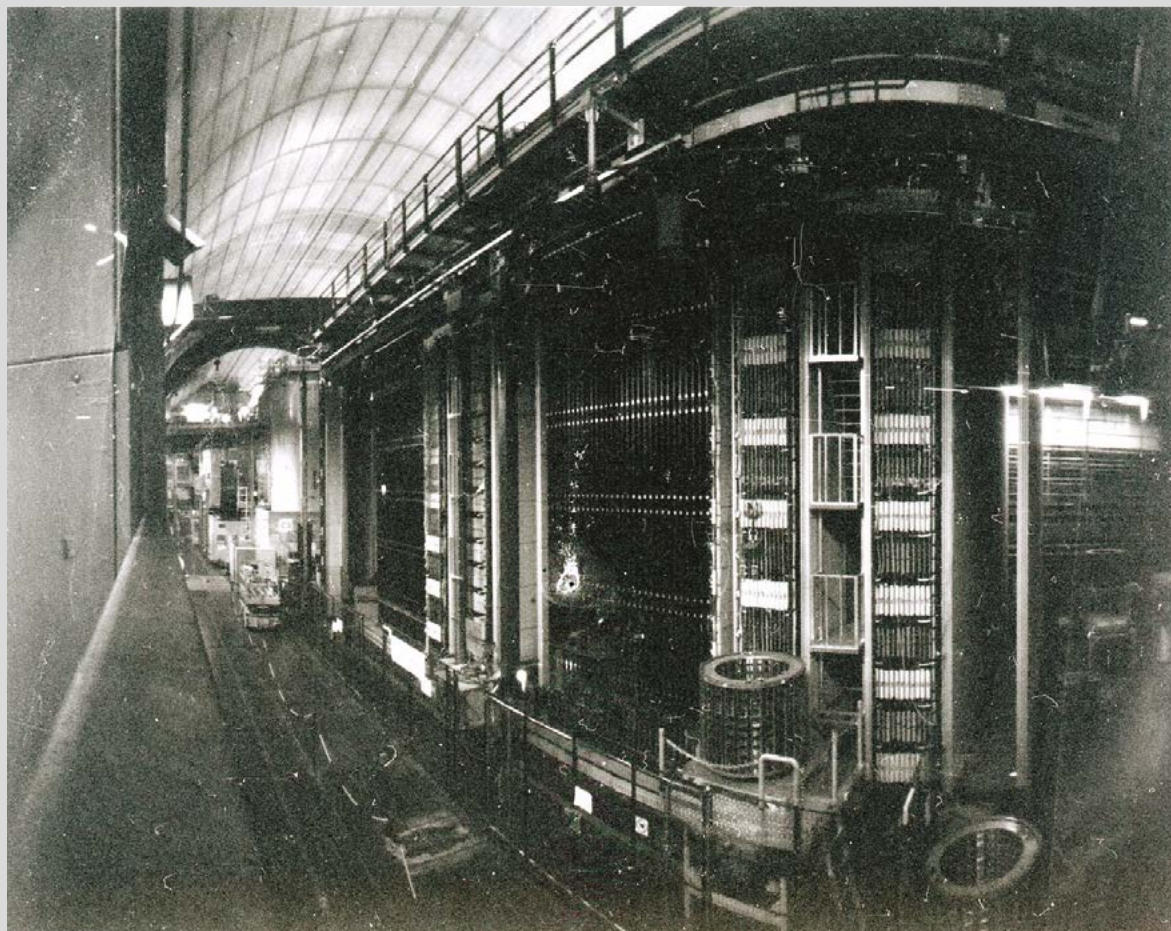


Da un sapore a un altro

I rivelatori sotterranei per studiare l'oscillazione dei neutrini

di Andrea Bersani



a.
OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) è stato progettato per osservare direttamente la comparsa di neutrini tau in un fascio di neutrini muonici prodotto al CERN e inviato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso nell'ambito del progetto CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso). L'esperimento ha raccolto dati tra il 2008 e il 2012 e l'osservazione di eventi di neutrino tau ha fornito la prima evidenza diretta dell'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini tau. L'immagine mostra il rivelatore di OPERA presso i laboratori del Gran Sasso in una foto analogica realizzata con una emulsione fotografica come quelle su cui si basava il rivelatore (vd. p. 40 in *Asimmetrie* n. 31, ndr).

Ogni secondo, miliardi di neutrini attraversano indisturbati ogni cosa (compreso il nostro corpo!). Proprio questa loro natura sfuggente rende i neutrini tra le particelle più difficili da studiare. La loro sezione d'urto, cioè la probabilità di interagire e lasciare una traccia, è estremamente bassa. Da questa rarità nasce la difficoltà di misurare le proprietà delle tre generazioni, o "sapori", dei neutrini: elettronico, muonico e tauonico. Tra le questioni aperte ci sono la misura delle masse, la determinazione dei parametri che governano le oscillazioni da

un sapore all'altro e la possibile differenza di comportamento tra neutrini e antineutrini. Per questo è fondamentale per noi costruire rivelatori molto grandi e altrettanto importante è cercare di eliminare ogni sorgente di segnali indesiderati, materiali radioattivi, disturbi elettromagnetici, raggi cosmici, che accecherebbero i nostri strumenti. Per un rivelatore di neutrini, il fondo di radiazione ambientale è come il Sole di mezzogiorno per una macchina fotografica che tenti di distinguere la fiamma di un fiammifero acceso a cento metri di



b.
DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) è un esperimento internazionale di nuova generazione in costruzione tra il Fermilab (Illinois) e la Sanford Underground Research Facility (Sud Dakota), negli Stati Uniti. Utilizzerà un intenso fascio di neutrini e grandi rivelatori ad argon liquido per studiare con elevata precisione le oscillazioni dei neutrini, determinare l'ordine delle loro masse e cercare possibili differenze tra neutrini e antineutrini che potrebbero aiutare a spiegare l'origine dell'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo. Nella foto è visibile la caverna che ospiterà DUNE, finita di costruire nel 2024.

distanza: il segnale c'è, ma rischia di perdersi completamente nella luce di fondo. Per questo motivo i maggiori esperimenti, con cui cerchiamo di misurare le proprietà sopra citate, sono molto ben nascosti in profondità sotto qualche montagna, o in altri luoghi straordinariamente remoti, in diversi angoli del mondo. Le cosiddette "oscillazioni" sono state per molti decenni il principale oggetto di studio nel campo dei neutrini. Essi sono prodotti e rivelati sempre e solo attraverso l'interazione debole in uno dei tre sapori, i quali, però, non coincidono con gli stati di massa, chiamati ν_1 , ν_2 , ν_3 : ciascun sapore è una diversa combinazione quantistica di questi tre stati. Seguendo le regole della meccanica quantistica, queste "sovrapposizioni" di stati si propagano in modo diverso e complesso, trasformandosi le une nelle altre, secondo un *pattern* che simula una oscillazione dipendente dalla distanza percorsa e dall'energia del neutrino stesso: tutti questi fenomeni, però, possono essere descritti grazie a pochi parametri, che sono appunto ciò che tutti questi esperimenti si sono proposti di misurare.

Tra i laboratori sotterranei più importanti ci sono i nostri Laboratori del Gran Sasso, raggiungibili attraverso il traforo che, passando 1400 metri sotto la vetta del monte più alto degli Appennini, collega l'Aquila a Teramo. Troviamo lì diversi esperimenti che hanno attratto ricercatori da Asia, Europa e Americhe, molti proprio dedicati al neutrino e alle sue oscillazioni.

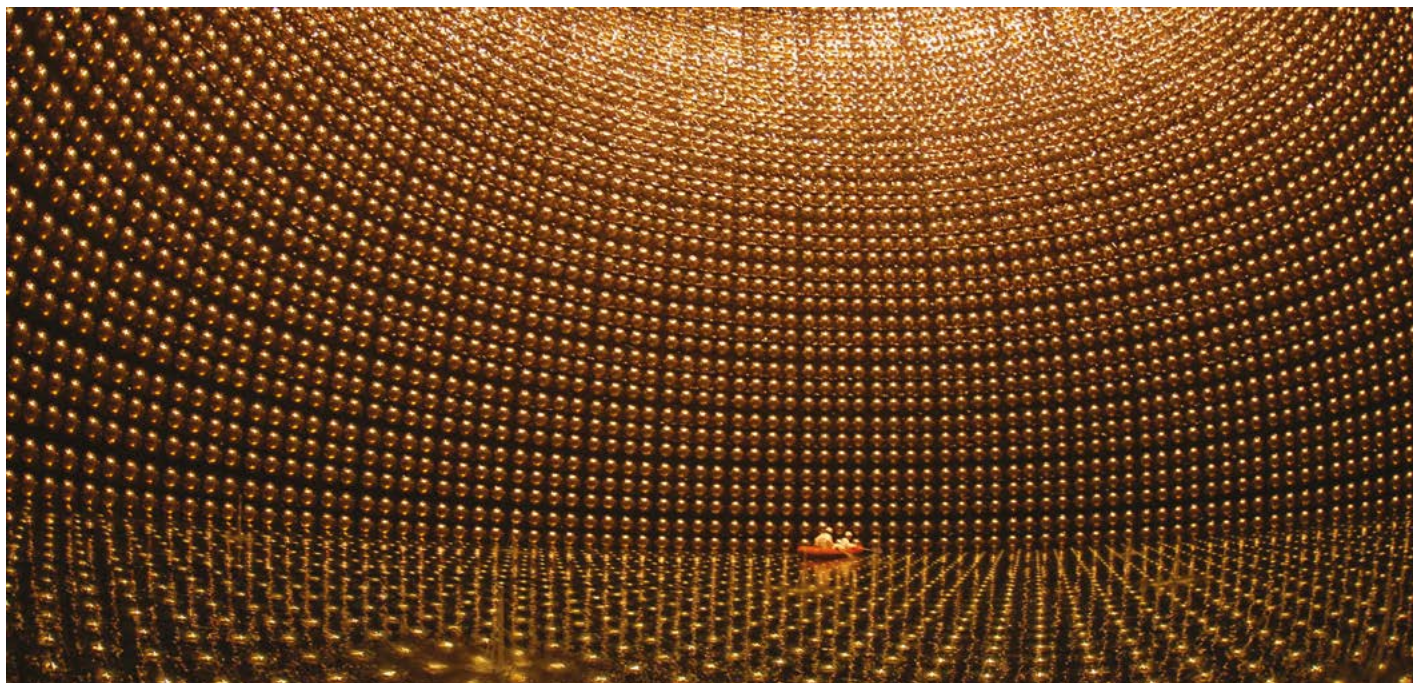
Almeno tre hanno segnato pietre miliari per lo studio delle oscillazioni. BOREXINO, basato su uno scintillatore liquido estremamente radiopuro, ha permesso di misurare in tempo reale neutrini solari di bassissima energia, contribuendo in modo decisivo alla comprensione dei meccanismi di produzione di energia nel Sole e alla verifica del quadro delle oscillazioni dei neutrini solari.

Tra gli esperimenti più grandi costruiti presso i Laboratori del

Gran Sasso c'è OPERA (vd. fig. a), basato su lastre fotografiche (milioni di lastre fotografiche!), in grado di ricostruire con precisione micrometrica le tracce delle particelle prodotte nelle interazioni, l'unico in grado di vedere la firma caratteristica del neutrino tau. OPERA ha dimostrato che alcuni neutrini muonici prodotti al CERN, durante il percorso di 730 km per arrivare ai Laboratori del Gran Sasso, si erano trasformati in neutrini tau. I neutrini trasformati erano appena dieci su 5603 interazioni ricostruite! Lo stesso fascio è stato utilizzato da ICARUS, un'idea di Carlo Rubbia nella seconda metà degli anni '70 del secolo scorso, un esperimento basato sulla ricostruzione di tracce prodotte in un enorme recipiente pieno di argon, il cui scopo principale era studiare l'ipotetica oscillazione in un quarto tipo di neutrino, la cui esistenza non è ancora stata dimostrata.

Andando oltreoceano, la miniera di Homestake in Sud Dakota sarà la sede di DUNE (vd. fig. b), basato sull'esperienza di ICARUS, il più grande esperimento oggi in costruzione per la misura di oscillazione del neutrino, disegnato per rivelare neutrini prodotti al Fermilab, vicino a Chicago, a oltre 1300 km di distanza.

La maggior parte di questi esperimenti sono stati installati in miniere abbandonate o ancora in attività, come SNO a Subdury, in Canada, che dopo una fase in cui ha usato acqua pesante, in cui il deuterio prende il posto dell'idrogeno, principalmente per lo studio delle oscillazioni dei neutrini solari, è stato riconvertito recentemente a scintillatore, per affiancare i risultati di BOREXINO e KamLAND, il primo già citato, il secondo situato nella miniera di Kamioka, in Giappone. KamLAND ha avuto molte vite. Prima era principalmente dedicato alla misura delle oscillazioni di antineutrini provenienti dai reattori nucleari di Giappone e Corea e di neutrini provenienti dai decadimenti dei materiali radioattivi nella Terra, i cosiddetti "geoneutrini", poi è stato migliorato per osservare neutrini solari, infine "drogato"



c.

SuperKamiokaNDE è un grande rivelatore Cherenkov contenente 50.000 tonnellate di acqua ultrapura, situato in Giappone. Misurando neutrini prodotti nell'atmosfera, dal Sole, da acceleratori e da altre sorgenti, ha fornito risultati fondamentali sul fenomeno delle oscillazioni dei neutrini, contribuendo alla scoperta premiata con il premio Nobel per la fisica nel 2015.

con un particolare isotopo dello XENON per misurare il doppio decadimento beta senza neutrini.

Nella stessa miniera di Kamioka si trovano diversi esperimenti. KamiokaNDE è stato il primo, nato per osservare il decadimento del protone (che finora non è stato osservato, peraltro) e che è valso ai suoi scienziati il premio Nobel nel 2002 per la prima osservazione di neutrini astrofisici. Evolutosi in SuperKamiokaNDE (vd. fig. c), con 50.000 tonnellate di acqua osservata da migliaia di fotomoltiplicatori di oltre mezzo metro di diametro, l'esperimento mostrò che i neutrini muonici prodotti nell'alta atmosfera cambiavano sapore attraversando la Terra, una scoperta premiata con il Nobel per la fisica 2015 a Takaaki Kajita. SuperKamiokaNDE verrà sostituito da HyperKamiokaNDE, che inizierà a prendere dati nel 2028 e conterrà l'enorme massa di 260.000 tonnellate d'acqua. La ricerca di volumi d'acqua giganteschi per neutrini di altissima energia ha portato a sfruttare grandi masse d'acqua fornite dalla natura stessa. Il primo esperimento, tutt'ora in attività, si trova nel lago Bajkal, oltre mille metri sotto la superficie del lago più grande del mondo. Ammodernato diverse volte, è in costruzione la sua evoluzione verso la scala

del chilometro cubo, che è considerata la meta di questo tipo di rivelatori. Al Polo Sud (letteralmente, il rivelatore contiene il Polo Sud geografico!) è stato costruito IceCube, a circa 2 km di profondità nel ghiaccio: questi rivelatori guardano principalmente al cielo, ma sono ottimizzati per i neutrini che vengono dal basso, così da schermare al meglio i segnali "meno interessanti" provenienti dall'alto. Bajkal e IceCube "guardano" a direzioni diverse nel cielo. Un altro grande rivelatore è in costruzione nel Mediterraneo, KM3NeT (vd. p. 18, ndr). Quest'ultimo è diviso in due parti, ARCA e ORCA, il primo più grande e distribuito, ottimizzato per i neutrini di origine astrofisica, al largo delle coste siciliane, il secondo più piccolo e denso di rivelatori, dedicato proprio ai neutrini atmosferici e allo studio delle oscillazioni, al largo di Tolone: miliardi di metri cubi d'acqua strumentati con decine di migliaia di rivelatori per osservare le particelle più leggere dell'universo. È solo grazie al silenzio delle profondità, sotto chilometri di roccia, acqua o ghiaccio, che possiamo studiare i neutrini e cercare risposte ad alcune delle domande più profonde sulla materia e sull'universo.

Biografia

Andrea Bersani è tecnologo alla sezione INFN di Genova, dove si occupa principalmente di magneti superconduttori per acceleratori e rivelatori di particelle, dopo aver lungamente lavorato su sviluppo, costruzione e integrazione di rivelatori, sia per fisica adronica che soprattutto per neutrini.