

L'ESPERIMENTO BOREXINO E LA SCOPERTA DEI NEUTRINI SOLARI LA LOGICA DELLA RICERCA SCIENTIFICA

di Gianpaolo Bellini*

A chi chiedere una testimonianza delle caratteristiche e del senso della ricerca scientifica se non a chi, come l'autore di questo articolo, ha dedicato gran parte della sua vita a questa avventura di natura conoscitiva e pienamente umana? L'autore che ha ideato e diretto l'esperimento Borexino, e ha scoperto i meccanismi che fanno brillare il Sole e le stelle, è stato insignito di numerosi premi tra cui il Premio Internazionale Bruno Pontecorvo nel 2015 e il Premio Enrico Fermi nel 2017.

* Professore Emerito
all'Università di Milano,
Scienziato Emerito
dell'INFN - Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Si parla spesso di ricerca scientifica nei diversi campi del sapere scientifico. Prendiamo come esempio la fisica: quanti sanno davvero come si svolge una ricerca in fisica fondamentale? Cioè in quella branca della scienza che si occupa di comprendere i fenomeni fisici che avvengono nel mondo che ci circonda? È certamente un ambito vastissimo: basta pensare che tutto ciò che ci circonda – tutto ciò che evolve intorno a noi, fino ai confini dell'Universo – può essere spiegato dalla fisica e dalla chimica. La fisica abbraccia discipline che spaziano dall'elettronica alla scienza dei materiali, dall'ottica all'astrofisica, dalla fisica nucleare e delle particelle alla fisica della materia condensata, e così via. Ogni disciplina ha le sue metodologie di studio e progresso, ma tutte condividono il comune fondamento del metodo scientifico. Quest'ultimo, codificato da Galileo, si basa sull'idea che per comprendere la Natura sia necessario interrogarla attraverso esperimenti o, quando la sperimentazione diretta non è possibile, mediante osservazioni.

Un aspetto fondamentale della fisica è che la ricerca di base molte volte precede le applicazioni tecniche. Senza una comprensione approfondita di un fenomeno, non sarebbe possibile sfruttarlo per scopi pratici. Allo stesso tempo, però, la ricerca scientifica di base si avvale della tecnologia. Gli strumenti utilizzati per condurre esperimenti possono essere altamente sofisticati e, quando si indagano fenomeni del tutto nuovi, spesso è necessario sviluppare strumenti e metodologie mai esistiti prima. Da ciò si comprende come la fisica di base e la tecnologia siano strettamente interconnesse e si supportino a vicenda.



L'esperienza dello scienziato

Passiamo ora allo spirito con cui uno scienziato deve affrontare la ricerca sperimentale. Un vero scienziato deve essere privo di pregiudizi e pronto ad accettare qualsiasi risultato emerga dall'osservazione, anche se questo contraddice le sue convinzioni scientifiche o personali. È fondamentale che egli verifichi se i dati raccolti siano in contrasto con i risultati sperimentali ottenuti in precedenza da lui o da altri ricercatori sullo stesso argomento. Un corretto risultato scientifico deve essere ripetibile: ripetendo un esperimento con lo stesso obiettivo, anche utilizzando tecniche diverse, si dovrebbe ottenere un risultato coerente, entro i limiti di incertezza che ogni misurazione porta con sé. Ricordo che una misura assolutamente priva di incertezze non esiste; sarebbe ciò che i filosofi definiscono un *noumeno*, una pura astrazione.

Infine, la ricerca scientifica non può essere una attività isolata. Altri scienziati devono poter verificare e validare i risultati ottenuti da ogni ricerca, affinché possano essere considerati oggettivi. I fenomeni osservati possono essere di varia natura: alcuni avvengono nel presente; la lettura o lo studio di altri portano a evidenziare fenomeni avvenuti in tempi molto lontani, come le ere geologiche passate o eventi cosmici avvenuti miliardi di anni fa. In questi casi, non è possibile una osservazione diretta, ma si può cercare di comprendere tali fenomeni studiando reperti antichi o analizzando tracce lasciate nel tempo. Per esempio, il *Big Bang*, che si ipotizza come l'inizio dell'Universo, è stato ricostruito attraverso osservazioni e dati raccolti ora, miliardi di anni dopo il *Big Bang*.

La ricerca scientifica è un percorso fatto di numerosi passi, spesso piccoli e faticosi, che gradualmente ci avvicinano a risultati che spiegano il fenomeno in studio. Tuttavia, il cammino non è mai lineare e può rivelarsi accidentato: lungo la strada si possono incontrare problemi o aspetti del tutto inaspettati che obbligano a cambiare la direzione della ricerca, a rivedere le tecniche utilizzate onde risolvere i problemi inattesi. A volte, oltre ai progressi, ci si trova a fare anche dei passi indietro, quando emergono lacune impreviste che bloccano temporaneamente il lavoro, richiedendo nuove analisi e riflessioni.

Trovo particolarmente ispirante una frase del fisico John N. Bahcall (1934 – 2005), padre del modello solare standard e grande sostenitore del mio ultimo esperimento, conosciuto come *Borexino*.

Bahcall disse: «*The most important discoveries will provide answers to questions that we do not yet know how to ask and will concern objects we have not yet imagined.*» (le scoperte più importanti forniscono risposte a domande che non siamo ancora in grado di formulare e riguardano oggetti che non abbiamo ancora immaginato). [*How the Sun Shines*, 2000, Nobel e-Museum]

Farò qui due esempi: il primo riguarda le ipotesi sul *Big Bang*, quindi qualcosa di molto remoto; il secondo si riferisce a un esperimento svolto tra il 1990 e il 2021 presso il laboratorio del Gran Sasso, relativo a un'osservazione attuale, ovvero il meccanismo attraverso il quale il Sole e le stelle producono l'energia necessaria per brillare.



Le ipotesi sul Big Bang

L'età dell'Universo è stimata in circa 14,5 miliardi di anni. Nel corso dell'ultimo secolo, la ricerca si è concentrata sull'esplorazione dell'Universo, osservando oggetti sempre più lontani da noi. Questo significa, di fatto, indagare sempre più indietro nel tempo: la radiazione che noi ora misuriamo è stata emessa dai vari oggetti celesti in tempi anche molto lontani. I più lontani hanno emesso tale radiazione in tempi sempre più addietro, perché, man mano che aumenta la loro distanza dalla Terra, la radiazione da loro emessa impiega più tempo a raggiungerci. Analizzando il passato, si possono seguire i cambiamenti di parametri fondamentali e si osserva che, andando indietro nel tempo, la temperatura aumenta costantemente, mentre la materia si compatta.

Gli scienziati sono riusciti a risalire fino a circa 380.000 anni dopo il *Big Bang*, a un'epoca in cui l'Universo era ancora *infante* rispetto alla sua età attuale. Questo periodo è noto come *l'epoca della ricombinazione*, durante la quale l'Univer-

so si raffreddò abbastanza da permettere agli atomi di formarsi per la prima volta. Non si può spingersi all'indietro oltre questo limite, perché le osservazioni dirette diventano impossibili. Tuttavia, estrapolando i dati sulla densità della materia e sulla temperatura di quell'epoca fino al *tempo zero*, si è giunti alla teoria secondo cui l'Universo, al momento del *Big Bang*, era costituito da una materia estremamente densa e calda. A temperature elevatissime, non è possibile che la materia riesca ad aggregarsi né attraverso legami nucleari né elettromagnetici. Da questa condizione iniziale ha avuto origine l'idea di una esplosione cosmica: a partire da questa l'Universo si è espanso, raffreddandosi progressivamente, sino a permettere la formazione prima dei nuclei e poi degli atomi e infine dei corpi celesti.

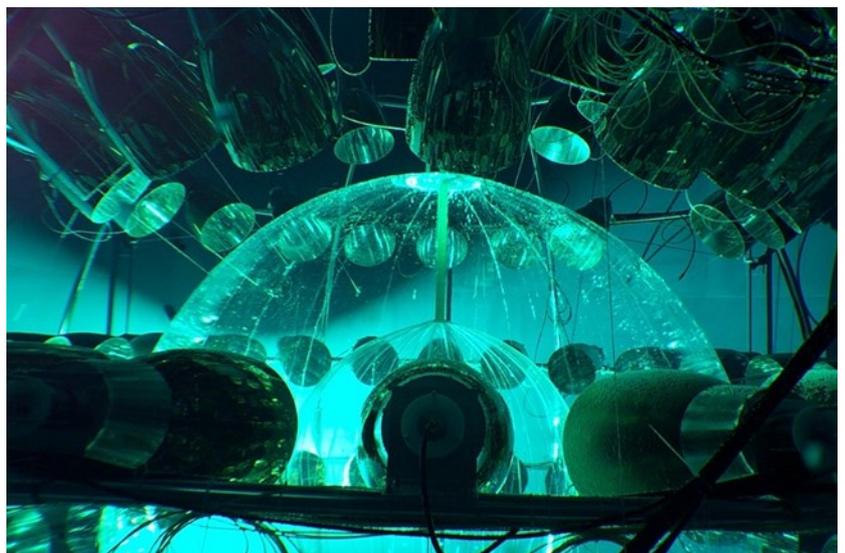
Studiando le caratteristiche di questa espansione, sono emerse interessanti scoperte, tra cui quella che l'Universo non solo si sta espandendo, ma che la velocità dell'espansione sta aumentando. Esperimenti raffinati relativi alla radiazione emessa dai corpi situati ai limiti dell'Universo, risalente quindi a circa 380.000 anni dopo il *Big Bang*, hanno rivelato che l'espansione dell'Universo era inizialmente più lenta rispetto a quanto osserviamo oggi. Questo significa che l'espansione dell'Universo sta accelerando. L'accelerazione della velocità di espansione può avvenire solo se esiste una forza che la provoca, ma se esiste la forza questa può essere collegata con un'energia, ed è quello che gli scienziati hanno fatto cercando di calcolare questa energia; l'hanno chiamata *energia oscura* e costituirebbe circa il 70% della massa-energia dell'Universo. Un bell'enigma a cui se ne aggiunge un altro: quello della cosiddetta *materia oscura*, materia invisibile, probabilmente formata da particelle che non emettono radiazioni, ma la cui presenza è dedotta dagli effetti gravitazionali che esercitano. Sommando energia oscura e materia oscura, si arriva alla sorprendente conclusione che la materia visibile, quella che possiamo osservare e studiare, rappresenta solo il 5% della massa-energia totale dell'Universo.

Questo è un chiaro esempio di come la ricerca scientifica possa portare grandi progressi nella comprensione della realtà, ma al contempo svelare quanto ancora ci resta da scoprire. Se da un lato abbiamo ampliato enormemente le nostre conoscenze sull'Universo, dall'altro abbiamo compreso che ciò che conosciamo rappresenta solo una piccola frazione – appena il 5% – di tutto ciò che esiste.

L'esperimento Borexino

Il secondo esempio riguarda un esperimento che ho avviato e condotto per 31 anni. Le prime discussioni al riguardo risalgono al 1988, mentre il lavoro vero e proprio è iniziato nel 1990. Nei primi cinque anni, ci siamo dedicati alla ricerca e allo sviluppo di nuove tecniche, strumenti e metodologie per raggiungere il necessario livello di radio-purezza nel rivelatore, un livello mai ottenuto prima da nessun altro esperimento.

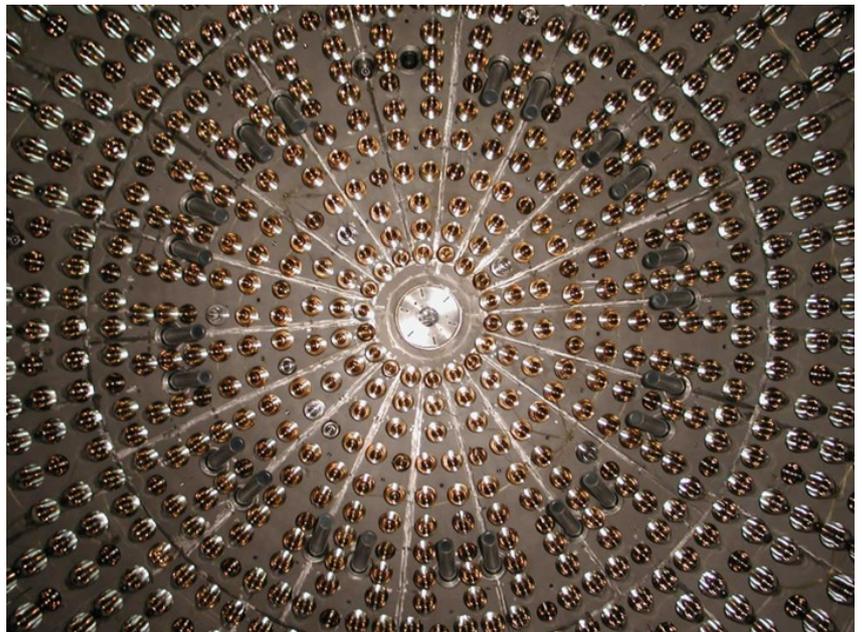
Fotografia dell'interno del prototipo di Borexino, una versione molto più piccola e semplificata che è servita per vari test. È utile per vedere nel piccolo come è costituito l'esperimento, con lo scintillatore contenuto nel pallone di nylon più piccolo schermato da un altro pallone più grande, mentre quanto avviene all'interno di esso viene captato dagli occhi elettronici, cosiddetti fotomoltiplicatori.



Nel 1996 è iniziata la costruzione del rivelatore, un'impresa estremamente complessa poiché nulla era standardizzato. Infine, nel 2007, siamo riusciti a iniziare la raccolta dei dati. Questa fase insieme alla loro analisi e interpretazione, è durata fino al 2021. L'esperimento, denominato *Borexino*, aveva lo scopo di indagare i meccanismi che alimentano il Sole e le stelle, permettendo loro di brillare. Probabilmente il lettore si starà chiedendo come sia possibile studiare l'interno del Sole e delle stelle, dato che a quelle temperature nessun mezzo costruito dall'uomo potrebbe addentrarsi senza essere distrutto. Fortunatamente, la Natura ci offre una particella elementare chiamata *neutrino*, che possiede una proprietà straordinariamente utile: interagisce pochissimo con la materia, riuscendo così ad attraversare l'Universo, inclusa la materia solare, senza essere deviato o assorbito. Il neutrino è uno dei «mattoni fondamentali» della materia, le cosiddette particelle elementari, al di sotto delle quali non esistono altre strutture.

I neutrini solari

Rilevare i neutrini solari, cioè i neutrini emessi dal Sole, è stato tutt'altro che semplice, dato che queste particelle interagiscono pochissimo con la materia. Per comprenderne la difficoltà, basti pensare che il Sole fa arrivare sulla terra circa 60 miliardi di neutrini per secondo e per centimetro quadrato. Tuttavia nel nostro rivelatore, contenente più di 200 m³ di scintillatore (il mezzo utilizzato per la rilevazione), riuscivamo a registrarne poco più di una quarantina al giorno.



La fotografia mostra la cupola del rivelatore interno sulla quale sono montati i fotomoltiplicatori che circondano il pallone contenente lo scintillatore. Gli occhi elettronici sono dotati di un concentratore ottico per catturare il più possibile i fotoni di luce prodotti dallo scintillatore.

Già negli anni Trenta del secolo scorso era stato ipotizzato dal fisico Hans Bethe (1906 – 2005) che il Sole fosse alimentato da una catena di reazioni di fusione nucleare. Questa catena inizia con la fusione di due nuclei di idrogeno per formare il deuterio, un isotopo il cui nucleo è composto da un protone e un neutrone. Il deuterio ha una massa inferiore alla somma delle masse dei due nuclei di idrogeno che lo generano: la differenza di massa si trasforma in energia, secondo il principio di equivalenza massa-energia $E=mc^2$. Lo stesso processo si ripete in tutta la catena di reazioni di fusione. Fortunatamente, cinque delle reazioni di fusione che compongono questa catena emettono neutrini, particelle che abbiamo catturato e rivelato, misurandone l'energia e altri parametri. I neutrini emessi da ciascuna di queste reazioni presentano una distribuzione energetica diversa e specifica della reazione che li genera. Misurando l'energia dei neutrini, siamo riusciti a risalire alle cinque reazioni che avvengono all'interno del Sole e che emettono neutrini.

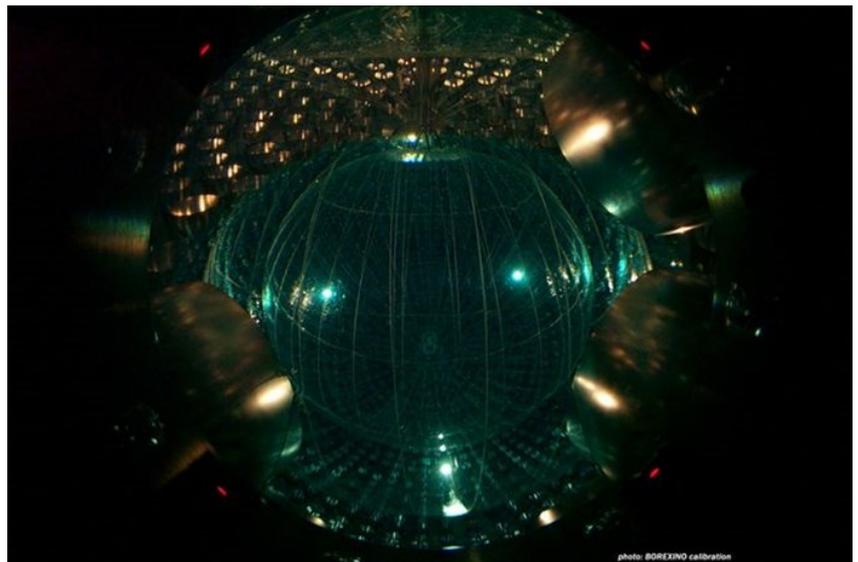
Lo studio delle stelle

Successivamente, ci siamo concentrati sullo studio delle stelle. Esistono stelle di diverse dimensioni: quelle simili al Sole, quelle più piccole e quelle di dimensioni maggiori. Le stelle con dimensioni uguali o inferiori a quelle del Sole sono alimentate dallo stesso meccanismo che alimenta il Sole stesso, noto come *catena pp* (protone-protone).

Altra storia sono le stelle con dimensioni superiori, almeno del 30% più grandi del Sole che vengono definite *stelle massive*. La *catena pp* nel Sole genera temperature che, nel suo nucleo, raggiungono circa 15 milioni di gradi. Questa elevata temperatura è essenziale per la stabilità del Sole. Infatti, la materia solare, estremamente densa, è soggetta alla forza di gravità, che la attira verso il centro, equidistante dalla distribuzione della materia stessa, e tende a farla collassare. Senza un meccanismo che contrasti questa attrazione gravitazionale, il Sole imploderebbe. Tuttavia, la pressione generata dall'agitazione termica degli atomi, dovuta alle alte temperature, bilancia la forza gravitazionale, garantendo l'equilibrio. Quando però si passa alle stelle massive, con una massa molto maggiore di quella del Sole, la temperatura prodotta dalla *catena pp* non è sufficiente a contrastare l'enorme forza gravitazionale. In questi casi, è necessaria una temperatura significativamente più alta. Ancora negli anni Trenta del secolo scorso, Hans Bethe e Carl Friedrich von Weizsäcker (1912 – 2007) ipotizzarono che, nelle stelle massive, la stessa reazione di fusione nucleare che avviene nel Sole (che essenzialmente «brucia» idrogeno) fosse catalizzata da carbonio, azoto e ossigeno. Questi elementi agiscono come catalizzatori, facilitando e accelerando le reazioni, dando origine al cosiddetto *ciclo CNO* (carbonio-azoto-ossigeno). Questa temperatura è sufficiente a contrastare la forza gravitazionale esercitata dalla materia in questo tipo di stelle.

Ma come dimostrare l'esistenza di questo ciclo? Ancora una volta sembrava che ci trovassimo di fronte a un'impresa impossibile. Dalla prospettiva delle stelle, la Terra appare come un punto infinitesimale, e i neutrini emessi sembrano incapaci di raggiungerci, fatta eccezione per eventi straordinari come l'esplosione di una supernova. In tali occasioni, infatti, viene emessa un'enorme quantità di neutrini che, anche sulla Terra, possiamo osservare come un'improvvisa ondata concentrata in un brevissimo intervallo di tempo. Tuttavia, la Natura è venuta ancora una volta in nostro aiuto. La *catena pp* è responsabile del 99% dell'energia prodotta dal Sole, mentre il restante 1% è generato dal *ciclo CNO*. La misura di questo 1% di neutrini provenienti dal *ciclo CNO* è stata estremamente complessa e ha richiesto circa quattro anni di analisi, non solo a causa del basso flusso di neutrini emessi, ma anche per via delle interferenze causate da residui radioattivi presenti nello scintillatore, nonostante la radio-purezza senza precedenti che eravamo riusciti a ottenere. Siamo riusciti tuttavia a rivelare e misurare i neutrini del *ciclo CNO*, dimostrando così l'esistenza di questo meccanismo. Questo risultato ha un'importanza fondamentale, poiché conferma il *ciclo CNO* come processo energetico nelle stelle massive.

Fotografia della parte interna del rivelatore Borexino fotografata da camere montate all'interno. Si può osservare il pallone interno contenente lo scintillatore, quello esterno di schermo mentre si intravedono gli occhi elettronici.



Le misure dell'energia solare attraverso i neutrini ci hanno anche permesso di osservare la stabilità del Sole su una scala temporale di oltre 100.000 anni. Ciò è possibile grazie alla natura stessa dei neutrini: mentre i neutrini prodotti nel nucleo solare, detto *core*, raggiungono la superficie del Sole in pochi secondi e impiegano circa 8 minuti per viaggiare fino alla Terra, i fotoni di luce, attraverso i quali si può misurare l'energia solare e che sono prodotti nel *core*, seguono un percorso caotico e sono continuamente assorbiti e riemessi, impiegando circa 100.000 anni per emergere sulla superficie solare. Il buon accordo fra le due misure, via neutrini e via fotoni, dimostra la stabilità del Sole proprio in un periodo di tempo di circa 100.000 anni.

La logica della scoperta scientifica

Vi ho presentato due esempi di esperimenti scientifici profondamente diversi tra loro: il primo si basa su osservazioni protrattesi per decenni, e da diversi osservatori, mentre il secondo è un singolo esperimento che ha richiesto oltre trent'anni, una vera e propria quasi mezza vita umana. Questo dovrebbe far comprendere come gli esperimenti scientifici possano trasformarsi in autentiche imprese e avventure umane.



La fotografia mostra uno scorcio dei fotomoltiplicatori montati, con tutti gli occhi elettronici e un operatore che ci sta lavorando.

Nell'esperimento *Borexino*, appena descritto, lungo questi trent'anni, si sono alternati numerosi fisici, ingegneri e tecnici. Complessivamente, più di 300 persone hanno partecipato a questo esperimento, con una presenza simultanea di circa 100-120 collaboratori nei momenti di maggiore attività. Dei collaboratori che hanno iniziato con me nel 1990 e sono arrivati fino al 2021, solo una quindicina hanno seguito tutto il percorso, mentre un numero analogo ha lasciato questa Terra negli anni di durata dell'esperimento. Nel frattempo, giovani coppie si sono formate e sono nati diversi bambini, testimoniando come il lavoro scientifico si intrecci continuamente con la vita personale di chi vi è coinvolto.

L'avventura umana si riflette anche nei sentimenti delle persone coinvolte: nella loro dedizione, nella disponibilità a trascorrere notti insonni per monitorare strumenti e riflettere su problemi irrisolti. Mi è capitato, per esempio, di andare a dormire con un problema aperto e svegliarmi al mattino con un'ipotesi di soluzione. È evidente che un pensiero costante non dà tregua al cervello, nemmeno durante il sonno.

Se invece pensiamo alle teorie sul *Big Bang*, ci troviamo di fronte a un'altra tipologia di impresa scientifica: gruppi di ricerca che si sono passati il testimone nel corso dei decenni, rimanendo focalizzati su un unico grande quesito, ossia comprendere come è nato l'Universo.

Sebbene io abbia fatto esempi tratti dalla fisica, credo che l'esperienza non sia molto diversa in altre discipline scientifiche, come la biologia. Conosco colleghi che hanno dedicato la vita allo studio del DNA e altri impegnati nelle neuroscienze.

La scienza, dunque, non è un pensiero filosofico né qualcosa che si risolve facilmente con un'intuizione: è un processo che matura nel tempo, attraverso un lavoro costante e rigoroso.

Mi è stato riferito – non so quanto sia vero – che in alcune scuole secondarie, e forse persino primarie, si incoraggi l'idea che gli studenti non debbano riprodurre in laboratorio esperimenti noti, ma piuttosto utilizzare la propria creatività per scoprire certi fenomeni. Mi dispiace dirlo, ma chi sostiene questo approccio dimostra di non conoscere cosa sia la scienza e come essa procede. La scienza non è improvvisazione né pura intuizione, anche se la creatività ha senza dubbio un ruolo cruciale. Anche esperimenti apparentemente semplici, come la misura della carica dell'elettrone, hanno richiesto anni di preparazione. Persino misure meno complesse necessitano di intuizioni che difficilmente uno studente può avere senza un'adeguata preparazione ed esperienza.

Per concludere

Vorrei concludere sottolineando che la cultura scientifica non è avulsa dalla vita e non dovrebbe esserci una netta separazione tra pensiero scientifico e pensiero umanistico, come purtroppo accade spesso, anche nelle scuole. Lo scienziato non dovrebbe limitarsi al ruolo di tecnico che esegue il proprio lavoro, ma cercare di comprendere il significato più ampio delle sue scoperte. Allo stesso modo, l'umanista dovrebbe riconoscere come la cultura scientifica abbia aperto nuove frontiere alla ricerca nelle discipline umanistiche.

Ricordo un'esperienza illuminante con un'insegnante di liceo che, parlando di un'epoca storica, riusciva a intrecciare letteratura, poesia, musica e scienza, offrendo una visione d'insieme. Pur senza approfondire ogni singolo aspetto, trasmetteva il senso di un'epoca, mostrando come attività umanistiche e scientifiche maturassero insieme in un determinato contesto culturale. Questa capacità di collegare saperi diversi sarebbe un enorme vantaggio per l'istruzione, un'opportunità che dovremmo coltivare.

Gianpaolo Bellini (Professore Emerito all'Università di Milano, Scienziato Emerito dell'INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)

Nota

Dello stesso autore può interessare anche: *La scoperta dei geoneutrini in EmmeCiquadro n.39*. https://emmeciquadro.euresis.org/mc2/39/mc2_39_geoneutrini_bellini.pdf

