turbolento, si potrebbero stabilire ulteriori collegamenti con altri concetti (potremmo dire 'archetipi') considerati invece propri del pensiero occidentale, come per esempio l'invisibile *apeiron* di Anassimandro. L'*apeiron* è insieme l'infinito e l'indifferenziato, la causa del divenire e della molteplicità, il principio ed il termine ultimo di tutto.

Esso non si esaurisce nella fase cosmogonica [27] ma, sotto forma di un perenne stato di moto vorticoso, continua a sussistere ai confini di ogni struttura 'ordinata', cioè di ogni singola cosa che esiste in natura. Anassimandro, d'altronde, si ricollegava in questo al carattere atemporale del *Chaos* di Esiodo [27] ed alla sua doppia valenza di vuoto originario e di massa indistinta di tutti gli elementi. Veniamo, così, rimandati ancor più indietro nel tempo. Ad esempio, nel contesto della nostra tradizione giudaico-cristiana, a quell'idea di acqua informe ed invisibile di cui si parla nei primi versetti della Genesi e che serve a scandire le due fasi della formazione del cosmo: dapprima il *Chaos* indistinto e poi, da esso, le singole cose [28]. Questa visione del vuoto alla base di un'eterna cosmogonia potrebbe dunque offrire nuovi spunti per quella possibile sintesi di comprensione razionale ed esperienza mistica unitaria che, secondo Heisenberg [29] e Pauli [30], costituisce «il mito espresso od inespresso di questo nostro tempo».

Per poter meglio apprezzare tutte le possibili implicazioni di questa problematica, è dunque necessario ritornare prima ad un antico passato, quello del pensiero greco e di alcune filosofie orientali, seguendo così il suggerimento di Bohr che «per trovare un parallelo con le lezioni della fisica atomica ... dobbiamo volgerci ad altri rami della scienza, come la psicologia, o magari a quel genere di problemi epistemologici che hanno affrontato pensatori come Buddha e Lao-tzu, nel tentativo di armonizzare la nostra posizione di spettatori e di attori nel grande teatro dell'esistenza»[31]. Dopo questo viaggio nel passato, che ci terrà occupati nei capitoli 4, 5 e 6, ritorneremo agli aspetti più propriamente fisici della nostra analisi nel capitolo 7, nella convinzione che «percorrere una strada più lunga permette, qualche volta, una migliore conoscenza del paese»[14].

References

- [1] H. A. Lorentz, *The Theory of Electrons*, Leipzig 1909, B. G. Teubner Ed.
- [2] A. A. Michelson and E. W. Morley, *Am. J. Sci.* **34** (1887) 333.
- [3] W. M. Hicks, *Phil. Mag.* **3** (1902) 9.
- [4] D. C. Miller, *Rev. Mod. Phys.* **5** (1933) 203.
- [5] M. Consoli and E. Costanzo, *Phys. Lett. A* **333** (2004) 355.
- [6] M. Consoli and E. Costanzo, *Nuovo Cimento B* **119** (2004) 393.
- [7] M. Consoli, C. Matheson and A. Pluchino, *Eur. Phys. J. Plus* **128** (2013) 71.
- [8] M. Consoli and A. Pluchino, *The classical ether-drift experiments: an enigma for physics and history of science*, Relazione su invito al Convegno della Società Italiana di Storia della Fisica e dell'Astronomia (SISFA), Proceedings SISFA 2014.
- [9] M. Consoli, *Found. of Physics*, **45** (2015) 22.
- [10] V. Scarani et al., *Phys. Lett.* **A276** (2000) 1.
- [11] N. Gisin et al., *Ann. Phys. (Leipzig)* **9** (2000) 831.
- [12] S. Liberati, S. Sonego and M. Visser, *Ann. Phys.* **298** (2002) 167.
- [13] G. Jaeger, *Entanglement, Information, and the Interpretation of Quantum Mechanics*, Springer Verlag, 2007.
- [14] J. S. Bell, *Dicibile e Indicibile in Meccanica Quantistica*, Adelphi 2010.
- [15] M. Consoli, A. Pluchino and A. Rapisarda, *Chaos, Solitons and Fractals* **44** (2011) 1089.
- [16] M. Consoli, A. Pluchino, A. Rapisarda and S. Tudisco, *Physica A* **394** (2014) 61.
- [17] P. Allegrini, M. Giuntoli, P. Grigolini and B. J. West, *Chaos, Solitons and Fractals*, **20** (2004) 11.
- [18] F. Caruso, S.F. Huelga, M.B. Plenio, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 190501.
- [19] H. Lee et al., *Science* **316** (2007) 1462.
- [20] D. Frenkel, *Nature* **443** (2006) 641.
- [21] R. Mantegna and B. Spagnolo, *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 563.

- [22] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung and F. Marchesoni, *Rev. Mod. Phys.* **70** (1998) 223288.
- [23] P. Hänggi and F. Marchesoni Eds., *Stochastic Systems: From Randomness to Complexity*, *Physica A* **325** (2003) 1.
- [24] E. Schrödinger, *Che cos'è la vita?*, Adelphi, Milano 1995.
- [25] W. Pauli, *Psiche e Natura*, Adelphi, Milano 2006.
- [26] F. Capra, *Il Tao della fisica*, Adelphi Ed. 1989.
- [27] R. Mondolfo, *L'Infinito nel Pensiero dell'Antichità Classica*, Presentazione di G. Reale, Bompiani/RCS Libri, Milano 2012.
- [28] Si vedano le opere di Sant'Agostino, *Difesa della Genesi contro i Manichei*, *Interpretazione letterale della Genesi* e gli ultimi tre libri delle *Confessioni*. Alcuni passi sono comunque riportati più avanti alla fine del Cap.4.
- [29] W. Heisenberg, *Oltre le frontiere della scienza*, Editori Riuniti, Roma 1984.
- [30] W. Pauli, *Fisica e Conoscenza*, Universale Bollati Boringhieri 2007.
- [31] N. Bohr, *Teoria dell'atomo e conoscenza umana*, Boringhieri Torino 1961.

4. Antiche concezioni della natura

Platone chiama ‘filosofia’ l’amore per la sapienza e guarda con venerazione al passato, a quel mondo in cui erano esistiti i ‘sapianti’. Cos’è questa antica sapienza greca? Secondo Colli «sapiente è chi getta luce nell’oscurità, chi scioglie i nodi, chi manifesta l’ignoto, chi precisa l’incerto»[1]. Chi cerca di interpretare le parole di un oracolo nelle quali la volontà di un dio si manifesta in modo ambiguo e oscuro. «Il signore, cui appartiene l’oracolo che sta a Delfi, non dice né nasconde ma accenna» dice infatti Eraclito, uno dei sapienti. Sono proprio questi aspetti a diventare la base per la concezione della natura espressa in quello che è forse il suo aforisma più famoso: «la natura (*physis*) ama nascondersi». Il suo carattere lapidario, del tipo cioè che potrebbe essere impresso sul frontale di un tempio greco, non può non sorprendere. Con sole tre parole si proclama una verità che è atemporale e riguarda la totalità delle cose. Il quadro si completa laddove egli dice anche che «l’armonia invisibile vale più di quella visibile».

Questa idea che la natura, in realtà, sia diversa da come ci appare, ed in particolare che la sua parte più celata sia anche quella più importante, ci ricorda l’opinione di Fermi sulla direzione della fisica del futuro che abbiamo citato all’inizio dell’Introduzione. Diventa quindi concepibile che il pensiero presocratico possa ancora dirci qualcosa di prezioso. In questo siamo confortati da un illustre predecessore come Schrödinger che, certamente con più autorevolezza di noi, aveva espresso questo medesimo interesse: «Dedicando il mio tempo agli antichi pensatori Greci, io non stavo seguendo un mio recente hobby; non lo consideravo, dal punto di vista professionale, una perdita di tempo da limitare al mio tempo libero; il mio interesse era giustificato dalla speranza di aumentare la mia comprensione della scienza moderna e così, ‘inter alia’, anche della fisica moderna»[2].

L’idea che la strada che porta alla vera sapienza sia avvolta nell’oscurità è anche il cuore di alcune filosofie orientali. Per esempio, nella tradizione induista, in quel passo delle *Brhad-Aranyaka-Upanisad* (VIII - VI secolo a.C) dove si dice che «gli dei amano il mistero e a loro ripugna ciò che è manifesto»[3, 4]. Ciò che è manifesto, ovvero la moltitudine di cose ed eventi che ci viene proposta dai nostri sensi, è infatti un ostacolo, un’illusione che ci impedisce di percepire la fondamentale unità di tutto nel *Brahman*, lo Spirito universale all’origine di tutto. Per liberarsi da questo incantesimo (sollevare il ‘velo di Maya’) bisogna rinunciare alle sollecitazioni che provengono dalla realtà sensibile e cercare il *Brahman* in ciò che risulta più difficile da percepire, cioè nel vuoto che è ‘tessuto’ a sua somiglianza. In questo modo, «essendosi concentrato su ciò che è di là dall’udito, di là dal tatto, di là dalla vista, di là dal gusto e dall’olfatto, che è indefettibile ed eterno, senza principio e senza fine, più grande del grande e duraturo, l’uomo si salva dalle fauci della morte»[5].

Analoghi concetti si ritrovano anche nel Taoismo cinese. Il *Tao*, tradotto spesso

come 'Via', è, allo stesso tempo, l'origine di tutto ed il principio regolatore della natura. Rappresenta qualcosa di indefinibile e non direttamente percepibile e va pensato come un vuoto pieno di potenzialità che dà il senso di ogni cosa esistente ma resiste ad una comprensione puramente razionale: «Guardato ma non visto, udito ma non ascoltato, toccato ma non afferrato, senza forma, senza suono, intangibile: il Tao resiste all'analisi e sfida la comprensione».

Il vuoto, dunque, non ha il significato del puro 'nulla', del non-essere, che gli viene di solito attribuito nel pensiero occidentale. Al contrario, in esso si trova l'origine di tutto. Paradossalmente, è in quel che chiamiamo vuoto che si finisce con lo scoprire la vera essenza della natura (l'essere) e non nelle singole cose che ne sono le manifestazioni esteriori (gli enti). In questo senso, del vuoto di queste filosofie orientali, parafrasando Heidegger, si potrebbe dire: «l'essere si cela mentre si manifesta negli enti». Si arriva così, alla fine, a riscoprire Eraclito.

Queste significative analogie tra pensiero greco presocratico e filosofie orientali riportano all'idea di Jaspers [6, 7], secondo cui ci fu un'epoca, detta Periodo Assiale (approssimativamente tra VIII e III secolo a.C.), nella quale avvennero cambiamenti epocali riguardanti la ricerca sull'uomo e sulla natura. In questo periodo: «In Cina vissero Confucio e Lao-Tzu, sorsero tutte le tendenze della filosofia cinese ... In India apparvero le Upanisad, visse Buddha e, come in Cina, si esplorarono tutte le possibilità filosofiche sino allo scetticismo ed al materialismo, alla sofistica ed al nichilismo ... In Iran Zoroastro propagò l'eccitante visione del mondo come lotta tra il bene ed il male ... In Palestina fecero la loro apparizione i profeti Elia, Isaia, Geremia ... La Grecia vide Omero, i filosofi Parmenide, Eraclito e Platone, ... Tutto ciò che questi nomi implicano prese forma in pochi secoli quasi contemporaneamente in Cina, India ed Occidente, senza che alcuna di queste regioni sapesse delle altre. La novità di quest'epoca è che in tutti questi tre mondi l'uomo prende coscienza dell'Essere nella sua interezza, di sé stesso e dei suoi limiti»[6].

Per quanto ci siano ovvie differenze nei modi in cui questi cambiamenti si realizzarono nelle varie regioni del mondo, e per quanto l'idea che non ci siano stati collegamenti sia questionabile, la tesi di Jaspers rimane suggestiva. Con queste premesse, in questo capitolo, presenteremo una nostra personale rivisitazione (che non ha alcuna pretesa di completezza) alla ricerca di analogie tra l'antico pensiero greco, filosofie orientali e quella moderna concezione del vuoto che abbiamo richiamato nei capitoli precedenti.

4.1 Brevi cenni al primo pensiero greco

Secondo tradizione, la filosofia greca nasce con Talete a Mileto sullo Jonio all'inizio del VI secolo. Le sue vere origini, però, restano misteriose. Più volte in passato si sono cercati collegamenti ed analogie con civiltà più antiche dell'Oriente quali, ad esempio, Egitto, Mesopotamia o anche India. Nietzsche sottolinea come stori-

camente «La filosofia in Grecia ha avuto inizio con un grande matematico. Da qui deriva il suo interesse per l'astratto, per il non-mitico, il non-allegorico»[8]. Riporta poi la testimonianza di Proclo secondo cui Talete apprese matematica ed astronomia durante il suo soggiorno in Egitto e poi le trasferì in Grecia. Contatti con l'Oriente si trovano anche nelle varie biografie di Pitagora (Diogene Laerzio, Giamblico e Porfirio), in cui si riferisce di come «in Egitto, entrò nei santuari ed apprese gli arcani della teologia egizia» e di come abbia viaggiato presso i Caldei e i Magi. Anche di Democrito si riportano viaggi in Egitto, in Persia ed addirittura in India (Diogene Laerzio, Demetrio, Antistene).

Che vi siano stati dei contatti sembra dunque difficile escluderlo. Ma quale fu la loro reale influenza sul pensiero greco? Uno spunto su tale questione potrebbe venire da Platone, quando nel *Timeo* narra del viaggio in Egitto di Solone, il più saggio dei Sette Sapienti. A Solone, rimasto stupito di non conoscere nulla di molte tradizioni e fatti più antichi, un vecchio sacerdote egizio si sarebbe rivolto dicendo «Solone, Solone, voi Greci siete sempre ragazzi, ...siete spiritualmente giovani perchè nelle vostre menti non avete nessuna antica opinione formata per lunga tradizione e nessuna conoscenza incanutita dal tempo». Nel dialogo, questo si fa risalire ai periodici cataclismi che, per così dire, 'azzerano' la memoria di interi popoli. Nondimeno, in queste parole sembra di poter cogliere, più che una critica, un segno di apprezzamento: il non essere condizionati da 'conoscenze incanutite dal tempo'. Diventa condivisibile allora il punto di vista di Nietzsche che, lungi dall'attribuire ai Greci una semplice attitudine a rielaborare, sottolinea la loro straordinaria voglia di conoscere che li rendeva capaci di assorbire elementi culturali 'vivi' provenienti da altri popoli, «essi sono giunti così lontano proprio perché hanno saputo scagliare oltre la lancia, raccogliendola là dove un altro popolo l'aveva abbandonata»[9]. Questo punto di vista sembra meno drastico di quello che tende ad escludere l'importanza di contaminazioni con le civiltà più antiche e a limitarne l'influsso solo a quelle aree dove sono innegabili, cioè alla matematica ed all'astronomia.

Nel frammento di Eraclito, sulla natura che ama nascondersi, c'è ancora qualcosa di importante riguardo all'idea stessa di verità. Come sottolineato più volte da Heidegger [10, 11], la parola stessa usata dai Greci per indicarla, cioè *a-letheia* = svelamento (nel senso di sollevamento di un velo) ha un significato che è sostanzialmente diverso da quello di conformità piuttosto adottata nel Medioevo («*veritas est adaequatio rei et intellectus sive enuntiationis*»). Per i Greci, invece, la ricerca della verità «richiede che l'essere venga prima esperito nel suo essere velato e nel suo nascondersi e che questo velo circonda l'uomo e lo angosti nella sua interezza e nel suo fondamento». Nel frammento di Eraclito trova dunque espressione questa esperienza fondamentale «con la quale, nella quale e a partire dalla quale si incominciò a guardare nell'essenza della verità»[10].

Vediamo allora cosa i vari autori dicevano sulla natura e quali erano i punti in

comune da considerare per una possibile sintesi.

4.1.1 La Scuola Ionica

I massimi rappresentanti della Scuola Ionica furono Talete, Anassimandro ed Anassimene e la loro attività, che va posta nella prima metà del VI secolo, fu rivolta, soprattutto, ad individuare un qualcosa che rappresentasse l'origine e l'elemento comune di tutte le cose. Questa loro ricerca viene ben resa da due passi di Aristotele. Nel primo [12], ricorda che «La maggior parte di coloro che per primi filosofarono ritennero che i principi di tutte le cose fossero soltanto quelli di specie materiale. Essi chiamano infatti elemento (*stoicheion*) e principio (*arché*) degli enti ciò da cui tutti gli enti sono costituiti e ciò da cui essi originariamente derivano e in cui alla fine si dissolvono, in quanto è una sostanza che permane mentre le sue affezioni vanno variando. E' per questo motivo, ossia è perché questa natura si conserva sempre, che essi ritengono che nulla si generi e nulla si distrugga ...Talete, il fondatore di tale forma di filosofia, dice che elemento è l'acqua».

Nel secondo [13], dice «Che dunque questa ricerca sia di pertinenza dei fisici è chiaro da quanto detto. Tutti infatti pongono giustamente l'infinito (*apeiron*) come principio. Non è possibile pertanto che esso esista invano, né che non abbia altra capacità se non quella di essere principio. Ogni cosa, infatti, o è principio o deriva dal principio, mentre non v'è principio dell'infinito, poiché questo sarebbe allora suo limite. Inoltre, in quanto principio, esso è ingenerabile ed incorruttibile. Infatti, tutto ciò che si genera necessariamente ha una fine e fine di ogni cosa è la corruzione. Affermiamo, pertanto, che non esiste un principio dell'infinito mentre esso sembra essere principio delle altre cose e avvolgere ogni cosa e reggere ogni cosa, come dicono quanti non ritengono che esista alcun altro principio oltre l'infinito, come ad esempio l'Intelletto e l'Amore. E dicono che questo è il divino: è infatti immortale ed incorruttibile, come dicono Anassimandro e la maggior parte degli antichi studiosi della natura».

Di questi due passi, Ricoeur [14] e Severino [15], pur con delle differenze, sottolineano alcuni aspetti fondamentali. Primo, il principio non è generabile né corruttibile quindi è eterno. Secondo, il principio è la forza che determina il mondo producendo tutte le cose e facendole alla fine ritornare a sé. Terzo, per questi due motivi, il principio ha qualcosa di divino. Quarto, la ricerca del principio, ovvero della verità, introduce dunque un nuovo senso del religioso. Quinto, la ricerca della verità può allora divenire un rimedio contro l'angoscia ed il dolore che caratterizzano la condizione umana. La forte tensione spirituale contenuta in questi passaggi logici ha dato potenza a tutto il pensiero greco e si coglie tuttora nettamente dopo venticinque secoli.

a1) Talete. Come già ricordato, fu grandissimo matematico ed astronomo (si dice abbia predetto un'eclissi di sole nel 585 a.C.). Fu uno dei Sette Sapianti e

a lui si attribuisce l'aforisma *Conosci te stesso*. Come anticipato, pose l'acqua come elemento fondamentale. Non ha lasciato nulla di scritto e la sua potrebbe essere stata una metafora piuttosto che un riferimento preciso alla stessa acqua che comunemente beviamo o nella quale ci bagniamo. Come ovvia osservazione, potrebbe essere stato ispirato dall'analogia con i possibili stati in cui l'acqua si può realizzare: liquido, solido (ghiaccio) o gassoso (vapore). Nei tre casi, tramite condensazione e rarefazione, si potrebbe dire che le 'affezioni' variano ma la 'sostanza' rimane invariata. Comunque, non si può escludere che possa essere stato influenzato anche dal pensiero mitico, in cui Oceano era la divinità primordiale da cui discendevano tutti gli dei. Infine, un'altra spiegazione potrebbe essere il ruolo fondamentale dell'acqua per la nascita di ogni forma di vita. In questo caso, potrebbero essere stati importanti i suoi viaggi in Egitto dove, appunto, senza il Nilo non sarebbe possibile alcuna forma di vita.

a2) Anassimandro. Si racconta che abbia predetto un terremoto e che sia stato il primo a comprendere l'obliquità dello zodiaco. Del suo pensiero abbiamo già ricordato l'idea di non legare il principio fondamentale a nessuna natura particolare ma all'infinito: «Egli disse che principio delle cose (*arché*) era una certa natura dell'infinito (*apeiron*) da cui si generano i cieli e l'ordine (*kosmos*). Essa è eterna e non invecchia e abbraccia tutti i mondi. E chiama tempo ciò che ne determina la generazione, l'esistenza e la distruzione»[16]. Quindi *apeiron* significa infinito, nel senso di quantitativamente illimitato poiché solo in questo caso si può comprendere come possa 'abbracciare tutti i mondi' e dar luogo ad un eterno divenire.

Nella visione di Anassimandro, però, *apeiron* significa anche indefinito, nel senso di qualitativamente indeterminato. Infatti, il formarsi di tutte le cose avviene per differenziazione ed è ineluttabilmente collegato alla loro distruzione per riassorbimento delle stesse differenze. In questa catena, si espia così quell'ingiustizia, insita nel processo di individuazione, dovuta al prevalere di una qualche determinazione sulle altre: «Anassimandro dice che principio non è né l'acqua né l'aria né un altro dei cosiddetti elementi, ma un'altra natura infinita dalla quale tutti i cieli provengono e i mondi che in essi esistono: da dove infatti le cose hanno l'origine, ivi hanno anche la distruzione secondo necessità: poiché esse pagano l'una all'altra la pena e l'espiazione dell'ingiustizia secondo l'ordine del tempo e l'ha espresso con vocaboli poetici. E' chiaro che avendo osservato il reciproco mutamento dei quattro elementi ritenne giusto non porne nessuno come substrato, ma qualcosa oltre questi. Secondo lui, quindi, la nascita delle cose avviene non in seguito ad alterazione dell'elemento ma mediante separazione dei contrari a causa dell'eterno movimento»[17].

L'introduzione del termine 'substrato' (*hypokeimenon*) porta all'idea dell'*apeiron* come un elemento materiale da cui tutto si origina ed in cui tutto finisce. Esso contiene in sé tutti i possibili contrari (per esempio caldo - freddo, secco - umido, ...) che caratterizzano ogni cosa come entità determinata. Invece, l'*apeiron*, essendo

totalmente indefinito, risulta esso stesso impercettibile poiché solo qualcosa che abbia delle qualità definite può essere rivelato, può 'impressionare'. In questo senso, se lo si volesse immaginare, l'*apeiron* risulterebbe simile all'impercettibile spazio vuoto.

La formazione di tutte le cose come separazione dei contrari dall'*apeiron* avviene a causa dell'eterno movimento (*aidios kinesis*) che è intrinseco alla sua stessa natura e ne esprime la potenzialità generatrice. Questo movimento corrisponde ad un moto di rotazione: «Anassimandro, amico di Talete, affermò che l'infinito aveva la causa completa della nascita e della distruzione del tutto: di lì, egli dice, si sono separati i cieli e in generale tutti i mondi che sono infiniti. Sosteneva che la distruzione e, molto prima, la nascita dei mondi avviene perché sono soggetti, tutti, da tempo infinito al movimento rotatorio»[18]. Questa caratteristica del moto rotatorio si basa sull'analogia col vortice che separa gli oggetti spingendo i più pesanti verso il centro ed i più leggeri verso l'esterno.

Non si deve però identificare il movimento rotatorio di ogni singolo *kosmos*, finito e temporaneo, con il moto rotatorio eterno 'precosmico' che caratterizza l'infinito *apeiron* e che produce la differenziazione. Altrimenti, si incontrerebbero varie difficoltà[19, 20], per esempio quella di immaginare una rotazione rigida che si estenda sino all'infinito e di riconciliare ciò con il moto rotatorio di ogni singolo *kosmos* che può invece avere luogo intorno ad assi differenti. Per questo motivo, Mondolfo [19] conclude che l'universalità del moto di rotazione non consiste nell'estensione di tale movimento all'infinito ma nel fatto che esso coinvolga *la totalità del reale*. Quindi, l'eterno moto rotatorio dell'*apeiron* ha un carattere 'locale' e, dunque, può differire da punto a punto come nel modello del vuoto come fluido turbolento discusso nel Cap. 2.

In questo modo, l'*apeiron* di Anassimandro, infinito, indeterminato, impercettibile ed origine di tutto si ricollega direttamente al *Chaos* primordiale della cosmogonia di Esiodo che, fonte e termine di tutte le cose, anche dopo la generazione del cosmo è fatto sussistere ai confini di esso [19]. Per meglio apprezzare questa analogia, si deve ricordare la doppia valenza del termine greco *Chaos*. Riporta infatti l'Enciclopedia Treccani: «Il nome greco *Chaos* (che contiene la stessa radice *cha-* dei verbi *chainein*, *chaskein*, 'essere aperto, spalancato') è stato adoperato per denominare la gran 'lacuna' o vuoto originario che si poteva pensare preesistente alla creazione del 'cosmo', la 'terra inanis et vacua' della Bibbia. Ma questo 'vuoto' non è per nulla da concepire come lo spazio infinito privo di ogni contenuto fisico, ma come l'essere ancora spalancato del mondo, prima del suo costituirsi in forme stabili e definite. Nelle prime cosmogonie elleniche (come nella Teogonia esiodea) appare come condizione prima (in Esiodo raggiunge la vera e propria personificazione) da cui ogni altra divinità o realtà si è venuta generando. In seguito, ha finito con il designare senz'altro la materia originaria, la massa anche confusa degli elementi versati, sparsi nello spazio, e il suo concetto si è così inserito nello sviluppo del

naturalismo greco».

In conclusione, quello che vogliamo qui sottolineare è la persistenza e l'ubiquità dell'*apeiron*. Esso è causa del divenire e della molteplicità [21], alla base di un'eterna cosmogonia nella quale rappresenta l'origine e il termine ultimo di ogni struttura ordinata.

a3) Anassimene. Un primo frammento, in cui si riporta il suo pensiero, recita «Anassimene poi - anche lui di Mileto - figlio di Euristrato, disse che il principio è l'aria infinita (*apeiron*) ...Peraltro essa si muove sempre: tutte le cose che mutano, infatti, non muterebbero senza movimento. Nel condensarsi e rarefarsi l'aria appare in forme differenti...»[22]. In rapporto ad Anassimandro, Anassimene dunque sembra tornare indietro scegliendo un elemento definito. Qui, l'aggiunta esplicita dell'epiteto *apeiron*, serve solo a sottolineare l'aspetto di infinità spaziale e non implica indeterminatezza qualitativa.

Questa interpretazione è confermata da un altro frammento «Anassimene poi, figlio di Euristrato, da Mileto, che fu seguace di Anassimandro, considera del pari unica ed infinita - come costui - la natura che fa da substrato, ma non già indefinita - come dice Anassimandro - bensì definita chiamandola aria. E afferma che essa differisce - in relazione alle sostanze - per rarefazione e condensazione. E rarefacendosi, l'aria diventa fuoco; condensandosi, invece, vento; in seguito nuvola, poi - quando si condensa ancora di più - acqua; quindi terra ... Anche Anassimene poi stabilisce come eterno il movimento, attraverso cui appunto si produce il mutamento»[23].

Tuttavia, una qualche indeterminatezza nell'idea di aria sembra comunque restare come risulta da un altro frammento in cui la si mette in relazione con l'anima: «Anassimene sostenne che l'aria è il principio delle cose : da questa infatti tutto proviene e in essa di nuovo tutto si dissolve. Come l'anima (*psyché*) nostra - egli dice - che è aria, ci tiene insieme, così pure il soffio e l'aria abbracciano il mondo intero»[24]. Questo suggerisce che l'aria di Anassimene possa essere la traduzione in senso naturalistico di un'entità incorporea in perenne movimento e non direttamente percepibile [25].

Per concludere, vorremmo sottolineare un altro aspetto. Anassimene comincia a descrivere la generazione delle cose riconducendo differenze qualitative a differenze quantitative (rarefazione e condensazione sono infatti differenze quantitative) [25]. Questo aspetto parve così straordinario a Nietzsche [8] da indurlo a mettere in dubbio la stessa collocazione temporale di Anassimene ponendola dopo Eraclito e gli Eleati. Anche Schrödinger trova sorprendente la visione di Anassimene, nella quale scorge il risultato di un'attenta osservazione [2]. Infatti, i concetti di rarefazione e condensazione di un dato mezzo vengono comunemente associati al progressivo allontanarsi ed all'avvicinarsi delle parti che lo compongono. Questo non ha nessun ovvio significato in una descrizione del mezzo come un puro continuo:

«cosa si allontana da che cosa?». Dunque, conclude, in qualche modo embrionale, Anassimene doveva avere un'idea granulare della materia, ben prima degli atomisti.

4.1.2 Eraclito

Eraclito di Efeso visse a cavallo tra il VI ed il V secolo. I frammenti che abbiamo già riportato possono ben riassumere la misteriosa profondità del suo pensiero. Nonostante il suo carattere scostante ed altezzoso, questo suscitò rispetto ed ammirazione come si può leggere in un epigramma riportatoci da Diogene Laerzio [25] «Non avvolgere in fretta intorno al suo asse il volume di Eraclito di Efeso; è certo un cammino ben difficile da percorrere. Oscurità e tenebra vi stanno senza una luce rischiaratrice; ma se un iniziato ti conduce in esso, diventa cose più luminose del sole splendente».

La riflessione di Eraclito si concentra sull'idea del divenire che era già stata centrale in Anassimandro. La sua celebre formula 'tutto scorre' indica che nulla resta immobile e ciò che permane è solo l'eterno divenire di tutte le cose. La sua idea del divenire si caratterizza mediante un continuo passare da un opposto all'altro: «Le cose fredde si riscaldano, le cose calde si raffreddano, le cose umide si disseccano, le cose secche si inumidiscono». Il divenire è dunque un continuo entrare in contatto dei contrari, «Connessioni: le totalità e le non totalità, il convergente ed il divergente, il consonante ed il dissonante; e fuori da tutte le cose ne sorge una sola, e fuori da una cosa sola sorgono tutte». Si potrebbe dire un perpetuo conflitto, «il conflitto è padre di tutte le cose e di tutte re»[25].

Di tale visione, il fuoco rappresenta bene l'elemento naturale: «Quest'ordine universale (*kosmos*), che è lo stesso per tutti, non lo fece alcuno tra gli dei o tra gli uomini, ma sempre era e sempre sarà fuoco vivente, che si accende e si spegne secondo giusta misura». In questa traduzione di Nietzsche [8] del passo di Clemente Alessandrino, il termine *kosmos* viene reso come 'ordine universale' (piuttosto che come mondo o universo) e serve ad indicare come ci sia in questo eterno conflitto un'armonia, 'l'armonia degli opposti', in quanto ogni cosa trae senso e determinazione dal proprio contrario [25]. Questo porta ad una circolarità del divenire e dell'intera realtà: «Comune infatti è il principio e la fine nella circonferenza del cerchio»[26], come se ci fosse un tipo di struttura relazionale per cui il punto al quale si arriva dopo un certo percorso può anche essere preso come punto di partenza in senso inverso. Questo senso di compiutezza, di perfezione, che come vedremo compare anche in Parmenide, implica che deve esistere un principio supremo che governa il divenire.

Per Eraclito, tale principio regolatore è il *logos* che permea di sé tutta la natura: «Eraclito mostrò che l'essenza del destino è il *logos* diffuso nella sostanza dell'universo. Ed essa è un corpo etereo, seme della generazione universale e del ciclo ordinato secondo misura»[27]. La vera sapienza consiste dunque nel riuscire a coglierlo:

«Perché in una cosa sola consiste la sapienza, nell'intendere quel *logos* che governa tutto per mezzo di tutto»[28]. Un qualcosa che agli uomini risulta molto difficile: «Di questo *logos* che è sempre, gli uomini non hanno intelligenza, sia prima di averlo ascoltato sia subito dopo averlo ascoltato»[29]. Si sarebbe, dunque, indotti a concludere che ciò che la natura, quasi gelosamente, ama nascondere di sé sia proprio il *logos*, questo principio regolatore del divenire che agli uomini riesce così difficile cogliere e che si trova diffuso nell'universo.

Questo aspetto è strettamente legato alla visione dell'anima. Reale [25] osserva, da un canto, che come con l'aria in Anassimene, anche Eraclito legò l'anima al principio naturale, in questo caso il fuoco, sostenendo, ad esempio, che la saggezza corrisponde ad uno stato di maggiore secchezza «Anima riarsa di sete è la più sapiente, che eccelle»[30]. Dall'altro, sottolinea come l'anima possieda un suo proprio *logos*: «I confini dell'anima non li potrai mai raggiungere, neppure se percorrerai tutte le strade: così profondo è il suo *logos*»[31]. C'è dunque in Eraclito un tentativo di spiegare insieme sia la natura che la sua conoscibilità. Questo avviene perché l'anima è partecipe dello stesso principio che regola tutte le cose. Allo stesso tempo, nell'altro frammento [32] «E' proprio dell'anima un *logos* che accresce sé stesso», si vede come l'anima abbia la misteriosa facoltà di accrescere il suo *logos*. Questo sembrerebbe richiedere un contatto con il *logos* 'diffuso nella sostanza dell'universo' e, probabilmente, anche un'intima disposizione che va oltre la pura razionalità. Infatti «Se non speri l'Inesperabile, non lo scoprirai, perché è chiuso alla ricerca, e ad esso non conduce alcuna strada»(la traduzione del frammento Diels - Kranz, 22 B18 è quella riportata da Tonelli [33]).

4.1.3 Parmenide

Originario di Elea, nell'Italia meridionale (l'odierna Velia), visse tra il VI ed il V secolo. Scrisse un poema didascalico in versi 'Sulla Natura' in cui si narra del suo incontro con una Dea che gli comunica quale sia la via da seguire per raggiungere la verità (*altheia*). Allo stesso tempo, accenna anche alla via dell'opinione (*doxa*) che non dà alcuna certezza assoluta: «O giovane ... Bisogna che tu tutto apprenda: e il solido cuore della Verità ben rotonda e le opinioni dei mortali, nelle quali non c'è vera certezza». Del poema riportiamo alcuni frammenti nella traduzione di Reale [34].

Prima parte: La via della verità.

Il cuore della rivelazione della Dea consiste nel seguire la via della verità e si manifesta in questa esortazione (frammento 6): «E' necessario il dire e il pensare che l'essere sia: infatti l'essere è, il nulla non è: queste cose ti esorto a considerare». Di questo 'essere', la Dea dice alcune cose

(frammento 3): «...Infatti lo stesso è pensare ed essere».

(frammento 4): «Considera come le cose che pur sono assenti, alla mente siano saldamente presenti; infatti non potrai recidere l'essere dal suo essere congiunto con l'essere, né come disperso dappertutto in ogni senso nel cosmo né come raccolto insieme».

(frammento 8): «... l'essere è ingenerato e imperituro infatti è un intero nel suo insieme, immobile e senza fine ... E neppure è divisibile, perché tutto intero è uguale; né c'è da qualche parte un di più che possa impedirgli di essere unito né c'è un di meno, ma tutto intero è pieno di essere ... esso è compiuto da ogni parte, simile a massa di ben rotonda sfera».

Seconda parte: La via dell'opinione.

Essa comincia con i versi «Qui pongo termine al discorso che si accompagna a certezza e al pensiero intorno alla Verità; da questo punto le opinioni mortali devi apprendere...» e contiene una descrizione della fisica e della cosmologia che ricalca idee che si ritrovano già negli Ionici.

Quale sia l'interpretazione dell'*essere* parmenideo è stato (ed è tuttora) molto dibattuto. Per Reale, «è chiaro che non si tratta di essere immateriale, come alcuni hanno preteso» [25]. Questo sarebbe evidente da alcuni specifici aspetti, come il carattere di sfera o espressioni del tipo «Tutto intero è pieno di essere». Per Severino [15] bisogna ricollegarsi direttamente agli Ionici per i quali è la stessa natura (*physis*) a rappresentare l'essere nella sua totalità. Questo discenderebbe dallo stesso titolo dell'opera di Parmenide e sarebbe reso ancora più evidente nell'opera del discepolo di Parmenide, Melisso di Samo, che, quasi per fugare ogni dubbio, abbandona l'intitolazione tradizionale e chiama il suo trattato 'Sulla Natura o sull'Essere'.

Ora, questa ambiguità è inevitabile. Infatti, la verità sull'*essere* viene rivelata da una Dea solo a chi «legge divina e giustizia hanno indotto a percorrere un cammino fuori dalla via battuta dagli uomini» (frammento 1). Come tale, cosa sia l'*essere* non può risultare immediatamente comprensibile: «per esso (l'*essere*) saranno nomi tutte quelle cose che hanno stabilito i mortali convinti che fossero vere» (frammento 8). Per questo motivo, il titolo del poema di Parmenide avrebbe potuto essere 'Sulla Natura, come, in realtà, è'. Ovvero, «l'*essere* sarebbe ciò di cui la natura sensibile è manifestazione al di là delle qualità sensibili» [35]. Per Parmenide, l'*essere* è dunque la vera essenza, l'intimo di sé che la natura tiene gelosamente nascosto, «l'Essere che si cela mentre si manifesta negli enti» (Heidegger).

Solo andando oltre le apparenze, si possono quindi ritrovare tutte quelle perfezioni, come immutabilità, indivisibilità, immobilità ... che vengono attribuite all'*essere* nella prima parte del poema. In questo senso, secondo Burnet [36], l'*essere* potrebbe considerarsi un'evoluzione dell'elemento primario dei Milesi: «La sostanza primaria dei primi cosmologi diventa una sorta di 'cosa in sé' e da allora non ha mai più perso questo carattere. Quelli che appaiono dopo, come gli 'elementi' di Empedocle,

le cosiddette ‘omeomerie’ di Anassagora e gli ‘atomi’ di Leucippo e Democrito, non sono altro che l’*essere* parmenideo».

Differente è l’interpretazione di de Santillana [37]. Per lui, l’*essere* è una denominazione ‘tecnica’ mediante la quale Parmenide indica un qualcosa che ha in mente per rappresentare l’elemento unificatore di tutte le cose che ci appaiono distinte e separate. Secondo de Santillana, per la sua fondamentale proprietà dell’estensione, questo qualcosa non può essere altro che lo spazio geometrico nelle sue caratteristiche fondamentali di mezzo continuo, omogeneo ed isotropo che, senza alcuna soluzione di continuità, va pensato unire una qualunque coppia di punti distinti. Le due interpretazioni potrebbero quindi convergere sull’idea di un substrato inosservabile, un etere, al limite tra il materiale e l’immateriale, che fornisca insieme la materia comune di tutte le cose ed il luogo, il ‘ricettacolo’, in cui esse sussistono (concetti che ritroveremo in seguito nella *chora* di Platone).

Nonostante l’*essere* non possa essere direttamente percepito, le sue proprietà fondamentali (immutabilità, indivisibilità, immobilità ...) possiamo riuscire ad intuirle. Anzi, l’altra identità ‘essere = pensare’ porta a concludere che l’*essere* è proprio ciò che ci rende possibile il concepirlo. Questo ci ricorda Eraclito per il quale la conoscibilità del mondo si spiega tramite il *logos*, quel principio regolatore che esiste diffuso sia come sostanza nell’universo che nell’anima umana.

Infine, il Frammento 5: «Indifferente è per me il punto da cui devo prendere le mosse; là infatti nuovamente dovrò fare ritorno». Esso indica non solo la perfezione circolare dell’*essere* ma, per quanto detto, anche che una sua comprensione debba avere le medesime proprietà di circolarità, un concetto anch’esso già ritrovato in Eraclito. La simultanea presenza di questi aspetti in comune, legati al modo di conoscere, suggerisce che la differenza tra Eraclito e Parmenide possa essere più sfumata rispetto alla radicale contrapposizione che viene di solito presentata. Come dice Gadamer, «nella totale diversità sono profondamente concordi, unanimi nel parlare entrambi dell’Uno e nel domandarsi come sia possibile parlare di questo Uno, avere un *logos*, formulare un discorso che sappia cogliere ciò che l’Uno dice di sé stesso».

Il significato della seconda parte del poema è, invece, quello di indicare i modi in cui la natura si manifesta agli uomini e che danno l’impressione del mutamento, della molteplicità, del movimento. Per esempio, la distinzione tra giorno e notte, che ci sembra del tutto naturale, è solo un’illusione. Secondo Popper [38], Parmenide potrebbe aver maturato questa sua visione dualistica della natura anche in seguito al suo studio dell’astronomia che gli fece comprendere che le fasi lunari sono solo un gioco di ombre e che Vespero, la stella della sera, e Lucifero, la stella del mattino, sono in realtà lo stesso pianeta Venere. Secondo Schrödinger, proprio la radicalità della visione di Parmenide giustifica la seconda parte del suo poema: «... la prima parte era in così totale contraddizione con i fatti osservati da indurlo a dare, insieme

alla sua vera concezione, una descrizione (potremmo dire attraente) del mondo come esso ‘per tutti è’, con il cielo, il sole, la luna e le stelle e tutto il resto. Ma questo, egli diceva, era solo la nostra impressione, un’illusione dei nostri sensi»[2].

Eppure, la convinzione di Parmenide che, dietro la variabilità dei fenomeni, ci sia qualcosa di eterno ed immutabile è fondamentale. Infatti, anche da questo deriva l’idea che la natura sia retta da leggi universali ed immutabili. Per questo, si può dire che la scienza classica occidentale si basa, prima di tutto, su due pilastri: l’*essere* di Parmenide ed il *logos* di Eraclito.

4.1.4 Melisso di Samo

Come anticipato, l’idea dell’*essere* parmenideo fu ulteriormente sviluppata da Melisso di Samo che tentò di dare una sistemazione ad alcuni aspetti rimasti incompiuti, come quelli legati alla sua finitezza ed immutabilità extratemporale. In Melisso, tali aspetti si traducono più precisamente così : «Sempre era ciò che era e sempre sarà»[39] ed anche «Ma come sempre (l’*essere*) è, così anche deve sempre essere infinito in grandezza»[40], perché se fosse limitato dovrebbe confinare con il non-essere, il nulla che non esiste.

Ma solo ciò che comprende tutto ed è uno può anche essere eterno ed infinito: «Dunque l’essere è eterno e infinito e uno e uguale tutto quanto. E non può perire né diventare maggiore né mutare disposizione, né soffrire né provare pena. Perché se fosse soggetto a qualcuna di queste cose non sarebbe più uno ... anche se in diecimila anni dovesse trasformarsi di un solo capello, in tutta la durata dei tempi andrebbe distrutto totalmente»[41]. Per questo motivo, l’eternità dell’*essere* è legata al suo ‘essere tutto’ ed al suo ‘essere uno’: «La molteplicità significa divisione, e questa significa movimento, e il moto cambiamento, e il cambiamento dissoluzione dell’essere. La salvezza dell’essere esige dunque che esso abbia l’unitotalità, che esclude tutta questa catena di conseguenze»[19], parole che rendono bene l’idea dell’Uno.

Infine il punto, forse, più controverso della concezione di Melisso: «Se dunque (l’*essere*) è, bisogna che esso sia uno: ma se è uno bisogna che esso non abbia corpo (*soma*); se invece avesse spessore avrebbe parti e non sarebbe più uno»[42]. Questo ha indotto diversi autori a concludere che Melisso aveva una concezione incorporea dell’*essere*. Questo punto di vista può essere contestato sulla base di vari argomenti. Il più forte è, forse, quello di Mondolfo [19] che ricorda l’altro passo nel quale invece si afferma il suo ‘essere pieno’, cioè quell’impenetrabilità (resistenza all’ingresso di altro) che è proprio uno degli attributi fondamentali della corporeità: «E neanche si muove perché non ha luogo dove subentrare, ma è pieno. Se ci fosse il vuoto subentrerebbe nel vuoto: non essendoci il vuoto non ha dove subentrare. Non può essere denso o rado perché non è possibile che il raro sia pieno allo stesso modo del denso, ma il rado, appunto perché rado, è più vuoto del pieno. Questa è la

distinzione che bisogna fare tra pieno e non pieno: se qualche cosa fa luogo e dà ricetta non è piena, se né fa luogo né dà ricetta essa è piena. Cosicché è necessario che sia pieno se il vuoto non c'è. Se dunque è pieno non si muove»[41].

In questo senso, il non avere 'corpo' e 'spessore' significa solo che l'essere di Melisso non ha le caratteristiche dei corpi ordinari. Esso va pensato, infatti, come un qualcosa di 'completamente pieno' che, quindi, non può avere quegli strati superficiali che limitano l'estensione dei corpi nelle varie dimensioni e che hanno densità differenti rispetto alla parte interna (quella che in inglese si chiama 'bulk'). Ritourneremo su questo aspetto quando discuteremo la visione dei primi atomisti, Leucippo e Democrito.

4.1.5 Pitagora e la sua scuola

Pitagora, originario dell'isola di Samo, visse tra il 580 ed il 500 circa. Forse fu allievo di Anassimandro e, come anticipato, gli si attribuiscono molti viaggi in Egitto ed in Oriente (Caldei e Magi). Si trasferì a Crotona dove fondò la sua scuola. In seguito a motivi politici, dovette rifugiarsi a Metaponto, dove morì, e la sua scuola fu dispersa. Pitagora non ha lasciato nulla di scritto. I più antichi testi della scuola di devono a Filolao, seconda metà del V secolo.

Secondo Aristotele, «I Pitagorici per primi si applicarono alle matematiche e le fecero progredire e, nutriti dalle medesime, credettero che principi di queste fossero principi di tutti gli esseri. E, poiché nelle matematiche i numeri sono per loro natura i principi primi, essi ritenevano di vedere, più che nel fuoco, nella terra e nell'acqua, molte somiglianze con le cose che sono e che si generano ... E inoltre pensarono che gli elementi del numero fossero elementi di tutte le cose e che tutto l'universo fosse armonia e numero»[43]. Questa loro dottrina derivava dall'aver osservato che precise leggi numeriche regolano i moti celesti, il susseguirsi di molti fenomeni naturali e gli accordi musicali.

Dalla loro rappresentazione grafica dei numeri come punti geometricamente disposti [25], però, i Pitagorici dedussero che i numeri non sono i veri principi primi ma derivano da due elementi fondamentali, l'illimitato ed il limitante, che ne determinano la parità: «Quando il numero dispari è diviso in due parti rimane un'unità in mezzo; ma quando viene diviso in due parti il pari, resta un campo vuoto senza determinazione e senza numero, dimostrando che è difettoso ed incompleto»(da Stobeo, come citato in [25]) . Quindi, estendendo questa proprietà alla natura, ne segue che «L'universo e le cose che sono in esso sono costituite dall'accordo di elementi limitanti e di elementi illimitati»(da Filolao, come citato in [25]).

Questa concezione ha un riscontro diretto nella loro concezione dell'universo che viene rappresentato come un cosmo limitato circondato da un vuoto illimitato che viene introdotto nel cielo tramite una specie di 'inspirazione': «Anche i Pitagorici

ammettevano l'esistenza del vuoto e dicevano che esso, per opera del 'soffio infinito' (*pneuma apeiron*), avanza nel cielo, come se questo respirasse, e che è proprio il vuoto a delimitare le cose della natura, quasi che il vuoto fosse un elemento che separa gli enti consecutivi e li delimita; e asserivano che ciò si verifica anzitutto nei numeri, giacché il vuoto delimita la loro natura. Presso a poco tali e tanti sono i motivi per cui alcuni affermano, altri negano l'esistenza del vuoto»[44].

Una corrispondenza fu anche stabilita tra i 'solidi platonici', cioè i cinque poliedri regolari inscrittibili in una sfera (tetraedro o piramide, cubo, ottaedro, dodecaedro, icosaedro), e gli elementi di Empedocle: «Pitagora, essendo cinque le figure solide dette anche matematiche, dice che dal cubo è nata la terra, dalla piramide il fuoco, dall'ottaedro l'aria, dall'icosaedro l'aria, dal dodecaedro la sfera del tutto», una teoria che va in realtà attribuita a Filolao [45].

Ci si convinse, infine, che nelle forme matematiche non risiede il vero principio delle cose, allo stesso modo del principio naturale del Milesi: «I principi e gli elementi di cui si servono i filosofi che sono detti Pitagorici sono assai lontani da quelli dei fisiologi ... gli enti matematici sono senza movimento»[46]. Piuttosto, il mondo delle forme matematiche rappresenta una realtà superiore immutabile di cui il mondo sensibile, nel suo divenire, è solo una copia. Per esempio, l'ideale della sfera ha un preciso corrispettivo nel fenomeno naturale per cui un corpo ruotante immerso in un fluido, in presenza di attrito, tende ad assumere alla fine la forma sferica. In questo senso, questa visione finale dei Pitagorici potrebbe essere considerata un punto di passaggio alla dottrina platonica delle idee.

4.1.6 Empedocle

Visse ad Agrigento tra il 480 ed il 420 a.C. Fu uomo di grande personalità, di cultura vastissima ed autorevole. Di lui ci restano vari frammenti di un poema, 'Sulla Natura', in cui espone la sua concezione del mondo. Egli tenta di riconciliare il 'principio di permanenza dell'essere' salvando, allo stesso tempo, la variabilità dei fenomeni attestata dalla nostra esperienza. Questo diventa possibile interpretando il nascere ed il perire come trasformazione, per mescolanza e separazione, di alcuni elementi fondamentali ed eterni: «Non vi è origine (*physis*) di nessuna delle cose mortali, né fine alcuna di morte funesta, ma solo mescolanza e separazione di cose mescolate, tuttavia il nome di origine (*physis*) per queste cose, è usato dagli uomini»[47]. Questi elementi, per Empedocle, sono quattro: fuoco, aria, acqua e terra.

Si noti come, in questo caso, il termine *physis* venga riferito al processo generativo piuttosto che a ciò che permane immutabile e rappresenta la costituzione ultima delle cose. Che i due concetti, per i Greci, si riassumessero in una sola parola era il loro modo di esprimere la fondamentale unità della natura.

La mescolanza e la separazione dei quattro elementi avviene sotto l'azione di due forze cosmiche antagoniste, 'odio' (*neikos*) e 'amicizia' (*philia*). La prima tende alla disgregazione degli elementi mentre la seconda porta all'unità dei molteplici. La loro azione sugli elementi viene fisicamente rappresentata tramite la formazione di un vortice che prima separa e poi tende a ricondurre tutto alla originaria forma sferica: «Le due forze sono in eterno conflitto: di volta in volta l'una oppure l'altra ottiene il predominio, ma senza annientare del tutto l'avversario perché, altrimenti, si otterrebbe l'immobilità assoluta o un moto del tutto caotico»[48].

Empedocle sviluppò anche una teoria della conoscenza. Essa si basa sull'affinità che esiste tra l'uomo e le cose in quanto si originano dai medesimi elementi. Così con la parte di noi omogenea alla terra si conosce la terra, con quella omogenea all'acqua si conosce l'acqua, e così via. Ebbe anche una concezione originale dei fenomeni biologici nella quale anticipò in qualche misura la visione evuzionistica della sopravvivenza degli esseri che riescono ad adattarsi alle condizioni ambientali.

4.1.7 Anassagora

Nacque a Clazomene intorno al 500 a.C. e si trasferì successivamente ad Atene dove rimase per circa un trentennio, tra il 480 ed il 450, e dove divenne amico e consigliere di Pericle. La sua morte si colloca approssimativamente intorno al 430.

Anche lui, tiene fermo il principio che nulla si crea e nulla si distrugge: «Del nascere e del perire i Greci non hanno una giusta concezione, perché nessuna cosa nasce né perisce ma da cose esistenti ogni cosa si compone e si separa. E così dovrebbero propriamente chiamare comporsi il nascere e separarsi il perire»[49].

Però, per lui i costituenti ultimi delle cose non sono solo i quattro elementi di Empedocle ma sono infiniti: «Bisogna supporre che in tutti gli aggregati ci siano molte cose e di ogni genere e semi di tutte le cose aventi forme, colori e sapori di ogni sorta»[50]. Tale infinita molteplicità di elementi, detti 'semi' o 'omeomerie', va associata a differenze qualitative. Cioè tali entità fondamentali danno luogo a parti qualitativamente identiche sia quando vengono divise infinite volte, «non c'è un minimo di piccolezza ma sempre si dà un minore», sia attraverso infinite addizioni successive, «ma anche del grande si dà sempre un maggiore»[51].

Originariamente le omeomerie erano tutte concentrate in un'unità indifferenziata: «Prima che queste si separassero, essendo tutte insieme, nessun colore era discernibile: lo proibiva la mescolanza di tutte le cose, dell'umido e del secco, del caldo e del freddo, del luminoso e dell'oscuro, e della terra molta che c'era e dei semi infiniti per quantità e in niente simili l'uno all'altro»[52]. Le cose, invece, pur essendo delle mescolanze, acquistano delle caratteristiche determinate per il prevalere di alcune qualità sulle altre.

Chiaramente, nella mescolanza originaria si ritrova l'*apeiron* di Anassimandro di cui mantiene la stessa assenza di ogni carattere specifico e dunque la stessa impercettibilità. Per Anassagora, però, tale mescolanza risulterebbe statica, priva di ogni forma di movimento se non ci fosse una forma di materia particolare: il *nous*. Tra tutte le omeomerie, essa è la più leggera e la più fine e l'unica capace di movimento autonomo. La sua funzione è quella di imprimere un movimento rotatorio alla immobile mescolanza originaria. «Il *nous* è illimitato, autocrate e non mescolato ad alcuna cosa ma solo è in sé stesso ... Se non fosse in sé stesso ma fosse mescolato ad altro le cose mescolate lo ostacolerebbero sì che non dominerebbe ogni cosa. Esso è la più pura di tutte le cose e ha cognizione completa di tutto. E il *nous* determinò la rotazione dell'insieme originario. E dapprima dal piccolo ha dato inizio al ruotare, poi la rivoluzione diventa più grande e più grande ancora diventerà ... Proprio la rotazione determinò il separarsi, e si separa il rado dal denso, e il caldo dal freddo, e l'oscuro dal luminoso, e l'umido dall'asciutto ... Però nulla si separa completamente da tutto il resto, ad eccezione del *nous*»[53]. Il *nous*, quindi, non è un principio astratto. Allo stesso tempo, differisce da tutti gli altri elementi e da tutto ciò che è composto, «una più fine materia che muovendosi nello spazio penetra in tutte le cose»[25] e che ricorda quella 'sostanza eterea' nella quale si trova diffuso il *logos* di Eraclito.

Una qualche confusione deriva forse dal termine *nous* che, tradotto come 'intelligenza', 'ragione', 'spirito', 'mente', 'senso' (inteso come significato), potrebbe indurre a dargli un significato spirituale. La spiegazione di questo, molto probabilmente, è la seguente. Nella visione di Anassagora, il processo di formazione delle cose produce alla fine infiniti mondi per i quali bisogna supporre che «uomini siano stati composti e altre creature quante hanno vita e che questi uomini abbiano città abitate ed opere costruite come da noi, e abbiano sole e luna e tutto il resto come da noi e che la terra produca per loro molte cose e di ogni genere»[52]. Poiché «la moltitudine delle cose distinte è tale che non si può conoscere né empiricamente né razionalmente»[54], il *nous*, che produce tutto ciò, e pure sarebbe un elemento materiale, finisce col rappresentare un'entità superiore.

La visione di Anassagora ha diversi aspetti che meritano di essere sottolineati. Mondolfo [19] ha osservato che in Anassagora i concetti di infinito ed infinitesimo raggiungono una consapevolezza più netta rispetto ai suoi predecessori. Questo si manifesta tramite la caratteristica delle omeomerie di mantenere la loro specifica qualità per numeri arbitrariamente grandi di divisioni o di accrescimenti. Questa nozione di infinito 'aperto', cioè non come processo compiuto, è una novità e potrebbe avere influenzato l'idea aristotelica di infinito 'in potenza'. Questa stessa nozione si ritrova anche nella progressiva estensione del moto rotatorio verso scale sempre più grandi nella quale si potrebbe addirittura intravedere il concetto del processo a cascata che è tipico della turbolenza.

Come già notato per Anassimandro, Mondolfo osserva [19] che, per l'esistenza

di infiniti mondi, il moto rotatorio associato al *nous* deve essere interpretato opportunamente. Cioè l'estensione a scale più grandi deve essere tale da preservare l'indipendenza dei moti rotatori dei singoli mondi che si vengono a formare. Di nuovo, questo porta ad un'interpretazione 'locale', cioè non rigida, della rotazione come appunto quella che si avrebbe in un fluido turbolento. Ulteriore conferma di questo aspetto la si ottiene da Volpi: «Il *nous* è innanzitutto animato da un movimento circolare; poi produce in uno spazio limitato un piccolo vortice che si dilata gradualmente intorno al proprio centro, estendendosi gradualmente attraverso lo spazio infinito. L'azione meccanica di questo vortice determina la separazione delle cose ...Il medesimo processo può verificarsi in innumerevoli punti dello spazio illimitato sicché anche Anassagora, come i filosofi di Mileto, ammette un'infinità di mondi»[48].

4.1.8 I primi atomisti: Leucippo e Democrito

Il primo filosofo atomista, Leucippo (secondo alcuni nato ad Elea e secondo altri a Mileto) visse tra il 480 ed il 420 e fu allievo di Zenone e di Melisso. Di lui ci resta un solo frammento della sua opera 'Sull'Intelletto': «Nulla si produce senza motivo, ma tutto con una ragione e necessariamente».

Democrito, invece, nacque ad Abdera nel 460 e visse molto a lungo, forse anche più di cento anni. Fu allievo di Leucippo e di lui si riportano viaggi in Egitto, in Persia ed addirittura in India (Diogene Laerzio, Demetrio, Antistene). Gli vengono attribuiti molti scritti su una grande varietà di argomenti: fisica, etica, matematica, musica ... con una profondità che viene riconosciuta da Aristotele: «In generale poi nessuno rivolse la sua meditazione ad alcun problema al di là dell'aspetto superficiale delle cose, tranne Democrito. Questi sembra essersi occupato di tutti i problemi e si distingue per la guisa del procedere»[55].

La dottrina di questi primi atomisti è esposta in moltissimi frammenti. Cominciamo da un frammento di Simplicio in cui viene riportato dapprima il pensiero del solo Leucippo dal quale risulta chiaro il suo legame con gli Eleati: «Leucippo, di Elea o di Mileto (perché su di lui c'è l'una e l'altra tradizione), parteggiando per la filosofia di Parmenide, non seguì però la stessa strada di Parmenide e di Senofane ... Infatti, mentre quelli concepivano l'universo come uno ed immobile e non concepivano neppure l'ipotesi del non-essere, egli mise innanzi gli atomi come elementi infiniti ed in eterno movimento ed affermò che le loro forme sono pure esse in numero infinito ... Inoltre egli non ammise che l'essere esistesse a maggior ragione del non-essere e considerò l'uno e l'altro ugualmente come cause delle cose che si generano. Infatti, poiché supponeva che la sostanza degli atomi fosse solida e piena, la chiamò essere e disse che si muove nel vuoto (*kenon*), al quale diede appunto il nome di non-essere, dicendo che esso esiste non meno dell'essere. Analogamente anche il suo discepolo Democrito di Abdera pose come principi il pieno ed il vuoto»[56].

Dunque, gli atomi di Leucippo sono lo stesso 'essere totalmente pieno' di Melisso frantumato in infiniti esseri-uni [25]. E poi, naturalmente, c'è il vuoto che, in quanto 'non-atomi', sarebbe non-essere. Esso però esiste a tutti gli effetti poiché viene posto sullo stesso piano degli atomi ed è considerato essenziale perché ci possa essere il loro movimento e, con esso, la formazione e la dissoluzione di tutte le cose. Il suo significato è ben espresso da Max Jammer: «Qui il vuoto significa chiaramente spazio non occupato. L'universo è fatto di pieno e vuoto. Lo spazio, in questo senso, è complementare alla materia ed è limitato dalla materia; materia e spazio si escludono reciprocamente»[57].

Questo emerge chiaramente da un altro passo di Aristotele: «Leucippo riteneva di poter portare argomenti che, accordandosi, con la sensazione, non privavano gli esseri né della generazione né della corruzione né del movimento né della molteplicità. Mentre da un lato egli accorda le sue dottrine con i fenomeni, dall'altro a coloro che sostengono l'Uno come immobile perché non esiste il vuoto egli risponde che il vuoto è il non-essere e che dell'essere nulla è non-essere: infatti l'essere è totalmente pieno. Tuttavia esso non è uno ma una pluralità infinita ed invisibile per la piccolezza delle masse. Questi molti si muovono nel vuoto (il quale infatti è) e raggruppandosi danno luogo alla generazione e disgregandosi originano la corruzione. Essi esercitano e subiscono azioni quando vengono in contatto: che è difatti la prova che non sono uno ... Ed ogni cambiamento ed ogni effetto subito si produce in questo, cioè per la separazione e la distruzione che si determina per effetto del vuoto, e per l'accrescimento che analogamente si verifica quando nei vuoti si insinuano altri solidi»[58].

Atomi e spazio vuoto sono dunque alla base di tutto, essi sono gli elementi fondamentali della natura, la vera *physis*. Tutto il resto è opinione soggettiva. Ed infatti Democrito dice «Opinione è il dolce, opinione è l'amaro, opinione il caldo, opinione il freddo, opinione il colore; *physis* solo gli atomi ed il vuoto»[59]. Per questo egli nega ogni valore all'esperienza mediante i sensi: «L'uomo deve rendersi conto, per mezzo del presente criterio, che egli è [per effetto delle apparenze sensibili] tenuto lontano dalla verità»[60]. Democrito coglie però in questo qualcosa di paradossale. Infatti fa poi dire ai 'Sensi': «Povero Intelletto, spero di sconfiggerci procurandoti la prova grazie a noi? La tua vittoria è la tua sconfitta»[61].

Il movimento degli atomi è eterno: «Dicevano che i corpi primi (primi secondo loro) e cioè gli atomi si muovono eternamente nel vuoto infinito per una forza che li costringe»[62]. Ma qual è la causa di questo eterno movimento? Per Empedocle erano le due forze cosmiche antagoniste. Per Anassagora era il *nous*. Negli atomisti il movimento è intrinseco alla natura degli atomi, un po' come l'incessante moto rotatorio dell'*apeiron* di Anassimandro. Questo perenne movimento assurge al ruolo di necessità universale (*ananke*). Questo emerge dal frammento di Leucippo e viene confermato esplicitamente da un passo di Diogene Laerzio in cui riporta il pensiero di Democrito: «Tutto si produce secondo necessità, poiché la causa della

formazione di tutte le cose è quel movimento vorticoso che egli chiama appunto necessità»[63]. Quindi, come già per Anassimandro ed Anassagora, questo eterno movimento, unito all'infinità dello spazio e all'infinità degli atomi, produce infiniti mondi: «Leucippo e Democrito dicono che i mondi sono infiniti di numero nel vuoto infinito e che derivano da atomi infiniti di numero»[64].

Andiamo infine al punto dell'indivisibilità degli atomi cominciando con un passo di Aristotele: «Democrito e Leucippo affermano che per mezzo di corpi indivisibili sono composte tutte le cose, che questi indivisibili sono infiniti sia per il numero che per le forme e che le cose differiscono tra loro per gli elementi di cui sono costituite e per la posizione e l'ordine di essi»[65]. Ed anche da Simplicio: «Quelli che hanno abbandonato la divisione all'infinito, per la ragione che non possiamo dividere all'infinito ed assicurare con questa la continuazione indefinita della divisione, dicono che i corpi sono costituiti di elementi indivisibili e si decompongono poi in questi indivisibili. Tranne che, mentre Leucippo e Democrito reputano che la causa dell' indivisibilità dei corpi primi sia non soltanto l'inalterabilità ma anche la loro piccolezza e l'essere privi di parti, Epicuro più tardi non ammise che i corpi primi fossero privi di parti e disse che essi sono indivisibili solo per l'inalterabilità»[66].

Dunque, queste sono le caratteristiche fondamentali degli atomi: l'essere 'totalmente pieni', che garantisce la loro mutua impenetrabilità, e l'essere indivisibili. La seconda deriva parzialmente dalla prima (è concepibile che solo qualcosa che abbia al suo interno delle parti non omogenee possa essere diviso) ma anche dalla loro piccolezza per la quale non possono essere direttamente percepiti. Questo è confermato in un altro passo tratto dal libro di Aristotele 'Su Democrito': «Egli [Democrito] reputa che le sostanze siano così piccole da sfuggire ai nostri sensi»[67].

Quindi, essendo una creazione del puro intelletto, non sorprende che essi non possano essere identificati con gli atomi della fisica moderna. Questi ultimi non sono affatto 'totalmente pieni' essendo composti da un nucleo molto piccolo e denso e di elettroni che gli orbitano intorno (con un diametro delle orbite che è circa centomila volte maggiore delle dimensioni nucleari). Inoltre, a causa del fenomeno della ionizzazione, in cui gli elettroni vengono infinitamente allontanati dal nucleo, essi risultano fisicamente divisibili. Si potrebbe allora tentare di identificare gli atomi di Leucippo e Democrito con il nucleo e gli elettroni ma anche questo non andrebbe bene. Infatti, il nucleo è divisibile in protoni e neutroni e questi ultimi sono entrambi composti di quarks. Essi potrebbero al massimo essere identificati con i costituenti ultimi della materia qualora, un domani, la fisica arrivasse ad identificarli con certezza ². Per esempio, oggi gli elettroni e i quarks sono considerati elementari, senza struttura, puntiformi. Ma un domani? Ritourneremo su questo

²Come descritto nel Cap. 2, si può però costruire un modello quantistico che simula la visione degli antichi atomisti, quello delle 'sferette rigide' (cioè impenetrabili) che, una volta introdotte come entità elementari, tendono a crearsi spontaneamente formando quel 'condensato di Higgs' oggi utilizzato come modello dello stato di minima energia [68].

punto nel capitolo finale.

4.2 Brevi cenni all'antico pensiero orientale

Fritjof Capra, nel suo libro 'Il Tao della Fisica' [69], nel quale mette in evidenza le interessanti analogie tra vari aspetti della fisica moderna e alcune filosofie orientali, inizia ricordando il modo di procedere delle scienze di oggi. Ogni disciplina, per definire il suo campo di applicazione, comincia selezionando alcuni aspetti, ritenuti più significativi e suscettibili di analisi quantitative, e costruisce un modello della realtà, della quale, per definizione, non si possono prendere in considerazione tutti i possibili aspetti. Sulla base di questa 'mappa intellettuale' si formulano poi delle predizioni da confrontare con le osservazioni sperimentali. Questo processo di selezione e semplificazione della realtà, implicito nel metodo scientifico, è stato fondamentale per il progresso della conoscenza nei vari settori. Infatti, 'filtrando' solo certe componenti del reale, riduciamo l'infinita ricchezza di informazioni da analizzare e possiamo raffinare grandemente l'indagine di quegli aspetti che siamo interessati a descrivere.

Ma la 'mappa' non è il 'territorio'. Non deve quindi sorprendere che questo modo di conoscere possa anche risultare insoddisfacente. Per esempio, come già ricordato alla fine del Cap. 3, una certa insoddisfazione fu espressa da alcuni grandi fisici del Novecento. Essi avevano notato come la meccanica quantistica portava ad una visione della realtà come un tutt'uno profondamente interconnesso. Dunque il loro auspicio di una possibile sintesi tra conoscenza razionale ed esperienza mistica unitaria nasceva come reazione [70] «contro la rigorosa separazione delle attività dello spirito umano in camere stagne in atto dal XVII secolo»³. Essi coglievano un grande contenuto di verità in alcune antiche filosofie orientali (Taoismo, Induismo, Buddismo), nella loro visione per cui la realtà ultima risulta preclusa ad una mente che tenti di raggiungerla adottando solo rigide categorie logiche. E' necessaria, invece, quella forma di conoscenza immediata ed unitaria che è tipica dell'intuizione mistica. Questo si trova, ad esempio, in un passo del Chuang-Tzu del Taoismo, «la grande sapienza tutto abbraccia, la piccola sapienza distingue», o anche nel modo in cui viene descritta la conoscenza del *Brahman* nelle antiche *Upanisad* induiste (VIII - VI secolo a.C.): «Ivi non giunge la vista, né la parola e neppure la mente. Non sappiamo né conosciamo in quale modo Lo si possa insegnare» [71].

Come già ricordato, questo stesso ideale di conoscenza era anche alle origini del primo pensiero greco, soprattutto in Eraclito, e si coglie anche nella venerazione di Platone per un antico passato. Per lui 'filosofia', ovvero amore per la sapienza,

³Paradossalmente, questa separazione cominciò a manifestarsi subito dopo un fondamentale passo verso una descrizione unitaria della natura, cioè quella sintesi newtoniana che mostrava come il moto dei corpi celesti e quello dei corpi sulla Terra fossero governati dalla stessa legge di gravitazione universale. La concezione della natura di Newton (fisico, alchimista, teologo,..) era però molto diversa da quella di uno scienziato moderno.

non significherebbe tanto l'aspirazione a qualcosa di mai raggiunto ma soprattutto tendenza a recuperare un qualcosa di già vissuto. Questo si ritrova in diversi passi, sia suoi che di Aristotele, per esempio: «E l'intuizione dell'intuibile e del non mescolato e del santo, la quale lampeggia attraverso l'anima come un fulmine, permise di toccare e di contemplare, una volta sola. Perciò sia Platone che Aristotele chiamano questa parte della filosofia l'iniziazione suprema, in quanto coloro che hanno toccato direttamente la verità pura riguardo a quell'oggetto ritengono di possedere il termine ultimo della filosofia, come in una iniziazione»[72]. Quindi, andando sufficientemente indietro nel tempo, sembra esserci stato un ideale conoscitivo comune tra pensiero greco antico e filosofie orientali, in accordo con l'idea di Jaspers del Periodo Assiale che abbiamo ricordato [6, 7]. Successivamente, però, questa comunanza si è persa, da quando il pensiero occidentale si è progressivamente allontanato da questo ideale e andato configurandosi come articolato sistema razionale.

I motivi per cui questo è successo sono sicuramente molteplici. Per quello che qui ci interessa, vorremmo sottolinearne uno che riguarda direttamente l'indagine fisica. Come già ricordato, la moderna scienza occidentale nasce da un processo di selezione e semplificazione della realtà. Esso è necessario per limitare l'infinita molteplicità dei fenomeni e delle cose e viene di solito controllato mediante approssimazioni successive, cioè cercando di aumentare progressivamente sia il dominio di applicazione che la precisione della 'mappa' e delle osservazioni. Invece, nelle filosofie orientali, ci si è concentrati su quell'entità sfuggente, il vuoto, il cui limite darebbe l'accesso alla realtà ultima. Questo si ritrova, per esempio, nel 'Tao Te Ching', il testo fondamentale del Taoismo, dove si dice che «Chi cerca l'erudizione, ogni giorno aggiunge qualcosa. Chi cerca il *Tao*, ogni giorno toglie qualcosa». O, come abbiamo già ricordato, nell'Induismo dove nel vuoto, ovvero «ciò che è di là dall'udito, di là dal tatto, di là dalla vista, di là dal gusto e dall'olfatto», si può arrivare a percepire il *Brahman*, «l'indefettibile ed eterno, senza principio e senza fine, più grande del grande e duraturo». In questo si cercava un rimedio contro l'angoscia ed il dolore che caratterizzano la condizione umana nella convinzione che solo così «l'uomo si salva dalle fauci della morte». Però, proprio perché il vuoto è, per sua natura, estremamente elusivo, questa forte polarizzazione su di esso ha rappresentato un ostacolo a che si sviluppasse nel mondo orientale la scienza come la intendiamo noi.

Questo lontano passato, in cui si cercava nel vuoto la vera essenza della natura, contiene comunque un'intuizione fondamentale che, da un canto, ci ricorda la concezione quasi religiosa della *physis* dei presocratici e, dall'altro, ci riporta ancora all'idea di Fermi sulla fisica del futuro. Per questo, è opportuno ricordare alcuni aspetti essenziali dell'antico pensiero orientale.

4.2.1 Il Taoismo

La dottrina Taoista, ad un primo contatto, risulta di difficile comprensione per le profonde differenze con il modo di pensare occidentale. Come mostreremo schematicamente nel seguito, però, confrontando tra loro diverse traduzioni, si possono trovare alcune analogie con il pensiero greco presocratico che possono aiutarci a chiarire meglio alcuni degli aspetti di maggiore interesse ai fini della nostra trattazione.

Il testo fondamentale del Taoismo, il 'Tao Te Ching', il cui titolo potrebbe essere reso come 'Libro della Via e della Virtù', da *Ching* (libro), *Tao* (via) e *Te* (virtù), è composto da circa cinquemila ideogrammi divisi in ottantuno capitoli. Tradizionalmente, viene attribuito a Lao-Tzu, un vecchio (*lao*) maestro (*tzu*) contemporaneo di Confucio e quindi vissuto nel VI secolo a.C. Ricerche moderne fanno però pensare che il testo potrebbe anche essere posteriore di un paio di secoli e magari frutto di diversi autori. Per formarsi un'opinione dei vari aspetti, è utile confrontare diverse traduzioni. Uno studio comparato molto approfondito è quello di Wing-tsit Chan [73]. Ci sono anche parecchie versioni in lingua italiana. Una con aspetti poetici è quella che si trova in ref.[74]. Uno studio recente ed accurato, che riporta esplicitamente diverse traduzioni di altri autori, è quello di Shantena Sabbadini [75] che ha tradotto direttamente dal cinese in italiano e che assumeremo nel seguito come riferimento.

Il primo punto è capire il vero significato del *Tao*: «Per gli antichi Taoisti, il *Tao* o la 'Via' non è il giusto modo di comportarsi dentro la società, ma il modo in cui funziona l'universo, in altre parole l'Ordine della Natura»[76]. In questo senso, «Il *Tao*, come Ordine della Natura che porta all'esistenza tutte le cose, ci ricorda il *logos* di Eraclito che controlla in modo ordinato il processo del mutamento»[76]. A parte il confronto con il *logos* di Eraclito, Needham dice che sarebbe interessante esplorare anche le analogie del *Tao* con la *physis* dei presocratici. In questo, senza che lui lo dica esplicitamente, si trova un riflesso di quel doppio significato per cui *physis* veniva interpretata sia come sostanza materiale che rappresenta l'elemento comune e, dunque, la costituzione ultima di tutte le cose, sia come la fonte del processo generativo, l'origine da cui tutto scaturisce.

Inteso come sostanza, il *Tao* è un mezzo indifferenziato da cui si originano tutte le cose. Esso va pensato come un fluido con gli stessi attributi del vuoto. Infatti, scorre senza essere percepito e senza incontrare resistenza (vedi cap. 25):

«C'è qualcosa che è indistinto e perfetto,
e precede la nascita del cielo e della terra.
Silenzioso ! Vuoto!

Autonomo ed immutabile.

Si muove in cerchio senza ostacoli.

E' la madre dell'universo noto e di quello ignoto.

Non conosco il suo nome; per indicarlo lo chiamo Tao.
 Se gli dovessi dare un nome, lo chiamerei Grande.
 Grande significa partire;
 partire significa andare lontano;
 andare lontano significa ritornare ...»

Lo stesso legame con il vuoto si ritrova in diversi altri passi. Per esempio nel cap. 4:

«Il Tao è vuoto (come una ciotola), se viene usato non si riempie mai.
 E' senza fondo
 sembra il progenitore di tutte le cose ...»

Ed è anche ripetuto nel cap.14 dove le caratteristiche del vuoto vengono usate per definire la sua fondamentale elusività:

«Guardato ma non visto; il suo nome è L'Invisibile.
 Ascoltato ma non udito; il suo nome è L'Inaudibile.
 Toccato ma non afferrato; il suo nome è L'Incorporeo.
 Queste tre qualità non si possono analizzare,
 perché si mescolano e diventano un'unità ...»

Che il *Tao* sia rappresentabile come una materia indifferenziata si ritrova anche nel cap.21:

«Quella che può essere considerata la materia del Tao è solo indistinta, solo confusa.
 Confusa! Indistinta! Ma al suo interno ci sono le forme.
 Indistinta! Confusa! Ma al suo interno ci sono le cose.
 Profonda! Oscura! Ma al suo interno ci sono le essenze...».

Dunque, essendo eterno, indifferenziato e vuoto, il *Tao* ci ricorda il *Chaos* di Esiodo e l'*apeiron* di Anassimandro. Come il *Chaos* e l'*apeiron*, il suo precedere «la nascita del cielo e della terra» va interpretato nel senso di un'eterna cosmogonia. Essa si compie in accordo a due principi fondamentali, lo *Yin* e lo *Yang*:

«Il Tao genera l'uno,
 l'uno genera il due,
 il due genera il tre,
 il tre genera tutte le cose.
 Tutte le cose portano lo yin e abbracciano lo yang
 e raggiungono l'armonia mescolando i due soffi vitali ...».

Dunque i mutamenti del *Tao* acquistano una struttura definita grazie alle due polarità *Yin* e *Yang*. Esse simboleggiano le coppie di opposti (luce - oscurità, maschio - femmina, cielo - terra ...) e il loro equilibrio esprime armonia. In questo ritroviamo ancora analogie con l'antico pensiero greco. Infatti, a parte il ricordato riferimento di Needham al *logos* di Eraclito, l'esistenza dei due principi antagonisti

ci ricorda anche le due forze cosmiche di Empedocle, ‘odio’ (*neikos*) e ‘amicizia’ (*philia*).

Allo stesso tempo, naturalmente, ci sono aspetti che non esistono nel pensiero greco. Per esempio, nel cap. 4, del *Tao*, che pure è l’origine di tutte le cose, si dice anche che «Smussa le punte, scioglie i nodi. Attenua lo splendore, si unisce con la polvere», quasi che nelle sue funzioni svolgesse un servizio. Questo si nota anche dove si dice che il *Tao* pur essendo ‘Grande’ potrebbe anche essere chiamato ‘piccolo’. Esso infatti «Nutre e veste i diecimila esseri ma non ne diventa padrone».

La presenza dei due principi in tutte le cose e l’idea di armonia che proviene dal loro equilibrio hanno implicazioni per l’uomo e l’organizzazione della società. Per esempio, un buon governante è colui che, nei suoi comportamenti, si ispira al *Tao*. Per questo deve adempiere alle sue funzioni con spirito di servizio e rendersi quasi ‘invisibile’. Nell’uomo, raggiungere l’armonia richiede invece di distaccarsi dalle passioni tendendo allo stato di vacuità. In questo modo si può riacquistare la propria vera natura ed entrare in unità con il *Tao*. Questo è espresso nei cap. 16 e 59, di cui riportiamo alcune parti nella versione particolarmente poetica di ref.[74]:

«...Essere moderati significa seguire il Tao senza deviazioni.

Seguire il Tao senza deviazioni significa riempirsi di energia benefica.

Riempirsi di energia benefica significa superare ogni difficoltà.

Superare ogni difficoltà significa sapere che ogni cosa è possibile ...»

ed anche

«...Il divino è unità col Tao.

L’unità col Tao è liberazione dal dolore,

è indescrivibile piacere, vita eterna».

Per concludere questa breve esposizione, va detto che l’esistenza di due principi fondamentali che danno alla realtà una struttura di tipo bipolare precede il Taoismo. Infatti si ritrova nei due elementi, la linea intera e la linea spezzata, che stanno alla base dell’*I Ching*, il ‘Libro dei Mutamenti’, che è molto più antico (circa XII secolo a.C.) del *Tao Te Ching*. Il rapporto tra i due testi è ben descritto dal grande sinologo tedesco Richard Wilhelm che scrive a questo proposito: «Lao-Tzu conosceva l’*I Ching* e ne trasse ispirazione per alcuni dei suoi aforismi più profondi. Anzi, tutto il suo pensiero è impregnato degli insegnamenti del Libro. Anche Confucio lo conosceva e ne fece profondo oggetto di riflessione. Il Libro dei Mutamenti compilato e commentato da Confucio è quello giunto sino a noi ... L’idea basilare del Libro è quella per cui il significato del mutamento non viene più ricercato nelle singole cose transitorie ma nell’immutabile, eterna legge che opera in ogni mutamento. Questa legge è il Tao di Lao-Tzu, il corso delle cose, il principio dell’unità nella molteplicità»[77].

4.2.2 L'Induismo delle Upanisad

La fonte spirituale dell'Induismo è costituita dai *Veda* (sapere rivelato), una raccolta di antichi testi scritti in sanscrito da anonimi saggi in un arco temporale di diversi millenni che risale sino al 3000 a.C. Le loro ultime parti, le *Upanisad* (insegnamenti ricevuti stando ai piedi del maestro) contengono quella che viene considerata l'espressione più alta della dottrina e, nel caso delle più antiche, risalgono al VIII - VI secolo a.C.

Il punto di partenza delle *Upanisad* più antiche ricorda, in qualche modo, quello dei primi naturalisti greci: l'origine ultima di tutte le cose. Tale origine viene identificata nel *Brahman*: «Spirito universale, causa efficiente e materiale di tutti gli esseri, trascendente i tre atti di creazione (*srsti*), mantenimento (*sthiti*) e riassorbimento (*laya*)» [3]. Esso è «la fonte di ogni esistenza, ciò da cui l'universo è nato» [78]. Nelle *Upanisad*, dunque, il *Brahman* emerge come l'unico vero dio e tutti gli altri sono solo sue emanazioni, dando così all'Induismo un carattere essenzialmente monistico nonostante la presenza di un gran numero di divinità. Questo lo si può dedurre da vari passi, per esempio quello in cui un saggio, interrogato su quanti dei in realtà vi siano, prima risponde secondo il rituale dicendo che ve ne sono 3306, poi riduce il numero a trentatre, a sei, a tre, a due, a uno e mezzo ed infine ad uno [79].

Il *Brahman* non è oggetto di indagine razionale. Può essere direttamente sperimentato solo mediante quella parte di noi stessi, l'anima immortale o *atman*, che si origina dall'individuarsi dello Spirito universale e dunque è ad esso omogenea. Solo grazie a questa affinità, si può arrivare a capire che le infinite cose ed eventi non sono altro che differenti manifestazioni del *Brahman*: «Colui il quale conosce questo grande miracolo primigenio, colui il quale sa che il Brahman è tutta la realtà, costui medesimo è il signore dei mondi. Come potrebbe essere vinto colui che conosce il grande miracolo primigenio, colui che sa che il Brahman è il reale?» [80]. Questa funzione generatrice del *Brahman* viene spiegata con diversi paragoni, ad esempio l'emissione del filo dal ragno, il germogliare dell'erba dalla terra, la crescita dei capelli sul capo di una persona.

L'esistenza di un'anima immortale viene inquadrata, all'interno della tradizione indiana, nel ciclo di rinascite successive (*samsara*) comandato dalla legge di causa ed effetto del *karma* e, quindi, richiede di spiegare quale sia il rapporto tra l'anima immortale e la dimensione fisica e psichica dell'esistenza temporanea. Questo viene descritto tramite la metafora del carro [81] (che presenta sorprendenti analogie con il racconto presentato nel Fedro di Platone). In questo paragone, l'*atman* è il viaggiatore, il corpo è il carro, l'intelletto (*buddhi*) è il conducente, la mente o volontà (*manas*) sono le redini, i sensi sono i cavalli e gli oggetti dei sensi sono le strade che si percorrono. Dunque, l'*atman* utilizza corpo, sensi, intelletto e mente, per sperimentare e conoscere questo mondo. Resta però fondamentalemente differente; non solo perché sopravvive alla morte ma anche perché riesce ad avere

accesso all'altro mondo durante il sonno e, come frammento del *Brahman*, può dare libero sfogo alla sua attività creatrice. Questa è quella condizione «nella quale non esistono né carri né cavalli e neppure strade, ma è egli [l'*atman*] che crea i carri, i cavalli e le vie e, svincolandosi col sonno da questo corpo, lasciando il respiro a sorvegliare il basso nido, va immortale dove vuole»[82].

Abbiamo detto che la realtà è un'emanazione diretta del *Brahman* e, dunque, ha un carattere fundamentalmente unitario. A causa della nostra ignoranza (*avidya*), abbiamo però la 'magica illusione' (*Maya*) della molteplicità e della transitorietà. Liberarsi di questa illusione è possibile se riusciamo a percepire l'intera realtà come 'tessuta' sullo spazio etereo (*akasa*), cioè su quello che ci appare come 'vuoto'. Questo, infatti, a sua volta, è 'tessuto' secondo il principio del *Brahman*, come privo di qualunque determinazione, e fornisce un simulacro della sua stessa natura eterna. Questa visione viene spiegata nel dialogo tra il saggio Yajnavalkya ed alcuni interlocutori della casta sacerdotale (*brahmana*), tra cui una donna, Gargi [83]. Di esso riportiamo alcuni passi:

«Ella [Gargi] gli disse: 'Ciò che, o Yajnavalkya, è al di sopra del cielo ed è al disotto della terra, ciò che si trova fra questo cielo e questa terra, che chiamiamo passato, presente e futuro, su che cosa è tramato e tessuto?'

Egli rispose: 'O Gargi, ciò che è al di sopra del cielo ed è al disotto della terra, ciò che si trova fra questo cielo e questa terra, ciò che si chiama passato, presente e futuro, tutto ciò è tessuto e tramato sullo spazio etereo'.

'E su che cosa, or dunque, lo spazio etereo è tramato e tessuto?'

Egli allora le disse: 'Lo spazio etereo è tessuto e tramato su quel principio che i brahmana, o Gargi, chiamano l'Indefettibile, che non è né grosso né sottile, che non è né corto né lungo, che non è fiamma e non è liquido, che non è colorato né oscuro, che non è né aria né etere, che non è aderente, che non ha sapore, non ha odore, è privo di occhi, è privo di orecchi, è privo di voce, è impercettibile, è privo di calore, non ha soffio, non ha bocca, è immisurabile, privo di interno e privo di esterno; questo principio nulla mangia e da nessuno è divorato ... E' invero su questo principio che lo spazio etereo è tessuto e tramato».

Attraverso lo spazio etereo, la percezione dell'unità di tutto nel *Brahman* diventa dunque possibile. Essa rappresenta una forma di conoscenza superiore che acquista valore salvifico e, come tale, non può essere solo il risultato di un ragionamento, un processo puramente razionale. E' invece uno stato di coscienza che si accompagna ad un alto grado di cultura etica: «Non colui che non ha cessato la sua cattiva condotta, non colui che non è sereno, non colui che non è raccolto, non colui la cui mente è alterata, può ottenere questo mediante l'intelligenza». Solo così si può produrre quell'intima disposizione che permette di raggiungere questa verità, se non, addirittura, di ottenerla come fosse una 'grazia'.

Questo particolare aspetto della conoscenza del *Brahman* come grazia (che verrà sviluppato in epoca molto più tarda nel XIII secolo d.C. [84]) è suggerito da un passo in cui si racconta di un giovane discepolo che per ben dodici anni aveva mantenuto i fuochi sacrificali ed era in uno stato di grande sofferenza. Un giorno, gli 'spiriti dei fuochi' vedendolo soffrire dissero tra sé: «“Egli soffre. Ci ha accuratamente mantenuti. Istruiamolo”. E gli dissero: “Brahman è spirito vitale (*prana*), Brahman è felicità (*ka*), Brahman è spazio etereo (*kha*). Ciò che è ka è kha e ciò che è kha è ka”. Così spiegarono a lui lo spirito e lo spazio»[85]. Per questo, *ka*, *kha* e *prana* diventarono anche nomi mistici del *Brahman*.

Il valore salvifico della conoscenza del *Brahman* introduce un elemento importante nella dottrina del ciclo delle incarnazioni della tradizione indiana. Infatti tale conoscenza porta alla liberazione (*moksa*), ad uscire dal ciclo delle rinascite, al 'sentiero degli dei'. Altrimenti, si resta nel *samsara*, sul 'sentiero dei padri' (*mani*). Infatti, coloro che seguono il sentiero dei padri, «costoro entrano nel fumo del rogo, dal fumo nella notte, dalla notte nella quindicina lunare oscura, dalla quindicina oscura nei sei mesi in cui il sole procede verso sud, da questi mesi nel mondo dei mani, dal mondo dei mani nella luna ... Allorché per loro è finita questa tappa, essi ritornano nello spazio, dallo spazio nell'aria, dall'aria nella pioggia, dalla pioggia nella terra ... Così risalendo i diversi domini, essi continuano il ciclo». Invece, coloro che seguono il sentiero degli dei, «costoro entrano nella fiamma, dalla fiamma nel giorno, dal giorno nella quindicina lunare chiara, dalla quindicina chiara nei sei mesi in cui il sole procede verso nord, da questi mesi nel mondo degli dei, dal mondo degli dei nel sole, dal sole nella regione delle folgori; pervenuti alla regione delle folgori, giunge un essere che li trasporta nel mondo del Brahman dove essi abitano in insondabili lontananze, dalle quali mai più quaggiù ritornano»[86].

4.2.3 Il Buddhismo ed alcuni suoi sviluppi

Col termine Buddha (l'Illuminato), la tradizione indiana denota una serie di personaggi apparsi sulla Terra dalla più remota antichità, i quali, avendo conseguito la suprema illuminazione spirituale (*bodhi*) hanno assunto il compito di impartire all'umanità insegnamenti adatti al particolare momento storico della loro comparsa. L'ultimo di costoro, il Buddha per antonomasia, di nome Siddhartha, detto Gautama, nacque intorno al 563 a.C. e morì probabilmente intorno al 483. Egli fu, dunque, contemporaneo a Confucio e Lao Tzu.

L'insegnamento del Buddha non era direttamente rivolto alla concezione del mondo. Questo, non perché il problema non debba interessare. Solo, egli era convinto che, per affrontare questo tipo di questioni, l'uomo si dovesse prima liberare dalle sue fragilità, da quel senso di precarietà che caratterizza la sua esistenza. Quindi, la sua infinita compassione lo indusse a cercare un rimedio contro l'angoscia ed il dolore che caratterizzano la condizione umana.

La dottrina del Buddha, enunciata nelle quattro Nobili Verità, è che l'infelicità è intrinseca alla vita umana. In ultima analisi, questo deriva da un fondamentale egoismo, dall'idea di avere un proprio sé da preservare ad ogni costo. Il rimedio consiste, quindi, nell'eliminare questa tendenza mediante un percorso di ascesi, l'Ottuplice Sentiero. In questo senso, gli insegnamenti del Buddha hanno un fine eminentemente pratico. Questi insegnamenti presuppongono, però, una metafisica molto complessa, i cui aspetti erano, certe volte, solo accennati nella dottrina originale. Su questi aspetti si concentrarono dunque le varie scuole del Buddhismo nei secoli successivi arrivando a sviluppare concezioni filosofiche molto profonde come la 'teoria del vuoto' e della 'doppia verità' del Buddhismo della Scuola *Madhya-maka* ('via di mezzo'). Questi sviluppi successivi sono interessanti per la visione del vuoto a cui portano ma non possono essere compresi senza ricordare brevemente alcuni aspetti essenziali dell'insegnamento originario. Per maggiori dettagli sul Buddhismo indiano, rimandiamo a [87, 88] oltre che ai testi originari [89]. Inoltre, per la concezione estetica del vuoto rimandiamo a [90] e per il Buddhismo Zen a [91].

L'egoistico attaccamento alla vita, che sta alla base della sofferenza umana, nasce dalla nostra ignoranza (*avidya*). Essa ci impedisce di riconoscere che l'infelicità è inevitabile nella condizione umana e ci fa percepire le cose come entità separate e noi stessi come se avessimo un'esistenza indipendente. L'uso dello stesso termine delle *Upanisad* e l'accento sull'aspetto di una visione frammentata della realtà suggeriscono che l'*avidya* non vada vista come un difetto del singolo individuo ma come un effetto universale che tende a velare la nostra coscienza. Sono le sensazioni e le azioni che derivano da questa ignoranza a determinare quella catena di reazioni che si propaga nel circolo perpetuo di nascita e morte del *samsara* secondo la legge del *karma*. L'insegnamento fondamentale del Buddha è che è possibile spezzare questa catena e raggiungere quell'illuminazione in cui ci si libera dalla falsa immagine del sé e delle cose e cessa l'attaccamento alla vita. Questo stato di liberazione è detto *nirvana* (interpretato come congiunzione di *nir*=cessazione con *vana*= desiderio ovvero, alternativamente, con *va*=soffio).

In questa visione ci sono diversi ingredienti che già compaiono nelle *Upanisad* ma ci sono anche importanti differenze. Per esempio, il Buddha nega che nell'uomo ci sia un'anima immortale, che ci sia cioè l'*atman*. L'individualità consiste invece solo in un aggregato temporaneo di elementi fisici e psichici (*skandha*) che si dissolve con la morte ma i cui effetti si perpetuano ineluttabilmente nel *karma*. Quindi il ciclo delle rinascite non è una vera 'metempsicosi', intesa come trasmutazione dello stesso *atman* in un nuovo corpo mortale, come nelle *Upanisad*, ma piuttosto andrebbe descritta come una concatenazione infinita di effetti transpersonali.

Questi aspetti venivano criticati da parte di alcuni filosofi brahmanici [92] che obiettavano al come potersi raccogliere i frutti di un'esistenza anteriore se tutto è temporaneo e destinato ad estinguersi. Essi vedevano in questo una doppia

ingiustizia: l'agente non raccoglie il frutto delle sue azioni e qualcun altro incolpevole soffre le conseguenze degli atti compiuti da altri. Inoltre i discepoli domandavano cosa avvenisse dopo che nella vita si raggiunge l'illuminazione. Il corpo continua a funzionare fino alla morte ma cessa ogni impulso alla rinascita. Allora, cosa succede all'illuminato dopo la morte, cos'è il *nirvana*?

Si dice che il Buddha abbia subito sentito che due aspetti della sua dottrina potevano riuscire difficili per i discepoli: la visione del *karma* e la natura del *nirvana*. In esse vedeva questioni senza un diretto interesse salvifico ed estremamente difficili da spiegare. Per quanto riguarda il *nirvana*, diceva che esso non indica né l'esistenza né la non-esistenza, esso è indescrivibile. Si richiedono forme più alte di conoscenza ma esse non sono esprimibili mediante il linguaggio. In tali questioni, spesso usava un tipo di logica che potremmo definire 'quaternaria' in cui cioè, a differenza dell'usuale logica binaria basata sul principio di non contraddizione, si considerano quattro alternative (sì, no, sì e no, né sì né no).

Sono interessanti la terza e la quarta alternativa che non hanno posto nella nostra logica tradizionale. Da un punto di vista generale, esse implicano la coesistenza di una proprietà e della sua negazione. Cerchiamo di capire con un semplice esempio a cosa questo possa corrispondere. Consideriamo una tela bianca che possa essere dipinta in due colori, rosso e nero. Quando il dipinto viene eseguito dividendo tutta la tela uniformemente in parti rosse e nere, riusciamo a capire senza difficoltà che ogni dato punto della tela può solo essere o rosso o nero. Immaginiamo però di distribuire in modo sempre più fitto macchie dei due colori in modo casuale senza uno schema pre-ordinato. Assumendo un certo potere risolutivo finito delle nostre osservazioni visive, potremmo facilmente arrivare ad una situazione in cui ogni dato punto della tela ci potrebbe apparire rosso, oppure nero, oppure rosso e nero, oppure né rosso né nero (cioè bianco, bianco-rosso, bianco-nero, bianco-rosso-nero). La visione del Buddhismo potrebbe essere paragonata a qualcosa di simile.

Un esempio di questo tipo di logica riguarda, appunto, la condizione dell'illuminato dopo la morte, su cui il Buddha chiarisce così il suo pensiero: «Così, Malunkyaputta, ricordati di quello che è stato da me dichiarato e di quello che non è stato da me dichiarato. E che cosa non è stato da me dichiarato? "Dopo la morte l' Illuminato esiste" non è stato da me dichiarato. "Dopo la morte l' Illuminato non esiste" non è stato da me dichiarato. "Dopo la morte l' Illuminato esiste e non esiste" non è stato da me dichiarato. "Dopo la morte l' Illuminato né esiste né non esiste" non è stato da me dichiarato. E perché queste cose non sono state da me dichiarate? Perché non sono connesse al fine ultimo, non sono fondamentali per la vita santa»[93].

Nel tempo, i discepoli cercarono però di dare una risposta a quegli aspetti non esplicitamente dichiarati dal Buddha. Molte riflessioni si concentrarono sugli aspetti del *karma* che abbiamo ricordato ed in particolare sul ruolo di chi avesse raggiunto l'illuminazione. Secondo alcuni, la ricerca dell'illuminazione era un

percorso essenzialmente individuale. Mentre per altri, la non esistenza di un sé personale fece maturare la convinzione che il *nirvana*, per essere completo, dovesse essere universale e portò a concepire l'ideale del *bodhisattva*, un personaggio che giunto alle soglie dell'illuminazione decide di rimandarla indefinitamente rimanendo nel *samsara* per continuare ad aiutare i non illuminati. Queste due scuole del Buddhismo, dunque, presero i nomi di «Hina-yana (piccolo veicolo), che può portare in salvo attraverso il mare tempestoso della vita un solo passeggero e Maha-yana (grande veicolo) perché nella sua barca il santo può trasportare altre anime attraverso i flutti perigliosi del *samsara*»[92].

Un altro spunto fu cercare di interpretare le ultime parole che il Buddha aveva loro detto sul letto di morte: «Tutto ciò che è composto è destinato a perire. Ricercate con assiduità la vostra liberazione». Questo fece sorgere l'idea che il *nirvana* consistesse nel raggiungimento di una realtà ultraterrena caratterizzata da un elemento non-composto, una specie di continuo indifferenziato associato ad uno stato di perenne beatitudine. Successivamente, però, sempre nel pensiero *Maha-yana*, cominciò a svilupparsi un differente punto di vista. Se il *nirvana* è lo stato in cui ogni sforzo, ogni desiderio è interamente cessato, sarebbe strano pensare al *nirvana* come ad un obiettivo da conseguire ad ogni costo. Quindi, la differenza tra *nirvana* e *samsara* potrebbe non essere di natura 'ontologica' ma, invece corrispondere a diversi stati mentali, a diversi livelli di consapevolezza. Questi problemi del Buddhismo *Maha-yana* sono all'origine del pensiero di Nagarjuna (II sec.d.C.), il fondatore della Scuola *Madhya-maka* ('via di mezzo').

Suo punto di partenza era uno dei primi insegnamenti del Buddha che predicava una 'via di mezzo', per esempio, nelle pratiche ascetiche mediando tra l'estrema mortificazione e l'eccessiva indulgenza verso sé stessi. Ma anche nella concezione della vita umana. Rifiutare la nozione dell'*atman*, cioè di un sé personale immortale, significa rifiutare solo la nozione di esistenza indipendente (*dravyasat*). Una giusta via di mezzo consiste invece nell'idea di 'esistenza dipendente' (*prajnaptisat*).

Nagarjuna estende questo principio alla sfera filosofica come mediazione tra la posizione di un'assoluta permanenza ed un totale nichilismo. La base per questa sua teoria è la nozione di *svabhava*, tradotta in vario modo come 'sostanza', 'essenza', 'natura intrinseca', 'carattere specifico', ... Egli la usa per definire qualcosa che esiste autonomamente, quello che, nelle rappresentazioni del pensiero, consideriamo il termine ultimo della catena ontologica. Usando lo stesso tipo di logica quaternaria che abbiamo ricordato in precedenza, egli conclude che non ci possa essere *svabhava*. Potremmo dire che questo richiederebbe un 'regresso all'infinito'. Per questo, tutte le cose hanno solo un'esistenza condizionata, condizionata da infinite relazioni di mutua interdipendenza. L'idea che ogni esistenza sia condizionata, porta al concetto chiave di *sunyata*, che si traduce di solito come vacuità (l'essere vuoto, da *sunya*=vuoto), che esprime come tutte le cose siano 'vuote', cioè vuote di *svabhava* e dunque prive di esistenza autonoma.

Sul concetto di *sunya* si gioca anche la differenza tra due tipi di verità: «L'insegnamento del Buddha riguardo alla dottrina si basa su due verità: una verità convenzionale ed una verità ultima ... Coloro che non comprendono la distinzione tra queste due verità non comprendono il profondo insegnamento del Buddha» [94]. Che cosa sono queste due verità? Una prima possibilità sarebbe di chiamare verità convenzionale (*samvriti satya*) quella che ci porta ad attribuire realtà ed esistenza autonoma alle cose. In questo caso, la verità ultima (*paramartha satya*) sarebbe invece che esse ne sono del tutto prive. Ovvero, la verità ultima sarebbe che non c'è alcuna realtà ultima, nessun 'assoluto'.

Una possibile alternativa a questa interpretazione proviene da un'osservazione di Garfield e Priest [95]. Secondo loro, adottando questa scelta, si potrebbe arrivare ad un paradosso. Da un canto, tutte le cose sarebbero prive di una natura specifica e, dall'altro, esse condividerebbero invece la stessa natura: la vacuità. Il punto viene ripreso in modo molto efficace da Gironi [96]: «Giacché *sunyata* esprime la 'natura' di tutte le cose, cioè giacché 'essere' per ogni cosa consiste nel suo essere *sunya*, allora 'vuoto' è il nome appropriato dell'essere».

A questo punto di vista si oppone tradizionalmente chi ricorda come Nagarjuna negli esplicitamente che di *sunya* si possa dire cosa sia o cosa non sia e che con esso si possa indicare qualcosa di reale: «Nulla può essere definito *sunya*, o a-*sunya*, *sunya* e a-*sunya*, né *sunya* né a-*sunya*. Questi termini sono introdotti solo allo scopo di una comprensione provvisoria» [97]. Williams, in particolare, obietta: «La vacuità è l'assenza di esistenza intrinseca di X. Se non vi fosse X, non potrebbe esserci una vacuità di X. Nell'ipotesi che non vi fosse nessun X, non potrebbe esistere neppure la vacuità» [87]. Anche *sunya* sarebbe quindi un concetto provvisorio, un modo utile di vedere le cose in una 'logica dell'indefinizione' [88].

Allo stesso tempo, Nagarjuna dice anche: «Per colui cui la vacuità fa senso, tutto fa senso. Per colui cui la vacuità non fa senso, nulla fa senso» [98]. Se veramente *sunya* fosse solo un concetto provvisorio, attribuirgli tale ruolo determinante sarebbe strano. La possibile obiezione, quindi, non è tanto di natura logica ma riguarda piuttosto l'enfasi posta da Nagarjuna su entrambi gli aspetti: la negazione che *sunya* possa essere alcunché di definito e, ad un tempo, la sua fondamentale importanza per raggiungere il *nirvana*.

Questo stretto legame tra *sunya* e *nirvana* suggerisce che la verità ultima potrebbe essere diversa. In una differente prospettiva, infatti, la verità convenzionale riguarderebbe tutte le cose in quanto mutuamente dipendenti e dunque 'vuote' di *svabhava*. La verità ultima, invece, riguarderebbe solo l'essenza di *sunya*. Essa non può essere rappresentata in alcun modo proprio perché, per esprimerla, bisognerebbe inventare una nuova forma di linguaggio [96], come infatti diceva il Buddha riguardo al *nirvana*.

Partendo da questa osservazione, uno studio recente [99] mette in evidenza con un'analisi comparata come il significato di *sunyata* in Nagarjuna sia simile a quello che si trova nella *Prajnaparamita Sutra* (Sutra della Sagesza Trascendente), quell'insegnamento che si fa risalire al Buddha e di cui Nagarjuna avviò lo studio sistematico. In questo caso, *sunya* sarebbe piuttosto simile all'*akasa*, o *kha*, delle *Upanisad* che, come abbiamo visto, indica lo spazio vuoto tessuto, a somiglianza del *Brahman*, come mezzo completamente indifferenziato. In questa differente interpretazione, *sunya* indicherebbe un'entità indefinibile ma che, nondimeno, può essere intimamente (misticamente) sperimentata. Sperimentandola, essa allora diventa reale, il punto di partenza per un nuovo cammino, il modo di accedere ad un livello più alto.

Per questo motivo, l'osservazione di Garfield e Priest è interessante. Noi abbiamo provato a riformularla in maniera lievemente diversa partendo da quel complesso di relazioni di mutua dipendenza necessarie per dare senso alla nozione di esistenza condizionata. La caratteristica di queste relazioni è che, partendo dal livello più semplice, le cose vengono legate a livelli sempre più profondi sino a rendere, alla fine, tutto interdipendente. Dunque, a questo complesso di relazioni, che non può essere negato, va attribuito un certo grado di realtà, potremmo dire lo status di principio: il ' principio della vacuità ' ovvero della non-esistenza autonoma di tutte le cose.

Ma allora, per un fisico che tende a vedere in una legge, in un principio immateriale (come per es. il principio di inerzia, quelli di conservazione dell'energia e di aumento dell'entropia per un sistema isolato...), il riflesso di proprietà strutturali della materia, diventa naturale pensare a *sunya* come una specie di etere, un substrato da cui tutto si origina ed in cui tutto finisce, un mezzo totalmente indifferenziato che, appunto, come l'*akasa* delle *Upanisad* (ma anche come l'*apeiron* di Anassimandro o come la materia che si associa al *Tao*), include in sé tutti i possibili contrari. Per questo, l'idea che questo substrato, pur non potendo essere compiutamente definito, potrebbe in qualche modo essere *sperimentato*, diventa interessante per la fisica. Per esempio, suggerendo che anche quell'altra doppia verità ricordata nel Cap. 3, quella legata all'origine fisica degli effetti relativistici, potrebbe, alla fine, essere risolta in favore dell'interpretazione Lorentziana.

4.3 Sintesi: il vuoto come origine di tutto?

Dalla nostra breve rivisitazione del primo pensiero greco e di alcune antiche filosofie orientali, emergono alcuni punti comuni che possiamo semplificare al massimo così. Nell'epoca che corrisponde al Periodo Assiale di Jaspers (approssimativamente tra VIII e III secolo a.C.) avvennero dei cambiamenti epocali riguardo alla ricerca sull'uomo e sulla natura. Riguardo alla natura, la riflessione si concentrò su cosa fosse l'origine e l'elemento ultimo di tutte le cose. Questa ricerca non aveva, però, un fine puramente conoscitivo. Essa esprimeva anche una profonda esigenza di

assoluto, di verità, che potesse dare fondamento all'esistenza umana. Questa origine, questo Principio alla base di tutto, prese nomi diversi. Era la Natura, *physis* (indicata anche come *arché*) per i Greci, il *Tao* per i Cinesi, il *Brahman* per gli Indù.

Un aspetto comune di questa antica ricerca era il carattere oscuro del Principio. «La natura (*physis*) ama nascondersi», diceva Eraclito. Il vero della natura, *l'essere*, si rivela solo a chi «legge divina e giustizia hanno indotto a percorrere un cammino fuori dalla via battuta dagli uomini», diceva la Dea a Parmenide. «Guardato ma non visto, udito ma non ascoltato, toccato ma non afferrato, senza forma, senza suono, intangibile: il Tao resiste all'analisi e sfida la comprensione», diceva Lao-Tzu. «Gli dei amano il mistero e a loro ripugna ciò che è manifesto» si diceva nelle *Upanisad*. Come si potrebbe spiegare questo carattere misterioso?

La spiegazione che vorremmo suggerire consiste nell'idea di una materia prima totalmente indifferenziata che, in un processo senza fine, è sorgente e termine ultimo di tutte le cose. Questo viene ben riassunto in due frammenti su Anassimandro. Il primo: «Egli disse che principio delle cose (*arché*) era una certa natura dell'infinito (*apeiron*) da cui si generano i cieli e l'ordine (*kosmos*). Essa è eterna e non invecchia e abbraccia tutti i mondi. E chiama tempo ciò che ne determina la generazione, l'esistenza e la distruzione»[16]. Il secondo: «Avendo osservato il reciproco mutamento dei quattro elementi egli ritenne giusto non porne nessuno come substrato, ma qualcosa oltre questi. Secondo lui, quindi, la nascita delle cose avviene non in seguito ad alterazione dell'elemento ma mediante separazione dei contrari a causa dell'eterno movimento»[17].

Nell'antica filosofia greca, questa visione non è solo quella di Anassimandro ma comprenderebbe anche ogni concezione in cui la generazione di tutte le cose avvenga tramite separazione di arbitrari elementi che preesistono in un tutto indistinto nel quale si cancella ogni loro proprietà definita. Come abbiamo visto, questo si ritrova esplicitamente in Anassagora, per il quale è il *nous* che innesca il moto di rotazione e produce la separazione dei 'semi', ma viene anche naturale in una rivisitazione di Empedocle in cui i quattro elementi coesistono in una mistura informe che si separa dinamicamente sotto l'azione delle due forze cosmiche antagoniste *neikos* e *philia*. In questo senso, tutto si potrebbe riassumere secondo uno schema simile allo *Yin - Yang* del *Tao*, cioè in un substrato indifferenziato e due principi contrari che producono ogni possibile determinazione.

Questo, peraltro, è lo schema riconosciuto da Aristotele quando, discutendo dei principi della generazione in generale, dice «E' stato così stabilito quanti sono i principi delle cose naturali sottoposte al divenire... In un primo tempo si disse che soltanto i contrari sono principi; in un secondo tempo si mise in rilievo la necessità che ci sia una qualche specie di substrato e che i principi siano tre»[100]. Questo substrato è una materia prima (*prote hyle*), di per sé inconoscibile [101], della cui

esistenza ci si convince solo per via di analogie eliminando tutte le determinazioni fino a raggiungere una totale assenza di forma. Come osservato da Cherniss [102], diventa dunque molto simile all'*apeiron*.

Prescindendo da altri dettagli, il punto chiave è che questa rappresentazione riesce a spiegare quella elusività cui abbiamo accennato. In ultima analisi, essa dipende dal fatto che il Principio si riflette in un'entità materiale che risulta, allo stesso tempo, indefinibile ed impercettibile e, come tale, fundamentalmente inaccessibile ad una mente puramente razionale. Infatti, solo qualcosa che abbia delle qualità definite può essere direttamente percepito e/o analizzato razionalmente. Ma allora, tale materia costitutiva, essendo impercettibile, diventa simile a ciò che ci sembra inutile spazio vuoto. Viceversa, siamo indotti a concludere che quello che ci appare inutile spazio vuoto è tutt'altro che vuoto: esso è pieno di quella materia indifferenziata da cui si originano tutte le cose. Quindi, ciò che ci appare vuoto (e che spesso, erroneamente, viene chiamato 'nulla') è, in realtà, come nella fisica moderna, l'inesauribile sorgente di tutto, un qualcosa di cui, come per la *physis* di Eraclito, si può dire che «si cela, come mistero, dietro l'apparenza delle cose che origina, pur manifestandosi anche attraverso di esse»[33].

Questa commistione inscindibile tra l'essere completamente informe e l'essere anche origine di tutto si ritrova dunque nell'*apeiron*, l'impercettibile causa materiale del divenire e della molteplicità. Si ritrova in Lao-Tzu che, pur dicendo che il *Tao* è vuoto, dice anche che «la materia del Tao è solo indistinta, solo confusa .. Ma al suo interno ci sono le cose». Si ritrova nei passi delle *Upanisad* che abbiamo citato dove si dice che lo spazio vuoto è tessuto, come mezzo completamente indifferenziato, a somiglianza del *Brahman*, la sorgente di tutto. Abbiamo anche visto che secondo alcune scuole del Buddhismo l'idea di un vuoto completamente indefinibile, ma misticamente sperimentabile, rappresenta l'unica possibile sostanza dotata di esistenza autonoma.

Infine, abbiamo anticipato che alcune interpretazioni dell'*essere* di Parmenide convergono sull'idea di una materia-spazio, un substrato al limite tra materiale ed immateriale, che si ritrova successivamente in Platone. Tale concezione è descritta nel Timeo, il dialogo nel quale si racconta l'origine del cosmo ad opera del Demiurgo. Per il fondamentale influsso del Timeo sul pensiero occidentale, non possiamo non ricordarne gli elementi essenziali.

L'azione del Demiurgo viene paragonata a quella di un artefice che «rivolgendo il suo sguardo verso ciò che è sempre allo stesso modo e servendosi di una tale entità come di un modello (*paradeigma*), realizza la forma e la proprietà di qualche cosa». Per Platone, «vi è assoluta necessità che questo mondo sia ad immagine di qualcosa» e si deve nettamente distinguere il modello, intellegibile ed eterno, dalla sua immagine, sensibile e caduca, che viene realizzata. Egli dice più avanti, però, che tra queste due specie, il modello eterno da un lato e la sua immagine sensibile

dall'altro, bisogna introdurre una terza: «Ora il discorso pare che ci costringa a tentare di spiegare con le parole questa altra specie difficile ed oscura». Come l'oro che può essere modellato e trasformato in molteplici forme, lo stesso si può dire di questa particolare natura che accoglie tutti i corpi e appare ora in una forma ed ora in un'altra. «Questa madre e ricettacolo di tutto ciò che è generato e visibile non dobbiamo chiamarla né terra, né aria, né fuoco, né acqua ... ma se diciamo che è una specie invisibile ed informe (*anoraton kai amorphon*), che tutto accoglie, che prende parte dell'intelligibile in modo assai oscuro e difficile da comprendersi, non diremo nulla di falso». Tale ricettacolo (*hypodoché*), viene successivamente rinominato *chora* (singolare femminile, di solito reso come regione, area, spazio, luogo...) da Platone che, riassumendo, conclude: «Come terza specie c'è infine *chora* che da sempre esiste ed è incorruttibile; accoglie tutte le cose che si generano, non è percepibile dai sensi e può solo essere intuita in modo parziale ed oscuro», come in un sogno. In essa coesistono gli elementi, nel senso che le sue modificazioni ed i suoi movimenti lasciano la stessa 'impressione': «sembra ogni volta fuoco la parte infiammata di essa, acqua la parte liquida, terra e aria nella misura in cui accoglie le loro immagini».

Il significato di *chora* è stato oggetto di infinite discussioni. Proprio in merito a questo, è interessante cosa ne dice Derrida [103]: «La *chora* non è né sensibile né intelligibile, essa appartiene ad un 'terzo genere'. Non si può neppure dire di essa che non è né questo né quello o che è parimenti questo e quello ... La *chora* sembra straniera al mondo del 'paradigma', questo modello intelligibile ed immutabile. E, tuttavia, 'invisibile' e senza forma sensibile, essa partecipa all'intelligibile in modo molto imbarazzante». Per questo motivo, quando nemmeno la logica quaternaria del Buddha che abbiamo ricordato sembra servire allo scopo, Derrida si rifiuta di adottare una traduzione definita di *chora*.

Tenendo conto che ogni interpretazione ha sempre qualche ambiguità, vediamo cosa possiamo dire riguardo alla traduzione adottata dalla maggior parte degli studiosi: quella di 'spazio'. Pur accettandola, *chora* andrebbe comunque interpretata come uno 'spazio riempito' che fornisca, allo stesso tempo: a) la 'materia' comune ed indifferenziata di cui tutte le cose sono fatte e b) il 'luogo' in cui esse necessariamente sussistono. Questo viene, del resto, confermato da Aristotele [104] secondo il quale «Platone dice nel Timeo che materia (*hyle*) e spazio (*chora*) sono la medesima cosa». Dunque *chora*, rappresenta una specie di materia-spazio, una «materia corporea assolutamente indeterminata - e per ciò invisibile, perché solo l'introduzione di qualche determinazione dà la percettibilità»[19].

Una conferma che non si tratti semplicemente di spazio vuoto ci viene data da Gomperz [105]. A suo parere, per Platone *chora* va intesa come «...una materia primordiale, che egli indica più volte come la 'nutrice', il 'grembo', o la 'madre' di tutto ciò che diviene. Ma questo qualcosa 'difficile ed oscuro', sprovvisto di una completa realtà, e davanti a cui Platone confessa la propria perplessità con

altrettanta schiettezza quanta enfasi, è tanto lontano dall'identificarlo con il puro spazio, che Platone dichiara anzi inammissibile l'ipotesi dello spazio vuoto, bandito in tutto e per tutto dalla sua raffigurazione della realtà cosmica».

Questa interpretazione può allora essere ben riassunta dalle parole di Zeller [106] secondo cui per Platone, la terza specie rappresenta «ciò che forma la base e per così dire il seno materno di ogni divenire, il comune che è alla base di tutti gli elementi fisici e di tutte le materie determinate e che, nell'incessante flusso di tutte queste forme, nel giro del divenire, si muove attraverso tutte esse come il loro sostrato permanente ... Quello che assume le impronte di tutte le forme, ma che appunto per questo deve essere esso stesso ancora senza alcuna forma e proprietà determinata ... Questo fenomeno non sarebbe possibile, se le materie determinate fossero qualcosa di reale e non semplici modificazioni di un terzo elemento comune, e perciò necessariamente privo di determinazione ... Questo elemento è più esattamente definito come un'essenza invisibile ed informe, capace di assumere tutte le forme, come lo spazio, che, imperituro, offre luogo a tutto ciò che diviene». Anche in Platone, si ritrova dunque quell'idea di un elemento primordiale oscuro, informe ed invisibile.

Come anticipato nel Cap. 3, ulteriori conferme di questa visione si potrebbero trovare nella tradizione giudaico-cristiana. Una discussione dettagliata di questo punto richiederebbe da sola un altro intero capitolo per confrontare le interpretazioni che, nel tempo, sono state date dei primi due versetti della Genesi, «In principio Dio creò il cielo e la terra. La terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque», anche alla luce di ciò che viene detto nel Libro dell'Esodo, nel Libro della Sapienza, fino ad arrivare al Nuovo Testamento. Qui ci limiteremo a riassumere il punto di vista di Ludwik Kostro [107], che deriva dal suo studio personale e dal confronto di diversi esperti rabbini e cristiani: «Il verbo del Vecchio Testamento 'bara', riservato a Dio, viene inteso frequentemente come il 'creare dal nulla'. Secondo la Grande Enciclopedia Biblica Cattolica, invece, la traduzione più appropriata è piuttosto quella di 'separare'. Molti studiosi biblici dimostrano infatti che questa frequente interpretazione non è consistente in quanto il termine 'bara' viene anche usato in parallelo con il termine 'asah' (fare) e 'jasar' (formare), significati che si riferiscono chiaramente ad attività di trasformazione di materia pre-esistente».

In questo senso, conclude Kostro [107], la descrizione biblica si ricollega direttamente a quella dei Sumeri nella quale tutto emerge a partire da acque eterne e sconfinite, quell'antica concezione di infinita eternità ben riassunta dalle parole di Mondolfo [19]: «Infinità del chaos originario, del primitivo abisso sconfinato che non può avere limiti anche perché non ha forma ed è tenebra, confusione, dispersione. Ma è indubbiamente anche movimento turbinoso, come il chaos acquoso della mitologia babilonese e la massa di nubi del Rig Veda, serbatoio immenso di tutte le forze e di tutti gli elementi, eterna sorgente ed insieme eterna foce e sbocco di ogni esistenza».

Per questo motivo, anche la creazione giudaico-cristiana sembra introdurre un'entità informe ed eterna o, meglio, atemporale, alla quale risulta del tutto estraneo lo scorrere del tempo ordinario, quello che viene comunemente associato al processo di formazione del cosmo. Nella tradizione cristiana, questa differenza di concezione si ritrova già in S. Agostino nel quale echeggiano concetti di chiara ispirazione platonica.

I primi passi di commento che riportiamo sono tratti dalla sua 'Difesa della Genesi contro i Manichei': «Da principio fu dunque creata la materia confusa e disordinata, affinché a partire da essa fossero fatte le cose ora distinte e formate; credo ciò che i greci chiamano chaos. Così infatti anche in un altro passo della Scrittura [Libro della Sapienza 11,17], tra le lodi di Dio, leggiamo la frase ' Tu che hai creato il mondo da una materia senza forma, o, come in altri manoscritti, da una materia invisibile'». Ed ancora, «La materia informe fu dunque chiamata ' cielo e terra ' perché da essa sarebbe derivato il cielo e la terra. Fu chiamata ' terra invisibile e caotica ' e ' tenebre sopra l'abisso ' per il fatto di essere informe poiché, essendo senza forma, non poteva né vedersi né toccarsi neanche se ci fosse stato uno che vedesse e toccasse. Fu chiamata ' acqua ' perché si prestava facilmente e docilmente al potere dell'Artefice che lavorava, affinché mediante essa fossero formate tutte le cose. Con quei nomi dunque veniva denotata la materia invisibile e informe dalla quale Dio creò l'universo». Allo stesso tempo «...comprenda chi può come la materia dell'universo fu creata dapprima e chiamata cielo e terra, perché ne furono tratti il cielo e la terra. Ma non fu creata dapprima nel tempo perché sono le cose formate a esprimere il tempo...».

Un altro riferimento si trova nel suo trattato 'L'interpretazione letterale della Genesi': «Prima che Dio desse forma a questa materia informe e la modellasse in specie, non esisteva l'essere separato, niente colore, niente forma, niente corpo, niente spirito. Però non è che non ci fosse assolutamente niente: c'era una certa assenza di forma priva di ogni carattere specifico».

Infine, nel Libro XII delle 'Confessioni', dopo aver richiamato i primi due versetti della Genesi, conclude dicendo: «Con queste parole è insinuata l'idea di informe, perché coloro che non sono in grado di capire come una completa assenza di forme non indichi il nulla assoluto, possano gradualmente capire da dove sono poi sorti il cielo, una terra visibile ed ordinata ... e tutte le realtà che sono sottomesse alle vicissitudini dei tempi a causa dell'ordinato succedersi dei movimenti e delle forme».

Semberebbe, quindi, che questa idea di un'entità materiale invisibile ed informe, che occupa lo spazio apparentemente vuoto e sta all'origine di tutto, fosse stata decisamente rifiutata solo dagli antichi atomisti greci. Secondo loro, infatti, il vuoto andava inteso come puro non-essere, da cui nulla poteva scaturire. Vedremo tuttavia, nel capitolo finale, che è possibile formulare uno schema idealizzato in

cui queste due opposte visioni riescono a coesistere adottando una concezione gerarchica della natura.

References

- [1] G. Colli, *La Nascita della Filosofia*, Adelphi, Milano 1975.
- [2] E. Schrödinger, *Nature and the Greeks*, Cambridge University Press 1954.
- [3] *Upanisad Antiche e Medie*, a cura di P. Filippini - Ronconi, Universale Bollati Boringhieri 2007.
- [4] *Bṛhad-Araṇyaka-Upaniṣad*, IV 2,2, p.85 di [3].
- [5] *Kātha Upaniṣad* I 3, 15, p.350 di [3].
- [6] K. Jaspers, *Origine e Senso della Storia*, Comunità, Milano 1965.
- [7] U. Galimberti, *Il Tramonto dell'Occidente, nella lettura di Heidegger e Jaspers*, Feltrinelli 2005.
- [8] F. Nietzsche, *I filosofi preplatonici*, Universale Laterza, Roma - Bari 2005.
- [9] F. Nietzsche, *La Filosofia nell'Epoca Tragica dei Greci*, Adelphi, Milano 2010.
- [10] M. Heidegger, *L'Essenza della Verità*, Adelphi, Milano 1997.
- [11] M. Heidegger, *Parmenide*, Adelphi, Milano 1999.
- [12] Aristotele, *Metafisica*, I 983 b6 e sgg.
- [13] Aristotele, *Fisica* III, 4, 203 b3 e sgg.
- [14] P. Ricoeur, *Il Problema del 'Divino' e la Filosofia Presocratica*, in *Essere, Essenza e Sostanza in Platone ed Aristotele*, Mimesis, Milano 2014.
- [15] E. Severino, *La Filosofia dai Greci al Nostro Tempo*, BUR Rizzoli 1996.
- [16] Diels-Kranz 12 A11. Tutti i frammenti citati della classica raccolta di H. Diels e W. Kranz sono tratti da *I Presocratici, Testimonianze e frammenti*, Edizioni Laterza, Bari 1983.
- [17] Simplicio, Phys. 24, 13 riportato in Diels-Krantz, 12 A9 e Diels-Krantz 12 B1.
- [18] Diels-Kranz 12 A10.
- [19] R. Mondolfo, *L'Infinito nel Pensiero dell'Antichità Classica*, Presentazione di G. Reale, Bompiani/RCS Libri, Milano 2012.
- [20] W. A. Heidel, *On Anaximander*, *Classical Philology*, **7** (1912) 212.
- [21] M. Carbonara Naddei, *Sophia* **36** (1968) 56.

- [22] Diels-Kranz 13 A7.
- [23] Teofrasto, *Opinioni dei fisici* fr.6, in G. Colli, *La Sapienza Greca*, Vol. II, Adelphi, 1997, pag. 217.
- [24] Aezio, I, 3, 4, in G. Colli, *La Sapienza Greca*, Vol. II, Adelphi Milano 1997, pag. 209.
- [25] G. Reale, *Storia della Filosofia Greca e Romana*, Vol. 1, *Orfismo e Presocratici Naturalisti*, Bompiani/RCS Libri Milano 2004.
- [26] Diels-Kranz 22 B103.
- [27] Diels-Kranz 22 A8.
- [28] Da Diogene Laerzio, vedi [8] pag.62.
- [29] Da Sesto Empirico, vedi [8] pag.60.
- [30] Stobeo, *Florilegio* 3, 5, 8 in G. Colli, *La Sapienza Greca*, Vol. III, Adelphi Milano 1996, pag. 61.
- [31] Diels-Kranz, 22 B45.
- [32] Diels-Kranz, 22 B115.
- [33] A. Tonelli, *ERACLITO, Dell'Origine*, Feltrinelli Milano 2012.
- [34] Parmenide, *Poema sulla Natura*, Traduzione di G. Reale, Introduzione e Commentario di L. Ruggiu, Bompiani/RCS Libri, Milano 2003.
- [35] André Pichot, *La Nascita della Scienza, Mesopotamia, Egitto, Grecia antica*, Dedalo, Bari 1993.
- [36] J. Burnet, *Early Greek Philosophy*, A. and C. Black, London 1920.
- [37] G. de Santillana, *The Origins Of The Scientific Thought: From Anaximander to Proclus: 600 B.C. To 300 A.D.*, University of Chicago Press, Chicago 1961.
- [38] K. Popper, *Il mondo di Parmenide*, a cura di F. Minazzi, Piemme, Casale Monferrato 1998.
- [39] Diels-Kranz 30 B 1.
- [40] Diels-Kranz 30 B 3.
- [41] Diels-Kranz 30 B 7.
- [42] Diels-Kranz 30 B 9.
- [43] Aristotele, *Metafisica* I, 985 b23.

- [44] Aristotele, *Fisica* IV, 213b 22.
- [45] Diels-Kranz 44 A 15.
- [46] Aristotele, *Metafisica* I, 989 b29.
- [47] Diels-Kranz 31 B 8.
- [48] F. Volpi, *Dizionario delle opere filosofiche*, Paravia e Bruno Mondadori, 2000.
- [49] Diels-Kranz 59 B 17.
- [50] Diels-Kranz 59 B 4.
- [51] Diels-Kranz 59 B 3.
- [52] Diels-Kranz 59 B 4.
- [53] Diels-Kranz 59 B 12.
- [54] Diels-Kranz 59 B 7.
- [55] Diels-Kranz 68 A 35.
- [56] Diels-Kranz 67 A 8.
- [57] M. Jammer, *Storia del concetto di spazio*, Feltrinelli 1966.
- [58] Diels-Kranz 67 A 7.
- [59] Diels-Kranz 68 B 9.
- [60] Diels-Kranz 68 B 6.
- [61] Diels-Kranz 68 B 125.
- [62] Diels-Kranz 67 A 16.
- [63] Diels-Kranz 68 A 1.
- [64] Diels-Kranz 67 A 21.
- [65] Diels-Kranz 67 A 9.
- [66] Diels-Kranz 67 A 13.
- [67] Diels-Kranz 68 A 37.
- [68] M. Consoli and P. M. Stevenson, *Int. J. Mod. Phys. A* **15** (2000) 133.
- [69] F. Capra, *Il Tao della fisica*, Adelphi, Milano 1989.
- [70] W. Pauli, *Fisica e Conoscenza*, Universale Bollati Boringhieri 2007.

- [71] *Kena Upanisad* I, 3, pag.429 di [3].
- [72] Aristotele, *Eudemo*, fr.10, in G. Colli, *La sapienza greca*, Vol.I, Adelphi 1995, pag.107.
- [73] *A Source Book in Chinese Philosophy*, translated and compiled by Wing-Tsit Chan, Princeton University Press 1963.
- [74] Lao-Tzu, *Tao Te Ching*, A cura di B. B. Walker, Traduzione e postfazione di C. Lamparelli, Oscar Mondadori, 2010.
- [75] Lao- Tzu, *Tao Te Ching*, Traduzione e cura di A. Shantena Sabbadini, Universale Feltrinelli 2011.
- [76] J. Needham, *Science and Civilization in China*, Cambridge University Press 1996, Vol. II, p. 36.
- [77] R. Wilhelm, Introduzione all' *I Ching*, Edizioni Astrolabio, Roma 1995.
- [78] *Storia della Filosofia Orientale*, a cura di S. Radhakrishnan, Feltrinelli 1962.
- [79] *Brhad-Aranyaka Upanisad* III, 9, 1, pag.75 di [3].
- [80] *Brhad-Aranyaka Upanisad* V, 4,1, pag.105 di [3].
- [81] *Katha Upanisad*, I 3, 3-9, pag. 349 di [3].
- [82] *Brhad-Aranyaka Upanisad* IV, 3,9-12 pag.88 di [3].
- [83] *Brhad-Aranyaka Upanisad* III, 8,1-12, pag.73 di [3].
- [84] H. N. Raghavendrchar, *Madhwa (dvaita)*, in [78].
- [85] *Chandogya Upanisad* IV 10, 5, pag. 183 di [3].
- [86] *Brhad-Aranyaka Upanisad* VI, 2,15-16 pag.118 di [3].
- [87] P. Williams, *Il Buddhismo in India*, Ubaldini Editore, Roma 2002.
- [88] I. Vecchiotti, *Storia del Buddhismo indiano*, Editori Riuniti University Press, Roma 2010.
- [89] *La Rivelazione del Buddha*, A cura e con saggio introduttivo di R. Gnoli, Vol. I e II, I Meridiani, Classici dello Spirito, Mondadori 2001.
- [90] G. Pasqualotto, *Estetica del vuoto, Arte e meditazione nelle culture d'Oriente*, Marsilio 2006.
- [91] A. W. Watts, *La via dello zen*, Universale Feltrinelli 2006.
- [92] H. D. Bhattacharya, *La filosofia buddhista*, in [78].

- [93] Si veda [89], Vol. I, pag.221 e sgg.
- [94] Nagarjuna, *Madhyamakakarika*, 24, 8-9.
- [95] J. Garfield e G. Priest, *Nagarjuna and the limits of thought*, in *Empty words: Buddhist Philosophy and Cross-Cultural Interpretation*, a cura di J. Garfield, Oxford University Press 2002.
- [96] F. Gironi, *Sunyata and the Zeroing of Being. A Reworking of Empty Concepts*, *Journal of Indian Philosophy and Religion*, 15 (2012).
- [97] Nagarjuna, *Madhyamakakarika*, 22, 11.
- [98] Nagarjuna, *Madhyamakakarika*, 24, 14.
- [99] G. Mason, *The relation of akasa to pratityasamutpada in Nagarjuna's writings*, PhD Thesis 2012, University of South Africa.
- [100] Aristotele, *Fisica* I, 191a 15 e sgg.
- [101] Aristotele, *Metafisica* VII, 1029a 20.
- [102] H. Cherniss, *Aristotle's Criticism of Plato and the Academy*, J. Hopkins Press, Baltimore 1944.
- [103] J. Derrida, *Il Segreto del Nome*, a cura di G. Dalmasso e F. Garritano, Jaca Book, Milano 1997.
- [104] Aristotele, *Fisica* IV, 209b 11.
- [105] T. Gomperz, *PENSATORI GRECI.*, Introduzione di G. Reale, Bompiani/RCS Libri, Milano 2013.
- [106] E. Zeller, R. Mondolfo, *La filosofia dei Greci nel suo sviluppo storico*, a cura di M. Isnardi Parente, La Nuova Italia Editrice, Firenze 1974, Parte II, vol. III.
- [107] L. Kostro, *The Evolution of the Notion of Creation in the Judeo-Christian Religion*, *Episteme* 2 (2000) 103.

5. Dalla chora di Platone all'etere di Kant

La transizione dalla *physis* alla fisica avvenne in diverse fasi attraverso le quali la riflessione sulla natura venne a configurarsi come un articolato sistema razionale all'interno del quale regolarità osservate venivano tradotte in linguaggio matematico. In questo lungo percorso scomparvero del tutto quegli elementi mistico-sapientziali che avevano caratterizzato il primo pensiero greco. Questo aspetto non andrebbe trascurato poiché le basi della scienza classica occidentale, cioè l'idea che nella natura si possa infine scoprire un ordine immutabile, risiedono, prima di tutto, nel *logos* di Eraclito e nell'*essere* di Parmenide, due concetti-chiave che, come abbiamo visto, derivano da un particolare modo di concepire e ricercare la verità.

Non è facile individuare tutte le tappe che determinarono questa transizione. Secondo la visione tradizionale, alla fisica propriamente detta si arriva solo con Galileo e Newton. Tuttavia Russo ha sostenuto, con validi argomenti [1], che una sua prima manifestazione, poi caduta nell'oblio, si ebbe già nel periodo ellenistico. In ogni caso, un passaggio fondamentale avvenne con Platone nel quale coesistono elementi del passato e straordinarie anticipazioni del futuro che si estendono sino a noi. In questo capitolo, presenteremo delle brevi schede (dei veri e propri 'flash') per dare un'idea di come si sia evoluta la concezione del vuoto nell'arco di duemila anni sino all'Ottocento, il periodo cruciale per gli esperimenti sull'etere che ci interessano. Queste schede sono dedicate a cinque punti di riferimento nella storia del pensiero: Platone, Aristotele, Cartesio, Newton e Kant.

5.1 Platone

Nel suo libro 'I Grandi della Fisica' [2], parlando di Platone, von Weizsäcker descrive lo stupore di Heisenberg quando, da giovane, lesse nel Timeo di quella visione in cui i poliedri regolari venivano indicati come gli ideali geometrici a cui il Demiurgo si era ispirato per modellare gli elementi a partire dalla *chora*, quella materia-spazio informe ed invisibile che abbiamo ricordato alla fine del capitolo precedente. L'aspetto più significativo è che, ritornando su quelle stesse pagine da fisico maturo, Heisenberg aveva finito col riconoscere che la sua visione della fisica si poteva definire, a tutti gli effetti, una concezione 'platonica'. In che senso? Spiega von Weizsäcker: «La tesi di Heisenberg si può formulare chiaramente. Nel sostenere che gli elementi strutturali ultimi del fuoco sono i tetraedri, della terra i cubi e così via, Platone usa quelli che oggi, pur non essendo stati scoperti da lui, sono in suo onore detti 'corpi platonici'; essi possiedono la proprietà matematica di rappresentare la simmetria tridimensionale dello spazio in forma discreta». In questo senso, nei poliedri regolari, Heisenberg ritrovava la sua stessa idea delle particelle elementari come manifestazioni di fondamentali proprietà di simmetria della natura: «Le espressioni matematiche che simboleggiano le particelle elementari sono per così dire l'idea sulle quali si modellano le particelle reali»[3]. Le proprietà di simmetria diventano dunque «la forma nella quale si lascia afferrare concettualmente la

bellezza della legalità della natura, in cui essa si rispecchia concettualmente»[2].

Queste poche frasi bastano da sole a riassumere l'importanza e l'attualità della visione platonica. Elaborata sulla dottrina pitagorica, essa fornisce una prima interpretazione di quella che Wigner chiama 'l'irragionevole efficacia della matematica' [4], del motivo, cioè, per cui fondamentali proprietà della natura possono essere espresse in forma matematica. La spiegazione di ciò non può essere trovata nella matematica stessa ma richiede una prospettiva metafisica. Questo emerge meglio analizzandone un po' più in dettaglio i vari aspetti.

Per Platone le particelle associate ad ogni elemento hanno una forma specifica ma sono troppo piccole per essere osservate direttamente. La particella più piccola, quella del fuoco, ha la forma del tetraedro, il solido regolare delimitato da quattro superfici piane formate da quattro triangoli equilateri; quelle dell'aria e dell'acqua hanno invece la forma dell'ottaedro e dell'icosaedro, delimitati rispettivamente dall'intersezione di otto e venti triangoli equilateri. Il cubo, o esaedro, associato alla terra, è invece formato dall'intersezione di sei quadrati uguali ed il dodecaedro (associato da Platone alla forma che il Demiurgo volle dare all'universo) da dodici pentagoni regolari. La scelta del tetraedro per il fuoco, l'elemento più leggero, viene motivata notando che esso è il più piccolo ed il più appuntito e può così penetrare più facilmente negli interstizi dei corpi. La terra viene associata al cubo poiché, tra tutti, è il poliedro che può essere assemblato in modo più fitto così da formare l'elemento più pesante. L'aria, poi, essendo più pesante del fuoco ma meno pesante dell'acqua, viene associata all'ottaedro che sta in posizione intermedia tra il tetraedro e l'icosaedro a venti triangoli. Quest'ultimo, per lo stesso motivo, viene infine associato all'acqua.

Fondamentale in questa descrizione è che le facce piane che delimitano i poliedri si possano tutte ottenere partendo da triangoli rettangoli che poi vengono riuniti opportunamente (a formare triangoli equilateri, quadrati e pentagoni). In questo modo, le vere 'particelle elementari' di Platone sono i triangoli rettangoli. Invece tetraedri, cubi, ... sono i volumi delimitati da certe superfici ottenute componendo triangoli, «che hanno il loro limite nei triangoli. *Peras*, limite, è un termine platonico che sistematicamente può anche sostituire la parola 'idea'. L'idea è ciò che dà alla cosa la sua forma, a cui la cosa partecipa nella misura in cui ha una forma, e la forma è intesa come contorno»[2]. La forma di un solido, e dunque la sua essenza, è il limite del solido stesso.

Ma andiamo avanti. Cos'è un triangolo? E' una figura piana caratterizzata dal suo limite, cioè da tre linee. Per quanto detto, queste linee costituiscono l'essenza del triangolo. Ma cos'è una linea? Una linea è delimitata da due punti. In questo modo, abbiamo realizzato un'ascesa dal solido, alla superficie piana, alla linea, al punto. Questa successione (volume, superficie, linea, punto), per cui tutto si riassume in un unico principio fondamentale, rappresenta dunque una forma di

‘scienza naturale’ su base puramente deduttiva. Con questo, parafrasando Russo [1], intendiamo dire che Platone non tratta direttamente di enti specifici ma collega mediante opportune regole di corrispondenza gli oggetti concreti, in questo caso (ed in senso lato) gli elementi naturali (fuoco, aria, acqua, terra), agli enti astratti della teoria (i poliedri e, da qui, i triangoli, le linee, i punti). Questo carattere puramente deduttivo è del resto inevitabile poiché, per Platone, del mondo sensibile si può avere al più una descrizione ‘verosimile’ tramite, appunto, l’individuazione di quelle forme matematiche che sono iscritte nei fenomeni.

5.2 Aristotele

Dove, invece, l’osservazione del mondo sensibile entra a pieno diritto nella fondazione della ‘fisica’ (la disciplina che studia la *physis*) è con Aristotele. Per Aristotele la fisica è, prima di tutto, teoria del movimento: «La natura (*physis*) prima e detta in senso proprio è l’essenza delle cose che possiedono il principio (*arché*) del movimento (*kinesis*) in se stesse in quanto tali. Infatti la materia (*hyle*) è detta natura (*physis*) per il fatto di essere atta a ricevere questo principio, e la generazione (*genesis*) ed il venire all’essere sono dette natura per il fatto di essere movimenti che derivano da questo»[5]. Quanto al movimento (*kinesis*), esso è la «realizzazione (*entelechia*) di ciò che è in potenza (*dynamis*) in quanto tale»[6]. Ad esempio, la costruzione, l’apprendimento, la guarigione, l’invecchiamento sono tutte realizzazioni di potenzialità ed, in questo senso, ‘movimenti’.

Dall’osservazione dei fenomeni, Aristotele arriva a distinguere quattro tipi di movimento: l’alterazione, l’accrescimento (o diminuzione), la generazione (o corruzione) e la traslazione. Il movimento locale di traslazione viene da lui considerato il più fondamentale perché ad esso, dice, si possono ridurre tutti gli altri. Esso è di tre tipi: moto dall’alto verso il basso (verso cioè il centro del mondo), dal basso (cioè dal centro del mondo) verso l’alto e moto circolare. I primi due sono opposti tra di loro e sono i moti tipici dei corpi soggetti a generazione e corruzione, quelli composti dai quattro elementi (fuoco, aria, acqua, terra). Il terzo, il moto circolare, non ha contrario ed è quello tipico della sostanza eterna o quinto elemento, l’etere, di cui sono fatti i cieli.

Non è questa la sede per andare in maggiori dettagli. Vogliamo però sottolineare come sia sbagliato considerare la Fisica di Aristotele una descrizione intuitiva senza basi sperimentali. In realtà, l’attenta analisi di Rovelli [7] dimostra che essa rappresenta una descrizione corretta e non-intuitiva della fisica newtoniana in un ben determinato ambito, quello di oggetti in un campo gravitazionale a simmetria sferica (la Terra) immersi all’interno di un fluido (aria od acqua). In questo senso, pur non essendo estendibile a realtà diverse, fornisce uno schema utile per inquadrare la realtà nota. Questo è, dopo tutto, il motivo per cui essa è durata così a lungo.

Per quanto riguarda il nostro interesse principale, il vuoto, è necessario analizzare prima il concetto di 'luogo' (*topos*). Esso gioca un ruolo fondamentale poiché, per quanto detto, la fisica è teoria del movimento, movimento appunto da un luogo all'altro. Come esempio per introdurre l'argomento, Aristotele considera un vaso in cui ci sia dell'acqua. Quando essa ne esce, ci sarà dopo aria, sicché un corpo diverso viene ad occupare il medesimo luogo. Da questo «è chiaro che il luogo è pur qualcosa e che quella parte di spazio verso cui e da cui si verifica il mutamento dei due elementi è qualcosa di diverso da entrambi»[8]. Quindi, diventa lecito supporre che il luogo sia qualcosa che prescinde dai corpi. Anzi, il fatto che ogni corpo debba essere in un qualche luogo implica che «meravigliosa deve essere la potenza del luogo. Infatti, ciò che è indispensabile per l'esistenza delle altre cose, e che esiste senza le altre, è necessariamente il primo»[9]. Il luogo diventa dunque qualcosa di diverso dai suoi mutevoli contenuti ed acquista una sua realtà ed anche una sua 'potenza': «Lo spostamento dei corpi fisici e degli elementi come fuoco o terra o simili mostrano non solo che il luogo è una realtà ma anche che esercita una potenza; infatti ogni elemento che non ne sia impedito si muove verso il suo proprio luogo, o verso l'alto o verso il basso»[10].

Detto questo, risulta difficile dire esattamente che cosa sia il luogo. Qui Aristotele analizza diverse possibilità, in alcune delle quali riecheggiano concetti di chiara ispirazione platonica: «Se il luogo è ciò che immediatamente contiene ciascun corpo, esso sarà allora un certo limite, sicché il luogo sembrerà essere la configurazione e la forma di ciascuna cosa, mediante cui sono limitate la grandezza e la materia della grandezza»[11]. Dunque, il luogo di un corpo potrebbe essere a) forma b) materia c) estensione tra le superfici del contenitore del corpo (ovvero il volume) d) superficie interna che lo racchiude. Ora, un corpo è fatto di materia e forma. Dunque poiché «il luogo è ciò che contiene quell'oggetto di cui è luogo e che non è nulla della cosa medesima che essa contiene»[12], le prime due alternative devono essere scartate. La terza implicherebbe che il luogo sarebbe un volume tri-dimensionale e, dunque, finirebbe con l'essere anch'esso un corpo. Ma poiché non ci può essere più di un corpo nello stesso posto, anch'essa deve essere scartata. Quindi resta solo la quarta. Osservando, poi, che «il cambiamento locale dell'oggetto spostato avviene in un contenitore che è in quiete»[13], Aristotele arriva infine alla sua famosa definizione: «Il luogo [di un corpo contenuto] è il primo limite immobile di ciò che lo contiene»[14]. In questo modo, tra tutti i possibili contenitori del corpo in questione, Aristotele individua prima il più piccolo di essi, quello cioè che è contenuto in tutti gli altri e con il quale il corpo è contiguo. Poi, definisce 'luogo' il limite (*peras*) di questo contenitore minimo, definendolo tramite la sua superficie interna.

Andiamo adesso al vuoto. Aristotele esordisce dichiarando che «si deve pretendere che il fisico mediti intorno al vuoto, se esso sia o no e in che modo e che cosa esso sia, proprio come si è fatto a proposito del luogo»[15]. A questo scopo, bisogna iniziare «prendendo in esame le teorie di quelli che ne sostengono l'esistenza e di quelli che,

al contrario, la negano ed anche le opinioni comuni su tali argomenti»[16]. Gli uomini comuni affermano che «il vuoto è un'estensione in cui non vi è alcun corpo sensibile»[17]. Questo viene giustificato poiché si assume che ogni corpo sia tangibile e che ogni corpo sia in un luogo. Dunque il vuoto sarebbe un luogo nel quale non vi è alcun corpo. Ma, ricordando la definizione di luogo data in precedenza, questo è impossibile. Infatti sarebbe equivalente ad adottare la terza alternativa scartata in precedenza, quella cioè di identificare il luogo come estensione tri-dimensionale, per la quale il luogo finirebbe per essere anch'esso un corpo.

Dunque, ove ci fosse il vuoto, il luogo non può essere definito. Viceversa, dove il luogo può essere definito non può esserci il vuoto. Si noti come questo equivale a dire che il luogo rimane indipendente dai suoi mutevoli contenuti a condizione che ve ne sia comunque qualcuno. Nell'esempio del vaso (un luogo trasportabile), il luogo che si ottiene non dipende dal fatto che esso venga riempito da aria, acqua, farina ... Il vaso, però, deve comunque essere contenitore di qualcosa, anche solo in linea di principio.

Questo argomento forma la base del rifiuto del vuoto da parte di Aristotele. Nella Fisica, Aristotele produce molti altri argomenti per convincere il lettore dell'impossibilità del vuoto ma questi argomenti non aggiungono molto di più a quello che abbiamo già ricordato. Questa insistenza dimostra solo che per lui il rifiuto del vuoto rappresentava una condizione vitale. Molto probabilmente, come suggerisce l'analisi di Rovelli citata in precedenza, Aristotele aveva capito che la sua fisica descriveva correttamente il moto dei corpi solo dentro un fluido. Da questo deduceva che il vuoto non poteva esistere e arguiva in modo tale da 'dimostrare' questa sua tesi.

5.3 Cartesio

Ciò non significa che l'idea generale di Aristotele sul vuoto non abbia una sua validità. Infatti, essa potrebbe diventare la base per una visione in cui, oltre alla materia ordinaria osservabile, esiste necessariamente una sostanza particolare di tipo diverso. Essa non è direttamente percepibile ed occupa uniformemente tutte le parti di spazio che ci sembrano vuote. Nondimeno, il suo ruolo è fondamentale perché, senza di essa, la materia ordinaria, cioè quella che comunemente sperimentiamo, non potrebbe esistere, avere stabilità⁴. Quindi, se immaginassimo di poter sostituire questa sostanza particolare con il puro 'nulla', la nozione di una data estensione spaziale, delimitata da pareti di materia ordinaria, perderebbe di senso. Per esempio, queste pareti potrebbero finire con lo schiacciarsi l'una sull'altra.

Questo fu il punto di vista di Cartesio: «Se qualcuno chiede cosa succederebbe se

⁴In base alla moderna visione ricordata nel Cap. 2 questo non dovrebbe troppo stupirci. Infatti, le proprietà della materia osservabile vengono a dipendere da ciò che ci appare spazio vuoto ma è, in realtà, permeato da un condensato uniforme di quanti elementari.

Dio rimuovesse ogni singolo corpo contenuto in un vaso, senza permettere a nessun altro corpo di subentrare a quello che è stato rimosso, la risposta è che le pareti del vaso dovrebbero entrare in contatto. Poiché se c'è il nulla tra due corpi, essi devono necessariamente essere in contatto. Ed è una manifesta contraddizione che essi siano separati, che ci sia una distanza tra di essi, se questa distanza fosse il nulla: perché ogni distanza è un modo dell'estensione e quindi non può esistere senza una sostanza estesa»[18]. Il punto è che, per Cartesio, estensione e materia (*res extensa*) devono essere identificate. Dunque, non ci può essere alcunché di esteso senza qualche tipo di sostanza materiale. Il fatto, poi, che sembra esserci il vuoto è solo un'illusione. Cartesio la spiega prima ricordando il significato relativo di 'vuoto' (vuoto di che?) e poi facendo diversi esempi che mostrano come i nostri sensi non ci permettono di percepire alcuni corpi ed alcuni tipi di movimento. Per questo, «...quando diciamo che un luogo è vuoto, è evidente che noi non vogliamo dire che non c'è nulla in quel luogo o in quello spazio, ma solo che non c'è niente di ciò che presumiamo dovervi essere»[19].

Quello che ci appare vuoto va in realtà pensato come riempito di una 'materia sottile', i cui costituenti sono estremamente piccoli ed in rapidissima agitazione. Queste sue caratteristiche la fanno somigliare ad un fluido: «Io concepisco la materia sottile come un fluido continuo che occupa tutto lo spazio non occupato da altri corpi»[20]. Questo aspetto della 'materia sottile' è spesso fonte di qualche ambiguità, anche per le differenze che esistono tra la versione originale nel 'Trattato sul Mondo o Della Luce' (1633) e quella nei 'Principi della Filosofia' (1647). Un utile riferimento per approfondire l'argomento è l'articolo di Lynes [21].

Punto essenziale della visione cartesiana è l'esistenza di una sola forma di materia: «Non c'è dunque che una stessa materia in tutto l'universo, e noi la conosciamo per questo solo, che essa è estesa; poiché tutte le proprietà che percepiamo distintamente in essa, si riportano a questa: che essa può essere divisa e mossa secondo le sue parti, e può ricevere tutte le diverse disposizioni, che noi osserviamo potersi verificare per mezzo del movimento delle sue parti. Poiché ... è certo ... che tutta la diversità delle forme che vi si trovano dipende dal movimento locale»[22].

Nel processo cosmogonico, da quest'unica materia indifferenziata che originariamente riempiva uniformemente tutto lo spazio, si sono formati tre elementi fondamentali, diciamo E1, E2 ed E3. I loro costituenti sono caratterizzati da diverse dimensioni e diverse velocità di movimento. La materia sottile è quella del tipo E1, che forma la luminosa materia del sole e delle stelle, e quella del tipo E2 che riempie gli spazi interplanetari ed interstellari. E3 rappresenta invece la densa materia che costituisce la Terra ed i pianeti. La suddivisione in elementi avviene in modo tale da non lasciare alcuno spazio vuoto. Dunque le particelle più sottili, quelle di E1, vanno ad occupare tutti gli interstizi lasciati liberi dalle particelle di E2 che occupano tutto lo spazio lasciato libero dalla materia E3. Questo spiega come mai «un vaso pieno di oro o di piombo non contiene più materia di quando

pensiamo che sia vuoto; e questo può apparire molto strano a coloro la cui ragione non va oltre le loro dita e che ritengono esservi al mondo solo ciò che toccano»[23].

La 'materia sottile' diventa anche un modo per dar conto della propagazione della luce, del calore e delle interazioni tra le forme osservabili di materia senza influenze 'occulte' che si propagano attraverso il 'nulla'. Per esempio, per descrivere la gravità diventa essenziale che il mondo sia un 'plenum' per far emergere in modo naturale il concetto di vortice: «Tutti i luoghi sono pieni di corpi, dobbiamo quindi concludere che è necessario che vi sia sempre un circolo di materia o anello di corpi che si muovano insieme in pari tempo; così che, quando un corpo lascia il suo posto a qualche altro che lo caccia, entra in quello di un altro, e quest'altro in quello di un altro e così di seguito fino all'ultimo, che occupa nel medesimo istante il luogo lasciato dal primo. Noi concepiamo questo senza pena in un circolo perfetto»[24].

Questo porta direttamente a quella descrizione nella quale, appunto, i pianeti (materia E3) erano pensati galleggiare in un vortice di materia sottile E2⁵. Si poteva così spiegare come mai le orbite di Keplero si trovassero tutte sullo stesso piano, un aspetto non risolto nella teoria di Newton. Oggi la spiegazione consiste nella teoria di Kant - Laplace del vortice originario da cui si è formato il sistema solare. Come sottolineato da von Weiszäcker, «Kant ha ripreso quanto di corretto c'era nella teoria cartesiana ipotizzando l'esistenza del vortice e colmato le lacune della dottrina newtoniana. Cartesio è stato dunque un precursore dell'attuale teoria della genesi dei pianeti»[2].

5.4 Newton

«Un francese che arrivasse a Londra troverebbe lì la filosofia, come del resto ogni altra cosa, molto differente. Aveva lasciato il mondo come un 'plenum' e ora se lo ritrova come un 'vacuum'». Così scriveva Voltaire nel 1730, in una delle sue 'Lettere Filosofiche', per descrivere la grande differenza tra le idee di Newton e la visione dei cartesiani. Ed aggiungeva: «E' il linguaggio usato, più che la cosa in sé, che irrita la mente umana. Se Newton non avesse usato la parola 'attrazione' nella sua mirabile filosofia, ognuno nella nostra Accademia avrebbe aperto i suoi occhi alla luce. Ma sfortunatamente egli ha usato a Londra una parola che suona ridicola a Parigi; e solo su questo egli fu attaccato, con un'imprudenza che un giorno sarà giudicata molto poco onorevole per i suoi oppositori».

Queste poche righe servono ad illustrare la forte resistenza che incontrò la nuova dottrina newtoniana della gravità. Nonostante fosse la prima teoria capace di spiegare quantitativamente le leggi di Keplero e la gravità terrestre, essa veniva considerata inaccettabile dai cartesiani poiché la gravità veniva intesa come un

⁵Confrontando con la visione aristotelica del 'De Caelo', questo spiega perché per Cartesio divenne naturale dare il nome 'etere' alla sua materia sottile.

effetto occulto, un'azione 'a distanza' attraverso il vuoto. Ma era proprio questa l'idea di Newton? Vediamo un po'.

Nei suoi 'Principi Matematici di Filosofia Naturale', Newton dice (sull'origine di questa forza) «non formulo alcun ipotesi e per noi è abbastanza che la gravità esista ed agisca in accordo alle leggi che abbiamo formulato». Cioè, per Newton, stabilire il modo in cui l'azione reciproca tra i corpi dipende dalle loro posizioni relative (la legge dell'inverso del quadrato della distanza) era tenuto distinto dallo spiegare i meccanismi con cui quella stessa azione si produceva.

D'altro canto in una lettera al vescovo Bentley, egli scriveva «...che un corpo possa agire su di un altro a distanza e attraverso il vuoto senza la mediazione di alcunché è per me una tale assurdità che credo nessun uomo in possesso di una competente capacità di pensiero possa mai concepirla. La gravità deve essere causata da un agente in costante accordo con certe leggi. Se poi questo agente sia materiale od immateriale lo lascio alla considerazione dei lettori». Proprio per questo, probabilmente, alla fine dei suoi 'Principi', speculava sulle straordinarie funzioni di un certo 'Spirito sottile' che potesse alla fine spiegare tutta la varietà dei fenomeni osservati. Si noti come Newton non usi né il termine 'materia sottile' di Cartesio e neppure il termine 'etere'. Usa invece un termine, 'Spirito sottile', che lascia aperta l'ambiguità materiale/immateriale citata sopra. Il termine 'etere' però riappare, dopo alcuni anni, nelle 'Questioni' poste alla fine dell'Ottica dove egli considera diverse questioni irrisolte che sembrano, appunto, suggerirne l'esistenza.

Una di queste 'Questioni', la diciottesima, tratta con la situazione di due recipienti cilindrici all'interno dei quali sono sospesi due termometri (che non sono in contatto con le pareti dei contenitori). Newton osserva che se da uno dei due recipienti viene pompata fuori tutta l'aria, quando i due recipienti vengono trasportati da un luogo freddo ad uno più caldo la temperatura segnata dai due termometri (quello nel contenitore evacuato e quello in cui c'è ancora aria) cresce quasi nello stesso tempo. Si domanda allora: «Non è il calore della stanza calda trasportato 'nel vuoto' dalle vibrazioni di un mezzo molto più sottile dell'aria che rimane 'nel vuoto' dopo l'estrazione dell'aria? ...E questo mezzo non è estremamente più raro e sottile dell'aria ed estremamente più elastico ed attivo? E non penetra facilmente in tutti i corpi? E non è sparso (a causa della sua forza elastica) in tutti i cieli? »[25].

Dunque, evidentemente, Newton si rendeva conto che un etere impercettibile poteva spiegare la trasmissione del calore e, allo stesso tempo, dar conto della propagazione della luce e della gravità. Per questo cercava di capire quali proprietà questo etere dovesse avere. Per esempio, un'elasticità molto maggiore di quella dell'aria per spiegare l'enorme velocità della luce. Questo emerge chiaramente nella ventunesima 'Questione': «E che la forza elastica di questo mezzo sia estremamente grande può essere ricavato dalla velocità delle sue vibrazioni. I suoni percorrono circa 1140 piedi inglesi in un minuto secondo ed in sette o otto minuti percorrono circa cento

miglia inglesi. La luce viaggia dal sole fino a noi in circa sette o otto minuti e la distanza è di circa 70 milioni di miglia inglesi. Quindi le vibrazioni e le pulsazioni di questo mezzo devono essere circa 700 mila volte più veloci dei suoni. Quindi la forza elastica di questo mezzo, in proporzione alla sua densità, deve essere di 700 mila x 700 mila (ossia circa 490 miliardi) ⁶ volte più grande di quanto sia per l'aria»[26].

Come si poteva giustificare ciò? E come poteva questo riconciliarsi con il non offrire alcuna resistenza al moto dei corpi? Newton arguisce che questo possa derivare da due aspetti, l'estrema piccolezza delle particelle di etere e la forte repulsione tra di esse: «E così se si supponesse che l'Etere (come la nostra aria) può contenere particelle che si sforzano di allontanarsi l'una dall'altra (infatti non so cosa sia questo Etere) e che le sue particelle sono estremamente più piccole di quelle dell'aria, o anche di quelle della luce, ... questo potrebbe rendere quel mezzo estremamente più raro ed elastico dell'aria e, per conseguenza, estremamente meno capace di offrire resistenza ai moti dei proiettili e più atto a premere sopra i grandi corpi, a causa dello sforzo che compie per espandersi»[26].

Questa idea di un etere formato da particelle piccolissime si ritrova del resto anche in Huygens ('Discorso Sulla Causa della Gravità', 1690): «L'estrema piccolezza dei componenti della materia fluida è assolutamente necessaria per spiegare le proprietà osservate del peso, cioè che corpi massivi, racchiusi da tutti i lati dentro recipienti di vetro, metallo, o qualunque altro materiale, risultano avere sempre lo stesso peso. Dunque la materia, che abbiamo detto essere la causa del peso, deve passare liberamente attraverso i corpi, anche i più densi, con la stessa facilità con la quale passa attraverso l'aria».

Quindi Newton, anche per l'influsso di Huygens, che proprio mediante l'ipotesi dell'etere riusciva a rendere consistente una descrizione ondulatoria della luce, aveva in mente un ben preciso modello dinamico. Per lui lo spazio che appare vuoto non era per nulla vuoto ma andava invece pensato come riempito di particelle piccolissime che tendono a respingersi fortemente l'una con l'altra. Esse formano un etere che è alla base della propagazione della luce e le cui variazioni di densità sono responsabili dell'attrazione gravitazionale tra i corpi osservabili. Il punto è che, da ciò, non riusciva poi a dedurre la fondamentale legge dell'inverso del quadrato e, dunque, si può capire perché questo suo modello restò alla fine confinato al livello puramente ipotetico.

5.5 Kant

La concezione dell'etere in Kant non è molto nota ma merita di essere ricordata per la sua straordinaria modernità. La collocazione precisa si trova nella sua ultima

⁶Qui Newton sta usando la relazione per cui, in un mezzo comprimibile, il quadrato della velocità u delle onde di compressione è dato da $u^2 = \text{elasticità} / \text{densità}$.

opera rimasta incompiuta, chiamata universalmente ‘Opus Postumum’, alla quale lavorò negli ultimi anni sino alla morte nel 1804. Le origini di questa riflessione risalgono però a diversi anni prima, cioè alla sua opera del 1786 ‘Primi Principi Metafisici della Scienza della Natura’ [27] e alla ‘Critica della Ragion Pura’ [28] del 1787. Per inquadrare il problema, cominciamo ricordando due aspetti essenziali del pensiero kantiano, cioè il rapporto tra matematica e scienze naturali ed il ruolo dei dati fenomenici.

Per Kant, una scienza naturale può propriamente dirsi ‘scientifica’ solo nella misura in cui applica la matematica ai suoi oggetti. La giustificazione di ciò si trova, però, al di fuori della matematica poiché «la scienza naturale propriamente detta presuppone in primo luogo la metafisica della natura»[27]. E’ solo un’illusione che si possa fare a meno di essa. Infatti, «tutti i filosofi della natura che vogliono procedere matematicamente nelle loro ricerche si sono sempre serviti di principi metafisici (benché inconsciamente) anche se protestavano solennemente contro ogni pretesa della metafisica sulla loro scienza»[27].

La metafisica, pur non avendo, per definizione, contenuti empirici, «può tuttavia trattare le leggi che rendono possibile il concetto di una natura in generale, anche senza relazione a qualche oggetto determinato di esperienza»[27]. Questo ruolo fondamentale della metafisica dà alla teoria della conoscenza una sua autonomia, rispetto ai risultati dell’esperienza, che Kant riassume dicendo: «E’ necessario dunque che la ragione si presenti alla natura avendo in una mano i principi, secondo i quali soltanto è possibile che fenomeni concordanti abbiano valore di legge, e nell’altra l’esperienza, che essa ha immaginato secondo questi principi: per venire, bensì, istruita da lei ma non in qualità di scolaro che stia a sentire tutto ciò che piaccia al maestro, sebbene di giudice, che costringa i testimoni a rispondere alle domande che egli loro rivolge»[28].

Tuttavia, su queste sole basi, Kant aveva dovuto concludere che «la facoltà pura dell’intelletto non arriva a prescrivere a priori ai fenomeni, mediante le sole categorie, più leggi di quelle sulle quali si basa una natura in generale, come la regolarità dei fenomeni nello spazio e nel tempo. Le leggi particolari, poiché riguardano fenomeni empiricamente determinati, non possono quindi essere desunte esclusivamente dalle categorie, sebbene sottostiano tutte alle categorie. Deve dunque intervenire l’esperienza»[28].

Allo stesso tempo, dire che la fisica impara queste leggi solo dall’esperienza significherebbe riconoscere la validità di pure ‘leggi empiriche’ e quindi ricadere sotto la critica di Hume (come può ciò che imparo solo dall’esperienza avere, di per sé, un valore universale?). Che fare allora? Rinunciare a dare un carattere rigoroso alla conoscenza della natura? Questa era la soluzione cui Kant propendeva al tempo della Critica. Invece, successivamente, nell’ ‘Opus Postumum’ [29] egli si propone di costruire un «Passaggio (*Übergang*) dai principi metafisici della scienza della

natura alla fisica».

Come messo ben in evidenza da Vittorio Mathieu [29], questo proposito viene molte volte dallo stesso Kant definito come 'sconcertante', 'assurdo' o 'insensato' in quanto si tratta di voler anticipare, sulla base del solo nostro intelletto, degli elementi che saranno in realtà raccolti soltanto dopo, in virtù, cioè, della nostra esperienza dei fenomeni. Eppure, insiste Kant, questo diventa necessario se si vuole dare dignità scientifica a quella che altrimenti sarebbe solo una 'compilazione', mero empirismo. Nella sua visione, l'*Übergang* non deve consistere tutto in concetti 'a priori', altrimenti sarebbe semplice metafisica, ma neppure interamente in rappresentazioni empiriche. Esso deve invece riguardare il sistema generale delle forze che muovono la materia e la rendono percettibile e, quindi, sono alla base delle nostre esperienze.

In questo contesto va collocata la questione dell'etere che è l'elemento cruciale per l'*Übergang*. A questo scopo, Kant definisce la fisica come *sistema dottrinale della conoscenza empirica in generale* [30], cioè che «ha per proprio oggetto cose la cui conoscenza è possibile solo mediante l'esperienza»[31]. Ora, ogni dato di esperienza è «apprensione come reazione al mobile nello spazio (la materia), in quanto oggetto sensibile esterno, ed al suo movimento»[31]. Quindi, «l'esistenza di forze motrici [che cioè muovono i corpi] nello spazio, in quanto esse impressionano il senso, è il fondamento della percezione di oggetti esterni»[32]. Da questo segue che «La fisica è il sistema dottrinale delle forze motrici della materia, in quanto può essere esibito nell'esperienza»[33]. Tali forze motrici hanno proprio nell'etere la loro origine. L'etere svolge dunque un ruolo di mediazione rendendo possibile la nostra esperienza della materia ed essendo alla base delle forze fondamentali.

L' 'Opus Postumum' raccoglie molte riflessioni in ordine sparso. In un breve riassunto, gli elementi dell'etere kantiano possono essere schematizzati così:

1) Lo spazio completamente vuoto (quello degli antichi atomisti) non è un oggetto di possibile esperienza, «Dello spazio vuoto non può esserci alcuna esperienza né alcuna inferenza circa l'oggetto di esso ... Dunque la proposizione 'c'è spazio vuoto' non può essere mai oggetto d'esperienza, né diretta né indiretta, ma è solo raziocinata»[34].

2) Oggetto dell'esperienza sono invece le manifestazioni dei corpi definiti come «una materia che limita sé stessa secondo struttura e forma mediante le sue forze internamente ed esternamente motrici, e che resiste ad ogni alterazione di detta struttura e forma»[35].

3) Come già detto, la percezione primaria dei corpi, nello spazio e nel tempo, richiede un qualche tipo di loro movimento affinché essi possano agire sul soggetto come oggetti sensibili. Quindi deve esistere un sistema di forze motrici che rende possibile l'esperienza. Esse vanno pensate come «forze motrici sul posto»(cfr. con

il concetto di campo locale di forze della fisica relativistica) e trovano la loro origine nell'etere, una forma di materia indifferenziata in continua e rapidissima vibrazione: «Esiste una materia diffusa come un continuum nella totalità dello spazio cosmico, che riempie, penetrandoli uniformemente, tutti i corpi, la si chiami etere o calorico etc. , che non è un elemento ipotetico (per spiegare certi fenomeni ed escogitare, per effetti dati, cause più o meno verosimili), ma può essere postulata e riconosciuta a priori come un elemento appartenente necessariamente al passaggio dai principi metafisici della scienza della natura alla fisica ... Di una tale materia originaria, priva di forma, penetrante tutti gli spazi e garantita solo dalla ragione, di cui noi non pensiamo nulla di più che semplici forze motrici diffuse nello spazio ed onnipresenti, si può postulare la realtà anche prima dell'esperienza e pertanto a priori»[36].

4) L'etere non è esso stesso direttamente percepibile, («Si vede facilmente che l'esistenza di tale materia non è oggetto dell'esperienza e derivata da essa, cioè empiricamente provabile»[37]) in quanto gli organi percettivi (in senso lato) si basano sulle sue stesse forze e «nessun senso può esperire lo strumento dei sensi medesimi come suo oggetto».

5) L'etere viene quindi ad essere un qualcosa d'intermedio tra materia e spazio. Si potrebbe dire che è una specie di 'spazio fisico', riempito cioè da quelle forze che esistono tra i corpi e che sono necessarie per renderne possibile la nostra esperienza (spazio 'ipostatizzato'). Si noti come questa visione sia proprio quella della fisica moderna.

References

- [1] L. Russo, *La rivoluzione dimenticata*, Universale Economica Feltrinelli, Milano 2001.
- [2] C. F. von Weizsäcker, *I Grandi della Fisica*, Donzelli Editore, Roma 2002.
- [3] W. Heisenberg, *Fisica ed Oltre*, Bollati Boringhieri, Torino 1984.
- [4] E. Wigner, *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences*, *Comm. Pure and Appl. Math.*, **13** (1960) 1.
- [5] Aristotele, *Metafisica V* 1015a 13, a cura di M. Zanatta, *Classici Greci e Latini*, BUR Rizzoli 2009.
- [6] Aristotele, *Fisica III* 201a 10, Edizioni Laterza, Bari 2001.
- [7] C. Rovelli, *Aristotle's Physics: a Physicist's Look*, arXiv:1312.4057 [physics.hist-ph]
- [8] Aristotele, *Fisica IV* 208b 6, Edizioni Laterza, Bari 2001.
- [9] *ibidem*, IV 208b 33.
- [10] *ibidem*, IV 208b 9.
- [11] *ibidem*, IV 209b 1.
- [12] *ibidem*, IV 211a 1.
- [13] *ibidem*, IV 212a 9.
- [14] *ibidem*, IV 212a 20.
- [15] *ibidem*, IV 213a 12.
- [16] *ibidem*, IV 213a 20.
- [17] *ibidem*, IV 213a 27.
- [18] R. Cartesio, *I Principi della Filosofia II*, 18, Edizioni Laterza, Bari 2000.
- [19] *ibidem* II, 17.
- [20] R. Cartesio, *Lettera a Morin*, si veda J. Bennett, *Space and Subtle Matter in Descartes's Metaphysics*, in *New Essays on the Rationalists*, R. Gennaro and C. Heunemann Eds., Oxford University Press 1999.
- [21] J. W. Lynes, *Descartes' Theory of Elements : From le Monde to the Principes*, *Journ. Hist. of Ideas*, **43** (1982) 55.

- [22] R. Cartesio, *I Principi della Filosofia* II, 23, Edizioni Laterza, Bari 2000.
- [23] R. Cartesio, *Il Mondo o Trattato della Luce* 4, 8, Edizioni Laterza, Bari 2000.
- [24] R. Cartesio, *I Principi della Filosofia* II, 33, Edizioni Laterza, Bari 2000.
- [25] I. Newton, *Ottica*, Libro terzo, Parte I, Questione 18. A cura di A. Pala, I Classici della Scienza, UTET, Torino 1978.
- [26] *ibidem*, Questione 21.
- [27] I. Kant, *Primi Principi Metafisici della Scienza della Natura*, Introduzione di L. Geymonat, Nota informativa e traduzione di L. Galvani, Edizioni Cappelli, Urbino 1959.
- [28] I. Kant, *Critica della Ragion Pura*, Traduzione di G. Gentile e G. Lombardo-Radice, Introduzione di V. Mathieu, Biblioteca Universale Laterza, Bari 1981.
- [29] I. Kant, *Opus Postumum*, Traduzione ed Introduzione di V. Mathieu, Biblioteca Universale Laterza, Bari 2004.
- [30] *ibidem*, p. 191.
- [31] *ibidem*, p. 197.
- [32] *ibidem*, p. 256.
- [33] *ibidem*, p. 238.
- [34] *ibidem*, p. 147.
- [35] *ibidem*, p. 256.
- [36] *ibidem*, p. 149.
- [37] *ibidem*, p. 167.

6. L'etere ottocentesco e la nascita della relatività

Per entrare nello spirito della fisica di fine Ottocento, immaginiamo di assistere ad una conferenza su 'Campo ed etere' [1] tenuta da Maxwell nel 1876 alla Royal Society di Londra: «Questa sera non ho nessuna scoperta da presentarvi. Voglio invece chiedervi di tornare su un vecchio argomento che è già stato sollevato numerose volte da quando l'uomo incominciò a pensare. Si tratta del problema della trasmissione delle forze. Noi vediamo che due corpi distanti influenzano reciprocamente il loro moto. Questa azione reciproca dipende dall'esistenza di una terza cosa, un mezzo che la trasmetta, oppure i corpi agiscono uno sull'altro direttamente, senza l'intervento di nient'altro?».

Partendo da questo, Maxwell comincia chiedendosi se anche nei casi in cui apparentemente non sembrano esserci agenti intermedi, «non sia tuttavia più ragionevole ammettere l'esistenza di un mezzo che sfugge attualmente ai nostri sensi, piuttosto che affermare che un corpo può esercitare un'azione in un luogo in cui non è presente». Passa, poi, ad analizzare gli argomenti dei sostenitori dell'azione 'a distanza': «Che diritto abbiamo, essi dicono, di affermare che un corpo non possa agire là dove non è presente? Non vediamo un esempio di azione a distanza nel caso del magnete, che agisce su un altro magnete non solo a distanza ma anche indipendentemente dalla natura della materia che occupa lo spazio interposto?». Ed inoltre, «la legge della gravità di Newton, che tutte le osservazioni astronomiche tendono a confermare ulteriormente, non afferma solo che i corpi agiscono uno sull'altro attraverso gli enormi spazi interposti, ma che due parti di materia, l'una situata nella profondità della terra e l'altra nella profondità della massa del sole agiscono l'una sull'altra esattamente come se gli strati sopra di esse non esistessero. Se un qualche mezzo prendesse parte alla trasmissione di questa forza dovrebbe esserci sicuramente una differenza a seconda che lo spazio tra i corpi non contiene altro che questo mezzo o viceversa è occupato dalla sostanza densa della terra o del sole».

Detto questo, Maxwell ricorda come il punto di vista di Newton sui possibili meccanismi dell'interazione gravitazionale fosse molto più complesso di come usualmente si creda. A questo scopo, riporta il pensiero di Newton come si evince dalla lettera al vescovo Bentley e dalle 'Questioni' da lui poste alla fine dell'Ottica (da noi riportate nel Cap.5). Dunque, conclude Maxwell, Newton si era sempre sforzato di spiegare la gravità tramite l'azione di un mezzo e la ragione per cui non aveva mai pubblicato queste ricerche fu data esclusivamente dalla sua incapacità di riottenere da questi meccanismi la fondamentale legge dell'inverso del quadrato.

Per quanto riguarda il magnetismo, Maxwell porta invece il discorso sulla tecnica di Faraday di visualizzare le linee di forza magnetica mediante la limatura di ferro. Con questo metodo, lo scienziato «può tracciare le varie direzioni delle linee di forza e determinarne la polarità relativa, può osservare in che direzione la forza aumenta

o diminuisce e, nei sistemi complessi, localizzare i punti neutri, ovvero le zone che non hanno né polarità né forza, anche se sono situate in mezzo a potenti magneti». Le linee di forza di Faraday formano un sistema tracciato in maniera precisa ed hanno un'esistenza continua nello spazio e nel tempo. L'osservazione della limatura di ferro mostra anche un altro aspetto. Le linee non hanno solo un significato di visualizzazione geometrica ma devono essere interpretate come linee di forza fisiche, quasi che esprimessero uno stato di stress di un mezzo sottostante, «una tensione - come quella di una fune - nella direzione delle linee di forza, combinata con una pressione in tutte le direzioni ad esse ortogonali».

Questi aspetti portano a dedurre l'esistenza di un mezzo fisico, l'etere, che permea lo spazio e trasmette questi effetti. Maxwell passa allora ad analizzare questa ipotetica «sostanza materiale, di natura più evanescente dei corpi visibili, che si suppone esista nelle parti dello spazio apparentemente vuote». Come ricordato nel Cap. 2, in quanto mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche e della luce, che sono onde trasversali, l'etere andrebbe pensato simile ad un mezzo elastico. Ad esso si potrebbero dunque attribuire alcune caratteristiche fisiche definite quali elasticità, rigidità e densità. Riguardo alla sua costituzione fisica, un modello promettente sarebbe di immaginarlo come un fluido composto di 'vortici molecolari', cioè di piccole porzioni in moto rotatorio, ciascuna intorno al proprio asse.

Maxwell ammette che «non è stata finora elaborata alcuna teoria che spieghi come questo sistema di vortici molecolari si mantiene per un tempo indefinito senza che la loro energia sia un po' alla volta dispersa in quel movimento irregolare che nei mezzi ordinari si chiama calore». Tuttavia la sua conclusione è netta: «Per quante difficoltà possiamo incontrare nella formulazione di una valida teoria della struttura dell'etere, non vi può essere dubbio che gli spazi interplanetari e interstellari non sono vuoti, ma sono occupati da una sostanza o corpo materiale, che è certamente il corpo più esteso e probabilmente il più uniforme che si conosca. Se poi questa vasta e omogenea estensione di materia isotropa oltre ad essere un mezzo di interazione fisica tra corpi distanti, e ad avere altre funzioni, delle quali forse non abbiamo ancora alcuna idea, costituisca anche, come sembrano pensare gli autori di 'Universo Invisibile', l'organismo materiale di esseri dotati di vita e di intelligenza altrettanto elevate o più elevate delle nostre attuali è un problema che va molto al di là dei limiti di una teoria fisica».

Questa conclusione di Maxwell ci induce a qualche riflessione. In particolare, l'ultima frase, nella quale Maxwell si riferisce ad alcune speculazioni sulle funzioni dell'etere avanzate da Stewart e Tait nel loro libro 'L'Universo Invisibile', dovrebbe anche darci un'idea della rivoluzione scientifica verificatasi nel 1905 con l'avvento della relatività speciale di Einstein e la sua originaria negazione dell'etere. Anche se la posizione di Einstein diventò molto più sfumata con il passare degli anni, soprattutto dopo il 1916 con il passaggio dalla relatività speciale alla relatività generale, l'impatto del suo primo atteggiamento di rifiuto rimase straordinario.

Tuttavia, alla base di quel rifiuto dell'idea dell'etere c'era un equivoco fondamentale. Come realizzato poi dallo stesso Einstein, infatti, non riuscire a mettere in evidenza il moto rispetto a qualche forma di etere non equivale a negarne l'esistenza. Questa evoluzione del suo pensiero, inquadrata nell'ambiente difficile della Germania del primo dopoguerra, ha un interesse generale e sarà da noi raccontata in una sezione a parte. Per il momento andiamo con ordine partendo dall'originaria idea di Maxwell di rivelare il moto della Terra nell'etere.

6.1 I primi esperimenti di ether-drift

Nell'ambito della fisica classica di Galileo e Newton, e considerando l'etere come un mezzo fisico ordinario, diventava naturale cercare di rivelare l'ether-drift, cioè il moto di deriva della Terra all'interno di esso. L'idea originale si trova in un contributo di Maxwell del 1878 all'Enciclopedia Britannica. Egli assumeva il modello di un etere stazionario rispetto al quale la luce si propagava con velocità costante c in tutte le direzioni. Invece, per un osservatore in moto la luce emessa da una sorgente terrestre avrebbe dovuto mostrare piccole differenze di velocità nelle varie direzioni. Questo argomento sembrava molto naturale. Infatti, un altro effetto, quello dell'aberrazione della luce stellare, scoperto da Bradley nel 1728, veniva interpretato come conseguenza del moto della Terra in un etere stazionario con la velocità tipica $v \sim 30$ km/s dovuta al moto di rivoluzione intorno al Sole.

Su questa base, Maxwell dedusse che ci dovevano essere piccole differenze nei tempi impiegati dalla luce a percorrere cammini ottici diversi. In particolare, su due percorsi di andata e ritorno, uno lungo la direzione del moto della Terra e l'altro in direzione ortogonale. Egli capì però che, a differenza dell'aberrazione, dove l'effetto osservato era proporzionale al rapporto v/c , nel suo caso effetti lineari in v/c si sarebbero cancellati. Quindi, concludeva che la differenza dei tempi impiegati dalla luce su due percorsi di andata e ritorno, sarebbe stata proporzionale a $(v/c)^2 \sim 10^{-8}$ e, molto probabilmente, inosservabile.

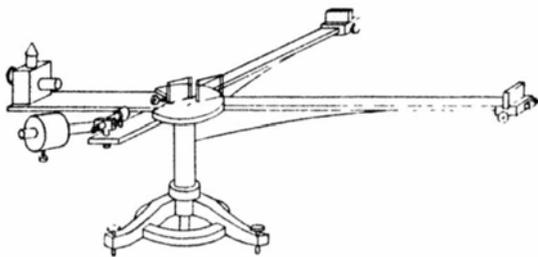


Figure 4: *Il primo interferometro di Michelson del 1881 [2].*

L'idea di Maxwell fu però presa sul serio da Michelson e messa in pratica con quello straordinario strumento che fu poi chiamato *interferometro di Michelson*. La sua prima realizzazione, nel 1881 a Berlino [2], è riportata nella figura 4 (vedi anche la figura 3 del Cap. 3). La luce emessa dalla sorgente (all'estrema sinistra della figura) viene separata da uno specchio semiargentato in due raggi che si propagano lungo due cammini ortogonali, ognuno di lunghezza D . I due raggi vengono poi riflessi da due specchi e quindi rifocalizzati su un obiettivo nel quale la loro ricomposizione produce una figura di interferenza. Ruotando tutto l'apparato, dal calcolo di Maxwell, le frange della figura di interferenza si sarebbero dovute spostare di una quantità proporzionale al prodotto $(D/\lambda)(v/c)^2$ dove λ è la lunghezza d'onda della luce utilizzata.

Per l'apparato originario del 1881, D e λ erano tali che, per $v = 30$ km/s, si aveva $(D/\lambda)(v/c)^2 \sim 0.02$. Il risultato ottenuto da Michelson fu però circa due volte più piccolo e considerato non conclusivo a causa di disturbi vari. Questo convinse Michelson a realizzare un nuovo esperimento dove, tramite riflessioni multiple, D raggiunse il valore di 11 metri. Questa nuova versione dell'apparato fu realizzata da Michelson e Morley nel 1887 [3] a Cleveland, vedi figura 5.

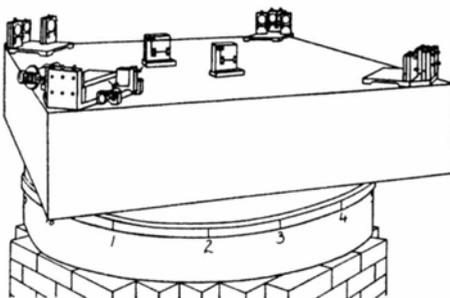


Figure 5: *L'interferometro di Michelson e Morley del 1887 [3].*

Michelson e Morley eseguirono sei serie di osservazioni, nei sotterranei della Case Western University di Cleveland, a mezzogiorno ed alle sei di pomeriggio nei giorni di 8, 9, 11 e 12 luglio 1887. Ogni sessione sperimentale consistette in sei giri dell'interferometro, ognuno eseguito nel tempo di sei minuti. Per questo nuovo apparato, il valore teorico di spostamenti di frange aspettato era $(D/\lambda)(v/c)^2 \sim 0.2$ mentre quelli osservati nelle varie sessioni risultarono molto più piccoli, tra 0.010 e 0.025. Per di più, i valori misurati alla stessa ora in giorni consecutivi mostravano differenze notevoli. Invece, poiché la velocità della Terra non poteva certo essere molto differente, avrebbero dovuto essere molto simili, almeno entro gli errori sperimentali. Come anticipato nel Cap. 3, la combinazione di questi due aspetti, cioè dati sperimentali piccoli ed irregolari, portò all'interpretazione delle

misure come tipici effetti strumentali. Si diffuse quindi l'idea che l'esperimento di Michelson e Morley avesse dato un risultato 'nullo', nel quale, cioè, non si vedeva alcuna traccia dell'ether-drift.

6.2 La prima relatività

L'impatto dell'esperimento di Michelson e Morley fu enorme poiché esso sembrava mettere in questione i fondamenti della fisica di allora, cioè le trasformazioni di Galileo e/o la stessa esistenza dell'etere. Proprio per questo, però, stimolò anche le ricerche di coloro che, continuando a vedere nell'etere la base dei fenomeni elettromagnetici, cercarono di indagarne più a fondo le proprietà. Da una ricostruzione storica di questa prima fase, si veda per esempio [4]-[7], emerge come un elemento importante sia stato l' 'ellissoide di Heaviside' cioè la deformazione della configurazione del campo elettrico associato ad una carica in moto. Questo indusse Fitzgerald nel 1889 (e poi Lorentz nel 1895) a supporre che le lunghezze di corpi tenuti insieme da forze elettromagnetiche si contraessero, nella direzione del moto, rispetto alle loro copie in quiete nell'etere. Seguendo la stessa logica, Larmor nel 1900 arrivava al fenomeno complementare della dilatazione del periodo di rotazione per un sistema di due cariche elettriche opposte il cui baricentro si muove nell'etere con velocità uniforme.

L'importanza di questa prima fase è stata colta da Bell nel capitolo dedicato alla relatività del suo libro 'Dicibile ed indicibile in meccanica quantistica' [8]. In questo suo saggio, sottolinea come, se avesse avuto occasione di insegnare la relatività, piuttosto che gli aspetti di rottura netta con il passato, egli avrebbe cercato di mettere in evidenza la continuità con le idee precedenti. La presentazione di Bell ha notevole valore pedagogico e sarà da noi qui sintetizzata in una forma estremamente semplificata.

Per cercare di riassumere lo 'spirito Lorentziano' della prima relatività, partiamo dal punto di vista di allora per cui esiste un sistema di riferimento privilegiato, l'etere, nel quale valgono le equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo. Introduciamo anche un osservatore Σ che sia in quiete nell'etere. Le sue misure di lunghezza spaziale e di durata temporale sono eseguite mediante opportuni regoli ed orologi la cui costituzione fisica dipende dalle proprietà della materia. Pensiamo la materia in modo molto schematizzato in termini di atomi i cui due elementi fondamentali (nucleo ed elettroni) interagiscono solo elettromagneticamente. Definiamo anche (X, Y, Z, T) le coordinate con le quali l'osservatore Σ parametrizza lo spazio a 3 dimensioni al variare del tempo.

Consideriamo prima materia atomica che sia in quiete nell'etere. Semplificando al massimo, possiamo dire che Σ vede orbite atomiche circolari di raggio L_0 percorse dagli elettroni in un certo periodo di tempo τ_0 . Invece, a causa delle deformazioni subite dalla configurazione del campo elettromagnetico, la materia atomica in moto

nell'etere esibisce per Σ due effetti peculiari. Definendo v' la velocità di traslazione (uniforme) della materia nell'etere, c la velocità della luce nel sistema dell'etere ed il rapporto $\beta' = v'/c$, Σ nota che:

1) Le dimensioni dell'orbita risultano contratte di un fattore $\sqrt{1 - (\beta')^2}$ nella direzione del moto. Cioè le orbite hanno una forma ellittica per cui la dimensione longitudinale (lungo il moto) è $L_{\text{long}} = L_0 \sqrt{1 - (\beta')^2} < L_0$. Invece le dimensioni trasverse (perpendicolari al moto) sono inalterate, ovvero $L_{\text{trasv}} = L_0$.

2) Il periodo risulta dilatato di un fattore $\gamma' = \frac{1}{\sqrt{1 - (\beta')^2}}$, ovvero $\tau = \tau_0 \gamma' > \tau_0$.

Possiamo allora cercare una trasformazione lineare, dalle coordinate (X, Y, Z, T) di Σ , a coordinate di un nuovo osservatore S' , diciamo (x', y', z', t') . La trasformazione deve essere tale che la materia in moto rispetto a Σ venga vista da questo nuovo osservatore S' esattamente come Σ vede la materia che è in quiete rispetto a lui (cioè con orbite atomiche circolari di raggio L_0 percorse in un periodo τ_0). Questa trasformazione, che corrisponde a passare da Σ all'osservatore solidale con la materia in moto, viene detta trasformazione di Lorentz. Definendo l'asse X come quello del moto, essa ha la forma seguente:

$$x' = \gamma'(X - v'T) ; \quad y' = Y ; \quad z' = Z ; \quad t' = \gamma'(T - \frac{v'X}{c^2})$$

Le formule inverse si ottengono facilmente scambiando le variabili accentate con quelle non accentate e cambiando segno alla velocità, cioè

$$X = \gamma'(x' + v't') ; \quad Y = y' ; \quad Z = z' ; \quad T = \gamma'(t' + \frac{v'x'}{c^2})$$

Per piccole velocità, queste formule si riducono alle trasformazioni di Galileo della fisica classica: $x' = X - v'T$; $y' = Y$; $z' = Z$; $t' = T$. Le trasformazioni di Lorentz preservano la forma delle equazioni di Maxwell ed il valore della velocità della luce nell'etere e spiegano il risultato negativo degli esperimenti di ether-drift. Infatti un segnale luminoso viene visto da S' propagarsi sempre con lo stesso valore $c' = c$ qualunque sia la sua velocità di traslazione rispetto a Σ . Questi aspetti delle trasformazioni di Lorentz indussero Poincaré nel 1905 a formalizzare così il Principio di Relatività da lui già proposto nel 1904 alla Conferenza di St. Louis: «Applicare una di tali trasformazioni equivale ad imprimere una traslazione comune a tutto il sistema. Allora due sistemi, uno immobile nell'etere ed uno in traslazione uniforme diventano la perfetta immagine l'uno dell'altro».

6.3 La relatività speciale di Einstein nel 1905

Proseguendo nella linea della continuità delle idee, piuttosto che in quella di una cesura radicale con il passato, vediamo allora come si potrebbe inquadrare la visione di Einstein del 1905. Assumiamo che il moto rispetto all'etere risulti sempre e comunque inosservabile. Allora l'etere, come sistema di riferimento, diventa

un concetto superfluo e può essere eliminato. A questo scopo, consideriamo due trasformazioni di Lorentz

$$\begin{aligned} (X, Y, Z, T) &\rightarrow (x', y', z', t') && : v' \text{ (rispetto all'etere)} \\ (X, Y, Z, T) &\rightarrow (x'', y'', z'', t'') && : v'' \text{ (rispetto all'etere)} \end{aligned}$$

Le trasformazioni di Lorentz godono delle fondamentali proprietà di gruppo, cioè la relazione tra due sistemi legati individualmente ad un terzo riferimento da una trasformazione di Lorentz è ancora una trasformazione di Lorentz con parametro di velocità *relativa* fissato da un'opportuna legge di composizione. Nel nostro caso, si ha

$$(x', y', z', t') \rightarrow (x'', y'', z'', t'') \quad : v_{\text{rel}} = \frac{v' - v''}{1 - \frac{v'v''}{c^2}}$$

Dunque, se v' e v'' fossero individualmente inosservabili, l'unico parametro rilevante diventerebbe la loro combinazione v_{rel} e dovrebbe essere possibile vedere gli effetti relativistici come conseguenza del moto relativo. Questo fu proprio il punto di vista di Einstein che, per dimostrare le stesse trasformazioni di Lorentz, sostituisce gli effetti fisici dell'etere elettromagnetico con due postulati:

a) Principio di Relatività (ovvero completa equivalenza dei riferimenti inerziali in moto relativo uniforme)

b) Indipendenza della velocità della luce *nel vuoto* dallo stato di moto della sorgente

In questa derivazione, gli effetti relativistici (contrazione delle lunghezze e dilatazione delle durate) si 'dematerializzano', perdono cioè il significato di effetti dinamici che modificano regoli ed orologi fisici, diventando parte della cinematica. La relatività diventa allora assiomatica, cioè del tutto sganciata da quegli aspetti elettromagnetici che ne erano stati alla base e, come tale, estendibile ad altri fenomeni.

Questa prospettiva più ampia viene ben resa dallo stesso Einstein. Nel 1955, poco prima della sua morte, rilasciò un'intervista (si veda la ref.[9]) su come ricordava le cose, al tempo del suo articolo 'Sull' Elettrodinamica dei Corpi in Movimento' nel 1905: «Non ci sono dubbi che la teoria della relatività, se guardiamo al suo sviluppo in retrospettiva, era matura per essere scoperta nel 1905. Lorentz aveva già dedotto che le trasformazioni che presero il suo nome erano essenziali per l'analisi delle equazioni di Maxwell e Poincaré era penetrato a fondo in tali questioni. Riguardo a me, io conoscevo due lavori di Lorentz del 1895 ma ignoravo i suoi lavori successivi, così come quelli di Poincaré. In questo senso, il mio lavoro del 1905 era indipendente. Il suo nuovo aspetto era la realizzazione che le trasformazioni di Lorentz trascendevano la loro connessione con le leggi dell'elettromagnetismo e riguardavano piuttosto la natura dello spazio e del tempo in generale. Il nuovo

risultato era che l'invarianza per trasformazioni di Lorentz era il requisito di ogni teoria fisica».

Va detto che l'assiomatizzazione operata da Einstein non è l'unico aspetto da sottolineare della sua formulazione. In realtà, secondo le sue stesse parole [10], ricondurre gli effetti relativistici al solo moto relativo tra osservatori «elimina l'ultimo residuo dell'oggettività fisica dello spazio e del tempo». Si elimina infatti non solo l'idea di un unico spazio ed un unico tempo, come nella fisica classica, ma anche la possibilità di ricondurre le differenze tra i vari osservatori ad un riferimento assoluto come nella formulazione Lorentziana.

Tuttavia, si fissano anche precisi criteri per confrontare tra di loro gli osservatori equivalenti. Quindi, quello che diventa essenziale sono i 'giudizi' di questi osservatori. A questo proposito, vale la pena di citare un articolato passo di von Laue: «Il valore e l'alto significato del pensiero di Einstein sta proprio nel fatto che esso infrange il pregiudizio tradizionale di un tempo valido per tutti i sistemi. Pur considerando violenta la svolta alla quale obbliga tutto il nostro pensiero, tuttavia, in esso, non compare la minima difficoltà gnoseologica. Infatti il tempo è come lo spazio, in termini kantiani, una forma della nostra intuizione, uno schema nel quale dobbiamo ordinare gli eventi, con il quale questi assumono significato oggettivo, invece di restare percezioni soggettive, in buona parte accidentali. Questo ordinamento può essere effettuato soltanto sul fondamento della conoscenza empirica delle leggi della natura. Luogo e tempo delle variazioni osservate di un corpo celeste possono essere fissati solo sul fondamento delle leggi ottiche. Il fatto che due osservatori diversi, in movimento, in base alle stesse leggi della natura, effettuino in modo diverso questo ordinamento, ritenendosi ognuno in quiete, non comporta alcuna impossibilità logica. Hanno significato oggettivo entrambi gli ordinamenti, poiché da ognuno di essi, tramite le formule di trasformazione, è possibile dedurre, in modo univoco, quello valido per gli altri osservatori in movimento»[10].

In ogni caso, a dispetto di tutte le differenze interpretative, ed assumendo che gli esperimenti di ether-drift diano sempre e comunque un risultato nullo, resta una sostanziale equivalenza fenomenologica con la visione Lorentziana dove c'è un sistema di riferimento privilegiato. Questo era già stata sottolineato chiaramente sin dall'inizio: «Vediamo dunque che la teoria senza etere di Einstein richiede esattamente ciò che richiede la teoria di Lorentz. Per questo motivo, secondo la teoria di Einstein un osservatore vede le stesse contrazioni, cambiamenti di ritmo etc. , nei regoli di misura e negli orologi che si muovono rispetto a lui, che si hanno nella teoria di Lorentz. Sia detto quindi in tutta generalità: non esiste alcun *experimentum crucis* tra le due teorie»(P. Ehrenfest, 'Sulla crisi dell'ipotesi dell'etere luminifero', Leida 1912).

Come già detto, tale equivalenza dipende solo dalle proprietà di gruppo delle trasformazioni di Lorentz e non viene alterata dall'introduzione di nuove forme

di interazione (come quelle deboli e forti) non ancora note nel 1905. Dunque, se la maggior parte degli studiosi ritiene del tutto soddisfacente considerare gli effetti relativistici come semplici conseguenze del moto relativo, è anche vero che, quando si comincia a riflettere sul loro reale significato fisico, si deve riconoscere [11] che «la contrazione di un regolo è un processo molto complesso e per niente elementare». O meglio, che «gli effetti relativistici, come la contrazione delle lunghezze e la dilatazione delle durate, sono in ultima analisi il risultato di proprietà strutturali della materia»[7] una volta che le equazioni fondamentali della teoria sono simmetriche per trasformazioni di Lorentz. Come tali, essi possono benissimo essere inquadrati in un'opportuna visione dell'etere che non sia di natura puramente elettromagnetica. Piuttosto, andrebbe invece ricordato come il secondo postulato di Einstein, cioè l'indipendenza della velocità della luce *nel vuoto* dallo stato di moto della sorgente, è quello tipico della propagazione di onde all'interno di un mezzo ed, in questo senso, come dice Pauli [11], «si rivela il vero nucleo della vecchia concezione dell'etere».

6.4 Einstein e l'etere

Nonostante questa sostanziale equivalenza fenomenologica, non c'è dubbio che la formulazione assiomatica di Einstein abbia finito con il prevalere nettamente sull'interpretazione Lorentziana. Questo si deve senz'altro a quella prospettiva più ampia della sua presentazione che abbiamo ricordato ed anche agli altri fondamentali contributi di Einstein (effetto fotoelettrico, moto Browniano, problema dei calori specifici, relatività generale,...) che lo hanno proiettato su un livello mai raggiunto da alcun altro scienziato.

C'è, però, un altro motivo per questa preferenza data alla visione di Einstein che ha le sue radici in ciò che fece più scalpore nel 1905, nella sua frase secondo cui «L'introduzione di un etere luminifero risulta essere superflua»[12]. Questa era la novità fondamentale, la dichiarazione di Einstein di poter fare a meno dell'etere, che lo faceva distinguere da ogni altro studioso del tempo. Partendo da questo, cominciò a maturare un risentimento verso Einstein da parte di alcuni esponenti di spicco dell'ambiente scientifico tedesco che, invece, consideravano l'etere fondamentale per descrivere i fenomeni elettromagnetici e gravitazionali. Questo risentimento, nel clima difficile della Germania del primo dopoguerra che avrebbe portato all'avvento del nazismo, finì con il trascendere l'ambito puramente scientifico e acquistò toni di estrema violenza, anche per il pacifismo e l'origine ebraica di Einstein. Da questi attacchi inqualificabili alla persona di Einstein sarebbe poi derivata un'immagine negativa per tutto ciò che aveva a che fare con l'idea dell'etere, ivi compresa l'interpretazione Lorentziana della relatività.

Noi pensiamo che questo abbia determinato una perdita complessiva per la fisica poiché la posizione di Einstein era destinata a mutare nel tempo. Questa evoluzione è molto ben raccontata nel libro di Ludwik Kostro [13] 'Einstein e l'Etere', nel quale

l'autore descrive le idee e le vicissitudini di Einstein attraverso molti documenti originali che coprono un periodo di diversi decenni. A parte la ricostruzione del pensiero di colui che è stato probabilmente il più grande genio della fisica, questo lavoro offre anche uno spaccato di storia (e sociologia) della scienza e prospettive di grande interesse sulla società tedesca del primo Novecento. Per questo motivo, ne vogliamo qui offrire un breve riassunto.

Dal lavoro di Kostro, emerge innanzitutto come Einstein, negli anni di Berna prima del 1905, fosse stato influenzato, oltre che dai lavori di Lorentz del 1895 e dal libro di Poincaré 'La scienza e l'ipotesi' del 1902, anche dal pensiero di Mach e del chimico e filosofo naturalista Ostwald. Se Mach tollerava l'etere come mezzo mediante il quale le grandi masse lontane determinano l'inerzia locale dei corpi, Ostwald, lo rifiutava in quanto le sue proprietà non potevano essere misurate direttamente: «Ciò che si misura è l'energia ... quindi non abbiamo alcun bisogno di cercarne un portatore se la incontriamo da qualche parte».

Tuttavia, riguardo all'etere, nel suo articolo del 1905 Einstein utilizzò un termine piuttosto debole come 'superfluo', volendo forse sottintendere che, in linea di principio, non ne negava la possibile esistenza. D'altro canto questo è quello che poi successe. Infatti, il suo iniziale atteggiamento fu poi sostituito da prese di posizione più nette, anche per il successo crescente tributato alle sue idee. Per esempio, nel 1910, scriveva che, per riconciliare l'elettromagnetismo con il principio di relatività, «il primo passo da fare era rinunciare all'etere». Tale atteggiamento di rifiuto (che per quanto detto in precedenza non trovava giustificazione a causa dell'equivalenza sostanziale, dal punto di vista fenomenologico, della sua formulazione con quella di Lorentz) doveva procurargli col tempo parecchia ostilità. In particolare, da parte di Philipp Lenard, un importante fisico sperimentale che era stato insignito del premio Nobel nel 1905 per le sue misure sull'effetto fotoelettrico, quello per la cui interpretazione Einstein avrebbe poi ricevuto il premio Nobel nel 1921.

Inizialmente Einstein e Lenard, proprio per il comune interesse legato all'effetto fotoelettrico, avevano avuto parole di apprezzamento reciproco. La situazione doveva però cambiare quando Lenard, nel 1910, presentò il lavoro 'Etere e materia' in cui (senza attaccare direttamente Einstein) difendeva l'idea che l'etere era importante per spiegare parecchi fenomeni, in particolare elettromagnetismo e gravitazione. Secondo Lenard, esso non andava pensato come un continuo ma piuttosto come formato da piccolissime parti in rotazione e tale caratteristica era il motivo per cui i corpi materiali potevano attraversarlo senza alcun attrito percepibile.

Questa idea, che come abbiamo visto dalla conferenza di Maxwell non era certamente nuova, suscitò la reazione violenta di Einstein. Egli scrisse a Laub, un assistente di Lenard, usando parole molto offensive nei confronti di Lenard. Kostro non dice se Lenard abbia mai saputo di questa lettera. Certo non immediatamente. Infatti,

tre anni dopo, nel 1913, scriveva ancora a Sommerfeld che, pensando di istituire ad Heidelberg una cattedra di fisica teorica, sarebbe stato lieto se Einstein avesse pensato di accettare. Visti gli sviluppi futuri, però, non è detto che non ne sia stato informato in seguito.

Nel 1914, proprio alla vigilia della prima guerra mondiale, ad Einstein fu offerto un posto all'Accademia Prussiana delle Scienze di Berlino. Appena arrivato, la stampa locale gli chiese un breve articolo sulla sua teoria. In questo articolo diceva ancora che il rifiuto dell'ipotesi dell'etere andava considerato come uno dei successi principali della teoria della relatività.

Le idee di Einstein dovevano però mutare profondamente in connessione con la sua visione dei fenomeni gravitazionali e con il passaggio nel 1916 da quella che per lui era adesso una relatività 'speciale' ad una nuova relatività 'generale'. Ora lo spazio-tempo diventava un'entità deformabile le cui proprietà metriche erano determinate dalla materia e dall'energia in esso contenuta. E' chiaro che questa visione ha molte analogie con la fisica dei mezzi elastici e conduce in modo naturale a concepire una qualche forma di etere. Per esempio, più di cinquant'anni prima, Riemann [14, 15] aveva già avuto l'intuizione di collegare fisica e geometria tramite un etere la cui resistenza alle deformazioni si poteva leggere nelle proprietà metriche dello spazio.

Il cambiamento di prospettiva fu notato da Lenard nel 1917 nel lavoro dal titolo 'Principio di relatività, etere, gravitazione'. La relatività generale di Einstein era accusata di cambiare solo il nome all'etere chiamandolo 'spazio'. Il paradosso era che tale teoria non poteva esistere senza un etere ma l'autore della stessa teoria sembrava volerne negare esplicitamente l'esistenza. Einstein rispose sotto forma di un dialogo tra un critico (che doveva essere Lenard) ed un relativista (Einstein stesso). Ma, dai suoi argomenti, sembrava che condividesse l'idea di fondo. Gli effetti osservati in presenza di fenomeni gravitazionali implicavano che lo spazio dovesse avere proprietà fisiche e quindi equivaleva ad una qualche forma di etere.

In seguito alle critiche di Lenard, alla sua corrispondenza con Lorentz, che fino alla sua morte nel 1928 sarebbe rimasto sempre fermo sulle sue convinzioni, e al suo stretto contatto con Hermann Weyl, Einstein maturò così una nuova visione. In questo suo ripensamento, probabilmente, era anche favorito da un certo distacco. Infatti la sua popolarità era divenuta immensa dopo la misura della deflessione della luce, durante l'eclissi del 1919, nella spedizione guidata da Eddington.

Tale nuova visione è ben rappresentata nel Manoscritto Morgan (1920) e nella sua lezione a Leida del 1920 : «Nel 1905 ero convinto che non fosse più permesso di parlare di etere in fisica. Tuttavia questa opinione era troppo radicale. Secondo la relatività generale, lo spazio è dotato di proprietà fisiche. In questo senso, un etere esiste ... Si può perciò dire che l'etere è risuscitato nella teoria della

relatività generale, anche se in una forma più sublimata. A differenza della materia ordinaria, esso non è pensabile come composto di particelle che possano essere seguite individualmente nel tempo».

Tali tentativi di chiarire il suo punto di vista, invece di contribuire ad un riavvicinamento, furono interpretati come un segno di debolezza, quasi una forma di trasformismo scientifico. Per esempio Gehrcke pubblicò un saggio dal titolo 'Critica e storia delle nuove teorie della gravitazione' in cui tentava di dimostrare la contraddittorietà della relatività generale ed accusava Einstein di plagio riguardo al problema della precessione del perielio di Mercurio. Wieland, che non era un fisico ma uno dei fondatori dell'Associazione degli Scienziati Germanici per la Preservazione della Scienza, disponeva di grosse quantità di denaro ed offriva compensi a quanti volessero scrivere contro Einstein o parlare contro di lui nei raduni. In un articolo del 6 Agosto 1920 su un giornale popolare, dal titolo 'La teoria della relatività di Einstein come suggestione scientifica di massa' ripeteva le critiche di Lenard e le accuse di plagio di Gehrcke.

Einstein fu difeso da Max von Laue (premio Nobel nel 1914 per le sue ricerche sui raggi X) sullo stesso quotidiano il giorno 11 Agosto. E, come risposta, Wieland e Gehrcke invitarono von Laue per il 24 Agosto ad un pubblico dibattito nella sede della Filarmonica di Berlino. Alla riunione erano presenti diversi membri della Società Accademica di Berlino tra cui Walter Nernst. Von Laue non accettò l'invito. Vi andò invece Einstein che applaudiva divertito ogni volta che veniva attaccato. Le critiche non avevano un reale fondamento scientifico ed erano per lo più rivolte a sottolineare le apparenti contraddizioni della teoria della relatività che sembrava riflettere «il caos di pensiero tipico dei dadaisti». Si terminava infine con la solita accusa di plagio.

Einstein, forse perché non si sentiva seriamente attaccato, non rispose in pubblico. Rispose invece tre giorni dopo con un articolo dal titolo 'La mia risposta alla società a responsabilità limitata degli antirelativisti'. In esso, dopo aver affermato che i maggiori fisici del tempo (Lorentz, Planck, Sommerfeld, von Laue, Born, Larmor, Eddington, Debye, Langevin e Levi-Civita) riconoscevano il valore della sua teoria, attaccava direttamente Lenard. Di lui dichiarava di riconoscere il valore come fisico sperimentale: «In fisica teorica però non ha ancora fatto nulla e le sue obiezioni alla relatività generale sono di tale superficialità che finora non ho ritenuto necessario rispondergli in dettaglio».

La disputa con Lenard sarebbe continuata il mese dopo al Congresso dei Naturalisti Germanici di Bad Nauheim. Numerosi lavori erano dedicati alla relatività ed erano previsti interventi dei maggiori fisici del tempo. Alla fine della relazione di Weyl, che aveva sottolineato come la metrica del continuo spazio-temporale rappresentava la definizione dello stato dell'etere in presenza di gravitazione, Lenard prese la parola. Dopo aver espresso la sua soddisfazione che la teoria della gravitazione

presentata da Weyl includesse di nuovo l'etere, non perse l'occasione per ripetere le sue aspre critiche ad Einstein il quale rispose in modo altrettanto aspro.

Dopo Bad Nahueim, Lenard fece tutto il possibile per indebolire il prestigio di Einstein e mettere in ridicolo la sua teoria come si può vedere dalla prefazione ad un suo nuovo libro sull'etere, intitolata 'Ammonizione ai ricercatori tedeschi', in cui metteva in guardia gli scienziati tedeschi dal lasciarsi influenzare da quello che era niente altro che un mucchio di ipotesi definito assai prematuramente come 'teoria'. Anche un altro importante fisico tedesco, Johannes Stark (premio Nobel nel 1919), si unì a Lenard. Nel 1922, in un articolo dal titolo 'La crisi presente della fisica tedesca' affermava: «Se solo Einstein se ne fosse andato con la sua teoria fin dall'inizio con i matematici ed i filosofi. Forse allora la fisica tedesca sarebbe stata risparmiata dal quel veleno che ne ha paralizzato il pensiero».

Col passare del tempo la vita di Einstein divenne molto difficile anche per il suo pacifismo e la sua origine ebraica. Basta citare il libro del 1931 'Cento autori contro Einstein' che raccoglieva una collezione di articoli e discorsi di suoi oppositori. La situazione precipitò infine dopo la presa del potere da parte di Hitler il 30 gennaio del 1933. Il 20 marzo di quello stesso anno, mentre Einstein si trovava negli Stati Uniti, la sua casa estiva fu perquisita alla ricerca di armi che qualcuno diceva essere state lasciate da alcuni comunisti. Otto giorni dopo Einstein ritornò in Europa ma non rientrò mai più in Germania. Per un certo periodo si stabilì in Belgio, sorvegliato dalla polizia segreta belga, ed il 17 ottobre 1933 andò infine a vivere a Princeton.

Non deve sorprendere quindi che tutte queste traversie, legate alla sua nuova visione dell'etere ed anche al forte contrasto personale con Lenard, Stark e gli altri, abbiano generato in Einstein una forma di rigetto. Probabilmente, per questo motivo la sua idea di etere 'sublimato' non fu ulteriormente sviluppata e mai più seriamente da lui considerata dopo il suo trasferimento definitivo negli Stati Uniti. L'unico riferimento che vale la pena di citare è quello nel libro scritto con Infeld nel 1938 [16]. Dopo averne ricordato la storia, concludeva che, alla luce della teoria della relatività, l'etere andava considerato un concetto contraddittorio che era meglio eliminare dai testi di fisica.

References

- [1] J. C. Maxwell, *Campo ed etere*, in *Relatività : esposizione divulgativa*, a cura di B. Cermignani, Bollati Boringhieri, Torino 1999.
- [2] A. A. Michelson, *Am. J. Sci.* **22** (1881) 120.
- [3] A. A. Michelson and E. W. Morley, *Am. J. Sci.* **34** (1887) 333.
- [4] E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Dover Publications, Inc. New York 1989.
- [5] C. Kittel, *Am. J. Phys.* **42** (1973) 726.
- [6] M. N. Macrossan, *Brit. J. Phil. Sci.* **37** (1986) 232.
- [7] H. R. Brown, *Physical Relativity: Space-time structure from a dynamical perspective*, Clarendon Press, Oxford 2005.
- [8] J. S. Bell, *Dicibile e Indicibile in Meccanica Quantistica*, Adelphi 2010.
- [9] M. Born, *Physics and Relativity*, in *Physics In My Generation*, Pergamon Press 1956.
- [10] E. Cassirer, *Teoria della relatività di Einstein*, A cura di G. Raio, Newton Compton 1981.
- [11] W. Pauli, *Teoria della Relatività*, Ed. Boringhieri 1970.
- [12] A. Einstein, *Ann. d. Phys.* **17** (1905) 891.
- [13] L. Kostro, *Einstein e l'etere*, Ed. Dedalo, Bari 2001.
- [14] B. Riemann, *Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria*, a cura di R. Pettoello, Bollati Boringhieri, Torino 1999.
- [15] U. Bottazzini and R. Tazzioli, *Rev. Hist. Math.* **1** (1995) 3.
- [16] A. Einstein e L. Infeld, *L'Evoluzione della Fisica*, Ed. Boringhieri, Torino 1960.

7. Esperimenti di ether-drift: una visione moderna

Come ricordato nel capitolo precedente, il risultato dell'esperimento di Michelson-Morley fu fondamentale per la prima formulazione degli effetti relativistici. Però, per completezza, va anche detto che altri studiosi, piuttosto che modificare i fondamenti della fisica di allora, avevano cercato prima altre strade. Per esempio, per tentare di capire se la riflessione da uno specchio in movimento [1] o altri effetti trascurati nell'analisi di Maxwell potessero spiegare la sostanziale riduzione degli spostamenti di frange osservati. Questi tentativi sono riassunti nel contributo di Hedrick alla Conferenza sull'Esperimento di Michelson e Morley [2], tenutasi a Pasadena nel 1927, a cui parteciparono i massimi esperti del tempo, in particolare Lorentz e Michelson.

Gli argomenti riassunti da Hedrick furono però confutati da Kennedy [3] in un lavoro successivo del 1935 che pose fine alla questione. Usando il Principio di Huygens, Kennedy faceva infatti vedere come, nell'ambito della fisica classica, si riottenesse sostanzialmente il vecchio risultato predetto da Maxwell e, dunque, non vi poteva essere dubbio sulla discrepanza tra predizione teorica e risultato sperimentale. Le conclusioni del lavoro di Kennedy possono essere riassunte in una forma estremamente semplice. Per un apparato sperimentale come quello illustrato nella figura 3 del Cap. 3 ed assumendo che, al passare del tempo, la proiezione della velocità della Terra nel piano dell'interferometro sia descritta da un modulo $v(t)$ ed una direzione $\theta_0(t)$, gli spostamenti di frange, al variare della direzione θ dell'asse dell'interferometro, sono dati dalla relazione:

$$\left[\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right]_{\text{class}} \sim \frac{D}{\lambda} \frac{v^2(t)}{c^2} \cos 2[\theta - \theta_0(t)] \quad (4)$$

Gli spostamenti di frange sono dunque predetti classicamente essere quello che viene detto un effetto di seconda armonica, cioè periodico in θ nell'intervallo angolare $[0, \pi]$, di ampiezza

$$A_2^{\text{class}} \sim \frac{D}{\lambda} \frac{v^2(t)}{c^2} \quad (5)$$

Fatta questa premessa, si potrebbe invece cercare di capire come analizzare gli esperimenti di ether-drift in una prospettiva moderna. Abbiamo anticipato nell'Introduzione che si erano notati dei piccoli residui irregolari nei dati sperimentali. Pur non essendo compatibili con la predizione classica, potrebbero comunque avere un significato fisico? In altre parole, potrebbero non essere stati puri effetti strumentali? Come faremo vedere, la loro grandezza tipica è proprio quella che ci si aspetterebbe, in una forma di relatività Lorentziana, per quella velocità della Terra di 370 km/s che *oggi* si ottiene dalle osservazioni astronomiche del fondo di radiazione cosmica (CMB=Cosmic Microwave Background) che potrebbe dunque rappresentare il sistema privilegiato Lorentziano. Questa consistenza sorprendente, tra misure di laboratorio ed osservazioni astronomiche, porta dunque a concepire

una nuova generazione di esperimenti dedicati. Aspetti importanti di questa analisi, legati alla corrispondenza con l'attuale concezione del vuoto in fisica delle particelle ed ai possibili modi di caratterizzare il segnale osservato, sono discussi in maggior dettaglio in alcune appendici.

7.1 La velocità della luce in un mezzo gassoso

Gli esperimenti classici di ether-drift furono eseguiti con interferometri nei quali la luce si propagava in un mezzo gassoso, aria o elio a pressione atmosferica. Dunque, a rigore, la velocità della luce *non* era lo stesso parametro c che entra nelle trasformazioni di Lorentz. Nella relatività, ed in particolare in un'interpretazione Lorentziana con un sistema privilegiato Σ , potrebbe questo avere qualche importanza?

Per studiare questo aspetto, ritorniamo alla Figura 3 del Cap. 3 e cerchiamo di valutare quale sia, per l'osservatore S' solidale con l'interferometro, la differenza tra i tempi che la luce impiega a percorrere i due percorsi di andata e ritorno nelle direzioni θ e $\pi/2 + \theta$. A questo scopo definiamo prima $c_\gamma(\theta)$ la velocità della luce nel mezzo gassoso e costruiamo con essa la velocità di andata e ritorno

$$\bar{c}_\gamma(\theta) = \frac{2c_\gamma(\theta)c_\gamma(\pi + \theta)}{c_\gamma(\theta) + c_\gamma(\pi + \theta)} \quad (6)$$

Quindi, la differenza dei tempi è data da

$$\Delta T(\theta) = \frac{2D(\theta)}{\bar{c}_\gamma(\theta)} - \frac{2D(\pi/2 + \theta)}{\bar{c}_\gamma(\pi/2 + \theta)} \quad (7)$$

A questo punto, per semplificare l'analisi, assumiamo la validità delle trasformazioni di Lorentz. Come abbiamo ricordato nel capitolo precedente, esse assicurano che, anche in presenza di un osservatore privilegiato Σ , la materia in moto rispetto a Σ venga vista dall'osservatore S' , in quiete rispetto ad essa, come Σ vede la materia in quiete rispetto a lui. Da questo segue l'isotropia delle lunghezze nel sistema di quiete, ovvero $D(\theta) = D(\pi/2 + \theta) = D$. Dunque, ogni possibile spostamento di frange dipende solo da un'anisotropia della velocità della luce. In questo modo, introducendo la lunghezza d'onda λ della luce e l'indice di rifrazione $\mathcal{N} \sim 1$ del mezzo gassoso, si ottiene lo spostamento di frange

$$\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} = \frac{c\Delta T(\theta)}{\mathcal{N}\lambda} = \frac{2Dc}{\mathcal{N}\lambda} \frac{\bar{c}_\gamma(\pi/2 + \theta) - \bar{c}_\gamma(\theta)}{\bar{c}_\gamma(\pi/2 + \theta)\bar{c}_\gamma(\theta)} \quad (8)$$

Ora, per analizzare questa espressione, facciamo prima l'ipotesi tradizionale per cui (in un mezzo isotropo come un gas) qualunque anisotropia della luce si dovrebbe annullare se il contenitore del gas fosse in quiete nel sistema privilegiato. Quindi, nel caso fisico in esame, dove invece l'osservatore ed il mezzo in cui la luce si

propaga sono in quiete nel sistema del laboratorio S' , ogni anisotropia si deve annullare nel limite di velocità $\mathbf{V} = 0$ per cui $S' \equiv \Sigma$.

Nello stesso tempo, assumendo sempre le trasformazioni di Lorentz, ogni anisotropia si deve anche annullare se la luce si propagasse nel vuoto, cioè per un indice di rifrazione $\mathcal{N} = 1$ così che $c_\gamma(\theta) \equiv c$. Dunque, se restringiamo la nostra analisi agli esperimenti classici in mezzi gassosi, dove $\mathcal{N} = 1 + \epsilon$, possiamo eseguire un'espansione in serie di potenze nei due piccoli parametri $\beta = V/c$ ed $\epsilon = \mathcal{N} - 1$. In questa espansione, ogni anisotropia per $c_\gamma(\theta)$ comincia con termini $\mathcal{O}(\epsilon\beta)$ ed ogni anisotropia per la velocità di andata e ritorno $\bar{c}_\gamma(\theta)$ comincia con termini $\mathcal{O}(\epsilon\beta^2)$. Infatti, per la sua stessa definizione, $\bar{c}_\gamma(\theta)$ è invariante per la sostituzione $\beta \rightarrow -\beta$. Ma, per ogni fissato valore di β , $\bar{c}_\gamma(\theta)$ è anche invariante per la sostituzione $\theta \rightarrow \pi + \theta$. Possiamo allora scrivere l'espressione generale

$$\bar{c}_\gamma(\theta) = \frac{2c_\gamma(\theta)c_\gamma(\pi + \theta)}{c_\gamma(\theta) + c_\gamma(\pi + \theta)} \sim \frac{c}{\mathcal{N}} \left[1 - \epsilon \beta^2 \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_{2n} P_{2n}(\cos \theta) \right] \quad (9)$$

Qui, per tenere in conto la simmetria per lo scambio $\theta \rightarrow \pi + \theta$, la dipendenza angolare è stata espressa come un'espansione infinita in polinomi di Legendre di ordine pari con coefficienti arbitrari $\zeta_{2n} = \mathcal{O}(1)$. Nella relatività speciale di Einstein, nella quale non esiste riferimento privilegiato, questi coefficienti ζ_{2n} si annullano identicamente. Invece, in un approccio Lorentziano, non c'è alcuna ragione per cui essi si debbano annullare *a priori*.

Ottenuta questa espressione generale, ci possiamo domandare quale sia il suo significato fisico. In altre parole, quale potrebbe essere un meccanismo per cui, in un gas posto in un laboratorio terrestre, la luce si propaga con velocità lievemente differenti nelle varie direzioni secondo l'Eq.(9)? Per cercare di capire, immaginiamo la luce che si propaga all'interno di un contenitore che racchiude il mezzo gassoso. Noi pensiamo sempre un gas come un mezzo isotropo, nel quale cioè le molecole si muovono disordinatamente in tutte le direzioni senza mostrare alcuna preferenza. Però supponiamo che ci sia un leggero flusso di energia, associato al moto della Terra, che si comporta come un gradiente termico di natura fondamentale. Se esso fosse estremamente piccolo, potrebbe agire sulla materia in modo asimmetrico. Per esempio, inducendo correnti convettive delle molecole in sistemi debolmente legati come i gas o dissipando mediante pura conduzione termica e senza generare alcun moto di particelle in sistemi fortemente legati come i liquidi o i solidi. Nel primo caso, vedi figura 6, il processo di assorbimento e riemissione della luce, da parte delle molecole del gas in moto convettivo (rispetto al sistema in cui il contenitore è in quiete) servirebbe una traccia di questo moto. Infatti, come discusso in [4, 5, 6] e riportato esplicitamente da noi in Appendice A, si otterrebbe esattamente la stessa forma in Eq.(9).

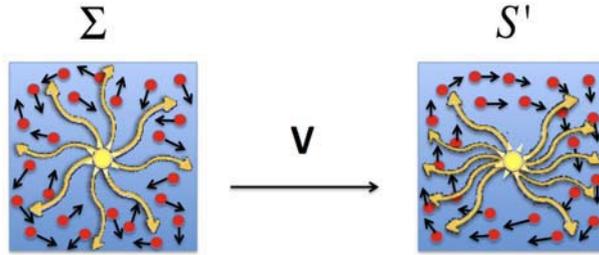


Figure 6: *Una raffigurazione pittorica di come un debole flusso di energia associato al moto della Terra, agendo come un gradiente termico efficace, potrebbe indurre correnti convettive in un sistema debolmente legato come un gas. In questo caso, l'anisotropia della luce risultante avrebbe esattamente la stessa forma dell'Eq.(9). La figura è presa dalla ref.[6] con il gentile permesso delle Edizioni Springer Science + Business Media.*

Si deve tener conto che l'ipotetica anisotropia, proporzionale a $(\mathcal{N} - 1)\beta^2$, di cui stiamo parlando è un effetto molto piccolo. Per esempio, per una velocità $V \sim 370$ km/s (quale quella indicata dall'osservazione del CMB) e un indice di rifrazione come quello dell'aria a pressione atmosferica e temperatura standard (STP), $\mathcal{N}_{\text{aria}} \sim 1.000293$, l'effetto sarebbe circa $4 \cdot 10^{-10}$. Tuttavia, tenuto conto dell'accuratezza straordinaria dell'interferometro di Michelson, potrebbe essere importante.

Naturalmente, questa analogia formale con l'Eq.(9) non implica che correnti convettive (rispetto al recipiente solido che contiene il gas) siano l'unico meccanismo possibile. Per esempio, qualche forma di interazione anisotropa della radiazione elettromagnetica con la materia potrebbe, in linea di principio, indurre gli stessi effetti. Tuttavia, ci sono delle altre ragioni che tendono a giustificare l'interpretazione che abbiamo proposto. Una prima motivazione deriva dalla visione del vuoto descritta nel Cap. 2. L'idea di un condensato di quanti elementari porta in modo naturale a domandarsi quale sia il sistema di riferimento nel quale la condensazione produce globalmente uno stato con momento spaziale $\mathbf{P} = 0$ e se questo 'vuoto di riferimento' potrebbe rappresentare l'ipotetico sistema privilegiato Lorentziano [7].

Generalmente questa possibilità non viene considerata. Però, non potrebbe invece *lo stato fisico del vuoto* modificarsi per una trasformazione di Lorentz? Come discusso in [8, 5, 6] (e riportato in Appendice B) questa possibilità dipende da una quantità poco capita: l'energia del vuoto. Solo quando questa quantità è

esattamente zero, lo stato fisico del vuoto è Lorentz-invariante come accade in teorie con una supersimmetria esatta (dove cioè esiste una simmetria tra particelle con spin intero e semintero). Poichè queste non sembrano essere realizzate in natura, il problema della Lorentz-invarianza del vuoto resta un problema aperto.

Ora assumendo, appunto, che lo stato di vuoto non sia esattamente Lorentz-invariante ci sarebbero diverse conseguenze. Una delle più semplici è proprio quella di un flusso di energia nella direzione del moto di ogni sistema S' rispetto al vuoto di riferimento che, dunque, rappresenterebbe una violazione del Principio di Relatività. E' praticamente impossibile eseguire un calcolo dettagliato degli effetti di questo flusso di energia. Tutto quello che si può dire è che esso si dovrebbe comportare come un piccolo gradiente termico fondamentale e potrebbe dunque alterare le proprietà della materia in maniera asimmetrica come abbiamo descritto.

Per di più, con questa interpretazione, diventerebbe comprensibile la differenza fenomenologica osservata [9, 10] tra esperimenti in cui la luce si propagava in mezzi gassosi ed esperimenti in solidi trasparenti come quello di Shamir e Fox [11]. Questi autori erano consapevoli che gli esperimenti nei gas potevano anche ammettere un'interpretazione alternativa del tipo $(\mathcal{N} - 1)\beta^2$. Per questo selezionarono un dielettrico solido trasparente (il perspex dove $\mathcal{N} \sim 1.5$) nel quale l'eventuale anisotropia dovuta all'indice di rifrazione sarebbe stata molto aumentata. Giacchè questo aumento non fu osservato, essi conclusero che l'interpretazione alternativa era esclusa e dunque le basi sperimentali della relatività speciale venivano ulteriormente rafforzate. Tuttavia, l'idea di un debole flusso di energia, per la quale ci si aspettano differenze tra mezzi dielettrici solidi e gassosi, fornisce adesso argomenti per riconciliare comportamenti diversi. Come anticipato nel Cap. 3, potremmo così trovarci in una situazione complessa nella quale il laboratorio di un generico sistema S' (come la Terra) non può più essere usato per definire un vero stato di quiete. Questo sarebbe ancora consistente con l'interpretazione della relatività di Lorentz ma non con quella di Einstein ed ogni conclusione verrebbe a dipendere dal confronto con gli esperimenti.

Proprio a questo scopo, va detto che l'Eq.(9), in linea di principio, è esatta all'ordine di accuratezza considerato e potrebbe essere usata direttamente per analizzare i dati lasciando come parametri liberi i primi due o tre coefficienti ζ_{2n} nei fit. Tuttavia, questa espressione generale può essere paragonata a quella che si otterrebbe usando le trasformazioni di Lorentz per derivare la metrica efficace $g^{\mu\nu}$, che descrive la propagazione della luce nel mezzo gassoso in quiete in S' , a partire dalla metrica di riferimento isotropa $\gamma^{\mu\nu} = \text{diag}(\mathcal{N}^2, -1, -1, -1)$ nel sistema Σ . In questo caso, come mostrato in [5, 6] (si veda anche l'Appendice C), si trova

$$\bar{c}_\gamma(\theta) \sim \frac{c}{\mathcal{N}} [1 - \epsilon\beta^2 (2 - \sin^2 \theta)] \quad (10)$$

che corrisponde a fissare nell' Eq.(9) $\zeta_0 = 4/3$, $\zeta_2 = 2/3$ e tutti gli altri $\zeta_{2n} = 0$ per $n > 1$. L'Eq.(10) rappresenta un caso particolare dell'Eq.(9) e fornisce così una

soluzione alternativa al calcolo dettagliato del flusso di energia nei sistemi gassosi. Come tale, sarà da noi adottata nel seguito come modello definito per la velocità della luce.

Sostituendo l'Eq.(10) negli spostamenti di frange Eq.(8), si trova allora

$$\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \sim \frac{D}{\lambda} \frac{2(\mathcal{N}-1)v^2(t)}{c^2} \cos 2[\theta - \theta_0(t)] \quad (11)$$

dove la coppia (v, θ_0) descrive la proiezione della velocità della Terra nel piano considerato.

Si noti che questa è formalmente analoga all'espressione classica Eq.(4) in cui l'ampiezza classica viene sostituita da

$$A_2 \sim \frac{D}{\lambda} \frac{v_{\text{obs}}^2(t)}{c^2} \quad (12)$$

con una velocità *osservabile*

$$v_{\text{obs}}^2(t) \sim 2(\mathcal{N}-1)v^2(t) \quad (13)$$

In questo modo, la formula classica dà direttamente questa velocità osservabile che è poi quella riportata in tutte le vecchie analisi degli esperimenti. Calcolare la velocità cinematica $v(t)$ rappresenta invece un passo successivo e richiede la conoscenza dell'indice di rifrazione del gas usato nell'interferometro. Rendendo il mezzo gassoso sempre più rarefatto si arriva al limite ideale $\mathcal{N} = 1$ in cui non si misura più alcun effetto e la velocità osservabile si annulla qualunque sia $v(t)$.

Riassumendo: in questo schema l'interpretazione degli esperimenti è trasparente. Secondo la relatività speciale non ci può essere alcuno spostamento di frange. Infatti la propagazione è assunta essere isotropa nel sistema S' del laboratorio e quindi si ha $v_{\text{obs}} = v = 0$. D'altro canto, se ci fossero spostamenti di frange, si potrebbe cercare di dedurre l'esistenza di un sistema privilegiato Σ qualora fossero soddisfatti due requisiti minimi: i) gli spostamenti di frange mostrano una dipendenza angolare del tipo in Eq.(11) ii) usando mezzi con indici di rifrazione differenti si ottiene consistenza con l'Eq.(13) in modo che differenti v_{obs} corrispondano alla stessa velocità cinematica v .

7.2 L'esperimento originale di Michelson-Morley del 1887

Come ricordato, la predizione classica per l'ether-drift era quella di un effetto di seconda armonica di ampiezza $A_2^{\text{class}} \sim \frac{D}{\lambda} \frac{v^2(t)}{c^2}$. Confrontando con le relazioni corrette (12) e (13), essa fornisce quindi solo la velocità osservabile, che è poi quella riportata in tutte le vecchie analisi degli esperimenti. Poiché, per l'apparato sperimentale usato da Michelson e Morley [12], si aveva $D/\lambda \sim 2 \cdot 10^7$, per il valore

tipico $v = 30$ km/s, ci si aspettavano dunque spostamenti di frange con ampiezza dell'ordine di 0.2. Per rotazioni di 90 gradi rispetto alla direzione θ_0 del drift lo spostamento complessivo aspettato dall'Eq. (4) era invece il doppio, dunque circa 0.4.

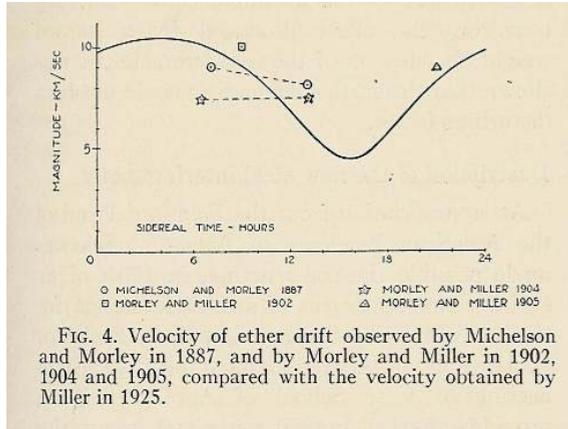


Figure 7: *Le velocità osservabili ottenute in vari esperimenti come riportate da Miller [13].*

Le ampiezze osservate nelle sei sessioni sperimentali (eseguite a mezzogiorno e alla sera nei giorni 8, 9, 11 e 12 luglio 1887) furono però molto più piccole. I loro valori variavano tra 0.010 e 0.025, con un valore medio di circa 0.016. Usando la relazione

$$v_{\text{obs}} \sim 30 \sqrt{\frac{A_2}{0.2}} \text{ km/s} \quad (14)$$

esse suggerivano velocità osservabili tra 6 e 10 km/s che non avevano alcuna ovvia interpretazione. Inoltre, le irregolarità riscontrate, tra osservazioni eseguite alle stesse ore del giorno, inducevano a considerare questi piccoli residui come tipici effetti strumentali. Questo punto di vista tradizionale e molte informazioni di carattere storico si trovano nel libro di Swenson [14].

Tuttavia, grandi esperti nel tempo hanno seriamente questionato questa interpretazione. Per esempio, Miller [13] nel 1933 scriveva: «La breve serie di osservazioni fu sufficiente a mostrare chiaramente che l'effetto non era della grandezza aspettata. Però, e questo dev'essere sottolineato, l'effetto indicato non era zero». Quantitativamente, la situazione può essere riassunta nella figura 7 in cui Miller riporta le velocità osservabili misurate in diversi esperimenti a varie ore del giorno. Esse vengono anche confrontate con una curva continua che riproduceva le sue numerose osservazioni del 1925. Per l'esperimento di Michelson-Morley il valore medio ripor-

tato da Miller è di circa 8.4 km/s e corrisponde ad un'ampiezza media di seconda armonica di circa 0.016.

Analoghe conclusioni erano già state ottenute da Hicks nel 1902 [15]: «I dati pubblicati da Michelson e Morley, invece di dare un risultato nullo, mostrano distinta evidenza per un effetto del tipo aspettato». Anche per lui, dunque, nelle varie sessioni c'erano evidenti effetti di seconda armonica (si veda la figura 8). Solo, le loro caratteristiche non erano quelle aspettate.

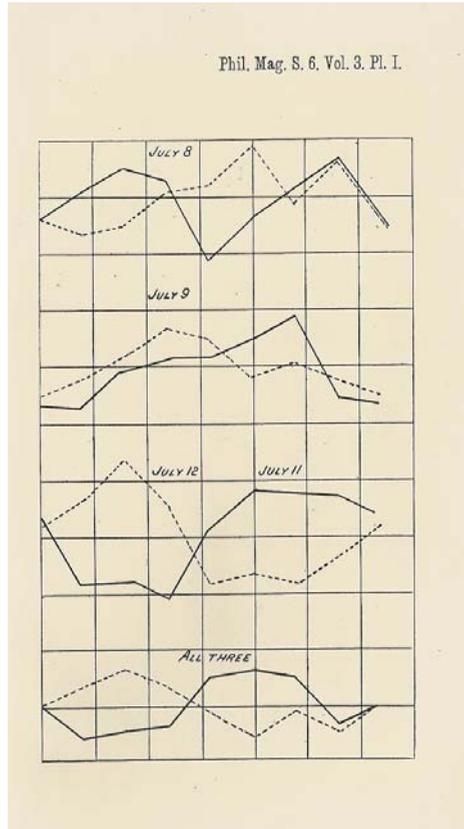


Figure 8: *Gli spostamenti di frange per l'esperimento di Michelson-Morley come riportati da Hicks [15]. Le linee intere e tratteggiate si riferiscono rispettivamente alle osservazioni di mezzogiorno e sera.*

Ora, abbiamo visto che, in una moderna forma di relatività Lorentziana, gli spostamenti di frange, in un mezzo gassoso di indice di rifrazione \mathcal{N} , sono dati dall'Eq.(11). Per ogni dato valore di $v(t)$ essi sono molto più piccoli di quelli

classicamente aspettati e la loro ampiezza è data da $A_2 \sim 2(\mathcal{N} - 1)A_2^{\text{class}}$. Si pensi che sostituendo il valore $v = 30$ km/s con quello dieci volte più grande $v = 300$ km/s (che è quello tipico di molti moti cosmici della Terra) ed usando l'indice di rifrazione dell'aria $\mathcal{N}_{\text{aria}} \sim 1.000293$, l'ampiezza aspettata $A_2 \sim 0.012$ sarebbe ancora 16 volte più piccola della stima classica 0.2 per $v = 30$ km/s. Essendo questo valore ben compatibile con l'ordine di grandezza misurato, diventa importante ricontrollare attentamente i dati originali.

Va detto che né Miller né Hicks discutono quale fosse l'accuratezza delle misure eseguite da Michelson e Morley. Questo può però essere dedotto dal lavoro originale nel quale si legge che, in termini delle divisioni del loro strumento di lettura, «la larghezza delle frange variava da 40 a 60 con un valore medio di 50 così che una divisione equivale a 0.02 lunghezze d'onda». Ora nel loro lavoro Michelson e Morley riportano le letture con un'accuratezza di 1/10 di divisione (esempio 44.7, 44.0, 43.5,...). Questo significa che l'accuratezza nominale era di ± 0.002 lunghezze d'onda. Infatti, in unità di lunghezza d'onda essi riportano valori come 0.862, 0.832, 0.824,... Inoltre, questa stima è in accordo con quanto si trova nel libro di Born [16] dove, discutendo lo spostamento classicamente aspettato per rotazioni di 90 gradi rispetto alla direzione del drift (circa 0.37), egli scrive esplicitamente: «Michelson era convinto che la centesima parte di questo spostamento sarebbe ancora stata osservabile» (cioè 0.0037). Quindi, per essere consistenti con l'articolo originale e il riferimento di Born al pensiero di Michelson, la stima dell'errore di lettura da adottare è di circa ± 0.004 .

Con questa premessa, una rianalisi completa dei dati è stata presentata nella ref. [5]. Di essa è opportuno riportare gli ingredienti essenziali con riferimento a diversi aspetti che non sono *mai* discussi nei testi di fisica. Un primo punto importante, descritto nel lavoro di Miller, è che le letture vennero riportate senza correggerle per la cosiddetta *deriva termica* dovuta a variazioni di temperatura. Essa produce una differenza sensibile tra la prima lettura e quella ottenuta dopo una rotazione di 360 gradi dell'apparato. Dunque, partendo da ogni set di 17 letture (eseguite ogni 22.5 gradi), diciamo $E(i)$ con $i=1,..17$, si deve prima correggere per la differenza $E(1) - E(17)$. Poiché, con ottima approssimazione, questo è un effetto lineare, si possono così definire dei dati corretti (per l'effetto di deriva termica) mediante la relazione

$$E_{\text{corr}}(i) = \frac{i-1}{16}(E(1) - E(17)) + E(i) \quad (15)$$

Gli spostamenti di frange sperimentali sono allora calcolati come differenza tra i dati corretti e la loro media:

$$\frac{\Delta\lambda(i)}{\lambda} = E_{\text{corr}}(i) - \langle E_{\text{corr}} \rangle \quad (16)$$

Questi 96 valori (16 per ognuna delle 6 sessioni) sono i dati fondamentali con cui

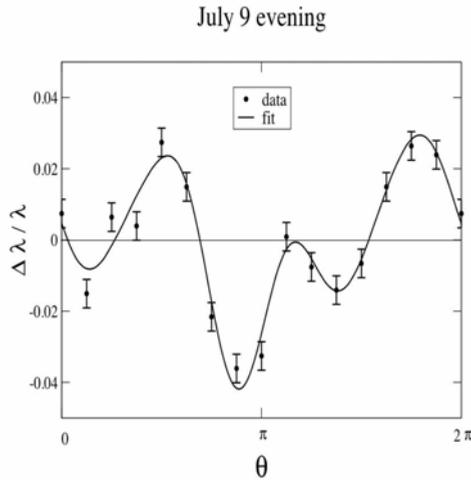


Figure 9: *Gli spostamenti di frange della sessione del 9 Luglio sera dell'esperimento di Michelson-Morley. Il fit è fatto con termini sino alla quarta armonica. La figura è presa dalla ref.[10] con il gentile permesso della Società Italiana di Fisica.*

confrontarsi. Essi non sono direttamente riportati nel lavoro originale di Michelson e Morley ma si possono trovare in ref.[5].

Gli spostamenti di frange così ottenuti forniscono i valori di una funzione periodica $\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda}$, a media nulla, nell'intervallo angolare $0 \leq \theta \leq 2\pi$, per $\theta = \frac{i-1}{16} 2\pi$ (si veda per esempio la fig.9). Si possono quindi estrarre l'ampiezza e la fase della componente di seconda armonica che è quella rilevante per un ether-drift. A questo scopo si costruiscono le combinazioni simmetriche

$$B(\theta) = \frac{\Delta\lambda(\theta) + \Delta\lambda(\pi + \theta)}{2\lambda} \quad (17)$$

(si veda ad esempio la fig.10) nelle quali si cancellano le armoniche dispari. Queste combinazioni $B(\theta)$ sono quelle riportate da Hicks nella figura 8 e (per i soli risultati mediati sulle varie sessioni) anche nelle figure del lavoro originale di Michelson-Morley.

La cancellazione delle armoniche dispari è conveniente per eliminare l'effetto di prima armonica originariamente segnalato da Hicks [15] (presente invece nella fig.9). La sua spiegazione teorica va ricercata nella disposizione degli specchi e, come tale, questo effetto si deve mostrare negli esperimenti. Diversi dettagli su questo aspetto vengono anche riportati da Miller [13] che fa vedere come i suoi dati erano ben consistenti con l'analisi teorica di Hicks. L'effetto di prima armonica

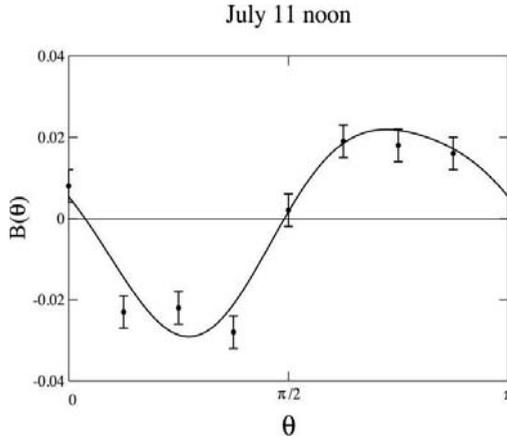


Figure 10: *Un fit alla combinazione $B(\theta)$ Eq.(17). L'ampiezza di seconda armonica ottenuta è $A_2^{\text{EXP}} = 0.025 \pm 0.005$ e quella di quarta armonica $A_4^{\text{EXP}} = 0.004 \pm 0.005$. Si confrontino i dati con la curva intera del giorno 11 Luglio riportata da Hicks in fig.8. La figura è presa dalla ref.[10] con il gentile permesso della Società Italiana di Fisica.*

è sostanziale ed ha una grandezza confrontabile con quella di seconda armonica. Analoghe conclusioni furono ottenute da Shankland e collaboratori [17] nella loro rianalisi delle osservazioni di Miller.

Le ampiezze di seconda armonica per le sei sessioni dell'esperimento di Michelson-Morley sono riportate nella Tabella 1 . Per la loro ragionevole consistenza statistica, se ne possono calcolare media e varianza ottenendo così il valore $A_2^{\text{EXP}} \sim 0.016 \pm 0.006$ ed una velocità osservabile media durante il giorno

$$v_{\text{obs}} \sim 8.4_{-1.7}^{+1.5} \text{ km/s} \quad (18)$$

da cui, inserendo l'indice di rifrazione dell'aria, si ottiene infine una velocità cinematica media

$$v \sim 349_{-70}^{+62} \text{ km/s} \quad (19)$$

che è ben consistente con quel valore di 370 km/s suggerito dall'osservazione del CMB.

A differenza dei valori delle ampiezze, che mostrano una ragionevole consistenza statistica, ci sono invece differenze sostanziali nella direzione θ_0 dell'ipotetico ether-drift, quello che viene di solito chiamato *azimuth*. Per esempio, per le osservazioni eseguite a mezzogiorno (tenendo conto che θ_0 è sempre definito a meno di $\pm 180^\circ$) si ottiene $357^\circ \pm 14^\circ$, $285^\circ \pm 10^\circ$ e $317^\circ \pm 8^\circ$ rispettivamente per 8, 9 e 11 Luglio. Per questa scelta di valori, i vettori $v_{\text{obs}}(\cos \theta_0, -\sin \theta_0)$ e la loro media sono riportati

Table 1: *Le ampiezze sperimentali di seconda armonica A_2^{EXP} per le sessioni di mezzogiorno (m.) e sera (s.) ottenute da un fit ai dati di Michelson-Morley.*

SESSIONE	A_2^{EXP}
Luglio 8 (m.)	0.010 ± 0.005
Luglio 9 (m.)	0.015 ± 0.005
Luglio 11 (m.)	0.025 ± 0.005
Luglio 8 (s.)	0.014 ± 0.005
Luglio 9 (s.)	0.011 ± 0.005
Luglio 12 (s.)	0.024 ± 0.005

nella figura 11. A causa di queste discrepanze, ci sono differenze notevoli tra la procedura di mediare le ampiezze estratte dalle singole sessioni e quella in cui l'ampiezza viene invece estratta dopo avere mediato in modo rigorosamente vettoriale i singoli spostamenti di frange [18].

Secondo l'usuale punto di vista, queste variazioni dell'azimuth alla stessa ora in giorni consecutivi, quando non ci possono essere differenze apprezzabili nel moto della Terra, indicherebbero che gli spostamenti di frange sono tipici effetti strumentali. Però, come anticipato nel Cap. 3, potrebbero invece indicare deviazioni non banali dalla solita visione dell'ether-drift come fenomeno regolare, le cui variazioni cioè sono solo dovute ad effetti lenti come la rotazione (e la rivoluzione) terrestre. In ogni caso, queste discrepanze tra misurazioni eseguite alla stessa ora in giorni consecutivi sono molto simili a quelle osservate da Miller sul Monte Wilson. A questo scopo, si veda la figura 22 della ref.[13] ed in particolare le forti fluttuazioni riscontrate intorno all'1 Agosto che è il periodo più vicino al mese di Luglio delle misure di Michelson-Morley. Quindi, si potrebbe anche dedurre che c'è un ether-drift ma, ancora una volta, le sue caratteristiche non sono quelle aspettate.

Per completezza, vogliamo anche aggiungere che le variazioni dell'azimuth potrebbero anche riflettere un particolare effetto sistematico di questi primi esperimenti che era stato segnalato da Hicks. Come descritto da Miller, prima di cominciare le osservazioni, l'ultimo specchio sul braccio dell'interferometro veniva attentamente aggiustato in modo da centrare bene la figura di interferenza ed assicurare frange verticali di larghezza opportuna. Ci sono due posizioni dell'angolo di questo specchio che danno frange della stessa ampiezza ma di segno opposto. Poiché le differenze sono estremamente piccole «gli aggiustamenti dello specchio possono facilmente cambiare da un tipo all'altro in giorni consecutivi. In questo caso, mediare dati ottenuti in giorni consecutivi è solo permesso se i tipi sono gli stessi. Altrimenti, se non si fa attenzione, ci si può aspettare uno spostamento medio nullo - almeno se si mediano un gran numero di misure»[15]. Quindi mediare i dati vettorialmente

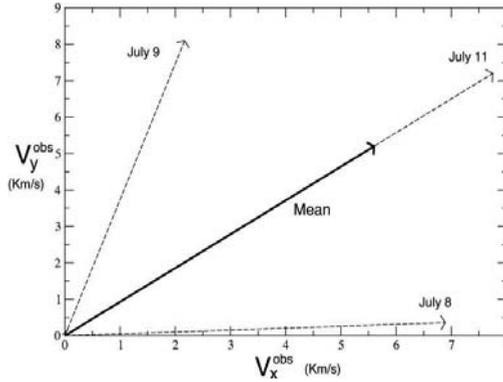


Figure 11: I vettori di velocità osservabile $v_{\text{obs}}(\cos \theta_0, -\sin \theta_0)$ per le tre sessioni sperimentali di mezzogiorno e la loro media. L'asse x corrisponde a $\theta_0 = 0^\circ \equiv 360^\circ$ e l'asse y a $\theta_0 = 270^\circ$. Le incertezze statistiche delle varie determinazioni sono ignorate. Tutte le direzioni indicate potrebbero anche essere invertite di 180° . La figura è presa dalla ref.[5] con il gentile permesso dello *European Physical Journal (EPJ)*.

ha degli aspetti delicati e può introdurre effetti incontrollati. Chiaramente, questa orientazione dello specchio non tocca i valori delle ampiezze estratte dalle singole sessioni e questo spiega come mediare le singole ampiezze (come fatto da noi) non risente di questo effetto accidentale. Invece, le fasi potrebbero essere sostanzialmente alterate. Infatti, un cambiamento di segno complessivo degli spostamenti di frange equivale ad una sostituzione $\theta_0 \rightarrow \theta_0 \pm \pi/2$. Proprio su questa base, Hicks concluse che le osservazioni dell'8 Luglio erano di tipo differente da quelle degli altri giorni. Dunque per le sue medie nella figura 8, «i valori delle ordinate sono un terzo di Luglio 9 + Luglio 11 - Luglio 8 per le osservazioni fatte a mezzogiorno e un terzo di Luglio 9 + Luglio 12 - Luglio 8 per quelle della sera». Se questo fosse vero, una scelta dell'azimuth per l'8 Luglio potrebbe essere $\theta_0^{\text{EXP}} = 267^\circ \pm 14^\circ$. Nella figura 11, questo allora orienterebbe la freccia dell'8 Luglio nella direzione dell'asse y e cambierebbe l'azimuth medio da $\langle \theta_0^{\text{EXP}} \rangle \sim 317^\circ$ a $\langle \theta_0^{\text{EXP}} \rangle \sim 290^\circ$. La possibile presenza di questo effetto sistematico lascia aperta l'interpretazione degli azimuth e induce, piuttosto, a concentrarsi principalmente sulle ampiezze delle singole sessioni sperimentali, confermando così l'ottima consistenza tra la velocità cinematica media Eq.(19) e il valore di 370 km/s ottenuto dal CMB.

Per finire, consideriamo l'interpretazione che Michelson e Morley diedero delle loro osservazioni. Essi concludono che lo spostamento aspettato era 0.4 «mentre lo spostamento effettivamente misurato era certamente minore della ventesima parte di questo». Poiché lo spostamento è proporzionale al quadrato della velocità, «... la velocità relativa della Terra rispetto all'etere è certamente minore di un quarto della velocità orbitale». Questo indicherebbe il limite $v_{\text{obs}} < 7.5$ km/s. Tuttavia,

in questa stima sembra esserci un errore teorico. Infatti, nel loro lavoro Michelson e Morley riportano i valori della combinazione simmetrica $B(\theta)$ Eq.(17) (per i dati mediati sulle tre sessioni di mezzogiorno e della sera) insieme al grafico di un profilo di seconda armonica di ampiezza 0.05. Questo valore di 0.05 essi lo interpretano come *un ottavo* dell'ampiezza aspettata così assumendo implicitamente il valore classico $A_2^{\text{class}}=0.4$. Come abbiamo fatto vedere, l'ampiezza classicamente aspettata era invece 0.2, non 0.4 (che piuttosto indicava lo shift per rotazioni di 90 gradi rispetto all'asse del drift). In questo caso il loro limite sperimentale potrebbe allora essere interpretato come $A_2^{\text{exp}} < \frac{0.4}{20} = 0.02$ e sarebbe equivalente a $v_{\text{obs}} < 9.5$ km/s. Se teniamo in conto che il loro limite deriva dall'aver mediato tra le varie sessioni, dove l'effetto complessivo si riduce, dedurremmo un sostanziale accordo con la nostra Eq.(18).

7.3 Rivelare l'ether-drift in laboratorio?

Come anticipato, tradizionalmente il possibile effetto dell'ether-drift è sempre stato pensato come fenomeno rigorosamente *deterministico*. Cioè, a meno degli errori introdotti dal processo di misura, gli ipotetici effetti fisici rivelabili in laboratorio dovevano essere *esattamente calcolabili* in termini del moto cosmico della Terra. In questo schema, non si possono dunque comprendere discrepanze sostanziali nei valori dell'azimuth alla stessa ora in giorni consecutivi. Tuttavia, se si comincia a riflettere, ci si rende conto che l'assunzione di un ether-drift puramente deterministico non è poi così ovvia. La relazione tra il moto 'macroscopico' della Terra e la misura 'microscopica' della velocità della luce eseguita in laboratorio dipende, infatti, in modo essenziale dalla natura fisica del vuoto.

Per capire come potrebbe esserci un salto logico, ritorniamo al modello discusso nella sezione precedente. L'anisotropia della velocità della luce in un mezzo gassoso, alla base degli spostamenti di frange misurati in un interferometro, potrebbe originarsi da un meccanismo complesso: un flusso di energia causato dal moto della Terra rispetto a quello che abbiamo chiamato 'vuoto di riferimento', quello cioè in cui la condensazione dei quanti elementari della teoria produce globalmente uno stato con momento spaziale $\mathbf{P} = 0$. Questo flusso di energia, agendo come un piccolo gradiente termico di natura fondamentale, potrebbe indurre deboli correnti convettive delle molecole del gas (rispetto al sistema nel quale il contenitore del gas è in quiete) e produrre l'Eq.(9). Poichè non siamo in grado di eseguire un calcolo da principi primi, abbiamo alla fine deciso di utilizzare le trasformazioni di Lorentz come conveniente strumento ottenendo l'Eq.(10). In questo schema, che è un caso particolare dell'Eq.(9), inserendo il valore $v = 370$ km/s suggerito dall'osservazione del CMB, si ottiene un'ampiezza di seconda armonica ben consistente con le osservazioni di Michelson e Morley.

Tuttavia, la discrepanza tra i vari valori dell'azimuth potrebbe invece dipendere da quella complessa concatenazione di effetti che non siamo in grado di ricostruire e,

più in generale, dalla natura fisica del vuoto. Però, poichè la grandezza dell'effetto previsto risulta essere quella giusta, possiamo mantenere il nostro schema cercando di apportarvi delle piccole modifiche. In questo modo, la questione adesso non riguarderebbe più l'esistenza dell'ether-drift, in quanto tale, ma piuttosto il modello teorico usato per confrontare osservazioni eseguite in tempi differenti o anche in luoghi differenti.

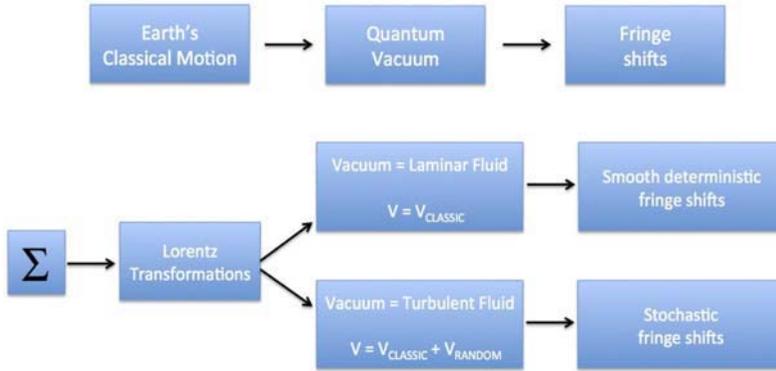


Figure 12: *I due possibili modi di collegare il moto cosmico della Terra e gli spostamenti di frange. La figura è presa dalla ref.[6] con il gentile permesso delle Edizioni Springer Science + Business Media.*

Da questo punto di vista, il modello deterministico adottato tradizionalmente consiste nel paragonare il vuoto ad un fluido in moto regolare, il cosiddetto ‘regime laminare’, nel quale le proprietà globali del moto e quelle ‘locali’ coincidono. Ma, ricordando i vari argomenti del Cap. 2, non potrebbe invece il vuoto essere più simile ad un fluido turbolento? In questo caso, il moto cosmico della Terra fisserebbe solo i limiti tipici per un campo di velocità microscopico che ha una natura ‘stocastica’, cioè non deterministica e che fluttua in modo casuale (vedi figura 12). Questo potrebbe spiegare le variazioni osservate negli azimuth mantenendo intatto l’accordo già trovato per l’ampiezza. Per esempio, come in certi modelli idrodinamici, la turbolenza, alle piccole scale del laboratorio, potrebbe risultare, con buona approssimazione, statisticamente isotropa. In questo caso, la direzione del drift, ad ogni dato tempo delle osservazioni, fluttuerebbe in modo da dare sempre un valor medio nullo. Per l’ampiezza, invece, che dà il modulo della velocità ed è una quantità definita positiva, ci si aspetta un comportamento più regolare.

Per apprezzare le possibili implicazioni di questo cambio di prospettiva, si devono prima richiamare alcune nozioni di base. La dipendenza temporale nell’ Eq.(11) è contenuta nelle due funzioni $v = v(t)$ e $\theta_0 = \theta_0(t)$. Il modello deterministico adottato sinora consiste nell’identificare $v(t) \equiv \tilde{v}(t)$ e $\theta_0(t) \equiv \tilde{\theta}_0(t)$, dove le due

quantità con la tilde sono calcolate mediante la trigonometria sferica a partire da una velocità cosmica della Terra che abbia un modulo V , un ascensione retta α ed una declinazione angolare γ . In questo caso, per osservazioni di pochi giorni, dove non ci sono variazioni apprezzabili nel moto orbitale di rivoluzione, tutta la dipendenza temporale è dovuta alla rotazione terrestre. Le espressioni analitiche per $\tilde{v}(t)$ e $\tilde{\theta}_0(t)$, e le combinazioni risultanti $\tilde{v}_x(t) = \tilde{v}(t) \cos \tilde{\theta}_0(t)$ e $\tilde{v}_y(t) = \tilde{v}(t) \sin \tilde{\theta}_0(t)$, sono note esattamente e sono riportate nell'Appendice D.

Riscriviamo ora l'Eq.(11) come:

$$\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \sim \frac{2D(\mathcal{N}-1)}{\lambda} \frac{v^2(t)}{c^2} \cos 2(\theta - \theta_0(t)) \equiv 2C(t) \cos 2\theta + 2S(t) \sin 2\theta \quad (20)$$

dove:

$$C(t) = \frac{D(\mathcal{N}-1)}{\lambda} \frac{v^2(t)}{c^2} \cos 2\theta_0(t) \quad e \quad S(t) = \frac{D(\mathcal{N}-1)}{\lambda} \frac{v^2(t)}{c^2} \sin 2\theta_0(t) \quad (21)$$

Allora, identificando $v(t) = \tilde{v}(t)$ e $\theta_0(t) = \tilde{\theta}_0(t)$, ed usando le formule dell'Appendice D, per osservazioni di pochi giorni, si otterrebbe la semplice struttura periodica [19] al variare del tempo siderale τ

$$S(t) \equiv \tilde{S}(t) = S_{s1} \sin \tau + S_{c1} \cos \tau + S_{s2} \sin(2\tau) + S_{c2} \cos(2\tau) \quad (22)$$

$$C(t) \equiv \tilde{C}(t) = C_0 + C_{s1} \sin \tau + C_{c1} \cos \tau + C_{s2} \sin(2\tau) + C_{c2} \cos(2\tau) \quad (23)$$

con coefficienti di Fourier S_k e C_k che sono indipendenti dal tempo (anch'essi riportati nell'Appendice D).

Invece, in un modello del vuoto come fluido turbolento queste espressioni non varrebbero più. Per capire la differenza, possiamo riscrivere le Eq.(21) come

$$C(t) = \frac{D(\mathcal{N}-1)}{\lambda} \frac{v_x^2(t) - v_y^2(t)}{c^2} \quad e \quad S(t) = \frac{D(\mathcal{N}-1)}{\lambda} \frac{2v_x(t)v_y(t)}{c^2} \quad (24)$$

con $v_x(t) = v(t) \cos \theta_0(t)$ e $v_y(t) = v(t) \sin \theta_0(t)$ e poi modellare le due componenti $v_x(t)$ and $v_y(t)$ come fluttuazioni stocastiche usando il metodo delle serie di Fourier non stazionarie che viene comunemente adottato per simulare flussi turbolenti [20, 21].

La prospettiva è quella di un osservatore che si muove nel fluido e vuole descrivere le due componenti della velocità nel suo piano x-y ad una data posizione fissa nel suo laboratorio. Assumendo turbolenza omogenea, si trova l'espressione generale

$$v_x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [x_n(1) \cos \omega_n t + x_n(2) \sin \omega_n t] \quad (25)$$

$$v_y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [y_n(1) \cos \omega_n t + y_n(2) \sin \omega_n t] \quad (26)$$

dove $\omega_n = 2n\pi/T$ e T denota una scala temporale che rappresenta il periodo comune di tutte le componenti stocastiche. I coefficienti $x_n(i = 1, 2)$ e $y_n(i = 1, 2)$ sono invece variabili aleatorie a media nulla che hanno la dimensione fisica di una velocità. Qui è dove entra il moto cosmico della Terra: nel determinare il loro campo di variazione. Senza necessariamente assumere un'isotropia statistica, si possono usare le formule dell'Appendice D per $\tilde{v}_x(t)$ e $\tilde{v}_y(t)$ e fissare $[-\tilde{v}_x(t), \tilde{v}_x(t)]$ come il range tipico per $x_n(i = 1, 2)$ e $[-\tilde{v}_y(t), \tilde{v}_y(t)]$ come quello corrispondente per $y_n(i = 1, 2)$.

Adottando un modello a probabilità uniforme all'interno degli intervalli $[-\tilde{v}_x(t), \tilde{v}_x(t)]$ e $[-\tilde{v}_y(t), \tilde{v}_y(t)]$, le sole medie statistiche non nulle (a livello quadratico) sono allora

$$\langle x_n^2(i = 1, 2) \rangle_{\text{stat}} = \frac{\tilde{v}_x^2(t)}{3 n^{2\eta}} \quad (27)$$

$$\langle y_n^2(i = 1, 2) \rangle_{\text{stat}} = \frac{\tilde{v}_y^2(t)}{3 n^{2\eta}} \quad (28)$$

Qui l'esponente η controlla lo spettro di potenza delle componenti di Fourier. Nelle simulazioni numeriche, tra i due valori $\eta = 5/6$ e $\eta = 1$ riportati nella ref.[21] si deve scegliere $\eta = 1$ che corrisponde al punto di vista di un osservatore che si muove nel fluido. Si noti che in questo modello, una completa media statistica (come per un numero infinito di misure) dà $\langle v_x(t)v_y(t) \rangle_{\text{stat}} = 0$ così da avere $\langle S(t) \rangle_{\text{stat}} = 0$ ad *ogni* tempo t .

Oppure, si potrebbe leggermente cambiare modello ed implementare esattamente anche un'isotropia statistica, come nella teoria di Kolmogorov [22] della turbolenza completamente sviluppata. In questo caso, si dovrebbero imporre limiti simmetrici, per esempio sostituendo $\tilde{v}_x(t)$ and $\tilde{v}_y(t)$ con $\frac{\tilde{v}(t)}{\sqrt{2}}$ ottenendo

$$\langle x_n^2(i = 1, 2) \rangle_{\text{stat}} = \langle y_n^2(i = 1, 2) \rangle_{\text{stat}} = \frac{\tilde{v}^2(t)}{6 n^{2\eta}} \quad (29)$$

In questo modello isotropo, si otterrebbe dunque $\langle v_x^2(t) \rangle_{\text{stat}} = \langle v_y^2(t) \rangle_{\text{stat}}$ così che anche $C(t)$ mostrerebbe una media statistica $\langle C(t) \rangle_{\text{stat}} = 0$ ad *ogni* tempo t .

E' chiaro quindi che, in questo modello alternativo del vuoto, l'interpretazione degli esperimenti cambierebbe completamente. Infatti, combinare gli spostamenti di frange misurati alla stessa ora in giorni consecutivi equivale a mediare i valori sperimentali di $S(t)$ e $C(t)$. Questo ha un senso nel modello tradizionale del vuoto come fluido in regime laminare nel quale valgono le Eq.(22) e (23). Invece, nel modello del vuoto come fluido turbolento, le due quantità vettoriali $S(t)$ e $C(t)$ avrebbero forti fluttuazioni e tenderebbero a cancellarsi in media. Questo spiegherebbe

facilmente il comportamento irregolare dell'azimuth osservato nell'esperimento di Michelson-Morley. Allo stesso tempo, l'ampiezza quadratica definita positiva:

$$A_2(t) \equiv 2\sqrt{S^2(t) + C^2(t)} \sim \frac{2D(\mathcal{N} - 1)}{\lambda} \frac{v_x^2(t) + v_y^2(t)}{c^2} \quad (30)$$

esibirebbe un comportamento più regolare e potrebbe essere usata per determinare la proiezione media della velocità della Terra nel piano x-y. Si noti anche che $A_2(t)$ è invariante per rotazione e le sue proprietà statistiche non variano se si assumono i limiti (27) e (28) ovvero (29). Questo comportamento più stabile potrebbe spiegare la ragionevole consistenza delle ampiezze di seconda armonica ottenute da Michelson e Morley nelle varie sessioni.

In ogni caso, per avere un'idea dell'accordo che si potrebbe ottenere nel modello stocastico sopra descritto, una semplice simulazione numerica di una sessione del mattino nell'esperimento di Michelson-Morley è stata effettuata in ref.[5]. A questo scopo, si sono scelti i parametri cinematici $V = 370$ km/s, ascensione retta $\alpha = 168$ gradi, declinazione angolare $\gamma = -6$ gradi (che descrivono il moto medio della Terra rispetto al CMB) per fissare i limiti $[-\tilde{v}_x(t), \tilde{v}_x(t)]$ e $[-\tilde{v}_y(t), \tilde{v}_y(t)]$ delle variabili aleatorie $x_n(i = 1, 2)$ e $y_n(i = 1, 2)$ nelle Eq. (25) e (26). Si sono inoltre adottate le Eq.(27) e (28) per le loro medie quadratiche. I valori simulati delle funzioni $C(t)$ e $S(t)$ in Eq.(24) sono riportati nelle Tabelle 11 e 12 dell'Appendice B della ref.[5] e gli spostamenti di frange, risultanti dall' Eq.(20), nella Tabella 13. I valori finali per ampiezza ed azimuth, rispettivamente $A_2^{\text{simul}} = 0.008 \pm 0.004$ e $\theta_0^{\text{simul}} = 269 \pm 11$ gradi, sono in discreto accordo con quelli sperimentali che abbiamo discusso nella sezione precedente, soprattutto se si ricorda l'osservazione di Hicks riguardo alle misure eseguite durante le sessioni dell'8 Luglio, per cui l'azimuth medio cambierebbe da $\langle \theta_0^{\text{EXP}} \rangle \sim 317^\circ$ a $\langle \theta_0^{\text{EXP}} \rangle \sim 290^\circ$. Diventa quindi necessario valutare ulteriormente la consistenza di questo modello considerando anche gli altri esperimenti di ether-drift che furono fatti dopo quello originale del 1887.

7.4 Altri esperimenti di ether-drift

a) Morley-Miller

In seguito all'originario esperimento del 1887, uno dei più influenti fisici del tempo, Lord Kelvin, dopo la sua conferenza all'Expo di Parigi del 1900, indusse Morley ed il suo allora giovane collaboratore Dayton Miller a progettare un nuovo interferometro (nel quale il cammino ottico fu portato a 32 metri) per cercare di migliorare l'accuratezza rispetto al risultato del 1887.

Va sottolineato che Morley e Miller nel loro lavoro [23] non riportarono direttamente le misurazioni ottenute alle varie ore ma sovrapposero dati presi al mattino con

quelli presi alla sera. Come successivamente spiegato da Miller [2], i due fisici assumevano infatti un ben determinato modello di ether-drift. Secondo loro, esso andava ottenuto componendo il moto del sistema solare rispetto alle stelle vicine (cioè verso la costellazione di Ercole con una velocità di circa 19 km/s) con il moto di rivoluzione orbitale della Terra: «Noi calcolammo la direzione e la velocità del moto del centro del nostro apparato componendo il moto annuale orbitale della Terra con quello del sistema solare verso un certo punto nel cielo ... Ci sono due ore durante il giorno per cui tale moto giace nel piano dell'interferometro»[23]. Le osservazioni alle due ore (circa 11:30 e 21:00) furono dunque combinate in modo tale che l'azimuth (presunto) delle osservazioni della mattina coincidesse con quello della sera. I due sets di osservazioni diedero però risultati con fasi quasi opposte. Quindi, quando gli spostamenti di frange furono mediati il risultato fu quasi zero.

Per questa ragione, il valore di 3.5 km/s riportato nell'articolo originale [23] non corrisponde alle effettive misurazioni. L'errore fu successivamente capito e corretto da Miller che si rese conto di come i due insiemi di dati dessero ognuno una velocità effettiva di circa 7.5 km/s (si veda la figura 11 del lavoro di Miller [13]). Per questa ragione, le velocità osservabili corrette per l'intero periodo 1902-1905 delle loro misure sono quelle mostrate nella nostra figura 7 e giacciono tra 7 e 10 km/s, ovvero

$$v_{\text{obs}} \sim (8.5 \pm 1.5) \text{ km/s} \quad (31)$$

Usando l'Eq.(13), si ottiene allora il valore medio cinematico

$$v \sim (353 \pm 62) \text{ km/s} \quad (32)$$

che è in ottimo accordo con quello riportato in Eq.(19) per l'esperimento di Michelson e Morley e il valore di 370 km/s ottenuto dal CMB.

b) Kennedy-Illingworth

Un interessante sviluppo fu proposto da Kennedy nel 1926. Come descritto nel suo contributo alla Conferenza sull'Esperimento di Michelson-Morley [2], il suo piccolo sistema ottico era racchiuso in un contenitore metallico, ermetico ed isolato termicamente, contenente elio gassoso a pressione atmosferica. A causa delle sue piccole dimensioni, «circolazione e variazione di densità del gas lungo il percorso ottico furono quasi eliminate. Inoltre, poiché il valore dell'indice di rifrazione dell'elio gassoso è tale che $\mathcal{N} - 1$ è circa 1/10 di quello dell'aria alla stessa pressione, i cambiamenti di densità del gas corrispondono a quelli che si avrebbero nell'aria ad 1/10 della pressione atmosferica». L'ingrediente essenziale dell'apparato di Kennedy consisteva in un piccolo gradino, spesso 1/20 di lunghezza d'onda, in uno degli specchi che avrebbe potuto permettere, in linea di principio, un'accuratezza nella misura delle frange di circa $1 \cdot 10^{-4}$. Per ottenere, questa accuratezza teorica Kennedy avrebbe dovuto implementare delle altre migliorie nell'apparato che

non furono realizzate. Nella versione originale dell'esperimento, l'accuratezza fu dunque limitata a $2 \cdot 10^{-3}$ ed i suoi risultati possono essere riassunti dalle sue parole [2]: «Una velocità di 10 km/s, come quella trovata dal Prof. Miller, avrebbe prodotto uno spostamento di frange $8 \cdot 10^{-3}$, quattro volte maggiore della risoluzione sperimentale». Dunque, poiché l'effetto è quadratico nella velocità, il risultato di Kennedy, spostamenti di frange minori di $2 \cdot 10^{-3}$, equivale a $v_{\text{obs}} < 5$ km/s. Usando l'Eq.(13), per l'elio a pressione atmosferica, dove $\mathcal{N} \sim 1.000035$, si ottiene allora il limite per la velocità cinematica $v < 600$ km/s.

L'apparato di Kennedy fu successivamente raffinato da Illingworth [24]. Oltre che migliorare gli specchi e la sorgente luminosa, anche la procedura di raccolta dei dati fu da lui ottimizzata in modo da eliminare le armoniche dispari e ridurre al minimo l'effetto di deriva termica di cui abbiamo parlato. Dai valori riportati nell'articolo di Illingworth si vede che l'errore delle singole letture arrivò al livello di 1/1500 di lunghezza d'onda e quello dei valori medi a circa $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$, raggiungendo quindi l'accuratezza che Kennedy aveva previsto.

Illingworth eseguì quattro serie di osservazioni nei primi dieci giorni di Luglio 1927. Esse consistettero in 32 sessioni sperimentali condotte giornalmente alle 5 (6 sessioni), alle 11 (10 sessioni), alle 17 (10 sessioni) ed alle 23 (6 sessioni). In ognuna di esse, egli misurava gli spostamenti di frange prodotti da rotazioni di 90 gradi dell'apparato. Una rotazione completa impiegava due minuti e le letture venivano eseguite a quattro posizioni differenti di 90 gradi ad intervalli di 30 secondi. Per prendere in considerazione rotazioni di 90 gradi, riscriviamo gli spostamenti di frange nella forma:

$$\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} = A_2 \cos 2(\theta - \theta_0) \quad (33)$$

Dunque, Illingworth nel primo set di 10 rotazioni (set A), eseguito con letture a Nord, Est, Sud ed Ovest, misurava $D_A(t) \equiv 2A_2(t) \cos 2\theta_0(t) = 4C(t)$ dove $C(t)$ è stato definito nell' Eq.(21). Nel secondo set di 10 rotazioni (set B), eseguito con letture a Nord-Est, Nord-Ovest, Sud-Ovest e Sud-Est, misurava invece $D_B(t) \equiv 2A_2(t) \sin 2\theta_0(t) = 4S(t)$, dove $S(t)$ è stato anch'esso definito nell'Eq.(21).

Vogliamo ricordare che, come discusso nella sezione precedente, in un modello di turbolenza isotropa, si ottengono medie statistiche $\langle S(t) \rangle_{\text{stat}} = \langle C(t) \rangle_{\text{stat}} = 0$. Dunque, ci si aspetterebbero forti cancellazioni tra le quantità $D_A(t)$ e $D_B(t)$ misurate da Illingworth anche quando i valori assoluti $|D_A(t)|$ e $|D_B(t)|$ di ogni singola osservazione non fossero piccoli. Si noti anche che D_A e D_B differiscono dalla quantità definita positiva $D_2 \equiv 2A_2$ che dovrebbe essere inserita nella relazione numerica per il suo apparato $v_{\text{obs}} = 112\sqrt{D_2}$ (in km/s). Per questo motivo i valori di velocità riportati da Illingworth $v_A = 112\sqrt{|D_A|}$ e $v_B = 112\sqrt{|D_B|}$ rappresentano dei limiti inferiori per la vera v_{obs} .

I valori medi $\langle D_A \rangle$ e $\langle D_B \rangle$ ottenuti dai sets di 10 rotazioni per ognuna delle 32

Table 2: *Il set A di Illingworth del 9 Luglio alle ore 11 come rianalizzato da Múnera [25].*

Rotation	D_A	$ D_A $	v_A [km/s]
1	-0.00100	+0.00100	3.54
2	+0.00066	+0.00066	2.89
3	-0.00066	+0.00066	2.89
4	-0.00066	+0.00066	2.89
5	-0.00166	+0.00166	4.57
6	+0.00234	+0.00234	5.41
7	+0.00100	+0.00100	3.54
8	+0.00034	+0.00034	2.04
9	+0.00000	+0.00000	0.00
10	-0.00100	+0.00100	3.54

sessioni sperimentali sono riportati nella Tabella 3 della ref.[5]. Da quella tabella si vede come la quantità $\sqrt{\langle D_A \rangle^2 + \langle D_B \rangle^2}$ abbia un valor medio di circa 0.00045. Esso corrisponderebbe a $v_{\text{obs}} \sim 2.4$ km/s da cui, usando l' Eq.(13) per l'elio gassoso a pressione atmosferica, si potrebbe tentativamente dedurre un valore medio cinematico $v \sim 284$ km/s. Questa è però una prima visione molto parziale. Per andare veramente a fondo nell'esperimento di Illingworth si devono considerare le sue misure di base, cioè il risultato dei singoli giri del suo interferometro. In questo caso, l'unico set di dati noto è il set A del 9 luglio alle ore 11. Questo set di dati è stato ri-analizzato da Múnera [25] ed i suoi valori sono riportati nella Tabella 2.

Da questo unico campione di dati di base, si vede che gli spostamenti di frange variano approssimativamente nell'intervallo ± 0.00200 , lo stesso limite trovato da Kennedy. Adesso, però, la sensibilità dell'apparato è notevolmente migliorata e dunque questi effetti non possono essere considerati piccoli. I loro valori assoluti indicherebbero velocità comprese tra 2 e 5 km/s ma i segni delle singole letture cambiano in modo apparentemente casuale. Così se si estrae la media si ottiene $\langle D_A \rangle = -0.00006$ che è molto minore di tutti i valori individuali. Múnera, nella sua analisi, suggerisce invece di stimare v_{obs} da $\langle |D_A| \rangle$, ottenendo così $v_{\text{obs}} = 3.13 \pm 1.04$ km/s. Ora, la solita interpretazione di questi cambiamenti di segno è quella di errori strumentali. Però i dati possono anche essere consistenti con il modello stocastico di ether-drift che abbiamo discusso. Come faremo vedere, all'interno di questo modello, la stima di Múnera ha un preciso significato in termini dello scarto quadratico medio di variabili aleatorie a media nulla.

Sulla base del modello di ether-drift non deterministico discusso nella sezione precedente, in ref.[5] si sono fatte diverse simulazione numeriche per capire il tipo

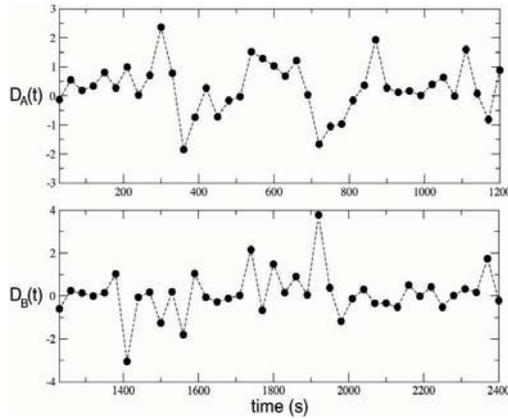


Figure 13: Una simulazione di $D_A(t)$ e $D_B(t)$, in unità 10^{-3} ad intervalli di 30 secondi, da due tipiche sequenze che corrispondono a sets di 10 rotazioni. I valori medi sono $\langle D_A \rangle = 0.00028$ e $\langle D_B \rangle = 0.00011$. Il limite isotropo dei parametri aleatori nelle Eq.(25) e (26) è $\tilde{v} = V_{\text{CMB}} = 370$ km/s. La figura è tratta dalla ref.[5] con il gentile permesso dello *European Physical Journal (EPJ)*.

di dati aspettati per l'esperimento di Illingworth. Si è assunto il caso più semplice di una forma di turbolenza statisticamente isotropa e fissato come limite per le variabili aleatorie $x_n(i = 1, 2)$ e $y_n(i = 1, 2)$ nelle Eq.(25) e Eq.(26) l'intervallo $[-\tilde{v}, \tilde{v}]$ con parametro fissato da $\tilde{v} = V_{\text{CMB}} = 370$ km/s. Come primo tipo di simulazione, riportiamo in figura 13 due sequenze di 40 valori di $D_A(t)$ e $D_B(t)$ che corrispondono a due sets di 10 rotazioni. Da questo si vede come i valori individuali non sono piccoli e variano approssimativamente nello stesso intervallo ± 0.00200 delle singole misure di Illingworth in Tabella 2. Anche il segno cambia in modo del tutto casuale per cui i valori medi $\langle D_A \rangle = 0.00028$ e $\langle D_B \rangle = 0.00011$ risultano molto più piccoli e perfettamente consistenti con quelli riportati da Illingworth. Quindi, in linea di principio, il suo esperimento potrebbe anche essere consistente con una forma di ether-drift di questo tipo.

Se questa fosse la natura dell'ether-drift, è chiaro che i processi di media all'interno di ogni sessione e, a maggior ragione, tra le varie sessioni tendono ad oscurare completamente l'informazione contenuta nelle singole misure. Diventerebbe dunque utile un'analisi delle deviazioni standard dei dati delle singole rotazioni che però non sono riportati da Illingworth. Per cercare di capire cosa si sarebbe potuto ottenere, in ref.[5] si sono comunque eseguite altre simulazioni numeriche generando grandi campioni di dati. Per lo stesso semplice modello di turbolenza isotropa, l'istogramma di un insieme di 10.000 determinazioni di $D_A(t)$ e $D_B(t)$ (ancora generate a passi di 30 secondi) sono riportate nei pannelli (a) and (b) della figura 14. Queste distribuzioni hanno code larghe, molto differenti da un profilo gaussiano,

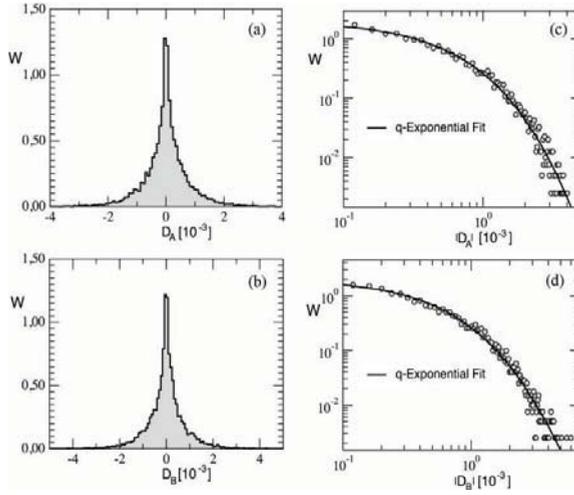


Figure 14: *Riportiamo, vedi (a) and (b), gli istogrammi W ottenuti da una simulazione per $D_A = D_A(t)$ e $D_B = D_B(t)$. La normalizzazione verticale è ad area unitaria. I valori medi sono $\langle D_A \rangle = 0.75 \cdot 10^{-5}$, $\langle D_B \rangle = -1.1 \cdot 10^{-5}$ e le deviazioni standard $\sigma(D_A) = 0.75 \cdot 10^{-3}$, $\sigma(D_B) = 0.83 \cdot 10^{-3}$. Mostriamo anche, vedi (c) e (d), i grafici corrispondenti in scala logaritmica ed i fit con l'Eq. (34). I parametri del fit sono $q=1.07$, $a=2$, $b=2.2$ per D_A e $q=1.12$, $a=2$, $b=2.3$ per D_B . La statistica totale corrisponde a 10.000 valori generati a passi di 30 secondi. Il parametro di velocità è $\tilde{v} = V_{\text{CMB}} = 370$ km/s. La figura è tratta dalla ref.[5] con il gentile permesso dello European Physical Journal(EPJ).*

un comportamento caratteristico delle distribuzioni di probabilità per quantità istantanee in flussi turbolenti (si veda ad esempio [26, 27]). Per meglio apprezzare le differenze da una statistica gaussiana ed evidenziare l'andamento funzionale delle code, i dati sono anche riportati (pannelli (c) and (d)) in valore assoluto e in una scala log–log. Come si vede, le distribuzioni risultanti sono ben fittate dalla cosiddetta funzione q -esponenziale [28]:

$$f_q(x) = a(1 - (1 - q)xb)^{1/(1-q)} \quad (34)$$

dove q è il cosiddetto *indice entropico*, mentre a e b sono parametri di fitting. Nei due casi mostrati si ha $q \sim 1.1$, il che conferma l'andamento a legge di potenza delle code e quindi una deviazione dal comportamento gaussiano, che si avrebbe per $q = 1$ (quando la funzione in Eq.(34) si riduce ad un esponenziale).

Per campioni di 10.000 dati, le medie statistiche $\langle D_A \rangle$ e $\langle D_B \rangle$ sono circa cento volte più piccole dei tipici valori istantanei $\mathcal{O}(10^{-3})$ generati casualmente ed ogni media non nulla va considerata una fluttuazione statistica. Invece, le deviazioni

Table 3: *Le medie globali riportate da Illingworth.*

Osservazioni	$\langle\langle D_A \rangle\rangle$	$\langle\langle D_B \rangle\rangle$
h 05:00	$+0.00036 \pm 0.00012$	-0.00016 ± 0.00009
h 11:00	-0.00001 ± 0.00007	-0.00000 ± 0.00006
h 17:00	-0.00008 ± 0.00012	-0.00005 ± 0.00008
h 23:00	-0.00034 ± 0.00014	$+0.00005 \pm 0.00006$

standard $\sigma(D_A)$ and $\sigma(D_B)$ hanno valori definiti che riflettono la grandezza del parametro di scala \tilde{v} . Tenendo fisso \tilde{v} a 370 km/s, si sono trovati i valori [5]

$$\sigma(D_A) \sim (0.74 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \quad \sigma(D_B) \sim (0.83 \pm 0.06) \cdot 10^{-3} \quad (35)$$

le cui incertezze riflettono le variazioni osservate a causa del troncamento dei modi di Fourier nelle Eq.(25), (26) e al variare dalla sequenza casuale. Tenendo in conto questi risultati, si ottiene uno spread leggermente minore, circa $0.65 \cdot 10^{-3}$, per l'effetto di un drift stocastico in una singola sessione di 10 rotazioni fatta da Illingworth. Questo è confrontabile con l'errore delle singole letture, circa $1/1500$ di lunghezza d'onda, cioè $\pm 0.67 \cdot 10^{-3}$. Combinando in quadratura le due incertezze si ottiene un buon accordo con i dati della Tabella 2 che danno una varianza della media di circa $\pm 1 \cdot 10^{-3}$. La simulazione è dunque utile per avere indicazioni sul valore assoluto della velocità osservabile. Infatti, con $\langle D_A \rangle = 0$ e $\langle D_B \rangle = 0$ si ha $\langle D_A^2 \rangle \sim \sigma^2(D_A)$ and $\langle D_B^2 \rangle \sim \sigma^2(D_B)$ da cui si possono ottenere le due stime:

$$v_{\text{obs}} \sim 112\sqrt{\sigma(D_A)} \sim 3.05 \text{ km/s} \quad v_{\text{obs}} \sim 112\sqrt{\sigma(D_B)} \sim 3.23 \text{ km/s} \quad (36)$$

con un valor medio di 3.14 km/s che coincide con la stima di Múnera $v_{\text{obs}} = 3.13 \pm 1.04$ km/s.

Accettando questo modello dell'ether-drift è chiaro che ogni tipo di media delle quantità vettoriali D_A e D_B perde di senso. Questo è vero per le medie all'interno delle singole sessioni ed, a maggior ragione, per le medie globali tra sessioni differenti ($\langle\langle \dots \rangle\rangle$) nelle quali si perde del tutto l'informazione fisica contenuta delle osservazioni di partenza. Nella Tabella 3, riportiamo le medie globali $\langle\langle D_A \rangle\rangle$ and $\langle\langle D_B \rangle\rangle$ ottenute da Illingworth ai vari tempi delle sue osservazioni.

Nondimeno, a dispetto delle cancellazioni aspettate, si vede che qualche effetto residuo ancora sopravvive (nel nostro semplice modello isotropo, questo sarebbe dovuto al numero finito delle osservazioni). Nello stesso tempo, si può estrarre un'informazione interessante dai due valori di $\langle\langle D_A \rangle\rangle$ alle 5 ed alle 23. Da essi si sono sempre estratte le due stime $v_A \sim 2.12$ km/s e $v_A \sim 2.07$ km/s rispettivamente. Quindi, da questi valori di v_A che, come anticipato, rappresentano limiti inferiori per v_{obs} , ne segue che ci debbono essere stati valori di v_{obs} che erano chiaramente

maggiori di entrambi. Per questa ragione, questo 2.1 km/s (che si riporta di solito per l'esperimento di Illingworth) piuttosto che essere visto come un limite *superiore* andrebbe visto come un limite *inferiore* posto dal suo esperimento. Combinandolo allora con il limite superiore di Kennedy $v_{\text{obs}} < 5$ km/s, concludiamo che questi due esperimenti, nei quali la luce si propagava in elio gassoso a pressione atmosferica, danno il range

$$(\text{Kennedy} + \text{Illingworth}) \quad 2 \text{ km/s} \lesssim v_{\text{obs}} < 5 \text{ km/s} \quad (37)$$

in accordo completo con la stima di Múnera $v_{\text{obs}} = 3.1 \pm 1.0$ km/s. Da questa ultima stima, usando l'Eq.(13) e l'indice di rifrazione $\mathcal{N} \sim 1.000035$, si ottiene una velocità cinematica

$$v \sim (370 \pm 120) \text{ km/s} \quad (38)$$

Essa è ben consistente con quelli Eq.(19) e (32) da Michelson-Morley e Morley-Miller e con il valore 370 km/s che si ottiene dalle osservazioni del CMB.

c) Miller

L'analisi di Múnera [25] è anche interessante poiché egli ha applicato lo stesso metodo usato per le osservazioni di Illingworth all'unico set di dati di Miller che viene riportato esplicitamente nella letteratura. In questo caso, il valore da lui ottenuto $v_{\text{obs}} = 8.2 \pm 1.4$ km/s, correggendo con l'Eq.(13), per l'aria a pressione atmosferica, conferma la stima $v \sim 350$ km/s ottenuta dagli altri esperimenti per la velocità media nel piano dell'interferometro.

Questo ottimo accordo con il valore 8.4 km/s di Michelson-Morley viene anche confermato dalla rianalisi critica delle osservazioni di Miller fatta da Shankland et al. [17]. Differentemente dagli altri esperimenti i dati di Miller furono raccolti a tutte le ore del giorno ed in quattro differenti periodi dell'anno. L'analisi del gruppo di Shankland fornisce una determinazione accurata dell'ampiezza di seconda armonica A_2^{EXP} per le quattro epoche. I loro valori, 0.042, 0.049, 0.038 and 0.045, rispettivamente per Aprile 1925, Luglio 1925, Settembre 1925 e Febbraio 1926 (vedi p.170 di ref.[17]) sono molto consistenti e si possono mediare facilmente. La determinazione media nella Tabella III della ref.[17] $A_2^{\text{EXP}}(\text{Miller}) = 0.044 \pm 0.022$, quando confrontata con la predizione classica per l'interferometro di Miller $A_2^{\text{class}} = \frac{L}{\lambda} \frac{(30 \text{ km/s})^2}{c^2} \sim 0.56$, corrisponde ad una velocità media osservabile

$$v_{\text{obs}} = 8.4_{-2.5}^{+1.9} \text{ km/s} \quad (39)$$

da cui, usando l'Eq.(13), si ottiene il valore cinematico

$$v = 349_{-104}^{+79} \text{ km/s} \quad (40)$$

Siamo ben consapevoli che la nostra conclusione contrasta l'opinione diffusa (provveniente proprio dal lavoro di Shankland et al. ref.[17]) che i risultati di Miller siano

artefatti dovuti a variazioni di temperatura. Ad un esame più attento, però, gli argomenti di Shankland et *al.* non sono poi così solidi (almeno confrontando con il riassunto del loro lavoro). Infatti, all'interno del loro articolo, questi autori dicono: «... non ci può essere dubbio che fluttuazioni statistiche da sole non possono spiegare gli spostamenti di frange periodici osservati da Miller»(vedi p.171 di ref.[17]). Ancora:«...sebbene ci siano notevoli fluttuazioni nei dati ad ogni posizione dell'azimuth..., i valori medi mostrano un marcato effetto di seconda armonica»(vedi p.171 di ref.[17]). In ogni caso, interpretare gli effetti osservati solo sulla base di condizioni locali di temperatura non rappresenta certo l'unica spiegazione. Infatti: «...dobbiamo ammettere di non essere riusciti a stabilire una diretta correlazione quantitativa tra ampiezza e fase della seconda armonica osservata e le condizioni termiche sul luogo di osservazione»(vedi p.175 di ref.[17]).

La cosa più sorprendente, però, è che Shankland et *al.* sembrano non realizzare che il valore medio $A_2^{\text{EXP}} \sim 0.044$, ottenuto proprio dalla *loro stessa* rianalisi delle osservazioni di Miller sul Monte Wilson, quando confrontata con il valore classico di riferimento $A_2^{\text{class}} = 0.56$ per il suo apparato, fornisce esattamente la stessa velocità osservabile media $v_{\text{obs}} \sim 8.4$ km/s ottenuta da Miller analizzando le osservazioni di Michelson e Morley a Cleveland. E' concepibile che la loro enfasi sugli effetti di temperatura sarebbe stata riconsiderata se si fossero resi conto di questa perfetta identità tra due determinazioni ottenute in condizioni sperimentali completamente diverse. In questo senso, un'interpretazione delle osservazioni di Miller in termini di un gradiente termico è accettabile solamente se questo gradiente rappresenta un effetto *non locale*, come nella nostra interpretazione dell'ether-drift da un flusso di energia fondamentale dovuto al moto della Terra rispetto al vuoto condensato.

Un'altra critica delle osservazioni di Miller è stata più recentemente presentata da Roberts [29]. Questo autore, usando il set di dati originali riportati nel lavoro di Miller, solleva diverse obiezioni riguardo alla validità ed al significato statistico delle sue osservazioni. L'infondatezza di queste obiezioni è stata dimostrata nella ref.[5] alla quale indirizziamo il lettore interessato.

Per finire, vogliamo ricordare che altre critiche al lavoro di Miller erano state sollevate in passato da von Laue [30] e Thirring [31]. Queste loro obiezioni (riproposte anche da Shankland et al. [17]) valgono nell'ambito tradizionale del modello deterministico dell'ether-drift e riguardano la complessiva consistenza della soluzione di Miller per il moto cosmico della Terra. Questo è un elemento importante che merita di essere menzionato.

Ritorniamo all'Eq.(20) e prendiamo la media degli spostamenti di frange sull'intero giorno siderale (definita da $\langle \dots \rangle_{\text{day}}$). In questo caso, assumendo le Eq.(22) e (23), si ottiene ad ogni angolo θ :

$$\left\langle \frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right\rangle_{\text{day}} = 2\langle \tilde{C}(t) \rangle_{\text{day}} \cos 2\theta \quad (41)$$

, in quanto $\langle \tilde{S}(t) \rangle_{\text{day}} = 0$. Utilizzando poi le relazioni dell'Appendice D, si trova

$$\langle \tilde{C}(t) \rangle_{\text{day}} = -\frac{D(\mathcal{N} - 1)}{\lambda} \frac{V^2}{c^2} \frac{1}{4} (3 \cos 2\gamma - 1) \cos^2 \phi \quad (42)$$

Il risultato finale può allora essere espresso come [17]

$$\left\langle \frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right\rangle_{\text{day}} = V^2 F(\gamma, \phi) \cos 2\theta \quad (43)$$

Quindi, tenendo conto che la latitudine del laboratorio ϕ è una costante e che la declinazione angolare γ è fissata ad ogni epoca specifica, gli spostamenti di frange mediati sul giorno siderale dovrebbero tutti avere un massimo a $\theta = 0$. Solo l'ampiezza dovrebbe variare. Invece, nelle osservazioni di Miller la posizione angolare del massimo variava nei vari periodi (vedi le figure 25 di ref.[13] e la figura 3 di ref.[17]). La presenza di questo effetto ha sempre rappresentato un problema serio per la consistenza complessiva della soluzione di Miller.

Tuttavia, come già detto, in questa derivazione si è assunto il solito modello di ether-drift deterministico. Come abbiamo già discusso in connessione con gli esperimenti di Michelson-Morley e Illingworth, i dati suggeriscono invece un effetto fisico diverso. Quello di un ether-drift irregolare con differenze sostanziali dalle Eq.(22) e (23) e nel quale si potrebbero invece avere medie statistiche $\langle S(t) \rangle_{\text{stat}} \sim 0$ e $\langle C(t) \rangle_{\text{stat}} \sim 0$ ad *ogni* valore del tempo siderale. In questa prospettiva, la discrepanza segnalata da von Laue e Thirring non sarebbe propria del lavoro di Miller ma riguarderebbe tutti gli esperimenti. Concluderemo quindi qui la nostra analisi segnalando la straordinaria consistenza dei valori $v_{\text{obs}} \sim 8.4$ km/s e $v \sim 350$ km/s (ottenuti dall'ampiezza di seconda armonica $A_2^{\text{EXP}} \sim 0.044$ ricalcolata dal gruppo di Shankland) con quelli che si ottengono da Michelson-Morley, Morley-Miller e Kennedy-Illingworth. In questo senso, questa parte del lavoro di Miller è destinata a rimanere.

d) Michelson-Pease-Pearson

Consideriamo adesso l'esperimento di Michelson, Pease e Pearson [32, 33]. Questi autori nei loro due lavori non riportano numeri specifici. Possiamo quindi solo citare dal lavoro originale [33] quello che dicono delle loro osservazioni nella versione più raffinata del loro esperimento: «Nella serie finale di misure, l'apparato fu trasferito in un sotterraneo ben isolato dell'osservatorio sul Monte Wilson. La lunghezza del percorso ottico era stata aumentata a 85 piedi ed i risultati confermarono che le precauzioni adottate per eliminare i disturbi dovuti a variazioni di temperatura e pressione erano state efficaci. Le misure non produssero alcuno spostamento di frange superiore ad un cinquantesimo [in inglese 'one-fiftieth'] di quello aspettato per un moto del sistema solare di trecento chilometri al secondo».

D'altro canto nell'altro lavoro [32], dopo simili commenti sulle precauzioni adottate per eliminare i vari disturbi, si trova quest'altra frase «Le misure non diedero alcun spostamento superiore ad un quindicesimo [in inglese 'one-fifteenth'] di quello aspettato per un moto del sistema solare di trecento chilometri al secondo. Questi risultati sono differenze tra gli spostamenti osservati ai tempi siderali corrispondenti al massimo ed il minimo secondo i calcoli del Dr. Strömberg per la velocità del sistema solare». Nello stesso lavoro, gli autori dicono anche che, secondo i calcoli di Strömberg, «uno spostamento di 0.017 della distanza tra le frange avrebbe dovuto essere osservata agli appropriati tempi siderali».

E' chiaro che, anche senza dirlo esplicitamente, gli autori assumevano un qualche tipo di meccanismo che riducesse gli spostamenti di frange rispetto al valore classico aspettato. Infatti per la versione con cammino ottico $D=85$ piedi, si aveva $\frac{D}{\lambda} \frac{(30\text{km/s})^2}{c^2} \sim 0.45$. Inserendo invece il valore 300 km/s si sarebbe avuto $\frac{D}{\lambda} \frac{(300\text{km/s})^2}{c^2} \sim 45$. Spostamenti di frange di un cinquantesimo di questo valore sarebbero comunque stati enormi. Si sarebbe allora condotti a pensare che le loro misure diedero spostamenti $\frac{|\Delta\lambda|}{\lambda} \lesssim \frac{1}{15} 0.017 \sim 0.001$. Eppure questo non è quello che essi dicono (parlano di *differenze* di spostamenti di frange). In ogni caso, questa interpretazione non si accorda con quella di Shankland et al. [17] (vedi la loro Tabella I) che riportano per Michelson, Pease e Pearson un valore di circa ± 0.005 .

Per tentare di capire meglio, abbiamo cercato in un altro lavoro che (piuttosto sorprendentemente) fu firmato solo da Pease [34]. Qui si scopre che in una prima versione dell'apparato gli spostamenti osservati erano di circa ± 0.030 . Successivamente, riducendo la velocità di rotazione dell'apparato, gli effetti osservati divennero considerevolmente più piccoli. Pease dichiara che, nel loro esperimento, per verificare i risultati di Miller, essi si erano concentrati su misure di carattere puramente 'differenziale', nel senso che non si riportavano i valori delle singole misurazioni ma solo le differenze

$$\epsilon(\theta) = \left\langle \frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right\rangle_{5.30} - \left\langle \frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right\rangle_{17.30} \quad (44)$$

Cioè, si facevano le misure a certi tempi siderali. Poi si mediavano un gran numero di tali misure. Infine, si riportavano solo le differenze $\epsilon(\theta)$. Dall'articolo di Pease, queste quantità hanno valori ± 0.004 od anche più piccoli.

Ora, come abbiamo già discusso in dettaglio, mediare misure eseguite allo stesso tempo siderale ha solo senso nel modello deterministico dell'ether-drift dove, per le due funzioni $C(t)$ ed $S(t)$, si assumono le semplici forme periodiche Eq.(22) e (23). Invece, se ci fosse una forte componente stocastica nel segnale, mediando i dati ci si dovrebbero aspettare forti cancellazioni. Addirittura, in un modello di turbolenza isotropa, aumentando sempre di più il numero delle misure, si arriverebbe al caso limite di medie statistiche $\langle S(t) \rangle_{\text{stat}} = 0$ e $\langle C(t) \rangle_{\text{stat}} = 0$ ad *ogni* valore del tempo

siderale. Quindi i valori di $\epsilon(\theta)$ non dicono assolutamente nulla sulla grandezza degli spostamenti di frange $\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda}$ ottenuti nelle singole sessioni sperimentali prima di fare ogni tipo di media e di sottrazioni.

Nel suo lavoro, Pease riporta il grafico di una sola osservazione fatta quando il cammino ottico era ancora 55 piedi. In questo grafico, i valori della combinazione simmetrica $B(\theta)$ Eq.(17) variano approssimativamente nell'intervallo ± 0.007 che equivale a valori di circa ± 0.011 per il cammino ottico di 85 piedi. Ora, questo solo grafico difficilmente potrebbe essere considerato rappresentativo dell'insieme di tutte le osservazioni. Nondimeno, questo è tutto quello che abbiamo. Quindi, assumendo come ordine di grandezza (per un cammino ottico di 85 piedi) un'ampiezza di seconda armonica di circa 0.010, si trova per questa configurazione, dove $\frac{D}{\lambda} \frac{(30\text{km/s})^2}{c^2} \sim 0.45$, una velocità osservabile

$$v_{\text{obs}} = (4.5 \pm \dots) \text{ km/s} \quad (45)$$

o, usando l'Eq.(13) per aria a pressione atmosferica, il valore cinematico

$$v = (185 \pm \dots) \text{ km/s} \quad (46)$$

Nelle due equazioni precedenti, i puntini stanno ad indicare che, in assenza di informazioni su altre sessioni, non si può stimare alcun range di errore. Va detto che le numerose osservazioni di Miller (vedi la Fig.22 di ref.[13]), entro gli errori, diedero valori di velocità osservabile nel range 4–14 km/s. Quindi, una sola osservazione che dia $v_{\text{obs}} \sim 4$ km/s non rappresenta certo una confutazione delle sue misure. Tanto più che, in un periodo di diversi mesi, quella singola sessione fu selezionata da Pease come esempio di osservazioni con effetti particolarmente piccoli.

Tuttavia, poichè questa è l'unica sessione disponibile, abbiamo voluto fare un ulteriore confronto con il nostro modello stocastico per confrontare l'ampiezza di seconda armonica $A_2(t) = \frac{2D(N-1)}{\lambda} \frac{v_x^2(t)+v_y^2(t)}{c^2}$ con il valore di Pease di una velocità osservabile di circa 4 km/s. A questo scopo, abbiamo adottato la versione più raffinata descritta nella Sezione 3, quella cioè per cui i limiti delle variabili aleatorie nelle Eq.(25) e (26), per $v_x(t)$ e $v_y(t)$, sono fissati da $[-\tilde{v}_x(t), \tilde{v}_x(t)]$ per $x_n(i = 1, 2)$ e $[-\tilde{v}_y(t), \tilde{v}_y(t)]$ per $y_n(i = 1, 2)$. Per valutare questi limiti (le cui espressioni analitiche sono date nell'Appendice D) abbiamo inoltre fissato i parametri cinematici di base $V = 370$ km/s, ascensione retta $\alpha = 168$ gradi, declinazione angolare $\gamma = -6$ gradi (come quelli che descrivono il moto medio della Terra rispetto al CMB) e la latitudine ϕ al valore 41 gradi del Monte Wilson. Con queste premesse, abbiamo generato 10.000 valori di $A_2(t)$ allo stesso tempo siderale 5:30 della sessione riportata da Pease. L'istogramma, riportato nella figura 15, mostra come un valore di circa 4 km/s giaccia ampiamente entro l'intervallo [1.8, 9.4] km/s che dà la probabilità del 70%.

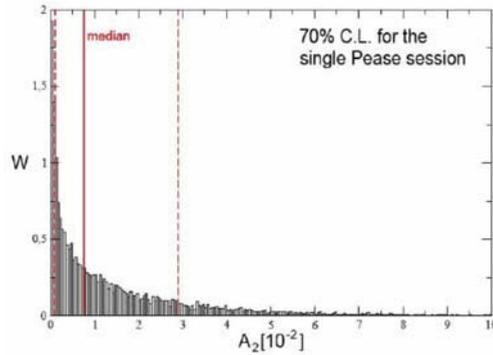


Figure 15: L'istogramma W di una simulazione di 10.000 valori dell'ampiezza $A_2(t)$ per la singola sessione sperimentale riportata da Pease [34]. La normalizzazione verticale è ad area unitaria. Mostriamo la mediana ed il limite del 70% CL che giace tra 0.001 e 0.029. Questo intervallo corrisponde a velocità osservabili tra 1.8 e 9.4 km/s.

7.5 L'esperimento di Joos

Tra tutti gli esperimenti classici di ether-drift, quello eseguito da Georg Joos a Jena nel 1930 [35, 36] resta insuperabile per l'accuratezza dell'apparato e la tecnica delle osservazioni (dati raccolti ogni ora per coprire l'intero giorno siderale e registrati fotograficamente). Per questo motivo, esso richiede un'analisi più raffinata e gioca un ruolo centrale per questo nostro lavoro.

Il sistema ottico di Joos era stato realizzato dalla Carl Zeiss di Jena. L'intero cammino ottico era $D=21$ metri ed il valore di riferimento classicamente aspettato era $\frac{D}{\lambda} \frac{(30\text{km/s})^2}{c^2} \sim 0.375$. La parte ottica era alloggiata all'interno di un contenitore ermetico. Si è sempre creduto che le misure fossero state eseguite quando nel contenitore si era fatto il vuoto (seppure, per quei tempi, un vuoto non troppo spinto confrontato con la tecnologia di oggi). Questo sembra confermato da diverse indicazioni. Per esempio, nel descrivere il suo dispositivo per produrre elettromecanicamente piccoli spostamenti degli specchi, Joos si riferisce esplicitamente alla condizione di apparato evacuato (si veda pag. 393 di [35]). Inoltre, Miller, nel suo articolo del 1933 [13], riferendosi alle misure di Joos parla esplicitamente di un contenitore di metallo nel quale era stato fatto il vuoto. Questo è particolarmente importante in quanto, successivamente nel 1934, Miller e Joos ebbero uno scambio pubblico di opinioni [37] e Joos, apparentemente, non ebbe motivi per correggere Miller. D'altro canto, lo storico della scienza Lloyd Swenson Jr. [38] riporta esplicitamente che le misure furono infine eseguite con percorsi ottici immersi in un bagno di elio gassoso. Poiché, a parte il breve riferimento al dispositivo per muovere gli specchi, nessun altro particolare viene dato negli articoli di Joos, noi abbiamo

deciso di seguire la chiara affermazione di Swenson assumendo l'interferometro riempito di elio gassoso a pressione atmosferica.

Le osservazioni furono eseguite nel 1930, a passi di un'ora iniziando alle 14 del 10 Maggio e finendo alle 13 dell' 11 Maggio. Due misure (la prima e la quinta) furono infine eliminate da Joos con la motivazione che c'erano stati dei disturbi spuri. I dati furono combinati simmetricamente in modo da eliminare le armoniche dispari e gli spostamenti di frange misurati furono tipicamente di alcuni millesimi di lunghezza d'onda. A questo scopo, si può vedere la Fig.8 di ref.[36] (riportata qui come nostra figura 16) e confrontare le misure con l'indicazione di 1/1000 di lunghezza d'onda. Da questa figura, Joos decise di adottare 1/1000 di lunghezza d'onda come limite superiore deducendo una velocità osservabile $v_{\text{obs}} \lesssim 1.5 \text{ km/s}$.

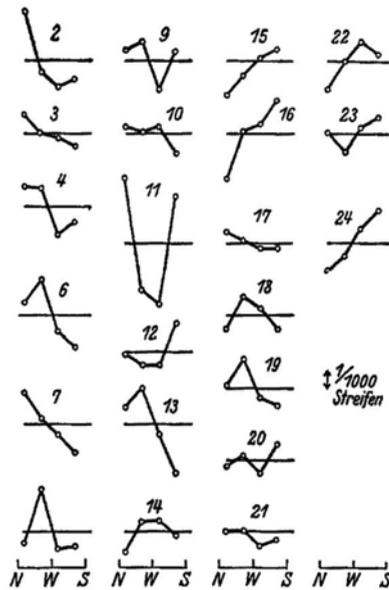


Fig. 8. Verschiebungen in einer über 24 Stunden erstreckten Serie beim Jenaer Versuch.

Figure 16: Il set di dati riportato da Joos [35, 36]. La doppia freccia corrisponde ad 1/1000 di lunghezza d'onda così che i punti sperimentali hanno una dimensione di circa $0.4 \cdot 10^{-3}$. Questo dà un'incertezza di $\pm 0.2 \cdot 10^{-3}$ nell'estrazione degli spostamenti di frange.

Tuttavia, poiché è chiaro dalla figura 16 che alcuni spostamenti di frange furono definitivamente più grandi di 1/1000 di lunghezza d'onda, abbiamo deciso in [5] di estrarre le ampiezze di seconda armonica A_2 dalle 22 figure di Joos. Differentemente

dalle fasi, infatti, questo può essere fatto in modo non ambiguo. Il punto è che non risulta chiaro quali siano i quattro valori angolari di riferimento θ_k ($k=1, 2, 3, 4$) riportati nelle figure. Sono essi $\theta_k \equiv (360^\circ, 315^\circ, 270^\circ, 225^\circ)$ o c'è un piccolo angolo di disallineamento $\theta^* \neq 0$ rispetto ai punti scelti per indicare N, W e S? Dalle figure esso sembrerebbe avere il valore $\theta^* \sim 17^\circ$ ma non si può essere sicuri. A seconda dei due casi, $\theta^* = 0$ o $\theta^* \sim 17^\circ$, si otterrebbero esattamente le stesse ampiezze A_2 ma differenti valori degli azimuth. Per questo motivo, piuttosto che introdurre incertezze teoriche, abbiamo deciso di concentrarci solo sulle ampiezze. I loro valori sono riportati nella figura 17 (per i precisi valori numerici si veda [5]).

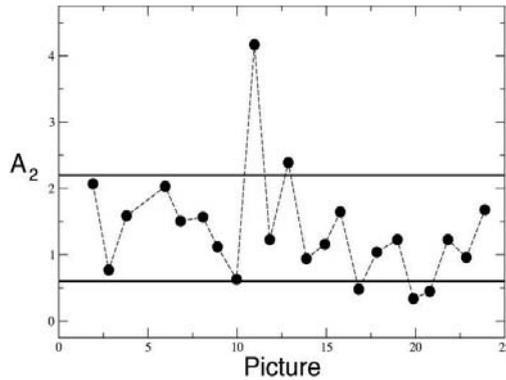


Figure 17: *Le ampiezze di seconda armonica, in unità 10^{-3} , ottenute dalle osservazioni di Joos. La banda verticale tra le due linee corrisponde al range $(1.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}$. La figura è tratta dalla ref.[5] con il gentile permesso dello European Physical Journal (EPJ).*

Calcolando media e varianza dei singoli valori, si ottiene un'ampiezza media sperimentale

$$\langle A_2^{\text{joos}} \rangle = (1.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-3} \quad (47)$$

ed una corrispondente velocità osservabile

$$v_{\text{obs}} \sim 1.8_{-0.6}^{+0.5} \text{ km/s} \quad (48)$$

Correggendo con l'indice di rifrazione dell'elio, le Eq.(13) e (48) darebbero allora una velocità cinematica $v \sim 217_{-79}^{+66} \text{ km/s}$.

Questa è però solo una prima parziale lettura dell'esperimento di Joos. Infatti, abbiamo confrontato le 22 ampiezze di Joos con modelli teorici di moto cosmico. A questo scopo, si devono prima trasformare i tempi delle misure dal tempo civile al tempo siderale. Per la longitudine 11.60 gradi di Jena, si trova che le osservazioni di Joos corrispondono ad un completo giro nel tempo siderale in cui il valore $\tau = 0^\circ \equiv 360^\circ$ è molto prossimo alla figura 20. Allora, usando le Eq.(96) e (99)

dell'Appendice D, si possono usare questi tempi e confrontare con predizioni teoriche per l'ampiezza che, per la data latitudine $\phi = 50.94$ gradi di Jena, dipendono dall'ascensione retta α e la declinazione angolare γ del moto cosmico considerato.

A questo scopo, è conveniente prima riscrivere le forme teoriche come

$$A_2(t) \cos 2\theta_0(t) = 2C(t) = \frac{2D(\mathcal{N} - 1)}{\lambda} \frac{v_x^2(t) - v_y^2(t)}{c^2} \sim 2.6 \cdot 10^{-3} \frac{v_x^2(t) - v_y^2(t)}{(300 \text{ km/s})^2} \quad (49)$$

$$A_2(t) \sin 2\theta_0(t) = 2S(t) = \frac{2D(\mathcal{N} - 1)}{\lambda} \frac{2v_x(t) v_y(t)}{c^2} \sim 2.6 \cdot 10^{-3} \frac{2v_x(t) v_y(t)}{(300 \text{ km/s})^2} \quad (50)$$

$$A_2(t) = \frac{2D(\mathcal{N} - 1)}{\lambda} \frac{v_x^2(t) + v_y^2(t)}{c^2} \sim 2.6 \cdot 10^{-3} \frac{v_x^2(t) + v_y^2(t)}{(300 \text{ km/s})^2} \quad (51)$$

nelle quali abbiamo usato la relazione $\frac{D}{\lambda} \frac{(30 \text{ km/s})^2}{c^2} \sim 0.375$ e l'indice di rifrazione dell'elio. Allora nel modello deterministico dove si approssima $v_x(t) \sim \tilde{v}_x(t)$, $v_y(t) \sim \tilde{v}_y(t)$ e si usa l' Eq.(99) dell'Appendice D per la combinazione scalare $\tilde{v}(t) \equiv \sqrt{\tilde{v}_x^2(t) + \tilde{v}_y^2(t)}$, si può eseguire un primo fit alle ampiezze nella figura 17 con la forma regolare $A_2^{\text{reg}}(t) = \text{const} \cdot \sin^2 z(t)$, dove $\cos z(t)$ è definito nell'Eq. (96) dell'Appendice D. I risultati del fit ⁷

$$\alpha = 168^\circ \pm 30^\circ \quad e \quad \gamma = -13^\circ \pm 14^\circ \quad (52)$$

confermano allora che, come trovato per l'esperimento di Illingworth, il moto della Terra rispetto al CMB (che ha $\alpha \sim 168^\circ$ e $\gamma \sim -6^\circ$) può servire come utile modello per descrivere i dati di ether-drift.

Però, nonostante il buon accordo tra i valori di α e γ dal CMB e quelli ottenuti dal fit Eq.(52) alle ampiezze di Joos, ci sono ancora dei problemi. Per esempio, qual'è il motivo delle forti fluttuazioni nelle ampiezze osservate? C'è un rapporto di circa un fattore 12 tra quella dell'osservazione numero 11 e quelle delle osservazioni numero 20 e 21. Questa differenza sostanziale non può essere riprodotta in un modello deterministico dell'ether-drift dove le differenti proiezioni della velocità della Terra, durante il giorno, possono al massimo dar conto di un fattore 2. Potrebbe, allora, l'ampiezza molto alta dell'osservazione numero 11 (a circa $4.15 \cdot 10^{-3}$) essere un artefatto strumentale?

Abbiamo cercato di chiarire questo punto eseguendo fit di seconda armonica (con due parametri liberi, ampiezza e fase) alle 22 osservazioni di Joos riportate nella nostra figura 16. Abbiamo quindi confrontato il chi-quadro medio che si ottiene con

⁷In realtà, c'è un altro minimo degenerare ad $\alpha = 348^\circ \pm 30^\circ$ e $\gamma = 13^\circ \pm 14^\circ$ in quanto $\sin^2 z(t)$ rimane invariante sostituendo simultaneamente $\alpha \rightarrow \alpha + 180^\circ$ e $\gamma \rightarrow -\gamma$. Tuttavia, per il buon accordo con i parametri ottenuti da osservazioni del CMB, noi ci siamo concentrati solo sulla soluzione (52).

quello di un fit a 22 sequenze di quattro numeri generati casualmente nell'intervallo $[-4 \cdot 10^{-3}, +4 \cdot 10^{-3}]$. Il chi-quadro medio, per grado di libertà, è di circa 0.8 per i dati di Joos e di circa 8 per le 22 sequenze di numeri casuali. Questa differenza di un ordine di grandezza suggerisce di attribuire un significato fisico ai dati in figura 16. In particolare, un fit di seconda armonica ai sostanziali spostamenti di frange dell'osservazione numero 11 ha una qualità eccellente, dello stesso livello, ed in molti casi migliore, di quelle con valori ben più piccoli, vedi figura 18. Quindi, non c'è alcun motivo per scartare l'osservazione numero 11.

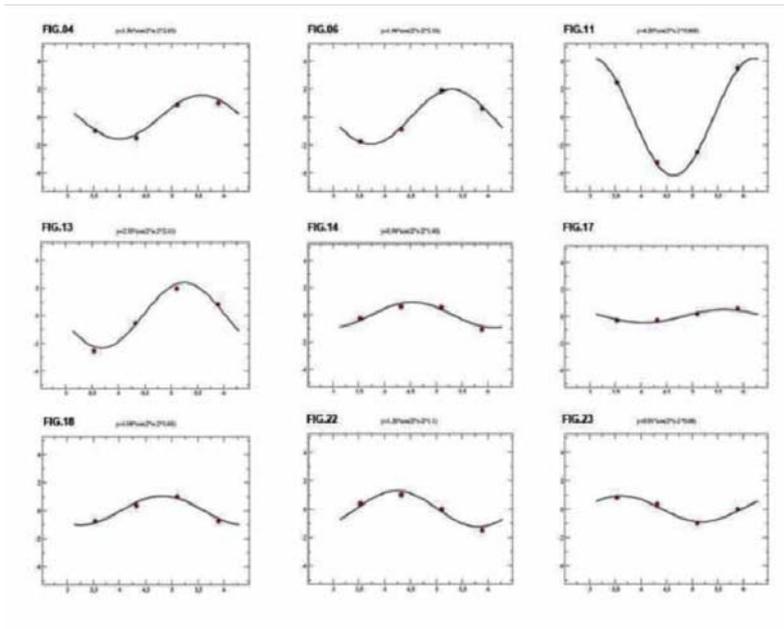


Figure 18: Alcuni fit di seconda armonica ai dati di Joos.

Un problema collegato è quello della normalizzazione assoluta delle ampiezze. Assumendo, la descrizione deterministica dell'ether-drift, con modulazioni regolari indotte dalla rotazione terrestre, l'ampiezza media su tutti i tempi siderali si può facilmente ottenere dall'Eq.(99) dell'Appendice D che dà la proiezione della velocità quadratica media

$$\langle \tilde{v}^2(t) \rangle_{\text{day}} = V^2 \left(1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \phi - \frac{1}{2} \cos^2 \gamma \cos^2 \phi \right) \quad (53)$$

Per il CMB e Jena, questa relazione dà $\sqrt{\langle \tilde{v}^2 \rangle_{\text{day}}} \sim 330$ km/s. Quindi, dall'Eq.(51)

si otterrebbe

$$\langle \tilde{A}_2(t) \rangle_{\text{day}} \sim 2.6 \cdot 10^{-3} \frac{\langle \tilde{v}^2(t) \rangle_{\text{day}}}{(300 \text{ km/s})^2} \sim 3.2 \cdot 10^{-3} \quad (54)$$

da confrontare con il valore medio dalle misure di Joos $\langle A_2^{\text{Joos}} \rangle = (1.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}$. Come abbiamo visto, nella descrizione standard, questo valore sperimentale porta alla stima $\sqrt{\langle \tilde{v}^2 \rangle} \sim 217 \text{ km/s}$ e *non* a $\sqrt{\langle \tilde{v}^2 \rangle} \sim 330 \text{ km/s}$. Per cercare di ottenere piena consistenza con il moto cosmico suggerito dalle osservazioni del CMB, si deve quindi cambiare il modello fisico dell'ether-drift.

Abbiamo dunque adottato il modello non-deterministico di ether-drift della Sezione 3 per simulare variazioni stocastiche del campo di velocità. Come nella simulazione utilizzata per confrontarci con l'unica sessione nota di Michelson-Pease-Pearson, abbiamo adottato la versione più raffinata, quella cioè per cui i limiti delle variabili aleatorie nelle Eq.(25) e (26) sono fissati da $[-\tilde{v}_x(t), \tilde{v}_x(t)]$ per $x_n (i = 1, 2)$ e $[-\tilde{v}_y(t), \tilde{v}_y(t)]$ per $y_n (i = 1, 2)$. Per valutare questi limiti (le cui espressioni analitiche sono date nell'Appendice D) abbiamo fissato gli stessi parametri cinematici di base $V = 370 \text{ km/s}$, ascensione retta $\alpha = 168$ gradi, declinazione angolare $\gamma = -6$ gradi, con una latitudine ϕ data dal valore 50.94 gradi di Jena.

Va notato che, in questo modello, si avrebbe subito una notevole riduzione dell'ampiezza rispetto al modello deterministico. Per stimare l'ordine di grandezza della riduzione, possiamo eseguire una completa media statistica (come per un numero infinito di misure) ed usare le Eq.(27) nell' Eq.(51), per il nostro caso $\eta = 1$. Questo dà

$$\langle A_2(t) \rangle_{\text{stat}} \sim 2.6 \cdot 10^{-3} \frac{\langle \tilde{v}^2(t) \rangle}{(300 \text{ km/s})^2} \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{18} \tilde{A}_2(t) \quad (55)$$

Mediando su tutti i tempi siderali, per il CMB e Jena, si otterrebbe allora un'ampiezza media di circa $1.7 \cdot 10^{-3}$ e non di $3.2 \cdot 10^{-3}$ migliorando così sostanzialmente l'accordo con il valore sperimentale $(1.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}$.

Una volta chiarito questo aspetto, e fissati i parametri cinematici globali, resta da valutare con maggior precisione l'accordo tra le simulazioni numeriche e i dati di Joos. I dettagli di questa analisi, come per esempio la dipendenza dalla sequenza random o dal troncamento dei modi di Fourier nelle Eq.(25) e (26), si trovano nella ref.[5]. Qui ne riportiamo solo i risultati. Un primo confronto può consistere nel produrre sequenze di 22 ampiezze prodotte col generatore di numeri casuali e confrontarle con l'unica sequenza sperimentale delle 22 ampiezze di Joos. A tale scopo, per valutare l'accordo ed a causa del carattere molto irregolare dei valori, è conveniente confrontare le curve che si ottengono nei due casi da un fit polinomiale (sino al quinto ordine). Questo primo tipo di confronto non ha una natura sistematica e richiede di generare molte sequenze casuali. Facendo questo,

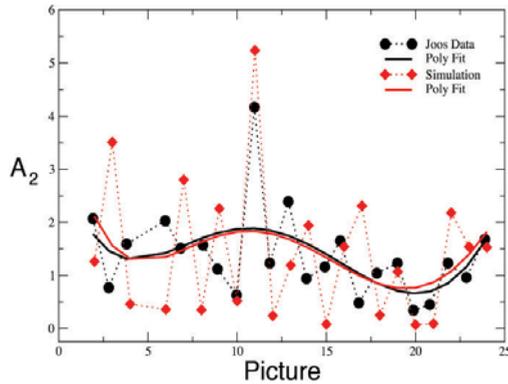


Figure 19: *Le ampiezze sperimentali di Joos sono confrontate con il risultato di una singola simulazione numerica per fissata sequenza random e fissato numero di modi di Fourier $5 \cdot 10^6$ nelle Eq.(25) e (26). Cambiando i parametri della sequenza random ed il numero di componenti di Fourier (nell' intervallo tra 10^3 e 10^7), i singoli valori simulati cambiano tipicamente di $(1 \div 4) \cdot 10^{-3}$, a seconda del tempo siderale. Mostriamo anche il risultato di un fit polinomiale del quinto ordine ai due set di valori. La figura è presa dalla ref.[5] con il gentile permesso dello European Physical Journal (EPJ).*

un ottimo accordo è per esempio quello mostrato nella figura 19 dalla quale si deduce una sostanziale equivalenza tra dati sperimentali e simulazione numerica.

Un confronto più convenzionale consiste invece nello stimare, per ogni ampiezza, un valor medio ed un'incertezza che rifletta le variazioni osservate nelle simulazioni. A questo scopo, abbiamo considerato le ampiezze $\langle A_2^{\text{simul}}(t_i) \rangle$ ottenute mediando su dieci ipotetiche misure effettuate ai tempi t_i di Joos. Per ogni t_i , l'effetto osservato di cambiare i parametri della simulazione sono riassunti in un errore simmetrico. Questo altro confronto è mostrato nella figura 20.

Le variazioni sono maggiori ai valori del tempo siderale dove la proiezione a Jena della velocità della Terra diventa più grande. La tendenza dei dati di Joos a giacere nella parte bassa della predizione teorica dipende in gran parte dal nostro uso di errori simmetrici. Per valutare meglio questo effetto abbiamo stimato più precisamente il contenuto di probabilità dagli istogrammi di 10.000 configurazioni generate ai tempi delle osservazioni di Joos. Questo confronto è sempre eccellente, anche nei due casi estremi delle osservazioni numero 11 e numero 20 mostrati nelle figure 21 e 22.

Possiamo dunque riassumere: dal confronto tra dati sperimentali e le nostre simulazioni numeriche, riassunte nelle figure 19 - 22, si ottiene un accordo soddisfacente con il modello non deterministico di ether-drift che abbiamo adottato.

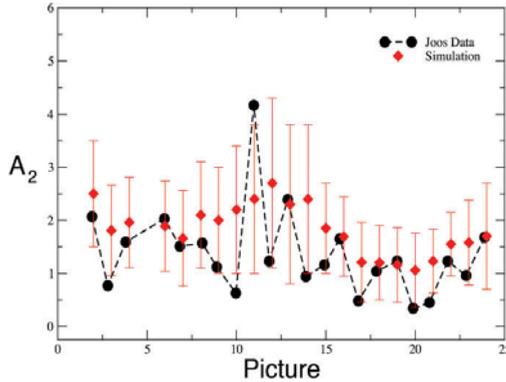


Figure 20: *Le ampiezze sperimentali di Joos sono confrontate con il risultato ottenuto simulando dieci osservazioni in giorni consecutivi eseguite agli stessi tempi di Joos. L'effetto di variare la sequenza random ed il numero di componenti di Fourier nelle Eq.(25) e (26) è stato riassunto in un valor medio ed in un errore simmetrico. La figura è presa dalla ref.[5] con il gentile permesso dello European Physical Journal (EPJ).*

In questa analisi, abbiamo utilizzato come parametri globali del moto quelli dedotti dall'osservazione del CMB e, dunque, le prime indicazioni ottenute dal fit Eq.(52) vengono rafforzate. Da questo accordo, segue anche che il valore cinematico $v \sim 217_{-79}^{+66}$ km/s ottenuto all'inizio semplicemente correggendo con l'indice di rifrazione dell'elio il valore osservabile (48), dovrebbe essere sostanzialmente aumentato poiché le variazioni stocastiche del campo di velocità tendono a ridurre l'ampiezza media, vedi Eq.(55). In questo modello non-deterministico, nel quale le osservazioni di Joos sono del tutto consistenti con il moto cosmico suggerito dal CMB, utilizzando l'Eq.(99) dell'Appendice D, per i parametri $V = 370$ km/s, $\alpha = 168^\circ$ e $\gamma = -6^\circ$ e per la latitudine $\phi = 50.94^\circ$ di Jena, otteniamo allora una velocità cinematica giornaliera

$$v = 330_{-70}^{+40} \text{ km/s} \quad (56)$$

7.6 Sommario e sviluppi futuri

Differentemente dallo spazio-tempo banalmente vuoto che Einstein aveva in mente nel 1905, il vuoto della fisica di oggi andrebbe piuttosto pensato come permeato da diversi condensati di quanti elementari. Il processo di condensazione seleziona in modo naturale un certo sistema di riferimento Σ (quello nel quale la condensazione avviene globalmente con momento spaziale $\mathbf{P} = 0$). Potrebbe esso giocare il ruolo di sistema privilegiato in un moderno approccio Lorentziano alla relatività? In altre parole, potrebbe lo stato fisico di un vuoto così definito *non* essere esattamente invariante per trasformazioni di Lorentz?

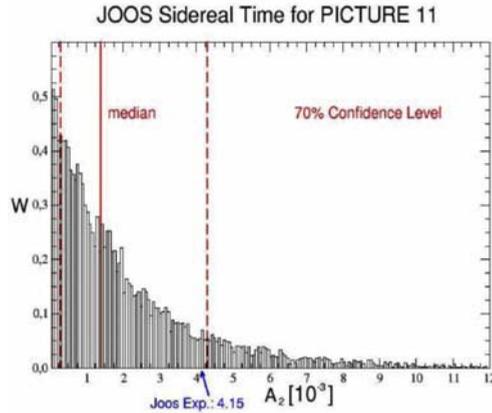


Figure 21: *L'istogramma W di una simulazione di 10.000 valori dell'ampiezza $A_2(t)$ al tempo dell'osservazione numero 11 di Joos. La normalizzazione verticale è ad area unitaria. Mostriamo la mediana, il limite del 70% CL (confidence level) ed il valore sperimentale di Joos.*

Partendo da questa osservazione di carattere generale, abbiamo suggerito un nuovo schema interpretativo di quei piccoli residui mai compresi negli esperimenti classici di ether-drift nei quali la luce si propagava ancora in sistemi gassosi (aria o elio a pressione atmosferica). Differentemente dall'interpretazione tradizionale, che tende a considerarli come puri effetti strumentali, essi potrebbero invece acquistare un significato fisico ed indicare un debole flusso di energia, associato al moto cosmico della Terra, che induce correnti convettive in sistemi debolmente legati come i gas ed una conseguente leggera anisotropia della velocità della luce. In questo schema, ci sono differenze non banali rispetto a quei moderni esperimenti dove la luce si propaga nel vuoto più spinto disponibile oggi ed anche rispetto a quelli nei quali la luce si propaga in sistemi fortemente legati come i dielettrici solidi o liquidi. In quest'ultimo caso, ci si aspetterebbe, infatti, che un debole flusso di energia dissipi essenzialmente mediante conduzione termica senza provocare alcun moto di particelle ed anisotropia della luce. Questa situazione complessa, nella quale il laboratorio terrestre non potrebbe più essere usato per definire un vero stato di quiete, sarebbe ancora consistente con l'interpretazione della relatività di Lorentz ma non con quella di Einstein.

Su queste premesse, abbiamo presentato una rianalisi moderna degli esperimenti classici di ether-drift in sistemi gassosi basandoci su due ingredienti essenziali. Da un canto, la comprensione che, in una forma di relatività Lorentziana, l'effetto del drift sulla velocità della luce in un sistema gassoso non è semplicemente proporzionale a $(v/c)^2$, come in fisica classica, ma dipende dall'indice di rifrazione \mathcal{N} tramite la combinazione $2(\mathcal{N}_{\text{gas}} - 1)(v/c)^2$. Questo fa capire come gli spostamenti di frange

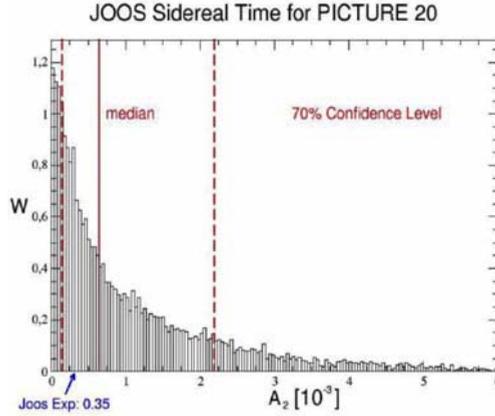


Figure 22: L'istogramma W di una simulazione di 10.000 valori dell'ampiezza $A_2(t)$ al tempo dell'osservazione numero 20 di Joos. La normalizzazione verticale è ad area unitaria. Mostriamo la mediana, il limite del 70% CL ed il valore sperimentale di Joos.

misurati non diano direttamente la velocità cinematica v ma, piuttosto, una velocità osservabile definita tramite la relazione $v_{\text{obs}}^2 \sim 2(\mathcal{N}_{\text{gas}} - 1)v^2$. Nei sistemi gassosi, essa risulta molto minore di quella cinematica e si annulla esattamente nel limite ideale di indice di rifrazione $\mathcal{N} = 1$.

Dall'altro, secondo gli argomenti teorici presentati nel Cap. 2, un modello del vuoto come mezzo irregolare, simile ad un fluido turbolento. Questo darebbe all'ether-drift una tipica natura stocastica, cioè non-deterministica, nella quale il moto cosmico della Terra fissa solo i limiti di un campo di velocità microscopico che fluttua in modo casuale. Quest'altra caratteristica permette di capire il carattere

Table 4: Le velocità medie osservate (o i limiti posti) da vari esperimenti nell'interpretazione alternativa basata sulle Eq. (8), (10) e (13).

Esperimento	gas nell'interf.	v_{obs} (km/s)	v (km/s)
Michel.-Morl.(1887)	aria	$8.4^{+1.5}_{-1.7}$	349^{+62}_{-70}
Morl.-Miller(1902-1905)	aria	8.5 ± 1.5	353 ± 62
Kennedy(1926)	elio	< 5	< 600
Illingworth(1927)	elio	3.1 ± 1.0	370 ± 120
Miller(1925-1926)	aria	$8.4^{+1.9}_{-2.5}$	349^{+79}_{-104}
Michelson-P.-P.(1929)	aria	$4.5 \pm \dots$	$185 \pm \dots$
Joos(1930)	elio	$1.8^{+0.5}_{-0.6}$	330^{+40}_{-70}

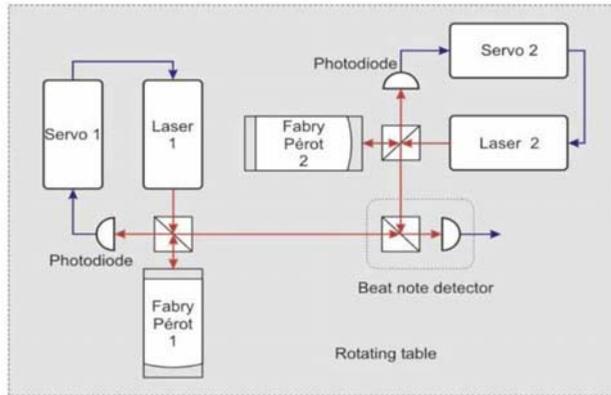


Figure 23: Lo schema di un moderno esperimento di ether-drift. Le frequenze della luce dai laser sono prima stabilizzate accoppiandoli a risonatori ottici di Fabry-Pérot. Le due frequenze ν_1 e ν_2 dei segnali uscenti dai due risonatori sono poi confrontate nel rivelatore di battimento che fornisce la differenza $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$. Negli esperimenti attuali, un vuoto molto spinto viene mantenuto all'interno dei risonatori. La figura è presa dalla ref.[6] con il gentile permesso delle Edizioni Springer Science + Business Media.

irregolare delle osservazioni sperimentali e suggerisce di concentrare l'attenzione sull'*ampiezza* degli spostamenti di frange che fornisce il modulo della velocità. Questa, a differenza della *fase* associata alla direzione del drift, che varia in modo casuale, è una quantità definita positiva ed esibisce un comportamento più regolare.

Adottando questo schema, gli esperimenti classici di ether-drift in sistemi gassosi danno le indicazioni riassunte nella Tabella 4. Da essa si deduce un'ottima consistenza con quella velocità della Terra di 370 km/s che *oggi* viene dedotta dalle osservazioni astronomiche del CMB che verrebbe così a giocare il ruolo del sistema privilegiato Lorentziano. Questa sorprendente coincidenza tra misure di laboratorio ed osservazioni astronomiche richiede una conferma definitiva tramite una nuova generazione di apparati dedicati allo scopo di riprodurre le condizioni sperimentali dei primi esperimenti in cui la luce si propagava in un mezzo gassoso (e non come oggi nel vuoto dove $\mathcal{N} = 1$ con grande accuratezza).

Consideriamo dunque brevemente gli esperimenti moderni di ether-drift (per una rassegna si veda per esempio la ref.[39]). In essi si misura la differenza relativa di frequenza $\Delta\nu(\theta)$ tra due risonatori ottici ortogonali, vedi figura 23. La loro frequenza individuale

$$\nu(\theta) = \frac{\bar{c}_\gamma(\theta)m}{2L(\theta)} \quad (57)$$

è proporzionale alla velocità della luce di andata e ritorno $\bar{c}_\gamma(\theta)$ dentro il risonatore tramite un numero intero m (che fissa il modo ottico della cavità) e la lunghezza della cavità $L(\theta)$ come misurata nel laboratorio. Assumendo, come in precedenza, la validità delle trasformazioni di Lorentz, la lunghezza della cavità, nel sistema di riferimento in cui essa è in quiete, non dipende dalla sua orientazione e si ha $L(\theta) = L$.

Allora, come nel caso degli spostamenti di frange negli esperimenti classici, uno shift di frequenza tra i due risonatori dipende solo da un'anisotropia della velocità della luce. Si ottiene quindi

$$\frac{\Delta\nu^{\text{phys}}(\theta)}{\nu_0} \sim \frac{\bar{c}_\gamma(\pi/2 + \theta) - \bar{c}_\gamma(\theta)}{c} \equiv \frac{\Delta\bar{c}_\theta}{c} \quad (58)$$

dove ν_0 indica la frequenza di riferimento dei risonatori, ed il suffisso “phys” indica una ipotetica parte fisica dello shift di frequenza dopo la sottrazione di ogni effetto spurio.

Restringendo la nostra analisi al solo caso in cui nelle cavità sia presente un mezzo gassoso di indice di rifrazione $\mathcal{N} = 1 + \epsilon$, possiamo ripetere lo stesso procedimento seguito nel caso degli esperimenti classici e si ottiene lo shift di frequenza

$$\frac{\Delta\nu^{\text{phys}}(\theta)}{\nu_0} \sim \frac{\bar{c}_\gamma(\pi/2 + \theta) - \bar{c}_\gamma(\theta)}{c} \sim (\mathcal{N} - 1) \frac{v^2}{c^2} \cos 2(\theta - \theta_0) \quad (59)$$

Sostituendo il vuoto praticato comunemente oggi nelle cavità ottiche, dove $\mathcal{N} = 1$ con grande accuratezza, con un mezzo gassoso, ci si aspetta dunque un sostanziale aumento del segnale.

Questo sostanziale aumento è confermato dal solo esperimento moderno eseguito in condizioni simili, l'esperimento del 1963 di Jaseja et. al [40] al MIT. Essi misuravano lo shift di frequenza tra due laser He-Ne ortogonali posti su una piattaforma ruotante. Per un confronto appropriato, si deve prima sottrarre un grosso effetto sistematico costante, di circa 270 kHz, che era presente nei dati e fu interpretato come probabilmente dovuto a magnetostrizione. Come suggerito dagli stessi autori, questo effetto spurio, che modificava solo la normalizzazione assoluta dello shift di frequenza, può essere sottratto considerando la variazione temporale dei dati. In questo caso, le variazioni residue di alcuni kHz sono consistenti con l'indice di rifrazione della miscela di He-Ne, circa 1.00004, e con le tipiche variazioni di velocità della Terra nella Tabella 4, vedi figura 24.

Riassumendo: lo shift di frequenza teoricamente aspettato in mezzi gassosi è

$$\left[\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \right]_{\text{gas}}^{\text{TEOR}} \sim \left[\frac{\Delta\bar{c}_\theta}{c} \right]_{\text{gas}}^{\text{TEOR}} \sim (\mathcal{N}_{\text{gas}} - 1) \frac{v^2}{c^2} \quad (60)$$

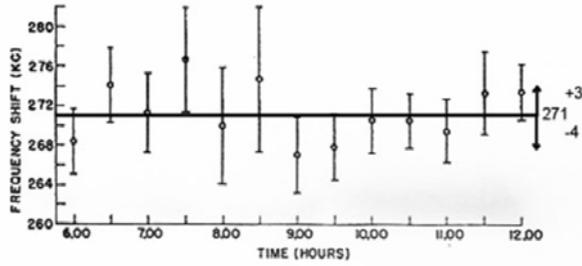


FIG. 3. Plot of relative frequency variation of two masers with 90° rotation as a function of the time of day between 6:00 a.m. and 12:00 noon on 20 January, 1963.

Figure 24: *I dati sperimentali di ref.[40] per lo shift di frequenza tra due He-Ne lasers. La doppia freccia indica il range di variazione atteso nello stesso modello Eq.(59) adottato per gli esperimenti classici.*

Allora, assumendo il valore tipico $v \sim 370$ km/s del moto della Terra rispetto al CMB, ci si aspetta $\frac{\Delta\bar{c}_\theta}{c} \lesssim 10^{-9}$ per esperimenti eseguiti in aria a pressione atmosferica, dove $\mathcal{N} \sim 1.000293$, e $\frac{\Delta\bar{c}_\theta}{c} \lesssim 10^{-10}$ per esperimenti in elio a pressione atmosferica, dove $\mathcal{N} \sim 1.000035$. Questi effetti attesi sono ben all'interno della presente tecnologia e molto maggiori di quelli osservati in esperimenti dove il vuoto viene fatto nelle cavità ottiche. Infatti, negli esperimenti migliori [41, 42] si trova un segnale istantaneo tipico $\left[\frac{\Delta\nu}{\nu_0}\right]_{\text{vacuum}}^{\text{EXP}} \sim \left[\frac{\Delta\bar{c}_\theta}{c}\right]_{\text{vacuum}}^{\text{EXP}} \lesssim 10^{-15}$ o minore e, dunque, del tutto trascurabile rispetto a quelli in Eq.(60).

Tali esperimenti sarebbero in linea con quelli proposti in ref.[43] dove, appunto, l'uso di risuonatori ottici riempiti di materiali diversi era stato proposto come un utile metodo complementare per studiare deviazioni da un'esatta Lorentz-invarianza. Da un'analisi preliminare, il loro costo si può stimare in circa 300.000 euro o poco più. Il solo aspetto delicato riguarda l'alta stabilizzazione, in pressione e temperatura, delle due cavità ottiche che è necessaria per escludere effetti spuri. A questo scopo, un importante elemento per aumentare la stabilità e ridurre gli effetti sistematici potrebbe consistere nel ricavare le due cavità dallo stesso blocco di materiale come nel caso delle cavità incrociate di ref.[44]. Questi aspetti non dovrebbero, comunque, rappresentare dei problemi insormontabili se si tiene conto che nei dati di Joos [35], ottenuti ormai più di ottanta anni fa, abbiamo potuto individuare tracce definite di quel tipo di moto che *oggi* si ottiene dalle osservazioni astronomiche del CMB.

7.7 Appendice A

Consideriamo la propagazione della luce in un mezzo gassoso di indice di rifrazione \mathcal{N} . Assumendo isotropia, il tempo t impiegato dalla luce a percorrere una certa distanza L all'interno del mezzo è $t = \mathcal{N}L/c$. Questo può essere espresso come la somma di $t_0 = L/c$ e $t_1 = (\mathcal{N} - 1)L/c$ dove t_0 è lo stesso tempo che si avrebbe nel vuoto e t_1 rappresenta il tempo medio addizionale di cui la luce viene rallentata dalla presenza della materia. Se ci fossero correnti convettive nel gas, dovute al moto del laboratorio rispetto ad un sistema di riferimento privilegiato Σ , allora t_1 sarebbe differente in differenti direzioni e ci sarebbe una piccola anisotropia della velocità della luce proporzionale a $(\mathcal{N} - 1)$.

Consideriamo la propagazione della luce in un piano bidimensionale ed esprimiamo t_1 come

$$t_1 = \frac{L}{c} f(\mathcal{N}, \theta, \beta) \quad (61)$$

dove $\beta = V/c$, V essendo la proiezione nel piano considerato della velocità rispetto al sistema Σ nel quale si assume la forma isotropa

$$f(\mathcal{N}, \theta, 0) = \mathcal{N} - 1 \quad (62)$$

Espandendo intorno a $\mathcal{N} = 1$ dove, per qualunque β , f si annulla per definizione, per sistemi gassosi (dove $\mathcal{N} - 1 \ll 1$) si trova la forma universale

$$f(\mathcal{N}, \theta, \beta) \sim (\mathcal{N} - 1)F(\theta, \beta) \quad (63)$$

con

$$F(\theta, \beta) \equiv (\partial f / \partial \mathcal{N})|_{\mathcal{N}=1} \quad (64)$$

e $F(\theta, 0) = 1$. Quindi, introducendo la velocità della luce

$$t(\mathcal{N}, \theta, \beta) = \frac{L}{c_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta)} \sim \frac{L}{c} + \frac{L}{c} (\mathcal{N} - 1) F(\theta, \beta) \quad (65)$$

si trova

$$c_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta) \sim \frac{c}{\mathcal{N}} [1 - (\mathcal{N} - 1) (F(\theta, \beta) - 1)] \quad (66)$$

Una relazione analoga vale per la velocità di andata e ritorno $\bar{c}_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta)$

$$\bar{c}_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta) = \frac{2 c_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta) c_\gamma(\mathcal{N}, \pi + \theta, \beta)}{c_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta) + c_\gamma(\mathcal{N}, \pi + \theta, \beta)} \sim \frac{c}{\mathcal{N}} \left[1 - (\mathcal{N} - 1) \left(\frac{F(\theta, \beta) + F(\pi + \theta, \beta)}{2} - 1 \right) \right] \quad (67)$$

Un'espressione più esplicita si ottiene esplorando alcune proprietà generali della funzione $F(\theta, \beta)$. Espandendo in serie di potenze di β

$$F(\theta, \beta) - 1 = \beta F_1(\theta) + \beta^2 F_2(\theta) + \dots \quad (68)$$

e tenendo conto che, per la stessa definizione di velocità di andata e ritorno, $\bar{c}_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta) = \bar{c}_\gamma(\mathcal{N}, \theta, -\beta)$, segue $F_1(\theta) = -F_1(\pi + \theta)$. Quindi, all'ordine $\mathcal{O}(\beta^2)$, esprimendo la combinazione $F_2(\theta) + F_2(\pi + \theta)$ come somma infinita in polinomi di Legendre, si ottiene la struttura generale

$$\bar{c}_\gamma(\mathcal{N}, \theta, \beta) \sim \frac{c}{\mathcal{N}} \left[1 - (\mathcal{N} - 1) \beta^2 \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_{2n} P_{2n}(\cos \theta) \right] \quad (69)$$

che coincide con l'Eq.(9).

7.8 Appendice B

Nella teoria standard, la possibile non-invarianza dello stato di vuoto per trasformazioni di Lorentz non viene di solito presa in considerazione. Probabilmente perché le proprietà del vuoto vengono riassunte in alcune quantità, come il valor medio del campo di Higgs $\langle \Phi \rangle = \phi$, che sono invarianti. Tuttavia, nella visione del vuoto come un condensato di quanti elementari si introduce in modo naturale un sistema di riferimento Σ , quello nel quale la condensazione produce globalmente uno stato con momento spaziale $\mathbf{P} = 0$, e dunque anche uno stato di vuoto di riferimento $|\Psi^{(0)}\rangle$ ⁸, quello appropriato ad un osservatore in quiete in Σ . L'invarianza per trasformazioni di Lorentz di $\langle \Phi \rangle = \phi$ allora non implica quella di $|\Psi^{(0)}\rangle$. Infatti, gli operatori che generano trasformazioni di Lorentz, diciamo U' , U'' ,... potrebbero trasformare in modo non banale lo stato di riferimento $|\Psi^{(0)}\rangle$ in $|\Psi'\rangle$, $|\Psi''\rangle$,... (stati appropriati ad osservatori in moto S' , S'' ,...) e, nonostante questo, per ogni operatore Lorentz invariante G , si avrebbe comunque

$$\langle G \rangle_{\Psi^{(0)}} = \langle G \rangle_{\Psi'} = \langle G \rangle_{\Psi''} = .. \quad (70)$$

Detto questo, in base ad argomenti generali di teoria quantistica dei campi (si veda ad esempio [45]), decidere sulla Lorentz invarianza dello stato di vuoto richiede di considerare l'algebra di Poincaré, cioè gli operatori P_α e $M_{\alpha,\beta}$ ($\alpha, \beta=0, 1, 2, 3$) dove P_α sono i 4 generatori delle traslazioni nello spazio-tempo e $M_{\alpha\beta} = -M_{\beta\alpha}$ sono i 6 generatori delle rotazioni del Gruppo di Lorentz con relazioni di commutazione

$$[P_\alpha, P_\beta] = 0 \quad (71)$$

$$[M_{\alpha\beta}, P_\gamma] = \eta_{\beta\gamma} P_\alpha - \eta_{\alpha\gamma} P_\beta \quad (72)$$

$$[M_{\alpha\beta}, M_{\gamma\delta}] = \eta_{\alpha\gamma} M_{\beta\delta} + \eta_{\beta\delta} M_{\alpha\gamma} - \eta_{\beta\gamma} M_{\alpha\delta} - \eta_{\alpha\delta} M_{\beta\gamma} \quad (73)$$

dove $\eta_{\alpha\beta} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ è il tensore di Minkowski.

⁸Ignoriamo qui il problema della degenerazione del vuoto assumendo che ogni sovrapposizione tra stati di vuoto equivalenti si annulli nel limite di volume infinito della teoria (si veda per esempio S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Cambridge University press, Vol.II, pp. 163-167).

In questo contesto ben definito, come discusso in ref.[8, 4, 5, 6], l'esatta Lorentz invarianza dello stato di vuoto richiede di imporre una condizione problematica: l'annullarsi della sua energia. Come esempio, consideriamo il generatore M_{01} di una trasformazione di Lorentz lungo l'asse x per cui si trova

$$P_1 M_{01} |\Psi^{(0)}\rangle = M_{01} P_1 |\Psi^{(0)}\rangle + P_0 |\Psi^{(0)}\rangle \quad (74)$$

Quindi, assumendo momento spaziale zero in Σ , un'energia del vuoto $E_0 \neq 0$ implica $P_1 M_{01} |\Psi^{(0)}\rangle = E_0 |\Psi^{(0)}\rangle \neq 0$. Dunque, poiché lo stato $M_{01} |\Psi^{(0)}\rangle$ è non nullo, lo stato di vuoto di riferimento $|\Psi^{(0)}\rangle$ non può essere Lorentz invariante.

La conseguenza più semplice di questa non invarianza è un flusso di energia-momento della direzione del moto rispetto Σ . Infatti, definendo lo stato trasformato $|\Psi'\rangle$ come

$$|\Psi'\rangle = e^{\lambda' M_{01}} |\Psi^{(0)}\rangle \quad (75)$$

(si ricordi che $M_{01} \equiv -iL_1$ è un operatore anti-hermitiano) ed usando le relazioni

$$e^{-\lambda' M_{01}} P_1 e^{\lambda' M_{01}} = \cosh \lambda' P_1 + \sinh \lambda' P_0 \quad (76)$$

$$e^{-\lambda' M_{01}} P_0 e^{\lambda' M_{01}} = \sinh \lambda' P_1 + \cosh \lambda' P_0 \quad (77)$$

si trova

$$\langle P_1 \rangle_{\Psi'} = E_0 \sinh \lambda' \quad \langle P_0 \rangle_{\Psi'} = E_0 \cosh \lambda' \quad (78)$$

Ora, questo risultato contrasta con quell'approccio alternativo in cui si tende a considerare l'energia del vuoto E_0 come una quantità spuria (perché probabilmente infinita) e si cerca invece di caratterizzare il vuoto mediante una quantità locale, cioè un tensore energia impulso della forma [46, 47]

$$\langle W_{\mu\nu} \rangle_{\Psi^{(0)}} = \rho_v \eta_{\mu\nu} \quad (79)$$

(ρ_v essendo una costante indipendente dallo spazio-tempo). In questo caso, si sarebbe condotti a conclusioni opposte. Infatti, introducendo le matrici Λ_ν^μ che descrivono una trasformazione di Lorentz ad un sistema in moto S' , definendo $\langle W_{\mu\nu} \rangle_{\Psi'}$ tramite la relazione

$$\langle W_{\mu\nu} \rangle_{\Psi'} = \Lambda^\sigma_\mu \Lambda^\rho_\nu \langle W_{\sigma\rho} \rangle_{\Psi^{(0)}} \quad (80)$$

ed usando l'Eq.(79), il valor medio di W_{0i} nello stato trasformato $|\Psi'\rangle$ si annullerebbe, proprio come si annulla in $|\Psi^{(0)}\rangle$, dando infine

$$\int d^3x \langle W_{0i} \rangle_{\Psi'} \equiv \langle P_i \rangle_{\Psi'} = 0 \quad (81)$$

Nondimeno, l'idea di eliminare del tutto E_0 dà luogo a diversi problemi. Per esempio, nel solito formalismo dei quanti ricordato nel Cap. 2 (il formalismo

detto della ‘seconda quantizzazione’) le energie $E_1(\mathbf{p})$, quelle di ogni particella con definito momento spaziale \mathbf{p} , si ottengono come differenza tra l’energia dello stato quantistico con una particella singola e l’energia dello stato di vuoto. Se l’energia E_0 non viene neppure presa in considerazione, in quanto spuria, anche $E_1(\mathbf{p})$ diventerebbe un qualcosa di mal definito. Inoltre, il fatto che allo stato di vuoto fisico, cioè a quello che ha energia minima, si debba attribuire un’energia definita ha motivazioni molto solide che risalgono all’equivalenza tra l’equazione agli autovalori ed il metodo variazionale. Questo conferma che non ci si può limitare solo a considerare la densità di energia.

Infine, ad un livello ancora più profondo, si deve capire che in un approccio basato solo sull’ Eq.(79) le proprietà di $|\Psi^{(0)}\rangle$ per trasformazioni di Lorentz non sono ben definite. Infatti, uno stato trasformato $|\Psi'\rangle$ si ottiene, per esempio, agendo su $|\Psi^{(0)}\rangle$ con il generatore M_{01} . Quando, $|\Psi^{(0)}\rangle$ è considerato un autostato dell’energia e momento totali, si può dimostrare senza eccezioni che, per $E_0 \neq 0$, $|\Psi'\rangle$ e $|\Psi^{(0)}\rangle$ differiscono in modo essenziale. D’altro canto, nel caso $E_0 = 0$ ci sono solo due alternative: o $M_{01}|\Psi^{(0)}\rangle = 0$, così che $|\Psi'\rangle = |\Psi^{(0)}\rangle$, o $M_{01}|\Psi^{(0)}\rangle$ è un vettore di stato proporzionale a $|\Psi^{(0)}\rangle$, così che $|\Psi'\rangle$ e $|\Psi^{(0)}\rangle$ differiscono di un fattore di fase. Quindi, se la struttura in Eq.(79) fosse realmente equivalente ad imporre l’esatta Lorentz invarianza del vuoto si dovrebbe riuscire a dimostrare risultati simili, per esempio che un tale stato $|\Psi^{(0)}\rangle$ rimane invariante per trasformazione di Lorentz, cioè risulta autostato degli operatori $M_{0i} = -i \int d^3x (x_i W_{00} - x_0 W_{0i})$ con autovalore zero. Invece, non c’è alcun modo di dimostrare questo partendo solo dall’Eq.(79) (che solo garantisce la condizione più debole $\langle M_{0i} \rangle_{\Psi^{(0)}} = 0$). Per questo motivo, a causa della non-equivalenza dei due approcci, non deve sorprendere che si possa arrivare a risultati contraddittori. Nello stesso tempo, questo mostra come non sia per nulla ovvio che le relazioni di tipo locale (79) rappresentino un approccio più fondamentale allo stato di vuoto.

Questa discussione tecnica è inevitabile per far vedere come il Principio di Relatività, l’ingrediente essenziale della relatività speciale, si basi su un’ipotesi implicita: l’esatta Lorentz invarianza dello stato di vuoto. In una teoria quantistica di campo, questo richiede che l’energia del vuoto si annulli esattamente. D’altro canto, un’energia del vuoto $E_0 \neq 0$ potrebbe avere origini molto differenti. L’unica cosa che si può dire è che solo supersimmetrie *esatte* (che non sono realizzate in natura) garantiscono in modo naturale $E_0 = 0$ e dunque la condizione necessaria per un vuoto Lorentz invariante. Quindi, questo aspetto del vuoto rappresenta un problema aperto che, allo stato attuale, non ha alcuna soluzione ⁹. Tuttavia,

⁹Si potrebbe anche tentare di arguire che una soluzione soddisfacente al problema dell’energia del vuoto richiede necessariamente l’introduzione di uno spazio-tempo curvo, allargando così la prospettiva alla relatività generale. Tuttavia, in assenza di una teoria quantistica consistente della gravità, modelli fisici del vuoto in uno spazio piatto, come quello del liquido turbolento da noi adottato, possono servire a chiarire quel serio problema ricordato nel Cap. 2 (l’enorme differenza tra gli effetti di curvatura aspettati e quelli sperimentalmente osservati) che altrimenti non avrebbe alcuna ovvia soluzione.

come abbiamo discusso nelle sezioni precedenti, si possono esplorare le conseguenze osservabili associate ad un vuoto non Lorentz invariante cercando una risposta negli esperimenti. Diventa allora naturale considerare l'interferometria laser. Essa rappresenta uno strumento potente per cercare, tramite una leggera anisotropia della velocità della luce, alterazioni inaspettate nella struttura della materia che potrebbero essere dovute ad un piccolo flusso di energia di origine fondamentale.

7.9 Appendice C

Per derivare l'Eq.(10), cominciamo considerando un mezzo dielettrico di indice di rifrazione \mathcal{N} il cui contenitore sia in quiete in Σ , il sistema di riferimento definito dall'imporre zero momento spaziale per il processo di condensazione del vuoto. Per un osservatore in quiete in questo sistema, la propagazione della luce all'interno del mezzo è assunta essere isotropa e descritta dall'equazione

$$\pi_\mu \pi_\nu \gamma^{\mu\nu} = 0 \quad (82)$$

dove

$$\gamma^{\mu\nu} \equiv \text{diag}(\mathcal{N}^2, -1, -1, -1) \quad (83)$$

e π_μ denota il 4-momento della luce per l'osservatore Σ .

Consideriamo adesso che il contenitore del mezzo si muova con una certa velocità uniforme \mathbf{V} rispetto a Σ e sia in quiete in un altro sistema S' . Denotiamo anche $u^\mu \equiv (u^0, \mathbf{V}/c)$ (con $u_\mu u^\mu = 1$), il 4-vettore adimensionale di S' rispetto a Σ . Per analogia, la propagazione della luce per l'osservatore in S' sarà descritta da

$$p_\mu p_\nu g^{\mu\nu} = 0, \quad (84)$$

dove ora $p_\mu \equiv (E/c, \mathbf{p})$ e $g^{\mu\nu}$ denotano rispettivamente il 4-momento e la metrica per S' .

Fatte queste premesse, cerchiamo di capire la relazione tra le due metriche $\gamma^{\mu\nu}$ e $g^{\mu\nu}$ cominciando dal punto di vista della relatività speciale nella quale si assume il Principio di Relatività, ovvero la completa equivalenza dei due riferimenti. Questo significa che ognuno dei due deve descrivere la propagazione nello stesso identico modo: propagazione isotropa per Σ e propagazione isotropa per S' , ovvero $g^{\mu\nu} = \gamma^{\mu\nu}$. Nonostante non venga di solito detto chiaramente, questa uguaglianza equivale ad introdurre una matrice di trasformazione simmetrica, diciamo $A^\mu{}_\nu = A^\mu{}_\nu(u_\mu, \mathcal{N})$, per cui si ha

$$g^{\mu\nu} = A^\mu{}_\sigma A^\nu{}_\rho \gamma^{\sigma\rho} \quad (85)$$

e si fissa (SR=Special Relativity)

$$[A^\mu{}_\nu(u_\mu, \mathcal{N})]_{\text{SR}} = \delta^\mu{}_\nu. \quad (86)$$

In relatività speciale, questa identificazione vale qualunque siano u_μ e il valore di \mathcal{N} , cioè qualunque sia il mezzo dielettrico, gas, liquido o solido.

D'altro canto, concentriamoci su un mezzo gassoso e rendiamolo sempre più rarefatto, cioè prendiamo il limite $\mathcal{N} \rightarrow 1$. Qui, l'usuale identificazione della matrice di trasformazione è diversa poiché si assume sempre

$$A^\mu{}_\nu(u_\mu, \mathcal{N} = 1) = \Lambda_\nu^\mu \quad (87)$$

dove Λ_ν^μ è la matrice che rappresenta la trasformazione di Lorentz da Σ a S' . Infatti, usando la relazione $\Lambda_\rho^\mu \Lambda^{\rho\nu} = \eta^{\mu\nu}$, questo è il modo standard per garantire $g^{\mu\nu} = \gamma^{\mu\nu}$ quando la luce si propaga nel vuoto e la metrica di partenza $\gamma^{\mu\nu}$ si riduce al tensore di Minkowski $\eta^{\mu\nu} \equiv \text{diag}(1, -1, -1, -1)$.

Ma allora, cosa possiamo dire nel caso $\mathcal{N} = 1 + \epsilon$ di un mezzo gassoso? Qui, l'Eq.(86) sembra difficile da mantenere per ragioni di continuità. Infatti, un salto repentino dall'Eq.(87) a

$$[A^\mu{}_\nu(u_\mu, \mathcal{N} = 1 + \epsilon)]_{\text{SR}} = \delta_\nu^\mu \quad (88)$$

per ogni $\epsilon > 0$ e per ogni valore della velocità di S' implicherebbe un'essenziale discontinuità della matrice $A^\mu{}_\nu(u_\mu, \mathcal{N})$ per $\mathcal{N} = 1$. Questo aspetto (quello di una continuità nella matrice di trasformazione) pone un problema di consistenza interna alla relatività speciale cui, apparentemente, nessuno ha mai fatto attenzione. Invece, nessuna particolare contraddizione sorge quando \mathcal{N} comincia a differire sostanzialmente dall'unità (ovvero nel caso di dielettrici liquidi e solidi) e si possono facilmente riconciliare l'Eq.(86) e l'Eq.(87).

Quindi, questa analisi suggerisce che, per continuità, nel caso $\mathcal{N} = 1 + \epsilon$ dei sistemi gassosi, la corretta matrice di trasformazione dovrebbe essere prossima a quella in Eq.(87) (come si dice in matematica, dovrebbe giacere nel suo 'intorno'). Poiché solo la scelta Eq.(86) riesce a garantire $g^{\mu\nu} = \gamma^{\mu\nu}$ quando $\mathcal{N} \neq 1$, nel sistema S' si avrebbe allora una piccola anisotropia della velocità della luce proporzionale a $\epsilon = \mathcal{N} - 1$. Questa anisotropia, che da proprietà di simmetria sarebbe poi proporzionale a $\epsilon\beta$ per la velocità della luce $c_\gamma(\theta)$ e ad $\epsilon\beta^2$ per la velocità di andata e ritorno $\bar{c}_\gamma(\theta)$, rappresenterebbe dunque il carattere distintivo dei sistemi gassosi. D'altro canto, nulla impedisce che la matrice di trasformazione possa tendere all'Eq.(86) quando \mathcal{N} comincia a differire sostanzialmente dall'unità.

Come discusso nella Sezione 1, la possibilità di comportamenti diversi è in accordo con l'analisi fenomenologica degli esperimenti [9, 10] secondo cui sembrano esserci due regioni, quella dei sistemi gassosi, dove $\mathcal{N} \sim 1$, ed un'altra dove la differenza di \mathcal{N} dall'unità è sostanziale, per esempio $\mathcal{N} \sim 1.5$ come con il perspex nell'esperimento di Shamir e Fox [11]. Questa diversità è inoltre compatibile con l'idea di un piccolo flusso di energia associato con un vuoto non esattamente Lorentz invariante. Questo

flusso, infatti, agendo come un piccolo gradiente termico, potrebbe alterare i vari stati della materia in modo differente. Per esempio, inducendo correnti convettive delle molecole in sistemi debolmente legati come i gas o dissipando principalmente mediante conduzione termica in sistemi fortemente legati come i liquidi o i solidi. Nel primo caso, differentemente dal secondo, per $\bar{c}_\gamma(\theta)$ ci si aspetterebbe quella leggera anisotropia regolata dall'Eq.(9) che è appunto $\mathcal{O}(\epsilon\beta^2)$. Nonostante sia difficile descrivere in modo quantitativo la transizione tra i due regimi, alcuni semplici argomenti possono essere dati seguendo la linea suggerita da de Abreu e Guerra (vedi pp.165-170 di ref.[48]).

Riassumendo: per $\mathcal{N} = 1 + \epsilon$ e con un vuoto che non sia esattamente Lorentz invariante, risulta più consistente calcolare $g^{\mu\nu}$ tramite la relazione

$$g^{\mu\nu} = \Lambda^\mu_\sigma \Lambda^\nu_\rho \gamma^{\sigma\rho} \quad (89)$$

(piuttosto che tramite l'Eq.(86)) ottenendo ($\kappa = \mathcal{N}^2 - 1$)

$$g^{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} + \kappa u^\mu u^\nu. \quad (90)$$

In questo modo, l'Eq.(84) dà un'energia ($u_0^2 = 1 + \mathbf{V}^2/c^2$)

$$E(|\mathbf{p}|, \theta) = c \frac{-\kappa u_0 \zeta + \sqrt{|\mathbf{p}|^2(1 + \kappa u_0^2) - \kappa \zeta^2}}{1 + \kappa u_0^2} \quad (91)$$

con $\zeta = \mathbf{p} \cdot \frac{\mathbf{V}}{c} = |\mathbf{p}| \beta \cos \theta$, dove $\beta = \frac{|\mathbf{V}|}{c}$ e $\theta \equiv \theta_{\text{lab}}$ indica l'angolo definito, nel sistema S' del laboratorio, tra il momento spaziale del fotone e \mathbf{V} . Usando, questi risultati si ottiene la velocità della luce

$$\frac{E(|\mathbf{p}|, \theta)}{|\mathbf{p}|} = c_\gamma(\theta) = c \frac{-\kappa \beta \sqrt{1 + \beta^2} \cos \theta + \sqrt{1 + \kappa + \kappa \beta^2 \sin^2 \theta}}{1 + \kappa(1 + \beta^2)}. \quad (92)$$

o all'ordine $\mathcal{O}(\kappa)$ e $\mathcal{O}(\beta^2)$

$$c_\gamma(\theta) \sim \frac{c}{\mathcal{N}} \left[1 - \kappa \beta \cos \theta - \frac{\kappa}{2} \beta^2 (1 + \cos^2 \theta) \right] \quad (93)$$

da cui si può calcolare la velocità di andata e ritorno ($\kappa \sim 2(\mathcal{N} - 1) \equiv 2\epsilon$)

$$\begin{aligned} \bar{c}_\gamma(\theta) &= \frac{2c_\gamma(\theta)c_\gamma(\pi + \theta)}{c_\gamma(\theta) + c_\gamma(\pi + \theta)} \\ &\sim \frac{c}{\mathcal{N}} [1 - \epsilon\beta^2 (2 - \sin^2 \theta)] \end{aligned} \quad (94)$$

che, come anticipato, è un caso particolare della più generale Eq.(9) ¹⁰.

¹⁰C'è una sottile differenza tra le nostre Eq.(93) e (94) e le corrispondenti Eq. (6) and (10) della ref. [9] che dipende dall'effetto relativistico di aberrazione angolare. Precisamente, in ref.[9], con

Un dettaglio concettuale riguarda l'indice di rifrazione i cui valori sono sperimentalmente misurati (sulla Terra) mediante misure della velocità della luce di andata e ritorno. Per esempio, per l'aria le determinazioni più precise sono al livello 10^{-7} , diciamo $\mathcal{N}_{\text{aria}} = 1.0002926..$ in condizioni di 'STP' (Standard Temperatura e Pressione). Assumendo, che ci possa essere una leggera anisotropia nel sistema della Terra, si dovrebbe interpretare il valore isotropo $c/\mathcal{N}_{\text{aria}}$ come una media angolare dell'Eq.(94), cioè

$$\frac{c}{\mathcal{N}_{\text{aria}}} \equiv \langle \bar{c}_\gamma(\bar{\mathcal{N}}_{\text{air}}, \theta, \beta) \rangle_\theta = \frac{c}{\mathcal{N}_{\text{air}}} \left[1 - \frac{3}{2}(\bar{\mathcal{N}}_{\text{aria}} - 1)\beta^2 \right] \quad (95)$$

Da questa relazione si può in linea di principio determinare il valore sconosciuto $\bar{\mathcal{N}}_{\text{aria}} \equiv \mathcal{N}(\Sigma)$ (come se il gas fosse in quiete in Σ), in termini della quantità sperimentale nota $\mathcal{N}_{\text{air}} \equiv \mathcal{N}(\text{Terra})$ e di V . In pratica, per il valore standard del moto rispetto al CMB $V \sim 370$ km/s, la differenza tra $\mathcal{N}(\Sigma)$ e $\mathcal{N}(\text{Terra})$ è al livello 10^{-9} e dunque del tutto trascurabile. Lo stesso vale per gli altri sistemi gassosi (come azoto, anidride carbonica, elio ...) dove l'attuale accuratezza sperimentale è, nel caso migliore, al livello 10^{-6} . Infine, il modulo della velocità isotropa di andata e ritorno viene misurato meglio nel limite di bassa pressione dove $(\mathcal{N} - 1) \rightarrow 0$. In questo stesso limite, per ogni dato valore di V , l'approssimazione $\mathcal{N}(\Sigma) = \mathcal{N}(\text{Terra})$ diventa sempre migliore.

7.10 Appendice D

Le formule tradizionali di trigonometria sferica permettono di calcolare la proiezione nel piano x-y dell'interferometro a partire da una velocità cosmica della Terra che abbia un modulo V , un ascensione retta α ed una declinazione angolare γ . I due parametri $\tilde{v}(t)$ e $\tilde{\theta}_0(t)$, che danno il modulo e la direzione nel piano x-y, sono dati dalle relazioni seguenti [49]:

$$\cos z(t) = \sin \gamma \sin \phi + \cos \gamma \cos \phi \cos(\tau - \alpha) \quad (96)$$

$$\frac{\tilde{v}_x(t)}{V} \equiv \sin z(t) \cos \tilde{\theta}_0(t) = \sin \gamma \cos \phi - \cos \gamma \sin \phi \cos(\tau - \alpha) \quad (97)$$

la motivazione (sbagliata) che l'anisotropia è $\mathcal{O}(\beta^2)$, non si fece particolare attenzione alla precisa definizione da adottare per l'angolo tra la velocità della Terra e la direzione di propagazione della luce. Così la velocità di andata e ritorno in S' venne parametrizzata in termini dell'angolo $\theta \equiv \theta_\Sigma$ come visto nel sistema Σ . Questo si può esplicitamente verificare sostituendo nelle nostre Eq. (93) e (94) le relazioni dell'aberrazione $\cos \theta_{\text{lab}} = (-\beta + \cos \theta_\Sigma)/(1 - \beta \cos \theta_\Sigma)$ o equivalentemente sostituendo $\cos \theta_\Sigma = (\beta + \cos \theta_{\text{lab}})/(1 + \beta \cos \theta_{\text{lab}})$ nelle Eq. (6) e (10) di ref. [9]. Però, l'apparato è in quiete nel sistema del laboratorio e dunque la corretta relazione di ortogonalità tra due raggi che si propagano ad angoli θ and $\pi/2 + \theta$ è espressa in termini di $\theta = \theta_{\text{lab}}$ e non in termini di $\theta = \theta_\Sigma$. Da questa osservazione banale segue una differenza importante. Infatti, adesso l'anisotropia finale è più piccola di un fattore 3 rispetto a quella calcolata in ref.[9] usando $\theta = \theta_\Sigma$. Quindi, con gli stessi dati sperimentali, la velocità che si ottiene è maggiore di un fattore $\sqrt{3}$ e diventa, così, consistente con il valore di 370 km/s che si ottiene dalle osservazioni del CMB.

$$\frac{\tilde{v}_y(t)}{V} \equiv \sin z(t) \sin \tilde{\theta}_0(t) = \cos \gamma \sin(\tau - \alpha) \quad (98)$$

$$\tilde{v}(t) \equiv \sqrt{\tilde{v}_x^2(t) + \tilde{v}_y^2(t)} = V \sin z(t) \quad (99)$$

Qui $z = z(t)$ è la distanza del vettore \mathbf{V} dallo zenith del laboratorio, ϕ la latitudine del laboratorio, $\tau = \omega_{\text{sid}} t$ il tempo siderale delle osservazioni in gradi ($\omega_{\text{sid}} \sim \frac{2\pi}{23^h 56'}$) e l'angolo $\tilde{\theta}_0$ viene contato convenzionalmente da Nord verso Est in modo che il Nord sia $\tilde{\theta}_0 = 0$ e l'Est $\tilde{\theta}_0 = 90^\circ$.

Identificando $v(t) = \tilde{v}(t)$ e $\theta_0(t) = \tilde{\theta}_0(t)$, nelle funzioni $S(t)$ e $C(t)$ definite nell'Eq.(21), si ottiene allora la semplice struttura periodica

$$S(t) \equiv \tilde{S}(t) = S_{s1} \sin \tau + S_{c1} \cos \tau + S_{s2} \sin(2\tau) + S_{c2} \cos(2\tau) \quad (100)$$

$$C(t) \equiv \tilde{C}(t) = C_0 + C_{s1} \sin \tau + C_{c1} \cos \tau + C_{s2} \sin(2\tau) + C_{c2} \cos(2\tau) \quad (101)$$

con coefficienti di Fourier S_k e C_k che sono indipendenti dal tempo.

Definendo $\mathcal{R} \equiv \frac{D(N-1)}{\lambda} \frac{V^2}{c^2}$, si trova [19]

$$C_0 = -\frac{1}{4} \mathcal{R} (3 \cos 2\gamma - 1) \cos^2 \phi \quad (102)$$

$$C_{s1} = -\frac{1}{2} \mathcal{R} \sin \alpha \sin 2\gamma \sin 2\phi \quad ; \quad C_{c1} = -\frac{1}{2} \mathcal{R} \cos \alpha \sin 2\gamma \sin 2\phi \quad (103)$$

$$C_{s2} = \frac{1}{2} \mathcal{R} \sin 2\alpha \cos^2 \gamma (1 + \sin^2 \phi) \quad ; \quad C_{c2} = \frac{1}{2} \mathcal{R} \cos 2\alpha \cos^2 \gamma (1 + \sin^2 \phi) \quad (104)$$

$$S_{s1} = -\frac{C_{c1}}{\sin \phi} \quad ; \quad S_{c1} = \frac{C_{s1}}{\sin \phi} \quad (105)$$

$$S_{s2} = -\frac{2 \sin \phi}{1 + \sin^2 \phi} C_{c2} \quad ; \quad S_{c2} = \frac{2 \sin \phi}{1 + \sin^2 \phi} C_{s2} \quad (106)$$

References

- [1] Un lista incompleta di lavori include: W. Sutherland, *Phil. Mag.* **45** (1898) 23; A. Righi, *N. Cimento* **XVI** (1918) 213; *ibidem* **XIX** (1920) 141; *ibidem* **XXI** (1921) 187; G. Dalla Noce, *N. Cimento* **XXIV** (1922) 17. La teoria di Righi è stata rianalizzata recentemente da P. Di Mauro, S. Notarrigo e A. Pagano, *Quaderni di Storia della Fisica*, **2** (1997) 101.
- [2] A. A. Michelson, et al., *Astrophys. Journ.* **68** (1928) pag. 341-402.
- [3] R. J. Kennedy, *Phys. Rev.* **47** (1935) 965.
- [4] M. Consoli and E. Costanzo, *Eur. Phys. Journ.* **C55** (2008) 469.
- [5] M. Consoli, C. Matheson and A. Pluchino, *Eur. Phys. J. Plus* **128**, 71 (2013).
- [6] M. Consoli, *Found. of Phys.* **45** (2015) 22.
- [7] M. Consoli, A. Pagano and L. Pappalardo, *Phys. Lett.* **A318**, (2003) 292.
- [8] M. Consoli and E. Costanzo, *Eur. Phys. Journ.* **C54** (2008) 285.
- [9] M. Consoli and E. Costanzo, *Phys. Lett.* **A333** (2004) 355.
- [10] M. Consoli and E. Costanzo, *N. Cim.* **119B** (2004) 393.
- [11] J. Shamir and R. Fox, *N. Cim.* **62B** (1969) 258.
- [12] A. A. Michelson and E. W. Morley, *Am. J. Sci.* **34** (1887) 333.
- [13] D. C. Miller, *Rev. Mod. Phys.* **5** (1933) 203.
- [14] Loyd S. Swenson Jr., *The Ethereal Aether. A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments*, University of Texas Press, Austin, 1972.
- [15] W. M. Hicks, *Phil. Mag.* **3** (1902) 9.
- [16] M. Born, *Einstein's Theory of Relativity*, Dover Publ., New York, 1962.
- [17] R. S. Shankland et al., *Rev. Mod. Phys.*, **27** (1955) 167.
- [18] M. A. Handshy, *Am. J. of Phys.* **50** (1982) 987.
- [19] S. Herrmann, et al., *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 150401.
- [20] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Pergamon Press 1959, Chapt. III.
- [21] J. C. H. Fung et al., *J. Fluid Mech.* **236**, 281 (1992).
- [22] A. N. Kolmogorov, *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **30** (1940) 4; English translation in *Proc. R. Soc. A* **434** (1991) 9.

- [23] E. W. Morley and D. C. Miller, *Phil. Mag.* **9** (1905) 680.
- [24] K. K. Illingworth, *Phys. Rev.* **30** (1927) 692.
- [25] H. A. Múnera, *APEIRON* **5** (1998) 37.
- [26] K. R. Sreenivasan, *Rev. Mod. Phys.* **71**, Centenary Volume 1999, S383.
- [27] C. Beck, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 064502 (2007).
- [28] C. Tsallis, *Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics*, Springer, 2009.
- [29] T. Roberts, *An Explanation of Dayton Miller's Anomalous 'Ether Drift' Result*, arXiv:physics/0608238.
- [30] M. von Laue, *Handbuch der Experimentalphysik*, Vol. XVIII (1926) 95.
- [31] H. Thirring, *Zeit. Physik* **35** (1926) 723; *Nature* **118** (1926) 81.
- [32] A. A. Michelson, F. G. Pease and F. Pearson, *Nature*, **123**, (1929) 88
- [33] A. A. Michelson, F. G. Pease and F. Pearson, *J. Opt. Soc. Am.* **18** (1929) 181.
- [34] F. G. Pease, *Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific*, **XLII**, 197 (1930).
- [35] G. Joos, *Ann. d. Physik* **7** (1930) 385.
- [36] G. Joos, *Naturwiss.* **38** (1931) 784.
- [37] G. Joos, D. Miller, Letters to the Editor, *Phys. Rev.* **45**, 114 (1934).
- [38] Loyd S. Swenson Jr., *Journ. for the History of Astronomy*, **1**, 56 (1970).
- [39] Per una rassegna, si veda H. Müller et al., *Appl. Phys. B* **77**, 719 (2003).
- [40] T. S. Jaseja, et al., *Phys. Rev.* **133** (1964) A1221.
- [41] S. Herrmann, et al., *Phys.Rev. D* **80**, 105011 (2009).
- [42] Ch. Eisele, A. Newski and S. Schiller, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 090401 (2009).
- [43] H. Müller, *Phys. Rev.* **D71**, 045004 (2005).
- [44] Ch. Eisele et al., *Opt. Comm.* **281**, 1189 (2008).
- [45] R. F. Streater and A. S. Wightman, *PCT, Spin and Statistics, and all that*, W. A. Benjamin, New York 1964.
- [46] Y. B. Zeldovich , *Sov. Phys. Usp.* **11**, 381 (1968).
- [47] S. Weinberg , *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1 (1989).
- [48] R. De Abreu and V. Guerra, *Relativity-Einstein's Lost Frame*, 2005, Extra]muros[Publ.
- [49] J. J. Nassau and P. M. Morse, *Astrophys. Journ.* **65** (1927) 73.

8. Idealizzazione del vuoto e conclusioni

In questa sezione conclusiva, cercheremo di affrontare il problema generale di come una certa descrizione del vuoto si rifletta su quella dei sistemi fisici. Per l'impossibilità di trattare questa questione in modo rigoroso, adotteremo un modello schematico idealizzato. Che una tale trattazione idealizzata sia necessaria, risulta del resto chiaro dalle considerazioni seguenti.

Il vuoto condensato che abbiamo descritto sinora costituisce la base di quello che viene chiamato 'Modello Standard', un quadro teorico che descrive tre delle interazioni fondamentali note (quella forte, quella elettromagnetica e quella debole), unitamente alle particelle elementari ad esse collegate. Il modello ha mostrato un ottimo grado di consistenza con gli esperimenti sino alla massima scala di energia esplorata che, per quanto riguarda gli acceleratori (e calcolandola nel sistema del centro di massa, che ha un significato relativisticamente invariante), corrisponde a quella del Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra e vale approssimativamente $E_{\text{LHC}} \sim 10^{13}$ eV (elettron-Volt). Essa è circa diecimila volte maggiore dell'energia immagazzinata nella massa di un protone ed è tale che, su questa scala, le interazioni elettromagnetiche e deboli mostrano circa la stessa intensità (si parla infatti di interazione *elettrodebole*). Ulteriori informazioni, anche se in condizioni sperimentali meno controllate, si possono ottenere dall'osservazione delle collisioni dei raggi cosmici con gli strati superiori dell'atmosfera. Con i rivelatori attuali, l'energia massima esplorata (sempre nel sistema del centro di massa) è la stessa di LHC a meno di inessenziali fattori numerici. Per le relazioni di indeterminazione di Heisenberg, a questa scala energetica si può anche associare una scala di lunghezza $l_{\text{LHC}} \sim \frac{\hbar c}{E_{\text{LHC}}}$ dove \hbar è la costante di Planck (divisa per 2π) e c la velocità della luce nel vuoto. Essa descrive le dimensioni della regione nella quale, nei processi elementari, si trasferisce un'energia E_{LHC} ed ha un valore $l_{\text{LHC}} \sim 10^{-18}$ cm.

Ora, le dimensioni tipiche degli atomi sono di circa 10^{-8} cm ed estrarre un elettrone da un atomo di idrogeno richiede 13.6 eV. Dunque, non c'è dubbio che, confrontate con questi valori, E_{LHC} rappresenti un'energia estremamente grande e l_{LHC} una lunghezza estremamente piccola. Tuttavia, i fisici teorici si pongono sempre nuove domande. Per esempio, esiste una scala di energia alla quale le interazioni forti potrebbero avere la stessa intensità delle interazioni elettromagnetiche e deboli? Dopo l'unificazione 'elettrodebole', potrebbe questo corrispondere ad una nuova, ipotetica 'grande unificazione'? Ed ancora, partendo da questo, cosa possiamo dire sulla gravità? Potrebbe anch'essa essere unificata con le altre tre interazioni? Dalle risposte a queste domande si fa anche risalire la possibilità di risolvere fondamentali problemi interpretativi legati alle forme 'oscure' di materia ed energia necessarie per dar conto delle attuali osservazioni cosmologiche.

Le risposte che la comunità scientifica ha sinora dato a queste domande ci proiettano

su scale energetiche molto maggiori di E_{LHC} o, equivalentemente, su scale di lunghezza molto minori di l_{LHC} . Una tappa considerata da quasi tutti molto importante corrisponde alla cosiddetta ‘scala di Planck’ con un’energia $E_P \sim 10^{15} E_{\text{LHC}} \sim 10^{28}$ eV e, dunque, una lunghezza $l_P \sim 10^{-15} l_{\text{LHC}} \sim 10^{-33}$ cm. Si noti come, in questa ipotesi, la differenza relativa tra la scala di Planck e quella di LHC sarebbe molto maggiore di quella che separa quest’ultima dalla scala atomica. Addirittura, la scala naturale di localizzazione associata ad un elettrone idealmente isolato (la sua lunghezza d’onda Compton) sarebbe circa 10^{22} volte maggiore della lunghezza di Planck. Per avere un’idea di cosa questo voglia dire, si pensi che il numero 10^{22} corrisponde circa al rapporto tra le dimensioni lineari del sistema solare e quelle di un atomo di idrogeno.

In questa situazione, nella quale la scala di Planck viene considerata teoricamente essenziale (anche se probabilmente sperimentalmente inaccessibile), anche quello che oggi ci appare come il prototipo di un oggetto elementare, l’elettrone, andrebbe visto come un oggetto complesso, cioè dotato di una certa struttura. A maggior ragione, anche altri enti considerati oggi elementari (campo di Higgs, quarks...), che entrano nella nostra descrizione del vuoto, sarebbero solo delle tappe intermedie verso quell’ideale ultimo di elementarità che, dai primi atomisti greci in poi, esiste nel pensiero umano. Tenendo conto di questo, cosa resterebbe della nostra visione attuale? C’è un qualche schema idealizzato del mondo che potrebbe restare valido?

8.1 Il mondo in una visione idealizzata

All’inizio delle sue lezioni di fisica [1] Feynman dice: «Se, in qualche cataclisma, l’intera conoscenza scientifica dovesse andare distrutta, e si potesse salvare un solo concetto da tramandare alle generazioni future, quale affermazione conterebbe il massimo di informazione nel minor numero di parole? Io credo che sia l’ipotesi atomica secondo cui tutte le cose sono fatte di atomi, piccole particelle in moto perpetuo che si respingono a certe distanze e si attraggono quando vengono allontanate. In questo concetto c’è un enorme contenuto di informazione sulla natura, se appena la si considera con un minimo di immaginazione».

Seguendo il suggerimento di Feynman, e proprio perché la concezione dei primi atomisti era una pura creazione dell’intelletto, si potrebbe allora partire da essa. A questo scopo, designeremo Atomi e Vuoto gli enti elementari della loro descrizione. L’uso delle iniziali maiuscole sta ad indicare che Atomi e Vuoto hanno esattamente lo stesso significato che veniva dato loro da Leucippo e Democrito (vedi Cap.4). Cioè, gli Atomi, impenetrabili ed eterni, sono i corpi primi, quelli il cui movimento vorticoso, che Democrito chiama *necessità*, sta alla base di tutto. Il Vuoto, come abbiamo ricordato, va inteso come ‘non-Atomi’ ed, in questo senso, sarebbe ‘non-essere’. Però esiste a tutti gli effetti. Esso ha il significato di spazio non occupato dagli Atomi ed è essenziale perché ci possa essere il loro movimento.

In questa descrizione, la dimensione tipica a degli Atomi va pensata essere infinitesima rispetto ad ogni scala di lunghezza sperimentalmente accessibile in modo che gli Atomi risultino inosservabili. Assumendo proprietà generali di uniformità, introduciamo anche una distanza media d tra gli Atomi nel Vuoto. Pure essa va pensata infinitesima rispetto ad ogni scala di lunghezza sperimentalmente misurabile in modo che anche il Vuoto risulti inaccessibile. Tuttavia, d viene assunto essere molto maggiore di a in modo che il perenne movimento degli Atomi sia limitato il meno possibile.

L'esistenza degli Atomi implica che il Vuoto non possa occupare la totalità dello spazio. Potremmo vedere questo come la conseguenza di una teoria fondamentale per cui lo stato di minima energia *non* è il Vuoto. Da quella visione dei condensati quantistici che abbiamo descritto, siamo anche portati ad assumere che, in questo stato di minima energia, il moto degli Atomi si combina in una gerarchia di strutture intermedie attraverso le quali tutte le loro proprietà individuali vengono progressivamente neutralizzate. Allora, nel limite 'idrodinamico' di scale di lunghezza molto maggiori delle dimensioni degli Atomi, questo stato di minima energia non mostrerebbe alcun carattere specifico (non riuscirebbe ad 'impressionare') finendo così con il risultare impercettibile. Diventa allora comprensibile perché lo si sia sempre chiamato 'vuoto', anche se vuoto non è. Con gli argomenti del Cap. 2, si arriva poi a quella sua rappresentazione intuitiva come fluido neutro e turbolento che abbiamo ricordato.

Detto questo del vuoto, inteso come stato di minima energia, immaginiamo adesso di perturbarlo lievemente dal suo stato di equilibrio. Cosa succede? Paragonando il vuoto ad un fluido turbolento, ci aspettiamo tutta una serie di fenomeni ondosi e vorticosi. Dunque, su una scala di lunghezze molto maggiori di quella degli inosservabili Atomi, onde e vortici diventerebbero il modello per rappresentare le eccitazioni del vuoto, cioè le forme di energia e materia osservabili. In questo schema idealizzato, esse, pur essendo entità discrete, non sarebbero separabili dal mezzo in cui sussistono.

Restando solo agli aspetti più generali, possiamo dire che molte di queste perturbazioni avrebbero vita breve e disperderebbero in fretta la loro energia. Altre, invece, si potrebbero propagare su grandi distanze senza dissiparla e restando ben localizzate. Le perturbazioni di questo tipo, generalmente chiamate *solitoni*, sarebbero allora i candidati naturali per rappresentare le particelle e, più in generale, le forme stabili e localizzate di energia e di materia.

Nonostante questo sia solo un semplice schema mentale, tuttavia rende possibile riconciliare punti di vista sempre considerati radicalmente opposti. Per esempio, Parmenide ed i primi atomisti avrebbero entrambi ragione. Gli atomisti nel dire che esiste il Vuoto (inteso come non-Atomi e dunque non-essere). Parmenide nel considerare tutte le cose che ci appaiono distinte (onde e vortici) come manifestazioni

di un unico *essere*, il fluido che rappresenta il vuoto, visto come natura immutabile che tutto unifica e che non ammette alcuna soluzione di continuità. Inoltre, come nelle filosofie orientali, le cose che ci circondano e che possiamo osservare (onde e vortici) non avrebbero una loro esistenza autonoma ma sarebbero semplici modificazioni di quell'unico elemento comune, il vuoto, dal quale tutte provengono ed in cui tutte, alla fine, confluiscono. Questa possibilità di riconciliare descrizioni fondamentalmente differenti e di comprendere la visione di culture molto diverse dalla nostra suggerisce che il nostro schema idealizzato del mondo contenga alcuni elementi di verità.

8.2 Il vuoto e la relatività

Ci si potrebbe domandare: in una descrizione idrodinamica, nella quale il vuoto viene trattato come un fluido e le forme di energia e materia osservabili come sue eccitazioni (del tipo onde e vortici), che cosa resta degli inosservabili Atomi e del loro incessante moto nell'inosservabile Vuoto? Certamente, una traccia di quella descrizione ultima del mondo sopravviverebbe tramite i valori delle costanti fisiche fondamentali. Per il resto, la relazione tra i due mondi

$$(\text{Vuoto, Atomi}) \rightarrow (\text{vuoto, onde, vortici}) \quad (107)$$

è solo indiretta e richiede modifiche non banali nella descrizione della dinamica e nella simmetria delle leggi fisiche.

Un caso ben noto è quello della propagazione di onde le cui equazioni hanno simmetrie diverse da quelle che regolano il moto dei corpuscoli. A questo proposito, abbiamo già ricordato come, nel modello dell'etere ottocentesco [2], le onde elettromagnetiche descritte dalle equazioni di Maxwell (simmetriche dunque per trasformazioni di Lorentz) venivano interpretate come oscillazioni trasverse di un fluido turbolento incompressibile i cui costituenti seguivano le leggi della fisica classica (simmetriche per trasformazioni di Galileo). Questo approccio intuitivo alle onde elettromagnetiche è stato più recentemente riformulato da Troshkin [3] e, se esteso ad includere una piccola compressibilità del fluido, riesce a fornire anche interessanti analogie con le equazioni linearizzate della relatività generale di Einstein [4].

Un'analoga differenza potrebbe verificarsi anche per quelle entità, i solitoni, che, in questo schema idealizzato, abbiamo indicato come i naturali candidati a rappresentare le particelle. Per illustrare questo aspetto, assumeremo che il perenne moto degli Atomi, per quanto caotico, avvenga però con una ben definita velocità microscopica media che chiamiamo c_{micr} . Per descrivere la dinamica dei solitoni, sceglieremo lo schema più semplice possibile, cioè quello della fisica classica. In questo schema, la deviazione di un corpo dal suo stato di moto richiede l'azione di una forza \mathbf{f} che esprime la variazione temporale del suo momento spaziale $\mathbf{P} = M\mathbf{v}$, detto anche quantità di moto. In questa relazione, M è la massa del corpo (nel

nostro caso del solitone) e \mathbf{v} la sua velocità. Inoltre, la variazione dell'energia E del corpo viene definita dal prodotto scalare tra i vettori \mathbf{v} e \mathbf{f} . Questo si formalizza nella semplice relazione

$$\frac{dE}{dt} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{f} = \mathbf{v} \cdot \frac{d(M\mathbf{v})}{dt} \quad (108)$$

L'Eq. (108) viene di solito risolta assumendo che la massa M abbia un valore M_0 indipendente dalla velocità del corpo e si ottiene $E = \frac{1}{2}M_0v^2$, con $v^2 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$.

Consideriamo, invece, che M sia la massa di un solitone, cioè di una configurazione localizzata di un fluido i cui costituenti più elementari sono in uno stato di perenne agitazione con velocità $c_{\text{micr}} \equiv c$. In questo caso, potrebbe diventare naturale cercare soluzioni in cui M dipende da \mathbf{v} o meglio dal suo modulo, cioè da v^2 , per il tramite del rapporto v^2/c^2 (si veda ad esempio Feynman [5]). Si ottiene allora la relazione funzionale

$$dE = \frac{1}{2}Mdv^2 + v^2dM \quad (109)$$

che esprime le variazioni dell'energia in termini delle variazioni combinate di v^2 e di M . Così, ponendo $E \equiv c^2M(v^2/c^2)$, si ha $\frac{dE}{dv^2} = c^2\frac{dM}{dv^2}$ e l' Eq.(109) diventa

$$\frac{dM}{dv^2} (c^2 - v^2) = \frac{1}{2}M \quad (110)$$

Questa semplice equazione differenziale può essere integrata con la condizione al contorno $M(v^2 = 0) = M_0$ e si ottiene

$$E = Mc^2 = \frac{M_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (111)$$

Su questa base, diventa naturale, da un canto, interpretare l'energia M_0c^2 del solitone in quiete come una specie di energia 'cinetica' che nasce dall'inosservabile moto degli Atomi sottostanti; dall'altro, introdurre trasformazioni lineari delle quattro quantità E/c e $\mathbf{P} = M\mathbf{v}$ che preservino l'indipendenza da v della combinazione quadratica $(E/c)^2 - \mathbf{P}^2 = (M_0c)^2$. Queste sono proprio le trasformazioni di Lorentz della relatività che, dunque, potrebbe essere vista come un fenomeno *emergente* nel limite idrodinamico. Cioè come il modo naturale di descrivere il mondo dei solitoni [6, 7, 8, 9] (e quello di onde che si propagassero con velocità $c_\gamma = c$) da parte di osservatori in moto traslatorio uniforme.

Per apprezzare a pieno questo aspetto, si deve prima tener conto che, sulla scala accessibile ai regoli e agli orologi fisici degli osservatori, il microscopico moto degli Atomi nel Vuoto appare come 'congelato'. Congelato nella struttura del fluido che rappresenta il vuoto e che fornisce la materia per le onde e i solitoni. Dunque, non c'è nulla di sbagliato nel fatto che il moto degli Atomi avvenga con una velocità media $c_{\text{micr}} = c$. Essa rappresenta una velocità limite *solo per i solitoni*, quelle configurazioni che, in un modello idrodinamico del vuoto, rappresentano la materia

localizzata ordinaria. Quindi, per gli inosservabili Atomi che si muovono nel Vuoto, il modo più semplice di risolvere l'Eq.(108) sarebbe quella di usare le solite forme non-relativistiche $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$ e $E = \frac{1}{2}mv^2$ nella quale m indica la massa degli Atomi e non dipende dalla loro velocità.

Si noti che i due tipi di soluzione derivano dalla *stessa* equazione (108) della fisica classica. C'è dunque una sostanziale differenza con l'usuale punto di vista secondo cui la fisica classica sarebbe solo una definita approssimazione della fisica relativistica nel limite di velocità molto minori di c . Questo introduce una certa forma di *circolarità* la cui giustificazione ultima va ricercata nella visione del vuoto. E' interessante che qualcosa di simile potrebbe anche accadere con la fisica quantistica. Cerchiamo di illustrarne il perché.

8.3 Il vuoto e la fisica quantistica

Nell'usuale formulazione della fisica quantistica, la fisica classica si riottiene come limite macroscopico, cioè quando la costante di Planck diventa molto più piccola della corrispondente scala associata al sistema fisico in esame. C'è però un punto di vista alternativo, seppur minoritario, secondo il quale il comportamento quantistico, invece che essere postulato in maniera assiomatica, potrebbe essere in qualche modo ricondotto a quello classico se si adottasse una certa visione del vuoto. Una vaga analogia, che comunque può essere utile per capire l'idea di fondo, è quella del moto Browniano. Questo è quel tipo di moto irregolare cui vanno soggette piccole particelle in un liquido a causa delle continue collisioni con le molecole che lo compongono. La presenza di un opportuno mezzo caotico sottostante potrebbe, in linea di principio, modificare la dinamica classica dei microsistemi dando luogo a quel comportamento quantistico che osserviamo.

Oppure, nel vuoto potrebbe esistere un campo elettromagnetico classico, indipendente da ogni sorgente localizzata, che fluttua perennemente intorno ad un opportuno stato stazionario il cui spettro di frequenze è caratterizzato dalla costante di Planck. Anch'esso potrebbe modificare la dinamica dei microsistemi. Per esempio, la stabilità degli atomi, che viene considerata impossibile classicamente, potrebbe corrispondere ad un equilibrio dinamico tra l'energia emessa dagli elettroni nel loro moto orbitale intorno al nucleo e quella da essi assorbita da questo campo fluttuante. Si noti come, in entrambe le analogie, il vuoto svolgerebbe un ruolo attivo. Dunque, se anziché lasciarlo nascosto sullo sfondo lo facessimo rientrare a pieno titolo nella descrizione, il comportamento quantistico potrebbe, sempre in linea di principio, essere ricondotto a quello classico in un mezzo opportuno. Da qui, nuovamente, il carattere circolare delle descrizioni della natura.

Questo punto di vista alternativo risale ai primordi della fisica quantistica. Precisamente alla formulazione idrodinamica di Madelung [10] ed all'analogia notata dallo stesso Schrödinger [11] tra l'equazione che oggi porta il suo nome ed un processo di

diffusione. A partire da allora, questa idea generale di un etere ‘sub-quantico’, di natura irregolare e che esiste al di sotto della superficie delle cose, è stata condivisa da un gran numero di autori (si vedano ad esempio le referenze [12]-[21]) ed ha prodotto varie formulazioni che spesso differiscono in modo non banale e che possono essere definite come modelli ‘stocastici’ o ‘a variabili nascoste’ della meccanica quantistica. Nonostante, in molti casi, le previsioni di questi modelli possano essere fatte coincidere con quelle della teoria quantistica standard, difficilmente tali formulazioni possono essere considerate delle vere *derivazioni* (cioè formali e complete) della fisica quantistica dalla fisica classica. Né si può dire che da esse si ottenga sempre lo stesso potere computazionale della teoria standard.

Tuttavia, questa non completa equivalenza non vuol dire che tali formulazioni alternative siano inutili. Esse infatti danno una visione complementare permettendo di porsi delle domande che altrimenti non avrebbero risposta nell’usuale teoria quantistica, come l’origine della stabilità degli atomi, della quantizzazione, dell’indeterminazione, e così via [22]-[27]. In questo senso, esse forniscono un punto di vista alternativo che, pur non servendo a calcolare meglio i livelli energetici degli atomi o le probabilità di decadimento delle particelle, potrebbe orientare la nostra intuizione verso aspetti più profondi della realtà, altrimenti inaccessibili.

Recentemente, c’è stato molto interesse per una di queste descrizioni alternative: quella dell’*onda-pilota* di de Broglie - Bohm [28, 29, 30]. Nella sua formulazione più semplice, vengono introdotte due entità distinte: un corpuscolo materiale localizzabile ed un’onda che lo guida, la funzione d’onda Ψ che compare nell’equazione di Schrödinger. L’onda ha un diretto significato fisico ed andrebbe interpretata come una reale eccitazione di un etere sottostante, cioè del vuoto. Essa viene provocata dal corpuscolo ma, nello stesso tempo, lo ‘pilota’ nel senso che ne determina il momento spaziale \mathbf{P} tramite la relazione $\mathbf{P} = -\hbar\nabla S$, dove S è la fase di $\Psi = |\Psi|e^{iS}$. Il comportamento quantistico del corpuscolo può allora essere visto come conseguenza di questo effetto di guida. Si noti come, a differenza dell’interpretazione usuale, il corpuscolo possiederebbe insieme una definita localizzazione ed un definito momento spaziale preservando così quell’intuitiva ‘ontologia’ dei sistemi fisici che è propria di una descrizione classica.

Il motivo di questo rinnovato interesse è che, in alcuni recenti esperimenti eseguiti all’interno di fluidi classici [31]-[34], si possono individuare gli elementi cruciali del modello appena descritto. Infatti, si riesce ad ottenere che una ‘particella’ (gocciolina di liquido) venga ‘guidata’ dalle onde che essa stessa ha generato (le onde di Faraday che si propagano nel liquido). Questo produce fenomeni analoghi a quelli caratteristici della fisica quantistica, come orbite quantizzate, diffrazione di particelle singole da una doppia fenditura, effetto tunnel attraverso una barriera... E questo avverrebbe in sistemi puramente classici, in sistemi cioè i cui elementi strutturali (in questo caso la goccia del liquido e le onde di Faraday) sono descritti da equazioni classiche.

Pur se le condizioni sperimentali sono molto particolari, anche il più rigoroso difensore della visione tradizionale dovrebbe, quanto meno, riconoscere in queste evidenze un'interessante forma di circolarità. In questa prospettiva, l'attenzione si sposterebbe dalla domanda su quale sia la descrizione più fondamentale verso un'ideale di conoscenza per cui descrizioni differenti, che hanno comunque ognuna un grande contenuto di verità, finiscono con il completarsi a vicenda aumentando il nostro grado complessivo di comprensione. In questa chiave di lettura, alla luce dei recenti esperimenti [31]-[34], il modello dell'onda-pilota giocherebbe un ruolo importante.

Nello schema dell'onda-pilota, le eccitazioni del vuoto, oltre ai solitoni, contengono quindi anche particolari onde che li guidano. Matematicamente esse corrispondono alle soluzioni dell'equazione di Schrödinger e, dunque, a differenza dei solitoni che possono restare ben localizzati su grandi distanze, hanno la tendenza ad allargarsi ed a diffondere il loro contenuto di informazione su regioni via via più grandi. Tuttavia, per quanto deboli, ci si devono aspettare contributi al campo d'onda da regioni lontane nello spazio e nel tempo che esistono indipendentemente da ogni dinamica 'locale'. Questa complessa struttura ha portato Bohm ad ipotizzare l'esistenza di una 'trama', una forma di memoria, che egli ha chiamato ordine *implicito* [35]. Esso non è facilmente osservabile, a differenza del più convenzionale ordine *esplicito* che, invece, serve per distinguere gli oggetti sulla base della loro localizzazione spaziale. La differenza tra i due tipi di ordine si estende a molteplici aspetti, per esempio anche all'applicabilità della nozione di causa-effetto, con potenziali implicazioni che trascendono il mero ambito della fisica (si veda per esempio [36, 37]).

Vogliamo infine ricordare che, estendendo il modello dell'onda-pilota in modo da renderlo simmetrico per trasformazioni di Lorentz, Bohm e Hiley discutono (vedi Cap.12 e 14 di ref. [38]) di come si finisca per adottare un'interpretazione *Lorentziana* degli effetti relativistici. In altre parole, il mezzo in cui esistono i campi d'onda (cioè il vuoto) avrebbe il ruolo di sistema di riferimento privilegiato. Questa è proprio l'interpretazione che noi pensiamo si possa dedurre dagli esperimenti di ether-drift e, dunque, una conferma sperimentale della nostra analisi darebbe ulteriore interesse a questa interpretazione alternativa della fisica quantistica.

8.4 Conclusioni

Diceva Confucio che quando le cose non sono chiamate con il loro giusto nome, e dunque il linguaggio non si conforma alla verità, ne deriva tutta una serie di conseguenze negative per l'uomo e la società: «gli affari non possono essere portati a termine con successo...le proprietà e la musica non fioriscono... le punizioni non vengono inflitte con giustizia...». Il risultato è che, alla fine, «la gente non sa più come muovere le mani ed i piedi». Oggi, ognuno di noi può convincersi di quanto Confucio avesse ragione. In questo contesto, un esempio che balza subito

agli occhi è quello del vuoto che viene chiamato 'vuoto' ma che, come abbiamo cercato di illustrare, 'vuoto' non è. Forse anche per questo, nella storia del pensiero occidentale, da Cartesio in poi, si era adottato un nome diverso, quello di 'etere'.

Il ruolo dell'etere era fondamentale nella fisica dell'Ottocento, dove veniva identificato come mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche ed era il fondamento di una vera e propria teoria, detta appunto 'teoria dell'etere'. Se volessimo riassumere le motivazioni di quella visione, potremmo citare, dai 'Principi della Meccanica', quel passo dove Hertz ricorda che «se cerchiamo di comprendere il moto dei corpi intorno a noi facendo attenzione solo a quello che si può direttamente osservare, in generale falliremo. Ci siamo presto resi conto, infatti, che la totalità delle cose visibili e tangibili non forma un universo conforme all'idea di legge fisica, nel senso che dalle stesse condizioni debbano seguire gli stessi risultati».

Abbiamo anche visto che il concetto dell'etere ha attraversato una profonda crisi con l'avvento della relatività speciale di Einstein nel 1905 e la sua visione di uno spazio-tempo banalmente vuoto. Abbiamo, però, anche visto che, dopo il 1916, con il passaggio dalla relatività speciale alla relatività generale, Einstein aveva modificato la sua posizione iniziale arrivando a concepire gli effetti di curvatura in un campo gravitazionale come deformazioni di un mezzo elastico e dunque il vuoto come una forma di etere, da lui chiamato 'etere sublimato'. Per vari motivi (alcuni dei quali hanno ben poco a che fare con la fisica), non sviluppò questa sua nuova concezione. Anche per questo, l'idea dell'etere finì nel dimenticatoio per una larga parte del Novecento.

Nella fisica di oggi, però, l'idea del vuoto è quella dello stato di minima energia e, come tale, va pensato contenere quei condensati quantistici di cui abbiamo parlato. Essi hanno caratteristiche alquanto diverse dall'etere di fine Ottocento (non servono a descrivere la propagazione delle onde elettromagnetiche), e vengono invece introdotti per spiegare l'origine della massa ed altri fenomeni essenziali come la non-osservabilità di quarks isolati. Tuttavia, riempiendo uniformemente lo spazio e facendo da sfondo ai processi fisici osservabili, possono essere considerati una nuova forma di etere, seppure quantistico. Qualcosa di simile, accade anche con un altro concetto importante che non abbiamo discusso. Si tratta di quelle forme 'oscuri' di materia ed energia, che non emettono luce ma dovrebbero interagire gravitazionalmente, che vengono oggi invocate per spiegare osservazioni cosmologiche altrimenti incomprensibili.

Vediamo dunque che periodicamente si modifica la concezione di ciò che comunemente chiamiamo vuoto. Come sottolineato da Fermi, resta però sempre l'idea che esso giochi un ruolo fondamentale. Questa idea generale per cui la comprensione ultima delle cose che vediamo dipende da qualcosa che *non* vediamo esprime una concezione filosofica ed è anche alla base di tutte le religioni. Per questo, la riflessione sul vuoto trascende il mero ambito della fisica ed acquista un generale interesse

suggerendo che l'indagine fisica possa alla fine avvicinarsi ad altre problematiche ed altre forme di conoscenza.

La nostra convinzione è che una tappa importante in questa direzione si potrebbe realizzare con quella nuova generazione di esperimenti di ether-drift che abbiamo proposto. La motivazione di base è che la condensazione dei quanti elementari della teoria è un processo macroscopico che introduce implicitamente un certo sistema di riferimento Σ , quello nel quale viene a determinarsi globalmente un momento spaziale uguale a *zero*. Questo sistema caratterizza la versione *fisicamente realizzata* di relatività e potrebbe essere in qualche modo 'privilegiato'. Cioè, lo stato fisico del vuoto condensato, per un osservatore in quiete in Σ , potrebbe non risultare esattamente identico a quello visto da ogni altro osservatore, per esempio da un osservatore posto nel laboratorio terrestre. Ora, nella teoria quantistica, questa identità dipende da una quantità poco capita, l'energia del vuoto, che dovrebbe anch'essa avere valore *zero*. Poiché solo supersimmetrie *esatte* (che non sono fisicamente realizzate) garantiscono in modo naturale tale risultato, questo aspetto rappresenta un problema aperto che, allo stato attuale, non ha alcuna ovvia soluzione. Senza motivazioni teoriche valide, quindi, il vuoto, o meglio il moto rispetto ad esso, potrebbe diventare osservabile.

La riprova di questo è che, nella nostra analisi, i piccoli residui irregolari osservati negli esperimenti del passato diventano altrettante indicazioni per quella stessa velocità della Terra di 370 km/s che oggi si ottiene dalle osservazioni astronomiche del fondo di radiazione cosmica (CMB). Diventa dunque comprensibile il nostro punto di vista: la differenza con gli odierni esperimenti di interferometria laser non è dovuta al progresso tecnologico ma al fatto che questi ultimi vengono eseguiti in *condizioni fisiche diverse*, per le quali cioè ogni effetto dovuto al moto dell'osservatore diventa invisibile. Invece, apportando a tali apparati le modifiche che abbiamo suggerito alla fine del Cap. 7, il vuoto si dovrebbe, per così dire, poter 'toccare con mano', con implicazioni sostanziali sul nostro modo di concepire la realtà.

References

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley Publ. Co. 1963, Vol.I, Sect. 1.2.
- [2] E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Dover Publications, Inc. New York 1989.
- [3] O. V. Troshkin, *Physica* **A168** (1990) 881.
- [4] H. E. Puthoff, *Linearized turbulent flow as an analog model for linearized General Relativity*, arXiv:0808.3404 [physics.gen-ph].
- [5] R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley Publ. Co. 1963, Vol.I, Sect. 15.9.
- [6] C. F. Frank, *Proc. Phys. Soc. A* **62** (1949) 131.
- [7] J. D. Eshelby, *Proc. Phys. Soc. A* **62** (1949) 307.
- [8] H. Gunther, *Phys. Stat. Sol.* **149** (1988) 104.
- [9] A. Unzicker, *What can Physics learn from Continuum Mechanics?*, arXiv:gr-qc/0011064.
- [10] E. Madelung, *Zeit. f. Phys.* **40** (1927) 322.
- [11] E. Schrödinger, *Sitz. Preuss. Akad. Wissen. Phys. Math. Klass.* 144 (1931)
- [12] R. Fürth, *Zeit. f. Phys.* **81** (1933) 143.
- [13] T. Takabayasi, *Progr. Theor. Phys.* **8** (1952) 143.
- [14] D. Bohm and J. P. Vigier, *Phys. Rev.* **96** (1954) 208.
- [15] E. Nelson, *Phys. Rev.* **150** (1966) 1079.
- [16] E. Nelson, *Quantum Fluctuations*, Princeton University Press 1985.
- [17] F. Guerra, *Phys. Rep.* **77** (1981) 263.
- [18] F. Calogero, *Phys. Lett. A* **228** (1997) 335.
- [19] M. Roncadelli, *Random Path Quantization*, in *The Foundations of Quantum Mechanics - Historical Analysis and Open Questions*, C. Garola and A. Rossi Eds., Springer Science + Business Media, 1995.
- [20] L. Fritsche and M. Haugk, *Stochastic Foundations of Quantum Mechanics and the Origin of Particle Spin*, arXiv:0912.3442 [physics.gen-ph].
- [21] P. Holland, *Found. Phys.* **45** (2015) 134.

- [22] T. W. Marshall, Proc. R. Soc. A **276** (1963) 475.
- [23] T. H. Boyer, Phys. Rev. D **11** (1975) 809.
- [24] L. de la Peña and A. M. Cetto, *The Quantum Dice - An Introduction to Stochastic Electrodynamics*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht 1996.
- [25] H. E. Puthoff, Phys. Rev. D **35** (1987) 3266.
- [26] D. C. Cole and Y. Zou, Phys. Lett. A **317** (2003) 14.
- [27] L. de la Peña and A. M. Cetto, *Contribution from stochastic electrodynamics to the understanding of quantum mechanics*, arXiv:quant-ph/0501011.
- [28] L. de Broglie, *Ondes et mouvements*, Gautier-Villars, Paris 1926.
- [29] D. Bohm, Phys. Rev. **85** (1952) 166; *ibidem*, **85** (1952) 180.
- [30] P. R. Holland, *The Quantum Theory of Motion: an Account of the De Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press 1993.
- [31] Y. Couder and E. Fort, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 15101.
- [32] A. Eddi, E. Fort, F. Moisy and Y. Couder, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 240401.
- [33] E. Fort, A. Eddi, A. Boudaoud, J. Moukhtar and Y. Couder, Proc. Nat. Acad. Sci. **107** (2010) 17515.
- [34] J. W. M. Bush, Annu. Rev. Fluid Mech. **47** (2015) 269.
- [35] D. Bohm, *Wholeness and the implicate order*, Routledge, Taylor and Francis Group, London and New York 1980.
- [36] I. Licata, *Osservando la Sfinge. La realtà virtuale della fisica quantistica*, Di Renzo Editore, Roma 1992.
- [37] E. Laszlo, *Alle radici dell'universo*, Sterling & Kupfer, Milano 1993.
- [38] D. Bohm e B.J. Hiley, *The Undivided Universe*, Routledge, Taylor and Francis Group, London and New York 1993.

Indice dei nomi

- Anassagora 46, 51-53, 54, 69.
 Anassimandro 12, 33, 40, 41-42, 44, 48,
 52, 54, 68, 69.
 Anassimene 40, 43, 45.
 Antistene 40, 43, 45.
 Aristotele 19, 40, 49, 53, 54, 55, 57, 69,
 71, 83-85.

 Bell J. S. 99.
 Bentley R. 88.
 Bohm D. 33, 169, 170.
 Bohr N. 32, 33.
 Born M. 106, 117.
 Bradley J. 97.
 Brout R. 15.
 Buddha 34, 63-68.
 Burnet J. 46.

 Capra F. 33, 58.
 Cartesio R. 19, 81, 85-87.
 Clemente Alessandrino 44.
 Colli G. 37.
 Confucio 58, 60, 63, 170.

 de Abreu R. 157.
 Debye P. 106.
 de Broglie L. 169.
 Demetrio 39, 53.
 Democrito 39, 47, 49, 53-55, 164.
 Derrida J. 71.
 de Santillana G. 47.
 Diogene Laerzio 39, 44, 53, 54.
 Dirac P. A. M. 20.

 Eddington A. 106.
 Ehrenfest P. 102.
 Einstein A. 12, 20, 26, 28, 29, 96, 100-107,
 146, 171.
 Empedocle, 50-51, 54, 60, 69.
 Englert F. 15.
 Epicuro 55.
 Eraclito 20, 37, 39, 44-45, 47, 48, 58, 60,
 61, 69, 81.
 Esiodo 12, 34, 42.

 Faraday M. 96, 97.
 Feynman R. P. 22, 23, 164, 167.
 Fermi E. 11, 37, 57, 171.
 Filolao 49, 50.
 Fitzgerald G. 20, 26, 99.
 Fox R. 113, 156.

 Gadamer H. G. 47.
 Galilei G. 20, 81, 97.
 Garfield J. 67, 68.
 Giamblico 39.
 Gironi F. 67.
 Gomperz T. 63.
 Guerra V. 157.

 Hedrick E. R. 109.
 Heidegger M. 38, 39.
 Heisenberg W. 34, 81.
 Hertz H. 171.
 Hicks W. 116-118, 121.
 Higgs P. 15.
 Hiley B. J. 170.
 Hume D. 90.
 Huygens C. 89.

 Illingworth K. K. 127-133.
 Infeld L. 107.

 Jammer M. 54.
 Jaseja T. S. 149.
 Jaspers K. 38, 57, 68.
 Joos G. 138-145, 149.
 Jung C. G. 33.

 Kant I. 81, 87, 89-92.
 Keplero G. 87.
 Kennedy R. 109, 127.
 Kostro L. 72, 103, 104.

 Langevin P. 106.
 Lao-Tzu 34, 58-60, 63, 69, 70.
 Laplace P. S. 87.
 Larmor J. 20, 26, 99, 106.
 Lenard P. 104-107.
 Leucippo 47, 49, 53-55, 164.

- Levi-Civita T. 106.
 Lorentz H. A. 13,20, 27, 29,99, 101,
 104,105,106,109, 146.
 Mach E. 104.
 Madelung E. 168.
 Mather J. C. 13.
 Mathieu V. 91.
 Maxwell J. C. 15, 95-97, 109.
 Melisso di Samo 46, 48-49.
 Michelson A. A. 28, 29, 30,98, 99, 109,
 112,114-122, 126, 135-138.
 Miller D. 110, 111, 112, 113, 115, 116,
 121, 122, 128-135, 138.
 Mondolfo R. 42, 48, 52.
 Morley E. W. 27, 99, 100, 114-122, 126.
 Münner H. 129, 133.
 Nagarjuna 66-68.
 Needham J. 60, 61.
 Newton I. 58, 81, 87-89, 96, 98.
 Nernst W. 106.
 Nietzsche F. 38, 39, 44.
 Ostwald W. 104.
 Parmenide 12, 45-47, 69, 70, 81, 164.
 Pauli W. 33, 34, 103.
 Pearson F. 135-138.
 Pease F. G. 135-138.
 Pitagora 39, 48-49.
 Planck M. 106.
 Platone 12, 39, 47, 58, 59, 63, 70, 71, 72,
 81-83.
 Poincaré H. 20, 26, 100, 101.
 Popper K. 47.
 Porfirio 39.
 Priest G. 67, 68.
 Proclo 39.
 Reale G. 45, 46.
 Ricoeur P. 40.
 Riemann B. 105.
 Rovelli C. 83, 85.
 Russo L. 81.
 S. Agostino 73.
 Schrödinger E. 33, 37, 43, 47, 168.
 Senofane 53.
 Severino E. 40, 46.
 Shamir J. 113, 156.
 Shankland R. 119, 133-136.
 Shantena Sabbadini A. 60.
 Simplicio 53.
 Smoot G. F. 13.
 Solone 39.
 Sommerfeld A. 105, 106.
 Stark J. 107.
 Stewart B. 96.
 Tait P. G. 96.
 Talete 38, 40.
 't Hooft G. 17.
 Tonelli A. 45.
 Troshkin O. V. 166.
 Volpi F. 53.
 Voltaire 87.
 von Laue M. 102, 106,134,135.
 von Weiszäcker C. 81, 82, 87.
 Weyl H. 22, 105, 106, 107.
 Wilczek F. 21.
 Wilhelm R. 60.
 Williams P. 67.
 Wing-tsit Chan 60.
 Zeller E. 72.
 Zenone 53.

AREE SCIENTIFICO–DISCIPLINARI

AREA 01 – Scienze matematiche e informatiche

AREA 02 – **Scienze fisiche**

AREA 03 – Scienze chimiche

AREA 04 – Scienze della terra

AREA 05 – Scienze biologiche

AREA 06 – Scienze mediche

AREA 07 – Scienze agrarie e veterinarie

AREA 08 – Ingegneria civile e architettura

AREA 09 – Ingegneria industriale e dell'informazione

AREA 10 – Scienze dell'antichità, filologico–letterarie e storico–artistiche

AREA 11 – Scienze storiche, filosofiche, pedagogiche e psicologiche

AREA 12 – Scienze giuridiche

AREA 13 – Scienze economiche e statistiche

AREA 14 – Scienze politiche e sociali

Il catalogo delle pubblicazioni di Aracne editrice è su

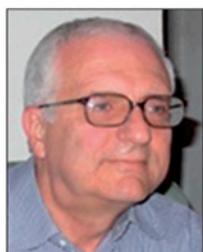
www.aracneeditrice.it

Compilato il July 28, 2015, ore 09:59
con il sistema tipografico \LaTeX 2 ϵ

Finito di stampare nel mese di agosto del 2015
dalla tipografia «System Graphic S.r.l.»
00134 Roma – via di Torre Sant’Anastasia, 61
per conto della «Aracne editrice int.le S.r.l.» di Ariccia (RM)

Il vuoto

Per la fisica moderna, il vuoto non è il puro “nulla”, bensì un substrato elusivo, sorgente e termine ultimo di ogni forma di energia e di materia. Questa visione, se da un lato presenta affascinanti analogie con concetti-chiave di epoche e culture diverse, dall'altro porta a rivalutare l'idea di “etere” mettendo in dubbio aspetti considerati oggi definitivamente acquisiti. Per esempio, rianalizzando i piccoli residui, sempre trascurati, di quegli storici esperimenti di ottica diretti ad osservare il moto della Terra nell'etere, si arriva ad identificare una velocità (370 km/s) che coincide con quella ottenuta per il nostro pianeta dal satellite COBE studiando la radiazione cosmica di fondo. Questo accordo sorprendente, se confermato con nuovi e più accurati esperimenti, trascenderebbe il puro ambito della fisica, arrivando a modificare la nostra stessa percezione della realtà.



Maurizio Consoli, dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), è stato direttore della sezione INFN di Catania e membro del consiglio direttivo dell'Istituto. Il suo interesse principale è rivolto alla fisica delle particelle elementari, in particolare ai test di precisione delle interazioni elettrodeboli e alla struttura del vuoto della teoria. Ulteriori informazioni sull'autore sono disponibili sul sito web <http://www.ct.infn.it/home/consoli/>.

Alessandro Pluchino, fisico teorico e docente presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Catania, si occupa principalmente di meccanica statistica e di modelli matematici e computazionali dei sistemi complessi. Recentemente le sue ricerche si sono concentrate sul ruolo delle strategie casuali nei sistemi socioeconomici e su modelli della struttura del vuoto come etere turbolento. Ulteriori informazioni sull'autore sono disponibili sul sito web <http://www.dfa.unict.it/home/pluchino/>.



xx,00 euro

ISBN 978-88-548-8888-8



9 788854 821217