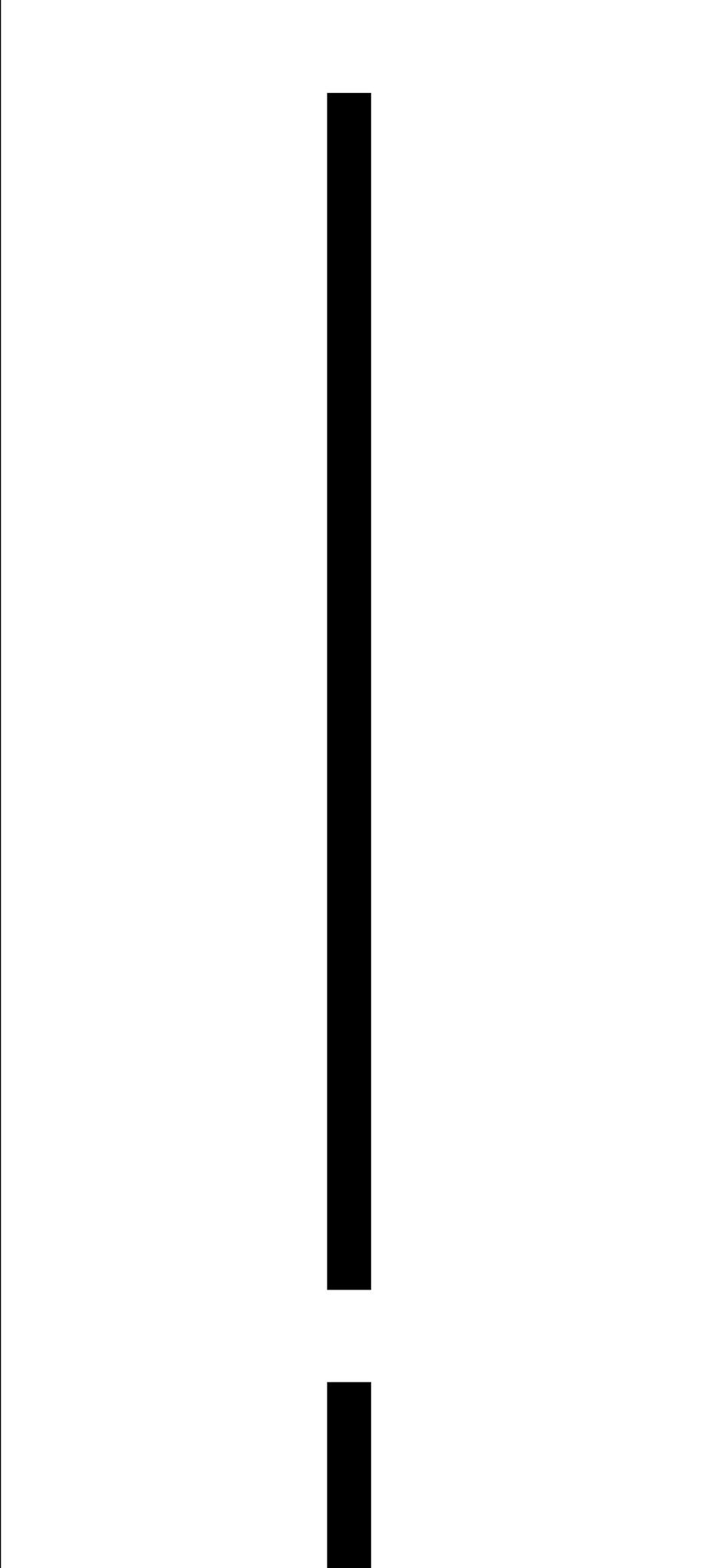
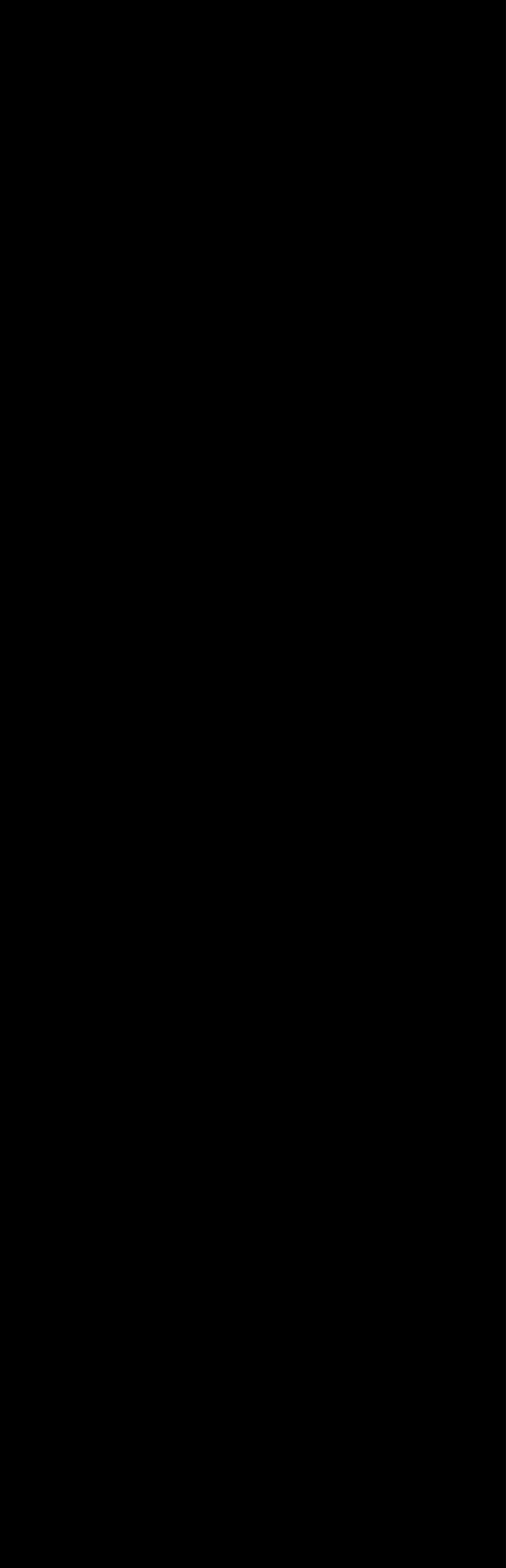


[vuoto]

anno 19 numero 37 / 10.24

**asimmetrie**

rivista semestrale dell'Istituto  
Nazionale di Fisica Nucleare



# asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

Si racconta che, quando AdA – il primo collisore elettrone-positrone ideato da Bruno Touschek e realizzato nei Laboratori Nazionali di Frascati all'inizio degli anni '60 – venne trasferito con un camion al laboratorio di Orsay a Parigi, il funzionario francese alla dogana di Modane chiese sospettoso cosa ci fosse dentro quella strana ciambella e gli venne risposto: "Non c'è nulla, proprio nulla". La risposta era appropriata perché all'interno di AdA era stato creato un "vuoto" per l'epoca molto spinto (pari a una pressione di  $1,3 \times 10^{-12}$  atm), che venne mantenuto durante il trasporto (naturalmente il doganiere non la considerò soddisfacente e fu necessario l'intervento del Ministero dell'Interno francese per convincerlo a lasciarla passare senza aprirla!). In effetti, quella del vuoto è una delle tecnologie "abilitanti" per i collisori, ovvero necessarie per il loro funzionamento, dal momento che un'eccessiva presenza di molecole di gas renderebbe instabili i fasci di particelle circolanti, così come per gli interferometri che misurano le onde gravitazionali, nei quali le interazioni con il gas residuo modificherebbero le figure di interferenza dei laser. Oggi la pressione del gas residuo nel tubo del fascio di LHC è circa mille volte più bassa di quella di AdA, ma ancora vari ordini di grandezza maggiore di quella presente

negli spazi intergalattici, che è comunque diversa da zero. Il vuoto ideale, inteso come totale assenza di particelle, non sembra dunque realizzato in natura ma, almeno concettualmente, era ben definito fino dagli inizi del XX secolo. Con la meccanica quantistica, il vuoto cambia definizione e diventa un oggetto complicato, che può transire da una fase a un'altra, fluttua, contiene particelle virtuali che non sono osservabili ma producono effetti misurabili sui processi fisici, microscopici e macroscopici, e potrebbe essere responsabile di fenomeni astrofisici e cosmologici come l'evaporazione dei buchi neri, l'inflazione, l'energia oscura. Continuate a leggere e scoprirete come un vuoto di questo genere possa facilmente riempire di argomenti affascinanti le pagine di questo numero!

Buona lettura.

**Antonio Zoccoli**  
*presidente INFN*



## asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Registrazione del Tribunale di Roma numero 435/2005 del 8 novembre 2005. Rivista pubblicata da INFN.

Semestrale, anno 19, numero 37, ottobre 2024

## direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

## direttore responsabile

Catia Peduto

## direttore comitato scientifico

Nicolao Fornengo

## comitato scientifico

Daniele Del Re  
Viviana Fafone  
Giuliana Galati  
Sandra Leone  
Alessandro Papa

## redazione

Catia Peduto

## hanno collaborato

Annalisa Allocca, Luca Amendola, Paolo Chiggiato, Cecilia Collà Ruvolo, Sergio Della Sala, Anna Greco, Paolo Lenisa, Matteo Leone, Maria Paola Lombardo, Matteo Massicci, Francesca Mazzotta, Alessandro Nagar, Alice Pisani, Fulvio Ricci, Marco Rossi

## contatti redazione

INFN Ufficio Comunicazione  
Piazza dei Caprettari 70  
I-00186 Roma  
T +39 06 6868162  
comunicazione@presid.infn.it  
www.infn.it

## impaginazione

Hylab

## stampa

Tipografare srl



su carta certificata FSC  
carta interno:  
R4 Next Bulky da 130 gr/m<sup>2</sup>  
carta copertina:  
garda matt art da 300 gr/m<sup>2</sup>

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'INFN, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di ottobre 2024. Tiratura 18.000 copie.

## come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito [www.asimmetrie.it](http://www.asimmetrie.it)

In caso di problemi contattare la redazione all'indirizzo [comunicazione@presid.infn.it](mailto:comunicazione@presid.infn.it)

## sito internet

Asimmetrie 37 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su [www.asimmetrie.it](http://www.asimmetrie.it)

## e-magazine

Asimmetrie è anche disponibile in versione digitale, ricca di ulteriori contenuti multimediali, come app di iOS e Android sull'Apple Store e nel Google Play Store.

## crediti iconografici

Foto copertina © Claudio Rampinini/ Shutterstock // foto p. 4 © Phil/Unsplash // foto a p. 5 © Wikipedia/Eric Gaba; foto b p. 6 © P. Villa-Former Ludovisi Collection-Wikipedia; foto c p. 7 © GRANGER - Historical Picture Archive / Alamy Foto Stock; foto d p. 8 © AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto d p. 9 © Claire Lamman/DESI // fig. p. 10-11 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 12 Science History Images / Alamy Stock Photo; fig. b p. 13 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. c p. 14 © Pfeiffer Vaccum - Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto d p. 15 © Giuseppe Bregliozzi // foto a p. 16 © CERN; foto b p. 17 © S. Schiavon-INFN; foto c p. 18 © CERN // foto a p. 19 © Centre for the Subatomic Structure of Matter (CSSM) and Department of Physics, University of Adelaide, 5005 Australia; fig. b p. 20 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 21 sinistra: © University of British Columbia. Archives, destra: (©Courtesy of the John Templeton Foundation. Photographs by Thomas Duncan Photography // fig. a p. 22 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. b p. 23 © A. Zenesini (Pitaevskii Bec Center; foto c p. 24 sinistra: © B. Devine-Wikipedia, destra: ©Prolineserver-Wikipedia // figg. a, b p. 25-26 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // fig. a p. 27 © NASA/CXC/Rutgers/J.Warren & J.Hughes et al.; fig. b p. 28 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. c p. 29 © ESA // foto a p. 30 © Astronomical Society of the Pacific, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto b p. 31 © Ball Aerospace; fig. c p. 32 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. d p. 33 © NASA // foto a p. 34 © : FAY 2018 / Alamy Foto Stock // fig. p. 36 © Lightspring/ Shutterstock // fig. a p. 37 © iStockPhoto/ libre de droit // foto p. 38 © panyastudio9/Freeipik // foto p. 39 © SDI Productions/iStockPhoto // foto a p. 40 © Centro Integrazioni satelliti Thales Alenia Space Roma; foto b p. 41 © NASA // foto a p. 42 © Virgo-INFN; fig. b p. 43 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 46 © LNF-INFN // fig. p. 48 © A. Nagar/ Asimmetrie-INFN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo ommesso o citato erroneamente alcune fonti.

# as

# 37 / 10.24 [vuoto]

<b>Breve storia del nulla</b> di Paolo Lenisa	4	<b>[as] intersezioni</b> Vuoti di memoria di Sergio Della Sala	36
<b>[as] Gradi di vuoto</b>	10	<b>[as] visioni</b> Turbolente emozioni di Giuliana Galati	38
<b>Sotto-pressione</b> di Fulvio Ricci	12	<b>[as] riflessi</b> Il cielo in una stanza di Matteo Massicci	40
<b>C'è nessuno?</b> di Paolo Chiggiato	16	<b>[as] illuminazioni</b> Tre piccoli esperimenti di Anna Greco	42
<b>Molto rumore per il nulla</b> di Marco Rossi	19	<b>[as] traiettorie</b> Modelli di Francesca Mazzotta	44
<b>Un salto nel vuoto</b> di Maria Paola Lombardo	22	<b>[as] spazi</b> Le mani in pasta di Cecilia Collà Ruvolo	46
<b>La sostenibile pesantezza del nulla</b> di Annalisa Allocca	25	<b>[as] lampi</b>	47
<b>L'assenza del tutto</b> di Luca Amendola	27	<b>[as] segni</b>	48
<b>Bolle spaziali</b> di Alice Pisani	30		
<b>[as] radici</b> La sconfitta dell' <i>horror vacui</i> di Matteo Leone	34		

# Breve storia del nulla

An open white door with a brass handle, leading to an empty room with light wood flooring and white walls. The door is slightly ajar, revealing the interior of the room. The room is completely empty, with no furniture or objects. The lighting is soft and even, highlighting the texture of the wood and the smooth surface of the walls.

Il vuoto dall'antichità alla fisica contemporanea

di Paolo Lenisa

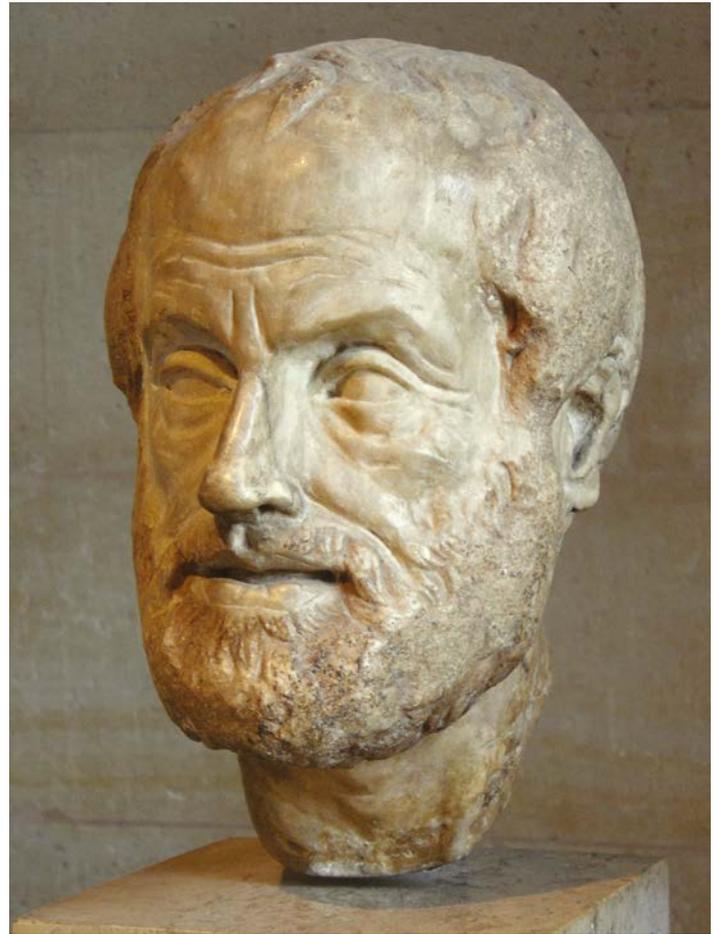
Il “vuoto”, comunemente, viene associato al “nulla”. Se un bicchiere contiene solo aria si dice che è vuoto, ma l’affermazione non è corretta, perché l’aria è materia anch’essa, seppure molto poco densa. Il vuoto costituisce uno dei concetti più complessi e controversi che abbiano interessato il pensiero umano. E la storia del vuoto rappresenta più una serie di fallimenti che di successi. Eppure, ogni fallimento è stato origine di nuove idee e paradigmi di pensiero, l’ultimo dei quali aspetta ancora di essere definito e rappresenta uno dei misteri più stimolanti della fisica contemporanea.

I primi a interrogarsi sul vuoto furono i Greci. Democrito ipotizza che la materia sia composta da atomi (vd. p. 4 in *Asimmetrie* n. 36, ndr). L’ipotesi di una materia localizzata in punti specifici dello spazio e non distribuita in modo uniforme implica l’esistenza del vuoto, inteso come assenza di materia, ovvero assenza di atomi. La presenza di un vuoto infinito rende quindi possibile l’esistenza degli atomi, che si possono muovere all’interno di esso. Dal loro movimento e dai loro scontri deriva la caratteristica della natura di trasformarsi incessantemente, dal loro aggregarsi la formazione di tutte le cose che ci circondano. Secondo Aristotele, invece, la natura “aborrisce il vuoto” di modo che, quando da un luogo viene tolta tutta la materia, producendo appunto il vuoto, immediatamente nuova materia si precipita a colmarlo (questo concetto è noto come “*horror vacui*”, la paura del vuoto, vd. anche p. 34, ndr).

Uno degli argomenti a supporto della non esistenza del vuoto era l’interpretazione che Aristotele dava del movimento. Aristotele era convinto che la velocità di un corpo fosse direttamente proporzionale alla forza applicata e inversamente proporzionale alla densità del mezzo. Una densità nulla, come quella implicata dal vuoto, avrebbe comportato un corpo che si muovesse con velocità infinita, il che risultava impossibile. Aristotele utilizzò il concetto di orrore del vuoto per spiegare come una freccia si mantenga in moto dopo aver lasciato l’arco dalla quale è stata scoccata. Secondo lui per mantenere in moto un oggetto era necessaria l’applicazione costante di una forza. Nella sua concezione, la freccia in movimento crea una sorta di vuoto dietro di sé e l’aria che si precipita a riempirlo spinge la freccia in avanti.

Fu necessario attendere due millenni per interpretare correttamente il moto della freccia senza la necessità di chiamare in causa il vuoto, e fu grazie al principio d’inerzia. Questo concetto fu definitivamente acquisito solamente nel 1600 con i contributi di Galileo Galilei, Cartesio e Isaac Newton. Secondo il principio d’inerzia, non è necessaria l’azione di alcuna forza per mantenere un corpo in movimento, il che significa che un corpo non soggetto a forze procede a velocità costante oppure resta in quiete.

La teoria aristotelica dell’“*horror vacui*” rimase in auge fino al XVII secolo. Molte osservazioni dell’esperienza quotidiana sembravano confermare la teoria, ma esisteva qualche fenomeno al quale la teoria non era in grado di dare risposta. Uno di questi era un fatto noto sin dall’antichità: l’impossibilità di estrarre l’acqua per mezzo di pompe aspiranti da pozzi molto profondi. Tali pompe consistevano di un cilindro, all’interno del quale era libero di scorrere uno stantuffo aderente alle pareti, mosso da una leva. Abbassando la leva, lo stantuffo veniva tirato verso l’alto lasciando uno spazio vuoto nella parte



**a.**  
Ritratto di Aristotele (busto in marmo, Museo del Louvre, Parigi). Copia del I o II sec. a. C. di una scultura in bronzo di Lisippo andata persa.



superiore del cilindro. Siccome si riteneva che la natura avesse orrore del vuoto, immergendo il cilindro in una cisterna piena d'acqua, quest'ultima si sarebbe dovuta innalzare. L'esperienza mostrava che, effettivamente, l'acqua si precipitava nel vuoto creato dallo stantuffo, ma solo fino a quando il dislivello fra l'acqua nella cisterna e la sommità del cilindro era inferiore a 10 metri.

La questione venne risolta solamente nel 1643, da un discepolo di Galilei: il fisico Evangelista Torricelli. L'intuizione determinante per la soluzione dell'enigma fu che l'aria abbia un suo peso. Torricelli capì che l'acqua sale all'interno del tubo dal quale viene aspirata l'aria, non perché va a colmare il vuoto "temuto" dalla natura, ma perché spinta dalla pressione esercitata dal peso dell'aria sovrastante. Trattandosi di stabilire un'equivalenza tra pesi, Torricelli pensò che non fosse

indispensabile usare l'acqua e realizzò il suo esperimento utilizzando il mercurio. Riempì di mercurio un tubo della lunghezza di un metro e della sezione di un centimetro quadrato e rovesciò poi il tubo in una vaschetta piena dello stesso metallo liquido. Il mercurio scese fino a raggiungere l'altezza di circa 75 cm. Questa altezza di mercurio corrispondeva al peso della colonna d'aria dell'atmosfera sovrastante. Nei rimanenti 25 centimetri si era creato così quello che ancora oggi si chiama il "vuoto torricelliano". Torricelli aveva finalmente compreso e dimostrato come il vuoto potesse esistere realmente. Sappiamo ora che non si tratta di un vuoto vero e proprio, perché il vuoto torricelliano contiene una piccola quantità di vapori di mercurio. Quello raggiunto, ad esempio, nei moderni acceleratori di particelle, come nel Large Hadron Collider

**b.**

L'*horror vacui* (terrore del vuoto) è un concetto che ricorre in varie discipline. In fisica e in filosofia indica una teoria ideata da Aristotele che afferma che "la natura rifugge il vuoto" (*natura abhorret a vacuo*) e perciò lo riempie costantemente. Nell'arte definisce l'atto di riempire completamente l'intera superficie di un'opera con dei particolari finemente dettagliati. Analogo uso conosce nella decorazione e nell'arredamento. Un esempio di *horror vacui* nell'arte è il sarcofago "Grande Ludovisi" nella foto, un'opera del III secolo conservata a palazzo Altemps a Roma. In questo caso una scena di battaglia tra romani e barbari è raffigurata come un ammasso di corpi che riempie tutta la superficie.



**C.**  
Evangelista Torricelli con  
un barometro. Incisione  
su legno, del 1881.

(LHC) del CERN di Ginevra, è di oltre 10 ordini di grandezza “più vuoto” (vd. p. 16, ndr)!

La breve storia del vuoto prosegue alla fine del 1800 in relazione alla propagazione della luce. In base alle idee introdotte dal fisico James Clerk Maxwell, si sapeva che la luce era un’onda. Le esperienze quotidiane forniscono alcune nozioni preconcepite sulle onde. Ad esempio, si osserva che per sentire un suono, le onde sonore devono propagarsi attraverso qualcosa (aria o acqua). Senza un materiale attraverso il quale muoversi, non c’è suono da sentire. Per analogia, la fisica nel XIX secolo postulava che per la propagazione delle onde elettromagnetiche, come quelle luminose nello spazio, fosse necessaria la presenza di un mezzo materiale. Mutuando un termine della filosofia greca, questo mezzo venne chiamato “etere luminifero”.

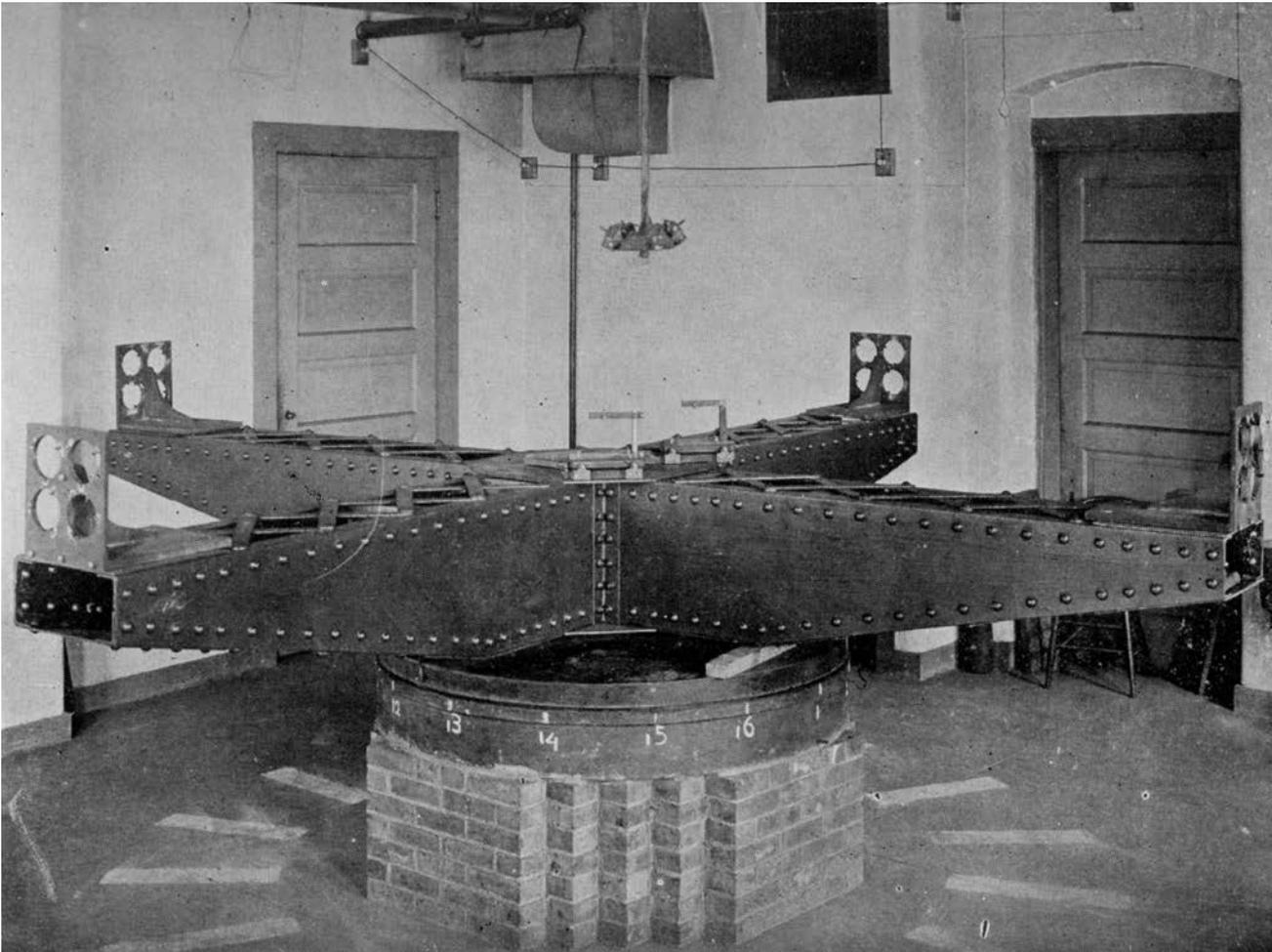
Nel 1887 Albert Abraham Michelson ed Edward Morley effettuarono un esperimento che aveva l’obiettivo di trovare traccia dell’etere. Tale esperimento sarebbe diventato uno degli esperimenti falliti più famosi della storia della fisica. L’idea alla base dell’esperimento può essere visualizzata con l’analogia di una persona che nuota in un fiume.

A seconda che il nuotatore stia nuotando controcorrente o meno, la sua velocità rispetto a un osservatore fermo sulla riva

del fiume cambierà. In questa analogia, il fiume rappresenta l’“etere” e il nuotatore la luce. L’esperimento si proponeva di misurare la velocità della luce a seconda che essa “nuoti” a favore o contro la corrente d’etere. Michelson e Morley osservarono che, indipendentemente dalla direzione in cui “nuotava”, la velocità della luce rimaneva costante. Nella nostra analogia con il fiume, significherebbe che, indipendentemente da velocità e direzione della corrente, il nuotatore continua a nuotare allo stesso ritmo costante. Ciò va contro la fisica classica e le nostre intuizioni sul movimento. Il risultato di questo esperimento implica che non esiste un punto di vista assoluto per misurare gli eventi. La capacità di accettare e interpretare senza preconcetti questa “sconcertante” evidenza fu essenziale per la concezione della teoria della relatività speciale di Einstein: uno dei punti di partenza della fisica moderna.

Tuttavia, le due teorie che rappresentano i pilastri della fisica moderna, la meccanica quantistica e la relatività generale, non riescono a conciliare l’attuale visione del vuoto.

La meccanica quantistica ci presenta un’immagine del tutto nuova di vuoto, come spazio pervaso da continue fluttuazioni energetiche. Lo spazio vuoto non è affatto vuoto: appare tale



solo perché la creazione e la distruzione incessante di particelle si verificano su intervalli temporali brevissimi e tali da non permettere allo sperimentatore la loro rivelazione. Significa che qualunque regione finita di spazio vuoto è piena di energia. La fisica moderna individua nel vuoto lo stato in cui questa energia è la minore possibile. Nel gergo scientifico, questa energia è chiamata “energia di punto zero” (vd. p. 19 e p. 22, ndr).

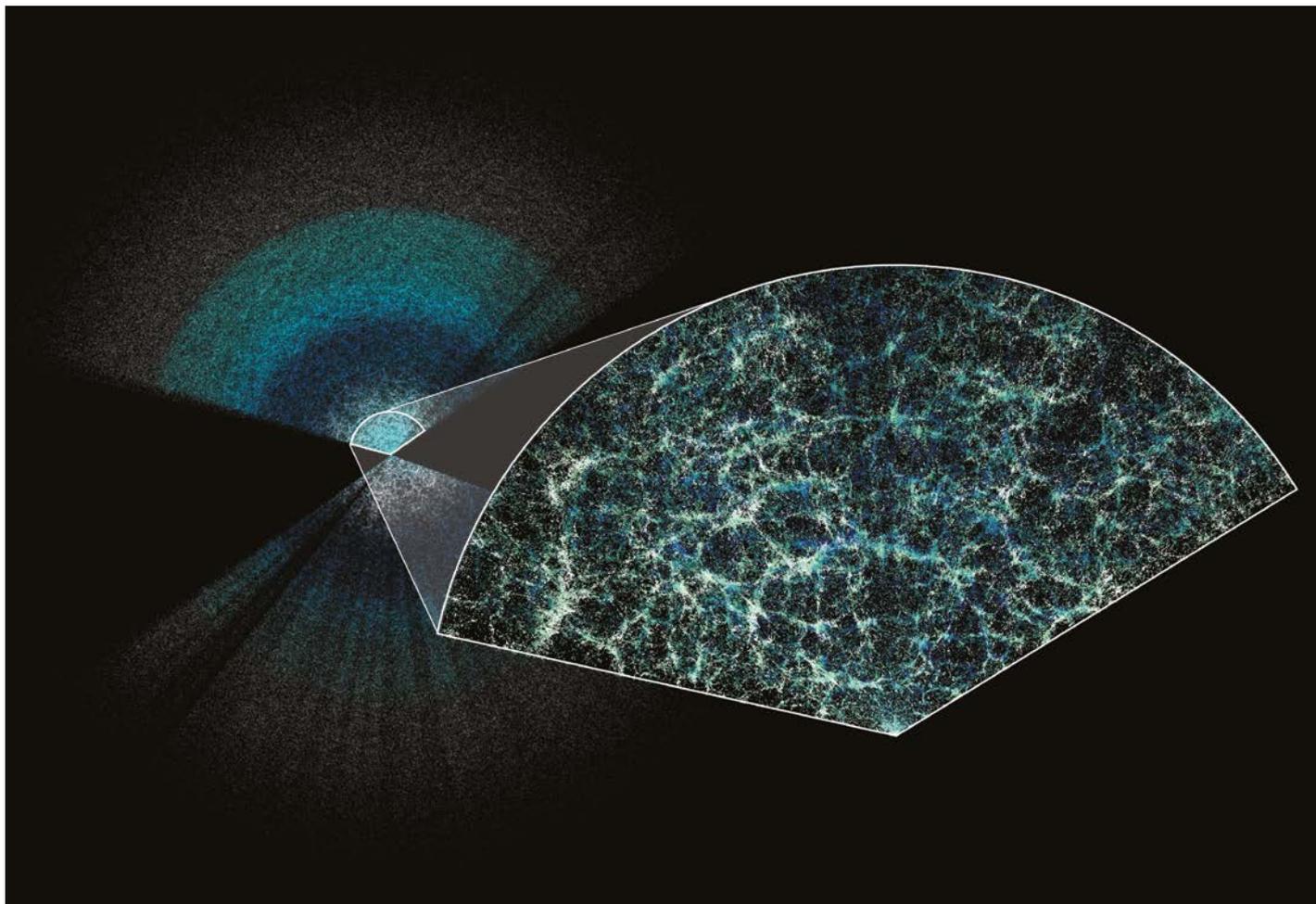
D’altro canto, l’energia del vuoto costituisce una spiegazione possibile dell’“energia oscura”, la ragione per cui l’universo, invece di rimanere statico o espandersi in modo decelerato come farebbe se contenesse solo materia e radiazione, stia invece accelerando la sua espansione sempre più (vd. p. 27, ndr).

L’energia oscura potrebbe essere spiegata invocando la costante cosmologica, un termine matematico nelle equazioni della relatività generale che può determinare proprio l’effetto di accelerazione dell’espansione. Oppure può essere spiegata introducendo un termine che cambia nel tempo, e che in certi modelli è stato chiamato “quintessenza”, creando un riferimento suggestivo ancora una volta ad Aristotele, che lo indicò come il quinto elemento per denotare l’essenza del mondo celeste, in aggiunta ai quattro elementi dei filosofi precedenti: acqua, aria, terra e fuoco.

In entrambi i casi, se cerchiamo di identificare l’energia oscura con un effetto dovuto all’energia del vuoto, il problema che si pone è che la quantità che osserviamo essere presente nell’universo è troppo piccola se paragonata a quanto ci aspetteremmo dalle fluttuazioni quantistiche descritte sopra. Quando gli scienziati iniziarono a pensare a questo concetto, calcolarono che questa energia avrebbe dovuto essere enorme, e questo avrebbe causato un’espansione dell’universo così intensa e rapida da non

d.

L’esperimento di Michelson e Morely, con cui si cercò di mettere in evidenza il moto della Terra rispetto all’etere luminifero, fu realizzato nel 1887 presso la Case Western Reserve University di Cleveland. In figura è mostrato un interferometro simile a quello originale, utilizzato da Morley e Miller nel 1903-1905, con cui fu ripetuto l’esperimento, confermando i risultati del 1887.



permettere la formazione di stelle e galassie. Dal momento che non è così, l'energia del vuoto nell'universo deve essere molto più piccola. Le misure cosmologiche della densità di energia oscura dicono che questa energia è l'equivalente di 4 atomi di idrogeno per metro cubo, mentre quella calcolata secondo la meccanica quantistica dovrebbe corrispondere a 100 miliardi di miliardi di volte la massa dell'intero universo osservabile, compressa nello stesso volume. Si tratta di una discrepanza di circa 120 ordini di grandezza che ha spinto alcuni scienziati a definire l'energia del vuoto "la peggiore previsione teorica nella storia della fisica".

Qualunque sia il termine utilizzato, l'enorme discrepanza tra la quantità di energia del vuoto prevista teoricamente e la quantità misurata nell'universo rappresenta uno dei problemi più scomodi, imbarazzanti e difficili della fisica teorica contemporanea.

#### Biografia

**Paolo Lenisa** è docente di fisica subatomica e fisica generale presso l'Università di Ferrara. Fisico sperimentale, si occupa di struttura del protone e di ricerca del momento di dipolo elettrico in anelli di accumulazione. Si interessa di storia della fisica e divulgazione scientifica.

10.23801/asimmetrie.2024.37.1

**e.**  
La più precisa, vasta e dettagliata mappa 3D dell'universo mai realizzata, ottenuta recentemente dai dati raccolti dallo strumento DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) in Arizona. Questa mappa permetterà di misurare l'espansione del cosmo negli ultimi 11 miliardi di anni e il ruolo che ha in questo processo la misteriosa energia oscura.

atmosfera di Marte

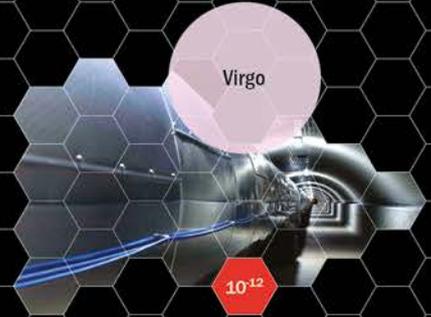


0,01  
 $3 \cdot 10^{-4}$

thermos (parte isolante)

$10^{-5}$   
 $10^{-7}$

Virgo



$10^{-12}$

cibo sottovuoto

$5 \cdot 10^{-9}$



$10^{-5}$   
 $10^{-12}$



termosfera della Terra

aspirapolvere

0,8



superficie di Plutone

$10^{-5}$



valvola termoionica

$10^{-7}$   
 $10^{-13}$

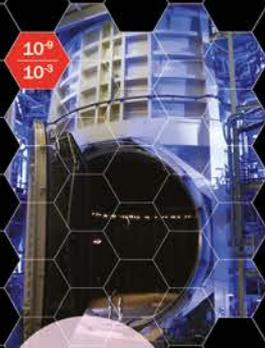


occhio di un uragano

0,8  
0,9



$10^{-6}$   
 $10^{-3}$



camera a vuoto della NASA

pompa turbomolecolare

$10^{-7}$   
 $10^{-12}$



lampadina a incandescenza

$10^{-4}$   
 $10^{-5}$



atmosfera terrestre

1

$2,5 \cdot 10^{19}$



1

$10^{-1}$

$10^{-2}$

$10^{-3}$

$10^{-4}$

$10^{-5}$

$10^{-6}$

$10^{-7}$

$10^{-8}$

$10^{-9}$

$10^{-10}$

$10^{-11}$

$10^{-12}$

$10^{-13}$

# [as] Gradi di vuoto

Dal vuoto che si misura in unità di pressione, come la pressione dell'aria in prossimità della superficie della Terra, a quello dello spazio interstellare o intergalattico, così spinto da essere misurato in numero di molecole o atomi per centimetro cubo.

superficie della Luna

$2 \cdot 10^5$

$3 \cdot 10^{15}$

superficie di Mercurio

$10^{15}$

LHC

$10^{14}$

$10^{15}$

1

spazio interstellare

spazio intergalattico

nebulosa

$10^4$

spazio interplanetario

11

$10^{-6}$

$10^{-14}$

$10^{-15}$

$10^{-16}$

pressione (atm)

molecole per  $\text{cm}^3$

$10^4$

$10^3$

$10^2$

10

1

$10^{-1}$

$10^{-2}$

$10^{-3}$

$10^{-4}$

$10^{-5}$

$10^{-6}$

# Sotto-pressione

## Come si crea e si misura il vuoto

di Fulvio Ricci

Come si crea e come si misura il vuoto? In entrambi i casi, non si tratta affatto di un'impresa semplice.

“Praticare” il vuoto è una espressione tecnica che implica l'operazione di estrazione dell'aria da un recipiente chiuso. In termini più corretti significa abbassare la pressione all'interno del recipiente. Il processo di estrazione del fluido dall'interno del recipiente può essere più o meno efficace e la pressione residua caratterizza la qualità del vuoto prodotto.

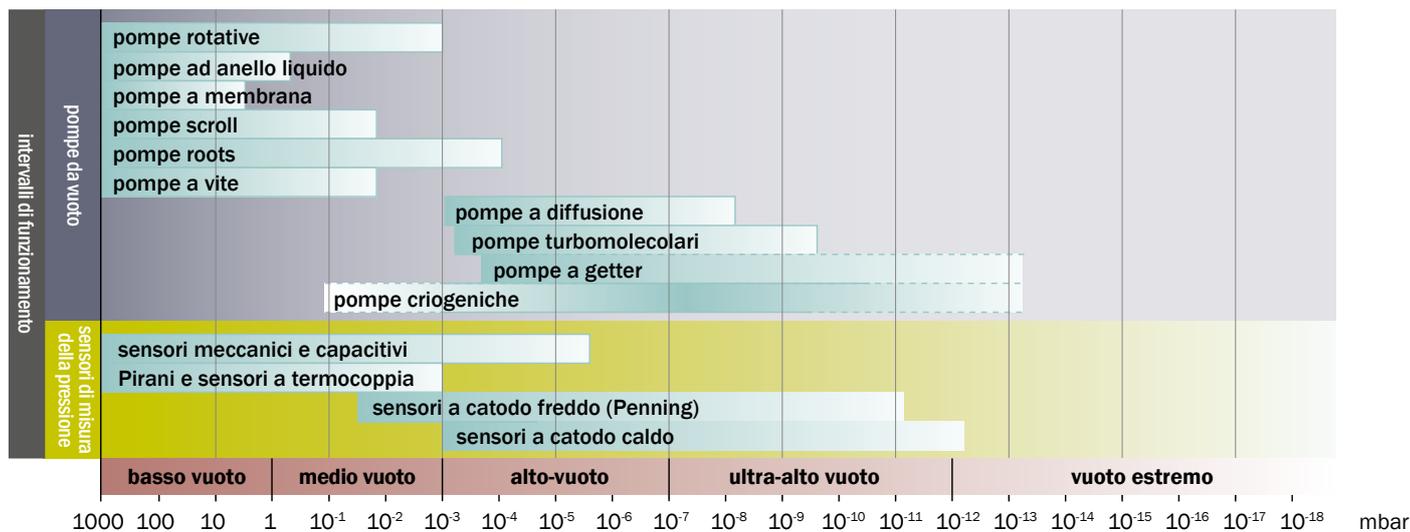
Attribuire la paternità della prima produzione di vuoto in un recipiente è un esercizio dai contorni poco definiti. Si potrebbe infatti arguire che anche l'antica e semplice operazione di travasare il vino da un recipiente a un altro tramite un semplice processo di aspirazione possa essere classificata come una pratica di vuoto. Il vuoto lo ha certamente praticato Torricelli con un tubo di vetro chiuso a una estremità, riempito di mercurio e poi capovolto, con l'estremità aperta immersa in un recipiente di mercurio (vd. p. 4, ndr). Nello stesso periodo storico il fisico tedesco Otto von Guericke (1602–1686), modificando un modello di pompa sviluppata nel III sec. a. C. da Ctesibio d'Alessandria, provò a vuotare prima botti piene d'acqua, poi bidoni in metallo. I primi

a.

L'esperimento delle due semisfere di Magdeburgo condotto da Otto von Guericke nel 1654.

L'esperimento consiste in due grandi emisferi di rame, sigillati ai bordi. L'aria veniva pompata fuori, creando così il vuoto all'interno della sfera. Nonostante due squadre di cavalli tentassero di separare i due emisferi, la pressione dell'aria agente sulla sfera, non bilanciata da una pressione all'interno della sfera in cui c'era il vuoto, non permise ai cavalli di separare le due parti. Solo facendo entrare aria all'interno della sfera attraverso un'apposita valvola fu possibile separare facilmente le due parti. Gli emisferi di Magdeburgo furono ideati da von Guericke per dimostrare il funzionamento della pompa d'aria da lui inventata e il concetto di pressione atmosferica.





tentativi furono fallimentari: durante la generazione del vuoto i bidoni metallici si schiacciavano. Infine costruì due semisfere unite insieme da guarnizioni in cuoio e, pompando via l'aria al loro interno, finalmente ottenne il vuoto.

Ai nostri giorni la tecnologia utilizzata per produrre e misurare il vuoto cambia significativamente a seconda degli intervalli di pressione residua presente nel contenitore. Si parla quindi di "basso vuoto", "medio vuoto", "alto vuoto", "ultra-alto vuoto" e "vuoto estremo" a seconda del livello di pressione residua (vd. fig. b).

In natura, una condizione di ultra-alto vuoto si ha ad esempio sulla superficie della Luna. La bassa forza di gravità della Luna non trattiene a sufficienza le molecole attorno alla crosta solida e nella notte lunare i valori di pressione sono dell'ordine di  $3 \times 10^{-12}$  mbar, corrispondenti a circa centomila particelle in un centimetro cubo. Produrre e misurare questo tipo di vuoto in laboratorio non è cosa semplice. La misura di valori così bassi di pressione è ottenuta monitorando la corrente elettrica generata dagli ioni delle molecole del gas residuo nel recipiente.

Gli strumenti basati su questo principio sono divisi in sistemi a "catodo caldo" e "catodo freddo". Nel caso del catodo caldo, lo strumento include un filamento che ionizza il gas per effetto termoionico. Nei misuratori a catodo freddo gli ioni sono generati naturalmente grazie all'effetto dei raggi cosmici. L'elemento a catodo freddo più diffuso è il Penning, con il quale si misurano pressioni da  $10^{-4}$  a  $10^{-11}$  mbar. In esso è presente un magnete, la cui funzione è di aumentare il cammino libero medio degli ioni ottenendo misure più accurate.

Un modo più sofisticato di misurare la pressione in ambienti di ultra-alto vuoto è quello basato sull'utilizzo di "microbilance a cristalli di quarzo": le variazioni di massa del cristallo di quarzo, dovute alla deposizione delle molecole del gas, determinano il cambiamento di frequenza di risonanza del cristallo.

La "spettroscopia di assorbimento laser a diodi modulabili" è un'altra tecnica ad alta sensibilità, che perturba poco dello stato del sistema: in questo caso il valore della pressione residua è ottenuto misurando l'assorbimento della luce laser che si propaga nell'ambiente di ultra-alto vuoto da parte delle molecole del gas residuo.

Per intervalli di pressione più alti (e quindi di minor vuoto), la strumentazione di misura cambia. L'effetto più sfruttato per ottenere la misura di pressione nel caso del medio vuoto, ad esempio, è lo scambio termico tra un filamento elettrico caldo e il gas residuo del recipiente. Lo scambio termico altera sia la temperatura che la resistenza elettrica del filamento e per questo si hanno due tipi di vacuometri: la "termocoppia", ovvero un termometro saldato in un punto del filamento, e il Pirani, che misura la variazione di resistenza del filamento.

Affrontiamo ora il problema di come fare e mantenere vuoto un recipiente. Dopo aver aspirato a lungo il fluido dal recipiente si giunge a una condizione stazionaria nella

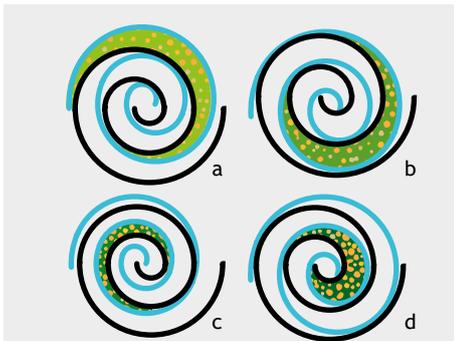
**b.** Un'estesa classificazione delle tipologie di pompe da vuoto e di sensori di misura di pressione. La linea tratteggiata indica la progressiva riduzione dell'efficienza di pompaggio del sistema. La pressione qui è indicata in millibar (mbar), ma esistono varie altre unità di misura: l'atmosfera (atm), pari a 1013,25 mbar, ma anche il Pascal (Pa), i millimetri di mercurio (mmHg o torr), la baria (Ba) e la psi.



pompa scroll



spirale fissa e spirale mobile



c.  
In alto, una pompa scroll, sotto le spirali (fissa e mobile), che si trovano al suo interno. Nella terza figura è mostrato il trascinamento del gas generato dal moto relativo delle due spirali: (a) Ingresso del gas. (b) Spostamento del gas. (c) Compressione del gas verso il centro. (d) Espulsione del gas dal centro della pompa.

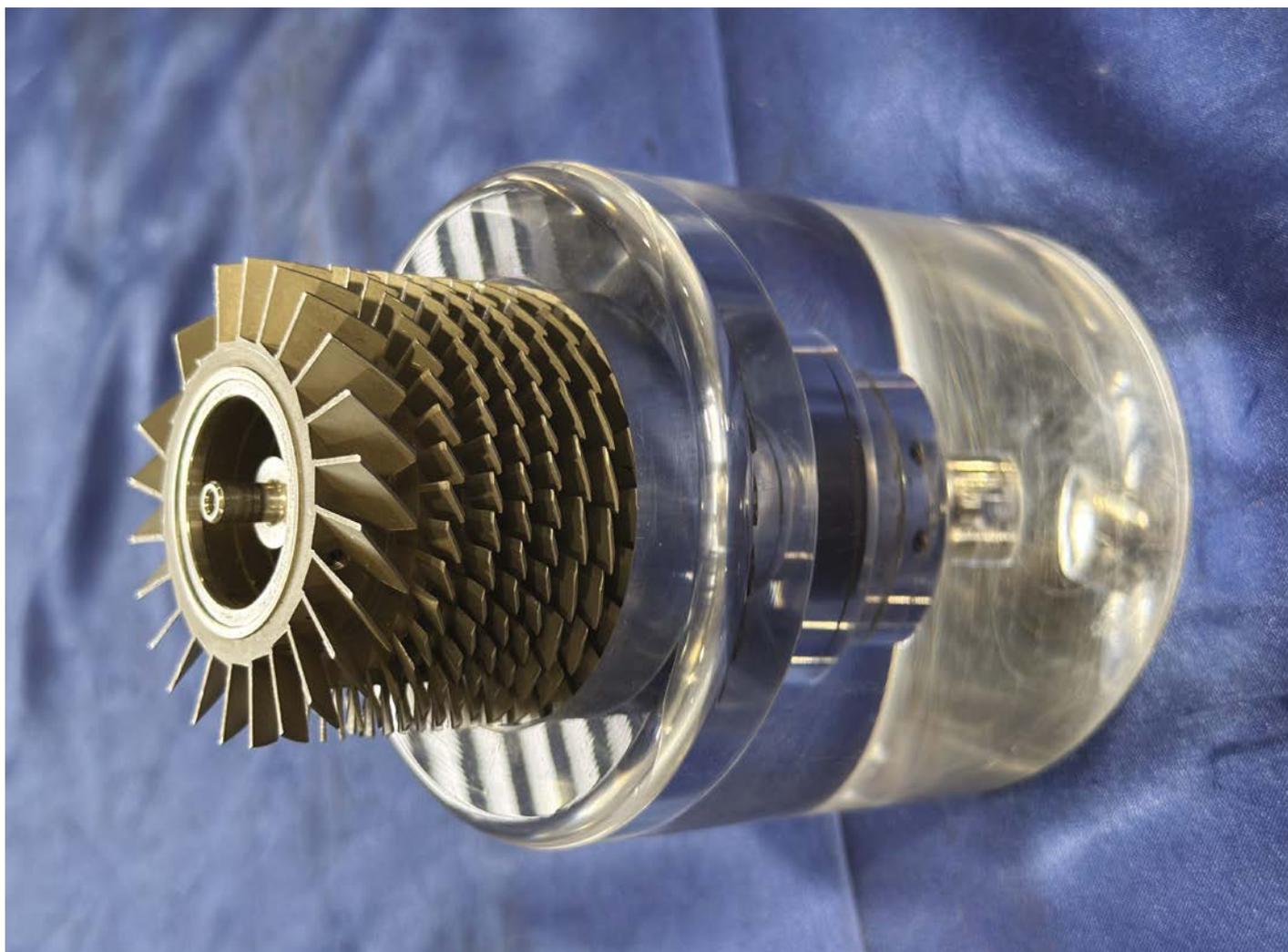
quale all'azione di estrazione, che avviene grazie al sistema di aspirazione, ovvero una cosiddetta "pompa da vuoto", si contrappone una continua immissione di molecole nel volume del recipiente, dovuto al distacco di molecole dalle pareti (un fenomeno noto come "degasaggio") e all'esistenza di microperdite del recipiente.

Il sistema di pompaggio viene scelto in funzione dell'intervallo di pressione in cui deve operare, tenendo anche conto del pericolo di inquinamento che la pompa può generare nel recipiente. Il basso vuoto è prodotto da "pompe volumetriche", che sfruttano la variazione di volume di una camera per provocare l'aspirazione del fluido in un'altra. Possono essere "rotative" o "a pistone", con olio lubrificante per le parti in moto o a secco. Nelle rotative la compressione avviene grazie al moto rotatorio di palette lubrificate che aprono e chiudono alternativamente la bocca d'ingresso e la bocca di uscita della pompa. La presenza di olio di lubrificazione può causare inquinamento, un effetto deleterio per varie applicazioni, come in microelettronica. Per ovviare a questo problema si usano le "pompe scroll", nelle quali la compressione avviene grazie a due spirali contrapposte, una fissa e l'altra in movimento; il fluido da aspirare fluisce verso la zona centrale di evacuazione di questa sorta di labirinto in movimento (vd. fig. c).

Per ottenere condizioni di alto vuoto in genere si usano le "pompe a diffusione". Con l'ausilio di pompe volumetriche, scaldando un fluido, si crea un cosiddetto "flusso motore" che si muove ad alta velocità (circa 500 m/s) e trascina per urto le particelle del gas da evacuare. Per ottenere vuoti fino a  $10^{-7}$  mbar il fluido motore deve avere una bassa tensione di vapore alle alte temperature di esercizio e per questo si usano oli minerali di speciale composizione.

L'effetto di quella parte del fluido motore che torna all'indietro verso il recipiente, impedisce l'uso delle diffusioni in impianti dove è richiesto un basso inquinamento. Si usano allora le "pompe turbomolecolari" (vd. fig. d), dotate di un rotore costituito da una pila di dischi coassiali, ciascuno dei quali è costituito da alette angolate fuori dal piano del disco. Le orientazioni delle alette sono scelte in modo che le molecole del fluido da evacuare, colpite dalle palette in veloce movimento rotatorio, siano spinte in basso verso l'uscita della pompa. Per scendere al di sotto di  $10^{-8}$  mbar, è necessario in via preliminare riscaldare le pareti del recipiente, mantenendolo sotto vuoto, a temperature dell'ordine di  $150^{\circ}\text{C}$ . Questo facilita il degasaggio e, una volta riportato il sistema a temperatura ambiente, le pompe di ultra-alto vuoto e di vuoto estremo consentono di abbassare ulteriormente la pressione. In questo caso si devono utilizzare le "pompe a intrappolamento": questa denominazione deriva dal principio fisico che ne determina il funzionamento, ovvero la creazione di legami molecolari tra le molecole residue del recipiente e il materiale con cui è fatta la pompa stessa.

Nelle "pompe a sublimazione di titanio" si sfrutta l'alta reattività chimica di questo elemento con le particelle residue nella camera da vuoto, formando un prodotto stabile che resta attaccato alle pareti. Negli impianti di ultra-alto vuoto, accanto alle pompe al titanio spesso convivono le "pompe ioniche". In esse, grazie alla presenza di un forte campo magnetico e ad un'alta tensione applicata a un sistema anodo-catodo, si



crea una nuvola elettronica che ionizza il gas da evacuare. Gli ioni positivi del gas sono poi proiettati ad alta velocità (*sputtering*) verso la piastra catodica in titanio, dove reagiscono chimicamente.

Per creare l'ultra-alto vuoto e il vuoto estremo vanno citate le "pompe a *getter* non evaporabili": sono strati di materiale poroso la cui capacità di assorbimento si innesca previo riscaldamento: ad esempio si utilizzano combinazioni di titanio (30%), zirconio (30%) e vanadio (40%) attivati a 400 °C.

Citiamo infine le pompe criogeniche: in questo caso il processo di intrappolamento è conseguenza dell'abbassamento di temperatura delle pareti della pompa rispetto a quella delle pareti del recipiente da vuotare. A parità di pressione, più la temperatura della pompa si abbassa, più le particelle di acqua, azoto, idrogeno, argon ed elio condensano sulle pareti fredde.

In LHC sono prodotte zone di vuoto estremo e la densità residua arriva a ca. 25.000 particelle per cm<sup>3</sup>, un valore ancora lontano da quello dello spazio intergalattico, dove la densità residua è di circa una particella per m<sup>3</sup>. La strada verso il vuoto assoluto, quindi, è ancora lunga.

d.  
Nella foto è mostrato il rotore di una pompa turbomolecolare: si noti come cambiano gli angoli delle palette dei dischi del rotore andando da un disco al successivo.

#### Biografia

**Fulvio Ricci** è professore emerito di Sapienza Università di Roma, affiliato INFN. Esperto di sistemi di rivelazione di onde gravitazionali, ha lavorato prima a Frascati e poi al CERN. A partire dal 1995 è membro della collaborazione internazionale Virgo, di cui è stato portavoce nel periodo della prima osservazione di un segnale di onda gravitazionale. Attualmente presiede la divisione Vacuum & Cryogenics dell' "Instrumental Science Board" del progetto Einstein Telescope.

# C'è nessuno?

## Il vuoto in LHC e Virgo

di Paolo Chiggiato

La ricerca scientifica ha stimolato radicali avanzamenti nella tecnologia del vuoto. Fra gli strumenti scientifici che richiedono l'ultra-alto vuoto (vd. p. 12, ndr), gli acceleratori di particelle e i rivelatori di onde gravitazionali sono stati motori di questo sviluppo, spingendo i limiti inferiori della rarefazione gassosa e adempiendo requisiti via via sempre più stringenti.

Nei primi, elettroni, protoni o ioni vengono accelerati fino a velocità prossime a quella della luce. Gli acceleratori sono impiegati in una larga gamma di applicazioni, che va dall'utilizzo industriale, lo studio di opere d'arte e la cura dei tumori, fino alla ricerca subatomica fondamentale. Attualmente, il più grande acceleratore è il Large Hadron Collider (LHC) del CERN (27 km di circonferenza), nel quale due fasci di protoni che circolano in direzioni opposte collidono fra di loro in quattro punti dell'anello. Il vuoto è necessario per ridurre gli urti fra le particelle e le molecole del gas residuo, che altrimenti provocherebbero perdite eccessive e instabilità. Il vuoto negli acceleratori è

**a.**

Foto del tunnel di LHC in uno dei tratti curvi (i cosiddetti "archi"). In blu si vedono i magneti superconduttori dipolari. Lo spaccato mostra l'interno del magnete con le due linee da vuoto dove circolano i fasci di protoni (blu e rosso). Il vuoto è presente dove circolano i fasci e all'interno dei grandi tubi blu (criostati) per garantire l'isolamento termico.





**b.** Foto del tunnel dell'esperimento Virgo a Cascina, nei pressi di Pisa. La camera da vuoto ha un diametro di 1,2 m ed è rivestita di isolante termico utilizzato durante la *bakeout*, per diminuire la dispersione termica e, durante il funzionamento, per limitare le escursioni termiche.

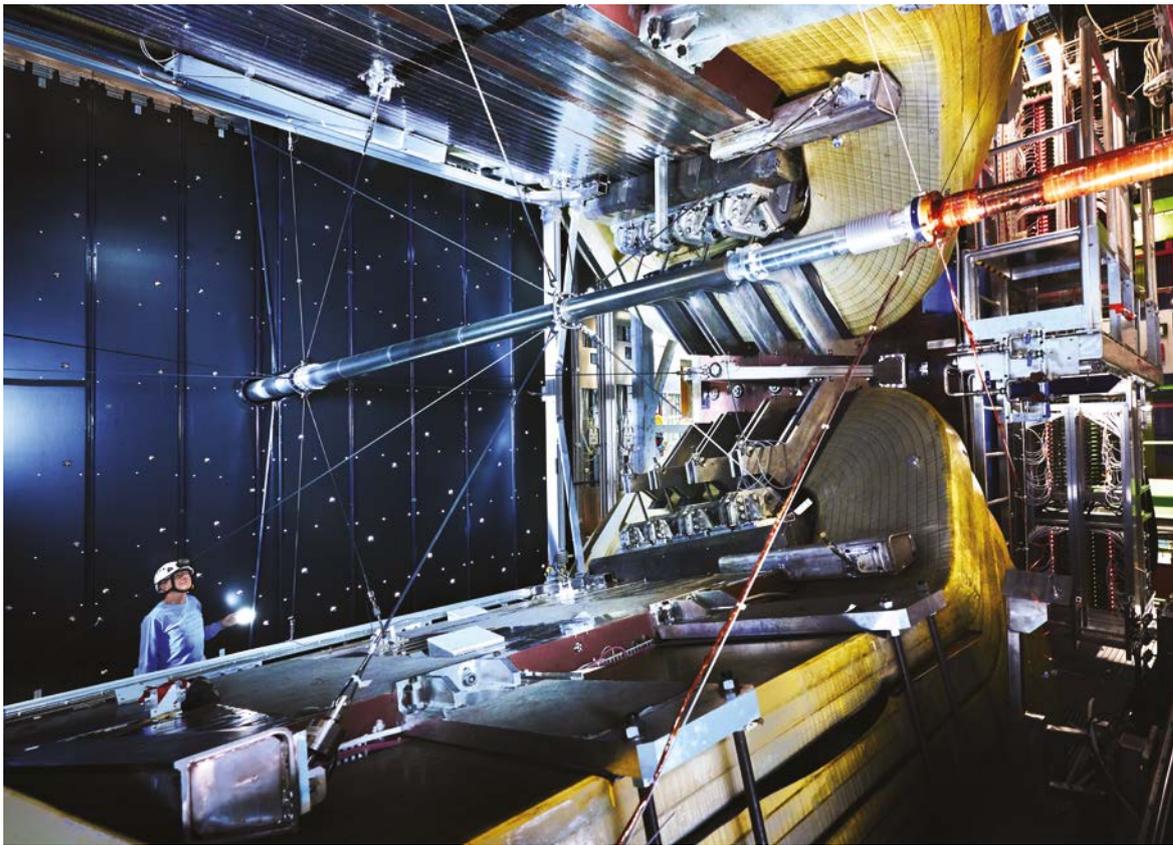
anche necessario per evitare scariche elettriche in dispositivi ad alta tensione, per esempio le cavità acceleratrici, dove sono presenti campi elettrici di vari MV/m. Un'altra applicazione del vuoto negli acceleratori è l'isolamento termico di liquidi criogenici, essenzialmente utilizzati per raffreddare i materiali superconduttori di cui sono composti i magneti che guidano i fasci di particelle e la cavità acceleratrici.

I rivelatori di onde gravitazionali, come Virgo e LIGO, richiedono livelli di vuoto simili a quelli degli acceleratori moderni. Al fine di misurare con tecniche di interferometria laser segnali estremamente deboli provocati da onde gravitazionali (fino a  $10^4$  volte più piccoli del diametro del protone), i raggi laser non devono essere perturbati da interazioni con le molecole del gas residuo. A differenza degli acceleratori, non è solo il valore medio della pressione che conta, ma anche le fluttuazioni statistiche della densità di molecole nel volume occupato dal raggio laser. Queste fluttuazioni aleatorie determinerebbero uno sfasamento dei fotoni del laser simile a quello ottenuto durante il passaggio di un'onda gravitazionale. Il risultato sarebbe un eccessivo aumento del "rumore" misurato dal rivelatore. L'ultra-alto vuoto è necessario anche per preservare la riflettività degli specchi, riducendo la presenza di gas condensabili, in particolar modo idrocarburi pesanti e vapore acqueo.

Il raggiungimento dell'ultra-alto vuoto implica l'ottenimento di pressioni almeno  $10^{12}$  volte inferiori a quella atmosferica. Il principale ostacolo non è il gas atmosferico, facilmente evacuabile, ma il degassaggio dei materiali che compongono il sistema da vuoto. Poiché i materiali utilizzati in ultra-alto vuoto sono essenzialmente metalli, le loro superfici sono ricoperte da ossidi parzialmente idrossilati che rilasciano

vapore acqueo. Per giunta, l'idrogeno atomico intrappolato nei metalli può migrare sulla superficie e liberarsi come idrogeno gassoso. Il rilascio del vapore acqueo può essere ridotto molto efficacemente tramite riscaldamento a più di  $100\text{ }^\circ\text{C}$  per varie ore sottovuoto nella configurazione d'installazione finale (*in situ*). Questo riscaldamento è comunemente chiamato "*bakeout*" e deve essere ripetuto ogni qualvolta il sistema è esposto all'aria atmosferica. Il degassaggio di idrogeno si diminuisce rimuovendo l'idrogeno presente nel metallo con trattamenti termici a temperature superiori a  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , sia nel vuoto che nell'aria. Questi trattamenti, detti rispettivamente di "*vacuum firing*" e "*air firing*" sono generalmente irreversibili e possono essere imposti ai materiali prima della fabbricazione delle camere da vuoto.

L'estrema rarefazione dell'ultra-alto vuoto implica che il pompaggio del gas rilasciato dai materiali possa avvenire solo attraverso meccanismi che agiscono sulle singole molecole. I processi utilizzabili sono essenzialmente due: il trasferimento di quantità di moto e la cattura molecolare. Il primo, raramente utilizzato negli acceleratori e mai nei rivelatori di onde gravitazionali in operazione, consiste nel conferire alle molecole una componente di quantità di moto in una direzione ben definita attraverso collisioni multiple con palette ruotanti a velocità periferiche dell'ordine della velocità molecolare media: sono le pompe turbomolecolari (vd. anche p. 14, ndr). Nel secondo meccanismo, le molecole sono catturate su una superficie del sistema da vuoto sfruttando interazioni chimiche (pompe *getter*) oppure "fisisorbimento", ossia forze di attrazione deboli tra molecole e superfici, su pareti a temperature criogeniche (pompe criogeniche). Una nota speciale meritano le



**c.** Camera da vuoto del rivelatore LHCb tenuta in posizione da corde in kevlar. Il pompaggio del gas residuo si basa su un film sottile di titanio-zirconio-vanadio, una pompa *getter* sviluppata al CERN.

pompe ioniche, che associano legami chimici a impiantazione atomica, rendendo così possibile anche il pompaggio di gas rari. Sebbene acceleratori e rivelatori di onde gravitazionali abbiano esigenze simili in termini di vuoto, entrambi hanno requisiti che differiscono significativamente. Le peculiarità dei rivelatori di onde gravitazionali derivano dall'estrema sensibilità dei loro sistemi ottici. Ogni forma di vibrazione ambientale deve essere ridotta al minimo. Le camere da vuoto con i loro supporti devono essere progettate per attenuare le vibrazioni del suolo. Inoltre, le specifiche per il contenuto di polveri e idrocarburi assorbiti sono rigorose per evitare alterazioni delle proprietà ottiche degli specchi. Dall'altro lato, la particolarità degli acceleratori sta nel fatto che, oltre alle sorgenti di gas già menzionate, i fasci di particelle possono causare in modo indiretto la liberazione di molecole gassose delle camere da vuoto tramite

bombardamento elettronico, ionico e di luce di sincrotrone. Sebbene abbiano requisiti diversi, i sistemi da vuoto di acceleratori di particelle e rivelatori di onde gravitazionali sono accomunati da un forte impatto sui costi dei futuri progetti. Tanto per l'Einstein Telescope (ET), il futuro rivelatore di onde gravitazionali europeo con più di 120 km di camere da vuoto, quanto per il Future Circular Collider (FCC), il futuro collisionatore circolare del CERN (91 km di circonferenza), i sistemi da vuoto figurano fra le prime linee di spesa. Per entrambi i progetti, il livello dei costi impone soluzioni tecnologiche alternative che coinvolgono materiali, fabbricazione, pompaggio, misura e controllo della pressione. Ancora una volta, gli strumenti scientifici che spingono i limiti della conoscenza umana contribuiranno sinergicamente allo sviluppo tecnologico dell'ultravacuo.

#### Biografia

**Paolo Chiggiato** ha conseguito la laurea in ingegneria nucleare presso il Politecnico di Milano e ha accumulato oltre trent'anni di esperienza lavorativa presso il CERN di Ginevra. Attualmente, ricopre il ruolo di responsabile del gruppo dedicato al vuoto, alle superfici e ai film sottili, mentre riveste anche la posizione di vicecapo nel dipartimento di tecnologia degli acceleratori. Inoltre, da circa cinque anni, è impegnato nel coordinamento del contributo del CERN per i sistemi da vuoto degli interferometri dell'Einstein Telescope (ET) e in tal ruolo è membro dell'Einstein Telescope Organization (ETO).

# Molto rumore per il nulla

## Il vuoto quantistico

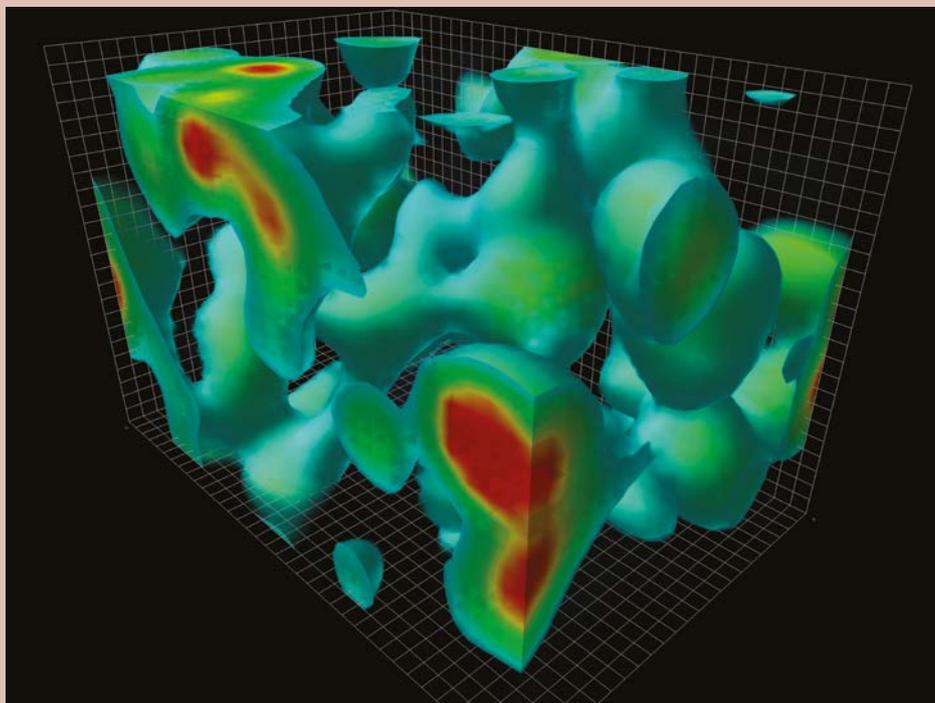
di Marco Rossi

Come possiamo descrivere il vuoto nel mondo subatomico? La descrizione migliore della realtà microscopica è attualmente basata sulla meccanica quantistica. L'oggetto fondamentale di cui si serve tale descrizione è il "campo quantistico".

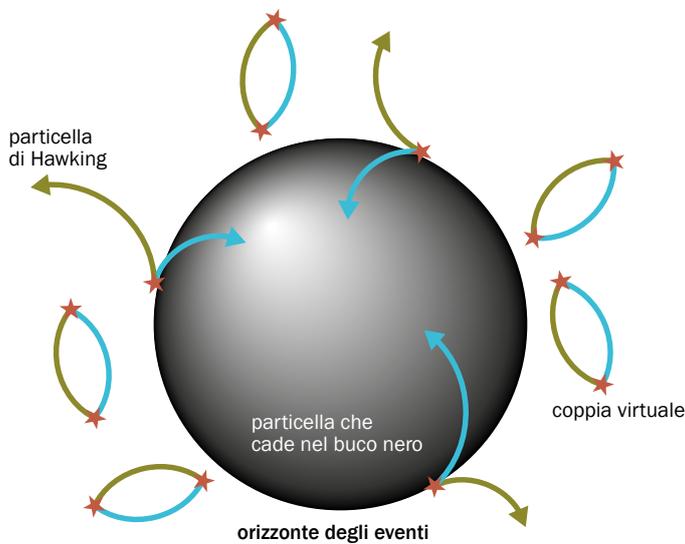
Vediamo allora innanzitutto cosa è un campo. Per i fisici un "campo" è una qualunque grandezza misurabile, il cui valore dipende dal punto dello spaziotempo in cui si fa la misura. Ad esempio, i valori di temperatura delle città che vediamo su una carta geografica sono i valori del campo di temperatura misurati nei diversi punti dello spazio (città) e in dati momenti (giorno, ora). Il campo temperatura è un campo "scalare": ad ogni punto dello spaziotempo si associa solamente un numero.

In fisica sono importanti anche i campi cosiddetti "vettoriali": in questo caso, ad ogni punto è associato un vettore. Ad esempio, il campo elettrico e il campo magnetico sono ciascuno descritti da un vettore con tre componenti, una per ogni direzione spaziale, che varia sia nel tempo che da punto a punto dello spazio. Questa descrizione, che fu utilizzata da Maxwell per codificare in un set di equazioni le leggi dell'elettromagnetismo classico, acquista un valore ancora più fondamentale nella successiva rivoluzione quantistica di inizio '900. Ben presto si comprese che, analogamente all'elettricità e al magnetismo, tutte le forme di materia ed energia (particelle e interazioni) sono descritte da campi quantistici, che si chiamano così in quanto soggetti alle leggi della meccanica quantistica.

Questa visione unificata della realtà ha conseguenze importanti sul concetto di vuoto. Prendiamo ad esempio il campo elettromagnetico. Esso si propaga come un'onda elettromagnetica e può essere raffigurato come una collezione di "oscillatori armonici". Un oscillatore armonico è la generalizzazione del concetto di una



**a.** Simulazione delle fluttuazioni del vuoto nella teoria della cromodinamica quantistica, responsabile delle interazioni forti. La figura mostra una porzione di spazio dal volume di  $2,4 \times 2,4 \times 3,6 \text{ fm}^3$ , sufficiente a contenere un paio di protoni. Le zone colorate rappresentano bolle di varia densità di energia del vuoto.



**b.**  
 Illustrazione schematica di come funziona il meccanismo della produzione della radiazione di Hawking. Vicino all'orizzonte degli eventi di un buco nero, la distorsione dello spaziotempo induce le coppie di particella-antiparticella virtuali a diventare reali, spendendo energia a scapito dell'energia gravitazionale del buco nero. Una delle due particelle cade poi dentro il buco nero, mentre l'altra si allontana. Un osservatore a grande distanza dal buco nero vede quindi radiazione emessa dal buco nero. Il processo porta quindi alla lenta evaporazione del buco nero stesso.

massa attaccata a una molla: grazie alla presenza della molla, la massa oscilla nel tempo. Se posizioniamo tante masse attaccate a tante molle, abbiamo una collezione di oscillatori armonici che oscillano nel tempo, uno per ogni punto dello spazio. Il limite in cui questo numero di oscillatori armonici diventa enorme (tecnicamente infinito) può essere efficacemente descritto da un campo.

L'energia di un oscillatore armonico è la somma di due termini: l'energia cinetica (o di moto), che è proporzionale al quadrato della quantità di moto, e l'energia potenziale, che dipende dal quadrato di quanto la massa è spostata dalla sua posizione di equilibrio. Il valore minimo dell'energia è zero e si ottiene quando sia la quantità di moto che lo spostamento sono nulli. Questa configurazione, che è permessa dalla fisica classica, è impossibile da realizzare per un campo quantistico.

Ciò che lo impedisce è il principio di indeterminazione di Heisenberg: in meccanica quantistica non è mai possibile avere l'oscillatore armonico quantistico fermo nella sua posizione di equilibrio, e quindi con energia nulla, e il campo, essendo una collezione di infiniti oscillatori armonici, è condannato a oscillare (o meglio "fluttuare") sempre. In questo quadro ciò che si avvicina il più possibile all'idea intuitiva di "nulla" è lo stato di energia minima: per un campo quantistico questo è lo stato in cui non ci sono particelle, ovvero, nel caso del campo elettromagnetico, non vi sono fotoni. Tale stato, che chiamiamo "vuoto", ha però un'energia residua per ognuna delle infinite frequenze del campo, dovuta appunto a quelle che vengono chiamate "fluttuazioni quantistiche del vuoto".

La presenza di questo fondo di "energia del vuoto" non ha conseguenze per la maggior parte dei fenomeni con cui conviviamo, poiché essi dipendono da differenze di energie. La meccanica quantistica rende la situazione più interessante, però, poiché permette di prendere in prestito una parte della riserva virtualmente infinita di energia del vuoto per un tempo brevissimo, proprio grazie al principio di indeterminazione.

Questa energia serve per creare particelle e antiparticelle in ogni punto dello spazio, ma solo per un tempo brevissimo, tanto più breve quanto più è grande l'energia presa temporaneamente in prestito. Queste particelle non possono essere rivelate sperimentalmente in modo diretto proprio per la loro esistenza effimera, vincolata dal principio di indeterminazione di Heisenberg, e sono quindi dette "virtuali". Ne segue che, pur essendo globalmente uno stato privo di particelle reali, ossia rivelabili, il vuoto quantistico in porzioni ridotte dello spazio e del tempo mostra una grande dinamicità.

Una conseguenza spettacolare di questa "effervescenza" locale è stata ipotizzata nel 1974 da Stephen Hawking e sorprendentemente riguarda alcuni degli oggetti più affascinanti dell'universo, i buchi neri, ovvero concentrazioni di massa capaci di intrappolare con la loro gravità qualunque oggetto all'interno di una sfera delimitata dal cosiddetto "orizzonte degli eventi". Il fisico inglese si chiese cosa sarebbe successo, se dal vuoto si fosse prodotta una coppia composta da una particella e un'antiparticella virtuali in presenza di un buco nero, nelle vicinanze dell'orizzonte degli eventi. Mentre in assenza di gravità le particelle della coppia virtuale vengono prodotte dal vuoto e subito riassorbite senza spendere energia, la distorsione dello spaziotempo dovuta alla gravità crea uno "sbilanciamento" che può impedire il "riassorbimento" immediato delle particelle virtuali, rendendole reali. Una delle due particelle cade all'interno del buco nero, attraversandone l'orizzonte, mentre l'altra può allontanarsi. Dal punto di vista di un osservatore distante,



c.  
A sinistra, William Unruh nel 1986, a destra Paul Davies in una foto del 2002.

l'effetto netto è che il buco nero emette particelle, "evaporando" poco alla volta e quindi perdendo massa.

Questo processo si verifica con continuità e l'insieme delle particelle emesse costituisce una radiazione, detta "radiazione di Hawking", che fa perdere massa ai buchi neri. L'aspetto affascinante di tale radiazione è che la sua intensità ha la stessa distribuzione in frequenza di quella emessa, secondo le leggi della termodinamica, da un corpo dotato di una temperatura, il cui valore dipende dalla gravità esercitata dal buco nero all'orizzonte degli eventi, che in ultima analisi dipende dalla massa del buco nero stesso. Ciò rende la radiazione di Hawking un fenomeno particolare, in cui si incontrano la meccanica quantistica, la relatività e la termodinamica, ossia teorie che di solito hanno ambiti di applicabilità diversi. Da un punto di vista più pratico, va detto che tale radiazione è trascurabile per buchi neri derivanti da collassi stellari, ma è dominante per gli ipotetici piccoli buchi neri formati nei primi istanti dell'universo, che quindi sono destinati a evaporare completamente. La piccolezza della radiazione di Hawking per buchi neri standard ha quindi reso finora impossibile una chiara conferma sperimentale di questo fenomeno.

Ciò che rende possibile la radiazione di Hawking è la forte gravità del buco nero. Ora, uno dei tanti lasciti del lavoro di Einstein è il cosiddetto "principio di equivalenza" (vd. p. 4 in *Asimmetrie* n. 30, ndr). Secondo questo assunto, che è alla base

della teoria della relatività generale, la gravità è indistinguibile da una forza apparente osservata in un sistema di riferimento in accelerazione. Consistentemente con ciò, negli anni 1975/76, William Unruh e Paul Davies hanno indipendentemente predetto che anche un osservatore in moto accelerato rispetto al vuoto quantistico deve osservare una radiazione. Inoltre, lo spettro in frequenza dell'intensità di questa radiazione deve coincidere con quello della radiazione emessa da un corpo a una temperatura la cui espressione coincide con la formula di Hawking, a patto di sostituire l'accelerazione di gravità all'orizzonte del buco nero con l'accelerazione del sistema di riferimento. Questo fenomeno è detto "effetto Unruh": anch'esso è molto piccolo e difficile da misurare con gli attuali apparati sperimentali.

La cosa che accomuna i due fenomeni descritti è che un campo gravitazionale o un suo equivalente possono "estrarre", rendendole osservabili, delle particelle dal vuoto quantistico. Questo, che è lo stato di minima energia possibile, è quindi lontano dall'essere un palcoscenico spoglio su cui operano le attrici della fisica fondamentale, ovvero le particelle e le loro interazioni: in esso, infatti, queste sono già presenti, seppur in forma virtuale. Verrebbe quasi da dire, adattando al vuoto quantistico una mirabile terzina dell'ultimo canto del Paradiso, che nel "suo profondo" "s'interna" tutto "ciò che per l'universo si squaderna".

#### Biografia

**Marco Rossi** ha conseguito il dottorato a Pisa e ha lavorato in Francia (Lyon, Annecy), Regno Unito (Durham, Edinburgh) e Giappone (Kyoto). Ora è professore associato di teoria dei campi e meccanica quantistica presso l'Università della Calabria e la sua ricerca riguarda i sistemi integrabili.

# Un salto nel vuoto

## Interazioni, temperatura e stabilità

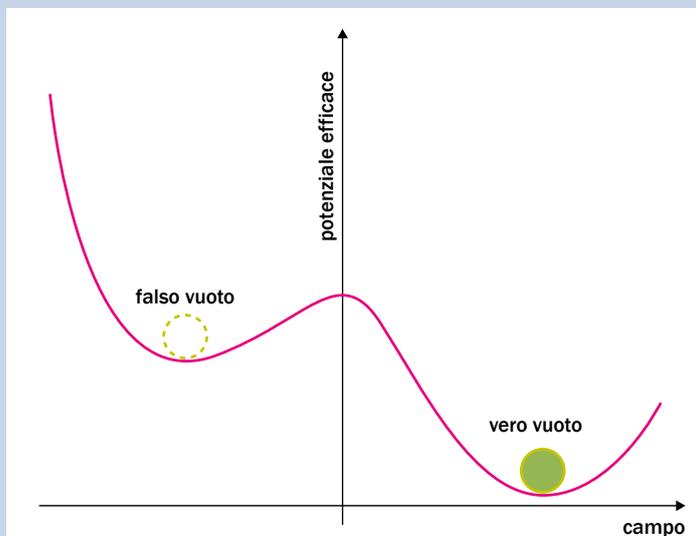
di Maria Paola Lombardo

La nostra attuale comprensione del mondo subatomico si basa sull'idea che le particelle elementari siano la manifestazione della fluttuazione di campi quantistici. Una particella di data massa e velocità, esente da interazioni, è l'effetto di un'oscillazione, con una frequenza ben definita, di un opportuno campo. Ciò lascerebbe pensare che lo stato di "vuoto", cioè di assenza di particelle, debba corrispondere all'assenza di qualunque fluttuazione di campi o, equivalentemente, allo stato in cui tutti i campi sono uniformemente uguali a zero. Invece questo non è possibile, perché anche i campi devono sottostare al principio di indeterminazione di Heisenberg e sono costretti ad agitarsi in un moto incessante, che può essere interpretato come la continua creazione e distruzione di particelle dall'esistenza effimera. Queste fluttuazioni di campi, dette "fluttuazioni del vuoto", hanno tuttavia un valor medio nullo: possiamo quindi concludere che lo stato di "vuoto" è quello in cui i campi fluttuano intorno allo zero. Questo è lo stato di minima energia per un sistema di particelle non interagenti (vd. p. 19, ndr).

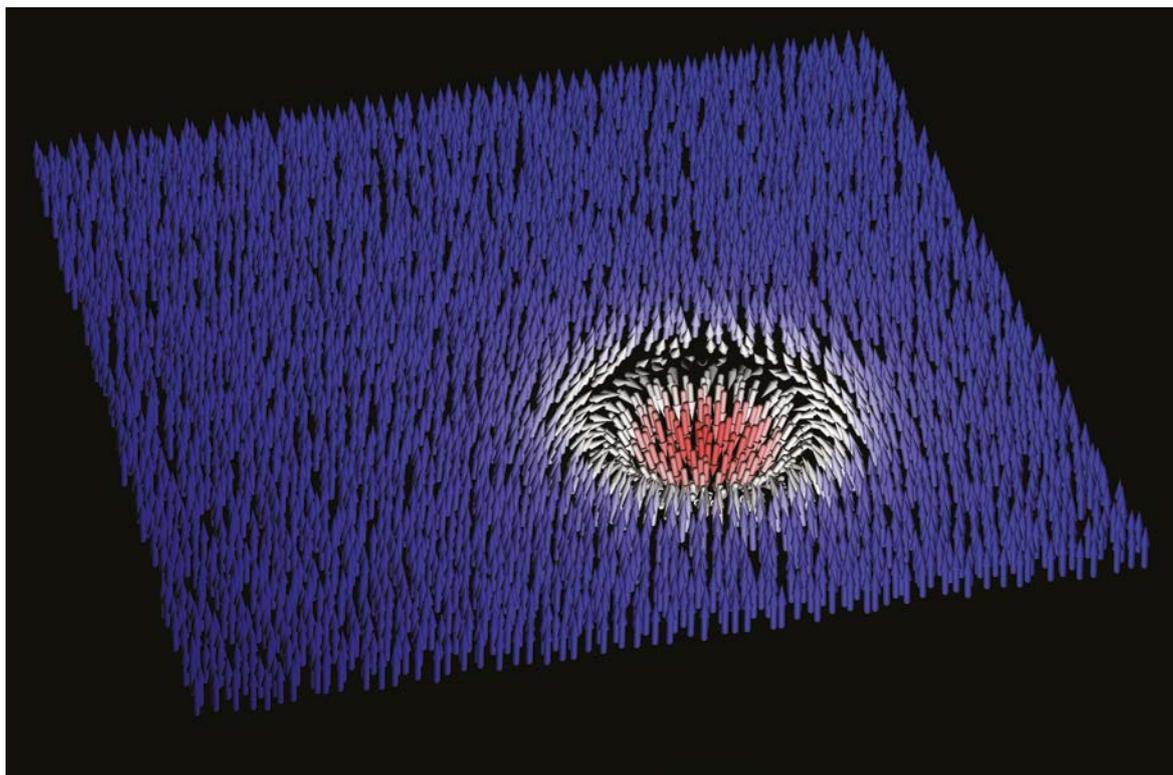
Quando le particelle hanno interazioni, le corrispondenti fluttuazioni quantistiche non sono più riconducibili solo a oscillazioni di frequenza definita. In questo caso, la loro dinamica (il modo in cui si propagano) si modifica e può essere descritta utilizzando il concetto di "potenziale efficace". Se, per semplicità, ci limitiamo a considerare un solo tipo di particella, e quindi un solo tipo di campo, il "potenziale efficace" dipende dai

possibili valori che quel campo può assumere. Il potenziale può quindi presentare dei massimi e dei minimi, e quelli che qui ci interessano in modo particolare sono proprio i minimi: per avere una rappresentazione figurativa di questo potenziale, si pensi al profilo di una catena montuosa, con vari picchi e valli. Lo stato di minima energia, cioè quello che chiamiamo il "vuoto", è quello in cui il campo fluttua in fondo alla valle più profonda. La cosa interessante è che il valor medio delle fluttuazioni del campo non è necessariamente uguale a zero, ma dipende da dove si trova la valle più profonda, cioè la posizione (configurazione) del campo in cui il potenziale ha il suo valore minimo.

Il quadro diventa ancora più intrigante se il sistema che vogliamo descrivere con il nostro campo è fatto di particelle interagenti in equilibrio a una certa temperatura. L'effetto della temperatura è quello di modificare il profilo del potenziale efficace e, quindi, in generale, il numero e la posizione delle sue "valli". Tipicamente, una temperatura alta implica ampie fluttuazioni del campo che inducono "disordine", facendo sì che il valore medio del campo sia nullo (potenziale efficace con un solo minimo in cui il valore medio del campo è zero), mentre quando la temperatura scende e le fluttuazioni termiche si attenuano può succedere che, per effetto delle interazioni, si manifestino le valli e i picchi del profilo iniziale del potenziale efficace: è come se, mano a mano che la temperatura scende, la vera forma della catena montuosa e delle valli venga poco a poco rivelata. Questa dinamica con profilo di valli e picchi



a.  
Esempio di curva del potenziale efficace in funzione del valore del campo. Il potenziale nel caso del "falso vuoto" è più elevato rispetto a quello del "vero vuoto". C'è una specie di barriera tra i due stati. La temperatura, favorendo le fluttuazioni, può aiutare il superamento della barriera e il passaggio verso il "vero vuoto".



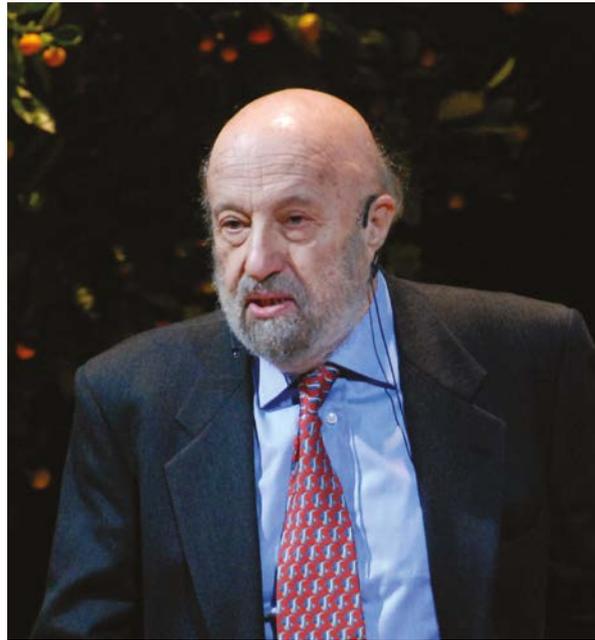
**b.** Rappresentazione della prima prova sperimentale di osservazione del decadimento del falso vuoto, ottenuta al Pitaevskii Center for Bose-Einstein Condensation di Trento. Inizialmente gli atomi si trovano in una configurazione in cui sono tutti allineati verso l'alto (il "falso vuoto"). Il decadimento del falso vuoto avviene quando in una porzione limitata di spazio cambia l'orientamento di parecchi atomi e si formano piccole bolle localizzate (le frecce rosse nell'immagine).

variabile con la temperatura ha interessato (e interessa) il nostro universo, che può essere trattato, con buona approssimazione e su larga scala, come un sistema la cui temperatura scende continuamente mentre esso si espande.

Ma cosa succede a un campo che, a una certa temperatura, è soggetto a un potenziale efficace con molte valli? Si posiziona subito in fondo alla valle più profonda? Lo fa uniformemente in tutti i punti dello spazio in cui è definito? Intuitivamente, se il nostro "profilo montuoso" ha una sola profondissima valle, il sistema non avrà esitazioni e sceglierà quella valle. Il vuoto sarà dunque stabile. Può capitare, però, che proprio accanto alla nostra comoda valle si apra, separato solo da una modesta altura, un precipizio rovinoso. Ecco che si delinea un possibile ruolo della temperatura: favorendo le fluttuazioni, la temperatura può incoraggiare il "salto" verso il precipizio, portandoci al di sopra della piccola altura, e poi nel baratro... In questo caso, lo stato di vuoto provvisorio, o "metastabile", in cui si trovava inizialmente il sistema, lo si chiama "falso vuoto", mentre il "vero vuoto" corrisponde al minimo più profondo, quello "stabile". Per un sistema a temperatura decrescente può succedere che la transizione verso il "vero vuoto" avvenga attraverso uno o più stazionamenti provvisori in altri stati di "falso vuoto". Può anche accadere che regioni diverse dello stesso sistema stazionino per tempi diversi nello stato (o negli stati) di falso vuoto, generando così delle disomogeneità spaziali che possono causare interessanti fenomeni (vd. p. 27 per il caso dell'universo). È evidentemente molto importante capire quali e quanti "vuoti" siano presenti nei modelli che descrivono

i costituenti fondamentali e le loro interazioni e se tra essi ci siano vuoti stabili.

Immaginiamo ora che il nostro potenziale, al diminuire della temperatura, modifichi la forma del suo profilo in modo che si passi da una fase in cui esiste un solo minimo a un'altra in cui quel minimo si separa in due minimi di uguale profondità. Che accade se il nostro profilo montuoso ha due belle valli, della stessa profondità e forma? Per spiegarlo, possiamo usare una citazione di Dante: "intra due cibi, distanti e moventi - d'un modo, prima si morria di fame - che liber uom l'un si recasse ai denti", che è una delle versioni della storia dell'asino di Buridano. Nel linguaggio del potenziale, si tratta di scegliere tra due vuoti equivalenti, e fatta la scelta, la simmetria si rompe spontaneamente. E di nuovo questo ci porta a parlare di temperatura: la rottura spontanea di simmetria, in cui la simmetria della natura - le due belle valli uguali - non viene realizzata dal nostro sistema, perché spontaneamente ne viene selezionata una, è tipica delle basse temperature. Si parla in questo caso di "transizione di fase": ad alta temperatura il campo fluttua intorno a un valore medio nullo, a bassa temperatura lo fa intorno a un valore medio diverso da zero. Il valore medio del campo, diverso nelle due fasi, consente di distinguerle - esso si comporta come "parametro d'ordine" del sistema. Il riferimento all'ordine si spiega perché la fase di alta temperatura è tipicamente "disordinata" a causa delle maggiori fluttuazioni termiche. Se il nostro sistema non fosse quello descritto da un campo quantistico fondamentale, ma piuttosto da un insieme di piccole barrette magnetiche disposte



**c.**  
A sinistra Yoichiro Nambu, a destra Giovanni Jona-Lasinio, i fisici che hanno sviluppato il modello sulla rottura spontanea di simmetria per formazione di condensati, che porta il loro nome.

su una struttura a reticolo e interagenti tra prime vicine, la fase di alta temperatura sarebbe quella in cui le barrette si orientano disordinatamente lungo le infinite possibili direzioni, producendo una magnetizzazione media uguale a zero, mentre in quella di bassa temperatura si allineerebbero ordinatamente tutte in una sola direzione, producendo una magnetizzazione media diversa da zero. In questo caso il “parametro d’ordine” è la magnetizzazione media.

Un effetto spettacolare della fase di bassa temperatura di sistemi che subiscono transizioni di fase è la formazione di “condensati”, come la “condensazione di Bose-Einstein”, che dà luogo ad esempio alla superconduttività: essa è dovuta alla formazione di coppie di elettroni che condensano formando uno stato superconduttore. In questo caso, il ruolo di parametro d’ordine non è giocato da un campo fondamentale, ma dal prodotto di due campi, ciascuno dei quali è associato a un elettrone. Ma cosa c’entra questo con il vuoto? Ebbene, nel vuoto delle interazioni forti, descritto dalla cromodinamica quantistica (QCD), si forma un condensato di quark e antiquark,

e questo condensato è strettamente associato alla rottura spontanea di simmetria di cui parlavamo prima. Esiste un modello molto generale che può descrivere la rottura spontanea di simmetria per formazione di condensati, che è dovuto a Yoichiro Nambu e Giovanni Jona-Lasinio e che viene utilizzato in molti contesti diversi, dalla studio della materia condensata alla meccanica statistica.

C’è un aspetto di straordinaria importanza nello studio delle transizioni di fase: se il sistema passa dalla fase ordinata a quella disordinata in maniera continua, il comportamento del sistema alla transizione dipende solo dalle sue simmetrie e non dal dettaglio delle interazioni microscopiche dei suoi costituenti. Si osserva quindi che sistemi anche molto diversi tra di loro (come, ad esempio, una teoria di campi interagenti a temperatura finita e un sistema di dipoli magnetici) si comportano in modo molto simile vicino alle loro rispettive transizioni di fase.

Questa proprietà, nota con il nome di “universalità” e studiata approfonditamente a partire dalla seconda metà del secolo scorso, è considerata un grande successo della fisica teorica.

#### Biografia

**Maria Paola Lombardo** è ricercatrice in fisica teorica. Si occupa di particelle elementari e di fisica nucleare delle alte energie, usando principalmente metodi numerici. Attualmente è associata senior presso la sezione INFN di Firenze.

# La sostenibile pesantezza del nulla

## Una bilancia per misurare il vuoto

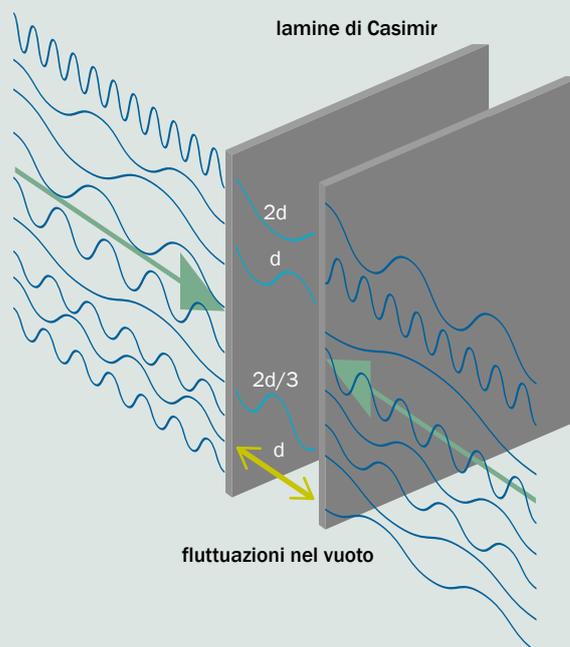
di Annalisa Allocca

Quanto pesa il vuoto? E, soprattutto, perché dovremmo misurare il peso di qualcosa a cui il senso comune associa il concetto di “nulla”?

La fisica classica dà una definizione abbastanza intuitiva del concetto di “vuoto”, che non è altro che “assenza di materia e di radiazione”. Secondo la fisica quantistica, invece, il vuoto è lo stato a più bassa energia possibile in cui un sistema fisico possa trovarsi, e questa energia non è nulla (vd. p. 19, ndr). Questo equivale a dire che un sistema nel suo stato di energia più bassa fluttua incessantemente intorno alla sua energia minima, come un pendolo che continua a fare minuscole oscillazioni intorno alla sua posizione di equilibrio. Secondo questa descrizione, nel vuoto ogni oscillazione del campo elettromagnetico, che per comodità chiameremo “fotone virtuale”, ha un suo stato energetico minimo non nullo, e la somma dei contributi di tutti i fotoni virtuali possibili, che sono infiniti, fa sì che il vuoto sia permeato da un’energia infinita: la cosiddetta “energia del vuoto” o “energia di punto zero”.

Questa energia, che sembrerebbe solo una fantasiosa invenzione di qualche fisico teorico, in realtà trova riscontro in un effetto fisico macroscopico ben noto che è l’“effetto Casimir”: consideriamo due lamine metalliche non elettricamente cariche e molto vicine tra loro immerse in uno spazio vuoto (nel senso quantistico del termine). A causa della riflettività delle superfici, solo alcuni fotoni di vuoto “possono sopravvivere” nello spazio interno alle lamine. Per capire meglio questo punto, pensiamo a una corda di chitarra che è bloccata ai due estremi: il ponte da un lato e il dito dall’altro. Queste posizioni determinano il modo in cui la corda può vibrare e di conseguenza la nota che viene prodotta. Per produrre una nota diversa è necessario cambiare la posizione della mano sulla tastiera.

Una cosa analoga accade al campo elettromagnetico di punto zero intrappolato tra le lamine: data una certa distanza tra le lamine, il campo può “vibrare” solo in determinati modi, non in tutti i modi possibili. Si dice allora che i fotoni di vuoto vengono “quantizzati”. In questo quadro, la pressione esercitata sulle lamine dai fotoni virtuali interni (quantizzati) è inferiore rispetto alla pressione esercitata dai fotoni virtuali sulle pareti esterne delle stesse, e di conseguenza le due lamine vengono spinte l’una verso l’altra. Inoltre, se la distanza tra le lamine fosse tenuta fissa (immaginiamo una sorta di scatola metallica),



a. Schema di una cavità di Casimir. Le lunghezze d’onda dei fotoni virtuali all’interno delle due lamine sono “quantizzate” (sono possibili solo alcune lunghezze d’onda dipendenti dalla distanza tra le due lamine) e sono meno di quelle che si trovano all’esterno. Il risultato è che la pressione esercitata sulle lamine dall’interno sarà inferiore rispetto a quella esercitata dall’esterno, e le due lamine saranno spinte l’una verso l’altra. Questo effetto viene chiamato “effetto Casimir”.

potremmo parlare di una “densità” di fotoni di punto zero interni alla scatola inferiore rispetto alla densità di fotoni di vuoto esterni. Una scatola siffatta è una “cavità di Casimir”.

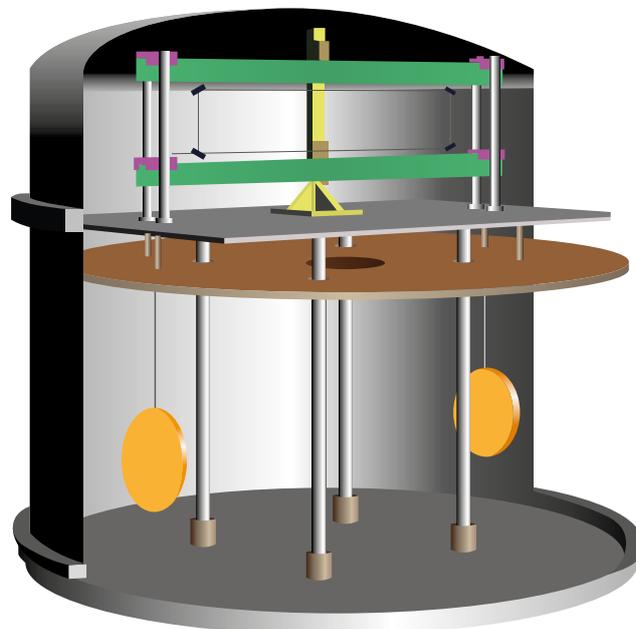
Ma, se il vuoto è “pieno” di un’energia infinita, come si comporta lo spaziotempo in presenza di questa energia? In altri termini: l’energia di punto zero è capace di interagire con il campo gravitazionale? Questa domanda tormenta i fisici da circa un secolo ed è anche la domanda alla base dell’esperimento Archimedes, che vuole misurare il peso (cioè, l’interazione con il campo gravitazionale) del vuoto (vale a dire, dell’energia di punto zero del campo elettromagnetico).

Archimedes è una bilancia estremamente sensibile, costituita da un braccio sospeso alle cui estremità sono fissati due campioni identici. All’interno di uno dei campioni viene variata periodicamente la quantità di energia di vuoto sfruttando l’effetto Casimir. Per capire come, torniamo alla nostra cavità di Casimir immersa nel “mare di fotoni di punto zero”: con pareti trasparenti, la densità di fotoni virtuali interni alla cavità è uguale a quella dei fotoni virtuali esterni. Se però le pareti della cavità diventassero riflettenti, la densità interna dei fotoni di vuoto diverrebbe inferiore a quella esterna, e come un corpo immerso in un fluido che cambia densità, risentirebbe di una spinta dal basso verso l’alto pari al “peso del fluido” spostato, dove il fluido in questione è proprio l’energia di punto zero. Questo è quello che possiamo definire il “principio di Archimede per il vuoto”, da cui prende il nome l’esperimento.

Per variare la riflettività, l’esperimento sfrutta un campione di materiale ceramico che, al di sotto di una certa temperatura detta “critica”, ha una transizione di fase, diventando così superconduttivo e trasformando da “trasparenti” a “riflettenti” le pareti delle cavità di Casimir da cui è costituito. È proprio per lavorare a temperature vicine a quella di transizione del campione che l’intero esperimento è immerso in un criostato raffreddato alla temperatura dell’azoto liquido, a circa  $-200^{\circ}\text{C}$ . A questo punto, se l’energia di vuoto interagisce con il campo gravitazionale nel modo previsto dalla relatività generale, il campione che transisce periodicamente allo stato superconduttivo contiene “meno fotoni di punto zero” dell’altro, e questo risulta in un segnale periodico sul sistema di lettura della posizione della bilancia, che riscontra una differenza di peso tra i due campioni. Il segnale di cui si sta parlando è estremamente piccolo: l’effetto atteso è paragonabile a quello di un virus che salta sul braccio della bilancia! Per rivelare un

segnale così piccolo è necessario ridurre al minimo qualunque fonte di rumore, ed è per questo che l’esperimento Archimedes è installato in uno dei luoghi sismicamente più silenziosi d’Europa: il laboratorio Sar-Grav situato presso la miniera di Sos-Enattos di Lula (NU), nel cuore della Sardegna.

Archimedes, esperimento unico nel suo genere, aggiungerà un tassello importante a uno dei problemi più discussi della fisica moderna, qualunque sarà il segnale che verrà fuori dalle sue misure.



**b.**

Schema della bilancia dell’esperimento Archimedes. Agli estremi del braccio della bilancia (uno dei due parallelepipedi verdi) sono sospesi due campioni (i due dischi arancioni). Ogni campione è costituito da una serie di cavità di Casimir in successione e in una delle due viene periodicamente variata la quantità di energia di punto zero sfruttando l’effetto Casimir. L’intero esperimento è contenuto in una camera da vuoto che sarà, a sua volta, inserita in un grande criostato.

#### Biografia

**Annalisa Allocca** è ricercatrice in fisica presso l’Università “Federico II” di Napoli. Oltre a occuparsi della realizzazione dell’esperimento Archimedes, lavora all’esperimento Virgo nell’ambito della cancellazione del rumore newtoniano, ed è membro della collaborazione Einstein Telescope, in cui si occupa della caratterizzazione del sito di Sos-Enattos.

# L'assenza del tutto

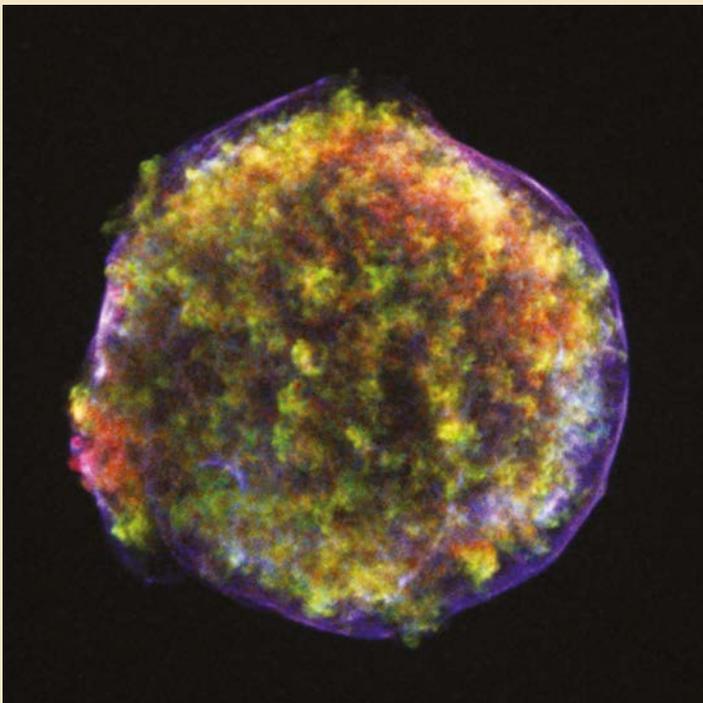
## Il vuoto in cosmologia

di Luca Amendola

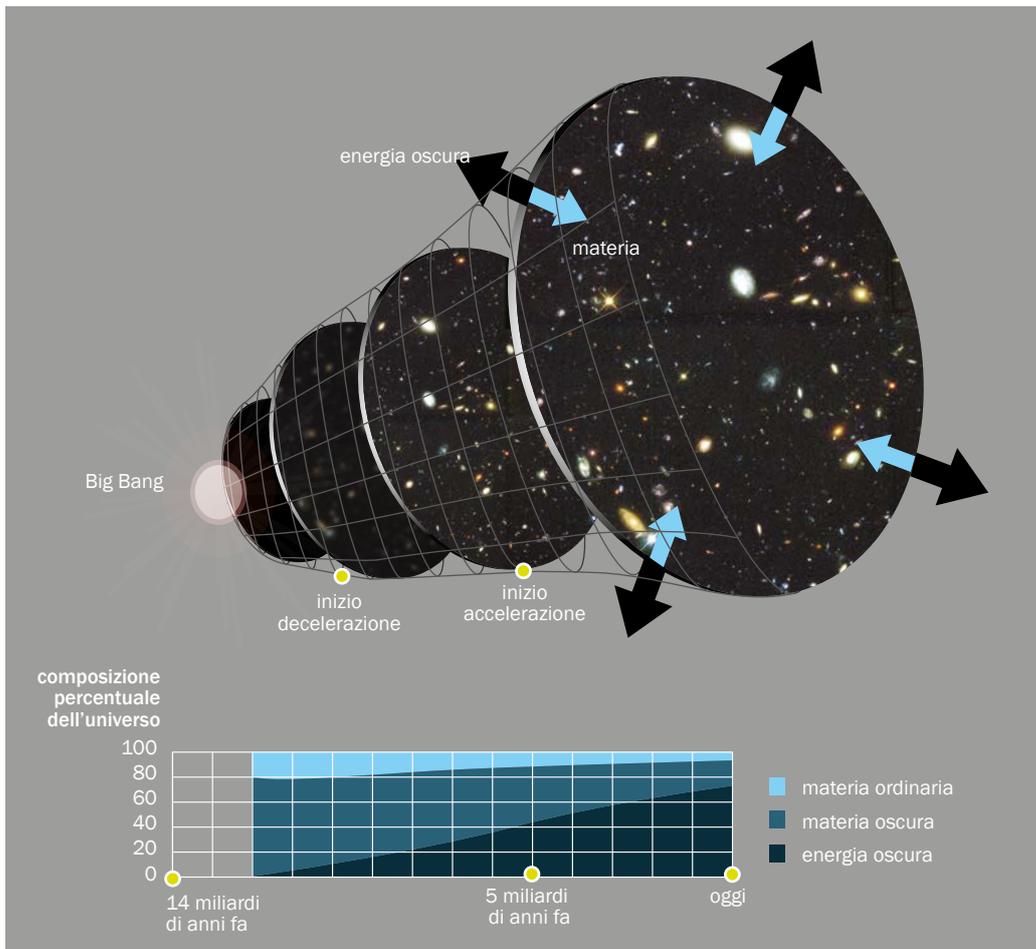
Dal vuoto veniamo, al vuoto torneremo. Questo aforisma dal sapore orientale potrebbe essere il motto della cosmologia moderna. La formidabile serie di eventi che ha portato alla formazione di galassie, stelle, pianeti ed esseri viventi potrebbe essere stata solo un interludio tra due eterni “non-luoghi, non-tempi”, uno prima del Big Bang e uno che seguirà la rarefazione completa della materia alla fine dell’evoluzione cosmica. Ma la scienza non è fatta di aforismi: sebbene molte evidenze osservative possono essere addotte a supporto di queste ipotesi, è bene chiarire subito che gli argomenti che tratteremo in questo articolo, ovvero l’infinito passato e l’infinito futuro, non sono direttamente accessibili. La narrazione che segue deve essere dunque cosparsa del sale della probabilità, non della certezza.

Iniziamo questa storia dalla fine, perché possiamo vederne con ragionevole sicurezza i segni premonitori (*spoiler*: non c’è nessun pericolo imminente, né oggi né nei prossimi dieci miliardi di anni). Sin da circa cento anni (l’anniversario ricorrerà nel 2029), sappiamo che l’universo si espande, ovvero che le distanze tra le galassie aumentano nel tempo. Ad esempio, una galassia distante 100 megaparsec dalla nostra Via Lattea,

pari a circa 330 milioni di anni-luce, si allontana alla velocità di circa 7000 km/sec. Nel 1998 due diversi gruppi di ricerca hanno scoperto però che l’universo non solo si espande, ma che si espande in maniera accelerata. Questa scoperta fu resa possibile da accurate osservazioni di stelle supernovae di un tipo particolare detto Ia, dotate di una luminosità universale, come fari della stessa potenza fabbricati in serie. Dal flusso luminoso che riceviamo possiamo quindi risalire alla loro distanza. Combinando questo dato con lo spostamento verso il rosso del loro spettro, da cui possiamo determinare l’epoca in cui la luce è stata emessa, ne deduciamo una relazione velocità-distanza che, infine, traccia la traiettoria dell’espansione. La rivoluzionaria scoperta dell’accelerazione ha costretto i cosmologi a ridisegnare le fondamenta della loro scienza. Un movimento accelerato richiede infatti una forza repulsiva, mentre la gravità, l’unica tra le forze fondamentali che agisce a distanze cosmologiche, è intrinsecamente attrattiva. Cosa può causare l’accelerazione cosmica? Nonostante la scoperta fosse del tutto inaspettata, la risposta era già pronta da qualche decennio, in attesa che qualcuno la ritirasse fuori dal cassetto delle grandi idee. L’aveva proposta,



a.  
Immagine nei raggi X del resto della Supernova 1572 (la *Nova di Tycho*), una supernova di tipo Ia osservata già nel 1572 dall'astronomo danese Tycho Brahe (vd. anche p. 40 in *Asimmetrie* n. 27, ndr).



b. Evoluzione dell'universo e delle sue componenti (materia ordinaria, materia oscura, energia oscura) dall'istante del Big Bang fino ad oggi.

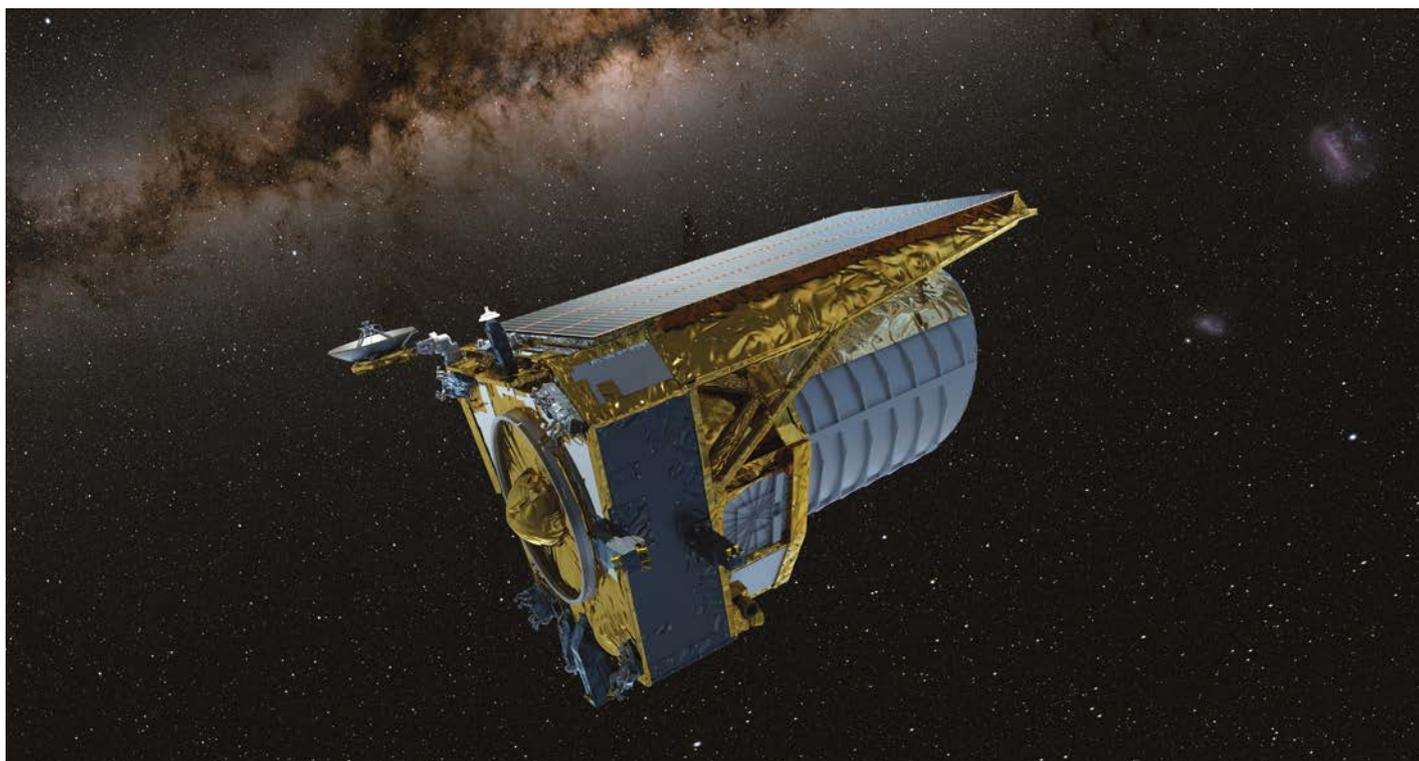
tanto per cambiare, Albert Einstein già nel 1917, in una delle più prodigiose false partenze della storia del pensiero umano. In quell'anno Einstein ipotizzò infatti l'esistenza di una "costante cosmologica", ovvero una forma di energia potenziale completamente uniforme distribuita in tutto lo spazio, al solo fine di riconciliare le sue equazioni della relatività generale con la sua filosofica propensione per uno spaziotempo statico. Ma Georges Lemaître ed Edwin Hubble scoprirono pochi anni dopo che il cosmo è tutt'altro che statico, e la costante di Einstein rimase un espediente ingegnoso ma piuttosto inutile, e perfino un poco imbarazzante. Eppure, la costante di Einstein, detta anche Lambda, possedeva un'insolita proprietà: la sua energia, del tutto uniforme, non muove le cose (le forze nascono dalle variazioni dell'energia potenziale), ma contribuisce comunque alla gravità così come ogni altra forma di energia. E seguendo le regole della relatività generale scopriamo che la costante Lambda e la pressione ad essa associata contribuiscono come una massa negativa, ovvero esercitando una repulsione, anziché un'attrazione. Proprio il *deus ex machina* di cui le scoperte del 1998 avevano bisogno.

La costante Lambda è anche chiamata "energia del vuoto", e ne ha tutto il diritto. Togliamo tutto: atomi, elettroni, protoni, neutroni, radiazione elettromagnetica; togliamo anche la materia oscura e il bosone di Higgs, eliminiamo ogni particella. Quello che resta è la costante cosmologica, e non c'è maniera

di eliminarla, perché non è veicolata da particelle, ma diffusa ovunque. L'energia del vuoto è una proprietà dello spazio, non della materia, e aumenta tanto quanto lo spazio si espande. La sua densità resta però costante (da cui il nome "costante cosmologica"), al contrario della densità di materia, che decresce in un universo in espansione, proprio come un gas si fa rarefatto quando si disperde nello spazio.

Ecco dunque perché la costante cosmologica è così importante in cosmologia: mentre lo spazio si espande, la sua densità costante prende via via il sopravvento rispetto alla densità decrescente di materia raccolta in stelle, gas, polveri, galassie. Già oggi la costante Lambda rappresenta circa il 70% dell'energia complessiva, e questa percentuale è destinata a crescere fino a raggiungere asintoticamente il 100%. A quel punto, la materia rimasta, probabilmente interamente collassata in buchi neri, sarà formata solo da spente ceneri disperse a distanze infinite.

La costante Lambda è in realtà il prototipo di un'intera famiglia di "energie del vuoto" che i cosmologi hanno proposto per spiegare l'accelerazione cosmica e altre meno spettacolari osservazioni astrofisiche, tra cui la radiazione di fondo cosmico e la distribuzione delle galassie. Queste nuove forme ipotizzano l'esistenza di "energia oscura", una sostanza che condivide gli aspetti essenziali della Lambda, ma è un po' meno costante, presentando cioè leggere variazioni nel tempo e nello spazio.



c.  
Immagine artistica del  
satellite Euclid.

Se il nostro cosmo sia permeato dalla pura costante di Einstein o da energia oscura, lo diranno le grandi campagne osservative dei prossimi anni, come il satellite Euclid dell'ESA, lanciato nel 2023.

Il vuoto non è però soltanto l'apocalittico destino dell'universo, ma anche la genesi primordiale: secondo alcune teorie l'universo avrebbe infatti compiuto transizioni da uno stato di vuoto a un altro. Per semplificare, potremmo dire che l'universo ha compiuto un salto quantistico da una costante cosmologica a un'altra. I due vuoti, quello iniziale e quello finale, sono spesso denominati "falso vuoto" e "vero vuoto", rispettivamente (vd. p. 22, ndr).

Una di queste transizioni potrebbe aver innescato la crescita esponenziale dello spazio nei suoi primissimi istanti di vita, la cosiddetta "inflazione". Altre transizioni potrebbero essersi prodotte successivamente, a mano a mano che l'universo si espandeva e si raffreddava. Questi fenomeni hanno molto in comune con le transizioni di fase termodinamiche, come il passaggio da un liquido a un solido. Come il ghiaccio si forma mediante la crescita di cristalli che via via si agglomerano e

solidificano il liquido, così le transizioni cosmiche potrebbero generare regioni della fase "nuova" con caratteristiche di densità, pressione e altre proprietà diverse dalla fase in cui si trovano immerse. Quando queste regioni gradualmente si raccordano e si fondono, si generano nuovi fenomeni potenzialmente osservabili. Esse potrebbero per esempio perturbare lo spazio e creare onde gravitazionali diffuse di intensità sufficiente a essere rivelate da futuri esperimenti come il satellite LISA dell'ESA. Oppure lasciare in giro per l'universo dei residui della transizione, detti "difetti topologici" che, come nodi inestricabili di un tessuto, sopravvivono ad ogni trasformazione e agiscono gravitazionalmente sulla materia ordinaria.

Cento anni dopo la costante di Einstein, stiamo ancora scoprendo la ricca fenomenologia del vuoto. Come l'invenzione dello zero ha rivoluzionato la matematica antica, così la scoperta del vuoto come ente dinamico ha costretto la fisica e la cosmologia a rivedere le loro basi teoriche. La natura del vuoto, la sua evoluzione, le sue proprietà fisiche, sono oggi tra le principali motivazioni scientifiche di molti grandi progetti sperimentali.

#### Biografia

**Luca Amendola** si è laureato alla Sapienza Università di Roma, dove ha anche conseguito il dottorato. È stato ricercatore all'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) fino al 2009 ed è attualmente professore di fisica teorica presso l'Università di Heidelberg in Germania. Ha pubblicato più di 200 articoli scientifici e diversi libri divulgativi, tra cui l'ultimo, "L'Algoritmo del mondo", per le Edizioni Il Mulino.

# Bolle spaziali

## L'irregolare struttura dell'universo

di Alice Pisani

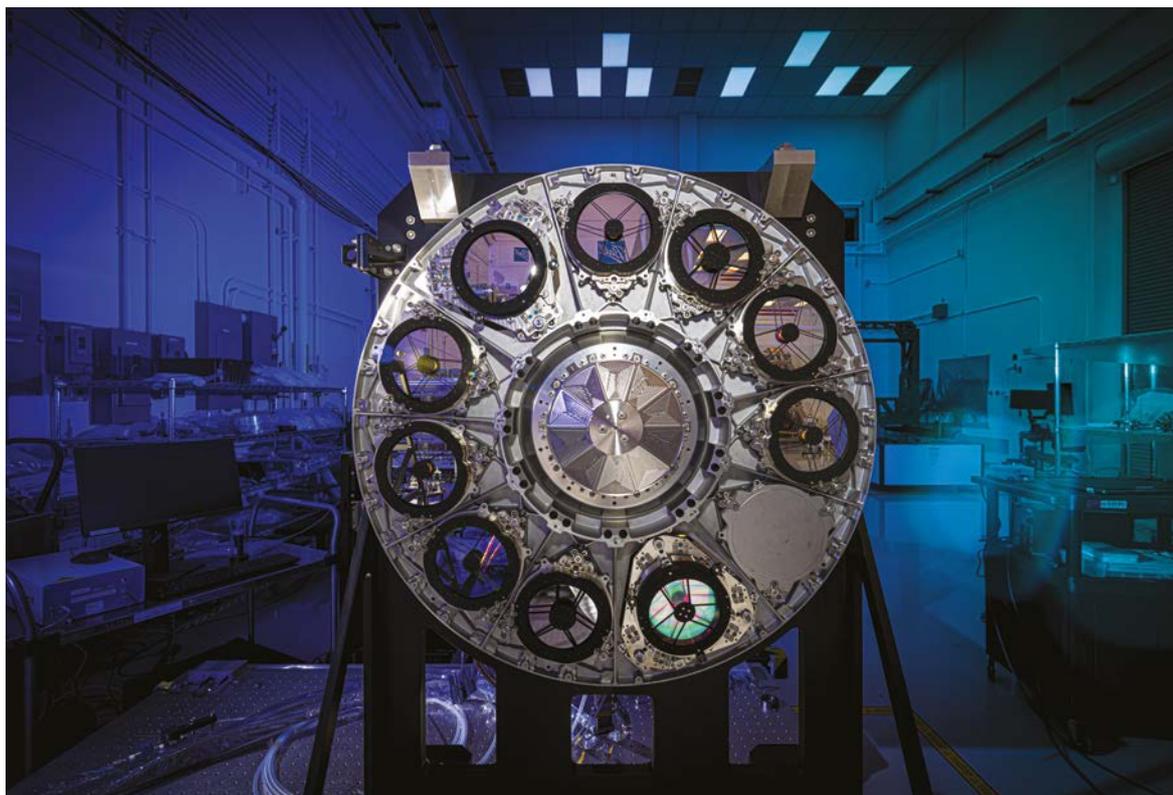
Osservando il cielo con i grandi telescopi moderni è possibile studiare la distribuzione delle galassie nell'universo. Il ramo della cosmologia che studia le grandi strutture dell'universo ha subito uno sviluppo incredibile negli ultimi cinquant'anni. All'inizio, le prime mappe della distribuzione di galassie a grande scala suscitarono un grande stupore tra gli scienziati: lungi dal mostrare una distribuzione uniforme, queste prime mappe suggerivano l'esistenza di una struttura disuniforme, con regioni piene di galassie e regioni con pochissime galassie. Vi fu quindi grande scetticismo nei riguardi di queste osservazioni: come potevano esserci dei buchi nella distribuzione di galassie? Perché non si osservava una distribuzione uniforme? Le osservazioni erano forse incomplete? Nel 1986, un fondamentale articolo di Valérie de Lapparent, Margaret Geller e John Huchra mostrò la prima mappa dell'universo a grandi scale, grande abbastanza da fornire un'evidenza schiacciante: la distribuzione a grandi scale delle galassie non è uniforme! Questa struttura a "schiuma" fu chiamata la "rete cosmica". Il ramo della cosmologia che si occupa di studiare la distribuzione

delle galassie nell'universo aveva appena compiuto un enorme passo avanti. Mentre in alcune zone ammassi di galassie e filamenti delineavano una struttura ben definita, la maggior parte del volume osservato mostrava regioni con pochissime galassie, i cosiddetti "vuoti cosmici".

I vuoti, enormi regioni dalle forme e taglie variegata, possono essere considerati le strutture più vaste dell'universo. Con dimensioni che vanno dalle decine alle centinaia di megaparsec, dominano il volume dell'universo. All'inizio, i vuoti non furono considerati strumenti utili per studiare il nostro universo nel suo insieme, mentre interessava di più comprendere come potessero formarsi tali oggetti e come evolvessero. Anche più avanti, nel 1995, benché Barbara Ryden proponesse di usare i vuoti per estrarre informazioni cosmologiche, questo non fu ancora possibile: a quei tempi non si conoscevano ancora abbastanza vuoti per poter ricavare informazioni utili. Ciò nonostante, almeno in linea di principio, abbiamo vari motivi per credere che i vuoti possano contribuire a rispondere alle grandi domande della cosmologia del nostro



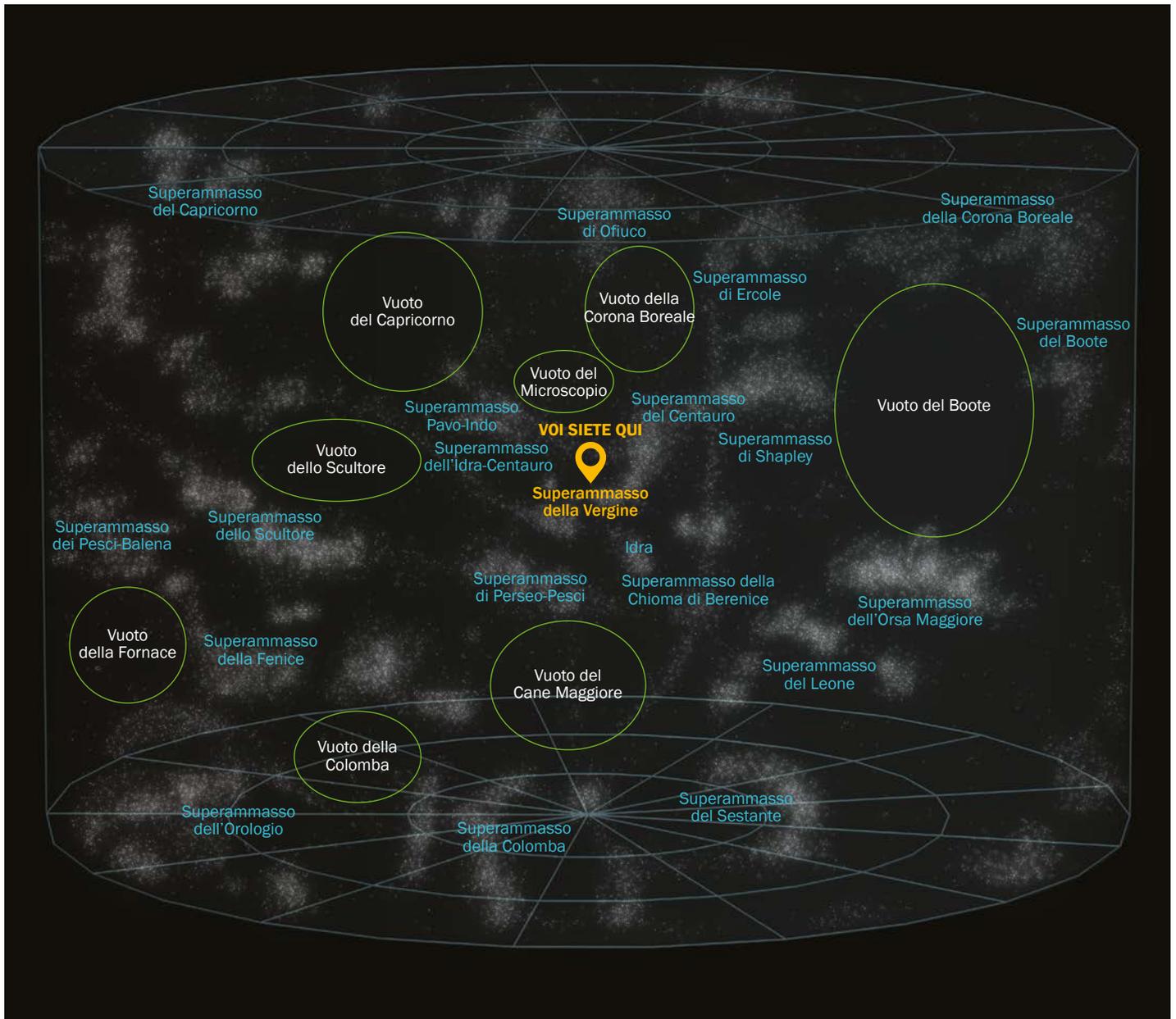
**a.** Margaret Geller e John Huchra ripresi mentre studiano i dati che hanno portato a evidenziare la struttura a grande scala dell'universo, formata da addensamenti, filamenti e vuoti. L'immagine a forma di ventaglio in alto mostra una porzione di universo in cui le galassie (i punti colorati) si distribuiscono proprio a formare questa struttura a spugna, detta la "rete cosmica".



**b.** Ruota di assemblaggio degli elementi del telescopio spaziale Nancy Grace Roman, costituita da un centro conico a forma di stella circondato da dieci piccoli cerchi bordati di nero. La ruota è sorretta da un telaio, ciascuno degli elementi riflette la luce nei toni del blu e del turchese.

secolo. Sappiamo che l'universo è in espansione accelerata e postuliamo l'esistenza dell'energia oscura per spiegare le nostre osservazioni. Ad oggi non si sa cosa sia l'energia oscura e, per studiarla, grandi collaborazioni di scienziati lavorano assiduamente per sviluppare, costruire e utilizzare telescopi sempre più performanti. Primo fra tutti si può citare il telescopio Euclid, lanciato dall'ESA nel 2023, seguito da DESI, dal Roman Space Telescope, dalla missione Vera Rubin, dal telescopio PFS di Subaru e dalla missione SPHEREx. Oltre all'energia oscura, un'alternativa per spiegare l'accelerazione dell'espansione dell'universo è una modifica della teoria della relatività generale. Studiare la distribuzione delle galassie dell'universo a grandi scale può gettar luce anche su alcuni altri misteri della cosmologia moderna, quali la natura della materia oscura, che costituisce circa un quarto del nostro universo, e la massa dei neutrini. La vasta gamma di programmi scientifici negli anni a venire mira a costruire mappe dell'universo sempre più vaste e dettagliate per rispondere a questi quesiti. Ebbene, l'avvento di dati grazie ai telescopi moderni è proprio ciò che ci porta all'età d'oro per i vuoti: la cosmologia dei vuoti cosmici necessita di una combinazione di giganteschi volumi osservati (i vuoti sono grandi oggetti e ne servono numerosi per studi statistici) in parallelo con un'alta precisione dei sondaggi per osservare anche le galassie a bassa massa, riuscendo così a catturare la posizione delle galassie fin nell'interno dei vuoti, permettendoci di studiare la struttura interna di queste sotto-densità in dettaglio. Ma perché studiare i vuoti? Perché cercare informazioni sul nostro universo proprio nelle regioni in cui c'è meno materia,

meno galassie? Perché i vuoti sono regioni dell'universo dove regna l'energia oscura. Per definizione, nei vuoti vi sono poche galassie. Sappiamo che la materia oscura costituisce lo "scheletro" per la distribuzione delle galassie dell'universo; quindi, se nei vuoti vi sono poche galassie, c'è anche poca materia e quindi questi giganteschi oggetti si evolvono governati dall'energia oscura. Se vogliamo comprendere l'energia oscura, è del tutto ragionevole concentrare la nostra attenzione sulle regioni dell'universo che sono state le prime a "sentire" gli effetti dell'energia oscura, essendo dominati da questa componente: queste regioni sono i vuoti cosmici. I vuoti sono quindi uno strumento importante per studiare la composizione e l'evoluzione dell'universo. Ma come possiamo estrarre vincoli sui modelli cosmologici dai vuoti? Sappiamo oggi che si possono utilizzare vari metodi. Primo fra tutti è lo studio della forma dei vuoti, ovvero del loro profilo di densità. Benché i vuoti osservati abbiano forme variegata, ipotizzando che nell'universo non vi siano né una direzione né una posizione privilegiate, in media ci aspettiamo che la forma dei vuoti debba essere sferica. Le dimensioni dei vuoti osservate nel cielo possono essere ricondotte in distanze fisiche, ma per fare questo bisogna fare delle assunzioni sulla composizione dell'universo. Se supponiamo quindi che il nostro universo abbia una data composizione, si possono convertire le dimensioni osservate dei vuoti in distanze fisiche e ottenere una misura media delle dimensioni dei vuoti nelle varie direzioni in cielo. Se questa misura mostra che i vuoti in media sono sferici, allora significa che la nostra ipotesi iniziale sulla composizione

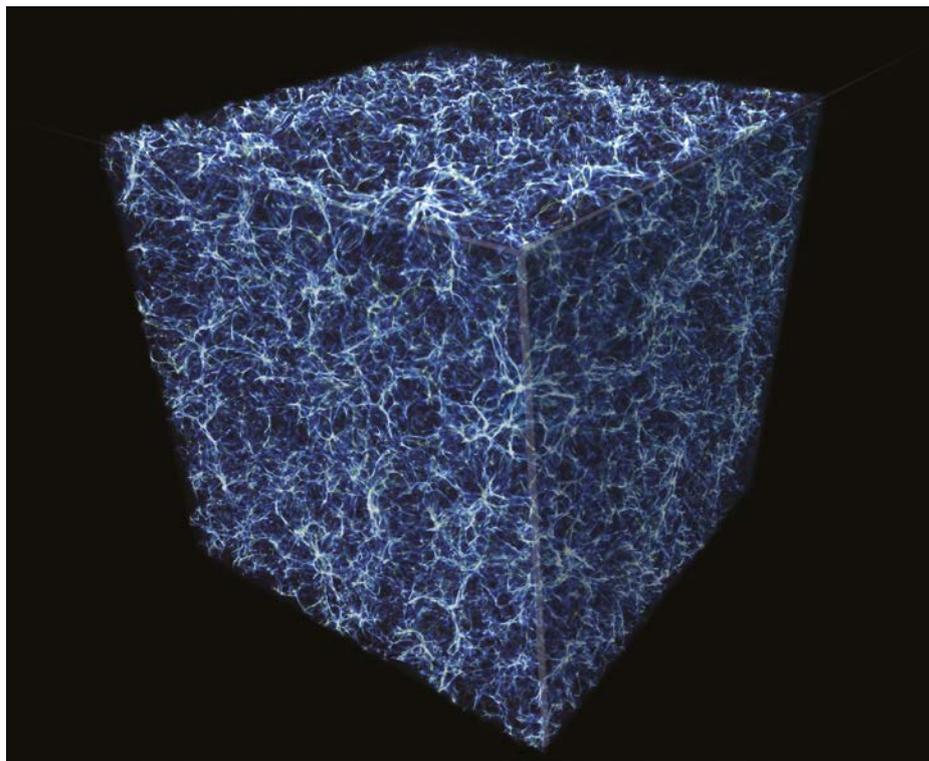


c. Grandi strutture nell'universo locale. Nella distribuzione di galassie si notano i vuoti cosmici.

dell'universo è corretta, altrimenti dobbiamo rivederla per rendere compatibile il modello teorico con le osservazioni. Questo metodo di studio delle strutture cosmiche è noto come il "test di Alcock-Paczynski", dal nome degli scienziati che proposero l'utilizzo di "sfere standard" per studiare l'universo. In parallelo, siccome le velocità delle (poche) galassie che compongono i vuoti avranno un impatto sulla forma misurata dei vuoti, dobbiamo modellarle, considerando la relatività generale. Quindi misurare il profilo di densità dei vuoti permette di porre dei vincoli alla composizione dell'universo e di testare la relatività generale su scale cosmologiche e in regioni a bassa densità, aprendo un nuovo regime dove validare la teoria

di Einstein. Questo metodo permette così di ottenere vincoli stringenti sul nostro universo utilizzando i vuoti cosmici. Il secondo metodo per estrarre informazioni dai vuoti è contarli. Siccome i vuoti sono dominati dall'energia oscura, è facile comprendere come la dimensione e il numero dei vuoti sarebbero diversi se, ad esempio, il nostro universo fosse stato dominato dall'energia oscura a tempi diversi da quanto è previsto dal modello cosmologico standard, o se l'energia oscura avesse proprietà che variano con il tempo. Nel 2015 è stato infatti dimostrato che, utilizzando nei prossimi anni i telescopi Euclid e Roman per contare i vuoti, si potranno vincolare le proprietà dell'energia oscura. Inoltre, il conteggio dei vuoti

**d.**  
Simulazione della distribuzione di materia nell'universo. La materia si aggrega in filamenti e zone molto dense, circondate da grandi zone vuote.



permetterà anche di ottenere limiti alle proprietà dei neutrini e di districare gli effetti cosmologici prodotti dai neutrini dagli effetti indotti dell'energia oscura, cosa difficile da ottenere con altre tecniche. L'applicazione delle tecniche di conteggio dei vuoti sta incominciando a dare i primi frutti: recentemente è stato infatti possibile utilizzare per la prima volta il conteggio dei vuoti osservati dai dati del telescopio BOSS per vincolare la composizione dell'universo. Questa prima applicazione ai dati è un'importante prova di fattibilità e mostra le potenzialità di questo metodo.

Infine, benché possa sembrare contro-intuitivo (visto che nei vuoti c'è davvero poca materia), gli scienziati pensano d'aver trovato nei vuoti un nuovo strumento per vincolare le caratteristiche particellari della materia oscura. Infatti, se è vero che nei vuoti c'è poca materia oscura e che quindi si aspetta un segnale basso (ad esempio un segnale di radiazione gamma,

prodotto dall'annichilazione o decadimento delle particelle di materia oscura), è anche molto basso il numero delle sorgenti astrofisiche che possono emettere radiazione, proprio perché i vuoti sono regioni con poche galassie. Quindi, benché il segnale per la materia oscura sia più debole nei vuoti, il rapporto tra segnale e rumore è in realtà più elevato che in altre regioni dell'universo, in cui c'è più materia oscura ma vi sono anche più sorgenti astrofisiche. In modo inaspettato i vuoti possono quindi essere anche un eccellente strumento per studiare le proprietà della materia oscura.

Grazie ai dati di grandi telescopi come Euclid, siamo entrati nell'età d'oro dei vuoti cosmici: queste gigantesche regioni dell'universo, fino a poco tempo fa inesplorate, saranno la chiave per risolvere alcuni tra i misteri più eccitanti della cosmologia moderna.

#### Biografia

**Alice Pisani** è una cosmologa italiana. Dopo aver studiato alla Sapienza Università di Roma, ha ottenuto un dottorato in astrofisica alla Sorbonne Université Pierre et Marie Curie. Ha poi lavorato per numerosi anni come ricercatrice e professoressa all'Università di Princeton, negli Stati Uniti, al Center for Computational Astrophysics dell'Istituto Flatiron e alla Cooper Union. È la *principal investigator* della borsa ERC COSMOBEST e, dal 2024, direttrice di ricerca del CNRS in Francia.

# La sconfitta dell'horror vacui

di Matteo Leone

storico della fisica

Nel IV libro della "Fisica", Aristotele si prende gioco del vuoto ritenendolo una contraddizione in termini. Poiché lo spazio non è altro che il limite dei corpi, non può esservi uno spazio se non in presenza di corpi. A partire da questa definizione, Aristotele mette in evidenza i paradossi che deriverebbero ammettendo l'esistenza del vuoto, arrivando persino a concedersi una battuta: "a chi consideri il cosiddetto vuoto nella sua vera essenza, risulterà che esso è veramente vuoto".

Non solo paradossi, ma anche osservazioni empiriche sembravano contraddire nell'antichità l'esistenza del vuoto. Un secolo prima di Aristotele, Empedocle riferiva degli effetti curiosi che si hanno con la "clessidra", un recipiente munito di un collo lungo e stretto, dotato di orifizio, e con il fondo bucherellato, utile ad attingere e trasportare acqua e altri liquidi o filtrare vino. Se si tappa l'orifizio e si immerge il recipiente in acqua, questa non entra; se si stappa l'orifizio, l'acqua entra dai buchi in basso; se lo si tappa nuovamente e si solleva il recipiente fuori dall'acqua, l'acqua non esce, nonostante i buchi! Solo stappando nuovamente l'orifizio, l'acqua fuoriuscirà.

Osservazioni come quella di Empedocle furono utilizzate nel Medioevo come prova che la natura aborrisce il vuoto (*horror vacui*). Per Giovanni Buridano, ad esempio, la possibilità di bere del vino con una canna era causata dalla necessità che "un qualche corpo segua sempre immediatamente l'aria che si aspira verso l'alto per prevenire la formazione di un vuoto".

Dimostrazioni sperimentali in favore dell'orrore della natura per il vuoto furono portate perfino da Galileo. Tuttavia, era lui stesso a notare che tale vuoto si può formare applicando una forza misurabile. Ad esempio, nel funzionamento delle pompe aspiranti, possiamo osservare sia la "virtù del vacuo" nel far risalire l'acqua sia i suoi limiti: l'ascesa dell'acqua si interrompe infatti all'altezza di poco più di 10 metri.

Evangelista Torricelli, allievo di Galileo, vedeva la cosa diversamente e così riassumeva la questione del vuoto: "molti hanno detto che il vacuo non si dia, altri che si dia, ma con repugnanza della natura e con fatica". Ma, aggiungeva: "non so già che alcuno abbia detto che si dia senza fatica e senza resistenza della natura". A supporto di questa idea, Torricelli mostrava che se si riempivano di mercurio dei vasi di vetro stretti e lunghi e li si capovolgeva in un catino contenente altro mercurio, questo scendeva fino ad arrestarsi "all'altezza d'un braccio e  $\frac{1}{4}$ , et un dito di più" (circa 76 cm). Il risultato non



a. Esperimento di Torricelli con vasi di forma diversa (Evangelista Torricelli, lettera a Michelangelo Ricci, 11 giugno 1644).

cambiava al cambiare della forma del vaso: sia che la parte superiore fosse cilindrica o avesse un rigonfiamento a fiasco, il livello del mercurio rimaneva lo stesso: “segno quasi certo che la virtù non era dentro”, perché il vaso a fiasco avrebbe dovuto contenere “più robbia rarefatta et attraente”. Sopra il mercurio si era formato il vuoto, ma non era questo responsabile della sospensione del mercurio. Il risultato era dovuto al fatto che “noi viviamo sommersi nel fondo d’un pelago d’aria”, il cui peso è “circa 1/400 del peso dell’acqua”.

Ma chi portò a compimento la grande intuizione di Torricelli fu Blaise Pascal, attraverso veri e propri esempi di scienza spettacolo. Come definire diversamente l’esperimento di Rouen del 1646, nel quale due tubi di vetro della lunghezza di 13 metri, fissati a un albero di nave, venivano riempiti uno di acqua e l’altro di vino e poi capovolti? Prima di eseguire l’esperimento, Pascal, con arte consumata, chiedeva al pubblico se la colonna di vino sarebbe risultata più alta o più bassa della colonna d’acqua. Il vino è certamente più “spirituale” dell’acqua, rispondevano i dotti, e dunque la colonna di vino sarà più schiacciata e quindi meno alta di quella d’acqua. Ma, per via della minor densità del vino, esattamente il contrario si produceva...

Decisiva nel superamento dell’idea di *horror vacui* fu poi la celebre esperienza del 1648 nella quale Pascal fece portare un tubo pieno di mercurio sulla cima del monte Puy-de-Dôme. L’altezza della colonna di mercurio risultò essere di 85 mm inferiore rispetto a quella raggiunta alla base della montagna: “forse la natura aborre il vuoto di più sui rilievi che non in pianura?”. Attraverso una serie di ingegnosi esperimenti, spesso reali, talvolta mentali, Pascal arriverà a comprendere che “il peso della massa d’aria produce tutti quegli effetti che erano stati attribuiti all’orrore del vuoto”.

Per Pascal, al di sopra del mercurio, dell’acqua o del vino nei suoi tubi, si era formato il vuoto. Ma non era questo a sostenere i liquidi, bensì la “pressione” esercitata dall’atmosfera. Di lì a poco, con l’invenzione della pompa pneumatica e i primi esperimenti di Otto von Guericke, Robert Boyle e altri, si riusciranno a produrre gradi di vuoto sempre più accentuati, a studiare sistematicamente diverse fenomenologie in condizioni di bassa pressione, fino allo studio dei fenomeni di scarica nei gas rarefatti che a fine ‘800 inaugureranno la nascita della fisica moderna.



b.  
Un ritratto di Blaise Pascal (Francois Quesnel, circa 1691, olio su tela, Reggia di Versailles).

[as] intersezioni

# Vuoti di memoria

di Sergio Della Sala

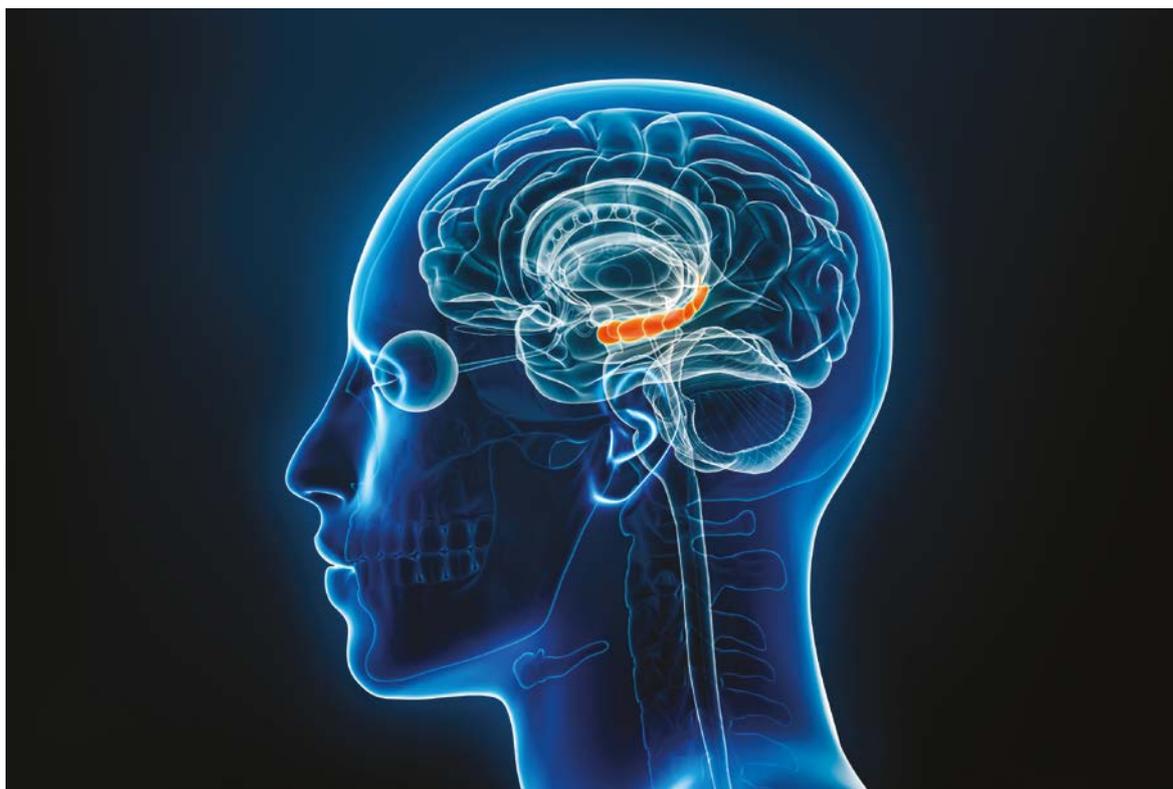
*professore di neuroscienze cognitive*

“Vuoto di memoria” è un’espressione colloquiale che identifica episodi in cui una persona non riesce a recuperare conoscenze che aveva, ricostruire eventi precisi del proprio passato o ricordare cosa deve fare in un dato momento. Il “vuoto” è una metafora per descrivere occasioni in cui i ricordi che riteniamo di avere non affiorano quando richiesti. Poeti e letterati hanno usato altre metafore simili per descrivere una difficoltà di accesso alla nostra memoria: nebbia che fa svanire i ricordi, memorie come foglie che volano via in autunno o che si rifugiano in un villaggio remoto senza telefono e, ancora, tele con dipinti dai dettagli affievoliti, sabbia che si disperde al vento, puzzle con frammenti mancanti, vetri appannati che nascondono la realtà, fiumi che trasportano lontano le nostre impressioni.

I vuoti di memoria sono un espediente narrativo ricorrente in letteratura, nei fumetti e nei film, soprattutto nei gialli, poiché rappresentano un’esperienza universale che permette di creare suspense e mistero e intrigare lettori e spettatori, facendoli riflettere su questioni complesse legate all’identità, alle diverse possibili ricostruzioni della realtà, alla funzione della memoria e alla sua perdita nelle nostre attività quotidiane.

Nella pratica clinica però si tratta di un termine non specifico, che abbraccia condizioni e situazioni molto diverse tra loro. Non esiste “la” memoria, ma molti diversi tipi di memoria che formano un modello cognitivo complesso. Entro questo modello, le varie declinazioni della memoria sono indipendenti l’una dall’altra; in termini tecnici che i due tipi di memoria “dissociano”, cioè occupano uno spazio diverso nel sistema cognitivo e sono verosimilmente generate





**a.**  
Vista laterale di un cervello con evidenziato l'ippocampo.

da percorsi neurali diversi. Questo significa che una forma di memoria può funzionare bene anche se un'altra forma è difettosa. Una persona con un danno cerebrale potrebbe per esempio conservare intatta la memoria a breve termine, quella che ci permette di ricordare una password appena vista fino al suo uso, ma avere deficit di quella a lungo termine, che ci permette di accedere a informazioni che abbiamo codificato nel passato o di apprendere nuove informazioni. Allo stesso modo, una persona potrebbe dimostrare difetti nella memoria episodica, che ci permette di ricordare eventi precisi (cosa abbiamo mangiato ieri sera), ma avere un normale accesso alla memoria semantica, che raccoglie le nostre conoscenze enciclopediche che non sono associate a un momento preciso del nostro passato (Parigi è la capitale della Francia). Ognuno di questi tipi diversi di memoria può esprimere “vuoti” specifici. Per cui, così come non si parla di memoria, bensì di memorie, non si deve parlare di amnesia, bensì di amnesie, che sono tante quanti sono i tipi di memoria. La memoria che ci permette di ricordare cosa dobbiamo fare si definisce “prospettica”, quella che si riferisce alla nostra vita si chiama “autobiografica” e tutte le memorie di cui non siamo consapevoli, per esempio trovare il bagno in casa nostra senza prestare attenzione alla mappa del nostro appartamento, si dicono “implicite”. La memoria implicita include anche la cosiddetta memoria “procedurale”, che ci consente di andare in bicicletta senza pensare ai movimenti che dobbiamo fare. Ogni memoria ha i suoi vuoti, ma non è necessario preoccuparsi, se ci capita di avere uno o l'altro di questi vuoti di memoria, a meno che essi non divengano persistenti, si aggravino progressivamente, interferiscano pesantemente nel quotidiano o si associno ad altri segni o sintomi.

Se dovesse capitare di esperire vuoti di memoria, bisogna resistere alla tentazione di diventare preda di scorciatoie fittizie, come quelle offerte da costosi programmi computerizzati per migliorare la memoria, che sono di moda ma non sono sostenuti da dati sperimentali. Tramite questi programmi si impara a svolgere meglio solo il particolare compito stimolato: l'abilità non si generalizza. E non può che essere così, dato che, come abbiamo visto, non esiste “la memoria”, esistono molti sistemi diversi, molte memorie fra loro distinte e dissociabili.

Però si può migliorare la propria strategia di apprendimento, la capacità di catalogare e di ragionare, studiando, leggendo, frequentando gli amici, praticando sport, ridendo e piangendo. Se si vive bene, si pensa bene, se si pensa bene la memoria ne giova e, invece di subire vuoti, li riempiamo di nuovi ricordi.

# Turbolente emozioni

di Giuliana Galati

Ogni volta che viaggio in aereo non posso resistere alla tentazione di chiudere gli occhi e appisolarmi, cullata dal suo movimento. Ogni tanto, però, capita di risvegliarmi bruscamente perché il dolce movimento si è trasformato in improvvisi scossoni da paura, che fanno pensare che il velivolo stia precipitando.

**[as]: Un vuoto d'aria!**

**[ala]:** Non esistono i vuoti d'aria!

**[as]: Chi ha parlato? Che significa?**

**[ala]:** Calma! Sono l'ala sinistra del tuo aereo. Rilassati, non c'è nessun pericolo e lo sbalzo che hai sentito non è dovuto a un "vuoto d'aria". Alla quota a cui volano gli aerei non è possibile che si creino delle zone in cui mancano totalmente molecole. Tutt'al più si tratta di una rapida variazione nella densità dell'aria attraverso la quale l'aereo vola.

**[as]: E perché la densità varia così all'improvviso? A me sembra proprio di cadere!**

**[ala]:** Dipende, ci sono vari fattori, come variazioni di

temperatura, pressione o umidità nell'atmosfera. Quelli che volgarmente chiami "vuoti d'aria" sono zone in cui c'è una diminuzione della densità dell'aria e quando un aereo attraversa una di queste aree può sembrare che perda quota improvvisamente, ma in realtà sta solo attraversando una zona con aria meno densa.

**[as]: C'entrano le cosiddette "turbolenze"?**

**[ala]:** In realtà le turbolenze sono un'altra cosa... Io ho esperienza di entrambe, lascia che ti spieghi. Le turbolenze sono movimenti irregolari e caotici dell'aria, e anche loro possono essere causate da diversi fattori...

**[as]: Per esempio?**

**[ala]:** Per esempio quando il sole riscalda la superficie terrestre, l'aria calda tende a salire, creando correnti ascensionali. Quando questa aria calda incontra strati di aria più fredda, si possono creare movimenti irregolari che vanno sotto il nome di "turbolenza convettiva".

Oppure, alle volte è l'aereo stesso a creare vortici d'aria che possono causare turbolenza all'aereo che passa dopo nella stessa zona. Hi, hi, hi! Scherzi tra aerei!



**[as]: Ma come scherzi tra aerei!? Ma vi pare il modo di spaventare noi poveri umani al vostro interno?**

**[ala]:** Su su, quante storie. Sto spiegando tutto per filo e per segno proprio per farvi smettere di avere paura. Allora, eravamo rimasti alla turbolenza di scia... Poi c'è la turbolenza da vento di montagna (onde "orografiche"), che si ha quando il vento soffia sopra le catene montuose, creando correnti d'aria turbolente sul lato sottovento delle montagne, che possono salire molto in alto, sino alla troposfera. Oppure le turbolenze "da corrente a getto", flussi d'aria veloci che si trovano ad alta quota. Infine ci sono le peggiori: le turbolenze "in aria chiara".

**[as]: Perché peggiori? Sono più pericolose? E poi che significa "aria chiara"?**

**[ala]:** Ma no... non sono più pericolose, solo che sono difficili da prevedere, perché non sono associate a nessun tipo di nube e quindi difficilmente rivelabili dai radar meteo di bordo. Noi ali siamo lì che voliamo tutte tranquille e all'improvviso ti senti solleticare da tutti i lati. Ma anche loro sostanzialmente dipendono dalle correnti a getto.

**[as]: Cosa sono esattamente queste correnti a getto?**

**[ala]:** Le correnti a getto, che noi chiamiamo "jetstream", sono flussi d'aria veloci che si trovano ad altitudini elevate, generalmente tra i 9000 e i 12.000 metri. Si formano a causa delle differenze di temperatura tra le masse d'aria polari e quelle tropicali. Furono scoperte dai piloti militari della seconda guerra mondiale, i primi che abbiano volato a così alta quota. Nel novembre 1944 un centinaio di bombardieri americani B29 volavano vicino a Tokyo, quando i piloti si accorsero che stavano viaggiando sui 720 km/h, 150 km/h più della massima velocità che i B29 potevano raggiungere. A causa di questa accelerazione inaspettata, solo una cinquantina di bombe su mille finì sui bersagli!

Oggi che le conosciamo meglio, possiamo sfruttare queste correnti per risparmiare carburante e ridurre i tempi di volo quando voliamo in direzione del getto (in genere nella direzione ovest-est). Quindi sono anche correnti positive, non creano solo turbolenze!

**[as]: Ma quindi i vuoti d'aria e le turbolenze non sono pericolosi per un aereo?**

**[ala]:** No, non sono pericolosi, te l'assuro! Gli aerei sono progettati per resistere alle turbolenze e ai cambiamenti di densità dell'aria. Convegno che possa essere un po' meno piacevole per il sonno dei passeggeri, ma noi ali non ci spezziamo mica! E i piloti sono addestrati per gestire queste situazioni, fanno del loro meglio per minimizzare il disagio, ma spesso, almeno per un po', è inevitabile e bisogna avere pazienza. L'importante è tenere sempre le cinture di sicurezza allacciate!

**[as]: Non so se sono tranquilla ancora... come fate a volare nonostante tutto?**

**[ala]:** Il segreto per volare sta nella "portanza", generata dalle ali. Quando un aereo si muove, l'aria scorre sopra e sotto le ali. La forma delle ali è tale che l'aria che passa sopra si muove più velocemente di quella sotto, creando una differenza di pressione che solleva l'aereo. Ovviamente questa è una spiegazione molto semplificata, i principi di fisica che entrano in gioco sono tantissimi e persino gli esperti a volte non si mettono d'accordo su quali siano quelli predominanti. Ad ogni modo, questi principi funzionano anche durante le turbolenze o se varia la densità dell'aria, anche perché i piloti possono regolare l'assetto dell'aereo e la velocità per mantenere un volo stabile nonostante le condizioni atmosferiche variabili. Più tranquilla ora?

**[as]: Direi di sì, se non ti spiace penso proprio che tornerò a schiacciare un pisolino...**

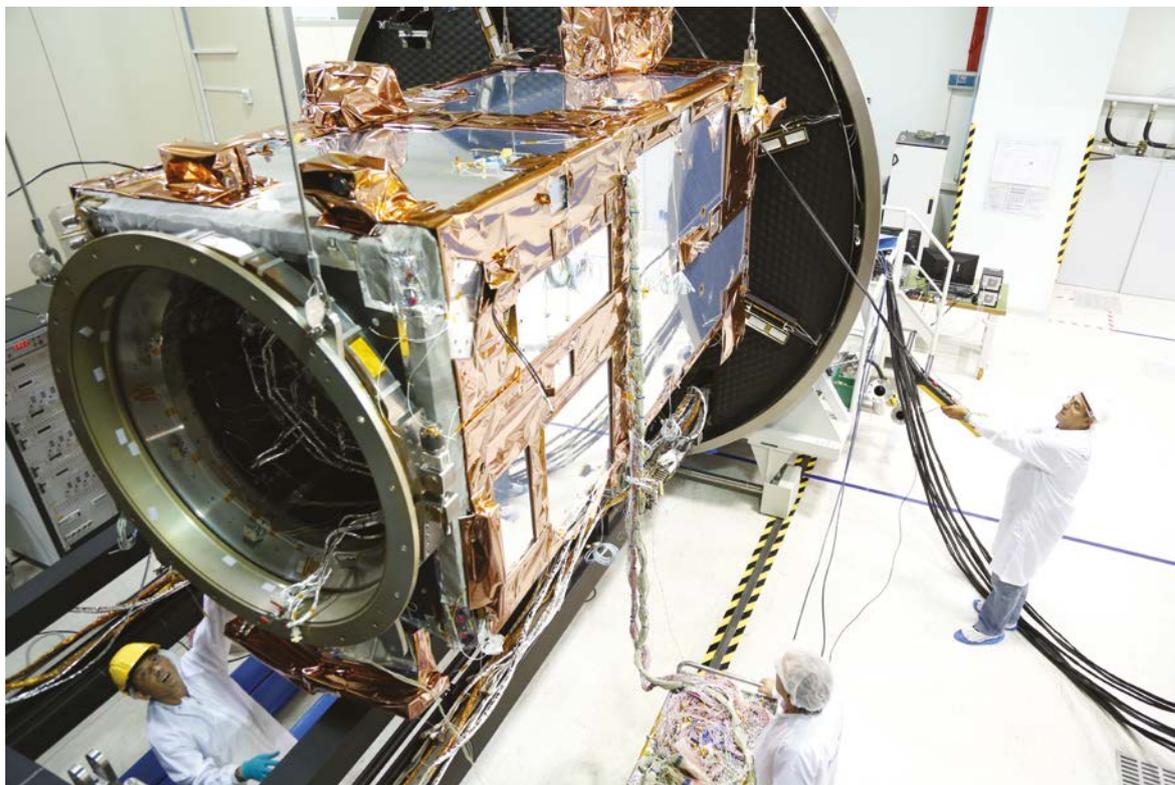
**[ala]:** Per sicurezza lascia sempre le cinture allacciate però, mi raccomando!



[as] riflessi

# Il cielo in una stanza

di Matteo Massicci



a.  
Una camera termovuoto presso il Johnson Space Center della NASA.

Per quanto costituisca “l’ultima frontiera” dell’esplorazione umana, come recita l’incipit di una famosa saga televisiva di fantascienza, l’attributo che si presta meglio a descrivere lo spazio è forse quello di “vuoto”. Con una densità caratteristica enormemente inferiore a quella dell’atmosfera terrestre, lo spazio interplanetario e interstellare si avvicina infatti molto a ciò che concepiamo, almeno idealmente, come mancanza assoluta di alcunché. Una condizione che, in assenza di fenomeni convettivi o conduttivi di trasmissione del calore, fissa in maniera rigida e stabile le rivelazioni della colonna delle temperature, che si aggirano, nel caso del vicinato spaziale della Terra, intorno ai  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  di minima e ai  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  di massima dovuti all’esposizione alla radiazione solare. Temperature che rendono l’ambiente inospitale non solo per la vita, ma anche per il funzionamento di sonde e satelliti. Questo è il motivo per cui la capacità di veicoli spaziali di operare nello spazio viene messa alla prova e certificata prima del loro lancio attraverso test che fanno ricorso a speciali dispositivi, noti come “camere termovuoto”, in grado di riprodurre pressioni e temperature del vuoto spaziale. Ne abbiamo parlato con Alessandro Stolfi, direttore del Centro Integrazione Satelliti di Thales Alenia Space.

**[as]:** Quale è l’obiettivo principale dei test condotti all’interno delle camere termovuoto?

**[Alessandro Stolfi]:** Sin dall’inizio dell’esplorazione spaziale, lo sviluppo e l’utilizzo di camere termovuoto ha sempre avuto come obiettivo ricreare le peculiari condizioni ambientali presenti nello spazio. Se infatti i fenomeni di dilatazione, a cui sono sottoposti nello spazio i materiali che compongono i veicoli spaziali, possono essere gestiti con relativa facilità, adottando opportuni accorgimenti durante la fase di costruzione, la difficoltà di prevedere con precisione come l’elettronica reagisca all’interno di strutture di piccole

dimensioni, come quelle di cui si compongono i satelliti, alle estreme variazioni di temperatura dell'ambiente spaziale, rimane ancora oggi elevata.

**[as]: Quali sono le caratteristiche di questi strumenti e in che modo riescono a riprodurre le condizioni dell'ambiente spaziale?**

**[A]:** Contraddistinte da una forma cilindrica, le dimensioni delle camere variano sulla base dei veicoli spaziali che devono essere testati, con grandezze che vanno da pochi litri fino a migliaia di metri cubi, come quelle in dotazione all'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e alla NASA. Questi oggetti sono sempre costituiti da un cosiddetto "vessel", la parte esterna del cilindro in grado di sopportare la differenza di pressione di 1 bar tra interno ed esterno, e da una componente termica ("shroud"), presente all'interno del vessel, dotata di un'intercapedine che viene riempita con un fluido termovettore come l'azoto, sia liquido che gassoso, o l'elio, in caso ci sia bisogno di raggiungere temperature ancora più basse. Questi strumenti dispongono poi di un sistema da vuoto suddiviso in un gruppo di pompe criogeniche e turbomolecolari per l'alto vuoto e di un gruppo di pompe per il basso vuoto (vd. p. 12, ndr). Grazie a questi sistemi, le camere che utilizziamo per le qualifiche sui nostri satelliti possono raggiungere temperature minime di -190 °C e massime di 150 °C e una pressione di  $10^{-7}$  mbar, simulando così lo spazio profondo. L'ultimo sottosistema di cui sono dotate le camere termovuoto è quello di acquisizione dati, costituito da centinaia di cavi collegati ad altrettanti sensori che si estendono dall'interno all'esterno della camera. La presenza di questi cavi di *setup* contribuisce a rendere il test del termovuoto la parte più complessa e dispendiosa della qualifica di sistemi spaziali, richiedendo fino a cinque mesi per la preparazione e verifica dei sottosistemi della camera stessa e per il successivo svolgimento di cicli di termovuoto che coinvolge il satellite.

**[as]: Perché i test di termovuoto sono così importanti e a quali procedure e verifiche vengono sottoposti i veicoli spaziali durante questa fase della loro qualifica per il volo?**

**[A]:** I test di termovuoto si suddividono in due momenti distinti. In una prima fase, chiamata di "thermal balance", viene messo alla prova e analizzato il modello termico matematico dell'apparato realizzato sulla base di una progettazione elaborata in funzione di quella che sarà l'orbita della missione. L'obiettivo di questa attività è verificare la capacità di trasmissione e dissipazione del calore da parte dei satelliti, ovvero le loro prestazioni in termini di bilanciamento termico, ottenuto con sistemi di controllo automatici che mantengono le temperature in un determinato intervallo. Una volta appurato in questo modo che il bilancio termico del satellite è effettivamente quello previsto, si passa al secondo ciclo di test in termovuoto, il cui obiettivo è verificare le performance delle componenti del satellite, sia di quelle del modulo di servizio responsabile dell'erogazione dell'energia elettrica, della gestione dell'orbita e dell'assetto del satellite, sia di quelle degli strumenti che compongono il carico utile (*payload*).

**[as]: Quali fattori possono incidere negativamente sul funzionamento dei satelliti testati e di conseguenza sull'esito dei cicli di termovuoto?**

**[A]:** Insieme alla complessità tecnica che abbiamo raccontato, ulteriori aspetti che possono incidere sulla riuscita dei test di termovuoto riguardano il fenomeno di degassaggio e la contaminazione delle superfici del satellite. La diminuzione della pressione all'interno delle camere durante i test comporta infatti la volatizzazione di molte molecole di acqua, ma non solo, presenti nei materiali di cui si compongono i satelliti, le quali devono essere estratte insieme all'aria per evitare momentanei aumenti localizzati di pressione, che potrebbero provocare scariche elettrostatiche in grado di danneggiare le componenti del veicolo. Per le stesse ragioni, la contaminazione all'interno delle cavità delle camere termovuoto deve essere monitorata costantemente e ciò viene fatto grazie all'impiego di microbilance al quarzo.



b. Il satellite Sentinel 1B dell'ESA durante il test di termovuoto.

[as] illuminazioni

# Tre piccoli esperimenti

di Anna Greco

Nel vuoto, anche la fisica di tutti i giorni non è più la stessa. Lo hanno mostrato con tre piccoli esperimenti alcuni ricercatori e ricercatrici di EGO (European Gravitational Observatory) a Cascina (PI), in uno *stand* dedicato in occasione dell'Open Day dell'interferometro per onde gravitazionali, che si è tenuto lo scorso 24 maggio.

Le persone in visita hanno potuto esplorare la struttura e partecipare a laboratori ed esperimenti dimostrativi che raccontavano la scienza delle onde gravitazionali e le tecnologie che rendono possibile "ascoltare" questi segnali dall'universo, per i quali il vuoto gioca un ruolo fondamentale (vd. p. 16, ndr). Questi esperimenti, pur richiedendo una strumentazione specifica per essere realizzati, possono fornire lo spunto per parlare di vuoto anche nelle classi della scuola secondaria, richiamando concetti di base di meccanica classica, dei fluidi e di termodinamica.

Nel primo esperimento (vd. fig. b2), un'elica motorizzata come quelle degli elicotteri o dei droni viene inserita in una camera a vuoto. Inizialmente, quando nella camera è ancora presente l'aria, l'elica resta sospesa, ma quando viene fatto il vuoto cade giù. Tuttavia, l'elica, essendo motorizzata, continua a girare. Non è il movimento dell'elica in sé, infatti, a permetterle di rimanere sospesa, ma il fatto che le pale, muovendosi,



**a.** All'Open Day di EGO e Virgo, il gruppo di ricerca che si occupa del vuoto ha presentato tre piccoli esperimenti sul tema.

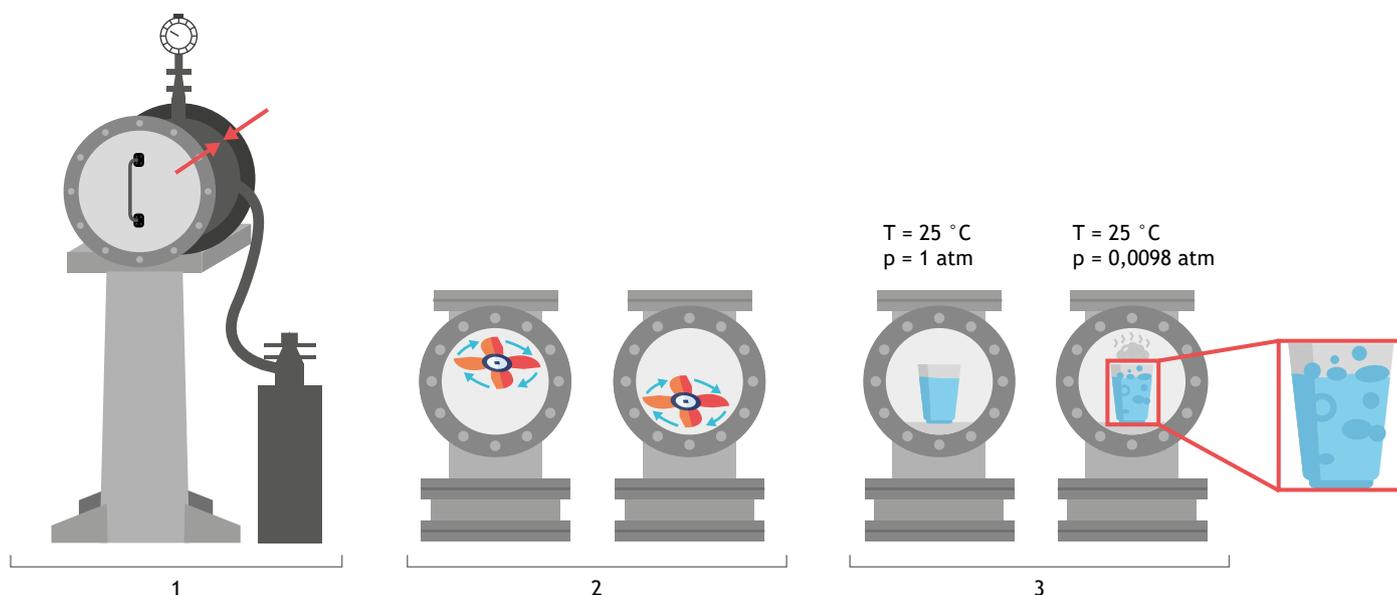
mettano in moto anche l'aria sottostante. È proprio il movimento dell'aria a generare una forza dal basso, detta "portanza", che si oppone alla gravità e sostiene l'elica. Questo meccanismo viene meno nel vuoto, facendo precipitare il congegno.

Il secondo esperimento (vd. fig. b1) consiste in due piastre circolari di 50 cm di diametro ciascuna, separate da una piccola intercapedine. Una delle due piastre ha una maniglia, che permette di separarla facilmente dall'altra come un coperchio da una pentola. Viene poi creato il vuoto nell'intercapedine, e allora le due piastre diventano quasi impossibili da separare. Cosa le tiene unite? Nella condizione di partenza, le due piastre sono in equilibrio statico, perché su entrambe agisce, oltre alla forza di gravità e alla reazione vincolare, la pressione atmosferica su tutte e due le facce. Quando viene creato il vuoto nell'intercapedine, si genera una differenza fra la pressione esercitata al suo interno, che è praticamente nulla, e la pressione dell'atmosfera, che adesso agisce solo sulle facce delle piastre che non sono aderenti fra loro. La differenza di pressione è tale che la forza che tiene le piastre unite equivale a quella necessaria per muovere una massa di una tonnellata, paragonabile a quella di un rinoceronte! L'esperimento è analogo a quello degli emisferi di Magdeburgo (vd. p. 12, ndr), una dimostrazione davvero impressionante della forza esercitata dalla pressione atmosferica: per separare due semisfere tenute insieme dallo stesso meccanismo che abbiamo descritto non bastarono due squadre

da quindici cavalli. Tenendo conto del fatto che la pressione atmosferica esercita una forza pari a circa 100.000 N per ogni metro quadro, si può calcolare con gli studenti come varia la forza in funzione della dimensione delle piastre e quale sia la dimensione massima che possono assumere in modo che, nonostante il vuoto, possano ancora essere separate "manualmente".

Il terzo esperimento (vd. fig. b3), infine, approfondisce le proprietà chimico-fisiche dell'acqua. In una camera a vuoto viene inserito un bicchiere con dell'acqua a temperatura ambiente e poi viene abbassata la pressione da 1 bar, corrispondente circa alla pressione atmosferica, a 10 mbar. Attraverso un oblò nella camera a vuoto, si nota che l'acqua inizia a bollire, anche se non è stata riscaldata. Una volta rimosso il vuoto ed estratto il recipiente, infatti, si può verificare che l'acqua è ancora a temperatura ambiente. L'esperimento fornisce lo spunto per esaminare il diagramma di fase dell'acqua (vd. p. 19 in *Asimmetrie* n. 36, ndr), notando come cambia il punto di ebollizione al variare della pressione, oltre che della temperatura.

L'Open Day di EGO e Virgo è ogni anno l'occasione ideale per scoprire la ricerca nel campo delle onde gravitazionali, ma l'osservatorio è aperto tutto l'anno per visite guidate per tutte le età. Se una classe sta seguendo un particolare percorso sul vuoto, si può richiedere anche di vedere in azione gli esperimenti raccontati in questo articolo.



**b.**

Rappresentazione schematica del funzionamento dei tre esperimenti.

1. Fra le due piastre viene creato il vuoto con una pompa da vuoto: in questa situazione, la pressione atmosferica le spinge l'una verso l'altra, rendendole difficili da separare.
2. L'elica rimane sospesa in condizioni normali, ma cade sul fondo quando viene fatto il vuoto, pur continuando a girare.
3. L'acqua può andare in ebollizione pur rimanendo a temperatura ambiente: in presenza di vuoto, la pressione si abbassa e rende possibile la transizione di fase anche senza un aumento della temperatura.

**[as]** traiettorie

# Modelli

di Francesca Mazzotta

Dalla fisica teorica alla modellizzazione nel settore manifatturiero: Rosa Giuliano, dopo un dottorato di ricerca in fisica teorica conseguito presso l'Università della Calabria, oggi lavora presso una società del gruppo Zucchetti che si occupa di consulenza e progettazione di sistemi gestionali aziendali.

**[as]: In che cosa consiste il tuo lavoro e di che cosa ti occupi?**

**[Rosa]:** Oggi mi occupo di digitalizzazione delle fabbriche, quindi di tutto quel percorso che riguarda l'ottimizzazione dei processi produttivi, dalla modellizzazione dei software per la raccolta dei dati fino alla programmazione delle varie attività, per riuscire a incrementare la produttività di un'azienda.

Inizialmente, il mio ruolo era più tecnico, ero un'installatrice e analista funzionale e il mio lavoro si svolgeva sul campo: andavo nelle fabbriche per analizzare il tipo di produzione ed elaborare un modello personalizzato per la raccolta e l'analisi dei dati in una determinata azienda. Poi ho lavorato come *project manager*, ma questo tipo di incarico non mi ha appassionato. E oggi mi occupo di consulenza di prevendita. Faccio, quindi, un lavoro di analisi preliminare delle varie aziende per identificare le loro peculiarità e richieste ed elaborare un progetto affine alle loro esigenze, dalla produzione alla logistica, dalla manutenzione fino all'elaborazione di processi per la garanzia della qualità. I miei ultimi clienti, per esempio, sono state grandi case farmaceutiche.

**[as]: Prima di iniziare a fare questo lavoro qual è stato il tuo percorso?**

**[R]:** All'inizio, avevo iniziato un percorso di studi a cavallo tra la fisica e l'informatica e la tesi per la mia laurea triennale



riguardava la modellizzazione di una colata di lava con strumenti di intelligenza artificiale. Alla fine della triennale, però, mi sono appassionata alla fisica teorica e ho scoperto le meraviglie della superconduttività e ho deciso che avrei voluto approfondire questo argomento. Allora, ho iniziato il mio percorso di studi in fisica teorica e in fisica nucleare e la mia tesi magistrale è stata sui cosiddetti "modi di Majorana", che sono semi-particelle che appaiono in specifiche condizioni fisiche e ci aiutano a simulare e comprendere i comportamenti delle particelle reali. La mia tesi di laurea ha poi portato a una pubblicazione scientifica e da lì ho iniziato il mio percorso di dottorato. Avevo tantissima voglia di continuare a studiare!

Durante il dottorato, ho avuto non solo l'occasione di far ricerca ma anche di partecipare a tante scuole in istituti di ricerca, dalla SISSA all'ICTP, e di presentare il mio lavoro in diverse conferenze. Ero innamorata del lavoro di ricerca e trovavo magico il fatto che partendo da numeri e calcoli si riuscisse a elaborare un modello fisico osservabile sperimentalmente.

**[as]: Che cosa è successo alla fine del dottorato? Come hai iniziato a lavorare nel mondo aziendale?**

**[R]:** Il mio primo contatto con questo mondo è arrivato quando ero ancora all'università. Durante delle attività di divulgazione rivolte ai più piccoli in occasione

della Notte Europea dei Ricercatori, ho incontrato una persona che mi ha proposto un lavoro come sviluppatrice informatica. Lì per lì, però, ero determinata a continuare con la ricerca. Ma alla fine del dottorato la situazione era cambiata. Avevo un po' di opzioni per continuare a far ricerca, ma erano per lo più all'estero e non si parlava di continuità. In quel momento, cercavo stabilità, volevo sposarmi e costruire una famiglia e quindi ho preso una decisione allora molto difficile: ho iniziato a cercare lavoro nel settore privato e ho iniziato a lavorare per il gruppo Zucchetti a Bologna, dove vivo e lavoro tuttora. All'inizio, ho lavorato come *data scientist* per un progetto di manutenzione predittiva per poi arrivare a lavorare nell'ottimizzazione dei processi produttivi e a ricoprire il mio ruolo attuale.

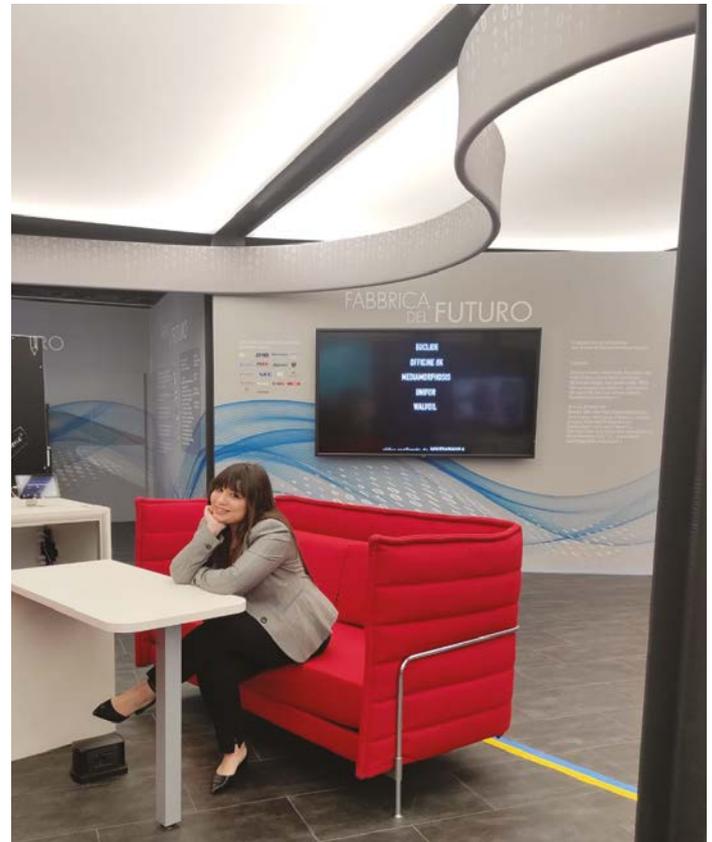
**[as]: Hai incontrato delle difficoltà nel percorso di transizione dal mondo della ricerca a quello dell'industria?**

**[R]:** No, affatto. In realtà, credo di essere stata agevolata dal fatto che durante il dottorato avevo piena autonomia. Il mio docente era per me un punto di riferimento, ma mi lasciava completa libertà nell'impostazione e organizzazione del mio lavoro di ricerca. Quindi, quando ho iniziato a lavorare, sono diventata in brevissimo tempo completamente autonoma. Inoltre, fare ricerca in fisica teorica ti permette di sviluppare tante competenze utili, come la programmazione, e ti apre la mente, ti permette di pensare a modelli per descrivere matematicamente una serie di situazioni che si presentano anche al di fuori della ricerca.

Fondamentalmente, il mio lavoro non è cambiato troppo: prima lavoravo con modelli applicati alla fisica delle particelle, oggi elaboro modelli per descrivere come funziona un macchinario o un processo produttivo. Devo dire che la difficoltà più grande è stata emotiva. A livello personale è stato difficile abbandonare la fisica, ma poi ho avuto la fortuna di trovare un lavoro che mi piace e di lavorare in un'azienda storica che sa investire sui giovani.

**[as]: Che cosa ti aspetti per il tuo futuro?**

**[R]:** Sicuramente continuità. Sono diventata mamma da appena due mesi e sapere di poter tornare a lavorare ricoprendo lo stesso ruolo dopo la maternità mi dà serenità. Inoltre, mi auguro di continuare a imparare cose nuove e di esplorare anche nuovi scenari. Mi piacerebbe, infine, crescere dal punto di vista professionale non solo in termini di competenze, ma anche dal punto di vista della carriera, arrivando a gestire un gruppo di lavoro tutto mio.



# Le mani in pasta

di Cecilia Collà Ruvolo

Sperimentare in prima persona, formulare domande e ipotesi prima di cercare le risposte sono i punti di partenza per un approccio alla didattica più coinvolgente e più vicino alle diverse attitudini degli studenti e delle studentesse presenti in classe. Nell'ottica di proporre un progetto di formazione per docenti di matematica, scienze e tecnologia delle scuole medie italiane, che si basasse proprio su un approccio didattico innovativo, è stato sviluppato HOP "Hands-On Physics", progetto di innovazione didattica nelle materie STEM, ideato, realizzato e promosso dal CERN di Ginevra, dalla Fondazione Agnelli e dall'INFN, con il sostegno di Intesa Sanpaolo e di Stellantis Foundation. HOP si propone di promuovere nelle scuole medie la familiarizzazione con il metodo scientifico, con la sperimentazione e lo studio delle scienze, e della fisica in particolare, evidenziando un legame tra le più intuitive esperienze che si possono fare in classe e gli sviluppi contemporanei della ricerca, che trovano nel CERN e nell'INFN due grandi protagonisti.

Il progetto, che nel 2023 ha coinvolto oltre 750 docenti, si basa su due pilastri: un kit didattico sperimentale, che viene donato ai docenti partecipanti, e una giornata di formazione per preparare gli insegnanti all'utilizzo in classe del kit e del metodo di insegnamento su cui si basa, l'*Inquiry based learning*, che vede nell'attività sperimentale e nella ricerca, nelle domande piuttosto che nelle risposte, il punto di partenza per l'apprendimento.

Il kit è una grande scatola modulare che contiene il materiale per condurre attività sperimentali su quattro tematiche: il metodo scientifico, la pressione, la luce e la carica elettrica. Permette di svolgere circa 20 esperienze, descritte in una guida pedagogica che suggerisce all'insegnante anche alcune modalità per condurre le attività in classe. La giornata di formazione è l'altro elemento essenziale del progetto: i docenti possono sperimentare in prima persona le attività e il metodo che potranno mettere in pratica con gli studenti e le studentesse grazie al kit. La chiave è stimolare la loro curiosità con un approccio attivo, coinvolgente e divertente. Inoltre, per i docenti è un'occasione per entrare in contatto con la ricerca portata avanti dal CERN e dall'INFN e scoprire come si lega alle scienze insegnate a scuola.

Dopo una fase pilota nella primavera del 2023, con un centinaio di docenti coinvolti, la prima edizione del progetto HOP si è svolta nell'autunno 2023 e ha visto la partecipazione di oltre 650 docenti, che hanno seguito la giornata di formazione condotta da ricercatori e ricercatrici dell'INFN e comunicatori della scienza. Le giornate di formazioni si sono svolte in 16 città, perlopiù nelle sedi locali dell'INFN e in alcuni casi in altre sedi (Fondazione Agnelli per Torino, il MUSE per Trento e il GGI per Firenze). Con l'obiettivo di coinvolgere in totale circa 2000 docenti, sono già previste altre due edizioni, nell'autunno 2024 e 2025, le cui attività formative si terranno anche in nuove sedi, in modo da estendere la diffusione del progetto.



a.  
Docenti durante la formazione di HOP ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN.

## [as] lampi

The image shows a handwritten musical score on aged paper. At the top center, there is a large, hand-drawn Roman numeral 'I'. Below it, the score is organized into four systems, each consisting of two staves (treble and bass clefs) and a blank space below. The first system begins with a 4/4 time signature. The rest of the page is empty, representing the 'silence' of the piece. A small number '1' is written in the bottom right corner of the page.

### John Cage, 4'33"

Riproduzione della partitura del brano "4'33"" (*"Four minutes and thirty-three seconds"*), ovvero "Quattro minuti e trentatré secondi") del compositore statunitense John Cage. L'opera, come specificato dall'autore, è una composizione "per qualunque strumento musicale o combinazione di strumenti", formata da tre movimenti durante i quali l'esecutore non suona nulla, lasciando che l'ascoltatore percepisca il silenzio: il primo movimento ha una durata di 30 secondi, il secondo di 2 minuti e 23 secondi e il terzo di 1 minuto e 40 secondi (con piccole variazioni tra le varie versioni che si sono succedute), per una durata totale di 4 minuti e 33 secondi, da cui il titolo del brano. La prima esecuzione fu effettuata il 29 agosto 1952 alla Maverick Concert Hall di Woodstock, nello stato di New York, e fu eseguita dal pianista David Tudor. Durante l'esecuzione del brano, Tudor sedeva al pianoforte, aprendo e chiudendo il coperchio della tastiera per scandire la progressione dei tre movimenti. Dopo la prima esecuzione del brano, riferendosi al pubblico disorientato da quanto aveva appena vissuto, Cage spiegò: "Non hanno colto il punto. Non esiste il silenzio. Quello che pensavano fosse silenzio, perché non sapevano ascoltare, era pieno di suoni accidentali. Si poteva sentire il vento che si muoveva all'esterno durante il primo movimento. Durante il secondo, le gocce di pioggia cominciarono a picchiare sul tetto, e durante il terzo le persone stesse emettevano ogni sorta di suoni interessanti, mentre parlavano o uscivano".

[as] segni



Un pianeta azzurro perso nel vuoto cosmico: una piccola perla cresciuta dal verde.

"Il senso nel vuoto", *pittura acrilica su carta, illustrazione e testo di Alessandro Nagar*



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare  
i laboratori dell'Infn:

*Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)*

T + 39 06 94032423  
/ 2552 / 2643 / 2942  
comedu@lnf.infn.it  
www.lnf.infn.it

*Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)*

T +39 0862 437265/450  
visits@lngs.infn.it  
www.lngs.infn.it

*Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)*

T + 39 049 8068342 356  
stage@lnl.infn.it  
www.lnl.infn.it

*Laboratori Nazionali del Sud (Lns)*

T + 39 095 542296  
visiteguidate@lists.lns.infn.it  
www.lns.infn.it



Raccontaci che cosa pensi di Asimmetrie su Instagram.  
Pubblica storie, post e reel con l'hashtag  
#AsimmetrieInfn e taggando l'account @infn\_insights.  
Condivideremo i tuoi contenuti.

[www.infn.it](http://www.infn.it)



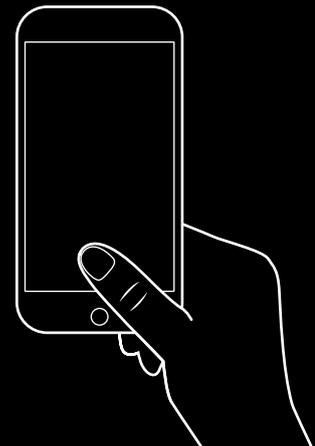
Sul sito [www.asimmetrie.it](http://www.asimmetrie.it)  
vengono pubblicate periodicamente  
notizie di attualità scientifica.

Per abbonarti **gratuitamente** ad Asimmetrie  
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:  
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio  
**indirizzo mail** per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:  
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,  
ricca di nuovi contenuti multimediali.





**[www.infn.it](http://www.infn.it)**

rivista online  
[www.asimmetrie.it](http://www.asimmetrie.it)