

Neutrino di Majorana e Universo

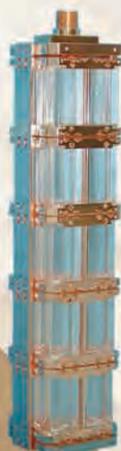
L'Universo in cui viviamo è il risultato di un'esplosione iniziale, il cosiddetto Big Bang. La materia in esso contenuta, inizialmente concentrata in un solo punto, si è diffusa formando le strutture che oggi conosciamo come le galassie, le stelle e i pianeti. L'Universo attuale è formato sostanzialmente di materia e non di antimateria. Non era così all'origine dell'Universo quando materia e antimateria coesistevano distruggendosi e ricreandosi continuamente. Quando e perché la materia abbia preso il sopravvento rendendo possibile l'esistenza dell'Universo così come lo conosciamo è una domanda a cui ancora non è possibile dare una risposta. La prova sperimentale dell'esistenza del $0\nu\beta\beta$ potrebbe spiegare la prevalenza di materia nell'Universo e la creazione delle strutture cosmiche.



Ettore Majorana: Storia di un'Idea

L'idea che sta alla base della ricerca di CUORE ha ormai più di 80 anni. Negli anni Trenta, Ettore Majorana faceva parte a Roma del gruppo di ricerca di Enrico Fermi noto come "i ragazzi di via Panisperna".

Nel 1937 Majorana pubblicò un famoso articolo, "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", in cui ipotizzava che neutrino e antineutrino fossero la stessa particella. Successivamente, nel 1939, Wendell Furry osservò che la teoria di Majorana prevedeva la possibilità che potesse verificarsi il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini. L'interesse per questo processo è cresciuto nel corso degli anni nella comunità scientifica e oggi molti esperimenti a livello mondiale cercano di scoprire se Majorana avesse ragione o meno.



30 Anni di Misure ai LNGS

CUORE è l'ultimo di una lunga serie di esperimenti dedicati alla ricerca del $0\nu\beta\beta$ effettuata ai LNGS. Grazie alle competenze sviluppate nel corso degli anni, partendo dal lavoro pionieristico del piccolo gruppo di Ettore Fiorini con singoli cristalli di pochi grammi, si è passati alla costruzione delle prime torri di dimensioni ridotte, poi a CUORICINO (2003-2008) e CUORE-0 (2013-2015) e, finalmente, a CUORE (dal 2017), il primo esperimento bolometrico al mondo con una massa dell'ordine di una tonnellata.

CUORE



La Ricerca del Doppio Decadimento Beta Senza Emissione di Neutrini

I neutrini sono particelle estremamente leggere e senza carica elettrica in grado di attraversare la materia interagendo pochissimo. Per questo motivo, nonostante i neutrini siano presenti in grandi quantità nell'Universo, sono molto difficili da osservare e il loro studio richiede la costruzione di infrastrutture ed esperimenti complessi spesso posizionati in laboratori sotterranei.

Gli esperimenti finora condotti hanno dimostrato che esistono diverse "famiglie" di neutrini e che un neutrino di una certa famiglia può trasformarsi in uno di un'altra, ma non sappiamo se esistano solo le tre famiglie finora osservate o se ne rimangano altre da scoprire. Sappiamo inoltre che i neutrini hanno una massa molto piccola ma non ne conosciamo ancora il valore.

Un altro mistero sembra essere la relazione tra i neutrini e le loro antiparticelle: essi sono allo stesso tempo particelle e antiparticelle, secondo la descrizione proposta dal fisico Ettore Majorana, oppure si comportano esattamente come tutte le altre particelle fondamentali?

Già nel 1939, i fisici avevano teorizzato un processo che, se confermato, permetterebbe di rispondere ad alcune di queste domande: si tratta del cosiddetto doppio decadimento beta senza emissione di neutrini ($0\nu\beta\beta$). Questo processo consiste nell'emissione di una sola coppia di elettroni da parte di un nucleo in seguito alla conversione di due neutroni in due protoni.

La sua osservazione confermerebbe che il neutrino è una particella di tipo Majorana e fornirebbe importanti informazioni sul valore della massa del neutrino. Inoltre, poiché il $0\nu\beta\beta$ viola le regole del 'Modello Standard', l'attuale teoria che descrive il mondo delle particelle, la sua scoperta potrebbe aprire la strada a nuovi modelli più esaurienti in grado di spiegare alcune delle anomalie che osserviamo e, in particolare, perché nell'Universo c'è molta più materia rispetto all'antimateria.

Negli ultimi decenni, diversi esperimenti hanno cercato il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini utilizzando tecnologie sempre più all'avanguardia. Per vedere il segnale i rivelatori devono avere grande massa, con un'eccezionale risoluzione energetica e una bassissima radiazione ambientale. Se osservato, il segnale sperimentale del decadimento sarebbe molto chiaro ma rarissimo: ci si aspetta di vedere solo alcuni decadimenti in 5-10 anni di presa dati con un rivelatore di molte tonnellate.

Collaborazione

CUORE è una collaborazione di oltre 150 scienziati provenienti in maggioranza da istituzioni italiane e statunitensi. CUORE è finanziato da: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), US Department of Energy (DOE) Office of Science, National Science Foundation (NSF), Alfred P. Sloan Foundation, University of Wisconsin Foundation, Yale University e National Energy Research Scientific Computing Center (NERSC).



Il Rivelatore

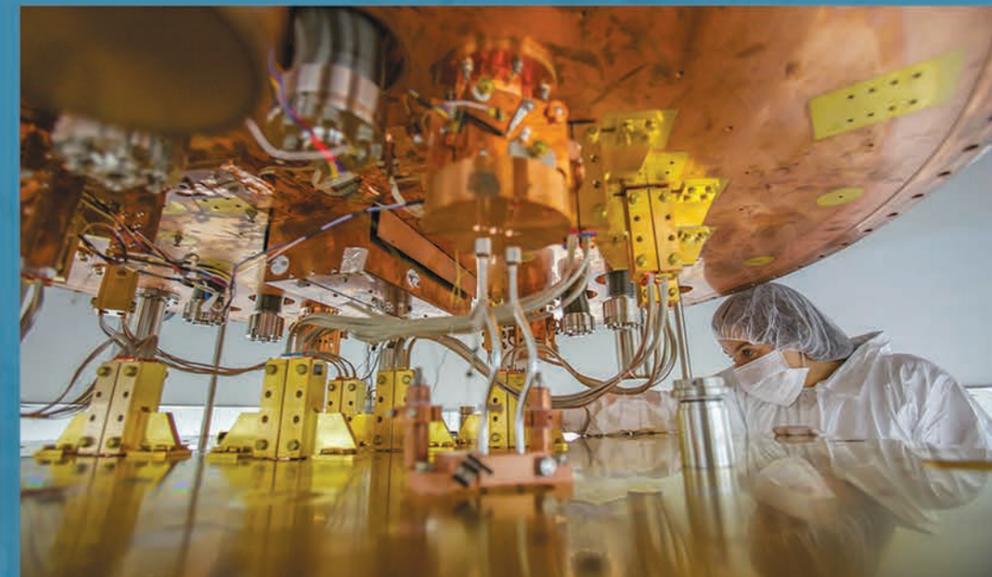
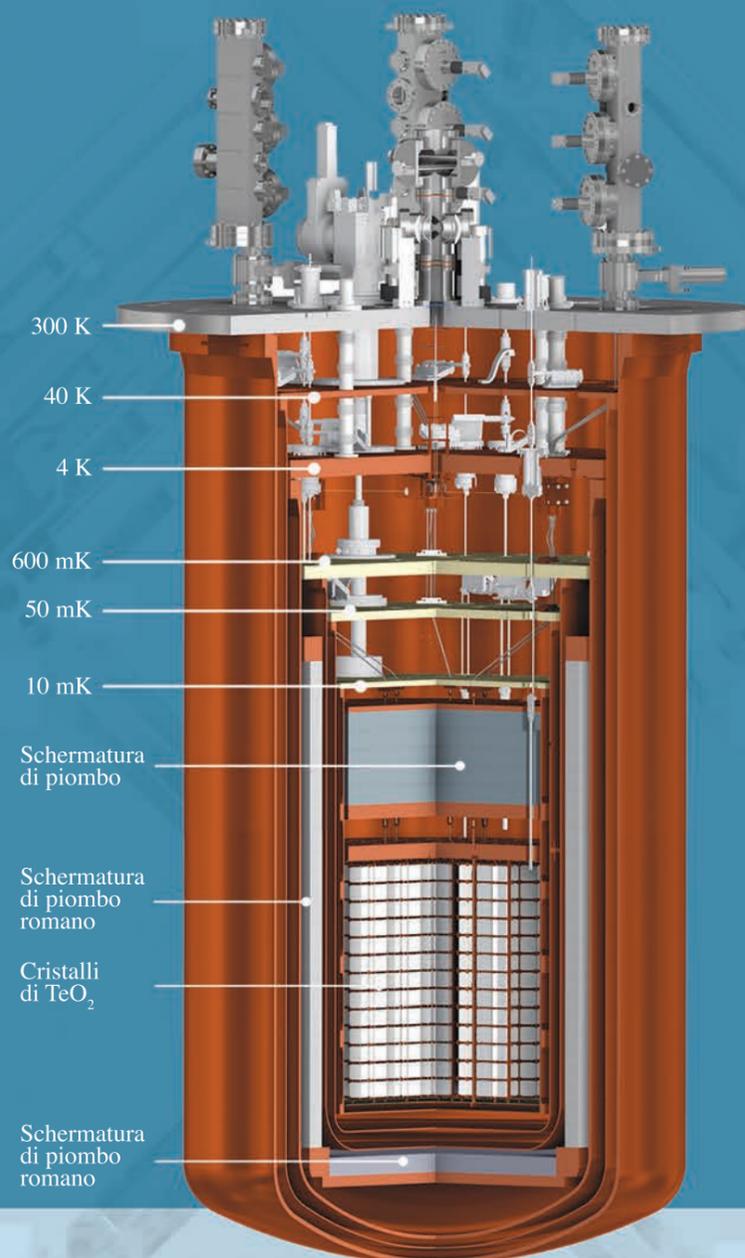
CUORE è costituito da 988 cristalli di ossido di tellurio (TeO_2) suddivisi in 19 torri. I cristalli contengono l'isotopo tellurio-130 (^{130}Te), il candidato al doppio decadimento beta senza emissione di neutrini.

Il tellurio è particolarmente indicato per la costruzione di rivelatori di questo tipo. Il ^{130}Te è infatti uno dei pochi isotopi presenti in natura in grado di generare il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini. L'isotopo è presente in grande quantità (34.2%) all'interno del tellurio naturale e perciò non richiede "arricchimenti isotopici" difficili e costosi. Rispetto ad altri isotopi, il ^{130}Te decade liberando una energia relativamente elevata, rendendo più facile individuare tali decadimenti rispetto ai segnali di altra natura. I cristalli di ossido di tellurio sono particolarmente puri dal punto di vista della radioattività ambientale e sono chimicamente stabili e meccanicamente robusti, per cui i rivelatori possono essere utilizzati per anni.

Un'interazione o un decadimento all'interno di un cristallo comporta un rilascio di energia, che si traduce in un lieve aumento della temperatura del cristallo stesso e che può essere trasformato in segnale elettrico da un sensore incollato sul cristallo. A temperatura ambiente non si è in grado di vedere questa minuscola variazione, ma a temperature criogeniche questo è invece possibile. Particolarità di questa tecnica (chiamata tecnica bolometrica) è che i cristalli fungono sia da sorgente del decadimento che da rivelatore dello stesso.

CUORE funziona quindi a temperature criogeniche: gli oltre 740 chilogrammi di cristalli, più altre 4 tonnellate tra parti in rame e schermi in piombo, sono raffreddati sino a pochi millesimi di grado sopra lo zero assoluto ($-273.14\text{ }^\circ\text{C}$). Queste temperature estreme sono raggiunte nel criostato grazie all'azione combinata di due refrigeratori, uno dei quali utilizza una miscela particolare di elio ^3He e ^4He .

Oltre allo strato di roccia che scherma i laboratori dai raggi cosmici, il rivelatore è protetto dalla radioattività ambientale da tre schermature di piombo, due installate all'interno e una all'esterno del criostato. Una delle due interne, che forma una specie di bicchiere intorno al rivelatore, è realizzata con antico piombo romano.



Piombo Romano

Parte del piombo utilizzato in CUORE proviene da un relitto affondato nel I secolo a.C. vicino ad Oristano, in Sardegna. Quasi un migliaio di lingotti di circa 33 chili l'uno furono recuperati all'inizio degli anni novanta, in uno sforzo congiunto tra fisici ed archeologi grazie ad un accordo tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e la Soprintendenza Archeologica di Cagliari e Oristano. Per circa duecentosettanta di essi è stata autorizzata la fusione per essere utilizzati in esperimenti di fisica ai LNGS. La parte superiore di questi lingotti, recante il marchio dell'antica ditta romana produttrice, è stata preventivamente asportata e consegnata per l'esposizione nel Museo Archeologico Nazionale di Cagliari, insieme ad altri reperti.

Il piombo in natura contiene una percentuale di piombo-210 (^{210}Pb), un isotopo radioattivo generato dal decadimento dell'Uranio-238. Il ^{210}Pb ha un tempo di dimezzamento di 22 anni (questo significa che dopo tale periodo la quantità iniziale di ^{210}Pb si è dimezzata). Qualunque campione estratto negli ultimi decenni presenta tracce di ^{210}Pb perché, sebbene questo continui a decadere, l'uranio presente nei minerali lo genera nuovamente. I Romani, inconsapevolmente, separando l'argento dal piombo, rimossero anche l'uranio, dando origine, 2000 anni dopo, ad un piombo con caratteristiche uniche. L'utilizzo di questo piombo offre all'esperimento CUORE l'opportunità unica di creare un ambiente estremamente puro dal punto di vista della radioattività.



Proteggere l'Esperimento dagli Esseri Umani

Come si può vedere dalle immagini (fase di installazione del criostato nella foto in alto e controlli finali del rivelatore nella foto in basso), i ricercatori lavorano indossando delle tute particolari. Questo tipo di procedura non è necessaria per proteggere l'uomo dall'esperimento ma, al contrario, l'esperimento dagli esseri umani. CUORE, infatti, è talmente sensibile che anche una goccia di sudore potrebbe contaminare gravemente l'esperimento, rovinando la sua sensibilità.

Il Metro Cubo più Freddo dell'Universo

Sebbene la temperatura raggiunta dal rivelatore di CUORE non sia la più fredda mai ottenuta, l'esperimento detiene un altro record: il suo volume sperimentale è infatti il metro cubo più freddo dell'Universo conosciuto. Non ci sono altre strutture naturali o costruite dall'uomo al contempo così grandi e fredde. Anche la temperatura dello spazio interstellare, 2.73 gradi sopra lo zero assoluto, è più alta rispetto al volume interno del criostato di CUORE.