



ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Laboratori Nazionali di Frascati

**INFN-15-08/LNF
14th October 2015**

**Breve storia della ricerca delle oscillazioni nei neutrini solari ed atmosferici fino al 1998, con particolare riguardo all'esperimento
MACRO**

F. Ronga

INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy

Abstract

Comunemente si tende a indicare il 1998 come anno della scoperta delle oscillazioni di neutrino. In realtà la storia è molto più complessa ed è durata circa 30 anni. Durante questi anni vi è stato inoltre un dibattito spesso acceso sulla mancanza dei neutrini elettronici provenienti dal sole e sulla mancanza dei neutrini di tipo muonico nelle cascate dei raggi cosmici. Tale dibattito però era limitato ai pochi ricercatori coinvolti direttamente negli esperimenti. Nel 1998 l'evidenza divenne tale da cancellare tutti i dubbi ed il risultato venne accettato da tutta la comunità scientifica. A causa dei numerosi protagonisti di questa complessa vicenda il premio Nobel per le oscillazioni di neutrino è stato assegnato solo in questi giorni, il 6 ottobre 2015, dopo ben 17 anni, a Arthur McDonald per le oscillazioni dal sole e a Takaaki Kajita per le oscillazioni di neutrini atmosferici. Tali Nobel seguono quelli del 2002 a Raymond Davis jr e Masatoshi Koshiba aventi come motivazione ufficiale la prima rivelazione di neutrini astrofisici dal sole e dalla supernova del 1987.

Publicato da SIDS–Pubblicazioni
Laboratori Nazionali di Frascati

Presentato a Fisica una passione, Evento in onore del Prof. Giorgio Giacomelli
Bologna 28 ottobre 2015

1 Introduzione

Comunemente si tende a indicare il 1998 come anno della scoperta delle oscillazioni di neutrino. In realtà la storia è molto più complessa ed è durata circa 30 anni. Durante questi anni vi è stato inoltre un dibattito spesso acceso sulla mancanza dei neutrini elettronici provenienti dal sole e sulla mancanza dei neutrini di tipo muonico nelle cascate dei raggi cosmici. Tale dibattito però era limitato ai pochi ricercatori coinvolti direttamente negli esperimenti. Nel 1998 l'evidenza divenne tale da cancellare tutti i dubbi ed il risultato venne accettato da tutta la comunità scientifica. A causa dei numerosi protagonisti di questa complessa vicenda il premio Nobel per le oscillazioni di neutrino è stato assegnato solo in questi giorni, il 6 ottobre 2015, dopo ben 17 anni, a Arthur McDonald per le oscillazioni dal sole e a Takaaki Kajita per le oscillazioni di neutrini atmosferici. Tali Nobel seguono quelli del 2002 a Raymond Davis jr e Masatoshi Koshiba aventi come motivazione ufficiale la prima rivelazione di neutrini astrofisici dal sole e dalla supernova del 1987.

2 Neutrini dal Sole

Il 7 marzo del 2003 in un convegno all'Accademia dei Lincei organizzato da Milla Baldo Ceolin, Arthur McDonald spokesman del Sudbury Neutrino Observatory e premio Nobel 2015 fece notare che l'evidenza del deficit dei neutrini dal sole (neutrini di tipo elettronico) durava dal 1968, data del primo lavoro sperimentale sul flusso dei neutrini solari con l'esperimento con il cloro del premio Nobel R. Davis jr [1]. Il deficit era grande, circa il 30%, e divenne subito statisticamente molto significativo. Si sarebbe potuto già negli anni '70 pensare alle oscillazione di neutrino e far partire un programma sperimentale per uno studio più accurato. Nicola Cabibbo chiese come mai questo non avvenne e perchè ci vollero 30 anni per accettare il fenomeno delle oscillazioni di neutrino, predetto da Bruno Pontecorvo già nel 1957. Ricordo che McDonald rispose che era un problema di sociologia scientifica.

Fino agli inizi degli anni cinquanta del secolo scorso la fisica delle particelle si era sviluppata con lo studio dei raggi cosmici, poi ci fu lo sviluppo rapido degli acceleratori e tutte le energie dei ricercatori del settore furono rivolte alle ricerche con acceleratori. I successi furono subito enormi e ben presto si pensò che la fisica delle particelle si potesse studiare solo con acceleratori. L'idea che si potesse fare fisica delle particelle anche senza acceleratori allora era minoritaria e discussa principalmente in conferenze come quelle sui raggi cosmici.

Inoltre le raffinate tecniche radio-chimiche usate da Davis erano spesso al di là della completa comprensione dei fisici sperimentali dell'epoca e il complesso calcolo teorico del

flusso dei neutrino solari di John Bahcall era ritenuto sospetto. Tutta questa incomprendimento portò alla mancata approvazione negli USA di un esperimento radio-chimico sui neutrini solari di seconda generazione con il gallio. Esperimenti con il gallio furono approvati solo nella seconda metà degli anni ottanta ed in Europa: al Gran Sasso (Gallex) e in Russia (Sage).

I risultati degli esperimenti con il gallio iniziarono ad apparire agli inizi degli anni novanta confermando il deficit visto dall'esperimento con il cloro, con differenze spiegabili con le diverse soglie nell'energia dei neutrini [2] [3]; è da notare che non ci furono mai discrepanze serie nei risultati degli esperimenti sui neutrini solari. Nonostante ciò si aspettò fino al 1998 affinché la comunità si convincesse del fenomeno.

Oltre a pregiudizi sperimentali vi era un forte pregiudizio teorico: in analogia a fenomeni analoghi per i quarks, si riteneva che l'ampiezza delle oscillazioni di neutrino sarebbe dovuta essere piccola e quindi fosse poco plausibile che le oscillazioni potessero produrre la grande riduzione del flusso dei neutrini solari osservata. Nel 1978 fu studiato, da Mikheev e Smirnov [5] e da Wolfenstein [4], l'effetto dell'attraversamento della materia sulle oscillazioni dei neutrini (effetto materia). Questo effetto poteva provocare un'amplificazione delle oscillazioni. Quindi fu suggerita una soluzione del problema dei neutrini solari che salvava il pregiudizio teorico: l'ampiezza di oscillazione originaria era piccola ma poi era amplificata con l'effetto materia.

Alcuni teorici [6] ritennero allora che, anche ammessa la possibilità di oscillazione dei neutrini solari, la soluzione fosse ampiezza di oscillazioni piccole e valori delle differenze delle masse dei neutrini attorno ai 10 eV; in tal caso i neutrini sarebbero stati importanti in cosmologia e avrebbero potuto spiegare il problema della materia oscura. Sulla base di queste considerazioni furono approvati al CERN due esperimenti, CHORUS e NOMAD, per la ricerca delle oscillazioni su un fascio dei neutrini muonici e su distanze dell'ordine del km.

Comunque debbo ricordare la presenza di un gruppetto di teorici non allineato a questo pensiero dominante. Dopo le prime conferme del deficit dei neutrini solari e l'inizio dell'anomalia dei neutrini atmosferici G.L. Fogli iniziò ad occuparsi della questione e nel 1994 il gruppo di teorici di Bari (G.L. Fogli, E. Lisi ed D. Montanino) pubblicò un lavoro [7] su un'analisi globale delle oscillazioni dei neutrini solari e dei neutrini atmosferici, primo di una lista di lavori che continua ancor oggi.

3 Neutrini atmosferici e fascio di neutrini dal CERN al Gran Sasso

La storia del deficit dei neutrini muonici derivanti dalle cascate prodotte dai raggi cosmici a causa delle interazioni con l'atmosfera è anche più complessa di quella dei neutrini solari. Ai pregiudizi riportati precedentemente si aggiungevano differenze dei dati nei vari esperimenti che, a posteriori, dobbiamo ritenere dovuti a fluttuazioni statistiche ma anche ad analisi dei dati errate.

I neutrini atmosferici di tipo muonico furono rivelati per la prima volta nel 1965 in una miniera d'oro in Sud Africa, miniera che fu scelta per ridurre il fondo dei raggi cosmici [9]. La rivelazione dei neutrini atmosferici fu fatta da un gruppo guidato da Frederick Reines, premio Nobel per la prima rivelazione dei neutrini (da reattore) nel 1956. Trascorsero poi parecchi anni prima che potessero iniziare degli studi sistematici sui neutrini atmosferici con apparati di seconda generazione.

Negli anni 70 i teorici delle teorie di grande unificazione (GUT) predissero che il protone dovesse essere instabile e che la vita media del protone fosse tale da poter rivelare decadimenti del protone alla portata di esperimenti aventi massa di ameno 1000 tonnellate. Due tecniche furono proposte: la rivelazione con l'effetto Cherenkov in acqua (IMB negli USA e Kamiokande in Giappone) e la rivelazione con un calorimetro con lastre di ferro separate da rivelatori traccianti (Frejus in Francia, Nussex in Italia sotto il monte Bianco e Soudan negli USA). La ricerca dei decadimenti del protone era limitata dai neutrini atmosferici che avrebbero potuto produrre eventi simili ad un decadimento del protone.

Pertanto in quegli anni ci fu un interesse sia teorico che sperimentale per i neutrini atmosferici. La prima volta che chi scrive udì parlare di oscillazioni di neutrini atmosferici fu all'inizio del progetto Gran Sasso, al workshop GUD organizzato da Marcello Conversi nell'ottobre del 1981 per esperimenti sul decadimento del protone [10].

In quel workshop ci fu un intervento sulle oscillazioni di neutrini atmosferici di M. Dardo. Rileggendo gli atti del workshop è sorprendente vedere come già nel 1981 fossero delineate chiaramente le tematiche di ricerca che vennero poi sviluppate nei successivi venti anni. Dardo proveniva dal gruppo di ricerca di raggi cosmici di Torino, che collaborava già allora con fisici russi, e nel suo intervento citava molti articoli di questi ultimi. È probabile che l'influenza di Bruno Pontecorvo in Russia sia stata importante per sviluppare il calcolo dei flussi di neutrini atmosferici e lo studio delle possibili oscillazioni.

Ben presto nel 1986 l'esperimento IMB [11] osservò i primi neutrini atmosferici ed osservò che il numero di neutrini di tipo muonico era inferiore a quanto atteso mentre il numero di neutrini di tipo elettronico era compatibile con le predizioni. Ciò provocò grande

eccitazione perché si capì subito che tale effetto poteva essere causato dalle oscillazioni dei neutrini muonici. Il risultato di IMB e poi di Kamiokande non fu confermato dall'esperimento del Frejus e con minore evidenza statistica da Nusex. I simboli neri della figura 1 riassumono i dati fino al 1997. Molti pensarono allora che l'effetto fosse dovuto a differenze delle sezioni d'urto dei neutrini in ferro ed in acqua.

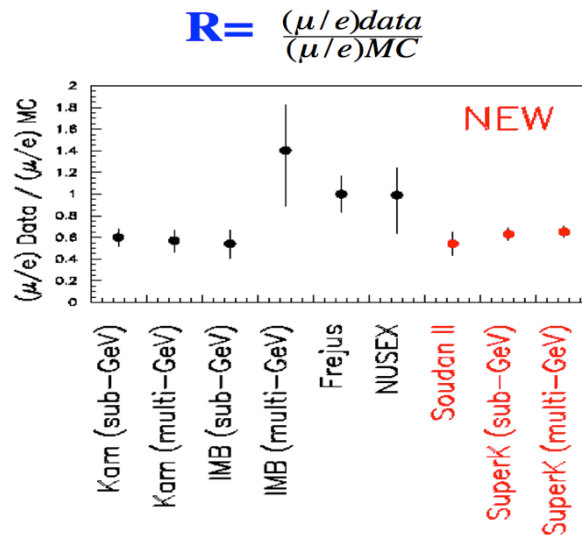


Figura 1: Il rapporto R che suggeriva la scomparsa dei neutrini di tipo muonico nei rivelatori con acqua. I punti neri rappresentano i dati fino al 1997. Questi dati sembravano suggerire che nei rivelatori con assorbitore ferro l'effetto non fosse confermato. Da notare che nessun esperimento, tranne Nusex, aveva fatto calibrazioni dirette con un fascio di neutrini. I punti rossi rappresentano i dati presentati nel 1998 alla conferenza sui neutrini di Takayama. Soudan2, con assorbitore ferro, confermò i dati degli esperimenti con acqua.

A complicare ulteriormente le cose inoltre nel 1992 la collaborazione IMB che pur aveva osservato il deficit di neutrini di tipo muonico rispetto a quelli di tipo elettronico pubblicò [12] un'analisi basata sui muoni prodotti dai neutrini muonici e che si fermavano all'interno del rivelatore (stopping muons). In questo lavoro veniva affermato che non c'era evidenza di oscillazioni. E in base a tale analisi si escludevano ampie zone dei valori dei due parametri importanti per le oscillazioni: ampiezza di oscillazione e differenza delle masse. In particolare si escludevano proprio i valori dei parametri che ora sappiamo vero. La figura 2 è la figura originale di tale lavoro, pubblicato sulla prestigiosa rivista Physics Review Letters. Questo risultato sembrava una conferma definitiva che gli effetti osservati dovessero essere dovuti alla mancata conoscenza delle sezioni d'urto. A questo risultato se ne aggiungevano altri relativi alla categoria di eventi chiamata muoni passanti diretti verso

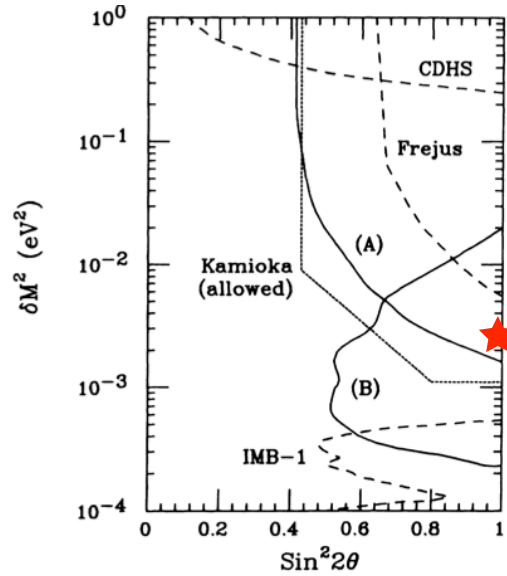


FIG. 2. 90% C.L. limits on ν_μ to ν_τ oscillations from rate (A) and stopping fraction (B). Dashed curves show limits from IMB-1 [14], Frejus [3], and CERN-Dortmund-Heidelberg-Saclay (CDHS) [15]. Dotted curve shows the allowed region from Kamiokande [16]. The Frejus limit is 95% C.L.; others are 90%.

Figura 2: Tratta dall'articolo di IMB su Physics Review Letters del 1992. Tutte le curve racchiudono zone escluse, tranne Kamiokande che racchiude la zona permessa. Si noti che la curva B di IMB esclude completamente la stella rossa che rappresenta i valori attuali dei parametri di oscillazione. Questo risultato errato creò molta confusione e rallentò la proclamazione della scoperta.

l'alto degli esperimenti IMB, Baksan e Kamiokande stesso i quali sembravano escludere un deficit dei neutrini muonici di questa categoria.

Nonostante questo, e in un ambito ristretto, ci si andava convincendo che qualcosa ci fosse. Ricordo che nel 1979, sotto la presidenza INFN di A Zichichi, si iniziò la progettazione del laboratorio sotterraneo del Gran Sasso. Fin dall'inizio si tenne presente la possibilità di esperimenti di oscillazione con un fascio di neutrini su distanza di 732 km dal CERN al Gran Sasso [14].

Attorno al 1992, il premio Nobel Carlo Rubbia, direttore del CERN dal 1989 al 1993, iniziò ad occuparsi della questione [13]; Rubbia riprese in mano la vecchia idea del fascio dal CERN al Gran Sasso e spinse per un progetto di fascio di neutrini. Con tale fascio si sarebbero potute verificare le anomalie dei neutrini atmosferici in maniera controllata. La prima bozza di un progetto concreto di fascio si ebbe nel 1992 ad opera di A. Ball et al. [15]. Purtroppo, però, il successivo direttore del CERN Llewellyn Smith fu contrario a continuare l'iniziativa. Di Rubbia mi è rimasta impressa una frase pronunciata, penso,

durante una riunione della commissione INFN per la fisica del neutrino. Il senso di tale frase era: Per gli italiani è permessa ogni cosa non espressamente vietata, a differenza di altri popoli per cui sono permesse solo le cose previste dalle leggi. Non c'è nessuna legge fisica che vieti le oscillazioni di neutrino. Io sono italiano e quindi penso che sia permesso ai neutrini di oscillare.

Comunque il fascio non venne preso mai in seria considerazione, sulla base dei pregiudizi dominanti. Anche dopo il 1998 la comunità di fisici sperimentali europei dei neutrini era divisa e il fascio CERN Gran Sasso (CNGS) fu approvato dall'INFN, durante la presidenza di Enzo Iarocci e dal CERN solo nel dicembre 1999. All'epoca i progetti concorrenti - MINOS negli USA; K2K e T2K in Giappone - erano già in fase avanzata. Per dare un esempio delle difficoltà si può ricordare che alcuni paesi europei non vollero partecipare a questa impresa, nonostante fosse finanziata quasi completamente dall'Italia. Per l'approvazione del CNGS fu decisivo il fatto che il direttore generale del CERN dell'epoca fosse Luciano Maiani.

4 MACRO e i neutrini atmosferici

A questo punto debbo inserire dei ricordi personali dovuti al fatto che nel 1989 era entrato parzialmente in funzione al Gran Sasso l'esperimento MACRO, che aveva come obiettivo principale la ricerca dei monopoli magnetici previsti dalle teorie di Grande Unificazione. Però lo stesso apparato poteva rivelare neutrini atmosferici di tipo muonico. La rivelazione era basata sull'osservazione di muoni verso l'alto prodotti nella roccia sotto il rivelatore dai neutrini muonici. Il verso dei muoni era riconosciuto misurando i tempi in contatori a scintillazione. La ricerca delle oscillazioni di neutrino era un tema presente fin dagli inizi di MACRO. La Figura 3 contenuta nella proposta del 1984 [16] mostra la regione accessibile a MACRO. Tale regione includeva il valore dei parametri di oscillazione che conosciamo ora.

Durante la costruzione di MACRO arrivò anche una proposta di Giulio Auriemma di mettere delle lastre di ferro magnetizzato tra la parte bassa di MACRO e la parte superiore, che noi chiamavamo attico. Lo scopo era separare neutrini da antineutrini. Tale proposta fu però rigettata perchè la costruzione era in fase molto avanzata. Questa idea fu ripresa in seguito (proposta Monolith ed esperimento INO attualmente in costruzione in India).

Il mio coinvolgimento nell'analisi dei neutrini fu in parte casuale, anche se all'epoca ero già molto interessato all'astronomia con i neutrini. Ma non avevo molto tempo perchè in MACRO mi occupavo dell'acquisizione dati, attività molto impegnativa nella fase di costruzione. L'allora spokesman italiano - Enzo Iarocci - voleva capire se il terzo piano di scintillatori, non ancora costruito, fosse realmente indispensabile in questo tipo di analisi.

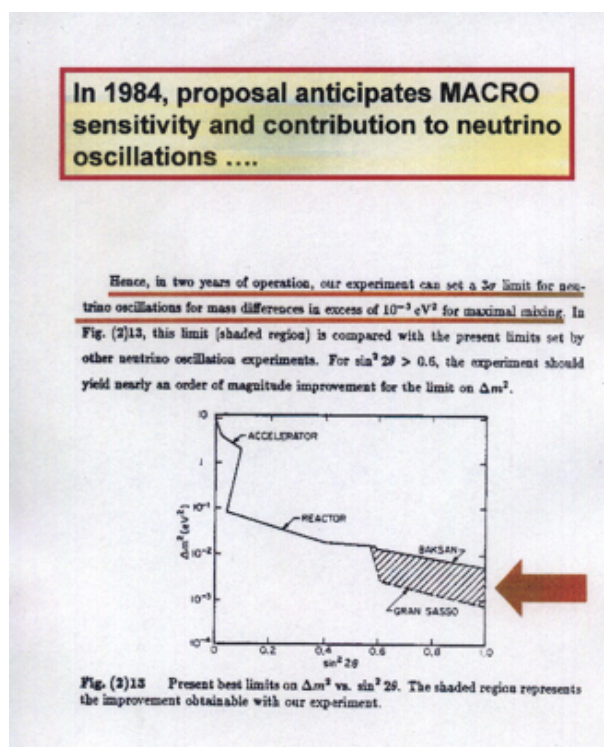


Figura 3: Pagina della proposta di MACRO del 1984 riportata da B. Barish nell'ultima riunione di MACRO del 21 gennaio 2010 al Gran Sasso. La regione tratteggiata rappresentava il risultato dello studio della sensibilità di MACRO nel 1984. Il segnale di oscillazione è stato trovato poi proprio in tale regione.

Iarocci mi chiese di occuparmene perché sapeva della mia esperienza sui tempi di volo maturata in altri esperimenti.

In effetti dopo poco identificammo chiaramente il primo muone verso l'alto prodotto da una interazione di neutrino avvenuta il 22 maggio 1989. Poiché MACRO era in costruzione, si prendevano dati in condizioni instabili e quindi si era molto prudenti su affermazioni sul flusso dei neutrini. Però già all'epoca si notava un netto deficit di eventi particolarmente concentrato sulla verticale. Molti di noi ritenevano che potesse essere un fatto strumentale dovuto alla presa dati non stabile, oppure si pensava che potesse essere un effetto di laghi o caverne sotterranee, cosa poi smentita. Risultati preliminari basati su 45 eventi sulla neutrino astronomia furono presentati alla quinta conferenza Neutrino Telescope di Venezia del marzo 1993 [17]. Alla fine si decise di costruire la parte superiore di MACRO (Attico) contenente il terzo piano di scintillatori. Ciò permise di rivelare eventi con interazione di neutrino entro il rivelatore, invece che nella roccia. Il primo evento di questo tipo si ebbe il 3 maggio 1994.

In MACRO poi si coagulò un nucleo di persone dedicate a questo tipo di analisi. Al gruppetto storico costituito da Paolo Bernardini, Doug Michael, Antonio Surdo, Teresa Montaruli e Maurizio Spurio si aggiunsero in vari periodi Ed Diehl, Bob Nolty, Colin Okada, Eugenio Scapparone. Avevamo poi il supporto per la parte teorica di Paolo Lipari e Stanislav Mikheev. Questo fu il gruppetto di persone che in genere presentava i risultati di MACRO alle varie conferenze. Queste presentazioni erano spesso lasciate a noi perché c'era diffidenza sui risultati anche da parte degli altri componenti della collaborazione. Molti pensavano che gli effetti osservati fossero dovuti a efficienze fuori controllo.

Una presa dati più stabile, anche se solo con la sola parte inferiore dell'apparato, avvenne solo nel 1993 e risultati preliminari con una limitata statistica di 74 eventi furono pubblicati nel 1995 su Physics Letters [18]. Si osservò un numero di eventi pari al 73% di quello allora atteso e si confermò il deficit accentuato sulla direzione verticale. La combinazione della distorsione della distribuzione angolare e della riduzione del numero totale di eventi suggeriva un effetto di oscillazioni. Comunque, a causa della statistica limitata e dei risultati negativi di IMB, riportati in figura 2, fummo molto (force troppo) prudenti nelle conclusioni. Nell'abstract infatti si diceva: *At the 90% confidence level, the data are consistent with no neutrino oscillations or some possible oscillation hypotheses with the parameters suggested by the Kamiokande contained-event analysis.* La frase era diplomatica perché, come già detto, questo risultato era in contrasto con quanto riportato non solo da IMB ma anche da Baksan e Kamiokande. Ricordo che Kamiokande dava risultati contraddittori tra eventi contenuti ed eventi non contenuti.

Nel frattempo alcuni si preoccupavano di possibili estensioni di MACRO. Ricordo che la proposta originaria di MACRO prevedeva 9 unit chiamate supermoduli. Ne furono approvati 6. Quindi c'era spazio libero nella sala B del Gran Sasso. Una proposta per i neutrini atmosferici arrivò attorno al 1992 da parte di Doug Michael. L'idea di Doug era di riempire lo spazio libero della galleria dove era MACRO con un calorimetro a lastre di ferro da 15 kton con rivelatori a camere RPC. Però i tempi non erano maturi e la proposta non ebbe molto seguito.

Anche il progetto del fascio del CERN-Gran Sasso ristagnava. L'allora direttore del laboratorio del Gran Sasso, Piero Monacelli, sollecitò con scarso successo la dirigenza del CERN e dell'INFN. Monacelli sollecitò anche proposte di esperimento su un possibile fascio CNGS. In seguito a questa sollecitazione, il 23-24 marzo 1995 fu organizzato da Doug Michael (gruppo MACRO) e Flavio Cavanna (gruppo ICARUS) un workshop per discutere di possibili esperimenti. Questa riunione seguiva riunioni abbastanza carbonare che continuavano al CERN sulle problematiche specifiche del fascio. Purtroppo la partecipazione a questo workshop fu limitata agli addetti ai lavori e, a parte la partecipazione di Rubbia e di Furio Bobisut, allora presidente della commissione dell'INFN che si occupava di fisica

del neutrino, non ci fu interesse da parte dei vertici dell'INFN, e tantomeno da parte del CERN. Un sommario del workshop e dello stato del fascio fu presentato da Cavanna al nono incontro di fisica della Valle d'Aosta di la Thuille del 5-11 Marzo 1995 [19].

Un importante risultato sperimentale fu da noi pubblicato nel 1998 su *Astroparticle Physics* [20] dopo essere stato rifiutato da *Physics Review D* nel 1997. L'articolo verteva sull'osservazione di particelle cariche verso l'alto prodotte da muoni di alte energie in rivelatori sotterranei. Secondo noi l'articolo era molto importante perché avevamo scoperto un fondo nella ricerca di neutrini muonici verso l'alto di cui non avevano tenuto conto IMB e BAKSAN. Tale fondo dipendeva dall'intensità dei raggi cosmici e tale intensità in IMB e BAKSAN era molto maggiore che in MACRO a causa della minore profondità. Questo fondo secondo noi metteva in dubbio i risultati di IMB e BAKSAN ed in particolare quello riportato in figura 2. Forse questa affermazione molto forte, ma corretta, provocò il rifiuto dell'articolo da parte di *Physics Review D* e il nostro successivo invio alla rivista europea *Astroparticle Physics*.

Arriviamo adesso al 1998. L'autore di questa nota era stato designato già nel 1997 a parlare per conto di MACRO alla XVIIIa conferenza dei neutrini di Takayama del 4-9 Giugno 1998. Inoltre Paolo Bernardini era stato designato a parlare al Vulcano workshop del 25-30 maggio 1998 che sarebbe avvenuto qualche giorno prima di Takayama.

Nel corso del 1997 e del 1998 la statistica di MACRO era aumentata, le analisi si erano raffinate, avevamo portato avanti ben tre analisi parallele e verificato che i risultati fossero compatibili. Una delle analisi usava un'elettronica alternativa per la misura dei tempi (il circuito PHRASE sviluppato a Pisa per la misura dei tempi). Avevamo anche risposto a una serie di quesiti posti da Barry Barish per verificare le efficienze dell'apparato a cui si associò Giorgio Giacomelli, co-spokesman della parte italiana. Avevamo trovato il motivo per cui IMB e Baksan davano risultati a nostro giudizio errati. Insomma eravamo pronti a fare affermazioni più decise ed esplicite in favore della presenza di oscillazioni. L'unica perplessità che avevamo era che la zona preferita dai dati di MACRO non corrispondeva a quella di Kamiokande (analisi successive di Kamiokande spostarono la zona preferita).

Con questo spirito ci presentammo alla riunione annuale di MACRO negli USA in cui in particolare si doveva discutere delle presentazioni alle conferenze estive: le prime erano il Vulcano workshop e la Neutrino 1998 in Giappone. La riunione avvenne il 18-20 aprile a Boston in coincidenza con la celebre maratona. La discussione sulla presentazione dei risultati dei neutrini fu molto accesa. C'è da tener presente che nel gruppo americano vi erano persone che avevano partecipato ad IMB e persone che partecipavano a SuperKamiokande. Inoltre stavano per essere pubblicati i risultati negativi di CHOOZ, un esperimento su reattore teso a verificare i risultati di Kamiokande supponendo che ci fossero oscillazioni con scomparsa degli anti-neutrini elettronici. CHOOZ, a cui partecipava un gruppo di MA-

CRO, escludeva una delle possibilità di oscillazione, nulla potendo dire sull'altra possibilità (neutrino muone in neutrino tau), però contribuiva a generare un'atmosfera di scetticismo sulle oscillazioni.

Per tutti questi motivi, nonostante gli sforzi e la contrarietà della parte italiana del gruppo dei neutrini, si decise a maggioranza che nulla avrebbe dovuto dirsi in favore delle oscillazioni dei neutrini. In particolare non si sarebbe dovuto presentare il grafico della regione permessa dei parametri.

Non so sinceramente cosa avremmo presentato dopo la decisione negativa del gruppo MACRO. Probabilmente io avrei fatto la stessa presentazione che poi ho fatto, ma con altro spirito. Comunque la discussione avvenne in assenza, per indisposizione, di Barry Barish¹. Per fortuna il giorno dopo, il 20 Aprile, Barish era di nuova in forma; venne alla riunione e si fece raccontare cosa era successo. Poi, rispettando i patti presi quando ci aveva chiesto di verificare le efficienze, intervenne con il suo fare deciso e convinse il gruppo americano a cambiare opinione.

5 La conferenza dei neutrini di Takayama del giugno 1998

La conferenza iniziò lunedì 4 giugno 1998. Si mormorò subito che ci sarebbe stato un grosso annuncio di SuperKamiokande e quindi c'era grande attesa. Il primo giorno ci fu una sessione dedicata ai neutrini solari: nell'ordine in Homestake (esperimento con il cloro di Davis), poi Gallex, Sage e SuperKamiokande.

È impressionante vedere come il deficit fosse osservato, sia pure in forme diverse, da tutti gli esperimenti sia quelli radio-chimici, che quello in acqua. SuperKamiokande inoltre disponeva di migliaia di eventi con cui era possibile iniziare a studiare effetti piccoli come quello dovuto alla variazione della distanza terra-sole. Nell'intervento di John Bahcall del pomeriggio sui flussi attesi dai calcoli dei neutrini solari si sottolineava il fatto che oramai si aveva un deficit con un effetto di 20 deviazioni standard. Molti si aspettavano già il lunedì il grosso annuncio ma non fu così.

Era chiaro quindi che ci sarebbero stati risultati ancora più importanti da parte di SuperKamioande nel settore dei neutrini atmosferici. A tale argomento era dedicata la mattinata del 5 giugno. L'agenda prevedeva nell'ordine l'intervento di E. Peterson (Soudan2), F. Ronga (MACRO) e del premio Nobel 2015 T. Kajita (Kamiokande e SuperKamiokande). L'agenda mi preoccupava perchè sapevo che SuperKamiokande era un esperimento di

¹Per quanto mi risulta, l'unica della sua vita!

qualità molto superiore a MACRO, per cui era possibile che in caso di discrepanza si desse maggior credito ai dati di SupeKamiokande e ci fosse una smentita immediata. Inoltre sapevamo che gli eventi contenuti di Kamiokande preferivano oscillazioni con differenza di massa molto più grandi di quella osservata da noi e quindi si poteva pensare che ciò fosse confermato nella presentazione di Kajita. Con trepidazione attesi quindi le conclusioni di Kajita.

Dopo la conferenza alcuni pensarono che la presentazione di MACRO fosse stata aggiustata sapendo quello che avrebbe detto Kajita. In realtà non fu così, perchè le linee della presentazione erano state fissate nella riunione di Boston di aprile e la presentazione era simile a quella di Paolo Bernardini già avvenuta il pomeriggio del 29 maggio 1998. Il workshop di Vulcano aveva una partecipazione più limitata di quella di Neutrino 1998 per cui la notizia non aveva raggiunto il grande pubblico. Si potrebbe perciò dire che il primo annuncio sulle oscillazione di neutrino sia avvenuto il 29 maggio 1998 a Vulcano da parte di MACRO e non a Takayama.

La presentazione di SOUDAN2 confermava la mancanza dei neutrini muonici (vedi figura 1) risolvendo finalmente la discrepanza ferro-acqua ma non concludeva nulla sulle oscillazioni. Della presentazione di MACRO riporto in figura 4 due trasparenze tra le più significative. La prima è il grafico della regione di confidenza che fa vedere che nel 1998 MACRO aveva un effetto superiore al 99% di livello di confidenza in favore di oscillazioni neutrino muone in neutrino tau e che la zona permessa non era molto diversa da quella di SuperKamiokande di figura 5. La seconda trasparenza di MACRO riporta tra le conclusioni che il neutrino sterile era sfavorito (c'era un fattore 8 tra le probabilità in neutrino tau e quella in neutrino sterile). Questa analisi era stata possibile grazie al lavoro di Paolo Lipari che da tempo si occupava del calcolo dell'effetto materia. Questi risultati furono pubblicati nei proceedings delle conferenze e, ancora prima, inviati il 29 Giugno 1998 a Physics Letters B [21].

Anche della presentazione di SuperKamiokande riporto nella figura 5 due trasparenze tra le più significative. La prima è quella relativa all'analisi per escludere il neutrino sterile con una studio della topologia degli eventi. La seconda è quella conclusiva con il famoso plot che viene ancora ricordato in tutto il mondo. La forza del risultato di SuperKamiokande stava nel fatto che le analisi con tipi diversi di eventi finalmente concordavano nel risultato. La curva arancione (stopping/through) sconfessava completamente il risultato di IMB di figura 2. Questi risultati furono subito pubblicati e risultano tra i più citati tra tutti gli esperimenti di fisica delle particelle [22]. Bisogna pure osservare che il risultato di SuperKamiokande contraddiceva in parte anche il risultato di Kamiokande (curva verde) ed era completamente in accordo con il risultato di MACRO in figura 4.

I giapponesi avevano organizzato una conferenza stampa per pubblicizzare questi

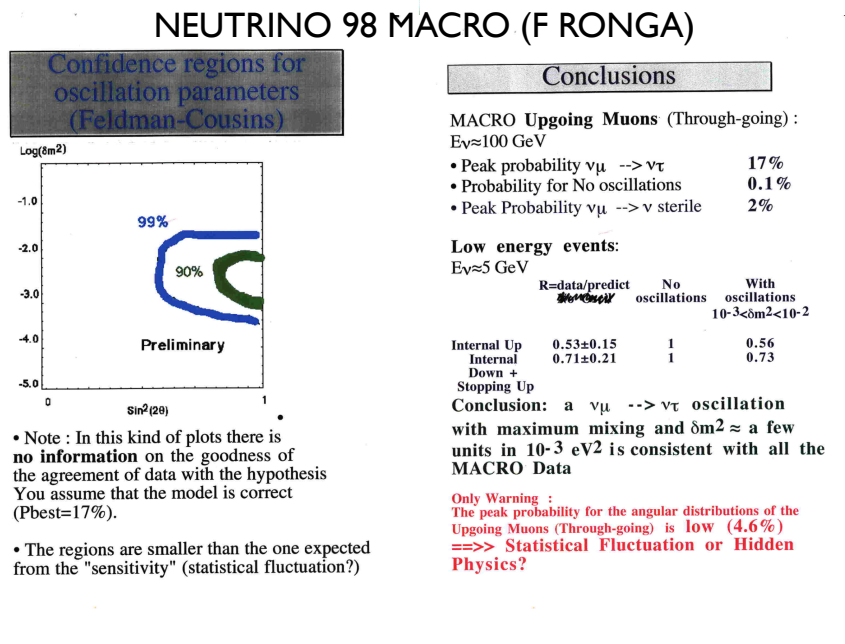


Figura 4: trasparenze dalla presentazione di MACRO a neutrino 1998. Le trasparenze sono ancora sul sito della conferenza <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/nu98/scan/index.html>. trasparenze simili erano state già mostrate da Paolo Bernardini sei giorni prima al Vulcano workshop 1998.

risultati in tutto il mondo, cosa che avvenne con grande successo anche presso il grande pubblico. Il risultato di MACRO però scomparve nei comunicati stampa, e l'INFN fu colta di sprovvisa, nonostante gli sforzi di Giacomelli. Questo, in parte, avvenne anche a causa dei dubbi e delle perplessità che ho ricordato prima. Comunque Giacomelli volle riconoscere il primato di SuperKamiokande, che aveva un effetto di ben 6σ mentre quello di MACRO era di 3σ , e volle inserire il nostro lavoro sul sito *arXiv* solo dopo quello di SuperKamiokande. Infatti i due numeri di preprint sono 9807003 (Superkamiokande) e 9807005 (MACRO).

La conferenza continuò in tono minore dopo questo avvenimento storico. Ricordo però altre due presentazioni che hanno avuto un impatto molto importante negli sviluppi della fisica del neutrino. La prima è la presentazione di C. Bemporad dei risultati negativi delle oscillazioni di anti-neutrino elettronico con il reattore CHOOZ in Francia. Tale risultato negativo assunse subito una grande importanza nello studio delle oscillazioni con tre neutrini (neutrino muonico, neutrino tau e neutrino elettronico) perché metteva un limite forte sul famoso angolo θ_{13} , poi misurato solo nel 2012. La seconda è la presentazione dei risultati di LSND, esperimento su un fascio di anti-neutrini di tipo muonico a Los Alamos

NEUTRINO 1998 SUPERKAMIOKANDE (T. KAJITA)

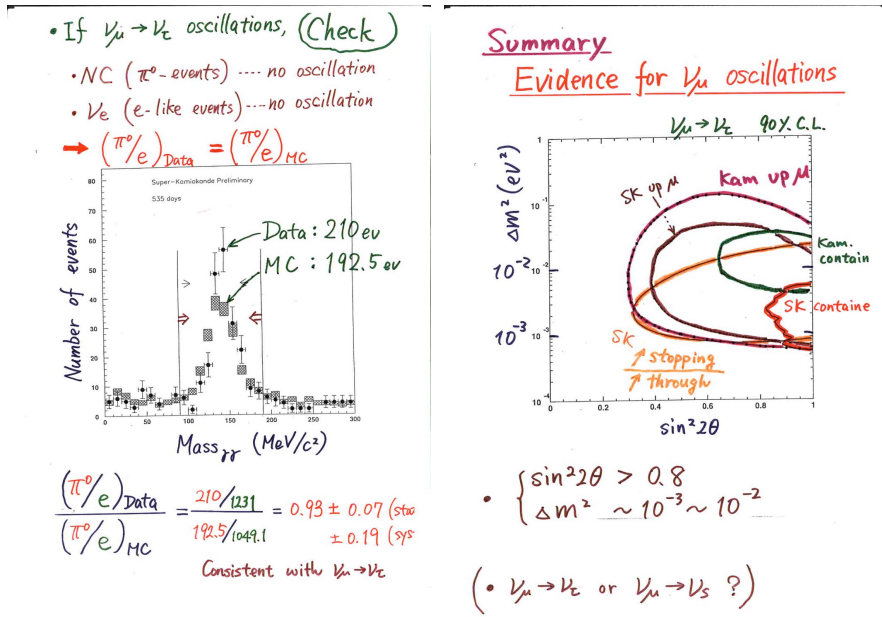


Figura 5: trasparenze dalla presentazione di SuperKamikande a neutrino 1998.

(USA). In tale esperimento veniva misurato un eccesso di anti-neutrino di tipo elettronico. Nella presentazione a Takayama tale risultato veniva interpretato come oscillazioni neutrino muonico in neutrino elettronico, ma in altra zona dello spazio dei parametri rispetto ai neutrini atmosferici. Poiché non c'era modo di inserire tale risultato in un modello di oscillazione con tre neutrini in accordo con gli esperimenti sui neutrini solari ed atmosferici, dopo la conferenza iniziarono ad essere presi in considerazione modelli con quattroneutrini, di cui uno sterile. L'esperimento LSND ebbe una grande importanza nel dibattito europeo e italiano e nell'approvazione del fascio dal CERN al Gran Sasso. Ci fu una proposta per un fascio di neutrini su piccola distanza al CERN per la verifica di LSND, ma tale proposta non fu approvata. L'effetto di LSND tuttora in parte non spiegato nonostante esperimenti dedicati a Fermilab negli USA.

Un effetto negativo di tale dibattito furono gli ulteriori ritardi nell'approvazione del CNGS. Ci furono anche altre proposte alternative come quella del fascio dal CERN ai monti del massiccio dello JURA su distanze dell'ordine dei 17 km. Tra i ricercatori del Gran Sasso, in un ambiente sicuramente più difficile di quello di un grande laboratorio come il CERN, circolava una battuta cattiva. La battuta era che queste proposte erano tutte di tipo DIRAC (Devo Immancabilmente Restare Al Cern). Forse queste considerazioni di tipo sociale, oltre a un problema di costi, spinsero a non costruire per il CNGS un rivelatore

di neutrini vicino localizzato al CERN: tale rivelatore avrebbe ampliato le possibilità del fascio permettendo un confronto tra misure vicino/lontano. Però si temeva forse che il rivelatore vicino assorbisse la maggiore parte degli interessi. Alla fine il fascio fu approvato nel dicembre 1999 con il programma scientifico della misura dell'apparizione dei neutrini tau con gli esperimenti ICARUS ed OPERA. In tale ricerca non vi era bisogno del rivelatore vicino.

6 Conclusioni

Il 1998 fu un punto di svolta perché convinse definitivamente la comunità dei fisici delle particelle elementari, dopo quasi 30 anni dalle prime indicazioni delle oscillazioni di neutrino. Dopo di allora furono proposti, approvati e costruiti molti esperimenti. Il settore si velocizzò, nonostante le interazioni deboli.

Siamo ormai alla terza generazione di esperimenti sulle oscillazioni di neutrino e la matrice delle oscillazioni è misurata tutta, tranne un parametro. Resta un rimpianto personale come italiano ed europeo: la non completa valorizzazione dei risultati ottenuti da MACRO al Gran Sasso, la divisione della comunità dei fisici dei neutrini in Europa sui programmi scientifici e l'ostilità di parte della comunità dei fisici di particelle. Come esempio di questi problemi ricordo che quando ci furono problemi finanziari per la costruzione di LHC una delle azioni per ridurre le spese al CERN fu la chiusura del piccolissimo gruppo del CERN che lavorava su OPERA. Questo fu sicuramente un segnale psicologicamente molto negativo per la collaborazione OPERA e per la comunità europea.

Il comportamento dei Giapponesi fu completamente diverso. Avevano approvato con determinazione il primo fascio di neutrini su lunga distanza (K2K) ben prima del 1998, credendo in questo tipo di fisica fin dall'inizio, nonostante tutti i dubbi elencati in questa nota. Per cui il Nobel di quest'anno è stato più che meritato.

Dopo la fine della presa dati con il CNGS, oggi in Europa non si fa più fisica dei neutrini con fasci di particelle, né a piccola né a grande distanza. Forse questo è corretto da un punto di vista di divisione dei compiti a livello mondiale, ma lascia un po' di amaro. Per fortuna in Italia continua al Gran Sasso la fisica dei neutrini senza acceleratori con BOREX (neutrini dal sole e da sorgente), CUORE e GERDA (massa dei neutrini, e neutrini di Majorana).

Riferimenti bibliografici

- [1] R. Davis, Jr., D. S. Harmer and K. C. Hoffman, “Search for neutrinos from the sun,” *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1205 (1968).
- [2] A. I. Abazov *et al.*, “Search for neutrinos from sun using the reaction Ga-71 (electron-neutrino e^-) Ge-71,” *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3332 (1991).
- [3] P. Anselmann *et al.* [GALLEX Collaboration], “Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso,” *Phys. Lett. B* **285**, 376 (1992).
- [4] L. Wolfenstein, “Neutrino Oscillations in Matter,” *Phys. Rev. D* **17**, 2369 (1978).
- [5] S. P. Mikheev and A. Y. Smirnov, “Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos,” *Sov. J. Nucl. Phys.* **42**, 913 (1985) [*Yad. Fiz.* **42**, 1441 (1985)].
- [6] J. R. Ellis, J. L. Lopez and D. V. Nanopoulos, “The Prospects for CHORUS and NOMAD in the light of COBE and GALLEX,” *Phys. Lett. B* **292**, 189 (1992) [[hep-ph/9207237](#)].
- [7] G. L. Fogli, E. Lisi and D. Montanino, “A comprehensive analysis of solar, atmospheric, accelerator and reactor neutrino experiments in a hierarchical three generation scheme,” *Phys. Rev. D* **49**, 3626 (1994).
- [8] H. H. Chen, W. R. Kropp, H. W. Sobel and F. Reines, “Muons produced by atmospheric neutrinos: Analysis,” *Phys. Rev. D* **4**, 99 (1971).
- [9] F. Reines, M. F. Crouch, T. L. Jenkins, W. R. Kropp, H. S. Gurr, G. R. Smith, J. P. F. Sellschop and B. Meyer, “Evidence for high-energy cosmic ray neutrino interactions,” *Phys. Rev. Lett.* **15**, 429 (1965).
- [10] M. Dardo, “Atmospheric neutrino oscillations and muon groups with GUD” in G. Ciapetti, F. Massa, S. Stipcich ed. “Physics and astrophysics with a multi kiloton modular detector underground track detector”, GUD workshop Rome 29-31 October 1981
- [11] T. J. Haines *et al.*, “Calculation of Atmospheric Neutrino Induced Backgrounds in a Nucleon Decay Search,” *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1986 (1986).
- [12] R. Becker-Szendy *et al.*, “A Search for muon-neutrino oscillations with the IMB detector,” *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1010 (1992).

- [13] C. Rubbia, “The Renaissance of experimental neutrino physics,” In *Madrid 1992, Proceedings, Perspectives on high energy physics and cosmology* 20-89, and CERN Geneva - CERN-PPE-93-008 (93/01,rec.Mar.) 36 p
- [14] A. Zichichi “The Gran Sasso Project”, in G. Ciapetti, F. Masastropysics and cosmic ray physics, S. Stipcich ed. “Physics and astrophysics with a multi kiloton modular detector underground track detector,” GUD workshop Rome 29-31 October 1981, A. Zichichi “Perspective of underground Physics the Gran Sasso project CERN EP 88-28
- [15] A. Ball, B. Bianchi, J.P. Revol, G. R Stevenson, E Weisse CERN Beams for Long Baseline Neutrino Experiments, CERN SL/Note 92-75 (BT)
- [16] Proposal for a large area detector dedicated to monopole search, astrophysics and cosmic ray physics at the Gran Sasso Laboratory Bari Bologna Caltech CERN Drexel Frascati Indiana Michigan Pisa Roma Texas AM Torino Virginia Tech. Collaboration Caltech-Frascati 1984
- [17] F. Ronga [MACRO Collaboration], “High-energy neutrinos in the MACRO experiment,” In *Venice 1993, Neutrino telescopes* 285-297
- [18] S. P. Ahlen *et al.* [MACRO Collaboration], “Atmospheric neutrino flux measurement using upgoing muons,” Phys. Lett. B **357**, 481 (1995).
- [19] F. Cavanna, “The CERN-Gran Sasso long baseline neutrino beam project,” In *La Thuile 1995, Results and perspectives in particle physics* 73-93
- [20] M. Ambrosio *et al.* [MACRO Collaboration], “The Observation of upgoing charged particles produced by high-energy muons in underground detectors,” Astropart. Phys. **9**, 105 (1998) [hep-ex/9807032].
- [21] P. Bernardini [MACRO Collaboration], “Measurement of the atmospheric neutrino induced muon flux with the MACRO detector,” hep-ex/9809003. 16 citations counted in INSPIRE as of 08 Oct 2015
- F. Ronga *et al.* [MACRO Collaboration], “Atmospheric neutrino induced muons in the MACRO detector,” Nucl. Phys. Proc. Suppl. **77**, 117 (1999) [hep-ex/9810008]. 41 citations counted in INSPIRE as of 08 Oct 2015
- M. Ambrosio *et al.* [MACRO Collaboration], “Measurement of the atmospheric neutrino induced upgoing muon flux using MACRO,” Phys. Lett. B **434**, 451 (1998) [hep-ex/9807005]. 521 citations counted in INSPIRE as of 08 Oct 2015

[22] T. Kajita [Super-Kamiokande and Kamiokande Collaborations], Nucl. Phys. Proc. Suppl. **77**, 123 (1999) [hep-ex/9810001]. 169 citations counted in INSPIRE as of 08 Oct 2015

Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], “Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos,” Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998) [hep-ex/9807003]. 4577 citations counted in INSPIRE as of 08 Oct 2015