

Luciano Maiani:
Lezione Fermi 21
Fantastici Neutrini! 2

1. Il fascio di neutrini del PS al CERN
2. La scoperta delle Correnti Neutre
3. Le oscillazioni dei neutrini
4. Oscillazioni a SuperKamiokande
5. Neutrini dal CERN al Gran Sasso
6. Oscillazioni di tre neutrini

1. Il fascio di neutrini del CERN

- Nei primi anni sessanta, entro' in operazione anche al CERN un fascio di neutrini/antineutrini di alta (per quei tempi) energia
- alla conferenza di Siena (1963) furono presentati i primi dati, che indicavano la possibile osservazione del bosone intermedio (non era vero, probabilmente era una particelle con charm)
- anche i dati del 1964 sui processi elastici di “corrente neutra” da neutrini

$$\nu(\bar{\nu}) + p \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + p$$

erano affetti da grandi errori sistematici, che risultavano in un limite superiore alla grandezza dell'effetto, limite che era, in effetti, sbagliato (come fu riconosciuto verso la fine degli anni sessanta).

- Nel 1968, il CERN intraprese la costruzione di una grande camera a bolle a liquido pesante, che fu chiamata Gargamelle, dal nome della madre di Gargantua, una donna gigantesca quanto il suo mitico figlio.

Andre' Lagarrigue, leader indiscusso della collaborazione Gargamelle, e' scomparso prematuramente nel 1975

Ancien élève de École Polytechnique (X1944)¹, il a étudié par la suite la physique aux États-Unis, à Berkeley, jusqu'en 1955. Il fait partie, avec Bernard Gregory, Albert Messiah et d'autres, qui comme lui ont séjourné aux États-Unis, de ceux qui ont profondément rénové l'enseignement supérieur de la physique après-guerre. Il est nommé professeur à l'Université d'Orsay en 1964.



The Gargamelle collaboration on neutrino physics (Aachen, Brussels, CERN, Ecole Polytechnique, Milan, Orsay and UCL) had formed by 1968, and met in Milan to list the priorities in the forthcoming neutrino experiments (see "Gargamelle's priorities"). The search for neutral currents was way down at number eight.

And it has to be explained here that at that time there were several different models for beating the divergence problems of the Fermi theory, and neutral currents as postulated by the electroweak model of Glashow (1961), Salam (1968) and Weinberg (1967) was just one option.

Other models included the "diagonal" model of Gell-Mann, Goldberger, Kroll and Low (1969). In this model, the divergence in non-diagonal processes involving unlike currents, such as in muon decay, were cancelled out, whereas for like currents such as in $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$, the expected cross-sections could be arbitrarily large.

We knew that there was support for this model from a reactor experiment by Reines and Gurr (1970), who initially found a cross-section for this process of more than 100 times the V-A value (which turned out to be yet one more of the many wrong numbers floating around in the neutrino field, although we did not know that at the time).

Gargamelle's priorities

1. W search
2. deep inelastic scattering, scaling
3. current algebra sum rules, CVC, PCAC
4. Diagonal Model
5. $\Delta S = 1$ processes, inverse hyperon decay, $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \Lambda + \mu^+$
6. inverse muon decay, $\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$
7. electron-muon universality
8. neutral-current search
9. form factors in exclusive reactions
10. search for heavy leptons

Priority list for Gargamelle neutrino experiments, drawn up in a collaboration meeting held in Milan, November 1968.

Erano tutte balle

La vecchia guardia sperimentale non teneva in grande considerazione l'unificazione e tanto meno la proposta del charm (GIM), che avrebbe risolto il problema delle correnti neutre adroniche.

L'asso nella manica di Gargamelle

- Una camera a bolle contiene un liquido a pressione appena sotto al punto di ebollizione;
 - una particella carica che lo attraversa crea atomi ionizzati lungo la sua traiettoria;
 - se in quel momento si depressurizza la camera, si formano delle bolle che “disegnano” la traiettoria e si possono fotografare
 - per ridurre il fondo dei cosmici, depressurizzazione e fotografia sono sincronizzati con l'arrivo dell'impulso dei neutrini.
 - Gargamelle conteneva Freon, un liquido molto pesante che aumenta la probabilita' di interazione dei neutrini
 - eventi inelastici di corrente neutra da neutrini:
 - *dal “niente” parte un fiotto di particelle nucleari*
 - ma il “niente” potrebbe essere un neutrone prodotto nello stesso fiotto di neutrini, ad es. sulle pareti di acciaio.
 - Gli eventi da neutroni avvengono solo vicino alla zona di produzione (i neutroni sono assorbiti dalla materia) mentre gli eventi da neutrino sono uniformi su tutto il volume della camera;
 - questo era l'*atout* principale di Gargamelle.
 - La probabilita' che il neutrino interagisca con un elettrone atomico e' circa di 1/2000 quella su protone
 - l'evento:
 - *dal “niente” parte un elettrone di alta energia*
- e' molto piu' chiaro; in gergo: *golden event*, bastano pochi eventi per essere sicuri.

2. La scoperta delle Correnti Neutre (1973)

L'inizio della grande stagione del CERN, la fisica italiana c'è

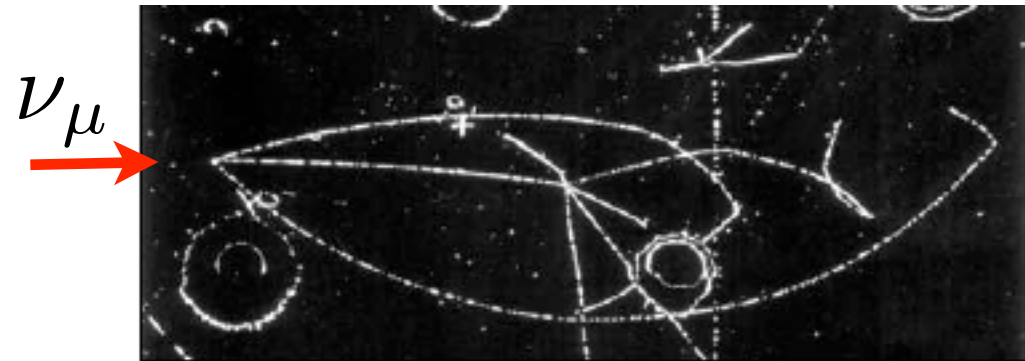


Fig. 1. A hadronic neutral current event, where the interaction of the neutrino from the left produces three secondary particles, all clearly identifiable as hadrons, as they interact with other nuclei in the liquid. There is no charged lepton.

Volume 46B, number 1

PHYSICS LETTERS

3 September 1973

OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

Received 25 July 1973

Events induced by neutral particles and producing hadrons, but no muon or electron, have been observed in the CERN neutrino experiment. These events behave as expected if they arise from neutral current induced processes. The rates relative to the corresponding charged current processes are evaluated.

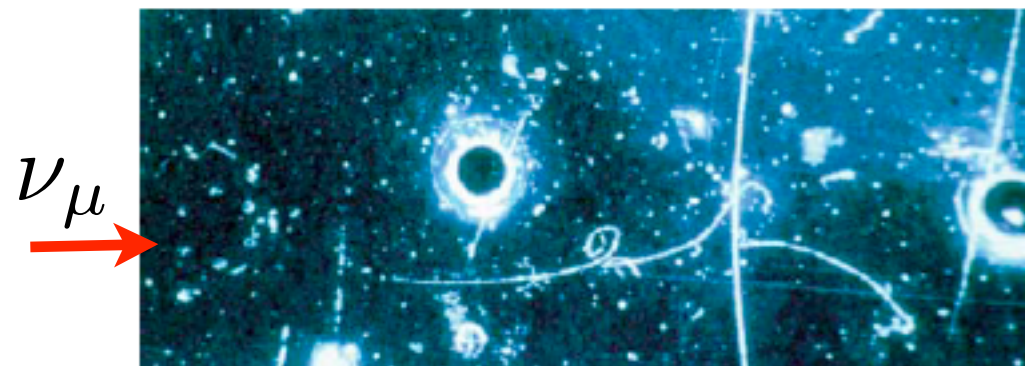


Fig. 2. The first leptonic neutral current event. An antineutrino coming from the left knocks an electron forwards, creating characteristic shower of electron-positron pairs.

Volume 46B, number 1

PHYSICS LETTERS

3 September 1973

SEARCH FOR ELASTIC MUON-NEUTRINO ELECTRON SCATTERING

Received 2 July 1973

One possible event of the process $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ has been observed. The various background processes are discussed and the event interpreted in terms of the Weinberg theory. The 90% confidence limits on the Weinberg parameter are $0.1 < \sin^2 \theta_W < 0.6$.

- forte partecipazione del gruppo di Milano (E. Bellotti, S. Bonetti, D. Cavalli, C. Conta, E. Fiorini, M. Rollier, A. Pullia);
- Sergio Natali (allora al CERN) crea il gruppo di Bari delle camere a bolle-neutrini (N. Armenise, O. Erriquez, M.T. Fogli-Muciaccia, S. Nuzzo, F. Romano)
- Bari diventa un azionista importante di Gargamelle;

per la trasmissione dei dati da analizzare: cassette dei nastri portate in Italia nei week end

..... at this point no one was talking in terms of a standard theory, even though many of the elements were there – charm, intermediate vector bosons and the Brout-Englert-Higgs mechanism for electroweak-symmetry breaking.

However, perceptions began to change around 1972 with the work of Gerardus 't Hooft and Martinus Veltman, who showed that electroweak theory could be selfconsistent through renormalization (CERN *Courier* December 2009 p30).

After this leap forward in theory, the observations in Gargamelle provided a similar breakthrough on the experimental front. “*At the start of the decade, people did not generally believe in a standard theory even though theory had done everything. The neutral-current signals changed that,*” Maiani recalls. “*From then on, particle physics had to test the standard theory.*”

La notizia della scoperta arrivò come un fulmine alla Conferenza di Aix-en-Provence, estate del 1973, e fu pubblicizzata in un affollato evento pubblico

CERN Courier, October 1973 pp297–298 (extract).

Physicists meet the public at Aix

During the week of the Aix Conference more attention than usual was given to the need for communication with non-physicists. A plenary session was held on “Popularizing High Energy Physics” and on several evenings “La Physique dans la Rue” events were organized in the town centre. One evening saw a more classical presentation of information with talks by Louis Leprince-Ringuet (on the beauties of pure research), Bernard Gregory (on the role of fundamental science and its pioneering role in international collaboration) and Valentine Telegdi (*on the intricate subject of neutral currents*). More than 600 people heard these talks, no doubt attracted particularly by the well known television personality of Leprince-Ringuet.

Towards Electroweak Unification

- After the discovery of the neutral currents, Milla has actively participated in the experimental determination of the basic parameter of the $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ theory, the Glashow-Weinberg-Salam angle, for leptons and quarks

VOLUME 41, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 JULY 1978

Measurement of Muon-Neutrino and -Antineutrino Scattering off Electrons

H. Faissner, H. G. Fasold,^(a) E. Frenzel, T. Hansl,^(b) D. Hoffmann, K. Maull,^(c) E. Radermacher, H. Reithler, and H. de Witt

III. Physikalisches Institut, Technische Hochschule, Aachen, Germany

and

M. Baldo-Ceolin, F. Bobisut,^(d) H. Huzita, M. Loreti, G. Puglierin, I. Scotoni,^(e) and M. Vascon

Istituto di Fisica Galileo Galilei dell'Università di Padova, Padova, Italy, and

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, Italy

(Received 6 April 1978)

$$A = g_L^2 = \left(-\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W\right)^2$$

$$B = g_R^2 = (\sin^2 \theta_W)^2$$

(3) Pure V or pure A currents are improbable at about 90% C.L. (4) The results indicate dominant $V+A$, with some $V-A$ mixed in; an estimate of their ratio is $a = A/B = (15_{-15}^{+25})\%$. (5) The data are in good agreement with the Salam-Weinberg model with

$$\sin^2 \theta_W = 0.35 \pm 0.08.$$

Nota: $\sin^2 \theta \approx 0.231$; $M_W \approx 83$ GeV; $M_Z \approx 95$ GeV

Electroweak Unification (cont'd)



NATIONAAL INSTITUUT VOOR KERNFYSICA EN HOGE-ENERGIEFYSICA

July 1983

NIKHEF-H/83-12

Measurement of the neutral current coupling constants
in neutrino and antineutrino interactions with deuterium

Amsterdam-Bergen-Bologna-Padova-Pisa-Saclay-Torino collaboration

D. Allasia⁷, C. Angelini⁵, A. Baldini⁵, M. Baldo-Ceolin⁴, S. Barlag¹, L. Bertanza⁵, A. Bigi⁵, V. Bisi⁷, F. Bobisut⁴, T. Bolognese⁶, A. Borg⁶, E. Calimani⁴, P. Capiluppi³, R. Casali⁵, S. Ciampolillo⁴, J. Derkaoui³, M.L. Faccini-Turluer⁶, R. Fantechi⁵, V. Flaminio⁵, A.G. Frodesen², D. Gamba⁷, G. Giacomelli³, A. Halsteinslid², A. Hornaes², H. Huzita⁴, B. Jongejans¹, I. Lippi⁶, M. Loreti⁴, C. Louedec⁶, G. Mandrioli³, A. Marzari-Chiesa⁷, A. Nappi⁵, R. Pazzi⁵, G.M. Pierazzini⁵, L. Riccati⁷, A. Romero⁷, A.M. Rossi³, P. Serra-Lugaresi³, A. Tenner¹, G.W. van Apeldoorn¹, P. van Dam¹, D. Vignaud⁶, C. Visser¹, R. Wigmans¹.

Abstract:

We have measured neutral and charged current interactions of ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ on proton and neutron. From a combination of ratios we determine the neutral current chiral coupling constants. The results are $u_L^2 = 0.13 \pm .03$, $d_L^2 = 0.19 \pm .03$, $u_R^2 = 0.02 \pm .02$ and $d_R^2 = 0.00 \pm .02$. These results agree with the predictions of the standard $SU(2) \times U(1)$ model. The corresponding value of $\sin^2 \theta_W$ is $0.20 \pm .04$.

Nota: $\sin^2 \theta \approx 0.231$; $M_W \approx 83$ GeV; $M_Z \approx 95$ GeV

3. Le oscillazioni dei neutrini

In Natura ci sono tre tipi di neutrino:



Per distanze da "laboratorio", ≤ 1 km, l'identita' si mantiene



Bruno Pontecorvo e coll. (e, in Giappone, Z. Maki e coll.):
su distanze piu' grandi (in relazione alle differenze tra le masse dei neutrini) un neutrino di un tipo si potrebbe trasformare (oscillare) in uno di tipo diverso (oscillazioni di neutrino), ad es. solo il 50% dei ν_μ darebbe luogo ad un μ^+ .

Energia e scale di lunghezza

- Esperimenti con neutrini di energia E_ν su una distanza L sono sensibili a valori di Δm^2 tali che

$$\Delta m^2 \approx \frac{2E_\nu \hbar}{L} = 0.4 \frac{E(\text{GeV})}{L(\text{km})} \text{ eV}^2$$

- col tempo, sono state esplorate regioni di molto diverse tra loro e oscillazioni tra sapori diversi
- i limiti sulle masse dei neutrini sono ad energie molto piccole, sulla scala nucleare, e per questo ci vogliono lunghe distanze, terrestri o astronomiche.

Sorgenti e distanze

sorgente	produzione	E_ν (MeV)	L (km)	reazione al rivelatore	met. riv.	Esperimento
reattore nucl.	$n \rightarrow \bar{\nu}_e e^- p$	1	~ 1	$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$	scint.	Savannah River (USA)
Sole (Be-B)	ν_e	1 – 10	$1.4 \cdot 10^8$	$\nu_e {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e {}^{37}\text{Ar}$	radioch.	Homestake (USA)
Sole (p-p)	ν_e	0.2 – 0.7	$1.4 \cdot 10^8$	$\nu_e {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e {}^{71}\text{Ge}$	radioch.	GALLEX (IT), SAGE (RU)
Sole (B)	ν_e	5.5 – 10	$1.4 \cdot 10^8$	$\nu_e p \rightarrow e n$	Cherenk.	Kamiokande (JP)
Sole (B)	ν_e	6 – 10	$1.4 \cdot 10^8$	$\nu d \rightarrow \nu p n$	Cherenk.	SNO (CA)
Supernova 1987	$e p \rightarrow n \nu_e$	1	$1.7 \cdot 10^{18}$	$\nu_e \text{Nucl.} \rightarrow e + \dots$	Cherenk.	Kamiokande II (JP), IMB (USA)
reattore nucl.	$n \rightarrow \bar{\nu}_e e^- p$	1	~ 1	$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$	scint.	sparizione di ν_e : Chooz (FR), Daya Bay (Cina)

TABLE I: Sorgenti e metodi di rivelazione dei neutrini naturali e artificiali di bassa energia.

sorgente	produzione	E_ν (MeV)	L (km)	reazione al rivelatore	met. riv.	Esperimento
Atmosfera (zenith)	$\left(\begin{array}{l} \pi \rightarrow \mu \nu_\mu \\ \mu \rightarrow \nu_\mu e \nu_e \end{array} \right)$	10^3	~ 20	$\nu_{\mu/e} \text{Nucl.} \rightarrow \mu/e + \dots$	Cherenk.	Kamiokande (JP)
Atmosfera (nadir)	$\left(\begin{array}{l} \pi \rightarrow \mu \nu_\mu \\ \mu \rightarrow \nu_\mu e \nu_e \end{array} \right)$	10^3	~ 13000	$\nu_{\mu/e} \text{Nucl.} \rightarrow \mu/e + \dots$	Cherenk.	Kamiokande (JP)
Acc. (short base)	$\pi/K \rightarrow \mu \nu_\mu$	10^{3-5}	0.1 – 1	$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \text{Nucl.} \rightarrow l^\mp + \dots$	imag.	
Acc. (long base)	$\pi/K \rightarrow \mu \nu_\mu$	10^{3-4}	300 – 900	$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \text{Nucl.} \rightarrow l^\mp + \dots$	imag.	JP, IT, USA

TABLE II: Sorgenti e metodi di rivelazione dei neutrini naturali e artificiali di alta energia.

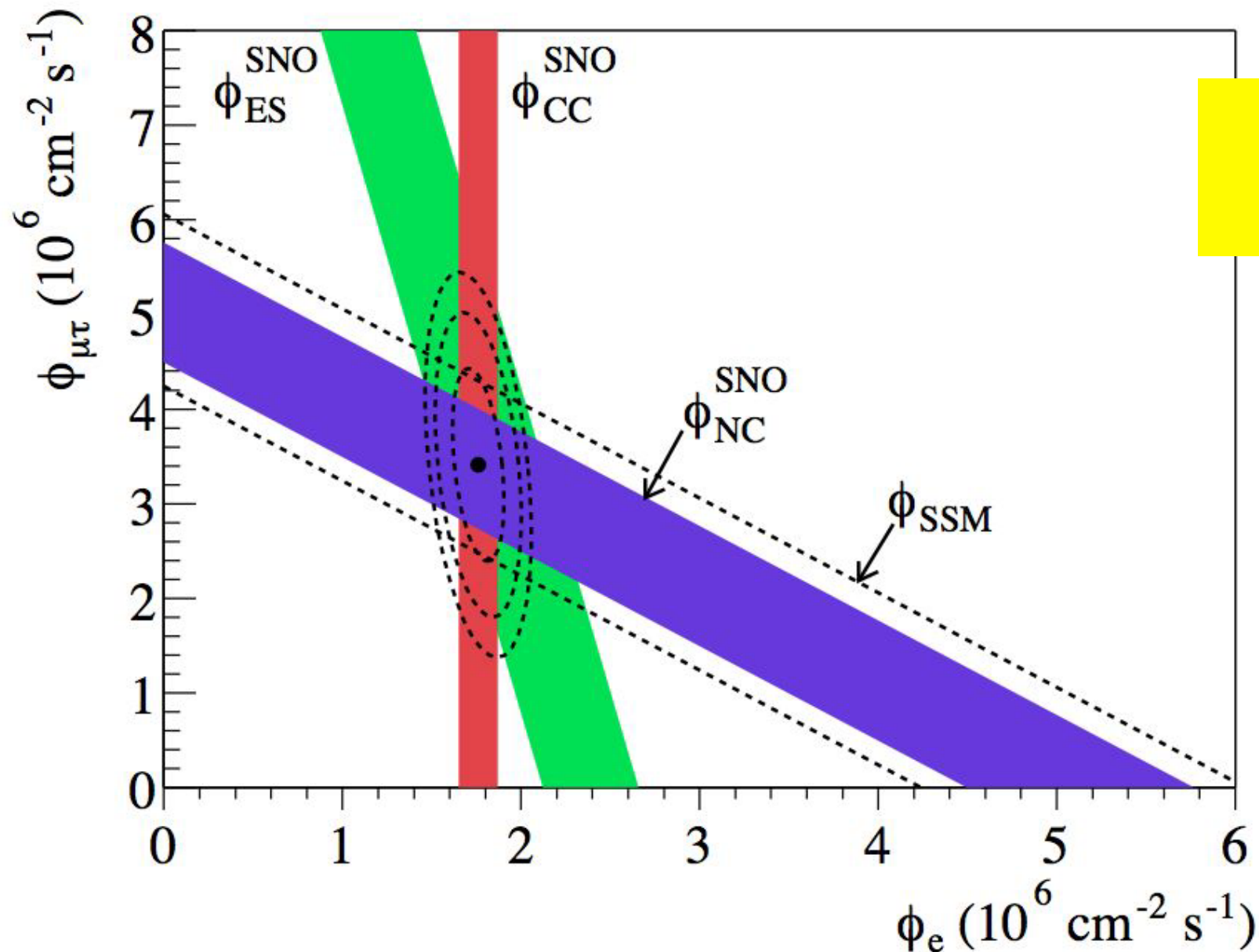
Deficit osservato negli esperimenti sui neutrini solari. Per SNO, vedi figura.

Esperimento	osservato/atteso	anni di osservazione
Homestake	$0.33 \pm 0.03 \pm 0.05$	1970 – 1995
Kamiokande	$0.54 \pm 0.08^{+0.10}_{-0.07}$	1986 – 1995
SAGE	$0.58 \pm 0.06 \pm 0.03$	1990 – 2006
GALLEX	$0.60 \pm 0.06 \pm 0.04$	1991 – 1996
Super- Kamiokande	$0.465 \pm 0.005^{+0.016}_{-0.015}$	1996–

- Pontecorvo:
 - I neutrini dal Sole partono come ν_e ed hanno energia bassa
 - se oscillano in ν_μ non hanno energia sufficiente per produrre un muone nei nostri rivelatori (con reazione di corrente carica)
 - in questo caso, una frazione di neutrini ci arriva come *neutrini sterili per le reazioni di corrente carica* e il flusso che misuriamo e' ridotto rispetto alle previsioni dei modelli solari
 - questo potrebbe spiegare il deficit visto a Homestake
 - deficit confermato negli anni da analoghi esperimenti (in particolare GALLEX con i neutrini pp, che hanno un flusso iniziale molto ben determinato)
 - e ormai consistente con una oscillazione in prevalenza $\nu_e - \nu_\mu$.

Risultati da Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

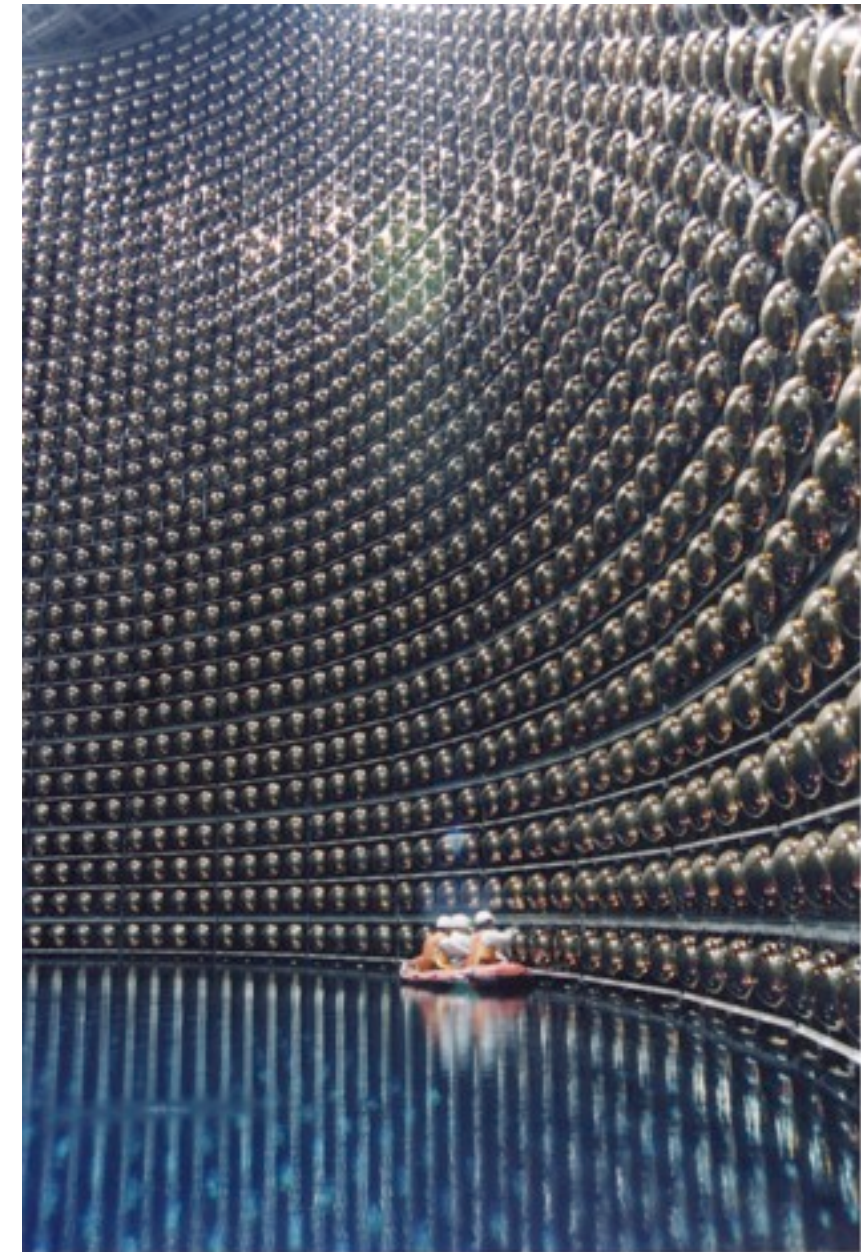
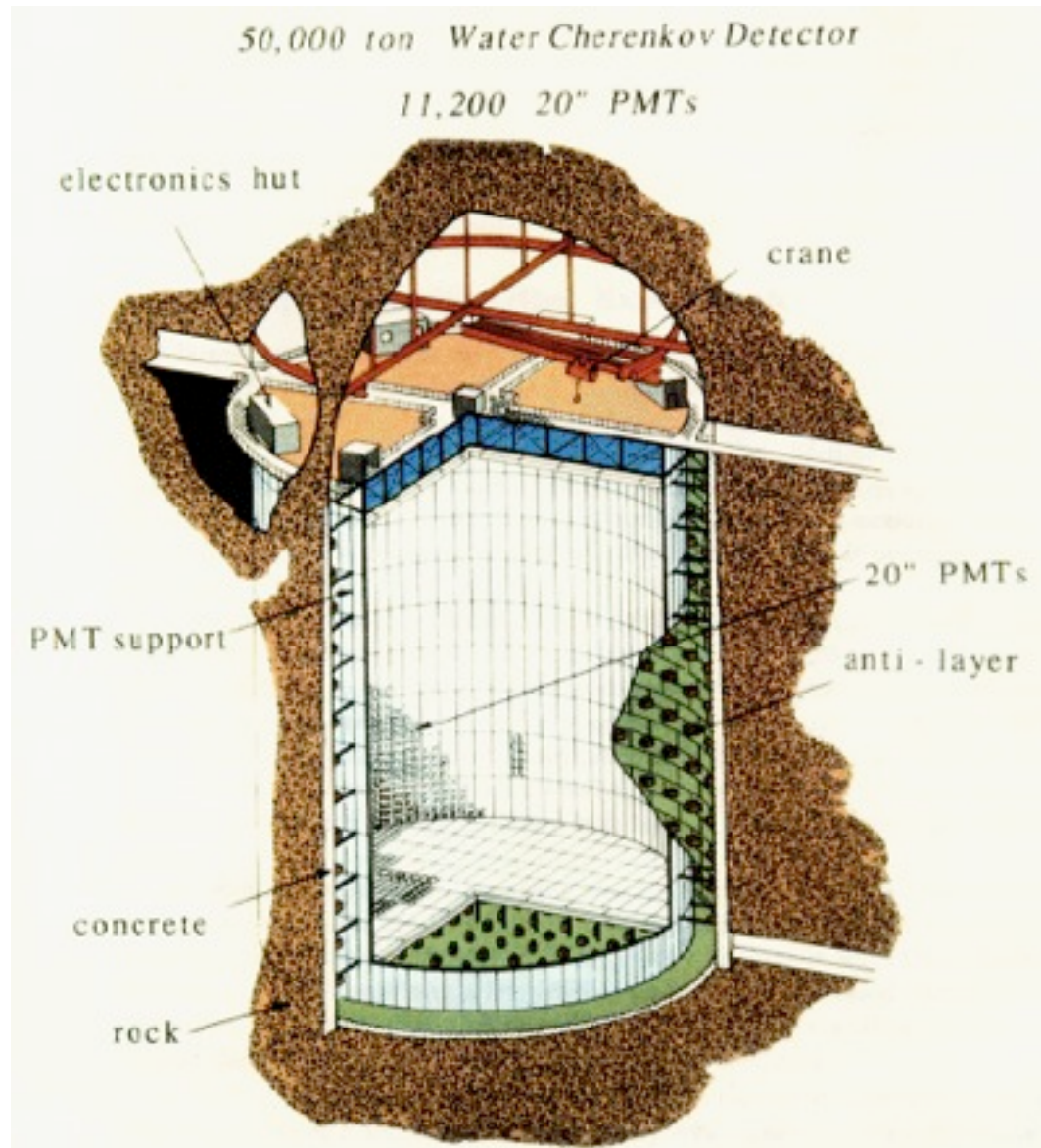
La misura delle reazioni da corrente carica (CC) e corrente neutra (NC, ES) permette di separare il contributo dei ν_e da quello della sovrapposizione $\nu_\mu-\nu_\tau$ e confrontarli con le previsioni del Modello Standard e lo spettro previsto per i neutrini del Boro.

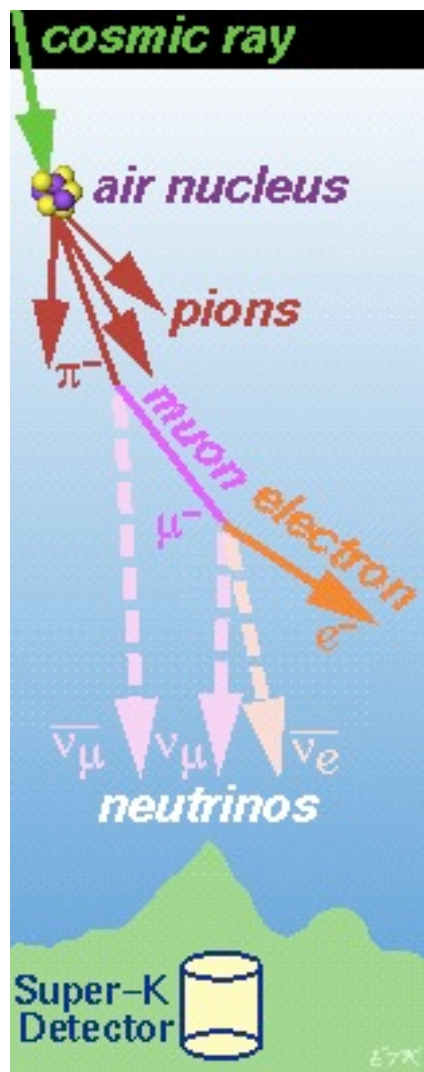


Nessun deficit nelle correnti neutre:
la reazione $\nu(\bar{\nu}) + p \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + p$
vale per tutti i neutrini !

4. Oscillazioni a SuperKamiokande

- installazione nella miniera di Kamioka (Giappone) per osservare:
 - decadimento del protone (non visto finora)
 - neutrini prodotti dai raggi cosmici nell' atmosfera (nu-atmosferici)

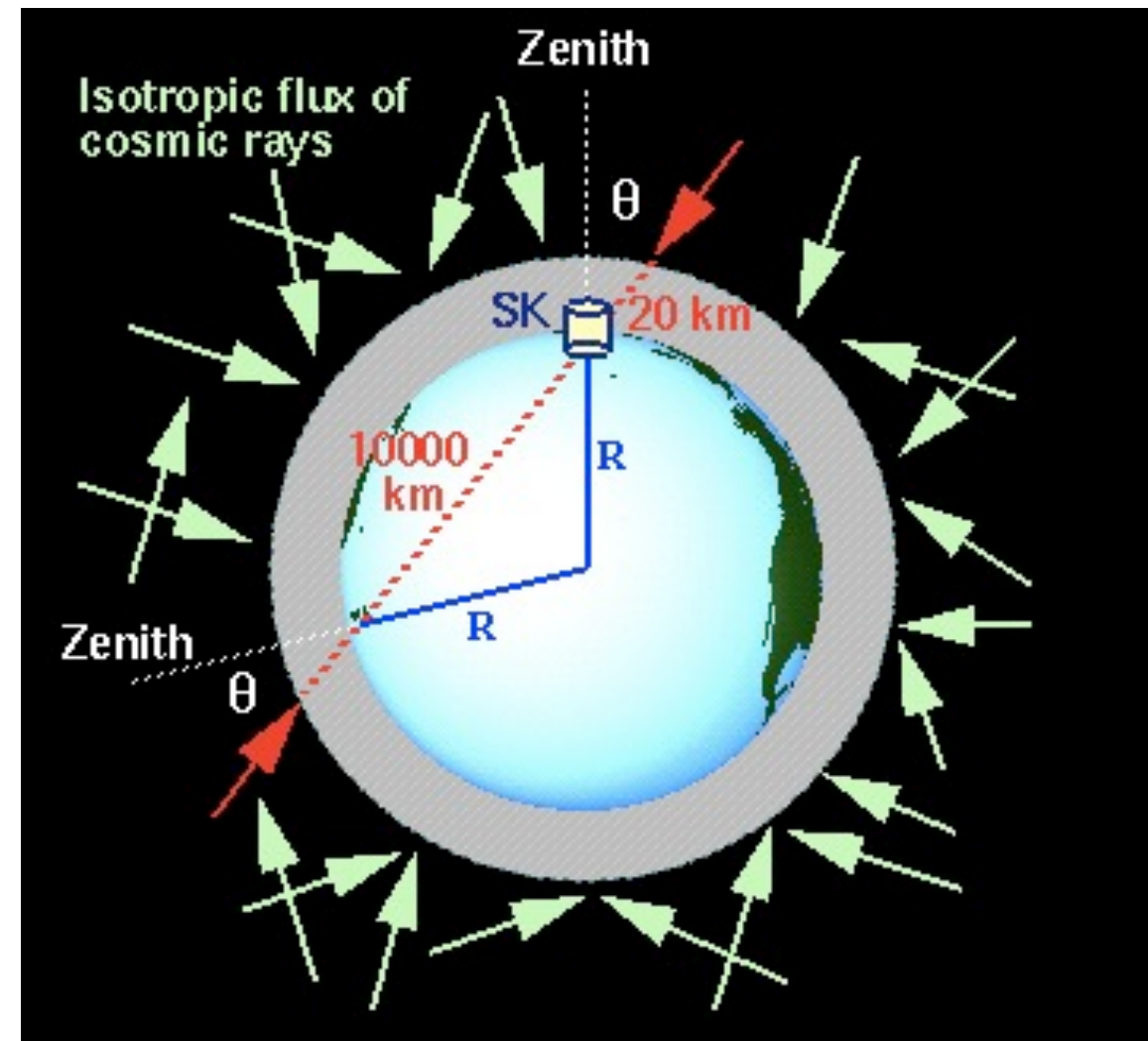




- Super-Kamiokande studia i neutrini prodotti dai raggi cosmici che entrano nell'atmosfera terrestre.
- I neutrini attraversano la Terra senza attenuazione, quindi S-K puo' confrontare i neutrini che *provengono dalla verticale* con quelli che *provengono dal basso*, dopo avere attraversato la Terra.
- I neutrini "dal basso" hanno percorso più strada: sono passati attraverso il nostro pianeta, percorrendo fino a 12.000 km, a seconda della direzione.

• Sorprendentemente, i neutrini di tipo muonico che vengono "dal basso" sono di meno di quelli che vengono "dal'alto".

- Nel 1997, la sparizione di neutrini muonici nel caso in cui le particelle percorrono distanze dell'ordine del diametro della Terra, divenne una certezza.
- Per i fisici di tutto il mondo era la prima prova sperimentale del fenomeno chiamato *oscillazione dei neutrini*.
- La strada per CNGS poteva considerarsi aperta, ..ma sarebbe stata ancora molto in salita.



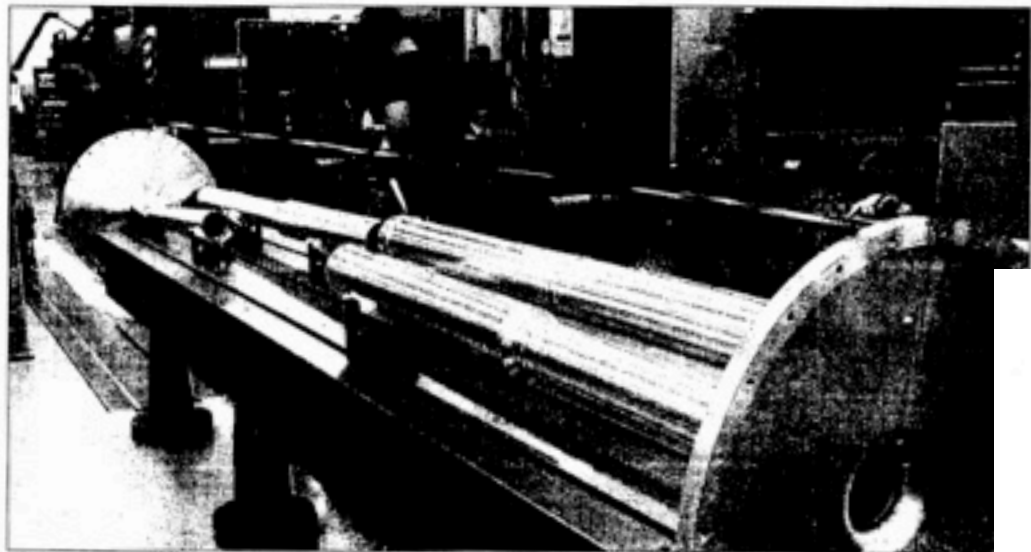
Che succede ai neutrini- μ scomparsi?

- secondo i nostri calcoli, si trasformano soprattutto in neutrini-tau.
- A S-K mancava la “firma” del neutrino-tau: l’osservazione dei leptoni tau, le particelle prodotte dal neutrino-tau quando urta con un nucleo di materia;
- i neutrini dell’atmosfera non hanno l’energia per produrre la particella τ .
- Per risolvere la questione occorreva un nuovo esperimento, con *condizioni di partenza controllate*, (quanti neutrini- μ ci sono all’inizio) *e di energia abbastanza alta* da permettere l’apparizione della particella τ .
- L’acceleratore SPS del CERN e’ in grado di generare i neutrini con l’energia necessaria.
- I Laboratori del Gran Sasso si trovano a 730 chilometri dall’SPS: una distanza che consente un grado di oscillazione abbastanza grande da essere osservabile.
- Le sale sperimentali del Gran Sasso sono orientate tutte verso il CERN: una decisione lungimirante, presa 15 anni prima, nel caso che il progredire degli studi sui neutrini avesse reso necessario un esperimento come CNGS!
- CERN Neutrino beam to GranSasso (CNGS), approvato nel 1999, realizzato nel 2006.

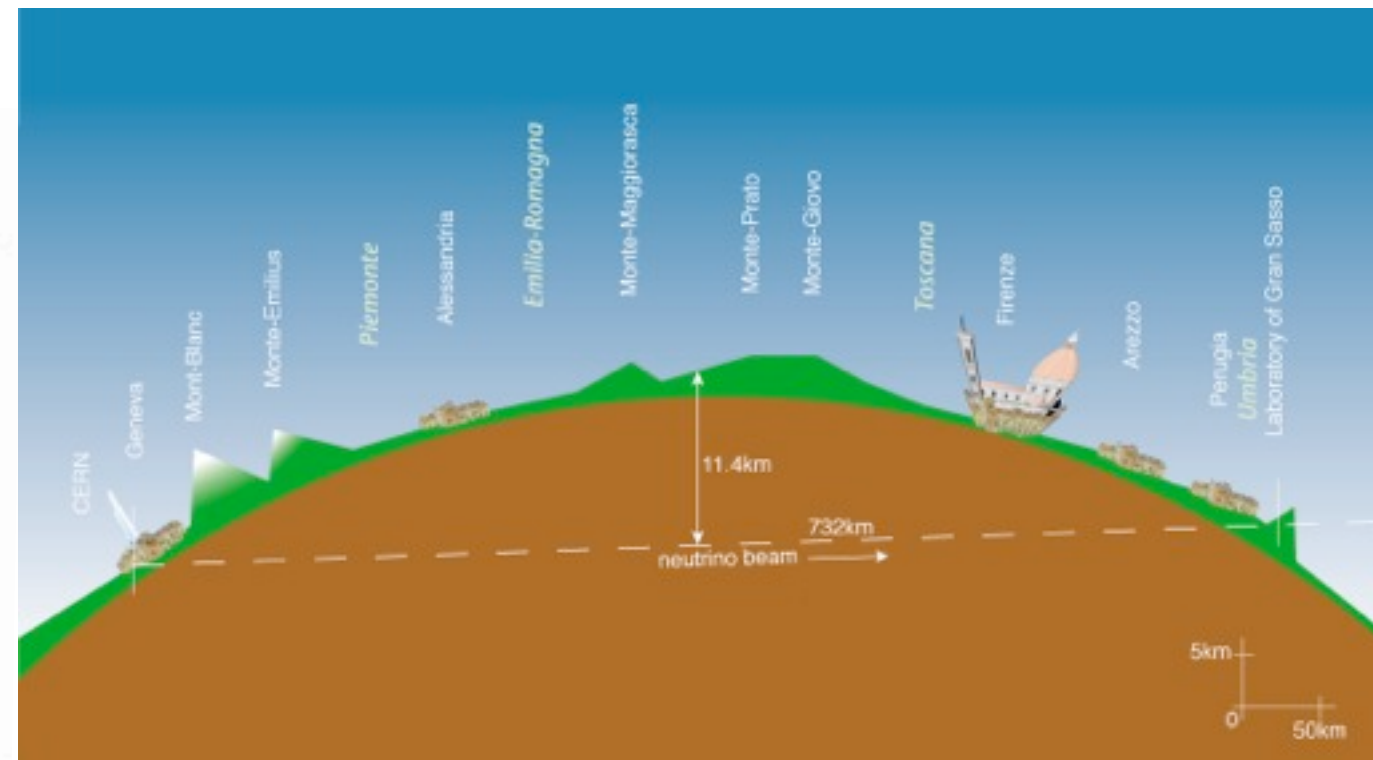
5. Neutrini dal CERN al Gran Sasso



Le CERN bombardera l'Italie par le sous-sol!



RECHERCHE Les scientifiques du CERN et de l'Institut national italien de physique nucléaire espèrent démontrer que la masse manquante de l'Univers se cache du côté des neutrinos. Ils ont échafaudé une expérience digne de Jules Verne: faire voyager sous terre de Meyrin au mont Aquilone près de Rome, des giclées de neutrinos, à la vitesse de la lumière. L'installation du canon et de la cible démarre l'an prochain. Premières réponses attendues en 2005.

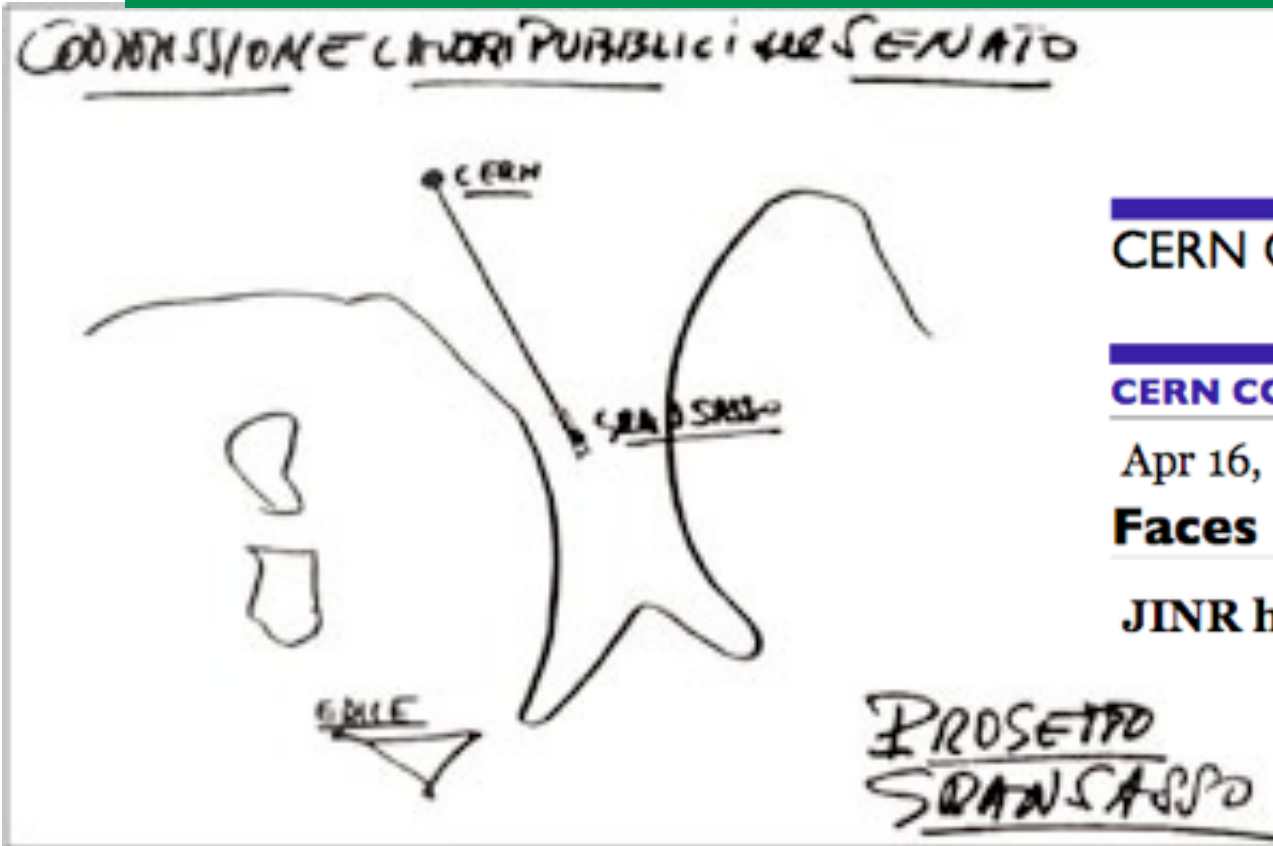


TRIBUNE DE GENÈVE
MARDI 23 DÉCEMBRE 1999

Le Cern bombardera l'Italie pour donner du poids à l'univers

In quei mesi, ci fu un'avisita del Council del CERN al Gran Sasso...ma alcuni media (anche Repubblica) equivocarono, cambiando il Council per i neutrini...Intervistato per telefono dalla RAI alla vigilia della visita, la prima domanda era: "E' vero che i neutrini arriveranno già' domani al Gran Sasso?..." Molto imbarazzato, dovetti spiegare in diretta che per i neutrini ci volevano altri cinque anni...

A. Zichichi's draft of a ν beam to LNGS



CERN Courier

CERN COURIER

Apr 16, 2008

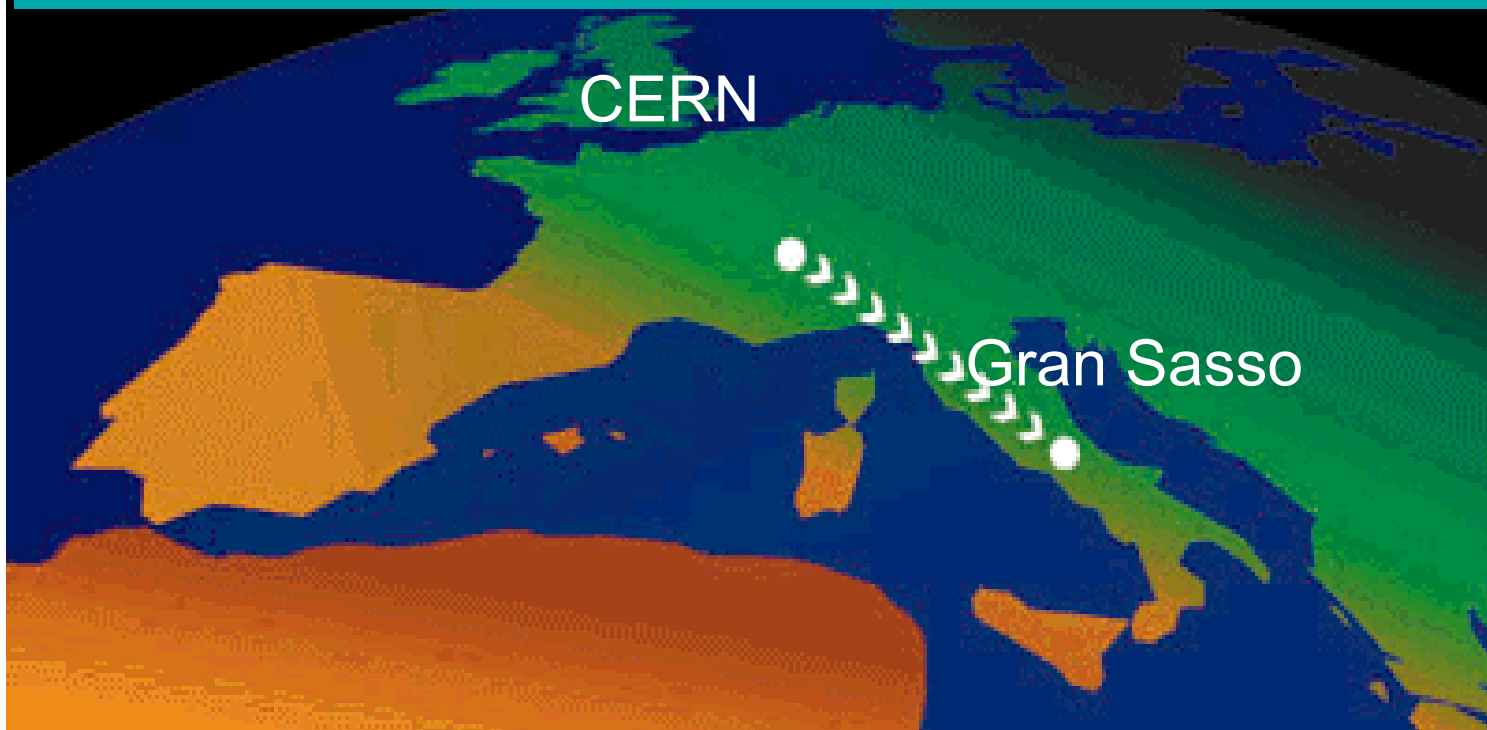
Faces and Places

JINR honours Zichichi with the 2007 Bruno Pontecorvo prize



The Long Baseline Neutrino Beam from CERN to Gran Sasso, to test $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillations, 2000-2006

Ground-Breaking Ceremony, October 12, 2000



October 12, 2000

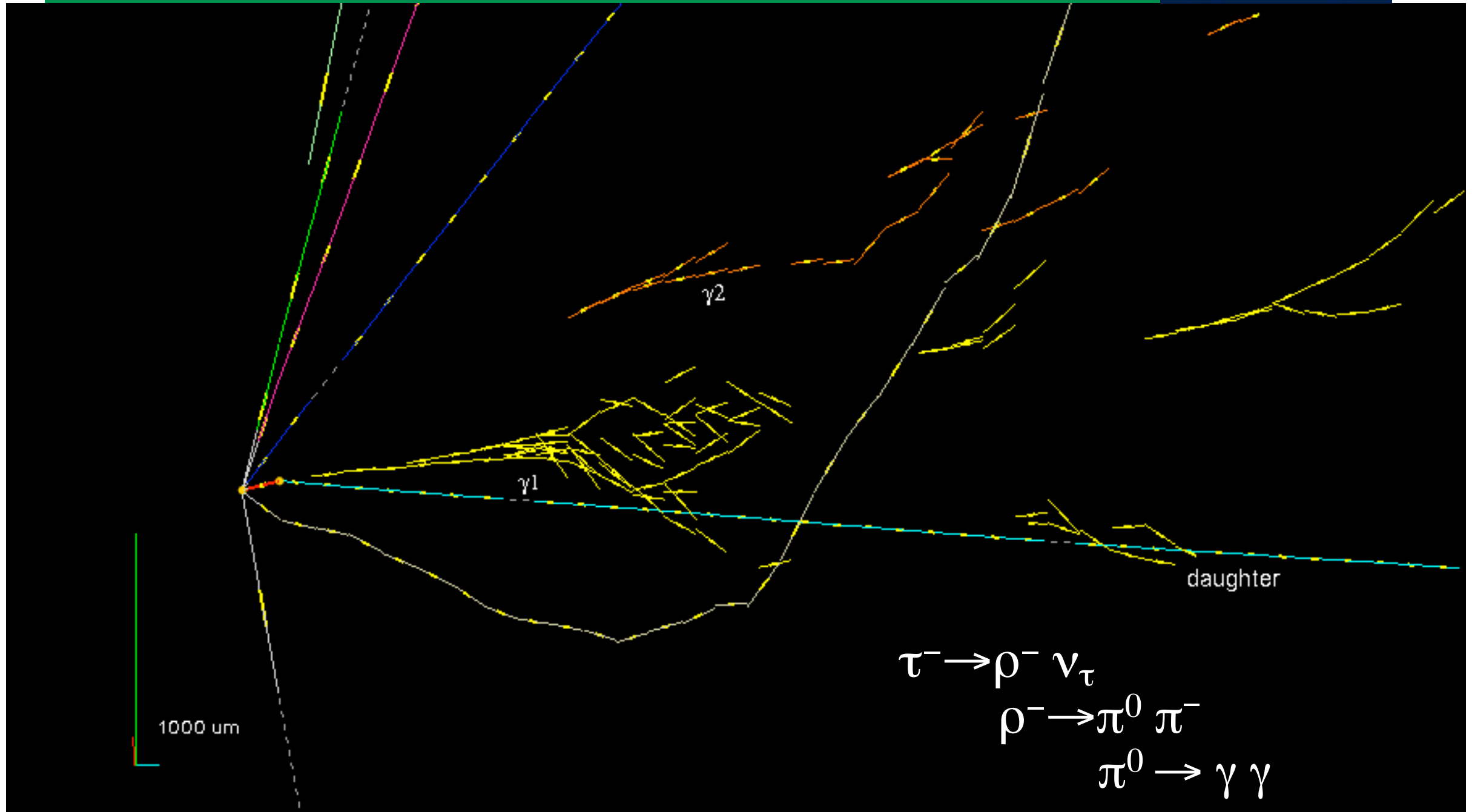
Madame Marie-Paule BARDECHE, *Sous-Préfet de Gex*;
 Prof. Alessandro BETTINI, *Direttore, Laboratori nazionali del Gran Sasso, INFN*;
 Prof. Luciano MAIANI, *Director General, CERN*.

CNGS, 11/09/2006

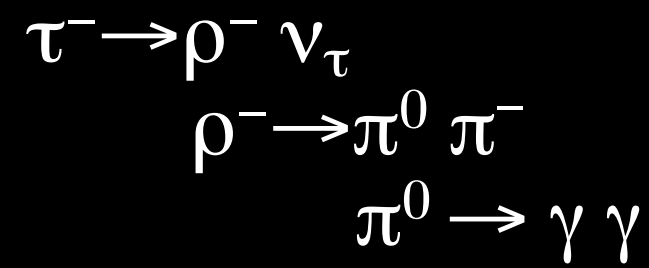
L. Maiani. Neutrini al Gran Sasso

16

OPERA, event 1

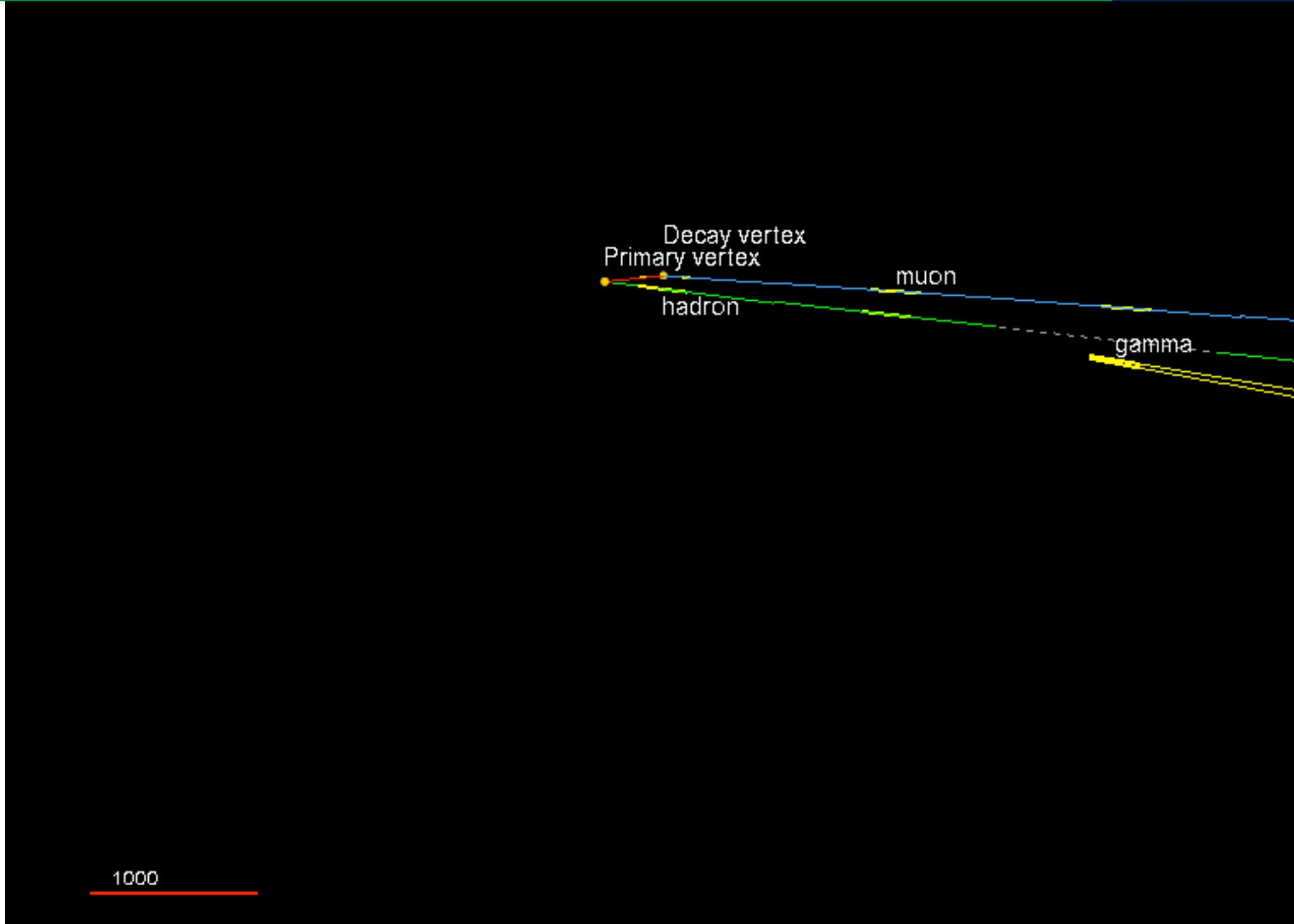


$$\tau \rightarrow \nu_\tau + 2 \pi$$



Giovanni De Lellis, seminar at CERN, June 11 2013

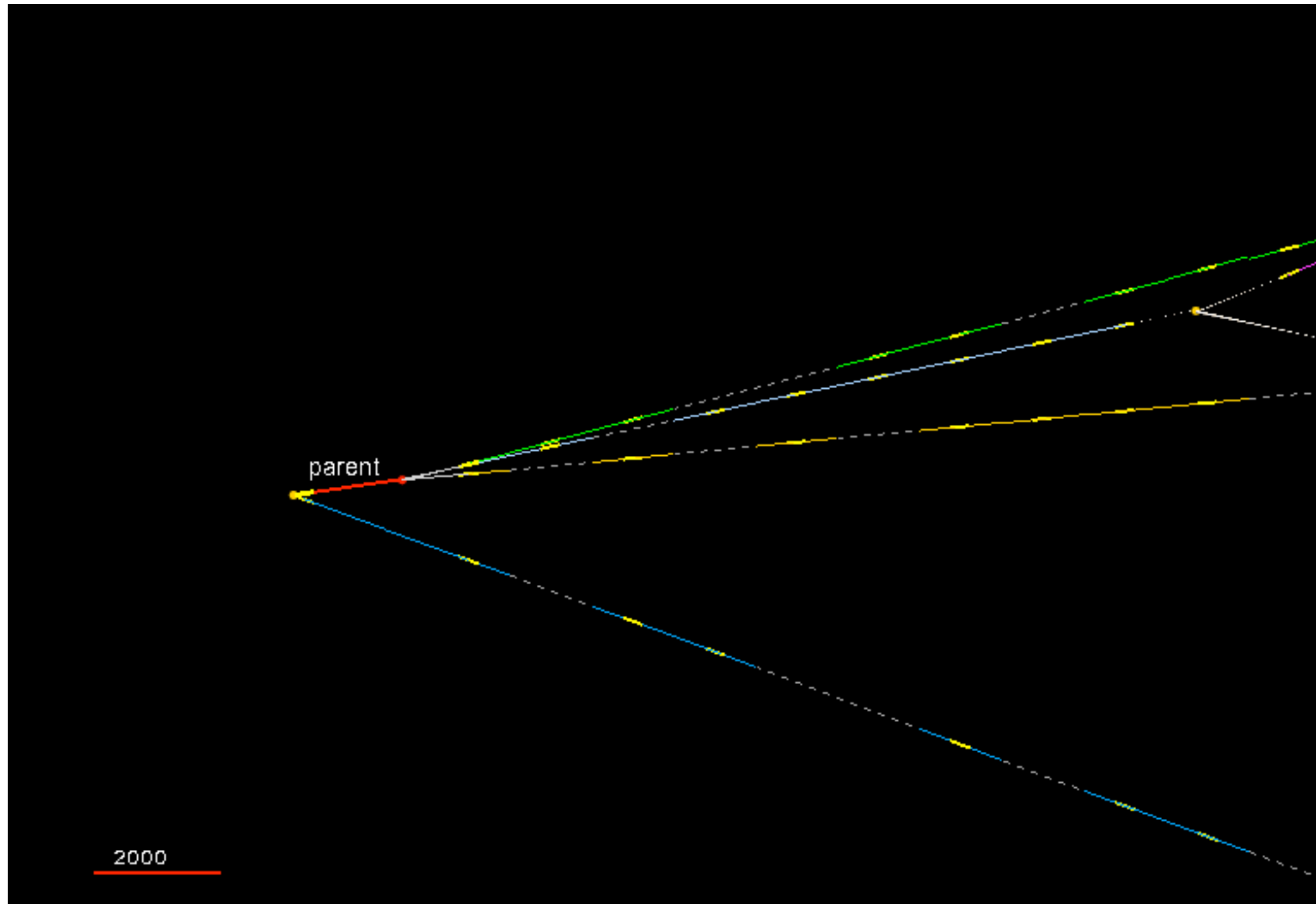
OPERA, event 2



$$\tau \rightarrow \nu_{\tau} + \nu_{\mu} + \mu$$

Giovanni De Lellis, seminar at CERN, June 11 2013

OPERA, event 1



$\tau \rightarrow \nu_\tau + 3 \text{ hadrons}$

Giovanni De Lellis, seminar
at CERN, June 11 2013

