

RELATIVITÀ E CAMPI: I CONTI NON TORNANO

Le leggi della fisica sono oggetto di continuo affinamento ed evoluzione. Diversamente da un teorema matematico, un principio fisico può essere nel tempo modificato e perfezionato per tener conto di nuove teorie e dei risultati di nuovi esperimenti. Ma talvolta si presentano inquietanti paradossi...

DI VALERIO FRANCHINA

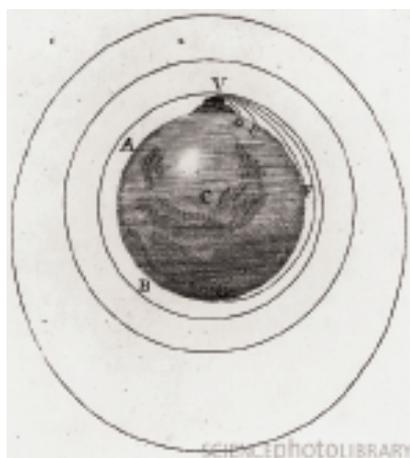


Willy il Coyote (cartoon attualmente trasmesso da Boomerang, il canale 608 di Sky) ritratto nella sua corsa sfrenata in aria nel tentativo di raggiungere lo struzzo Beep Beep, contravvenendo così alle leggi della fisica classica.

Da diversi anni Willy il Coyote insegue lo struzzo Beep Beep, senza riuscire a raggiungerlo. Accade che – nella foga dell'inseguimento – Willy esca di strada ad una stretta curva vicina ad un precipizio, continuando a correre come un forsennato in aria. Ad un tratto il malcapitato si accorge di non avere più il terreno sotto i piedi (cioè, sotto le zampe) e precipita a capofitto nel sottostante canyon. Nei cartoni animati le leggi della fisica sono un po' diverse da quelle del nostro mondo. Qualcuno le ha perfino codificate (si trovano ad esempio in funnies.paco.to/cartoon.html) e quella che si applica al povero Willy sostiene che “la gravità ha effetto solo

quando ci si accorge di essere sospesi nel vuoto”. Nel mondo reale, Willy comincerebbe a cadere subito – non appena perso l'appoggio – descrivendo una traiettoria parabolica, lievemente mitigata dalla resistenza dell'aria. Sebbene quanto descritto sia facilmente immaginabile e riscontrabile come vero, le cose sono spesso un po' più complicate di come appaiono. Un sondaggio condotto qualche anno fa ha prodotto un risultato sorprendente: la maggior parte degli intervistati era convinta che Willy il Coyote avrebbe percorso un primo tratto di traiettoria orizzontale, di lunghezza dipendente dalla velocità iniziale, salvo poi cominciare a cadere, magari un

po' meno bruscamente che nei cartoni animati, a dimostrazione che le leggi della fisica – anche le più semplici – non fanno parte del nostro normale bagaglio di conoscenze. E poi la fisica e la matematica rientrano, secondo la comune convinzione, nel novero delle scienze “esatte” (il che implicherebbe che esistano scienze “inesatte” o addirittura “sbagliate”...). Però, mentre la matematica si appoggia su teoremi dimostrati oltre ogni possibile obiezione, in fisica ne esistono pochissimi, conseguenza di sviluppi logico – matematici. Tutto il resto è basato su leggi o principi, la cui validità è prima di tutto sperimentale. Certo, esiste anche la fisica teorica – importantissima – che enuncia



Disegno tratto dal libro "A Treatise of the System of the World" (Un trattato sul sistema del mondo) di Isaac Newton, del 1728. Un proiettile viene sparato orizzontalmente da una alta montagna (V). A basse velocità il proiettile percorre brevi distanze, mentre cade a terra seguendo una traiettoria parabolica. Per velocità sufficientemente alte il proiettile comincia invece a percorrere un'orbita ellittica e non cade più.

festano scostamenti tra la pratica e la teoria. Quando questo avviene, occorre un'evoluzione teorica che superi tali scostamenti, senza aprire però lacune da qualche altra parte.

È possibile immaginare situazioni – note come esperimenti virtuali – in cui l'applicazione delle leggi fisiche note produce effetti paradossali: questo esercizio è molto affascinante – ma anche molto pericoloso sul piano dialettico. Infatti, può darsi che non sia per niente chiaro dove sia la causa del paradosso: allora le dispute salgono fortemente di intensità. Mentre nel settore della cinematica e della dinamica la situazione è stabilizzata, quando si parla di campxpi, forze a distanza (come la gravità) e simili questioni, ci si imbatte spesso in paradossi.

I PARADOSSI DEI PIONIERI DELLA FISICA

Quasi tutti accompagnavano una straordinaria capacità intellettuale ad alcune incredibili stranezze, forse legate all'epoca in cui vivevano.

Come si è detto, verso la metà del 1600 furono gettate le basi scientifiche della fisica, partendo dalle leggi della meccanica. Poco dopo fu la volta della termodinamica, che portò una ventata di sconcerto con concetti come l'entropia e l'irreversibilità di alcune trasformazioni. Poi, con la scoperta delle radia-

teorie da passare comunque al vaglio della sperimentazione. Una teoria deve avere una formulazione priva di anomalie logiche, però può anche essere controintuitiva... Fino a prova contraria.

La necessità della conferma sperimentale è evidente, visto che la fisica descrive la struttura del mondo. Forse proprio dalle difficoltà che accompagnano questa conferma, specie quando occorre verificare leggi complicate che riguardano particelle, alte energie o condizioni limite, deriva uno sviluppo temporale diverso tra fisica e matematica. Ad esempio, il famoso teorema sui triangoli rettangoli, erroneamente attribuito a Pitagora, era già noto molto tempo prima di lui:

lo stesso vale per altri notevoli risultati e teoremi matematici e geometrici. Invece, prima di Galileo, la conoscenza delle leggi fisiche era limitatissima. Ai tempi dell'antica Grecia si credeva addirittura che esistesse un rapporto costante tra la forza impressa ad un corpo e la velocità che tale corpo – se non vincolato – sviluppava in conseguenza: occorre arrivare a Newton per stabilire che tale rapporto sussiste invece tra forza e accelerazione (è il secondo principio della dinamica). Possiamo situare verso la metà del 1600, proprio all'epoca di Galileo e Newton, l'avvio dello sviluppo della fisica e delle sue leggi. Tutta la fisica? Eh, purtroppo no. **All'aumentare – e al complicarsi – delle conoscenze e delle teorie, hanno cominciato a proliferare situazioni in cui si mani-**

Galileo Galilei (1564-1642). Grazie all'uso del suo cannocchiale, scoprì i quattro più grandi satelliti di Giove ed osservò le montagne della Luna. In fisica, scoprì la isocronicità delle oscillazioni del pendolo e la costanza della accelerazione di gravità. Sostenne la teoria copernicana di una Terra ruotante intorno al Sole. Venne inquisito per eresia dalla Chiesa Cattolica Romana e visse quindi agli arresti domiciliari come eretico dal 1633 al 1642, anno della sua morte.



PARADOSSI E PARA-PARADOSSI

zioni catodiche, e di altra natura, arrivò la teoria dei campi e delle azioni a distanza. Verso l'inizio del '900 la conoscenza del campo elettrico e di quello magnetico aveva raggiunto livelli paragonabili agli attuali. Il monumentale trattato sull'elettromagnetismo pubblicato dal fisico Maxwell nel 1873, nel quale sono enunciate le equazioni che portano il suo nome (non proprio tutte, ma la base c'è, eccome) è ancora attuale: le equazioni di Maxwell sono il fondamento del grande sviluppo radioelettrico nell'ultimo secolo. Pochi anni dopo, nel 1905, apparvero alcuni importanti lavori di Einstein e fu enunciata la famosa teoria della relatività ristretta. Cominciarono anche dispute feroci sulla sua effettiva validità, che ha poi ricevuto conferme sperimentali (alcune delle quali sono però abbastanza indirette e quindi motivo di ulteriori dubbi e obiezioni). Fu proprio grazie a tale teoria che fu smontato un terribile paradosso, come vedremo tra poco.

Ma prima dobbiamo osservare che – in poco più di due secoli – cambiarono molto più i fisici che non la fisica. **Galileo e Newton hanno dato un contributo straordinario alla formulazione delle leggi della meccanica e dell'ottica: eppure pare che Galileo producesse oroscopi (a pagamento), mentre il caso di Newton è ancora più clamoroso. Era infatti un convinto assertore dell'Astrologia e della Alchimia.** Anche nel settore della divinazione non disdegnava di dire la sua: arrivò addirittura a predire la fine del mondo nel 2060, anno che si sta pericolosamente avvicinando. Se un fisico di oggi si azzardasse a fare qualcosa del genere, sarebbe irreversibilmente screditato: il che non sembra sia accaduto a Isaac Newton. In realtà, la transizione da un mondo basato su credenze e suggestioni ad uno più orientato verso le spiega-

Para - primo elemento di parole composte di origine greca o di formazione moderna, dal greco *pará* "presso, accanto, oltre"; può indicare vicinanza, somiglianza, affinità o deviazione, alterazione, contrapposizione (*paramilitare, paranormale*); in chimica compare nei composti derivati dal benzene per sostituzione di due atomi di idrogeno dell'anello benzenico quando gli atomi sostituiti sono distanziati fra loro da altri due (*paraldeide*).

Paradosso - s. m.

1. affermazione, opinione, tesi che, nonostante sia in contrasto con l'esperienza comune, si dimostra di fatto fondata: un *paradosso fisico, matematico* | (*filos.*) ragionamento logico che parte da un presupposto falso; sofisma: i paradossi di Zenone di Elea | nella logica contemporanea, antinomia;
2. (*estens.*) affermazione, ragionamento, tesi sorprendente: *argomentare, ragionare per paradossi*; i *paradossi di Oscar Wilde* | fatto, comportamento che si presenta come contrario alla logica, incoerente: *tutta la sua vita è stata un paradosso*; *Il paradosso di metropoli in gran parte abitate, e solo durante poche ore del giorno, da gente suburbana* (E. CECCHI)
agg. (*med.*) si dice di fenomeno contrario alle aspettative.

Para-paradosso - definiremo *para-paradosso* la situazione che si verifica quando, individuato un paradosso ottenuto applicando alcune leggi fisiche note, si riesce a superarlo modificando le leggi stesse. È evidente che la definizione gioca sul doppio significato di "para" che richiama anche il concetto di "ripararsi".

zioni logiche non è stata istantanea: anzi, è tuttora in corso e ancora durerà. Per giustificare il comportamento occasionalmente antiscientifico di Newton e – in misura meno pubblicizzata – di Galileo, basterà osservare che vissero nel primo periodo di questa transizione e qualche scoria di oscurantismo doveva per forza esser loro rimasta attaccata. E poi Newton non aveva nemmeno esagerato se si confronta con Keplero. Il famoso matematico ed astronomo, autore delle tre leggi sul moto dei pianeti, piuttosto controintuitive e che

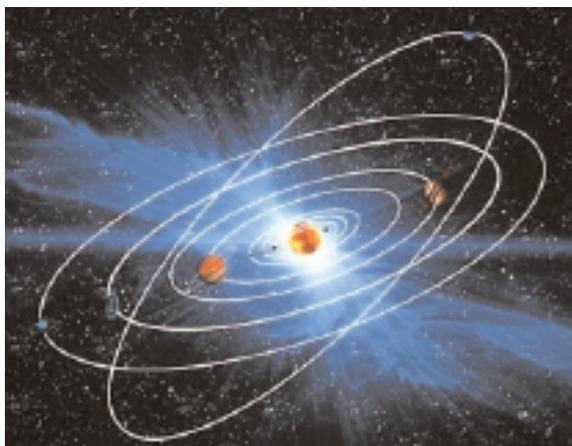
danno perciò una misura della grande capacità scientifica del loro autore, ne combinò una delle sue, tale da far apparire quelle di Newton semplici marachelle. Una volta sistemata – in forma così autorevole e rivoluzionaria – la questione del moto dei pianeti, rimaneva il problema degli altri astri, cioè delle così dette stelle fisse.

Tutti sapevano che tali stelle sono incastonate in una volta sferica di cristallo: che altro, se no?

*Isacco Newton (1642-1727).
Astronomo, matematico e fisico inglese, enunciò la legge di gravitazione universale dalla quale derivò il modello dell'universo ritenuto valido fino all'avvento di A. Einstein. Inventò il telescopio a riflessione, studiò la luce e le leggi della diffrazione e della riflessione, introdusse il calcolo differenziale e integrale.*



Detto fatto, Keplero si accinse nell'impresa di calcolare lo spessore di tale volta! Per capire cosa passò per la mente di Keplero, va ricordata la sua abilità – riconosciuta insuperabile – nel progettare obiettivi per i telescopi. Egli aveva quindi una grande capacità di calcolo (manuale, ovviamente) e una buona conoscenza della tecnologia del cristallo. Allo scopo applicò un procedimento altamente demenziale: ad un certo punto tirò in ballo perfino la Trinità per asserire l'eguaglianza delle masse della volta, del Sole e dell'etere (qualunque cosa fosse...). Con questo procedimento, in cui a momenti di stretto rigore matematico si alternavano, per la verità in maggioranza, scelte assolutamente arbitrarie – come quella secondo la quale la volta era composta di cristallo di Jena, all'epoca considerato il migliore per gli obiettivi – arrivò a calcolarne lo spessore in nove miglia inglesi (sono circa quindici chilometri). Le stelle incastonate nella volta avevano dunque un diametro piuttosto misero, specie se confrontato con quello che qualche decennio dopo è stato loro attribuito. **Questa incredibile trovata fu poi inserita nello stesso volume, *Harmonices Mundi*, del 1619, in cui veniva enunciata la ben più sensata terza legge sul moto dei pianeti: è forse uno dei massimi esempi di pubblicazioni in cui coesistono importanti principi di fisica e straordinarie panzane.** Ma il contributo di Keplero alle conoscenze fisiche ne risulta sminuito? Sicuramente no: anche questo è un notevole paradosso. Le cose erano già un po' cambiate quando – circa due secoli e mezzo dopo – Maxwell e Einstein pubblicarono le loro opere. Il rigore scientifico era cresciuto, anche se non sempre, e cominciava a manifestarsi l'inquietudine derivante dalle così dette azioni a distanza.



Ricostruzione al computer delle orbite di nove pianeti del sistema solare. Mercurio Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone, rappresentato in blu in alto a destra. A causa della estrema ellitticità dell'orbita di Plutone,

a volte Nettuno risulta essere il pianeta più lontano dal Sole. Il Sole e i pianeti non sono rappresentati in scala.

Cosa siano, è presto detto. Nella meccanica classica, le azioni – e le reazioni – derivano sempre dal contatto tra i corpi. Però erano già state individuate almeno tre situazioni in cui nascevano forze a distanza: quelle elettriche, quelle magnetiche e quelle gravitazionali.

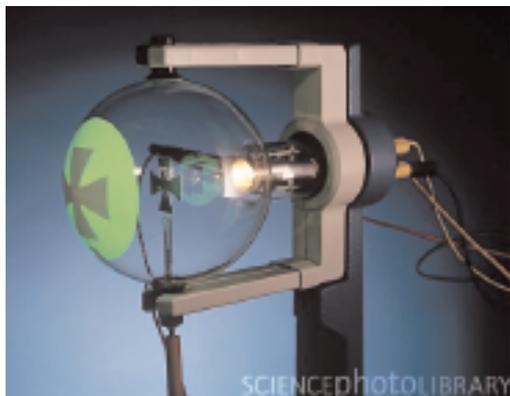
LA FISICA MODERNA E I PRIMI PARADOSSI

Si apre la porta ai campi di forza e alle azioni a distanza. Ma dalla porta aperta entrano anche i primi paradossi, alcuni dei quali davvero imbarazzanti.

Parecchia matematica dopo, costituita soprattutto dalla trattazione dell'algebra dei vettori – particolarmente potente – e dalla teoria dei campi, la fisica disponeva di alcune leggi nuove di zecca e sperimentalmente verificate. L'intensità delle tre forze a distanza – elettrica, magnetica, gravitazionale – dipende dal quadrato della distanza tra gli oggetti sui quali si manifestano: il che faceva supporre – o almeno sperare – che avessero una stessa causa. In questa direzione si mos-

sero molti ricercatori. Era stata anche individuata una dipendenza tra campi elettrici e magnetici.

Intanto William Crookes aveva scoperto i raggi catodici, verso la fine del secolo XIX: ma lo studio di tali raggi coinvolse molti altri fisici, tra cui Röntgen, primo premio Nobel per la fisica. Si era compresa meglio la natura dei flussi elettrici, arrivando ad ipotizzare la presenza di particelle elettricamente cariche, chiamate poi elettroni. Classici esperimenti permisero non solo di confermarne l'esistenza, ma anche di definirne alcune stupefacenti proprietà. La più singolare è quella che attribuisce una massa agli elettroni, i quali acquistano nel nostro modello mentale l'aspetto di sferette, piccole e cattivissime, ma non dissimili da una pallina da tennis: anche se un po' più piccole (un bel po', veramente). Carica e massa dell'elettrone sono state ripetutamente misurate: alcuni libri divulgativi affermano, con qualche esagerazione, che gli elettroni siano stati addirittura visti! Non è proprio così: è stato osservato il cammino percorso da elettroni accelerati e deflessi da campi elettromagnetici, con dispositivi come le camere a bolle. Inoltre, ogni volta che accendiamo un televisore o un monitor da PC (quelli a raggi catodici, ancora non del tutto soppiantati dagli schermi piatti), abbiamo una notevole conferma che i piccoli elettro-



Tubo di Crookes. Inventato da William Crookes (1832-1919) verso la fine del 1800, questo dispositivo fu usato per evidenziare il percorso dei raggi catodici. Applicando una corrente elettrica il catodo (a destra) si scalda ed emette elettroni. Raggiungendo l'interno dell'ampolla, a sinistra, rivestito con una sostanza fluorescente, la forma dell'ombra della croce di Malta interposta sul loro cammino dimostra che essi hanno viaggiato in linea retta.

PARADOSSI FISICI: IL CAMPO ELETTRICO DISPETTOSO

Uno dei più famosi paradossi fu risolto da un intervento combinato di Einstein ed altri geni della fisica, tra cui il premio Nobel Max Born.

Per capire la madre di tutti i paradossi, noto come paradosso di Born-Einstein, dobbiamo prima richiamare un paio di nozioni di meccanica classica.

Ad un corpo di massa m che si muove con una velocità v è associata una grandezza – denominata *quantità di moto* e data proprio dal prodotto della sua massa per la sua velocità – che si dimostra essere invariante finché sul corpo non agiscono forze. È una conseguenza delle leggi di

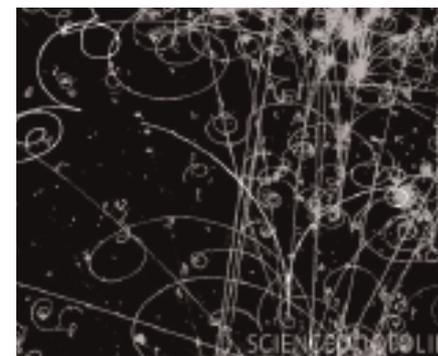


Foto della "camera a bolle" da 4,5 metri del FermiLab (USA) mentre avviene la trasformazione di un fotone (da raggi gamma), la cui traiettoria è invisibile, in una coppia elettrone-positrone (materia-antimateria). Le tracce bianche a V al centro in basso sono quelle della coppia creata dall'ingresso del fotone nella camera. La traiettoria del positrone curva a sinistra e termina dove si annichilisce nell'incontro con un elettrone atomico dando origine a due fotoni, la cui traiettoria è invisibile. Uno di questi fotoni crea poi una seconda coppia elettrone-positrone nell'angolo in alto a sinistra della foto.

ni svolgono il loro onesto lavoro, colpendo i fosfori dello schermo e trasformando la loro energia cinetica in energia luminosa. Queste situazioni, in cui la presenza di corpuscoli non visibili viene evidenziata indirettamente, fanno pensare all'allegoria platonica della caverna, sulla cui volta vengono proiettate le ombre della realtà che gli osservatori finiscono per percepire come realtà autentica. Curiosa coincidenza, dato che Platone non vedeva la fisica di buon occhio: anzi, ne riteneva impossibile il fondamento scientifico.

La scoperta dell'elettrone indusse ad ipotizzare l'esistenza del magnetone nei campi magnetici e del gravitone in quelli gravitazionali. Però, mentre la conoscenza dell'elettrone progrediva e nuovi esperimenti e nuove leggi – tra cui quella di Lorentz – descrivevano il moto degli elettroni nel loro passaggio in un campo magnetico, non si trovava traccia di magnetoni e gravitoni. Benché in fisica sia pericoloso fare affermazioni categoriche, si può ormai ritenere che la caccia a queste particelle forse non avrà successo, perché probabilmente non esistono.

Lo studio dei raggi catodici permise di stabilire che gli elettroni potevano raggiungere una velocità prossima – appena inferiore – a quella della luce. **Il fatto che il campo elettrico prodotto dagli elettroni in movimento si propagasse a velocità molto elevata ma non**

infinita, gettò nello sconforto i fisici dell'epoca. Nascevano infatti diverse situazioni paradossali. Vedremo tra poco quella che può essere chiamata la madre di tutti i paradossi e il modo in cui fu fornita la spiegazione. Prima però torniamo a Maxwell, che – nel suo già ricordato trattato sull'elettromagnetismo – osservava: "...Ma da tutte queste teorie la domanda sorge spontanea: Se qualcosa viene trasmesso a distanza da un corpo ad un altro, in quali condizioni questo qualcosa si troverà dopo aver lasciato il primo corpo e non aver ancora raggiunto il secondo? (...) Se energia viene trasmessa nel tempo da un corpo ad un altro, deve esistere un mezzo intermedio dove questa energia risiede durante il viaggio. (...) Perciò tutte queste teorie inducono a ritenere che tale mezzo esista: e se ne ammettiamo l'esistenza, credo che dovrebbe occupare un posto importante nelle nostre ricerche. Dovremmo sforzarci di costruire un modello mentale delle sue proprietà; questo è stato il mio obiettivo costante in questo trattato".

Il trattato – nella sua terza edizione postuma del 1904 – consta di oltre 1.000 pagine. Queste considerazioni sono riportate proprio sull'ultima. Forse Maxwell dovrebbe essere ricordato più per la britannica nonchalance nell'aver concluso il trattato con un simile agghiacciante interrogativo che per le sue equazioni.

Newton. D'altra parte, in un sistema isolato, su cui cioè non agiscono forze esterne, la posizione del centro di massa – il baricentro – è univocamente determinata. Se il sistema era inizialmente in quiete, il baricentro è in quiete. Se il corpo è articolato, allo spostamento di un suo componente corrisponde lo spostamento simmetrico di altre sue parti, in modo tale che il baricentro del corpo non cambi di posizione. È una conseguenza del terzo principio di Newton (azione e reazione).

Supponiamo allora di disporre – in un contenitore isolato – di un generatore di campo elettrico fissato al contenitore stesso (come un trasmettitore radio), che improvvisamente emetta un fascio di elettroni. Questo fascio ha associata una quantità di moto (massa per velocità), calcolabile secondo le leggi dell'elettrodinamica classica. Per conservare la posizione del baricentro del sistema (generatore e fascio di elettroni) e la quantità di moto complessiva del sistema isolato, il generatore, solidalmente al contenitore (immaginatoci il generatore fissato all'interno di una scatola parallelepipedica), si muoverà per reazione in verso



La ricerca sulle onde gravitazionali non ha tuttora fornito evidenze della loro esistenza. In foto si vede l'antenna del detector Auriga installato a Legnaro (Italia).

Il cilindro-antenna lungo 3 metri viene mantenuto alla temperatura di 0,1° Kelvin per minimizzare le sue

vibrazioni atomiche. L'Auriga sarebbe in grado di rilevare lo scoppio di una supernova nel nostro gruppo locale. Le onde gravitazionali emesse nell'esplosione causerebbero vibrazioni nel cilindro dell'ordine del miliardesimo di milionesimo di millimetro.

opposto sulla direzione del fascio emesso. Supponiamo che il fascio di elettroni venga intercettato da uno schermo, che sia parte del contenitore isolato, situato ad una certa distanza da esso. All'impatto del fascio di elettroni con lo schermo (immaginiamo che si tratti della parte della scatola posta di fronte al generatore), la quantità di moto verrà restituita al contenitore che si fermerà. Ma, mentre il fascio viaggiava nello spazio, il contenitore si è mosso. Quindi, **alla fine dell'esperimento, il baricentro del sistema si sarà spostato senza che siano state applicate forze esterne (intervengono solo forze interne al sistema stesso). Questo viola in un colpo solo un buon numero di leggi fisiche note.** A meno che la propa-

gazione del fascio di elettroni non avvenga istantaneamente: ma non è possibile, perché gli elettroni che lo compongono, come abbiamo osservato in precedenza, hanno velocità elevata, ma finita. In altri termini, se il contenitore non si è mosso, il campo si è propagato a velocità infinita, violando il principio della velocità limite di Einstein. Se invece si è mosso, viene violato il principio della conservazione del centro di massa. E questo è davvero un bel paradosso. Ma nel box a pagina **** viene fornita la spiegazione, dovuta a Max Born e Albert Einstein, che elimina completamente la situazione paradossale. Il contenitore si è in effetti mosso (anche se di pochissimo, in un eventuale esperimento pratico) ma solo grazie ad una notevole – ed in-

LA DIPENDENZA TRA CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI

Una corrente che scorre in un conduttore produce un campo magnetico: è la legge di Biot e Savart (o di Ampère). Inversamente, un campo magnetico NON statico produce una corrente elettrica in un conduttore: è la legge di Neumann-Lenz. Questi risultati si deducono anche dalle equazioni di Maxwell, ma furono ottenuti circa un secolo prima! È allora provata l'univocità dei due campi e delle relative forze? Nemmeno per idea. Infatti, mentre una corrente elettrica costante – dunque, un campo elettrico statico – produce un campo magnetico, statico anch'esso, non è affatto vero il contrario. Per produrre effetti di tipo elettrico occorre un campo magnetico di intensità, o almeno di direzione, variabili nel tempo. Tutte le macchine elettriche che costituiscono l'ossatura del mondo moderno – motori, alternatori, dinamo, ma anche strumenti di misura, altoparlanti, sistemi di comunicazione elettrica – si basano sulla diretta applicazione delle due leggi citate: una buona verifica sperimentale, nel caso ci fossero ancora dubbi.

Motore a corrente alternata. Lo "statore" (in blu) viene magnetizzato dagli avvolgimenti arancione (in rame) percorsi dalla corrente elettrica. Il "rotore" (lucido, al centro) fissato all'albero motore libero di ruotare, viene costretto dalle forze magnetiche a muoversi insieme al campo magnetico rotante generato dallo statore.

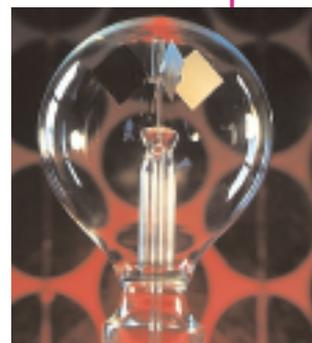


Forse la più chiara ed elegante spiegazione di questo paradosso si trova nell'ottimo libro di Max Born, grande fisico e premio Nobel, contemporaneo di Einstein. Questo libro è disponibile nella traduzione italiana (anche questa ottima: Boringhieri, 1968) e tanto vale citarla testualmente (si riferisce a fotoni e non ad elettroni, ma il concetto è lo stesso):

... L'elettrodinamica classica dice, in accordo con l'esperienza, che la quantità di moto trasmessa da luce d'energia E ad una superficie che l'assorbe è E/c [c è la velocità della luce]; quindi la quantità di moto di rinculo del contenitore dovuta all'emissione ha lo stesso valore. Se il contenitore ha massa M , acquista una velocità di rinculo v data, secondo il teorema di conservazione della quantità di moto, da $Mv = E/c$. Il contenitore continua a muoversi durante il tempo necessario alla luce per percorrere la distanza l tra trasmettitore e ricevitore; a meno di termini di ordine superiore, questo tempo t è eguale a l/c . Durante questo tempo il contenitore percorre una distanza $x = vt = El/Mc^2$; per non contraddire il principio fondamentale del centro di massa dobbiamo supporre che il trasferimento d'energia sia accompagnato da un trasferimento simultaneo di massa nella stessa direzione. Se indichiamo questa massa, per il momento non ancora nota, con m , il momento totale dovuto allo spostamento di massa dopo il processo è dato da $Mx - ml$; per il principio fondamentale del centro di massa, questo deve essere zero. Sostituendo per x l'espressione trovata sopra si ottiene per m la formula di Einstein: $m = M x/l = E/c^2$.

La madre di tutti i paradossi fisici viene sì smontata, ma a prezzo elevatissimo: l'introduzione dell'equivalenza tra massa ed energia espressa da $E=mc^2$.

Radiometro di W. Crookes (1832-1919). Lo strumento doveva servire a indagare la radiazione solare. L'elemento di sostegno di tre cartoncini quadrati può ruotare su un asse verticale. I cartoncini sono neri da un lato e riflettenti dall'altro. Nell'ampolla viene fatto un vuoto parziale. Sottoposto alla luce solare il rotore gira spontaneamente. Il fenomeno non è dovuto, come comunemente si crede, al diverso assorbimento della luce da parte delle due facce dei cartoncini, che eventualmente causerebbero una rotazione inversa, bensì a complessi fenomeni quantistici che si instaurano sui loro spigoli.



gegna – estensione delle leggi fisiche della meccanica classica.

IL PARADOSSO DEL CAMPO GRAVITAZIONALE

Anche in questo caso esiste una situazione paradossale legata alla velocità di propagazione: se non fosse istantanea, le orbite dei pianeti diventerebbero instabili.

Rispetto ai campi elettromagnetici quello gravitazionale è un caso a parte, tanto che ancora si cerca qualche evidenza di onde gravitazionali – previste dalla teoria generale della relatività – con esperimenti molto complessi e costosi,

condotti anche dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare con il progetto Auriga (www.auriga.infn.it). Fra l'altro, se mai si dovesse riuscire a provare l'esistenza di un'onda gravitazionale, potrebbe essere ipotizzata l'esistenza dei gravitoni: ma qui è proprio il caso di parlare di fantascienza...

Il campo gravitazionale presenta aspetti che sembrano fatti apposta per scatenare paradossi. Mentre siamo ormai capaci di generare campi elettromagnetici, di modularli (cioè variarne l'intensità) e dirigerli (come si fa con le antenne paraboliche dei ponti radio), e siamo anche in grado di impedirne gli effetti con sistemi di schermatura (la gabbia di Faraday per i campi elettrici e le lastre in *mu-metal* per quelli magnetici), **con il campo gravitazionale non si riesce ad interagire. Non abbiamo alcun mezzo per intervenire sulla sua**

intensità e direzione né tanto meno per schermarlo. Se ci riuscissimo, sarebbe il più straordinario risultato della tecnologia umana. Le leggende circa la scoperta e la costruzione di schermi e macchine antigravità sono ricorrenti nella storia: la capacità di levitare o addirittura di ascendere al cielo, contrastando la forza di gravità, è considerata una prerogativa divina. Deve essere così, perché solo sospendendo l'azione delle leggi della fisica sembra possibile ottenere questo risultato. O forse ci si dovrebbe trasferire nel mondo dei cartoni animati e far finta di non accorgersi che ci manca l'appoggio, per cui non cadremmo... Un noto paradosso riguarda la velocità di propagazione delle interazioni gravitazionali. La stabilità delle orbite dei pianeti è assicurata – si dimostra matematicamente – solo se la propagazione è istanta-



Lancio dello Space Shuttle Atlantis per la missione STS-45 (24 marzo 1992). La dimensione del serbatoio principale (arancione) cui è fissato lo Shuttle rende bene l'idea della enorme quantità di combustibile, che costituisce anche la massa di reazione, necessaria per questi lanci.

nea, come ricordato ad esempio da S. Carlip, M. Wiener e G. Landis. Ma l'istantaneità è incompatibile con la teoria della velocità di propagazione, che non può essere infinita ed è limitata da quella della luce (la velocità di propagazione deve in ogni caso essere inferiore a 300.000 chilometri al secondo). La spiegazione del paradosso fornita dagli autori citati è complicata e ricorda un po' – calcisticamente parlando – il rifugiarsi in calcio d'angolo: se non addirittura il ricorso al fallo tattico! Infatti, giustifica sia il caso di propagazione istantanea che quello contrario. È molto difficile – ai limiti dell'impossibilità – condurre esperimenti al riguardo, anche perché – come già osservato – non siamo attualmente in grado di intervenire sul campo gravitazionale.

L'ELETTROMAGNETE FANTASMA

È – per così dire – il gemello del paradosso di Born-Einstein per il campo magnetico.

L'esperimento virtuale che conduce al paradosso è inizialmente simile a quello proposto per il campo elettrico. Si riferisce però ad un campo magnetico generato da un elettro-

magnete, percorso improvvisamente da corrente. In tale campo si trova un corpo ferromagnetico polarizzato, che chiameremo àncora. Questa viene soggetta ad una forza repulsiva, come avviene in qualunque motore elettrico o strumento di misura a bobina o ferro mobile. Il sistema costituito dall'elettromagnete e dall'àncora viene quindi perturbato e – in mancanza di vincoli opportuni – la posizione di entrambi gli elementi viene alterata: non così la posizione del baricentro del sistema (perché quest'ultimo è sede di sole forze interne). In seguito al passaggio della corrente, il campo elettromagnetico generato si è propagato nello spazio circostante l'elettromagnete con una funzione d'onda e la sua velocità di propagazione non può superare quella della luce. La prima conseguenza è che l'effetto di repulsione sull'àncora è ritardato rispetto al momento di applicazione della corrente nell'elettromagnete. Supponendo di operare nel vuoto in condizioni ideali, il ritardo dipende dalla distanza tra i due corpi. La seconda conseguenza è che, per mantenere costante la posizione del baricentro del sistema, lo spostamento dei due

corpi deve avvenire in perfetto sincronismo. Ma come fanno i due corpi a spostarsi simultaneamente, visto che le relative informazioni viaggiano – al massimo – alla velocità della luce? Inoltre, non essendovi traccia di magnetoni, non esiste una quantità di moto associabile al flusso emesso, come accadeva invece nel paradosso di Born-Einstein. Ma c'è di peggio. Supponiamo che la corrente che ha attraversato l'elettromagnete sia impulsiva e che la durata dell'impulso sia inferiore al tempo di propagazione dell'onda per raggiungere l'àncora (ed eventualmente per tornare indietro). La reazione di ritorno non potrà provocare lo spostamento dell'elettromagnete, che in mancanza di corrente non ha più proprietà magnetiche. A questo punto si hanno conseguenze imbarazzanti. Viene subito in mente che la posizione del baricentro si modifica: ma allora non potevano esserci solo forze interne! Inoltre, se àncora ed elettromagnete hanno un vincolo insensibile al campo prodotto (che quindi non lo perturba e non ne viene perturbato: ad esempio siano collegati per mezzo di una barra di materiale isolante e non ferromagnetico), il fenomeno produce un effetto propulsivo. Per fortuna almeno il principio di conservazione dell'energia non risulta – all'ingrosso – messo in discussione, perché la propulsione è avvenuta a spese dell'energia elettrica im-



Disegno computerizzato del sistema X-1 Cigno, che si pensa contenga un buco nero. Questo sistema dista circa 82.000 anni luce dalla Terra. Un buco nero è una zona di spazio nella quale il campo gravitazionale è così alto che nemmeno la luce riesce ad allontanarsene. Al suo interno si produrrebbero fenomeni tali da poter comprendere addirittura l'inversione della freccia del tempo.

messa nell'elettromagnete. Sono state finora avanzate molte spiegazioni, ma nessuna ha convinto pienamente. **Si sarebbe quindi di fronte alla possibilità che non si tratti di un paradosso, ma di una situazione che supera il paradosso stesso, diventando di fatto possibile: un para-paradosso!**

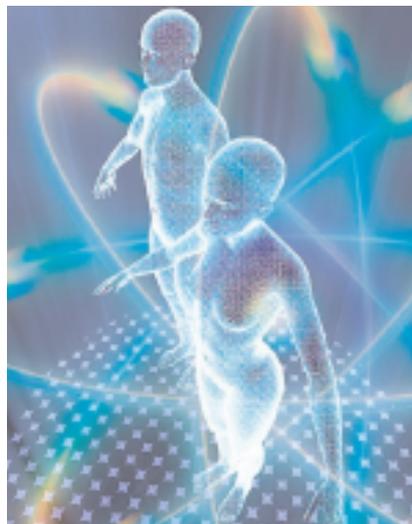
IL SOGNO PROIBITO

Per realizzare missioni spaziali a lungo raggio occorre superare gli attuali limiti di autonomia. La propulsione elettromagnetica potrebbe essere una soluzione.

Paradossi o non, la realizzazione di un meccanismo che consenta di ottenere uno spostamento ricorrendo a campi elettromagnetici interni sarebbe vitale per l'astronautica. Ricordiamo come avviene la propulsione di veicoli con i sistemi convenzionali. Sul terreno e nell'acqua si sfrutta l'attrito: le ruote motrici, o le eliche di una imbarcazione, esercitano sul mezzo di contatto la forza propulsiva. Che il fenomeno sia dovuto all'attrito risulta ben chiaro quando si cerca di muovere (o frenare...) una vettura sul ghiaccio: il ridotto coefficiente di attrito rende l'azione poco efficace o impossibile. Nei velivoli con propulsione ad elica il liquido è un gas e non un liquido: cambiano le leggi coinvolte

Un fenomeno noto come "quantum entanglement" (non-separabilità quantistica) renderebbe possibile la copia dello stato quantico di un sistema in un altro identico che ne differisce solo per la distanza interposta. In teoria sarebbe quindi possibile il teletrasporto della materia, creandone una copia perfetta a distanza, a patto però di distruggere l'originale.

(un liquido è incompressibile, mentre un gas si può comprimere) ma il principio è identico. Le cose vanno diversamente nei veicoli a getto, come gli aeroplani a reazione e gli idrogetti. Qui un fluido – aria o acqua – viene aspirato, accelerato e poi espulso a velocità elevata. Al fluido è associata una quantità di moto che per reazione determina lo spostamento del veicolo. Nell'acqua – o nell'atmosfera – il fluido per far funzionare il getto è disponibile in quantità, perché provvede al sostentamento del veicolo. Ma nello spazio non esistono fluidi. Allora si sfrutta ancora il principio di azione e reazione (e che altro, se no?) proiettando all'esterno del veicolo, più velocemente possibile, una massa immagazzinata in precedenza. Quindi occorre una sorgente di energia per accelerare la massa propellente ma occorre anche la massa stessa, o la materia prima per produrla. Poiché esistono limiti al carico che un veicolo spaziale può portare con sé, la massa disponibile per la sua proiezione all'esterno limita l'autonomia del veicolo stesso. Viaggi spaziali più lunghi di quelli per raggiungere i pianeti prossimi sono attualmente impronibili. Tra le numerose alternative che vengono analizzate, la propulsione elettromagnetica occupa un posto di rilievo. **Tutti i più importanti istituti di ricerca – a partire dalla NASA – se ne stanno occupando attivamente.** Non sono da meno gli enti di ricerca mili-



tari (soprattutto quelli americani), che secondo alcuni avrebbero già ottenuto qualche risultato. Questo però sembra francamente esagerato, visto che l'argomento è oggetto – già da diversi anni – dell'interesse di innumerevoli ricercatori, molti dei quali stanno percorrendo identiche direttrici di indagine. Se un avanzamento significativo fosse stato ottenuto, sarebbe impossibile mantenere il segreto: non ci si riuscì nemmeno con la tecnologia nucleare militare. Oltre tutto, nell'epoca di Internet, la quantità di documenti che trattano dell'argomento (non pochi facilmente tacciabili di ciarlataneria, ma ce ne sono anche di maledettamente seri) sta diventando sterminata. **A questa moderna corsa all'oro (ma è un paragone ridotto) stanno partecipando anche piccoli laboratori privati e addirittura ricercatori isolati, talvolta chiaramente velleitari.** Qualcuno sostiene addirittura di aver risolto il problema, pur non avendo ancora mostrato prove convincenti e riproducibili. È raro che con pochi mezzi e fuori da grandi istituti di ricerca si ottengano risultati. Certo, pare che Albert Einstein dicesse "tutti sono convinti che una cosa sia impossibile, poi arriva qualcuno che non lo sa e la inventa". E per riferirsi ad *outsider* di successo si cita di solito Guglielmo Marconi: e basta... Però il buon Guglielmo addusse prove tali da superare qualsiasi obiezione. Invece, i più disinvolti cultori della propulsione elettromagnetica sostengono di avere dati sperimentali, ma poi risulta difficile se non impossibile assistere ad un esperimento. In conclusione, studiare, studiare e studiare questi fenomeni sembra più che opportuno: sostenere senza prove di aver trovato la soluzione, via, non è un atteggiamento da fisici veri. E poi, i tempi di Keplero e del calcolo dello spessore della volta celeste sono ormai piuttosto lontani. 