

# **I sensori quantistici e le relative applicazioni**

Corso di Laurea in Informatica  
~Università degli Studi di Verona~

Filippo Arduini  
VR501479  
19 marzo 2025

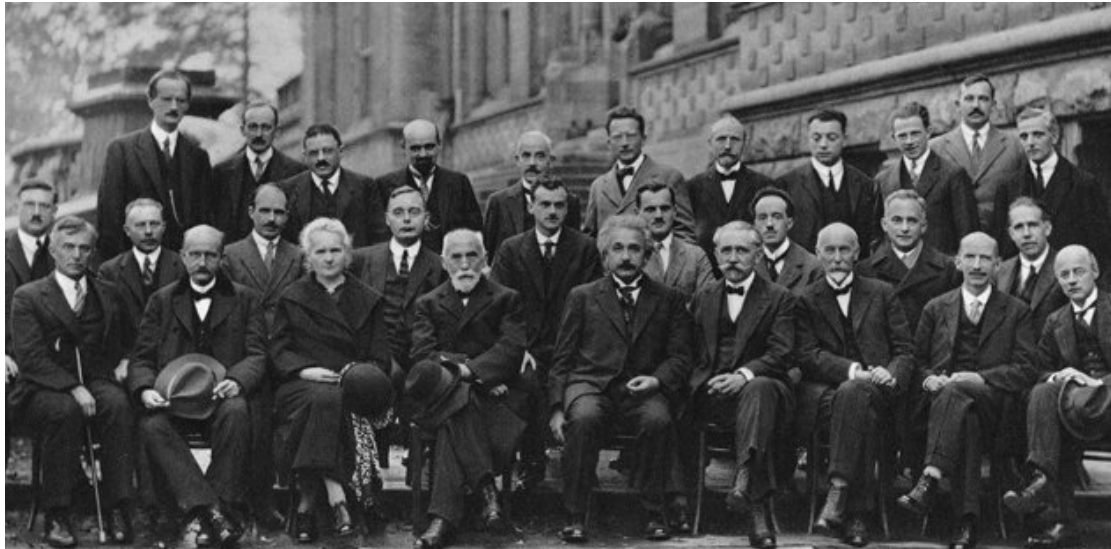
# 1) - Breve cenno storico sulla meccanica quantistica

Alla fine del XIX secolo le leggi della meccanica classica non riuscivano a spiegare in modo soddisfacente i comportamenti della materia e della radiazione elettromagnetica alla scala di lunghezza dell'ordine dell'atomo o alla scala di energia delle interazioni interatomiche. Ciò che risultava davvero incomprensibile era la realtà sperimentale della luce e dell'elettrone (i loro comportamenti). A causa di queste limitazioni, tra la fine del XIX secolo e della prima metà del XX secolo, iniziò lo sviluppo di una "nuova fisica", differente da quella conosciuta sino a quel momento, costruita su leggi e teorie elaborate a cavallo dei due secoli. Queste teorie si fondavano sul principio che alcune grandezze a livello microscopico, come l'energia o il momento angolare, possono variare soltanto di valori discreti detti "**quanti**". Senza entrare nei dettagli delle scoperte, delle tesi ed antitesi succedutesi tra il 1800 e dell'inizio del 1900, possiamo riassumere dicendo che la meccanica quantistica, sviluppatasi con il contributo di numerosi fisici nell'arco di oltre mezzo secolo, fu in grado di fornire una spiegazione soddisfacente a tutte le regole empiriche e contraddizioni dell'epoca.

## 1.1) - Sviluppo della meccanica quantistica

Sulla base dei risultati ottenuti, tra il 1925 e il 1926, Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger svilupparono rispettivamente la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria, le prime due formulazioni della meccanica quantistica. Sebbene queste due teorie siano differenti, conducono agli stessi risultati. Nel 1948, Richard Feynman sviluppò una rappresentazione ancora diversa, chiamata integrale sui cammini, che porta agli stessi risultati delle precedenti. Secondo questa teoria, una particella quantistica percorre tutte le possibili traiettorie durante il suo moto, e i contributi forniti da tutti i

cammini interferiscono tra loro, generando il comportamento più probabile osservato.



Nel 1927, 29 delle menti più brillanti del mondo si riunirono a Bruxelles per il quinto Congresso Solvay, una serie di conferenze scientifiche dedicate ad importanti problemi aperti riguardanti la fisica e la chimica. Qui si discussero le basi teoriche e formali della nuova fisica.

## 2) - Introduzione concetti teorici di base

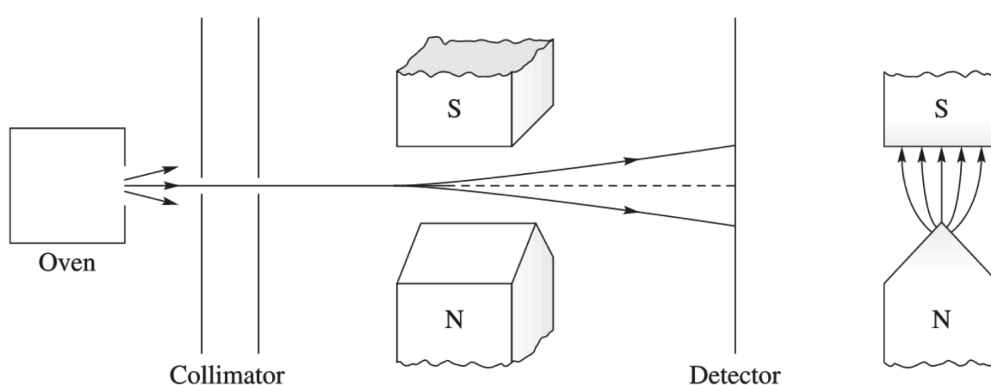
Per entrare nel vivo della materia, iniziamo col descrivere gli esperimenti che meglio descrivono la natura quantistica, questi illustrano alla perfezione i motivi della necessità di distaccarsi dai concetti della fisica classica quando si tratta di particolari argomenti visibili su scala atomica e sub-atomica. In una certa misura, un sistema a due stati come quello descritto da questo primo esperimento è il sistema meno classico e più "quantum-meccanico" possibile (al tempo - 1922).

### 2.1) - L'esperimento di Stern - Gerlach

Inizialmente, degli atomi di argento (Ag) vengono riscaldati in una fornace. La fornace ha un fiorellino attraverso il quale alcuni degli atomi di argento sollecitati possono fuoriuscire. Il fascio di atomi passa attraverso un collimatore (dispositivo in grado di raddrizzare un fascio di raggi provenienti da una sorgente in un fascio di raggi paralleli) ed è quindi sottoposto ad un campo elettromagnetico disomogeneo prodotto da due corpi polarizzati, uno dei quali presenta un angolo sporgente. Gli atomi di argento sono stati scelti per un motivo ben specifico, l'atomo di argento è composto da un nucleo e ben 47 elettroni, 46 dei quali possono essere visualizzati in una nuvola magnetica sfericamente simmetrica senza momento angolare netto. Ignorando lo spin del nucleo, si può però notare che l'atomo per intero presenta momento angolare, ciò grazie solo al momento angolare dello spin del 47-esimo elettrone. I 47 elettroni sono attaccati al nucleo e, come risultato, la pesantezza dell'intero atomo possiede momento magnetico pari al momento magnetico dello spin del 47-esimo elettrone.

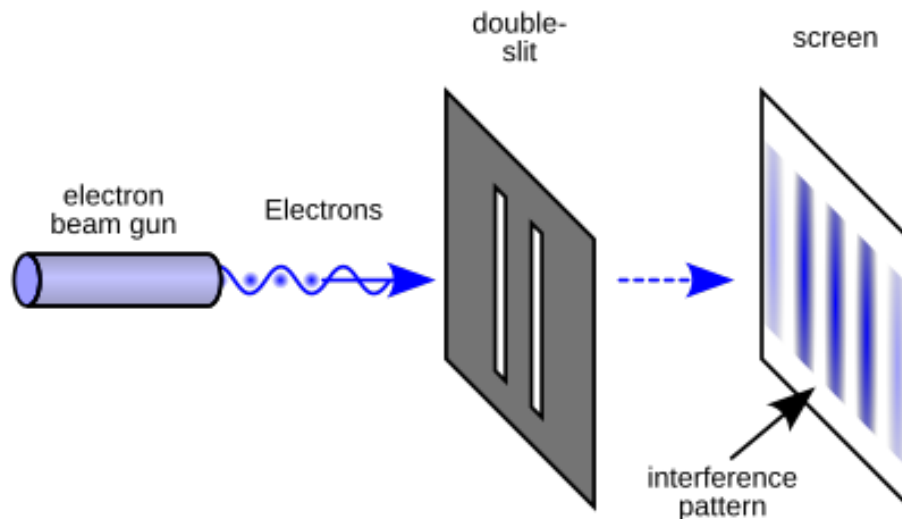
Poiché l'atomo in sé è molto pesante, possiamo aspettarci che il concetto classico di traiettoria possa essere legittimamente applicato. Chiamiamo il momento magnetico col simbolo  $\mu$  e lo spin dell'elettrone con la lettera **S**, la componente  $\mu(z) > 0$  [ $S(z) < 0$ ] subisce una forza che la spinge verso il basso, al contrario la componente  $\mu(z) < 0$  [ $S(z) > 0$ ] subisce una forza che la spinge verso l'alto. Ci si aspetta quindi che il flusso si divida in base ai valori assunti da  $\mu(z)$ . In altre parole, l'apparato SG misura la componente  $z$  di  $\mu$  (momento magnetico), o , in modo equivalente, la componente  $z$  di **S** fino ad un fattore proporzionale.

Gli atomi nel forno sono orientati in modo random, se l'elettrone fosse come un qualsiasi oggetto che ruota, ci potremmo aspettare che  $\mu(z)$  assuma tutti i valori compresi tra  $|\mu|$  e  $-|\mu|$ . Questo porterebbe a farci aspettare un continuo fascio di flussi uscente dall'apparato di SG. Al contrario, ciò che osserviamo sperimentalmente è piuttosto una separazione in due diversi fasci, fenomeno chiamato "quantizzazione dello spazio" (fenomeno visibile nell'illustrazione).



L'esperimento in sé e i risultati da esso ottenuti non sono di primaria importanza per l'obiettivo di questo elaborato, ci risulta però molto utile per fornire un'infarinatura semplice sulla meccanica quantistica.

## 2.2) - Esperimento delle doppie fenditure & interferenza quantistica



Didascalia

L'esperimento della doppia fenditura è una variante dell'esperimento di Young, in cui tra una sorgente di luce e una lastra fotografica si dispone una barriera opaca con due fenditure parallele di larghezza opportuna. Svolto nel 1801, permette di mostrare il dualismo onda-particella della materia.

Nell'esperimento della doppia fenditura si adottano però lastre rilevatrici moderne, molto più sensibili di quelle disponibili nell'Ottocento, e una sorgente estremamente debole di luce o elettroni, fino all'emissione di un unico fotone o elettrone per volta. In questo modo si verifica che in entrambi i casi la lastra non viene impressionata in maniera continua, ma si formano singoli punti luminosi indicativi di un comportamento corpuscolare. I punti però non rispettano la distribuzione corpuscolare classica che li vorrebbe localizzati in corrispondenza delle fenditure, ma risultano inizialmente diradati e dall'apparente distribuzione caotica, per poi, aumentando man

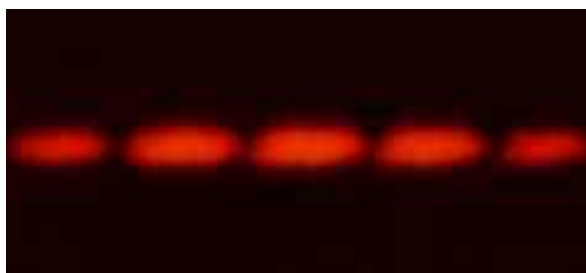


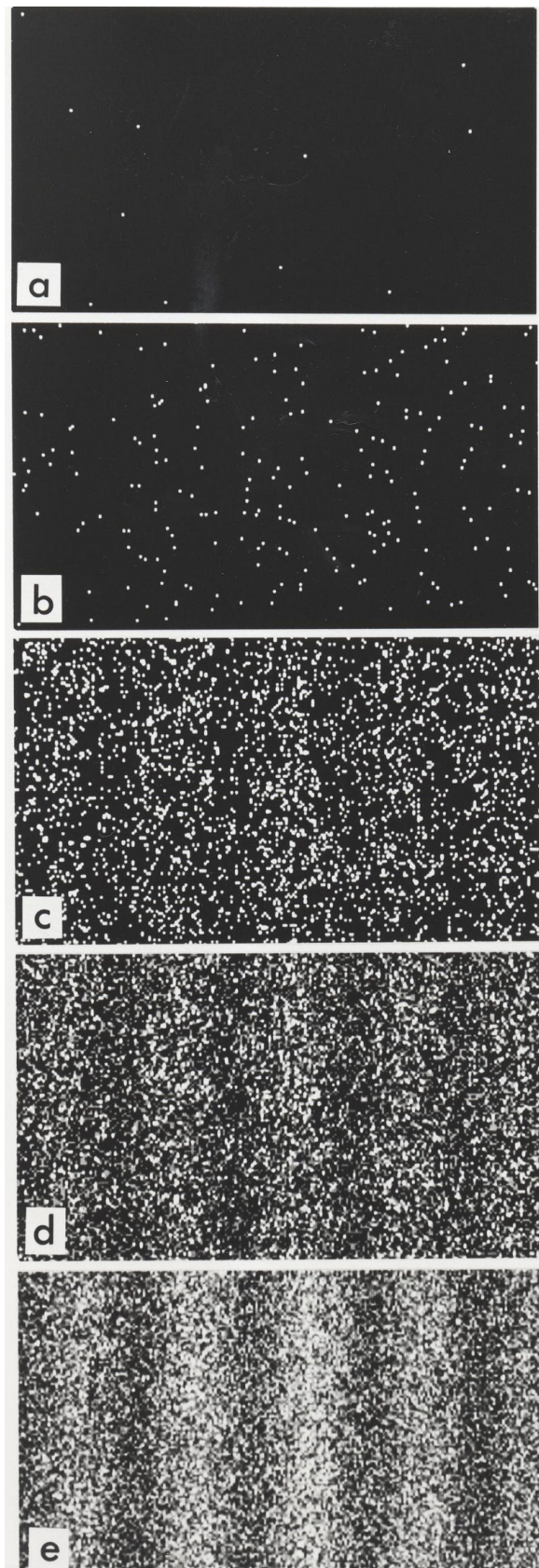
Figura di interferenza da luce laser

mano di numero, evidenziare le frange di interferenza tipiche del comportamento ondulatorio.

Ciò dimostra inequivocabilmente l'esistenza del dualismo onda-corpuscolo, sia della materia che della radiazione elettromagnetica. In particolare si può notare come la posizione della particella sullo schermo risente della presenza delle due fenditure "come se" essa, comportandosi come un'onda e attraversandole entrambe, venisse scissa in due nuove onde che interferiscono fra loro, mentre nel momento in cui viene "osservata" tramite la rilevazione sullo schermo appare solamente come corpuscolo. La dimostrazione del fenomeno d'interferenza risulta quindi possibile solo attraverso l'osservazione di più particelle.

L'esperimento della doppia fenditura mostra attraverso le frange d'interferenza le manifestazioni ondulatorie di particelle quantistiche. L'interferenza è la capacità dell'azione ondulatoria di una particella di diminuire o di amplificare l'azione di altre particelle quantistiche, come due scie di barche che si incrociano in un lago. A volte le onde sovrapposte si sommano, generando così un'onda più grande, altre volte si annullano, cancellando l'onda.

È importante sottolineare che la meccanica quantistica è molto più complessa rispetto a quanto descritto in precedenza. I due esperimenti menzionati forniscono solo un'introduzione intuitiva e permettono di



Esperimento della doppia fenditura  
effettuato con elettroni singoli. Le  
immagini sono prese dopo l'invio di (a)  
10, (b) 200, (c) 6.000, (d) 40.000, (e)  
140.000 elettroni.

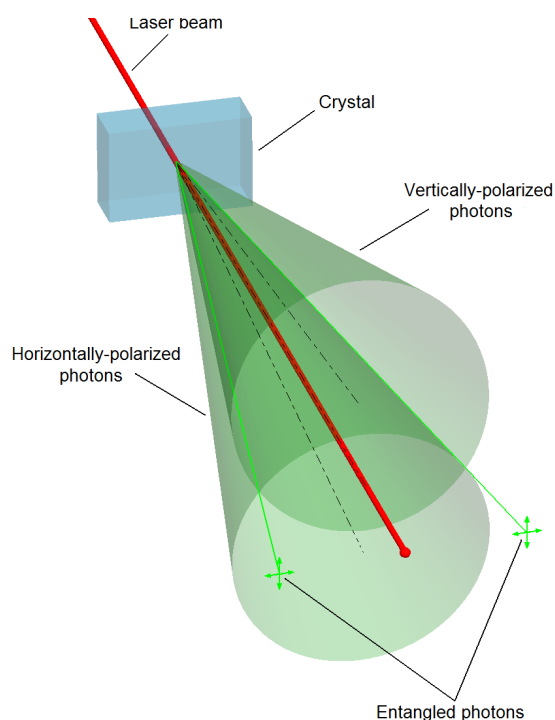


mantenere il documento comprensibile a chiunque. Per approfondire l'argomento, sarebbe necessario introdurre anche i formalismi della meccanica quantistica e la teoria su cui si basa.

### 3) - I sensori quantistici

Nel settore della tecnologia quantistica, i sensori utilizzano le proprietà della Meccanica Quantistica (MQ), alcuni esempi sono l'entanglement, l'interferenza quantistica e lo squeeze dello stato quantistico (spiegate brevemente in seguito). Tutte queste proprietà hanno aumentato ed ottimizzato la precisione delle misurazioni ed hanno abbattuto i limiti delle attuali tecnologie dei sensori tradizionali.

Per "Entanglement" si intende l'**entanglement quantistico**, il fenomeno di un gruppo di particelle che vengono generate, interagiscono o condividono la prossimità spaziale in un modo tale che lo stato quantistico di ogni particella del gruppo non può esser descritto indipendentemente dallo stato delle altre, anche quando le particelle sono separate da una grande distanza. Utilizzato largamente negli orologi quantistici (sempre si tratta di sensori, di tempo), permette di raggiungere un livello di precisione non raggiungibile con tecnologie tradizionali. Questi



Rappresentazione del fenomeno di entanglement

orologi vengono solitamente utilizzati in parallelo con satelliti dedicati a GPS e comunicazioni satellitari.

L'**interferenza quantistica** è già stata citata nell'introduzione quando si è appunto parlato dell'esperimento della doppia fenditura, si rimanda quindi al paragrafo 2.2 per una spiegazione più dettagliata. Concetto fondamentale nella progettazione di interferometri. Gli interferometri sono dispositivi che sfruttano l'interferenza delle onde di luce (o di particelle) per misurare variazioni piccolissime in grandezze fisiche, come lunghezza, angolo o velocità. L'interferenza quantistica gioca un ruolo cruciale nel migliorare la sensibilità di questi sensori.

Un esempio noto è l'interferometro di Mach-Zehnder, che utilizza l'interferenza di fotoni per misurare piccole variazioni di fase. Quando un fotone entra in un interferometro, viene separato in due percorsi. Le due onde di probabilità che descrivono il fotone interferiscono quando si ricombinano, e qualsiasi cambiamento nelle condizioni fisiche (ad esempio, una variazione di temperatura o di campo magnetico) può modificare l'interferenza, consentendo di misurare il cambiamento con una precisione estremamente alta.

Per quanto riguarda invece lo **squeeze dello stato quantistico**, si fornirà una definizione breve e generale. In fisica, uno **stato coerente spremuto (stato squeezed)** è un qualsiasi stato dello Spazio di Hilbert in cui il principio di incertezza è saturato.

Nella fotonica e nell'ottica quantistica i concetti appena elencati sono sfruttati per effettuare misurazioni estremamente precise. I sensori quantistici sono spesso costruiti su sistemi a variazione continua (in essi, le grandezze

che descrivono il sistema possono assumere un numero infinito di valori all'interno di un intervallo, anziché essere limitate a un numero discreto di opzioni), ossia sistemi quantistici caratterizzati da gradi di libertà continui come quadrature di posizione e momento (la quadratura di posizione misura l'incertezza associata alla posizione, cioè quanto è precisa la conoscenza della posizione di una particella, mentre la quadratura di momento è spesso descritta in termini della distribuzione di probabilità di trovare una particella con un determinato momento). Il funzionamento di base si deve a meccanismi relativi agli stati ottici della luce, che spesso coinvolgono proprietà meccaniche quantistiche come lo schiacciamento o l'intreccio bimodale. Questi stati sono sensibili alle trasformazioni fisiche che vengono rilevate da misurazioni interferometriche. Il rilevamento quantistico può essere utilizzato anche in aree non fotoniche, come bit di spin (che rispondono a campi magnetici), ioni intrappolati (che rispondono a campi elettrici e sono stati recentemente proposti per studiare i sensori di rotazione e di rumore del campo elettrico sopra le superfici), bit di flusso e nanoparticelle.

Nella fisica dello stato solido, un sensore quantistico è un dispositivo quantistico che risponde a uno stimolo. Solitamente si riferisce ad un sensore, che ha livelli di energia quantizzati, utilizza la coerenza quantistica o l'entanglement per migliorare le misurazioni oltre a ciò che può essere fatto con i sensori classici.

### 3.1) - Ricerca ed applicazioni

Al giorno d'oggi, ci sono quattro principali tecnologie che promettono di rivoluzionare il rispettivo campo d'applicazione:

1. Spin allo stato solido,
2. atomi neutri,
3. circuiti superconduttori,
4. ioni intrappolati;

Il funzionamento del rilevamento quantistico si basa su queste quattro tecnologie. Il reale potenziale del quantum sensing risulta ad oggi ancora sconosciuto, ma possiede le carte in regola per creare un ecosistema totalmente nuovo se i ricercatori, le start-up e le aziende leader del settore lavoreranno insieme per esplorare le possibili applicazioni e portarle "fuori dai laboratori".

Il mondo sta vedendo una sempre più crescente domanda di sistemi di misurazione ad alta accuratezza, i sensori quantistici hanno il potenziale per far fronte a questo bisogno applicando le proprietà quantistiche che garantiscono una performance potenziata (come ad esempio una maggiore sensibilità e la capacità di operare in condizioni critiche e scomode per gli strumenti tradizionali). In scala, i sensori quantistici potranno essere usati per monitorare l'attività geologica, segnalare disastri climatici, tracciare marcatori biologici in una singola goccia di sangue o render possibile il prolungamento della vita delle batterie per veicoli elettrici.

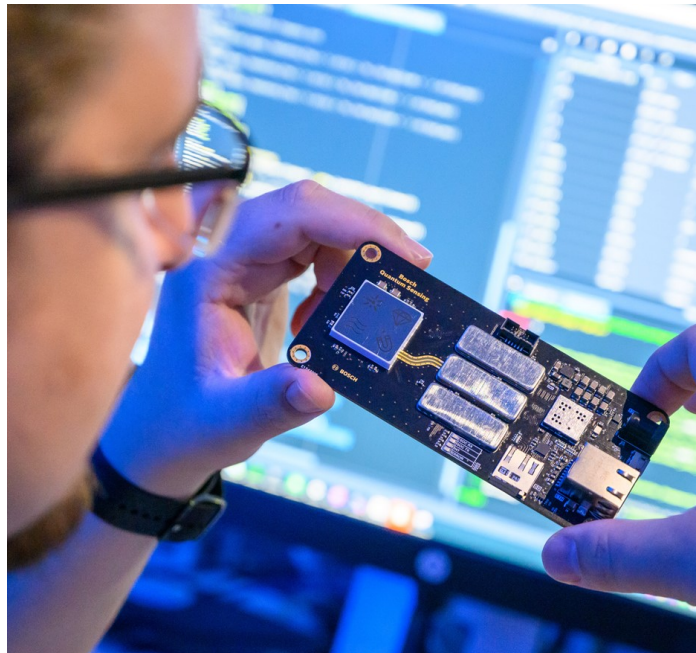
Di pari passo questi nuovi strumenti avranno la peculiarità di essere piccoli e leggeri, quindi comodi per misurare valori biologici h24 direttamente restando applicati sul corpo di un paziente, o in alternativa per

essere utilizzati in ambienti ostili come durante l'esplorazione spaziale o nel mezzo di un reattore per la fusione nucleare.

Nonostante il quantum sensing sia un settore molto più maturo rispetto a tante altre tecnologie quantistiche, persiste comunque una profonda spaccatura tra i risultati raggiunti nei laboratori accademici e le esigenze delle industrie ed delle aziende che si occupano dei settori sopra elencati. La prospettiva più interessante, malgrado il punto debole precedentemente descritto, è la creazione di un ecosistema tecnologico totalmente nuovo, capace di osservare ciò che prima era inosservabile. Tuttavia questa "promessa" è vincolata ad un nuovo e necessario sviluppo da realizzarsi negli anni futuri.

Volendo ora guardare al futuro, ci si può chiedere come avverrà la distribuzione delle nuove tecnologie quantistiche e in quali aree vedremo un utilizzo massiccio di esse. Nel breve periodo possiamo individuare almeno quattro casi d'uso dove questa tecnologia è, dal punto di vista commerciale, introducibile: rappresentazione d'immagini e diagnostica nelle scienze della vita, navigazione senza GPS, analisi dei guasti nella microelettronica e misurazioni sotterranee per la mappatura di tunnel, oggetti sotterrati e per l'estrazione di risorse.

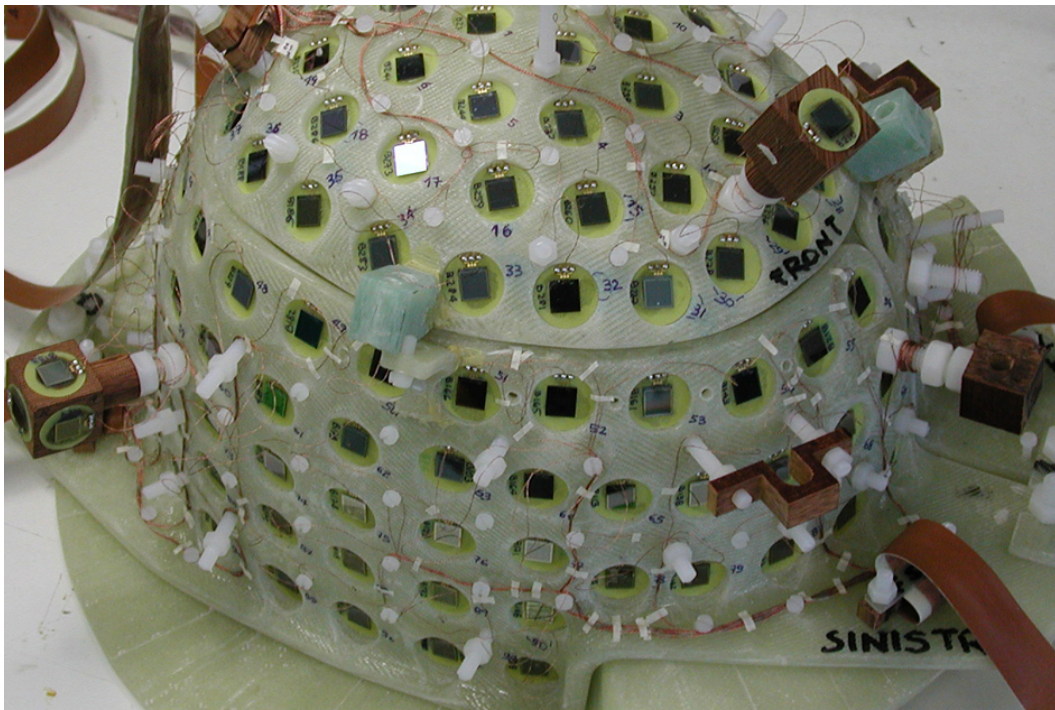
### 3.2) - Le tecnologie del quantum sensing



Prototipi di sensori quantistici BOSCH® in fase di sperimentazione [6]

Attualmente possiamo elencare quattro principali tecnologie del quantum sensing: spin allo stato solido, atomi neutri, circuiti superconduttori e ioni intrappolati.

Queste tecnologie hanno capacità di sensing che spaziano in un ampio range di proprietà fisiche, che includono il campo magnetico, campi elettrici, rotazione, accelerazione, temperatura, gravità, tempo e pressione. Altre tecnologie, come quella a fotoni, potrebbero essere usate per applicazioni in sensoristica, anche se al momento sono poche le applicazioni per le quali le tecnologie a fotoni sono adatte e performanti. Ad esempio, quando si misurano campi gravitazionali o elettromagnetici per la navigazione, i sensori devono correggere il rumore ambientale, avere un basso drift ed essere in



Elmetto equipaggiato con sensori magnetici quantistici [7]

grado di rilevare i campi vettoriali per ottenere la lettura più accurata, rendendo i sensori ad atomi neutri e a diamante quantistico i più adatti.

### 3.2.1) Rilevamento di segnali nelle scienze mediche

Attualmente, i medici rilevano innumerevoli segnali usando metodi convenzionali e quindi tecnologie come magneto-encefalografia, risonanza magnetica e magneto-cardiografia, che forniscono informazioni limitate riguardo la posizione della fonte del segnale (sull'organo specifico). Inoltre, i rilevatori convenzionali sono di scomodo utilizzo, e richiedono una serie di precauzioni che aumentano di molto il prezzo totale di mantenimento. Al contrario i **biosensori quantistici** possono effettuare le medesime misure attraverso equipaggiamenti leggeri come elmetti o cinture direttamente applicabili sul paziente.

La tecnologia in questione (non nello specifico quella dell'immagine) consiste di una serie di tanti piccoli sensori, ognuno di circa 1 centimetro

cubo di grandezza. Tali sensori sono in grado di determinare molto velocemente la posizione di un segnale magnetico all'interno del corpo umano con una precisione di pochissimi millimetri. Con ulteriori sviluppi questi biosensori potrebbero addirittura riuscire ad operare in condizioni ambientali comuni, questo è da aspettarsi entro i prossimi cinque anni.

### 3.2.2) - Spostamenti tracciati senza GPS

Nel caso in cui i satelliti addetti all'aggiornamento dei sistemi GPS siano fuori uso, ad oggi non esisterebbe una soluzione immediata per risolvere il problema, se non la riparazione del satellite guasto o il suo rimpiazzo con uno nuovo. Pertanto, c'è un bisogno urgente di sistemi di navigazione migliori e soprattutto più affidabili, soprattutto nel caso di veicoli a guida autonoma. Al momento, quando il segnale GPS non è disponibile per un breve periodo, le unità di misura inerziali possono essere utilizzate per dedurre la posizione relativa a una posizione iniziale nota e ad una rotta. L'uso di sensori quantistici richiederà una calibrazione molto meno frequente delle unità di misura inerziali, riducendo l'errore di deriva accumulato e migliorando la precisione della navigazione nel tempo. In alternativa, i sensori quantistici possono essere utilizzati per navigare in base a mappe preesistenti della forza gravitazionale terrestre e dei campi magnetici della crosta. In queste applicazioni, i sensori quantistici sono da uno a due ordini di grandezza più sensibili rispetto alla tecnologia convenzionale. Sono comunque necessari sviluppi ulteriori [8].



### 3.2.3) - Analisi funzionale nella microelettronica

I sensori quantistici possono anche migliorare il rilevamento di difetti e stati operativi nella microelettronica attraverso l'imaging diagnostico non invasivo delle correnti elettriche e della magnetizzazione in tali sistemi. Si consideri il processo di fabbricazione dei chip semiconduttori: un aspetto del controllo qualità è garantire che le dimensioni delle caratteristiche dei bit di memoria magnetica siano ben al di sotto di 100 nm. Le misurazioni di prova esistenti vengono eseguite collegando sonde elettriche ai punti di memoria e verificandone le prestazioni elettriche, ma solo alla fine del processo di produzione. Al contrario, i sensori magnetici quantistici potrebbero analizzare singoli punti nella memoria nelle fasi iniziali del processo di produzione, prima della metallizzazione, del confezionamento e della frammentazione dei chip, con grandi vantaggi per la progettazione futura dei chip e il relativo controllo qualità. I sensori NV-diamond (Nitrogen Vacancy) sono particolarmente adatti a queste applicazioni, poiché offrono immagini magnetiche vettoriali minimamente invasive con elevata risoluzione spaziale, buona sensibilità e ampio campo visivo.

### 3.2.4) Misurazioni sotterranee e altri ambienti inospitali

In fine vediamo delle applicazioni, per i sensori quantistici, nel sottosuolo e in altre condizioni estreme o inospitali, dove questa tecnologia riesce ad offrire misurazioni più precise e robuste. Per effettuare queste letture così accurate, i dispositivi devono necessariamente essere compatti, per esempio dovrebbero esser montati all'interno delle ali di droni o in angusti spazi ricavati in macchinari dedicati alla trivellazione sotterranea.

Gli strumenti tradizionali (che non utilizzano tecnologia quantistica) non riescono a distinguere facilmente segnali di campi gravitazionali o elettromagnetici dal “rumore” dell’ambiente circostante, per esempio da quello del drone o altro dispositivo su cui è montato il sensore. I sensori quantistici sono altamente sensibili, infatti ad esempio, misurano gli spostamenti nelle linee di risonanza atomica per fornire misurazioni altamente sensibili. I primi di questi sensori quantistici sono già utilizzati per rilevare i cambiamenti gravitazionali indotti dai processi vulcanici. Affinché funzionino su larga scala, sono necessari miglioramenti per ridurre al minimo gli effetti delle vibrazioni e delle brusche manovre che possono impedire ai sensori di funzionare.

#### 4) Il futuro del quantum sensing, produzione di scala, innovazione e intelligenza artificiale.

È possibile fare ipotesi su dove saranno i futuri casi d'uso ad alto impatto, ad esempio, i sensori quantistici potrebbero consentire la spettroscopia a risonanza magnetica nucleare (NMR) e la risonanza magnetica di singole cellule biologiche e persino singole proteine, con possibilità trasformatrice per la salute umana. Oggi, alcuni sensori quantistici sono ancora troppo grandi, pesanti e costosi o sono costruiti su misura. Quindi, l'ampio impatto commerciale dipenderà da un ulteriore sviluppo per ridurre le dimensioni, il peso e la potenza del dispositivo (SWAP) e migliorare l'efficienza dei costi di fabbricazione.

Parlando invece di convergenza tra IA e quantum sensing, i sensori quantistici possono osservare ciò che una volta non era osservabile con la tecnologia convenzionale, aprendo possibilità per nuove intuizioni. Esistono

già hardware dedicati al rilevamento quantistico e primi algoritmi di intelligenza artificiale per l'analisi dei dati. Per il massimo impatto a breve termine, i sensori quantistici devono essere integrati nelle tecnologie e nelle infrastrutture esistenti. Nel lungo termine, man mano che la tecnologia viene ampiamente adottata, i sensori quantistici potrebbero fornire set di dati unici e di grandi dimensioni per l'addestramento di algoritmi di intelligenza artificiale con un impatto di vasta portata.

## Biografia

Nota principale: Ho volutamente evitato di fornire una spiegazione dei formalismi della meccanica quantistica concentrandomi esclusivamente sugli argomenti teorici che ho ritenuto utili alla comprensione della necessità e sviluppo dei sensori quantistici.

I concetti teorici citati nel testo, sui quali non mi sono soffermato, sono stati spiegati con informazioni reperite tramite ricerca su web, in modo particolare Wikipedia (Utilizzata solo ed esclusivamente per informazioni teoriche non essenziali per l'argomento principale).

Le sezioni che non presentano note o informazioni relative alle fonti sono basate interamente sui seguenti quattro articoli principali:

[1] "Quantum sensors will start a revolution" <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01663-0>

[2] "Quantum Information Processing, Sensing and Communications: Their Myths, Realities and Futures" <https://arxiv.org/abs/2412.00987>

[3] "Quantum Sensing Can Already Make a Difference. But Where?" [https://journalsojs3.fe.up.pt/index.php/jim/article/view/2183-0606\\_012.001\\_L001](https://journalsojs3.fe.up.pt/index.php/jim/article/view/2183-0606_012.001_L001)

[4] "Photonic quantum information processing: A concise review" <https://pubs.aip.org/aip/apr/article/6/4/041303/997349/Photonic-quantum-information-processing-A-concise>

Nei paper qui sopra citati sono presenti approfondimenti relativi ad aspetti inerenti l'impatto economico che avranno queste tecnologie, volutamente tralasciati nella stesura di questo testo poiché ritenuti fuori tema.

Per quanto riguarda invece la sezione sulla storia della materia, gli esperimenti, le parti di teoria descritte e le informazioni principali sono state prelevate ed elaborate dal seguente testo:

[5] "Modern quantum mechanics", Jun John Sakurai.

Le immagini annesse sono state scelte in primis per descrivere anche visivamente ciò di cui si sta parlando ma anche per annettere alla ricerca ulteriori articoli a testimonianza della ricerca costante che molte aziende ed enti scientifici stanno perseguendo per un veloce sviluppo della sensoristica quantistica. Ad esempio:

[6]: <https://www.bosch-press.it/pressportal/it/it/press-release-60544.html>

[7] <https://www.isasi.cnr.it/sensori-magnetici-quantistici-e-imaging-funzionale-del-cervello/>

[8] <https://www.shunlongwei.com/it/what-quantum-sensors-can-be-used-as-gps-replacements/>