

---

# Esperimenti di Neutrini negli USA

**Camillo Mariani**

*Center for Neutrino Physics, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 24061, USA*

---

## Introduzione

Negli Stati Uniti ci sono vari progetti per lo studio delle oscillazioni di neutrini e delle loro interazioni con la materia.

Possiamo dividere gli esperimenti in tre categorie, corrispondenti a quando gli esperimenti prenderanno dati: esperimenti "presenti", "futuri prossimi" e "futuri lontani". L'elenco degli esperimenti presenti comprende  $\text{NO}\nu\text{A}$ , Minerva e MINOS. Gli esperimenti futuri, uno prossimo e uno lontano, sono, rispettivamente, MicroBooNE e DUNE. Un altro tipo di divisione riguarda la tecnologia che verrà adottata per misurare le proprietà dei neutrini. Esperimenti come MicroBooNE o DUNE useranno la tecnologia dell'argon liquido per identificare in modo preciso le interazioni dei neutrini.

## $\text{NO}\nu\text{A}$

$\text{NO}\nu\text{A}$  è un esperimento nato negli Stati Uniti, che utilizza il fascio di neutrini esistente a Fermilab (NuMI), con un aumento dell'intensità, e un rivelatore lontano posizionato a circa 800 km di distanza in prossimità della frontiera con il Canada.

Il fascio di neutrini chiamato NuMI, è generato al Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) ed utilizza il fascio di protoni prodotti dal main injector, incidente su un bersaglio di grafite che ha la forma di un lungo cilindro di metallo.

Diversi tipi di particelle fondamentali sono prodotti nelle collisioni tra i protoni e il bersaglio di grafite, inclusi pioni, che sono particelle cariche. NuMI utilizza magneti per guidare i pioni nella direzione in cui si vogliono produrre neutrini. I pioni, poco tempo dopo la loro creazione (circa 100 m) decadono in muoni e neutrini muonici, e questi ultimi continuano a viaggiare nella stessa direzione dei pioni. Il bersaglio di NuMI, insieme ai magneti che determinano la direzione del fascio di neutrini, è mostrato in Fig. 1.

Il fascio di neutrini è rivolto verso il basso con un angolo di 3.3 gradi. Anche se il fascio nasce circa 150 piedi ( $\sim 50$  m) sottoterra al Fermilab, raggiungerà profondità fino a sei miglia sotto la superficie terrestre nel suo viaggio verso Ash River, al confine con il Canada, prima di incontrare il rivelatore lontano di  $\text{NO}\nu\text{A}$ .

Il complesso acceleratore a Fermilab attualmente è in grado di erogare 400 kW di potenza, ed in futuro verrà aggiornato in modo da erogare fino a 700 kW di potenza per NuMI.

L'esperimento  $\text{NO}\nu\text{A}$  utilizza due rivelatori: un rivelatore vicino che è posizionato a Fermilab e consiste di 330 tonnellate di scintillatore liquido, e un rivelatore molto più grande, di 14000 tonnellate, che è posizionato nel Minnesota, appena a sud del confine USA-Canada. I rivelatori sono costituiti da 344000 celle di scintillatore estruso, mostrato in Fig. 2. Le celle sono costituite di plastica (PVC) altamente riflettente e sono riempite di scintillatore liquido. I due bloc-

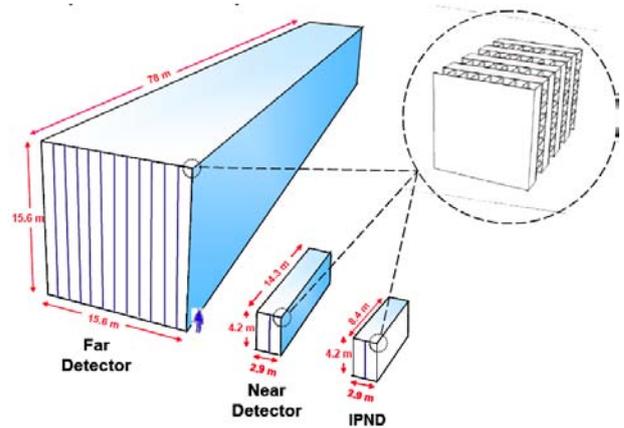


**Figura 1:** Fotografia del bersaglio per neutrini usato in NuMI. Foto cortesia di Fermilab.

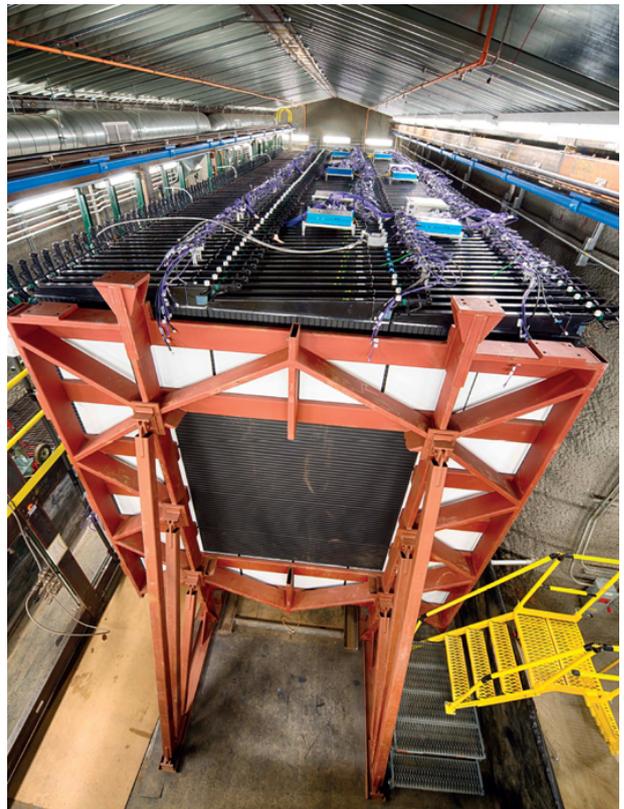
chi sono riempiti con un liquido composto per il 95% da olio minerale e dal 5% da pseudocumene (liquido incolore infiammabile), tossico, ma imprescindibile negli esperimenti con i neutrini: la miscela amplifica la luce che la colpisce, permettendo ai neutrini di essere individuati e misurati più facilmente. Ogni cella nel rivelatore lontano misura 3.9 cm di larghezza, 6.0 cm di profondità ed è lunga 15.5 metri. L'assemblaggio delle celle è rappresentato schematicamente in Fig. 2.

Quando un neutrino colpisce un atomo in uno scintillatore liquido, rilascia uno sciame di particelle cariche. Poiché queste particelle si fermano nel rivelatore, la loro energia viene raccolta utilizzando fibre ottiche che modificano la lunghezza d'onda della luce in modo che possa essere raccolta efficientemente dai foto-rivelatori posizionati all'esterno di ciascuna cella di plastica contenente scintillatore liquido. Utilizzando il modello di luce visto dai foto-rivelatori, è possibile determinare quale tipo di neutrino ha causato l'interazione e quale sia la sua originale energia.

La presa dati per  $\text{NO}\nu\text{A}$  è iniziata ufficialmente alla fine del 2013 e la costruzione dell'intero apparato (due rivelatori a quasi 800 chilometri



**Figura 2:** Schema dell'assemblaggio delle celle di plastica nei rivelatori dell'esperimento  $\text{NO}\nu\text{A}$ .



**Figura 3:** Fotografia del rivelatore vicino di  $\text{NO}\nu\text{A}$ .

di distanza) è stata completata nel gennaio 2014. La prima fase dell'esperimento durerà sei anni.

$\text{NO}\nu\text{A}$  permetterà di caratterizzare in dettaglio i neutrini, determinandone i tempi di vita, la direzione e l'energia. Studiando le oscillazioni nelle diverse tipologie di neutrini, gli scienziati sperano di scoprire l'ordinamento delle masse dei neutrini (la cosiddetta gerarchia di massa) e il perché l'Universo contiene attualmente molta più materia che antimateria. Il compito dei ricercatori del progetto  $\text{NO}\nu\text{A}$  è, letteralmente,



**Figura 4:** Fotografia del rivelatore vicino di MINOS, a Fermilab.

catturare i neutrini al volo con attrezzature molto grandi e costose. I primi risultati importanti sono già arrivati. Dopo aver "sparato" protoni contro obiettivi di grafite al Fermilab, appena fuori Chicago (Illinois), i neutrini vengono raccolti e inviati 735 chilometri a nord ovest, dove si trova il rivelatore  $\text{NO}\nu\text{A}$  ad Ash River (Minnesota), lungo il confine canadese. I primi fasci sono stati sparati nel settembre 2013, mentre le apparecchiature di Ash River, oggi completate, erano ancora in costruzione.

Il fascio di neutrini prodotto a Fermilab attraversa ben tre stati e un lago: l'Illinois, il Wisconsin, (la crosta terrestre sottostante) il Lago Superiore ed il Minnesota.

## MINOS

L'esperimento MINOS utilizza lo stesso fascio di neutrini muonici sfruttato da  $\text{NO}\nu\text{A}$ , e prodotto dal main injector del Fermilab. Il fascio di neutrini in questo caso viene proiettato a 735 chilometri di distanza, attraverso la Terra, verso un rivelatore di neutrini da 5000 tonnellate posto a 800 metri di profondità presso il Soudan Underground Laboratory, nel Minnesota. Le fotografie dei rivelatori vicino e lontano di MINOS sono presentate nelle Fig. 4 e 5.

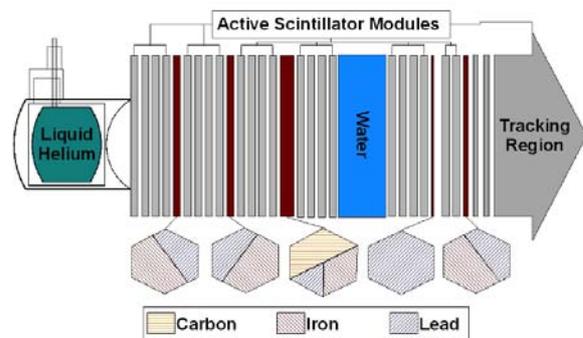
L'esperimento MINOS, come  $\text{NO}\nu\text{A}$ , utilizza due rivelatori quasi identici: il rivelatore vicino, posizionato a Fermilab, è utilizzato per controllare la purezza del fascio di neutrini muonici, mentre quello del Soudan è utilizzato per la ricerca dei neutrini elettronici e muonici. Per coprire il tragitto dal Fermilab al Soudan, i neutrini impiegano quattro centesimi di secondo, un



**Figura 5:** Fotografia del rivelatore lontano di MINOS, in Minnesota.

tempo sufficiente per cambiare le loro identità. Entrambi i rivelatori sono composti di scintillatore plastico. La luce proveniente dalle particelle cariche emesse dalle interazioni di neutrini viene catturata usando fibre ottiche e trasformata in segnali elettrici da foto-moltiplicatori. Entrambi i detector sono immersi in campo magnetico.

L'osservazione degli eventi nel rivelatore del Soudan permette ai ricercatori dell'esperimento MINOS di ottenere informazioni sulla quantità  $\sin^2 2\theta_{13}$ . Se i neutrini muonici non si trasformassero in neutrini elettronici, tale quantità sarebbe nulla. L'intervallo di valori permesso dall'ultima misurazione di MINOS si sovrappone a quella dell'esperimento T2K, ma è più limitata. MINOS restringe tale range a 0-0.12, migliorando i risultati ottenuti dallo stesso esperimento su un insieme di dati più limitato nel 2009 e nel 2010. Il range ottenuto da T2K è tra 0.03 e 0.28.



**Figura 6:** Schema di assemblaggio dei piani di Minerva.

## Minerva

Il rivelatore *Minerva* è posizionato di fronte al detector vicino di MINOS. *Minerva* ha lo scopo di studiare in dettaglio le interazioni di neutrini con diversi materiali. Il rivelatore è costituito da diversi piani di scintillatore plastico (come MINOS) alternati a piani costituiti da carbonio, ferro e piombo come mostrato nella Fig. 6.

## DUNE

Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) sarà il più grande esperimento per lo studio delle oscillazioni dei neutrini mai costruito. Il nuovo fascio di neutrini (che verrà prodotto al Fermilab) invierà particelle a 800 miglia di distanza, verso un rivelatore ad Argon liquido da 40000 tonnellate ospitato nel Sanford Underground Research Lab in South Dakota. DUNE utilizzerà una diversa tecnologia per rivelare le interazioni di neutrini, l'argon liquido. Il rivelatore lontano di DUNE sarà riempito con Argon liquido, che consentirà di utilizzare una tecnologia estremamente sofisticata, per catturare immagini tridimensionali, attraverso piani di sottilissimi fili, delle tracce lasciate dalle particelle cariche prodotte dall'interazione dei neutrini. DUNE utilizzerà anche un near detector, simile a quello utilizzato da T2K ma ancora in fase di progettazione, per caratterizzare sia il fascio di neutrini prodotti al Fermilab sia le interazioni di neutrini



**Figura 7:** Fotografia del rivelatore ICARUS.

in argon liquido. Parte del progetto DUNE è una serie di esperimenti ("short baseline" o SBND) che sono attualmente in costruzione a Fermilab, tutti condotti con diversi rivelatori argon liquido incluso il rivelatore ICARUS 7, costruito in Italia.

---

**Camillo Mariani:** È un assistant professor presso il Centro di Fisica del Neutrino di Virginia Polytechnic Institute and State University nota anche come Virginia Tech in USA. Mariani è coinvolto in vari esperimenti di neutrini agli acceleratori e ai reattori negli Stati Uniti ed Europa tra cui MiniBooNE, MicroBooNE, SBND, DUNE, Double Chooz, SOLID e CHANDLER.