

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](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

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

ISBN 978-88-548-8787-9

*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: ottobre 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 Agodi<sup>1</sup>, Maggio 2015*

---

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



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Il vuoto nella fisica di oggi</b>	<b>15</b>
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
<b>3</b>	<b>L'idea dell'ether-drift e le sue implicazioni</b>	<b>27</b>
3.1	L'idea di rivelare l'ether-drift . . . . .	28
3.2	Implicazioni del rivelare l'ether-drift . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Antiche concezioni della natura</b>	<b>37</b>
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
<b>5</b>	<b>Dalla <i>chora</i> di Platone all'etere di Kant</b>	<b>81</b>
5.1	Platone . . . . .	81
5.2	Aristotele . . . . .	83
5.3	Cartesio . . . . .	85
5.4	Newton . . . . .	87
5.5	Kant . . . . .	89
<b>6</b>	<b>L'etere ottocentesco e la nascita della relatività</b>	<b>95</b>
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

<b>7</b>	<b>Esperimenti di ether-drift: una visione moderna</b>	<b>109</b>
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
<b>8</b>	<b>Idealizzazione del vuoto e conclusioni</b>	<b>163</b>
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  $\Sigma$ , 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  $\Sigma$ , 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

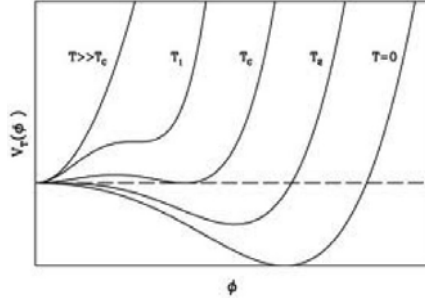
Per parlare del vuoto, cominciamo pensando ad una cosa molto semplice, una scatola ritrovata in soffitta. Essa contiene molti oggetti di natura diversa che vi avevamo riposto negli anni, vecchie chiavi, monete, fotografie ... Selezionando i vari oggetti secondo il loro tipo, possiamo progressivamente 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.



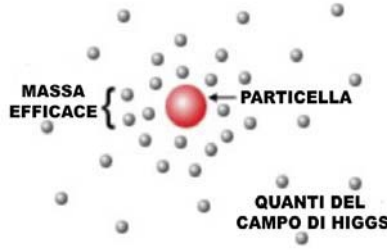
**Figure 1:** *Variation dell'energia in funzione del valor medio del campo per diversi valori della temperatura. La situazione di oggi dovrebbe corrispondere ad una temperatura appena superiore allo zero assoluto. La figura è presa dalla ref.[3].*

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  $\phi$  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  $\Sigma$ , il fenomeno della condensazione può essere ben approssimato come avvenire tutto nel modo di momento nullo  $\mathbf{k} = 0$ , per la loro densità media

$\rho_\Sigma$  in un certo volume  $\Omega_\Sigma$  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  $\Omega$ ? 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  $\Omega \sim 10^{-24}$  cm<sup>3</sup> o in quello nucleare  $\Omega \sim 10^{-39}$  cm<sup>3</sup>. 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.