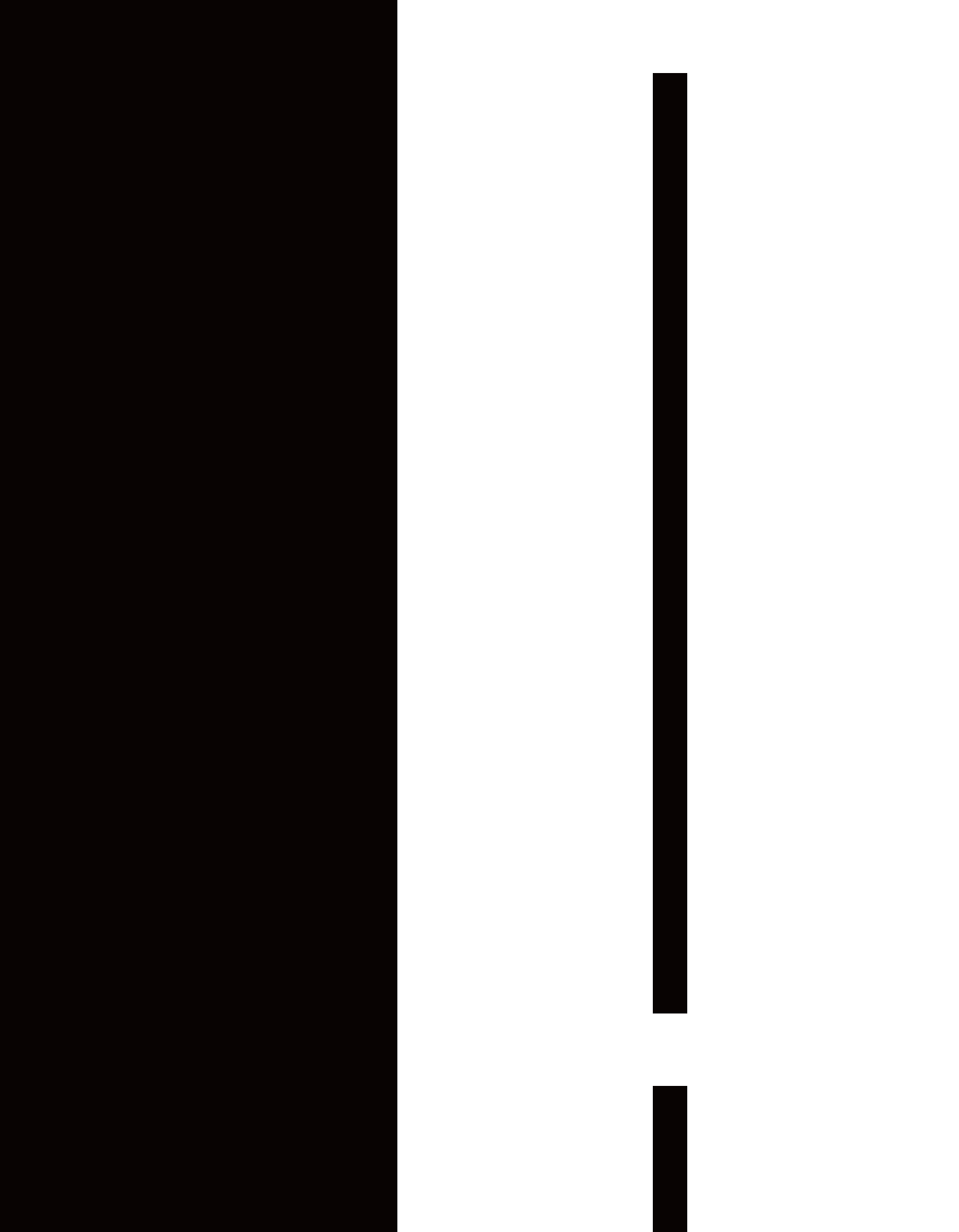


[tempo]

anno 9 numero **17** / 10.14

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



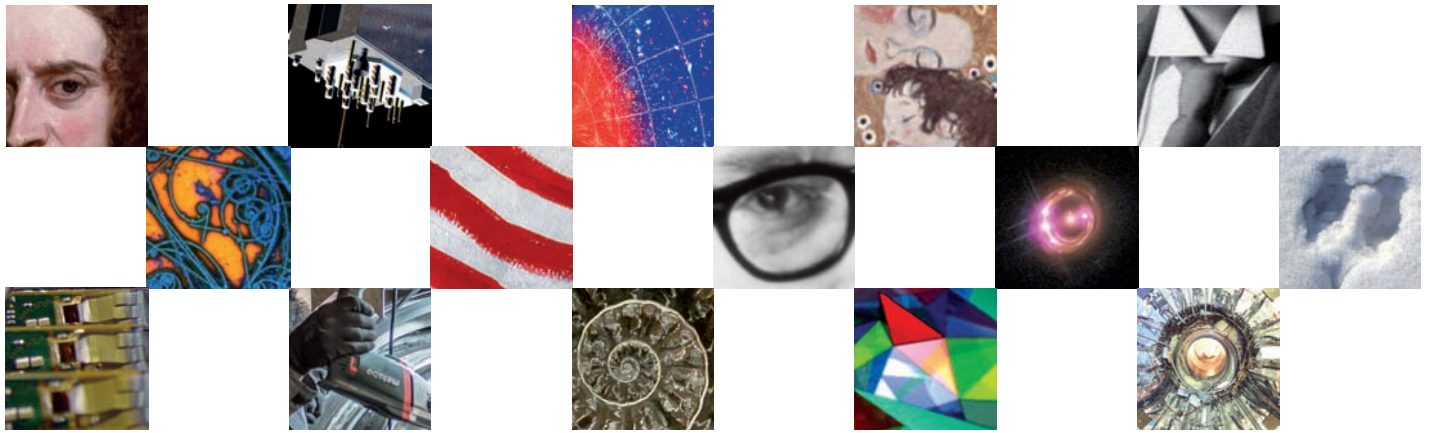
asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

Tempus fugit! Ma forse solo per noi e forse neanche sempre. Confesso che al di fuori della mia esperienza personale, quando ho il prossimo appuntamento, quanto manca alla cena, fra quanto si va in vacanza, dove ho lasciato l'orologio ... il tempo è per me un mistero. Come fisico dovrei aver metabolizzato lo spaziotempo a quattro dimensioni, nel quale tutti gli eventi accadono, ma la verità è che la dimensione temporale è sfuggente, evanescente. Credo di condividere l'opinione di Kant quando dice che il tempo ha una realtà empirica, perché è la condizione necessaria affinché si abbia percezione di alcunché di esterno o interno, ma non esiste in sé, ovvero indipendentemente da noi. Razionalmente so che per le particelle elementari il tempo non ha un verso, come per me che mi muovo dalla nascita verso la morte, so che il viaggiatore che va veloce nel cosmo e poi torna troverà un mondo diverso, quello di un futuro che chissà come sarà e soprattutto come lo accoglierà. Razionalmente non so se e quando il tempo abbia avuto un inizio. E cominciamo ora a capire come forse finirà. Se la massa del bosone di Higgs e quella del quark top sono quelle che abbiamo misurato con i nostri sofisticati apparati, allora il nostro universo è destinato a sprofondare nel suo livello di energia minimo (non vi preoccupate, manca molto!). Noi non ci saremo, ma cosa ne sarà del tempo in quell'universo non lo sappiamo proprio. Quello che so per certo è che il tempo che segna il mio orologio non coincide con quello del mio essere, con i lunghi momenti di noia e i brevi attimi di gloria (che forse sono durati per il mio orologio lo stesso tempo). Speriamo che questo numero di Asimmetrie aiuti a capire come sia complesso, misterioso e affascinante il concetto stesso di tempo.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn

**asimmetrie**

as

17 / 10.14 [tempo]

Time out di Carlo Rovelli	4	Lo scatto giusto di Umberto Marconi e Barbara Sciascia	33
Il tempo prima del tempo di Antonella Varaschin	10	Sincronizziamo gli orologi di Maximiliano Sioli	38
[as] intersezioni Passato presente futuro. di Mauro Dorato	13	[as] radici Dilatazione dei tempi alla prova. di Giulio Peruzzi	42
Cronoviaggi di Francesca Scianitti	15	[as] spazi Oltre. di Francesca Scianitti	45
Cambia, todo cambia! di Massimo Pietroni	19	[as] riflessi Calcolare in 3D. di Vincenzo Napolano	46
Le tre età di Eleonora Cossi	22	[as] illuminazioni Io dico l'universo. di Carlo Dionisi	48
Avanti e indietro di Fabio Anulli	26		
Spaccare il secondo di Aldo Godone e Massimo Inguscio	29		



Time out

Il tempo, da Newton alla gravità quantistica

di Carlo Rovelli

a.
Immagine artistica di un satellite del
Gps (Global Positioning System).



Quando negli anni settanta il primo sistema di navigazione satellitare (il Gps che ora si trova in tante automobili) fu sperimentato dall'esercito americano, i fisici avvertirono i costruttori che gli orologi sui satelliti sarebbero andati più veloci di quelli a terra. I generali dell'esercito responsabili del progetto non vollero crederci e i primi test furono fatti ignorando quest'accelerazione del tempo con l'altezza. Nulla funzionò. Così i generali dovettero accettare l'idea che il tempo da qualche parte scorre più veloce.

Esperienze come questa ci mostrano che la nostra intuizione elementare su come funziona il tempo non è corretta. O meglio, che questa intuizione non è adatta a descrivere il mondo, non appena si esce dal regime di dimensioni, velocità e precisione a cui siamo abituati. Se si pongono due orologi precisi uno più in alto e uno più in basso, questi misurano due intervalli di tempo diversi, fra il momento in cui sono stati separati e il momento in cui vengono ravvicinati. L'orologio tenuto più in basso indica che è passato meno tempo e l'orologio tenuto più in alto indica che è passato più tempo: il tempo non passa eguale per tutti (vd. p. 42, ndr). Oggi abbiamo orologi molto precisi, e questa differenza di velocità dello scorrere del tempo si misura anche a dislivelli di pochi decimetri. Il tempo è qualcosa di più complesso di quanto immaginiamo comunemente.

Quello che sappiamo oggi sul tempo grazie alla fisica si può distinguere in quattro livelli, via via più completi, ma via via più incerti, associati a quattro teorie: la *fisica newtoniana*, che ha tre secoli, la *relatività speciale* (o *ristretta*) e la *relatività generale*, che hanno un secolo, e la *gravità quantistica*, che è

in corso di elaborazione. Quanto è grande l'affidabilità del nostro sapere sul tempo, raccolto in queste teorie?

La prima di queste teorie, la teoria di Newton, è quella che si avvicina di più alla nostra intuizione elementare del tempo. Ci offre una concettualizzazione del tempo precisa e solidissima, di assoluta affidabilità nell'ambito dei fenomeni più familiari ma, allo stesso tempo, limitata. Sappiamo per certo che fallisce, per esempio, nel caso degli orologi precisi che misurano tempi differenti ad altezze differenti. La seconda e la terza teoria, cioè le due teorie di Einstein sul tempo, sono state largamente suffragate da una vastissima classe di esperienze e sono oggi estremamente affidabili, anche se il mondo scientifico è pronto a rimetterle in dubbio (come ha fatto, ad esempio, per gli strani risultati sui neutrini più veloci della luce di qualche anno fa, che si sono poi rivelati un falso allarme – vd. p. 38, ndr). Ma anche per queste due teorie sappiamo che esistono precisi limiti di validità, al di là dei quali le nostre idee sul tempo richiedono ulteriori cambiamenti. Infine, la ricerca attuale in gravità quantistica sta formulando una concettualizzazione del tempo ancora nuova, che appare necessaria per comprendere anche gli aspetti più generali della natura del tempo. Ma la ricerca in gravità quantistica è ancora lontana dall'avere un supporto sperimentale e, dunque, è ancora immersa in una nuvola di incertezza, priva di consenso. Quindi, detto in altre parole, oggi i fisici hanno idee molto confuse su cosa sia il tempo. L'unica cosa veramente certa è che il tempo non corrisponde a quello che ci indica la nostra intuizione elementare.



b.
Ritratto di Isaac Newton del 1702 di
Sir Godfrey Kneller (olio su tela).

Vediamo le quattro teorie sul tempo più nel dettaglio. La fisica newtoniana descrive il tempo come qualcosa che scorre in maniera uniforme ovunque, in un universo immerso in uno spazio infinito. Spazio e tempo sono indipendenti dalla materia o dagli osservatori. Lo spazio esiste anche se non c'è nulla, il tempo scorre anche se nulla succede. Questa idea di tempo ci è oggi familiare, ma non bisogna pensare che sia innata. L'idea del tempo di Newton si è imposta per la sua efficacia, non perché fosse naturale, e infatti si è imposta a fatica. L'idea dominante precedente, codificata per esempio da Aristotele, era che il tempo fosse solo una descrizione del modo (della misura) in cui le cose si muovono. Quindi se nulla esiste e nulla si muove non c'è tempo che passa. Le idee astratte di tempo e di spazio, indipendenti dalle cose del mondo e dall'accadere concreto nel mondo, ci sembrano oggi naturali, ma sono storicamente recenti. La fisica newtoniana, costruita su questa nozione di tempo, funziona benissimo nella nostra vita quotidiana, ed è per questo che si è imposta come modello di pensiero, ma è sbagliata quando si misurano le cose in modo più preciso. Per esempio, il pianeta Mercurio segue un'orbita chiaramente diversa da quella prevista dalle equazioni di Newton. E due orologi uguali possono misurare tempi diversi, in barba al tempo unico di Newton. Si è chiaramente capito che l'idea newtoniana dell'universo non descriveva bene la natura con il celebre lavoro di Einstein del 1905 sulla relatività speciale. La scoperta di Einstein si può formulare nel modo seguente. Secondo l'idea newtoniana di tempo, il tempo è unico nell'universo, quindi esiste un

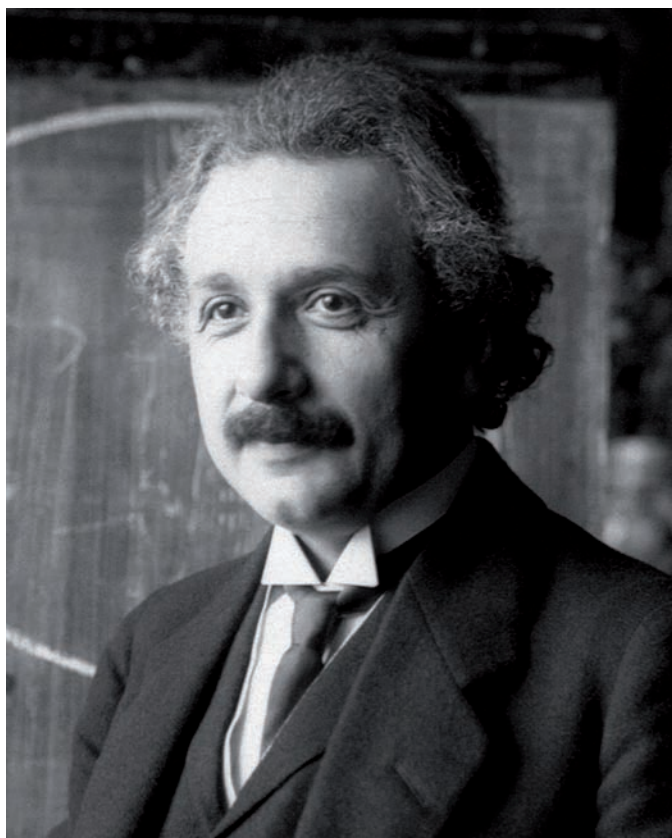
“adesso” che è ora lo stesso ovunque nell'universo. Tutti gli accadimenti dell'universo si possono catalogare fra quelli “futuri”, che sono dopo l'adesso, quelli “passati” che sono prima, o in un istantaneo “adesso”, fra il passato e il futuro, in cui si trova ora l'intero universo. Ma la realtà, come ha giustamente compreso Einstein, non è fatta così. Posso parlare del mio “passato”, che comprende tutto ciò che ho potenzialmente visto e vissuto, posso parlare del mio “futuro”, ovvero dell'insieme degli eventi rispetto ai quali io mi trovo nel passato, ma fra il passato e il futuro esiste uno spazio intermedio, di cui Newton non si era accorto, che non è né passato né futuro. La durata di questa regione che non è né passato né futuro rispetto al *me-ora*, dipende dalla distanza da me. A pochi metri da me, la durata di questo spazio intermedio è dell'ordine dei nanosecondi, cioè molto breve, per questo non ci accorgiamo della sua esistenza. Dall'altra parte dell'oceano è dei millisecondi, ancora sotto la soglia della nostra percezione. Ma su Marte è di 15 minuti e su una galassia più lontana è dell'ordine di milioni di anni (vd. fig. 2 in approfondimento a p. 8). Quello che accade su quella galassia durante questi anni non è per noi né passato né futuro. In nessun modo, quello che accade là durante questo tempo può avere un effetto su di noi, né quello che accade qui può influire su ciò che accade sulla galassia durante questi milioni di anni. È come se, durante questo intervallo, le due storie temporali non fossero collegate. La teoria della relatività speciale di Einstein ci ha mostrato che la struttura del tempo è più complessa di quanto pensassimo. Non c'è un “adesso”

dell'universo e non c'è un tempo unico per tutti. Ogni luogo, ogni oggetto, ogni storia ha il suo proprio tempo e questi tempi non sempre combaciano. Anzi, in generale non combaciano. Orologi eguali possono indicare durate diverse, se si muovono in modo diverso. Einstein scopre questa curiosa struttura profonda della realtà, oggi largamente verificata, analizzando l'apparente inconsistenza fra la teoria elettromagnetica e la meccanica.

Dieci anni dopo, nel 1915, analizzando l'apparente inconsistenza fra la sua teoria e la teoria della gravità, Einstein realizza un altro spettacolare tuffo nella comprensione della realtà. E così scopre che lo spazio “dentro cui tutto esiste” e “il tempo lungo il quale tutto scorre”, cioè questa specie di tela immobile introdotta da Newton su cui sembravano dipinti la realtà e il suo divenire, costituiscono un oggetto fisico ben definito, anch'esso governato da equazioni. Questo oggetto è il *campo gravitazionale*, un gemello del campo elettromagnetico introdotto pochi decenni prima da Faraday e Maxwell per comprendere l'elettromagnetismo. Spazio e tempo smettono di essere le misteriose quantità quasi “extra fisiche” introdotte da Newton e immerlettate da Kant, e la realtà torna a essere un insieme di oggetti che interagiscono, di cui chiamiamo “tempo” la misura del moto, come lo era per Aristotele. Einstein usa la metafora del “grande mollusco” per descrivere lo *spaziotempo* in cui siamo immersi: spazio e tempo diventano oggetti quasi materiali, con una loro dinamica.

Negli ultimi dieci o quindici anni, le più selvagge e incredibili conseguenze di questa audace teoria di Einstein (riguardanti buchi neri, espansione dell'universo, onde gravitazionali, lenti gravitazionali, differenza di velocità del passaggio del tempo con l'altezza ecc.) sono state tutte direttamente o indirettamente verificate. Oggi, questa teoria rappresenta la più estesa forma di sapere fortemente credibile che abbiamo sul tempo. Il tempo è il nome che diamo a una certa caratteristica quantitativa del campo gravitazionale, che a sua volta è una cosa simile al campo elettromagnetico.

Anche per la relatività generale di Einstein, tuttavia, sappiamo con relativa certezza che esistono precisi limiti di validità. Questi vengono dal fatto che la teoria non comprende gli effetti quantistici, i quali devono svolgere un ruolo anche per lo spazio e per il tempo. La ricerca volta a costruire una teoria quantistica della gravità, e quindi una teoria quantistica dello spazio e del tempo, porta a riconsiderare ancora una volta la nozione di tempo. Ci si è improvvisamente accorti di ciò negli anni sessanta, quando i fisici americani John Wheeler e Bryce DeWitt hanno scritto l'equazione fondamentale della teoria e questa equazione è scritta senza che il tempo vi compaia in alcun modo. Anche in versioni più moderne di questa teoria, come nella cosiddetta *teoria della gravità quantistica a loop*, le equazioni fondamentali non includono la variabile “tempo”. La spiegazione di questo fatto, che all'inizio ha generato molta confusione, è semplice: il tempo in sé, come osserva Newton stesso nel suo libro, non è osservabile. Noi osserviamo solo cose in movimento, la variabile tempo è un'utile aggiunta per mettere ordine. Ma in uno “spaziotempo”, cioè in un campo gravitazionale, soggetto a fluttuazioni



c.
Albert Einstein in una foto del 1921.

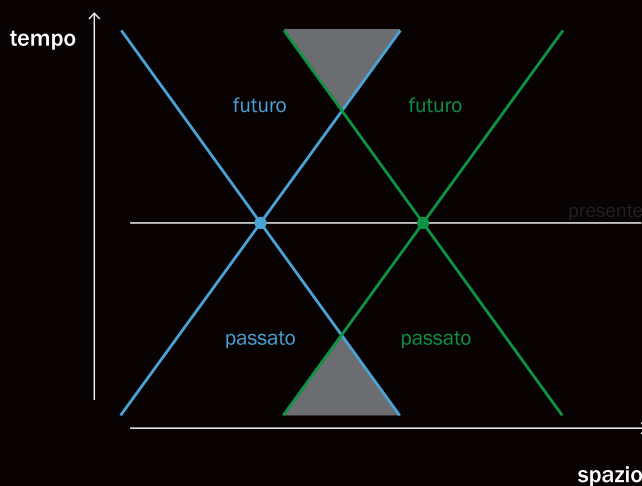
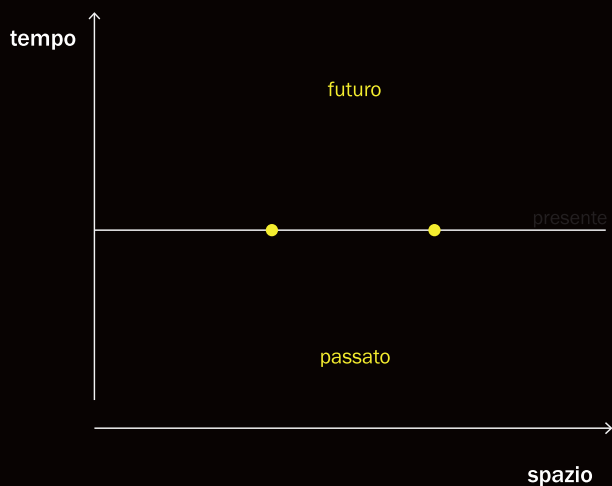
Spaziotempo relativo

Ogni punto di un diagramma spaziotemporale rappresenta un evento, cioè qualcosa che accade in una certa posizione dello spazio e in un certo istante di tempo. Nella fig. 1 (a sinistra) sono visibili due eventi (in giallo) che per la fisica newtoniana si verificano nello stesso istante e hanno lo stesso passato (semipiano inferiore) e lo stesso futuro (semipiano superiore). La linea orizzontale su cui giacciono rappresenta il loro presente. A destra nella fig. 1, per la relatività speciale, i due eventi, i punti in blu e in verde sono simultanei solo in un

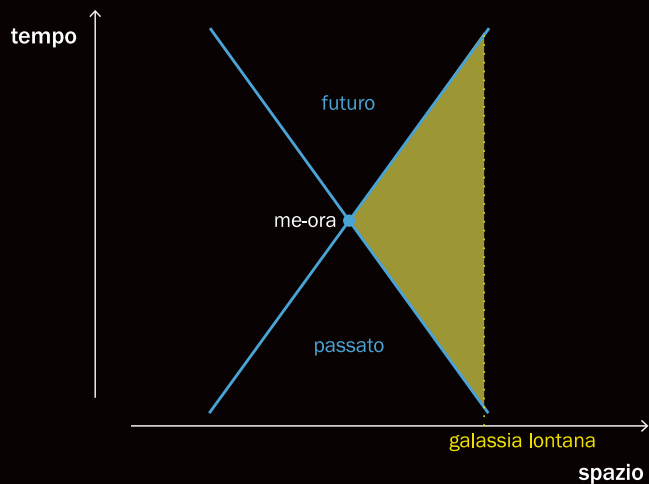
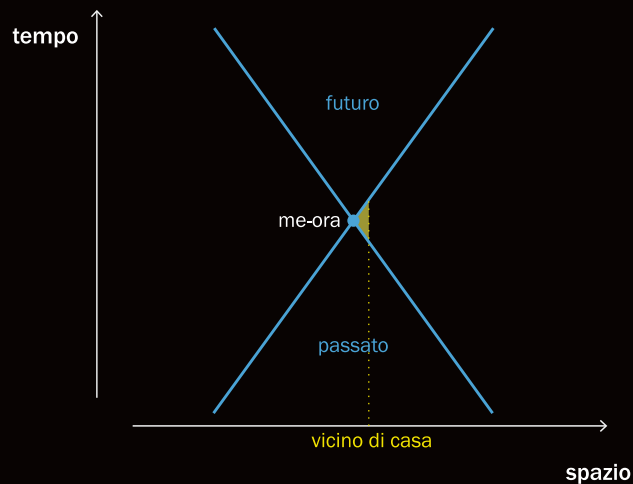
particolare sistema di riferimento e hanno un futuro e un passato distinti. Il futuro e il passato sono rappresentati, rispettivamente, dai triangoli superiori e inferiori (i cosiddetti "coni" del futuro e del passato). Le intersezioni di questi triangoli costituiscono il futuro e il passato comune dei due eventi (in grigio). Il diagramma con i due coni raffiguranti il futuro e il passato si chiama *spaziotempo di Minkowski*.

Nella fig. 2, l'intervallo di tempo degli eventi che non sono connessi a me-ora aumenta all'aumentare della distanza da me del punto dello spazio in cui questi eventi si verificano (la distanza è misurata sull'asse orizzontale). Questo intervallo di tempo è di una frazione piccolissima di secondo per gli eventi che si verificano vicino a me, è di qualche decina di minuti per eventi che si verificano, ad esempio, su Marte (non visualizzato nella figura) e può essere di milioni o di miliardi di anni per eventi che si verificano su una lontana galassia.

1.



2.



d.
Una rappresentazione artistica della
gravità quantistica.



quantistiche e alla granularità minuta che caratterizza tutti gli effetti quantistici, questa inosservabile nozione del tempo perde ogni utilità. È un po' come dire che la distanza in chilometri lungo un'autostrada è un concetto utile se ci serve per viaggiare in automobile, ma se stiamo studiando i singoli grani dell'asfalto diventa una nozione che fa solo confusione. Per studiare i quanti di gravità, il tempo non è più una buona variabile. Invece di avere equazioni che descrivono come cambiano le cose "nel tempo", possiamo direttamente avere equazioni che descrivono come cambiano le cose l'una rispetto all'altra. Questo è ragionevole, ma allora il fluire del tempo come lo sperimentiamo sulla nostra pelle, che cos'è? Una possibilità è che il tempo come lo conosciamo noi riemerge solo in un limite statistico o termodinamico. Quello che caratterizza il fluire del tempo è la *termodinamica*, la crescita dell'*entropia* (cioè la grandezza che misura il disordine microscopico dei sistemi fisici). Forse, il tempo nasce solo quando si considerano molte variabili e valori medi. Il tempo, insomma, è

una conseguenza della nostra ignoranza dei dettagli microfisici del mondo. La terna gravità/quanti/termodinamica rappresenta oggi un nodo chiave per comprendere il mondo, su cui si sta concentrando molta della ricerca fondamentale più affascinante. Al centro di questo nodo, c'è la misteriosa nozione di tempo. Di certezze, alla fine, ce ne sono pochissime. Come dice Amleto alla fine del primo atto, confuso, dopo che lo spettro di suo padre gli ha rivelato che le cose non sono come lui pensava, *The time is out of joint* ("Il tempo è uscito dai suoi cardini").

Biografia

Carlo Rovelli è professore di fisica teorica all'Università di Aix e Marsiglia, dove dirige il gruppo di ricerca in gravità quantistica. È conosciuto per i suoi lavori sulla teoria della gravità quantistica "a loop".

Link sul web

http://it.wikipedia.org/wiki/Gravità_quantistica_a_loop

Il tempo prima del tempo

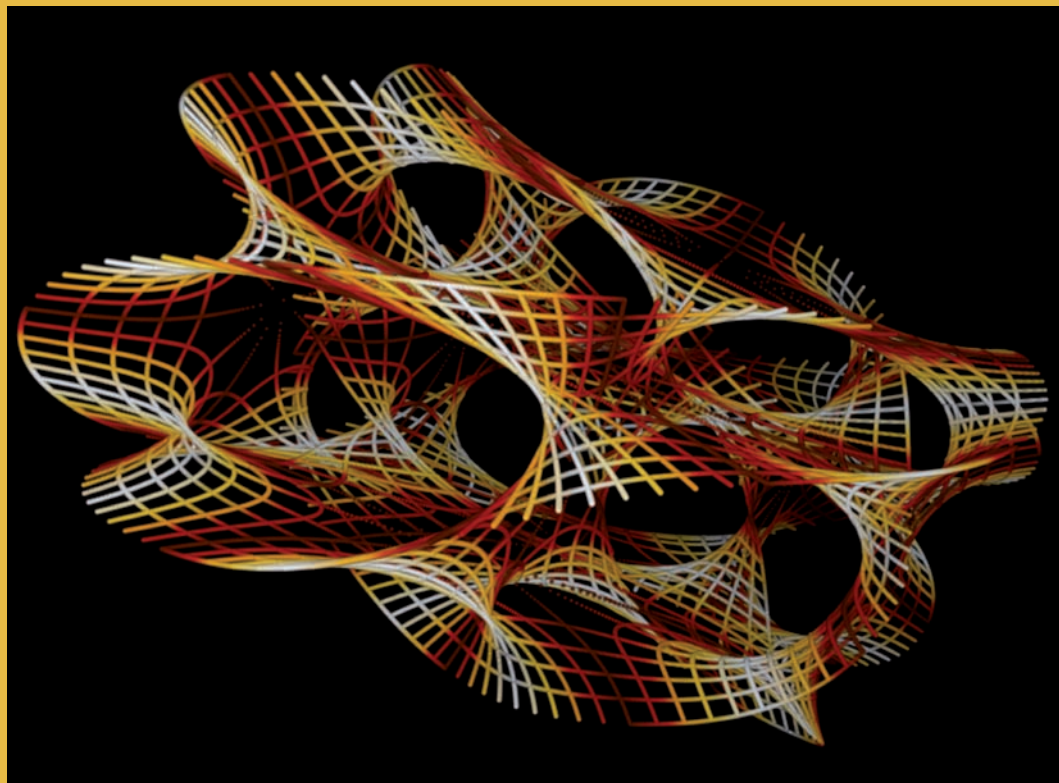
Conversazione con Gabriele Veneziano

di Antonella Varaschin

Era il 1968 quando un giovane fisico teorico italiano, di passaggio al Cern di Ginevra fra un dottorato in Israele e un posto di ricercatore al Mit di Boston, diede alle stampe un articolo che avrebbe rappresentato una pietra miliare per la fisica teorica contemporanea. Vi si mostrava che, grazie a una formula vecchia di 200 anni (la funzione beta di Eulero), era possibile render conto di alcune misure della interazione forte, realizzate con gli acceleratori di particelle. Il giovane autore di quell'articolo, Gabriele Veneziano, è oggi uno dei

massimi fisici teorici al mondo e la sua intuizione si è poi strutturata nella cosiddetta *teoria delle stringhe* che, nata quindi come una descrizione delle forze nucleari, verrà poi a rappresentare il primo promettente tentativo di unificare l'inconciliabile: la relatività generale e la meccanica quantistica, ovvero macrocosmo e microcosmo. Secondo questa teoria, le particelle elementari che costituiscono il nostro universo non sono più entità infinitamente piccole, punti senza dimensioni, ma oggetti unidimensionali

chiamati (con una traduzione un po' imprecisa dall'inglese) *stringhe*: cordicelle sottilissime e cortissime, praticamente invisibili, tese e vibranti. E maggiore è la vibrazione e l'estensione spaziale della stringa, maggiore è la sua massa. Ancora oggi, manca, a questa affascinante e ambiziosa teoria, una conferma sperimentale: anzi, la possibilità o meno di verificarla o falsificarla rappresenta uno degli aspetti che più offrono il fianco ad affondi da parte di critici, scettici e detrattori. Ma questo è un altro discorso.



a.
Rappresentazione grafica 3D di uno spazio di Calabi-Yau. Secondo la teoria delle stringhe esistono delle dimensioni extra oltre alle quattro che conosciamo. Queste dimensioni sarebbero "arrotolate" in figure con la forma di spazi di Calabi-Yau.

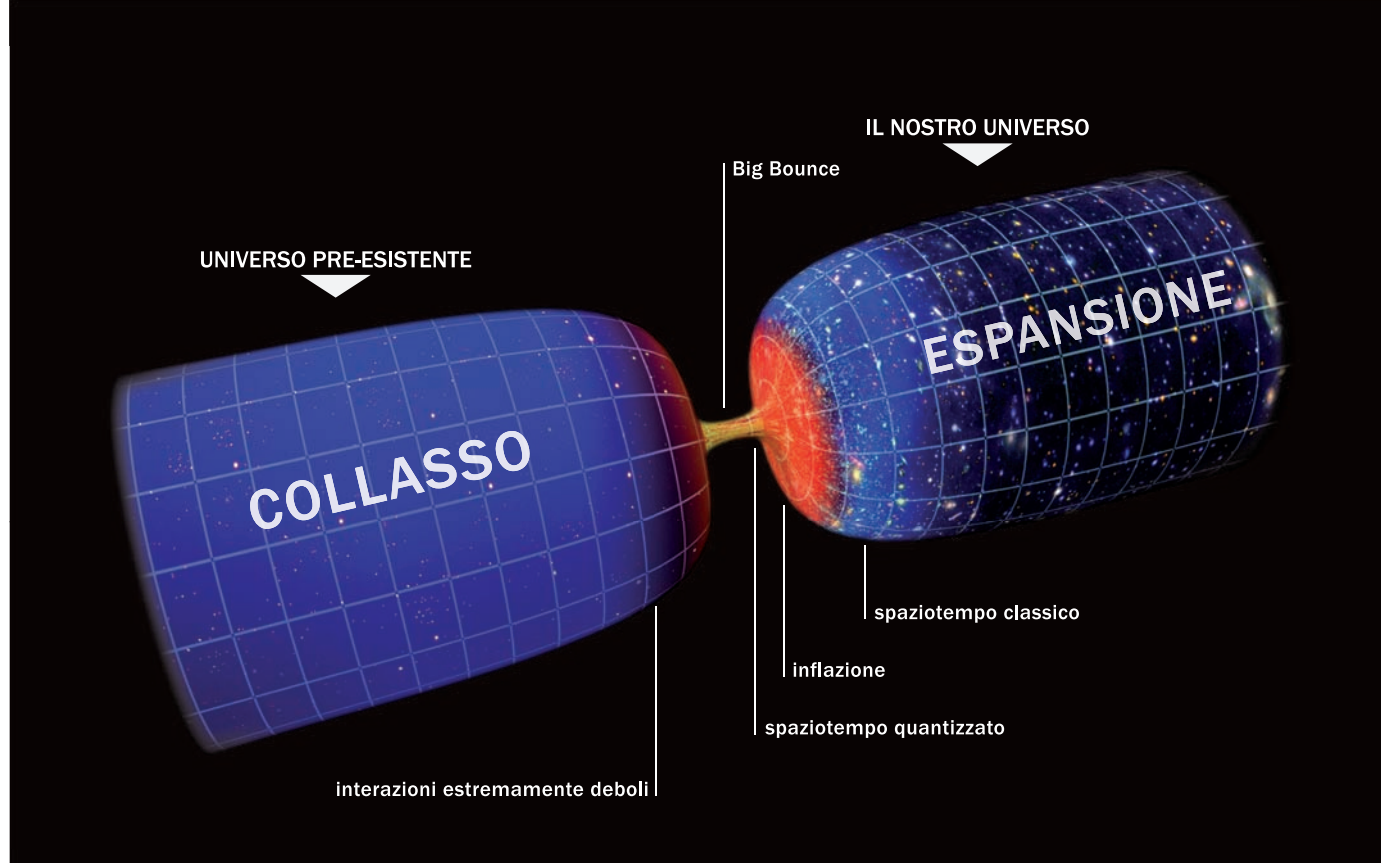


b.
Gabriele Veneziano, fisico teorico di indiscussa fama internazionale, è uno dei padri della teoria delle stringhe.

Nel corso della nostra conversazione con Veneziano, vogliamo approfondire il concetto di tempo come deriva dalla teoria delle stringhe e dalle sue implicazioni cosmologiche. Nel 1991, infatti, Veneziano pubblicò un altro articolo significativo, in cui mostrava come dalla teoria delle stringhe potesse derivare un nuovo modello cosmologico di tipo inflazionario, che apriva le porte a possibili scenari detti del *pre-Big Bang*. Ma se esiste un “pre-”, qualcosa antecedente al momento in cui abbiamo sempre pensato avesse avuto inizio tutto, compreso il tempo, questo significa che la nostra idea di tempo deve essere rimessa in discussione, così come la nostra posizione nel contesto dell’evoluzione dell’universo. “Se e quando il nostro universo ha avuto inizio, è una domanda alla quale non sappiamo ancora rispondere, ma negli ultimi trent’anni c’è stato un cambiamento importante nella descrizione della sua storia”, inizia a raccontare Gabriele Veneziano. “Prima degli anni ’80, il modello convenzionale era quello del ‘Big Bang caldo’, in cui tutto aveva avuto inizio a un certo tempo ‘zero’, istante in cui tutte le distanze relative erano talmente contratte da diventare nulle, dando così luogo a un completo collasso. Tutto insomma avrebbe avuto inizio da una *singolarità*, come viene chiamata in gergo matematico, in cui densità, temperatura e curvatura dell’universo erano infinite. Dopodiché, un’espansione di tipo decelerato, quindi dapprima molto veloce e poi sempre più lenta, ci ha portati fino a oggi. Questo modello riportò numerosi successi ma

lasciava aperti svariati problemi concettuali e fenomenologici”.

Agli inizi degli anni ’80 era stato proposto un modello, detto *inflazionario*, che riusciva a superare queste difficoltà. In questo modello, nell’universo primordiale ci sarebbe stata una fase di espansione accelerata praticamente esponenziale (detta *inflazione* per analogia con quella dei prezzi che, ad esempio, raddoppiano ogni 15 anni), seguita poi dall’espansione decelerata, come nel vecchio modello cosmologico (vd. *Asimmetrie* n. 15 p. 4, ndr). Quello che è successo prima dell’inflazione è ancora oggetto di ricerca: non si ha per il momento una risposta a questa domanda, anche perché l’inflazione ha la caratteristica di nascondere in modo efficace tutto ciò che era avvenuto precedentemente. “C’è un punto che voglio precisare, perché si fa spesso molta confusione a riguardo: nel ‘vecchio’ modello cosmologico, l’inizio del tempo coincideva con il Big Bang. Nel modello inflazionario non è più così. L’inflazione, infatti, è una fase di forte espansione dell’universo che ha portato, di conseguenza, a un suo estremo raffreddamento. A questo punto però è necessario far subentrare l’azione di un meccanismo fisico, chiamato appunto ‘riscaldamento’, che ha fatto sì che alla fine dell’inflazione l’universo ridiventasse caldo. Il Big Bang del vecchio modello viene così rimpiazzato dal momento in cui termina l’inflazione: un periodo molto breve, ma molto significativo che, per sua definizione, non ha niente a che vedere con l’inizio del tempo”.



c.
Visualizzazione grafica del Big Bounce.

I fisici teorici stanno ancora cercando di capire da che cosa sia scaturita l'era inflazionaria dell'universo e si chiedono qual è la fisica rilevante per descrivere quella fase. Bisogna porsi la domanda sull'inizio del tempo, utilizzando la teoria giusta: questa non può essere la relatività generale di Einstein, che è una teoria classica, deterministica e che prescinde dagli effetti quantistici, quando invece abbiamo evidenza che la meccanica quantistica ha giocato un ruolo essenziale già durante l'epoca inflazionaria. Per la fase pre-inflazionaria servirebbe, quindi, una teoria quantistica della gravità, che è un ben noto problema teorico. Sul mercato non ci sono molte alternative. Una è la teoria delle stringhe e l'altra è la teoria della gravità quantistica a loop (vd. p. 7, ndr). Entrambe queste teorie suggeriscono che all'inizio dell'inflazione non ci sia stata una singolarità che impedirebbe di andare più indietro del tempo zero.

“Il problema dell'origine del tempo resta così ancora aperto. Questo è un momento molto interessante in cosmologia: per la prima volta si punta veramente il dito sulla necessità di applicare la meccanica quantistica anche alla teoria della gravitazione. Dato che la teoria delle stringhe non tollera gli infiniti, sembrano esserci, nel suo contesto, solo due alternative per quanto riguarda l'inizio del tempo. La prima è che andando all'indietro, ci sia una fase speculare alla nostra (salvo che le interazioni erano talmente deboli da dare un universo privo di strutture), che si estende indefinitamente verso il passato e che termina quando temperatura, densità e curvatura raggiungono il massimo valore permesso. La

seconda ipotesi è che tutto sia iniziato da una fase in cui non esistevano spazio e tempo, concetti scaturiti solo successivamente. Nel primo scenario, quello proposto nel 1991, c'è qualcosa che simula il vecchio Big Bang: il cosiddetto *bounce*, ovvero “rimbalzo”, un momento in cui le varie quantità fisiche raggiungono il loro massimo valore per poi iniziare a decrescere. Invece che di Big Bang possiamo parlare di *Big Bounce* del momento in cui la temperatura dell'universo avrebbe raggiunto il suo valore massimo, ma finito”. Possiamo chiederci che cos'è il tempo? “Personalmente tendo ad assumere un atteggiamento operativo a riguardo: il tempo inteso come quantità misurabile con orologi, con oggetti fisici. Il tempo perde senso se non lo si può misurare (ricordo che Einstein arrivò alla relatività ristretta pensando a come sincronizzare due orologi se la velocità della luce è finita). Dunque non mi pongo tanto la questione di che cosa sia il tempo, che prendo come concetto primitivo, ma piuttosto di come misurarlo: un atteggiamento da fisico, più che da filosofo”.

Link sul web

<http://www.college-de-france.fr/site/en-gabriele-veneziano/biography.htm>

http://www.youtube.com/watch?v=i_OUsZjngw

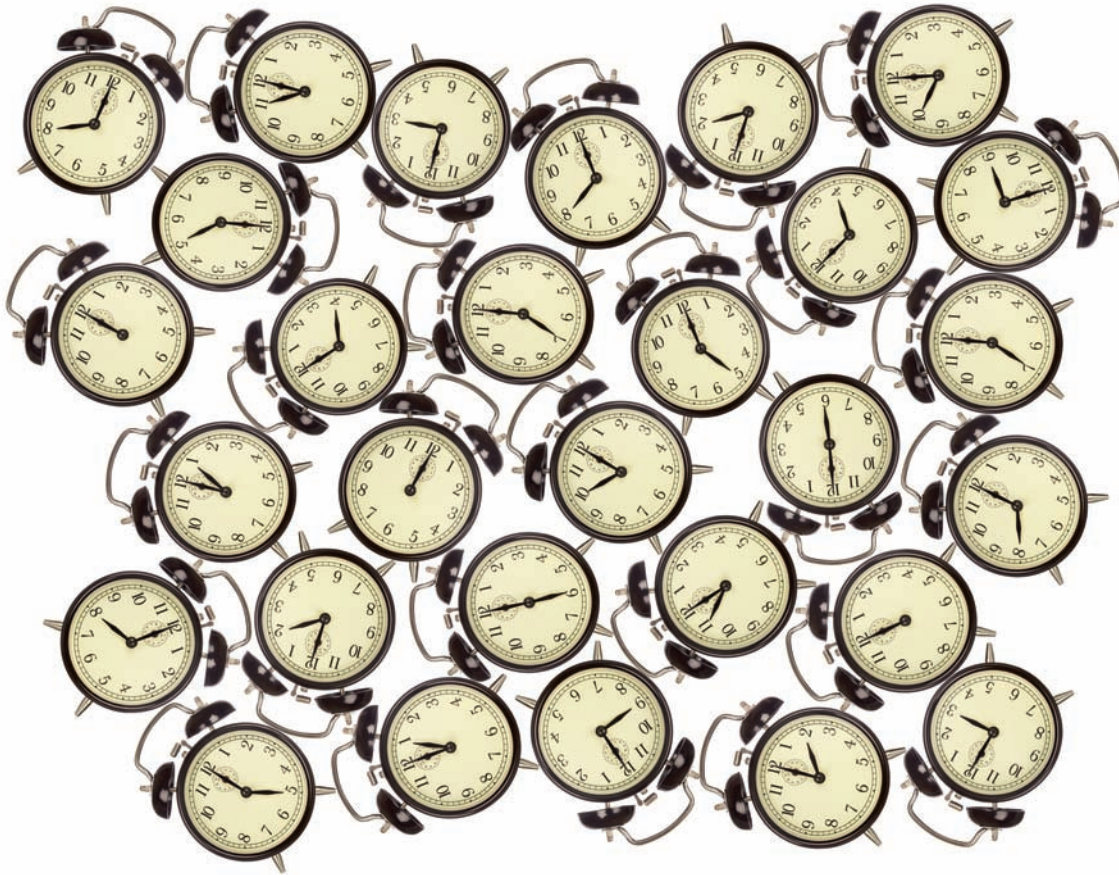
http://www.einstein-online.info/spotlights/big_bangs

[as] Intersezioni

Passato presente futuro.

di Mauro Dorato

filosofo della scienza



La riflessione sul tempo è un capitolo fondamentale della filosofia e della scienza contemporanea. Non è esagerato ritenere che tutti i problemi filosofici e scientifici più importanti si intreccino oggi con il problema del tempo. Quest'ultimo non solo gioca un ruolo centrale nella descrizione del mondo esterno, ma è anche qualcosa di cui siamo direttamente coscienti, e ha quindi a che fare con la nostra identità personale. I due più grandi problemi aperti della scienza contemporanea, ovvero l'unificazione della meccanica quantistica e della relatività generale da una parte (vd. p. 4, ndr) e la comprensione dell'origine del pensiero cosciente a partire dal cervello dall'altra, infatti, chiamano in causa, sebbene in modo assai diverso, proprio il tempo. Nella sua *Nuova Confutazione del Tempo* Borges scrive

*Il tempo è la sostanza di cui sono fatto.
Il tempo è un fiume che mi trascina, ma io sono il fiume;
è una tigre che mi divora, ma io sono la tigre;
è un fuoco che mi consuma, ma io sono il fuoco.*

Il fatto che Borges insista sulla natura personale del tempo (“noi” siamo il tempo) allude forse al fatto che il tempo (insieme allo spazio) è una forma soggettiva innata con la quale gli esseri umani esperiscono il mondo esterno e interno, come sostenuto da Kant nella sua *Critica della Ragion Pura*. Infatti, per Kant, il tempo ha una realtà empirica, perché è la condizione necessaria affinché si abbia percezione di alcunché di esterno o interno, ma non esiste in sé, ovvero indipendentemente da noi. Ovvero, non esiste nel mondo considerato in sé (è “ideale” da un punto di vista trascendentale). In più, come afferma la citazione di Borges, il tempo dal punto di vista dell’esperienza è la sostanza di cui siamo fatti, ma una “sostanza” che sembra consumarsi costantemente proprio come una fiamma, che vive grazie alla sua distruzione. Questa metafora poetica introduce in modo naturale uno dei problemi principali della filosofia del tempo, che coinvolge la natura del momento presente e il suo continuo passaggio. Il momento presente è fondamentale nella nostra esperienza, ma dal punto di vista della fisica, newtoniana o einsteiniana che sia, non esiste. Scrive Carnap nella sua autobiografia, nella quale racconta del suo incontro con Einstein a Princeton: “Il problema del presente lo preoccupava seriamente. Una volta Einstein disse che l’esperienza del presente significa qualcosa di speciale per l’uomo, qualcosa di essenzialmente diverso dal passato e dal futuro, ma che questa importante differenza non ha luogo e non può averne nella fisica”.

Non c’è dubbio che con la relatività della simultaneità sia diventato ancor più difficile attribuire una qualche oggettività al divenire temporale e all’esistenza di una differenza radicale tra passato cosmico, presente cosmico e futuro cosmico. Le differenze in questione, come accade con la relazione di successione temporale, diventano puramente locali, nel senso che hanno oggettività solo per eventi relativi a singole linee di universo, legati tra loro da rapporti causali invariati, perché collegabili da segnali che viaggiano a velocità inferiori a quella della luce. Risulta quindi difficile sostenere che l’“esser presente” sia una proprietà intrinseca degli

eventi (e quindi sia del tutto indipendente dalla nostra coscienza) e che sia acquisita via via da eventi temporalmente successivi. Invece sembra assai più plausibile sostenere che tale proprietà dipenda – come la fisica relativistica integrata da alcuni dati neurocognitivi e da importanti teorie filosofiche contemporanee suggeriscono – dalla prospettiva di *agenti* dotati di strutture percettive e cognitive simili alle nostre. Questa conclusione è di importanza non solo teorica, ma anche pratica: noi viviamo e facciamo esperienza del mondo solo nel momento presente ed è solo con la memoria e con l’anticipazione (che sono tuttavia atti psicologici che avvengono nel momento presente) che ci spingiamo mentalmente al di là di quel che, momento per momento, facciamo. Queste capacità di “viaggiare nel tempo” sono tipiche degli esseri umani. Non è un caso che le grandi filosofie ellenistiche e le religioni orientali ci hanno sempre esortato a concentrarci esclusivamente sul momento presente, perché le nostre vite si dispiegano solo nel presente: perché tormentarci per un passato che non esiste più e consumarci con l’ansia per un futuro che non esiste ancora, se solo il presente esiste? I metafisici contemporanei hanno tradotto questo atteggiamento pratico elaborando la cosiddetta *metafisica presentista*, una posizione teorica che ritiene che esista solo ciò che esiste nel presente, posizione che essi hanno difeso con ragioni del tutto indipendenti dalle loro conseguenze pratiche. Ma se la fisica relativistica ci insegna che, come sosteneva Einstein, passato, presente e futuro esistono tutti allo stesso modo, diviene necessario non solo concentrare la nostra attenzione sul momento presente, ma anche comprendere che quest’ultimo è solo un minuscolo anello inserito in una catena cosmica di cui facciamo parte. Dobbiamo allora accogliere nella nostra mente in modo equanime tutte e tre le determinazioni del tempo: passato, presente e futuro e cercare di guardare all’universo, come suggeriva Spinoza, *sub specie aeternitatis* (“sotto l’aspetto dell’eternità”, ndr). La filosofia è un sapere insieme teorico e pratico, ed è forse proprio questa inscindibile unione l’eredità più preziosa che il pensiero greco ci ha lasciato.

Cronoviaggi

La fantascienza del tempo

di Francesca Scianitti

Si narra di cronoviaggiatori rientrati dal futuro con un fiore in mano. Di mogli e mariti riemersi dalla tomba per rivivere la giovinezza e dimenticarsi l'uno dell'altra una volta tornati bambini. Avventurieri raddoppiati e copie di temponauti scomparsi in viziosi circoli temporali chiusi e inaccessibili. Buchi neri che invertono la rotta del tempo e universi sede di infiniti futuri possibili. Macchine del tempo che soltanto il genio di Einstein avrebbe potuto immaginare, se solo avesse osato farlo.

La fantascienza sembra il luogo naturale di una lotta impossibile tra immaginazione, realtà fisica, logica ed etica, capace di generare paradossi dalla straordinaria potenza narrativa. Forse non ha alcun senso interrogarsi sul fondamento scientifico di questi racconti, ma può essere interessante ribaltare la domanda: che fisica otterremmo se provassimo a dare coerenza alle invenzioni della fantascienza? La potenza delle risposte può dare luogo a sua volta a un viaggio nel tempo, sovvertendo il senso comune e il limite delle nostre conoscenze, e immaginando realtà considerate fino a quel momento inaccettabili o mai immaginate.

La più straordinaria delle previsioni concettuali della fantascienza si trova nel primo romanzo di questo genere, *La macchina del tempo* di George Wells. Scritto nel 1895, dieci anni prima che Einstein pubblicasse il primo articolo sulla teoria della relatività speciale, il romanzo fonda la possibilità dei viaggi nel tempo sull'idea che non esista alcuna differenza tra le tre dimensioni spaziali e la dimensione temporale, se escludiamo la nostra percezione del procedere del tempo. È un'anticipazione della formulazione matematica di Minkowski dello spaziotempo quadridimensionale, costituito non più da eventi spaziali che evolvono nel tempo, ma da un *continuum*, in cui l'evoluzione nel tempo



a.

È un fiore portato dal futuro il co-protagonista del romanzo *La macchina del tempo* di Herbert George Wells. Grazie all'invenzione di una prodigiosa macchina del tempo, un geniale scienziato accede a un futuro lontanissimo scoprendo forme di vita inimmaginate. Al suo ritorno, porterà nel presente l'unica prova di quel viaggio: un fiore sconosciuto.

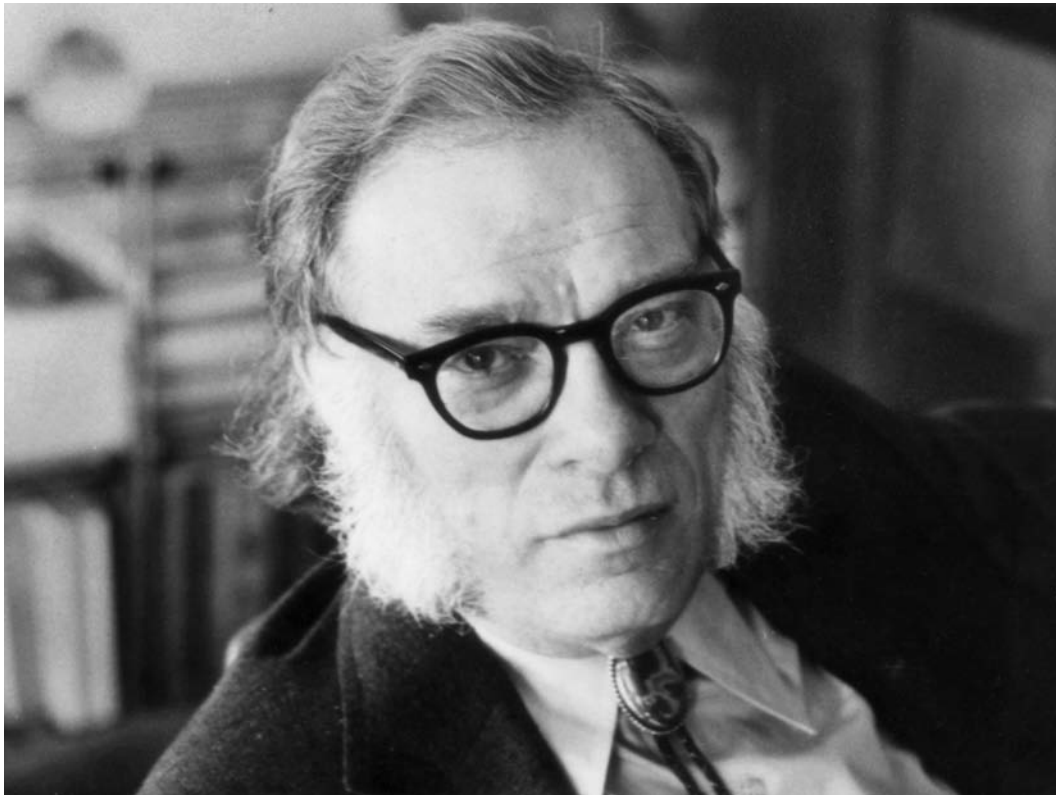
viene rappresentata come un “moto” lungo la dimensione temporale (vd. approfondimento a p. 8, ndr). Come fotografie successive di un unico individuo, scattate in epoche diverse, la realtà che conosciamo è immaginata da Wells come una sezione, una rappresentazione tridimensionale dell'*unicum* quadridimensionale, fisso e inalterabile. Ma se il tempo è solo una dimensione come le altre, osa l'immaginazione di Wells, deve pur essere possibile muoversi avanti e indietro lungo l'asse temporale come facciamo con le tre dimensioni spaziali. Con questa irresistibile semplicità la fantascienza sfonda per la prima volta la porta del tempo.

Wells però non si accontenta di precedere inconsapevolmente la teoria scientifica, ne sfida persino i confini futuri. I suoi viaggi temporali, infatti, come quelli della maggior parte degli scrittori di fantascienza, consentono viaggi nel passato, o ritorni dal futuro al presente, oltre che viaggi di sola andata nel futuro. Perché i viaggi nel futuro non sono poi così interessanti, almeno finché il viaggiatore non decide di tornare. Ed è il ritorno al presente ad avere conseguenze

scientificamente ed eticamente paradossali. Lo stesso cronoviaggiatore potrebbe incontrare se stesso da giovane o, peggio, uccidere i propri genitori prima della sua nascita. Quale realtà sarebbe allora più reale, quella del presente in cui è nato o quella del presente in cui non può essere nato? E se anche volessimo accettare la possibilità di un ritorno dal futuro al presente (così come un viaggio nel passato), dal presente qualcosa dovrebbe scomparire. Perché un fiore portato dal futuro non può che essere fatto con gli stessi atomi già esistenti nel presente: il suo “ritorno dal futuro” significherebbe la presenza simultanea degli stessi atomi in due luoghi diversi e la materia risulterebbe così duplicata, creata dal nulla. Eppure bisogna ammettere che, da un punto di vista puramente letterario, il paradosso è un irresistibile trampolino di lancio verso il fantastico. E non è raro che l'autore produca soluzioni geniali per restituire senso e consistenza alla sua sceneggiatura. Affondando così le radici in una nuova struttura della realtà, e non soltanto nell'invenzione pura, i nuovi mondi della fantascienza sono spesso insolitamente credibili.

b.

Isaac Asimov è autore di circa 500 volumi, non solo su argomenti scientifici, ma anche del genere romanzo poliziesco, di fantascienza umoristica e di letteratura per ragazzi. Le sue opere sono considerate una pietra miliare sia nel campo della fantascienza che nel campo della divulgazione scientifica.

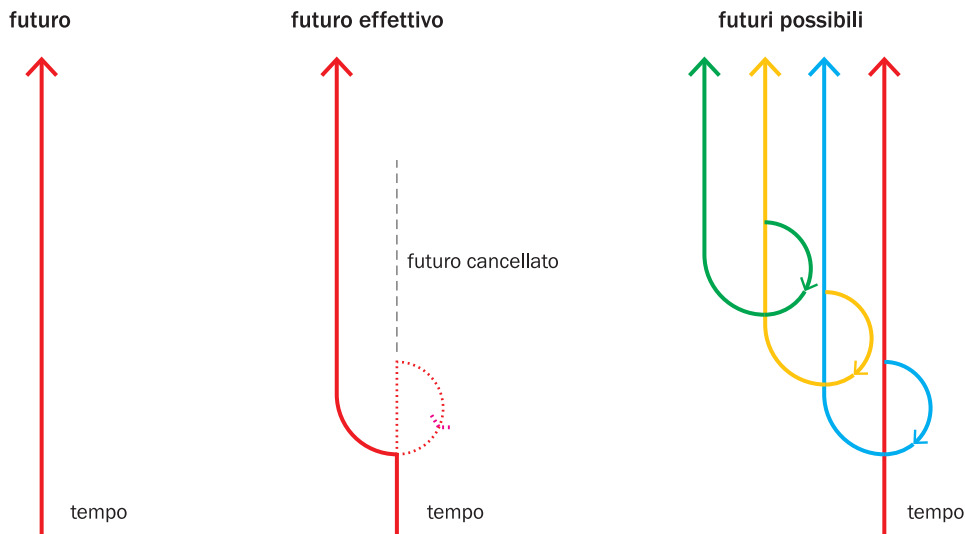




C.
Una scena di "Ritorno al futuro" (1985, regia di Robert Zemeckis): Michael J. Fox (a destra) e Christopher Lloyd (a sinistra) con la DeLorean utilizzata nel film come macchina del tempo.

Per risolvere il paradosso della duplicazione, nel racconto *Necrologio* Isaac Asimov fa ricorso a una particolare macchina del tempo ideata da un oscuro dottor Stebbins: la macchina crea una copia del viaggiatore, l'uno viaggia nel tempo, l'altro resta nel presente. La macchina, tuttavia, è costruita in modo da uccidere gli esseri che richiama nel presente, prevenendo così la possibilità che il ritorno dal futuro possa cambiare la storia. L'individuo originale, in sostanza, non viaggia affatto: è il suo duplicato a essere costretto in un circolo vizioso presente-futuro-presente, che ripercorre di continuo, muovendosi su una linea temporale chiusa. Per la fisica questa situazione non è poi così assurda, se si considera l'analogia con il vuoto quantistico: dal vuoto possono emergere una particella e un'antiparticella, che subito si annichilano e si ricreano, e così via in un circolo chiuso infinito. Ma in questo caso, come in altri, la fantascienza supera la semplice soluzione del paradosso e nel racconto di Asimov il circolo a un certo punto si spezza. Approfittando del ritorno dal futuro della copia defunta del marito, la moglie del dottor Stebbins decide di uccidere l'originale riuscendo così, in modo

insospettabile, a liberarsene per sempre. Come propongono Robert Heinlein e Philip Dick in racconti simili a quello di Asimov, tuttavia, la duplicazione del cronoviaggiatore può essere evitata: di ritorno dal futuro, il viaggiatore potrebbe identificarsi con il se stesso presente, per "uscire" da questo prima di ripartire. L'idea è asfissiante, ma risolverebbe, oltre al problema del parricidio, la moltiplicazione infinita di quel Martin del famoso film *Ritorno al futuro*, che tornando dieci minuti prima di quando era partito può osservare il se stesso in partenza, il quale a sua volta potrebbe tornare dieci minuti prima a osservare Martin che osserva Martin in partenza, e così via senza fine. La strategia per aggirare i paradossi, ed evitare le descrizioni incoerenti, segue in genere una filosofia molto personale, alla quale ciascun autore di fantascienza aderisce sulla base di scale di valori e conseguenze ritenute più o meno accettabili. Non è raro comunque che la scelta sia quella di cavalcare e portare all'estremo le conseguenze paradossali delle invenzioni fantascientifiche, progettando castelli privi di fondamenta, assurdi e tuttavia credibili. Un bell'esempio è



raccontata dal film *Il curioso caso di Benjamin Button* (2008), che vede un vecchissimo Brad Pitt ripercorrere a ritroso le fasi dell'esistenza, incrociando la vita di una moglie bambina, di cui sarà in diversi momenti amico-nonno, adulto-seduttore, marito, figlio e, infine, infante nipote. Ma non si tratta in questo caso di veri e propri viaggi nel tempo, perché è il tempo stesso a invertire la sua rotta diventando "anti-tempo", portando a eventi come la morte al "contrario". Anche quando si affidano totalmente ai paradossi, estremizzandone le conseguenze, i bravi scrittori di fantascienza si pongono il problema della coerenza dell'universo che inventano, che non può capitolare in una serie di catastrofi inaccettabili. Ma l'immaginazione ha bisogno di spazio, non di limitanti preconcezioni, e la coerenza non può essere protetta da un semplice principio di censura, sulla base del quale ciò che è troppo paradossale, è semplicemente inaccettabile. Per questo i creatori di fantascienza sanno spesso rendere logicamente possibile ciò che fisicamente non lo è, mettendo in campo speculazioni che possono dare da

pensare ai più affermati filosofi e fisici teorici. Una bella soluzione narrativa, e logica, dei paradossi temporali prevede, ad esempio, che si accettino gli interventi sul passato: questo è possibile solo eliminando il futuro, per così dire, originale, a favore di un nuovo futuro, modificato dall'incursione del cronoviaggiatore. È certamente una soluzione affascinante, ma darebbe inevitabilmente luogo a una serie di problemi di natura etica, poiché ammette, di fatto, la possibilità di realizzare un presente-futuro a proprio piacimento tramite rapide escursioni, di tanto in tanto, nel passato. Esiste una seconda soluzione, più accettabile, probabilmente la più elegante e coerente tra tutte le possibili: prevede che il futuro originale sia conservato e continui il suo corso insieme ad altri infiniti futuri e universi paralleli modificati dalle incursioni in infiniti passati preesistenti. Ecco una nuova previsione della letteratura che ha probabilmente la stessa dignità del *continuum* spaziotemporale previsto da Wells prima di Einstein. Resta da chiedersi, a questo punto, se si tratti davvero soltanto di fantascienza.

d. Due possibili soluzioni del paradosso dei viaggi nel passato (o dei ritorni dal futuro). In entrambi i casi il viaggio modifica il futuro. Al centro, il futuro non modificato è da considerare impossibile, irrealizzabile e viene cancellato. A destra, i futuri modificati e non modificati dalle incursioni nel passato sono tutti conservati, dando luogo a un'infinità di futuri possibili. (Figura liberamente tratta da "La scienza della fantascienza" di Renato Giovannoli).

Link sul web

<http://www.scuola.rai.it/articoli/herbert-george-wells-la-macchina-del-tempo-un-libro-in-tre-minuti/3056/default.aspx>

Cambia, todo cambia!

La variazione delle costanti fondamentali

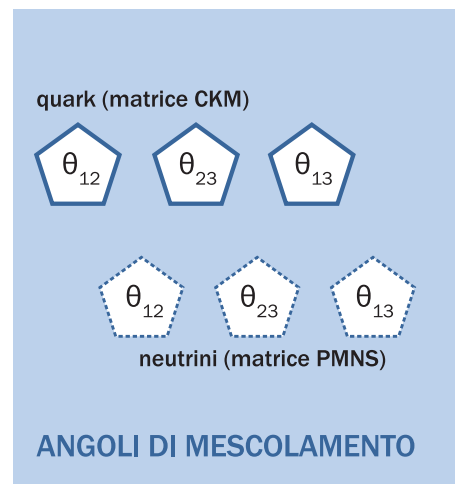
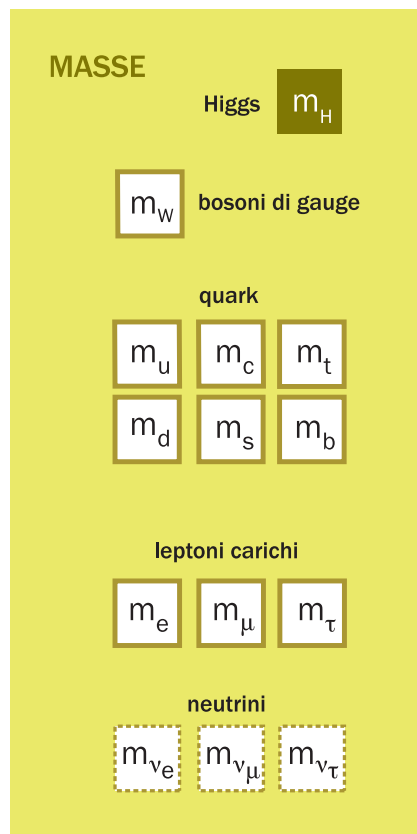
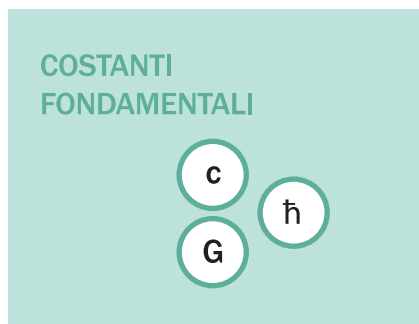
di Massimo Pietroni

Ogni teoria fisica contiene un certo numero di parametri che non possono essere calcolati a partire dalla teoria stessa, ma devono essere determinati attraverso una misura sperimentale. Un esempio è la costante di Newton, G , che entra nella legge della gravitazione universale per la forza di attrazione F tra due masse m_1 e m_2 , poste a una distanza R : $F = G m_1 m_2 / R^2$. La teoria di Newton non fornisce alcuna indicazione sul valore di G , tanto che questo fu determinato per la prima volta solo nel 1798, e cioè 71 anni dopo la morte di Newton stesso, con le misure tramite bilance a torsione eseguite da Cavendish. Il valore dei parametri fondamentali, all'interno di un dato schema teorico, è *a priori* del tutto ignoto. Per questo motivo, in accordo con tutti i dati sperimentali disponibili in un certo momento, si assume che questi parametri siano costanti nel tempo, e li si indica come *costanti fondamentali*. Alcuni di questi parametri possono variare con l'energia del processo in cui vengono misurati, un fenomeno ben noto che va sotto il nome di *running* delle costanti. Se una nuova misura fisica dovesse mettere in evidenza anche una dipendenza dal tempo di questi parametri, vorrebbe dire che c'è un nuovo meccanismo responsabile di questa variazione temporale, che rende inevitabile modificare lo schema teorico. Il fisico teorico inglese Paul Dirac, uno dei padri della meccanica quantistica, fu tra i primi a proporre che alcune costanti fondamentali fossero in realtà variabili su scale dei tempi dell'ordine della vita dell'universo. Il suo punto di partenza fu l'osservazione che in Natura esistono alcuni numeri molto grandi, che difficilmente possono essere spiegati in modo naturale dalla teoria. Uno di questi è il rapporto fra la forza elettrostatica e quella gravitazionale che si esercitano tra un protone e un elettrone, che vale circa 10^{40} e dà la misura della "forza" dell'elettromagnetismo rispetto alla gravità. La proposta di Dirac fu di spiegare questo numero enorme ipotizzando che la forza elettrostatica e quella

gravitazionale fossero inizialmente dello stesso ordine, e che il rapporto tra loro fosse cresciuto in modo proporzionale all'età dell'universo man mano che questo invecchiava. Concretamente, Dirac immaginò che la costante di Newton G variesse in modo inversamente proporzionale all'età dell'universo, rendendo la gravità sempre più debole col passare del tempo. Agli occhi di Dirac questa soluzione era attraente, poiché spostava il problema teorico dalla spiegazione di un numero enorme a quella di un numero di ordine uno (il rapporto iniziale tra le due forze) per cui può essere più plausibile immaginare una determinazione in termini di principi elementari.

a.
Il fisico teorico inglese Paul Adrien Maurice Dirac.

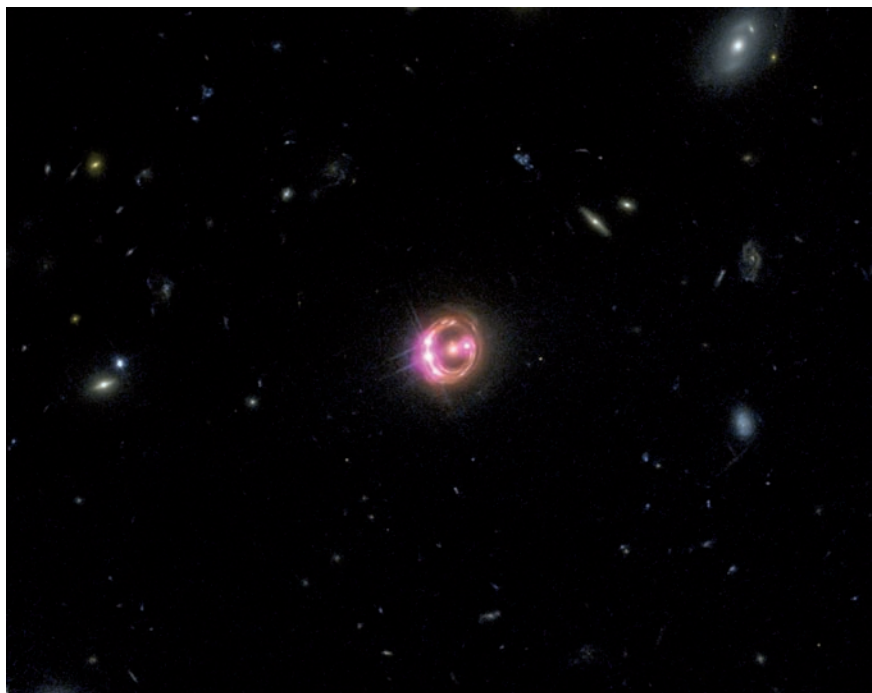




In realtà, lo schema proposto da Dirac, oltre a basarsi su motivazioni opinabili, non resse ad analisi più approfondite. Per esempio Edward Teller calcolò che poiché, all'aumentare di G , la luminosità del Sole aumenta (proporzionalmente a G^7) e, contemporaneamente, il raggio dell'orbita terrestre si riduce, nel passato la temperatura sulla superficie del nostro pianeta sarebbe stata molto più elevata, raggiungendo addirittura i 100 gradi centigradi tra 200 e 300 milioni di anni fa, rendendo così impossibile la vita così come la conosciamo oggi. Ciononostante, l'idea di base, e cioè la dipendenza dal tempo delle costanti fondamentali, è tuttora dibattuta dai fisici teorici e messa alla prova dalle osservazioni sperimentali. Nel modello standard le quantità non calcolabili sono almeno 25 e determinano il valore delle masse delle particelle elementari (quark, leptoni, bosoni W e Z, particella di Higgs), le intensità delle interazioni elettrodeboli e forti e il mescolamento tra loro delle tre famiglie di quark e delle tre dei leptoni (vd. fig. b). Allo stato attuale non abbiamo alcun modo per calcolare questi

parametri, sebbene esistano teorie più generali, ancora non confermate sperimentalmente, in cui alcuni di essi possono essere calcolati in termini di altri, perdendo così il loro status di parametri fondamentali. Oggi sappiamo che anche nel modello standard diversi parametri fondamentali, nei primissimi istanti di vita dell'universo, avevano un valore diverso dall'attuale. Si tratta della *costante di Fermi*, che regola l'intensità delle interazioni nucleari deboli, e delle masse dei quark e dei leptoni, che vengono tutti determinati dal valore del campo di Higgs (vd. Asimmetrie n. 14 p. 22, ndr). Questo ha subito una transizione nell'universo primordiale, all'incirca 10^{-27} secondi dopo il Big Bang, passando da zero al valore a cui è rimasto "congelato" fino ai nostri giorni. Sebbene questa variazione sia avvenuta troppo indietro nel tempo per aver lasciato tracce osservabili, è possibile che un comportamento simile sia ancora all'opera, oggi, per altri campi analoghi al campo di Higgs. Nell'ambito della teoria delle stringhe, per esempio, le costanti fondamentali sono tutte fissate dal valore di particolari campi dinamici, alcuni dei quali

b. Il modello standard della fisica delle particelle contiene, oltre alle tre costanti fondamentali, c (velocità della luce), G (costante di Newton) e h (costante di Planck), altri 26 parametri che vengono considerati costanti nel tempo, ma che potrebbero anche essere variabili in una teoria più estesa. Questi fissano l'intensità delle interazioni (G_F , α , α_s), le masse delle particelle, il mescolamento fra le diverse famiglie di quark e leptoni e la violazione della simmetria CP.



c.
Il quasar RX J1131 distante circa sei miliardi di anni luce.

potrebbero essere ancora in moto. In questo scenario, per esempio, anche l'interazione elettromagnetica, quella che è misurata con la precisione più elevata, potrebbe aver subito una variazione nel corso delle epoche cosmologiche recenti. Un destino analogo potrebbero avere avuto, per esempio, il rapporto tra massa dell'elettrone e massa del protone o l'intensità delle interazioni nucleari.

La memoria dei valori passati di queste ipotetiche "costanti incostanti" potrebbe riemergere in osservazioni di varia natura; per esempio, studiando le abbondanze di diversi isotopi nella miniera di Oklo, in Gabon, un sito eccezionale in cui circa due miliardi di anni fa si realizzarono le condizioni per l'accensione di un vero e proprio reattore nucleare naturale. Queste abbondanze, infatti, sarebbero sensibili a una variazione della *costante di struttura fine*, che regola l'intensità della radiazione elettromagnetica.

Altre tracce verrebbero dalla cosmologia che, attraverso lo studio della formazione dei nuclei primordiali, è oggi in grado di fornire limiti su una possibile variazione di G nell'epoca compresa tra un secondo dopo il Big Bang e oggi, che per essere in accordo con le osservazioni non dovrebbe essere più grande di pochi punti percentuali.

Al momento attuale, l'unica (flebile) traccia di variazione di costanti fondamentali è quella riportata dal gruppo di astronomi guidati da John Webb, che, osservando la luce proveniente da quasar lontani qualche miliardo di anni luce, ha notato una anomalia nelle righe spettrali, che può essere spiegata se la costante di struttura fine fosse stata più piccola in passato di una parte su centomila. Queste osservazioni sono però tuttora sotto esame da parte della comunità scientifica e una risposta definitiva appare ancora lontana, a causa dell'estrema difficoltà di queste misure.

Biografia

Massimo Pietroni è ricercatore dell'Infn della sezione di Padova. In questi ultimi anni si è occupato principalmente del problema della materia e dell'energia oscura nell'universo e delle sue possibili spiegazioni nell'ambito della fisica delle particelle.

Link sul web

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/introduction.html>

<http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature13433.html>

<http://www.media.inaf.it/2014/06/18/una-misura-per-la-costante-gravitazionale/>

Le tre età

Datare l'universo, la Terra e la materia vivente

di Eleonora Cossi

a.
Dettaglio di *Le tre età della donna*,
dipinto del 1905 del pittore
austriaco Gustav Klimt (olio su tela).



Nel 1811 in Inghilterra, in una spiaggia del Dorset, una giovane donna fece una scoperta destinata a cambiare per sempre la concezione del tempo. Lei si chiamava Mary Anning ed è passata alla storia per aver scoperto un gigantesco scheletro di animale, il più grande mai rinvenuto. La Anning, che aveva imparato dal padre a riconoscere i fossili del Giurassico, particolarmente abbondanti in quella zona, aveva trovato uno scheletro completo di un rettile marino chiamato *Ichtyosaurus*: una creatura sconosciuta e impossibile da concepire seguendo la concezione della storia accettata allora dalla maggior parte degli uomini, quella delle sacre scritture. Da quel giorno il tempo non fu più lo stesso.

Fino al 1700 l'età della Terra, e quindi, per la credenza dell'epoca, anche quella dell'universo, era stata stimata sulla base dell'interpretazione delle sacre scritture in circa 6000 anni. Solo a partire dalla fine del '700 i calcoli iniziarono a esser basati su criteri "scientifici. Ancora agli inizi del secolo scorso, però, l'età della Terra era stimata in milioni di anni. Solo attorno al 1930, meno di cent'anni fa, Arthur Holmes iniziò a utilizzare le misure radiochimiche per stabilire, in miliardi di anni, l'età della Terra.

Oggi è possibile risalire con precisione anche a epoche molto più lontane di quelle in cui la Terra era abitata dai dinosauri (l'era *Mesozoica*), utilizzando specifici metodi di datazione che gli scienziati hanno sviluppato in ambiti scientifici diversi, come la geologia, la fisica delle particelle e l'astrofisica.

Partiamo dall'età dell'universo, la macchina del tempo più potente che abbiamo a disposizione e in cui possiamo vedere tanto più indietro, quanto più lontano guardiamo.

Grazie al programma di misure del telescopio Hubble (l'Hubble Extreme Deep Field program, vd. fig. b) abbiamo potuto osservare oggetti distanti fino a 13 miliardi di anni luce, grazie alle misure del *redshift cosmologico*, lo "spostamento verso il rosso" della luce, previsto dall'espansione dell'universo secondo la *legge di Hubble* (vd. Asimmetrie n. 15 p. 33, ndr).

Secondo le stime più aggiornate la nascita dell'universo viene fatta risalire a circa 13,8 miliardi di anni fa, quando è avvenuto il Big Bang. Questa stima è confermata dalle osservazioni dei satelliti, come Wmap e Planck, che studiano la radiazione

b.

L'Hubble Extreme Deep Field (Xdf), in italiano *campo extra-profondo di Hubble*, cioè l'immagine di una piccolissima regione di cielo visibile dall'emisfero sud, basata sui risultati di una serie di osservazioni del telescopio spaziale Hubble. Benchè la regione di cielo osservata sia molto più piccola di quella coperta, ad esempio, dalla Luna, l'immagine contiene circa 5500 galassie. L'Xdf ha permesso di osservare galassie molto distanti, create quindi nell'universo "giovane" ed è diventata un'immagine caposaldo nello studio dell'universo primordiale.



cosmica di fondo. Nel 2013, il satellite Planck dell'Agenzia spaziale Europea (Esa) ci ha inviato una dettagliata mappa della radiazione cosmica di fondo, la prima immagine che abbiamo dell'universo, ricca di informazioni sulla composizione dell'universo primordiale. Secondo i modelli della fisica delle particelle e della cosmologia questa "foto d'epoca" (vd. fig. c in Asimmetrie n. 15 p. 35) ci mostra l'universo 380 mila anni dopo il Big Bang. Cosa sia successo prima è descritto dal modello cosmologico detto Lambda-Cdm, che prevede che l'universo sia in espansione e composto per circa il 95% da energia oscura (Lambda) e materia oscura fredda (Cold Dark Matter) (vd. Asimmetrie n. 14 p. 4, ndr). Sempre studiando la radiazione cosmica di fondo, e in particolare i suoi stati di polarizzazione, si può provare ad andare ancora più indietro cercando, indirettamente, conferme sulla teoria dell'inflazione: la rapidissima espansione che, immediatamente dopo il Big Bang, avrebbe ingigantito le fluttuazioni quantistiche prodotte nel Big Bang fino a farle diventare i "semi" di materia in corrispondenza dei quali si sono formate le galassie (vd. anche Asimmetrie n. 15 p. 37, ndr).

Per stimare l'età del sistema solare e della Terra si usano, invece, modelli astrofisici e metodi di datazione derivanti dalla geologia. Secondo l'ipotesi scientifica più accreditata, circa 5 miliardi di anni fa da una nebulosa primordiale cominciò il processo che portò 4,6 miliardi di anni fa alla formazione del sistema solare. Con i metodi "geologici", infatti, in particolare stimando l'età dei meteoriti rinvenuti sulla Terra, la nascita del sistema solare è stata stimata a circa 4,6 miliardi di anni fa, età compatibile con la datazione delle rocce terrestri e quindi con la stima fatta per la nascita della Terra. L'origine della vita

sulla Terra è, invece, argomento ancora molto controverso, e oggi viene fatta risalire a circa 3,5 miliardi di anni fa. La storia "geologica" del nostro pianeta viene, dunque, ricostruita prevalentemente utilizzando documenti speciali: le rocce e i fossili. Entrambi possono essere studiati sia con metodi di datazione relativa, al fine di stabilire la successione degli eventi che hanno caratterizzato la storia della Terra, sia con metodi di datazione assoluta, in particolare con tecniche di datazione *radiometriche* (o *radiodatazione*), che consentono di datare con precisione un evento, indicando quando si è verificato e la sua durata. I metodi di datazione relativa si fondano su tre criteri: *stratigrafico*, *paleontologico* e *litologico*, e si basano sull'osservazione delle rocce sedimentate e dei fossili che vi sono rimasti imprigionati.

Il criterio stratigrafico si basa sull'osservazione degli strati sedimentari delle rocce e sull'evidenza che quelli più antichi si trovino più in basso e quelli più recenti più in alto, rispettando l'ordine cronologico. Non sempre però questo ordine è rispettato: i movimenti tettonici possono, infatti, averlo alterato, rendendo impossibile la sua applicazione. Il criterio paleontologico sfrutta i fossili per datare gli strati rocciosi in cui sono rimasti imprigionati, partendo dal presupposto che la vita sulla Terra si sia evoluta omogeneamente. Questo tipo di datazione si effettua sui cosiddetti fossili "guida" appartenenti a specie vegetali e animali che hanno avuto ampia e rapida diffusione, come le ammoniti usate come fossili guida dell'era Mesozoica, identificabili come indizi inequivocabili di una data epoca. L'ultimo, il criterio litologico, si basa sull'assegnare alle rocce dello stesso tipo una identica età ed è il criterio di più ristretta applicazione.

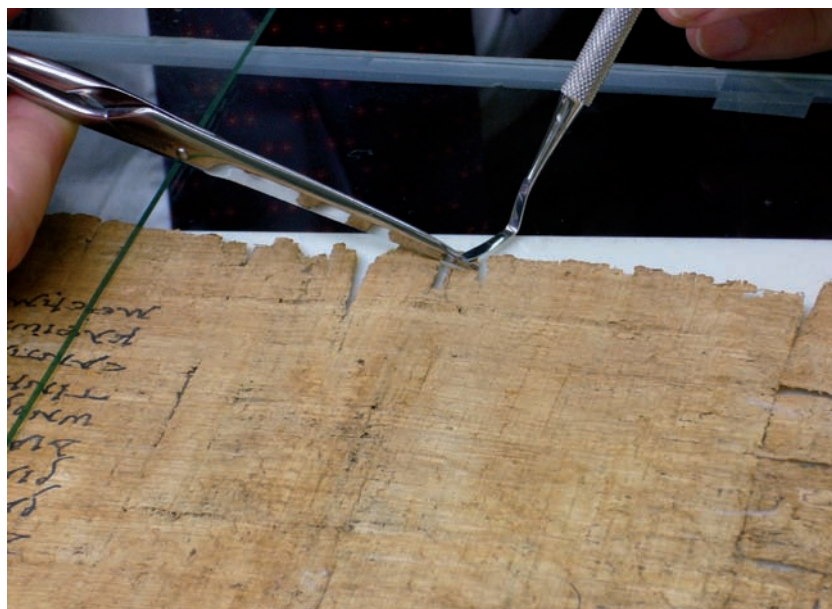


c.
Gli ammoniti sono considerati
“fossili guida”, ovvero indizi certi,
dell'era Mesozoica.

Mentre i metodi di datazione relativa ci permettono di individuare il susseguirsi degli eventi, restituendoci una sorta di racconto della storia del nostro pianeta, quelli di datazione assoluta ci consentono di individuare con precisione delle date, risalendo così non solo all'età di un reperto, ma anche a ciò che l'ha originato. Tra questi metodi, il più importante, quello della radiodatazione, consente di misurare la radioattività residua di rocce e fossili.

La radioattività è una proprietà di alcuni isotopi instabili di certi elementi che emettono radiazione (storicamente denominata di tipo *alfa*, cioè nuclei di elio, *beta*, cioè elettroni o positroni, o *gamma*, cioè fotoni), trasformandosi in isotopi stabili dello stesso elemento o di un altro elemento: questo fenomeno è chiamato *decadimento radioattivo*. Gli scienziati conoscono il *tempo di dimezzamento*, ovvero il tempo necessario affinché una data quantità di isotopi instabili (radioattivi) si dimezzi. Calcolando il rapporto tra la quantità di un elemento radioattivo presente in una roccia e quella di un elemento stabile è possibile, conoscendo il tempo di dimezzamento, risalire all'età della roccia che stiamo analizzando. Per la datazione di reperti risalenti fino a 40.000 anni fa si ricorre al metodo del *radiocarbonio*, largamente impiegato anche nei beni culturali per la datazione di reperti di origine animale o vegetale (vd. fig. d). Piante e animali, infatti, sono una fotografia del carbonio che è presente in atmosfera con due isotopi: il carbonio 14 (^{14}C), radioattivo, e il carbonio 12 (^{12}C), stabile. Gli esseri viventi, infatti, fissano il carbonio atmosferico

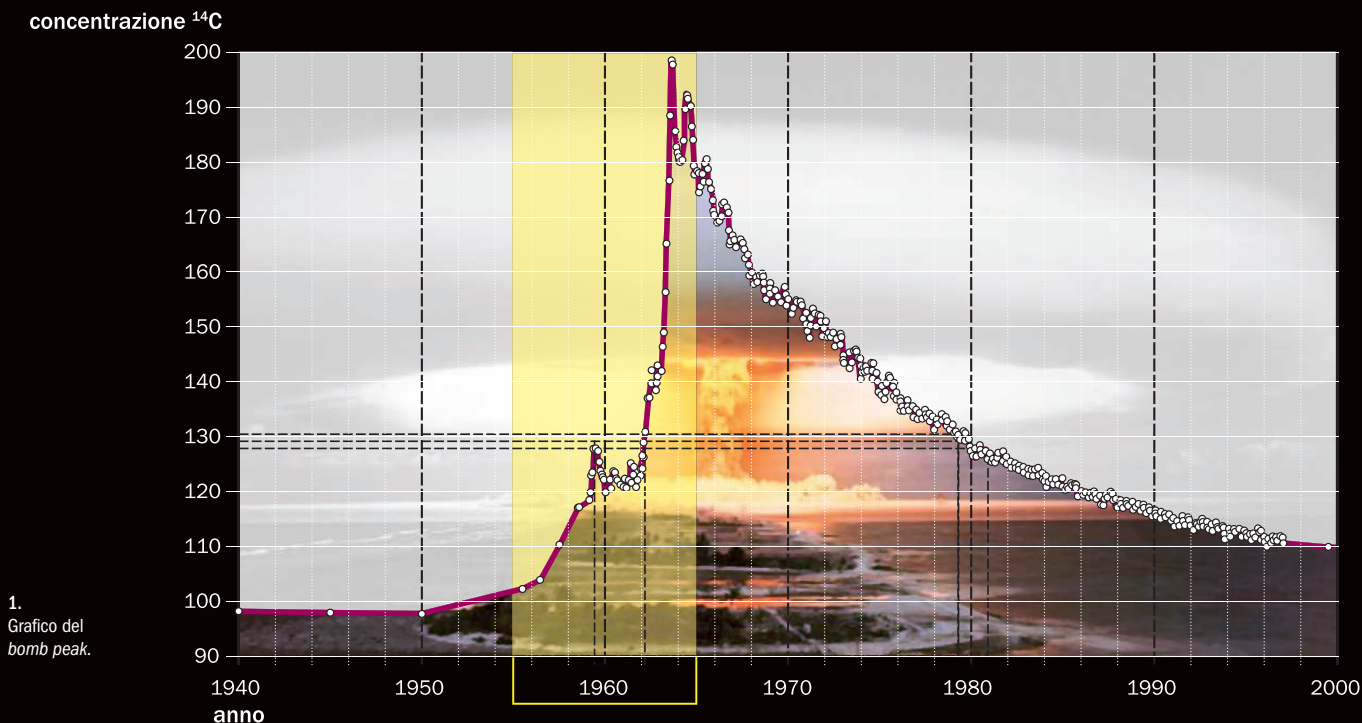
d.
Il *Papiro di Artemidoro*, datato con il carbonio 14 dal laboratorio Labec, il laboratorio per i Beni Culturali di Firenze dell'Infn, nel 2008. Secondo le misure realizzate dal Labec, il papiro risale al I° secolo d.C. Il documento conterrebbe la prima trascrizione conosciuta di parte di un testo geografico di Artemidoro di Efeso, ma l'attribuzione e la datazione del contenuto sono ancora controversi.



Bomb peak

Durante la Guerra Fredda, dopo il 1955, si assiste a un susseguirsi di test nucleari che ha causato, tra gli effetti secondari, un grande aumento della concentrazione di carbonio 14 nell'atmosfera terrestre. I valori hanno raggiunto un picco verso la metà degli anni '60 (1963-1965), per poi decrescere dopo la firma dei trattati internazionali per il bando dei test nucleari. A questo fenomeno gli scienziati danno il nome di *bomb peak* ("picco delle bombe"). Con l'aumentare del carbonio 14 in atmosfera aumentava, conseguentemente e con uguali valori, anche quello di tutti

gli organismi viventi, tra cui anche le piante di cotone o lino, da cui si realizzano le tele da pittura. Sfruttando questo fenomeno, ricercatori del Labec di Firenze hanno provato, con un'analisi eseguita con l'acceleratore Tandem, che una tela attribuita al pittore Fernand Léger fosse inequivocabilmente un falso (come sospettato). Il livello di carbonio 14 della tela, infatti, è risultato decisamente più alto di quello presente durante la vita del pittore, morto prima del *bomb peak*, cioè precedente all'innalzamento del radiocarbonio dovuto ai test nucleari.



contenuto nel diossido di carbonio/anidride carbonica (CO_2) attraverso la fotosintesi clorofilliana, per la flora, o attraverso l'alimentazione, per la fauna. Quando muoiono, l'isotopo ^{12}C , stabile, rimane inalterato, mentre l'isotopo ^{14}C , instabile, comincia a decadere trasformandosi in azoto (^{14}N). La concentrazione di carbonio 14, quindi, diminuisce con il passare del tempo. La relazione fra quanto carbonio è rimasto e quanto si è trasformato è ben nota ai fisici ed è dettata dalle leggi del decadimento radioattivo (per il ^{14}C il tempo di dimezzamento è

pari a 5730 anni). Per datare un reperto di origine organica occorre, dunque, misurare la quantità residua di ^{14}C , ma questa quantità è piccolissima: pari a un atomo di ^{14}C su mille miliardi di atomi di carbonio. È quindi necessario avere una grandissima sensibilità e misurare con una precisione tale da arrivare a un'incertezza nell'ordine di 20-30 anni. Ciò viene fatto con tecniche di fisica nucleare, utilizzando acceleratori di particelle e spettrometri che permettono di separare i nuclei di carbonio 14 e contarli (vd. Asimmetrie n. 9 p. 34).

Link sul web

<http://www.fossilmuseum.net/>

http://www.bbc.co.uk/schools/primaryhistory/famouspeople/mary_anning/

http://scienzapertutti.lnf.infn.it/index.php?option=com_content&view=article&id=1873&Itemid=595

http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/21mar_cmb/

Avanti e indietro

La freccia microscopica del tempo

di Fabio Anulli



Mentre prendete un aperitivo e osservate un cubetto di ghiaccio che si sta sciogliendo nel vostro bicchiere di Spritz, non vi aspettereste mai che questo possa tornare a solidificarsi. Allo stesso modo, con il tempo inesorabilmente invecchiamo e possiamo scegliere cosa fare domani, ma non evitare gli errori commessi ieri. Per l'esperienza comune, dunque, il tempo è palesemente asimmetrico: la cosiddetta "freccia del tempo" scorre in una sola direzione e nessun processo macroscopico reale è reversibile nel tempo. Questa naturale evoluzione dei fenomeni nel tempo non è però legata a un'asimmetria delle leggi fisiche fondamentali, quanto piuttosto alla complessità dei sistemi e al concetto di entropia. Semplificando, possiamo dire che l'entropia è una misura del disordine di un sistema fisico. Sistemi isolati evolvono verso stati di entropia maggiore, cioè più disordinati, e questo processo risulta di fatto irreversibile.

A livello delle interazioni tra particelle elementari la situazione è però completamente diversa e ciò che ci sembra essere scontato, in realtà, non lo è affatto. L'urto tra due particelle, ad esempio, risulta perfettamente plausibile anche se "osservato"

a ritroso nel tempo, con le due particelle dello stato finale che si muovono in direzione opposta, urtano e ritornano nello stato iniziale, come se si trattasse di un film che viene visto al contrario. Ma nel corso degli anni, i fisici si resero conto che questo non è sempre vero e che anche nel mondo delle particelle esistono situazioni in cui i processi fisici non sono equivalenti se la direzione del tempo viene invertita. La conferma sperimentale definitiva è arrivata da uno studio, pubblicato dalla collaborazione Babar dello Slac National Accelerator Laboratory di Stanford (California) alla fine del 2012, in cui è stata annunciata la prima osservazione diretta di una violazione della simmetria per inversioni temporali, ossia di una irreversibilità delle leggi fisiche a livello microscopico.

Vediamo di che si tratta e come è stato trovato questo risultato. In meccanica quantistica l'operazione di "inversione temporale" (indicata con T) corrisponde allo scambio dello stato iniziale con quello finale e all'inversione del segno del tempo. T è una delle cosiddette simmetrie *discrete*, insieme alla simmetria per inversioni spaziali P e a quella di carica C (ovvero la simmetria rispetto allo scambio di particelle con antiparticelle). Fino agli anni '50, si pensava che esse fossero rispettate dalle interazioni fondamentali, cioè che le interazioni fondamentali agissero nello stesso modo se applicate su un

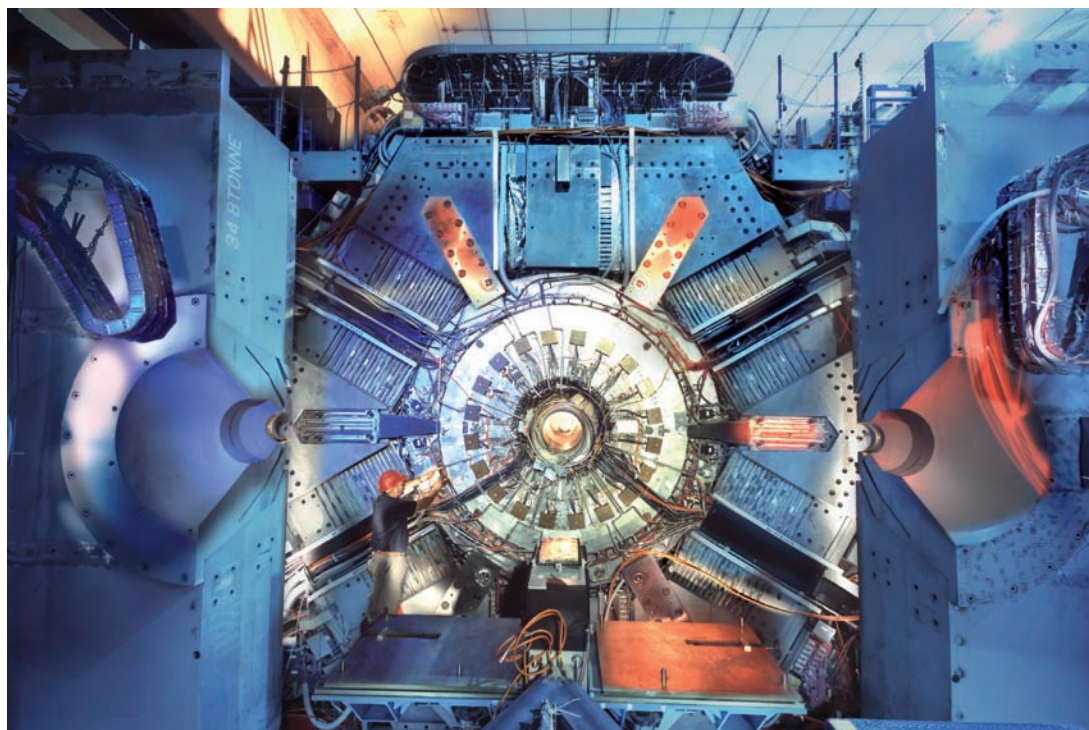
dato sistema o sulla sua versione speculare (la simmetria P) o, ancora, su quella che si ottiene scambiando tutte le particelle del sistema in antiparticelle (simmetria C). In seguito si scoprì che C, P e anche l'operazione combinata di C e P (il prodotto CP) sono in realtà violate dall'interazione debole (vd. Asimmetrie n. 16 p. 33, ndr).

Un teorema fondamentale della teoria dei campi asserisce che la simmetria ottenuta dall'operazione combinata CPT è rispettata da tutte le interazioni fondamentali. Per effetto del teorema CPT, se un certo processo fisico non conserva una delle simmetrie, allora deve violare anche il prodotto delle altre due e viceversa. Quindi, l'osservazione sperimentale che CP è violata implica che anche T debba essere violata dall'interazione debole. Per molti anni si è cercata la verifica sperimentale diretta della violazione di T. Ma questa, senza fare riferimento alla simmetria CP o CPT, è molto complicata da ottenere. Di fatto consiste nel confrontare la probabilità di un processo fisico con quella del processo ottenuto scambiando lo stato iniziale con quello finale e invertendo il segno delle grandezze fisiche dipendenti

dal tempo, come la velocità delle particelle coinvolte. Ciò risulta in genere sperimentalmente impossibile per la difficoltà di preparare lo stato iniziale del processo "invertito temporalmente". Un modo molto elegante per aggirare tali difficoltà fu proposto nel 1999 e realizzato sperimentalmente da Babar nel 2012. L'esperimento Babar è stato progettato per studiare gli effetti della violazione di CP nei decadimenti dei mesoni B, studiando i decadimenti di circa 500 milioni di coppie di mesoni B e anti-B (cioè contenenti, rispettivamente, un antiquark o un quark bottom), prodotti dalle collisioni tra elettroni e positroni all'acceleratore Pep-II, presso lo Slac National Accelerator Laboratory (vd. Asimmetrie n. 11 p. 35, ndr). La verifica della violazione di T si basa sulla misura della probabilità di trasformazione tra coppie di stati quantistici correlati dei mesoni B neutri. In particolare, si sono studiate le frequenze in funzione del tempo di due trasformazioni di mesoni B neutri, che si ottengono una dall'altra attraverso un'inversione temporale (vd. approfondimento a p. 28). È come se si osservasse una particella che si è trasformata in un'altra tornare indietro e

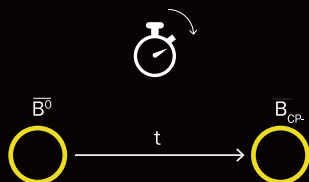
ri-trasformarsi nella particella originaria. Le frequenze misurate da Babar sono risultate diverse. Se la simmetria temporale fosse conservata, la probabilità che si verifici ciò sarebbe di una parte su 10^{43} , cioè incredibilmente piccola. Questo risultato rappresenta quindi la prima misura diretta della violazione di T. Inoltre il valore misurato di questa asimmetria è coerente con la violazione di CP osservata in analoghi decadimenti dei mesoni B neutri, così come richiesto dal teorema CPT. Prima di Babar, anche altri esperimenti avevano evidenziato asimmetrie riconducibili a una violazione di T. In genere, però, le misure effettuate facevano assunzioni riguardo al teorema CPT oppure riguardavano trasformazioni che implicavano anche la presenza di una violazione di CP, come nel caso dell'esperimento CPLEAR, che nel 1999 misurò la violazione di T con i mesoni K. La misura effettuata da Babar, invece, oltre a essere particolarmente bella, perché fa pieno uso di proprietà fondamentali della meccanica quantistica, non ha alcuna connessione con CP e CPT, e pertanto viene considerata la prima osservazione diretta della violazione di T.

a.
L'esperimento Babar allo Slac National Accelerator Laboratory a Stanford, negli Stati Uniti.

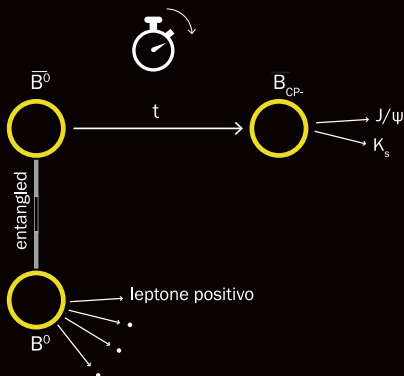


Specchio del tempo

riflessione temporale



misura di Babar

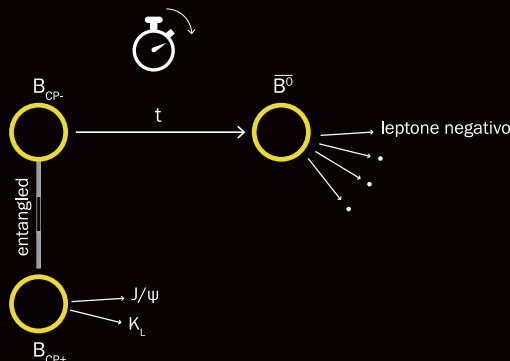
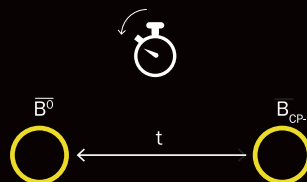


La verifica della violazione di T in Babar si basa sulla misura della probabilità di trasformazione tra coppie di stati quantistici correlati di particolari mesoni B neutri. Le coppie di mesoni B neutri prodotti in Babar possono essere di due tipi: la coppia di un B^0 e un anti- B^0 (stati che contengono rispettivamente un antiquark bottom e un quark bottom) e la coppia che indichiamo B_{CP+} - B_{CP-} (stati che si contraddistinguono per il comportamento sotto trasformazioni di CP). Nel tempo, questi stati evolvono gli uni negli altri, così per esempio dopo un certo tempo un anti- B^0 può trasformarsi in un B_{CP-} e un B_{CP-} in un anti- B^0 .

I diversi stati possono essere identificati analizzandone i prodotti di decadimento, che sono differenti nei vari casi possibili. Le coppie di mesoni neutri vengono create in uno stato di aggrovigliamento (in inglese *entanglement*, vd. *Asimmetrie* n. 16 p. 36, ndr), a causa del quale i due mesoni, pur allontanandosi l'uno dall'altro, rimangono intimamente connessi senza assumere un'identità ben definita: in altre parole, non si può dire chi sia la particella e chi l'antiparticella. Ma a causa dell'entanglement, quando il primo dei due mesoni decade, manifestando la propria identità attraverso i prodotti di decadimento (e si scopre così che si tratta per esempio di un B^0), si viene a conoscenza

1.

Per verificare la violazione di T in Babar, è stata studiata la trasformazione di un anti- B^0 in un B_{CP-} e quella inversa, di un B_{CP-} che si trasforma in un anti- B^0 (in alto). In basso sono visualizzate le catene di decadimento, grazie alle quali tale misura è stata realizzata.



dell'identità dell'altro mesone della coppia (che nel caso dell'esempio in fig. 1 sarà dunque un anti- B^0).

Tale proprietà diventa un formidabile strumento: si può selezionare lo stato iniziale del secondo mesone senza bisogno di doverlo misurare, scegliendo un particolare decadimento del primo mesone. Sfruttando l'entanglement è quindi possibile selezionare una catena di decadimento nella quale un anti- B^0 , identificato dal decadimento del B^0 entangled (in leptoni e altre particelle), si trasforma in un B_{CP-} , di cui si osserva direttamente il decadimento (il B_{CP-} decade nella particella J/ψ e nel mesone K_S). Questa catena viene confrontata con la catena "inversa", in cui un B_{CP-} , identificato dal decadimento del B_{CP+} entangled (il B_{CP+} decade nella particella J/ψ e nel mesone K_L), si trasforma in un anti- B^0 , di cui si osserva direttamente il decadimento (vd. fig. 1, in basso). Questo procedimento ha permesso di confrontare l'evoluzione temporale di una trasformazione con la sua inversione temporale, ossia la sua riflessione attraverso lo specchio del tempo. Confrontando, in funzione del tempo, le probabilità con cui si verificano le due trasformazioni, si è scoperto che queste probabilità risultano diverse, dimostrando così in maniera diretta la violazione della simmetria temporale T.

Biografia

Fabio Anulli è ricercatore dell'Infn presso la sezione di Roma. La sua attività di ricerca si svolge nel campo della fisica sperimentale delle alte energie. Ha collaborato a diversi esperimenti ad acceleratori di particelle, in particolare a Kloe presso i Laboratori Nazionali di Frascati, Babar presso lo Slac National Accelerator Laboratory a Stanford, nel quale attualmente ricopre la carica di Physics Analysis Coordinator, e l'esperimento Atlas al Cern di Ginevra.

Link sul web

<http://www-public.slac.stanford.edu/babar/>

<https://www6.slac.stanford.edu/news/2012-11-19-babar-trv.aspx>

<http://physics.aps.org/articles/v5/129>

<http://blogs.nature.com/news/2012/11/particle-physicists-confirm-arrow-of-time-for-b-mesons.html>

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2012/nov/21/babar-makes-first-direct-measurement-of-time-reversal-violation>

Spaccare il secondo

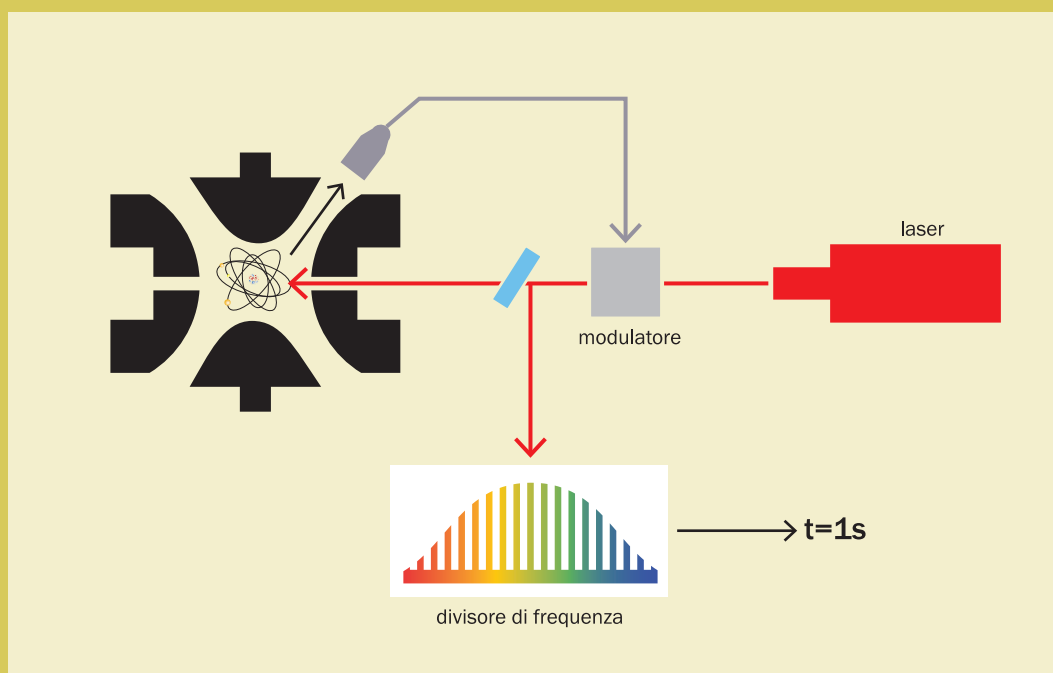
Dagli orologi atomici agli orologi nucleari

di Aldo Godone e Massimo Inguscio

La scienza che si occupa di definire le unità di misura, la *metrologia* moderna, discende da un'intuizione di James Maxwell del 1870, secondo cui: "Se si vogliono ottenere campioni di lunghezza, tempo e massa, che siano assolutamente permanenti, essi devono essere cercati non nelle dimensioni o nel movimento o nella massa del nostro pianeta, ma nella lunghezza d'onda, nella frequenza e nella massa assoluta degli atomi. Essi infatti sono eterni, inalterabili e tutti perfettamente uguali". Il suggerimento di Maxwell è stato messo in pratica per la prima volta per l'unità di misura del tempo, costruendo degli *orologi atomici*: si tratta di dispositivi, costituiti da un oscillatore (in genere un laser), che analizza una transizione atomica utilizzata come

discriminatore della frequenza, e da un divisore di frequenza, in grado di riportare il periodo dell'oscillazione atomica di riferimento a un intervallo di tempo convenzionalmente definito come un secondo (vd. fig. a).

Il primo orologio atomico è stato realizzato nel 1955 al National Physical Laboratory in Inghilterra da Louis Essen e Jack Parry utilizzando una transizione dello stato fondamentale del cesio 133, la cui frequenza è stata poi convenzionalmente definita pari a 9.192.631.770 Hz ed è alla base dell'attuale definizione del secondo. Lo sviluppo di questo orologio è stato impressionante, in quanto ha migliorato la sua accuratezza di circa un ordine di grandezza ogni decennio, sino a raggiungere il livello di una parte su 10^{14} nel 1990. Questo



a.
Schema di un orologio atomico. La radiazione di un oscillatore laser è agganciata in frequenza alla transizione atomica di riferimento attraverso un modulatore e inviata a un divisore di frequenza, che genera l'unità di tempo in secondi.



b.
L'apparato di controllo della fontana criogenica al cesio utilizzata quale campione primario della scala di tempo nazionale italiana.

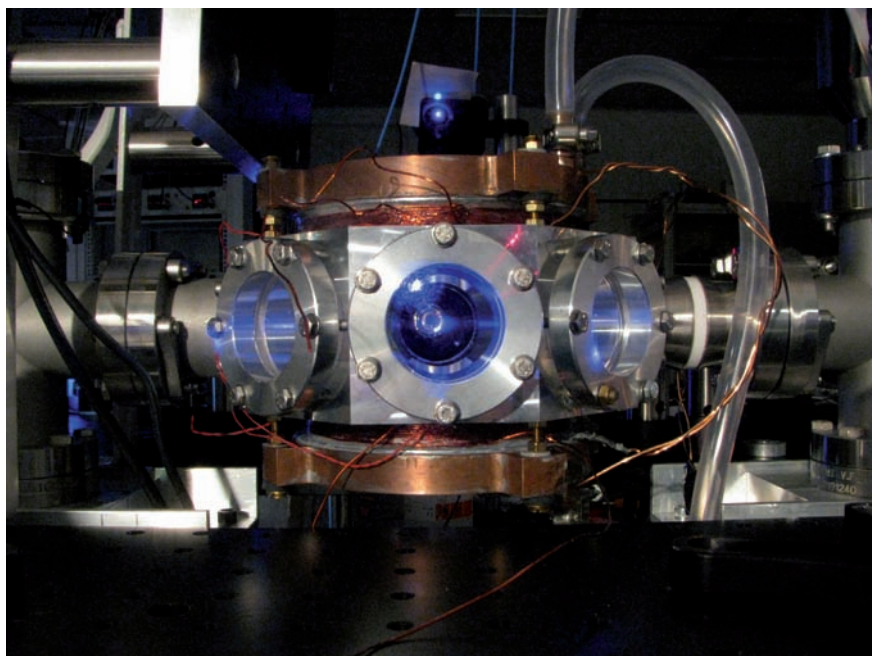
significa che orologi di questo tipo possono sbagliare al massimo di un milionesimo di secondo al giorno.

La "performance" di un orologio atomico dipende principalmente dal tipo di transizione dell'atomo di riferimento e dall'isolamento dalle perturbazioni esterne (come campi elettrici, magnetici, temperatura, urti, ...). L'intuizione di Maxwell, infatti, è tanto più valida quanto più la realizzazione sperimentale riproduce la situazione ideale di un atomo imperturbato. Proprio per venire incontro a questa necessità è stato determinante lo sviluppo della tecnica di raffreddamento laser (*laser cooling*) degli atomi, che ha consentito, negli ultimi 20 anni, di spingere ulteriormente l'accuratezza dell'orologio al cesio "termico", grazie alla realizzazione di *orologi atomici a fontana*, dove atomi di cesio o rubidio raffreddati a una temperatura prossima allo zero assoluto (pari a 1 micro-Kelvin) vengono sondati durante il loro volo nel campo gravitazionale terrestre (vd. fig. b). Questo risultato costituisce un primo limite di accuratezza per gli orologi basati in questo caso su una transizione nella regione delle microonde.

Nell'ultimo decennio si è proposto l'utilizzo, al posto del cesio, di reticoli di stronzio e itterbio (vd. fig. c) o di singoli ioni di alluminio, che presentano transizioni ottiche fortemente proibite (ovvero con una frequenza estremamente precisa).

Ciò ha consentito di portare l'accuratezza di questi *orologi atomici ottici* fino a qualche parte su 10^{18} (un milionesimo di secondo l'anno), aprendo la strada a una possibile futura ridefinizione dell'unità di misura del secondo. Allo stesso tempo, però, ha indicato un nuovo limite di accuratezza per gli orologi atomici, essenzialmente legato alla difficoltà tecnica di assicurare la condizione di "atomo imperturbato" a livelli migliori di quelli ottenuti. Nella figura a pagina 32 è raffigurata l'evoluzione degli orologi, dagli orologi con bilanciere a verga del 1300 agli orologi atomici moderni. Nel riquadro è riportato il notevole miglioramento di accuratezza nella realizzazione dell'unità di tempo degli ultimi 30 anni, dovuto all'introduzione degli orologi atomici a fontana e ottici.

Agli inizi del 2000 la Physikalisch-Technische Bundesanstalt tedesca ha proposto una transizione nucleare dell'isotopo 229 del torio come possibile transizione di riferimento per un orologio in grado di superare l'accuratezza di quelli ottici di uno/due ordini di grandezza. Il forte interesse per questa transizione del torio 229 è dovuto alla sua frequenza incredibilmente bassa, che ne consente, in linea di principio, l'osservazione con tecniche di spettroscopia laser ordinaria nella regione dell'ultravioletto. Da un punto di vista metrologico, una transizione nucleare garantisce una minore sensibilità ai fenomeni



c.
Luce emessa da un
campione ottico all'itterbio.

che tipicamente limitano i campioni di frequenza ottici, in quanto il nucleo è fortemente schermato dagli strati elettronici esterni. Al momento quattro gruppi di ricerca nel mondo sono impegnati nel tentativo di ridurre l'incertezza con cui oggi si conosce la frequenza di questa transizione (circa 10%), allo scopo di osservarla direttamente con le tradizionali tecniche di spettroscopia atomica, passo fondamentale per la realizzazione di un primo *orologio nucleare*.

L'importanza di osservare questa transizione del torio non risiede solo nel suo impiego metrologico, ma, più in generale, nella sua dipendenza dalla costante di struttura fine, circa 10.000 volte superiore a quella delle transizioni normalmente

utilizzate nei campioni atomici, che permetterebbe anche una verifica della stabilità nel tempo delle costanti fondamentali (vd. p. 19, ndr).

Orologi atomici o nucleari molto più accurati di quelli attuali darebbero un grande impulso agli esperimenti legati alla relatività generale, sia a terra che sui satelliti. Infatti, da un lato si avrebbe un miglioramento dei test "classici", come quelli del redshift gravitazionale (vd. p. 44, ndr) o del *principio di equivalenza* (vd. Asimmetrie n. 14 p. 13, ndr), dall'altro si aprirebbe la strada a interessanti nuove possibilità di osservazione di effetti gravito-elettromagnetici e di verifiche dei modelli di gravità quantistica (vd. p. 9, ndr).

Biografia

Aldo Godone ha svolto la sua attività scientifica nel campo della spettroscopia atomica ad alta risoluzione e in particolare dei campioni atomici di frequenza. Attualmente è coordinatore scientifico dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Inrim) di Torino.

Massimo Inguscio, professore di fisica della materia all'Università di Firenze, è esperto a livello internazionale di materia condensata ultrafredda. È co-fondatore del Laboratorio Europeo di Spettroscopia Non-Lineare ed è attualmente presidente dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Inrim) di Torino.

Link sul web

http://www.inrim.it/ldm/index_i.shtml

<http://www.hoepli.it/libro/il-tempo-e-atomico-/9788820358945.html>

<http://physics.aps.org/articles/v5/126>

EVOLUZIONE DEGLI OROLOGI

scarto
(secondi/giorno)

1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 anno

10^3

10^2

10^1

10^0

10^{-1}

10^{-2}

10^{-3}

10^{-4}

10^{-5}

10^{-6}

10^{-7}

10^{-8}

10^{-9}

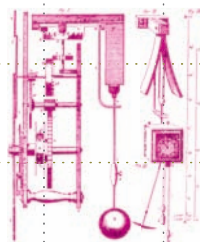
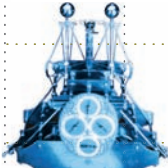
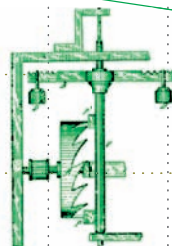
10^{-10}

10^{-11}

10^{-12}

10^{-13}

orologi con bilanciere a verga



primo orologio a pendolo (Huygens)

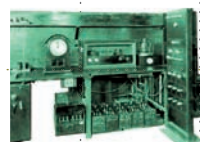
orologi a pendolo con scappamenti perfezionati

compensazione della temperatura (Graham)

compensazione della temperatura e frazione ridotta (Harrison)

compensazione barometrica (Robinson)

orologio a pendolo quasi libero e a spinta quasi costante (Riefler)

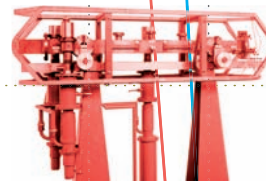


primo orologio al cristallo di quarzo



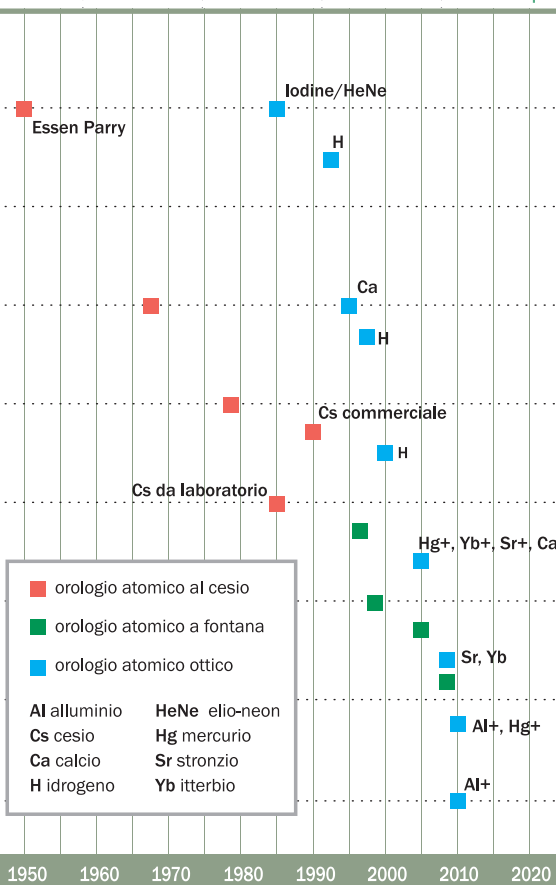
orologio a pendolo libero (Shortt)

orologi atomici al cesio



orologi atomici a fontana

orologi atomici ottici



scarto
(secondi/giorno)

1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 anno

Lo scatto giusto

Un grilletto per i rivelatori di particelle

di Umberto Marconi e Barbara Sciascia

La bocca di un vulcano che erutta lava incandescente o il gesto rapido di un ghepardo che ghermisce un'antilope. Immagini che colgono l'essenza di un fatto più di tante parole o filmati. Basta che sia "lo scatto giusto". Anche nella fisica delle particelle a un certo punto divenne necessario fare lo scatto giusto, con la difficoltà aggiuntiva di dover fotografare qualcosa che, però, non si può vedere!

Andiamo con ordine: le particelle elementari non si possono vedere ma i rivelatori di particelle le "rendono visibili" sfruttando alcune loro proprietà, come per esempio la carica elettrica. Un po' come un animale che lascia impronte sulla neve: dal loro studio possiamo capire molto dell'animale che le ha lasciate. Uno dei primi rivelatori che ha permesso di "vedere" le particelle è stata la camera a bolle (vd. approfondimento a p. 34), dove era necessario scattare una foto alla traccia lasciata dalla particella appena transitata. Il problema era quando scattare, e fu risolto aggiungendo un altro tipo di rivelatore che emetteva un segnale al passaggio della particella, ben prima che si formasse la traccia nella camera a bolle, segnale usato per scattare la foto.

Negli anni, la crescente complessità degli esperimenti e i vari tipi di rivelatori sviluppati hanno portato a ideare sofisticate alternative alla macchina fotografica, note nel loro insieme come *sistema di trigger* o *trigger tout-court* (in italiano, "grilletto").



Prima di entrare nei dettagli di un sistema di un moderno trigger, dobbiamo definire altri due aspetti: la *firma*, o *signature* in inglese, e il *tempo morto*, o *dead time*. Con la firma si indica l'insieme delle caratteristiche degli eventi interessanti, un po' come la firma autografa sulla carta di credito che ci dovrebbe identificare in maniera univoca. Per tempo morto si intende il tempo minimo tra uno scatto e l'altro, tempo in cui la macchina fotografica non può scattare foto, come se fosse inutilizzabile, "morta".

Insomma ogni fotografia fatta a un evento, buono o cattivo che sia, implica che per un po' di tempo non potrò scattare altre foto, anche nel caso ci fossero eventi buoni. E la strategia perseguita da tutti i moderni sistemi di trigger è definire la miglior *signature*, in modo da

scattare foto solo agli eventi buoni (il *segnale*) e non a quelli inutili (il *fondo*), e aver il minor *dead time* possibile, in modo da perdere meno eventi buoni possibili.

Fino a che la frequenza con cui accadono gli eventi è bassa, è abbastanza facile costruire buoni sistemi di trigger. Ma dal prossimo anno i fasci di protoni di Lhc (il Large Hadron Collider al Cern di Ginevra) si incontreranno quaranta milioni di volte al secondo (in gergo si dice che dal 2015 Lhc "funzionerà a 40 MHz") al centro di ciascuno dei quattro esperimenti (Alicé, Atlas, Cms e Lhcb) presenti lungo il tunnel di Lhc. E ognuna di queste volte potrebbe succedere qualcosa di "interessante", come la produzione di un bosone di Higgs (vd. Asimmetrie n. 8 e n. 14, ndr) o addirittura la produzione di qualche

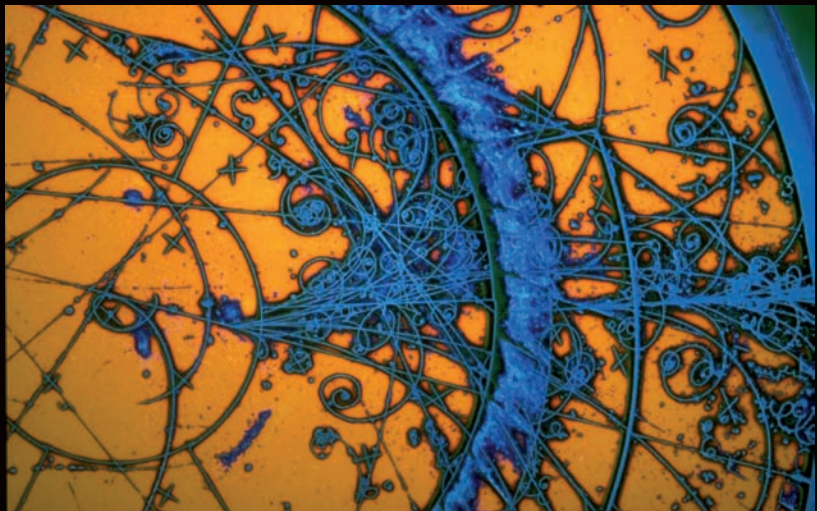
[as] approfondimento

Guardare le bolle

"Butta la pasta!": una tipica espressione italiana che sottintende la più ampia "l'acqua bolle, butta la pasta!". E quante volte attendendo affamati che l'acqua bollesse, abbiamo notato speranzosi le prime bollicine? "Guardare le bolle" è quello che facevano i fisici che tra gli anni '50 e gli anni '80 usavano una *camera a bolle*, un rivelatore inventato nel 1952 dall'americano Donald Glaser, con un brevissimo articolo di meno di una colonna, che gli valse il premio Nobel nel 1960.

La camera a bolle mette insieme tre diverse idee. La prima è che una particella carica che attraversa un gas o un liquido lo ionizza (separa elettroni dalle molecole che li includevano, lasciando ioni carichi positivamente). La seconda è che un liquido che "sta per bollire" inizia a farlo di preferenza attorno a uno ione. La terza è che le singole bollicine che si formano al passaggio della particella carica sono fotografabili, prima che tutto il liquido si metta a bollire. In pratica, il rivelatore consiste in un contenitore, posto all'interno di un campo magnetico, in cui un liquido, spesso idrogeno, è mantenuto in condizioni di pressione e temperatura subito al di sotto del punto di ebollizione. Pochi millisecondi prima dell'arrivo del fascio di particelle parte la sequenza,

antesignana dei moderni sistemi di trigger, necessaria a fotografare le particelle stesse. Il liquido viene espanso tramite un pistone, in modo da provocare un calo di pressione, rendendolo "pronto a bollire". Quando le particelle cariche attraversano il liquido ionizzandolo, singole bolle si formano attorno agli ioni e pochi millisecondi dopo il passaggio delle particelle vengono scattate *fotografie stereo*, cioè da più direzioni diverse, in modo da poter ricostruire la traiettoria tridimensionale. Negli anni sono state costruite più di cento camere a bolle e sono state raccolte più di



1. Elaborazione artistica delle tracce lasciate da particelle cariche nella camera a bolle Bebc (Big European Bubble Chamber) al Cern nei primi anni '70.

cento milioni di fotografie stereo. La complessa analisi di queste immagini, che richiedeva molte persone opportunamente specializzate, ma che poteva essere fatta anche in laboratori lontani dall'esperimento, è stata uno degli elementi chiave nello sviluppo delle collaborazioni internazionali per effettuare i grandi esperimenti.

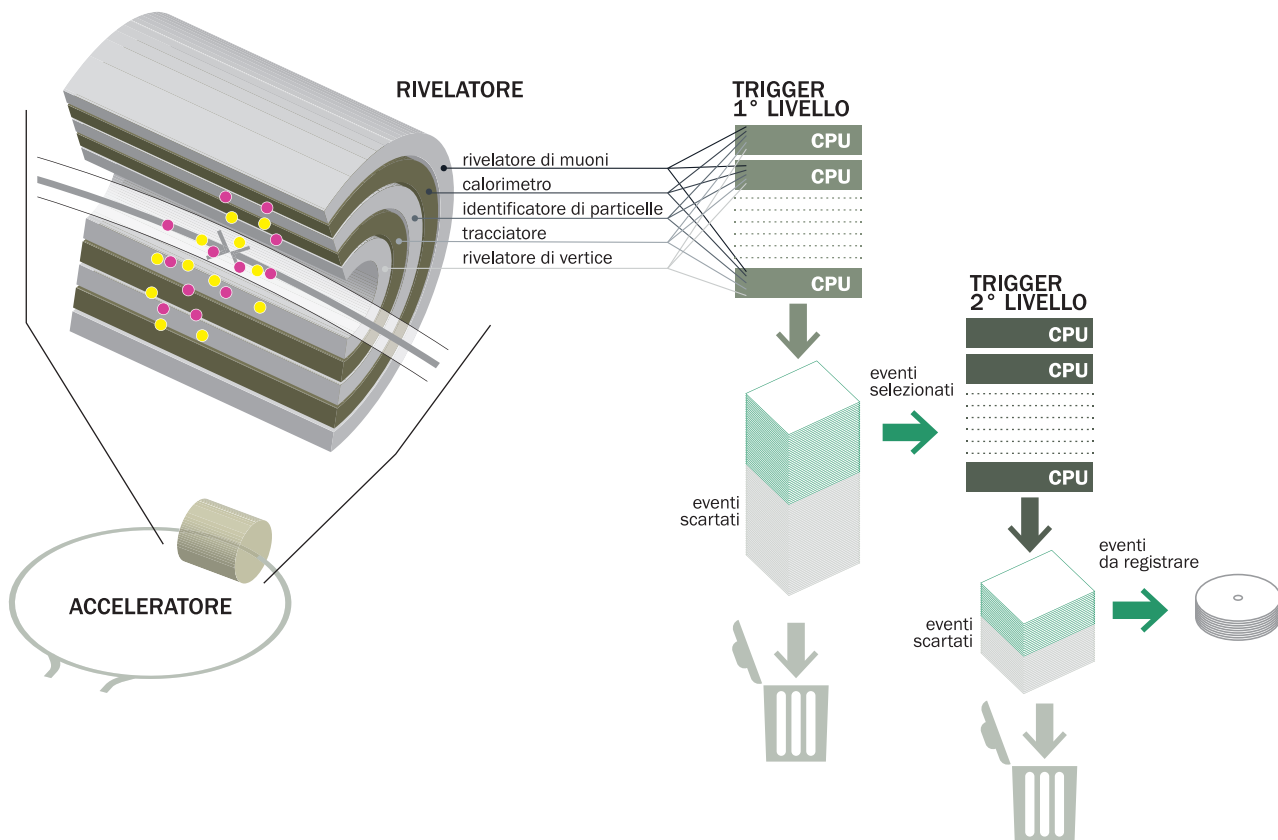


particella ancora mai osservata come quelle che potrebbero spiegare la natura della materia oscura (vd. Asimmetrie n. 4, ndr). A complicare il tutto, gli eventi prodotti all'interno dei quattro esperimenti di Lhc contengono molta informazione (in media ciascuno occupa 1 MB) a causa del numero e della complessità dei rivelatori utilizzati, informazione che non può essere elaborata nei 25 nanosecondi a disposizione tra una collisione e l'altra. La soluzione può essere quella di utilizzare sistemi di trigger che lavorino in parallelo e/o su più livelli. Di solito si usano entrambi gli approcci e ciascuno dei quattro esperimenti ha implementato un proprio sistema trigger con caratteristiche peculiari equivalenti. I vari esperimenti stanno preparando l'upgrade dei loro sistemi di rivelazione, incluso il trigger; nel seguito descriveremo la soluzione scelta da Lhcb, il cui sistema può già ora funzionare a 40 MHz, ma può registrare al più una metà degli eventi interessanti che saranno prodotti grazie alla

maggiore energia di Lhc. Quest'ultimo esperimento studia in particolare gli eventi in cui siano stati prodotti quark di tipo charm o beauty e deve distinguerli dalla maggioranza degli altri casi, in cui non è successo nulla di interessante.

Un tipico accorgimento è quello di usare una sequenza di meccanismi di selettività e latenza progressivamente crescenti. In altre parole, le prime richieste (*selettività*) devono essere semplici e veloci, in modo da ridurre il numero di eventi da esaminare con più attenzione e in più tempo (*latenza*). Complessivamente il tempo di elaborazione richiesto dalla procedura di trigger per completare la valutazione è dell'ordine di 10 millisecondi: molto maggiore del tempo utile di 25 nanosecondi. La scelta necessaria per sostenere il ritmo imposto dalle collisioni in Lhc è allora usare molte procedure di selezione in parallelo. Nel caso di Lhcb, dove il flusso aggregato dei dati è di circa 40 Tb/s, è possibile realizzare un sistema di trigger che impieghi esclusivamente reti di computer

a.
Negli ultimi mesi del 2014 finiranno i lavori a Lhc, iniziati ad aprile 2013, che permetteranno una nuova raccolta di dati a un'energia di fascio molto maggiore di prima.



(senza alcun altro filtro intermedio) che elaborino circa quattrocentomila procedure in parallelo, permettendo al trigger stesso di funzionare alla frequenza desiderata. Dai primi anni 2000, è diventato comune l'uso di *processori (CPU) multi-core*, in cui più processori sono montati sul medesimo supporto in modo da aumentare la potenza di calcolo del singolo computer. Oggi si trovano in commercio processori fino a 12 *core* per CPU, ma anche così il numero di computer necessari per eseguire 400.000 procedure di trigger in parallelo sarebbe troppo grande. Entro qualche anno però i progressi nella tecnologia di produzione dei chip permetteranno d'avere processori con centinaia di core per CPU. Attorno al 2018/19, anno previsto per la realizzazione del nuovo progetto di trigger, saranno a disposizione per il mercato di largo consumo nuovi computer dotati di sistemi *dual CPU* (cioè in cui uno stesso server gestisce due CPU), ciascuna dotata di 200 *core*: questo permetterà di eseguire le operazioni necessarie con una rete di computer costituita da 1000 nodi di calcolo.

Le informazioni per “ricostruire l'evento” consistono in segnali prodotti da rivelatori disseminati lungo i 21 metri di lunghezza e i più di 10 metri di altezza di Lhcb, che è quasi un nano rispetto agli altri due esperimenti giganteschi, Atlas e Cms (vd. Asimmetrie n. 8 p. 18, ndr). I tanti “frammenti” dell'evento sono trasmessi, attraverso circa diecimila fibre ottiche, a un altro sistema, per essere riaggregati a ricostituire l'evento completo. Come nella costruzione di un enorme puzzle, ciascun frammento deve avere una sua “forma particolare” che permetta di “metterlo al posto giusto”; questa “forma”, chiamata in gergo *indirizzo*, deve essere codificata secondo un protocollo di rete standard, cioè nello stesso modo usato per i dati che viaggiano su internet (vd. Asimmetrie n. 13 p. 18, ndr). Il compito, chiamato *event-building*, di mettere insieme i frammenti “riconoscendone la forma” e ricostruire ciascun evento, è svolto da una rete di computer dedicata, chiamata in Lhcb Event Builder Farm, che impiega connessioni di rete veloci da 100 Gb/s che permettono di riaggregare gli eventi con la massima efficienza.

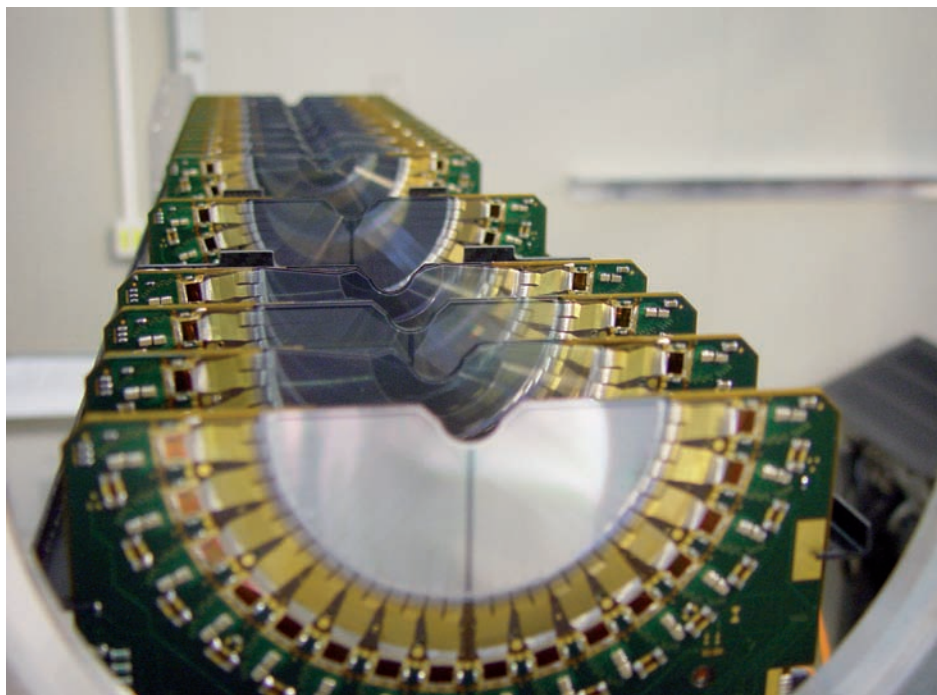
b. Schema di un tipico sistema di trigger: i fasci prodotti dall'acceleratore collidono all'interno di un rivelatore producendo segnali nei vari sotto-rivelatori (rivelatore di muoni, calorimetro ecc.). Ciascuno di essi invia i segnali relativi a una determinata collisione a una medesima CPU del primo livello di trigger. Il primo livello esegue un'analisi veloce di ciascun evento e decide se rigettarlo o passarlo al livello successivo per un'analisi che potrà essere più lunga e quindi più accurata. Solo una piccola parte degli eventi prodotti nelle collisioni verrà salvata per formare il campione di dati che sarà studiato in dettaglio.

Tutti i computer dell'Event Builder Farm ricevono continuamente i frammenti degli eventi dall'elettronica di lettura del rivelatore; ciascuno di essi, a turno, riceve i dati da tutti gli altri computer, in maniera da avere tutti i frammenti corrispondenti a un determinato evento da riaggregare, per ricostituire l'evento completo. I dati prodotti dal rivelatore arrivano ai computer dell'Event Builder Farm attraverso schede elettroniche d'interfaccia che saranno realizzate appositamente.

Una volta ricomposto, l'evento è inviato a un altro sistema, l'Event Filter Farm in Lhcb, che grazie ai suoi mille nodi di calcolo potrà selezionare eventi alla frequenza di 40 MHz e gestire il flusso aggregato di 40 Tb/s. Gli esperimenti di Lhc sono a più di 100 metri di profondità sotto terra e sono sottoposti a un enorme flusso di radiazioni. Per la trasmissione dati è quindi necessario impiegare un chip resistente alla radiazione, prodotto dal Cern e capace di trasmettere fino a 4,8 Gb/s. È necessario un gran numero di canali di trasmissione (circa 10.000) per sostenere il traffico dati verso l'Event Builder Farm. Per sfruttare al meglio i mille nodi di calcolo nel riconoscimento o analisi degli eventi, è necessario un controllore, che da una parte sappia quale dei nodi è meno carico di lavoro e, dall'altra, invii – usando gli indirizzi – tutti i frammenti di un medesimo evento allo stesso nodo. Questo ruolo di “regolatore del traffico” è svolto da un'unità funzionale specifica, di solito chiamata *trigger-supervisor*: attraverso quest'ultimo, ciascuno dei nodi dell'Event Filter Farm segnala al trigger quali risorse sono libere e pronte ad accogliere un nuovo evento che può essere analizzato. Tutta questa complessità può essere riassunta, pensando a Lhc come a una

macchina che produce 40 milioni di immagini al secondo, di cui meno di una su mille è realmente interessante. Ciascuno dei quattro esperimenti “vede” quest'immagine attraverso i propri rivelatori, come se fosse un puzzle: il singolo pezzo è l'informazione registrata da ciascun canale di ciascun rivelatore. Un generico sistema di trigger può guardare pochi tra queste decine di migliaia di pezzi. Il trigger di Lhcb potrà guardare tutti i pezzi e decidere se l'evento è interessante, il tutto entro i 25 nanosecondi tra una collisione e l'altra.

c.
Particolare del *Velo*, il rivelatore di Lhcb più vicino al punto di interazione dei fasci di protoni. Le informazioni raccolte dal Velo sono uno degli ingredienti fondamentali del trigger di Lhcb.



Biografia

Umberto Marconi è ricercatore presso la sezione Infn di Bologna. La principale attività di ricerca riguarda lo studio dei quark beauty e charm in Lhc con l'esperimento Lhcb. Al momento lavora alla progettazione del nuovo sistema di readout del trigger di Lhcb, previsto per l'upgrade del rivelatore nel 2018-19.

Barbara Sciascia è ricercatrice presso i Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) dell'Infn. È stata a lungo responsabile del trigger dell'esperimento Kloe. Da alcuni anni collabora all'esperimento Lhcb.

Link sul web

<http://www.lhc-closer.es/1/3/13/0>

<http://profmattstrasser.com/articles-and-posts/largehadroncolliderfaq/the-trigger-discarding-all-but-the-gold/>

Sincronizziamo gli orologi

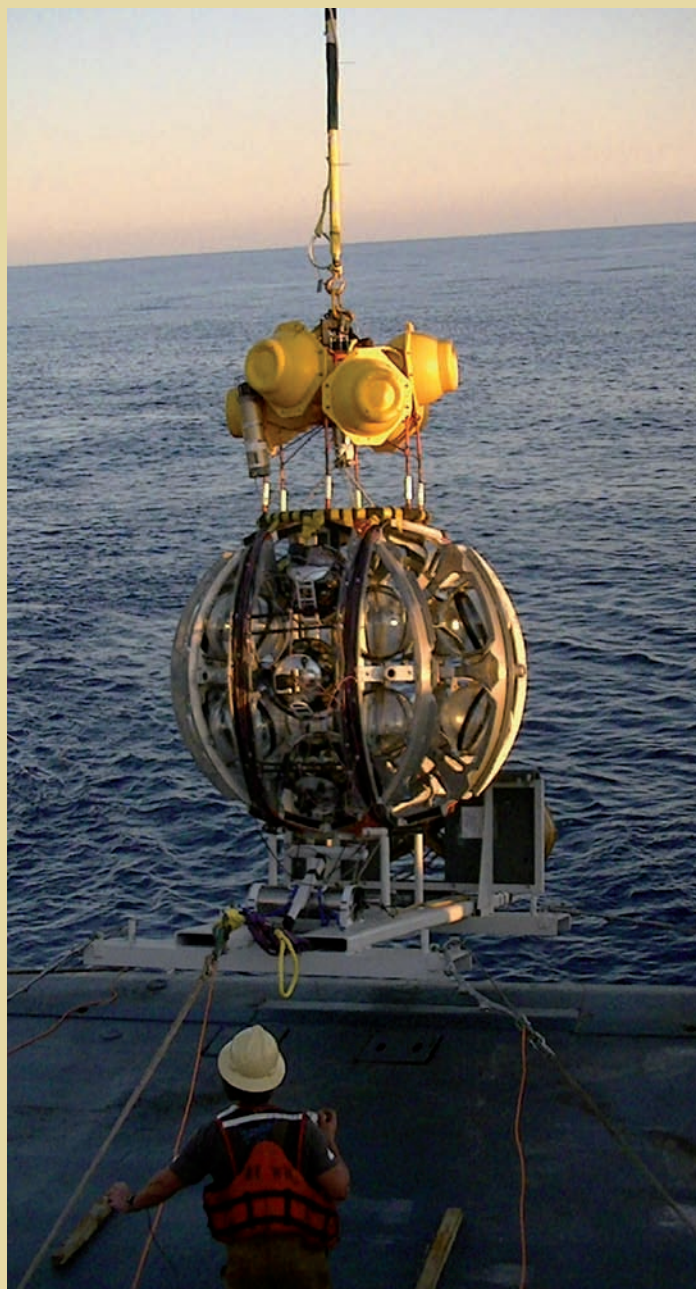
Tecniche di allineamento temporale

di Maximiliano Sioli

Molti esperimenti di fisica richiedono una misura precisa del tempo. Anche in un esperimento semplice – per esempio quello del piano inclinato di Galileo (vd. p. 48, ndr) – gli orologi che misurano il tempo associato al passaggio di una sfera dalla partenza fino al traguardo devono essere *sincroni* (cioè le “lancette” devono muoversi senza anticipare né ritardare rispetto a un orologio di riferimento) e *in fase* (cioè devono battere l’ora tutti allo stesso istante), per poter correttamente misurare il moto della sfera. Negli esperimenti di fisica delle particelle tutti gli “orologi” installati nei componenti elettronici degli esperimenti devono essere sincroni e in fase, con una precisione di frazioni di miliardesimi di secondo. Ciò è fondamentale per poter correlare i dati che arrivano dai sottosistemi del rivelatore e che vanno associati allo stesso evento fisico (nel gergo dei fisici si dice che i segnali sono *in coincidenza temporale*). Anziché installare un orologio atomico su ogni parte del rivelatore (che sarebbe un’operazione troppo complessa e immensamente costosa) i fisici utilizzano spesso un unico preciso orologio di riferimento (il *master clock*) e una rete di cavi elettrici o fibre ottiche calibrate, su cui viaggiano segnali ottici ed elettrici utilizzati per sincronizzare e mettere in fase tutti i componenti elettronici dell’esperimento. In molti dei moderni esperimenti di astrofisica particellare (vd. Asimmetrie n. 15 pp. 11 e 15) si costruiscono apparati composti da rivelatori separati da distanze che vanno dal centinaio di metri al centinaio di chilometri. Questi rivelatori devono identificare gli eventi fisici di interesse, tracciando il passaggio di particelle che si muovono con velocità prossime a quelle della luce nel vuoto, in volumi di materia grandi fino a migliaia di chilometri cubi. Gli eventi si ricostruiscono misurando “in coincidenza” le particelle che investono i vari rivelatori dislocati nello spazio. È chiaro dunque come un’accurata e precisa ricostruzione dell’evento sia subordinata all’accuratezza e precisione del sistema di sincronizzazione di tutti i rivelatori dell’esperimento.

a.

Calata a mare agli inizi del maggio del 2014 della seconda delle cento strutture che formeranno il telescopio sottomarino per neutrini Km3net, in costruzione negli abissi al largo della Sicilia a 3500 m di profondità.





Nei telescopi di neutrini le unità di rivelazione sono costituite da decine di migliaia di sensori di luce disposti in stringhe verticali distanziate centinaia di metri nelle profondità marine o sotto il ghiaccio. Negli osservatori di raggi cosmici, come ad esempio l'esperimento Auger in Argentina, le stazioni di rivelazione sono invece disposte su superfici di alcune migliaia di chilometri quadrati. Queste differenze incidono sulla scelta tecnologica utilizzata per confrontare i tempi registrati dai vari rivelatori. Nel primo caso, il segnale dell'orologio principale collegato al Gps viene ricevuto da una stazione di terra e trasportato fisicamente attraverso fibre ottiche in modo capillare in tutte le unità di rivelazione (questo è necessario, perché i segnali inviati dai satelliti Gps non si propagano né sott'acqua né sottoterra). Ciascuna unità può essere così sincronizzata continuamente assegnando ad ogni segnale fisico identificato il *timestamp* (cioè il tempo al quale è stato acquisito il dato, scritto con un'opportuna codifica digitale), che verrà poi utilizzato in fase di ricostruzione dell'evento. Nel secondo caso, quello dei rivelatori in superficie, ciascuna unità di rivelazione è dotata di un ricevitore Gps indipendente per la costruzione dell'informazione temporale. Con questi sistemi si riescono a sincronizzare le diverse parti dell'esperimento con accuratezze dell'ordine del milionesimo di secondo (nanosecondo).

Accanto alla necessità di allineare temporalmente diverse parti dello stesso esperimento, è spesso importante essere in grado di sincronizzare diversi esperimenti molto distanti tra loro. È questo il caso delle reti di rivelatori che ricercano le onde gravitazionali prodotte nel cosmo da grandi masse in accelerazione (vd. Asimmetrie n. 15 p. 30). La possibilità di costruire reti di rivelatori fornisce un importante passo in avanti per questo settore di ricerca, perché è solo attraverso il confronto dei tempi di arrivo del fronte di un'onda gravitazionale che è possibile misurarne la direzione di provenienza. Questo è particolarmente rilevante per la rivelazione delle onde gravitazionali prodotte dalla fusione di due stelle di neutroni, in cui è necessario avere almeno tre siti distanti capaci di misurare ampiezza e polarizzazione dell'onda gravitazionale in arrivo. Mediante triangolazione è poi possibile ricostruire la direzione della sorgente con una buona accuratezza, anche con sincronizzazioni relative particolarmente modeste, dell'ordine del millesimo di secondo. Un esempio di questo tipo è rappresentato dalla rete Ligo-Virgo-Geo600, composta da due interferometri negli Usa, uno in Italia (vd. fig. b) nei pressi di Pisa e uno in Germania. I quattro rivelatori disposti a formare un quadrilatero che attraversa l'intero Atlantico forniscono una ridondanza di misura, qualora uno degli altri

b.
Uno dei "bracci" del rivelatore di onde gravitazionali Virgo, a Cascina (Pisa).

fosse fuori acquisizione, contribuendo inoltre ad aumentare la precisione e l'accuratezza della misura sul segnale ricercato.

Un discorso a parte merita la sincronizzazione di orologi su grandi distanze per misure di *tempi di volo*, cioè del tempo in cui una particella, con velocità prossima a quella della luce, percorre una distanza nota. È il caso della misura della velocità dei neutrini prodotti al Cern di Ginevra e rivelati dopo 730 km ai Laboratori del Gran Sasso dell'Infn. In questo caso specifico la misura, eseguita prima dall'esperimento Opera (vd. approfondimento) e successivamente anche da altri esperimenti del Gran Sasso (Icarus, Lvs e Borexino), è essa stessa il risultato sperimentale a cui si vuole pervenire, pertanto l'accuratezza nella calibrazione delle varie parti dell'esperimento deve essere estrema. Dell'intera catena di misure

temporali in cascata, sono particolarmente delicate quelle che collegano la sorgente con il Gps a Ginevra e il Gps al Gran Sasso con il rivelatore Opera. È stata recentemente sviluppata una tecnologia chiamata *White Rabbit*, che fornisce un protocollo per il trasferimento e la sincronizzazione di dati su distanze dell'ordine dei 10 km con accuratezze inferiori al nanosecondo. Un aspetto interessante di questa tecnologia è il suo carattere *open source* (vd. Asimmetrie n. 14 p. 37), grazie al quale si è andata costruendo una comunità molto attiva che ha permesso un lungo processo di calibrazione e correzione dei *bug*. È prevedibile che il monitoraggio continuo offerto da questa tecnologia possa far sì che essa possa essere scelta in futuro come parte integrante dei sistemi di temporizzazione dei vari esperimenti.

c.

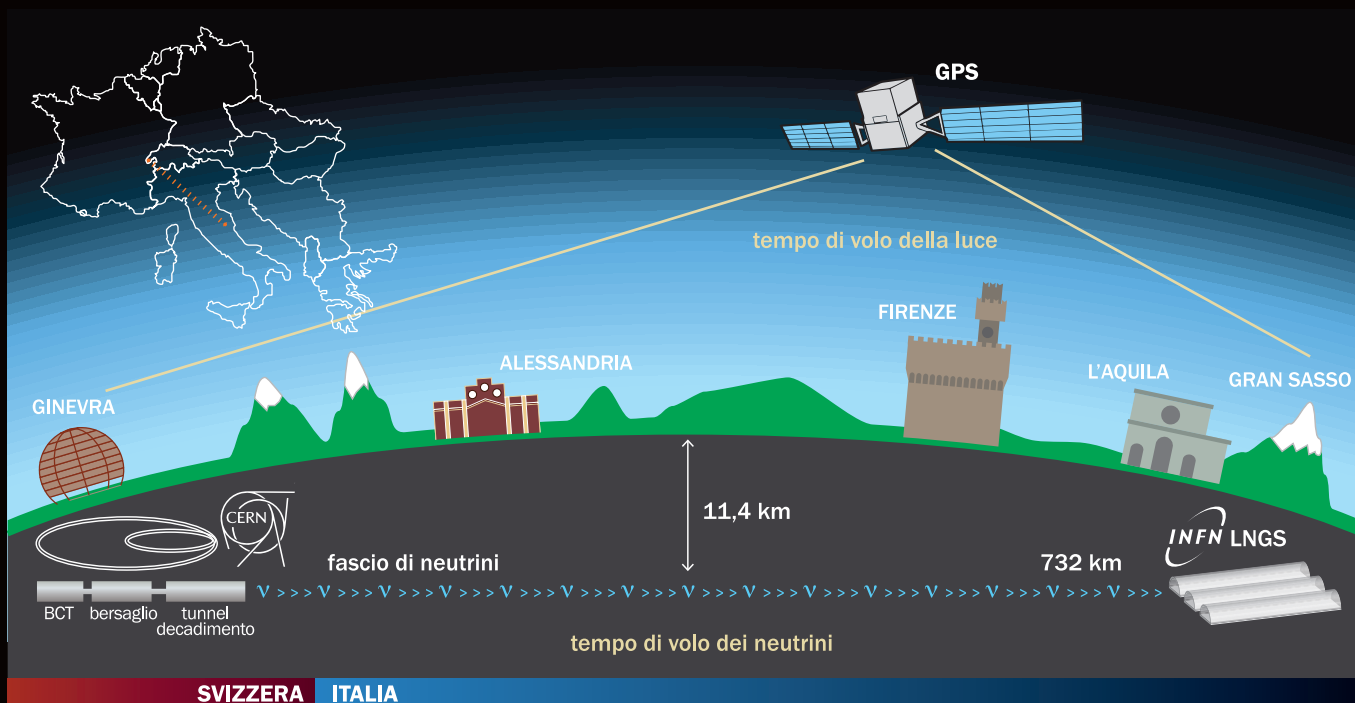
Il rivelatore Opera nella sala C dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Nelle regioni più scure sono collocati circa 150.000 "mattoni" di piombo e lastre fotografiche per la ricostruzione micrometrica delle interazioni dei neutrini.



Il volo dei neutrini

1.

Schema della misura effettuata dall'esperimento Opera. I due ricevitori Gps in common view permettono di misurare con la precisione richiesta i tempi del passaggio dei protoni in un punto della catena di acceleratori del Cern e il tempo di interazione dei neutrini nel rivelatore al Gran Sasso.



I neutrini del fascio Cngs (Cern Neutrinos to Gran Sasso) vengono prodotti al Cern inviando dei pacchetti di protoni contro un bersaglio di grafite e convogliando i prodotti di interazione all'interno di un tunnel di decadimento, che è sotto vuoto e lungo circa un chilometro. Tra questi prodotti di decadimento ci sono i neutrini muonici che procedono indisturbati verso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs) dell'Infn, dove l'esperimento Opera mira a identificare quanti neutrini oscillano, cioè si "trasformano" da muonici in tauonici lungo il percorso. Ma Opera è anche in grado di misurare il *tempo di volo*, ovvero l'intervallo temporale che intercorre tra la produzione e la rivelazione del neutrino, che è un'informazione importante per i fisici. Infatti, conoscendo la distanza percorsa, ottenuta anch'essa con misure di grande precisione, si risale poi alla velocità del neutrino. Non essendo noto il punto di produzione del neutrino all'interno del tubo di decadimento, la misura del tempo di volo viene effettuata prendendo come istante iniziale quello del passaggio del pacchetto di protoni, che ha dato origine al neutrino rivelato, in un punto prefissato posto prima del

bersaglio (nel Beam Current Transformer, Bct), e come istante finale quello in cui il neutrino ha interagito in un certo punto dell'apparato ai Lngs (il che accade molto raramente). Anche se non si può associare al neutrino rivelato il protone "genitore" all'interno del pacchetto, i pacchetti sono così compatti che si riesce a individuare l'istante iniziale con una precisione di pochi nanosecondi. Questa procedura assume che, dall'istante iniziale all'istante in cui viene prodotto il neutrino, i protoni e i loro prodotti di interazione viaggino alla velocità della luce. Essendo questo intervallo molto minore dell'intera durata del viaggio verso i Lngs, l'approssimazione è ampiamente giustificata. La misura si riduce quindi a collegare i tempi iniziale e finale con quelli di due ricevitori Gps posti rispettivamente all'esterno dei laboratori del Cern e dei Lngs. Questa operazione, tra le più delicate dell'intera procedura, è in parte svolta utilizzando la tecnologia White Rabbit e in parte mediante misure di calibrazione dei vari ritardi temporali introdotti dalla propagazione dei segnali all'interno del rivelatore. Per un altro aspetto determinante, il modo con cui vengono agganciati tra loro i due

segnali Gps, si è fatto uso della tecnica *common view*, in cui solo i segnali emessi dai satelliti visti simultaneamente da entrambi i siti vengono presi in considerazione. L'intera procedura ha consentito di misurare il tempo di volo con una precisione di qualche nanosecondo, un milione di volte inferiore rispetto alla durata dell'intero viaggio dei neutrini. Come è noto, nel settembre del 2011 la misura del tempo di volo dell'esperimento Opera aveva fornito un risultato anomalo, compatibile con una velocità di propagazione *superluminale* (più veloce della luce) per i neutrini, contraddicendo il limite imposto dalla teoria della relatività di Einstein. Nuove calibrazioni e ulteriori controlli effettuati sui ritardi di propagazione dei segnali di sincronizzazione temporale hanno però messo in luce due errori strumentali responsabili di questa anomalia e pochi mesi più tardi il risultato è stato smentito. Gli studi effettuati per capire l'anomalia, uniti ai risultati che nel frattempo pervenivano da altri esperimenti indipendenti, hanno definitivamente confermato l'errore ma, al contempo, hanno aperto nuove prospettive per misure temporali di altissima precisione a grandi distanze.

Biografia

Maximiliano Sioli è professore di fisica sperimentale presso l'Università di Bologna. Si è occupato di fisica dei raggi cosmici e fisica del neutrino negli esperimenti Macro e Opera al Gran Sasso e attualmente si occupa di fisica agli acceleratori nell'esperimento Atlas di Lhc del Cern.

Link sul web

<http://cern.ch/proj-cngs>

<http://www.ohwr.org/projects/white-rabbit>

[as] radici

Dilatazione dei tempi alla prova.

di Giulio Peruzzi

storico della fisica

a.
Frontespizio della prima edizione de
Il Saggiatore di Galileo Galilei, opera
considerata il “manifesto” del
metodo della scienza moderna.



A Galileo si deve la prima chiara affermazione del ruolo della nozione fisica di tempo nell'ambito della scienza moderna: il tempo, infatti, viene incluso da Galileo tra le “qualità primarie od oggettive” nella sua opera *Il Saggiatore* del 1623. In seguito Newton, nei *Principi Matematici della Filosofia Naturale* del 1687, caratterizza esplicitamente la nozione fisica di tempo in riferimento al “tempo assoluto, vero, matematico” che “in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente”. Come si andrà chiarendo, in particolare nel corso della seconda metà del XIX secolo, questo implica che il tempo scandito dagli orologi sia lo stesso, indipendentemente dal loro stato di moto. Questa proprietà intuitiva della nozione di tempo entra tuttavia in conflitto, almeno a partire dagli anni 1880, con alcuni esiti teorici e sperimentali della teoria dei fenomeni elettrici, magnetici e ottici descritti in forma unificata da Maxwell nel 1864. Si fa strada da allora l'idea che si debba pensare a tanti “tempi locali” o “tempi propri” diversi, ognuno associato a un diverso sistema di riferimento in moto relativo rispetto agli altri. Nel 1905 Einstein, nel suo articolo dal titolo *Elettrodinamica dei corpi in movimento*, pone questa nuova interpretazione della nozione di tempo alla base della teoria della relatività speciale (o ristretta), che riguarda solo le trasformazioni delle coordinate spaziali e temporali tra sistemi inerziali. Nel 1915, anche per capire come tradurre la legge di gravitazione universale di Newton nell'ambito della sua teoria della relatività, Einstein arriva alla definitiva formulazione della teoria della relatività generale, che riguarda le trasformazioni di spazio e tempo tra sistemi di riferimento in moto relativo qualunque. Entrambe le teorie relativistiche di Einstein prevedono che nel passaggio da un sistema

b.

Bruno Rossi (Venezia, 1905 - Cambridge, USA, 1993), protagonista insieme a Enrico Fermi della rinascita della fisica in Italia negli anni 1930.

di riferimento a un altro in moto relativo si assista a fenomeni di dilatazione temporale. È possibile verificare sperimentalmente quanto previsto dalle teorie relativistiche di Einstein in relazione alla dilatazione temporale nel passaggio da un sistema di riferimento a un altro in moto relativo? Per quanto controintuitiva possa apparire questa caratteristica del tempo, la sua verifica sperimentale è ormai un fatto ben consolidato. Il primo esperimento sulla dilatazione temporale prevista dalla relatività speciale viene descritto in un articolo di Bruno Rossi e David Hall pubblicato nel febbraio del 1941 su *Physical Review*. Nell'ambito dello studio dei raggi cosmici, che sono particelle di alta energia provenienti da fuori dell'atmosfera terrestre, erano state scoperte nel 1937 delle particelle, in seguito chiamate *muoni* (vd. *Asimmetrie* n. 10, ndr). Nel giro di poco tempo si capì che i muoni erano simili agli elettroni, salvo che avevano una massa maggiore (circa 200 volte quella dell'elettrone) ed erano instabili, cioè tendevano a decadere in frazioni di secondo in altre particelle. I muoni vengono creati negli strati alti dell'atmosfera nell'urto tra i raggi cosmici (in larga parte protoni) con le molecole dell'aria. Si conoscevano approssimativamente i valori medi dell'altezza alla quale venivano creati, del numero di muoni che arrivava a terra e della loro velocità. Mettendo insieme queste informazioni con quelle relative al tempo medio di vita di queste particelle (dell'ordine dei milionesimi di secondo), si otteneva una discrepanza palese: sarebbero dovuti arrivare a terra, cioè senza decadere prima nel tragitto, molti meno muoni di quanti invece se ne osservavano. Come scrivono Rossi e Hall, gli esperimenti da loro condotti, oltre a permettere una più accurata misura del tempo medio di vita dei muoni, costituivano una verifica della dilatazione dei tempi prevista dalla relatività speciale.

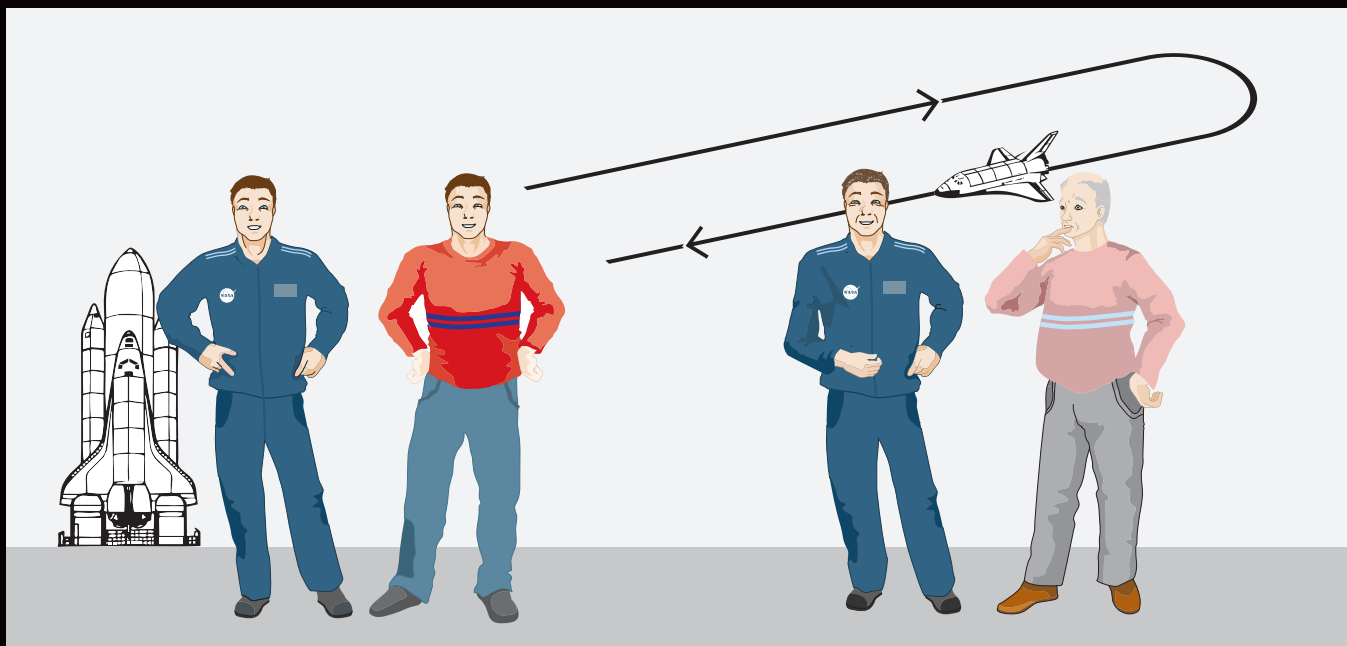


Siccome infatti i muoni si muovono a velocità prossime a quella della luce, il loro tempo medio di vita misurato da un orologio sulla Terra risulta dilatato. Questo spiega perché ne vediamo arrivare di più: è come se la natura, osserva Rossi, ci avesse messo a disposizione degli orologi (i muoni con il tempo scandito dallo loro vita media) che si muovono a grandi velocità. Tuttavia la relatività speciale richiede che il processo sia simmetrico. Se viaggiassimo nel sistema di riferimento del muone (dove cioè il muone ha velocità nulla), non ci sarebbe dilatazione temporale. In questo caso però vedremmo la Terra venirci incontro ad altissima velocità. Allora, secondo la relatività speciale, che oltre alla dilatazione dei tempi prevede la contrazione delle lunghezze nella direzione del moto, l'altezza dell'atmosfera apparirebbe minore di quella osservata da terra. In altri termini, senza dilatazione del tempo medio di vita riusciremmo ad arrivare a terra, perché l'altezza dell'atmosfera si contrae rispetto a quella vista da terra. Quindi il numero di muoni che arrivano a terra resta uguale sia nel sistema di riferimento della Terra, sia nel sistema di riferimento del muone. Dall'epoca di questo pionieristico lavoro di Rossi e Hall molti esperimenti hanno confermato le loro previsioni, non più utilizzando i raggi cosmici ma gli acceleratori di particelle.

I gemelli: un non-paradosso

1.

Il paradosso dei gemelli: di ritorno dal viaggio, l'astronauta che ha viaggiato è più giovane del fratello gemello rimasto sulla Terra.



Nello stesso articolo del 1905 dove introduce la relatività speciale, Einstein propone un esperimento concettuale: immaginando che si possa far muovere un orologio lungo un percorso chiuso, Einstein prevede che, una volta tornato al punto di partenza, l'orologio debba segnare un tempo inferiore rispetto a un orologio sincrono rimasto fermo in quel punto. In altri termini, la stessa idea si può applicare a due viaggiatori, la cui vita proceda in qualche modo in "sincronia", ad esempio a due gemelli. Tornato al punto di partenza, il gemello che ha viaggiato come astronauta nello spazio dovrebbe essere più giovane di quello rimasto a terra. Ma perché uno dovrebbe osservare l'altro invecchiato e non il viceversa? Entrambi vedendosi in movimento l'uno rispetto all'altro dovrebbero calcolare un ritardo dei loro orologi.

La cosa si risolve nell'ambito della relatività generale: il gemello che parte subisce due accelerazioni molto forti, la prima per potersi muovere e la seconda per invertire la rotta e tornare da dove era partito. A causa di queste accelerazioni il suo orologio subisce un ulteriore rallentamento di cui non risente il gemello rimasto fermo. Questo fenomeno, noto come *paradosso dei gemelli* (o *degli orologi*) si scontra decisamente con il senso comune, ma dal punto di vista della fisica non è un paradosso. La sua applicabilità effettiva ai gemelli deve invece vedersela con l'impossibilità biologica di viaggiare a velocità paragonabili con la velocità della luce, caso in cui l'invecchiamento dell'astronauta diventerebbe evidente: per i gemelli resta quindi solo un bell'esperimento concettuale.

Un altro esperimento sulla dilatazione temporale è dato dalla verifica sperimentale diretta del paradosso degli orologi (chiamato poi più comunemente "dei gemelli", vd. approfondimento), che viene compiuta per la prima volta nel 1971 da Joseph Hafele e Richard Keating ed è descritta in due articoli pubblicati su Science nel 1972. L'esperimento consiste nell'utilizzo di quattro orologi atomici (con sensibilità dell'ordine dei miliardesimi di secondo, vd. p. 29, ndr) sincronizzati tra loro e con gli orologi dell'Osservatorio Navale degli Stati Uniti. I quattro orologi vengono posizionati su aerei che compiono il giro del mondo, al termine del quale si confrontano i tempi indicati dagli orologi che hanno volato con quelli rimasti a terra. I risultati ottenuti confermano "la singolare conseguenza" della teoria sull'invecchiamento asimmetrico dei gemelli. Vale la pena notare, tuttavia, che l'esperimento è particolarmente delicato per varie ragioni, che Hafele e Keating spiegano in dettaglio nel primo articolo. Bisogna, infatti, tenere conto del fatto che l'orologio a terra non si trova su un sistema inerziale, ma segue la rotazione della superficie terrestre. Inoltre, la relatività generale prevede

una dilatazione gravitazionale del tempo, secondo la quale un orologio posto, per esempio, sulla superficie della Terra (ma, equivalentemente, di qualunque corpo celeste) scandisce il tempo più lentamente rispetto a un orologio posto a una certa altezza dalla superficie (dove il campo gravitazionale è più debole). Questo effetto, il *redshift gravitazionale*, è stato verificato sperimentalmente per la prima volta da Robert Pound e Glen Rebka nel 1960. La dilatazione temporale gravitazionale va tenuta presente nell'esperimento di Hafele e Keating: l'orologio atomico che sta a terra è rallentato da questo effetto (gravitazionale) e bisogna essere sicuri che il redshift non mascheri l'effetto (cinematico) di dilatazione temporale legato al moto relativo degli orologi che si intende misurare. Si potrebbe pensare che queste previsioni teoriche e verifiche sperimentali siano lontane dalla nostra vita quotidiana. Eppure ogni volta che usiamo un navigatore satellitare Gps per sapere quale strada prendere in terra o in mare, stiamo di fatto toccando con mano proprio gli effetti cinematici e gravitazionali che influiscono sulla misura del tempo.

[as] spazi

Oltre.

di Francesca Scianitti



a.
Il Museo delle Scienze (Muse) di Trento, dove verrà allestita la mostra "Oltre".

È uno spazio da superare la mostra "Oltre", curata dall'Infn assieme all'Agenzia Spaziale Italiana (Asi) e al Museo delle Scienze (Muse) di Trento, che la ospiterà dal prossimo novembre alla primavera 2015. Un invito a disegnare, immaginandolo, un universo che si estende soprattutto al di là dell'osservabile. Oltre i confini dello spazio e del tempo, oltre la materia, oltre tutto ciò che è accessibile ai nostri occhi o ai più sofisticati strumenti di indagine e di misura, oltre i sensi e la capacità di percepire e intuire. È però qualcosa alla portata della nostra immaginazione, come lo erano il moto della Terra per Copernico, le quattro dimensioni dello spazio e del tempo per Einstein, la massa delle particelle per Higgs. Al pari della scenografia piatta della volta stellata, così l'universo che oggi sappiamo descrivere è la proiezione di qualcosa di molto più grande e complesso, del quale stiamo imparando a decifrare i segnali.

"Così come la scienza partecipa in modo sempre più rilevante al divenire culturale della nostra comunità, proprio per via dell'immanenza che ha su tutte le espressioni sociali contemporanee – commenta Michele Lanzinger, direttore del Muse di Trento – anche i musei scientifici e le loro azioni possono e devono entrare a far parte dell'esperienza culturale dei visitatori, di qualunque età essi siano e qualunque sia la loro sensibilità specifica. Si tratta di far sì che le proposte dei

musei, con grande coraggio, escano dal recinto della didattica e si spingano alla ricerca di un dialogo con tutte le espressioni sociali e culturali. La mostra 'Oltre' punta decisamente su questo obiettivo".

Anche da un punto di vista architettonico, lo spazio della mostra è una sorta di balcone sospeso sull'ignoto, saldamente ancorato alle conoscenze acquisite della scienza: le pareti sono installazioni vive in movimento, capaci di modificarsi nell'interazione con chi le osserva, mentre pavimenti e soffitti sono impercettibili confini interrotti da rapide incursioni di un fuori poco conosciuto. Così, ad esempio, l'universo delle origini è una melassa da attraversare per acquistare massa, lo spaziotempo è una rete da plasmare con il proprio corpo e i corpi stessi possono interferire come onde d'acqua sulla superficie di uno stagno.

Scandiscono il racconto alcune presenze virtuali: esperti di avventure oltre il limite, che guidano lo spettatore all'esplorazione dell'universo, e lo invitano a guardare fuori, là dove la conoscenza incontra un ostacolo e la scienza volge lo sguardo, gli strumenti e l'immaginazione.

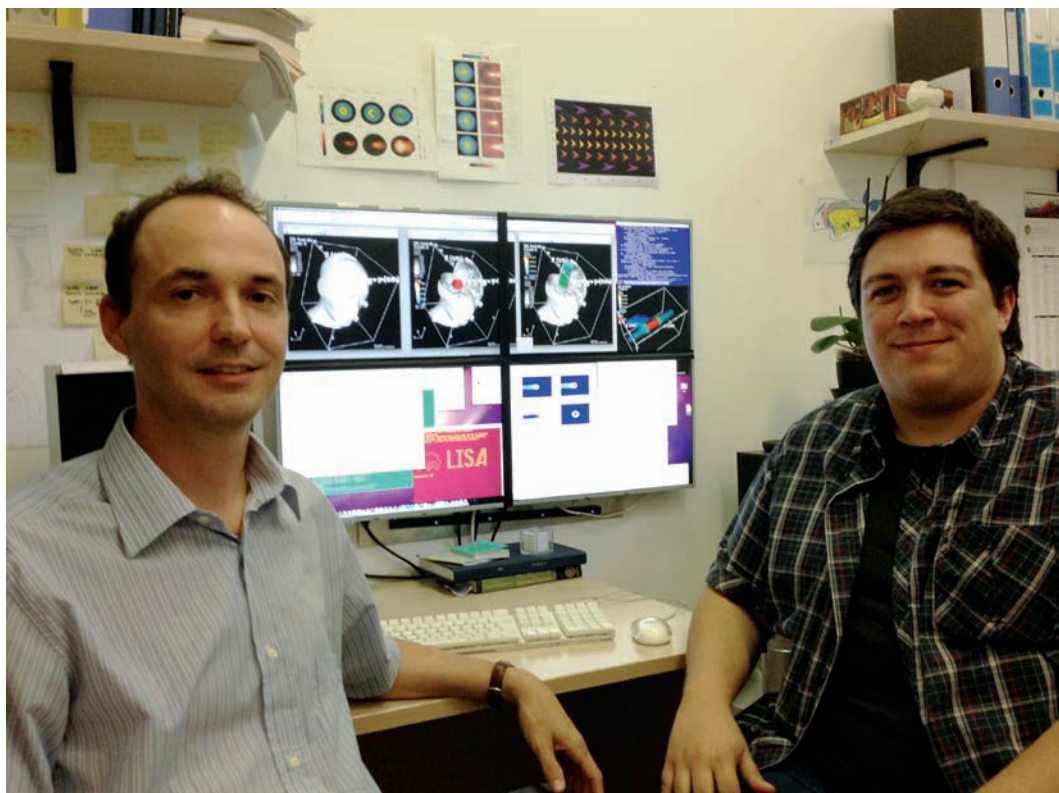
Alla pagina web <http://www.asimmetrie.it/index.php/as-spazi-oltre> è scaricabile un ulteriore contributo del direttore del Muse, Michele Lanzinger.

[as] riflessi

Calcolare in 3D.

di Vincenzo Napolano

a.
Angelo Schiavi (a sinistra), del Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria dell'Università La Sapienza, e Stefano Pioli (a destra), esperto in calcolo parallelo su GPU del gruppo di Schiavi.



In certi casi saper risolvere un problema non basta, bisogna risolverlo nel minor tempo possibile. Lo sanno bene i fisici, che studiano gli effetti dei fasci di particelle irraggiati nel corpo dei pazienti per bombardare e distruggere i tumori. Il loro obiettivo è definire, insieme ai medici, quale sia l'assetto migliore dei fasci, quanti debbano essere e con quali direzioni e intensità, per ottenere il maggior beneficio, con i minori effetti collaterali sui tessuti sani del corpo. E il tempo impiegato ad arrivare a questa soluzione ottimale è – letteralmente – vitale.

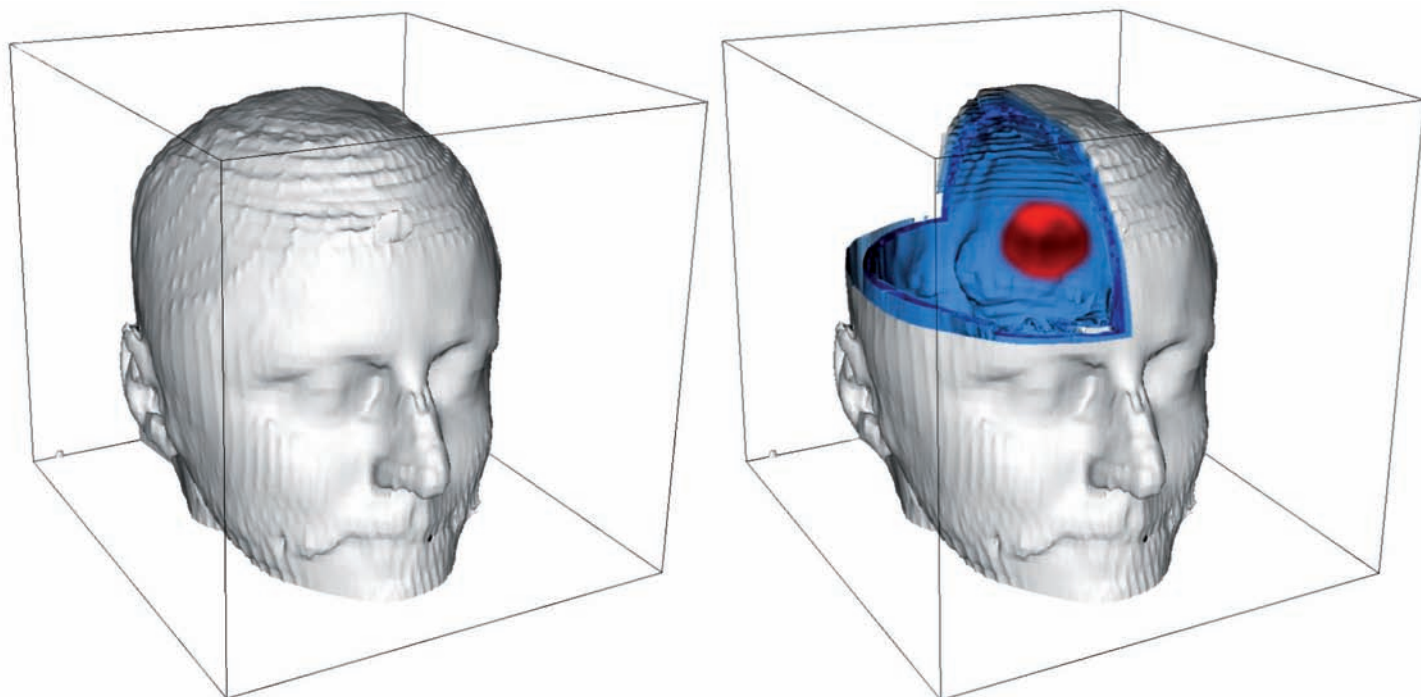
“In realtà – spiega Angelo Schiavi, che guida il gruppo di sviluppo software dell'Università La

Sapienza che lavora su queste tematiche – esistono programmi al calcolatore che sono in grado di simulare con estrema precisione i diversi scenari possibili, ovvero i piani di trattamento del paziente, tra cui il medico potrà scegliere. Questi metodi (chiamati *simulazioni Monte Carlo*) sono sostanzialmente gli stessi usati dai nostri colleghi al Cern per riprodurre il comportamento complicato delle particelle elementari nei rivelatori di Lhc”. Nel caso delle simulazioni di fisica fondamentale, però, il fattore tempo, anche se importante, non è altrettanto decisivo. “Per definire i diversi scenari con simulazioni di questo tipo –

continua Schiavi – un calcolatore, anche con prestazioni elevate, impiega decine di ore. È un tempo irrealistico, considerando il numero di pazienti di ogni struttura ospedaliera e, se si volesse dotare ogni ospedale di un centro di calcolo adeguato, i costi sarebbero esorbitanti”. Nella pratica delle cure ospedaliere, infatti, i piani di trattamento vengono definiti utilizzando metodi di calcolo numerico approssimato, di comprovata affidabilità, ma non altrettanto precisi. E i cui risultati, nei casi più complicati, devono essere comunque verificati con le simulazioni. “Per questo abbiamo provato ad abbattere i tempi di calcolo delle simulazioni Monte Carlo – dice Schiavi – semplificando la ‘fisica’, ovvero eliminando tutti gli elementi non indispensabili a descrivere l’interazione tra le particelle e i tessuti biologici”. Il risultato è un programma di simulazione che Schiavi ha chiamato Fred, che, seppur in maniera fortemente semplificata, riesce a portare la durata di calcolo fino a poche ore per ogni scenario. “Aspettare qualche ora per avere una risposta e poter valutare la strategia più adeguata alla cura – dice Stefano Pioli, giovane neolaureato in ingegneria biomedica – è ancora un tempo troppo lungo per un medico. È possibile, però, ridurre sensibilmente il tempo di calcolo richiesto senza diminuire il contenuto di informazioni

delle simulazioni, facendole girare su un processore un po’ insolito”. Ovvero sulla scheda grafica del computer, chiamata dagli informatici GPU (Graphic Processor Unit), anziché sul processore centrale, la CPU. “La scheda grafica – ci spiega Pioli – è costituita da migliaia di microprocessori in grado di elaborare in parallelo il percorso di ogni particella, descrivendone punto per punto la deposizione di energia nel corpo del paziente”. Naturalmente le particelle di un fascio sono molte di più di poche migliaia e lo stesso processo deve essere ripetuto molte volte. Ciò nonostante, girando sulla GPU, Fred arriva a presentare un piano di trattamento semplificato in pochi minuti. “Un risultato entusiasmante – dicono i due ricercatori – ma che è ancora lontano dal diventare uno strumento concretamente utilizzabile nella routine medica. Il nostro obiettivo fino a ora era quello di fornire una prova teorica della sua fattibilità”. L’hardware delle GPU, in realtà, è stato progettato per riuscire a riprodurre in video gli scenari dei videogame o di panorami tridimensionali. “Realizzare delle mappe virtuali del corpo del paziente e del rilascio di radiazione ed energia dei fasci – conclude Schiavi – non è in fondo un compito del tutto diverso da quello della grafica 3D, ma calato in un contesto ancor più interessante e certamente più utile”.

b.
Modellizzazioni del cranio basate sulle Tac del paziente (in bianco la pelle e in blu le ossa) e sul volume tumorale (in rosso) definito secondo le indicazioni dell'oncologo.



[as] illuminazioni

Io dico l'universo.

Un pendolo che oscilla, una palla che rotola lungo un piano, l'acqua che cola da un cannello. Esperienze comuni cui non prestiamo quasi attenzione, ma che osservate dalla mente acuta di Galileo divennero le basi per la nascita della scienza moderna. Nell'era di Lhc e della Stazione Spaziale Internazionale, è difficile percepire la portata dell'opera di Galileo, ma ci viene in aiuto lo spettacolo teatrale "Io dico l'Universo, dialoghi galileiani", organizzato dalla Società Italiana di Fisica in occasione del suo 100° Congresso Nazionale a Pisa a settembre del 2014. Lo spettacolo presenta anche un video che racconta la scoperta della legge della caduta dei gravi usando le parole dello stesso Galileo. La leggenda vuole che Galileo abbia lasciato cadere degli oggetti dalla Torre di Pisa per studiarne il moto, ma i tempi di caduta sarebbero stati troppo brevi per essere misurati dagli orologi del tempo. L'idea geniale fu allora di far rotolare delle sfere lungo piani inclinati, allungando così i tempi di caduta fino ad alcuni secondi, misurati da Galileo prima contando i battiti del polso, poi con i tempi di battuta musicali, grazie al suo ottimo orecchio musicale, e infine con un orologio ad acqua appositamente costruito e preciso al meglio del decimo di secondo. Come scrisse Galileo stesso, "quanto poi alla misura del tempo, si teneva una gran secchia piena d'acqua, attaccata in alto, la quale per un sottil cannellino, saldatogli nel fondo, versava un sottil filo d'acqua". Galileo intuisce e assume che il flusso

attraverso il cannellino è costante e quindi misura il tempo pesando con "esattissima bilancia" l'acqua raccolta "in un piccol bicchiere" tra l'apertura e la chiusura del cannellino. L'accurata misura sperimentale del tempo lo porta a enunciare la legge che porta il suo nome, una delle prime della storia della fisica: "per esperienze ben cento volte replicate sempre s'incontrava, gli spazii passati esser tra di loro come i quadrati de i tempi".

Per altro Galileo aveva quasi inventato un "misuratore di tempo" molto più semplice, accurato e preciso di quello ad acqua. Osservando le oscillazioni di una lampada nel Duomo di Pisa, scopre due leggi fisiche fondamentali. Prima formula la legge dell'isocronismo del pendolo: "il medesimo pendolo fa le sue vibrazioni con l'istessa frequenza, o pochissimo e quasi insensibilmente differente, sien elleno fatte per archi grandissimi o per piccolissimi dell'istessa circonferenza". In seguito formula la legge dell'indipendenza del periodo dalla massa del pendolo, fissata la lunghezza del pendolo stesso: "due palle, una di piombo ed una di sughero, quella ben più di cento volte più grave di questa,... hanno sensatamente mostrato, come la grave va talmente sotto il tempo della leggera, che né in ben cento vibrazioni, né in mille, anticipa il tempo d'un minimo momento, ma camminano con passo equalissimo". Quest'ultima rappresenta la scoperta sperimentale dell'equivalenza tra massa gravitazionale e massa inerziale che è alla base sia della teoria della gravitazione universale di Newton che della relatività generale di Einstein (vd. Asimmetrie n. 14 p. 12, ndr). Le due leggi del pendolo permettono di tarare facilmente pendoli di lunghezza nota ricavandone "semplici misuratori di tempo", e sarà lo stesso Galileo molti anni più tardi a proporre l'uso del pendolo come meccanismo regolatore degli orologi. Ne abbozzò un progetto, ma ormai vecchio e cieco, non riuscì a realizzarlo e l'orologio a pendolo verrà costruito solo nel 1657, da Huygens. [Carlo Dionisi]



a.
Il piano inclinato, esposto nel Museo di Galileo di Firenze.

Per approfondire scarica il pdf integrale e guarda il video:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/as-illuminazioni-io-dico-l-universo>

**I laboratori dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.**

I laboratori organizzano, su richiesta
e previo appuntamento, visite gratuite
per scuole e vasto pubblico.

La visita, della durata di tre ore circa,
prevede un seminario introduttivo
sulle attività dell'Infn e del laboratorio
e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

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

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

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

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

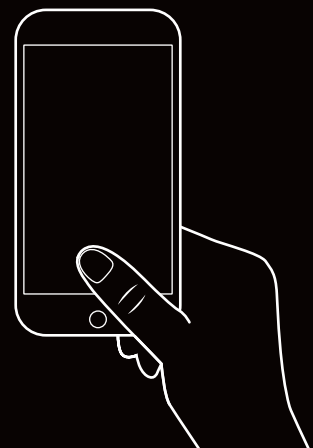
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

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





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it