

## Neutrini da reattori nucleari

I reattori nucleari sono una sorgente intensa di  $\bar{\nu}_e$  dai decadimenti  $\beta$  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.

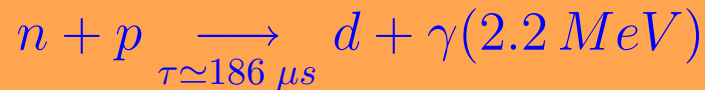
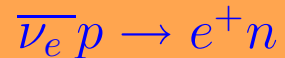
La presente generazione di esperimenti di oscillazione ai reattori ricerca oscillazioni  $\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_x$  nella zona caratteristica delle oscillazioni di neutrini atmosferici:  $\Delta m^2 = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$   
 $\rightarrow L/E \text{ (km/GeV)} \sim 5 \cdot 10^{-4} \rightarrow L \sim 1.5 \text{ km}$ .

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,

prompt positron signal, energy range.

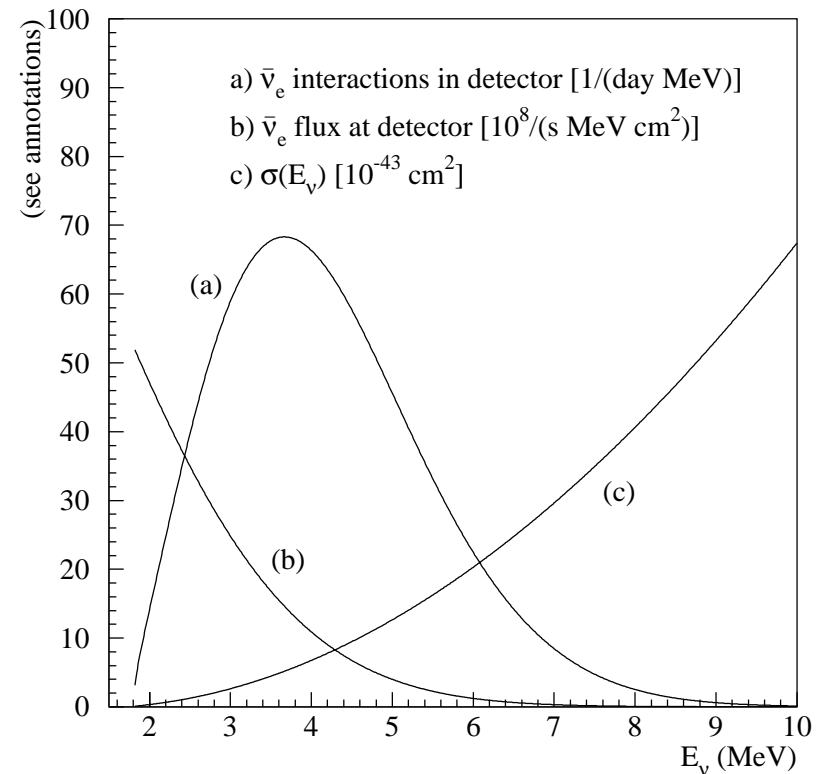


delayed correlated photon.

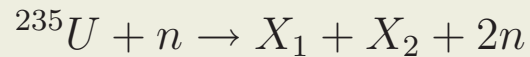
in funzione dell'energia, confrontato con le stime di frequenza di interazioni di neutrini.

Per determinare quest'ultimo:

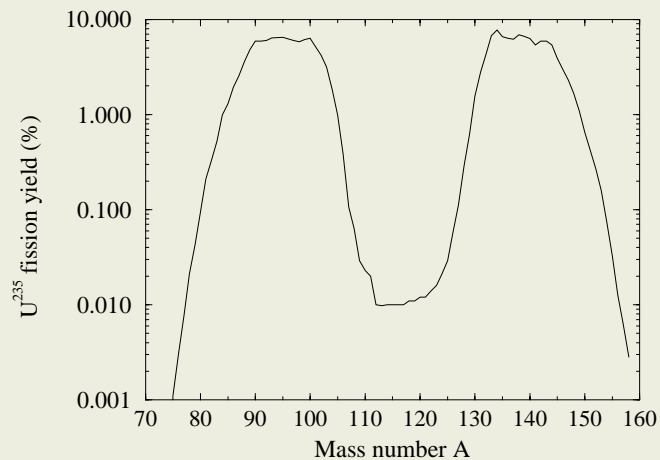
1. Misura del potere termico del reattore
2. Determinazione dello spettro dei neutrini
3. Stima dell'osservabile sperimentale: lo spettro dei positroni nel rivelatore.



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



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  $_{58}\text{Ce}^{140}$ .  $^{235}\text{U}$  ha 98 protoni e 142 neutroni  $\Rightarrow$  per raggiungere la stabilità in media 6 neutroni devono decadere  $\beta \Rightarrow 6 \bar{\nu}_e$ .

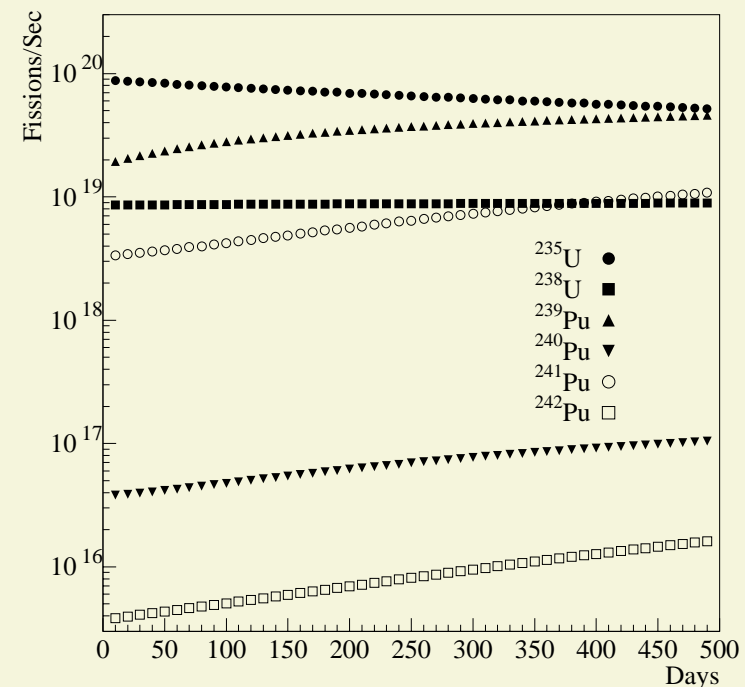


La soglia di produzione del processo di rivelazione  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  é di  $\sim 1.8 \text{ MeV} \Rightarrow$  solo il 25% dei neutrini da fissione é rivelabile.

## 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 ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ), é derivato indirettamente da misure dello spettro di elettroni misurato direttamente. Il quarto componente principale,  $^{238}\text{U}$ , 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

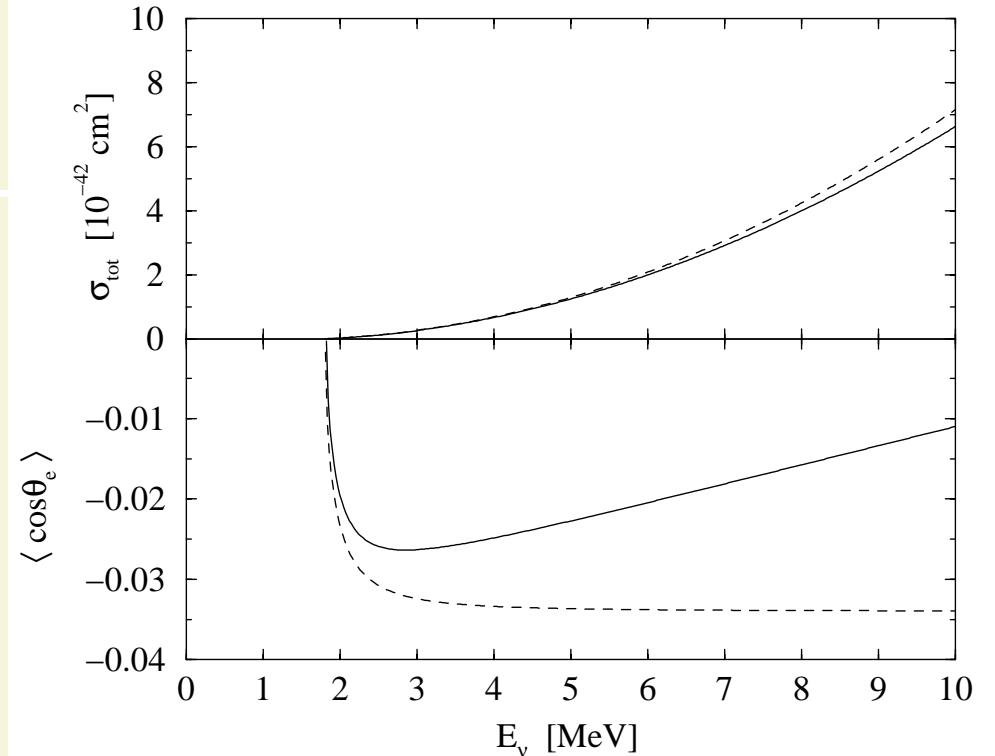
La sezione d'urto del processo  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  é, al primo ordine:

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

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  $\Delta_{inner}^R$  sono  $\Delta_{inner}^R \simeq 0.024$ .

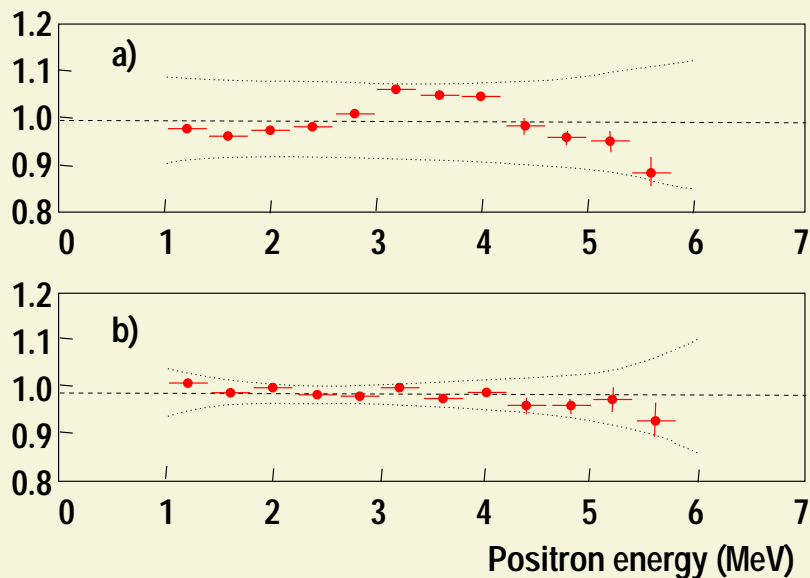


Linea solida: predizioni a  $\mathcal{O}(1/M_n)$ , tratteggiata  $\mathcal{O}(1)$ .

## 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.

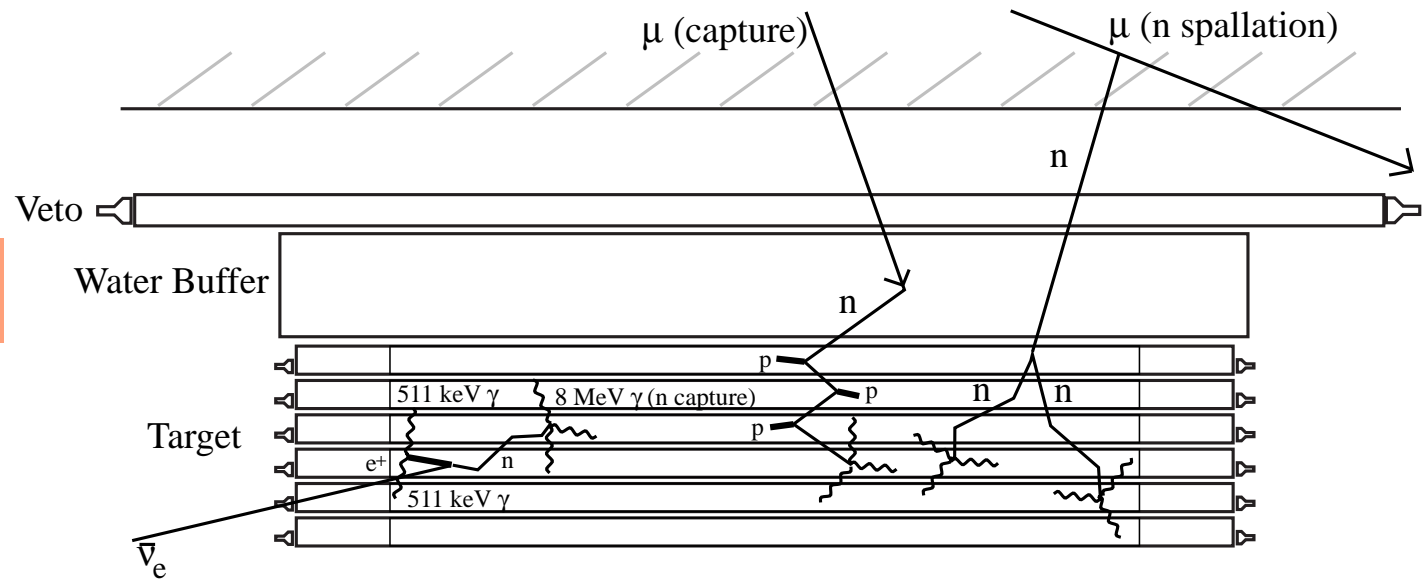


## Summary degli errori sistematici (da hep-ph/0107277)

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).

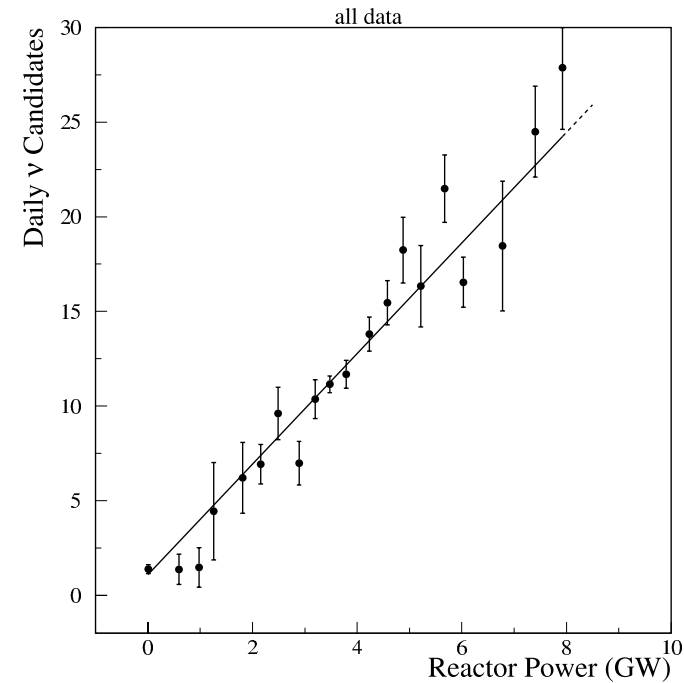
Systematic	CHOOZ (%)	PALO VERDE (%)
$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+)$	1.9	-
Number of p in target	0.8	-
$W_{th}$	0.7	-
Energy absorbed per fission	0.6	-
Total rate prediction	2.3	2.1
$e^+$ trigger eff.	-	2.0
n trigger eff.	-	2.1
$\bar{\nu}_e$ selection cuts	-	2.1
$(1 - \epsilon_1)B_{pn}$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

## Fondi Sperimentali



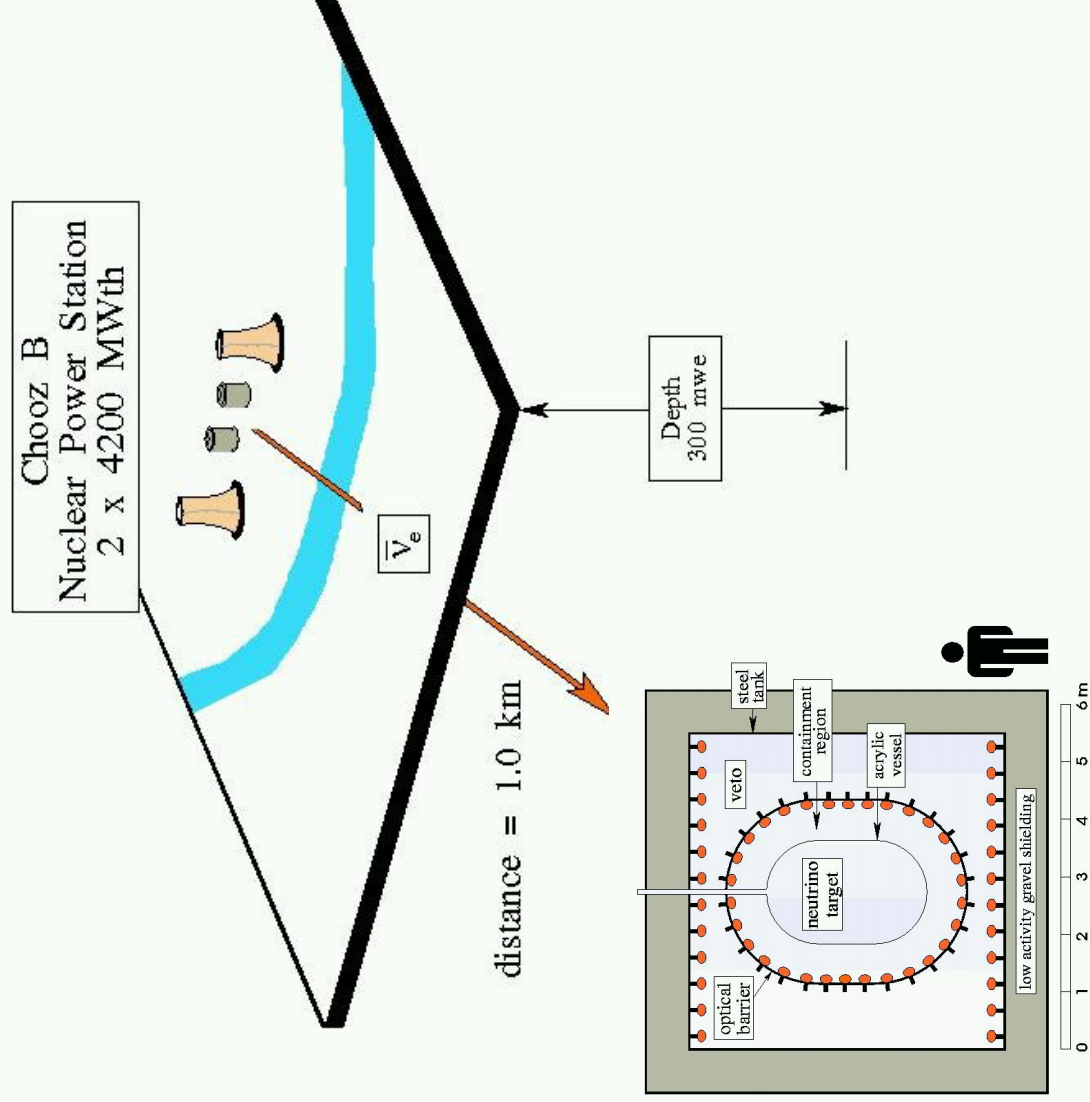
Principalmente due categorie:

- 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)



Chooz Underground Neutrino Laboratory  
Ardennes, France

## Il rivelatore CHOOZ

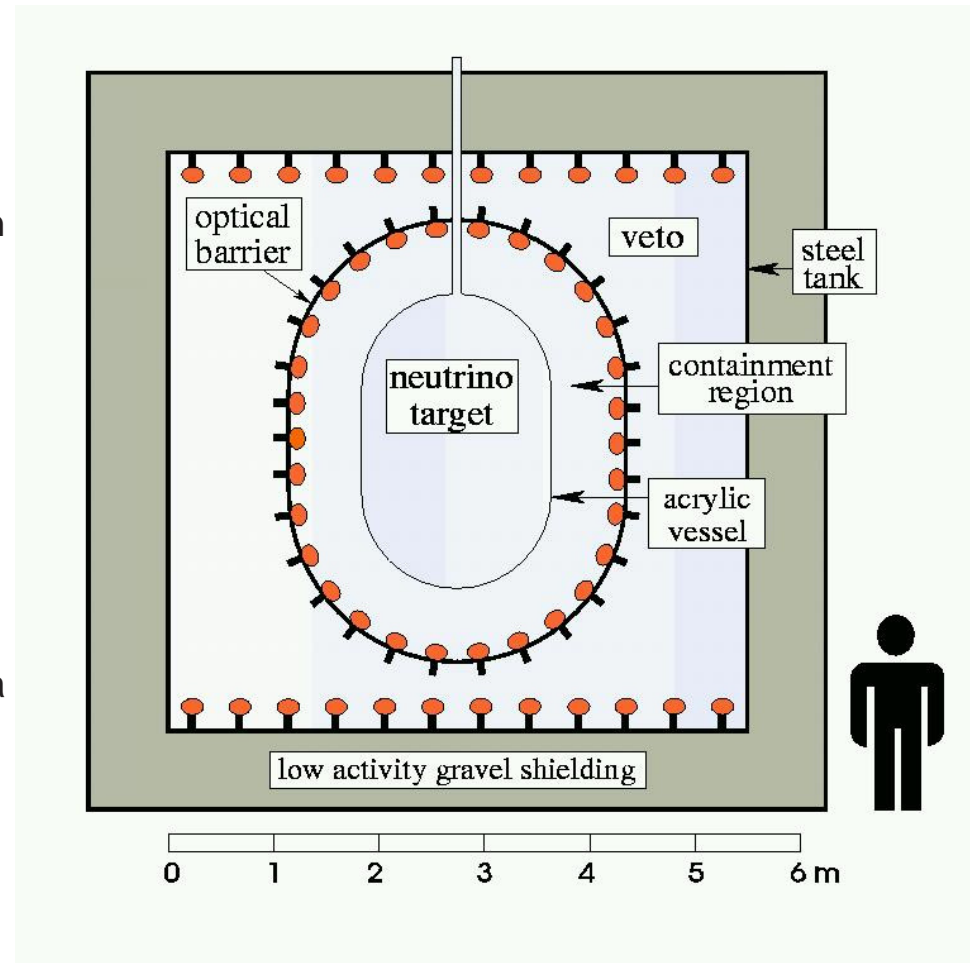
Rivelatore di 5 ton di scintillatore liquido drogato con gadolinio. Veto con scintillatore liquido.

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

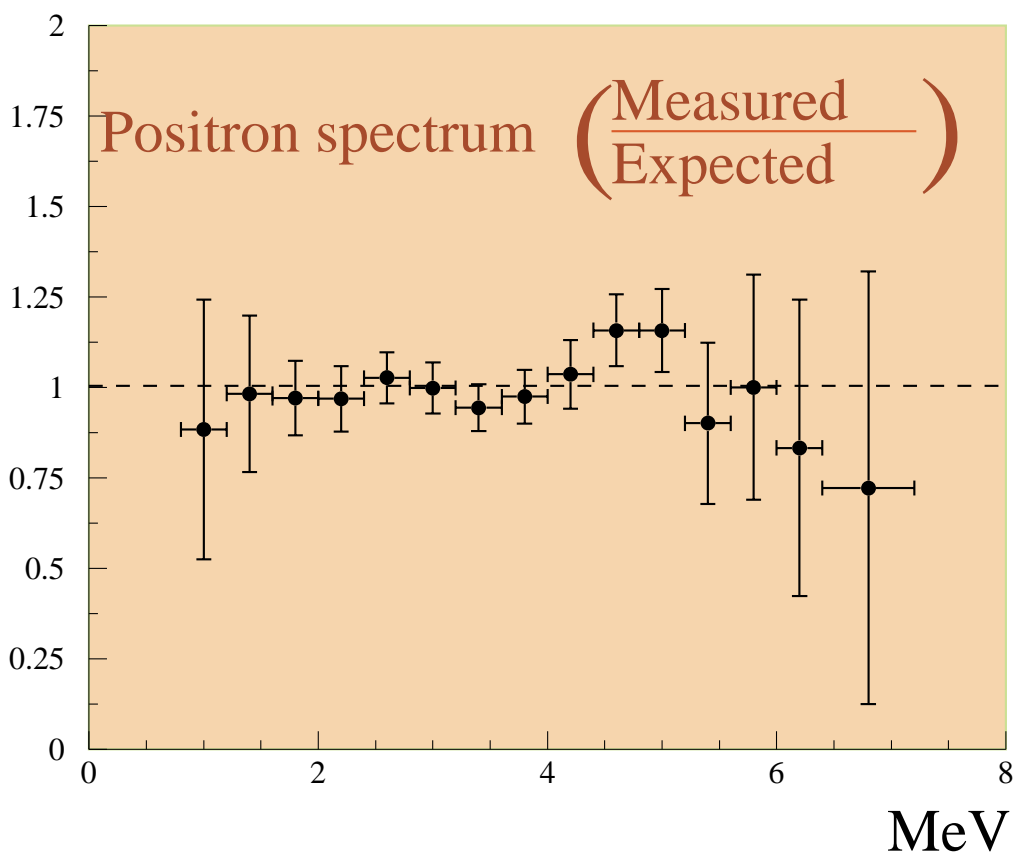
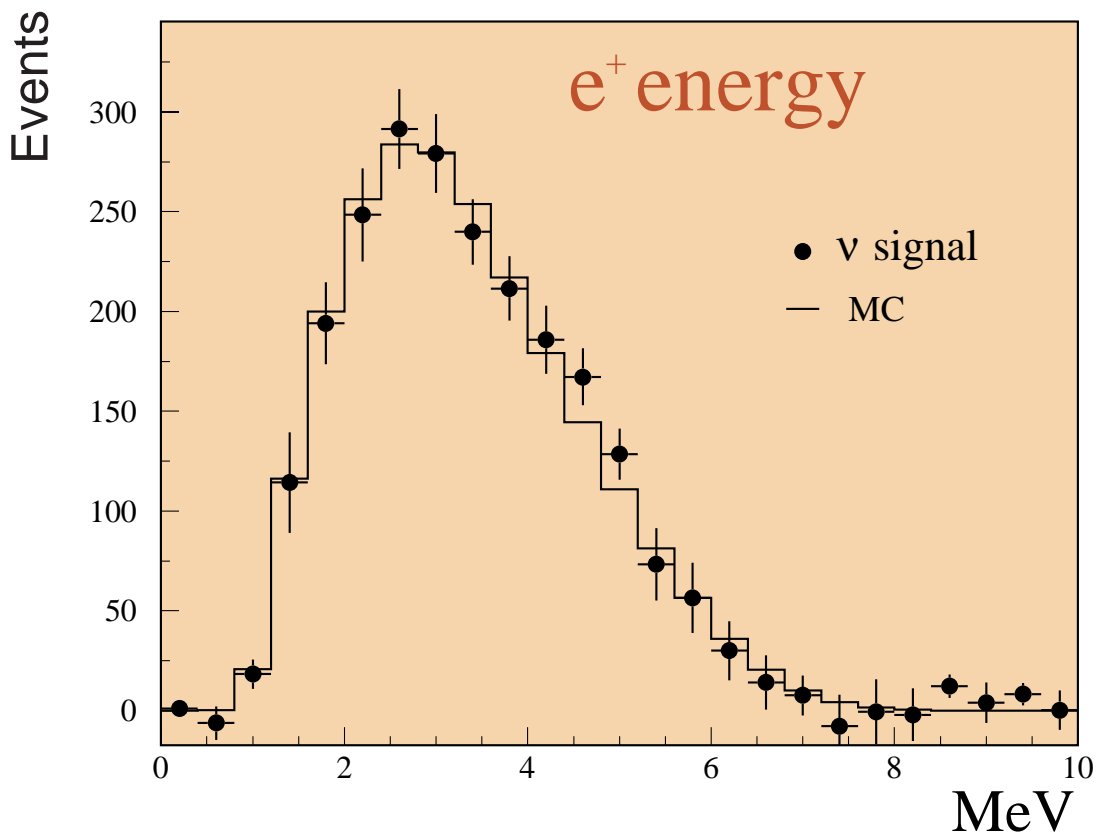
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad E(\bar{\nu}_e) = E(e^+) + 1.804 \text{ MeV}$$

Due segnali in sequenza:

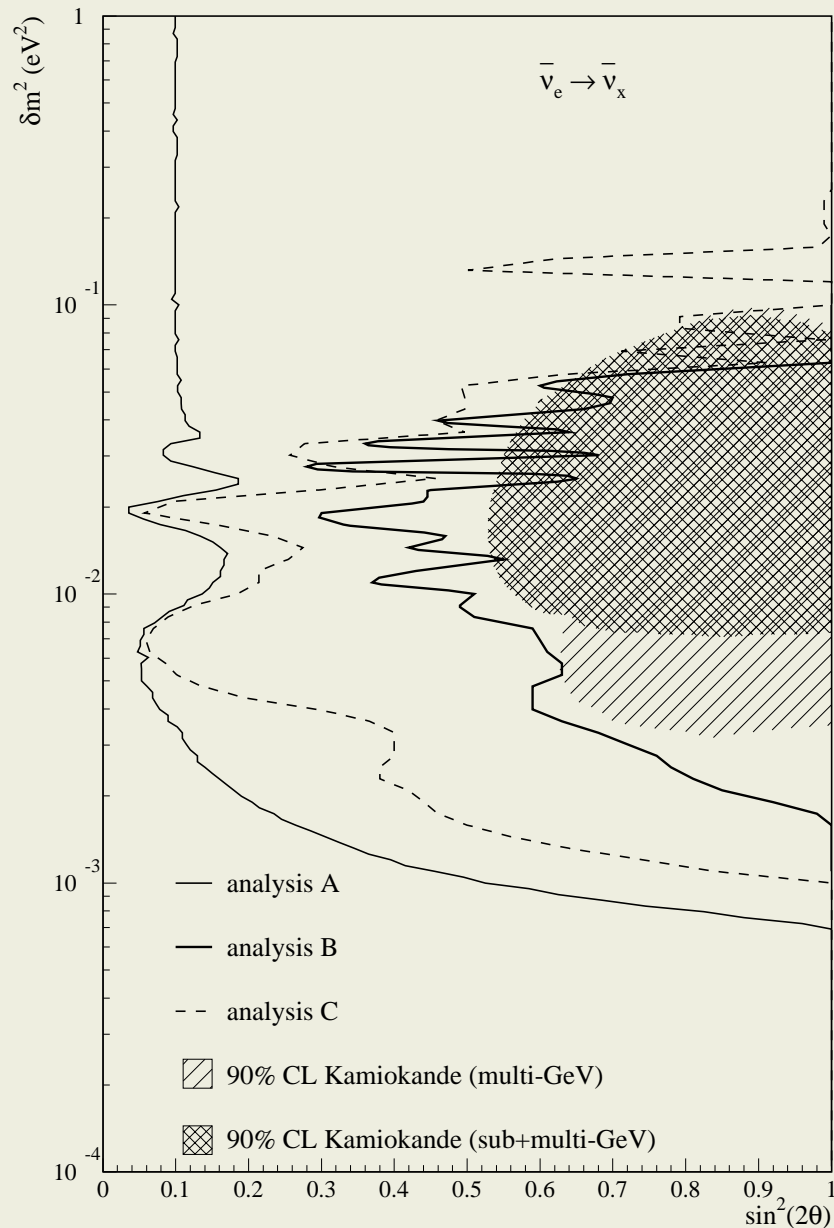
1. Prompt:  $e^+$  seguito da  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
2. Ritardato: cattura del neutrone in gadolinio, dopo la termalizzazione, con rilascio di circa 8 MeV.



# 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 ( $\Delta L = 117.7 \text{ m}$ ) fra i due reattori. Molte delle sistematiche si cancellano, ma gli errori statistici sono maggiori e la sensibilità in  $\Delta m^2$  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

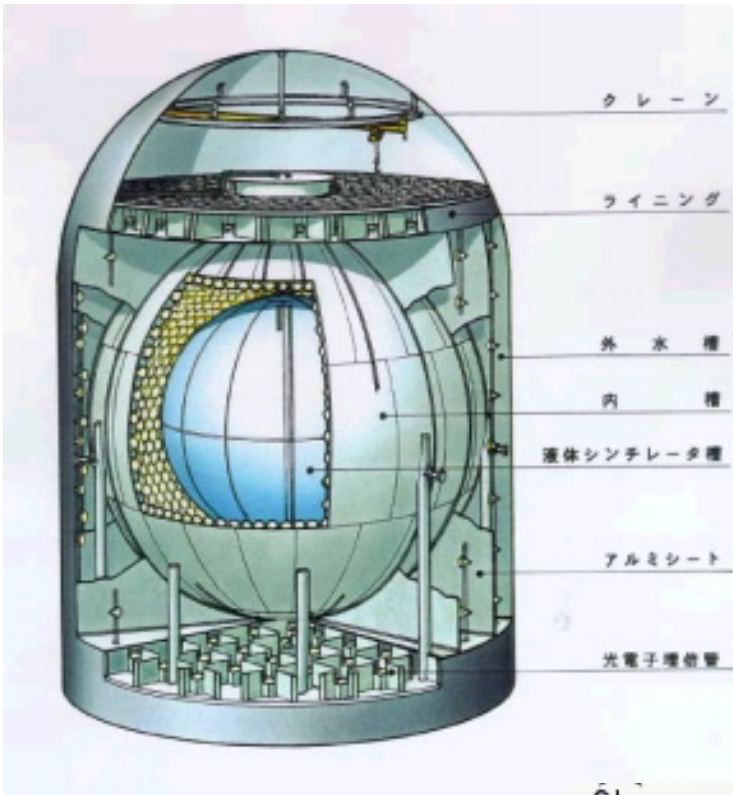
Tohoku University

1,200 m<sup>3</sup> liq. scint.

1,280 17" PMTs

20% coverage

anti: 3,000m<sup>3</sup> water

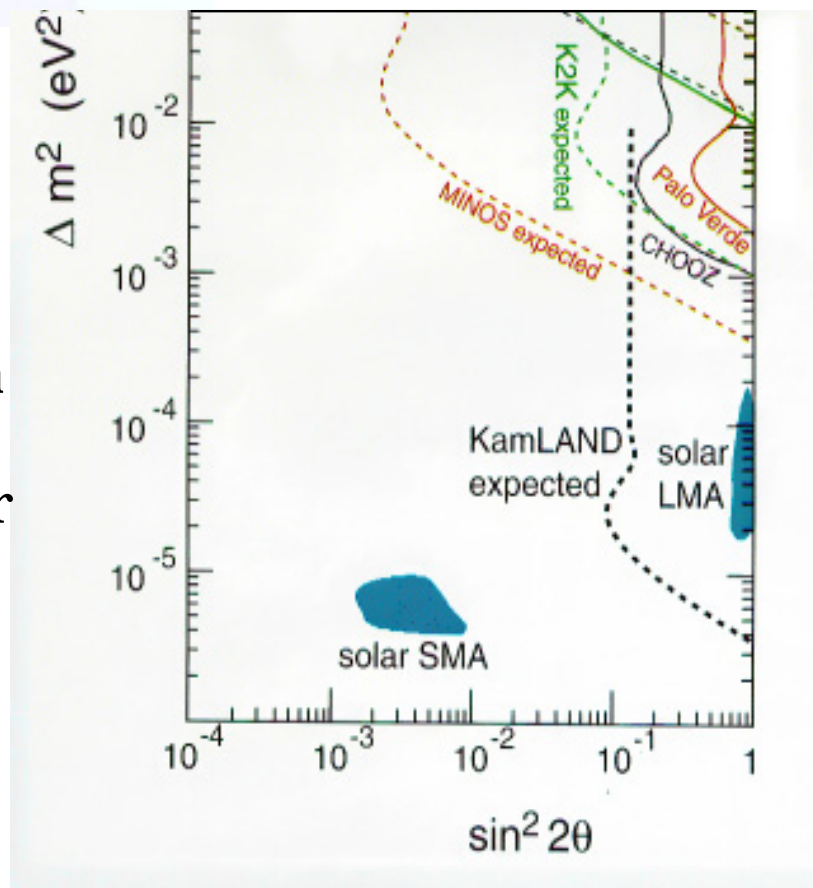


$E_e > 1.8 \text{ MeV}$

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

700 events/kt/year

April 2001~



## A brief history of KamLAND

	Dates	Live time (days)
Start data taking	Jan 2002	-
Run A (data-set of 1 <sup>st</sup> paper)	Mar 9 - Oct 6 2002	145.4*
Electronics upgrade & 20" PMT commissioning	Jan/Feb 2003	-
Run B	Oct - Jan 11 2004	369.7
Data-set presented here <sup>†</sup>	Mar 9, 2002 - Jan 11, 2004	515.1

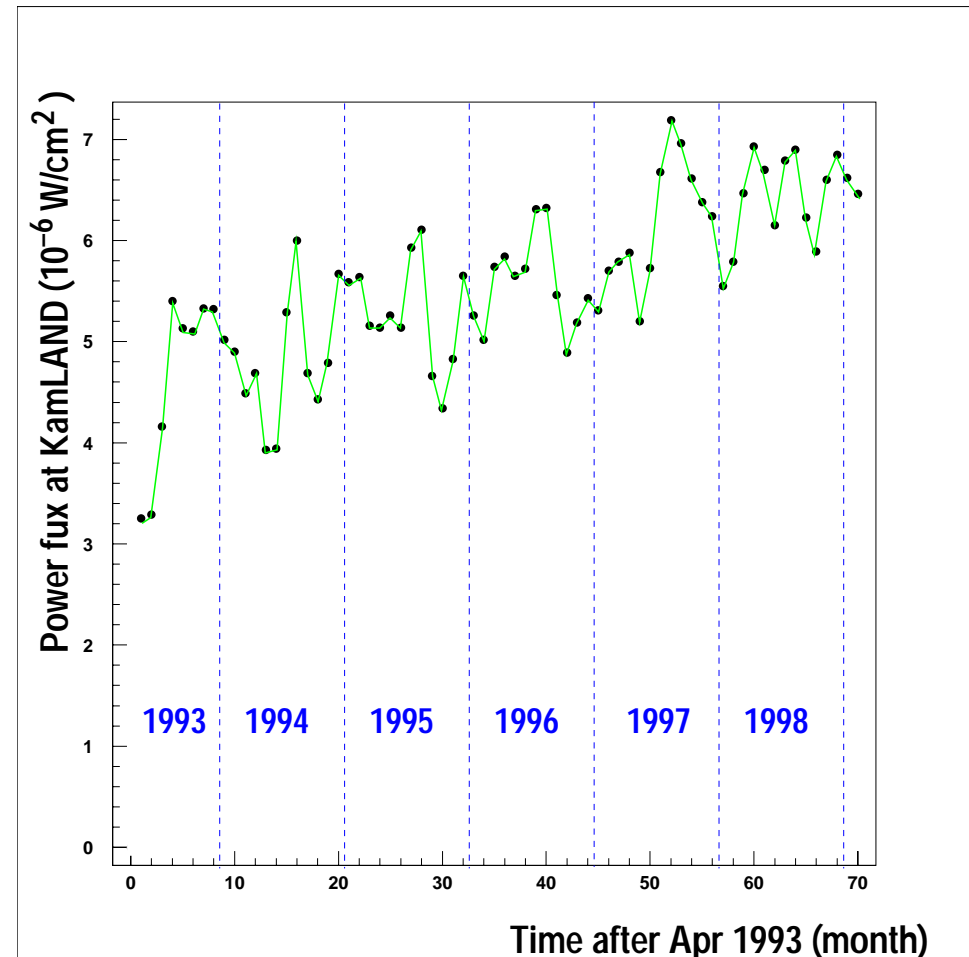
\*Was 145.1 with old analysis

*† T. Araki et al, arXiv:hep-ex/0406035 Jun 13, 04 submitted to Phys Rev Lett*

## Kamland e i reattori nucleari del Far-East

Site	Distance (km)	# of cores	P(ther.) (GW)	flux ( $\bar{\nu}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Signal ( $\bar{\nu}$ /yr)
<b>Japan</b>					
Kashiwazaki	160.0	7	24.6	$4.25 \times 10^5$	348.1
Ohi	179.5	4	13.7	$1.88 \times 10^5$	154.0
Takahama	190.6	4	10.2	$1.24 \times 10^5$	101.8
Hamaoka	214.0	4	10.6	$1.03 \times 10^5$	84.1
Tsuruga	138.6	2	4.5	$1.03 \times 10^5$	84.7
Shiga	80.6	1	1.6	$1.08 \times 10^5$	88.8
Mihama	145.4	3	4.9	$1.03 \times 10^5$	84.5
Fukushima-1	344.0	6	14.2	$5.3 \times 10^4$	43.5
Fukushima-2	344.0	4	13.2	$4.9 \times 10^4$	40.3
Tokai-II	294.6	1	3.3	$1.7 \times 10^4$	13.7
Shimane	414.0	2	3.8	$9.9 \times 10^3$	8.1
Onagawa	430.2	2	4.8	$9.8 \times 10^3$	8.1
Ikata	561.2	3	6.0	$8.4 \times 10^3$	6.9
Genkai	755.4	4	6.7	$5.3 \times 10^3$	4.3
Sendai	824.1	2	3.3	$3.5 \times 10^3$	2.8
Tomari	783.5	2	5.3	$2.4 \times 10^3$	2.0
<b>Korea</b>					
Ulchin	~750	4	11.2	$8.8 \times 10^3$	7.2
Wolsong	~690	4	8.1	$7.5 \times 10^3$	5.2
Yonggwang	~940	6	16.8	$8.4 \times 10^3$	6.9
Kori	~700	4	8.9	$8.0 \times 10^3$	6.6
<b>Total</b>		<b>69</b>	<b>175.7</b>	<b><math>1.34 \times 10^6</math></b>	<b>1102</b>

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.

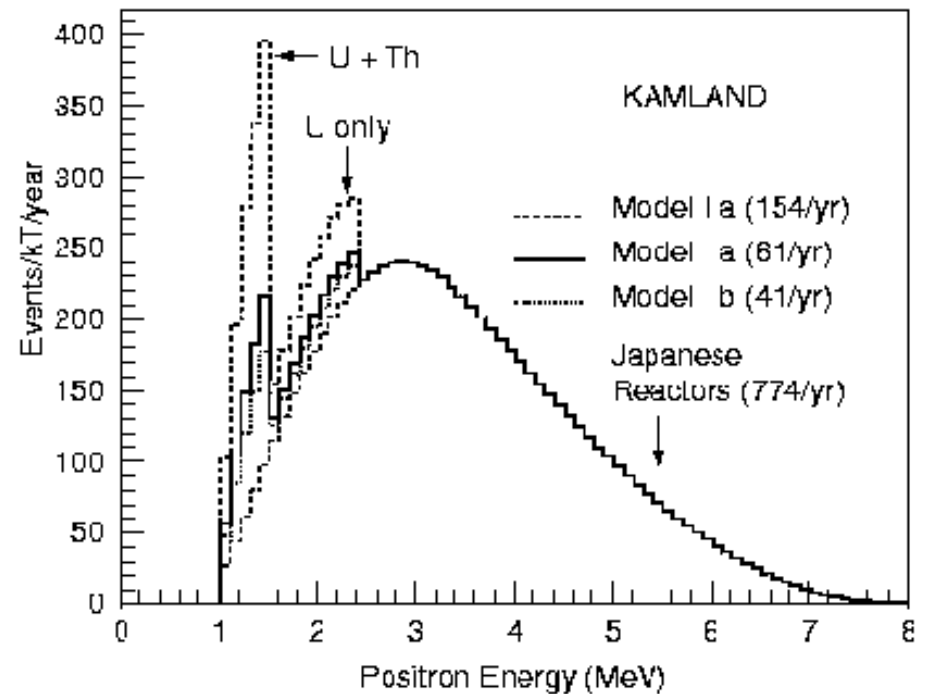


## Kamland e i fondi

La terra irradia circa 40 TW di calore. Si stima che circa 16 TW siano di origine radiogenica, 90% di questi derivano da  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . 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

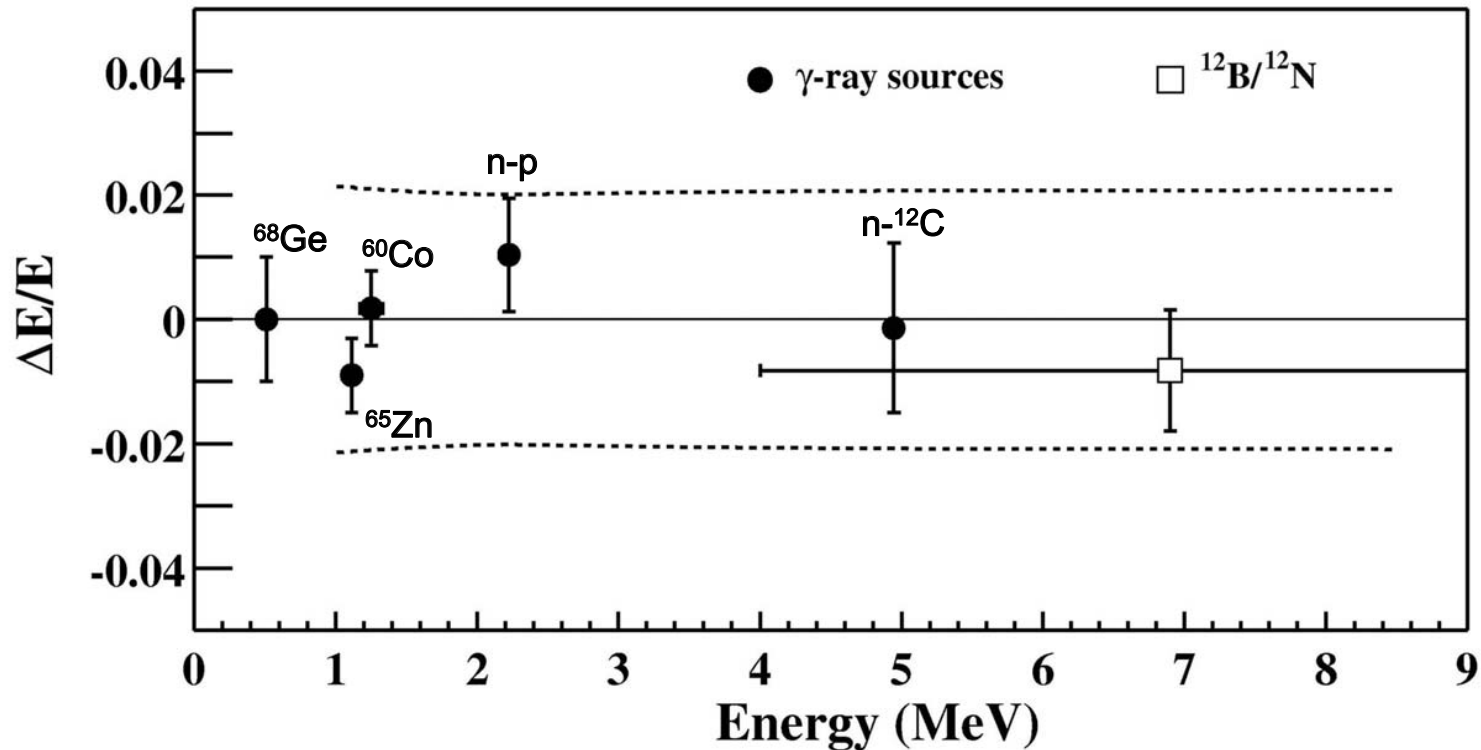
Background source	Rate ( $\text{day}^{-1}$ )
Cosmic muons induces neutrons	0.1
Natural radioactivity (random coincidence)	0.15
Natural radioactivity (correlated)	0.005
Total predicted background	0.25
Reactor $\bar{\nu}_e$ signal (no oscillation)	2



## Kamland e gli errori sistematici

Fiducial Volume	4.7	Reactor power	2.1
Energy threshold	2.3	Fuel composition	1.0
Efficiency of cuts	1.6	$\bar{\nu}_e$ spectra	2.5
Livetime	0.06	Cross section	0.2
Total systematic uncertainty			6.5

## Energy calibration uses discrete $^{12}\text{B}/^{12}\text{N}$ and $\gamma$ -ray sources



*Carefully include Birks law, Cherenkov and light absorption/optics to obtain constants for  $\beta$  and  $e^-$ -type depositions*

$\Delta E/E \sim 6.2\%$  at 1MeV

# Results

(766.3 ton·yr,  
~4.7 the statistics of the first paper)

Observed events 258  
No osc. expected  $365 \pm 24(\text{syst})$   
Background  $7.5 \pm 1.3$

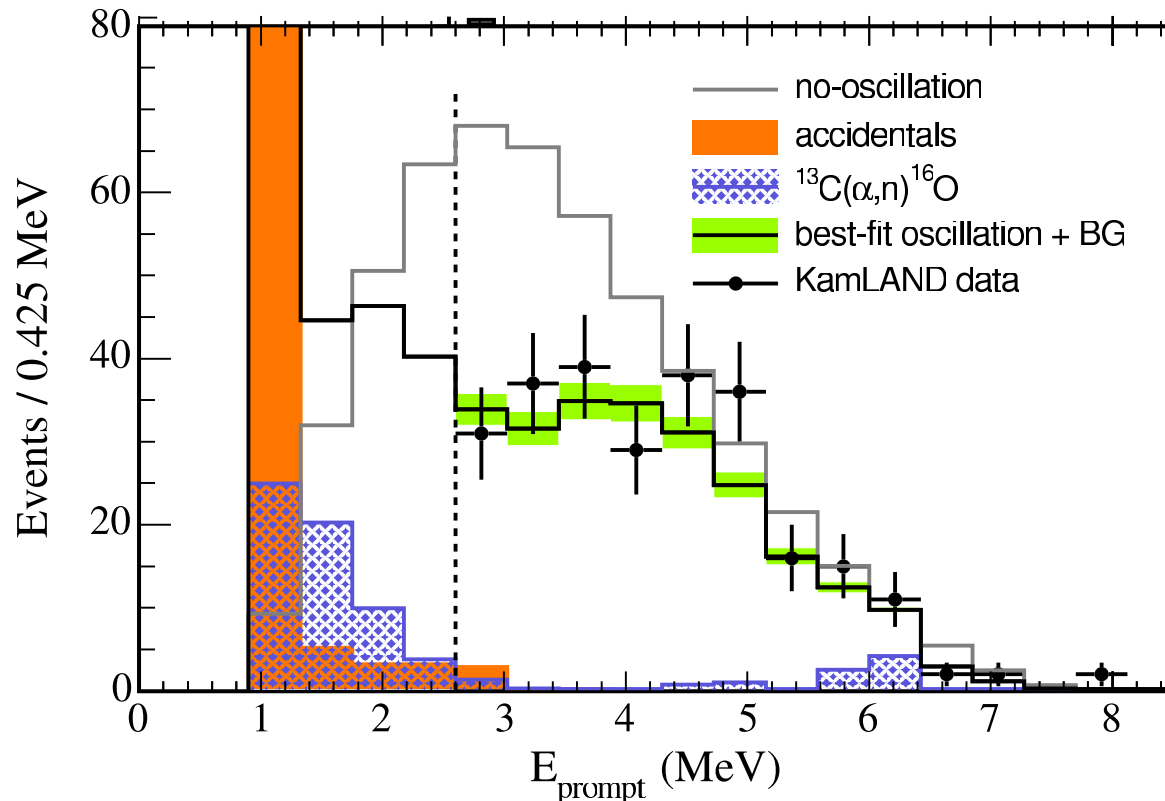
Background	Events
Accidentals	$2.69 \pm 0.02$
$^8\text{He}/^9\text{Li}$	$4.8 \pm 0.9$
$\mu$ -induced n	$< 0.89$
Total	$7.5 \pm 1.3$

**Inconsistent with simple  $1/R^2$  propagation  
at 99.995% CL**

$$(\text{Observed} - \text{Background}) / \text{Expected} = 0.686 \pm 0.044(\text{stat}) \pm 0.045(\text{syst})$$

*Caveat: this specific number does not have an absolute meaning in KamLAND,  
since, with oscillations, it depends on which reactors are on/off*

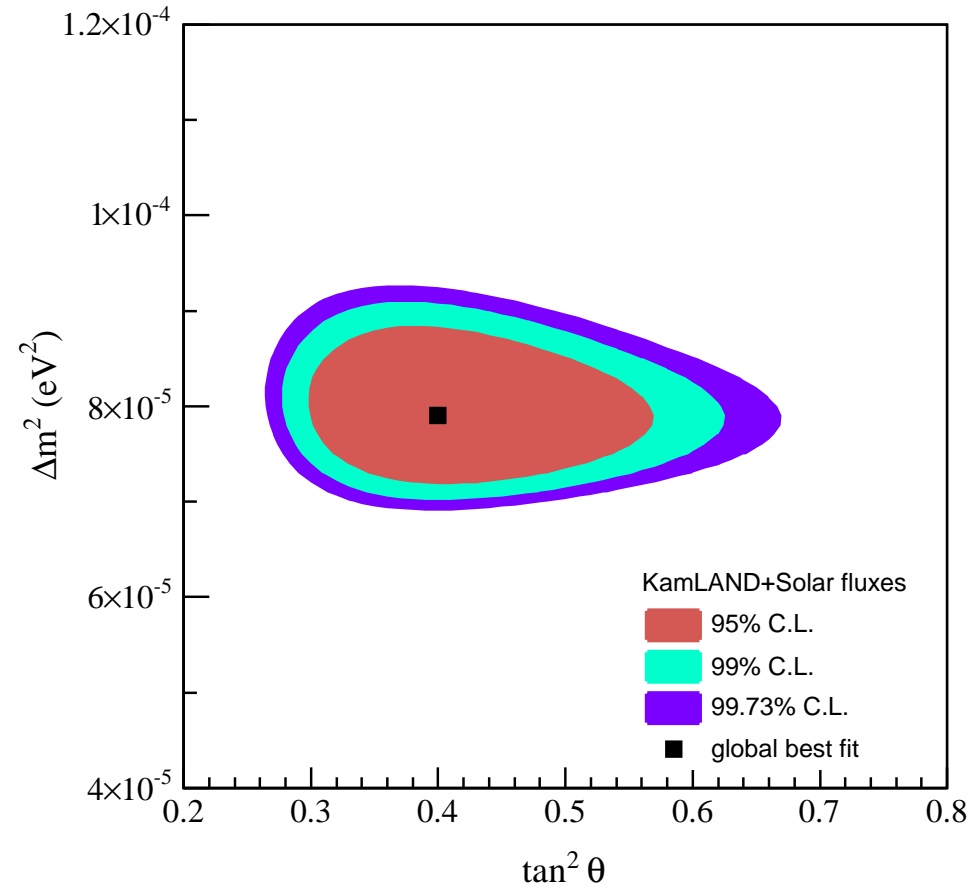
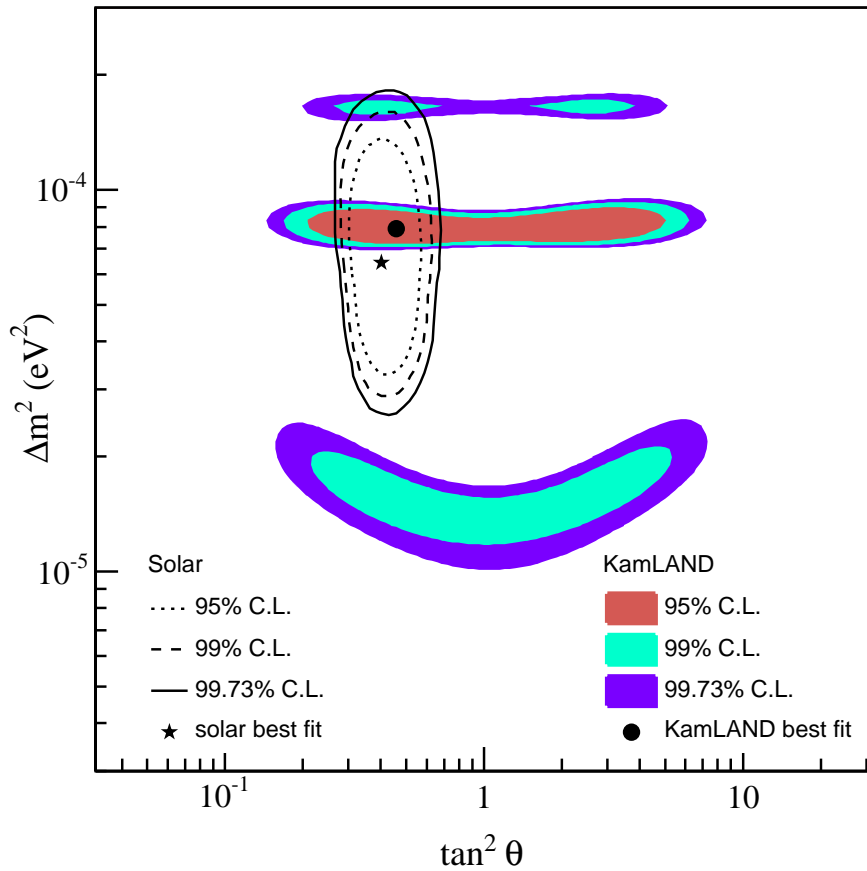
# Energy spectrum now adds substantial information



*A fit to a simple rescaled reactor spectrum is excluded at 99.89% CL ( $\chi^2=43.4/19$ )*

**Best fit to oscillations:**  
 $m^2=8.3 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta = 0.83$   
 Straightforward  
 $\chi^2$  on the histo  
 is 19.6/11  
 Using equal  
 probability bins  
 $\chi^2/\text{dof}=18.3/18$   
 (goodness  
 of fit is 42%)

## Fit a Kamland e ai Solari



$$\Delta m_{12}^2 = 8.2_{-0.5}^{+0.6} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta_{12} = 0.40_{-0.07}^{+0.09}$$