Le Tecnologie Quantistiche

Nuovi occhi per la fisica fondamentale?

Valter Bonvicini

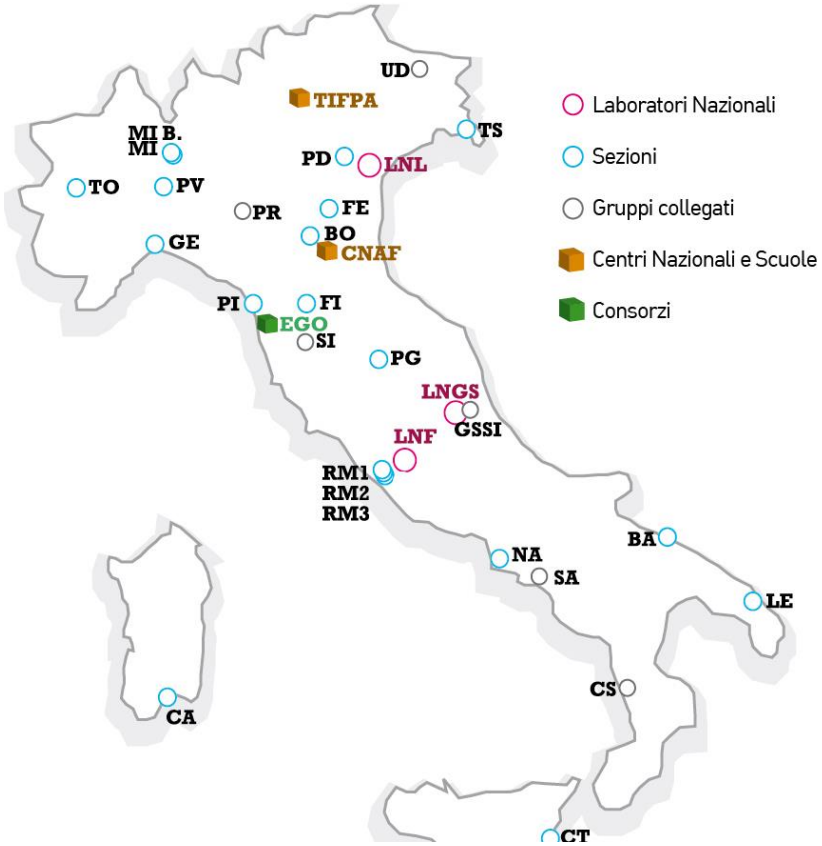
INFN – Sezione di Trieste

Genova, Festival della Scienza 2026

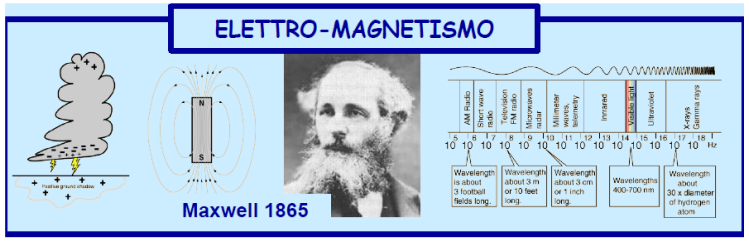
Contenuti del seminario

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

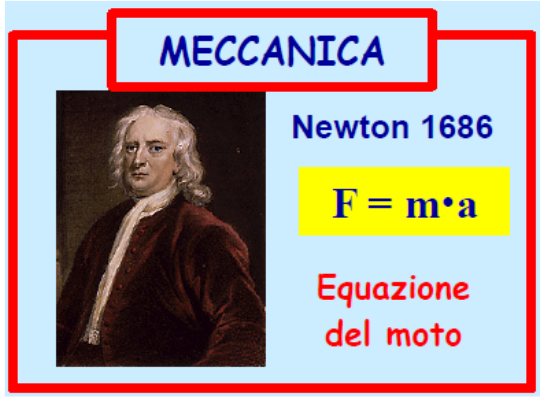
- L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) è l'Ente pubblico nazionale di ricerca dedicato allo studio dei costituenti elementari della materia e delle leggi fondamentali dell'universo. La sua missione scientifica è "promuovere, coordinare ed effettuare la ricerca scientifica nel campo della fisica nucleare, subnucleare, astroparticellare e delle interazioni fondamentali, nonché la ricerca e lo sviluppo tecnologico pertinenti alle attività in tali settori".
- L'interesse dell'INFN nelle Tecnologie Quantistiche è duplice:
  - Adottare tutte quelle tecnologie e conoscenze (sia relative al calcolo quantistico che alla sensoristica) che permettano di migliorare la ricerca in fisica fondamentale
  - Contribuire allo sviluppo delle Tecnologie Quantistiche con le conoscenze derivanti dalla fisica delle particelle e con la realizzazione di grandi infrastrutture di ricerca.



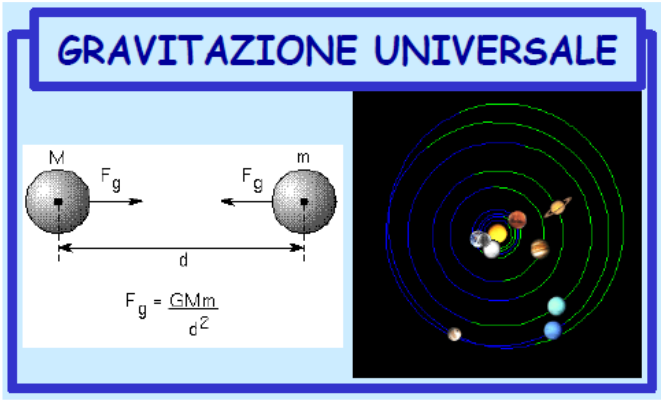
La fisica alla fine del XIX secolo

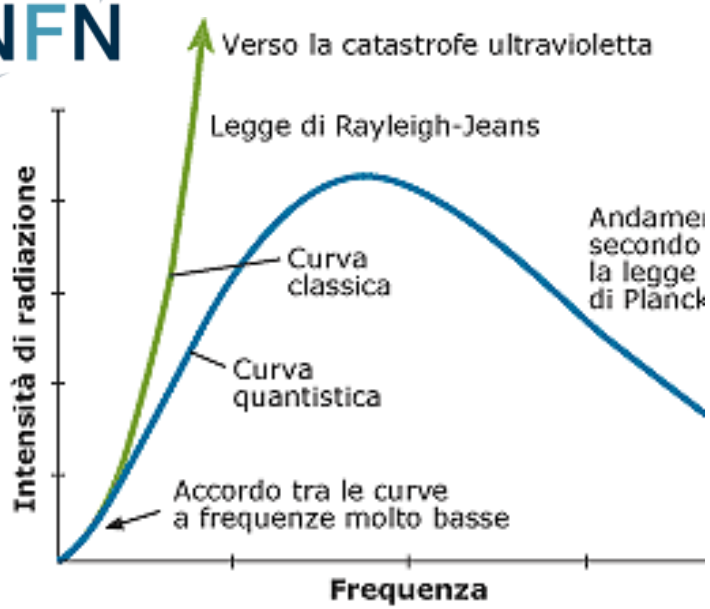


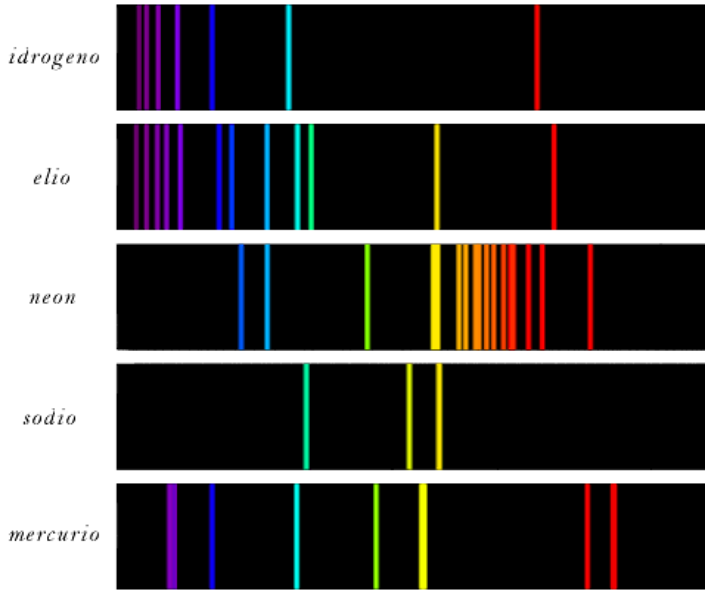
- Verso la fine del XIX secolo la fisica aveva raggiunto un più che soddisfacente livello di sviluppo teorico e sperimentale. Essa permetteva di descrivere praticamente tutti i fenomeni naturali allora conosciuti.

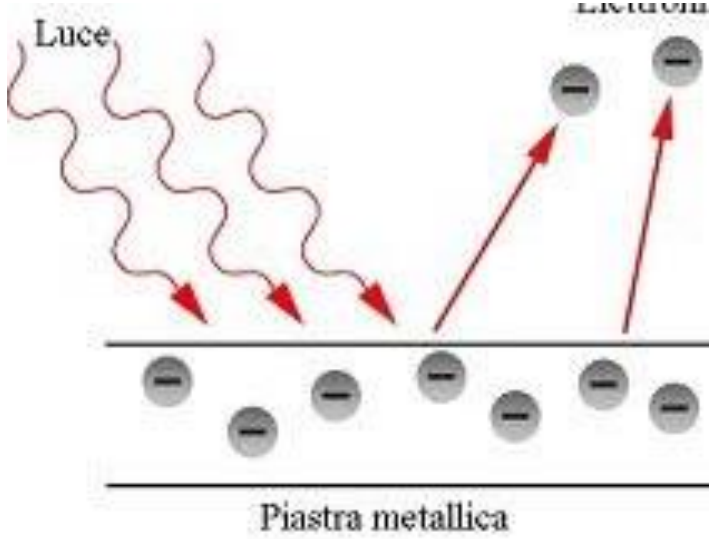


- Questa serie di successi aveva trovato sempre maggiori applicazioni nel campo tecnologico e industriale.









La crisi della fisica classica

- Nonostante tutto questo, c'erano alcune contraddizioni fra previsioni teoriche e dati sperimentali che la fisica ottocentesca non riusciva a spiegare. Eccone alcuni:
  - Spettri a righe nell'emissione e assorbimento dei gas
  - Stabilità degli elementi
  - Spettro del corpo nero
  - Effetto fotoelettrico

Alcuni concetti chiave della Meccanica Quantistica

- La MQ è un cambiamento paradigmatico della fisica che entra in gioco quando abbiamo a che fare con fenomeni che avvengono su scale di energia, di tempi e di masse molto piccole, come nel mondo subatomico.
- Connessione universale tra energia e tempo: h (costante di Planck), $h \approx 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s (N.B.: si usa spesso la costante di Plack ridotta, $\hbar = h/2\pi$)
- **Quantizzazione dell'energia**: l'energia non è assorbita o emessa in modo continuo, ma in pacchetti discreti chiamati quanti (introdotti da Max Planck nel 1900, con $E = h\nu$)
- **Dualismo onda-particella**: oggetti come la luce (fotoni) e gli elettroni si comportano sia come particelle sia come onde a seconda di come vengono osservati o misurati (ipotesi di De Broglie).

Alcuni concetti chiave della Meccanica Quantistica

- **Principio di sovrapposizione degli stati**: un sistema quantistico può trovarsi contemporaneamente in una combinazione lineare di più stati possibili (come nel celebre esperimento mentale del gatto di Schrödinger) fino al momento della misurazione.
- **Collasso della funzione d'onda**: quando si effettua una misurazione, lo stato di sovrapposizione "collassa" in un unico risultato certo, governato da leggi probabilistiche e non più dal determinismo classico.
- **Principio di indeterminazione di Heisenberg**: non è possibile determinare con precisione assoluta e simultanea determinate coppie di grandezze fisiche coniugate, come la posizione (x) e la quantità di moto (p) di una particella, ma vale $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$)

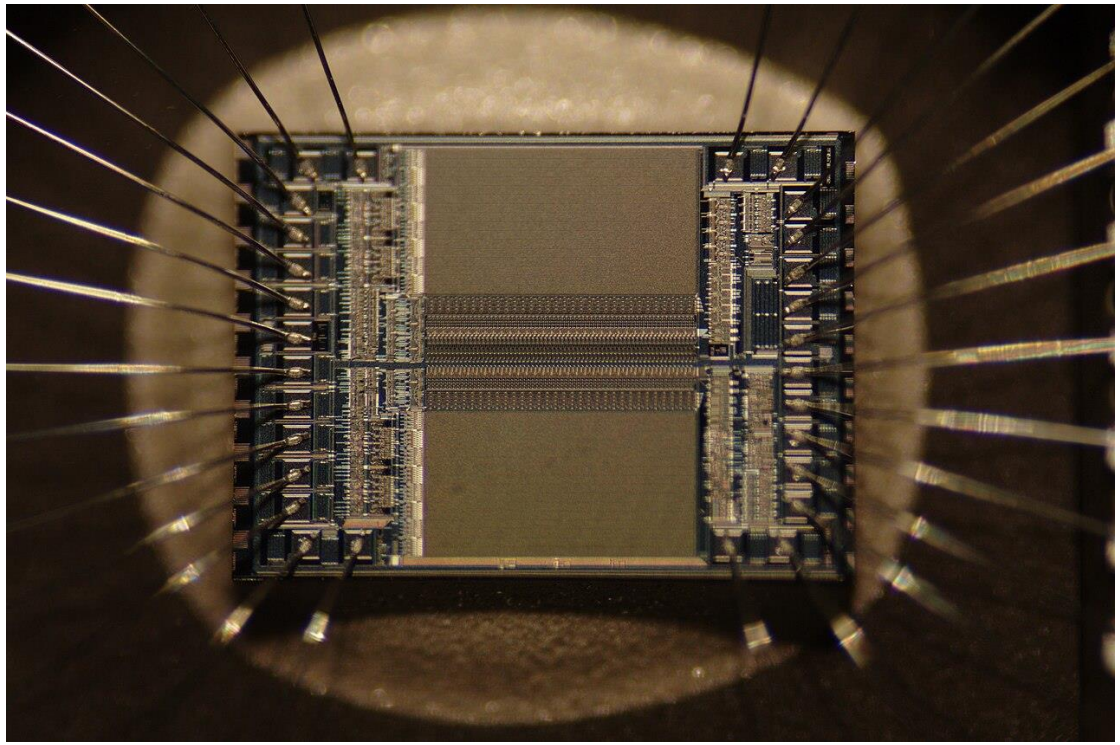
La prima rivoluzione quantistica

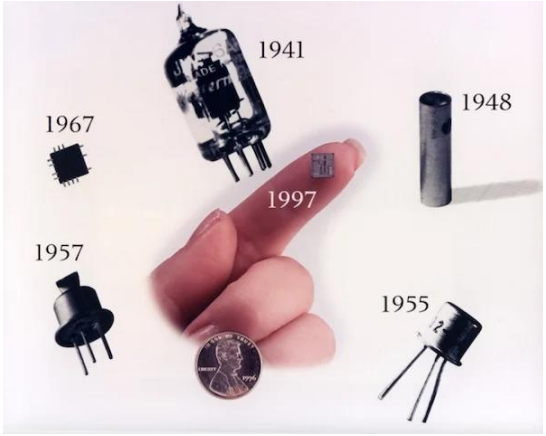
- La Meccanica Quantistica, basata su un formalismo matematico che incorpora il dualismo onda-particella, ha permesso di spiegare moltissimi fenomeni fisici, anche molto sottili.
  - **La stabilità della materia e la struttura atomica e nucleare**
  - **L'interazione radiazione-materia**
  - **I legami chimici e le proprietà elettriche e termiche dei corpi**
  - **La conduzione della corrente elettrica, le differenze tra conduttori e isolanti**

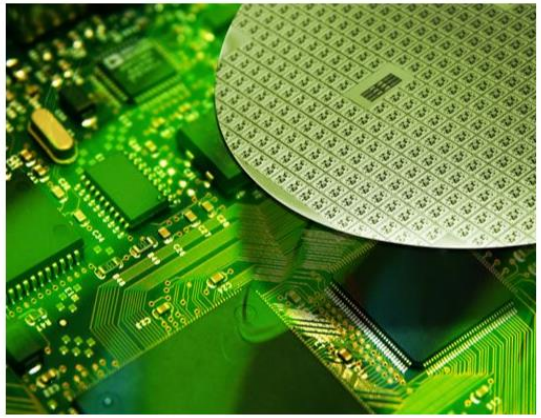
- Inoltre, grazie alla comprensione profonda della materia resa possibile dalla fisica quantistica, i fisici hanno inventato alcuni dispositivi che hanno rivoluzionato la nostra vita. Alcuni esempi di seguito.

La prima rivoluzione quantistica

Il transistor a semiconduttore ed i circuiti integrati





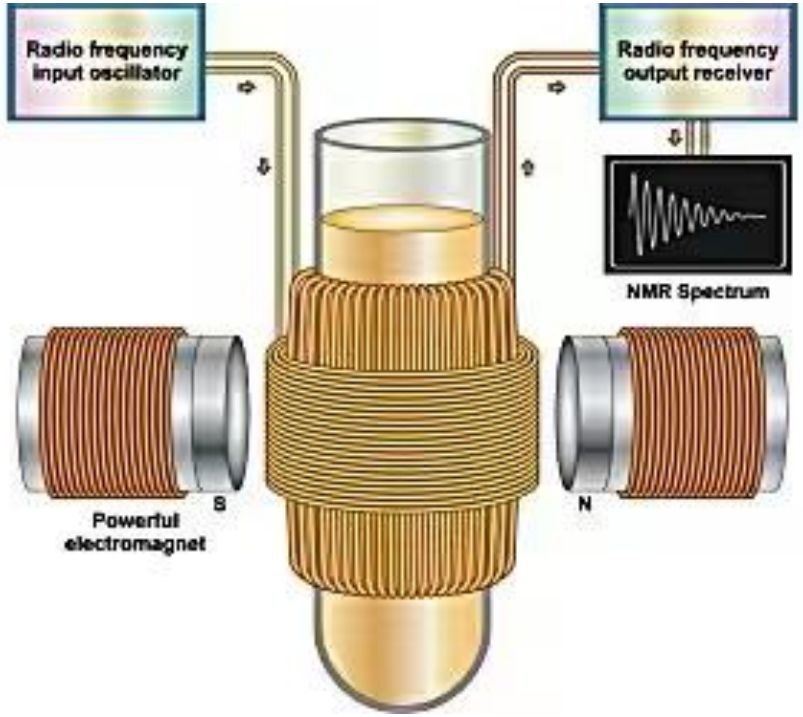


La prima rivoluzione quantistica

Il laser

La prima rivoluzione quantistica

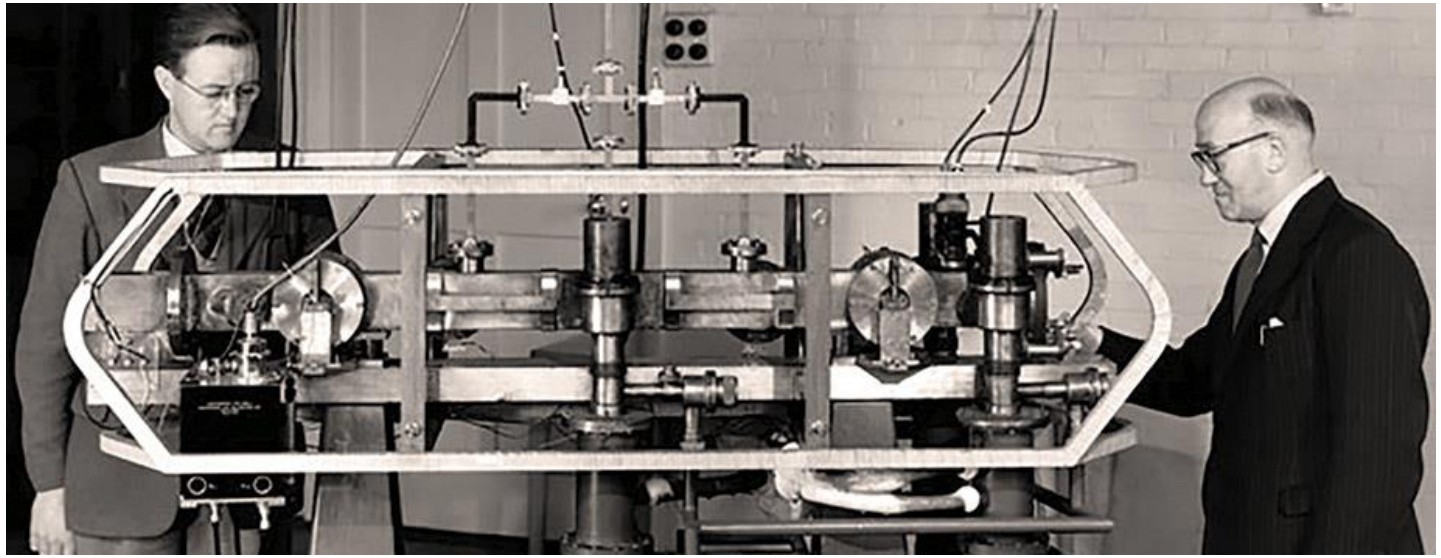
La Risonanza Magnetica Nucleare

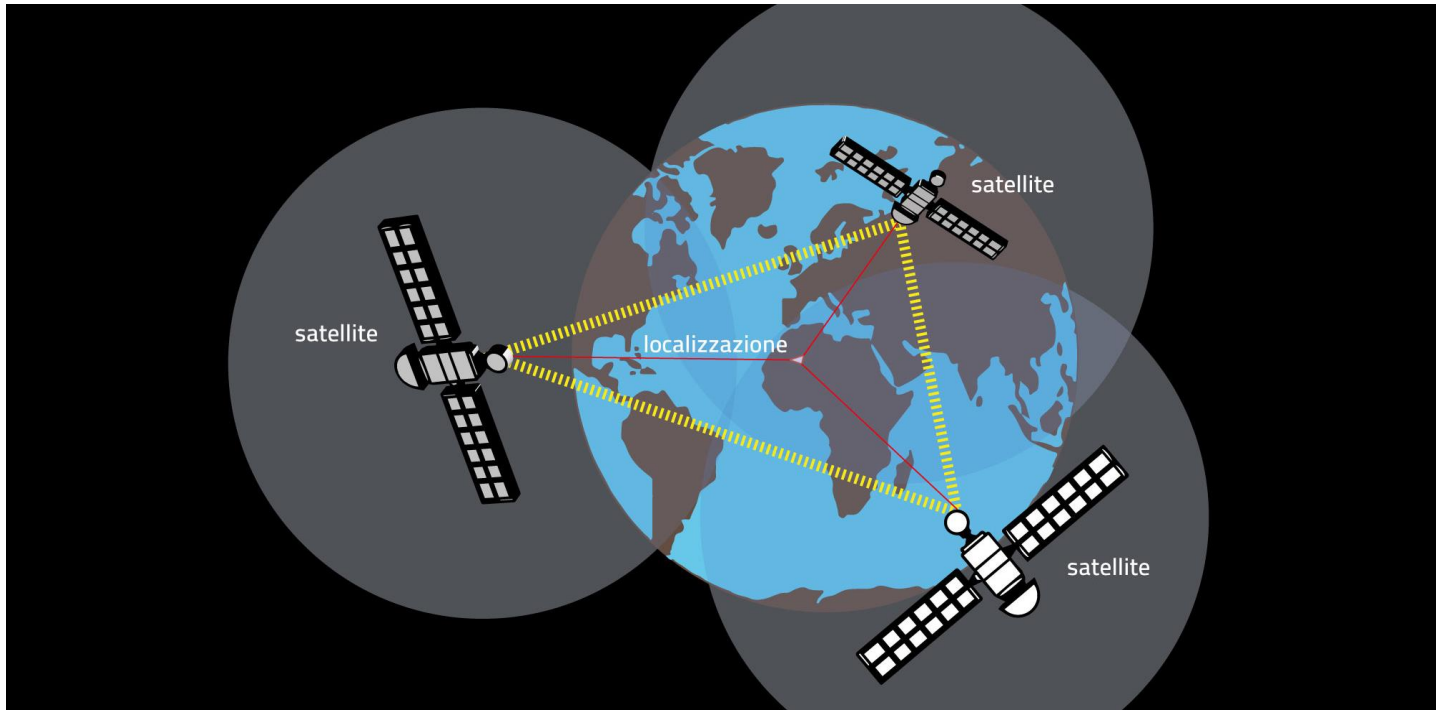


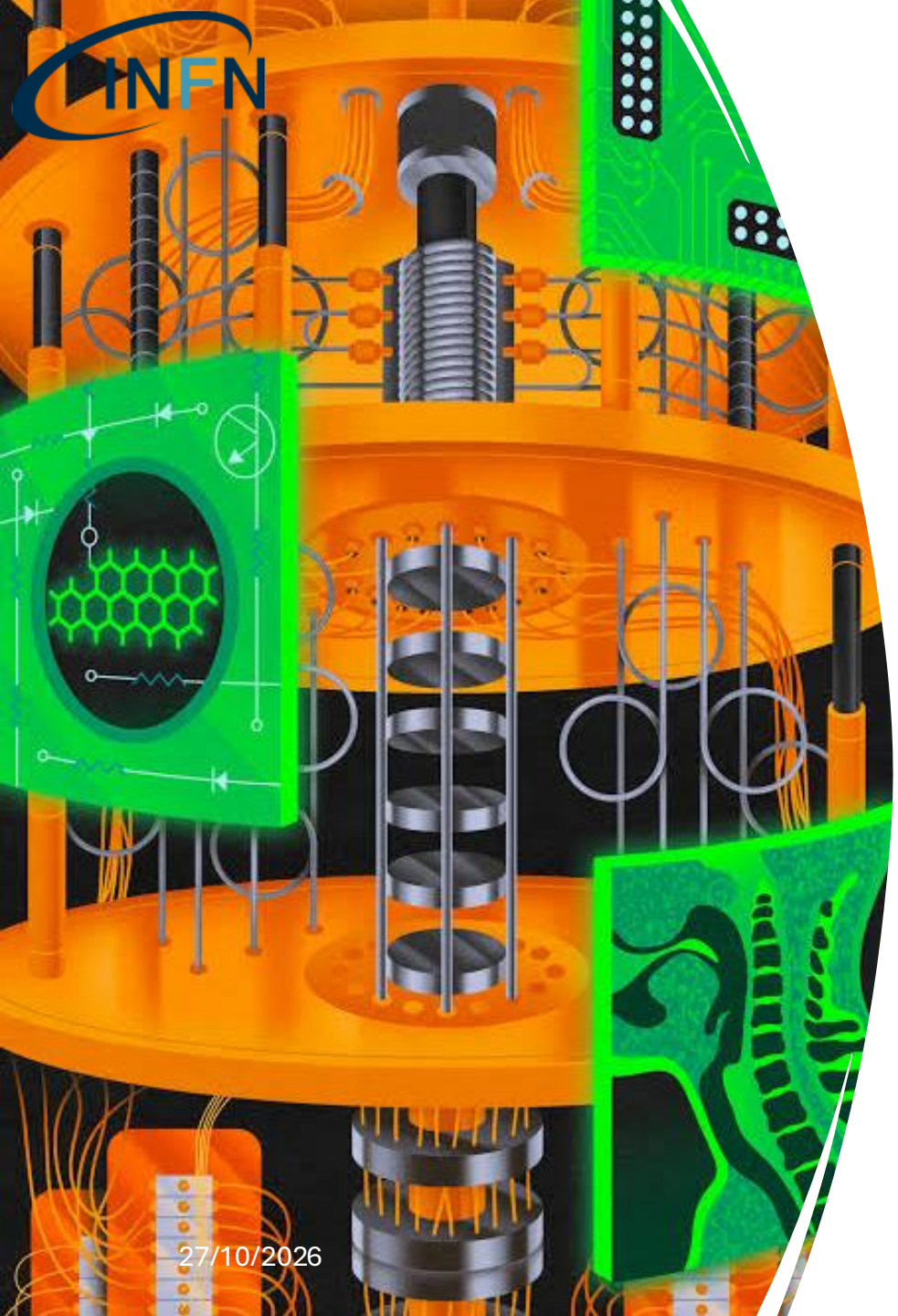
La prima rivoluzione quantistica

- Gli orologi atomici…

… e il GPS





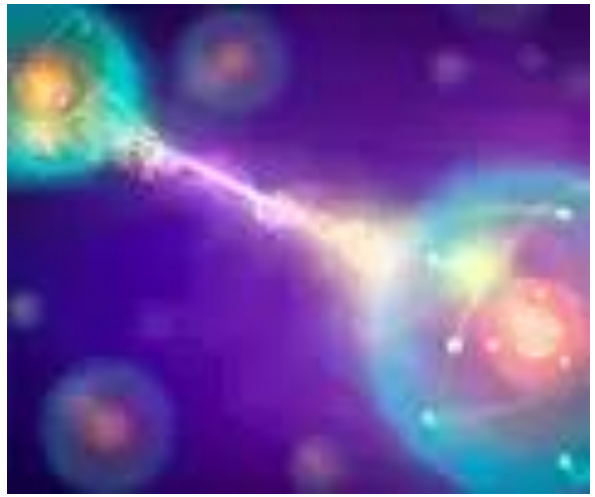


La seconda rivoluzione quantistica

- Con tale termine si intende quella relativa all'uso della cosiddetta "informazione quantistica". Questa è basata su due elementi fondamentali: uno è l'"entanglement", l'altro è la capacità di manipolare singoli oggetti quantistici.
- Entanglement: in un sistema di due o più particelle, lo stato quantistico di ciascuna particella non può essere descritto indipendentemente dallo stato delle altre, anche se le particelle si trovano a grandissima distanza tra loro.
- Seconda rivoluzione quantistica:
  - Quantum Computing
  - Metrologia Quantistica
  - Informazione Quantistica
  - Sensori Quantistici

Entanglement quantistico

- L’entanglement è un fenomeno fisico in cui due o piú particelle sono correlate in modo tale che lo stato di una di esse influenza istantaneamente le altre, indipendentemente dalla distanza tra loro
- Proprietà chiave:
  - Non-località: le particelle restano connesse anche a grande distanza, senza che vi sia alcun collegamento fisico o segnale tra loro
  - Correlazione istantanea: la misura dello stato di una particella immediatamente determina lo stato dell’altra
  - Non vi è trasmissione di dati o segnali, non viola la teoria della relatività

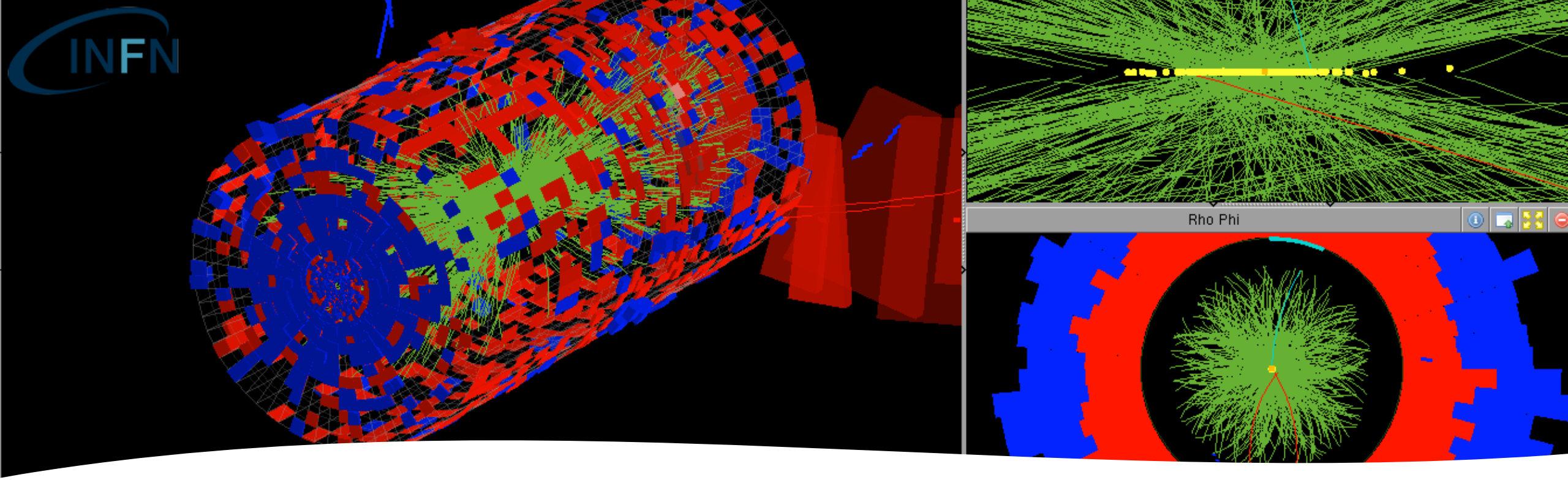


Computer quantistico

- Si tratta di elaboratori (ancora in fase di sviluppo) il cui funzionamento sfrutta le leggi della meccanica quantistica.
- Computer classici: adottano come unità minima di informazione il bit, che può assumere soltanto due valori (convenzionalmente chiamati 0 e 1).
- Computer quantistici: anch'essi usano un'unità di informazione a due livelli, il qubit, ma con una differenza fondamentale: mentre il bit può assumere soltanto uno dei due valori permessi in un dato momento, il qubit può essere una combinazione di entrambi, in virtù del principio di sovrapposizione. Inoltre, grazie all'entanglement, ogni qubit può essere correlato a un altro, moltiplicando così la potenza computazionale.

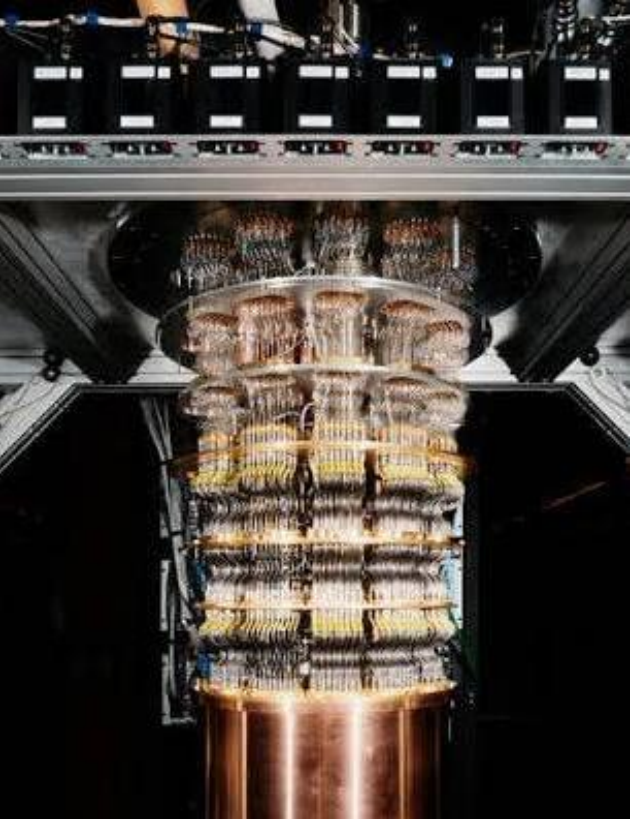
Computer quantistico

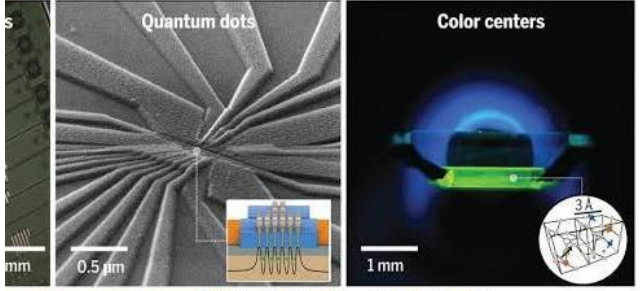
- A cosa serve:
  - Simulare molecole e sistemi chimici, accelerando la scoperta di nuovi farmaci, materiali avanzati, batterie più efficienti…
  - Risolvere problemi complessi di ottimizzazione: gestione di reti logistiche enormi (distribuzione dell'energia, traffico aereo, gestione delle scorte…)
  - Operare come «acceleratore» in sinergia con i computer classici per affrontare specifici problemi complessi (Quantum Machine Learning)
- A cosa non serve:
  - Non sostituisce il PC di casa per gli usi quotidiani (navigare il web, scrivere documenti, giocare ai videogiochi…)
  - Non è una macchina universale: non accelera i database comuni. Da' un vantaggio concreto solo per specifiche categorie di problemi (ottimizzazione, simulazioni molto complesse, crittografia…)
  - L'implementazione hardware di un computer quantistico è estremamente costosa e complessa

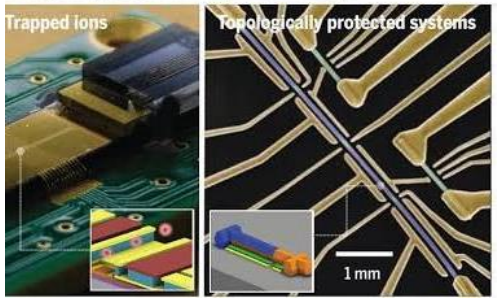


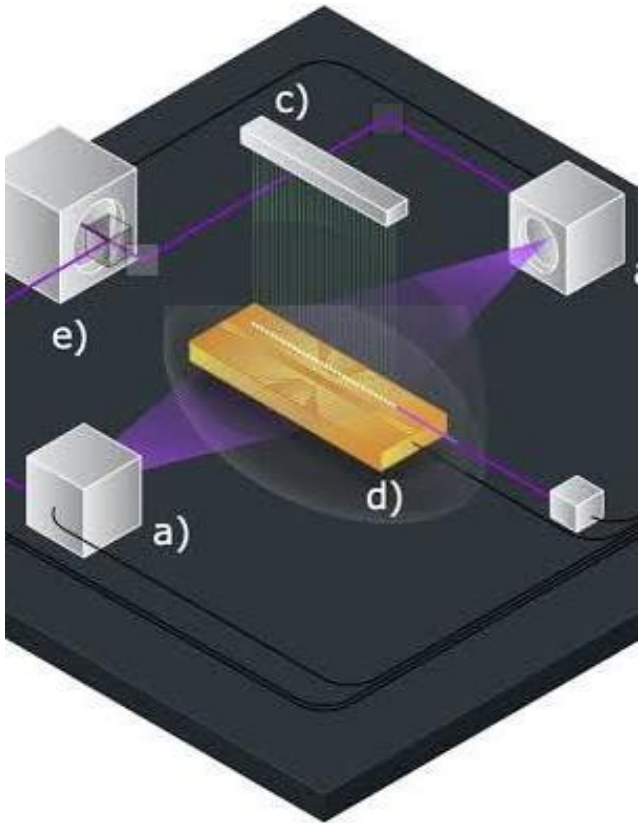
Quantum computing e fisica delle particelle elementari

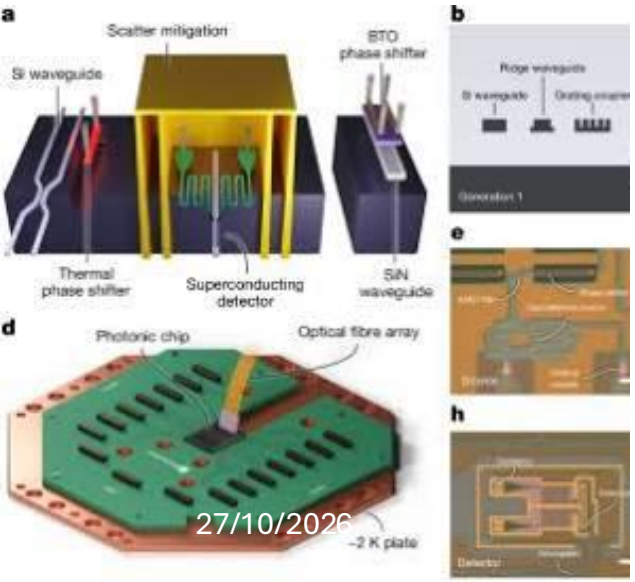
- Applicazione della sinergia tra computer classici e algoritmi quantistici per risolvere problemi specifici: ad esempio migliorare e velocizzare la ricostruzione delle tracce delle particelle prodotte negli esperimenti al grande collisionatore protone-antiprotone LHC al CERN di Ginevra.





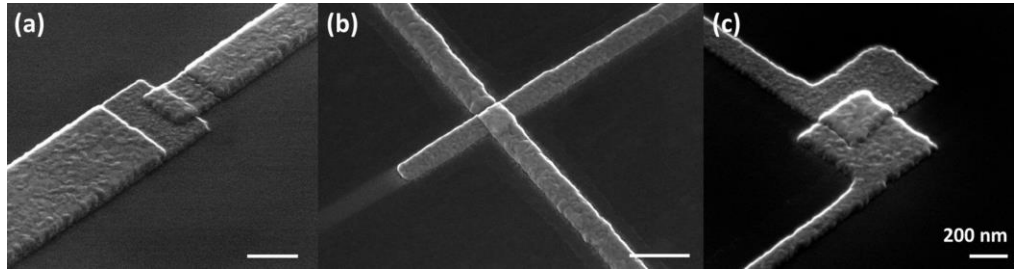




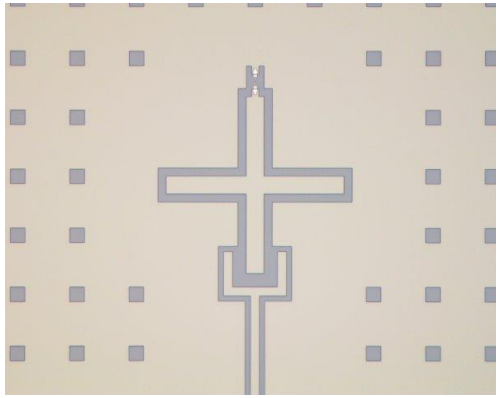


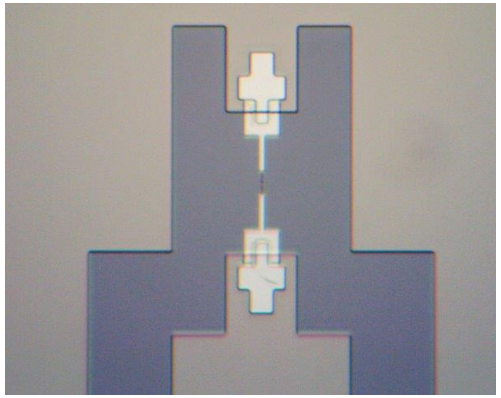
Computer quantistici: diverse piattaforme tecnologiche

- Qubit superconduttivi
- Sistemi Fotonici
- Ioni intrappolati
- Atomi neutri freddi
- Silicon spin/Quantum dots

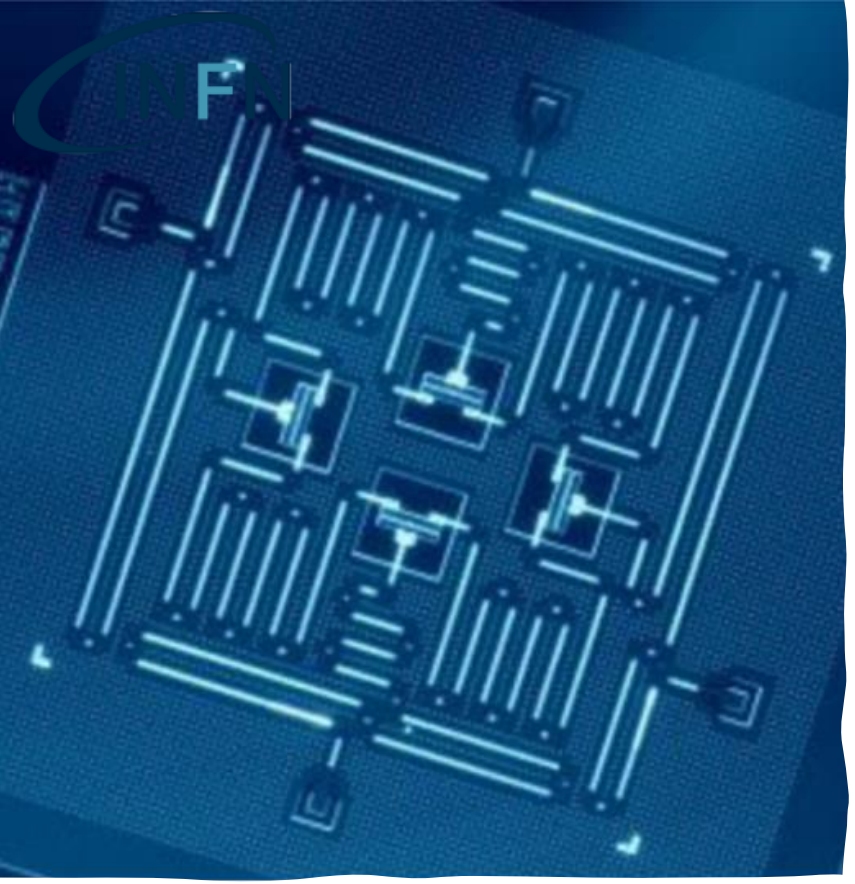


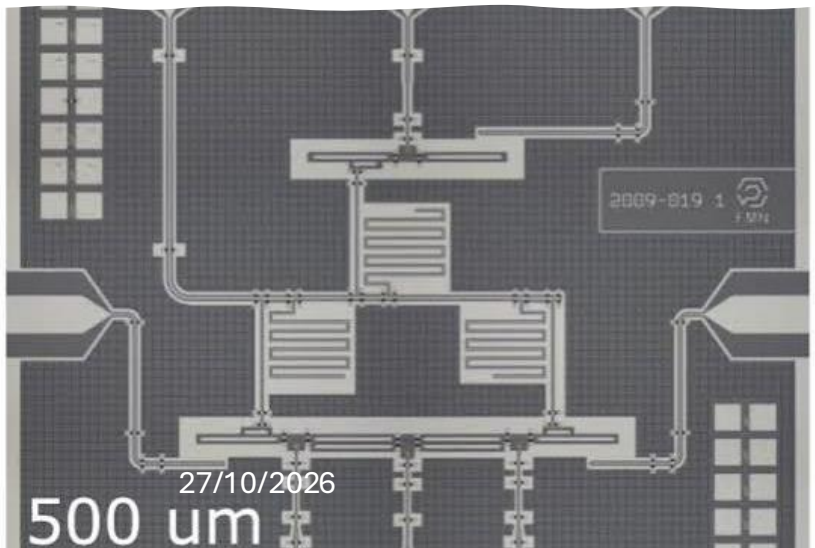
Qubit superconduttivi





- Una delle piattaforme tecnologiche utilizzate per la realizzazione di computer quantistici è quella **superconduttiva.**
- La superconduttività è quell'effetto, tipicamente quantistico, per il quale la resistenza di alcuni materiali si annulla al di sotto di una certa temperatura critica T_c (molto bassa).
- Un qubit superconduttivo si basa su un microcircuito (raffreddato a temperatura prossima allo zero assoluto) che agisce come un «atomo artificiale» con due distinti e controllabili stati quantistici.



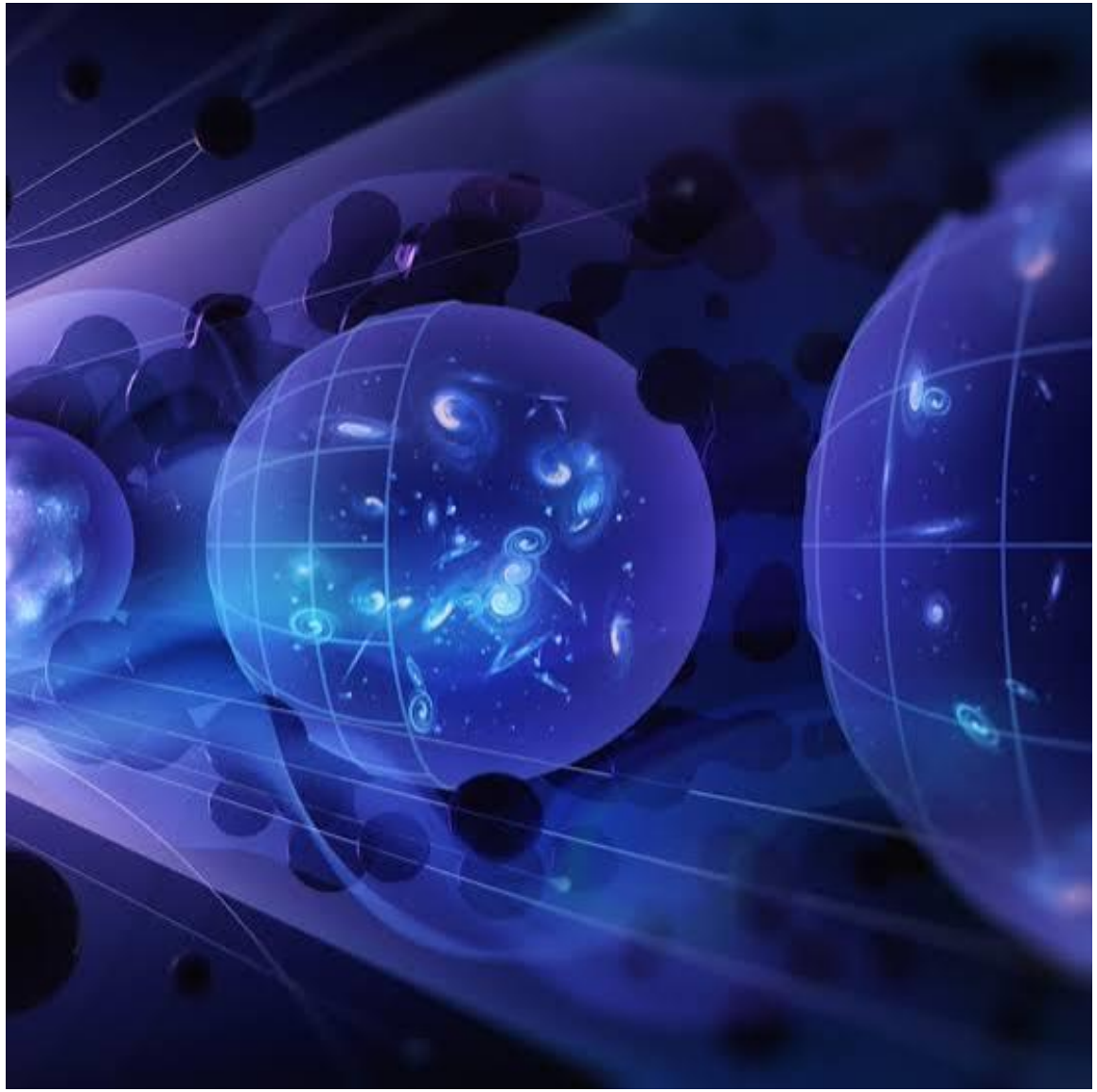


Qubit superconduttivi

- Fondamentalmente, è un circuito risonante LC superconduttivo in cui l'induttanza lineare L è sostituita da un dispositivo chiamato «giunzione Josephson»
- Il qubit può essere controllato da impulsi opportuni a radiofrequenza (microonde) sintonizzati esattamente sul gap energetico tra 0 e 1. Regolando le caratteristiche degli impulsi, si può far transire il qubit o metterlo in uno stato di sovrapposizione.

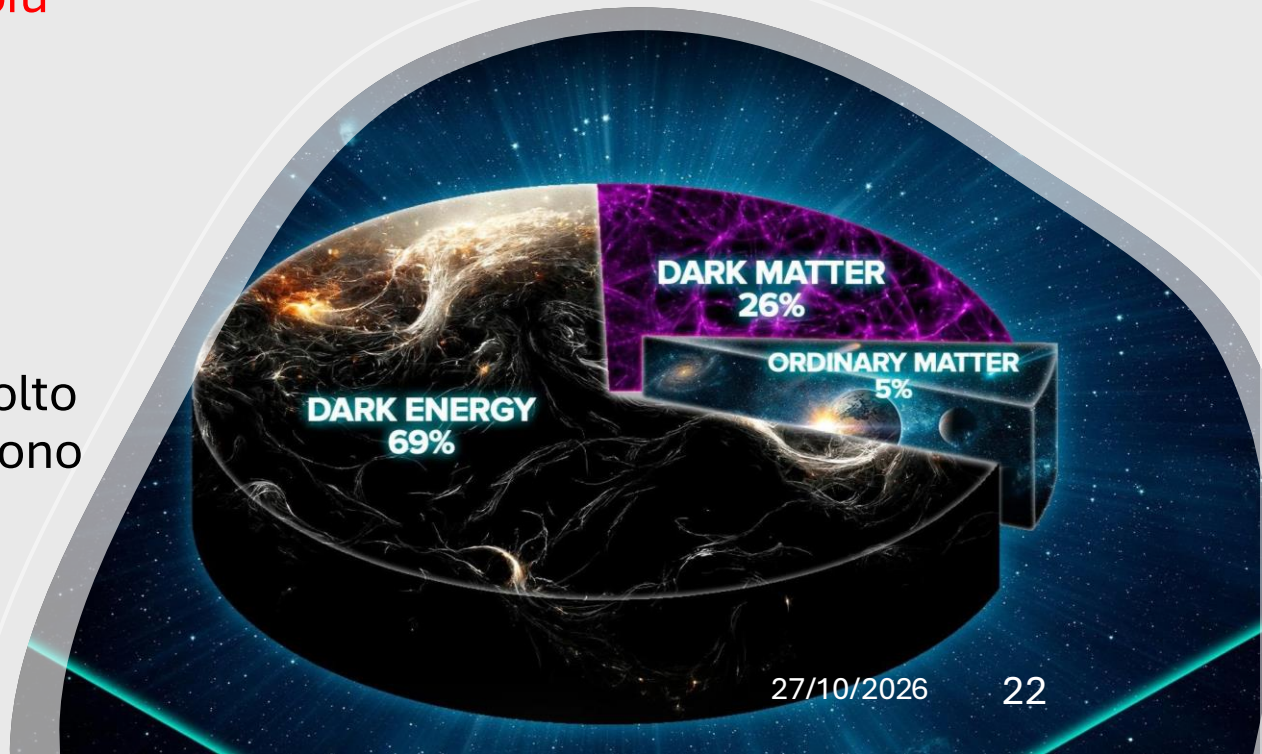
Quantum sensing

- In generale, la sensoristica quantistica usa la manipolazione e la lettura di stati quantistici (livelli energetici negli atomi, stati di spin, circuiti superconduttivi, ecc.) per spingere la misurazione di grandezze fisiche molto al di la' dei limiti di sensitivita' tradizionali.
- Le applicazioni sono molteplici, vedremo nelle prossime trasparenze alcuni esempi di come le tecnologie quantistiche aprano prospettive straordinarie nella fisica fondamentale



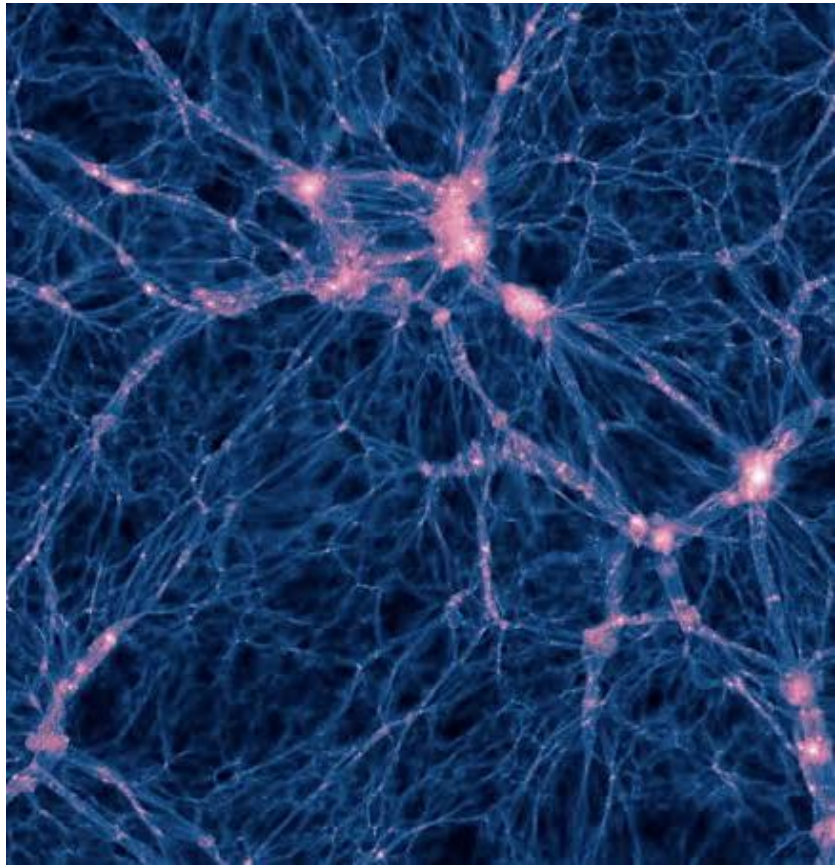
La Materia Oscura: uno dei grandi problemi aperti della fisica fondamentale

- Ci sono effetti gravitazionali che noi osserviamo, per esempio nella velocità di rotazione delle galassie, che non possono essere spiegati dalla relatività generale se non assumendo che ci sia nell'universo molta più materia di quella che noi normalmente osserviamo ("materia barionica").
- La materia barionica (quella ordinaria) costituisce solo il 5% della materia totale
- Questa materia (ipotetica) è chiamata "oscura" perché non interagisce, se non molto debolmente, con la materia ordinaria e ci sono svariate ipotesi circa la sua natura.



La Materia Oscura

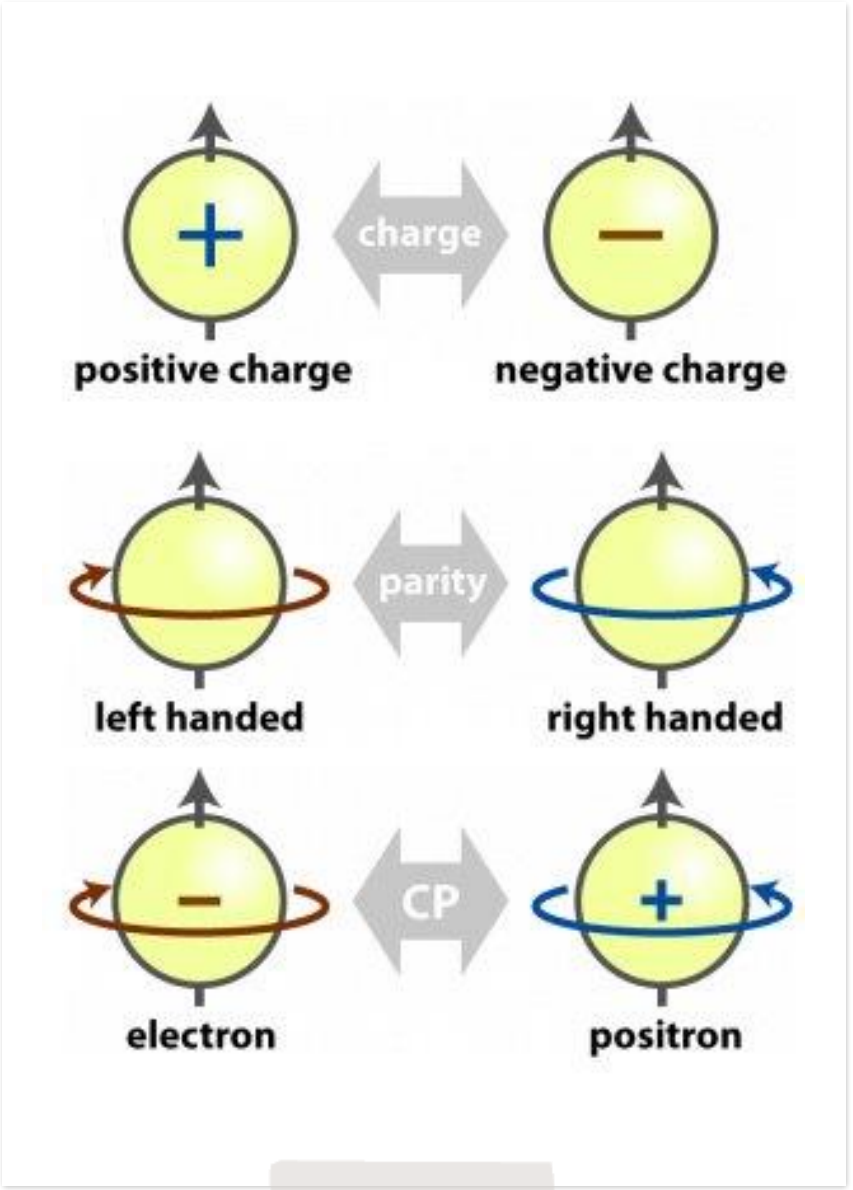
- Da cosa è costituita la Materia Oscura? Non lo sappiamo. Varie ipotesi:
  - **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particles), particelle pesanti che interagiscono solo tramite gravità e forza nucleare debole.
  - **Assioni** (e Axion-like particles), particelle leggerissime che si comportano più come onde che come corpuscoli.
  - **Buchi neri primordiali**, buchi neri nati nelle primissime fasi del Big Bang, durante la cosiddetta fase dell'inflazione.
  - … e molte altre…



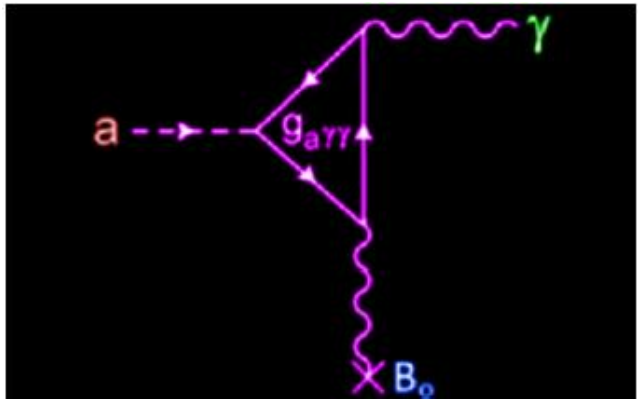
Ipotesi: Materia Oscura assionica?

- Assioni: particelle ipotetiche (molto leggere) ipotizzate per spiegare la non violazione della simmetria CP (Carica – Parità) nelle interazioni forti (strong CP problem)

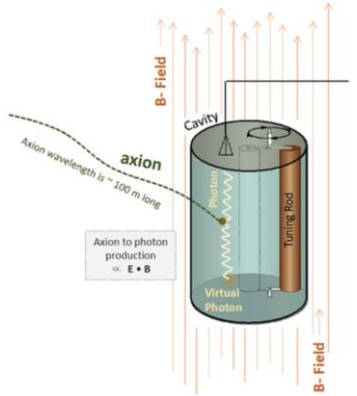
- Alcuni modelli teorici suggeriscono che la nostra galassia sia circondata da un alone di Materia Oscura. L'assione è attualmente considerato uno dei principali candidati per spiegare la composizione di questa materia.



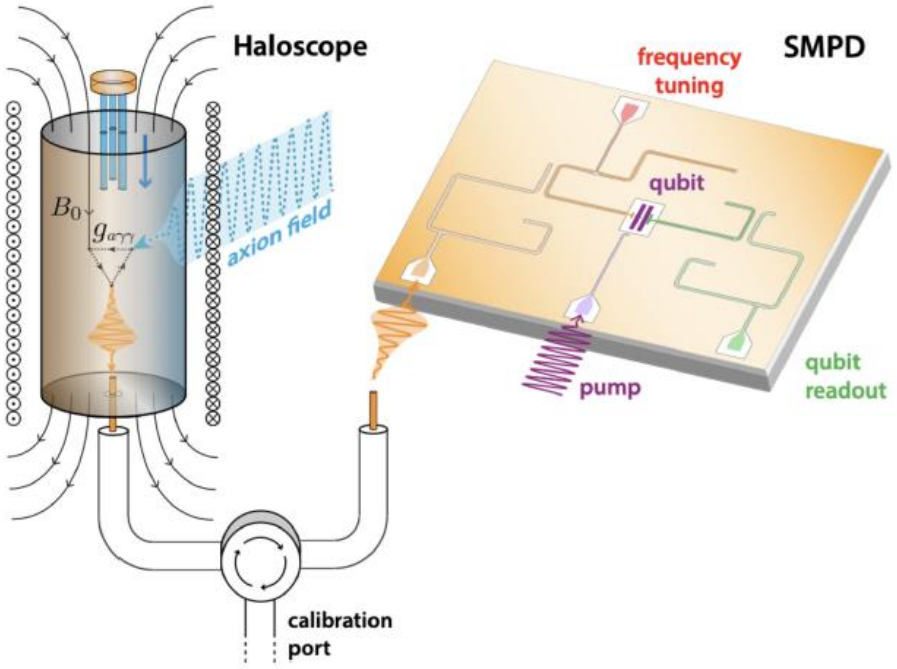
Come rivelare gli assioni?



- Per cercare di rivelare queste particelle, si usano dei rivelatori chiamati “aloscopi”, in cui gli assioni si convertirebbero in fotoni all’interno di una cavità risonante a radiofrequenza immersa in un campo magnetico molto intenso e operate a temperature ultra-criogeniche, a qualche decina di millikelvin, appena sopra lo zero assoluto.
- Per leggere il segnale che si genererebbe nella cavità, tradizionalmente, si utilizzano i migliori amplificatori lineari esistenti (per esempio i JPA) che lavorano al limite quantistico (SQL), un rumore di fondo ineliminabile previsto dal principio di indeterminazione di Heisenberg. Alle frequenze di interesse (sopra i 5 GHz), il rumore quantistico domina e rende estremamente difficile e lenta la scansione in frequenza per la ricerca degli assioni nella regione di interesse.



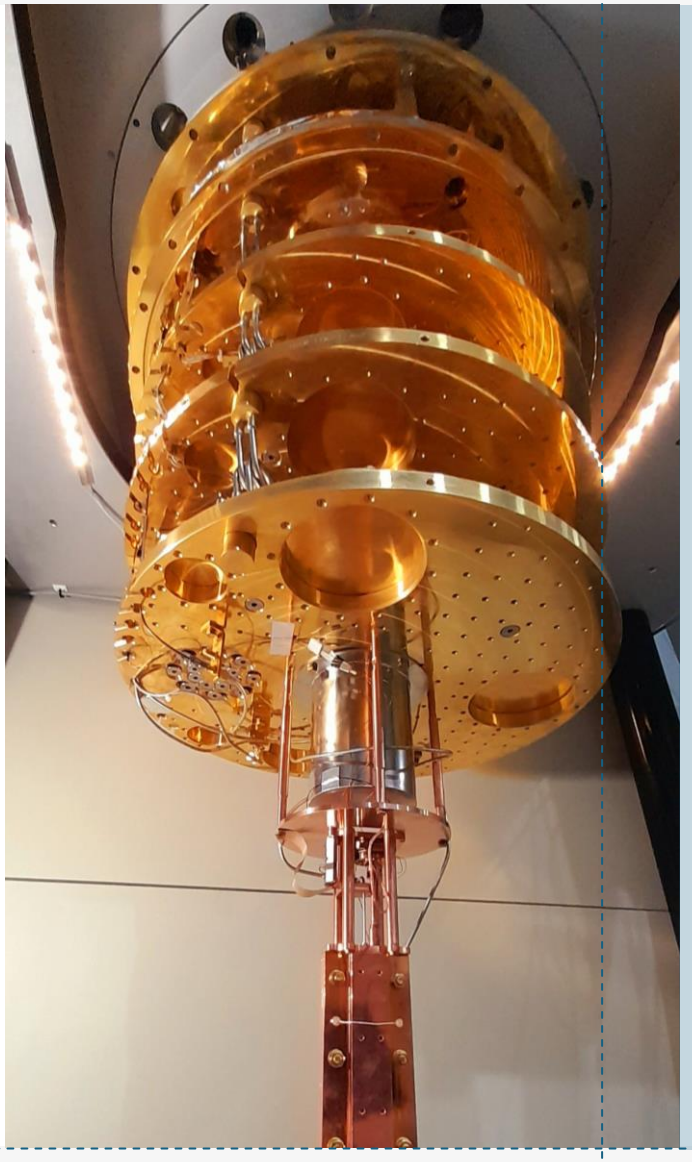
Come rivelare gli assioni? Con i qubit!



- Un salto (quantico) in avanti: un dispositivo chiamato SMPD (Single Microwave Photon Detector) conta i singoli fotoni anziché amplificare l'ampiezza dell'onda, evitando lo SQL!
- Perché è difficile rivelare singoli fotoni nelle microonde? Perché la loro energia è estremamente piccola, circa 50000 volte più piccola di quella di un fotone nella banda visibile.
- L'idea è quella di utilizzare i qubit superconduttivi, che sono sostanzialmente atomi artificiali. Questo ci permette di ottenere un guadagno significativo nella velocità della ricerca degli assioni con gli aloscopi, aumentando di un fattore 20 la velocità di rivelazione.
- Questa è una dimostrazione di una nuova applicazione per le tecnologie quantistiche, che stanno rapidamente cambiando il nostro modo di fare esperimenti di frontiera nella fisica fondamentale.

L’esperimento QUAX per la rivelazione di assioni

- L’esperimento dell’INFN QUAX, è basato su due Aloscopi (uno ai Laboratori Nazionali di Legnaro e uno ai Laboratori Nazionali di Frascati dell’INFN).
- Ciascun Aloscopio è costituito da una cavità risonante a radiofrequenza raffreddata a una temperatura vicina allo zero assoluto e immersa in un forte campo magnetico.

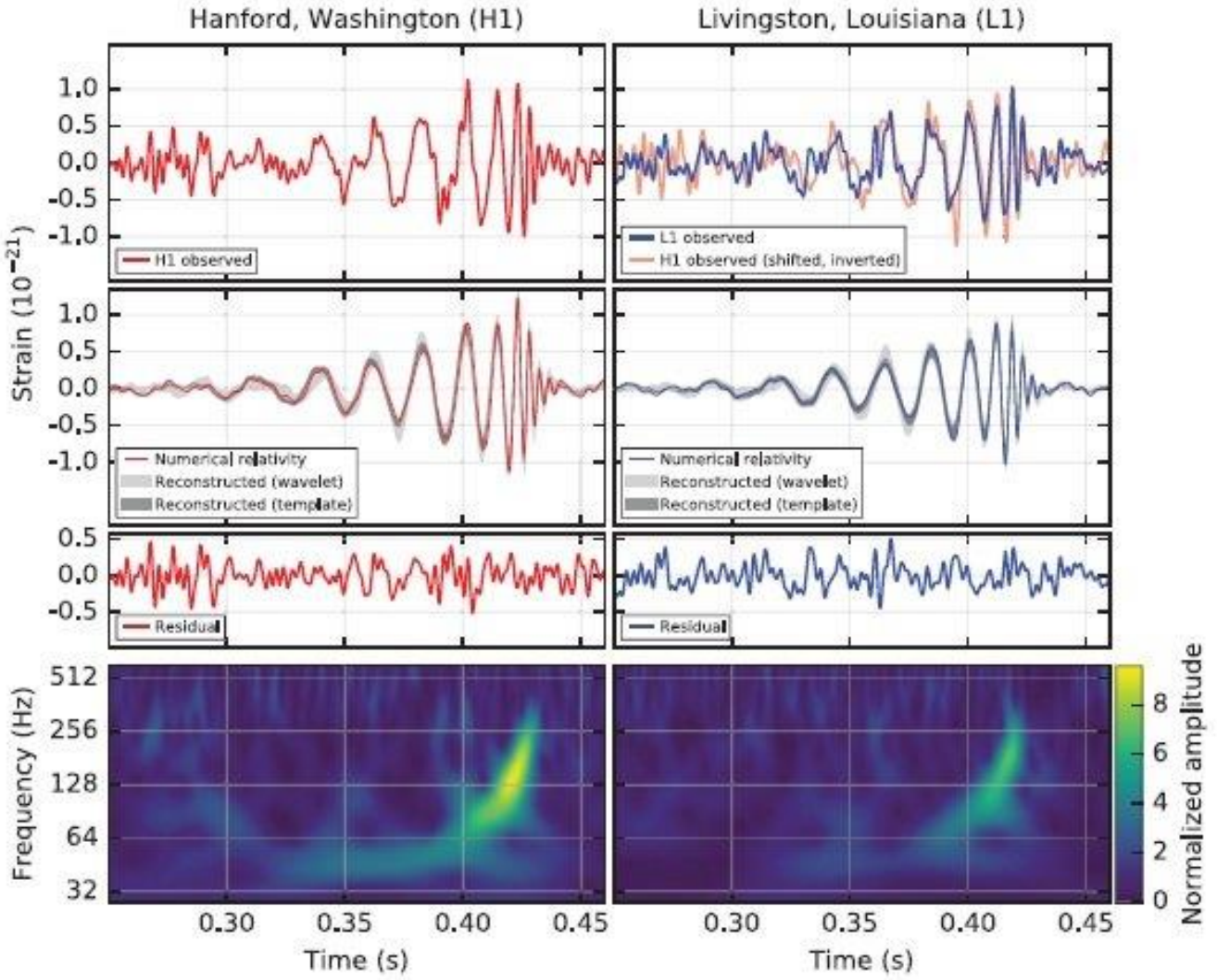


Le onde gravitazionali

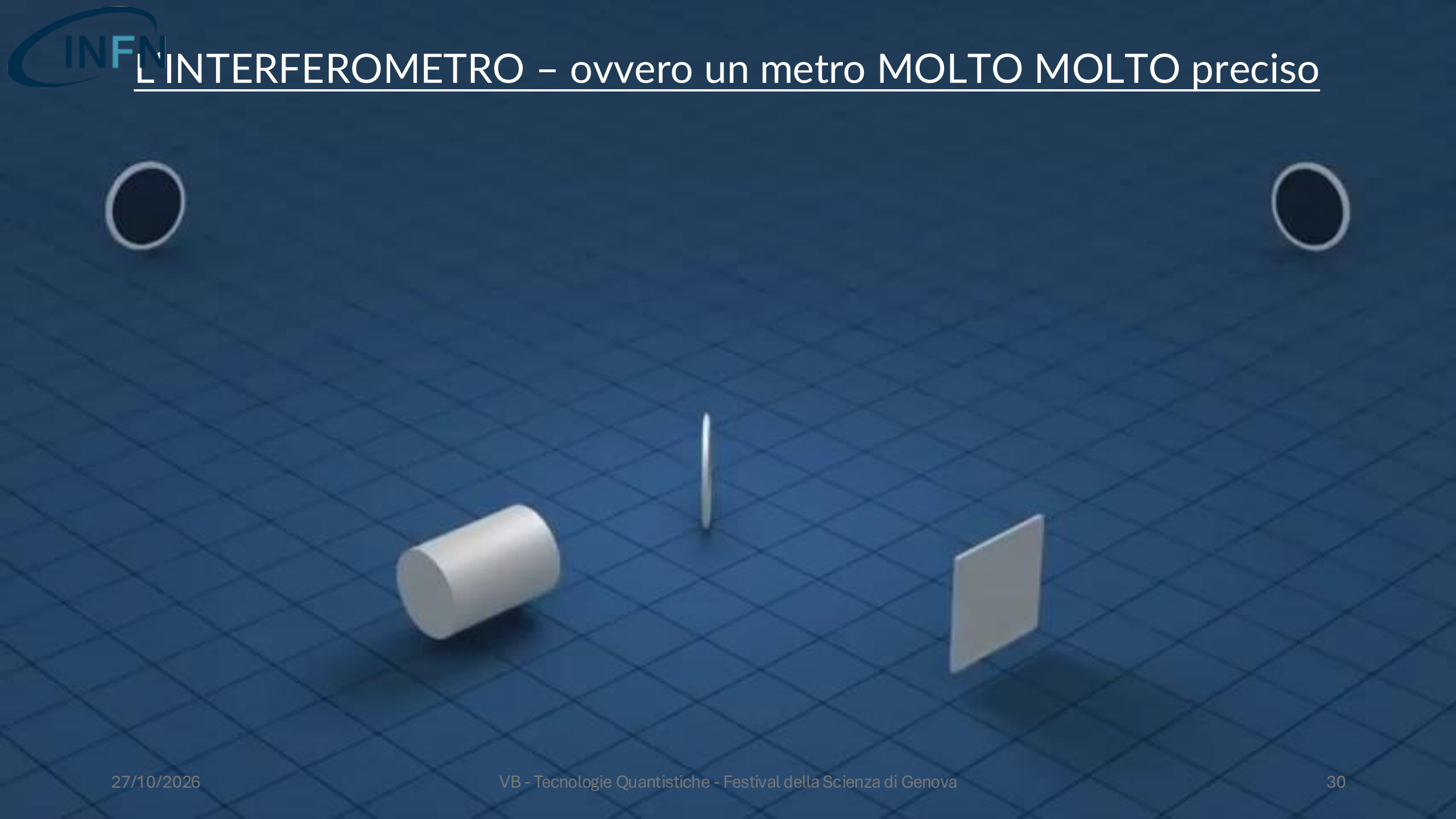
- Increspature dello **spazio-tempo**, previste da Einstein nella Teoria della Relatività Generale
- Si propagano come onde in tutte le direzioni e alla velocità della luce
- Le sorgenti più intense: cataclismi cosmici come la **coalescenza di due buchi neri** o di **stelle di neutroni,** e le **esplosioni di supernove**, e lo stesso Big Bang (**buchi neri primordiali**)
- Quanto sono **intense**? Come possiamo **osservarle**?
  - Attualmente si usano degli strumenti chiamati interferometri (LIGO negli Stati Uniti, Virgo in Italia, KAGRA in Giappone)

Rivelazione di onde gravitazionali con gli interferometri ottici

- Prima rivelazione delle onde gravitazionali, 14 settembre 2015
  - Coalescenza di due buchi neri di masse circa 29 e 36 masse solari, situati a circa 1 miliardo di anni luce dalla Terra



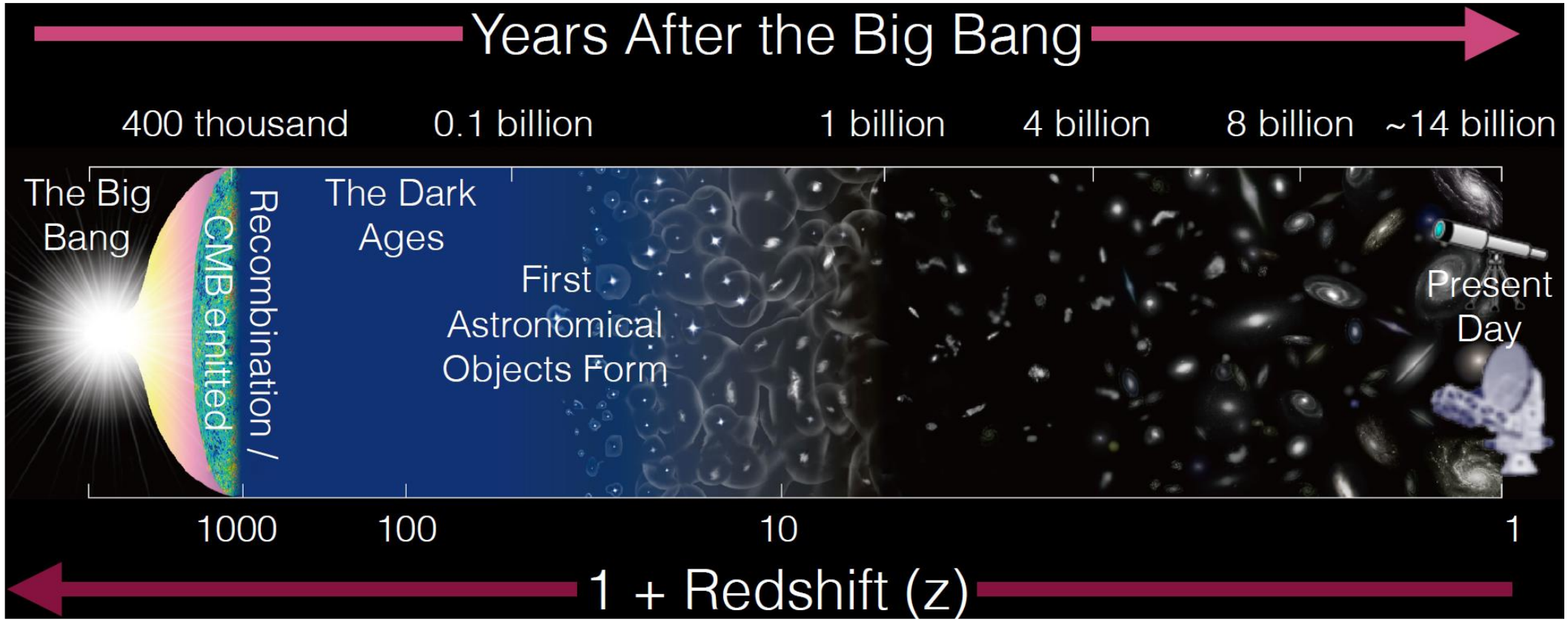
L'INTERFEROMETRO – ovvero un metro MOLTO MOLTO preciso



INFN
VIRGO

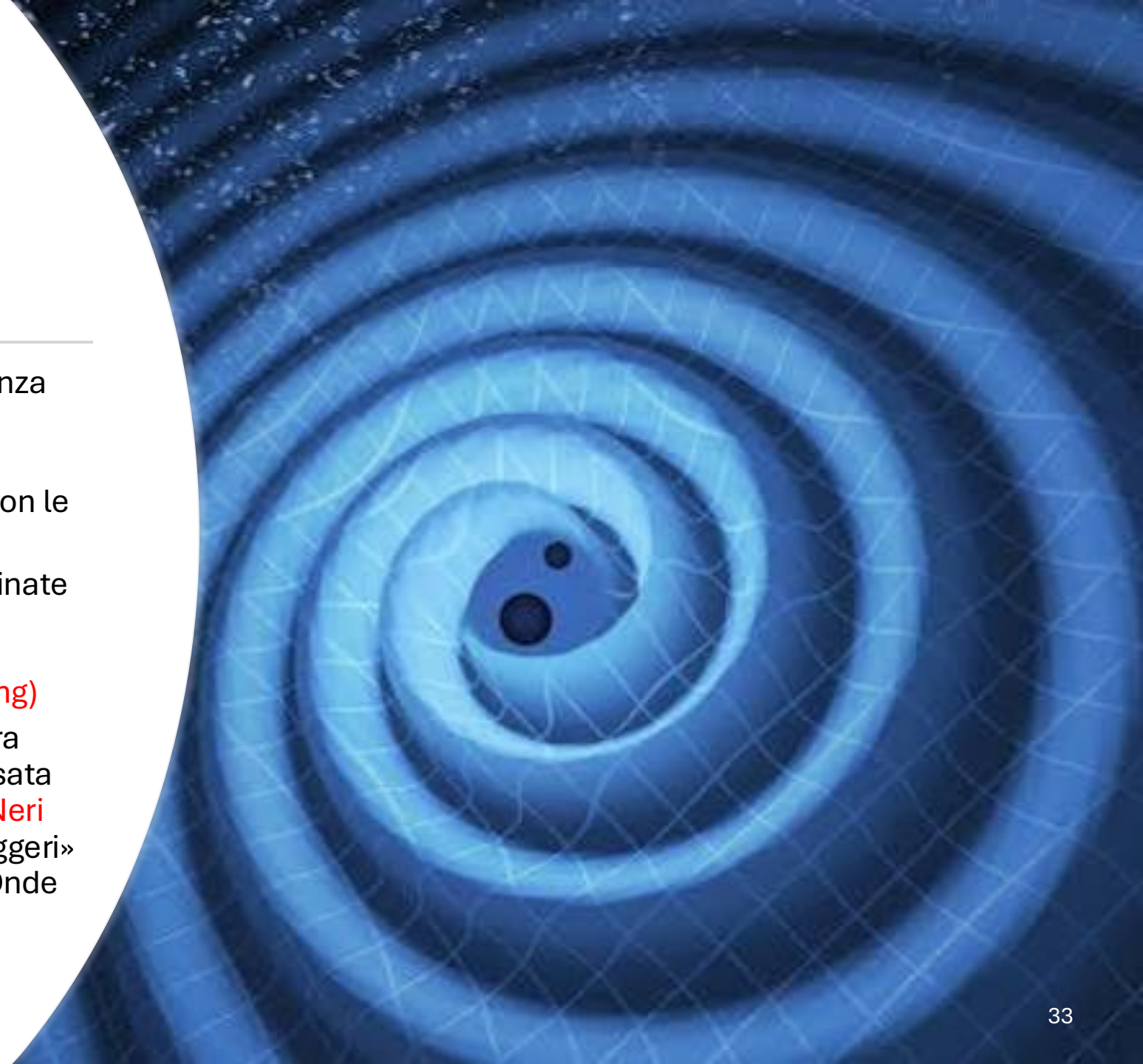
Onde gravitazionali e Materia Oscura

- Gli interferometri attuali, ed anche il futuro progetto Einstein Telescope, operano nella banda da pochi Hz a qualche kHz.
- Vi è però anche un grande interesse ad esplorare regioni ad alta frequenza, nella banda tra i MHz e i GHz.



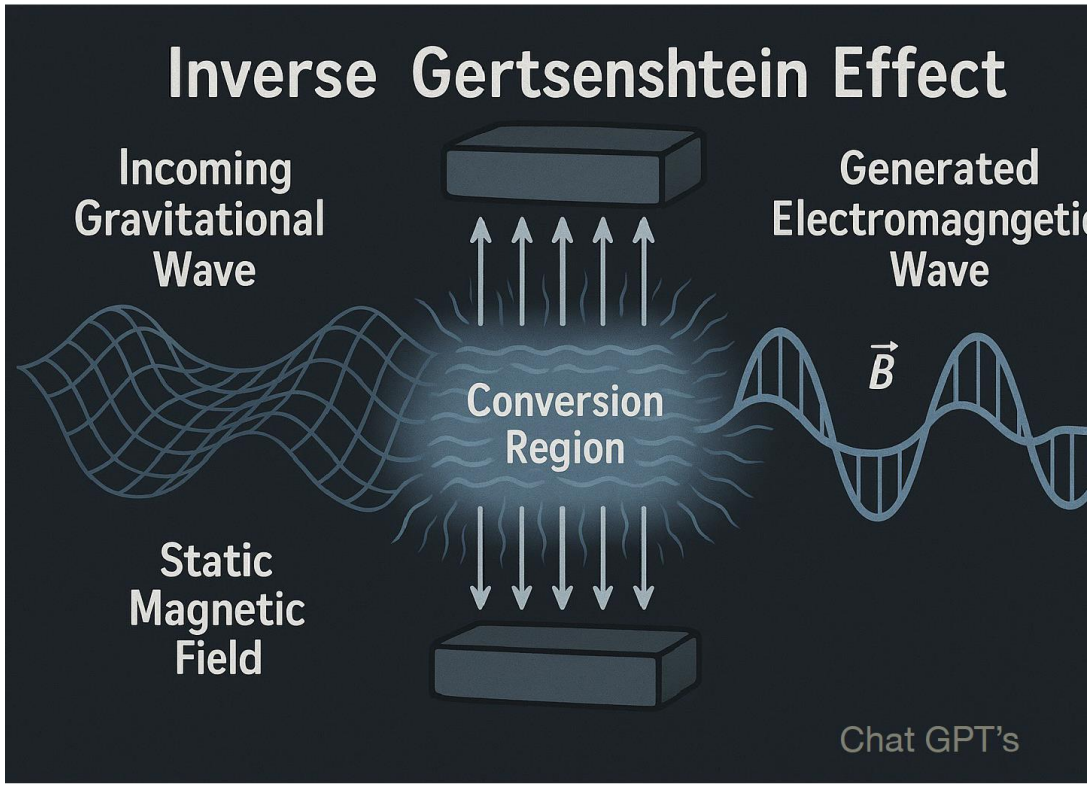
Onde Gravitazionali e Materia Oscura

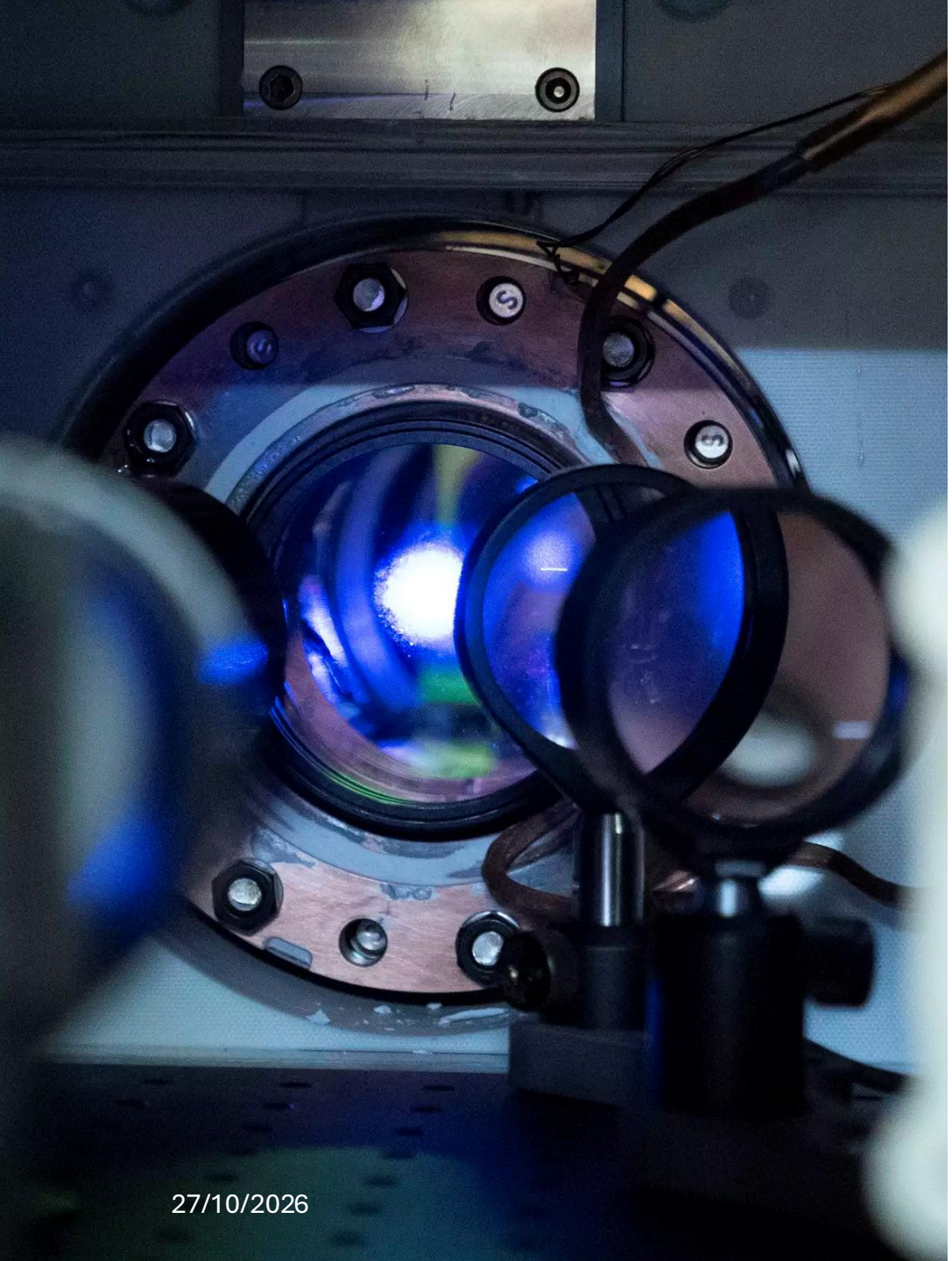
- Perche' le Onde Gravitazionali ad alta frequenza sono interessanti?
  - Le sorgenti astrofisiche standard (come buchi neri ordinari o stelle di neutroni) non le producono
  - Diverse teorie prevedono che siano originate da eventi energetici avvenuti nelle primissime fasi dell'universo, come l'inflazione (10^{-36} – 10^{-32} s dopo il Big Bang)
  - Alcune teorie spiegano la Materia Oscura come dovuta a materia ordinaria collassata durante la fase dell'inflazione in Buchi Neri Primordiali. Questi sarebbero molto «leggeri» e la loro coalescenza darebbe luogo a Onde Gravitazionali ad alta frequenza.



Tecnologie quantistiche per OG ad alta frequenza

- Cavità risonanti superconduttive accoppiate a qubit per le Onde Gravitazionali ad alta frequenza.
- Si utilizza lo stesso principio degli aloscopi per la ricerca di assioni, sfruttando la conversione delle OG in fotoni in forte campo magnetico.
- Recentemente è iniziata la costruzione di una pionieristica rete europea di osservatori basata su questa tecnologia (progetto GravNet).





Orologi atomici per misure ultraprecise… per esempio misure di gravità

- Gli orologi atomici forniscono misure ultraprecise di tempo.
- Il tempo e il campo gravitazionali sono intimamente legati nella Relativita Generale: più un punto si trova vicino a una grande massa (dove il potenziale gravitazionale è "più basso"), più il tempo scorre lentamente rispetto a un punto situato lontano da quella massa (dilatazione temporale gravitazionale)
- Mettendo due orologi atomici identici ad altezze diverse (orologio A a terra, orologio B ad una certa altezza h), si verifica che il tempo misurato da B è di una frazione infinitesimale più «veloce» di quello misurato da A a causa dell'infinitesima variazione del campo gravitazionale terrestre.

Conclusioni e prospettive

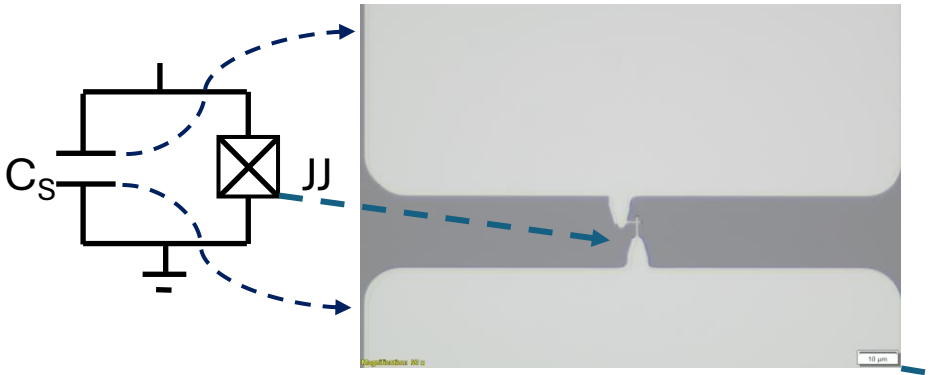
- La cosiddetta «seconda rivelazione quantistica», oltre a promettere di avere un impatto straordinario in moltissimi settori della nostra vita (dall'economia, alle telecomunicazioni, alla finanza, alla medicina) costituisce anche una straordinaria chiave d'accesso per decifrare alcuni dei segreti più intimi della Natura.
- È intorno alla domanda "che cos'è la realtà?" che è sviluppato uno dei dibattiti culturali più importanti del '900, quello tra i grandi fisici di allora, come Schrödinger e Heisenberg, ma soprattutto tra Einstein e Bohr. Un dibattito tra menti straordinarie che ha ispirato profonde riflessioni e pionieristici esperimenti che ci traghettano nel nuovo millennio, fino al Nobel per la fisica del 2022 e alle nuove tecnologie, protagoniste del nostro presente e futuro.
- Dopo le grandi prove sperimentali a cui è stata sottoposta, la meccanica quantistica si è rivelata una finissima descrizione della realtà con conseguenze straordinarie e costituisce un esempio eccellente di come la ricerca di base possa avere risvolti inaspettati in settori che interessano tutta la società.

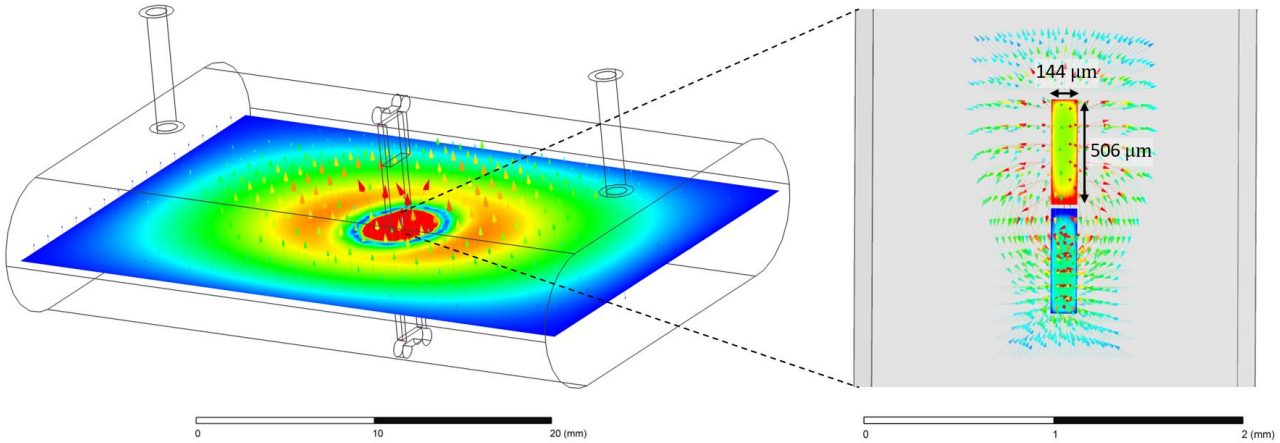
Spare slides

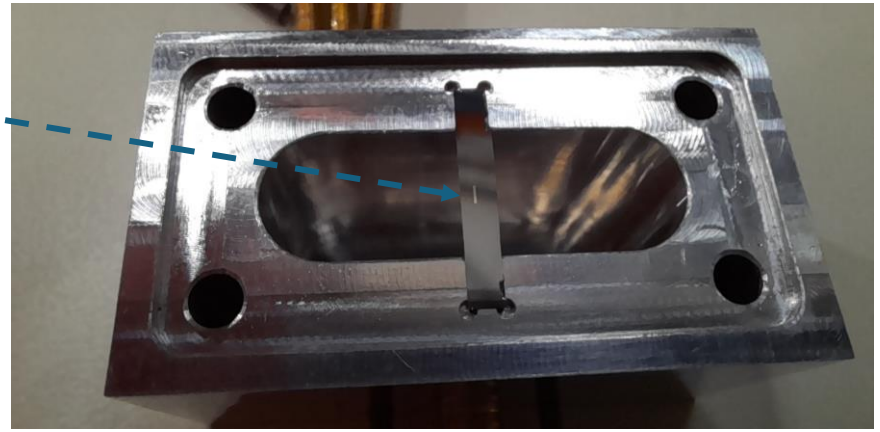
Come rivelare gli assioni?

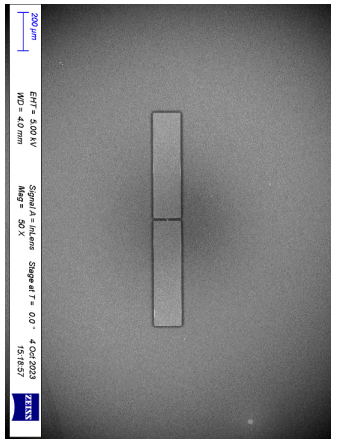
- Sotto alcune ipotesi, possiamo considerare il campo assionico di materia oscura come un campo classico che oscilla alla **frequenza Compton** della particella. Siamo nella regione delle microonde.
  - $\nu = \frac{mc^2}{h}$
- Il rivelatore ideale somiglia ad un ricevitore radio molto sensibile che deve essere sintonizzato alla giusta frequenza, corrispondente alla massa dell'assione, e capace di discriminare un segnale al di sopra del rumore, generalmente di origine termica.
- Sfruttando la **conversione di assione in fotone in un campo magnetico**, almeno una decina di gruppi nel mondo sta utilizzando apparati chiamati Aloscopi nei quale la conversione avviene all'interno di una **cavità risonante a microonde immersa in un forte campo magnetico**.

Qubit superconduttivi accoppiati a cavita risonanti



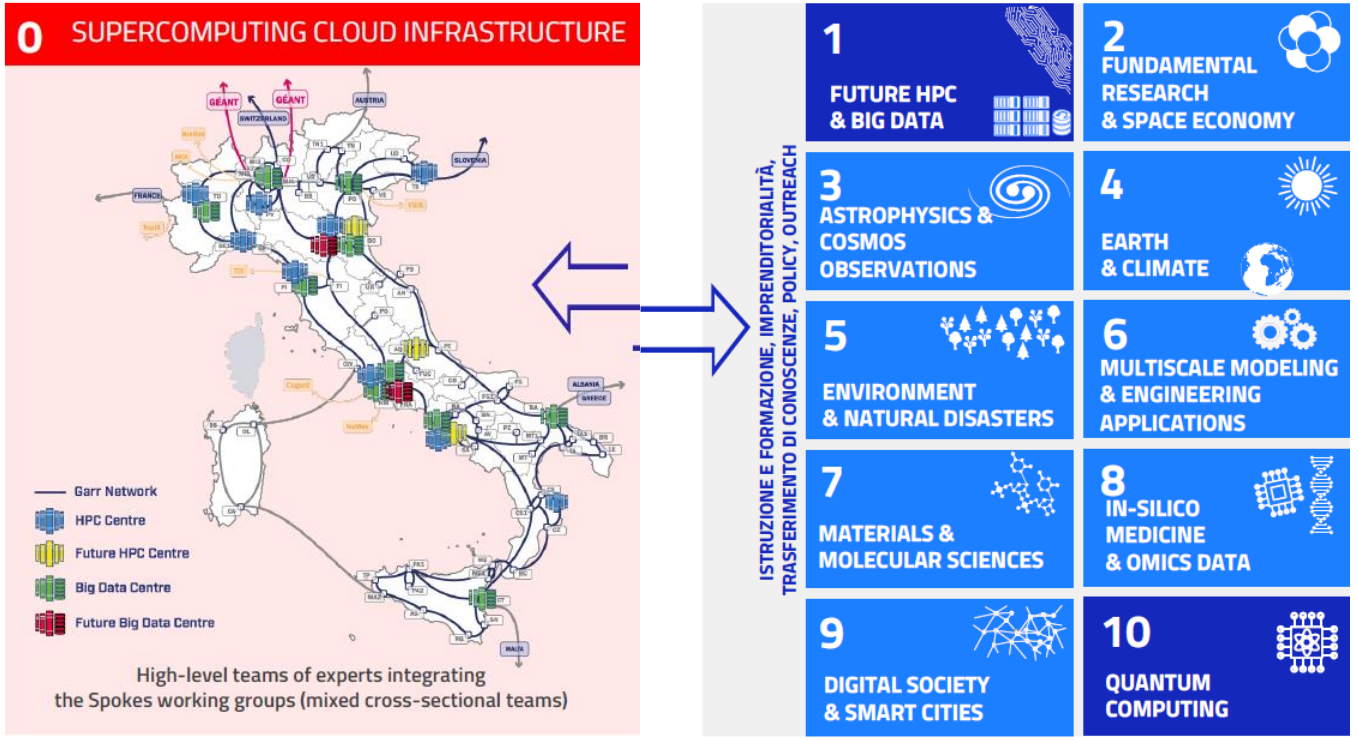




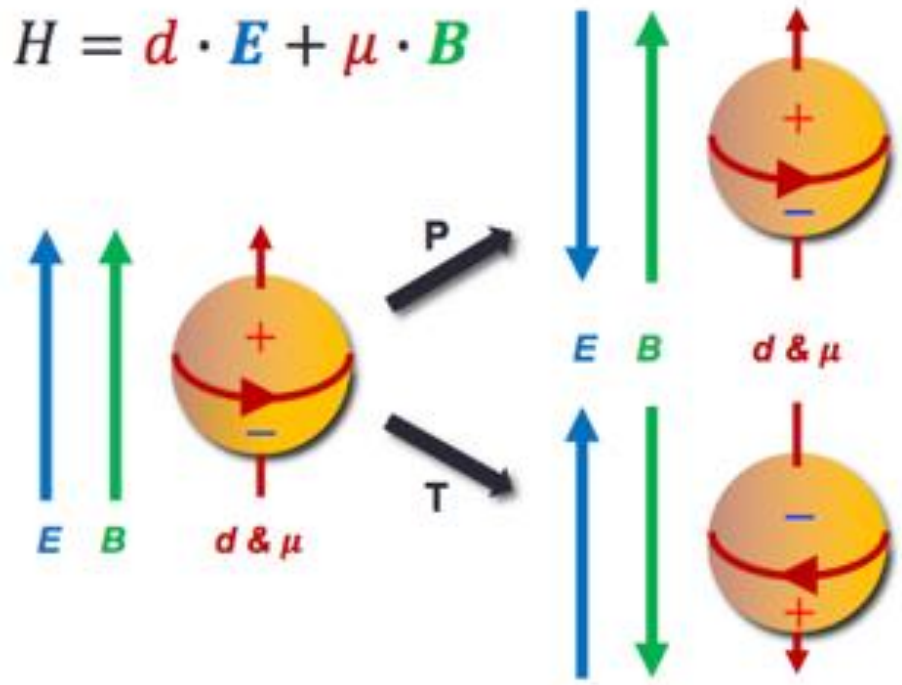


L’INFN e le tecnologie quantistiche

- Il Centro Nazionale di Ricerca in HPC, BIG Data e Quantum Computing
- Investimento da 320 M€, realizzato con finanziamento PNRR
- Uno dei cinque Centri Nazionali istituiti dal PNRR, dedicati a settori strategici per lo sviluppo del Paese



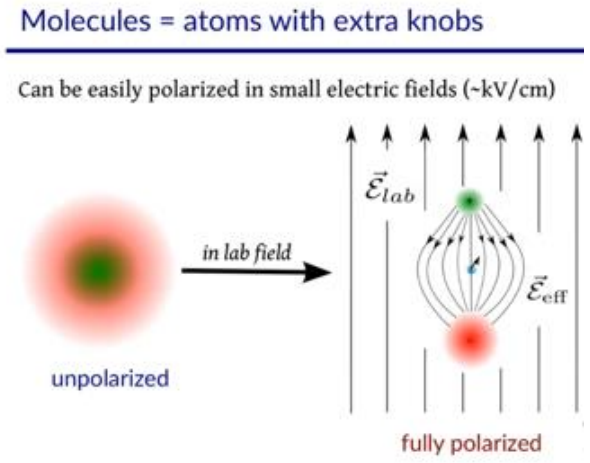
EDM searches

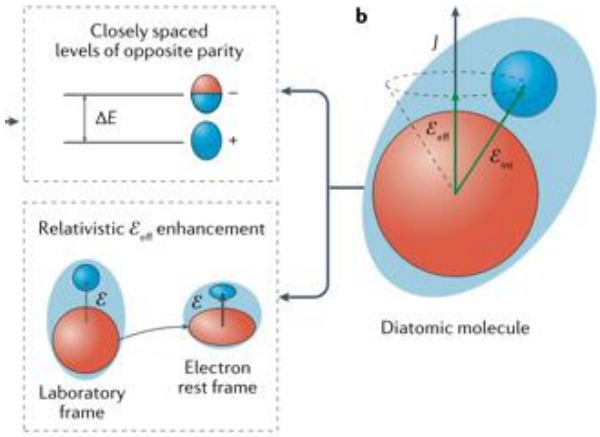


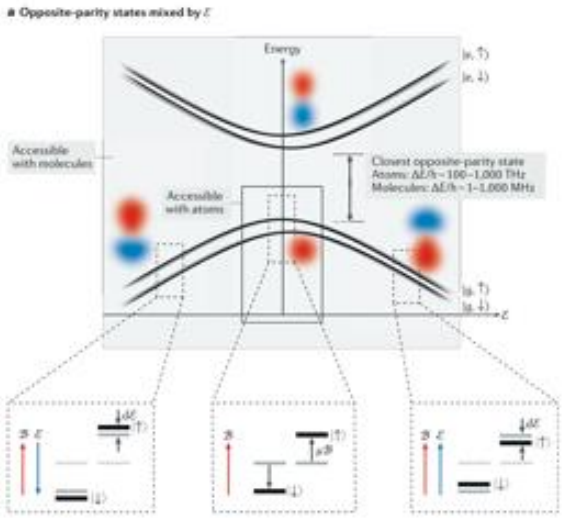
- The EDM is an asymmetrical charge distribution along the particle spin
- The EDM violates both T and P symmetries ⇒ CPT implies CP violation
- CP violation is required to generate a cosmological matter-antimatter asymmetry
- EDM's in SM are tiny ($d_e < 10^{-38}$ e·cm), but most SM extensions include new CP violating phases that contribute to EDM's
- This makes EDM an ideal probe for detecting NEW PHYSICS associated with CP violation and a powerful window on energy scales much larger than those that can be probed directly at LHC

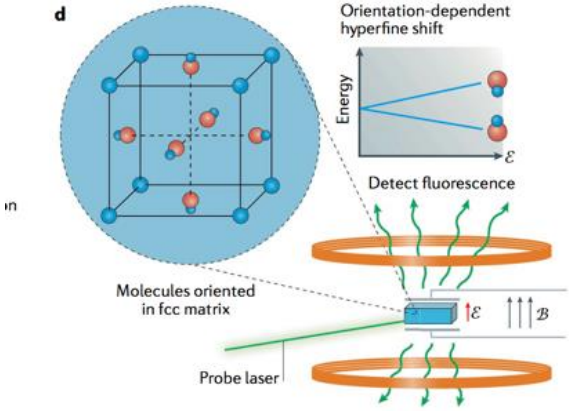
Cold molecules for EDM measurements

- DOCET, CSN5 (G. Carugno – PD)
- PD, LNL, FE
- A new approach for e and p EDM measurement: paramagnetic molecules confined in a quantistic low temperature solid (e.g., para-H crystal)
  - Long coherence times for electronic spin transitions of the trapped molecules
  - Large electric field on electrons
  - Possibility to host a high concentration of paramagnetic molecules with controlled isotopic purity (J = 0).









Tecnologie quantistiche per le onde gravitazionali

- Già oggi le tecnologie quantistiche sono impegate per migliorare la ricerca nel campo delle onde gravitazionali
  - Negli interferometri ottici come LIGO e VIRGO si utilizza il quantum squeezing della luce per ridurre il rumore ottico ed aumentare la sensibilità. Due tipi di rumore ottico:
    - Fluttuazioni di fase o Shot noise: il numero di fotoni che arriva sulla superficie di uno degli specchi in un dato intervallo di tempo è soggetto a fluttuazioni, il che introduce un'incertezza nella risposta del fotorivelatore. Domina ad alte frequenze (> 100 Hz).
    - Fluttuazioni di ampiezza: dovute alle variazioni della pressione di radiazione dei fotoni sulle superfici degli specchi. Domina a basse frequenze (< 100 Hz).