

Neutrini da reattori nucleari

I reattori nucleari sono una sorgente intensa di $\bar{\nu}_e$ dai decadimenti β dei frammenti di fissione.

Ogni reazione di fissione libera circa 200 MeV di energia e 6 $\bar{\nu}_e$.



Il flusso é di circa $2 \cdot 10^{20} \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1} \text{ GWatt}^{-1}$, isotropo, $\langle E(\bar{\nu}_e) \rangle \simeq 0.5 \text{ MeV}$.

Storicamente i neutrini sono stati scoperti ad un reattore nucleare e i primi esperimenti di oscillazione sono stati condotti ai reattori.

La presente generazione di esperimenti di oscillazione ai reattori ricerca oscillazioni $\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_x$ nella

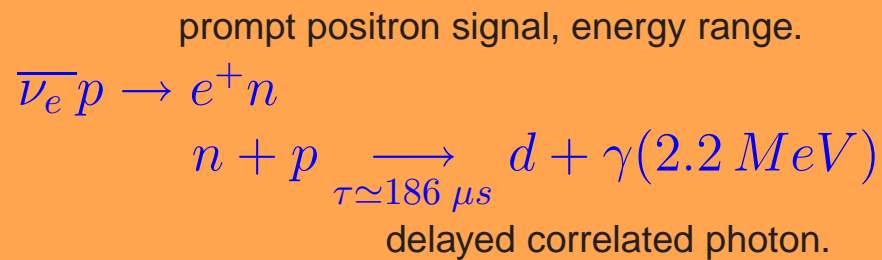
zona caratteristica delle oscillazioni di neutrini atmosferici: $\Delta m^2 = 3.5 \cdot 10^{-3}$

$\rightarrow L/E \text{ (km/GeV)} \sim 5 \cdot 10^{-4} \rightarrow L \sim 1.5 \text{ km}$.

Due esperimenti ad una distanza di circa 1 km da reattori nucleari: CHOOZ in Europa e PALO VERDE negli Stati Uniti.

Determinazione del flusso di neutrini

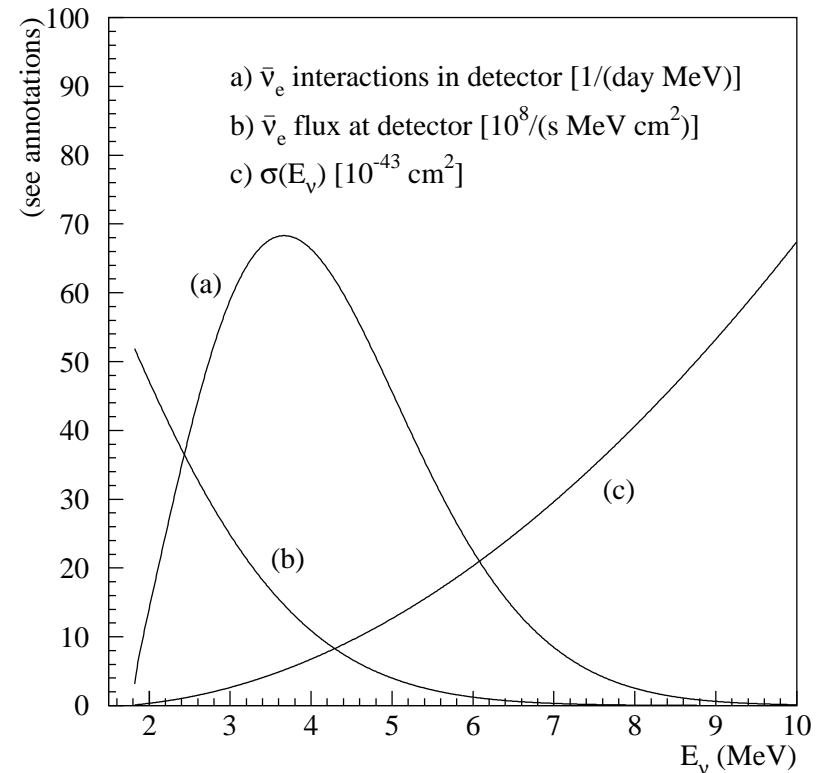
La misura sperimentale é la determinazione del numero assoluto di interazioni di neutrini sul rivelatore,



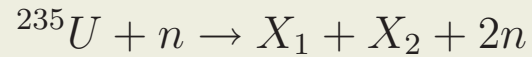
in funzione dell'energia, confrontato con le stime di frequenza di interazioni di neutrini.

Per determinare quest'ultimo:

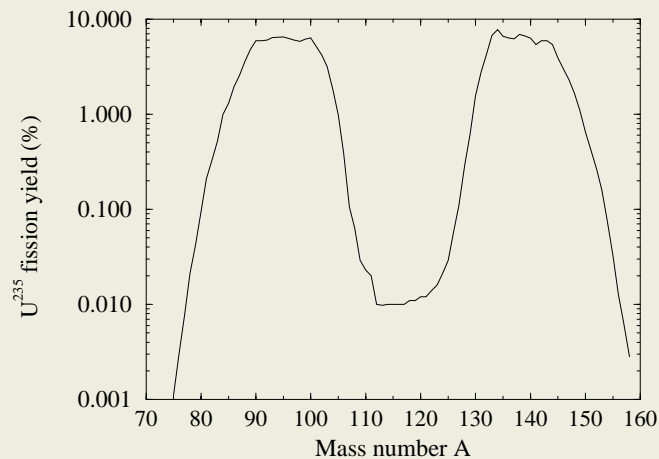
1. Misura del potere termico del reattore
2. Determinazione dello spettro dei neutrini
3. Stima dell'osservabile sperimentale: lo spettro dei positroni nel rivelatore.



La reazione piú comune e' la fissione di ^{235}U



I frammenti piú leggeri hanno in media $A \simeq 94$, i piú pesanti $A \simeq 140$. I nuclei stabili con $A = 94$, 140 sono $_{40}\text{Zr}^{94}$ e $_{58}\text{Ce}^{140}$. ^{235}U ha 98 protoni e 142 neutroni \Rightarrow per raggiungere la stabilità in media 6 neutroni devono decadere $\beta \Rightarrow 6 \bar{\nu}_e$.

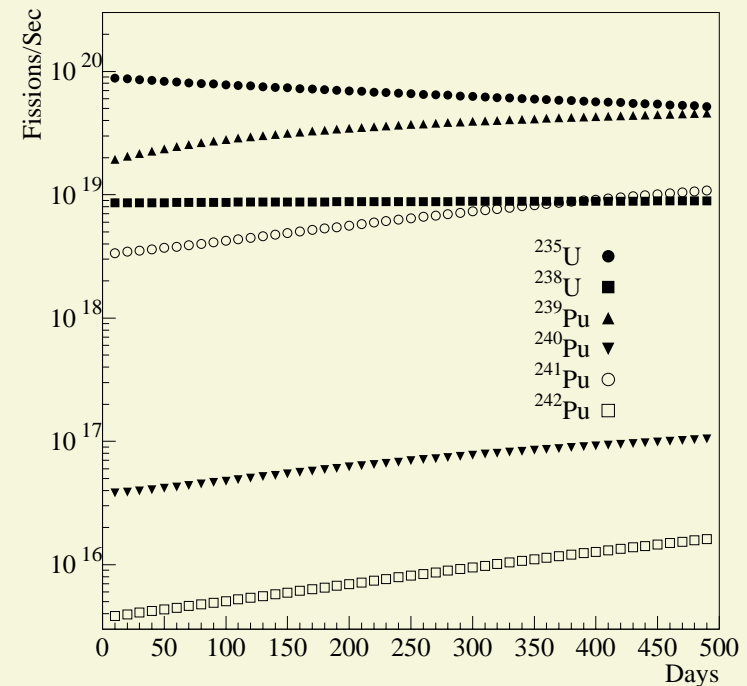


La soglia di produzione del processo di rivelazione $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ é di $\sim 1.8 \text{ MeV} \Rightarrow$ solo il 25% dei neutrini da fissione é rivelabile.

Misura del potere termico del reattore

Tutti i neutrini da processi a basso Q-value, quali le scorte di combustibile stoccate nei reattori e la radioattività indotta nelle strutture del reattore, non producono neutrini rivelabili.

La composizione del combustibile del reattore varia nel tempo, ed é continuamente sotto monitoraggio (la potenza del reattore dipende dalla sua composizione).



Dalla frequenza di fissioni allo spettro degli $\bar{\nu}_e$

Lo spettro dei $\bar{\nu}_e$ per tre dei quattro principali isotopi (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu), é derivato indirettamente da misure dello spettro di elettroni misurato direttamente. Il quarto componente principale, ^{238}U , é stimato a MonteCarlo, cosí come tutti i processi sulla catena di decadimento dei secondari. Errore sistematico: $\sim 1\%$.

Dai $\bar{\nu}_e$ ai positroni

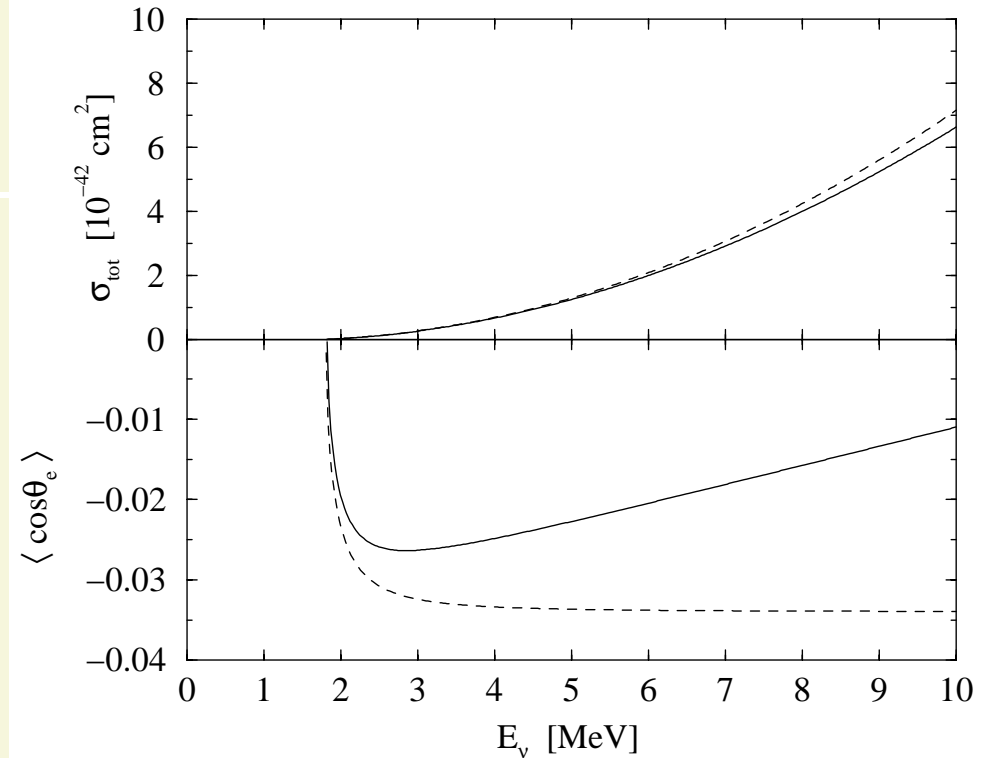
La sezione d'urto del processo $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ é, al primo ordine:

$$\begin{aligned}\sigma_{tot}^{(0)} &= \sigma_0 (f^2 + 3g^2) E_e^{(0)} p_e^{(0)} \\ &= 0.0952 \left(\frac{E_e^{(0)} p_e^{(0)}}{1 \text{ MeV}^2} \right) \times 10^{-42} \text{ cm}^2 \quad (1)\end{aligned}$$

dove $E_e^{(0)} = E_\nu - (M_n - M_p)$ é l'energia del positronio (trascurando il rinculo del neutrone, marginale) $p_e^{(0)}$ il momento, $f = 1, g = 1.26$ sono le costanti di accoppiamento vettoriale e assiale. Infine

$$\sigma_0 = \frac{G_F^2 \cos^2 \theta_C}{\pi} (1 + \Delta_{inner}^R), \quad (2)$$

dove le correzioni radiative Δ_{inner}^R sono $\Delta_{inner}^R \simeq 0.024$.

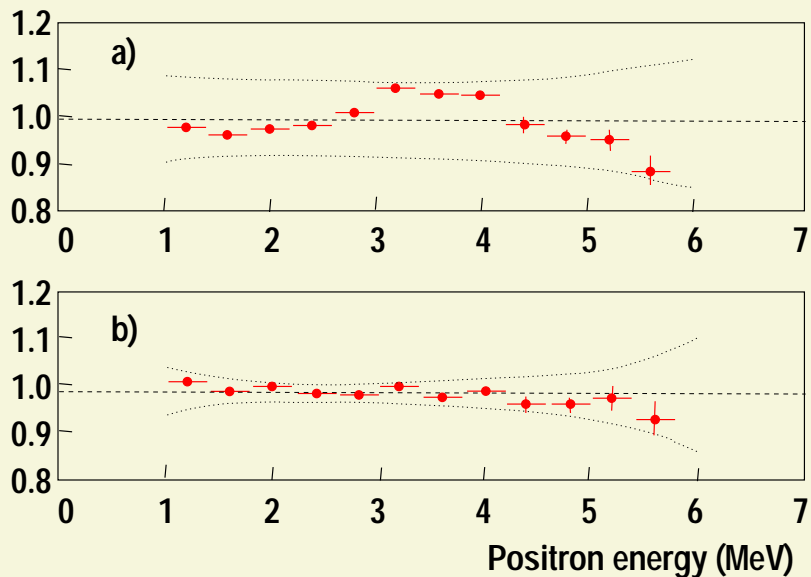


Linea solida: predizioni a $\mathcal{O}(1/M_n)$, tratteggiata $\mathcal{O}(1)$.

Accordo Predizioni Dati

Rapporto fra le misure dell'esperimento Bugey 3 (anni '80, ora si presume che non potesse vedere oscillazioni) e le predizioni dello spettro degli $\bar{\nu}_e$.

La curva b) é la predizione piú aggiornata.

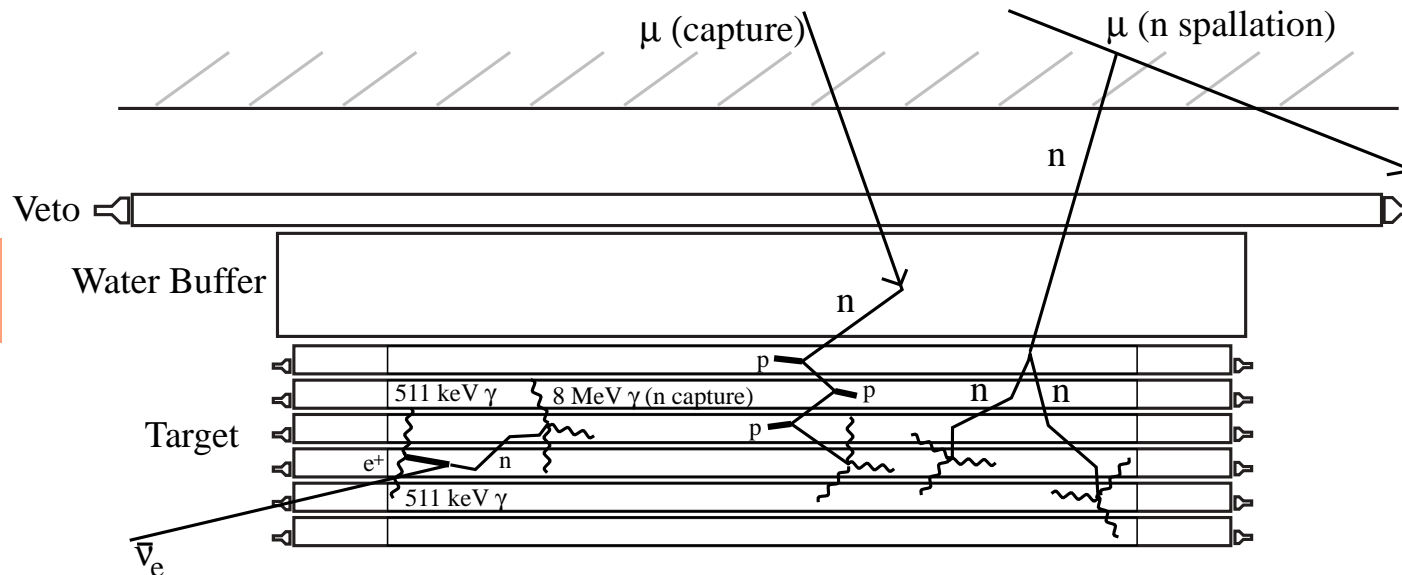


Summary degli errori sistematici (da hep-ph/0107277)

Origin and magnitude of systematic errors in PALO VERDE and CHOOZ. Note that the two experiments offer different breakdowns of their systematics. For simplicity we do not show the systematics for the PALO VERDE ON-OFF analysis. The PALO VERDE results are from the analysis of the full data set (Boehm *et al.* 2001).

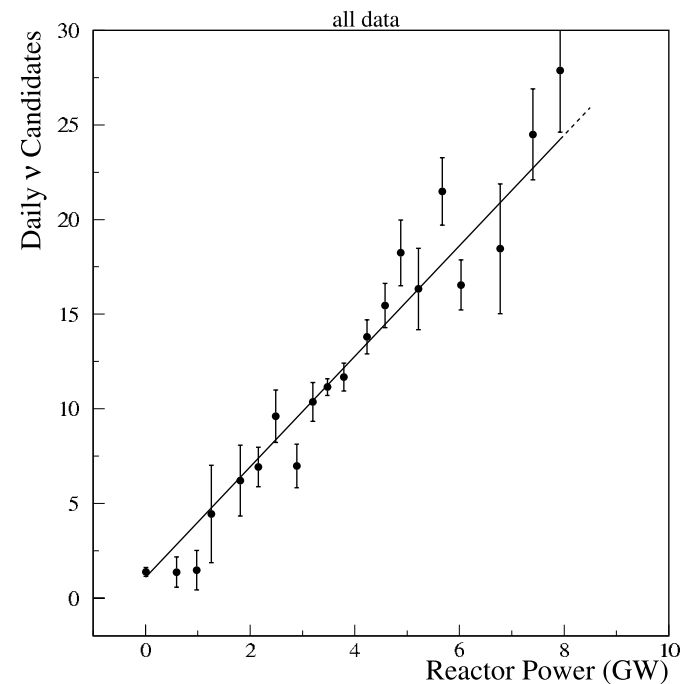
Systematic	CHOOZ (%)	PALO VERDE (%)
$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+)$	1.9	-
Number of p in target	0.8	-
W_{th}	0.7	-
Energy absorbed per fission	0.6	-
Total rate prediction	2.3	2.1
e^+ trigger eff.	-	2.0
n trigger eff.	-	2.1
$\bar{\nu}_e$ selection cuts	-	2.1
$(1 - \epsilon_1)B_{pn}$ estimate	-	3.3
Total $\bar{\nu}_e$ efficiency	1.5	4.9
Total	2.7	5.3

Fondi Sperimentali



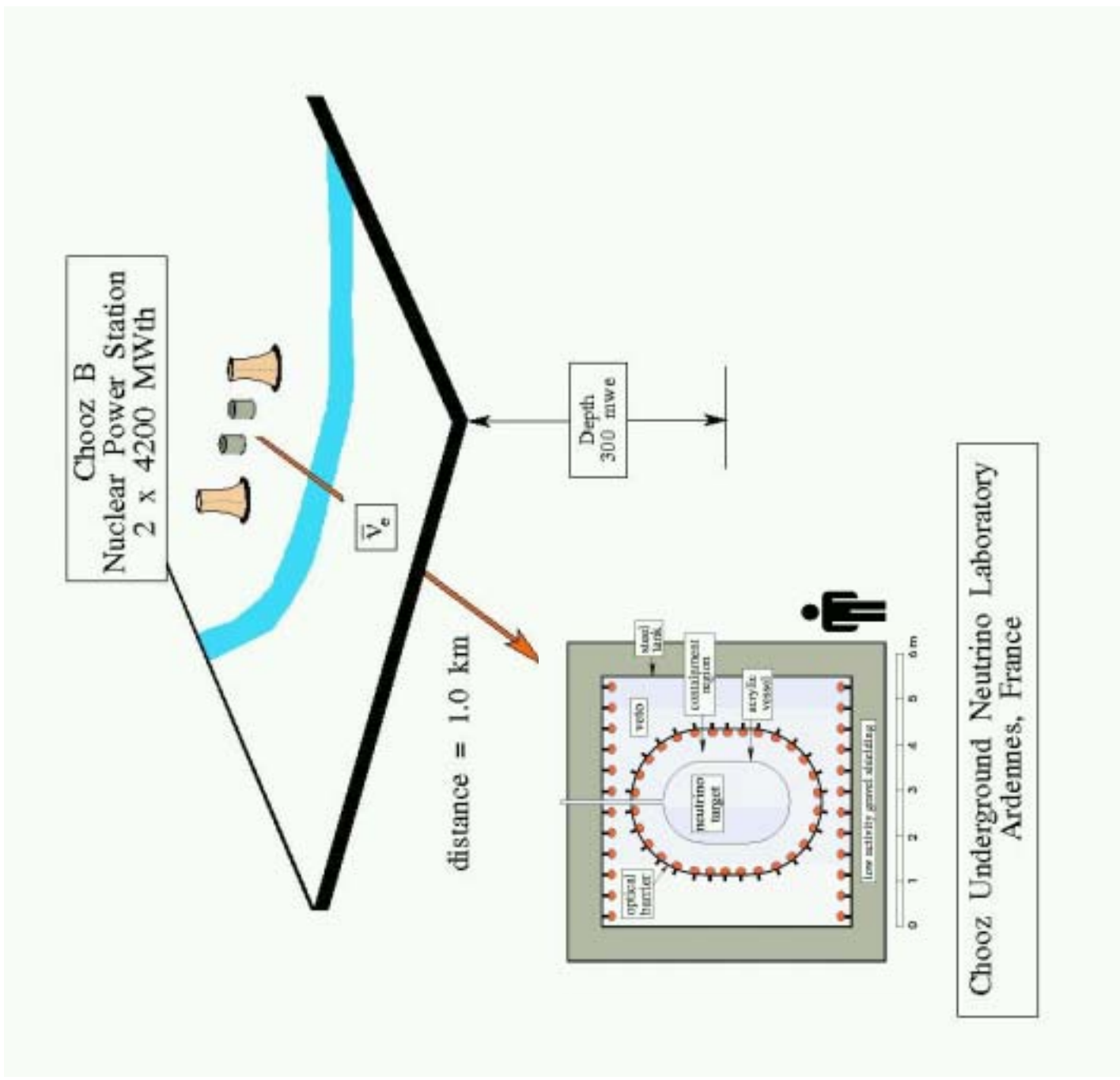
Principalmente due categorie:

- Fondi accidentali dati dalla coincidenza casuale di un segnale “positron-like” e uno “neutron-like”. Deducibile sperimentalmente misurando le probabilità di singola dei due segnali.
- Fondi da neutroni indotti da raggi cosmici. Misurabili con precisione a reattore spento (se possibile! Nessuno pensa di spegnere un reattore di potenza per permettere ad un esperimento di oscillazione di misurare i propri fondi).



Conteggi nell'esperimento Chooz in funzione della potenza del reattore.

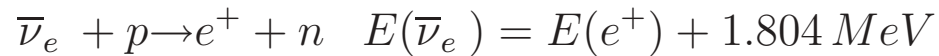
Esperimento CHOOZ (Francia-Italia-Russia-USA)



Il rivelatore CHOOZ

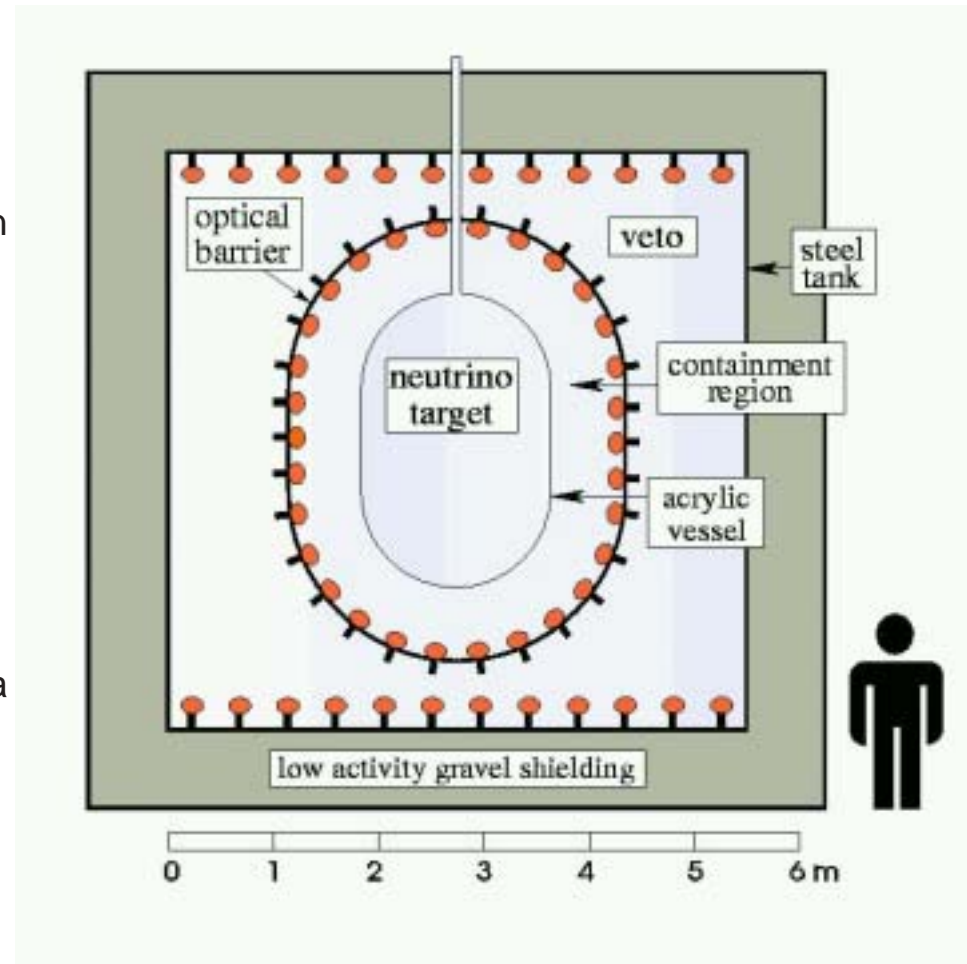
Rivelatore di 5 ton di scintillatore liquido drogato con gadolinio. Veto con scintillatore liquido.

Rivelazione di $\bar{\nu}_e$:

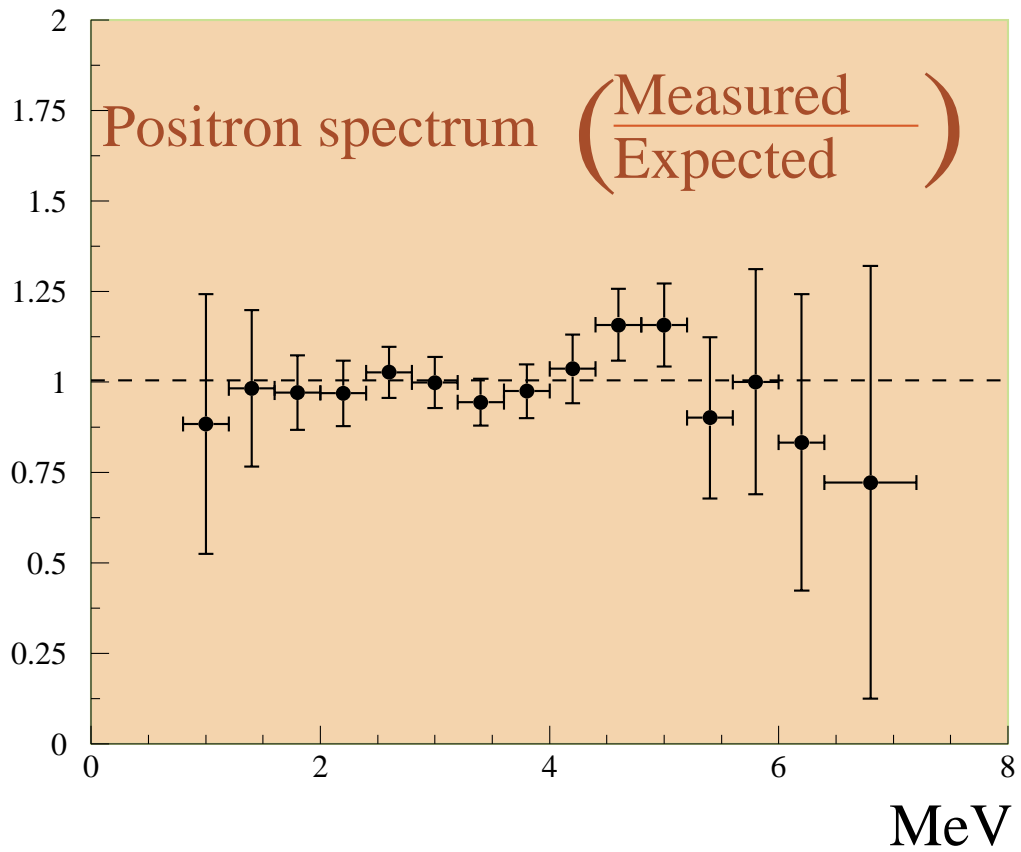
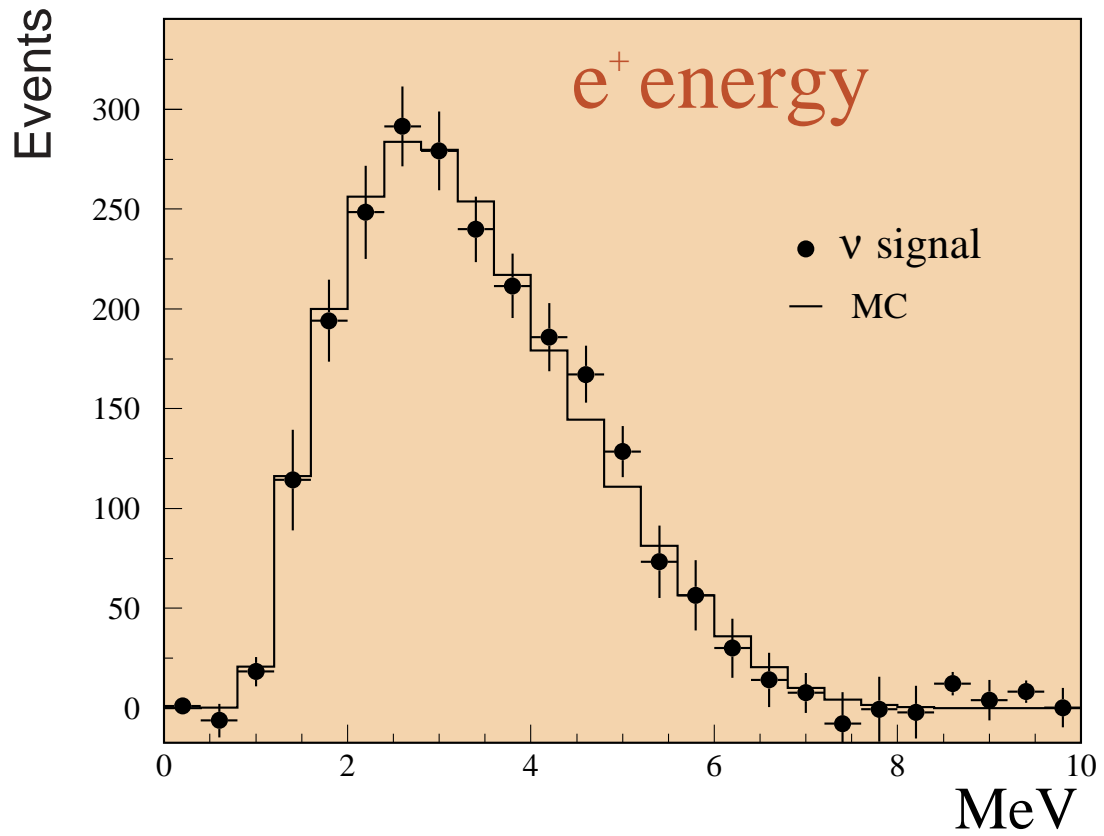


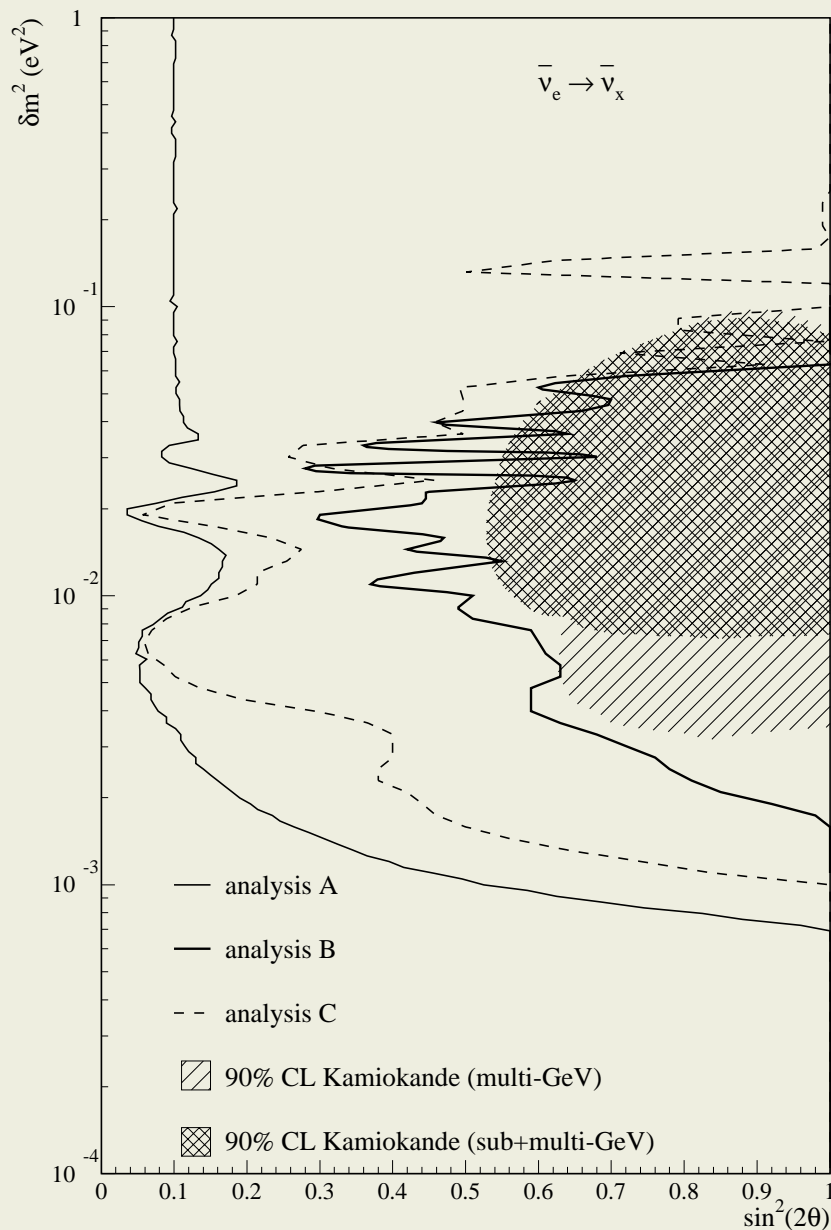
Due segnali in sequenza:

1. Prompt: e^+ seguito da $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
2. Ritardato: cattura del neutrone in gadolinio, dopo la termalizzazione, con rilascio di circa 8 MeV.



CHOOZ all data





Risultati finali di CHOOZ

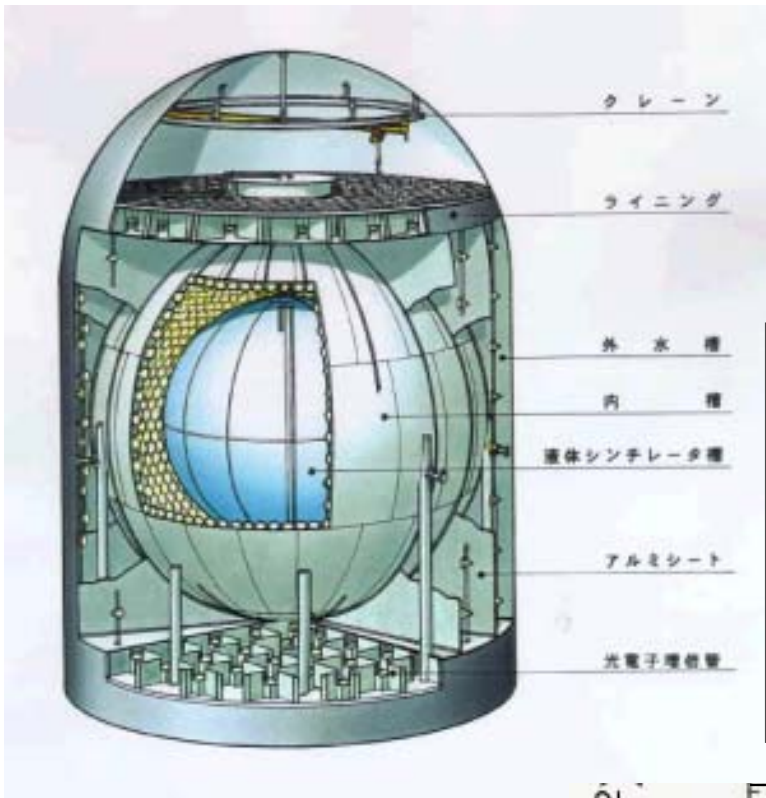
- **Analisi A** Spettro di $\bar{\nu}_e$ dopo aver sottratto i fondi. Sono utilizzati sia la rate assoluta che lo spettro.
- **Analisi B** Usa la differenza delle baseline ($\Delta L = 117.7 m$) fra i due reattori. Molte delle sistematiche si cancellano, ma gli errori statistici sono maggiori e la sensibilità in Δm^2 è ridotta data la baseline più corta.
- **Analisi C** Solo la forma dello spettro è utilizzata.

Kamland, in presa dati dal 22 gennaio 2002

KAMLAND

Long baseline
Reactor experiment
converted from
KAMIOKANDE

hosted by
Tohoku University



1,200 m³ liq. scint.

1,280 17" PMTs

20% coverage

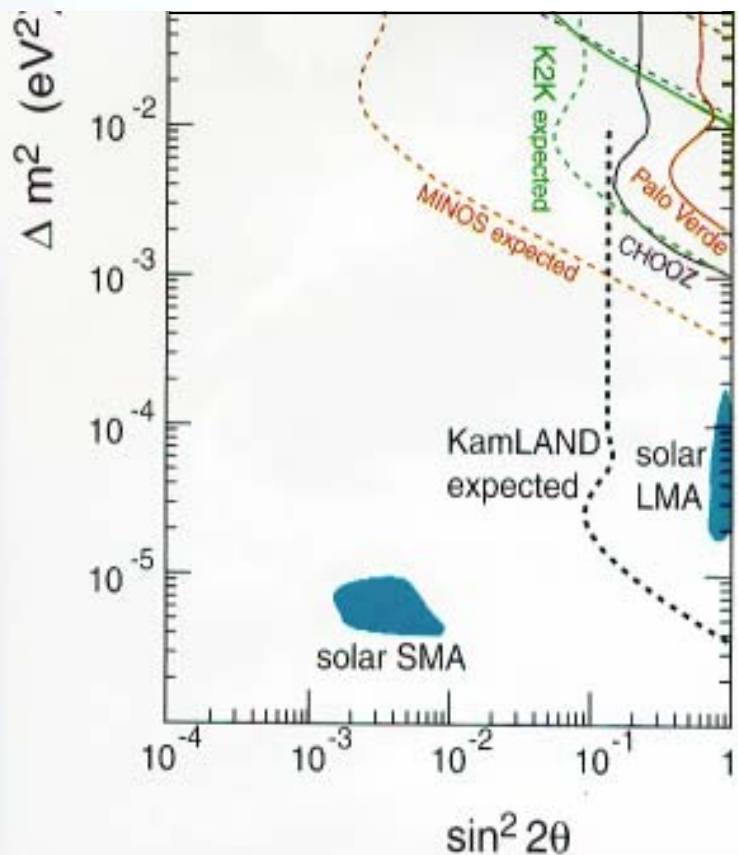
anti: 3,000m³ water

$E_e > 1.8 \text{ MeV}$

reactor $L \sim 150 \text{ km}$

700 events/kt/year

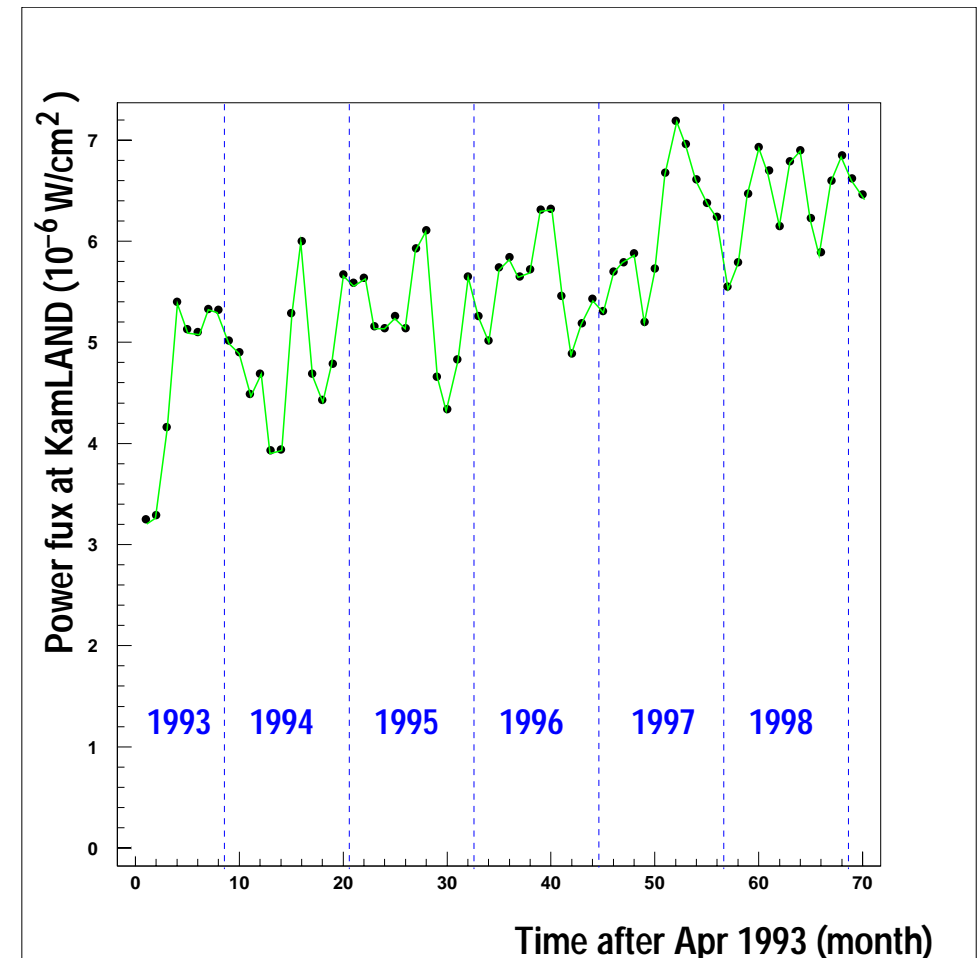
April 2001~



Kamland e i reattori nucleari del Far-East

Site	Distance (km)	# of cores	P(ther.) (GW)	flux ($\bar{\nu}$ cm ⁻² s ⁻¹)	Signal ($\bar{\nu}$ /yr)
Japan					
Kashiwazaki	160.0	7	24.6	4.25x10 ⁵	348.1
Ohi	179.5	4	13.7	1.88x10 ⁵	154.0
Takahama	190.6	4	10.2	1.24x10 ⁵	101.8
Hamaoka	214.0	4	10.6	1.03x10 ⁵	84.1
Tsuruga	138.6	2	4.5	1.03x10 ⁵	84.7
Shiga	80.6	1	1.6	1.08x10 ⁵	88.8
Mihama	145.4	3	4.9	1.03x10 ⁵	84.5
Fukushima-1	344.0	6	14.2	5.3x10 ⁴	43.5
Fukushima-2	344.0	4	13.2	4.9x10 ⁴	40.3
Tokai-II	294.6	1	3.3	1.7x10 ⁴	13.7
Shimane	414.0	2	3.8	9.9x10 ³	8.1
Onagawa	430.2	2	4.8	9.8x10 ³	8.1
Ikata	561.2	3	6.0	8.4x10 ³	6.9
Genkai	755.4	4	6.7	5.3x10 ³	4.3
Sendai	824.1	2	3.3	3.5x10 ³	2.8
Tomari	783.5	2	5.3	2.4x10 ³	2.0
Korea					
Ulchin	~750	4	11.2	8.8x10 ³	7.2
Wolsong	~690	4	8.1	7.5x10 ³	5.2
Yonggwang	~940	6	16.8	8.4x10 ³	6.9
Kori	~700	4	8.9	8.0x10 ³	6.6
Total		69	175.7	1.34x10⁶	1102

La richiesta di corrente elettrica in Giappone ha due picchi in estate/inverno, mentre in primavera/autunno la richiesta é minore. Il livello di potenza medio dei reattori rispecchia tale andamento e permette una stima dei fondi.

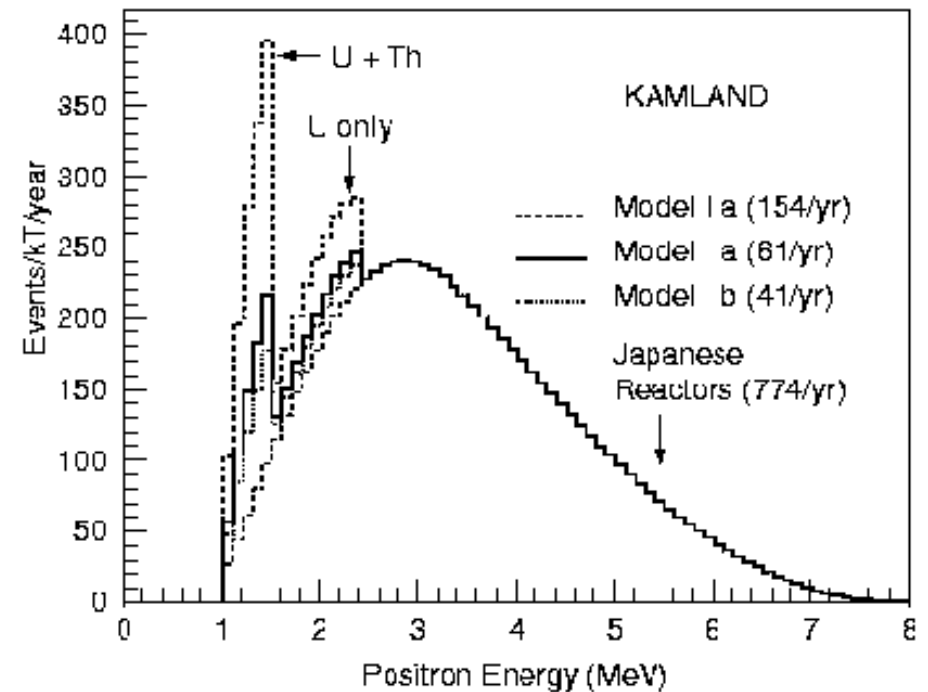


Kamland e i fondi

La terra irradia circa 40 TW di calore. Si stima che circa 16 TW siano di origine radiogenica, 90% di questi derivano da ^{238}U e ^{232}Th . I loro neutrini sono piú soffici di quelli irradiati dai reattori e in parte sopra la soglia di rivelazione degli $\bar{\nu}_e$.

Segnale/rumore atteso: 10:1

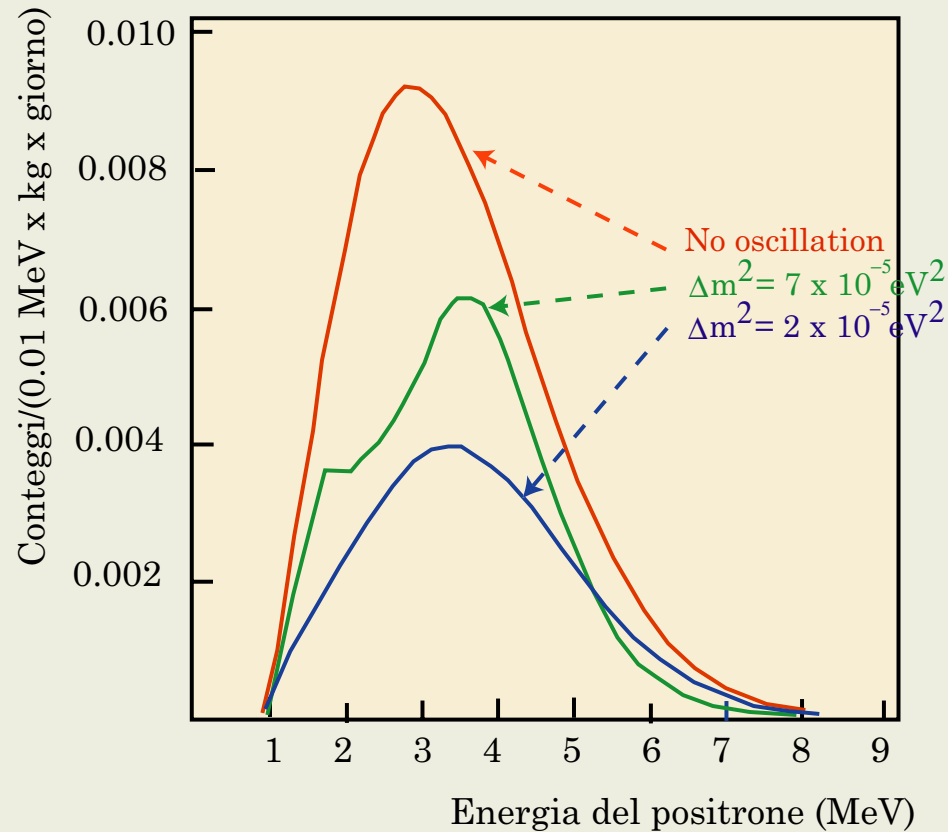
Background source	Rate (day ⁻¹)
Cosmic muons induces neutrons	0.1
Natural radioactivity (random coincidence)	0.15
Natural radioactivity (correlated)	0.005
Total predicted background	0.25
Reactor $\bar{\nu}_e$ signal (no oscillation)	2



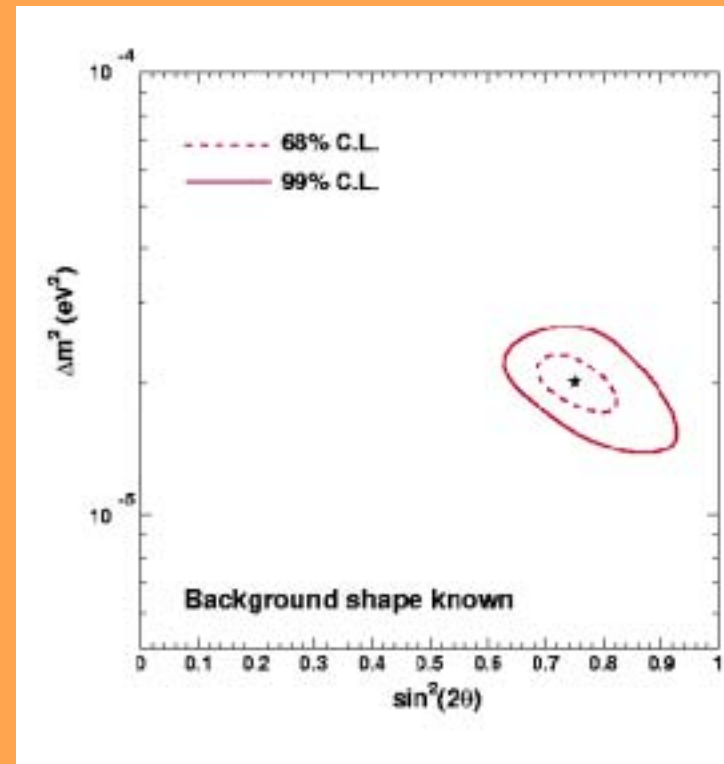
Misure di precisione in Kamland

Se la soluzione dei neutrini solari é la LMA, Kamland é sicuramente il killer experiment.

Distorsione dello spettro dei positroni in 3 diverse soluzioni all'interno della LMA.



Precisione nel misurare $\sin^2 2\theta$ e Δm^2 nel caso della soluzione LMA.





KamLAND Experiment

1,000 ton liquid scintillator neutrino detector

1st phase experiment

($E_{th} = 1.8 \text{ MeV}$)
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

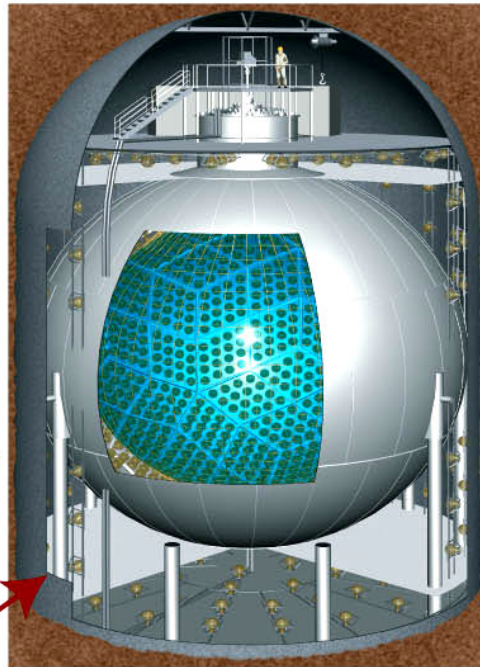
- Neutrino Oscillation Search by Reactor Anti-neutrinos



- Terrestrial Anti-neutrino Detection



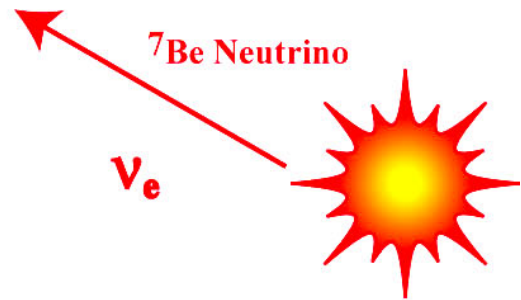
$\bar{\nu}_e$



2nd phase experiment

($E_{th} = 300 \text{ keV}$)
 $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

- Solar neutrino Detection



supernova-burst ν , relic supernova ν ,
atmospheric ν , Proton Decays, . . .



KamLAND Detector

○ Detector site : Old Kamiokande site (2700 m.w.e.)

○ 1,000 ton Liquid Scintillator

- 80%: dodecane, 20%: pseudocumene, 1.5 g/liter: PPO ($\rho = 0.78$)
- housed in spherical balloon (13m diameter) of transparent nylon/EVOH composite film (135 μ m)
- supported by cargo net structure

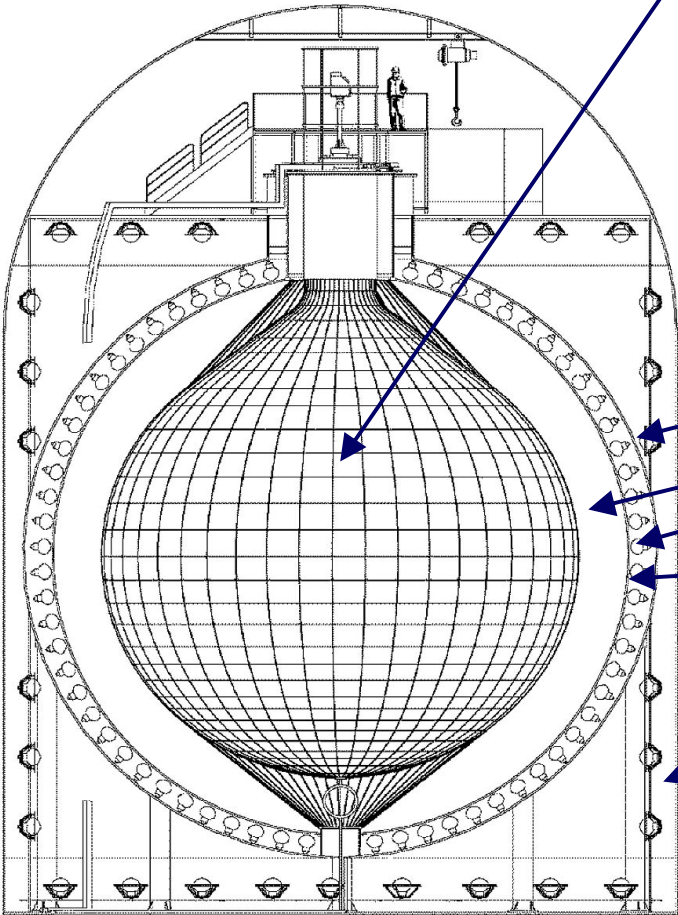
○ 3,000 m³ Scintillation Light Detector

- 18m diameter stainless steel tank filled with paraffin oil ($\Delta\rho = 0.04\%$, lighter than LS)
- 1,325 17-inch+554 20-inch PMT's
- photosensitive coverage $\sim 34\%$
- 3mm thick acrylic wall (120 plates) : Rn barrier

○ Water Cherenkov Outer Detector

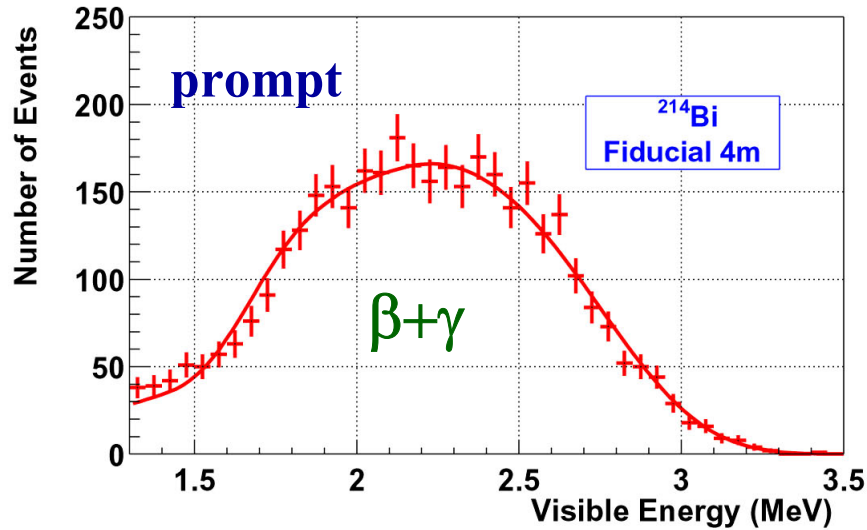
- 225 Kamiokande 20-inch PMT's

Present analysis $\sim 22\%$

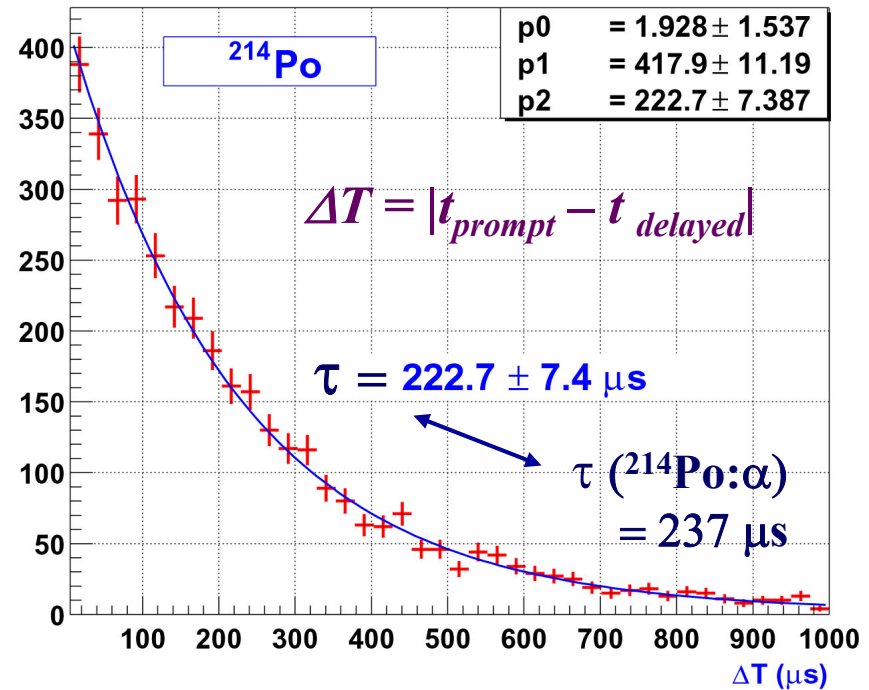
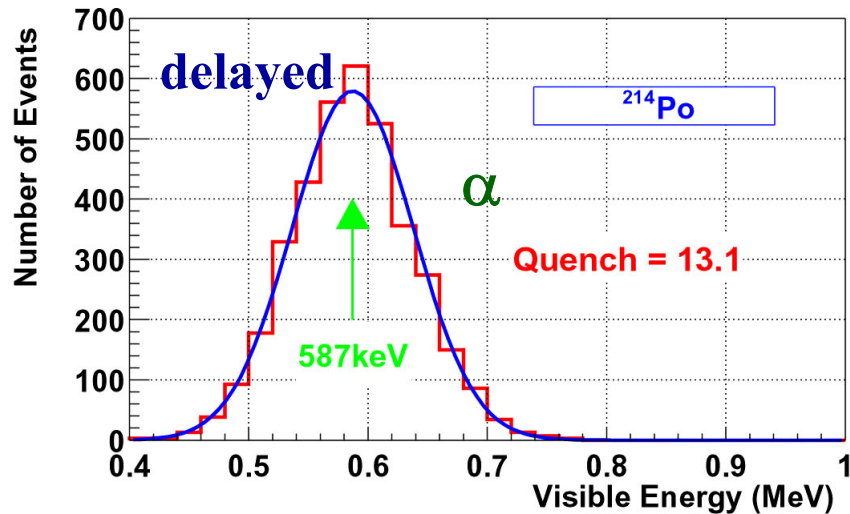




^{214}Bi - ^{214}Po - ^{210}Pb Signal



$^{238}\text{U} = (3.5 \pm 0.5) \times 10^{-18} \text{ g/g}$
inside fiducial volume





Systematic Uncertainties

$E > 2.6 \text{ MeV}$

	%	
Total LS mass	2.1) <u>4.6</u>
Fiducial mass ratio	4.1	
Energy threshold	<u>2.1</u>	
Tagging efficiency	<u>2.1</u>	
Live time	0.07	
Reactor power	2.1	
Fuel composition	1.0	
Time lag	0.28	
$\bar{\nu}_e$ spectra	2.5	
Cross section	0.2	
# of target protons	< 0.1	

Total Error

6.4 %

5 % : goal





$\bar{\nu}_e$ Event Selection

data sample : Mar. 4 – Oct. 6, 2002
162 ton•yr (145.1 days)

➤ inverse β - decay selection

$E_{\text{prompt}} > 2.6 \text{ MeV}$

no OD signals

$0.5 < \Delta T < 660 \mu \text{ sec}$

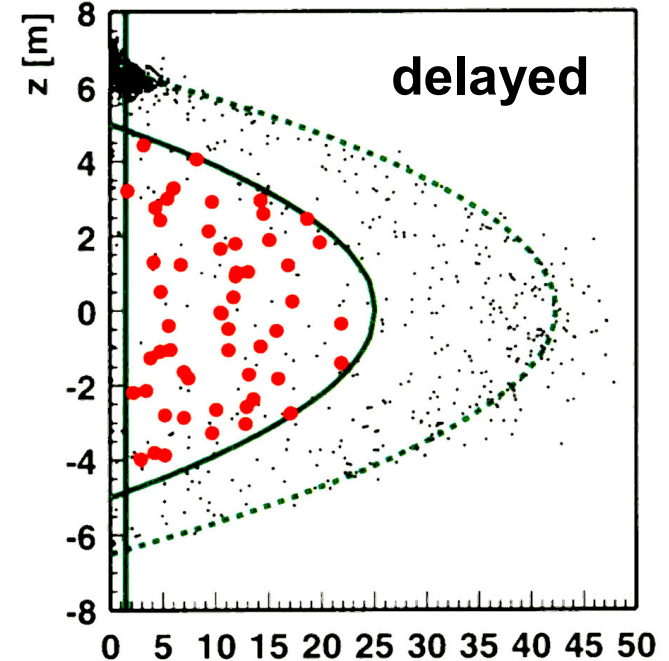
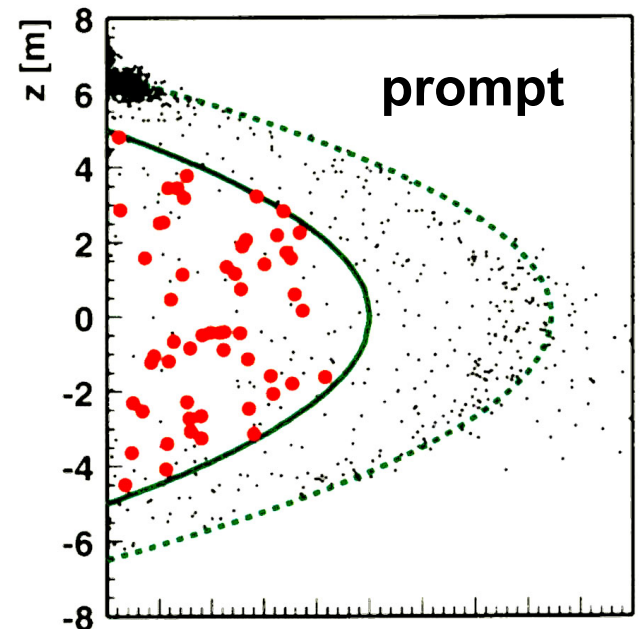
$\Delta R < 1.6 \text{ m}, 1.8 < E_{\text{delay}} < 2.6 \text{ MeV}$

➤ μ -induced spallation event cut

$\Delta T_{\mu} < 2 \text{ sec}, \Delta E_{\mu} > 3 \text{ GeV}$
or $\Delta R_{\mu} < 3 \text{ m}$

➤ fiducial selection

$R < 5 \text{ m} : 408 \text{ ton}$





Observed Event Rates

Final sample

**162 ton•yr, $E_{prompt} > 2.6 \text{ MeV}$
54 ev**

Expected

$86.8 \pm 5.6 \text{ ev}$

Background

$0.95 \pm 0.99 \text{ ev}$

accidental

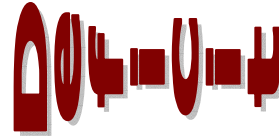
0.0086 ± 0.0005

${}^9\text{Li}/{}^8\text{He} (\beta, n)$

0.94 ± 0.85

fast neutron

0 ± 0.5





Evidence for Reactor $\bar{\nu}_e$ Disappearance

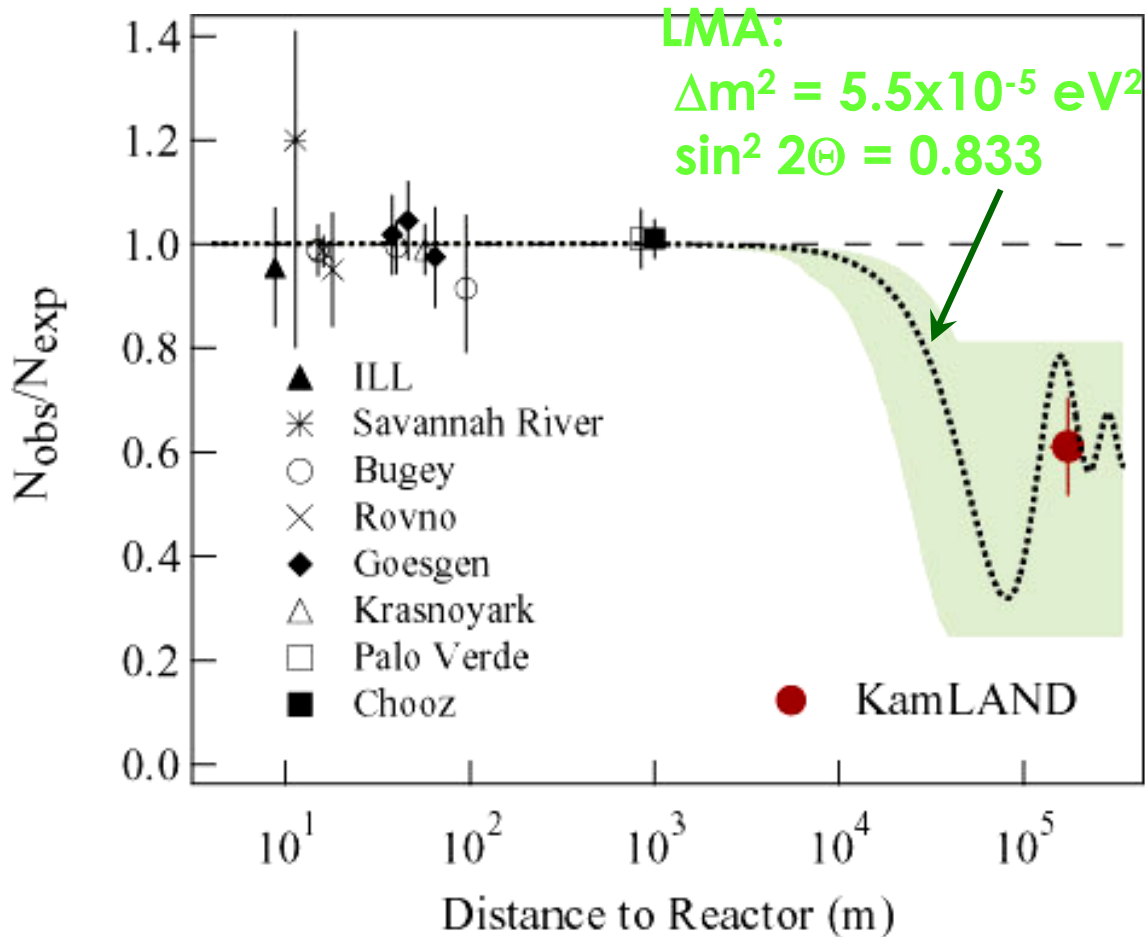
$$\frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}}{N_{\text{expected}}}$$

$$= 0.611 \pm 0.085 \text{ (stat)} \\ \pm 0.041 \text{ (syst)}$$

99.95 % C.L.



Ratio of Measured to Expected $\bar{\nu}_e$ Flux from Reactor Neutrino Experiments



G.Fogli et al., PR
D66, 010001-406,
(2002)



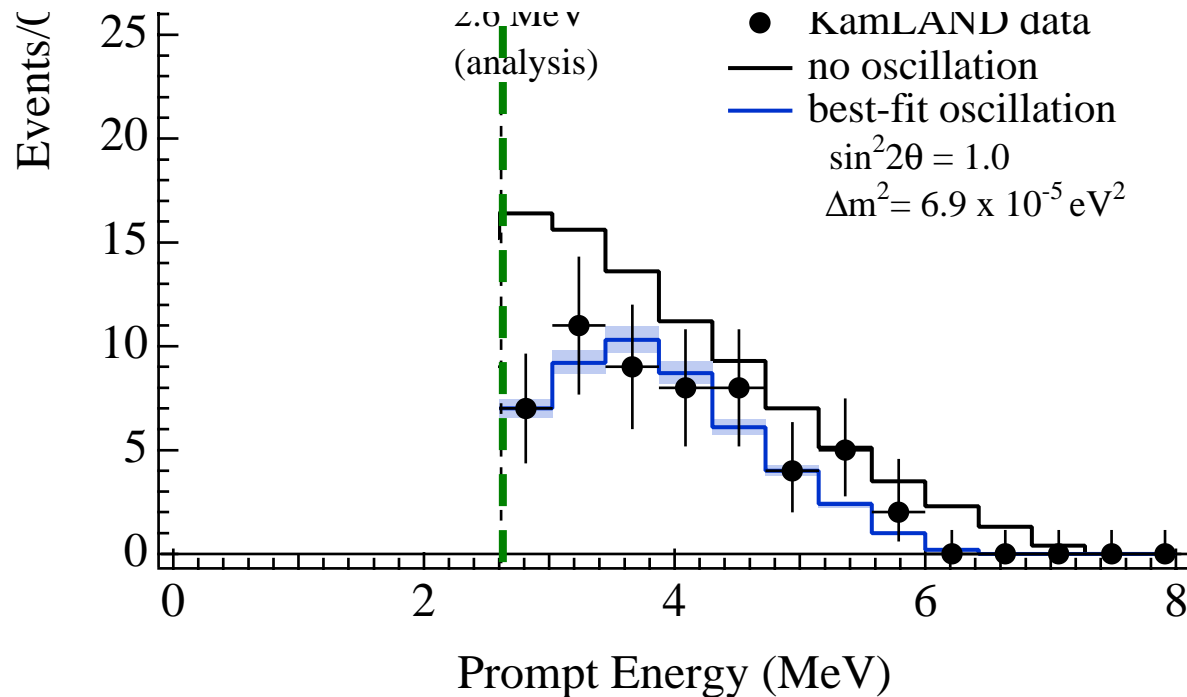
Energy Spectrum ($E_{\text{prompt}} > 2.6 \text{ MeV}$)

data : consistent with

distorted shape at 93 % C.L.

&

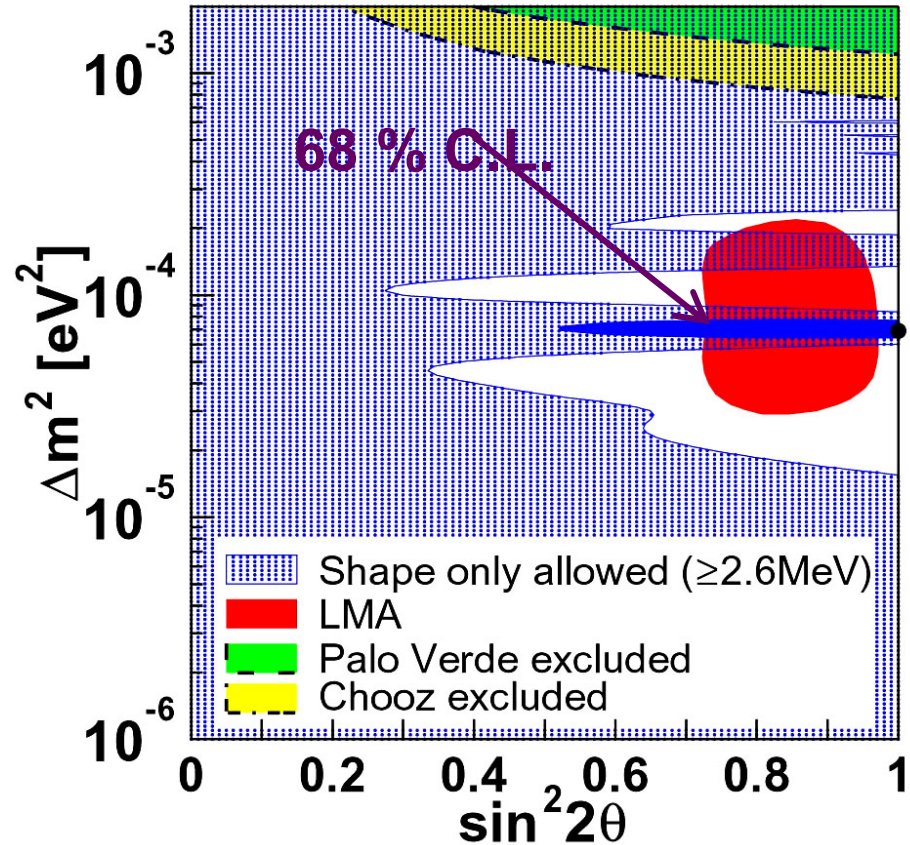
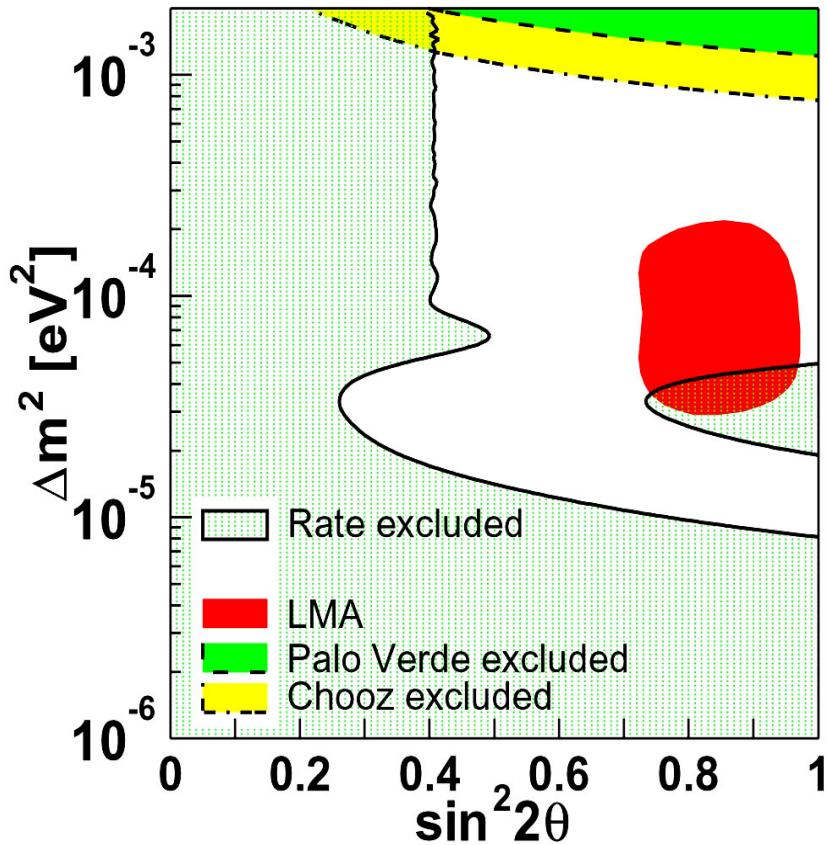
no oscillation shape at 53% C.L.





Neutrino Oscillation Study, Using Event Rate or Spectrum Shape

$\nu_e \rightarrow \nu_x$ $E_{\text{prompt}} > 2.6 \text{ MeV}$ 95 % C.L.





Neutrino Oscillation Study, Combining Rate & Energy Spectrum

$E_{\text{prompt}} > 2.6 \text{ MeV}$

Best fit :

$$\Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$
$$\sin^2 2\theta = 1.01$$

