

Relazione tra massa e temperatura del Sole

Dalla:

$$3 kT = G (M_S/R_S) M_P$$

segue:

$$T = G M_S M_P / (3 k R_S)$$

Fissato il raggio, T e' proporzionale alla massa M_S .

Temperature molto elevate sono possibili solo in oggetti stellari di grande massa (non nella Terra)
In oggetti aventi massa inferiore a circa un decimo di massa solare, non possono aver luogo reazioni termonucleari.

Equilibrio idrostatico

All'equilibrio, la pressione gravitazionale al centro di una stella deve bilanciare la pressione termica legata alle reazioni nucleari

Pressione termica (se solo idrogeno):

$$P_i = nkT = M_S kT / (4/3 \pi R^3 M_P)$$

Pressione gravitazionale:

$$P_g = -2/3 \pi G \rho^2 R^2 = -(3/8\pi) G M_S^2 / R^4$$

$$P_g = - P_i \rightarrow$$

$$M_S = 2 R k T / (G M_P)$$

Vediamo che una relazione di proporzionalita' tra massa e raggio segue dall'equilibrio idrostatico

Origine dell'energia: Reazioni "primarie"

La prima delle reazioni che puo' aver luogo e' (reazione pp):



$$E(\nu_e) < 0.420 \text{ MeV}$$

$$\langle E(\nu_e) \rangle = 0.265 \text{ MeV}$$

$$t = 10^{10} \text{ anni}$$

99.6% dei neutrini

Processo "debole"

Alle tipiche energie in una stella (circa 1 MeV)

σ circa 10^{-20} mb (circa 10-100 mb in reazioni nucleari)

Spiega come mai il Sole "bruci" lentamente

Contribuisce anche (reazione pep):

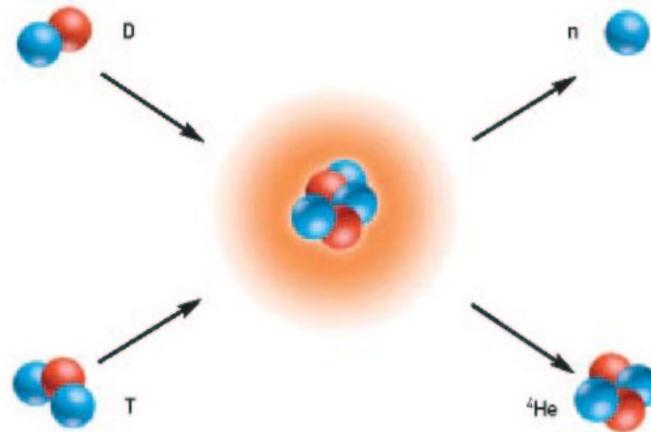


$$\langle E(\nu_e) \rangle = 1.442 \text{ MeV}$$

$$t = 10^{12} \text{ anni}$$

0.4% dei neutrini

Reazioni termonucleari



Barriera Coulombiana

La repulsione Coulombiana impedisce ai due nuclei di avvicinarsi a distanze tali da dar luogo a processi di fusione

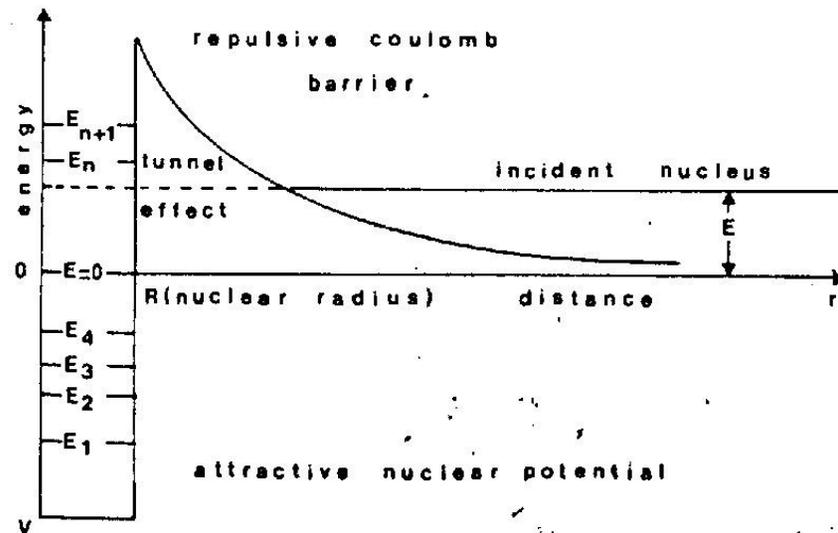


Fig. IV.5. The compound nucleus model. The compound nucleus formed by the two colliding nuclei is represented by its nuclear potential and its nuclear states $E_1, E_2, \dots, E_n, E_{n+1}, \dots$. One of the original nuclei (the target) is supposed at rest. The other one (the incident particle) has an energy E . If E does not coincide with one of the nuclear states of the compound nucleus (which is the case in the figure), the cross section is relatively small. It increases by several orders of magnitude if E coincides with one of the energies E_n (resonance effect).

Distribuzione delle velocità e sezione d'urto

Il rate di reazione è il prodotto della sezione d'urto per la velocità relativa dei due nuclei (distribuzione Maxwelliana di velocità)

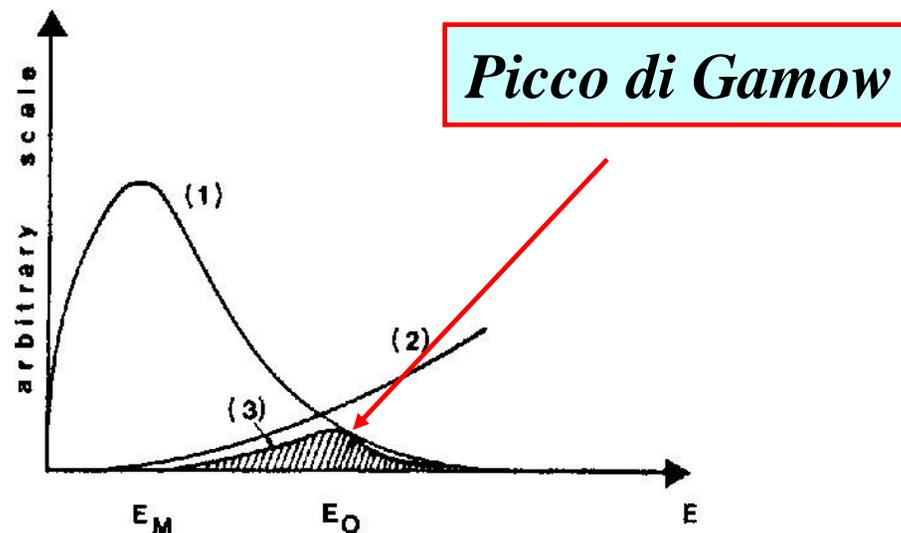


Fig. IV.6. *The Gamow peak*: The nuclear reaction rate (curve 3) is the product of the nuclear reaction cross section (curve 1) by the relative velocity of the nuclei, which, for a perfect gas, follows a Maxwell-Boltzmann distribution (curve 2). The nuclei which have the maximum probability of undergoing a nuclear reaction are *not* the ones with the average Maxwellian velocity (energy E_M), but the ones with the relative energy E_0 , corresponding to the maximum of the Gamow peak.

Reazioni "primarie" [1]

$$\begin{aligned} p + p &\rightarrow d + e^+ + \nu_e \\ E(\nu_e) &< 0.420 \text{ MeV} \\ \langle E(\nu_e) \rangle &= 0.265 \text{ MeV} \\ t &= 10^{10} \text{ anni} \end{aligned}$$

$$m_p = 938.272029 \text{ MeV}$$

$$m_e = 0.51098918 \text{ MeV}$$

$$m_d = 1875.612762 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.60217653 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\Delta m = 2 \times m_p - m_d = 0.931296 \text{ MeV} = 1.4921006 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

E' l'energia del positrone piu' quella del neutrini. L'energia del neutrino e':

$$0.931296 - 0.510999 = 0.420 \text{ MeV}$$

Il positrone annichila poi con un elettrone, dando fotoni.

Reazioni "primarie"[2]

Successivi processi molto piu' veloci:



Catena o ciclo dell' H_2

Risultato finale: trasmutazione di quattro protoni in un isotopo dell'He.

Reazioni "primarie" [3]



$$\mathbf{m_p = 938.272029 \text{ MeV}}$$

$$\mathbf{1 \text{ MeV} = 1.60217653 \cdot 10^{-13} \text{ J}}$$

$$\mathbf{m_d = 1875.612762 \text{ MeV}}$$

$$\mathbf{m_{He^3} = 2808.39142 \text{ MeV}}$$

$$\mathbf{\Delta m = 938.272029 + 1875.612762 - 2808.39142 \text{ MeV} = 5.4934 \text{ MeV}}$$

Reazioni "primarie"[4]

Energia liberata: circa 26.7 MeV, di cui una frazione compresa tra 2% e 19% e' portata da neutrini

	Reaction	Frequency	Energy (MeV)	Name
<i>PP I</i>				
$E_\nu < 0.423 \text{ MeV}$ →	$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	99.75%	0.0 – 0.42	pp
	$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	0.25%	1.44	pep
	${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	100%	—	
	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	85%	—	
<i>PP II</i>				
$E_\nu \sim 0.863 \text{ MeV}$ 0.386 MeV →	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	15%	—	
	$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	99.99%	0.86, 0.38	${}^7\text{Be}$
	$p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	100%	—	
<i>PP III</i>				
$E_\nu < 15 \text{ MeV}$ →	$p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	0.01%	—	
	${}^8\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	100%	0–14.1	${}^8\text{B}$

Vita del Sole

Motivo della lentezza del processo di combustione:

Primo passo della catena: fusione di nuclei di idrogeno:

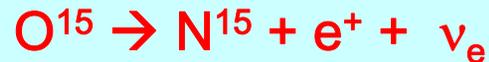


E' un processo "debole" (piccolissima sezione d'urto)

Ciclo CNO

Combustione dell'H in reazioni che coinvolgono elementi pesanti (C, O, N) [Bethe, 1939]:

2 catene:



In entrambi i cicli $4\text{p} \rightarrow \text{He}^4 + 2\text{e}^+ + 2\nu_e$

Circa 1.7 MeV sono portati dai neutrini.

Processo fortemente dipendente dalla temperatura !

Cicli CNO e pp

Dipendenza del rate dalla temperatura

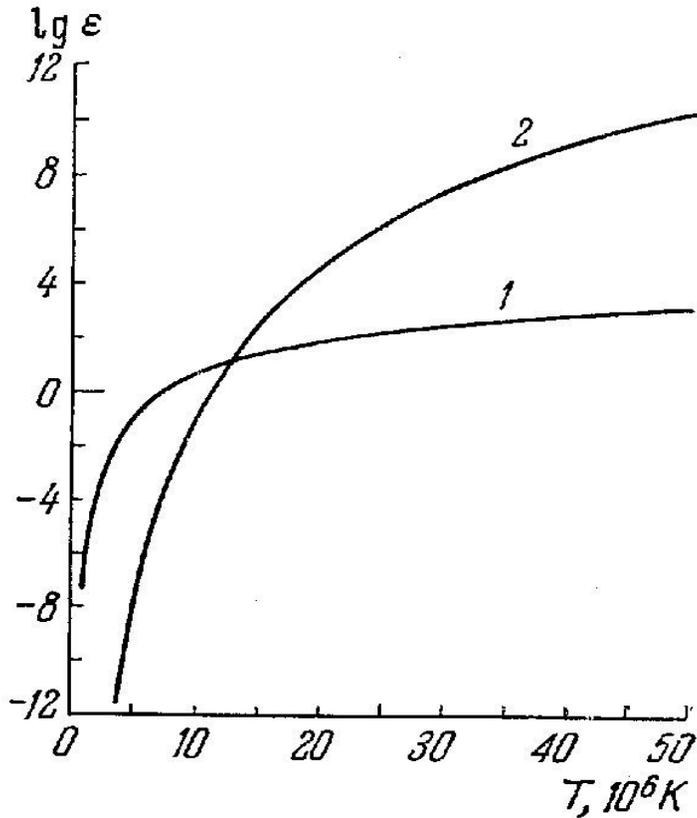


Fig. 12.2. Temperature dependence of energy liberation rates ϵ (erg/g·s) in the hydrogen (curve 1) and the carbon (curve 2) cycles.

Nel caso del ciclo pp il rate va come T^4 , in quello CNO come T^{24}
Energia nel pp satura a $\sim 10^7 \text{ K}$
I due rates sono uguali
per $T \sim 13 \times 10^6 \text{ K}$

Causa della differenza \leftarrow sezione d'urto della reazione $p p \rightarrow d e^+ \nu_e$ limitata a 10^{-20} mb .

Per $T \ll 10^7 \text{ K}$ domina il ciclo PP

Per $T \gg 10^7 \text{ K}$ domina il CNO

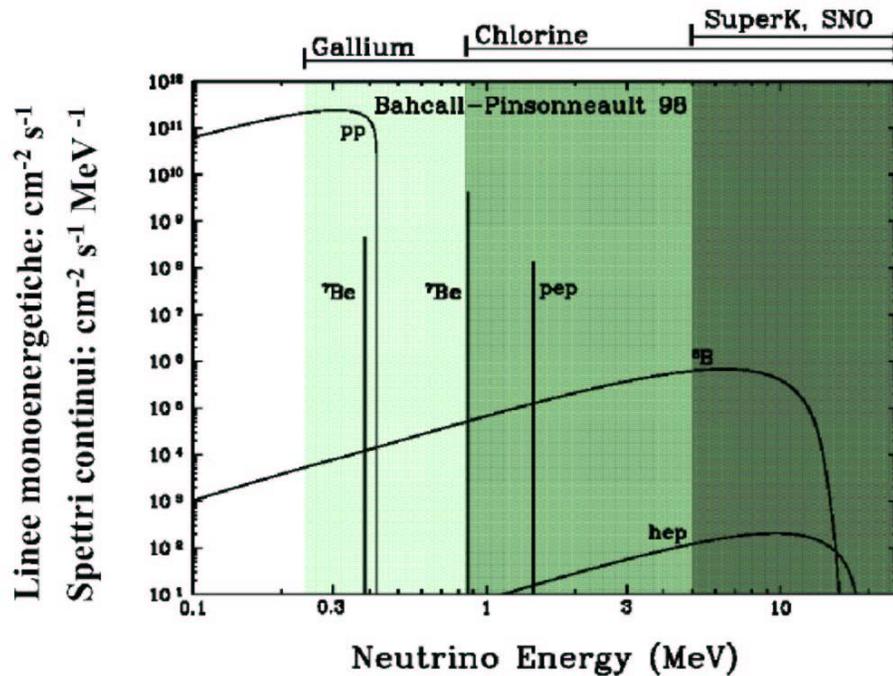
Sole $\sim 8 \times 10^6 \text{ K}$

\rightarrow Stelle con temperature piu' alte di quelle nel Sole liberano piu' energia per unita' di tempo che non il Sole

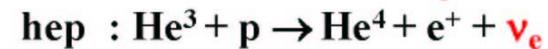
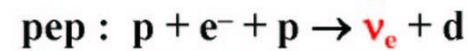
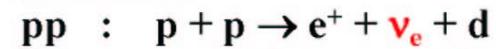
\rightarrow **bruciano prima**

Distribuzioni radiali di produzione dei neutrini

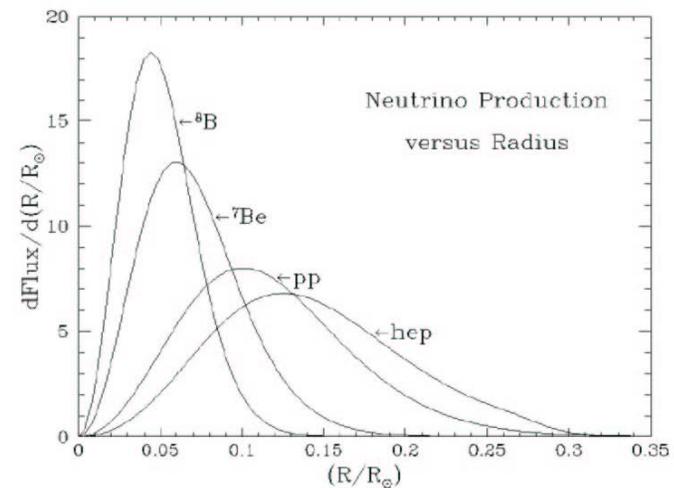
Predizione del flusso e dello spettro dei neutrini solari sulla Terra (ciclo p – p)



Notazioni



Distribuzioni radiali della produzione di ν_e nell'interno del Sole (predizioni SSM)

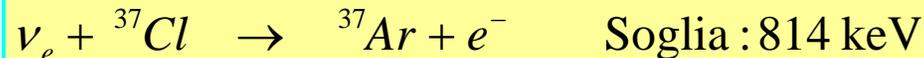


Esperimenti radiochimici (Cloro)

Esperimento del Cloro (Homestake gold mine)

profondita': 4100 mwe

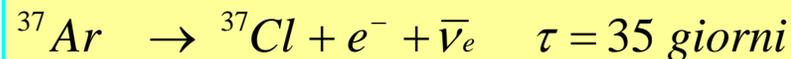
615 tonnellate di C_2Cl_4 (percloroetilene) \rightarrow
2.2 10^{30} grammi-atomo



[rate atteso : 8.0 ± 3.0 SNU]

1 SNU (Solar Neutrino Unit) = 10^{-36} catture per atomo per giorno

Conteggio dei decadimenti di :



Argon prodotto e' volatile. Estrazioni una volta al mese.

Conteggio dei decadimenti in contatori proporzionali in ambiente a bassa radioattivita'.

reazione	SNU
pp	0.0
pep	0.2
hep	0.03
7Be	1.1
8B	6.1
${}^{13}N$	0.1
${}^{15}O$	0.3
${}^{17}F$	0.003

Esperimenti radiochimici (Cloro)

Flusso predetto: 7.6 (+1.3, -1.1) SNU

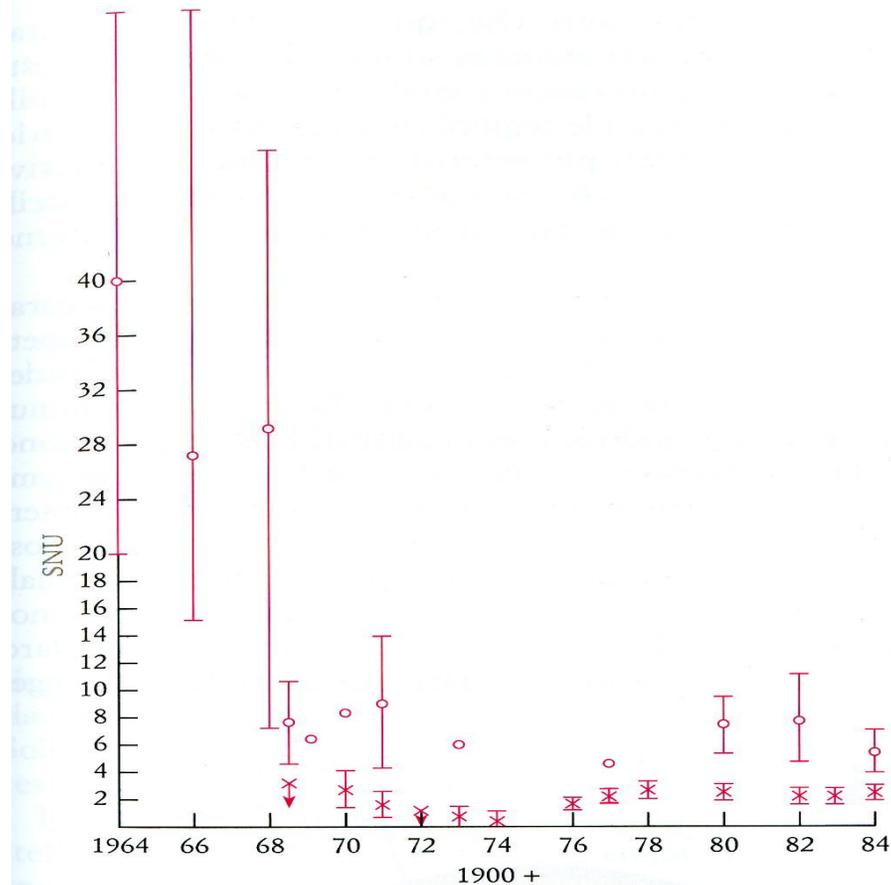


Figura 15

Diagramma che mostra in che modo sono cambiate, nell'arco di vent'anni, le osservazioni e le previsioni riguardo al flusso di neutrini prodotti dal decadimento del ^8B nel centro del Sole. Le barre indicano una deviazione standard; \times osservazione; \circ teoria.

Esperimenti radiochimici (Cloro)

Estrazione con metodi chimici

Conteggio (contatore proporzionale)

Misura dell'energia e del tempo di salita dell'impulso

verifica dell'efficienza di estrazione

0.1 cm³ di ³⁶Ar (o ³⁸Ar) immessi nella soluzione e recuperati poi insieme all' ³⁷Ar prodotto

Ulteriori verifiche:

(a) sorgente radioattiva di neutroni



recupero e conteggio dell' ³⁷Ar prodotto

(b) immissione di quantità note di ³⁷Ar (500 atomi!) nel rivelatore → recupero e conteggio

Esperimenti radiochimici (Cloro)

Flusso predetto: 7.6 (+1.3, -1.1) SNU

$$\Phi_{mis} = 2.56 \pm 0.23$$

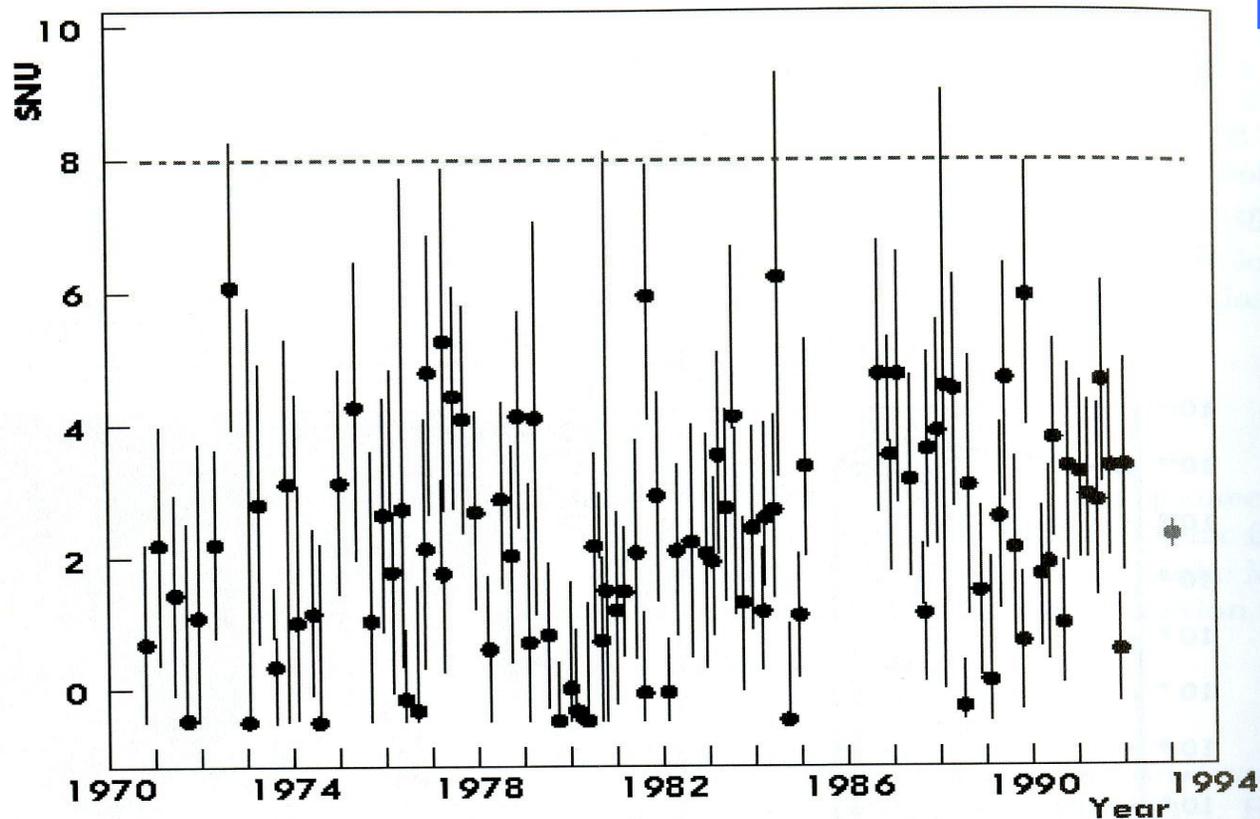


Fig. 14.5. Observational results from the Homestake neutrino experiment as a function of time. The line at 7.9 SNU shows the prediction of the 'standard solar model'.

Results of Chlorine experiment

1. First measurement of solar neutrino interaction rate
2. Raised the problem of missing neutrinos
3. Opened a field of research that is not yet closed. Davis was awarded in 2002, the Nobel prize together with Koshiba and R. Giacconi

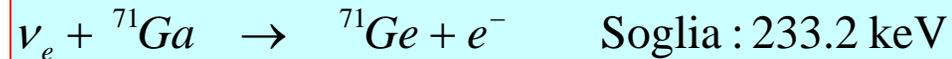
“for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos”

$$\begin{aligned} R &= 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU} \\ &= 2.56 \pm 0.23 \end{aligned}$$

Constancy of the solar neutrino flux (over 23 years): no correlation has been found between R_{ν}^{Sun} and the solar cycle (many speculation on this item in the '90)

Esperimenti radiochimici(Gallio)

GNO+SAGE



(sensibile ai neutrini pp)

[rate atteso : 128_{-7}^{+9} SNU]

1 SNU (Solar Neutrino Unit) = 10^{-36} catture per atomo per giorno

Conteggio dei decadimenti di :



***Gallex (Gran Sasso) → GNO (110 tonnellate di GaCl₃ → 30 tonnellate di Gallio)
(Italia-Francia-Germania..)***

***SAGE (Baksan, USSR) → 57 tonnellate di Gallio metallico
(Soviet American Gallium Experiment)***

Esperimenti radiochimici (Gallio)

Conteggio dei decadimenti del ^{71}Ge

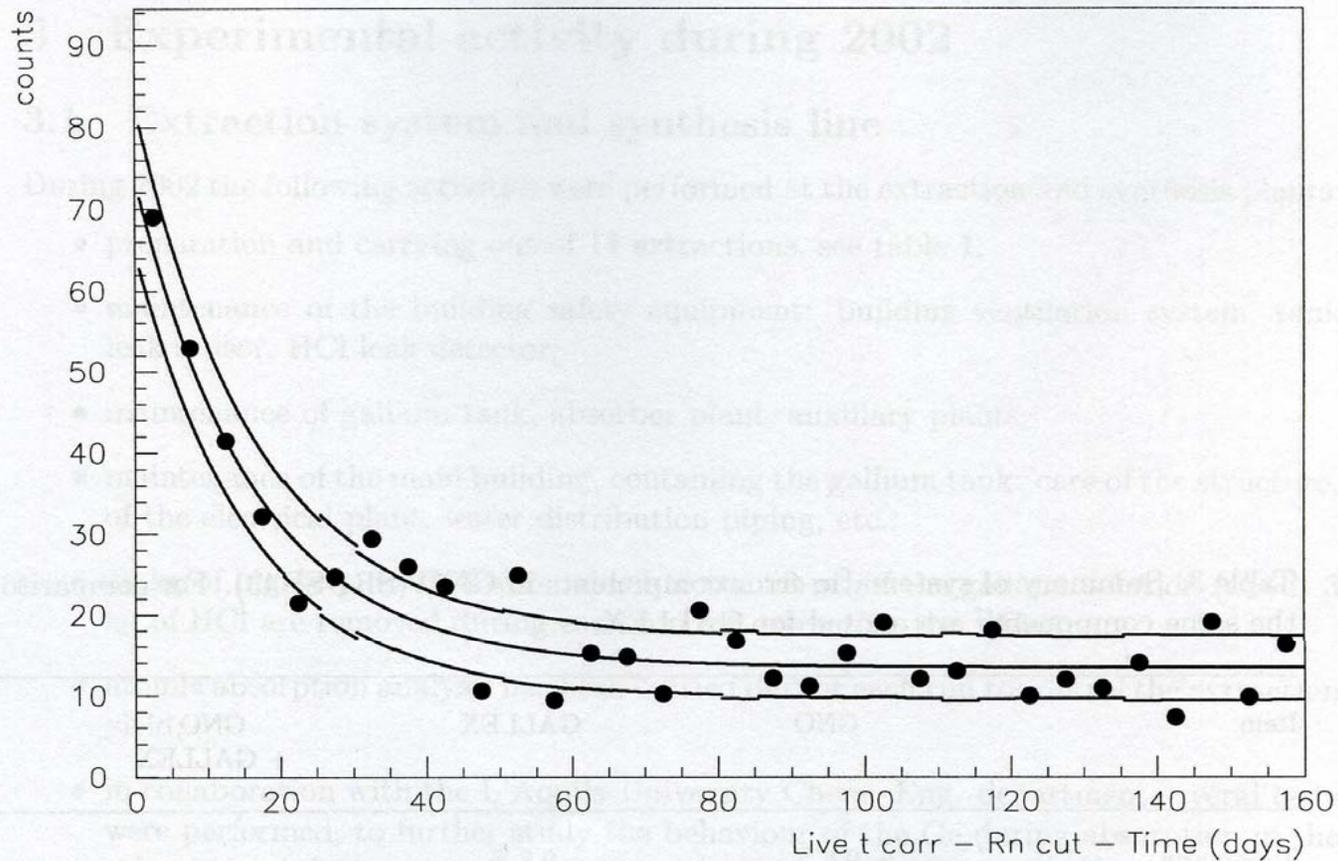


Figure 4: Distribution of candidate ^{71}Ge counts vs. counting time.

Esperimenti radiochimici(Gallio)

Gallex

Estrazione del gas (Ge) e trasformazione in GeH₄ (Germano) che e' simile al metano (CH₄) adatto a far funzionare un contatore proporzionale. Mescolato a Xe ed introdotto nei contatori.

Contatori opportunamente calibrati. Misura della forma dell'impulso da ciascun evento di decadimento (energia, tempo di salita)

Processore a reti neurali adoperato per separare decadimenti del Ge da fondo radioattivo.

Efficienza dell'intero sistema misurata due volte: sorgente di ⁵¹Cr (Sorgente da 2 MCi di Cr, prodotto al reattore di Grenoble e rapidamente trasportato in Italia)

⁵¹Cr → ⁵¹V + neutrini monocromatici con righe a:

426 KeV(9%), 431 KeV(1%), 746 KeV(81%), 751 KeV(9%)

Vicine alle righe dei neutrini emessi nel processo del ⁷Be:

Be⁷ + e⁻ → Li⁷ + ν_e: 386 KeV(10%), 863 KeV(90%)

$$\mathcal{E} = 0.93 \pm 0.08$$

Esperimenti radiochimici(Gallio)

Gallex+GNO

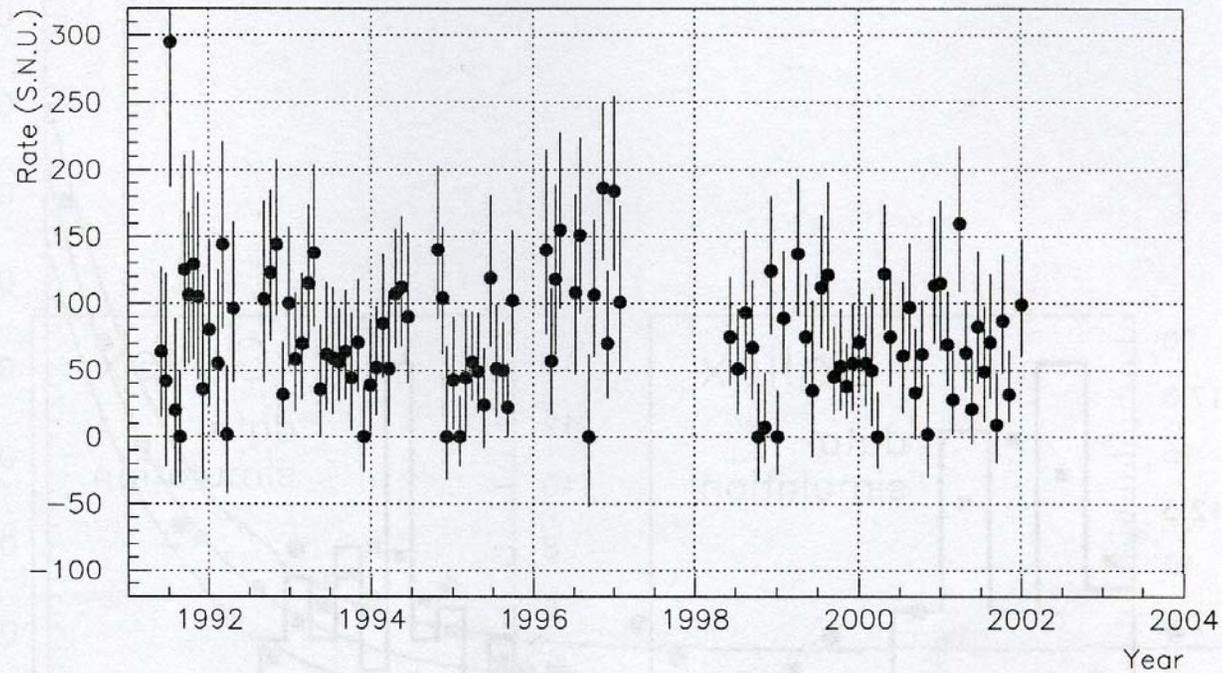
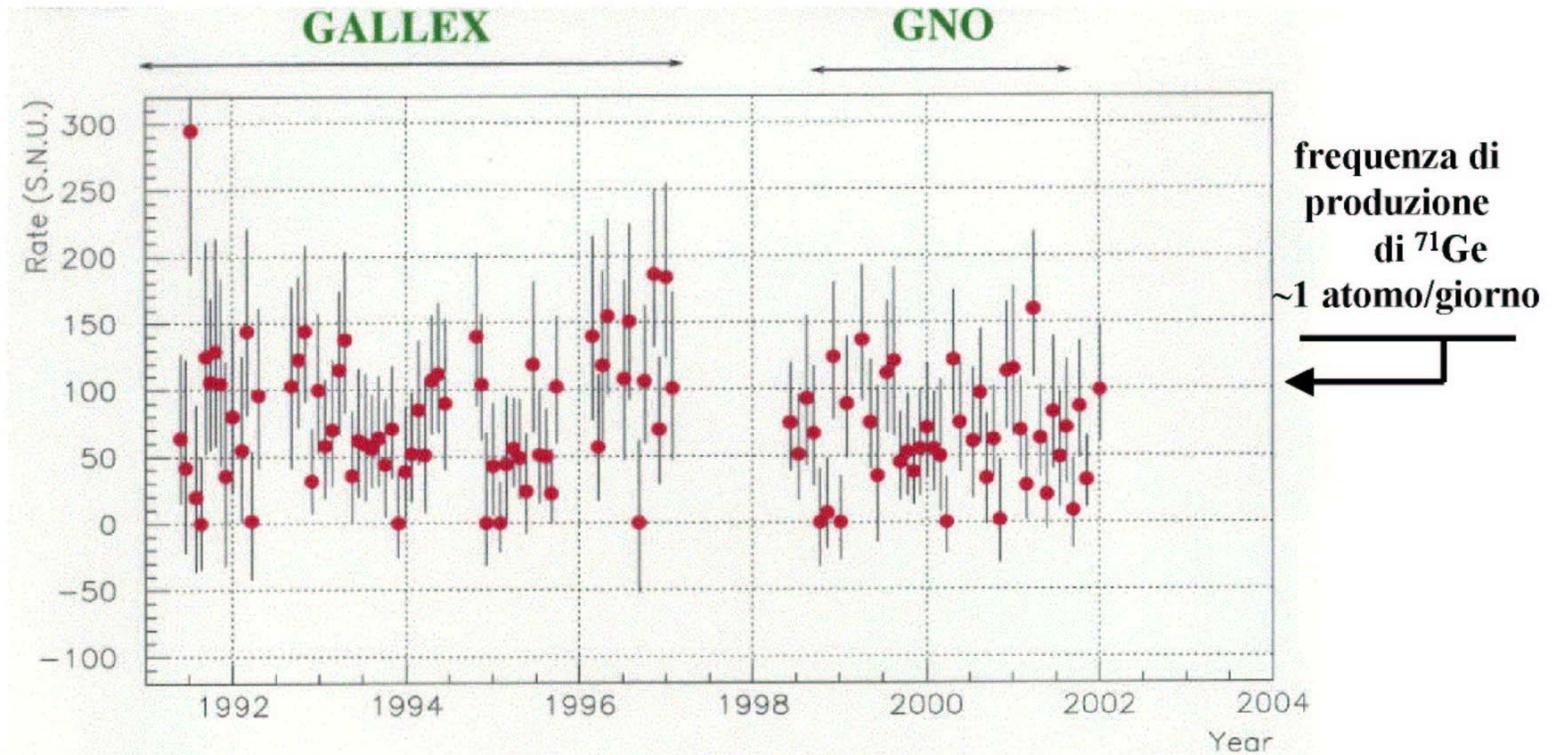


Figure 1: Measured solar neutrino capture rate (atoms/day) in the single 65 GALLEX solar runs, and in GNO solar runs SR1-SR43. A signal of 100 SNU corresponds to a production rate of 0.90 ^{71}Ge atoms per day inside the 30 tons gallium tank.

Flusso atteso: 128 (+9/-7) SNU → Misurato: 77.5 (+7.6/-7.8) SNU

Gallex-GNO



GALLEX

77.5 ± 6.2 (stat) ± 4.5 (sys) SNU

GNO

65.2 ± 6.4 (stat) ± 3.0 (sys) SNU

GNO+GALLEX

70.8 ± 4.5 (stat) ± 3.8 (sys) SNU

SAGE (1990 – 2001)

$70.8^{+6.5}_{-6.1}$ SNU

PREDIZIONE SSM :

128^{+9}_{-7} SNU

Dati/SSM = 0.56 ± 0.05

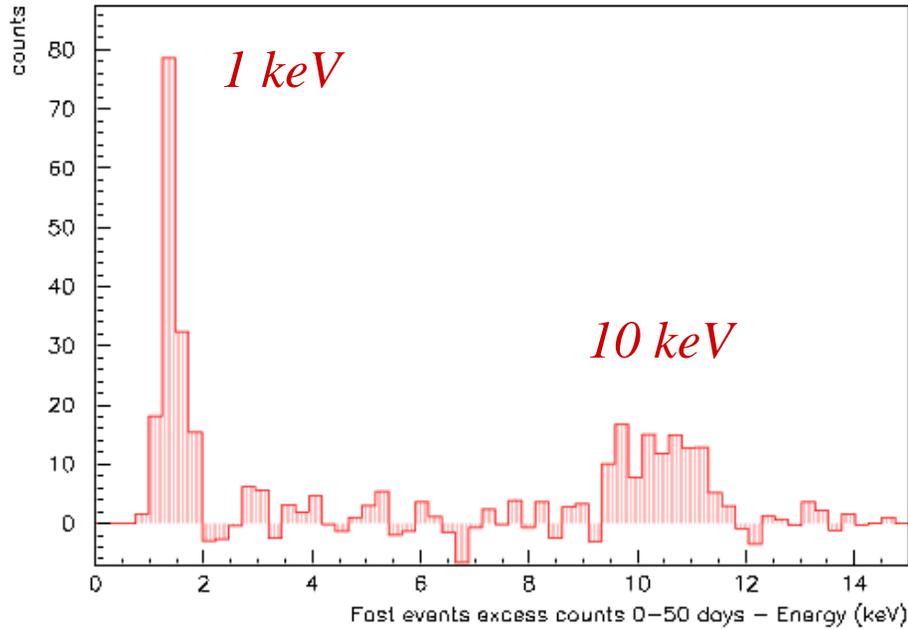
Gallium Experiments

New !!

	Data taking	N runs	Average Efficiency <i>Tank to counter</i>	Hot chem check	Source calib	R_{ex} [SNU]
GALLEX/ GNO LNGS Italy	1991- 2003 stopped	123	97 %	^{71}As	Yes twice ^{51}Cr source	69.3 ± 4.1 ± 3.6 5.9% 5.2% 69.3 + 5.5
SAGE Baksan Kabardino Balkaria	1990- ongoing	121	90 %	No	Yes ^{51}Cr ^{37}Ar	66.9 ± 3.9 ± 3.6 5.8% 5.2% 66.9 +5.3 -5.0

New combined value* **68.1 ± 3.75 (5.5%)*

The signal is validated for both SAGE and GALLEX/GNO by



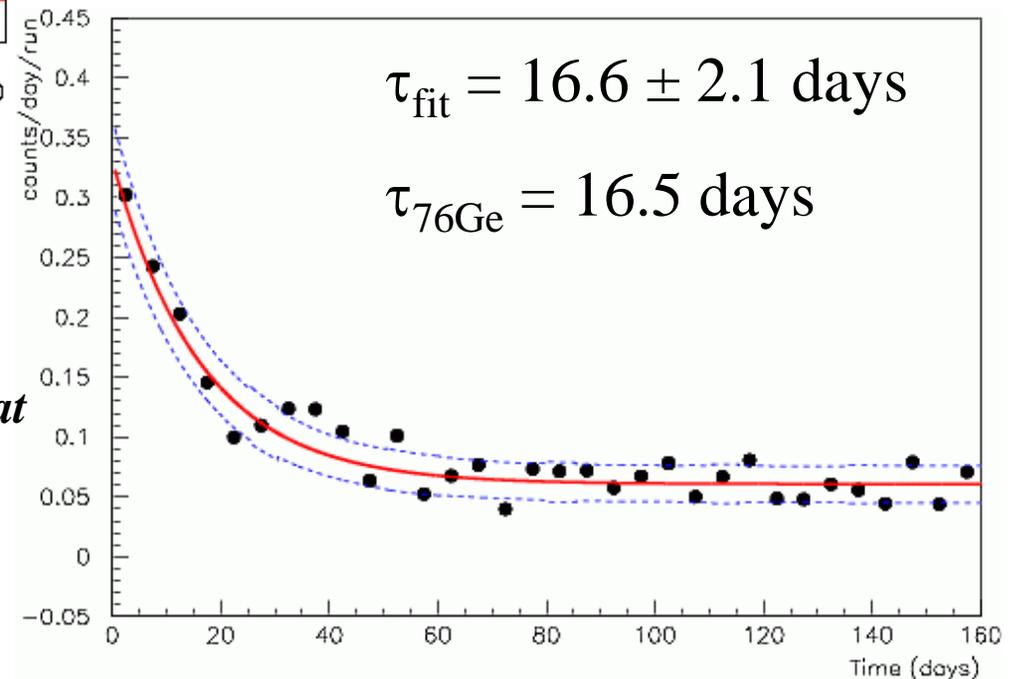
Event energy distribution

Important! No other peaks appear in the spectrum

Event time distribution.

Analysis: M.L. analysis.

Null hypothesis: 1 decaying isotope + flat backgr (independent /each run)



combining SAGE and GALLEX/GNO period
 Jan 1990 – December 2003

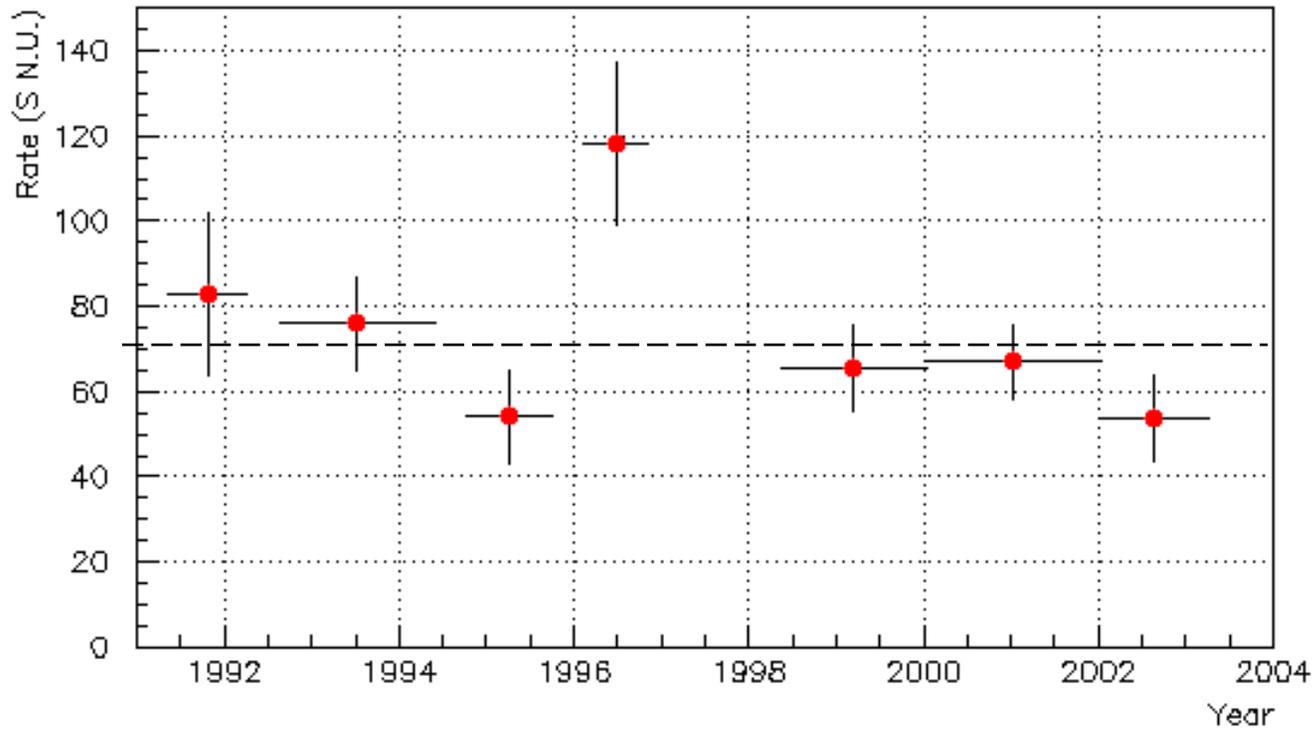
$$68.1 \pm 3.75 \text{ (5.5\%)}$$

Diminuzione sistematica del segnale negli anni in GALLEX+GNO

GALLEX/GNO			
Period	May `91 – Jan `97	Apr `98 – Mar `03	May `91 – Mar `03
R_v	77.5 ± 6.2 ^{+4.3} _{-4.7}	62.9 ± 5.4 ± 2.5	69.3 ± 4.1 ± 3.6

SAGE			
Period	Jan `90 - Oct `99		Jan `90 Dec `03
R_v	75.4 ^{+7.0} _{-6.8} ^{+3.5} _{-3.0} *	< 60 ??	66.9 ^{+3.9} _{-3.8} ^{+3.6} _{-3.2}

GALLEX – GNO



Test hypothesis of time constancy of ν signal:

1. Test of Likelihood Ratio \rightarrow C.L. 5.6 %
2. χ^2 flat fit = 13.6 (6 d.o.f.) \rightarrow C.L. 3.4%

Radiazione Cherenkov (Pavel Cherenkov, 1939)

Una particella carica che si muova in un mezzo trasparente, di indice di rifrazione n , ad una velocità superiore a quella della luce nel mezzo (c/n), genera un'onda coerente di shock nel mezzo (analoga a quella generata da un aereo supersonico nell'atmosfera).

La radiazione è concentrata lungo la superficie di un cono avente angolo di apertura:

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$$

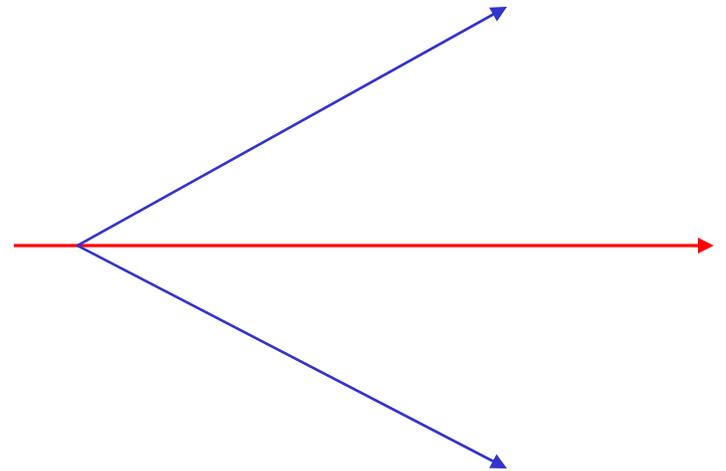
dove $\beta = v/c$ e v la velocità della particella.

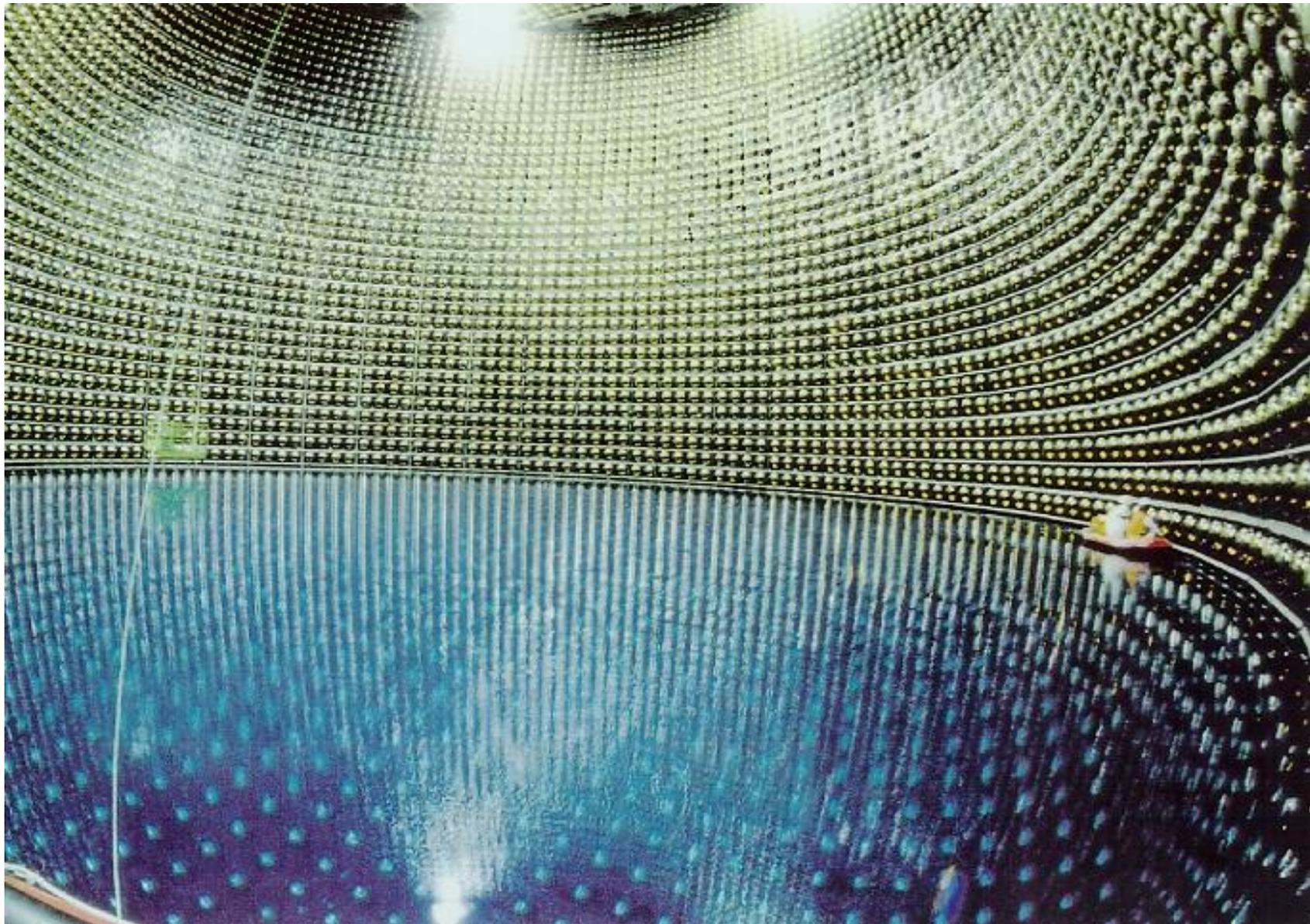
La direzione della particella che ha generato la radiazione può essere facilmente ottenuta dalla misura del fronte d'onda.

Il numero di fotoni generati per unità di percorso è espresso, in funzione della lunghezza d'onda λ da:

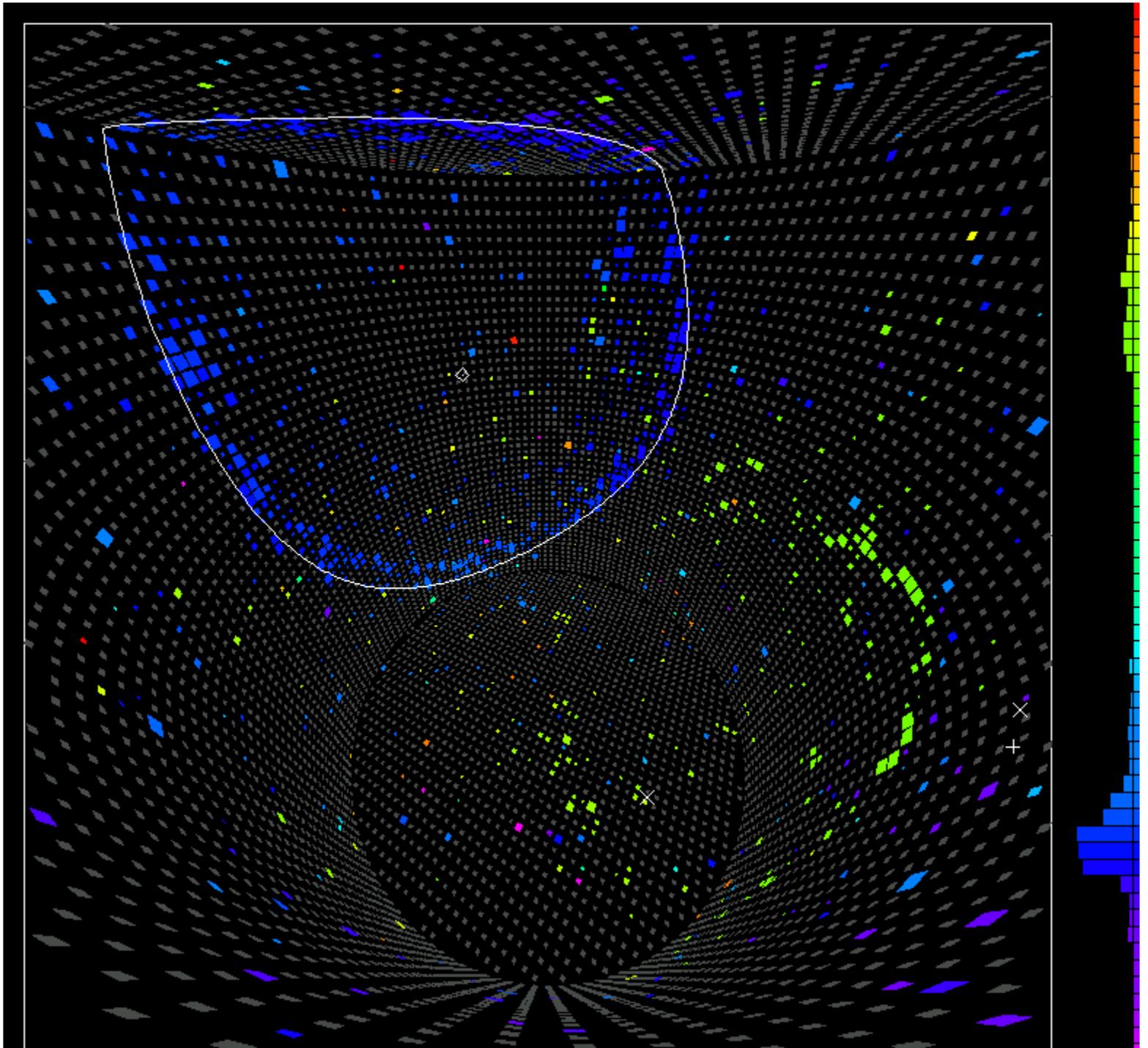
$$\frac{dN}{d\lambda dx} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right)$$

dove Z è la carica della particella e α la costante di struttura fine.

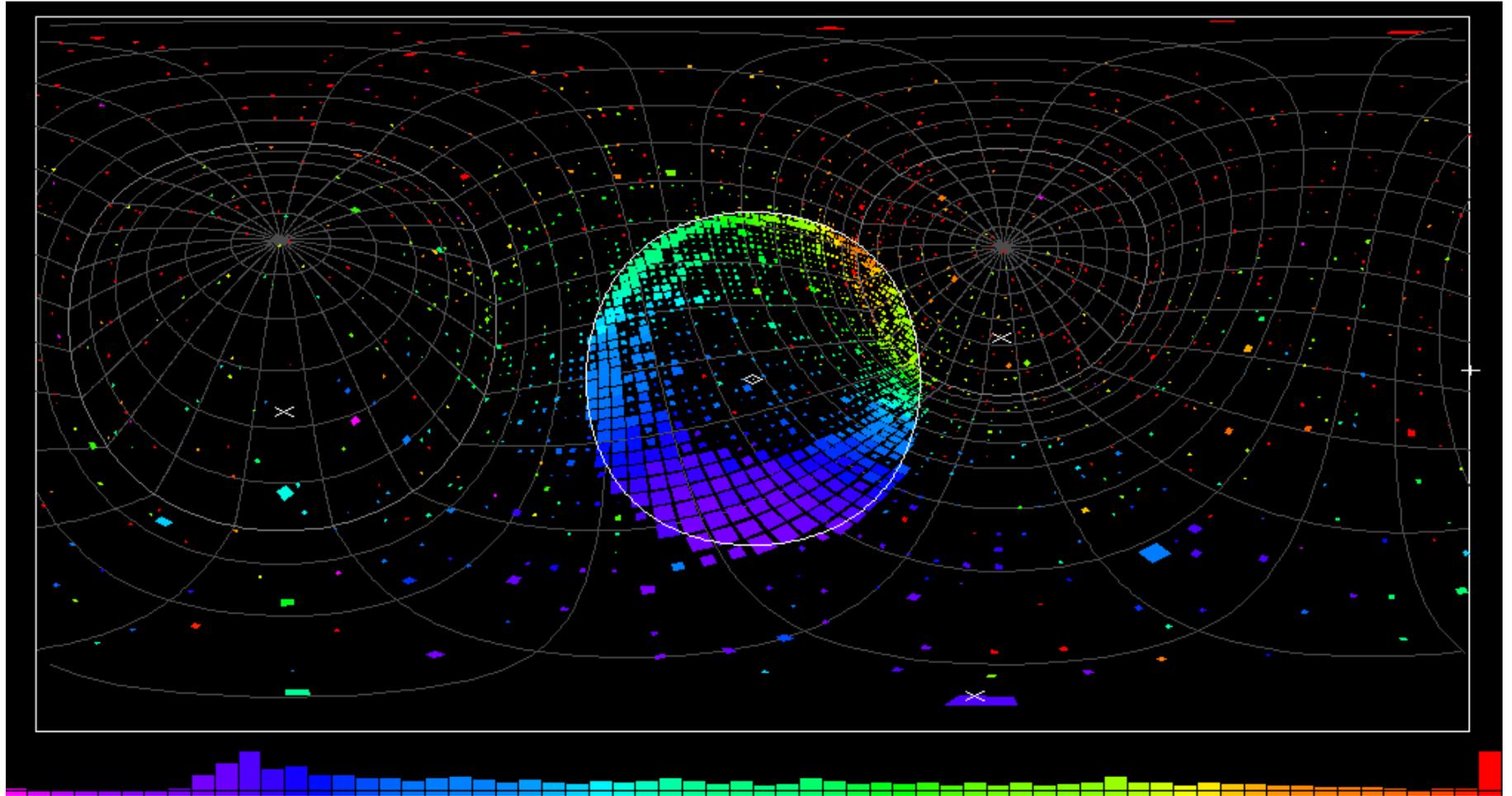




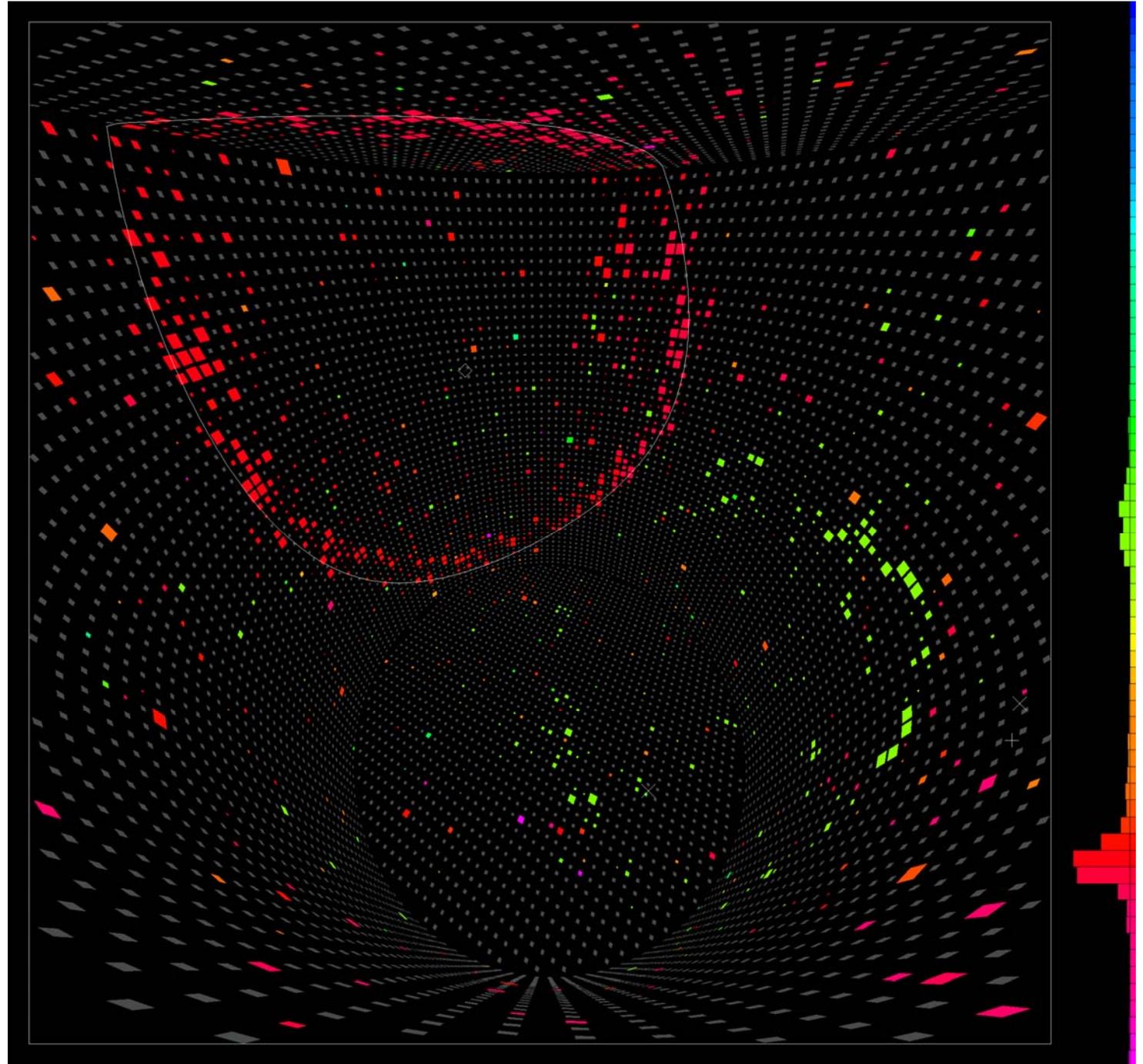
Cerenkov(1)



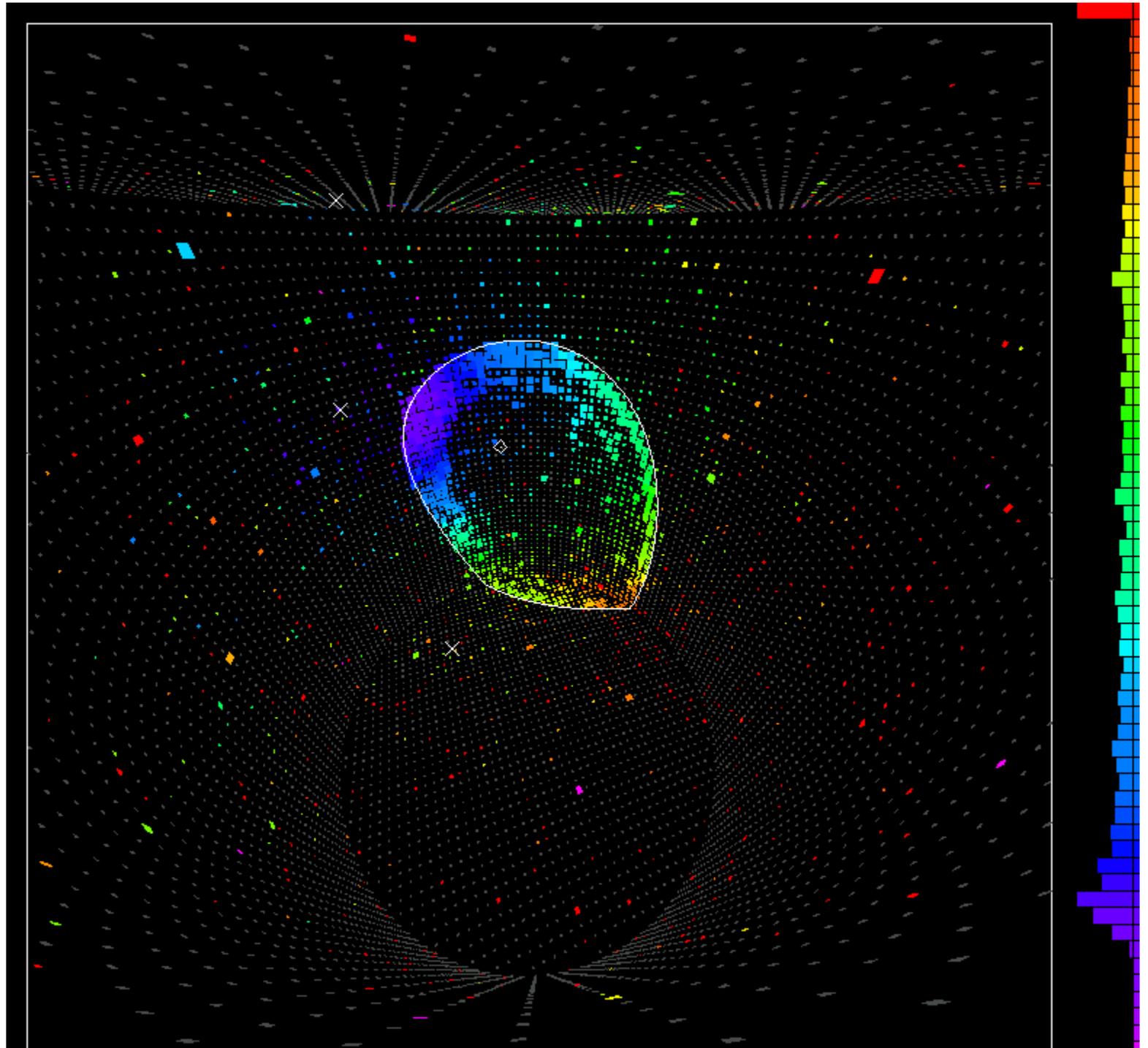
Cerenkov(2)



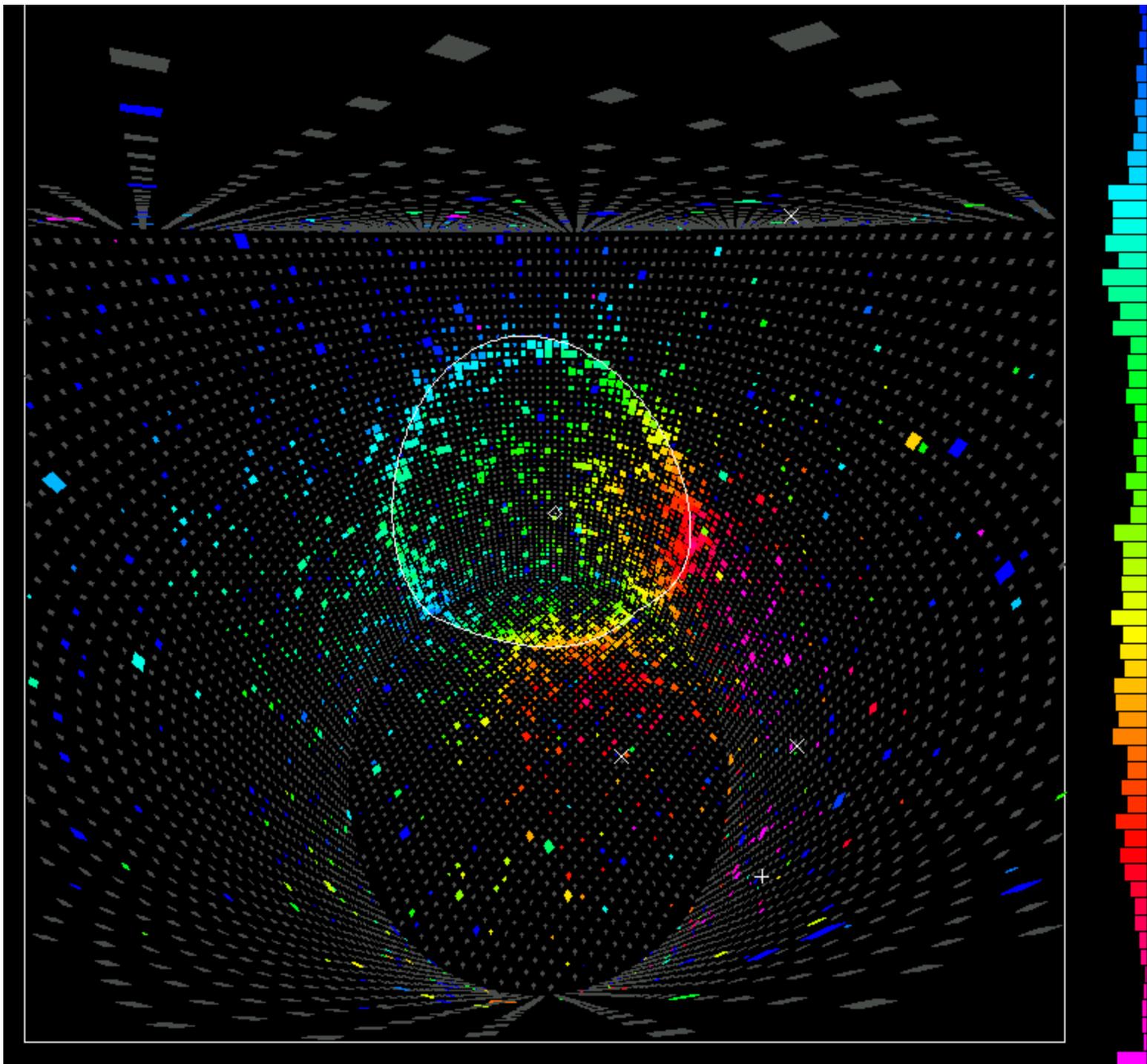
Cerenkov(3)



Cerenkov(4)

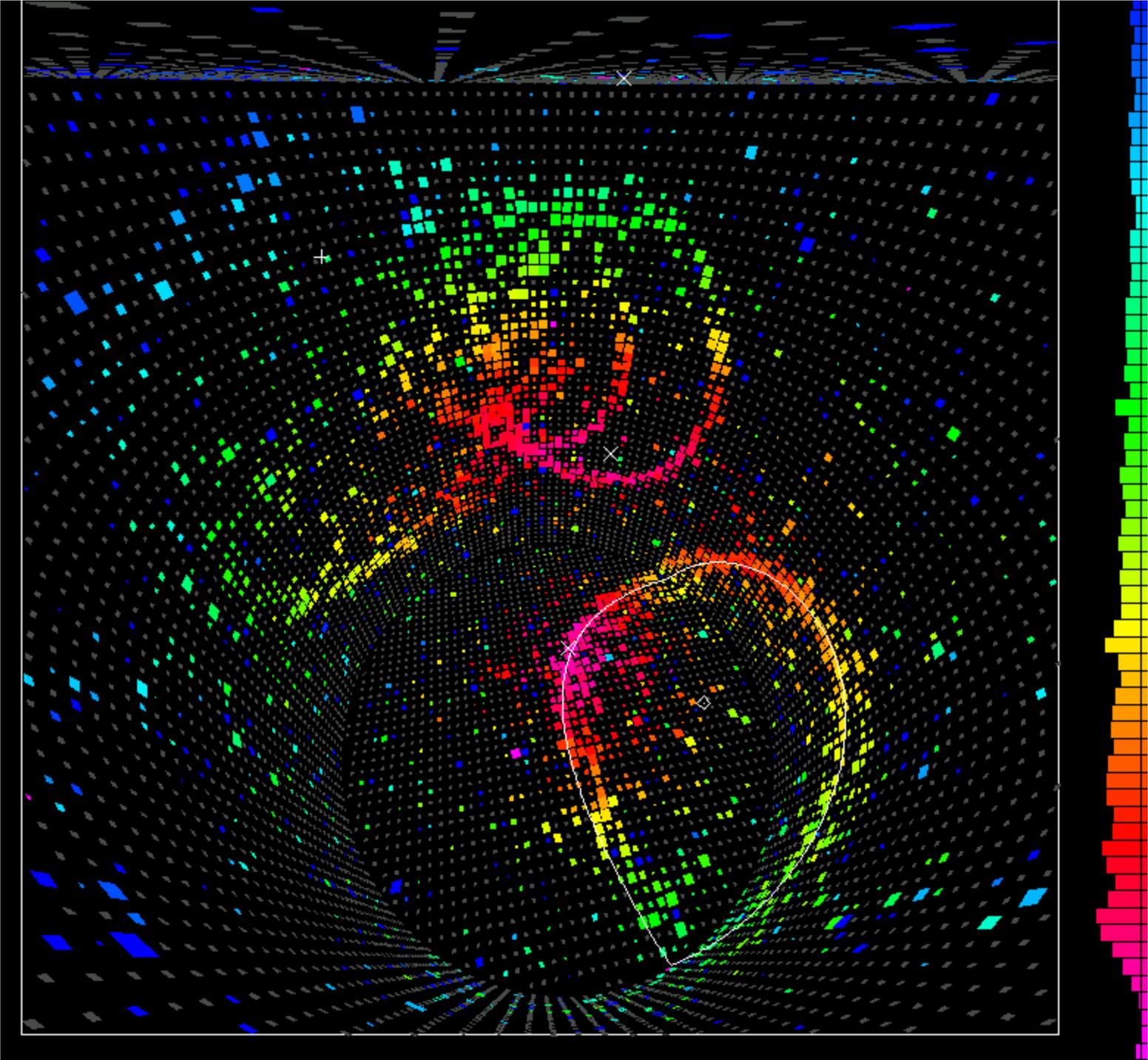


Cerenkov(5)



Cerenkov(6)

(Multi-Ring)



Superkamiokande(1)

Esperimenti in “tempo reale” con contatori Čerenkov ad acqua per la rivelazione dei neutrini solari

Diffusione elastica neutrino – elettrone: $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

Rivelazione della luce Čerenkov emessa dagli elettroni in acqua

Soglia di rivelazione ~ 5 MeV (percorso residuo di elettroni da 5 MeV in $H_2O \approx 2$ cm)

Sezioni d'urto: $\sigma(\nu_e) \approx 6 \sigma(\nu_\mu) \approx 6 \sigma(\nu_\tau)$



Due esperimenti:

Kamiokande (1987 – 94).

Volume utile: $680 \text{ m}^3 H_2O$

Super-Kamiokande (1996 – 2001).

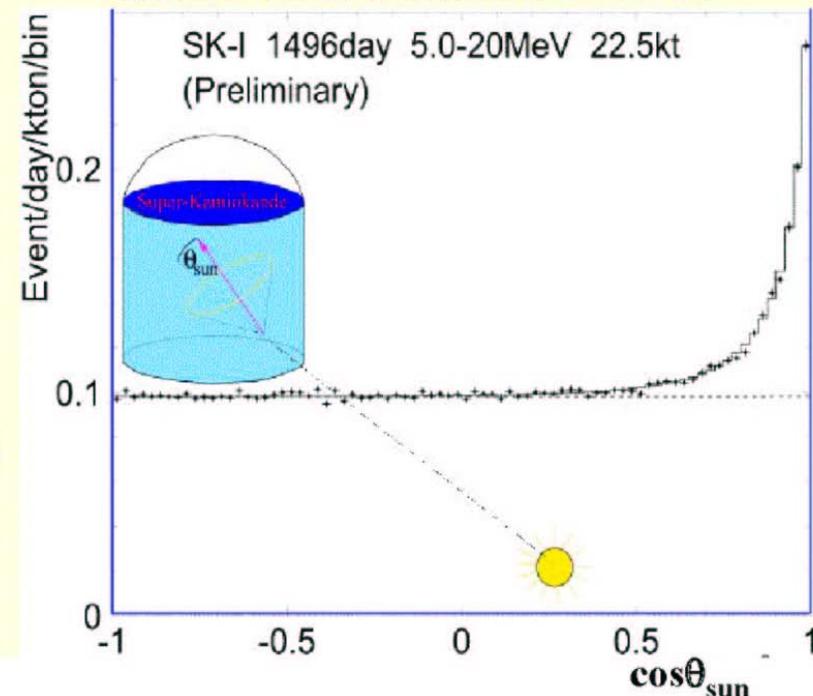
Volume utile: $22500 \text{ m}^3 H_2O$

nella miniera Kamioka (Giappone)

Profondità $2670 \text{ m } H_2O \text{ eq.}$

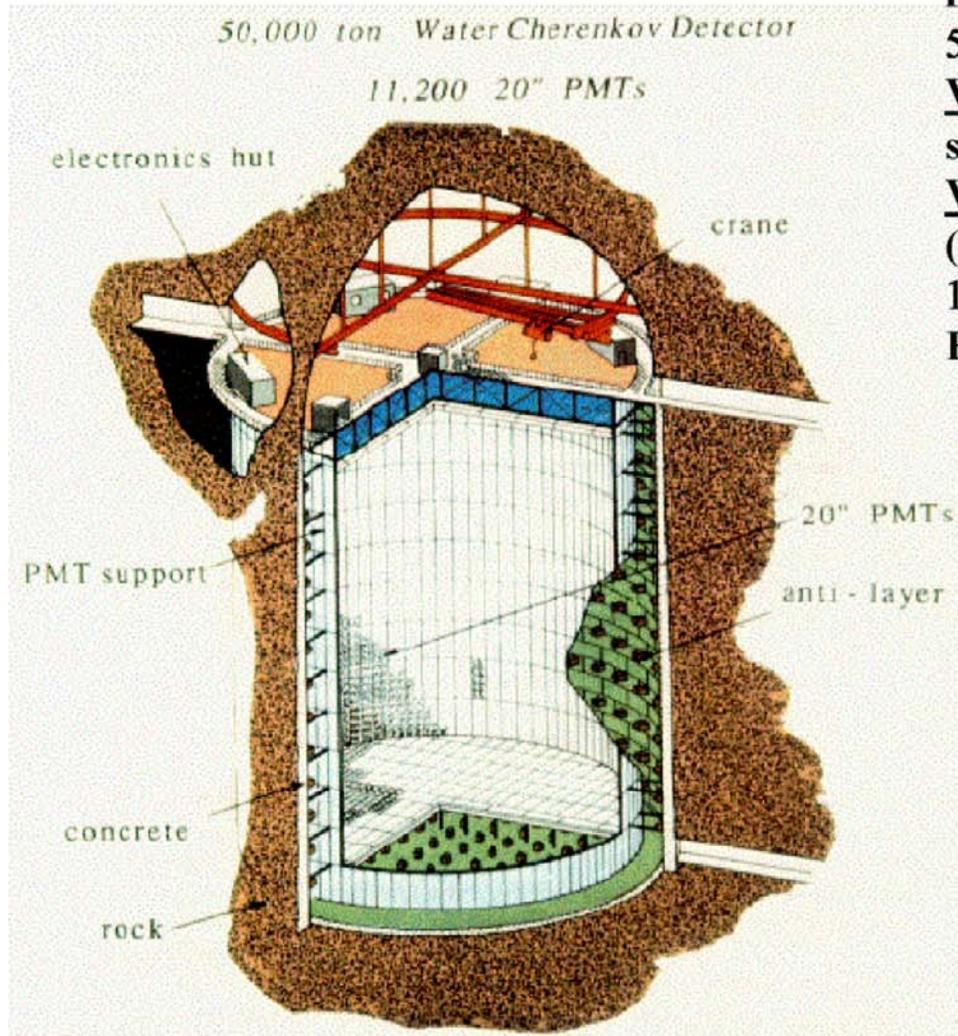
Verifica dell'origine solare del segnale dalla correlazione angolare tra le direzioni dell'elettrone rivelato e del neutrino incidente

Solar Peak above 5 MeV



Superkamiokande(2)

Rivelatore Super-Kamiokande



Serbatoio cilindrico

$h = 41.4$ m, diam. = 39.3 m

50 000 tonn. di H_2O pura

Volume esterno (anticoincidenza):

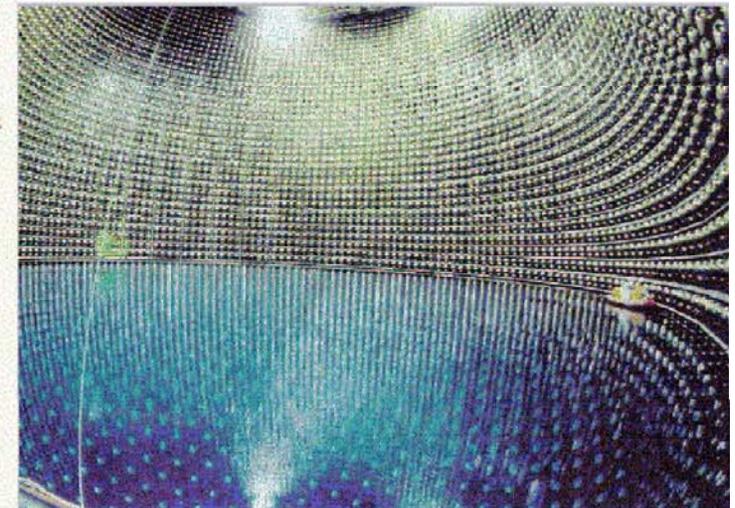
spessore ~ 2.7 m

Volume interno: ~ 32000 m³

(massa fiduciale 22500 tonn.)

11200 fotomoltiplicatori, diam. = 50 cm

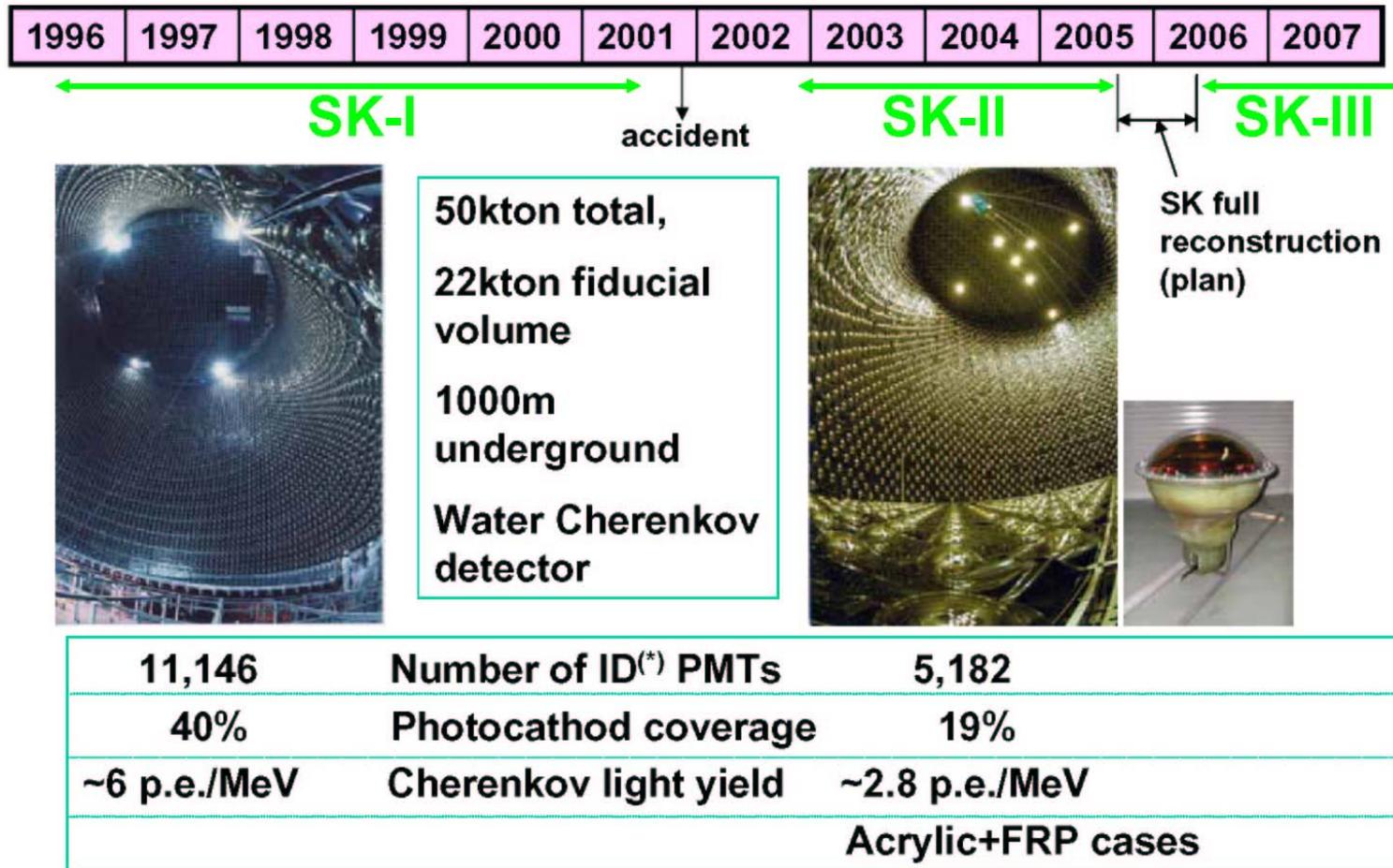
Efficienza di raccolta della luce $\sim 40\%$



Volume interno durante
il riempimento con acqua

Superkamiokande(3)

Super-Kamiokande detector

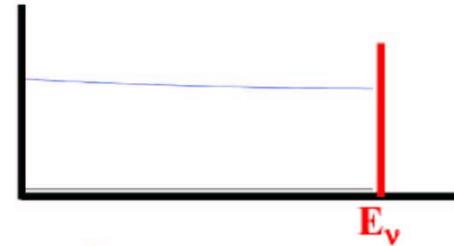


Number of ID PMTs will be back to 11,146 in SK-III.

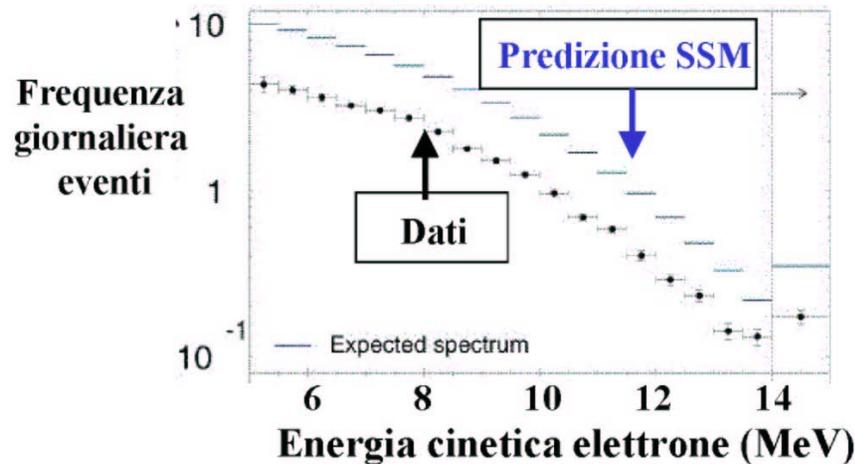
(*) Inner Detector

Superkamiokande(4)

Distribuzione dell'energia cinetica dell'elettrone da diffusione elastica $\nu_e - e$ di neutrini mono-energetici: praticamente piatta tra 0 and $2E_\nu/(2 + m_e/E_\nu)$



Convoluzione con lo spettro dei neutrini predetto
 \Rightarrow predizione SSM della distribuzione dell'energi degli elettroni



Risultati da 1496 giorni di presa – dati (22400 eventi)

Flusso misurato (assumendo totalità di ν_e): $\Phi(\nu_e) = (2.35 \pm 0.02 \pm 0.08) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 (stat) (sist)

Predizione SSM : $\Phi(\nu_e) = (5.05)_{-0.81}^{+1.01} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Dati/SSM = $0.465 \pm 0.005_{(stat)}^{+0.093}$ (errore teorico incluso) \leftarrow DEFICIT DI ν_e
 -0.074

Superkamiokande(5)

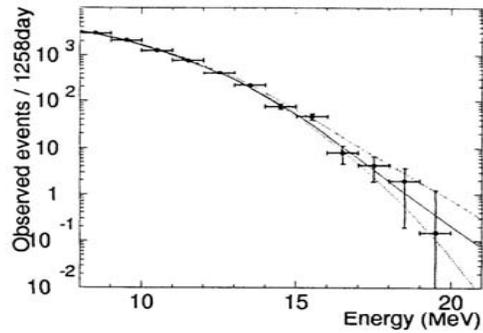


FIG. 5: Energy spectrum of recoil electrons produced by ^8B and *hep* neutrinos, in 1 MeV bins. The points show data with statistical error bars. The curves show expected spectra with various *hep* contributions to the best-fit ^8B spectrum. The solid, dotted, and dashed curves show the spectrum with 1, 4.3, and 0 times the BP2000 *hep* flux, respectively.

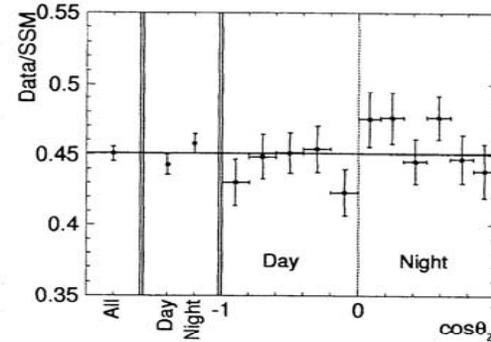


FIG. 2: The solar zenith angle (θ_z) dependence of the solar neutrino flux (error bars show statistical error). The width of the night-time bins was chosen to separate solar neutrinos that pass through the Earth's dense core ($\cos \theta_z \geq 0.84$) from those that pass through the mantle ($0 < \cos \theta_z < 0.84$). The horizontal line shows the flux for all data.

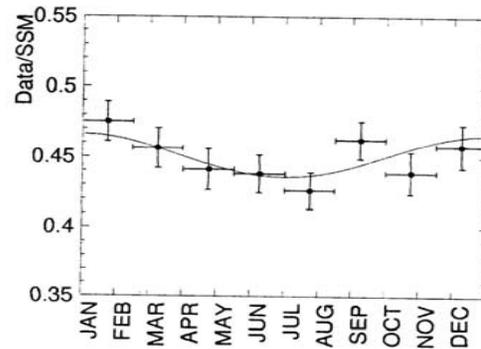
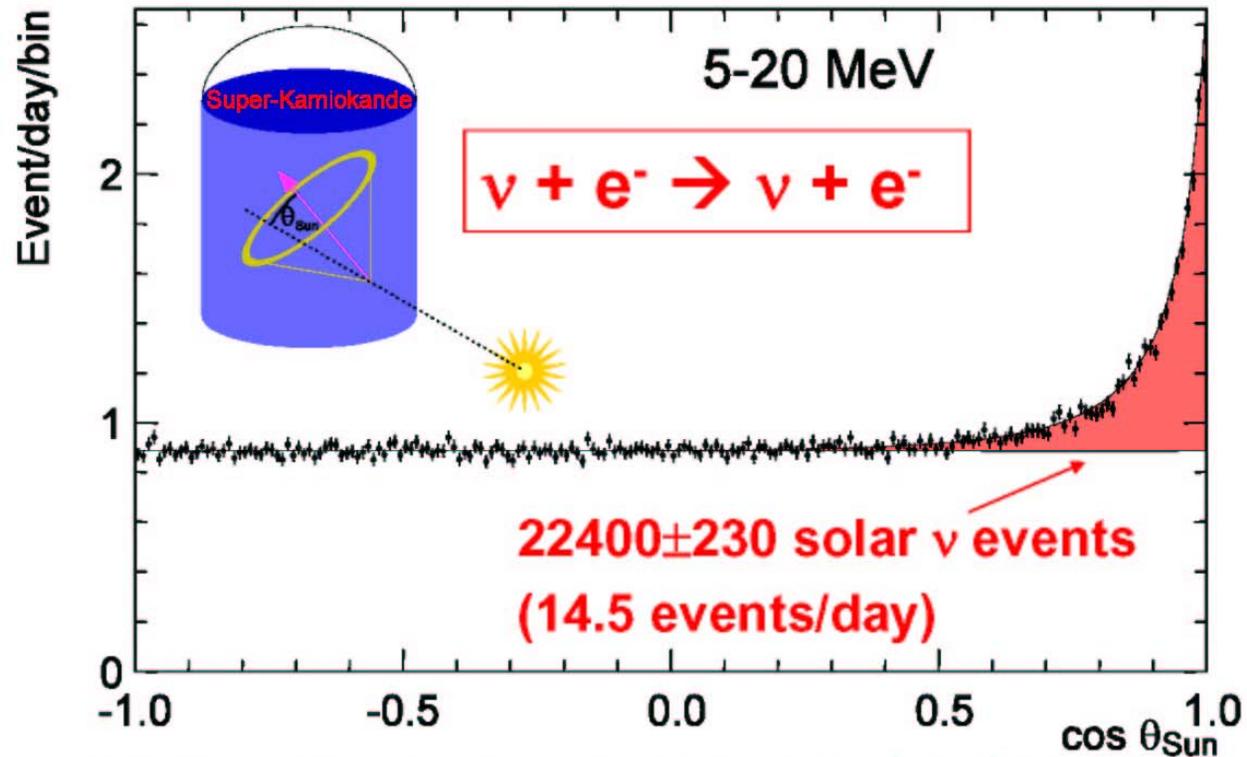


FIG. 4: Seasonal variation of the solar neutrino flux. The curve shows the expected seasonal variation of the flux introduced by the eccentricity of the Earth's orbit. Error bars show statistical errors only.

SK(angle)

Super-Kamiokande-I solar neutrino data

May 31, 1996 – July 13, 2001 (1496 days)



^8B flux : $2.35 \pm 0.02 \pm 0.08$ [$\times 10^6$ /cm 2 /sec]

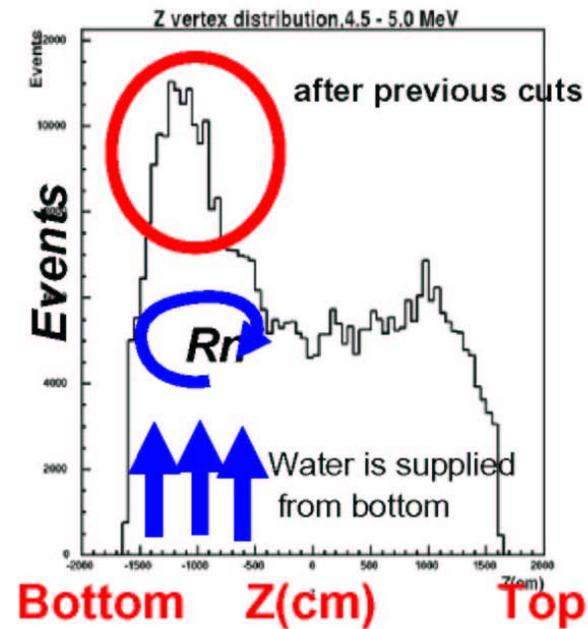
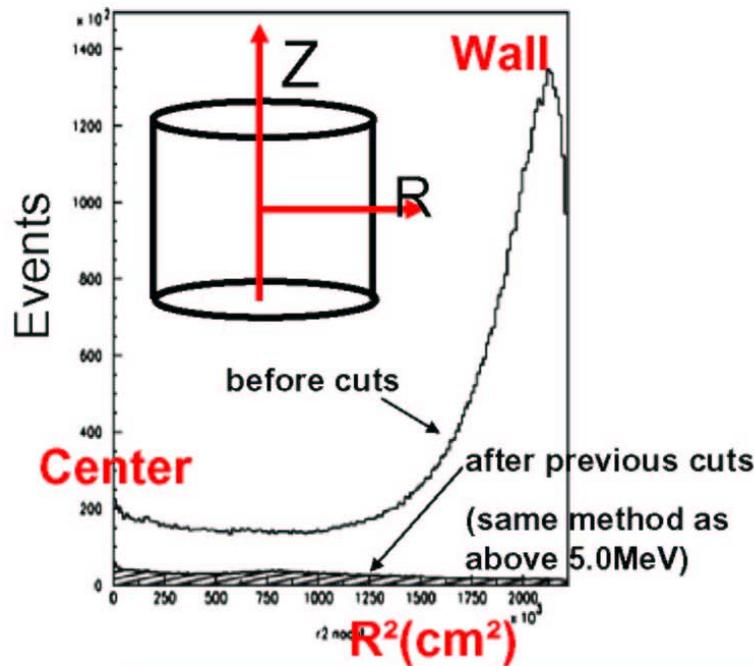
$$\frac{\text{Data}}{\text{SSM(BP2004)}} = 0.406 \pm 0.004 \begin{matrix} +0.014 \\ -0.013 \end{matrix}$$

(Data/SSM(BP2000) = 0.465 ± 0.005 +0.016/-0.015)

SK(Backgr)

Analysis of lower energy region in SK-I

Vertex position distribution of background (4.5 – 5.0 MeV)



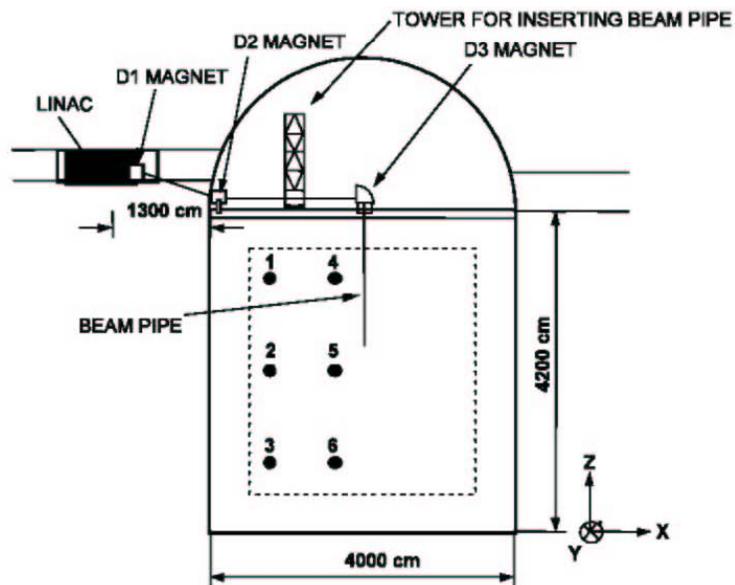
- Apply tighter cuts to reduce external background.
- Use improved vertex reconstruction program.
- Remove high radon periods.
- Select period when trigger eff. for 4.5-5.0 MeV is >95%.
(466 days, Sep. 1999-July 2001)

SK(Calibr)

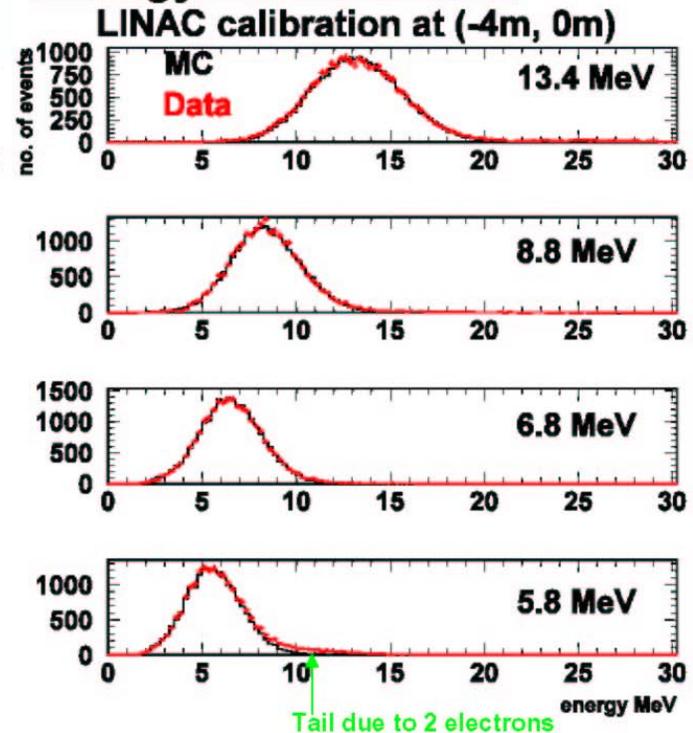
Detector calibration in SK-II

- PMT relative gain calibration by using $\text{Ni}(n,\gamma)\text{Ni}$ source and an uniform light source (Xe-scintillation ball).
- Timing calibration by N_2 -DYE laser ball.

LINAC calibration data were taken at 6 positions.



Energy distributions

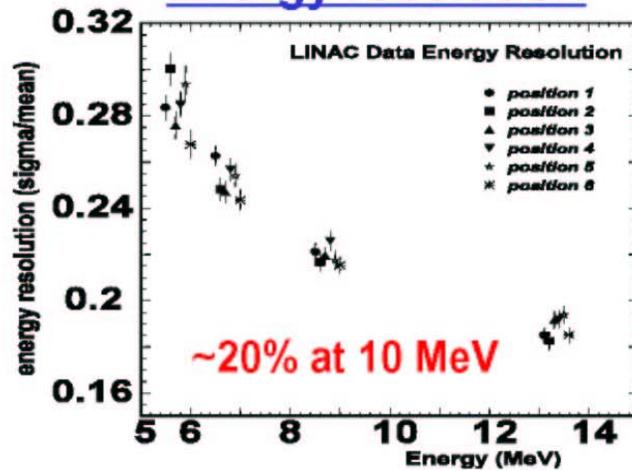


SK(Perform)

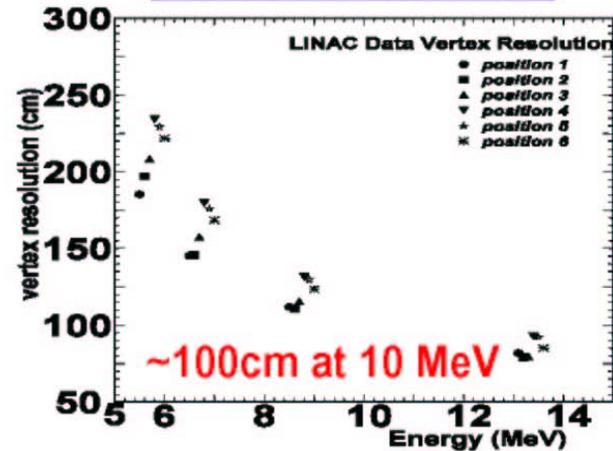
SK-II detector performance

• LINAC calibration •

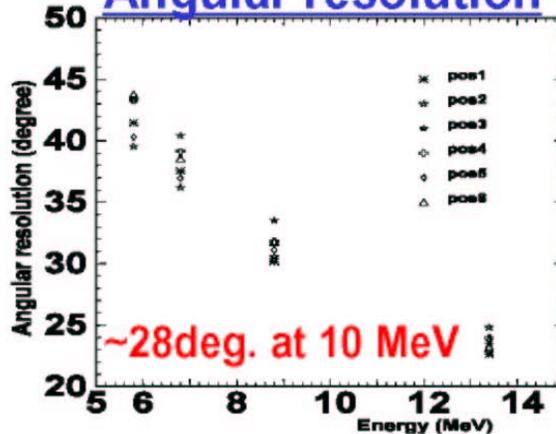
Energy resolution



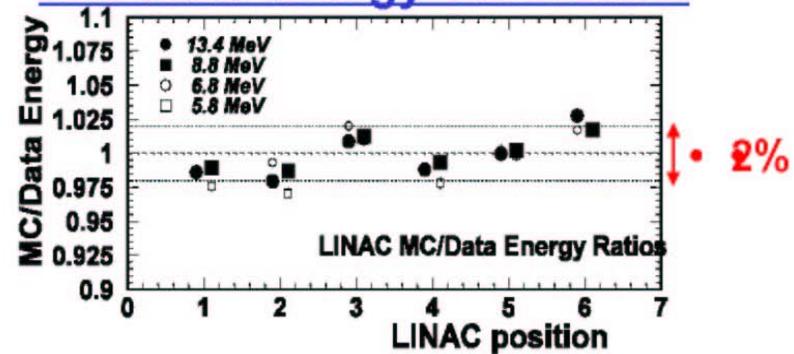
Vertex resolution



Angular resolution



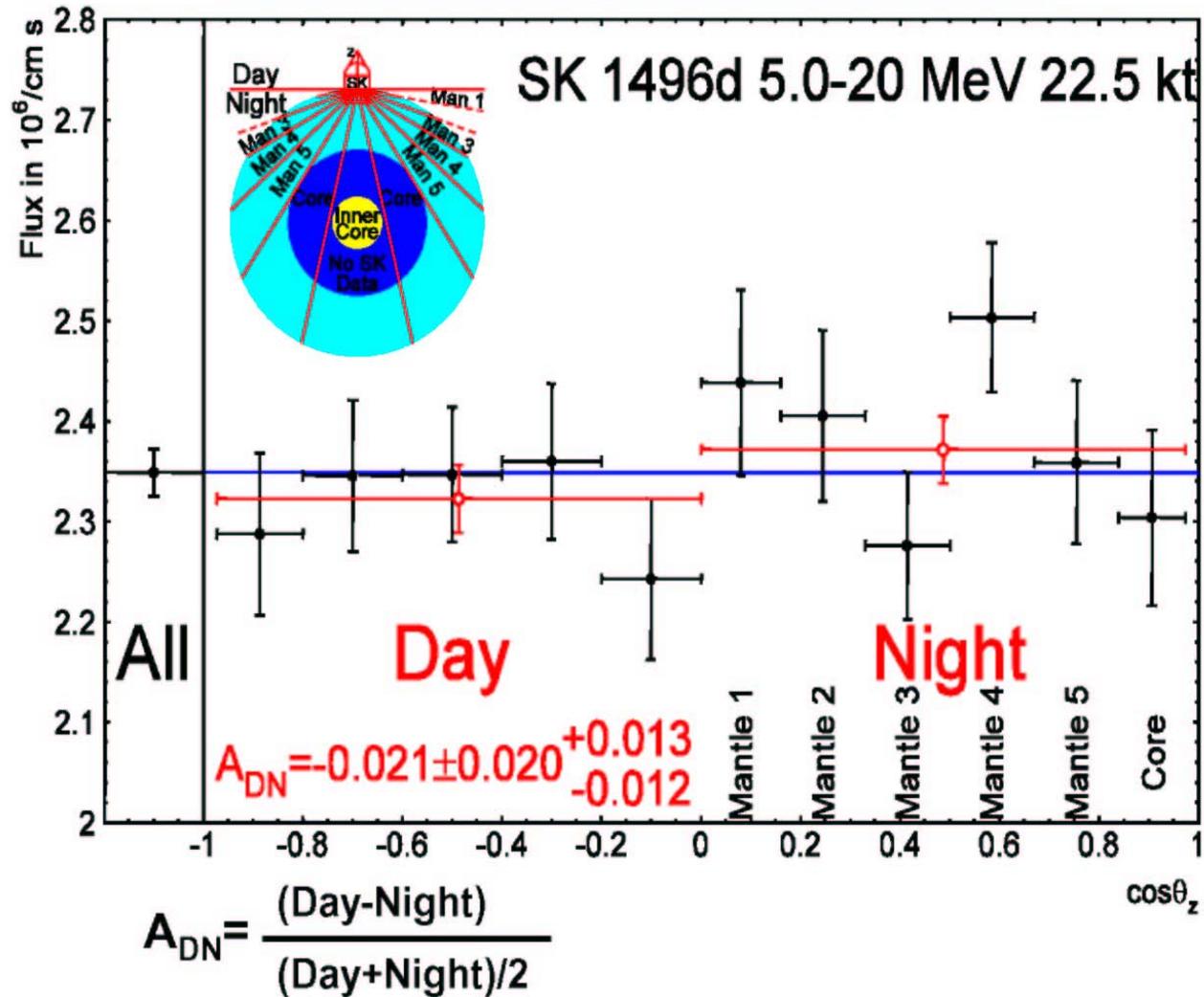
Absolute energy calibration



MC tuning is in progress.

SK(day-night)

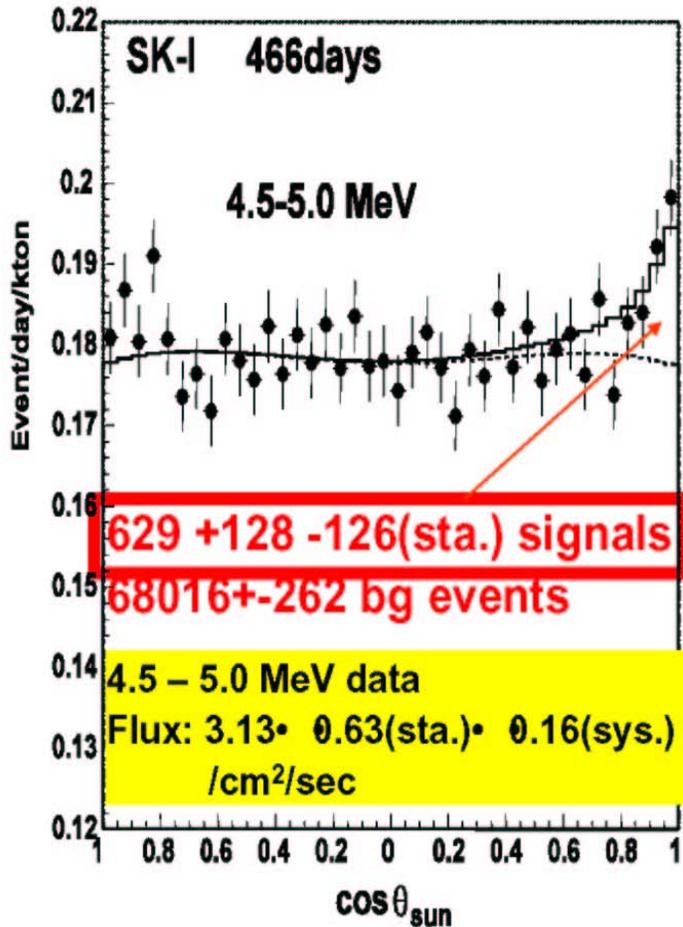
SK-I day/night difference



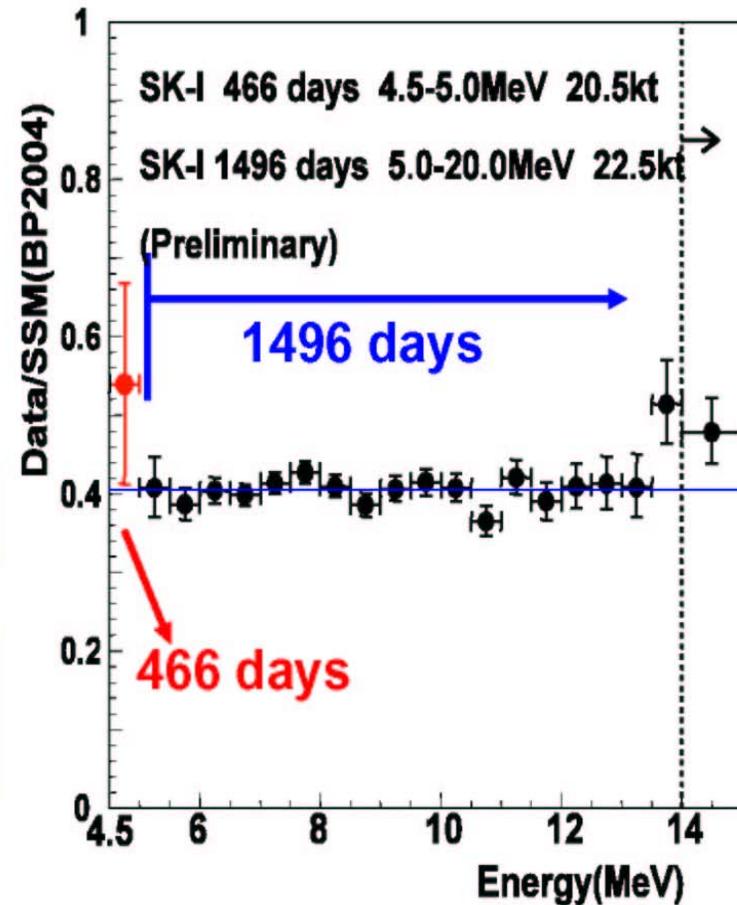
SK(low_energy)

Analysis of lower energy region in SK-I

Direction to the sun



Solar neutrino energy spectrum

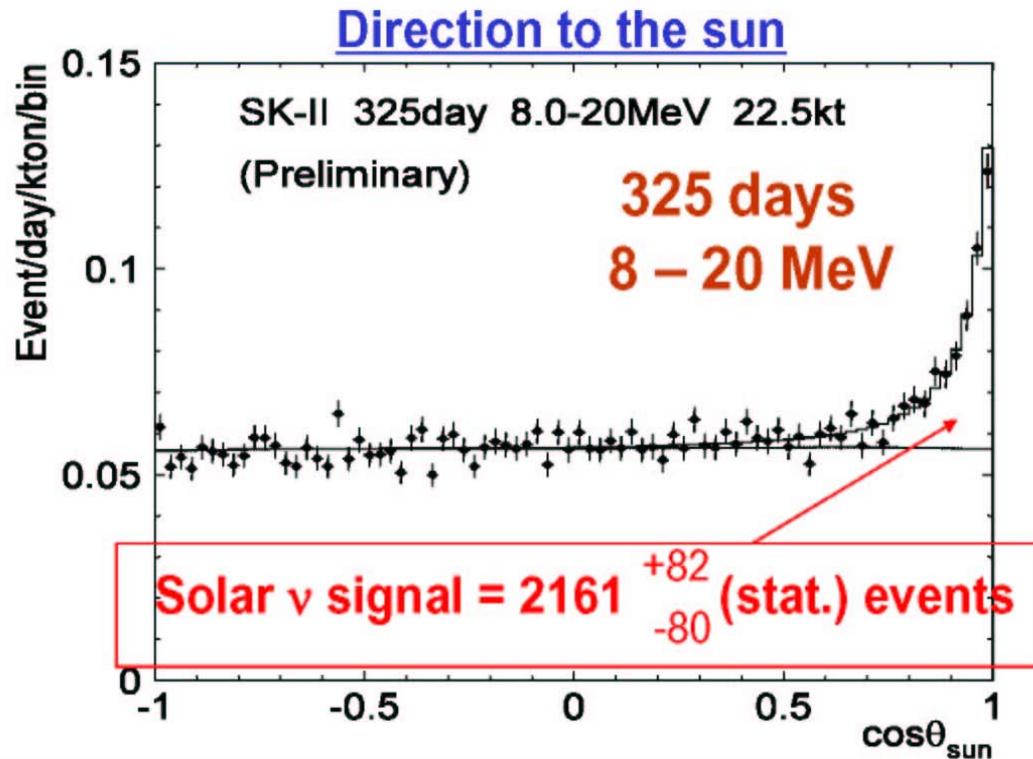


4.5-5.0 MeV data is consistent with previous results.

SK-II(angle)

SK-II preliminary results

Dec.24,2002 – March 25, 2004



Flux = 2.38 ± 0.09 (stat.) ($\times 10^6/\text{cm}^2/\text{s}$)

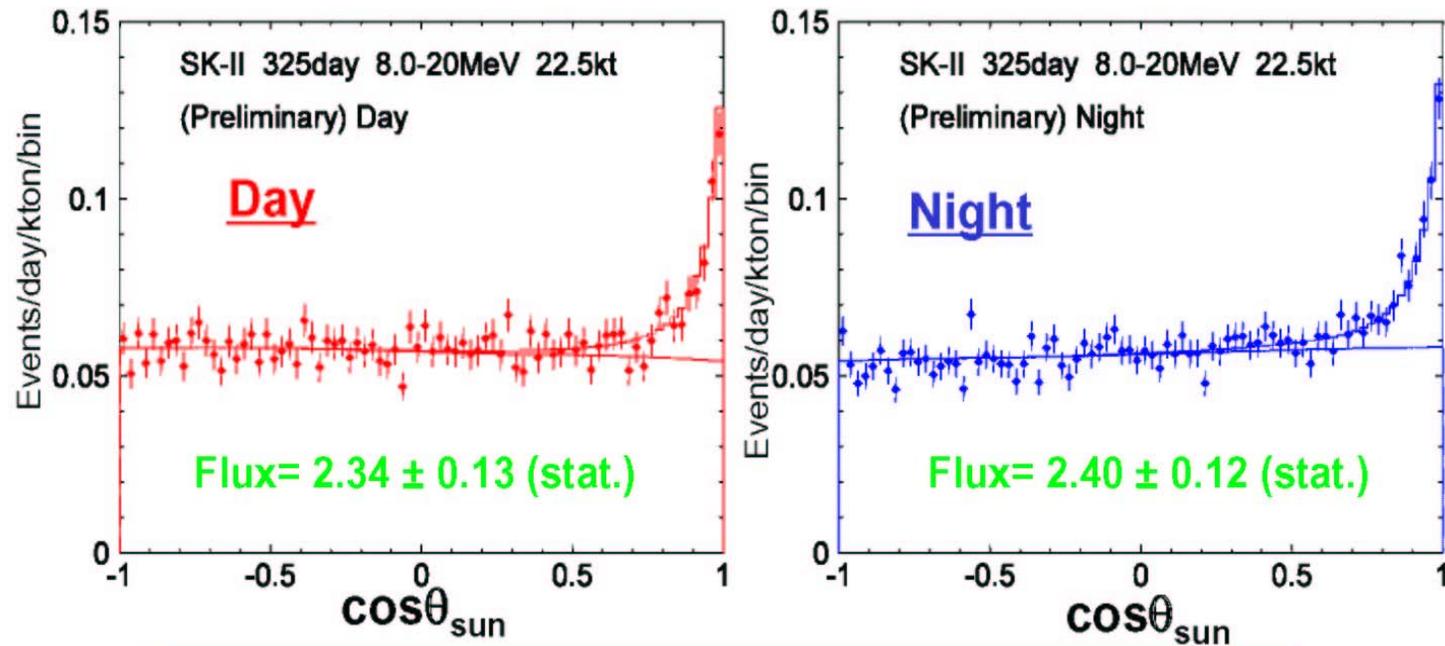
(Systematic error
under study)

(cf. SK-I result: $2.35 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{sys.})$)

SK-II(day-night)

SK-II: Day-Night difference

325 days (Dec.24,2002 – March 25, 2004)

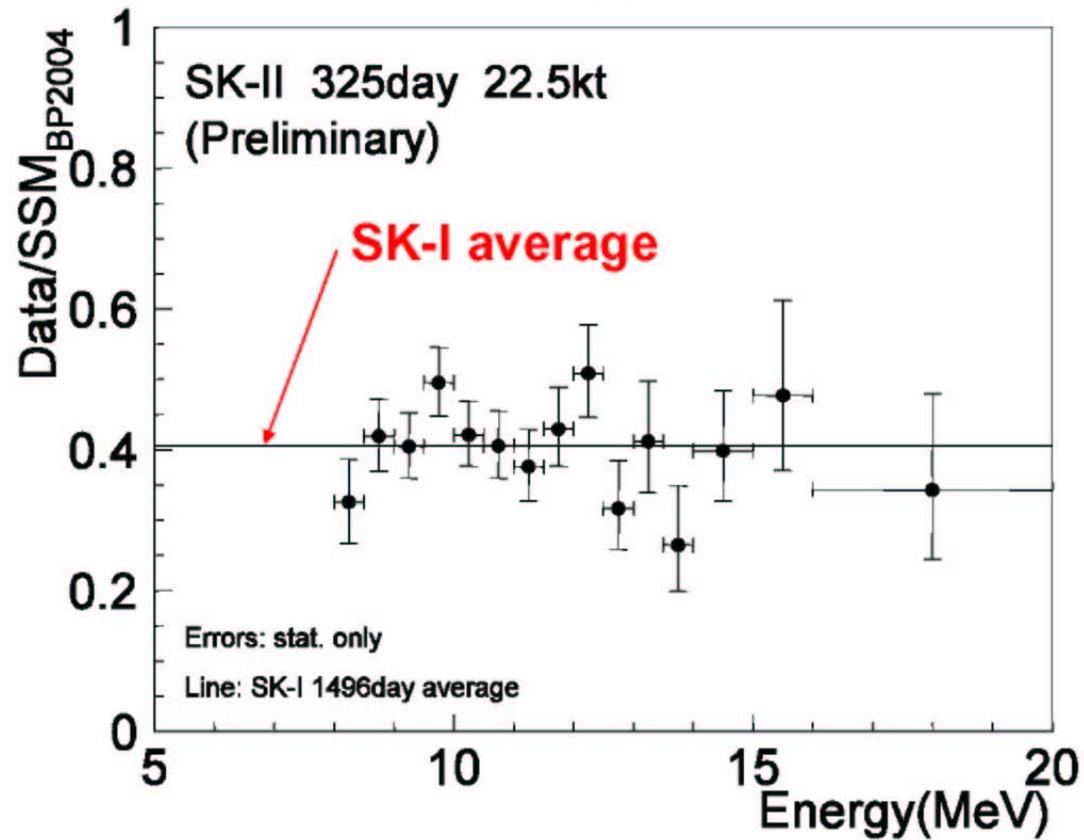


$$A_{DN} = \frac{(D-N)}{(D+N)/2} = -0.025 \pm 0.075 \text{ (stat.)}$$

(Systematic error under study)

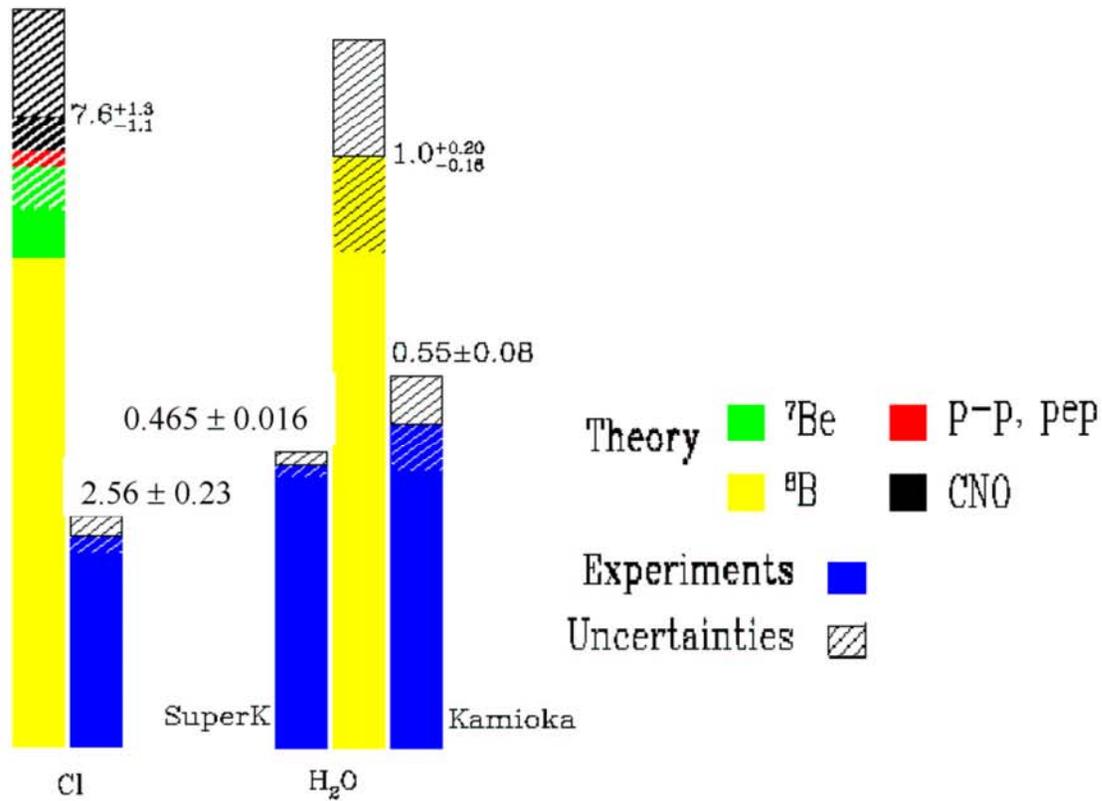
SK-II(energy)

SK-II energy spectrum



Consistent with SK-I

Confronto dei risultati Homestake e Kamioka con le previsioni SSM



Oscillazioni dei neutrini ?

Generati nel Sole: ν_e

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu \quad \text{O} \quad \nu_e \rightarrow \nu_\tau$$

Effetto proporzionale al quadrato della distanza

Inversamente prop. all'inverso del quadrato dell'energia

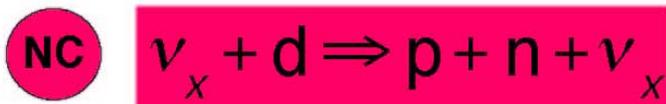
Un ν_μ o ν_τ prodotto non puo' avere interazioni di corrente carica su elettrone (solo corrente neutra) poiche' l'energia del neutrino $e' <$ della massa del leptone (μ o τ) prodotto

SNO

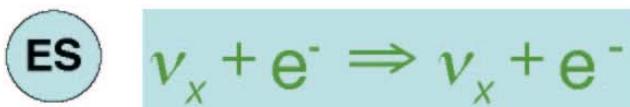
Sudbury Neutrino Observatory



- Gives ν_e energy spectrum well
- Weak direction sensitivity $\propto 1 - 1/3 \cos(\theta)$
- ν_e only.



- Measure total ${}^8\text{B}$ ν flux from the sun.
- Equal cross section for all ν types



- Low Statistics
- Mainly sensitive to ν_e , some sensitivity to ν_μ and ν_τ
- Strong direction sensitivity

Key physics signatures

$$\frac{\Phi_{\text{CC}}}{\Phi_{\text{NC}}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau}$$

$$\frac{\Phi_{\text{CC}}}{\Phi_{\text{ES}}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + 0.154(\nu_\mu + \nu_\tau)}$$

Φ_{day} vs Φ_{night}