

Appunti del corso

(December 21, 2007)

Queste note non hanno carattere di organicità.

Si tratta semplicemente di appunti *in progress*, che si spera comunque possano essere di un qualche aiuto per gli studenti.

1 Esperimenti

1.1 ARGO-YBJ (Tibet)

L'acronimo sta a significare "Astrophysical Radiation Ground-based Observatory at YangBaJing" ed indica un rivelatore posizionato ad alta quota (4300 m) dedicato alla ricerca di sorgenti gamma a partire da energie di qualche centinaio di GeV. Tra le finalità dell'esperimento c'è anche lo studio dei raggi cosmici a energie superiori al TeV, fino alla zona del ginocchio.

Il rivelatore consiste in un tappeto di Resistive Plate Counters (RPC) che coprono completamente una superficie di $78 \times 74 \text{ m}^2$. Un anello esterno, attrezzato solo per il 20% con RPC, porta la superficie totale a $110 \times 100 \text{ m}^2$. L'ottima risoluzione temporale ($\sim 1 \text{ ns}$) fornita dagli RPC permette la ricostruzione spazio-temporale del fronte dello sciame con un dettaglio finora mai raggiunto (si veda l'evento in Fig. 9).

1.2 AUGER (Argentina)

L'esperimento è essenzialmente dedicato allo studio dei raggi cosmici ad energie oltre 10^{19} eV allo scopo di verificare le misure di Agasa (Fig. 4) non compatibili con le previsioni dell'effetto GZK.

Vengono usati due sistemi di rivelazione degli sciami estesi. Mille e seicento tank, attrezzate con fototubi e collocate nella pampa ad una distanza di 1.5 km l'una dall'altra, rivelano la luce Čerenkov generata dalle particelle cariche nell'acqua con cui sono riempite le tank. Quattro "occhi" rivelano la luce di fluorescenza prodotta dallo sciame nell'atmosfera.

1.3 DAMA (Italia)

Esperimento dedicato alla ricerca della materia oscura e collocato nei laboratori sotterranei del Gran Sasso...

1.4 HESS (Namibia)

Si tratta di un telescopio a luce Čerenkov per l'astronomia gamma ...

1.5 Homestake (Sud Dakota)

Si tratta del primo esperimento finalizzato alla rivelazione dei neutrini solari. Con tecniche radio-chimiche, Davis misurò un flusso di neutrini molto inferiore a quello previsto sulla base del modello solare standard (SSM). I risultati della misura sono sintetizzati nella Fig. 10.

1.6 KamLAND (Giappone)

L'esperimento ... Fig. 17 ...

1.7 MACRO (Italia)

In presa dati dal 1989 al 2000, era collocato nei laboratori sotterranei del Gran Sasso. Occupava un volume di $10 \times 12 \times 72 \text{ m}^3$, il tracciamento delle particelle era garantito da strati di tubi a *streamer*, mentre delle *tank* riempite con scintillatore liquido permettevano la misura dei tempi d'arrivo.

Finalizzato principalmente alla ricerca del monopolo magnetico, ha permesso importanti misure sui raggi cosmici studiandone la componente muonica di alta energia. Il risultato più importante è stata la misura del flusso dei neutrini atmosferici in funzione della direzione d'arrivo, che ha avvalorato la rivoluzionaria ipotesi di neutrini massivi ed oscillanti.

1.8 MILAGRO (Nuovo Messico)

L'esperimento è dedicato all'astronomia gamma per energie superiori a $\sim 2 \text{ TeV}$. Il rivelatore è installato a 2630 m di quota, nelle vicinanze di Los Alamos. Una piscina di 5000 m^2 , completamente schermata dalla luce solare, è attrezzata con due strati di fotomoltiplicatori (rispettivamente ad una profondità di 1.5 e 8 m) che rivelano la luce Čerenkov generata nell'acqua dalle particelle cariche dello sciame. La direzione d'arrivo del primario è ricostruita con una risoluzione angolare di circa 0.5° . Lo strato più profondo di scintillatori permette di rivelare i muoni e quindi di rigettare circa il 90% degli sciami adronici. La piscina centrale è circondata da una matrice esterna di 175 contenitori, anch'essi pieni d'acqua ed attrezzati con fototubi.

1.9 Sudbury Neutrino Observatory (Ontario)

L'esperimento è costituito da 1000 tonnellate di acqua pesante (D_2O) contenute in un contenitore di acrilico, circondato da altre 5000 tonnellate di acqua normale che funziona da schermo contro il background (radioattività naturale e prodotti dei raggi cosmici). Una struttura di fotomoltiplicatori permette di rivelare le interazioni nell'acqua pesante dei neutrini solari generati dal ciclo del 8B , distinguendo le correnti cariche (CC), le correnti neutre (NC) e gli scattering elastici (ES):

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad (CC)$$

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \quad (NC)$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (ES)$$

Per comprendere la misura di SNO è necessario ricordare che, mentre le interazioni CC sono previste solo per i ν_e , le altre due interazioni si manifestano anche per ν_μ e ν_τ . Per le NC le sezioni d'urto sono uguali per ν_e , ν_μ e ν_τ . Per gli ES le sezioni d'urto risultano $\sigma_e \sim 6.5\sigma_\mu \sim 6.5\sigma_\tau$.

1.10 SuperKamiokande (Giappone)

Il detector è costituito da un enorme cilindro pieno d'acqua purissima, equipaggiato con fototubi che permettono di rivelare il segnale Čerenkov generato dalle particelle relativistiche. In Fig. 11 sono rappresentati due eventi generati da neutrini atmosferici (nel primo caso da un neutrino muone, nel secondo da un neutrino elettrone). Le misure effettuate da SuperKamiokande (Fig. 12) evidenziarono un deficit nel flusso di neutrini muonici atmosferici. La relazione tra questo deficit e il cammino percorso dai neutrini avvalorò definitivamente l'ipotesi di neutrini massivi e oscillanti.

2 Qualche dato

Velocità della luce	c	299792458	m/s
Costante di gravitazione universale	G	6.6742×10^{-11}	$m^3/kg/s^2$
Temperatura del fondo cosmico di microonde	T_0	2.725 ± 0.001	K
Massa del Sole	M_\odot	1.988×10^{30}	kg
Massa della Terra	M_\oplus	5.972×10^{24}	kg

		massa (MeV)	tempo di vita (s)	principali decadimenti	
leptoni	elettrone	e	0.511		
	muone	μ	105.658	2.197×10^{-6}	$\nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$
	tau	τ	1776.99	290.6×10^{-15}	$\nu_\tau X$
mesoni	pione carico	π^-	139.57	2.603×10^{-8}	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$
	pione neutro	π^0	134.98	8.4×10^{-17}	$\gamma \gamma$
barioni	protone	p	938.27		
	neutrone	n	939.57	885.7	$p e^- \bar{\nu}_e$

	Densità di energia (eV/cm^3)
Raggi cosmici fuori dal campo magnetico solare	1
Luce stellare	0.6
Fondo cosmico di microonde	0.26
Campo magnetico galattico ($3 \mu G = 3 \times 10^{-10} T$)	0.25

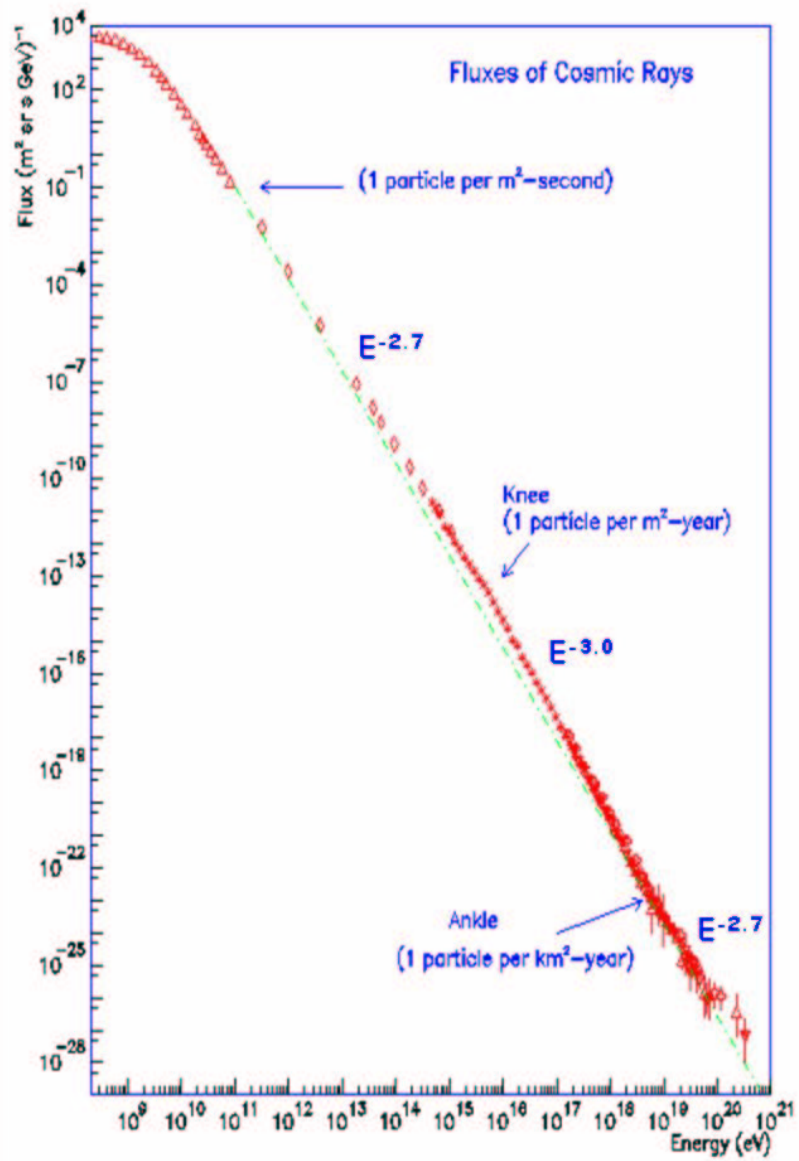


Figure 1: Spettro differenziale dei raggi cosmici.

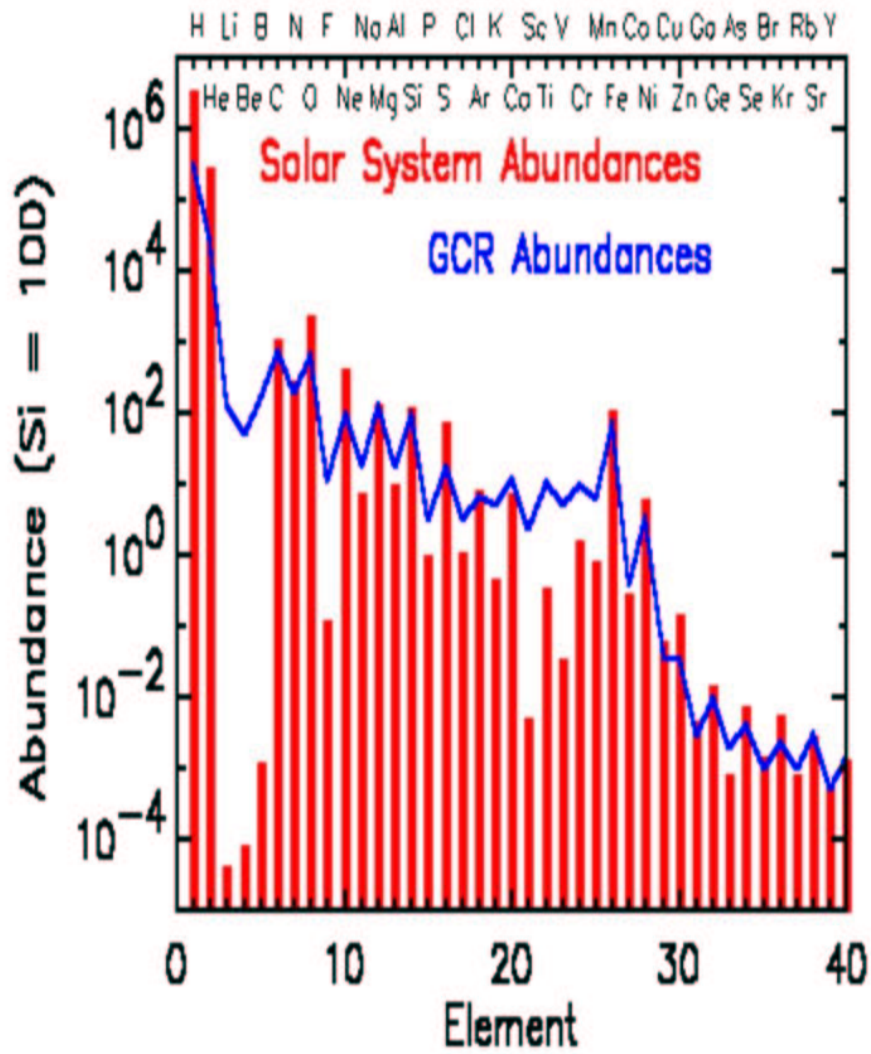


Figure 2: Abbondanza elementale nei raggi cosmici, confrontata con quella nel sistema solare.

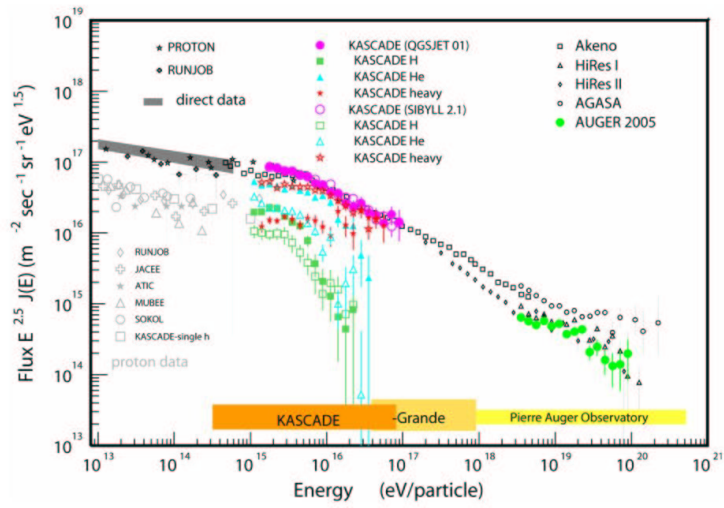


Figure 3: ...

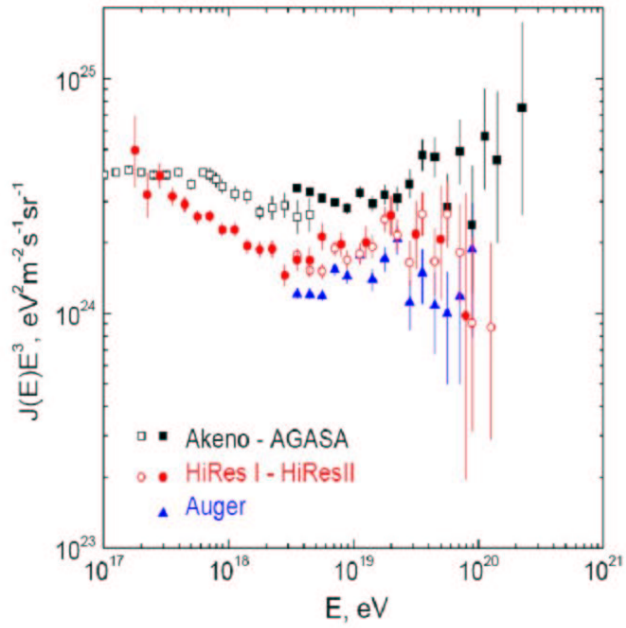


Figure 4: Misure del flusso di raggi cosmici ad altissime energie.

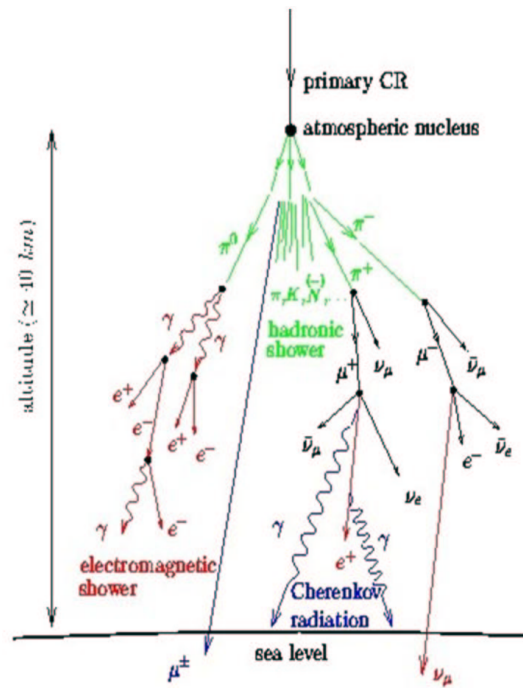


Figure 5: Sviluppo di uno sciame esteso in atmosfera.

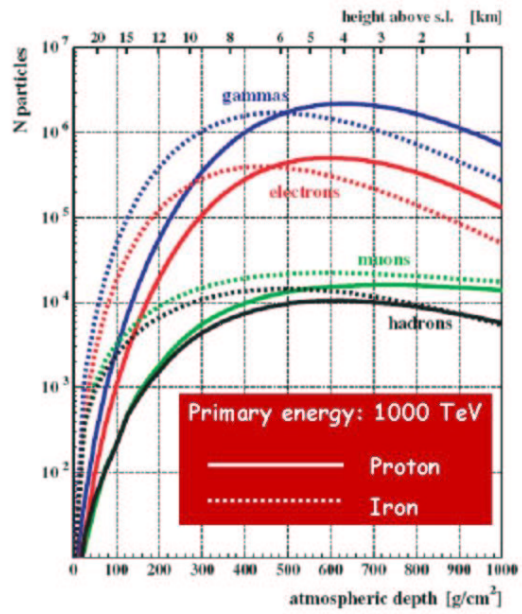


Figure 6: Sviluppo longitudinale di uno sciame innescato da un primario da 1000 TeV.

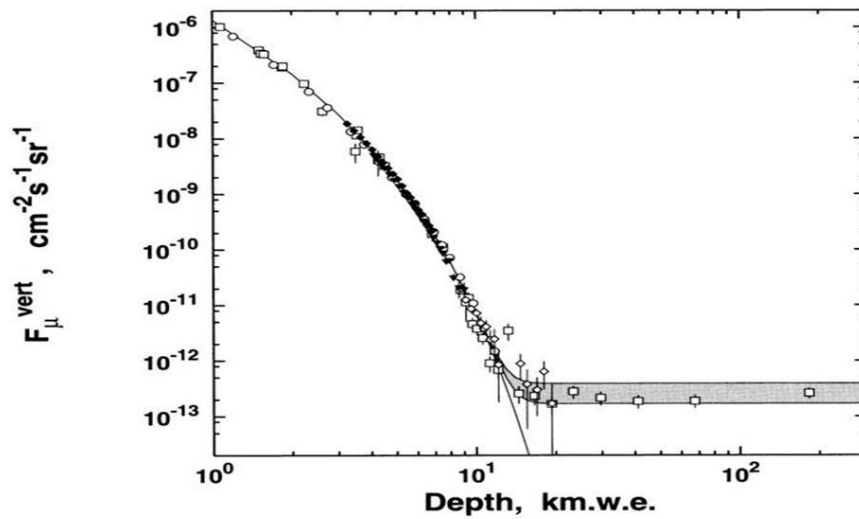


Figure 7: Flusso di muoni in funzione della profondità.



Figure 8: Simulazione di uno sciame elettromagnetico e di uno sciame adronico.

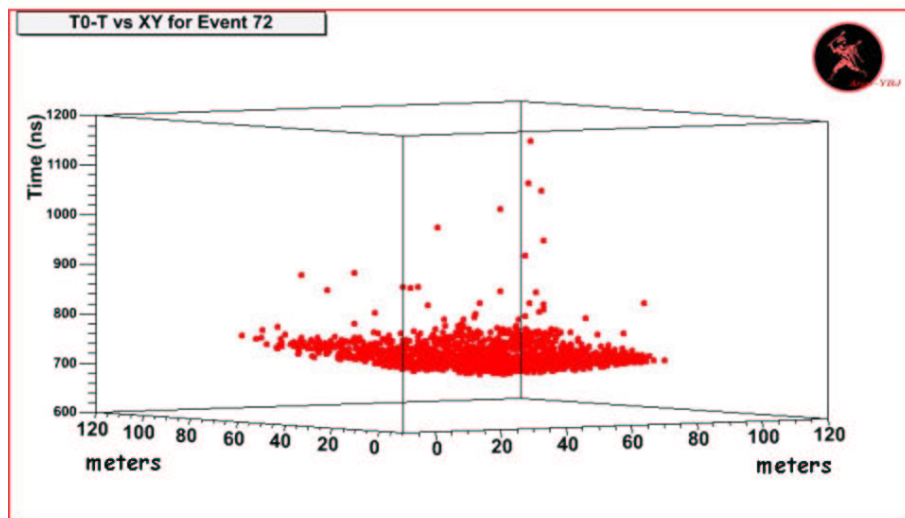


Figure 9: Esperimento ARGO-YBJ - Ricostruzione di uno sciame.

3 Le oscillazioni dei neutrini

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[1.27 \Delta m^2 (eV^2) \frac{L(km)}{E(GeV)} \right]$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[1.27 \Delta m^2 (eV^2) \frac{L(km)}{E(GeV)} \right]$$

dove θ rappresenta l'angolo di mixing, Δm^2 la differenza dei quadrati delle masse, L il cammino percorso dal neutrino ed E l'energia.

4 Il puzzle dei neutrini solari

SNO - La presenza di una componente non elettronica nel flusso di neutrini solari è stata dimostrata per la prima volta dall'esperimento SNO. I flussi stimati sulla base delle diverse interazioni neutriniche sono i seguenti (in unità di $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

$$\Phi_{CC} = 1.68 \pm 0.06_{-0.09}^{+0.08}$$

$$\Phi_{NC} = 4.94 \pm 0.21_{-0.34}^{+0.38}$$

$$\Phi_{ES} = 2.35 \pm 0.22 \pm 0.15$$

Si ricordi che le correnti cariche sono solo dovute ai neutrini elettronici, mentre le correnti neutre e gli scattering elastici possono essere dovute anche a neutrini muonici e tau. Il numero di scattering elastici attesi per questi ultimi due neutrini è ridotto di un fattore $\zeta = 1/6.5$, a causa della diversa sezione d'urto.

I risultati sperimentali si possono quindi spiegare ipotizzando per effetto delle oscillazioni, nel flusso di neutrini solari, ci sia una componente di neutrini muonici (Φ_μ) e tau (Φ_τ), oltre a quella di neutrini elettronici (Φ_e). Infatti, compatibilmente con gli errori, risulta che il flusso totale è quello previsto dal modello solare standard e che circa un terzo di questo flusso è quello dei neutrini elettronici, mentre i neutrini muonici e quelli tau contribuiscono per gli altri due terzi. Infatti i risultati sperimentali sono interpretabili con le seguenti equazioni:

$$\Phi_{CC} = \Phi_e$$

$$\Phi_{NC} = \Phi_e + \Phi_\mu + \Phi_\tau$$

$$\Phi_{ES} = \Phi_e + \zeta \Phi_\mu + \zeta \Phi_\tau$$

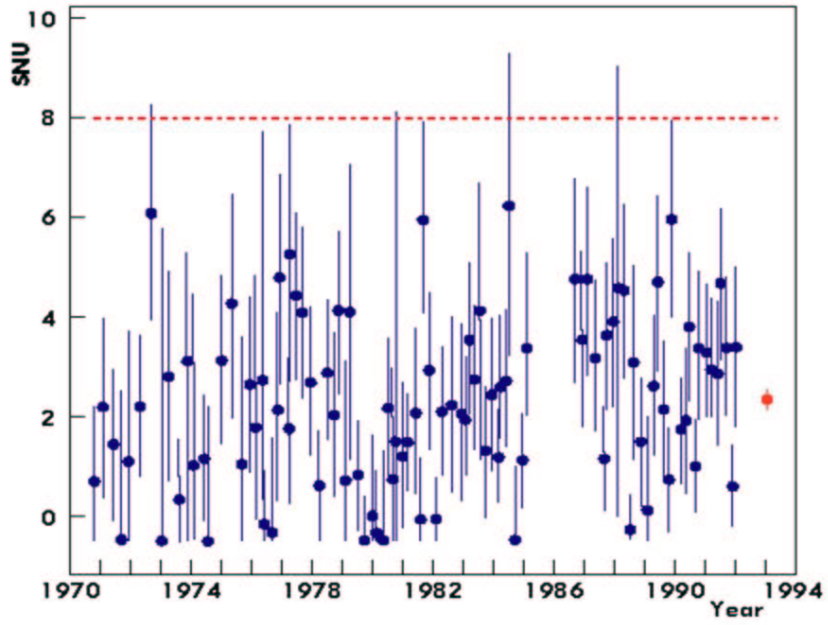


Figure 10: Homestake - Misura del flusso di neutrini solari. Il punto rosso rappresenta la media di tutte le misure.

	Δt (s)	E_e (MeV)	E_ν (MeV)
1	0.000	20.0	21.3
2	0.107	13.5	14.8
3	0.303	7.5	8.8
4	0.324	9.2	10.5
5	0.507	12.8	14.1
6	1.541	35.4	36.7
7	1.728	21.0	22.3
8	1.915	19.8	21.1

Table 1: Eventi da neutrino rivelati dall'esperimento Kamiokande in concomitanza con la Supernova 1987A.

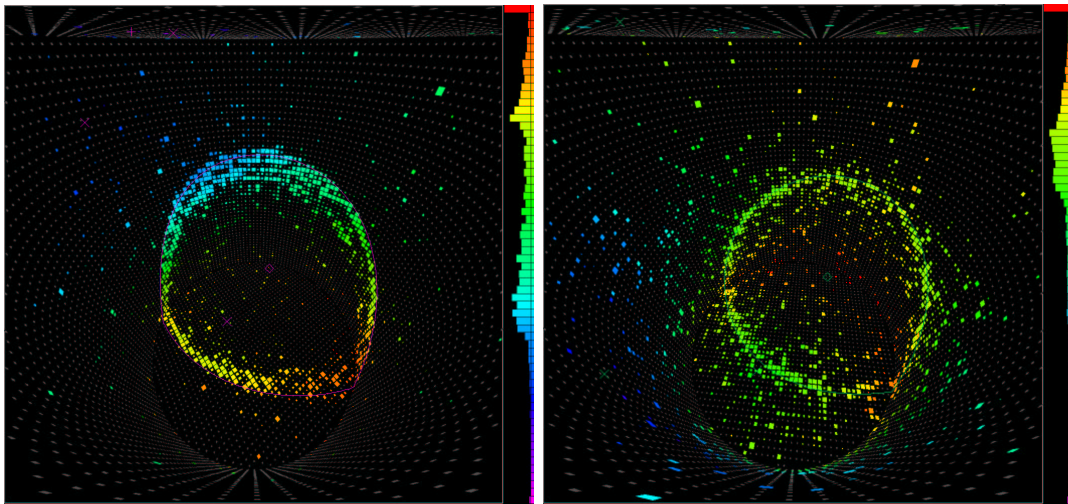


Figure 11: Superkamiokande - Evento da neutrino muonico (sinistra) e da neutrino elettronico (destra).

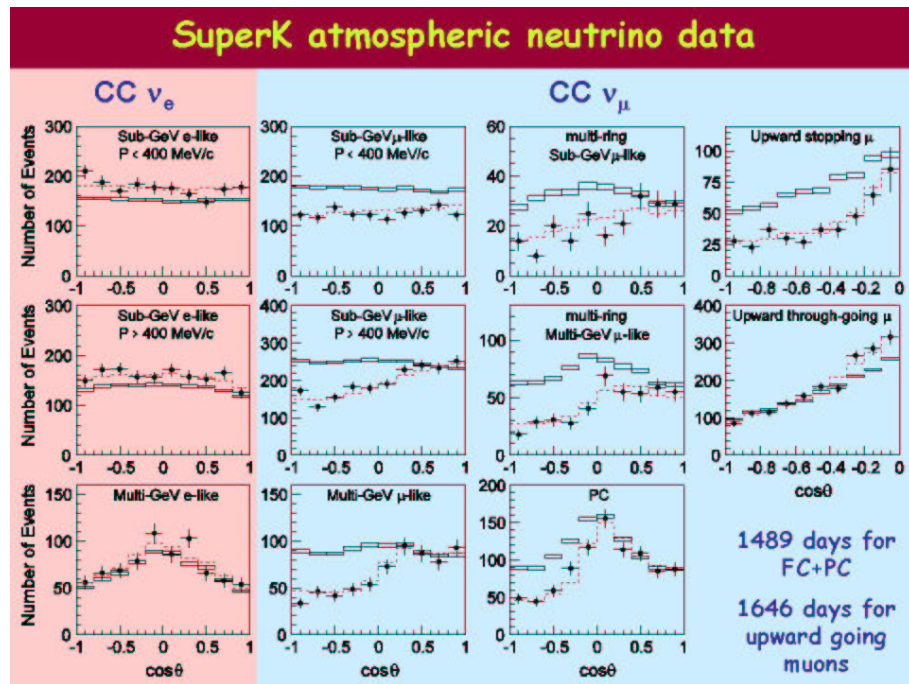


Figure 12: Superkamiokande - Risultati sperimentali relativi ai neutrini atmosferici.

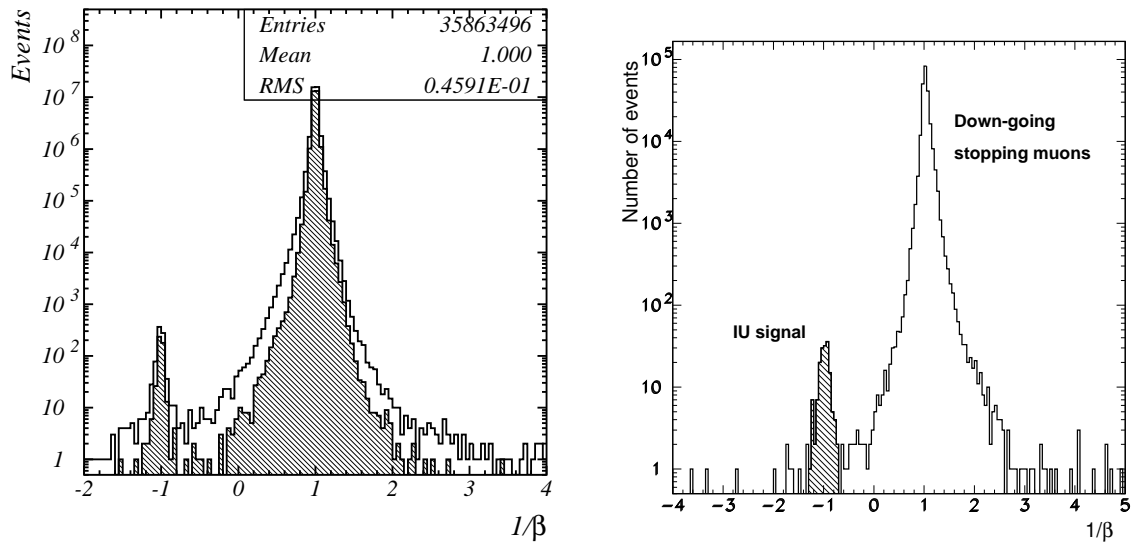


Figure 13: MACRO - Distribuzione di $1/\beta$ per muoni passanti (a sinistra) e per muoni che si fermano o vengono generati nell'apparato (a destra).

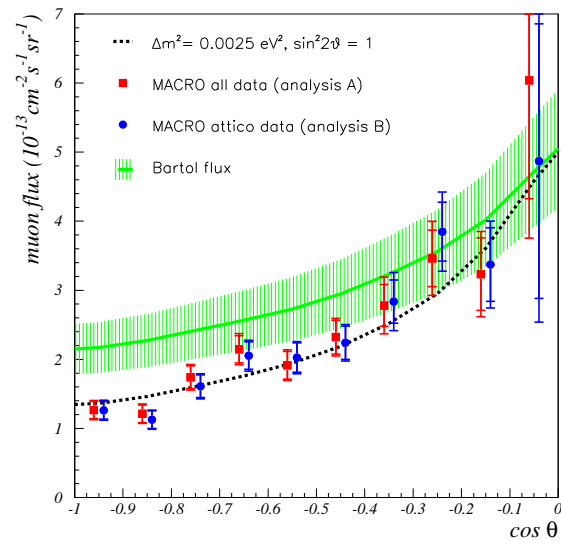


Figure 14: MACRO - Flusso di muoni dal basso in funzione del coseno dell'angolo di zenit.

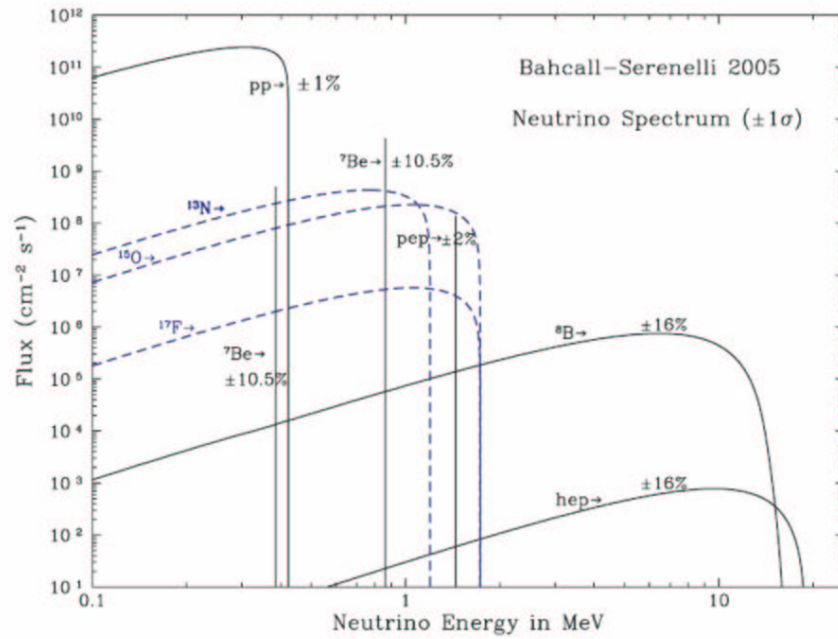


Figure 15: Flusso previsto per i diversi canali di produzione dei neutrini solari.

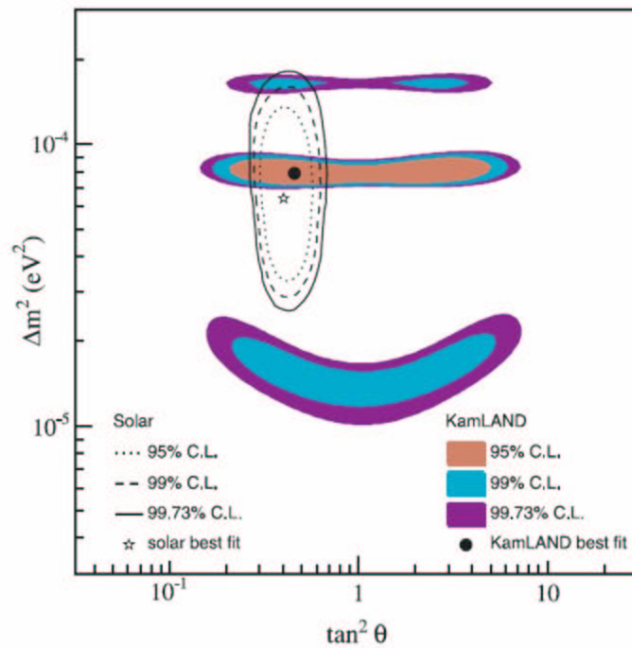


Figure 16: Regioni ammesse nel piano dei parametri di oscillazione sulla base delle misure sui neutrini solari e dell'esperimento KamLAND.

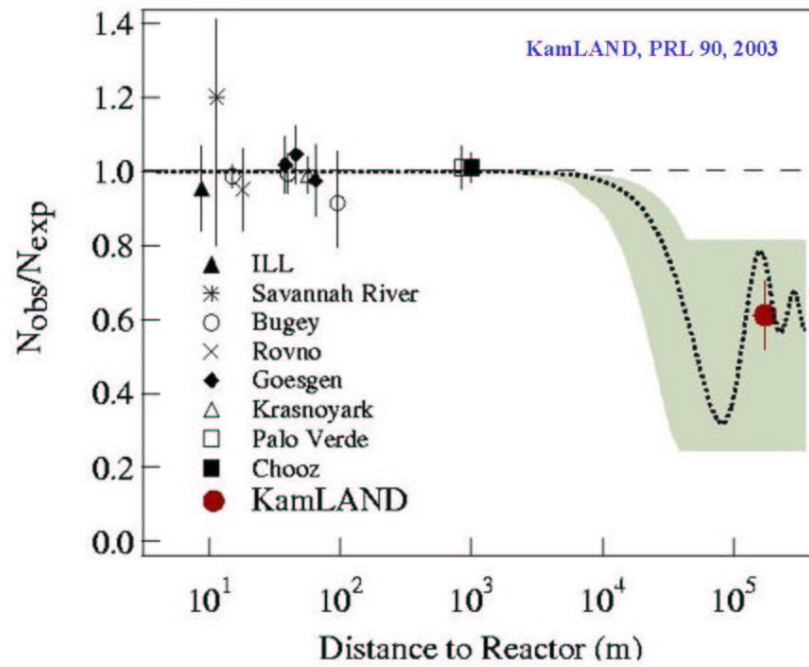


Figure 17: Riduzione del flusso di neutrini in funzione della distanza dal reattore. La curva sovrapposta ai punti sperimentali è quella prevista nell'ipotesi che i neutrini oscillino.

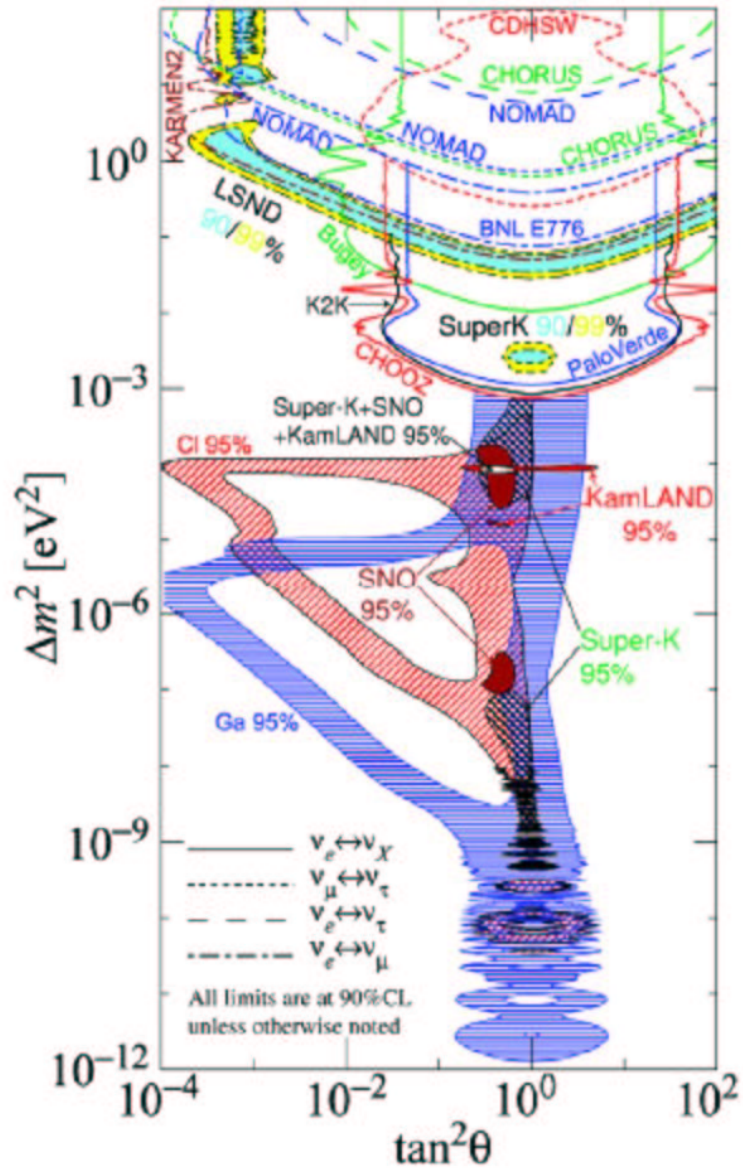


Figure 18: Oscillazione dei neutrini - regioni ammesse e regioni escluse nel piano dei parametri di oscillazione.

RUN 16399 EVENT 2925 at 1:28:12.77 on 9/14/1998

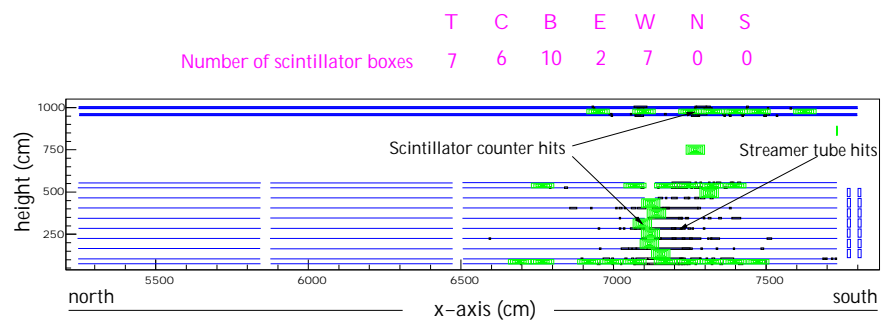


Figure 19: MACRO - Display di uno degli eventi presumibilmente generati da muoni dal basso di grande energia.

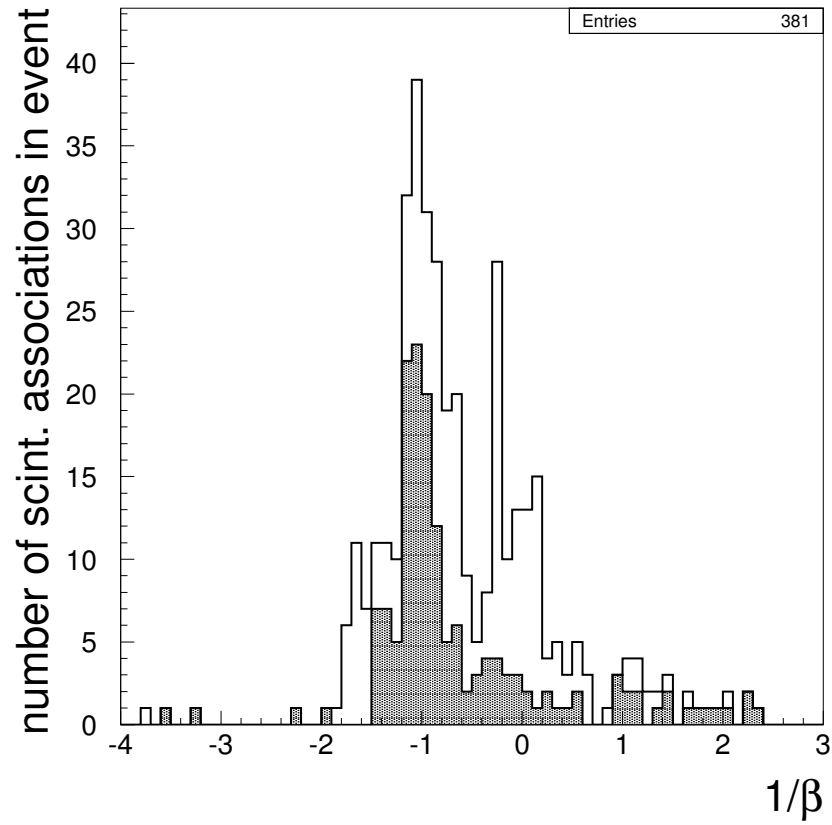


Figure 20: MACRO - Distribuzione di $1/\beta$ per tutte le diverse coppie di scintillatori accesi nell'evento di Fig. 19. La parte grigia si riferisce alle coppie di scintillatori che soddisfano opportuni tagli d'analisi

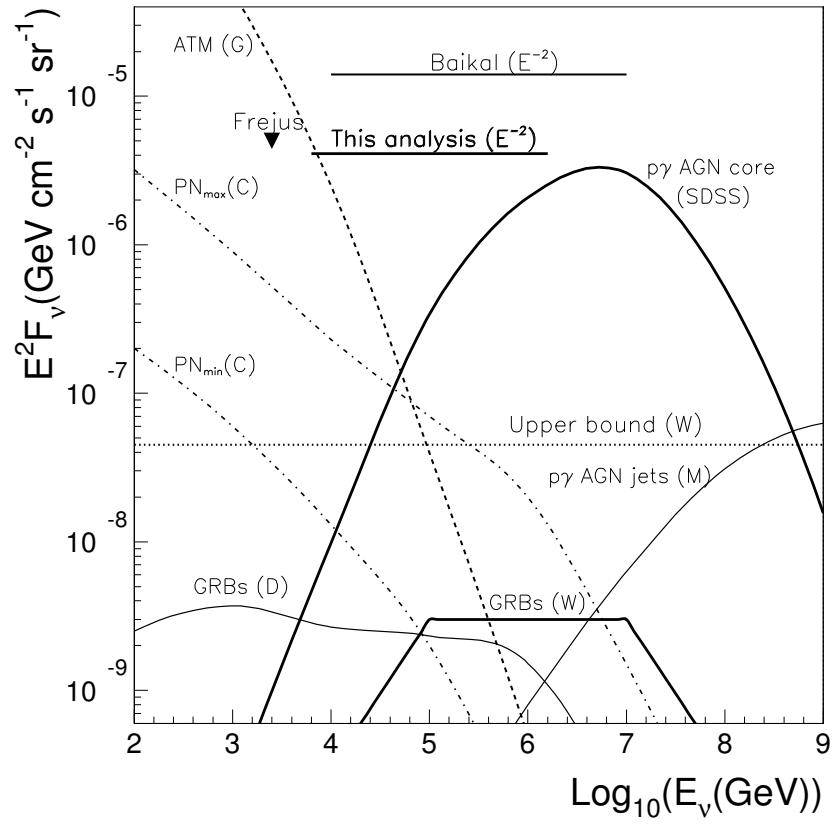


Figure 21: Flussi attesi di neutrini astrofisici e limiti sperimentali.

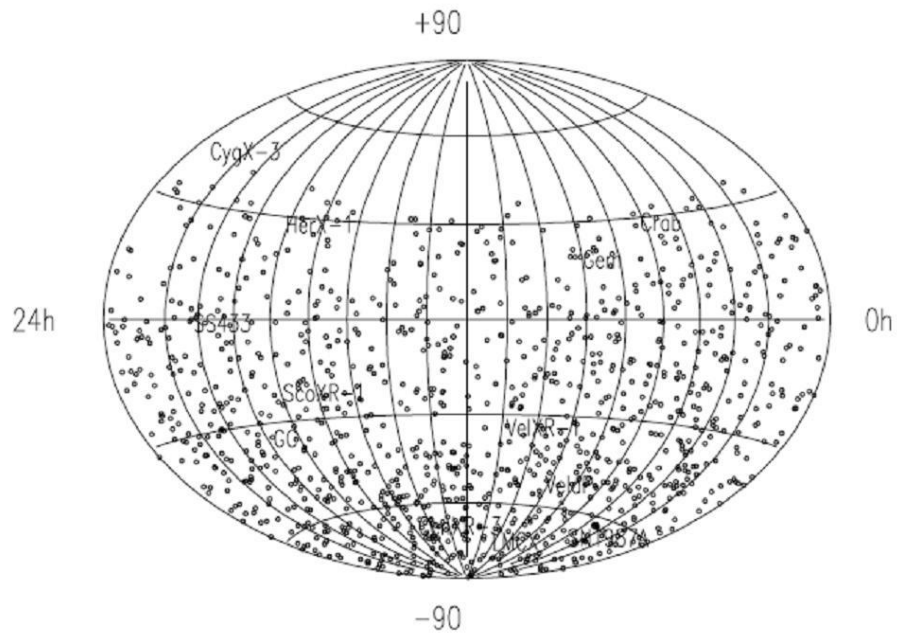


Figure 22: MACRO - Gli eventi da neutrino (muoni dal basso) riportati sulla sfera celeste.

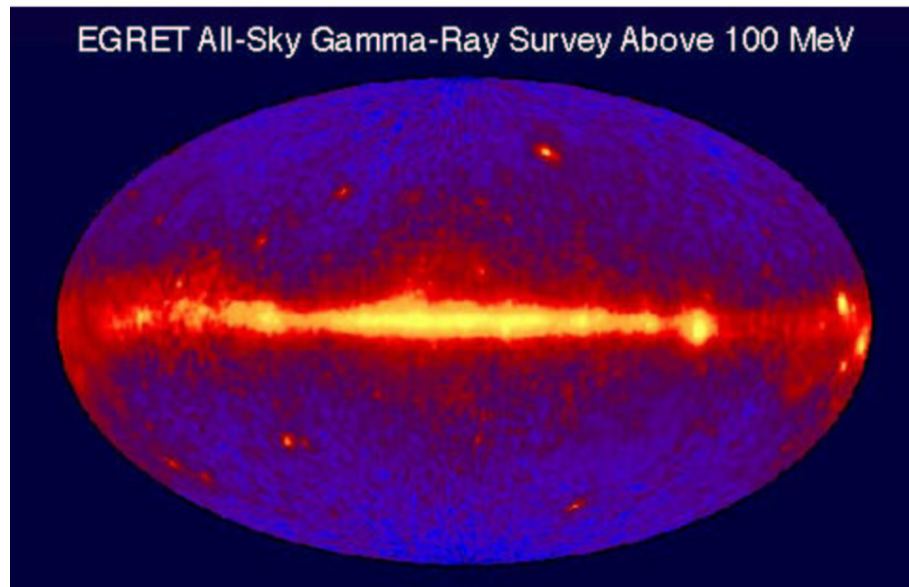


Figure 23: EGRET - La mappa del cielo per energie superiori a 100 MeV .

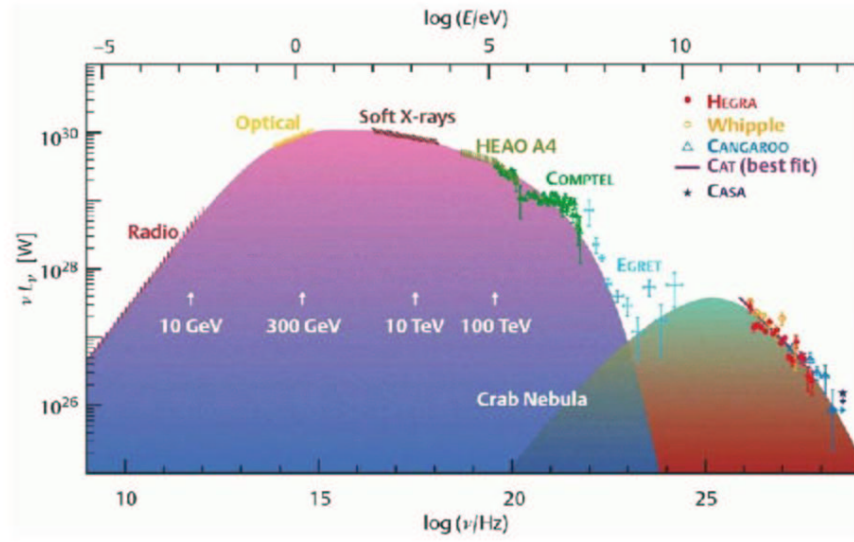


Figure 24: Spettro della radiazione emessa dalla Nebulosa del Granchio (Crab Nebula).

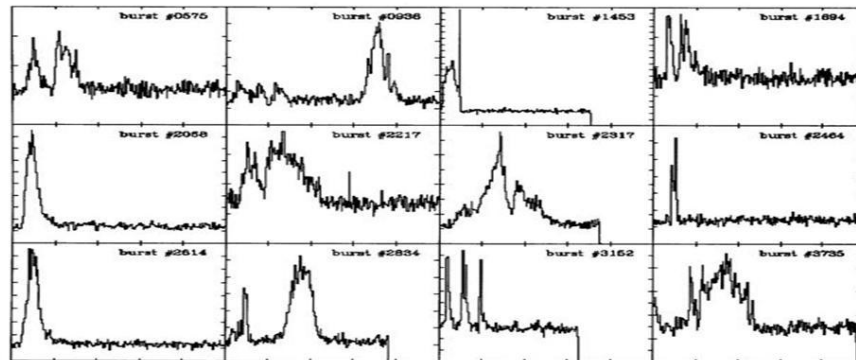


Figure 25: Luminosità di alcuni GRB in funzione del tempo.

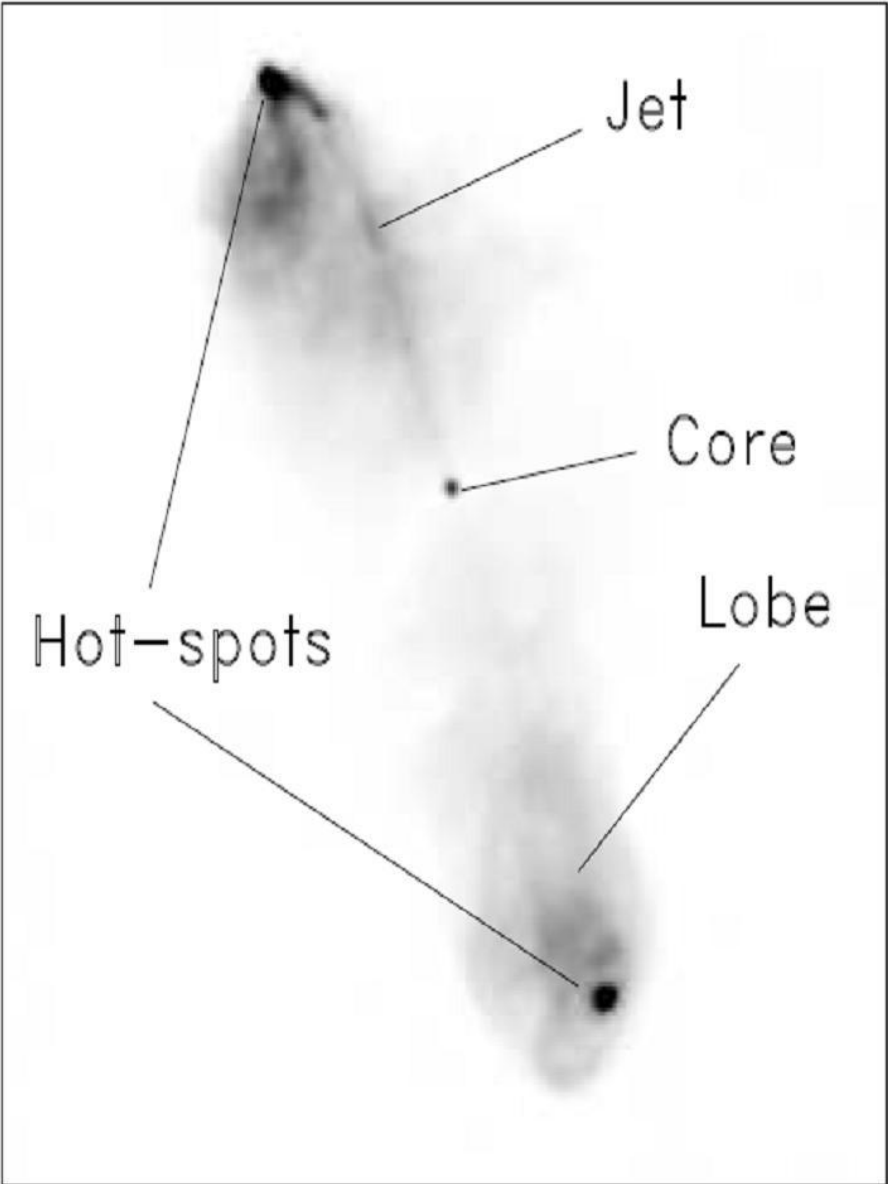


Figure 26: Nucleo galattico attivo.

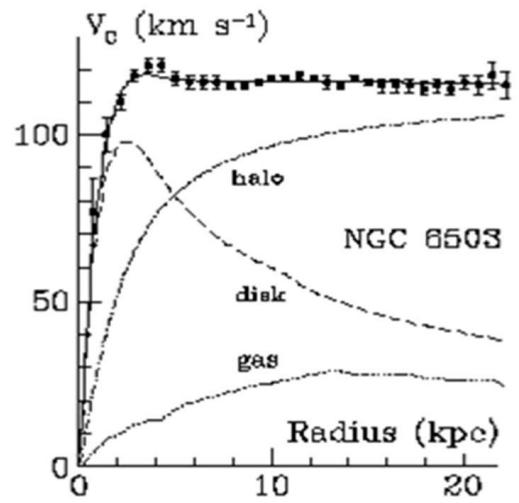


Figure 27: Velocità radiale delle stelle in funzione della distanza dal centro della galassia.

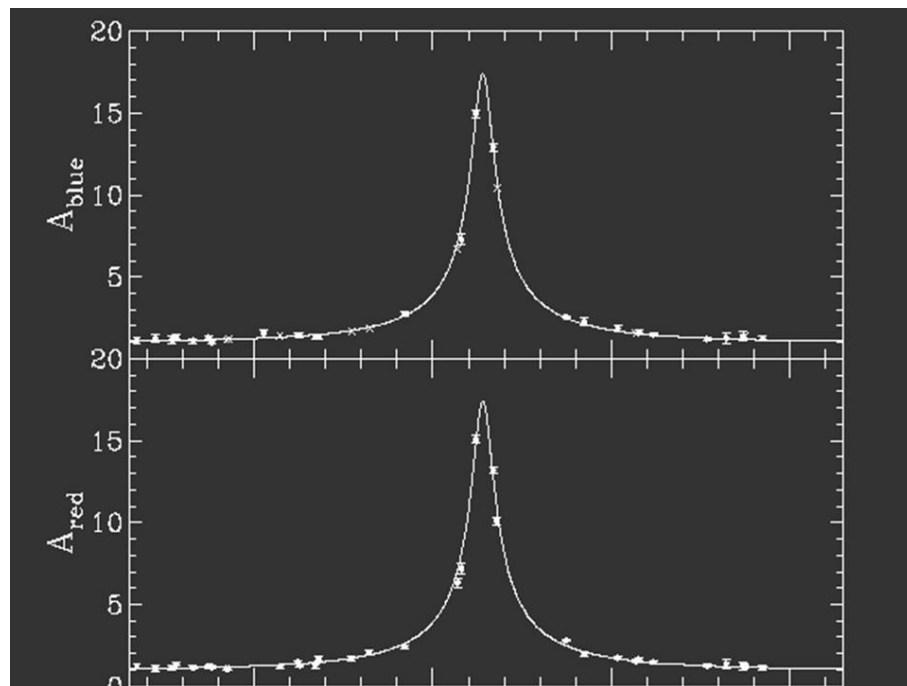


Figure 28: Evidenza sperimentale del lensing gravitazionale.

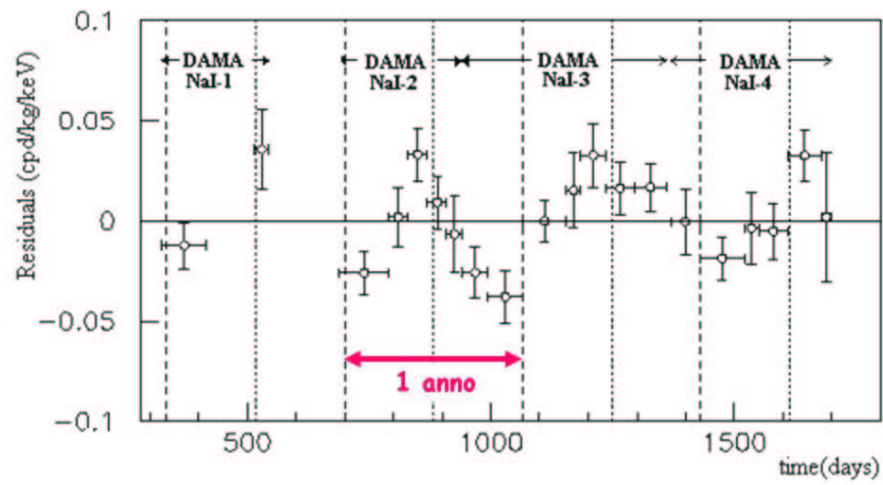


Figure 29: DAMA - Risultato sperimentale.