

Il neutrino che verrà

Gli esperimenti futuri

di Paolo Bernardini

In questi anni il panorama della fisica del neutrino si è arricchito di così tanti nuovi dettagli, grazie ai molti recenti risultati, da far credere che gli esperimenti attualmente in corso possano presto completare le conoscenze sul neutrino, esaurendo questo filone di ricerca. In realtà non è così. Migliaia di ricercatori in tutto il mondo, tra i quali molti italiani, continuano a progettare e realizzare nuovi esperimenti, sempre più complessi e tecnologicamente avanzati. A spingerli non è solo un interesse specifico sui neutrini, ma anche la convinzione che queste particelle misteriose possano ancora riservare entusiasmanti sorprese, di valenza più generale. Misure di precisione dell'oscillazione dei neutrini, un fenomeno ormai ben noto, potrebbero evidenziare delle anomalie e aprire la strada a nuova fisica. I neutrini potrebbero addirittura fornirci la chiave per comprendere perché la materia domina l'universo e l'antimateria sia destinata a sopravvivere solo pochi istanti.

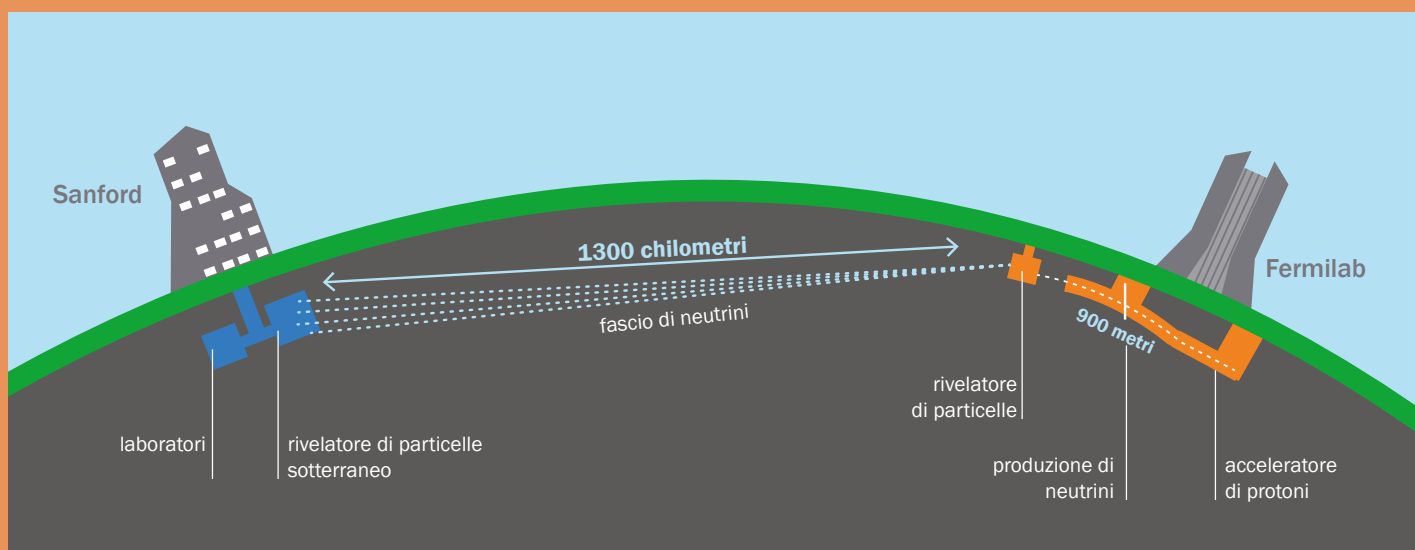
Per descrivere i tanti progetti sperimentali relativi ai neutrini sarebbe necessario un intero volume.

Qui ci si limiterà alle più importanti misure nell'ambito di tre tra i principali progetti futuri. Un esperimento che si prevede prenderà dati già alla fine del 2022, denominato Juno, è in costruzione in Cina a circa 53 chilometri da due impianti nucleari. Nota la potenza dei reattori, è possibile stimare il flusso di antineutrini elettronici emessi dai frammenti instabili della fissione nucleare. Juno sarà costituito da una gigantesca sfera, di 40 metri di diametro, riempita con 20 mila tonnellate di scintillatore liquido, in grado di rivelare gli antineutrini con una statistica mai ottenuta in passato.

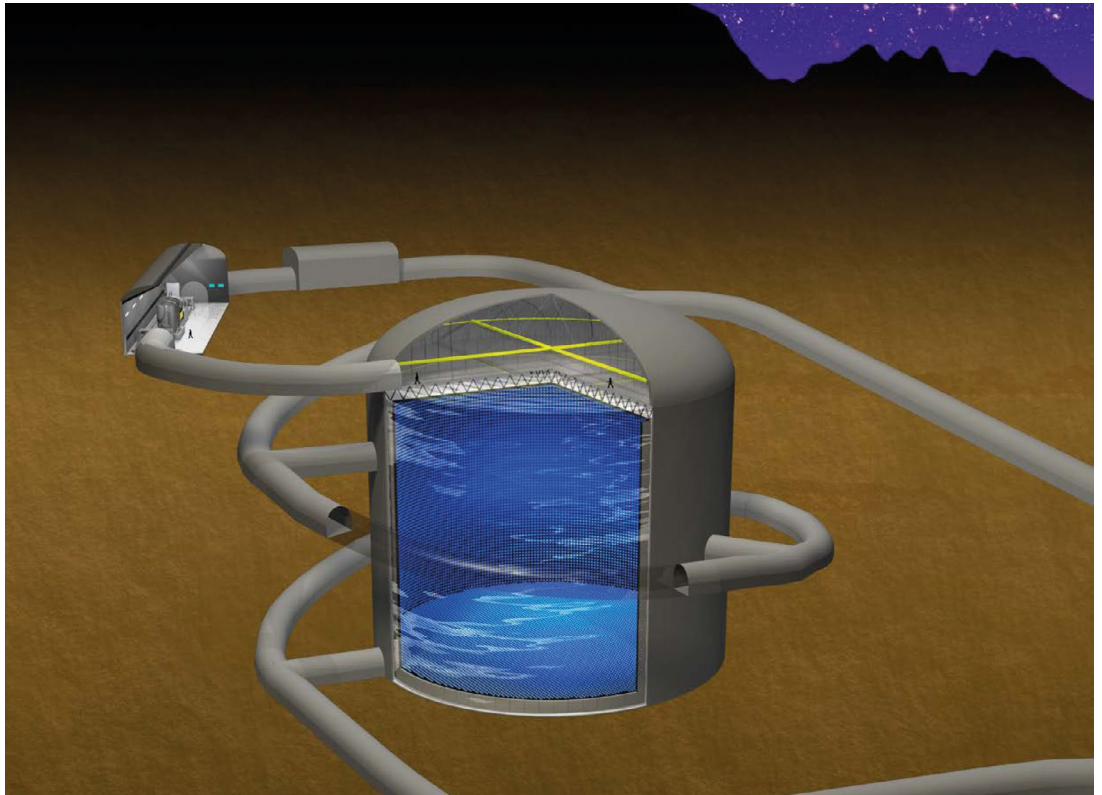
È previsto che l'oscillazione provochi una notevole riduzione del flusso degli antineutrini generati dai reattori e che a questa riduzione si sovrapponga un'ulteriore variazione, dipendente dalla gerarchia di massa e rivelabile grazie all'ottima risoluzione in energia dell'esperimento. In queste condizioni, Juno può risolvere alcune discrepanze tra misure precedenti e determinare la gerarchia delle masse associate ai neutrini.

La gerarchia di massa è oggetto di indagine

a. L'esperimento DUNE studia l'oscillazione dei neutrini muonici a grandi distanze. I neutrini, prodotti al Fermilab dall'interazione di un fascio di protoni con un bersaglio, sono osservati inizialmente in un rivelatore posto nello stesso laboratorio e, successivamente, da un rivelatore sotterraneo a 1300 chilometri di distanza a Sanford.



b.
Hyper-Kamiokande,
il grande rivelatore di
neutrini in costruzione a
Kamioka (Giappone), sarà
dieci volte più grande del
suo predecessore Super-
Kamiokande.



anche da parte di due altri importanti progetti: DUNE, negli Stati Uniti, e Hyper-Kamiokande (Hyperk), in Giappone. Essi intendono sfruttare l'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini elettronici non solo per studiare le masse dei neutrini, ma anche per misurare un parametro associato alla violazione della simmetria CP. I neutrini si prestano perfettamente a tale misura perché gli antineutrini non sono solo le antiparticelle dei neutrini, ma anche le loro immagini speculari. Infatti, i neutrini sono sinistrorsi (hanno impulso e spin antiparalleli), mentre gli antineutrini sono destrorsi (hanno impulso e spin paralleli). In conclusione, gli antineutrini sono il risultato dell'operazione CP sui neutrini. DUNE e Hyperk hanno in programma di verificare se l'oscillazione dei neutrini abbia caratteristiche differenti rispetto a quella degli antineutrini. Entrambi gli esperimenti utilizzano un fascio di neutrini muonici, un rivelatore vicino per monitorare il fascio prima che l'oscillazione si manifesti e un gigantesco rivelatore remoto, per misurare l'effetto dell'oscillazione. I neutrini

muonici vengono prodotti a partire da un fascio di protoni estratti da un acceleratore. Questi incidono sul bersaglio, tipicamente un pezzo di grafite, generando un gran numero di pioni carichi che si propagano all'interno di un tunnel sotterraneo. Un opportuno sistema di magneti permette di focalizzare i pioni di carica positiva o viceversa quelli di carica negativa. Essendo particelle instabili, i pioni decadono in volo generando muoni e neutrini muonici. La fine del tunnel arresta i muoni e i pioni residui, mentre i neutrini proseguono il loro cammino nel sottosuolo verso i rivelatori. Se le polarità dei magneti sono adattate per collimare pioni positivi e disperdere pioni negativi, il fascio inizialmente sarà costituito da neutrini muonici. Se viceversa vengono collimati pioni negativi, il fascio sarà costituito da antineutrini muonici. In entrambi i casi l'oscillazione fa sì che nei rivelatori lontani arrivino anche neutrini o antineutrini elettronici, inizialmente assenti. Sebbene gli obiettivi di DUNE e Hyperk siano molto simili, in realtà i due esperimenti sono alternativi e complementari. Non solo per le

c.
Il 4 dicembre 1930
Wolfgang Pauli scrive
una lettera ai fisici che
partecipano a un congresso
a Tubinga in cui ipotizza
l'esistenza del neutrino.

tecniche adottate, ma anche per le diverse strategie di misura. Infatti, le ricerche sulla violazione di CP devono tener conto del cosiddetto "effetto materia", cioè del fatto che gli elettroni della materia ordinaria agiscono in maniera opposta sull'oscillazione dei neutrini e degli antineutrini elettronici e quindi la violazione di CP non può essere indagata se le misure non vengono "ripulite" da questo effetto.

La scelta operata dalla collaborazione Hyperk è quella di utilizzare un fascio in una banda di energia molto stretta e di posizionare il gigantesco rivelatore sotterraneo (258 mila tonnellate di acqua purissima) a "solo" 300 chilometri dall'acceleratore di Jparc, in modo da rendere trascurabile l'effetto materia. Viceversa, i ricercatori di Dune hanno optato per un fascio con uno spettro energetico molto più ampio e un rivelatore, composto da quattro moduli per un totale di 52 mila tonnellate di argon liquido, posto a una distanza di circa 1300 km dall'acceleratore che sarà in funzione al Fermilab. In questo caso l'effetto materia non sarà assolutamente trascurabile, ma sarà possibile distinguere tra effetto materia e un'eventuale violazione di CP osservando il profilo dei picchi di oscillazione a diverse energie.

È noto da tempo che c'è violazione di CP nel settore dei quark, ma tale violazione è così esigua da non riuscire a spiegare lo sbilanciamento tra materia e antimateria che osserviamo nell'universo. Tale sbilanciamento potrebbe essere spiegato se Dune e Hyperk scoprissero che la violazione di CP si manifesta anche nel settore dei leptoni, in particolare nell'oscillazione dei neutrini.

Nel 1930 Wolfgang Pauli preferì rimanere a Zurigo perché invitato a una serata danzante, piuttosto che partecipare a un congresso a Tubinga. Inviò ai congressisti solo una irrituale lettera in cui ipotizzava l'esistenza del neutrino. Son trascorsi 90 anni da allora e forse oggi Pauli rinunciarebbe al ballo pur di sapere quali progressi scientifici e quali progetti futuri hanno avuto e ancora hanno come fondamento la sua "disperata" ipotesi.

Original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.96 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich herzlichst
ansprechen bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verwinkelten Ausweg
verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
sich mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedemfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche
 β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
 β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
würde, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente
verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons
nicht grösser sein kann, als die eines γ -Strahls und darf dann
 μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Ideen
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
 γ -Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,
gesteht und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen β -Spektrum
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. Leider kann ich nicht
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabhämlich
bin. Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer
untertänigster Diener

ges. W. Pauli

Biografia

Paolo Bernardini è docente presso l'Università del Salento. Si interessa di raggi cosmici e fisica del neutrino. Ha partecipato agli esperimenti Macro al Gran Sasso e Argo-Ybj in Tibet. Attualmente è impegnato negli esperimenti Dampes su satellite e Dune negli Stati Uniti.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.10