

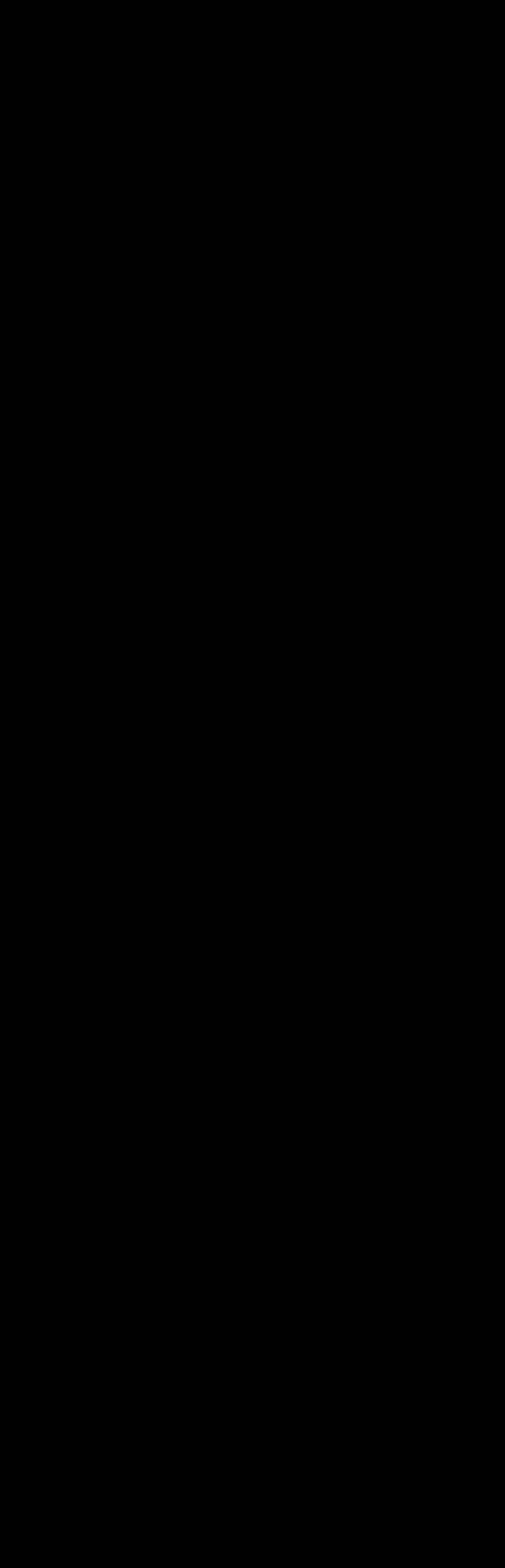
[clessidre]



anno 21 numero 40/ 04.26

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

La storia della fisica può essere letta come un lungo percorso di perfezionamento nella misura del tempo. Fin dall'antichità, l'uomo ha cercato di dare forma a ciò che è invisibile e sfuggente, affidandosi inizialmente ai fenomeni periodici della natura – il moto della Terra attorno al Sole, l'alternarsi del giorno e della notte – e costruendo strumenti come clessidre e orologi ad acqua, basati anch'essi sulla ripetizione regolare di un fenomeno fisico.

Con il progredire delle conoscenze, queste tecniche si sono raffinate: il pendolo ha permesso di sfruttare con precisione l'oscillazione di un corpo sotto l'azione della gravità, mentre i grandi orologi meccanici hanno rappresentato un connubio di tecnologia, arte e ingegno umano. Grazie alle loro "complicazioni", era possibile suddividere il tempo in intervalli sempre più piccoli e, allo stesso tempo, tenere il passo di stagioni e anni.

Il '900 ha segnato una rivoluzione concettuale: la relatività ha mostrato che il tempo non è assoluto, ma dipende dalla distribuzione di massa, energia e dalla velocità dell'osservatore.

Una differenza di quota di pochi centimetri è sufficiente a modificare la frequenza di un orologio atomico, trasformando così la misura del tempo in un vero laboratorio per testare la gravità in regime debole e sondare eventuali variazioni delle costanti fondamentali.

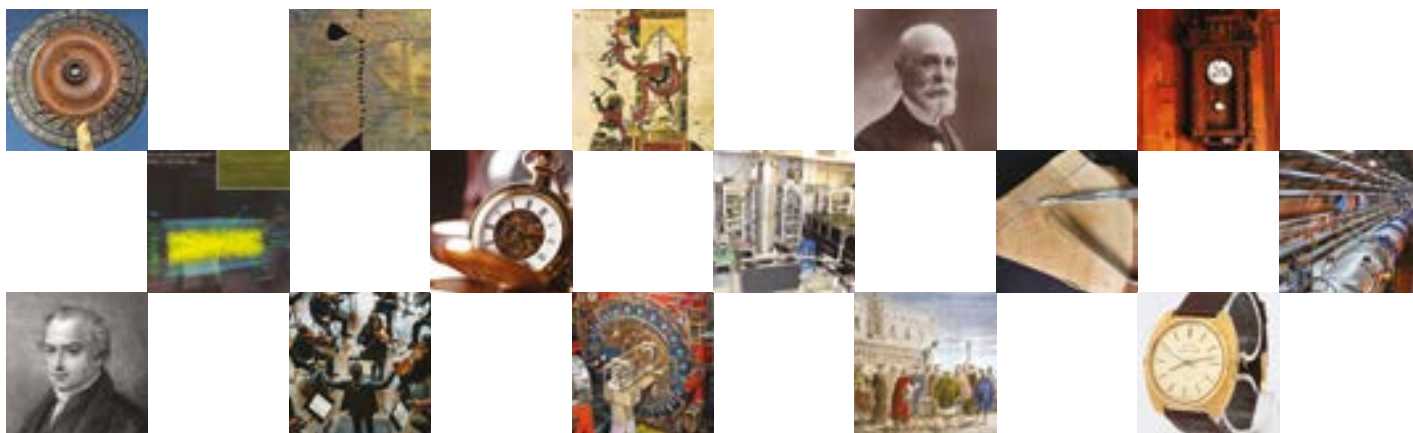
Parallelamente, la fisica moderna ha spinto la capacità di misura verso scale sempre più estreme. Gli orologi al quarzo e gli orologi atomici, basati su oscillazioni e transizioni quantistiche, permettono di controllare il tempo con una precisione incredibile per periodi lunghissimi. In ambito sperimentale, acceleratori e rivelatori lavorano con stabilità di fase e risoluzioni temporali dell'ordine dei picosecondi, separando eventi che avvengono quasi simultaneamente. Con laser ultracorti e tecniche di *attosecond metrology* si sondano ritardi di emissione fino a poco tempo fa non misurabili, rivelando processi quantistici prima inaccessibili.

Anche la misura di tempi lunghi si affida alle leggi fisiche: dal decadimento del carbonio-14 alla vita delle stelle, fino ai metodi che ci permettono di stimare l'età dell'universo.

Ovunque volgiamo lo sguardo, la dimensione temporale diventa una chiave fondamentale per comprendere l'evoluzione dei sistemi fisici, dal mondo microscopico a quello cosmico.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
Presidente INFN



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

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

Semestrale, anno 21, numero 40, aprile 2026

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *Presidente INFN*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Nicolao Fornengo

comitato scientifico

Daniele Del Re
Viviana Fafone
Giuliana Galati
Sandra Leone
Alessandro Papa

redazione

Catia Peduto

hanno collaborato

David Alesini, Alessandro Cianchi, Antonaldo Diaferio, Anna Greco, Luciano Iess, Lucia Liccioli, Martina Malberti, Anna Maragno, Alex Mattiussi, Salvatore Micalizio, Alessandro Nagar, Mauro Nisoli, Alessandro Soranzo, Guido Tonelli

contatti redazione

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

impaginazione

Hylab

stampa

Tipografare srl

su carta certificata FSC
carta interno:



R4 Next Bulky da 130 gr/m²
carta copertina:
garda matt art da 300 gr/m²

Tutti i diritti sono riservati.
Nessuna parte

della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'INFN, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di aprile 2026.
Tiratura 19.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare la redazione all'indirizzo comunicazione@presid.infn.it

sito internet

Asimmetrie 40 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su www.asimmetrie.it

e-magazine

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

crediti iconografici

Foto copertina © Tom Merton/iStockPhoto // foto p. 4 © Andrii Zorii/Dreamstime; foto p. 5 © Andrii Zorii/iStockPhoto; foto a p. 6 BrianAJackson/iStockPhoto foto b p. 7 © Deutsches Uhrenmuseum; foto c p. 8 © CERN // foto a p. 9 © Gozitano-Wikimedia; foto b (a destra) p. 10 © Wolfgang Sauber; foto c p. 11 © K.Pornsatid/Adobe Stock // figg. pp. 12,13 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // figg. a, b pp. 14-15 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 16 © INRIM // foto a p. 17 © Science Photo Library fig. c p. 19 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto d p. 20 © clu/iStockPhoto // foto a p. 21 © LABEC-INFN; fig. b p. 22 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 23 © LABEC-INFN // foto a p. 24 © CERN; fig. b p. 25 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 26 © D. Alesini // foto a p. 27 © CERN; fig. b, c pp. 28-29 © CERN // foto a p. 30 ©VK Studio/Adobe Stock; foto p. 31 ©DESY // foto a p. 32 © Claudio Bresciani / Alamy; fig. c, 1 pp. 34-35 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // fig. a p. 36 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. b p. 37 © ESA // foto a p. 39 © Istituto Veneto; fig. b p. 40 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto b p. 43 © Thorsten Naeser/ attoworld.de // fig. a p. 44 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto b p. 45 © C. Peduto // foto p. 46 © INFN // fig. p. 48 A. Nagar/ Asimmetrie-INFN.

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

as

40 / 04.26 [clessidre]

Per quanto tempo è per sempre? di Guido Tonelli	4	You are here di Luciano Less	36
Tempus fugit di Anna Maragno	9	[as] intersezioni Il tempo psicologico di Alessandro Soranzo	39
[as] Come misurare il tempo	12	[as] visioni <i>Χρόνος</i> contro <i>Κρόνος</i> di Giuliana Galati	42
Dammi solo un minuto di Salvatore Micalizio	14	[as] illuminazioni Il tempo che scorre di Anna Greco	44
C'era una volta di Antonaldo Diaferio	17	[as] spazi <i>L'escape room</i> delle particelle di Alex Mattiussi	46
Alla ricerca del tempo perduto di Lucia Liccioli	21	[as] lampi	47
Ritmi frenetici di David Alesini	24	[as] segni	48
Tempi moderni di Martina Malberti	27		
Sinfonia di particelle di Alessandro Cianchi	30		
L'atto fuggente di Mauro Nisoli	32		

Per quanto tempo è per sempre?

Una breve storia della misura
del tempo

di Guido Tonelli



Le clessidre sono alcuni dei più antichi fra gli strumenti di misura del tempo. Assieme a meridiane e calendari hanno definito il rapporto con il tempo per intere comunità di umani, quelle che prosperavano grazie a piogge periodiche, o alle alluvioni benefiche di un grande fiume. Per un tempo interminabile il più terribile degli incubi per ogni popolazione di allevatori o coltivatori era che il Sole non riapparisse o che si interrompesse di colpo la magica sequenza delle stagioni. Il nostro senso del tempo ha radici in questa storia millenaria. Qualunque cosa minacciasse questo meccanismo perfetto costituiva un pericolo per la sopravvivenza dell'intera specie umana. Non a caso il potere veniva affidato a sacerdoti e astronomi, i più sapienti nell'organizzare un calendario, nel carpire i segreti nascosti in questo fluire regolare. Chi comprendeva le leggi segrete del tempo dominava il mondo, chi era capace di correggere quelle sottili derive nel fluire dei giorni e delle stagioni, che lo rendevano impercettibilmente irregolare, esercitava un potere immenso sugli uomini. Ma la necessità di controllare lo scorrere del tempo è uno dei bisogni ancestrali più profondi. Come accade in molti animali, e persino in alcune specie di insetti, il forte senso del tempo che caratterizza la nostra specie ha radici profonde nella biologia. Ritmi circadiani regolano da sempre le nostre funzioni vitali,

mentre valutare gli intervalli di tempo, memorizzare le attese, ipotizzare il momento più opportuno per una determinata azione si sono rivelati strumenti fondamentali per la sopravvivenza della specie. Non deve stupire che riechegi ancora in noi lo stupore dell'umanità bambina di fronte al carattere periodico dei grandi processi naturali: il Sole che percorre il suo arco a segnare l'alternarsi di luce e buio, l'accendersi delle stelle nel cielo notturno, la Luna che lo illumina con perfetta cadenza e il susseguirsi interminabile delle stagioni.

Con il passaggio dalla civiltà contadina all'epoca della manifattura, padroneggiare lo scorrere del tempo e misurarlo con precisione diventa un'attività fondamentale. Orologi meccanici sempre più precisi vengono messi a punto per organizzare la produzione e il commercio dei beni, per scandire il ritmo della vita nelle città o determinare la posizione dei vascelli che solcavano i grandi oceani alla ricerca di nuove terre. L'avvento della moderna rivoluzione industriale, ai primi del '900, segna il trionfo della misura del tempo, che diventa onnipresente e invade tutti gli aspetti della vita: organizza la giornata lavorativa nelle fabbriche e nei luoghi di lavoro, definisce le pause concesse agli operai e misura il loro salario, regola e stabilisce con precisione anche i periodi dedicati al recupero delle energie o allo svago.



a.
Un orologio da
taschino.

Migliaia di orologi fanno la loro apparizione nelle fabbriche e nei luoghi pubblici delle città, invadono le case e diventano accessori personali indispensabili. Iniziano con fare capolino dai taschini dei signori e finiscono per dilagare al polso di tutti. Una moltitudine di cronometri viene inglobata in ogni strumento di lavoro, trasporto o comunicazione. Il “clock” definisce i cicli dei processori nei cellulari, nei computer, nei sistemi satellitari, in ogni tipo di macchina utensile. Con la seconda rivoluzione industriale, gli orologi diventano strumenti onnipresenti che cadenzano la vita e le attività di miliardi di individui. Per ironia della sorte, proprio nel momento in cui la società celebrava il massimo trionfo del tempo, di colpo cambia tutto e il concetto stesso di tempo viene stravolto irrimediabilmente. Non appena la scienza moderna riesce a esplorare gli angoli più reconditi dell’universo, scopre che lo scorrere del tempo è qualcosa di molto più complicato e bizzarro di quanto si poteva immaginare. Quando si analizzano i fenomeni che avvengono nelle dimensioni subnucleari, il tempo diventa qualcosa di intimamente connesso allo spazio, che si deforma con la velocità. Qualcosa di ancora più strabiliante succede quando si osservano gli oggetti giganteschi che popolano il cosmo sulle grandi distanze, le galassie o gli ammassi di galassie. In questi due mondi, così lontani fra loro, quello scorrere del tempo armonico e costante, che ci ha incantato per millenni, si liquefa, si contorce, si frantuma. Spazio e tempo ci appaiono come una coppia indissolubile; non un concetto astratto, ma una sostanza materiale che occupa

l’universo intero, che vibra, oscilla e viene deformata dalla grande distribuzione di massa o di energia. La concezione ordinaria del tempo, quella che per millenni è stata utilizzata per ogni incombenza quotidiana, non funziona più. Con Albert Einstein il tempo assoluto di Isaac Newton riceve un colpo durissimo. Non solo non è più rigido e immutabile, ma perde anche la sua indipendenza dallo spazio. Il tempo universale di Newton si frantuma definitivamente in una specie di pulviscolo, un caleidoscopio di minuscoli orologi locali, il cui ticchettio non è soltanto fuori sincronia con tutto il resto, ma varia continuamente, incessantemente. A ogni punto corrisponde una specifica curvatura che dipende dalla distribuzione di energia e massa dell’intero universo rispetto a quella particolare posizione, in ogni singolo momento. Il tempo scorre con ritmi differenti in ciascun punto dell’universo e il suo fluire varia nel tempo anche localmente, in funzione dei cambiamenti dinamici della distribuzione di massa ed energia dell’universo intero. A partire da quel momento misurare il tempo con precisione sempre crescente diventa uno strumento fondamentale per comprendere le leggi fondamentali della natura, per carpirne i segreti più nascosti. La misura di intervalli di tempo sempre più minuti diventa essa stessa uno strumento scientifico privilegiato per cercare le profonde simmetrie che possono nascondere nuove leggi della fisica. Per misurare il tempo si sono sempre utilizzati fenomeni periodici: il battito del polso, il moto apparente del Sole attorno alla Terra o un pendolo che



b.
L'Astron della Seiko è stato il primo orologio al quarzo commercializzato. Le uniche 100 unità prodotte furono vendute tutte a Tokyo nel Natale del 1969.

compie piccole oscillazioni. La precisione è cresciuta sempre di più, via via che si sono utilizzati fenomeni fisici caratterizzati da oscillazioni di frequenza sempre maggiore. Per questo si è passati dagli orologi a pendolo a quelli al quarzo, fino a giungere agli orologi atomici. La rivoluzione scientifica dei primi del '900 ci ha dato gli strumenti per capire e indagare i fenomeni caratteristici dei sistemi atomici, e lì si sono trovate transizioni periodiche ad altissima frequenza, che seguono un ritmo più regolare e preciso di qualunque altro fenomeno naturale utilizzato fino a quel momento.

Per avere un'idea del salto di qualità, basta ricordare che un buon orologio al quarzo può scartare di qualche secondo all'anno, mentre non è difficile costruire orologi atomici che sbagliano di un secondo ogni qualche milione di anni. Recentemente, utilizzando alcune particolari transizioni in atomi raffreddati a temperature vicinissime allo zero assoluto, è stato possibile costruire prototipi sperimentali che sbaglierebbero di un secondo ogni trenta miliardi di anni, un intervallo di tempo più che doppio rispetto all'età attuale del nostro universo. Ma a cosa servono orologi così precisi? Il loro scopo non è certamente quello di fornirci l'ora esatta. Sono strumenti di una sensibilità estrema, capaci di misurare le infinitesime differenze di potenziale gravitazionale che fanno accelerare o rallentare lo scorrere del tempo. Con strumenti così raffinati diventa possibile investigare fenomeni che nessuno è riuscito finora a misurare. Per esempio, può diventare realistico misurare la deformazione dello spaziotempo su scala microscopica, cioè testare la relatività generale nel mondo delle particelle subatomiche.

Nella storia della fisica, ogni volta che si è trovato un modo più preciso di misurare il tempo si sono fatte spesso scoperte fondamentali. Qualcuno pensa, per esempio, di provare a verificare se le costanti fondamentali della fisica sono veramente costanti nel tempo. Altri immaginano di sottoporre a stress i principi fondamentali dell'elettromagnetismo, della gravità e della meccanica quantistica. La sfida per riuscire a misurare intervalli di tempo sempre più minuscoli domina il mondo delle particelle elementari, stati della materia talmente effimeri da esibire vite medie che si consumano in infinitesime frazioni di secondo. Per molte di queste particelle si usa la dilatazione relativistica del tempo. Accelerate a velocità vicine a c , prima di decadere percorrono distanze misurabili, dalle quali si ricavano informazioni preziose sulla loro vita media. È quello che succede quotidianamente nel cuore dei moderni tracciatori di particelle cariche, che equipaggiano tutti gli esperimenti nei collisori di particelle e misurano agevolmente vite medie fino a 10^{-13} s (ovvero un decimo di picosecondo), cioè più breve di un millesimo di miliardesimo di secondo.

Ma quando si parla di particelle con vite medie di una decina di ordini di grandezza ancora più brevi, vale a dire comprese fra 10^{-22} e 10^{-25} s, nessun rivelatore riuscirebbe a distinguere il cammino che percorrono prima di decadere. Anche viaggiando alla velocità della luce percorrerebbero distanze comprese fra le dimensioni di un protone e quelle di un quark. Per studiare intervalli di tempo così infinitesimi si deve ricorrere a un metodo completamente diverso. È quello che ci ha permesso di misurare la vita media delle particelle più importanti del modello standard, i bosoni W e Z, il bosone di Higgs e il più



C.
Il Collider Detector del Fermilab (CDF, 1985-2011), dove nel 1995 è stato scoperto il quark top.

massiccio dei quark, il top. In questo caso ci viene in soccorso il principio di indeterminazione che, da limite invalicabile alla precisione, diventa uno strumento potente che ci permette di effettuare misure che parevano impossibili. Una forma di relazione di indeterminazione vale anche per tempo ed energia. Se vogliamo conoscere con alta precisione una delle due grandezze, dobbiamo accettare una grossa indeterminazione sull'altra. In questo caso ΔE , che possiamo vedere come incertezza sulla massa della

particella che decade, è inversamente proporzionale a Δt , che interpretiamo come la sua vita media. Misurando molte volte la massa della particella e determinando l'incertezza ΔE con cui la misuriamo, possiamo determinare la sua vita media. Anche se la vita media è molto piccola, praticamente non misurabile in altro modo, lo stesso principio che sembrava limitare le nostre capacità di conoscenza può essere invece usato per espanderle. La sfida a misurare intervalli di tempo sempre più minuscoli continua.

Biografia

Guido Tonelli, fisico del CERN, professore emerito dell'Università di Pisa e ricercatore associato dell'INFN, è uno dei principali protagonisti della scoperta del bosone di Higgs. Per il suo contributo alla scoperta ha ricevuto il Breakthrough Prize in Fundamental Physics, il Premio Enrico Fermi e la Medaglia d'onore del Presidente della Repubblica.

Tempus fugit

Metodi e strumenti storici per la misura del tempo

di Anna Maragno



a.
Il “calendario di Coligny”, tavola bronzea del II secolo d.C. Tra i più rilevanti documenti dell’epigrafia celtica, la lastra riporta, in caratteri latini, un calendario lunisolare di 62 mesi, riferibili a un arco temporale di 5 anni.

Da sempre l’uomo, pur percependo con chiarezza gli effetti dello scorrere del tempo, avverte la difficoltà di misurarlo. Nel corso della Storia, le unità di misura ideate per la suddivisione del tempo furono, essenzialmente, il mese, la settimana, il giorno, l’ora, i minuti e i secondi.

I primi tentativi di realizzare un calendario si basarono sui cicli lunari. Tuttavia, i “calendari lunari” (composti da mesi, settimane, giorni) non tenevano conto del ritorno periodico delle stagioni legato all’anno solare e producevano, così, uno scarto di ben 11 giorni all’anno. Diverse furono le soluzioni adottate dalle civiltà antiche per correggere le discrepanze tra anno solare e anno lunare. A questo scopo, Giulio Cesare introdusse a Roma il “calendario giuliano”, che prevedeva gli anni bisestili ma sovrastimava la durata dell’anno di circa 11 minuti. Tale ritardo finì per accumularsi sino a diventare pari a 10 giorni nell’anno 1582. Il problema fu drasticamente risolto

da papa Gregorio XIII con la cancellazione dei giorni dal 5 al 14 ottobre 1582 e l’introduzione del “calendario gregoriano”, che tutt’oggi utilizziamo.

La semplice alternanza tra luce e buio in cielo diede origine alla fondamentale suddivisione in dì e notte, ulteriormente ripartite in 12 parti ciascuno. In epoca medievale, la Chiesa adottò il sistema delle “ore canoniche”. A queste succedettero le “ore italiane”: 24 ore della stessa durata, contate a partire dal tramonto. Con le invasioni napoleoniche, si impose infine in Europa l’“ora alla francese” (o “ultramontana”). È quella dei nostri orologi, che segnano le 12 al mezzogiorno e le 24 alla mezzanotte. Per quanto riguarda la durata del giorno, oggi distinguiamo il “giorno siderale” dal “giorno solare medio”. Il giorno siderale (di 23 ore, 56 minuti e 4 secondi) corrisponde al tempo impiegato dalla Terra per tornare nella stessa posizione rispetto alle stelle più lontane (le “stelle fisse”) dopo una completa rotazione sul proprio asse. Il giorno



b.
A sinistra, raffigurazione dell'“orologio elefante” dall'opera *Compendio* di al-Jazarī (XII-XIII secolo).
A destra, un notturlabio tedesco del XVIII secolo.

solare medio (di 24 ore) si riferisce invece al tempo compreso tra due passaggi successivi del Sole alla sua massima altezza sull'orizzonte di un dato luogo.

La partizione sessagesimale delle ore in minuti e secondi risale alle civiltà mesopotamiche e seppero imporsi nella tradizione successiva. La durata di 1 secondo, che ai tempi della Rivoluzione francese fu stabilita come pari a $1/86.400$ del giorno solare medio, oggi corrisponde alla durata di 9.192.631.770 oscillazioni della radiazione emessa dall'atomo di cesio-133 (^{133}Cs) in specifiche condizioni (vd. p. 14, ndr). La storia delle unità di misura del tempo si intreccia con quella degli strumenti costruiti per determinarlo. Tra i più antichi e ancora in uso figura la “meridiana solare”, una semplice asta (detta “gnomone”) poggiata perpendicolarmente a una superficie (il “quadrante”), che riporta soltanto il mezzogiorno e sulla quale si proietta l'ombra dello gnomone. Più precisi sono gli “orologi solari”, nient'altro che meridiane i cui quadranti segnano anche le altre ore del dì. Naturalmente, tali dispositivi risultavano inutilizzabili durante la notte. Per ovviare al problema, gli Egizi crearono il “*merkhet*”, un regolo dotato di un filo a piombo e di un mirino. Osservando il transito di alcune stelle attraverso due *merkhet*, era possibile determinare l'ora. In epoche successive si diffuse il “notturlabio” (o “notturnale”), un dispositivo portatile che permetteva di calcolare l'ora basandosi sulla posizione di specifiche stelle rispetto alla Stella Polare. Fortuna ancora maggiore conobbe uno strumento

che non richiedeva né la luce del Sole, né l'osservazione delle stelle: la clessidra. Le diverse tipologie differiscono a seconda delle epoche e delle civiltà, ma sono tutte accomunate dallo scorrere di acqua o sabbia da un contenitore a un altro attraverso una piccola apertura. Come le clessidre, anche gli “orologi a incenso”, impiegati in epoca medievale nell'Estremo Oriente, misuravano il tempo senza far riferimento alla posizione del Sole o delle stelle. Il loro funzionamento si basava sulla velocità di combustione dell'incenso posto all'interno. E, a proposito di combustione, non dimentichiamo le “candele orarie” e gli “orologi a olio”. Entrambi, opportunamente graduati, segnavano le ore man mano che il livello della cera o dell'olio calava.

Oltre a misurare il tempo, alcuni strumenti erano concepiti anche per meravigliare, come nel caso degli “orologi ad acqua” e degli “orologi astronomici”.

Già in epoca romana si udivano le campanelle di complessi esemplari di orologi ad acqua, ma presso gli Arabi si ammirava l'impareggiabile fantasia dimostrata nella costruzione di speciali modelli ad acqua come l'“orologio elefante”. Dal basso Medioevo in poi, molte città si dotarono di orologi astronomici, spesso di dimensioni ragguardevoli e posti nelle piazze o nelle chiese. Non segnavano soltanto l'ora, ma anche le posizioni del Sole, della Luna, dei pianeti, delle principali costellazioni e, a volte, riportavano persino le eclissi e il calendario perpetuo. Nel frattempo, cresceva l'apprezzamento nei confronti di



c.
Un orologio a pendolo risalente al XIX secolo.

“orologi meccanici” che, a partire dal ‘300, si diffusero in tutta Europa. I primi prototipi erano azionati da ruote dentate mosse da un peso, a cui era collegato un sistema meccanico, lo “scappamento”, che consentiva all’energia prodotta dal peso di liberarsi (ossia “scappare”) gradualmente. Il peso fu presto sostituito da molle e fusi che assicuravano continuità al movimento degli ingranaggi, consentendo, nel contempo, di ridurre le dimensioni degli orologi, i quali divennero oggetti di pregio per le sale signorili. Nel ‘600, la precisione crebbe notevolmente con l’introduzione degli “orologi a pendolo”: in tali esemplari, il moto oscillante del pendolo, dovuto alla forza di gravità, era convertito in una rotazione regolare degli ingranaggi attraverso ruote di scappamento. Questa tipologia di orologi, però, non poteva essere utilizzata sulle navi, in quanto il rollio, la salsedine, gli sbalzi di temperatura e di pressione minavano completamente l’affidabilità dei meccanismi. Tuttavia, all’epoca delle grandi esplorazioni e dei

commerci su larga scala uno strumento per il computo dell’ora era di assoluta necessità per poter calcolare correttamente la longitudine del luogo rispetto al meridiano di riferimento ed evitare quindi di perdere rotta, equipaggio e merci preziose. Il cosiddetto “problema del meridiano” fu risolto con l’introduzione del bilanciere con molla a spirale, un sistema che consentiva agli orologi di funzionare correttamente in qualsiasi posizione, anche in movimento. Il primo cronometro marino prende il nome da John Harrison (1693-1776), un geniale orologiaio britannico che dedicò la vita alla realizzazione di cronometri sempre più precisi e compatti. Non solo sulle navi: ingranaggi sempre più maneggevoli permisero di progettare i primi “orologi da taschino”, in gran voga nel ‘800. Il loro successo fu superato soltanto da quello dell’“orologio da polso” (vd. p. 14, ndr), un accessorio oggi arricchito, grazie al progresso della tecnologia, di altre funzioni e dal quale non sappiamo separarci.

Biografia

Anna Maragno, laureata in fisica con una tesi vincitrice del Premio SISFA 2021, è dottoressa di ricerca in didattica e storia della fisica. È ora titolare di un assegno di ricerca in didattica e storia della fisica presso l’Università di Ferrara.

10.23801/asimmetrie.2026.40.2

[as] Come misurare il tempo

FENOMENO PERIODICO

OSCILLATORE



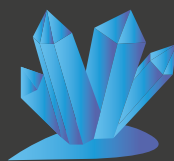
pendolo

orologio a pendolo
[secondo]



molla

orologio meccanico
[decimo di secondo]



oscillazioni in un
cristallo di quarzo
[da 10^{-4} s a 10^{-7} s]



oscillazione quantistica

oscillazioni atomiche
(cesio, rubidio,
stronzio, itterbio)
[tra 10^{-10} s e 10^{-15} s]



oscillazioni
nucleari (torio)
[sotto 10^{-16} s]

FENOMENO NON PERIODICO DOTATO DI UN TEMPO SCALA

FLUSSO DI MATERIA CONTROLLATO



clessidra
[minuti, decine
di minuti, ore]



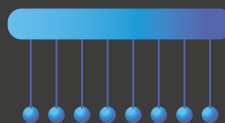
caduta

orologio ad acqua
[secondi,
decine di secondi]

REAZIONE CHIMICO-FISICA



candele orarie
[minuti, ore]



consumo

orologio a incenso, a olio
[minuti, ore]

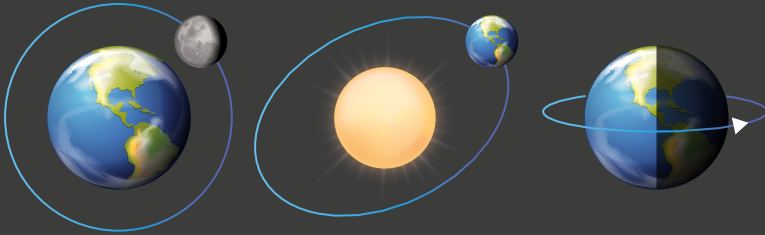
REAZIONI NUCLEARI



equilibrio stellare

età della stella
[miliardi di anni]

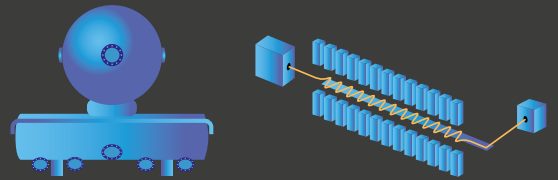
MOTI ORBITALI, MOTI ROTAZIONALI



orbita

rotazione sull'asse

CAMPI ELETTROMAGNETICI OSCILLANTI



interazione con la materia

Luna attorno alla Terra
[mese]

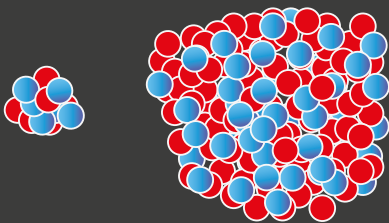
Terra attorno al Sole
[anno]

Terra
[giorno]

cavità a radiofrequenza
[da 10^6 s a 10^9 s]

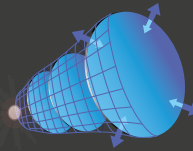
laser a elettroni liberi
[da 10^{-11} s a 10^{-19} s]

DECADIMENTI RADIOATTIVI



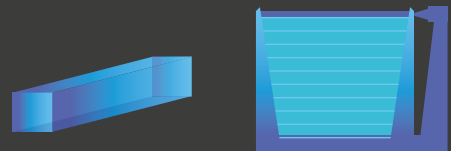
vita media del processo di decadimento

DINAMICA COSMOLOGICA



espansione dell'universo

RILEVATORI DI FISICA DI PARTICELLE



sensori

carbonio-14
[migliaia di anni]

uranio-238
[miliardi di anni]

costante di Hubble
[età dell'Universo,
dell'ordine di 10^{17} s]

cristalli scintillanti
[10^{-12} s]

camere a piastre
resistive multigap
[10^{-12} s]

Dammi solo un minuto

La misura moderna del tempo

di Salvatore Micalizio

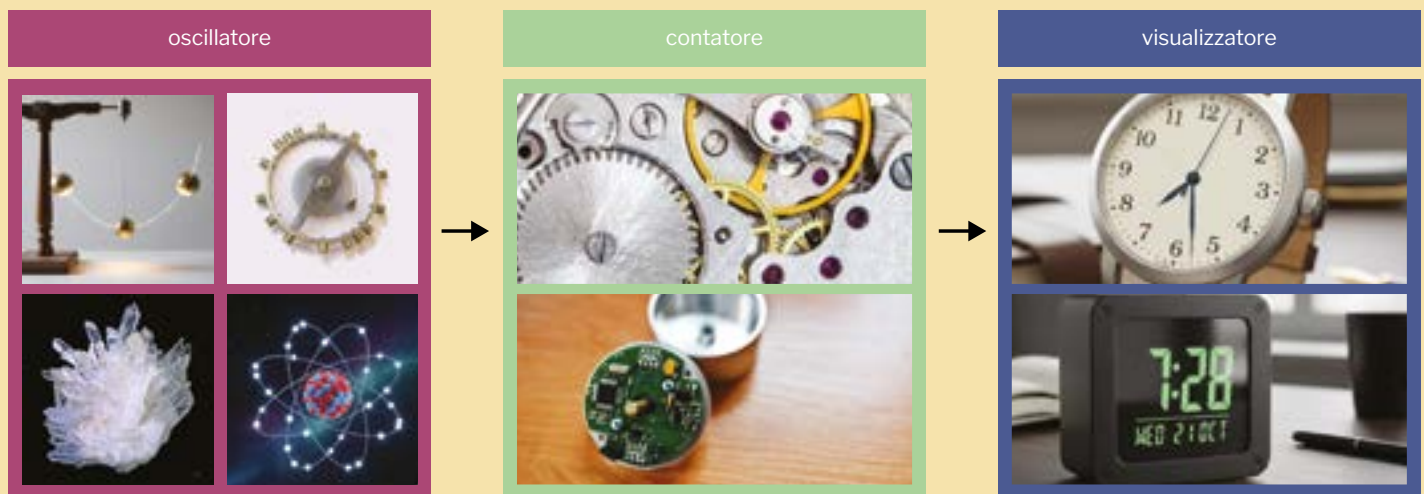
L'avanzare della conoscenza dei fenomeni fisici e della tecnologia ha portato alla nascita di meccanismi sempre più complessi per misurare una grandezza tanto elusiva quanto fondamentale come il tempo, basti pensare agli orologi meccanici. Più di recente, gli orologi al quarzo prima e quelli atomici poi hanno permesso di raggiungere livelli di accuratezza inimmaginabili. Ma quali caratteristiche deve possedere un orologio per essere considerato realmente preciso?

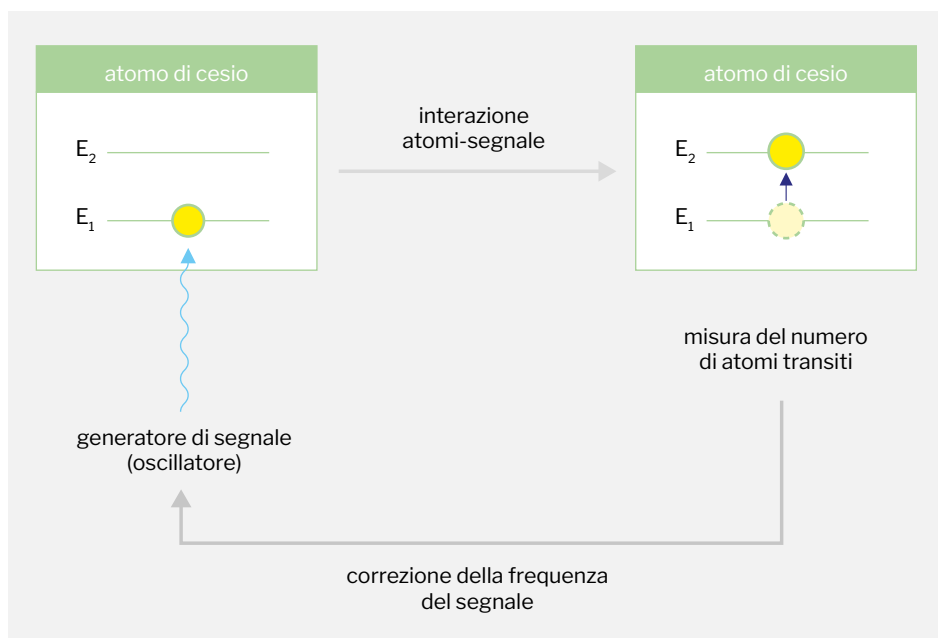
Innanzitutto, per costruire un orologio ad alte prestazioni, abbiamo bisogno di un fenomeno fisico periodico, che si ripete cioè con regolarità, e che fornisce il battito dell'orologio stesso; la durata di tale fenomeno, o un suo multiplo, può essere utilizzata come riferimento per definire l'unità di tempo. È necessario poi un dispositivo che conti queste oscillazioni e un sistema che mostri l'ora. Infine, tutte le parti dell'orologio devono essere alimentate da una sorgente di energia (vd. fig. a). Il moto di un pendolo o di un bilanciere, le vibrazioni di un cristallo di quarzo o le oscillazioni associate a transizioni atomiche possono essere assunti come

fenomeni periodici di riferimento. Una caratteristica importante è che tali oscillazioni siano stabili e poco influenzate dalle condizioni ambientali.

Per realizzare orologi precisi è fondamentale anche un'altra proprietà: la frequenza dell'oscillazione deve essere la più elevata possibile. Un'analogia con le misure di lunghezza ci può aiutare a capire perché. Supponiamo di voler misurare la lunghezza di un oggetto, come ad esempio un tavolo. La precisione della misura dipende dalla finezza della scala graduata del righello utilizzato. Un righello con tacche molto ravvicinate, ad esempio con risoluzione del millimetro, permette di determinare con maggiore accuratezza la lunghezza del tavolo rispetto a un righello che presenta una risoluzione limitata al centimetro. La stessa cosa vale per gli intervalli temporali: più è alta la frequenza del fenomeno che definisce l'intervallo di tempo di riferimento, maggiore sarà la precisione con cui determineremo la durata dell'intervallo stesso. Nel 1880 i fratelli Pierre e Jacques Curie dimostrarono l'"effetto piezoelettrico": una lamella di quarzo posta all'interno di un opportuno circuito elettrico risonante

a. Schema di principio di ogni orologio moderno. Il cuore dell'orologio è l'oscillatore che può essere un pendolo, ma anche un quarzo o un atomo. Il segnale generato dal risonatore è inviato a un sistema (meccanico o elettronico) che rivela e conta le oscillazioni del risonatore. Un visualizzatore (lancette o display) mostra poi l'ora.





b. Principio di funzionamento di un orologio atomico. Nello stato iniziale, l'elettrone dell'atomo (in giallo) si trova nel livello energetico a energia più bassa. L'elettrone interagisce con un segnale elettromagnetico di frequenza opportuna generato da un oscillatore locale (il quarzo, la cui frequenza è stata moltiplicata). L'elettrone effettua quindi la transizione al livello più energetico con una certa probabilità. Si sintonizza la frequenza del quarzo a quella dell'atomo massimizzando il numero di atomi transiti.

comincia a oscillare e tali oscillazioni sono estremamente regolari. La frequenza di oscillazione dipende da come è tagliata la lamella e varia da decine di kilohertz (decine di migliaia di oscillazioni al secondo) a decine di megahertz (decine di milioni di oscillazioni al secondo).

Negli orologi al quarzo commerciali che portiamo al polso, un circuito elettromeccanico converte a più bassa frequenza le rapide oscillazioni del quarzo, un po' come il cambio nell'automobile regola la velocità delle ruote rispetto al motore. In questo modo, la frequenza di oscillazione (circa 30 kHz) viene divisa fino a ottenere un valore utile per misurare il tempo: un'oscillazione al secondo. Il segnale di frequenza così generato aziona un motorino elettrico che muove le lancette o agisce sul display. La precisione dell'ora mostrata resta comunque legata al risonatore, cioè al quarzo.

I quarzi non sono solo impiegati negli orologi di tutti i giorni. Sono infatti un componente fondamentale per costruire orologi ancora più precisi: gli orologi atomici, che hanno frequenze di oscillazione ancora maggiori e il cui schema concettuale è mostrato in fig. b.

Gli atomi possiedono una struttura discreta dei livelli energetici. Per passare da un livello a un altro di energia maggiore, l'elettrone dell'atomo deve assorbire una radiazione elettromagnetica con una frequenza ben precisa. Questa frequenza è una proprietà della natura, dipendendo esclusivamente dall'atomo considerato: tutti gli atomi di uno stesso elemento condividono la stessa frequenza di risonanza che può quindi essere utilizzata come riferimento stabile e accurato.

Il segnale elettromagnetico di frequenza opportuna viene generato proprio a partire da un quarzo. Rispetto ai quarzi degli orologi da polso, il quarzo di un orologio atomico vibra a una frequenza molto più alta, 10 o 100 MHz, è isolato dall'ambiente

esterno ed è controllato in temperatura. In questo modo il quarzo fornisce agli atomi un segnale poco rumoroso, contribuendo alla precisione dell'orologio.

Le frequenze atomiche di interesse per gli orologi giacciono principalmente nella regione delle microonde, sono cioè dell'ordine dei GHz (gigahertz, miliardi di oscillazioni al secondo): la frequenza del cesio è per esempio circa 9 GHz. Per eccitare una transizione atomica con un segnale elettromagnetico, è necessario quindi un circuito elettronico che a partire dalla frequenza del quarzo arrivi ai GHz delle frequenze atomiche.

Il segnale sintetizzato in questo modo è inviato sugli atomi che hanno una certa probabilità di saltare al livello più energetico (il livello più in alto in fig. b). Si misura quindi il numero di atomi che ha cambiato stato energetico: in questo modo si ha un'indicazione di quanto la frequenza del segnale applicato sia vicina a quella della transizione atomica. Il segnale generato dal quarzo si sintonizza automaticamente in base alla risposta degli atomi: se la frequenza non coincide, un sistema di correzione la aggiusta finché non è perfettamente sincronizzata con la frequenza atomica. In questo modo, l'orologio mantiene un'elevatissima precisione.

Su questo principio funzionano diversi orologi atomici, tra cui la fontana atomica al cesio che è lo standard di frequenza che attualmente realizza la definizione del secondo con la miglior accuratezza (vd. fig. c): per accumulare un errore di un secondo la fontana deve funzionare per più di un milione di anni! La fontana atomica al cesio prende questo nome, perché il suo funzionamento ricorda quello di una fontana. Dopo una prima fase in cui gli atomi di cesio sono raffreddati mediante laser fino a temperature prossime allo zero assoluto, gli atomi vengono lanciati verso l'alto, dove rallentano, si fermano e ricadono sotto l'effetto della gravità. Da qui il nome



“fontana atomica”: gli atomi zampillano come in una fontana. Durante questo moto balistico, gli atomi attraversano due volte una cavità a microonde: una mentre salgono e una mentre scendono. In questo modo, la microonda induce la transizione tra due livelli energetici dello stato fondamentale. La misura della frequenza di questa transizione è estremamente precisa ed è alla base dell’attuale definizione del secondo nel Sistema Internazionale. Più di recente, la ricerca nel campo della metrologia del tempo si è indirizzata verso transizioni atomiche appartenenti al dominio

ottico, in altre parole il segnale di interrogazione è un laser. Elementi come lo stronzio (Sr) e l’itterbio (Yb) hanno frequenze di oscillazione milioni di volte più elevate delle microonde. Questi nuovi orologi atomici sbaglierebbero di appena un secondo nell’arco di miliardi di anni e sono quindi ottimi candidati per una possibile ridefinizione del secondo. Inoltre, orologi così precisi possono trovare applicazione in campi affascinanti come la geodesia relativistica, la fisica fondamentale e la navigazione satellitare del futuro.

c. La fontana atomica al cesio costruita presso i laboratori dell’INRIM. La fontana è lo standard di frequenza che realizza con la miglior accuratezza la definizione del secondo del Sistema Internazionale di misura (SI).

Biografia

Salvatore Micalizio è ricercatore presso la Divisione di Metrologia Quantistica e Nanotecnologie dell’INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica). Si occupa di campioni atomici di frequenza a microonda ed è responsabile di diversi progetti finanziati dall’ESA dedicati allo sviluppo di orologi atomici compatti per applicazioni spaziali.

C'era una volta

Come si determina l'età di stelle, galassie e dell'intero universo

di Antonaldo Diaferio



a. Illustrazione di Galileo Galilei (1564-1642), mentre mostra al Doge di Venezia il suo cannocchiale, il primo a essere utilizzato per osservazioni astronomiche, in piazza San Marco nell'agosto del 1609. Galileo, a destra del cannocchiale, venne a conoscenza del primo telescopio, o "tubo magico", inventato in Olanda nel 1608, e ne costruì uno suo nel 1609. Utilizzandolo scoprì numerose stelle invisibili a occhio nudo, le lune di Giove e montagne sulla Luna e pubblicò i suoi risultati nel *Sidereus Nuncius* (1610).

I moti periodici del Sole, della Luna e di tutta la sfera celeste hanno misurato lo scorrere del tempo per la maggior parte della civiltà umana, segnando le ore della giornata, il trascorrere dei mesi e degli anni. Tuttavia, nel passato, gli oggetti celesti non erano considerati assoggettati alla caducità propria del mondo terrestre. La maggior parte delle mitologie del mondo antico immaginava che tutti gli oggetti celesti fossero stati formati in un unico evento creativo e che fossero immutabili. Con l'apparizione di stelle *novae*, registrate nel mondo occidentale dal XVI secolo, e con le osservazioni del suolo lunare con valli e montagne a opera di Galileo all'inizio del '600, l'idea dell'immutabilità degli oggetti celesti cominciò a vacillare. La fine della dicotomia aristotelica tra cielo e terra e la spinta dell'Illuminismo prima e del Positivismo poi aprirono la strada al pensiero che gli oggetti celesti potessero nascere e morire.

Lo sviluppo delle scienze fisiche, la termodinamica e l'ottica *in primis*, con le prime osservazioni degli spettri stellari, ottenute facendo attraversare alla luce uno



b.

Nel 1896 A. H. Becquerel (1852-1908) scoprì accidentalmente che i sali di uranio impressionavano una lastra fotografica anche se non esposti alla luce del Sole. Il fenomeno divenne il progetto della tesi di dottorato di Marie Curie, che battezzò il fenomeno "radioattività". Utilizzando un elettrometro messo a punto dai fratelli Curie nel 1881, basato sull'effetto piezoelettrico da loro scoperto, Marie Curie scoprì che la radiazione emessa elettrizzava l'aria circostante e ipotizzò che la radiazione non fosse il risultato di qualche interazione ma venisse emessa spontaneamente dagli atomi di uranio: fu l'inizio della moderna fisica nucleare.

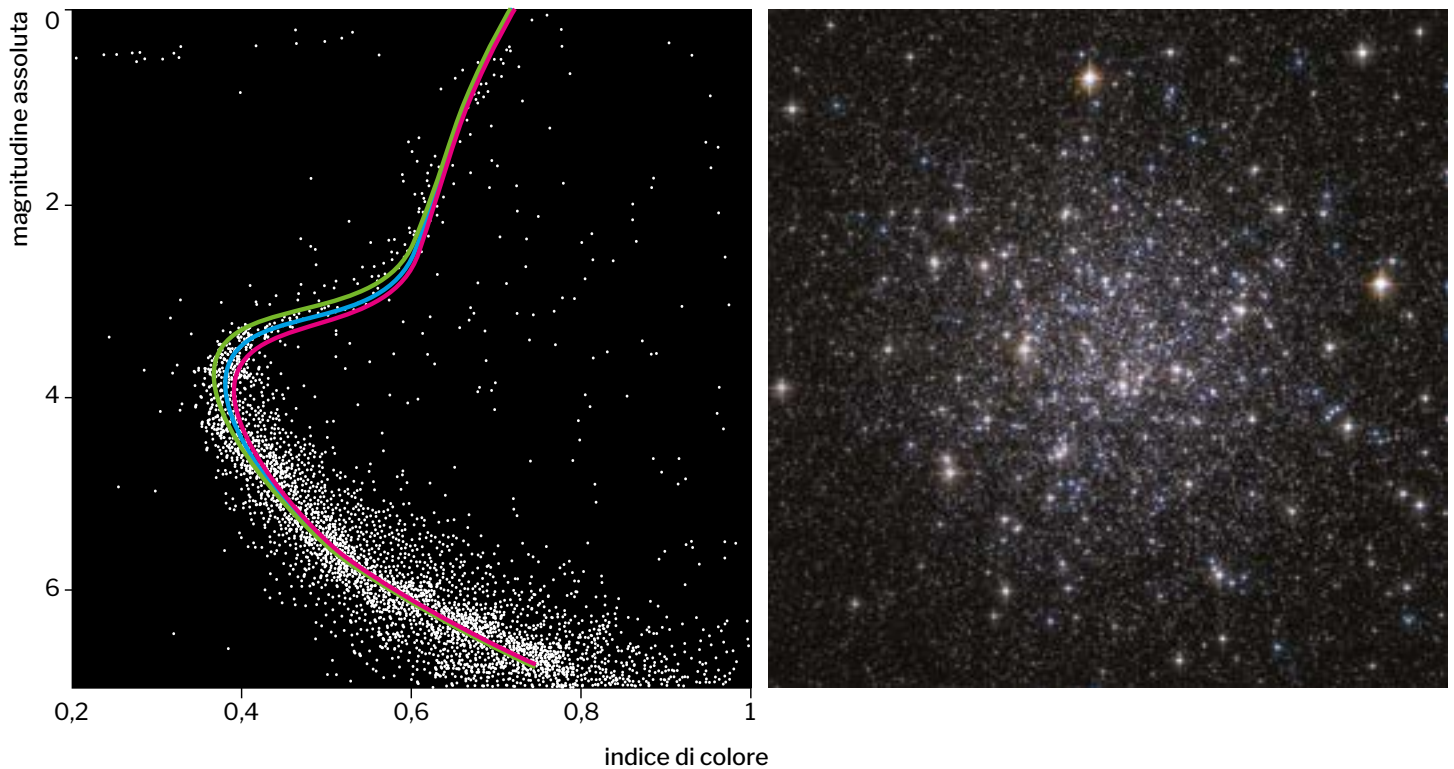
spettroscopio sufficientemente sensibile, dimostrò, oltre ogni ragionevole dubbio, che le stelle sono dei sistemi che obbediscono alle stesse leggi della fisica del mondo terrestre. Le stelle producono energia e quindi devono spegnersi quando ne esauriscono la fonte. È naturale dunque chiedersi quale sia la loro età.

Nel 1863 Lord Kelvin suggerì che il Sole, come le altre stelle, trasformasse la sua energia gravitazionale in radiazione elettromagnetica durante una lenta contrazione dovuta all'attrazione gravitazionale generata dalla propria massa. Il rapporto tra l'energia gravitazionale del Sole e la sua luminosità fornisce un'età del Sole dell'ordine di 100 milioni di anni: un tempo ben più lungo dei 6000 anni che, sembra, già san Barnaba nel I secolo d.C. assegnò all'età della Terra, una stima considerata affidabile fino al 1600. Nel '700 gli studiosi convinti della correttezza di questa stima cominciarono a diminuire. Nel 1778, la creatività di Georges-Louis Leclerc, primo conte di Buffon, suggerì una delle prime ipotesi di un meccanismo naturale per la formazione della Terra: la Terra avrebbe avuto origine dalla collisione tra una cometa e il Sole, generando una sfera infuocata che si sarebbe raffreddata in circa 75.000 anni.

Lo strumento per la stima dell'età della Terra arrivò sul finire del XIX secolo con la scoperta di Antoine Henri Becquerel di un fenomeno nuovo e inaspettato: la radioattività. Gli elementi radioattivi si trasformano in altri elementi chimici e la loro

abbondanza relativa varia con il passare del tempo. I rapporti di abbondanze degli elementi di una catena radioattiva, come per esempio gli isotopi dell'uranio e del piombo, sono quindi degli orologi naturali. Nel 1921, c'era un consenso diffuso tra i fisici e i geologi che l'età della Terra, basata sull'età delle sue rocce stimata con i rapporti isotopici, fosse di almeno 2 miliardi di anni, ben maggiore dell'età del Sole secondo Kelvin. In altre parole, il Sole doveva essere più vecchio e quindi avere una fonte di energia diversa da quella ipotizzata da Kelvin.

Due ingredienti suggerirono la soluzione: il primo era il fatto che la radioattività mostrava che un elemento chimico può trasformarsi in un altro elemento chimico, un fenomeno del tutto nuovo e sorprendente. Il secondo ingrediente era la possibilità di trasformare massa in energia, in accordo con la teoria della relatività ristretta di Albert Einstein del 1905. I due elementi chimici più leggeri, l'idrogeno e l'elio, hanno una massa in rapporto di 1 a 4. Tuttavia la somma della massa di 4 atomi di idrogeno è leggermente superiore alla massa dell'atomo di elio. Se il Sole fondesse idrogeno per formare elio, questa piccola differenza di massa potrebbe fornire al Sole l'energia necessaria per sopravvivere per miliardi di anni. Questa ipotesi fu avanzata per la prima volta da William Draper Harkins nel 1915, ripresa da Jean Perrin nel 1919 e ancora da Sir Arthur Eddington nel 1920. La formulazione della meccanica quantistica nel 1925, applicata a reazioni termonucleari da



c. Diagramma HR (a sinistra) dell'ammasso globulare M68 (a destra). In ascissa è riportata la temperatura utilizzando l'indice di colore. In ordinata è riportata la luminosità in termini di magnitudine assoluta. Gli ammassi globulari sono sistemi stellari contenenti alcune centinaia di migliaia di stelle in un volume di qualche parsec (pc) cubo (1 pc = 3,26 anni luce). La posizione delle stelle degli ammassi globulari nel diagramma HR si sovrappone a una curva, detta "isocrona", derivata per stelle di massa diversa ma con la stessa età. Il confronto tra le isocrone dei modelli di evoluzione stellare e il diagramma HR restituisce l'età degli ammassi. Nella figura sono mostrate tre isocrone: quella superiore corrisponde a una popolazione di stelle di 12 miliardi di anni, quella intermedia a una di 13 miliardi di anni e quella inferiore a una popolazione di 14 miliardi di anni. La figura suggerisce che M68 abbia un'età di circa 13 miliardi di anni. Si stima che gli ammassi globulari più vecchi della Via Lattea abbiano circa 14 miliardi di anni, con un'incertezza di circa 1 miliardo di anni.

Hans Bethe nel 1939, confermò queste intuizioni su basi oltremodo solide. Se le reazioni termonucleari sono la principale fonte di energia delle stelle, diventa naturale chiedersi quale sia l'evoluzione di una stella dalla sua nascita fino all'esaurimento del combustibile nucleare. Si crea pertanto un intreccio indissolubile tra lo studio dell'evoluzione stellare e la fisica nucleare e la termodinamica: oggi si stima che il Sole viva circa 10 miliardi di anni. Il tempo di vita di una stella diminuisce con l'aumentare della massa della stella, poiché l'efficienza di bruciamento del combustibile nucleare aumenta proporzionalmente alla massa. Per esempio, la vita di una stella di 4 masse solari dura circa un quinto di quella del Sole. I modelli di evoluzione stellare permettono di stabilire la traiettoria di una stella nel piano luminosità-temperatura superficiale, visualizzabile nel diagramma di Hertzsprung-Russell (HR) (vd. fig. c e anche in Asimmetrie n. 9 p. 12, ndr). Con ragionamento inverso, la posizione di una stella osservata oggi nel diagramma HR, nota la sua massa e la sua composizione chimica, permette di stabilire la sua età. Per esempio, si

stima che il Sole abbia un'età di 4,6 miliardi di anni, con un'incertezza di circa il 10%. Questa età è in accordo con l'età della Terra stimata oggi con i rapporti isotopici delle sue rocce. Concludiamo quindi che l'età del sistema solare sia di 4,6 miliardi di anni, come confermano anche le misure dei rapporti isotopici nei meteoriti.

Utilizzare la posizione delle stelle nel diagramma HR può essere usato per stimare l'età di un'intera popolazione di stelle nate nello stesso istante, ossia "coeve". Per sistemi stellari in cui le stelle non siano coeve, come le galassie, si può ragionevolmente ipotizzare che l'età sia confrontabile con l'età delle loro stelle più vecchie, almeno tra quelle osservate. Per esempio, l'età della Via Lattea dovrebbe essere simile all'età della sua stella più vecchia attualmente nota: HD 140283. Questa stella ha un'età stimata tra i 12 e 14 miliardi di anni, a seconda dei modelli evolutivi e della composizione chimica adottati. Questa età è sostanzialmente identica all'età degli ammassi globulari della Via Lattea, a ragionevole conferma che circa 13 miliardi di anni sia l'età della nostra galassia. L'età di circa 13,8 miliardi di anni



d.
Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840) enunciò il paradosso che prende il suo nome per la prima volta nel 1823. Medico di giorno e astronomo amatoriale durante la notte, si dedicò completamente all'astronomia dal 1822.

sembra essere anche l'età di tutto l'universo. La predizione di un universo dinamico di Alexandr Friedmann del 1922, basata sulla relatività generale, fu confermata dalla misura dell'espansione dell'universo a opera di George Lemaître nel 1927 e definitivamente da Edwin Hubble nel 1929. È naturale immaginare che l'origine dell'espansione coincida con la nascita del nostro universo osservabile.

Come per le stelle, che necessitano di un modello di evoluzione stellare per stimarne l'età, anche l'universo ha bisogno di un modello per descriverne l'espansione e risalire alla sua età. Il modello oggi più accreditato, il modello LCDM, è fornito dalla relatività generale nella forma del modello di Friedmann-Lemaître. Ora, il modello LCDM può descrivere le proprietà statistiche del fondo di radiazione a microonde (CMB), ossia lo spettro di potenza delle sue anisotropie, se poniamo la nascita dell'universo a 13,8 miliardi di anni fa. L'aspetto più suggestivo di questo risultato è che coincide, come anticipato, con l'età delle stelle più vecchie che osserviamo.

Il modello LCDM presenta tuttavia un numero non indifferente di discrepanze con le osservazioni, sia sulla scala delle galassie sia su grande scala. Per esempio, il tasso di espansione dell'universo, la costante di Hubble-Lemaître H_0 , stimato con misure di distanze di stelle variabili e supernovae è maggiore del valore richiesto dalle misure del CMB interpretate dal modello LCDM più di 6 volte l'incertezza della misura. È una discrepanza molto significativa che ha effetti sulla stima dell'età dell'universo, che è inversamente proporzionale a H_0 . Quale che sia l'età dell'universo osservabile, è pressoché certo che non sia infinita: è il buio della notte a fornircene la prova. Se l'universo fosse eterno, la luce generata da una stella, per quanto lontana, avrebbe avuto il tempo di raggiungerci e il cielo sarebbe luminoso anche di notte. L'incompatibilità tra il cielo buio e un universo di età infinita, un paradosso che Heinrich Olbers enunciò nel 1823 ma che fu messo a fuoco, presumibilmente per la prima volta, da Thomas Digges nella seconda metà del XVI secolo, è risolta solo assumendo che l'universo abbia un'età finita. Sorprendentemente, questa soluzione non fu suggerita da un fisico, ma nel 1848 da Edgar Allan Poe nel suo saggio "Eureka": l'intuito geniale non ha confini disciplinari!

Biografia

Antonaldo Diaferio è professore di astronomia e astrofisica presso l'Università di Torino. Ha lavorato allo Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics di Cambridge (MA, USA) e al Max-Planck-Institut für Astrophysik di Garching (Monaco), Germania. È socio dell'Accademia delle Scienze di Torino e presidente di Infini.to, Planetario di Torino e Museo dell'Astronomia e dello Spazio "Attilio Ferrari". Si occupa di cosmologia, teoria della gravitazione e struttura su grande scala dell'universo.

10.23801/asimmetrie.2026.40.4

Alla ricerca del tempo perduto

Decadimento radioattivo e datazione al carbonio-14

di Lucia Liccioli

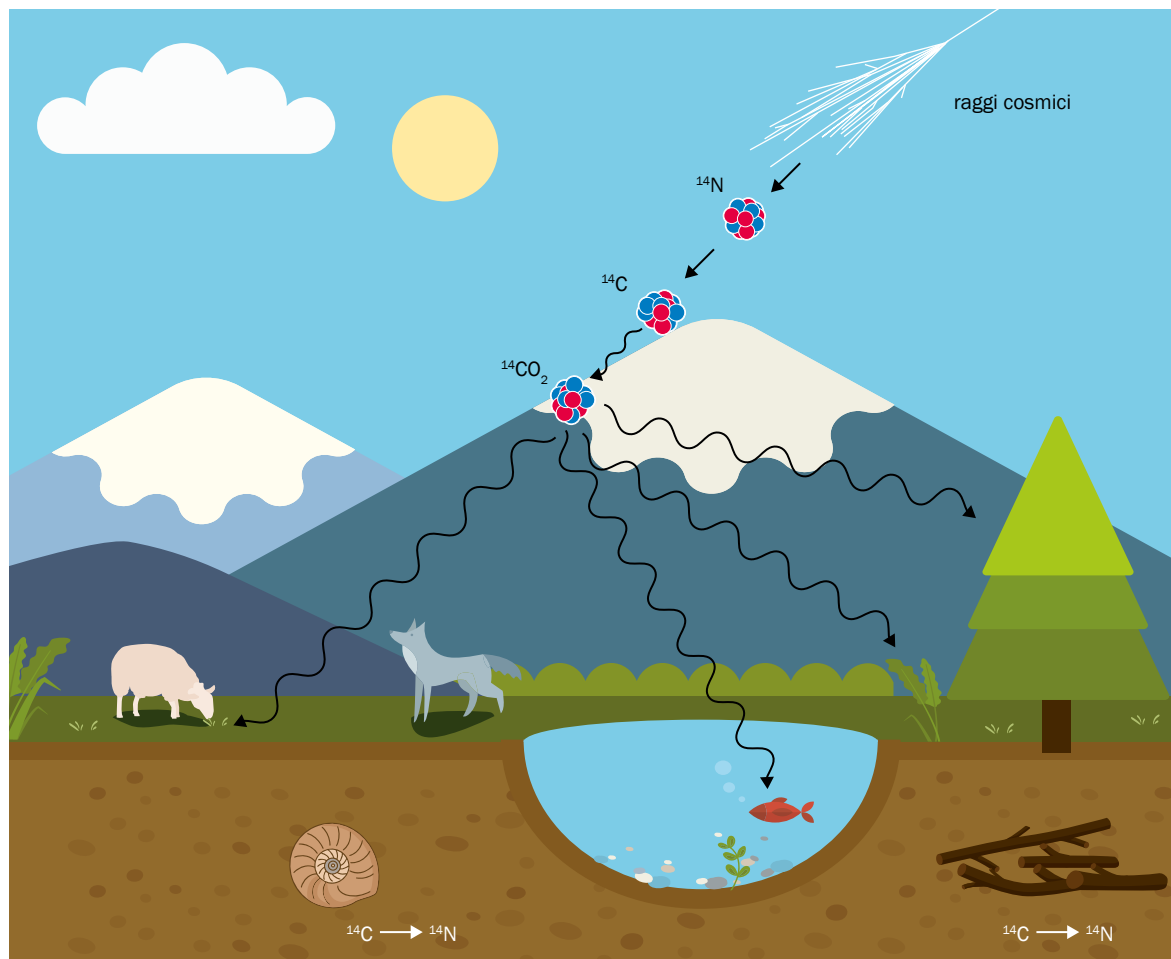


a.
Anelli di accrescimento in una porzione di tronco di quercia raccolto sul monte Amiata: ogni anello corrisponde a un anno in cui viene "registrata" la concentrazione di carbonio-14.

Per secoli la cronologia del passato umano è stata affidata esclusivamente all'attribuzione stilistica da parte degli storici dell'arte, alla stratigrafia elaborata dagli archeologi oppure a riferimenti incrociati con cronache e genealogie: strumenti tutto sommato fragili. Un valido supporto può essere rappresentato dalle discipline scientifiche, che, ormai da molti anni, si sono progressivamente integrate in ogni settore della società. In particolare, nel caso si voglia stimare l'età di un reperto di origine organica, uno dei metodi più utilizzati è quello della datazione con il carbonio-14 (^{14}C), un isotopo radioattivo del carbonio. Negli anni '40 del 1900, il chimico statunitense Willard Libby comprese che il carbonio-14 poteva essere sfruttato come un orologio naturale. È grazie a questa sua intuizione che possiamo datare, in modo scientifico, reperti di origine organica e non, una scoperta che ha rivoluzionato discipline come l'archeologia e la storia dell'arte, per la quale Libby venne insignito del premio Nobel per la chimica nel 1960. Il carbonio è presente in natura sotto forma di tre isotopi, due dei quali stabili, carbonio-12 (circa 98,9% di abbondanza isotopica) e carbonio-13 (circa 1,1%), mentre il terzo è un isotopo radioattivo, il carbonio-14. Il radiocarbonio si forma in alta atmosfera dall'interazione di neutroni, prodotti secondari dei raggi cosmici, con nuclei di azoto (vd. fig. b.). Dopo la formazione, il carbonio-14 si combina rapidamente con l'ossigeno formando l'anidride carbonica-14 ($^{14}\text{CO}_2$). L'anidride carbonica in atmosfera entra a far parte del ciclo del carbonio diffondendosi nel suolo, nei mari e nella biosfera, attraverso, in primo luogo, il processo di fotosintesi clorofilliana e poi attraverso la catena alimentare, in tutti gli esseri viventi. In natura si raggiunge una condizione di equilibrio fra la continua formazione di radiocarbonio e il suo decadimento, facendo sì che la concentrazione in atmosfera e in tutti gli organismi viventi si possa considerare costante. Al momento della morte di ogni organismo, lo scambio con l'ambiente esterno si interrompe. Se non esistono altri meccanismi di formazione o di assunzione del carbonio, si può quindi considerare l'organismo come un sistema chiuso: mentre il numero di atomi di carbonio-12 rimane costante, quello di carbonio-14 comincia a decadere, secondo la legge del decadimento radioattivo, emettendo un elettrone e una particella neutra (l'antineutrino), con un tempo di dimezzamento di 5700 anni.

Il tempo trascorso dalla morte di un organismo, determinato tramite la relazione tra concentrazione residua di radiocarbonio e decadimento temporale, è definito “età radiocarbonica convenzionale”. Tale valore viene calcolato assumendo due parametri standard: la concentrazione iniziale di carbonio-14 presente in atmosfera nel 1950, anno scelto come riferimento, e la cosiddetta “vita media di Libby”, pari a 8033 anni, calcolata da Libby assumendo come tempo di dimezzamento del radiocarbonio 5568 anni, un valore leggermente diverso da quello conosciuto oggi (5700 anni). L’età convenzionale di radiocarbonio si esprime tipicamente in “anni BP” (*before present*), considerando come “*present*” proprio il 1950. Tale età non corrisponde però all’età reale del campione, in quanto il calcolo si fonda su ipotesi, che risultano valide solo in prima approssimazione. Tuttavia, con opportune correzioni è possibile superare i limiti di queste assunzioni e ricavare, a partire dall’età convenzionale, una stima più accurata dell’età reale del campione datato attraverso una curva di calibrazione, riconosciuta dalla comunità internazionale. In linea di principio è quindi possibile datare tutti quei materiali che sono appartenuti a un organismo vivente come un animale (ossa, lana, pergamena, seta) o a un organismo vegetale (legno, carbone, semi, lino, cotone). In realtà, la datazione con

il radiocarbonio si può applicare anche a materiali inorganici artificiali, come la “biacca” (un pigmento bianco a base di carbonato di piombo) o alle malte antiche, materiali che “fanno presa” sfruttando l’anidride carbonica presente nell’aria. Nel caso delle malte, ad esempio, il componente inorganico databile al radiocarbonio è la calcite, che si forma dalla reazione dell’idrossido di calcio con l’anidride carbonica atmosferica (CO_2) durante la presa del materiale. Risulta quindi fondamentale la fase di preparazione dei campioni, in modo da garantire l’affidabilità delle misure. Prima dell’analisi, il materiale deve essere accuratamente pulito e trattato per eliminare eventuali contaminazioni, che possono essere di origine moderna o antica, come residui di carbonati, humus o materiali usati durante i restauri, che potrebbero alterare il contenuto di carbonio e quindi falsare l’età misurata. A seconda della natura del campione (legno, ossa, carbone, tessuti, ecc.), vengono applicati metodi specifici di pre-trattamento chimico e fisico, finalizzati a isolare la frazione di carbonio più rappresentativa del momento in cui il materiale ha cessato i suoi scambi con l’esterno. Le tecniche tipicamente impiegate per la misura del radiocarbonio sono due: la misura dell’attività radioattiva e il conteggio degli atomi di carbonio-14. Poiché la misura del radiocarbonio è comunque invasiva e distruttiva, è necessario



b. I raggi cosmici entrano in atmosfera e interagiscono con gli atomi, creando neutroni energetici. Quando un neutrone colpisce un atomo di azoto, questo si trasforma in carbonio-14 che, insieme all’ossigeno, crea anidride carbonica-14. Il carbonio-14 contenuto nell’anidride carbonica viene assorbito dagli alberi e dalle piante attraverso la fotosintesi e gli animali assumono il carbonio-14 mangiando le piante. Finché un organismo è vivo, la percentuale di carbonio-14 nel suo corpo resta pari a quello dell’atmosfera. Quando l’organismo muore, smette di assorbire nuovo carbonio-14 e quello presente inizia a decadere lentamente, trasformandosi di nuovo in azoto. Misurando quanto carbonio-14 è rimasto nei resti organici, si può calcolare quanto tempo è passato dalla morte e quindi determinarne l’età.



c. Sala sperimentale del LABEC (Laboratorio di Tecniche Nucleari per l'Ambiente e i Beni Culturali di INFN Firenze e UniFI), dove è installato un acceleratore elettrostatico da 3MeV con il quale vengono effettuate misure di spettrometria di massa con acceleratore (AMS) per la misura della concentrazione di carbonio-14.

che la massa da prelevare sia quanto più piccola possibile, trattandosi molto spesso di campioni provenienti dal campo dei beni culturali.

Il metodo del conteggio radioattivo, utilizzato già da Libby, si basa sulla misura delle particelle emesse nel decadimento. Misurando il numero di emissioni, si determina l'attività, ovvero il numero di decadimenti nell'unità di tempo. Gli svantaggi principali di questa tecnica sono legati alla bassa attività del carbonio-14: sono quindi necessari tempi di misura molto lunghi o, in alternativa, campioni di grossa massa per ottenere basse incertezze sperimentali. L'altra possibilità è quella di misurare direttamente il numero di atomi di radiocarbonio, discriminando questo isotopo dagli isotopi stabili del carbonio in base alla diversa massa.

Una tecnica che permette la discriminazione in massa degli atomi è la "spettrometria di massa". Il principio è quello di separare ioni con la stessa energia e lo stesso stato di carica a seconda delle diverse deflessioni subite in un campo magnetico in funzione della loro massa. Con la spettrometria di massa

tradizionale, la cui massima sensibilità è dell'ordine di una parte su 10^{10} , non è però possibile discriminare il carbonio-14 dalle interferenze isobariche che si presentano. In una misura di radiocarbonio le principali interferenze sono l'isotopo 14 dell'azoto (il più abbondante in atmosfera), e gli isobari molecolari, che si hanno quando il carbonio-13 si lega a un atomo di idrogeno (^{13}CH) o il carbonio-12 si lega a due atomi di idrogeno ($^{12}\text{CH}_2$).

Negli anni '70 del secolo scorso, fu messa a punto una tecnica di spettrometria di massa, chiamata "spettrometria di massa con acceleratore" (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), molto più sensibile di quella tradizionale, accoppiando filtri di tipo elettrostatico e magnetico all'uso di un acceleratore elettrostatico. Con questa tecnica si riescono ad abbassare i limiti di sensibilità fino a 10^{-15} . Ad oggi, è possibile datare reperti risalenti al massimo a circa 50.000 anni fa, perché il numero di atomi di carbonio-14 residui in campioni più antichi è troppo basso per essere rivelato con le attuali tecniche di misura.

Biografia

Lucia Liccioli è laureata in scienze per la conservazione e il restauro e ha conseguito un dottorato in chimica all'Università di Firenze. Lavora presso il laboratorio LABEC di Firenze, dove si occupa principalmente di preparazione dei campioni e della misura del carbonio-14 con tecnica di spettrometria di massa con acceleratore (AMS).

Ritmi frenetici

Le misure di tempo e la sincronizzazione nella fisica agli acceleratori

di David Alesini

Gli acceleratori di particelle sono stati e sono tuttora tra i più potenti strumenti di investigazione scientifica nell'ambito della ricerca in fisica fondamentale e fisica applicata e trovano oggi giorno applicazione nei più svariati campi della medicina, sicurezza, tomografia e trattamento di materiali. Sono macchine elettromagnetiche estremamente complesse, che consentono di accelerare particelle di vario tipo (elettroni, protoni, ioni) portandole a energie elevatissime (fino ai TeV) e velocità prossime a quella della luce. Le richieste in termini di sincronizzazione dei vari dispositivi acceleranti e la loro stabilità sono stati oggetto di decenni di ricerca e sviluppo e rappresentano oggi la frontiera in questo campo tecnologico. Per comprendere quali sono tali richieste è importante capire in che modo vengono accelerate le particelle. Il processo di accelerazione può avvenire seguendo una traiettoria lineare

(quello che accade in un cosiddetto LINAC), in cui le particelle passano una sola volta attraverso i dispositivi acceleranti, oppure seguendo traiettorie circolari, in cui le particelle passano milioni di volte al secondo attraverso gli stessi dispositivi di accelerazione, guadagnando progressivamente energia. Nella prima tipologia rientrano, ad esempio, i LINAC di elettroni utilizzati nei FEL (*Free Electron Laser*), che consentono la generazione di impulsi laser nei raggi X molto intensi e ultracorti, fino alla scala dei femtosecondi (cioè impulsi di un milionesimo di miliardesimo di secondo, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), rendendo possibili analisi molecolari che fino a pochi decenni fa erano considerate inimmaginabili. Tra gli acceleratori circolari citiamo i collisori, nei quali due fasci di particelle circolano in direzioni opposte all'interno di due anelli e, collidendo in un punto, consentono ad esempio di ricreare



a.
Il Large Hadron Collider (LHC), il più grande e potente acceleratore di particelle al mondo, situato al CERN vicino a Ginevra. LHC fa collidere protoni (e nuclei pesanti) circolanti in due anelli di 27 km a energie fino a 14 TeV, ricreando condizioni simili a quelle dell'universo primordiale, per studiare le particelle fondamentali e le leggi della fisica. Grazie a questa straordinaria macchina si è scoperto il bosone di Higgs.

densità di energia paragonabili a quelle dei primi istanti di vita dell'universo. È stato proprio grazie a tali macchine, come il Large Hadron Collider (LHC), che è stato possibile scoprire il bosone di Higgs.

In entrambi i casi i pacchetti di particelle sono accelerati con l'utilizzo di strutture metalliche in rame o superconduttive, chiamate cavità a radiofrequenza (RF), all'interno delle quali è confinato un campo elettrico oscillante, sincronizzato con il passaggio delle particelle, che fornisce energia a ogni passaggio. Tali campi hanno tipicamente frequenze che vanno dalle decine di MHz ai GHz, ovvero compiono dalle decine di milioni a vari miliardi di oscillazioni in un secondo.

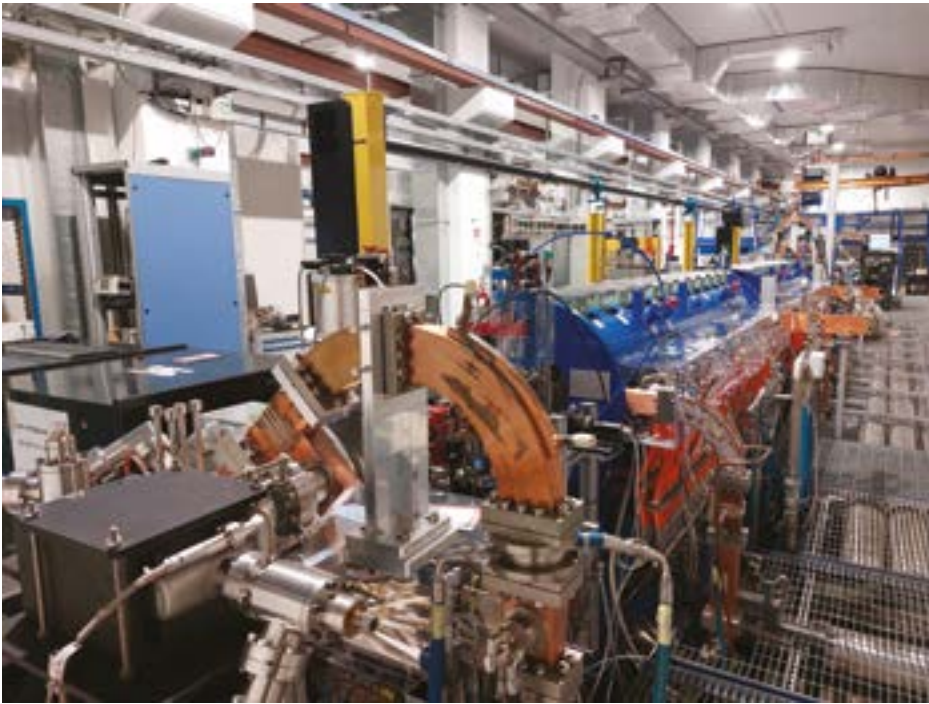
Le esigenze di sincronizzazione e stabilità dei vari dispositivi acceleranti nascono proprio da questa modalità di accelerazione. Poiché, infatti, la singola oscillazione del campo elettrico ha un periodo che può arrivare al di sotto del miliardesimo di secondo (nanosecondo, $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$), tutti i vari sistemi acceleranti devono essere tra loro sincronizzati e stabili con precisione ben al di sotto di questo periodo di radiofrequenza, in modo da mantenere il fascio di particelle sempre "in fase" con il campo accelerante, garantendo stabilità di energia. Immaginando di suddividere il periodo di radiofrequenza in 360 gradi si parla di "stabilità di fase" e questa deve essere ben al di sotto del grado.

I diversi tipi di acceleratori (lineari, circolari, collisori, macchine di luce di sincrotrone) hanno, tuttavia, esigenze di stabilità differenti. Nei LINAC impiegati nei FEL, ad esempio, il fascio di elettroni arriva all'energia finale in centinaia di metri attraversando decine o centinaia di dispositivi acceleranti, alimentati da altrettante sorgenti a radiofrequenza che

operano tipicamente a qualche GHz. Tutte queste sorgenti devono, pertanto, essere sincronizzate e stabili con precisione ben al di sotto del picosecondo ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). Non solo. Per poter aumentare la corrente di picco del singolo pacchetto di particelle, necessaria per l'operazione del FEL stesso, si utilizzano sistemi di compressione longitudinale realizzati con opportuna manipolazione della distribuzione di energia all'interno del pacchetto stesso. Questa è ottenuta attraverso i campi acceleranti che devono avere stabilità di sincronizzazione al livello di poche decine di femtosecondi. Nei collisori, invece, in cui i due fasci di particelle circolano in direzioni opposte, in due anelli, e collidono in un punto centinaia di milioni di volte al secondo, la sincronizzazione delle cavità acceleranti dei due anelli è direttamente collegata alle oscillazioni in energia del singolo pacchetto e alla stabilità dei fasci collidenti nel punto di interazione. Una variazione del punto di collisione può infatti portare non solo a una perdita di efficienza (ovvero di "luminosità"), ma anche a instabilità del fascio di particelle e a un aumento dei segnali di fondo nei rivelatori. Le radiofrequenze dei due anelli non devono pertanto essere solo perfettamente "agganciate" tra di loro per evitare che i pacchetti collidenti scivolino progressivamente, giro per giro, andando fuori collisione, ma devono avere sincronizzazione e stabilità ben al di sotto della frazione di grado, che tradotto in tempo nel caso di LHC, con cavità che operano a ca. 400 MHz, significa poche decine di picosecondi. Negli acceleratori di particelle, le esigenze di sincronizzazione non si fermano soltanto alle strutture acceleranti ma anche alla sincronizzazione tra acceleratore e utenti. Nel caso di un collisore, ad esempio, un sistema di "trigger hardware" (detto

prefisso	simbolo	fattore moltiplicativo	potenza di 10
yotta	Y	1 000 000 000 000 000 000 000 000	+24
zetta	Z	1 000 000 000 000 000 000 000	+21
exa	E	1 000 000 000 000 000 000	+18
peta	P	1 000 000 000 000 000	+15
tera	T	1 000 000 000 000	+12
giga	G	1 000 000 000	+9
mega	M	1 000 000	+6
chilo	k	1 000	+3
etto	h	100	+2
deca	da	10	+1
	u	1	0
deci	d	0,1	-1
centi	c	0,01	-2
milli	m	0,001	-3
micro	μ	0,000 001	-6
nano	n	0,000 000 001	-9
pico	p	0,000 000 000 001	-12
femto	f	0,000 000 000 000 001	-15
atto	a	0,000 000 000 000 000 001	-18
zepto	z	0,000 000 000 000 000 000 001	-21
yocto	y	0,000 000 000 000 000 000 000 001	-24

b. La clessidra dei prefissi.



c.

L'acceleratore lineare di elettroni SPARC, in operazione presso i Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell'INFN. Questa straordinaria macchina consente di generare pacchetti di particelle di altissima qualità, in termini di distribuzione energetica e densità, permettendo esperimenti pionieristici di accelerazione al plasma e di generazione di radiazione coerente (*Free Electron Laser*).

trigger di primo livello) seleziona in tempo reale se una collisione ha prodotto eventi interessanti o meno, riducendo la frequenza delle collisioni effettivamente “registrate” di un fattore circa 1000. Al fine di ricostruire il corretto istante in cui è avvenuta una collisione da “salvare”, questo sistema deve pertanto essere sincronizzato con l'acceleratore al meglio di frazioni del tempo di attraversamento tra i pacchetti collidenti. Nel caso di LHC parliamo ad esempio di meno di 100 picosecondi. Analogamente negli esperimenti di dinamica molecolare (*pump-probe*) con luce di sincrotrone o FEL, impulsi laser esterni (*pump*) eccitano un campione che poi è analizzato dall'impulso di raggi X (*probe*) emesso dall'acceleratore. La sincronizzazione reciproca in questi casi si deve spingere fino a qualche decina di femtosecondi.

Tutti questi livelli di sincronizzazione si basano su un sistema concettualmente semplice ma tecnicamente critico. Tutto parte da un oscillatore centrale (*master*

oscillator) ultra-stabile, che oscilla a una frequenza che può variare dalle decine alle centinaia di MHz e che rappresenta il riferimento assoluto del tempo di tutta la macchina e relativi esperimenti. Questo orologio (*clock*) è quindi distribuito attraverso cavi o fibre ottiche stabilizzate che non introducono rumore o sfasamenti ai vari sistemi, che quindi si agganciano, si sincronizzano a questo riferimento con, ad esempio, quelli che chiamiamo sistemi elettronici ad aggancio di fase (PLL).

La sincronizzazione negli acceleratori di particelle rappresenta oggi una delle sfide tecnologiche più sofisticate e decisive: dalla precisione dei campi a radiofrequenza fino al perfetto allineamento temporale con esperimenti esterni. La capacità di controllare il tempo con accuratezza estrema, fino a pochi femtosecondi, è ciò che permette a queste macchine straordinarie di spingersi sempre oltre, aprendo nuove frontiere nella ricerca scientifica e nelle sue applicazioni.

Biografia

David Alesini lavora da oltre 25 anni nell'ambito degli acceleratori di particelle presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN ed è attualmente coordinatore del Comitato Nazionale INFN-Acceleratori.

Tempi moderni

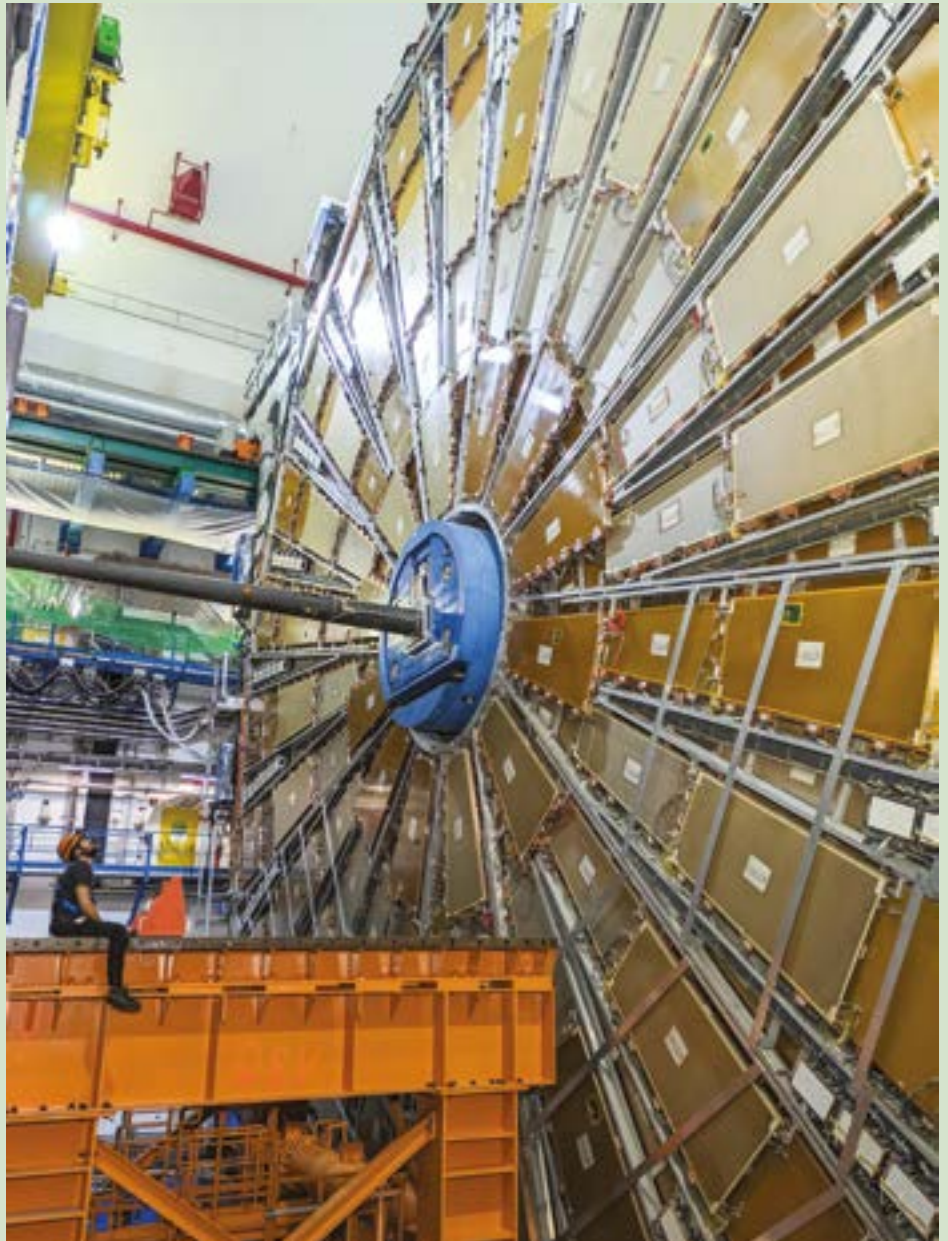
Pico- e nanosecondi negli esperimenti di fisica delle particelle

di Martina Malberti

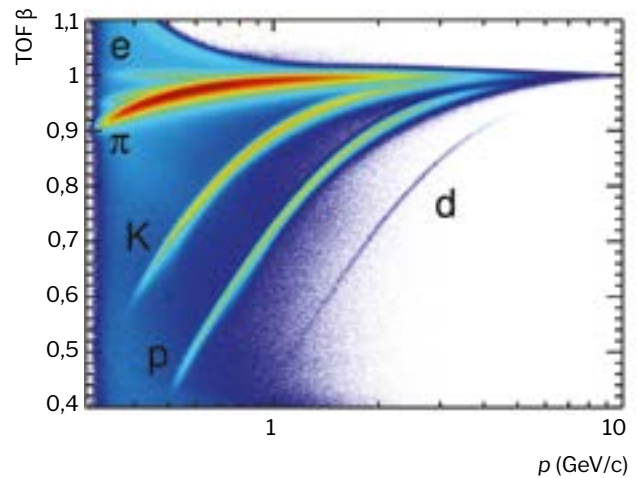
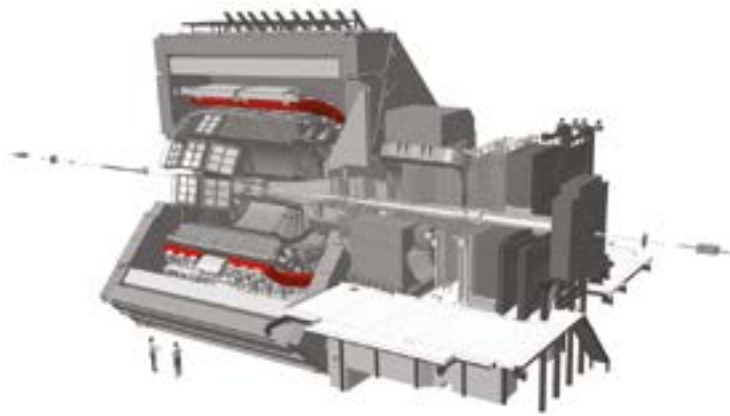
Negli esperimenti agli acceleratori, il tempo viene misurato in unità ben più piccole e quasi inconcepibili per la nostra esperienza, in nanosecondi (miliardesimi di secondo) o persino in picosecondi (millesimi di miliardesimi di secondo). Si pensi che un battito di ciglia ha una durata tra 0,1 e 0,4 secondi, mentre un nanosecondo è 100 milioni di volte più breve e un picosecondo 100 miliardi di volte più breve.

Ma a cosa serve misurare intervalli di tempo così piccoli? Negli acceleratori, come LHC, le particelle viaggiano a velocità prossime a quella della luce e le loro collisioni producono fenomeni che durano tempi estremamente ridotti. Per dare un'idea, il tempo necessario per percorrere la distanza di 1 m (una scala di grandezza confrontabile con le dimensioni dei rivelatori) viaggiando alla velocità della luce è circa 3,3 ns. Se vogliamo misurare intervalli di quest'ordine di grandezza dobbiamo disporre di strumenti più precisi del nanosecondo.

Una delle più comuni applicazioni di misure di tempo precise in esperimenti di fisica delle particelle è la loro identificazione tramite la misura del "tempo di volo" (*time-of-flight*, TOF). Questa tecnica è basata sulla misura del tempo che la particella impiega a percorrere una determinata distanza tra due punti, ad esempio tra il punto di interazione (dove è avvenuta la collisione) e il rivelatore. Conoscendo la lunghezza del cammino e il tempo impiegato, è possibile ricavare la velocità della particella. Combinando questa informazione con la misura del momento ottenuta da altri sottorivelatori come i tracciatori, si può determinare la sua massa e quindi la sua identità.



a. Particolare del rivelatore ATLAS, uno dei grandi esperimenti al Large Hadron Collider del Cern di Ginevra.



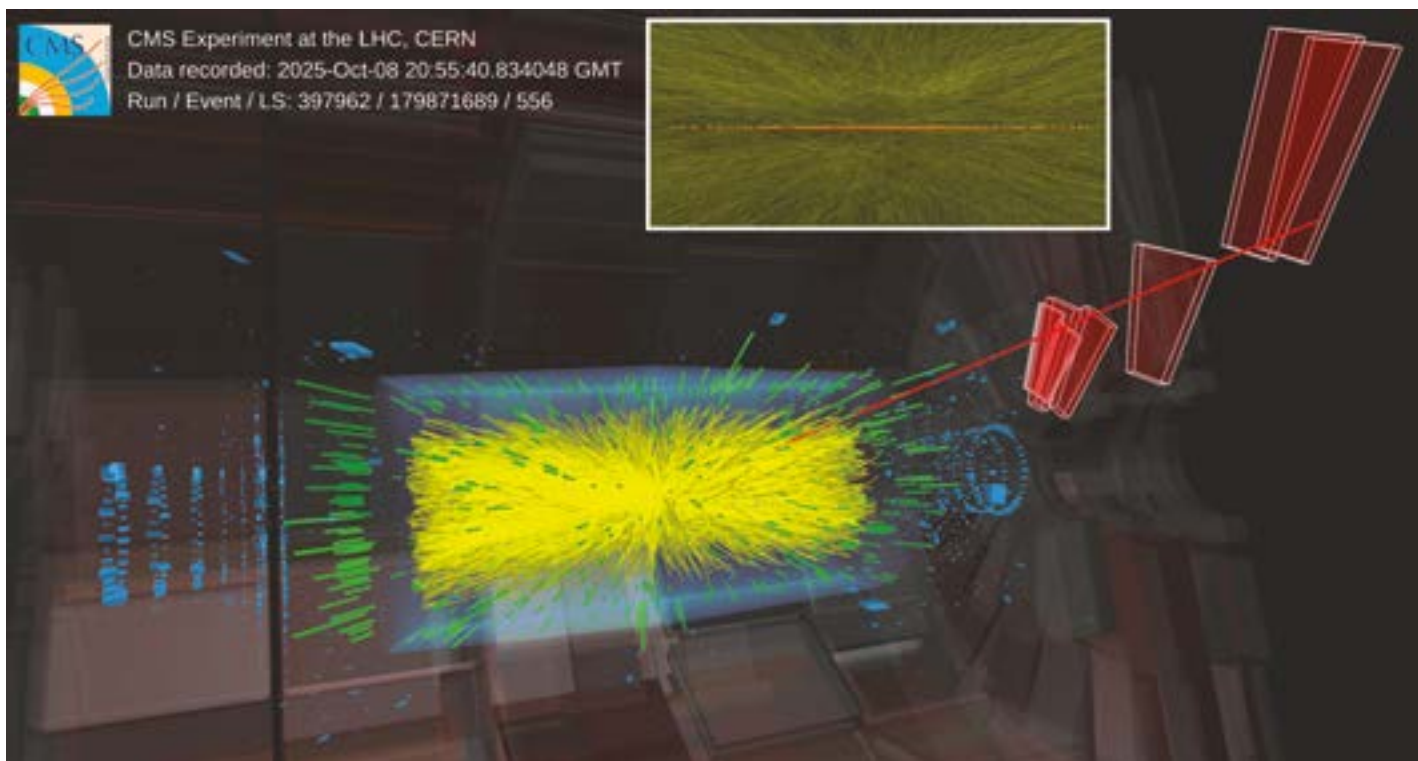
Ad esempio, un pione (di massa ca. $140 \text{ MeV}/c^2$) con un momento di $1 \text{ GeV}/c$ impiega $3,37 \text{ ns}$ a percorrere 1 m , un kaone (di massa ca. $496 \text{ MeV}/c^2$) dello stesso momento impiega $3,72 \text{ ns}$, un protone (di massa ca. $938 \text{ MeV}/c^2$) invece $4,57 \text{ ns}$.

Le differenze dei tempi di volo sono alcune centinaia di picosecondi: con uno strumento di misura con precisione dell'ordine dei 100 picosecondi saremo in grado di distinguere tra le specie. Uno degli esempi più avanzati di rivelatori di tempo di volo attualmente in uso in un esperimento a collisori è il sistema TOF dell'esperimento ALICE al CERN (vd. fig. b), che utilizza una particolare tecnologia di rivelatori a gas chiamata Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC), appositamente sviluppata per ottenere risoluzioni temporali molto elevate in grandi aree (ca. 60 ps per una superficie di circa 150 m^2). Il TOF di ALICE permette di identificare particelle fino a momenti di alcuni GeV/c , fondamentale per studiare il plasma di quark e gluoni prodotto nelle collisioni di ioni pesanti.

Ma l'identificazione di particelle non è l'unica applicazione. Negli ultimi anni, la spinta verso futuri collisori ad alta luminosità, come l'High-Luminosity LHC (HL-LHC), ha portato a una rinnovata attenzione verso sistemi capaci di misure di tempi con estrema precisione. Ad ogni scontro dei fasci di protoni, infatti, non si ha una sola collisione, ma se ne producono molte, addirittura centinaia al HL-LHC, e

quasi simultanee. Questo fenomeno è detto "*pileup*". La densità di interazioni degli eventi perché le tracce e depositi energetici prodotti nelle collisioni risultano sovrapposti (vd. fig. c). Se vogliamo studiare con precisione un singolo evento raro, dobbiamo quindi riuscire a separarlo dalla confusione degli altri. Come entra in gioco una misura molto precisa del tempo di arrivo di ciascuna particella per aiutarci a capire da quale collisione ha avuto origine? Le collisioni in realtà non avvengono tutte esattamente nella stessa posizione e stesso istante, ma si distribuiscono per alcuni centimetri lungo la direzione dei fasci e su un intervallo di ca. 200 picosecondi nel tempo. Ecco che allora se il tempo di arrivo di ogni particella prodotta nelle collisioni viene misurato con una precisione di qualche decina di picosecondi, è possibile associarla al corretto vertice di interazione e a eventi che nello spazio sembrano coincidenti e si rivelano dunque separati nel tempo. Una misura precisa di tempo non serve solo a "fare ordine" tra collisioni caotiche, ma può anche diventare strumento per la ricerca di fenomeni di nuova fisica. Alcuni modelli teorici oltre il modello standard prevedono infatti la produzione di nuove particelle a lunga vita media (nanosecondi, microsecondi o più), che decadono a distanze macroscopiche dal punto di collisione. Rivelatori di tempo molto precisi aiutano a distinguere un segnale "in ritardo" da quello prodotto da particelle ordinarie.

b.
Il rivelatore TOF (in rosso) dell'esperimento ALICE. A destra, il grafico rappresenta la velocità $\beta=v/c$, misurata tramite la tecnica del tempo di volo, in funzione del momento p per diverse specie di particelle.



Al CERN entrambi i grandi esperimenti ATLAS e CMS stanno installando per la fase di HL-LHC dei nuovi sottorivelatori dedicati alla misura precisa del tempo di arrivo di particelle cariche. Le tecnologie di sensori adottate sono diverse, ma tutte hanno l'obiettivo di fornire misure di tempo con precisioni di 30-40 picosecondi: nella parte più centrale del MIP Timing Detector dell'esperimento CMS si utilizzeranno cristalli scintillanti di ossiortosilicato di lutezio e ittrio (LYSO) accoppiati a fotomoltiplicatori al silicio; le regioni vicine ai fasci di protoni, che sono quelle più soggette alle radiazioni, saranno invece equipaggiate con sensori al silicio veloci, che offrono la possibilità di moltiplicare il segnale, i cosiddetti Low Gain Avalanche Diodes. Non bastano però solo sensori veloci e precisi: servono anche una catena elettronica di lettura straordinariamente rapida e una sincronizzazione impeccabile. A tale scopo, gli esperimenti usano

un riferimento temporale chiamato *clock*, un segnale regolare comune senza il quale sarebbe impossibile correlare segnali provenienti dalle diverse componenti dei rivelatori e quindi attribuirli o meno allo stesso evento fisico. Il *clock* di LHC ha una frequenza di 40 MHz, corrispondente a 25 nanosecondi. È fondamentale che il segnale del *clock* sia stabile e preciso, ovvero che eventuali piccole fluttuazioni o distorsioni (il cosiddetto "jitter", vd. p. 30) siano ridotte al minimo. Tecnologie avanzate, come il White Rabbit Project, hanno reso possibile distribuire segnali di *clock* agli esperimenti con la precisione di picosecondi. Misurare tempi con precisione estrema in fisica delle particelle è dunque una sfida tecnologica straordinaria che apre nuove opportunità per approfondire la comprensione delle interazioni fondamentali della natura.

c. Un evento osservato nel rivelatore CMS durante un test ad alto numero di eventi concomitanti (*pileup*) effettuato l'8 ottobre 2025. L'insero mostra una vista ingrandita dei 206 vertici di interazione ricostruiti (punti arancioni) e più di 9000 tracce ricostruite (linee gialle).

Biografia

Martina Malberti è ricercatrice dell'INFN presso la sezione di Milano Bicocca. Dal 2004 partecipa all'esperimento Compact Muon Solenoid (CMS) al CERN. Negli ultimi anni si è occupata dello sviluppo del MIP Timing Detector per l'*upgrade* di CMS.

Sinfonia di particelle

Jitter e femtosecondi

di Alessandro Cianchi



a.
Un'orchestra è un modello di sincronizzazione. Il direttore è il *master clock* che allinea in tempo i vari strumenti. Anche in un acceleratore di particelle i vari dispositivi devono lavorare sincronizzati.

Immaginate un'orchestra. Una sinfonia è il risultato di tanti strumenti, ognuno dei quali segue la propria partitura, con un tempo ben definito. Quando il direttore fa un segno, attaccano le percussioni, a un altro gesto sono i fiati a essere coinvolti. Il risultato è piacevole grazie alla perfetta temporizzazione degli orchestrali.

In un acceleratore di particelle avviene lo stesso: ci sono tanti dispositivi e il risultato ci soddisfa solo se tutti sono sincronizzati per operare a un certo tempo. Non solo. Poiché tanti sono i pacchetti di particelle da accelerare, la ripetizione precisa della stessa partitura è fondamentale. Altrimenti ognuno fa storia a sé.

Il *jitter* è la fluttuazione temporale dell'evento che si discosta dal tempo aspettato. Mentre per un'orchestra siamo a livello di decine o centinaia di millisecondi, i nuovi acceleratori hanno delle richieste molto più stringenti, parliamo di femtosecondi. Vediamo innanzitutto di capire perché questa necessità.

Partiamo da un acceleratore del presente, con molto futuro, l'"acceleratore al plasma". Nelle macchine convenzionali le particelle sono accelerate tramite un'onda elettromagnetica a radiofrequenza. Con questa tecnologia si possono raggiungere

dei campi elettrici al massimo di circa cento milioni di volt in un metro, in banda X (circa 12 GHz) e solo in alcuni prototipi. Nell'accelerazione al plasma, si sfrutta il campo elettrico generato dalla separazione di carica, che viene prodotta in un plasma neutro. Ciò permette di ottenere dei campi di diversi ordini di grandezza superiori, diminuendo così proporzionalmente la lunghezza della macchina.

Per farlo serve un cosiddetto "*driver*": può essere un pacchetto di particelle cariche oppure un laser di alta potenza, dell'ordine di 10^{18} W/cm². Le particelle cariche, elettroni di solito, repellono gli altri elettroni del plasma, mentre gli ioni, molto più pesanti, rimangono nella loro posizione. Si forma una zona in cui sono presenti molte più cariche positive che negative. Nel caso del laser è la forza "ponderomotrice" della radiazione a separare le cariche, generando il campo elettrico che utilizziamo per accelerare il fascio, che chiamiamo "*witness*" e che arriva dopo il *driver*.

Il tempo che intercorre tra il *driver* e il *witness* è nell'ordine del picosecondo, ma siccome la perturbazione del plasma non è costante nel tempo, il *jitter* che si può tollerare tra il *driver* e il *witness* è dell'ordine della decina dei femtosecondi. Se fosse



b.
Lo European XFEL di DESY (Amburgo). Le macchine che pilotano queste sorgenti di luce hanno dei requisiti molto stringenti sulla qualità dei fasci di elettroni e soprattutto sulla sincronizzazione con sorgenti esterne, al livello di pochi femtosecondi.

più grande, il *witness* vedrebbe ogni volta un'intensità di campo differente, acquisendo dunque un'energia diversa. Il campo si chiama "campo scia", e come la scia delle auto nella Formula 1 dipende dalla posizione relativa tra chi dà la scia e chi la sfrutta, così in questo caso quanto campo accelerante sente il *witness* dipende dalla sua distanza dal *driver*.

In un laser a elettroni liberi (FEL) vengono prodotti degli impulsi di radiazione nei raggi X, dunque penetranti la materia, con durata di femtosecondi, che è un tempo scala proprio delle reazioni chimiche. Moltissimi esperimenti vengono condotti con una tecnica di *pump and probe*: si eccita un campione e poi si vede come reagisce nel tempo facendo arrivare la radiazione a diversi istanti temporali. La richiesta sul tempo di arrivo è dell'ordine dei femtosecondi.

Queste applicazioni ci richiedono di produrre e trasportare le nostre particelle con un tempo ben preciso e soprattutto di suonare la stessa partitura tutte le volte in modo uguale. Si potrebbe pensare che basti un orologio molto preciso, e che tutti i sistemi ricevano da questo il tempo una volta per tutte. In realtà, l'attuale tecnologia non ci permette di avere una stabilità al livello desiderato per più di qualche ora. È necessario distribuire a tutti i nostri orchestrali continuamente un segnale di sincronizzazione. I nostri sistemi sono un matrimonio tra ottica ed elettronica. Infatti, in molti casi usiamo dei segnali ottici prodotti da laser molto precisi e poi li recapitiamo ai vari strumenti con dei collegamenti in fibra ottica, stabilizzati in temperatura. La fibra ottica è immune dai disturbi elettromagnetici che sono propri di un ambiente tipo quello degli acceleratori. Abbiamo poi dei sistemi di *feedback* che evitano i *drift* lenti che si sviluppano con dinamiche di

minuti od ore. Sono fastidiosi ma si possono curare. Adesso che abbiamo distribuito a tutti il segnale del direttore d'orchestra e ognuno sa quando attaccare la sua parte, dobbiamo vedere, sul nostro fascio di particelle accelerato, se tutto è andato bene.

Ci sono vari sistemi, alcuni "parassiti", ovvero che non disturbano il fascio, utilizzando in qualche modo il campo elettrico che si muove insieme alle cariche, altri, invece, "distruttivi". Ne descriviamo uno del secondo tipo, molto utilizzato perché riesce a fornire un'immagine di come le particelle sono distribuite nel tempo: una TDS (*time-deflecting structure*). Si tratta di una struttura metallica, dove insieme al fascio di particelle da misurare arriva un'onda elettromagnetica. Il verso del campo elettrico è ortogonale alla direzione del fascio. Ed è un campo oscillante. Questo significa che la testa del pacchetto vede, ad esempio, una forza trasversale che lo devia in alto, il centro nessuna forza, la coda una forza che lo devia in basso. Dopo un tratto di deriva, le particelle giungono su una targhetta fluorescente, che emette della luce nella posizione in cui le cariche l'hanno intercettata. Vediamo un'immagine nel piano trasverso di com'è fatto il pacchetto di particelle in longitudinale. E se abbiamo due fasci, *driver* e *witness*, misuriamo due strutture, con una separazione che dipende dalla loro distanza. Ogni volta che la coppia arriva nel TDS abbiamo un'immagine e notiamo che sia la distanza tra *driver* e *witness*, sia la posizione di entrambi variano leggermente. È il *jitter*. Con i moderni sistemi possiamo misurare lunghezze temporali e *jitter* al livello del femtosecondo, che è la risoluzione richiesta.

Biografia

Alessandro Cianchi è professore ordinario in fisica sperimentale delle interazioni fondamentali e applicazioni nel dipartimento di fisica dell'università di Roma Tor Vergata. È responsabile della *beam instrumentation* nel progetto europeo EuPRAXIA.

L'atto fuggente

Alla scoperta del mondo ultrarapido degli elettroni

di Mauro Nisoli

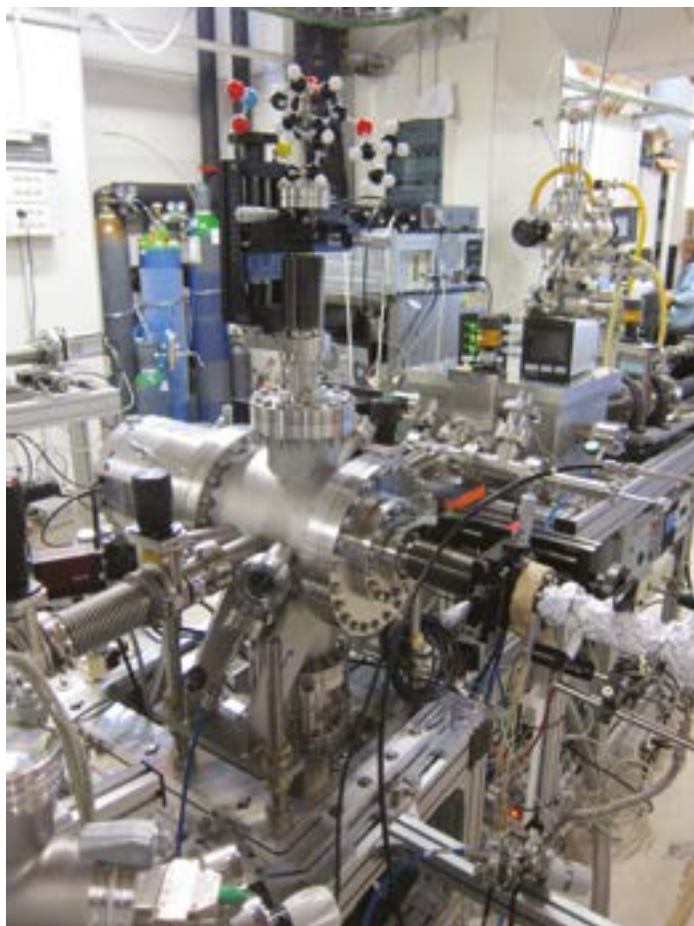


a.
Pierre Agostini, Ferenc Krausz e Anne L'Huillier ritratti durante la cerimonia ufficiale per il conferimento del premio Nobel per la fisica 2023.

Cosa succede dentro un atomo quando la luce lo colpisce? Come si muove un elettrone durante una reazione chimica? Fino a poco tempo fa, queste domande non potevano trovare risposta a livello sperimentale. Mancavano infatti gli strumenti adatti a investigare fenomeni elettronici che avvengono su intervalli di tempo così brevi. Oggi, grazie agli impulsi di luce più brevi mai generati, gli impulsi ad "attosecondi" (vd. fig. b p. 24), possiamo non solo osservare questi fenomeni, ma anche iniziare a controllarli. Un attosecondo è un miliardesimo di miliardesimo di secondo ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). In un intervallo di tempo così breve, la luce percorre una distanza pari al diametro di un atomo d'oro. Su

questa scala ultrarapida si svolgono molti processi fondamentali, in particolare quelli governati dalla meccanica quantistica.

L'invenzione dei metodi sperimentali che hanno permesso di generare impulsi ad attosecondi e di utilizzarli per lo studio della dinamica degli elettroni nella materia è valsa il premio Nobel per la fisica 2023, assegnato a Pierre Agostini, Ferenc Krausz e Anne L'Huillier. Il riconoscimento ha premiato sia l'avanzamento sperimentale nella produzione di impulsi ultrabrevi, sia il loro impatto scientifico: tali impulsi rappresentano uno strumento che consente, per la prima volta, di osservare e controllare il movimento degli elettroni, le



b.
Porzione dell'apparato sperimentale per misure ad attosecondi all'Attosecond Research Center del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano.

particelle fondamentali che governano i processi chimici, elettrici e ottici della materia.

Misurare impulsi della durata di pochi attosecondi rappresenta una sfida formidabile, poiché si tratta di risolvere intervalli di tempo estremamente brevi, ben al di sotto delle capacità degli strumenti elettronici convenzionali e non accessibili nemmeno utilizzando le tecniche sviluppate per la misura degli impulsi a femtosecondi (vd. p. 30, ndr). Sono state sviluppate tecniche innovative basate sull'impiego della luce stessa come strumento di misura. Il metodo si fonda sull'uso di un secondo impulso, una porzione dell'impulso laser utilizzato per generare gli impulsi ad attosecondi, che agisce come una sorta di "riferimento" od "orologio ottico" rispetto all'impulso ad attosecondi da misurare. Focalizzando su un gas nobile i due impulsi con un ritardo temporale controllato tra loro, si induce l'emissione di elettroni la cui distribuzione energetica dipende dal ritardo stesso. L'analisi dell'evoluzione temporale dello spettro di fotoemissione consente di ricostruire con precisione le caratteristiche temporali degli impulsi ad attosecondi. A partire dalla prima dimostrazione sperimentale di impulsi di durata inferiore al femtosecondo nel 2001, la scienza degli attosecondi ha avuto un impatto significativo sulla fisica atomica, molecolare e dello stato solido. L'introduzione di nuove tecniche spettroscopiche basate su impulsi ad attosecondi, affiancata dallo sviluppo di metodi teorici avanzati per l'interpretazione dei dati sperimentali, ha reso possibile l'osservazione e lo studio di fenomeni fisici fino ad allora inaccessibili, aprendo la strada a una comprensione più profonda della dinamica ultrarapida degli elettroni nei sistemi quantistici.

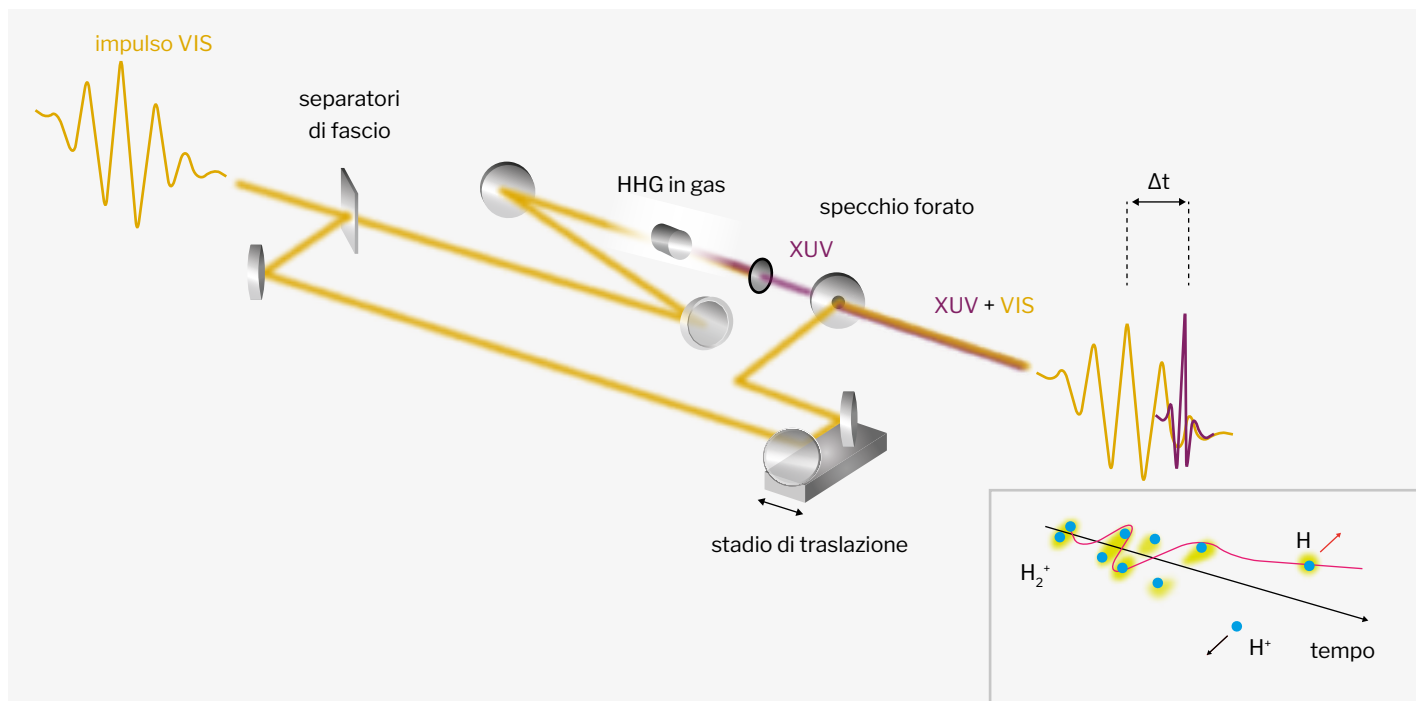
Tra le applicazioni più rilevanti vi è lo studio di come gli elettroni reagiscono quando la luce li espelle da un atomo. Per molto tempo si è creduto che questo processo fosse istantaneo: l'arrivo di un fotone bastava a liberare immediatamente un elettrone. Le misure rese possibili dagli impulsi ad attosecondi hanno però rivelato che non è così semplice: l'emissione avviene con un leggero ritardo, che racchiude preziose informazioni sulla dinamica elettronica e sulla struttura atomica. Dal punto di vista quantistico, questo ritardo, dell'ordine di pochi attosecondi, è dovuto allo sfasamento subito dalla funzione d'onda dell'elettrone, mentre attraversa il potenziale generato dall'atomo ionizzato. In un esperimento pionieristico, il gruppo di Ferenc Krausz ha mostrato che, nel neon, gli elettroni provenienti dagli orbitali $2p$ emergono circa 20 as più tardi rispetto a quelli degli orbitali $2s$. Successivamente, il gruppo di Anne L'Huillier ha spinto queste osservazioni a un livello di precisione ancora maggiore, riuscendo a misurare con grande accuratezza i ritardi di fotoemissione, prima in argon e poi nuovamente in neon. Oltre a osservare, la nuova sfida è controllare i sistemi quantistici. È possibile "pilotare" il comportamento degli elettroni, influenzare l'esito di una reazione chimica, dirigere il trasferimento di carica in una molecola o in un materiale con precisione temporale estrema? Sono questi i requisiti fondamentali per lo sviluppo dell'"attochimica", che mira a controllare le reazioni chimiche agendo direttamente sugli elettroni sulla scala temporale naturale delle dinamiche elettroniche.

La prima applicazione degli impulsi ad attosecondi allo studio della dinamica elettronica in molecole è stata realizzata al Politecnico di Milano, nell'ambito di una collaborazione internazionale. Impulsi ad attosecondi sono stati utilizzati per ionizzare molecole di idrogeno (H_2), mentre impulsi nell'infrarosso (IR) di pochi femtosecondi sondavano la dinamica elettronica generata. I risultati hanno dimostrato che è possibile controllare in modo diretto la posizione di un elettrone all'interno di una molecola su una scala temporale ultrarapida.

Un risultato particolarmente affascinante emerso dall'analisi teorica dell'esperimento è che, dopo la ionizzazione, il movimento dell'elettrone fra i due atomi di idrogeno può essere controllato agendo sull'elettrone espulso dall'impulso ad attosecondi. Questo controllo della localizzazione elettronica è possibile grazie a un fenomeno di *entanglement* quantistico tra l'elettrone emesso e lo ione molecolare (H_2^+) generato dalla ionizzazione. La presenza di tale correlazione suggerisce che l'*entanglement* tra fotoelettrone e ione possa essere un elemento ricorrente nei processi ultraveloci, aprendo prospettive interessanti verso un collegamento con il campo dell'informazione quantistica.

Un'importante implicazione tecnologica dello sviluppo dei metodi sperimentali introdotti dalla scienza ad attosecondi riguarda il settore della fisica dello stato solido. La capacità di controllare le proprietà fisiche dei solidi tramite impulsi

luminosi ultrabrevi rappresenta un importante obiettivo, di notevole interesse sia dal punto di vista della ricerca fondamentale che da quello tecnologico. In questo contesto, gli sviluppi più recenti nel settore degli impulsi ad attosecondi permettono di studiare i primissimi istanti dell'interazione tra luce e materia e di esplorare il limite ultimo di velocità con cui le cariche possono essere iniettate e modulate con la luce. Dal punto di vista tecnologico l'iniezione di carica in un semiconduttore mediante impulsi nella regione spettrale dell'IR di pochi femtosecondi potrebbe essere utilizzata per portare il materiale in uno stato conduttivo, realizzando commutatori ultraveloci in optoelettronica, un traguardo fondamentale che potrebbe consentire di aumentare la velocità limite dell'elaborazione dati e della codifica delle informazioni fino alla regione dei petahertz ($1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$). La possibilità di generare e misurare impulsi luminosi della durata di pochi attosecondi ha aperto una nuova fase nella ricerca scientifica, in cui la luce non è più soltanto uno strumento di osservazione, ma diventa un mezzo per interagire e controllare direttamente i processi fondamentali della materia. Questi impulsi permettono di esplorare la dinamica degli elettroni su scale temporali estremamente brevi. L'accesso sperimentale a tali scale temporali consente una comprensione più profonda dei meccanismi alla base della chimica, della fisica dello stato solido e, più in generale, dei sistemi complessi.



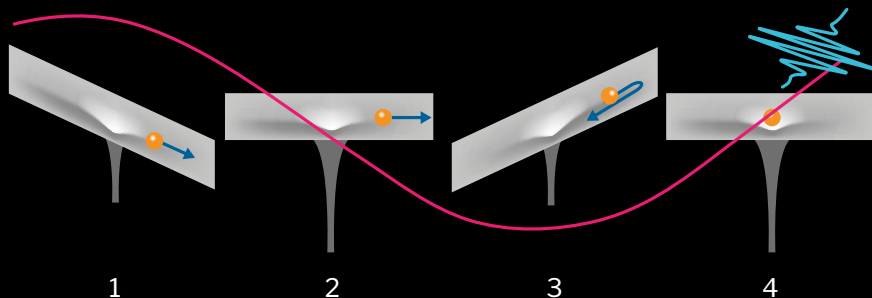
c. Gli impulsi di luce ad attosecondi consentono di osservare i movimenti ultraveloci degli elettroni nella materia. La figura mostra lo schema dell'apparato sperimentale utilizzato per misure di *pump-probe*, che combinano impulsi di pochi femtosecondi nel visibile (VIS) e impulsi ad attosecondi nell'estremo ultravioletto (XUV), ottenuti per mezzo della generazione di armoniche di ordine elevato (HHG). In particolare, è illustrata la prima applicazione degli impulsi ad attosecondi allo studio della dinamica elettronica in molecole. In questo esperimento, impulsi ad attosecondi ionizzano molecole di idrogeno H_2 in H_2^+ , mentre impulsi nel visibile (VIS) di pochi femtosecondi ne sondano la dinamica elettronica risultante. Il riquadro illustra in modo schematico l'evoluzione temporale della distribuzione di carica dopo la ionizzazione indotta dall'impulso ad attosecondi. Le zone verdi sono quelle in cui la distribuzione di carica dell'elettrone è maggiormente concentrata.

[as] approfondimento

Impulsi di luce

Qual è la durata minima di un impulso di luce? Esiste un limite fisico fondamentale: non è possibile produrre impulsi più brevi di un singolo ciclo ottico della luce, la cui durata è determinata dalla lunghezza d'onda λ secondo la relazione $T = \lambda / c$, con c che indica la velocità della luce. Per la luce visibile, la cui lunghezza d'onda varia tra 380 e 780 nanometri, la durata minima è quindi di circa 1-2 femtosecondi. Per superare la barriera del femtosecondo e generare impulsi ancora più brevi, è necessario usare luce con lunghezza d'onda minore, nella regione spettrale dell'estremo ultravioletto (XUV). La tecnica più comunemente utilizzata per generare impulsi in questo intervallo spettrale è chiamata "generazione di armoniche di ordine elevato" (HHG - High-Order Harmonic Generation in inglese), dimostrata sperimentalmente per la prima volta da Anne L'Huillier nel 1988. Tale tecnica è basata su effetti non lineari che si innescano quando impulsi laser ultrabrevi (da pochi femtosecondi a poche decine di

femtosecondi) vengono focalizzati su un gas nobile, come argon o neon, con intensità dell'ordine di 10^{13} - 10^{14} W/cm². A queste intensità il campo elettrico del laser può deformare il potenziale dell'atomo a tal punto da permettere all'elettrone più esterno di fuoriuscire ("ionizzazione tunnel"). Una volta liberato, l'elettrone viene accelerato dal campo elettrico del laser. Quando il campo elettrico inverte segno, nel mezzo ciclo successivo, l'elettrone può essere spinto nuovamente verso lo ione da cui era stato estratto e ricombinarsi con esso. A questo punto, l'energia cinetica accumulata durante il moto dell'elettrone viene rilasciata sotto forma di un breve impulso di luce ad alta energia (nella regione del XUV o dei raggi X molli), della durata di pochi attosecondi. Poiché questo processo, illustrato in modo schematico in fig. 1, si ripete periodicamente ogni mezzo ciclo ottico della radiazione incidente, si genera un treno di impulsi ad attosecondi.



1.

Illustrazione dei processi fisici che portano alla generazione di impulsi ad attosecondi. La linea rossa rappresenta un ciclo ottico del campo elettrico dell'impulso laser che viene focalizzato su un gas nobile e innesca il processo di generazione. L'elettrone più esterno (rappresentato come una pallina) viene liberato in prossimità di un massimo del campo elettrico tramite ionizzazione (1). L'elettrone estratto dapprima si allontana (2) e, in seguito all'inversione della polarità del campo (3), l'elettrone ritorna nella sua posizione iniziale, dove può ricombinarsi con lo ione da cui è partito dando luogo all'emissione di un impulso ad attosecondi (4).

Biografia

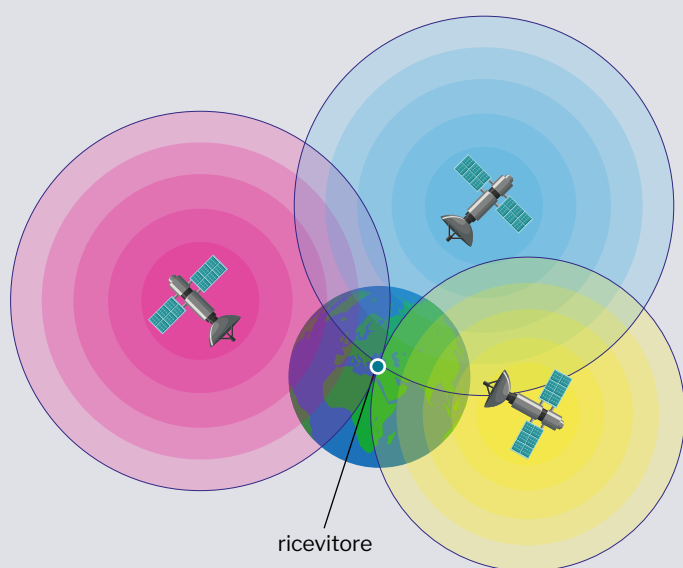
Mauro Nisoli è professore al Politecnico di Milano e responsabile dell'Attosecond Research Center presso il Dipartimento di Fisica. La sua attività di ricerca riguarda la generazione e l'impiego di impulsi ad attosecondi allo studio delle dinamiche ultraveloci degli elettroni nelle molecole e nella materia condensata.

10.23801/asimmetrie.2026.40.9

You are here

Come fanno GPS e Galileo a portarci a casa

di Luciano less



a. Schema della trilaterazione. Il ricevitore misura i tempi di arrivo dei tre segnali satellitari, da cui si ricavano i raggi delle tre sfere. La conoscenza delle coordinate dei tre satelliti, assieme a quella dei raggi, permette di ricavare le coordinate del punto di intersezione tra le tre sfere, che coincide con la posizione del ricevitore.

Il mio orologio segna le 17:15. Molto tardi. Avremmo già dovuto essere da tempo al rifugio, invece ci attendono ancora due, forse tre ore di cammino sul ghiacciaio. Per di più è calata la nebbia e non si intravede nessuna pista. Trent'anni fa un po' di ansia e preoccupazione sarebbero state inevitabili. Quando riusciremo ad arrivare, con queste condizioni meteo e su un terreno sconosciuto a tutti noi? Oggi, invece, estraggo dalla tasca il mio cellulare, apro l'app con la mappa su cui, a casa, avevo tracciato un buon percorso, attendo qualche secondo, ed ecco apparire il puntino blu che indica la mia posizione. Nessuna ansia. Legati in cordata, dobbiamo solo controllare che quel puntino si discosti poco dalla traccia sullo schermo. Dopo due ore, ecco apparire la sagoma del rifugio. È ora di cena e di un brindisi.

Ma cosa c'è dietro quel puntino blu che ci ha permesso di arrivare rapidamente e senza errori al rifugio? Come fa il nostro cellulare a guidarci in una città sconosciuta all'indirizzo desiderato? La risposta sta in tre elementi: orologi, satelliti e segnali radio. I sistemi di navigazione satellitare, indicati in gergo tecnico come GNSS (un acronimo per *global navigation satellite system*) sono certamente l'utilizzazione più diffusa di sistemi spaziali nella vita di tutti i giorni.

Sebbene gli odierni GNSS siano sofisticate realizzazioni tecnologiche, il loro principio di funzionamento è semplice. Supponiamo di avere sopra di noi tre satelliti dotati di tre orologi sincronizzati tra loro. Supponiamo poi che ciascuno di questi tre satelliti trasmetta in maniera sincrona, ad esempio allo scoccare di ogni secondo, un impulso radio e ci fornisca le sue coordinate spaziali (x, y, z) in quel momento. Facciamo poi un'assunzione alquanto irrealistica, cioè che l'orologio del mio cellulare sia sincronizzato con quello dei satelliti. I segnali radio provenienti dai tre satelliti arriveranno al mio cellulare in tempi diversi, che dipenderanno dalla loro distanza. I segnali radio si propagano con ottima approssimazione alla velocità della luce (300.000 km/s circa), quindi se, per esempio, un satellite dista 30.000 km, il segnale radio impiegherà 0,1 s per raggiungermi. Il ricevitore GNSS integrato nel mio cellulare annota i tempi di ricezione dei tre impulsi e le coordinate (x, y, z) di ciascun satellite. Siamo pronti a porci la domanda fondamentale: qual è il punto dello spazio (ossia quali sono le sue coordinate X, Y, Z) per il quale i tempi di propagazione sono quelli misurati dal ricevitore? Il problema contiene tre incognite (le coordinate



b.
Rappresentazione grafica della costellazione di satelliti Galileo (ESA).

X, Y, Z dell'utente) con tre misure a disposizione (i tempi di propagazione dei segnali radio dai tre satelliti all'utente), quindi la sua soluzione è non solo possibile, ma anche semplice.

Come mostra la fig. a, basterebbe solo applicare il teorema di Pitagora nella procedura chiamata di "trilaterazione".

Tuttavia, l'orologio interno al mio cellulare non è certamente sincronizzato con quello dei satelliti della costellazione. La determinazione della nuova incognita (la desincronizzazione, ossia la differenza tra il tempo dei satelliti e quello del mio orologio locale) richiede un quarto satellite. In questo modo, misurando un altro tempo di propagazione, non solo posso ottenere la mia posizione, ma posso anche sincronizzare il mio orologio con il tempo satellitare, a sua volta legato con ottima precisione al tempo civile diffuso dagli istituti metrologici nazionali.

Il primo GNSS operativo è stato il Global Positioning System (GPS) americano: progettato dal Dipartimento della difesa a partire dal 1973, è diventato pienamente operativo nel 1993, con 24 satelliti (oggi più numerosi) attorno ai 20.000 km di quota. La precisione tipica per gli utenti civili era dell'ordine dei 100 metri a causa di un errore intenzionale nella posizione dei satelliti trasmessa agli utenti. Disattivata quella funzione, l'accuratezza è migliorata drasticamente. I moderni cellulari permettono di ottenere precisioni di pochi metri, mentre per applicazioni professionali, come quelle geodetiche o militari, l'errore può ridursi a pochi centimetri.

Alla fine degli anni '90 anche in Europa prese piede l'idea di sviluppare un sistema analogo, orientato però verso le applicazioni civili. Galileo, il sistema di navigazione satellitare dell'Unione europea e dall'Agenzia spaziale europea (ESA), diventato operativo nel 2016, offre prestazioni comparabili, ma con una maggiore trasparenza e standard di accuratezza ancora più elevati (attorno a un metro per gli utenti generici, molto meno per i servizi di precisione). Galileo si distingue anche per la qualità e stabilità dei suoi orologi atomici al rubidio e ai maser a idrogeno passivo, capaci di perdere al massimo un secondo dopo molti milioni di anni. È proprio questa stabilità a rendere possibile la sincronizzazione estremamente precisa di tutti gli orologi della costellazione, necessaria per la navigazione e per molte altre applicazioni scientifiche e industriali.

Ogni satellite GNSS porta a bordo più orologi atomici, la cui sincronizzazione è mantenuta costantemente da stazioni di terra che confrontano il tempo satellitare con le scale di tempo dei principali istituti metrologici. Gli orologi a bordo non servono solo a misurare la distanza con precisione, ma anche a calcolare con accuratezza le orbite dei satelliti stessi: errori di pochi miliardesimi di secondo si tradurrebbero in decine di metri di incertezza nel posizionamento a terra.

A queste scale di precisione, gli effetti della relatività non possono essere ignorati. I satelliti GNSS si muovono a circa 4 km/s a una quota di 20.000 km, dove il campo gravitazionale terrestre è più debole. Secondo la relatività generale, il tempo segnato da orologi scorre più velocemente dove la gravità è più debole, mentre la relatività ristretta prevede un rallentamento dovuto alla velocità. Sommando i due effetti, gli orologi a bordo dei satelliti guadagnerebbero circa 40 microsecondi al giorno rispetto a quelli sulla Terra. Se questa differenza



c.
L'esperimento di congiunzione solare della missione Cassini (NASA/ESA/ASI) è stato effettuato nel luglio del 2002, quando la sonda si trovava oltre Giove e in viaggio verso Saturno, la sua destinazione finale. Orologi molto precisi all'antenna di terra e un sistema di telemisure all'avanguardia, capace di misurare la velocità della sonda con errori di tre millesimi di millimetro al secondo, hanno confermato la teoria di Einstein con precisione senza precedenti.

non fosse compensata, l'errore in posizione, dopo un solo giorno, diventerebbe addirittura di 10 km. In pratica, se gli effetti relativistici non fossero adeguatamente considerati, il sistema non funzionerebbe. Potremo dire che il sistema GPS americano è stata la prima applicazione "industriale" della teoria di Einstein.

La misura del tempo è altrettanto cruciale nella navigazione interplanetaria, esattamente come lo è stata per la navigazione marittima con il cronometro di Harrison dopo il 1761. Le sonde spaziali, infatti, non possono affidarsi ad un ancora inesistente "GPS marziano". La loro orbita nello spazio profondo è determinata dai centri di controllo terrestri grazie a misure dei tempi di propagazione, della frequenza di segnali radio inviati e ricevuti da una o più antenne terrestri. Misurando differenze di tempo e frequenza con orologi atomici molto stabili si possono stimare distanze di centinaia di milioni di chilometri con precisioni di pochi centimetri, e velocità di decine di chilometri al secondo a meno di qualche centesimo di millimetro al secondo.

Il tempo, quindi, non è solo una misura del nostro quotidiano, ma anche una delle chiavi per esplorare l'universo.

Esperimenti scientifici nello spazio hanno sfruttato proprio la misura del tempo per mettere alla prova la relatività e la struttura stessa dello spaziotempo. Uno dei più noti è l'esperimento della missione Cassini, che nel 2002, mentre era in viaggio verso Saturno, misurò la variazione del ritardo di segnali radio quando il loro cammino passava vicino al Sole. La gravità, infatti, rallenta i tempi di transito della luce, in maniera tanto più pronunciata quanto più grande è la massa del corpo che la genera: un effetto previsto da Einstein e confermato dalla sonda Cassini con una precisione di una parte su cinquantamila.

Dalla cordata sul ghiacciaio alle sonde interplanetarie, il filo conduttore è lo stesso: orologi sempre più precisi che misurano lo scorrere del tempo e vengono continuamente sincronizzati tra loro, permettendo di orientarci nello spazio, esplorare l'ignoto e comprendere meglio le leggi che governano l'universo. Dietro quel puntino blu non c'è solo tecnologia, ma anche la capacità di misurare il tempo, una delle più sottili conquiste della conoscenza umana.

Se vi capiterà di seguire una traccia nella nebbia, pensateci: è il tempo, misurato con precisione, a indicarvi la strada.

Biografia

Luciano Iess insegna ingegneria aerospaziale presso Sapienza Università di Roma. Ha condotto esperimenti di geodesia e fisica fondamentale con diverse missioni di spazio profondo della NASA e dell'ESA. Ha ricevuto la medaglia Jean Dominique Cassini della European Geosciences Union e le Exceptional Public Service Medal ed Exceptional Scientific Achievement Medal della NASA.

[as] intersezioni

Il tempo psicologico

di Alessandro Soranzo



a.
Giovanni Bruno Vicario (1932-2020), esponente italiano della psicologia della Gestalt.

Tutti abbiamo sperimentato come il tempo passi velocemente quando ci divertiamo o quanto scorra lentamente durante un'attesa noiosa. Questa semplice esperienza rivela una verità fondamentale: il tempo psicologico non rispetta il tempo dell'orologio. Se Einstein ci ha insegnato che il tempo dell'orologio non scorre ugualmente per tutti gli osservatori dell'universo, la psicologia mostra come anche il nostro orologio interiore segni un tempo relativo, dipendente da emozioni, attenzione e meccanismi percettivi. Lo psicologo italiano Giovanni Vicario si è occupato principalmente di questi ultimi, vale a dire di come i meccanismi percettivi influenzino la nostra percezione del tempo. Il suo contributo fondamentale fu di mostrare, sia in ambito acustico sia visivo, come la sequenza temporale di eventi non sempre corrisponda alla sequenza percepita.

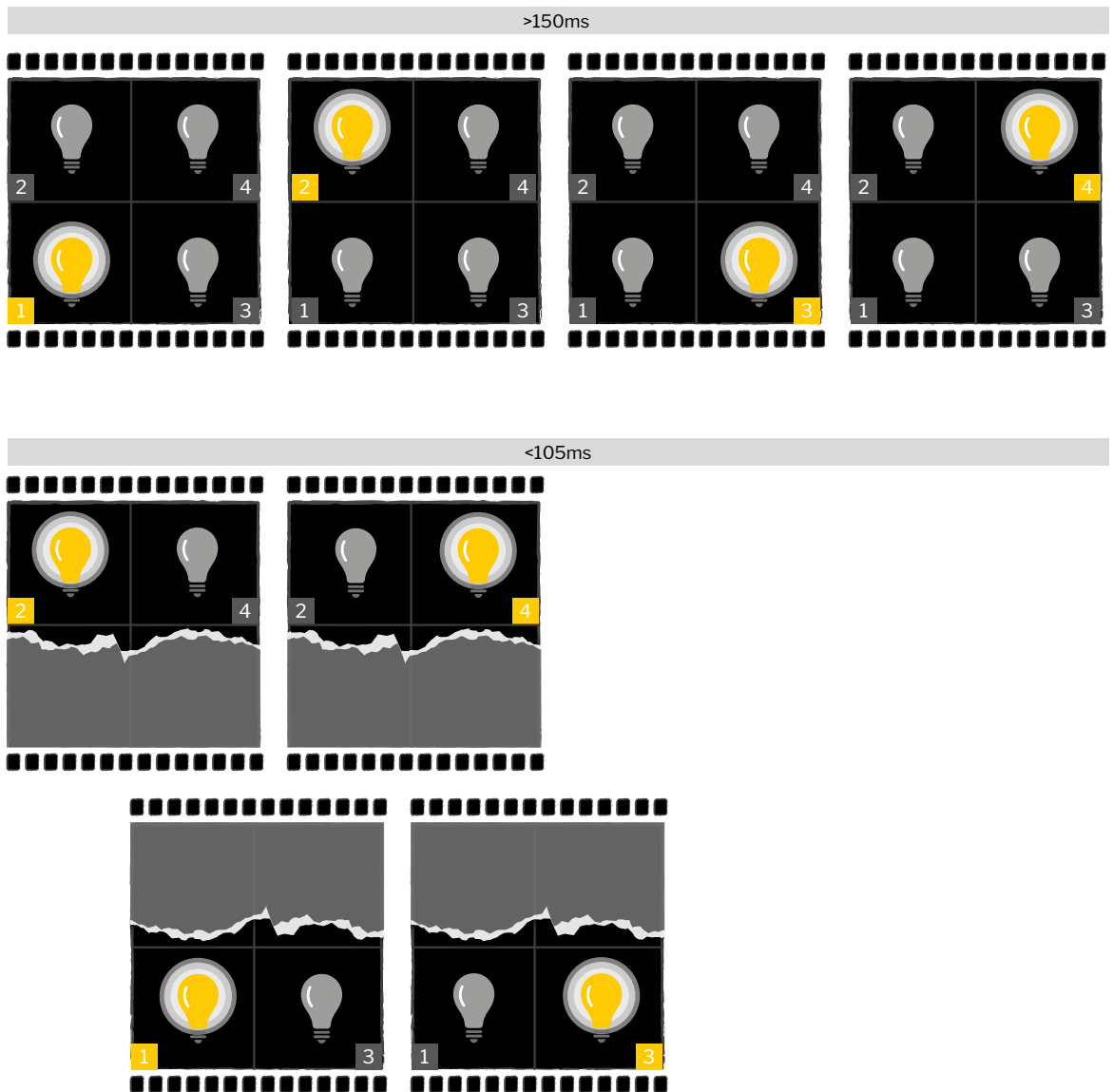
Nell'esperimento acustico del "doppio trillo", dimostrò come una sequenza ciclica di note alte e basse (AaBb) venisse percepita come una melodia unica e alternata quando le note erano lunghe (>200 msec). Tuttavia, quando la durata di ogni nota si riduceva (attorno ai 50 msec), l'esperienza percettiva si scindeva in due trilli simultanei e indipendenti: uno acuto e uno grave. In questo caso, le note si raggruppavano percettivamente per somiglianza di frequenza, nonostante siano separate nel tempo da note dell'altro gruppo di frequenze.

Questo fenomeno fu replicato nel campo della visione (vd. fig. b) utilizzando sequenze di punti luminosi (1-2-3-4) disposti agli angoli di un rettangolo virtuale disposto verticalmente rispetto all'osservatore che si accendevano e spegnevano ciclicamente (basso-sinistra, alto-sinistra, basso-destra e alto-destra). Anche qui, la sequenza percepita cambiava in base alla durata degli stimoli. Quando la pausa tra un'accensione e la successiva era lunga (>150 ms), si vedeva un unico punto muoversi a zig-zag, seguendo il principio della vicinanza temporale che sta alla base del movimento stroboscopico e della percezione del movimento cinematografico.

Quando invece tale intervallo era breve (<105 ms), si percepivano due punti che oscillavano orizzontalmente (uno in alto e uno in basso) nello stesso tempo (1-3 e 2-4), unendosi quindi per vicinanza spaziale, anziché seguire la sequenza temporale fisica.

(In entrambi gli esperimenti nelle finestre temporali intermedie, tra 50 e 200 ms nell'esperimento acustico e tra 105 e 150 ms in quello visivo, la configurazione percettiva risultava instabile, dimostrando plasticamente che la

b. Schema dell'esperimento visivo. I punti luminosi si accendono e si spengono in sequenza 1-2-3-4. Quando la pausa tra una accensione e la successiva è inferiore a 105 ms si percepiscono due punti oscillanti in alto (2-4) e due in basso (1-3). Si veda anche il video online alla pagina <http://asimmetrie.it/effetto-vicario.html>.



percezione del tempo non è una riproduzione passiva della sequenza fisica degli eventi). I risultati di questi esperimenti ci pongono un problema fondamentale: perché la sequenza percepita può essere diversa da quella fisica? Perché il nostro sistema percettivo, in certe condizioni, “riscrive” l’ordine temporale degli eventi? Per rispondere a questi interrogativi è utile considerare i principi dell’organizzazione percettiva. La teoria della Gestalt, proposta dallo psicologo Max Wertheimer agli inizi del secolo scorso, si fonda proprio sui “principi dell’organizzazione percettiva” per spiegare come la nostra percezione organizza elementi distinti in oggetti percettivi unitari. Secondo la teoria psicologica della Gestalt, la nostra percezione non è la semplice somma di sensazioni elementari, ma è

un’attività organizzata, governata da principi precisi, per cui gli stimoli sono strutturati in configurazioni dotate di senso: “l’insieme è diverso della somma delle sue parti” è il motto della Gestalt.

Tra i principi percettivi identificati da Wertheimer che guiderebbero il modo in cui noi percepiamo il mondo vi sono: la somiglianza (elementi simili per forma, colore o dimensione tendono a essere organizzati insieme); la buona continuazione (si percepiscono con andamento regolare e fluido, piuttosto che spezzate ad angolo); il destino comune (elementi che si muovono insieme sono percepiti come un unico oggetto); la vicinanza (elementi prossimi nello spazio e nel tempo, sono percepiti come un’unica unità).

Recenti studi hanno dimostrato come questi



principi siano fondamentali anche per comprendere fenomeni psicologici in ambito artistico, come l'ambiguità del sorriso della Gioconda.

Gli esperimenti sulle sequenze temporali uditive e visive dimostrano che la nostra percezione non deriva affatto da una semplice ricostruzione di tali sequenze, ma da una costruzione attiva governata proprio dai principi dell'organizzazione percettiva suggeriti dalla Gestalt. La continuità fenomenica dei due trilli, nell'esperimento di acustica, o delle due luci, nell'esperimento di visione, prevale sulla continuità temporale fisica.

Per spiegare come elementi non sequenziali nel tempo fisico possano essere percepiti come tali, Vicario ipotizza quindi l'esistenza di una "microstruttura del tempo psicologico", in cui l'unità di analisi percettiva è un intervallo temporale ("istante fenomenico") sufficientemente ampio (nell'ordine di 200 ms) tale da incorporare più stimoli contemporaneamente, permettendo così processi di unificazione basati sui principi di organizzazione percettiva piuttosto che sulla successione fisica. I lavori sulla percezione di sequenze temporali dimostrano quindi come la percezione sia il risultato di una negoziazione dinamica tra principi dell'organizzazione percettiva in conflitto. Nell'esperimento acustico, la vicinanza temporale compete con la somiglianza di frequenza; in quello visivo, la vicinanza temporale compete con la vicinanza spaziale. A seconda dei parametri temporali, prevale l'uno o l'altro percepito. Questi lavori poi spostano l'attenzione dalla struttura fisica dello stimolo all'attività costruttivo/organizzativa del nostro sistema percettivo, che resta centrale nelle neuroscienze cognitive contemporanee. Tale attività percettiva che opera al di sotto della nostra consapevolezza è alla base non solo di illusioni di laboratorio, ma della nostra stessa capacità di dare un senso coerente al flusso degli eventi che ci circonda.

c.
L'ambiguità del sorriso della Monna Lisa (1503-1506), nota anche come la Gioconda, dipende dai principi di organizzazione percettiva applicati alle sfumature ai bordi delle labbra.

di Giuliana Galati



a.
Statua del dio del tempo Chronos nel Cimitero monumentale di Staglieno, a Genova. Scolpita dall'artista Santo Saccomanno nel 1873, l'opera è collocata nel porticato inferiore a levante e fa parte della tomba di Erasmo Giuseppe Piaggio.

Granello dopo granello la sabbia si insinua nella strozzatura al centro della clessidra. Il tempo passa, inesorabile, cadenzato, ipnotico... Pian piano prende forma una piramide di sabbia instabile, dentro la quale mi sembra di scorgere i contorni di una figura di spalle. Sembra un uomo possente e muscoloso, ma allo stesso tempo non sembra umano, più un dio. Dal modo in cui si muove mi sembra stia azzannando una preda a grandi morsi. Stringo gli occhi e mi pare di scorgere una gamba insanguinata che penzola dalla sua bocca!

[as]: Ora ho capito chi sei! Tu sei Kronos, figlio di Urano e Gea, marito di tua sorella Rea, padre di Èstia, Demetra, Era, Ade, Poseidone, Zeus e del Centauro Chirone. Sei il dio del tempo che mangia i suoi figli come le ore mangiano i minuti e i minuti divorano i secondi!

[Chronos]: Eccone un'altra che a scuola ha saltato qualche lezione di letteratura greca. Il dio del tempo, ovvero me medesimo, è Chronos, non quel pallone gonfiato di Kronos, figlio di Urano e Gea, marito di blablabla che si è mangiato i figli. E io, per tua informazione, sono vegetariano e sto mangiando tofu e pomodori.

[as]: Ah, ops. Mi sa che anche in quell'occasione dormivo...

[C]: Devi sapere, mia cara, che nell'antichità i greci usavano termini diversi per definire il tempo: χρόνος (chronos) per indicare la natura quantitativa del tempo, ovvero lo scorrere degli istanti uno dopo l'altro, αἰών (aion) per indicare una durata, καιρός (kairos) per indicare il tempo qualitativo, ovvero l'abilità di fare la cosa giusta al momento opportuno. Però avevano scelto due termini dal suono molto simile per chiamare me e quel farabutto: io sono Χρόνος (Chronos) e lui è Κρόνος (Kronos). Così alla fine ci hanno confuso tutti.

[as]: Mi dispiace, non deve essere bello essere associati a qualcuno che non si apprezza... Ma quindi tu sai tutto sul tempo? Sant'Agostino scriveva: "Che cosa è dunque il tempo? Se nessuno me ne chiede, lo so bene; ma se volessi darne spiegazione a chi me ne chiede, non lo so". Io ci ho pensato e risponderci che è quella cosa che scorre in avanti sempre uguale, come testimoniato dalle lancette del mio orologio!

[C]: Sbagliato! Quell'affarino che hai al polso non si muove mica sempre allo stesso modo, nemmeno quando funziona perfettamente. È proprio il tempo, infatti, a non scorrere sempre uguale: al mare il tempo scorre più lentamente che in montagna. E non perché al mare ci si diverta meno che a sciare, ma perché il tempo scorre più lentamente vicino a una grande massa come quella della Terra. Allo stesso modo il tempo scorre più lentamente se viaggi su un aereo supersonico e più velocemente se sei ferma, come adesso, a fissare una clessidra. Colpa (o merito) della relatività!

[as]: Ma io non me ne sono mai accorta! Al massimo mi accorgo che passa in fretta quando mi diverto e lentamente quando mi annoio...

[C]: Certo sono differenze impercettibili per voi umani, ma ormai la scienza ha fatto passi da gigante ed è riuscita a dimostrarlo e a misurarlo. Forse dormivi anche durante la lezione di fisica...

[as]: Può darsi, anche se è un tema che mi affascina molto. Qual è il tempo più veloce che si può misurare?

[C]: Se me l'avessi chiesto qualche anno fa, ti avrei detto l'attosecondo: 10^{-18} s. Nel 2001 gruppi di ricerca guidati da Anne L'Huillier, Pierre Agostini e Ferenc Krausz sono riusciti a osservare il tempo con cui un elettrone viene emesso da un atomo dopo essere stato colpito da un fotone, grazie a impulsi laser attosecondici. Hanno vinto il Premio Nobel per la fisica nel 2023.

[as]: Wow! Non credo si possa fare meglio di così, stiamo parlando di un milionesimo di milionesimo di secondo!

[C]: Eh eh... Se ho fatto bene i miei conti tu vivi nel 2026 e quindi dovrete aver sentito che sono stati misurati gli zeptosecondi.

[as]: Zeptosecondi? E a quale minuscola frazione di secondo corrispondono?

[C]: Uno zeptosecondo corrisponde a un milionesimo di trillesimo di secondo: 10^{-21} s. I fisici della Goethe Universität di Francoforte, guidati da Reinhard Dörner, insieme ai colleghi del laboratorio di fisica delle particelle Desy (Deutsches Elektronen-Synchrotron) di Amburgo e del Fritz-Haber-Institut di Berlino sono riusciti a misurare la propagazione della luce all'interno di una molecola. Il fotone, per attraversare una molecola di idrogeno, impiega circa 247 zeptosecondi per la lunghezza media del legame della molecola.

[as]: Ma come si fa a misurare un tempo così breve?

[C]: Usando spettrometria avanzata. Hanno misurato il modello di interferenza dell'elettrone espulso, utilizzando il microscopio

a reazione COLTRIMS (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectrometer), un apparato che rende visibili i processi di reazione ultraveloci negli atomi e nelle molecole. Misurando anche l'orientamento spaziale della molecola di idrogeno, sono riusciti a utilizzare l'interferenza delle onde elettroniche provenienti dai due atomi per calcolare con precisione il ritardo temporale tra il momento in cui il fotone ha raggiunto il primo e quello in cui ha raggiunto il secondo atomo di idrogeno.

[as]: Credo mi ci vorranno mooolti zeptosecondi per capire...

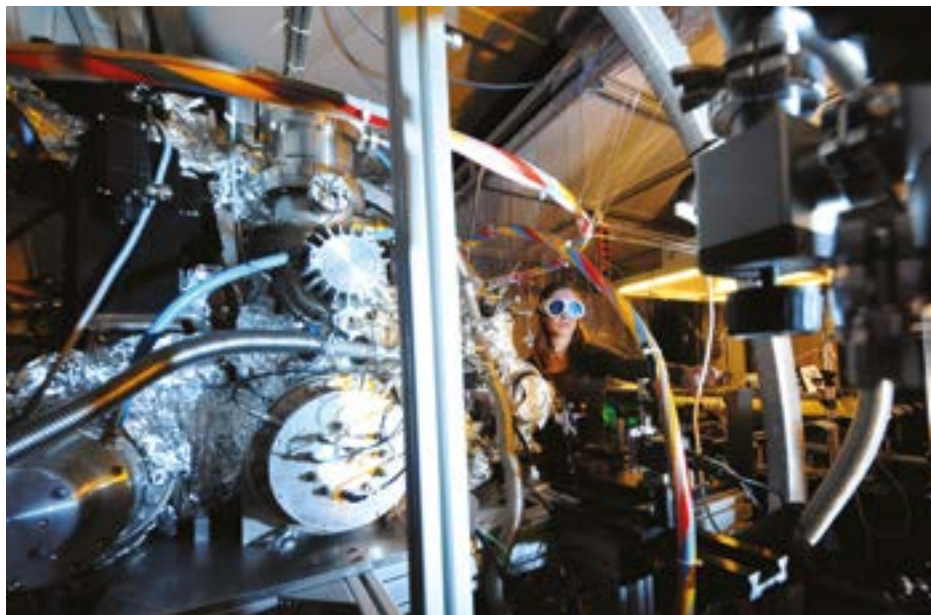
[C]: La faccio molto semplice. È un po' come fotografare lo schizzo provocato da due sassolini lanciati in uno stagno: dalle onde che si sovrappongono si può ricostruire quando sono caduti. Adesso però devo andare...

[as]: No, aspetta! Ho ancora un sacco di domande: hanno vinto un premio Nobel anche loro per questa scoperta? Tu conosci già il futuro e puoi anticiparmi se riusciremo ad andare oltre misurando gli yoctosecondi?

[C]: Yoctosecondi? Ma allora non dormivi sempre a scuola! Purtroppo però non posso anticiparti niente sul tempo futuro, dovrai scoprirlo da sola.

[as]: Uffa, va bene... E scusa ancora per lo scambio di pers... hem, dio iniziale.

[C]: Figurati, non preoccuparti, succede da più di 2000 anni... Ormai ci abbiamo fatto l'abitudine, alla fine è un po' come essere diventati la stessa cosa, due facce della stessa medaglia. A proposito, mi è venuta di nuovo fame! Ho i figli per cena, vuoi unirti anche tu?



b. Una scienziata del laboratorio di fisica degli attosecondi lavora con l'apparato COLTRIMS (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy), utilizzato per eseguire esperimenti sulla doppia ionizzazione.

Il tempo che scorre

di Anna Greco

Nel linguaggio quotidiano la parola clessidra ci porta subito a pensare alla sabbia che si muove tra due bulbi di vetro collegati e sovrapposti per misurare il passare del tempo.

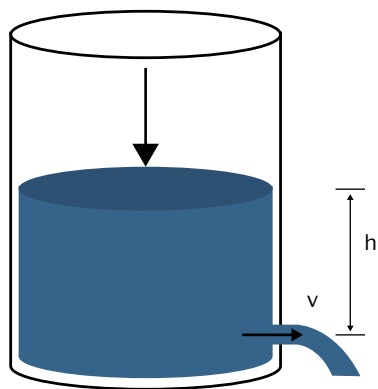
Eppure, l'etimologia della parola viene dal greco *klepsýdra*, che significa "orologio ad acqua", composto di *klépto*, "rubare", e *hýdor*, "acqua". Le prime clessidre, infatti, erano diffuse nell'antichità come strumenti di misura del tempo basati sul fluire dell'acqua da o verso un recipiente graduato, mentre le clessidre a sabbia comparvero molto tempo dopo, si ipotizza nel Medioevo. Una delle più antiche è la clessidra egizia di Karnak, risalente al tempo del faraone Amenofi III, intorno al XIV secolo a.C. e conservata oggi al Museo Egizio del Cairo. La clessidra di Karnak consiste in un vaso di alabastro con un foro vicino al fondo e al cui interno sono incise delle tacche. È una "clessidra a svuotamento": l'acqua inserita nel vaso graduato defluiva gradualmente dal foro e il passare del tempo veniva misurato valutando l'abbassamento del livello dell'acqua all'interno del vaso, confrontandolo con le tacche. Gli studiosi pensano che questo strumento venisse utilizzato per determinare l'ora durante la notte ed eseguire i riti sacri all'ora corretta. Le clessidre ad acqua avevano infatti il vantaggio di poter essere utilizzate anche di notte e in giornate senza sole, a differenza delle meridiane.

La misura così realizzata, però, era poco precisa: la velocità di fuoriuscita dell'acqua dal foro non è costante, e di conseguenza lo svuotamento del vaso non avviene nello stesso tempo per tutta la durata del fenomeno. Anche nelle clessidre a riempimento, in cui il passare del tempo è indicato dal crescere del livello dell'acqua che cade in un recipiente graduato da una cisterna posta più in alto, si pone lo stesso problema, poiché la velocità di riempimento e di svuotamento è difficile da controllare.

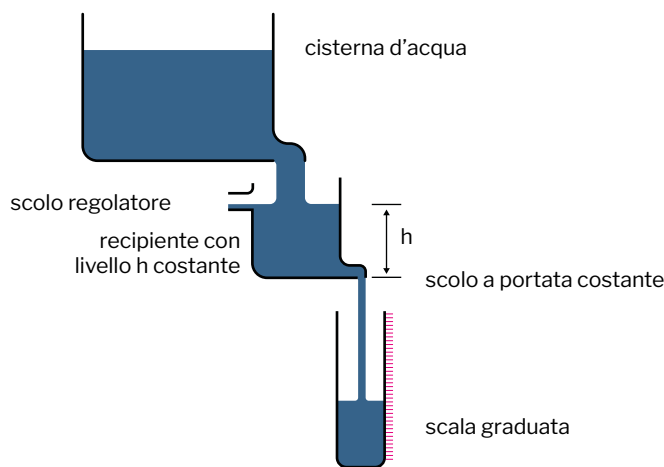
Oggi possiamo descrivere il fenomeno attraverso la legge di Torricelli (1643), che descrive la velocità v di fuoriuscita dell'acqua dal foro in funzione del livello del fluido nel recipiente, indicato come h : $v = \sqrt{2gh}$, dove g è l'accelerazione di gravità. Man mano che l'acqua nel recipiente diminuisce – ossia, diminuisce il valore di h – anche la velocità con cui l'acqua scorre fuori dal foro diventa sempre più piccola (vd. fig. a, a sinistra).

La soluzione più immediata al problema viene attribuita a Ctesibio, ingegnere e inventore della Grecia antica, vissuto intorno al III secolo a.C. Il suo orologio ad acqua, che supera in complessità e precisione la clessidra, viene descritto dallo storico e architetto romano Vitruvio nel suo *De Architectura* (30-15 a.C.).

Ctesibio introdusse un secondo recipiente tra la cisterna e il recipiente graduato, in cui si sarebbe



svuotamento di un contenitore



a.
La velocità di uscita dell'acqua da un contenitore con un foro alla base dipende da h secondo la legge di Torricelli. A sinistra h è variabile. Nel caso di un orologio ad acqua di Ctesibio (a destra), h viene mantenuta costante.



b.
L'orologio ad acqua
sul Pincio, nella Villa
Borghese a Roma.

mantenuto costante il livello dell'acqua proveniente dalla cisterna cosicché la fuoriuscita diretta al recipiente graduato avvenisse a velocità costante. Il punto chiave, quindi, è il recipiente centrale, che deve avere un piccolo foro da cui può fuoriuscire l'acqua in eccesso (vd. fig a, a destra).

Un orologio ad acqua di questo tipo si può riprodurre a casa o in classe, con materiali semplici da reperire, come descritto dalla scheda di lavoro sugli orologi ad acqua sul sito del progetto INFN Lab2Go (vd. https://lab2go.roma1.infn.it/doku.php?id=fisica:esperimenti_a_casa:orologio_ad_acqua).

L'orologio di Ctesibio descritto da Vitruvio, in realtà, è molto più complesso di quello appena descritto, perché collega la misura del tempo non all'osservazione della scala graduata nel recipiente "finale", ma alla presenza di un galleggiante in quest'ultimo, che sale al salire del livello dell'acqua. Il galleggiante è a sua volta collegato con una scala graduata che indica le ore del giorno e che si muove nel tempo, tenendo conto del passare dei giorni e della diversa durata della giornata nel corso dell'anno. Inoltre, l'orologio di Ctesibio tiene conto di accortezze tecniche come il materiale in cui erano realizzati i recipienti e i fori di uscita dell'acqua per evitare che si alterassero nel tempo a causa dell'erosione o del deposito di impurità e incrostazioni che avrebbero potuto modificare la velocità di fuoriuscita del liquido.

Oltre che in Egitto e in Grecia, le clessidre e poi gli orologi ad acqua si svilupparono in molte regioni del mondo antico con caratteristiche diverse. Orologi ad acqua pubblici erano presenti a Roma sin dall'età repubblicana, tradizione proseguita pare durante l'età imperiale. Nel mondo arabo, comparvero raffinatissimi orologi ad acqua con effetti spettacolari e piccoli automi, ad opera di Ibn al-Razzāz al-Jazarī, nel XII secolo d.C. In India testi vedici e opere astronomiche descrivono diversi strumenti, come ciotole perforate, utilizzati per misurare intervalli regolari di tempo, mentre in Cina le clessidre, apparse tra il II e il I millennio a. C., raggiunsero una notevole complessità, con galleggianti, ruote idrauliche, ingranaggi, fino alla costruzione della torre astronomica di Su Song nell'XI secolo.

Gli idrocronometri moderni sono molto accurati ed è possibile visitarne alcuni in Italia. Due sono a Roma, uno nel giardino del Pincio, all'interno del parco di Villa Borghese, e uno nel cortile di palazzo Berardi (in via del Gesù n. 62), al centro della città, entrambi costruiti dal frate Giambattista Embriaco (1829-1903) sul finire dell'800 e al momento inattivi. Di più recente costruzione è l'idrocronometro di Fondo, in Val di Non, terminato nel 2010 dall'orologiaio Giuliano Zanoni e posto nella piazza centrale del paese, in una teca di vetro dalla quale è possibile osservare il meccanismo in funzione.

[as] spazi

L'escape room delle particelle

di Alex Mattiussi



Per maggiori informazioni:

https://collisioni.infn.it/attivita_educative/hepscape oppure
<https://web.infn.it/hepscape/>

Come si racconta la fisica delle particelle a una classe delle scuole primarie e secondarie, senza formule spaventose ma non rinunciando al rigore scientifico? La risposta la si può trovare in HEPscape! (High Energy Physics escape room) che nasce proprio da questa sfida: trasformare concetti complessi della fisica moderna in un'esperienza coinvolgente, collaborativa e memorabile. Il progetto, promosso dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) nell'ambito delle attività educative e di divulgazione, è pensato in particolare per il mondo della scuola – ma adatto a qualsiasi genere di pubblico – e per dialogare con i linguaggi delle nuove generazioni. HEPscape! è una *escape room* scientifica in cui i partecipanti sono chiamati a risolvere enigmi, decifrare indizi e collaborare per “uscire” dalla stanza entro un tempo limite. Ogni prova è costruita intorno a temi chiave della fisica delle alte energie: le particelle elementari, le forze fondamentali, gli acceleratori, i rivelatori e il metodo scientifico. Non si tratta di un semplice gioco a tema, ma di un percorso didattico strutturato, progettato da ricercatrici e ricercatori dell'INFN insieme a esperti di didattica e comunicazione della scienza. Il cuore del progetto è l'apprendimento attivo. Gli studenti e il pubblico

generico non ricevono passivamente informazioni, ma sono stimolati a porsi domande, formulare ipotesi, verificare soluzioni e prendere decisioni di gruppo. In questo modo, HEPscape! restituisce un'immagine autentica del lavoro scientifico: una pratica collettiva fatta di confronto, tentativi ed errori, creatività e metodo. L'esperienza favorisce inoltre lo sviluppo di competenze trasversali, come il *problem solving*, la comunicazione e la gestione del tempo. Un altro aspetto centrale è l'accessibilità. HEPscape! è pensato per essere adattabile a diversi livelli scolastici, tipi di pubblico e contesti. Il progetto presta particolare attenzione al linguaggio inclusivo e alla rappresentazione delle professioni scientifiche, mostrando la varietà di ruoli e competenze presenti nella ricerca contemporanea.

Con HEPscape! l'INFN rinnova il proprio impegno verso le scuole, sperimentando forme innovative di dialogo tra ricerca e società. In un'epoca in cui la scienza è sempre più centrale nelle scelte collettive, offrire agli studenti strumenti per comprenderla – e magari appassionarsene – è una responsabilità fondamentale. E se per farlo bisogna “scappare” da una stanza piena di enigmi, tanto meglio.

[as] lampi

Tratto da “Cinque dix” di Gioele Dix (alias Davide Ottolenghi), 1995

(Annunciato da un festoso stacco musicale, entra sorridente il professor Nosave. Indossa un vistoso gilet fiorato sopra una sgargiante camicia. Ha grandi occhiali da vista con una montatura in tartaruga. Parla con forte accento argentino.)

Buonasera signore e signori!

Io me presenta. Me chiama Ruben Nosave, io è un professore en la università en Buenos Aires e me ocupa del SPORT, già de molto tempo en el mio paese, en l'Argentina, io è un docente de sport, io è un ciensiato (*scienziato*) de questo argomento. E io va già dicendo de molto tempo en el mio Paese, e adeso anche en el vostro meraviglioso Paese, che EL SPORT FA MALE! Sì, se deve avere el coraggio de dire, en questa epoca che tutti vuole andare en palestra e stare en forma, se deve avere el coraggio de dire che el sport FA MALLISSIMO!

El sport fa male FISICAMENTE! Fa male a la gamba, fa male a la schiena, fa male al toracce (*fa male al torace*), fa male le ossa, fa male al polmonne, fa male al cuore, ogne sport se specialissa de massacrarte un organo en al corpo, ma globalmente el sport fa male! Ma sopra de tuto io vuole dire che el sport fa male EL CERVELO! Sì, se tu te dedica costantemente a un sport, se diventa TOTALMENTE EMBECILE!

[...]

Io sarà molto sincero ora. Se deve respetare tute le persone e io respeta anche el sportivo professionista. Pero el professionista è un uomo disturbato psichicamente, è un uomo che non ha reasione normale de fronte a le cose normale. Io ve fa un esempio riguardante profesionisti del cì e voi capirà.

Tu prende una gara de slalom en la televisione, sì? Cenquanta concurente (*cinquanta concorrenti*), el primo arriva primo, ultimo arriva ultimo, questo è logico, niente de capire.

Ma tu guarda el tiempo che mete (*il tempo che impiegano*).

El primo mete, per esempio, un minuto, dodici secondi... e... e qualcosa... Un qualcosa che non è niente! È un tempo che normalmente non me intereserebbe de calcolare, è meno de un secondo, non se fa niente en quel tempo, neanche un microbo fa una passeggiata, sì?

El cenquantesimo, l'ultimo, mete: un minuto, dodici secondi... quasi tredici... ma non ancora tredici neanche lui!! Sta tutti afulati fra el dodicesimo e el tredicesimo secondo! E ce sarebbe spazio per altri cinquanta! Ultimo è arivato, rispetto del primo, un quarto de secondo en ritardo!

Tu va a parlare con lui alla fine de la gara, lui è un uomo destruto totalmente, ha falito el suo scopo. Lui piange, lui se arabia, lui dice continuamente, maniacalmente: “Io è in ritardo! Io è arrivato in ritardo!”

Ma non è una reazione normale! Ma ve sembra un ritardo, un quarto de secondo?! Se io arrivasse un quarto de secondo en ritardo ai miei appuntamenti io sarebbe un uomo felice! Io ariva sempre con due ore di ritardo. Ma è felice lo stesso perché me ne frega! Crasie signore e signori! Arrivederci! Ala prosima volta!

(Esce sorridendo e agitando le braccia.)

[as] segni



Assenza di moto in deserti cristallizzati. Assenza di battito nei cuori spezzati. Tempo, illusoria ed evanescente presenza.

“Assenza”, pittura acrilica su carta, illustrazione e testo di Alessandro Nagar



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

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

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

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

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

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

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

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



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

www.infn.it



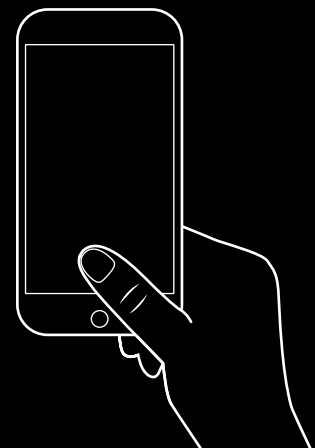
Sul sito www.asimmetrie.it vengono pubblicate periodicamente notizie di attualità scientifica.

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

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

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

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





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it