

Primi risultati di Borexino e prospettive future

M. Pallavicini
Università di Genova & INFN



Contenuti

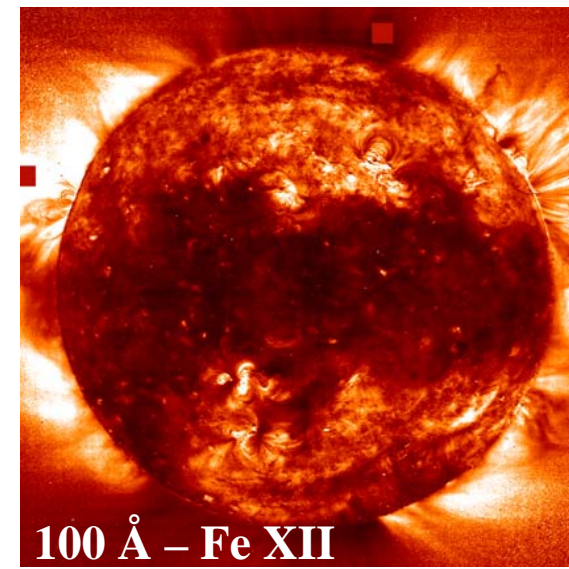
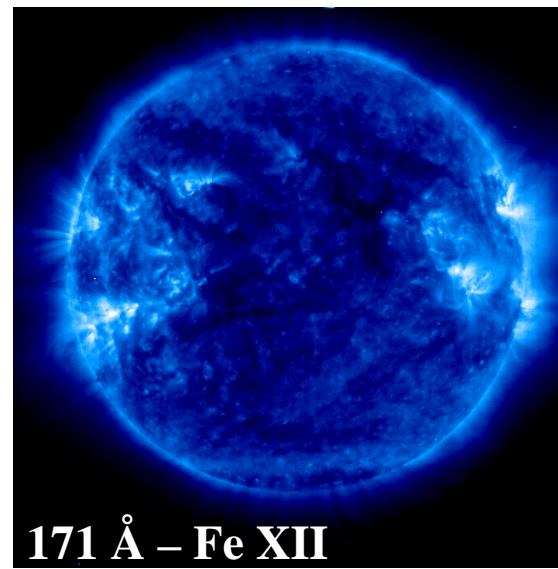
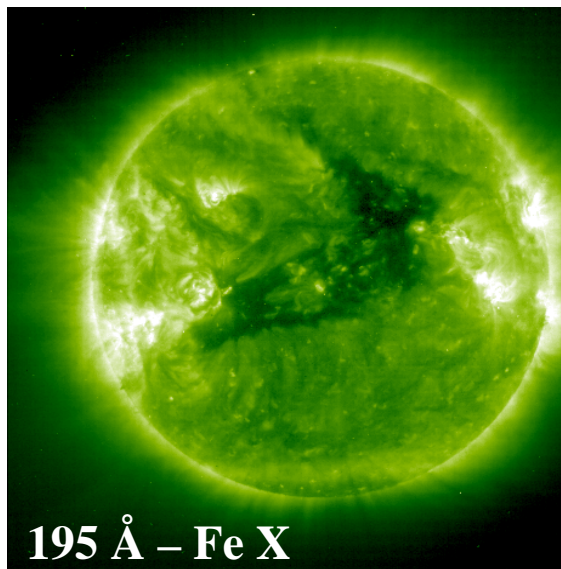


- **Il Sole e i neutrini solari**
 - **I neutrini:** sonda per le reazioni nucleari del Sole
 - **Il Sole:** sorgente per esperimenti di fisica del neutrino
- **Motivazioni per Borexino**
 - Cenni storici al problema dei neutrini solari e sviluppi recenti
 - Il ruolo di Borexino oggi
- **Sviluppo e costruzione dell'esperimento**
 - Difficoltà sperimentali e loro soluzione
- **Primi risultati e prospettive**
 - La prima misura in tempo reale dei ν solari di bassa energia
 - Prospettive scientifiche

Il Sole (I)

- Il Sole è la stella ovviamente meglio conosciuta e più studiata
 - I fotoni in tutto lo spettro danno un'enorme quantità di informazioni, ma solo sulla superficie del Sole
 - Per la struttura profonda dobbiamo basarci su modelli e estrapolazioni
 - Eliosismologia, ad esempio

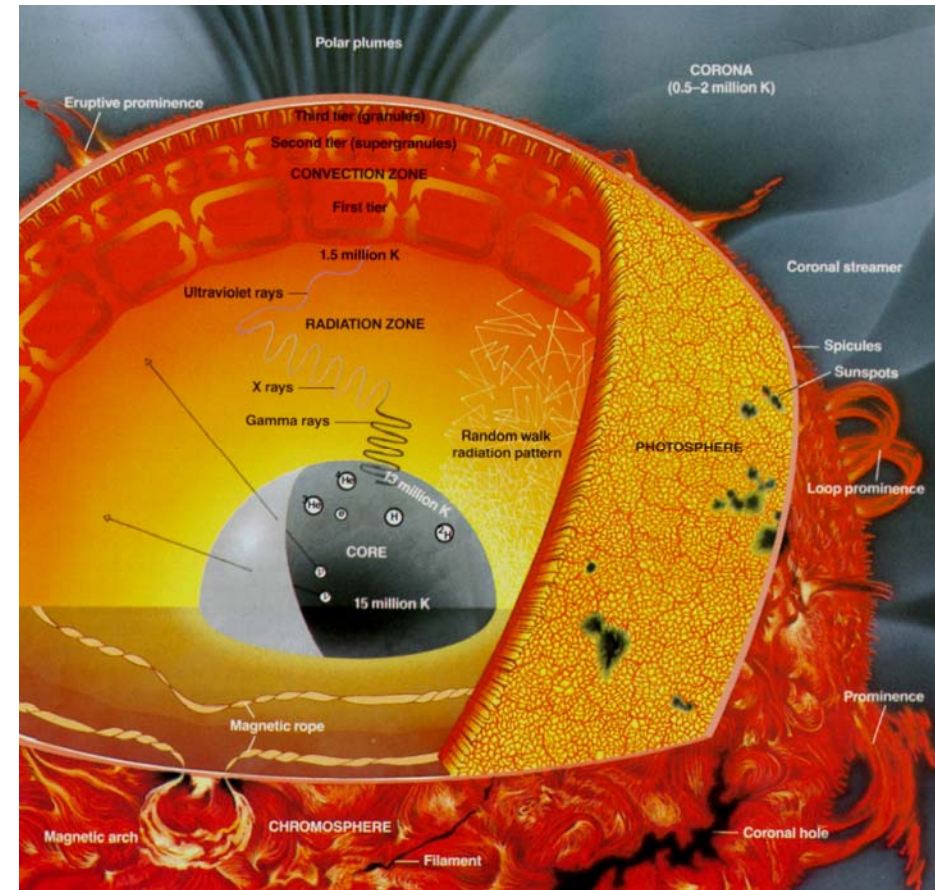
Luce bianca



Il Sole (II) - Struttura



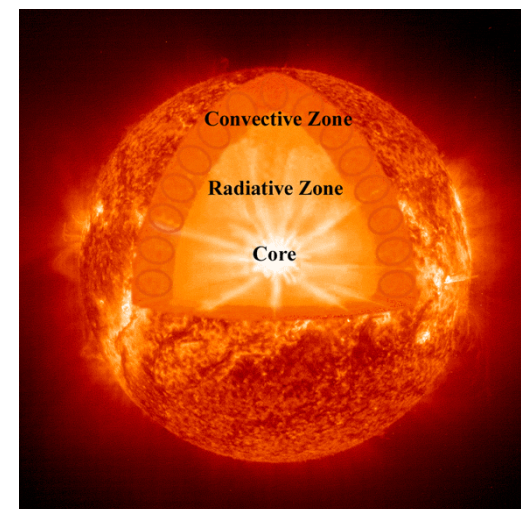
- **0 - 0.25 R_s** (0.7 10^6 Km): nocciolo
 - Reazioni nucleari: $T \sim 1.5 \cdot 10^7$ °K
 - Ciclo pp e ciclo CNO
 - $7 \cdot 10^{11}$ Kg/s di idrogeno in elio
- **0.25 - 0.75 R_s** : zona radiativa
 - I fotoni trasportano l'energia in $\sim 10^5$ y
- **0.75 - 1.0 R_s** : zona convettiva
 - Forte convezione e turbolenza
 - Complessi fenomeni superficiali molto studiati, ma non ancora del tutto capiti
- **$> R_s$** : corona
 - Gas a milioni di gradi
 - Complessi fenomeni magneto-idrodinamici poco capiti



Reazioni nucleari solari



- Da molto tempo è chiaro che le reazioni che tengono in funzione il Sole (e tutte le stelle) sono le reazioni nucleari del **ciclo pp** e del **ciclo CNO**
 - Nel ciclo pp, 4 protoni si fondono in un nucleo di ^4He con liberazione di circa 27 MeV di energia
 - E' il ciclo fondamentale per tutte le stelle non troppo calde, come il Sole
 - Nel ciclo C-N-O, questi elementi catalizzano la produzione di ^4He , senza essere consumati nella reazione
 - Questo ciclo è quello dominante per stelle calde
 - Nel Sole dovrebbe contribuire per 1-2 % ma la cosa è ancora molto incerta
 - ☞ Recenti nuove misure di “metallicità” hanno cambiato di un fattore 2 il contributo



astro-ph/0410214

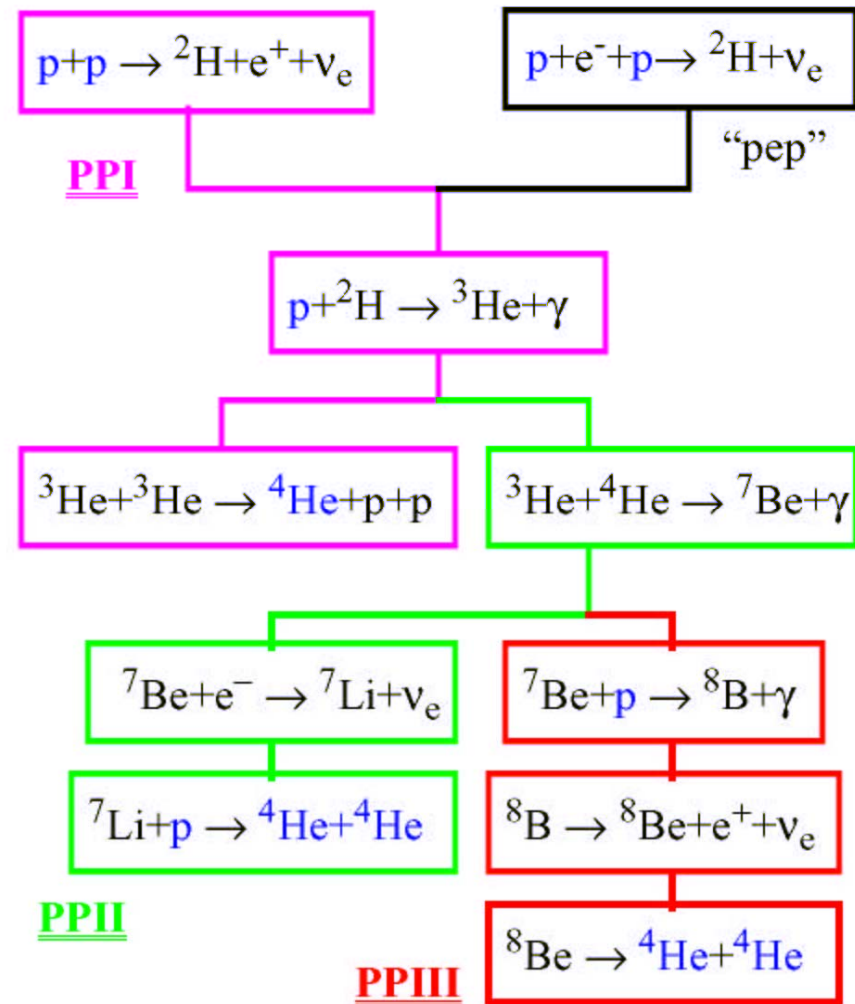
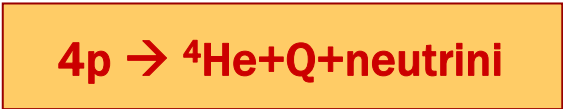
Reazioni nucleari solari: ciclo pp



- Il ciclo pp

- E' il ciclo dominante per stelle non troppo calde come il Sole
- Il ciclo si divide in vari rami, ognuno dei quali è associato all'emissione di neutrini di varia energia

- Complessivamente:

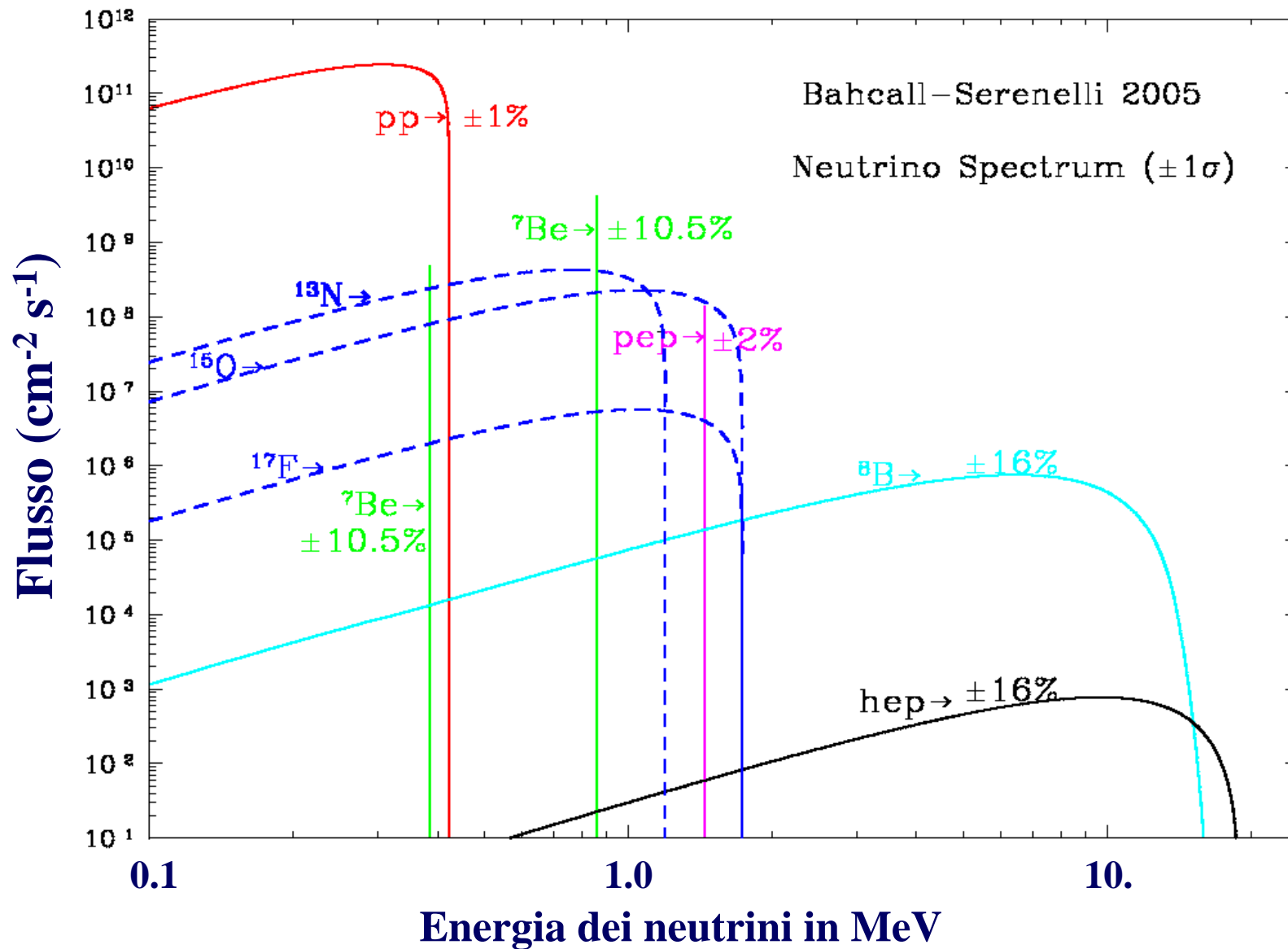


Che cosa è un “modello solare” ?



- E' un modello **evolutivo** del Sole che ne segue la storia dalla formazione fino a oggi
 - Include:
 - Equazioni di equilibrio idrostatico
 - Bilancio energetico e di massa
 - Reazioni nucleari
 - Trasporto dell'energia (irraggiamento e convezione)
 - Dipende da molti parametri e/o assunzioni
 - Composizione chimica iniziale
 - Sezioni d'urto nucleari
 - Campi magnetici, rotazione
- Fra l'altro, il modello determina la temperatura oggi del nucleo, e quindi la produzione di neutrini
 - Incertezze dovute alla composizione chimica, alle sezione d'urto nucleari

Neutrini dal Sole



Rivelazione ν solari



- Il flusso di neutrini solari a Terra è $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (energia 0.1 – 10 MeV)
 - I neutrini sono accoppiati alla materia solo da interazioni deboli.
 - $\sigma = 10^{-46} - 10^{-43} \text{ cm}^2$ dipendente dal processo e dall'energia.
 - λ in acqua $\sim 30 \text{ pc}$ a 1 MeV.

- I rivelatori di ν devono essere grossi! (massivi)

- Esempio: ν solari da 1 MeV

$$\Phi \approx 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$
$$\sigma \approx 2 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2 \Rightarrow R \approx 2 \cdot 10^{-38} \text{ s}^{-1} \text{ per atomo bersaglio}$$

- Se vogliamo 1 evento/mese

$$\Delta t = 2.5 \cdot 10^6 \text{ s} \Rightarrow \frac{1}{2 \cdot 10^{-38} \cdot 2.5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{31} \text{ atomi} = 600 \text{ t H}_2\text{O}$$

- I rivelatori devono essere **sotterranei**

- Con questi numeri, il fondo dovuto ai raggi cosmici è intollerabile
 - Sotto il Gran Sasso, il flusso di cosmici è ridotto di un **fattore 10^6**

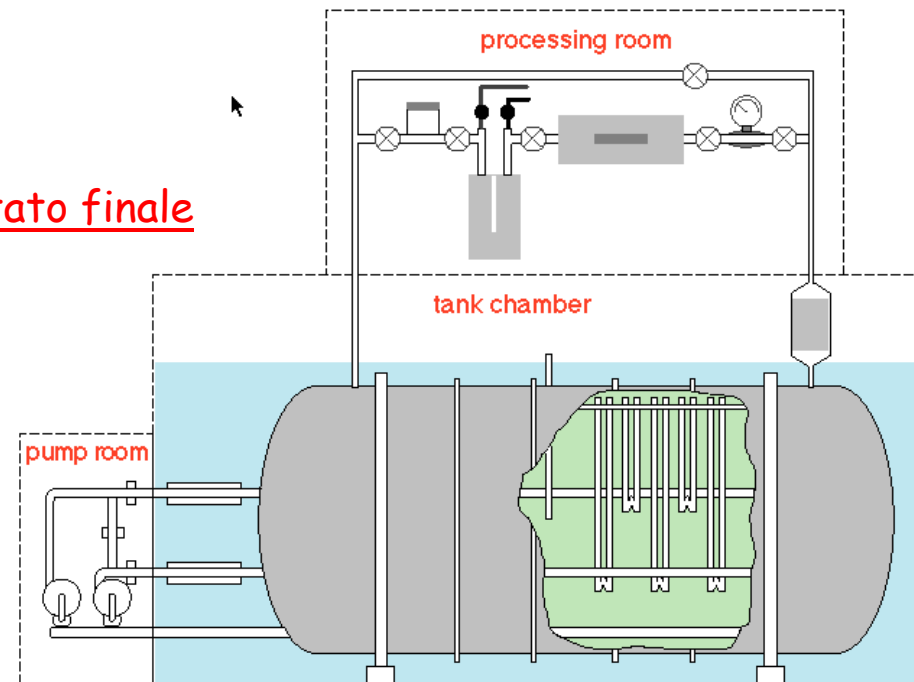
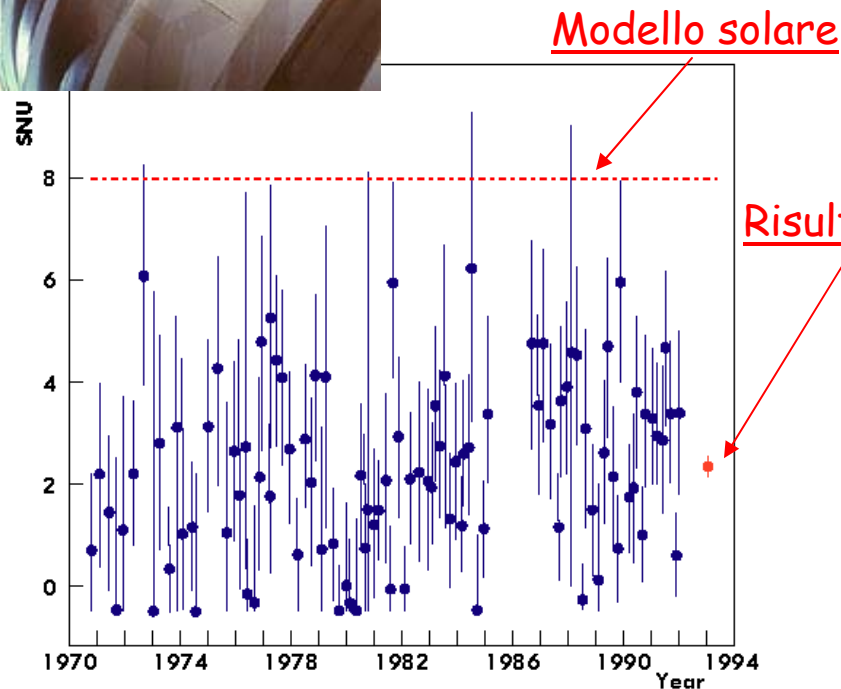
Homestake: 1970-1995 (Nobel 2002)



- L'esperienza di **R. Davies**: 1 atomo al giorno in 10^{31} atomi!



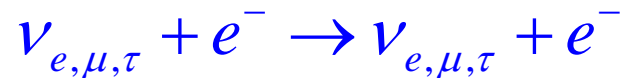
- Bersaglio: una tanica con 614 t di detergente liquido (C_2Cl_4)
- Estrazione degli atomi di ${}^{37}\text{Ar}$ con filtri al carbone e loro conteggio con rivelatori proporzionali (cattura elettronica)



Kamiokande: 1986- (Nobel 2002)

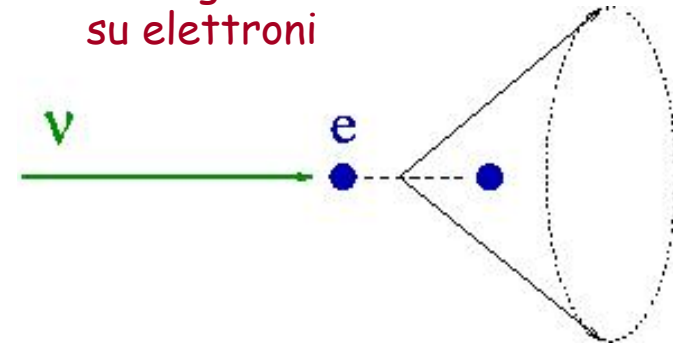


- In acqua:

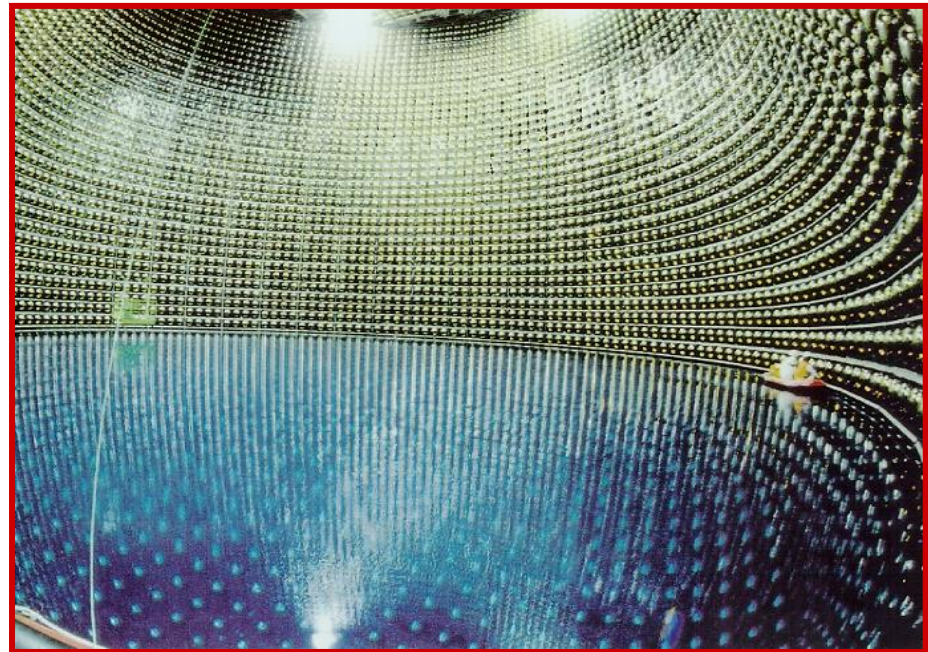
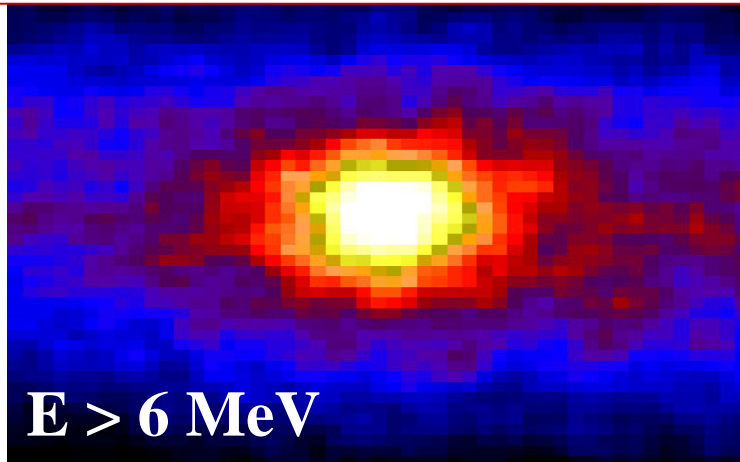


- L'elettrone diffuso emette un **cono di luce Cerenkov** che può essere rivelata con dei **tubi fotomoltiplicatori**
- Si misura in tempo reale la **direzione del ν incidente**, consentendo lo studio delle distribuzioni angolari

scattering elastico
su elettroni



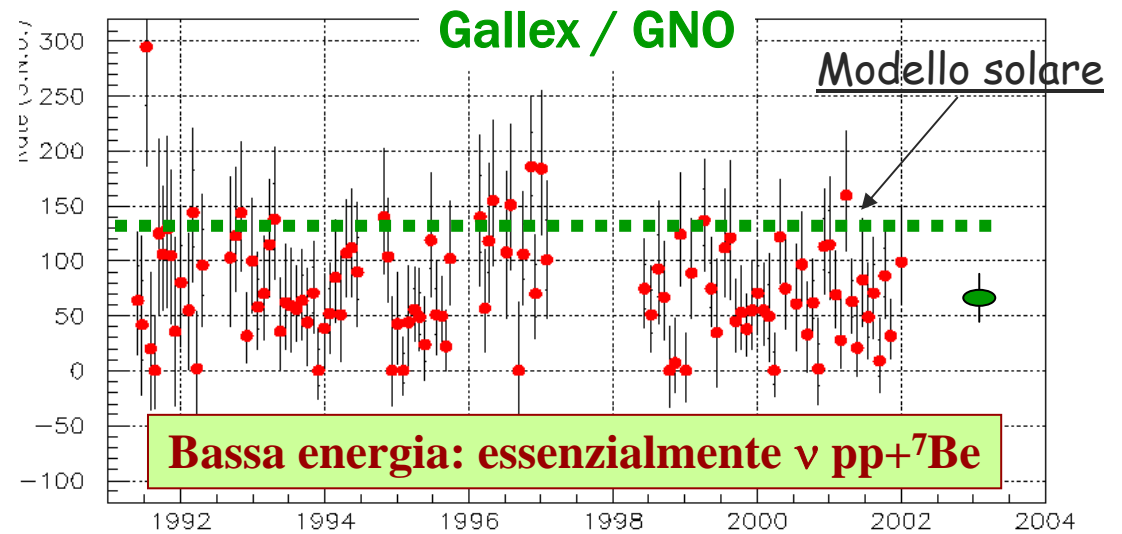
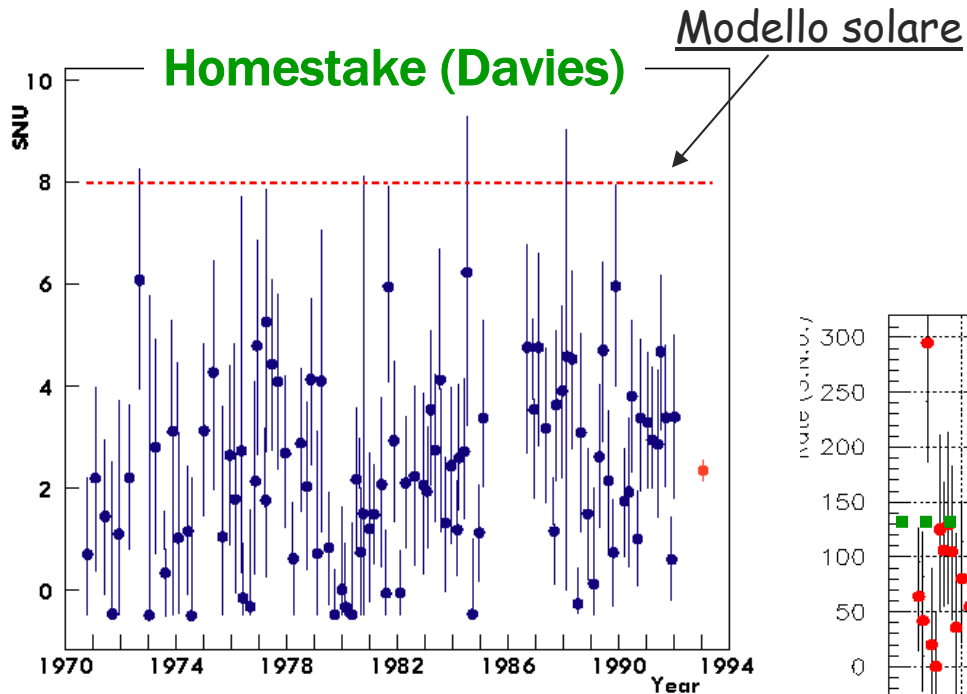
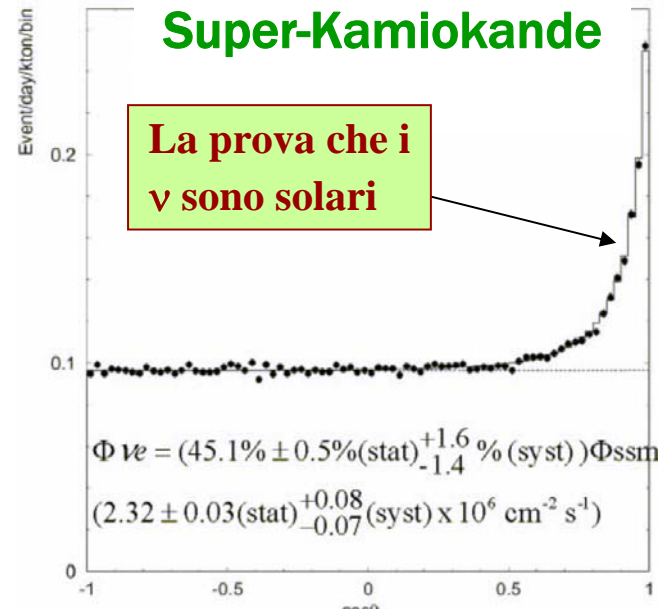
La prima immagine del nucleo del Sole



Il problema dei ν solari prima del 2000



Tre esperimenti confermano un deficit rispetto alle previsioni del modello solare standard



Il deficit dipende dall'energia!



Le oscillazioni di ν



- La spiegazione ormai accettata per il deficit solare è il fenomeno delle oscillazioni di neutrino.
- Nel vuoto:
 - Se si accetta l'ipotesi che i neutrini hanno massa diversa da zero, non vi è garanzia che gli autostati di massa coincidano con quelli di sapore
 - Per una sorgente puntiforme monocromatica:

$$P_{e \rightarrow \mu} = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left[\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right]$$

Δm in eV
 L in m
 E_ν in MeV

- Il Sole non è puntiforme, e le righe non sono esattamente monocromatiche.
 - Decoerenza su distanza inferiore a quella Terra-Sole

$$P_{e \rightarrow \mu} = \frac{1}{2} \sin^2(2\theta)$$

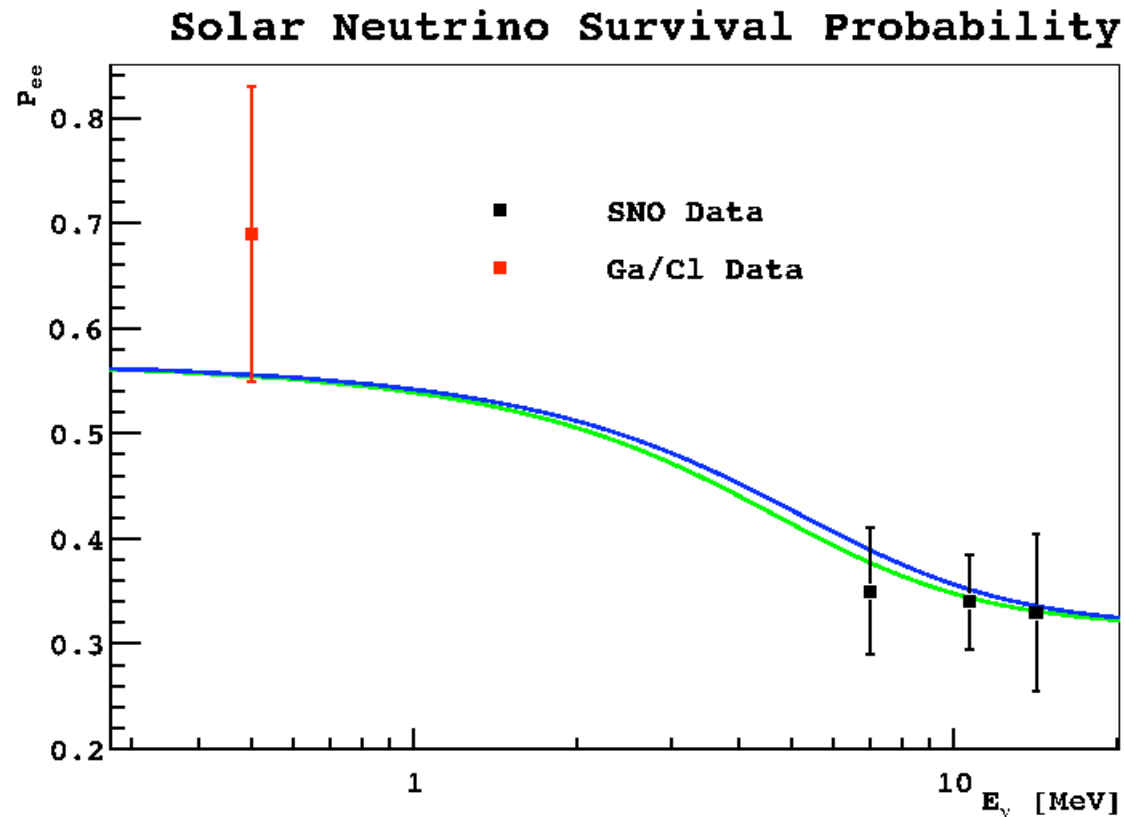
Le oscillazioni nel vuoto danno un **deficit**,
ma **NON** dipendente da **E**
come osservato. **Manca qualcosa!**

Le oscillazioni di ν nella materia



- **Effetto MSW**

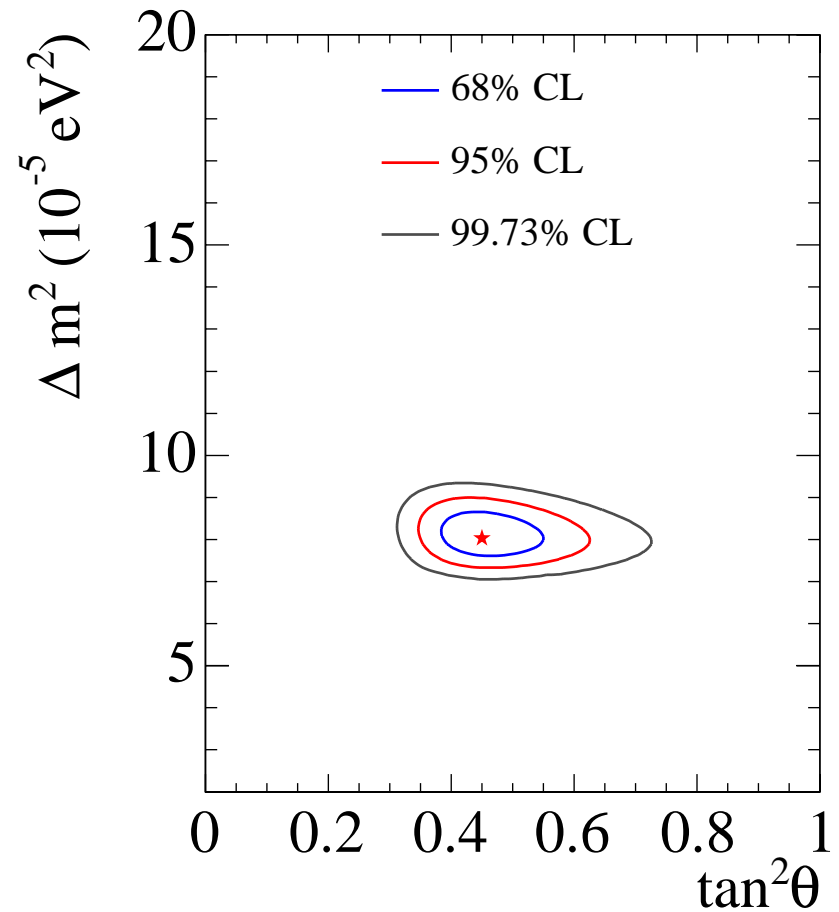
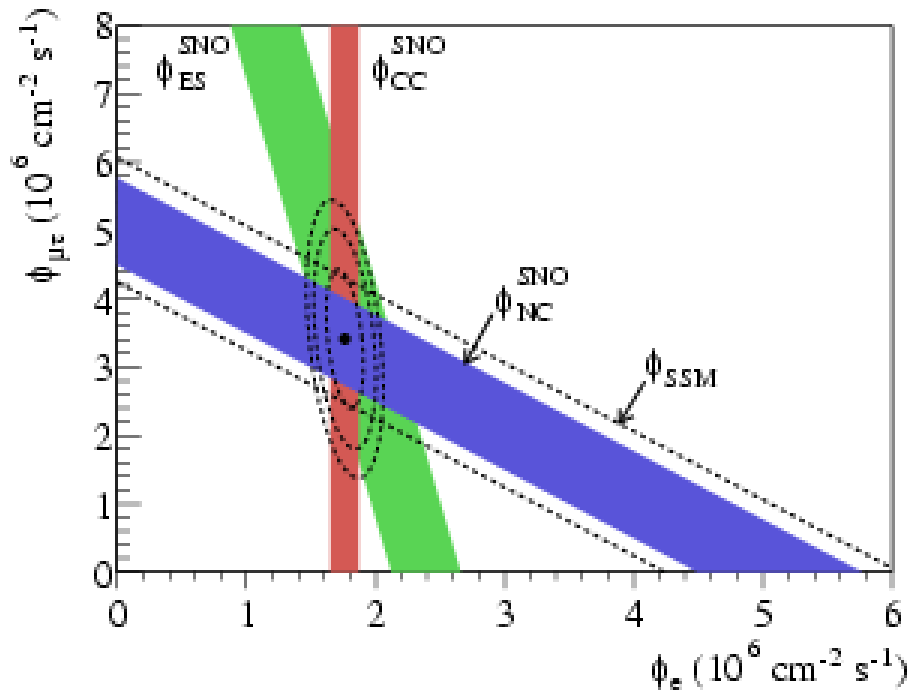
- L'interazione dei ν_e con la materia è diversa da quella di ν_μ, ν_τ
 - Indice di rifrazione efficace nel Sole, velocità di propagazione diversa
- I corrispondenti stati si sfasano, modificando P_{ee}



SNO e KamLand (2001-2002)



- SNO e KamLand hanno completato la prima generazione di esperimenti, dimostrando che:
 - Le oscillazioni con effetto MSW spiegano il deficit solare senza dover introdurre modifiche al MS.
 - Gli (anti) neutrini elettronici oscillano (KamLand).



Motivazioni per Borexino nel 2007



- **Fisica dei neutrini:**

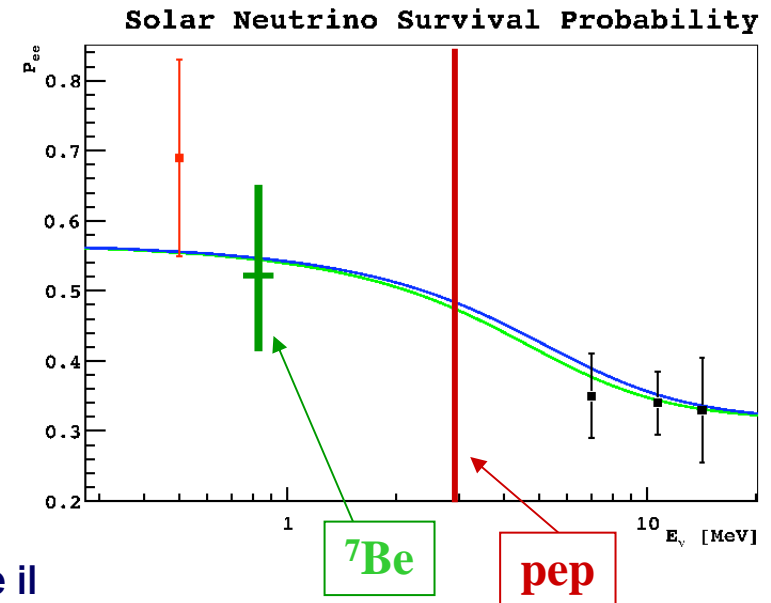
- Verificare il meccanismo MSW
- Migliorare la misura dei parametri

- **Fisica del Sole**

- Test della fisica del nucleo
 - Determinare il flusso del ${}^7\text{Be}$
 - Determinare il flusso pep e pp e controllare il bilancio energetico
 - Misurare direttamente la componente CNO e determinarne il ruolo nel Sole

- **Inoltre:**

- La sorgente di calore geotermico (geo-neutrini)
- Il “core” di una supernova durante l’esplosione
- Momento magnetico del neutrino con una sorgente radioattiva (${}^{51}\text{Cr}$)



Abruzzo
120 Km da Roma



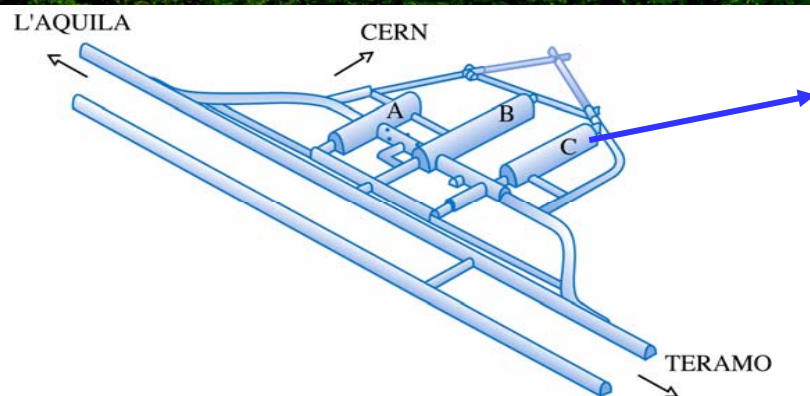
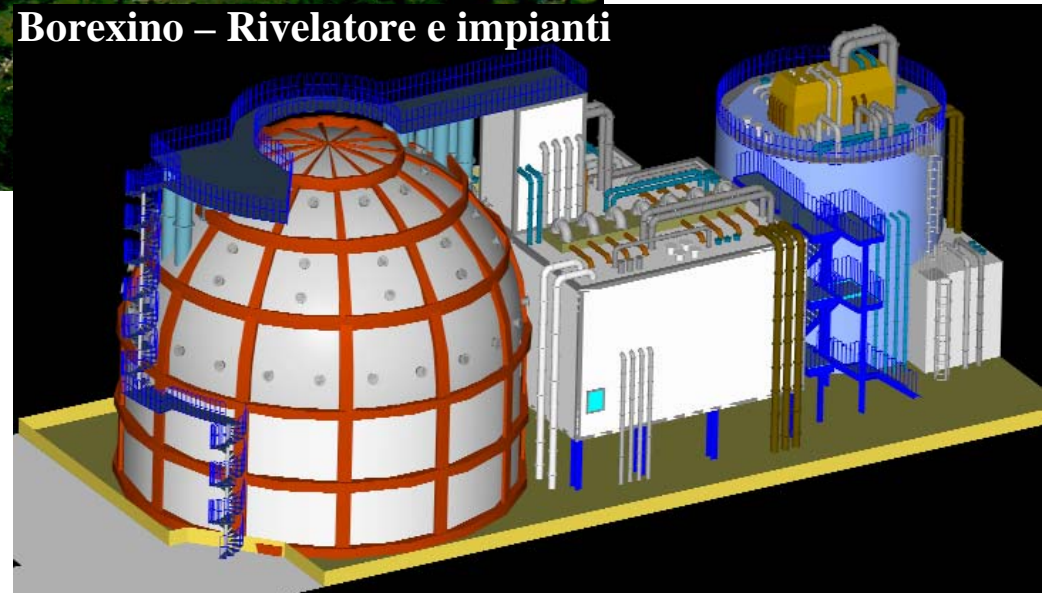
Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Assergi (AQ)
Italy
~3500 m.w.e

Laboratori esterni



Borexino – Rivelatore e impianti



La collaborazione



Perugia

Genova

INFN

Milano

APC Paris

Princeton University

Virginia Tech. University



Dubna JINR (Russia)

Kurchatov Institute (Russia)

Jagiellonian U. Cracow (Poland)

RMKI Budapest (Hungary)

Heidelberg (Germany)

Munich (Germany)



Rivelazione e segnatura dei ν



- Borexino rivela i ν solari per mezzo dello scattering elastico su elettroni in un volume di scintillatore liquido **ultra-purificato**

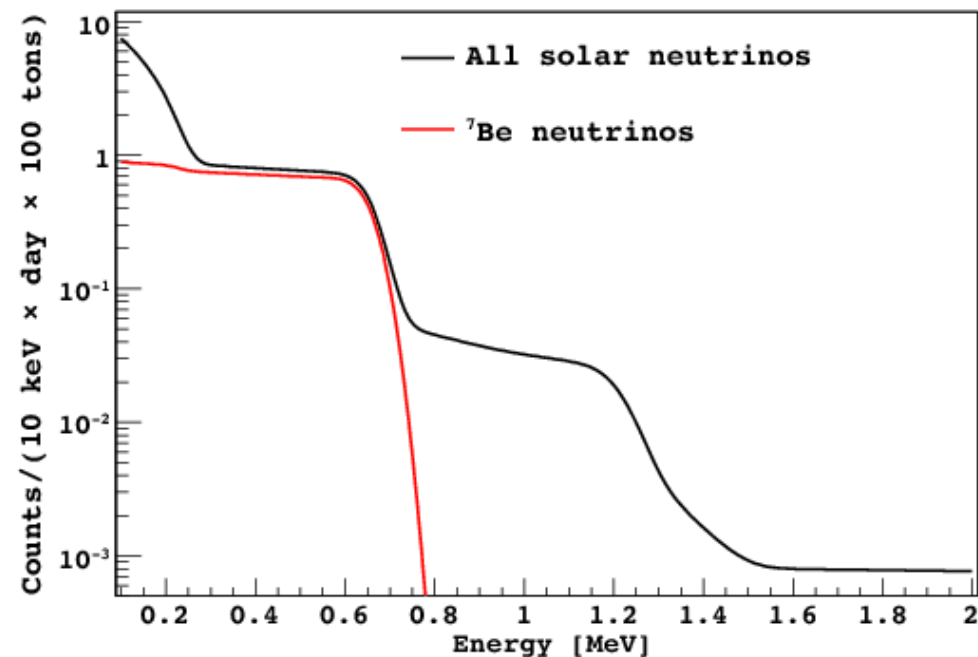
- Linea monoenergetica 0.862 MeV del ${}^7\text{Be}$ ν principalmente
- Ma anche in futuro pep ν , CNO ν e forse pp ν

- Rivelazione con luce di scintillazione:

- Bassa soglia in energia
 - Buona ricostruzione spaziale
 - Buona risoluzione in energia
- MA...**
- No direzionalità
 - Gli eventi indotti da ν non sono distinguibili da decadimenti β

- Lo scintillatore deve essere straordinariamente puro

Tipico ν rate (SSM+LMA+Borexino)



Un po' di numeri



- Perché 20 anni per fare Borexino ?

- Con **100 t** di massa bersaglio, il numero di eventi al giorno attesi è **~40**
 - $\sim 40 / 86400 / 100000 = \sim 5 \cdot 10^{-9} \text{ Bq/Kg}$
- Un evento di diffusione ν -e è indistinguibile da un decadimento β nucleare o da uno scattering compton, la radioattività naturale intrinseca dello scintillatore deve essere più bassa di questo numero

- MA:

- Acqua minerale naturale: **10 Bq/Kg** ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th
- Aria: **10 Bq/m³** ^{222}Rn , ^{85}Kr , ^{39}Ar
- Roccia qualunque: **100-1000 Bq/Kg** ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , altro

Lo scintillatore di Borexino **DEVE essere
(e fortunatamente è) **9-10 ordini di grandezza**
MENO RADIOATTIVO di qualunque cosa sulla Terra**

15 anni di lavoro in 4 slides (I)

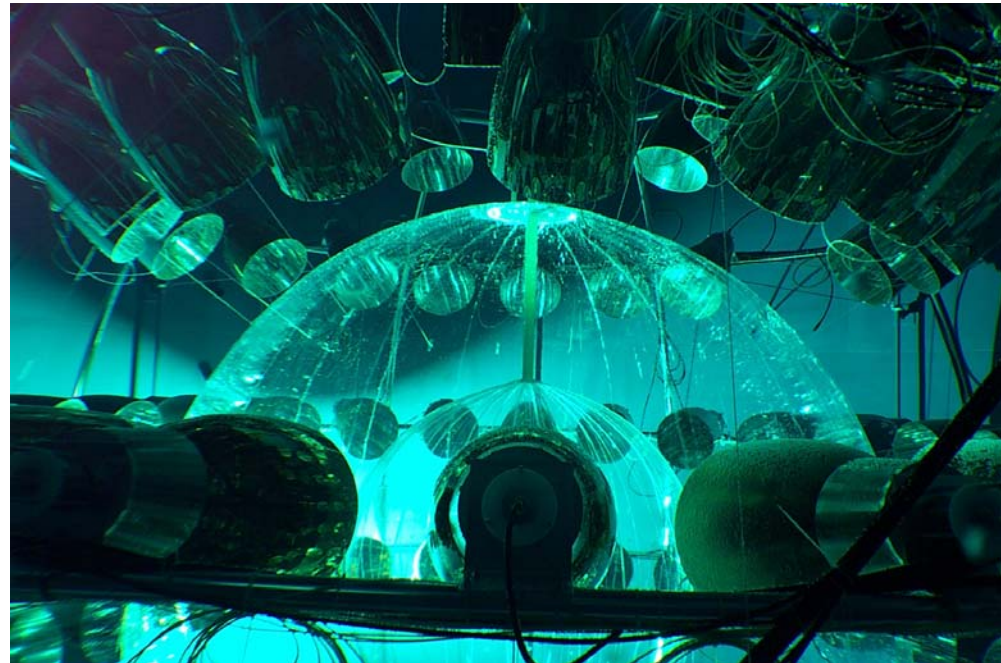


● I problemi da affrontare

- ^{14}C (β ~160 KeV): dentro il PC
 - Selezione scintillatore
- ^{39}Ar (β), ^{85}Kr (β - γ), ^{222}Rn (α , β , γ): aria
 - Sviluppo di N_2 ultrapuro
- ^{238}U (α , β , γ), ^{232}Th (α , β , γ), ^{210}Pb (α , β), ^{210}Po (α): ovunque
 - Purificazioni, selezione materiali
- γ dalla roccia e dai materiali
 - Schermature, Selezione materiali
- μ dai Raggi cosmici
 - Underground e μ ID con rivelatore

● Le soluzioni

- Sviluppo di strumenti, tecniche di misura, tecniche di purificazione completamente innovativi
- Lo strumento fondamentale
 - Counting Test Facility



Qualche impianto



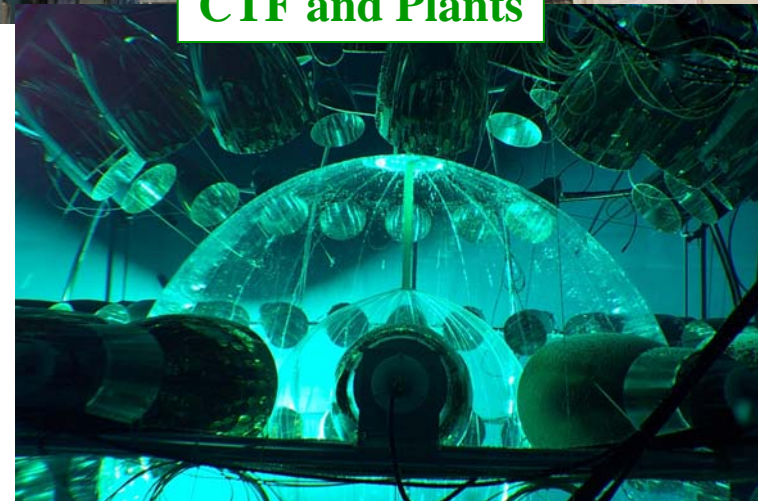
Water Plant



Storage area and Plants



CTF and Plants



15 anni di lavoro in 4 slides (II)



● Rivelatore e Impianti

- Tutti i materiali selezionati per:
 - **Bassa radioattività intrinseca**
 - Bassa emanazione di Rn
 - Tolleranza al contatto col PC
- Tubi, recipienti, impianti:
 - elettropuliti, lavati con detersivi selezionati, trattati con acido e passivati, sciacquati con acqua ultrapura fino a classe 20-50
- Impianto a tenuta di vuoto
 - Requisiti: $< 10^{-8}$ atm/cc/s
 - Regioni critiche protette con sacchi di nylon flussati in azoto
 - Tutte le operazioni di manutenzione da effettuare sotto flusso di azoto e doppio contenimento

● PMTs (2212)

- Possono stare in PC e acqua
- Vetro selezionato a bassa attività
- Time jitter: **1.1 ns** (per avere una buona ricostruzione spaziale)

● Nylon vessels

- Selezione materiale per radioattività, resistenza meccanica, tolleranza al PC e all'acqua
- < 1 c/d/100 t in FV
- Construzione in camera bianca con aria filtrata dal ^{222}Rn
- Mai esposto all'aria!

15 anni di lavoro in 4 slides (III)



- **Acqua (capacità 1.8 m³/h)**
 - RO, CDI, filtri, N₂ stripping
 - U, Th: < 10⁻¹⁴ g/g
 - ²²²Rn: ~ 1 mBq/m³
 - ²²⁶Ra: <0.8 mBq/m³
 - 18.2-18.3 MΩ/cm tipico @ 20 °C
- **Scintillatore**
 - IV: PC+PPO (1.5 g/l)
 - OV & Buffer: PC+DMP (5 g/l)
 - **Distillazione PC**
 - 6 stadi
 - 80 mbar, 90 °C
 - **Stripping sottovuoto** con low Ar-Kr
N₂
 - Vapore per umidificare 60-70%
- **Purificazione del PPO**
 - PPO è solido
 - Soluzione concentrata (120 g/l)
 - Soluzione purificata con:
 - Water extraction
 - Filtraggio
 - Distillazione
 - N₂ stripping con LAKN
- **Riempimento**
 - Purging della SSS con LAKN ('06)
 - Riempimento con acqua (Aug. 06 → Nov. 06)
 - Sostituzione dell'acqua con PC+PPO or PC+DMP (Jan. 07 → May. 07)
- **Inizio run: 15 maggio, 2007**

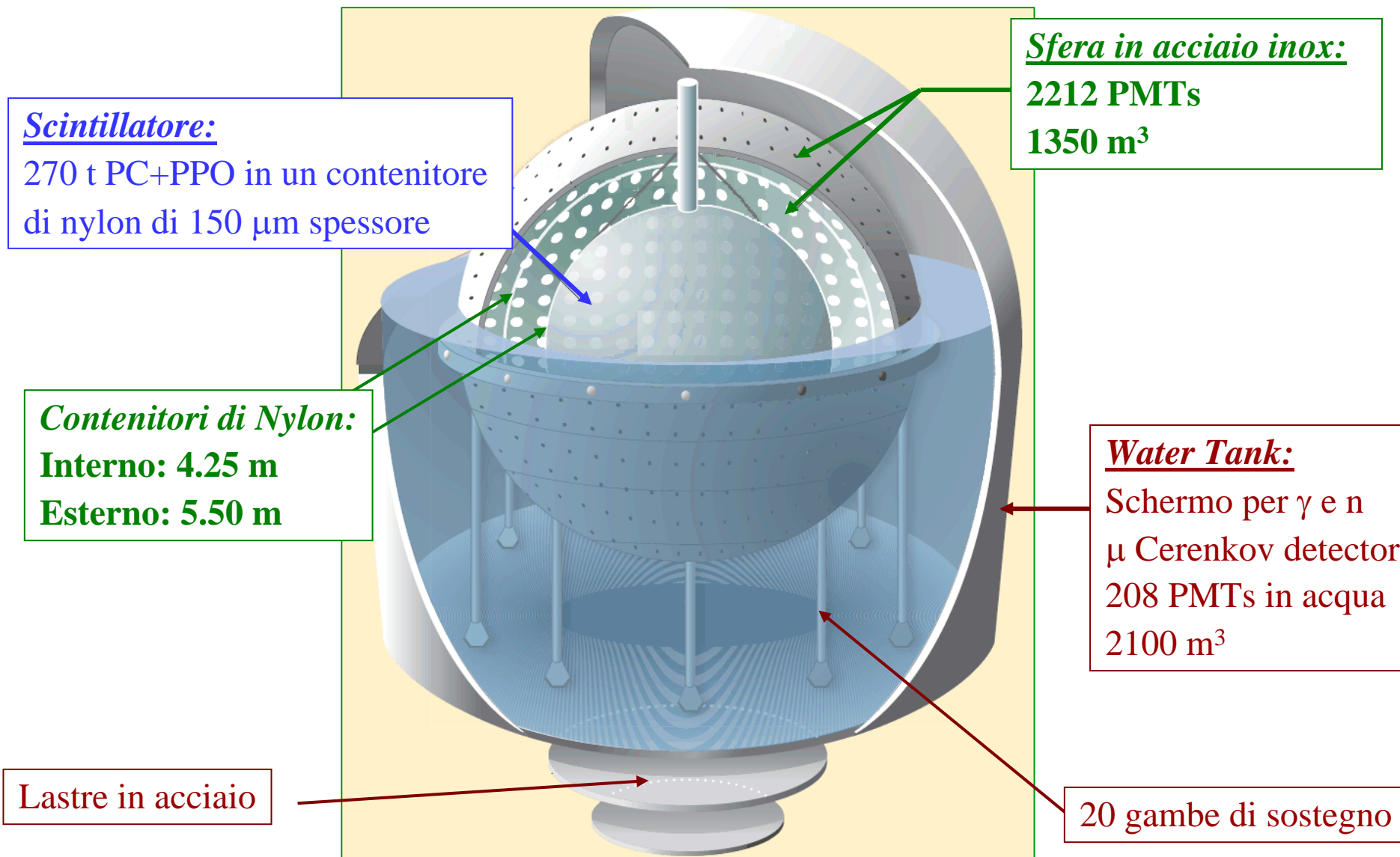
15 anni di lavoro in 4 slides (IV)



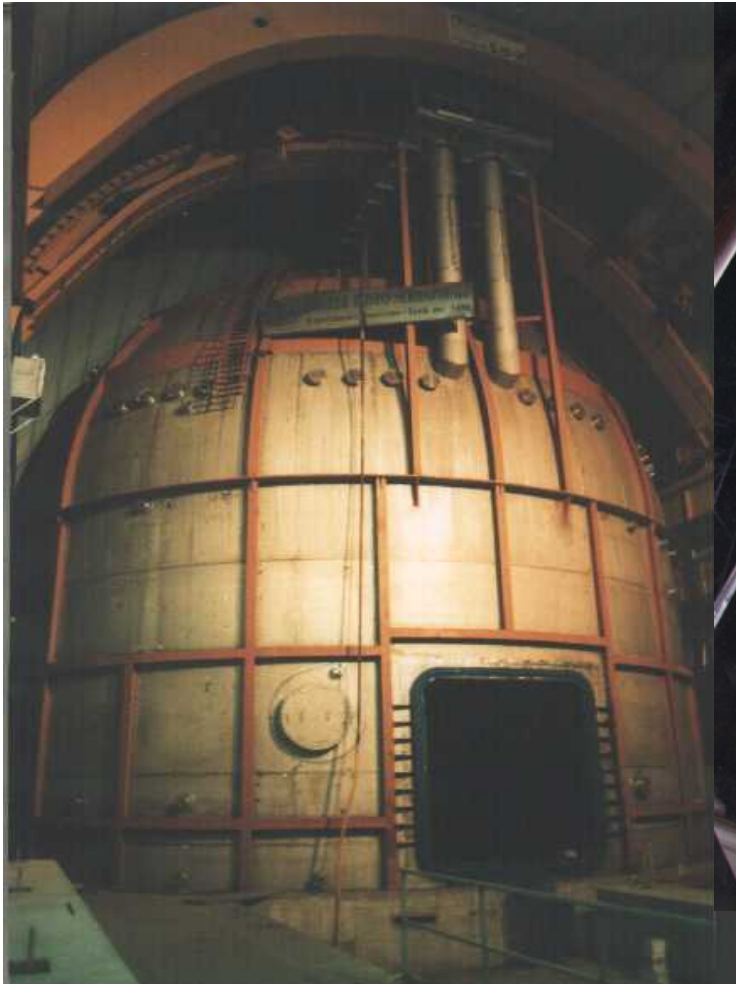
Radioisotope		Concentration or Flux		Strategy for Reduction		
Name	Source	Typical	Required	Hardware	Software	Achieved
μ	cosmic	$\sim 200 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ at sea level	$\sim 10^{-10}$	Underground Cherenkov detector	Cherenkov signal PS analysis	$< 10^{-10}$ (overall)
Ext. γ	rock			Water Tank shielding	Fiducial Volume	negligible
Int. γ	PMTs, SSS Water, Vessels			Material Selection Clean constr. and handling	Fiducial Volume	negligible
^{14}C	Intrinsic PC/PPO	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-18}$	Old Oil, check in CTF	Threshold cut	$\sim 10^{-18}$
^{238}U	Dust	$\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} g/g	$< 10^{-16}$ g/g	Distillation, Water Extraction		$< 10^{-17}$
^{232}Th	Organometallic (?)	(dust)	(in scintillator)	Filtration, cleanliness		$< 10^{-17}$
^7Be	Cosmogenic (^{12}C)	$\sim 3 \cdot 10^{-2}$ Bq/t	$< 10^{-6}$ Bq/ton	Fast procurement, distillation	Not yet measurable	?
^{40}K	Dust, PPO	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$ g/g (dust)	$< 10^{-14}$ g/g scin. $< 10^{-11}$ g/g PPO	Water Extraction Distillation	Not yet measurable	?
^{210}Pb	Surface contam. from ^{222}Rn decay			Cleanliness, distillation	Not yet measurable (NOT in eq. with ^{210}Po)	?
^{210}Po	Surface contam. from ^{222}Rn decay			Cleanliness, distillation	Spectral analysis a/b stat. subtraction	~ 60 $\sim 0.01 \text{ c/d/t}$
^{222}Rn	air, emanation from materials, vessels	~ 10 Bq/l (air) ~ 100 Bq/l (water)	$< 1 \text{ c/d/100 t}$ (scintillator)	Water and PC N_2 stripping, cleanliness, material selection	Delayed coincidence	$< 0.02 \text{ c/d/t}$
^{39}Ar	Air (nitrogen)	$\sim 17 \text{ mBq/m}^3$ (air)	$< 1 \text{ c/d/100 t}$	Select vendor, leak tightness	Not yet measurable	?
^{85}Kr	Air (nitrogen)	$\sim 1 \text{ Bq/m}^3$ in air	$< 1 \text{ c/d/100 t}$ $< 0.01 \text{ ppt}$	Select vendor, leak tightness (learn how to measure it)	Spectral fit fast coincidence	~ 0.2 < 0.35



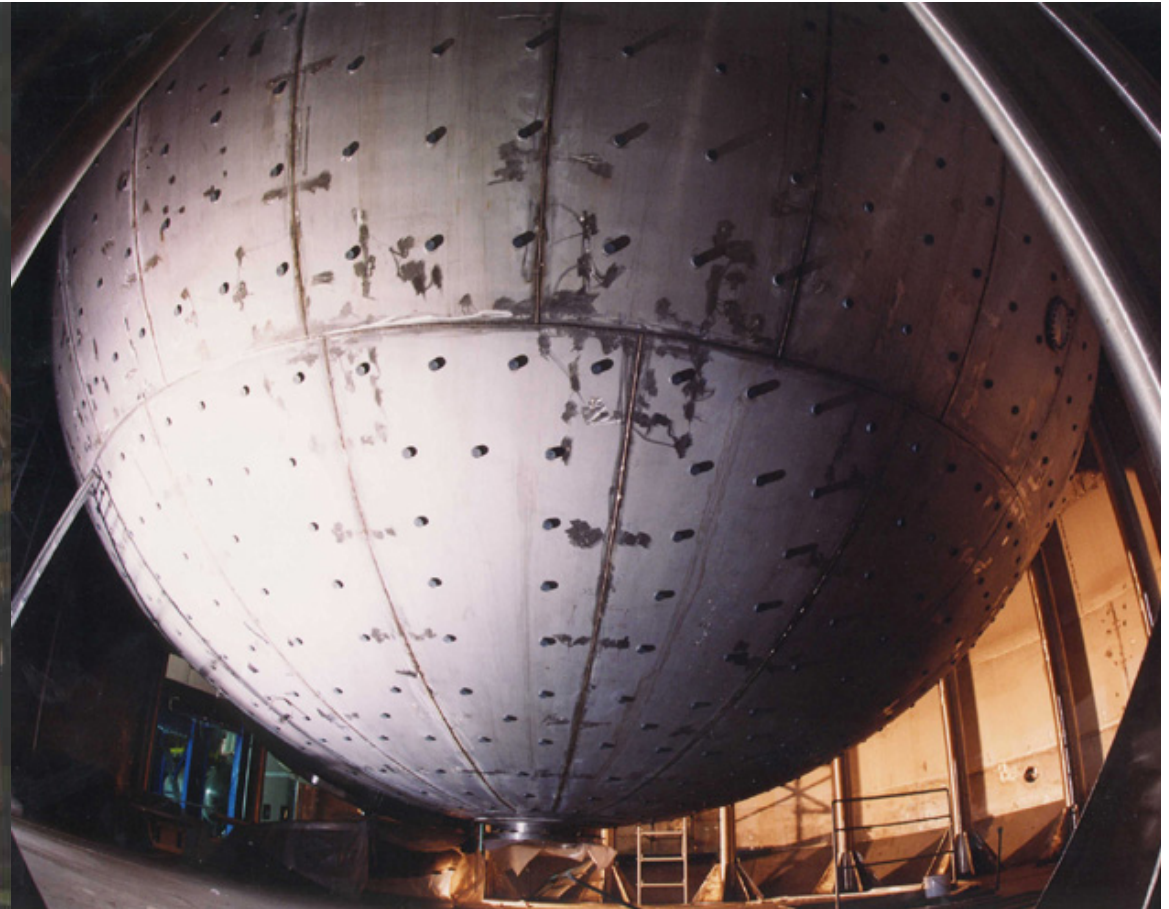
Schema del rivelatore



La WT e la sfera



Water Tank nel 1998

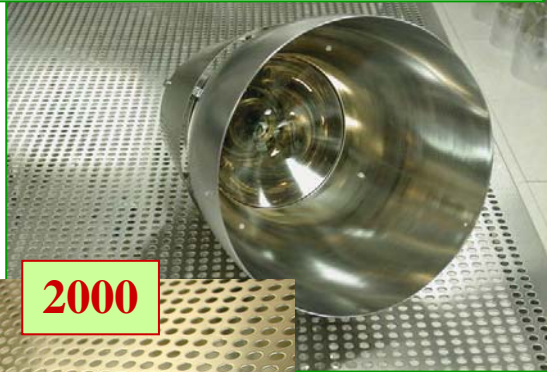


La sfera dentro la WT - 1999

Fototubi e vessel



Fototubi: PC & Water proof



2000



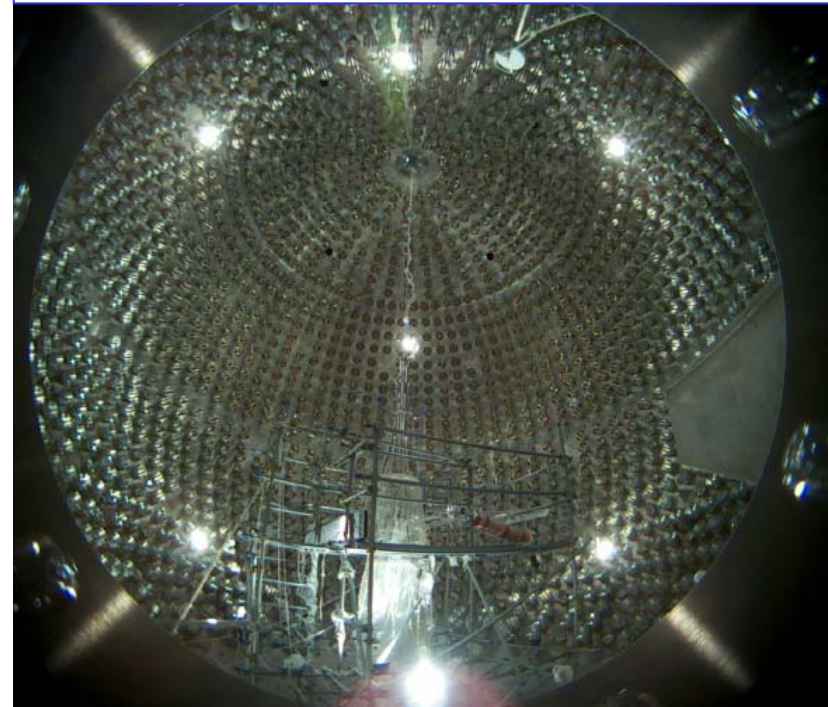
Installazione dei PMT nella sfera



2002



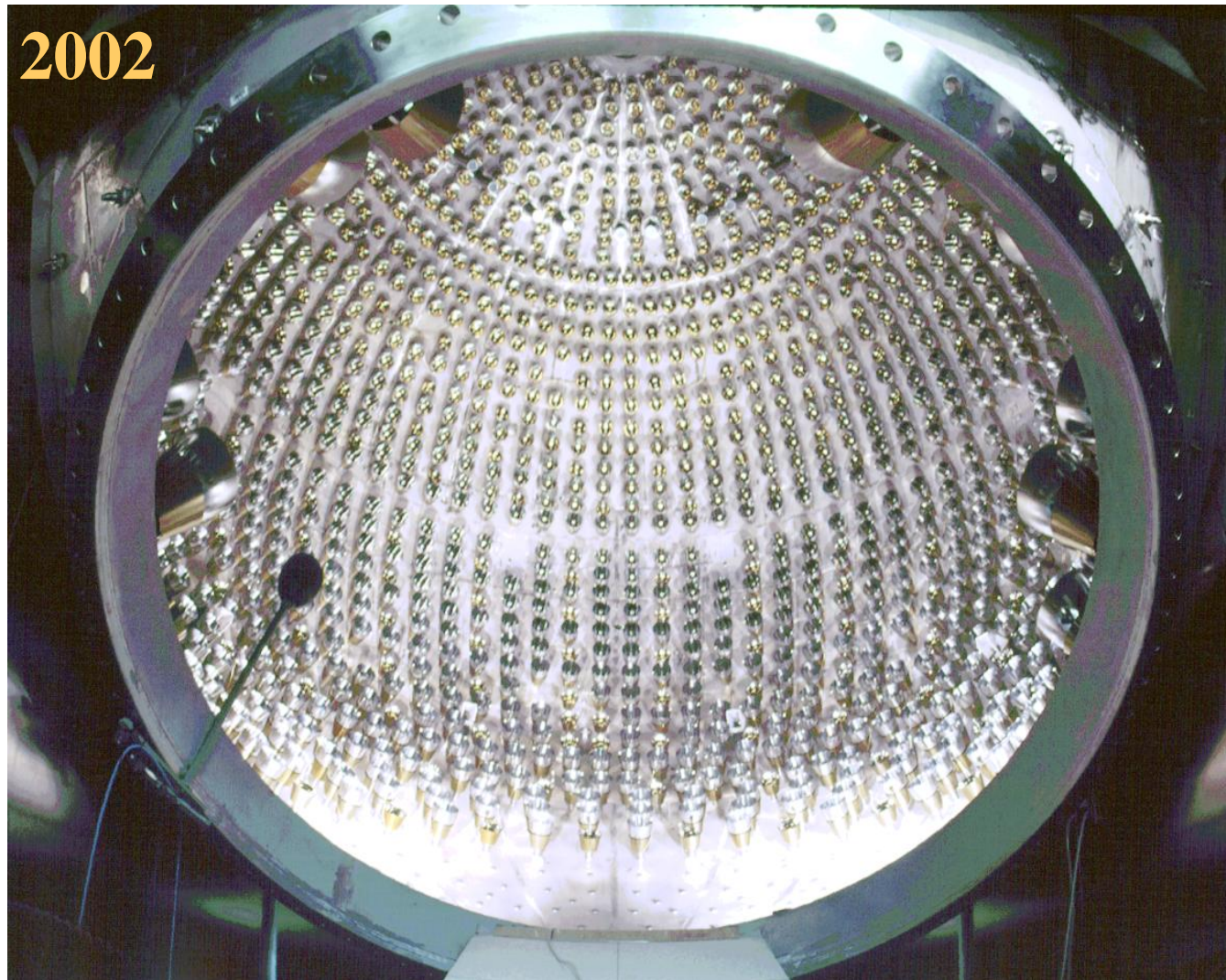
Installazione dei vessels di nylon (2004)



Installazione PMT e fibre ottiche



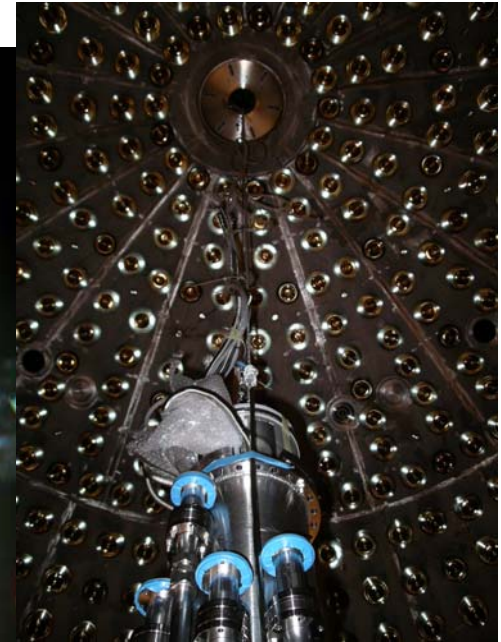
La sfera finita senza vessels



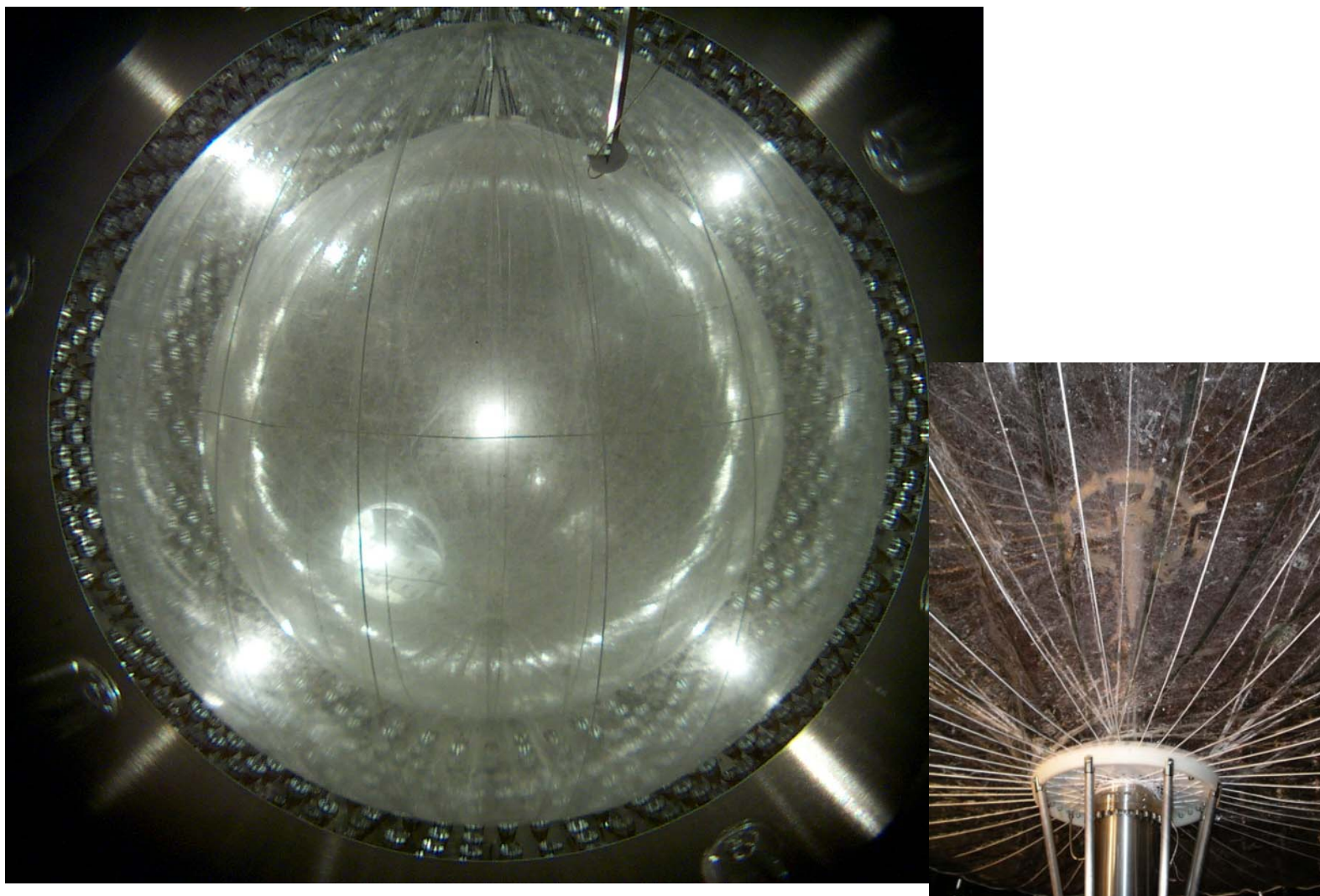
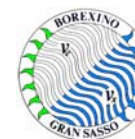
Installazione vessels



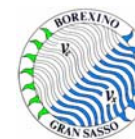
2004



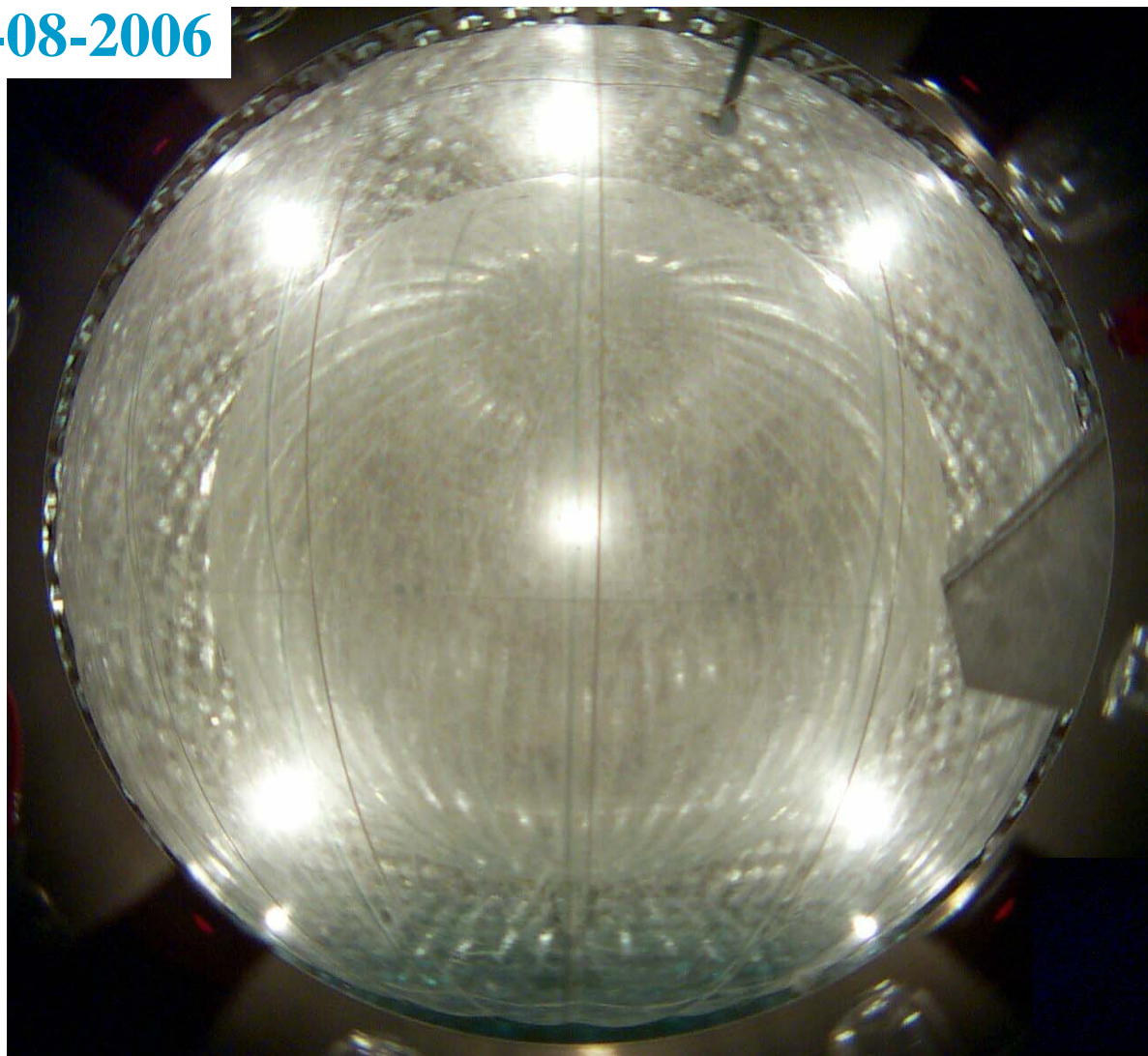
Vessel pieni di LAK N₂



Water filling (I)



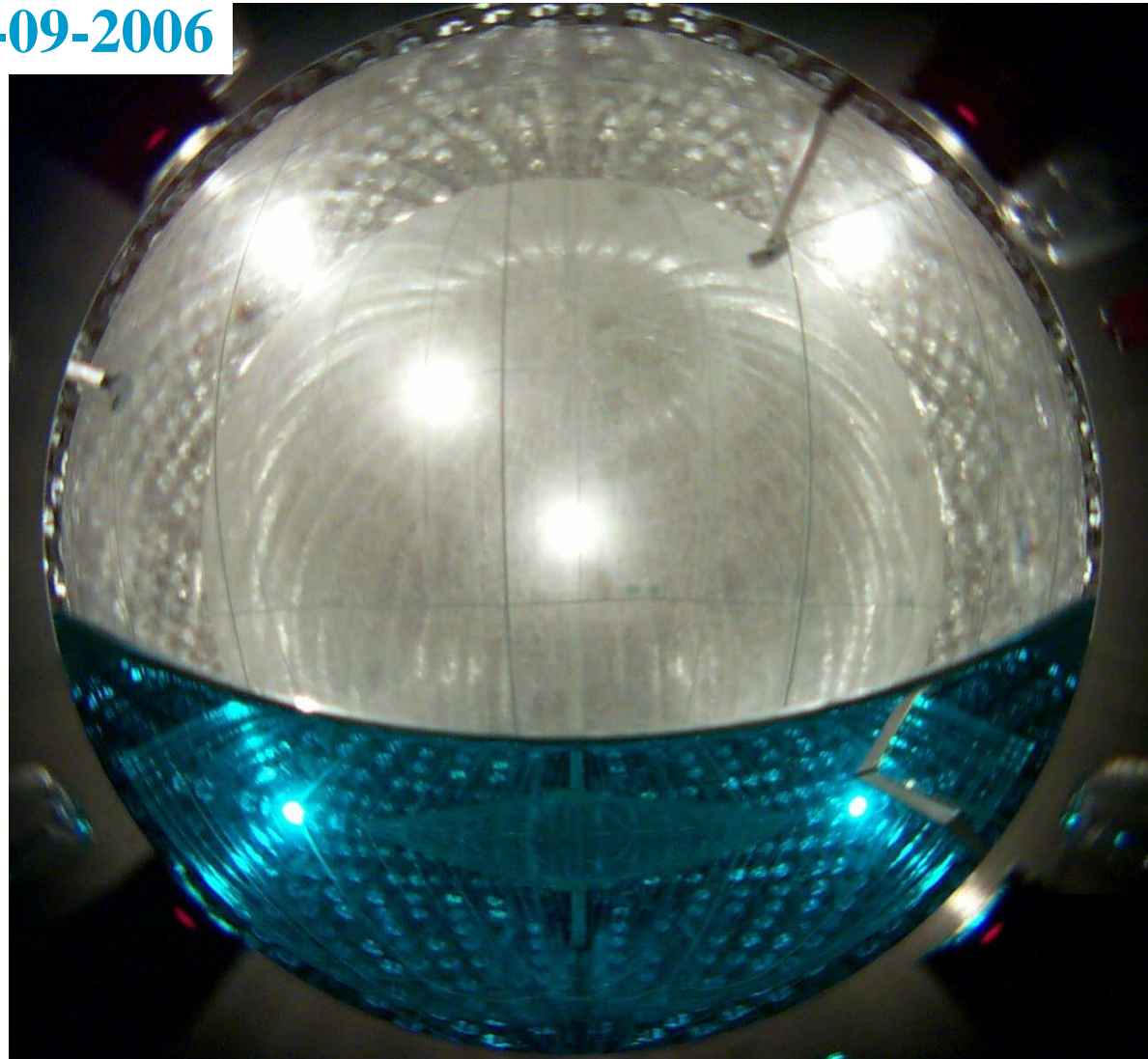
24-08-2006



Water filling (II)



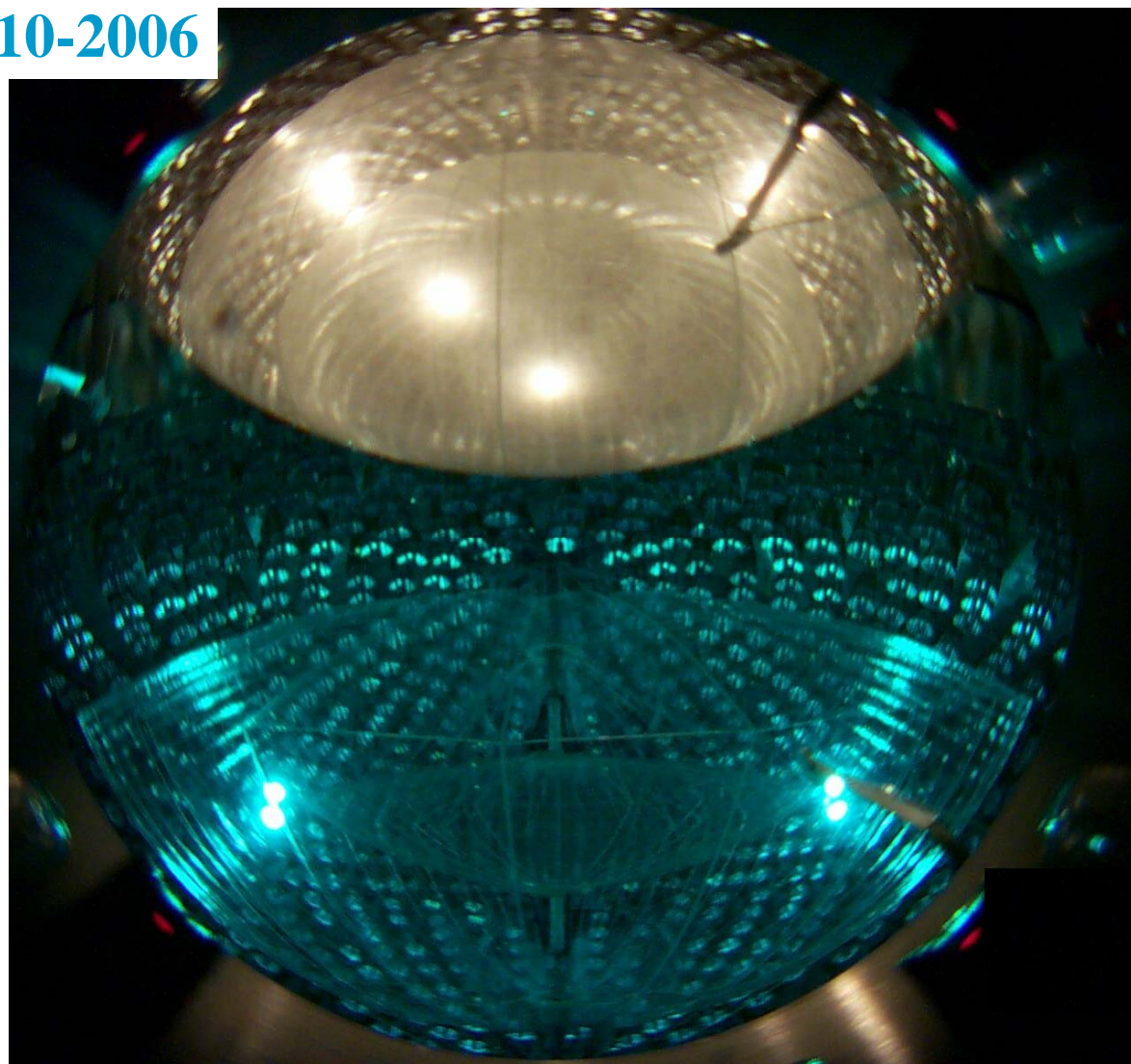
20-09-2006



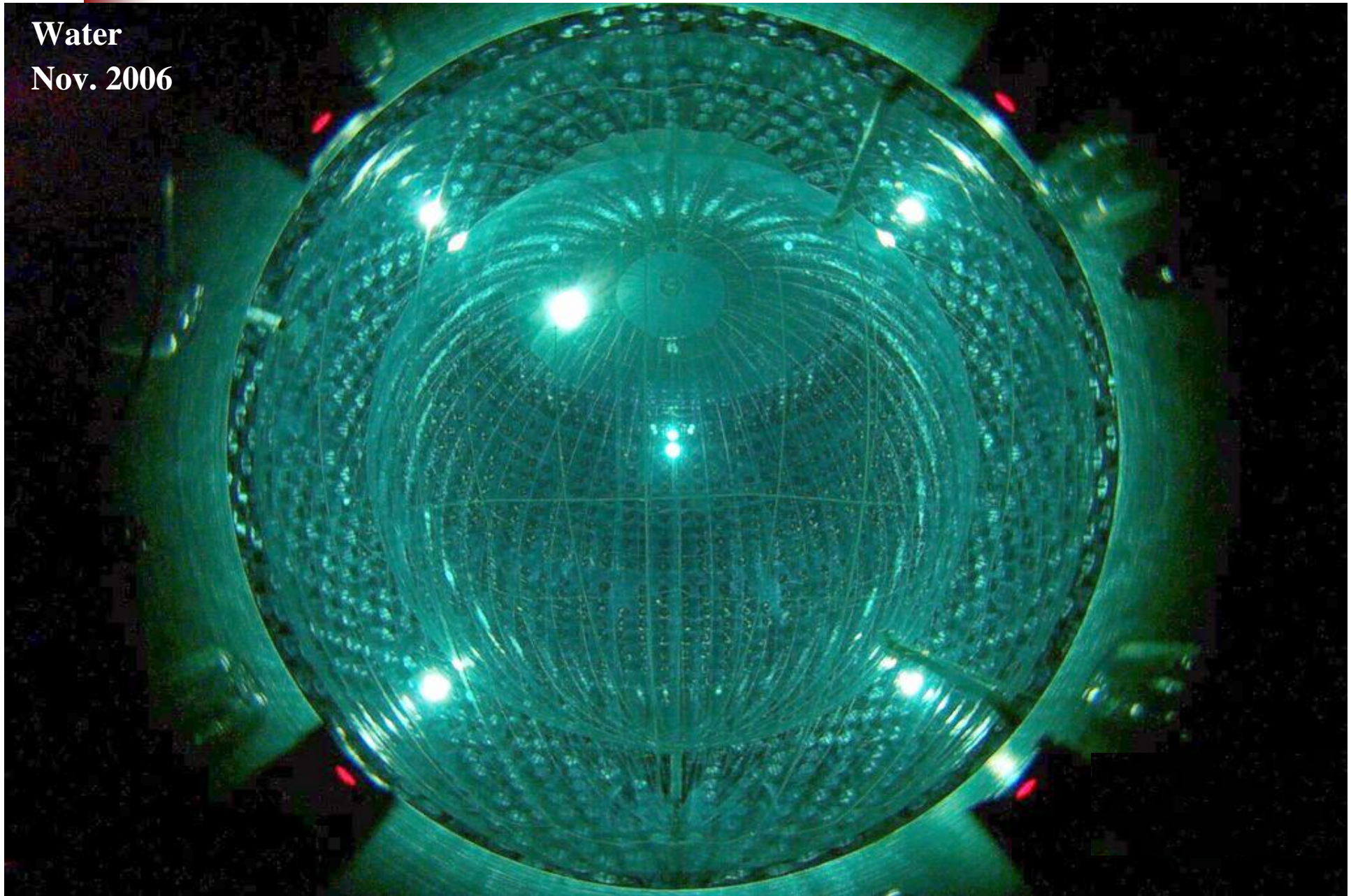
Water filling (III)



20-10-2006



Water
Nov. 2006



Roma – 16 novembre 2007

M. Pallavicini - Università di Genova & INFN



Ultimi lavori in WT

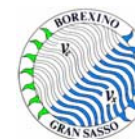


Roma – 16 novembre 2007

M. Pallavicini - Università di Genova & INFN



PC nella SSS



29-01-2007

photo: BOREXINO calibration

Roma – 16 novembre 2007

M. Pallavicini - Università di Genova & INFN



15 maggio 2007

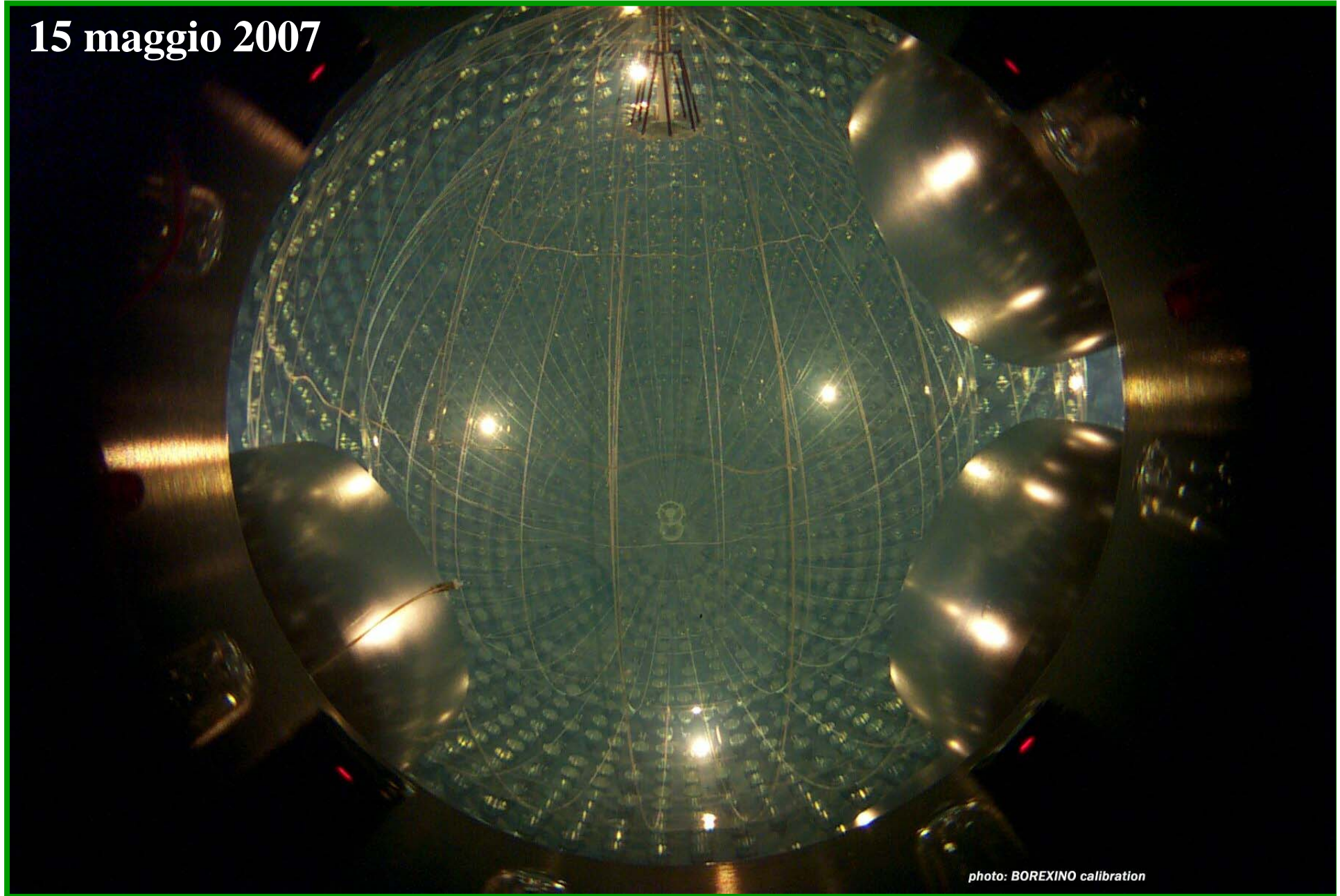
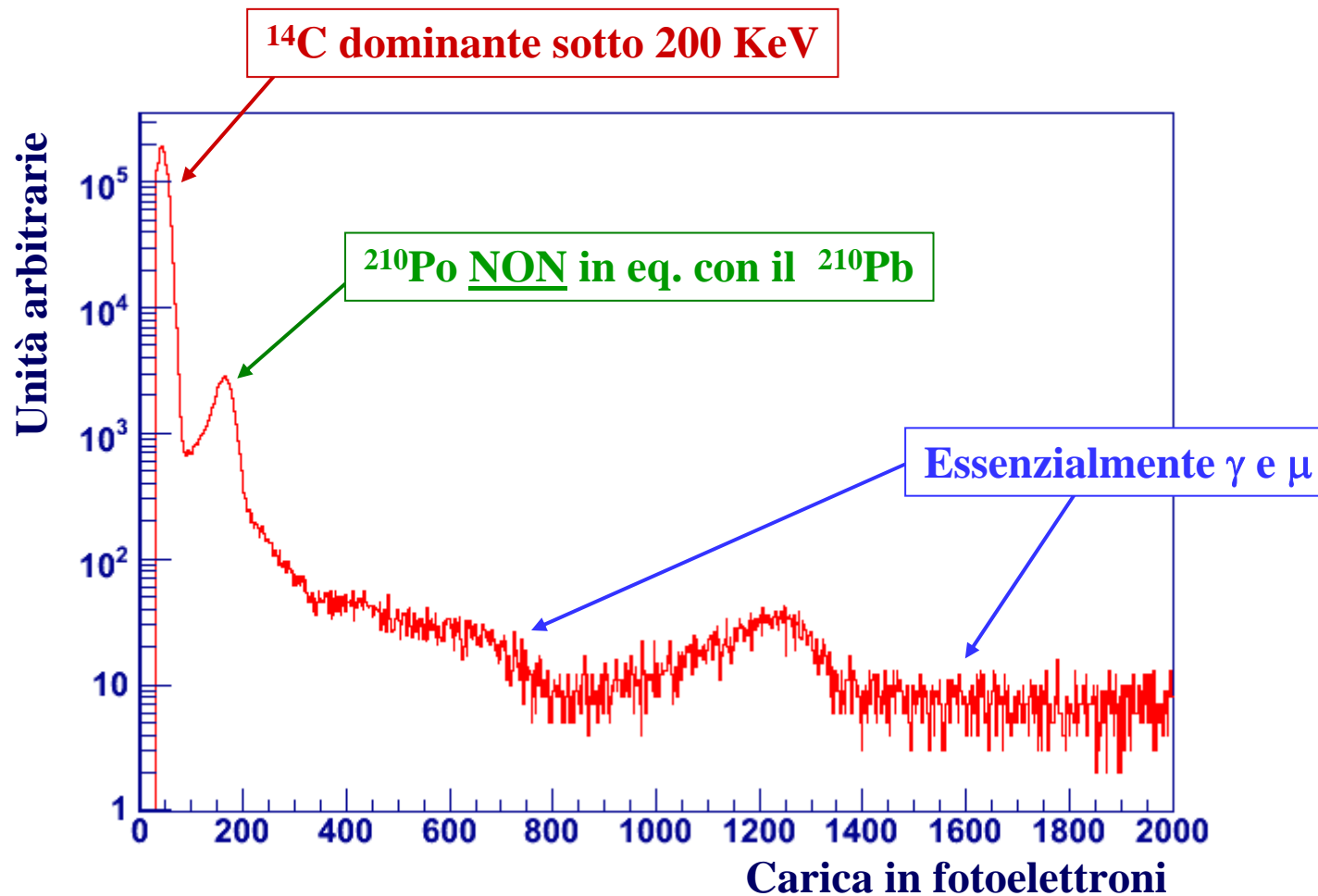


photo: BOREXINO calibration

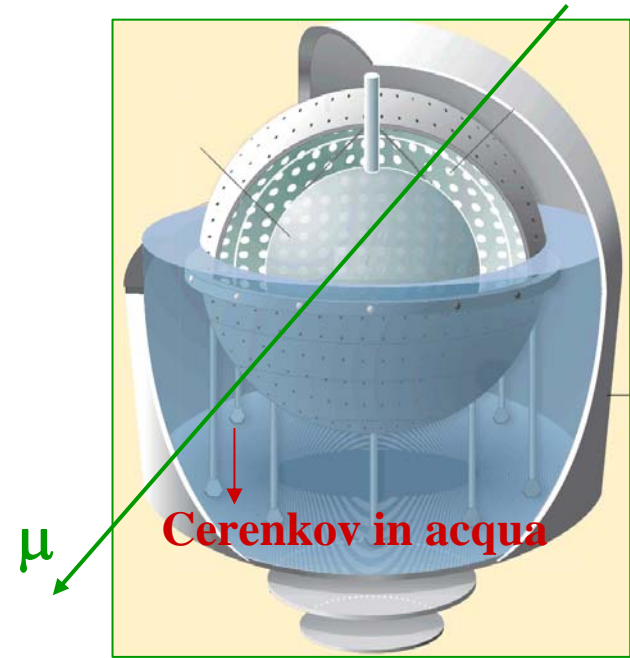
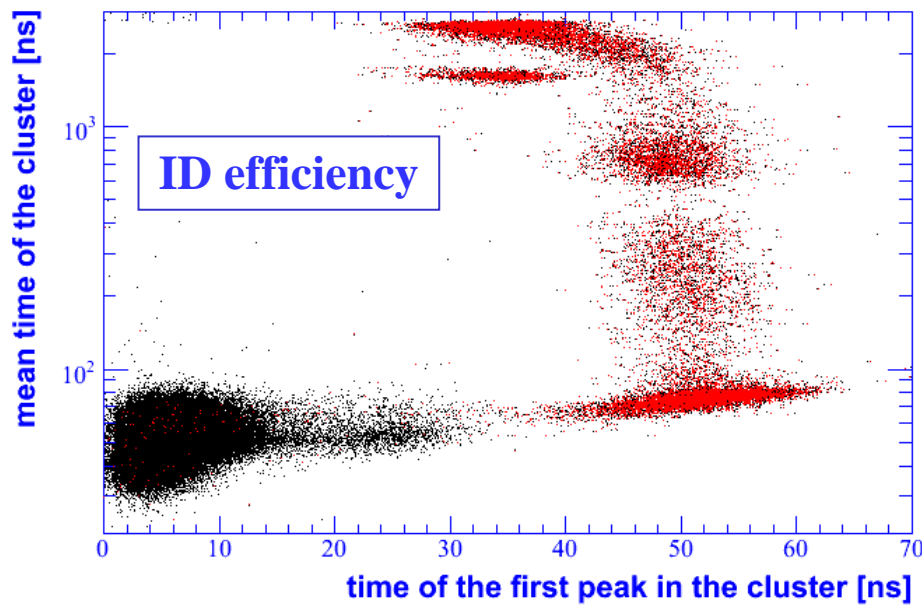
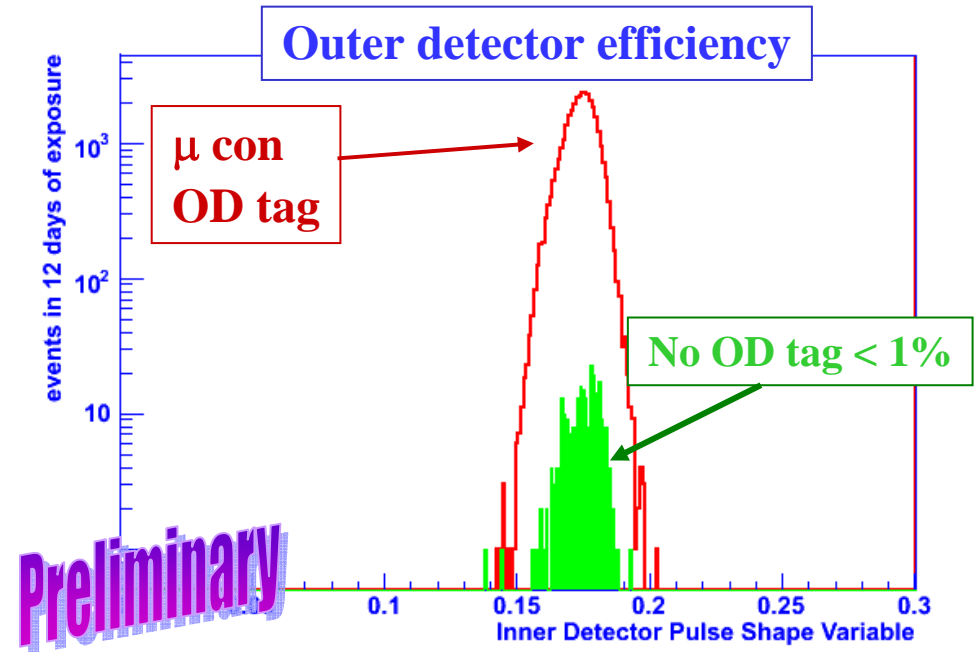
Punto di partenza: nessun taglio



Un giorno di dati. Trigger rate ~ 15 Hz.



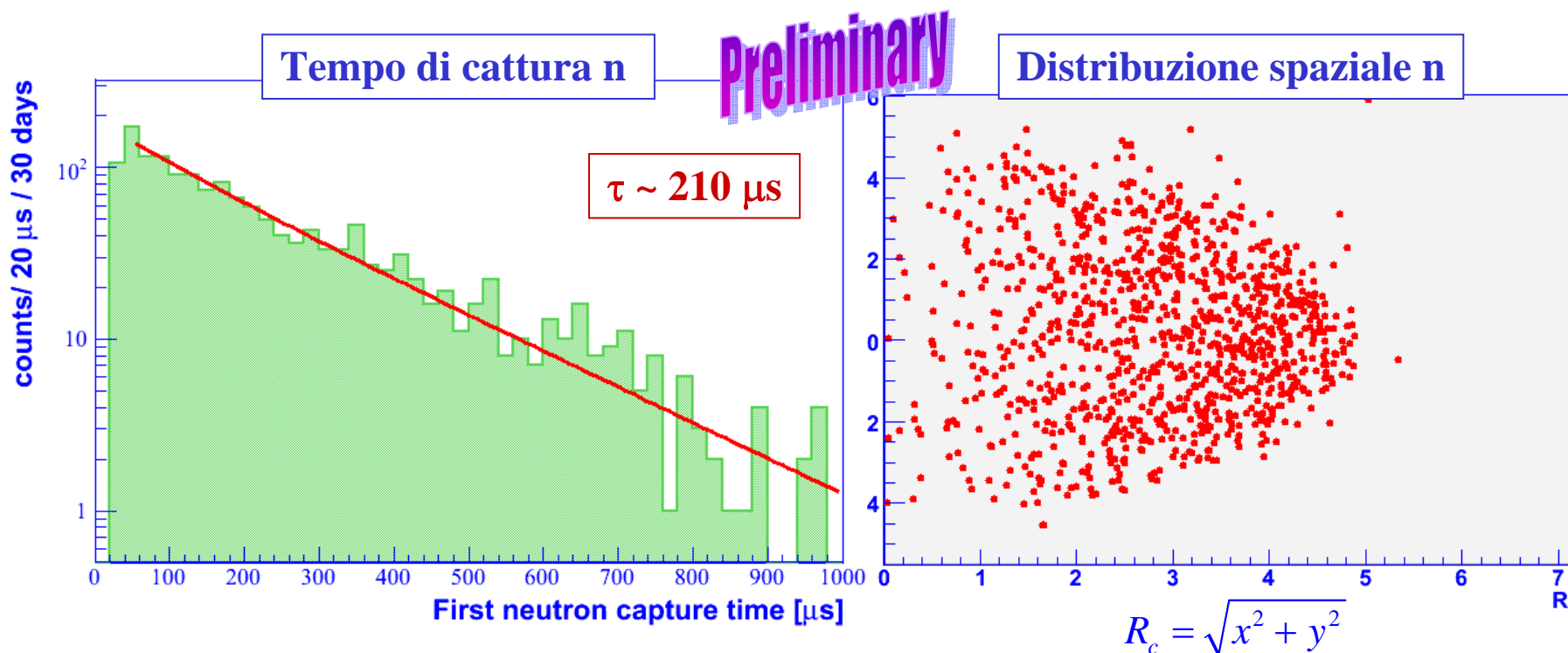
- μ sono identificati sia dall'OD sia dall>ID
 - OD eff: ~ 99%
 - ID basato su variabili di forma dell'impulso
 - Fattore di reiezione stimato
 - $> 10^4$ (conservativo)



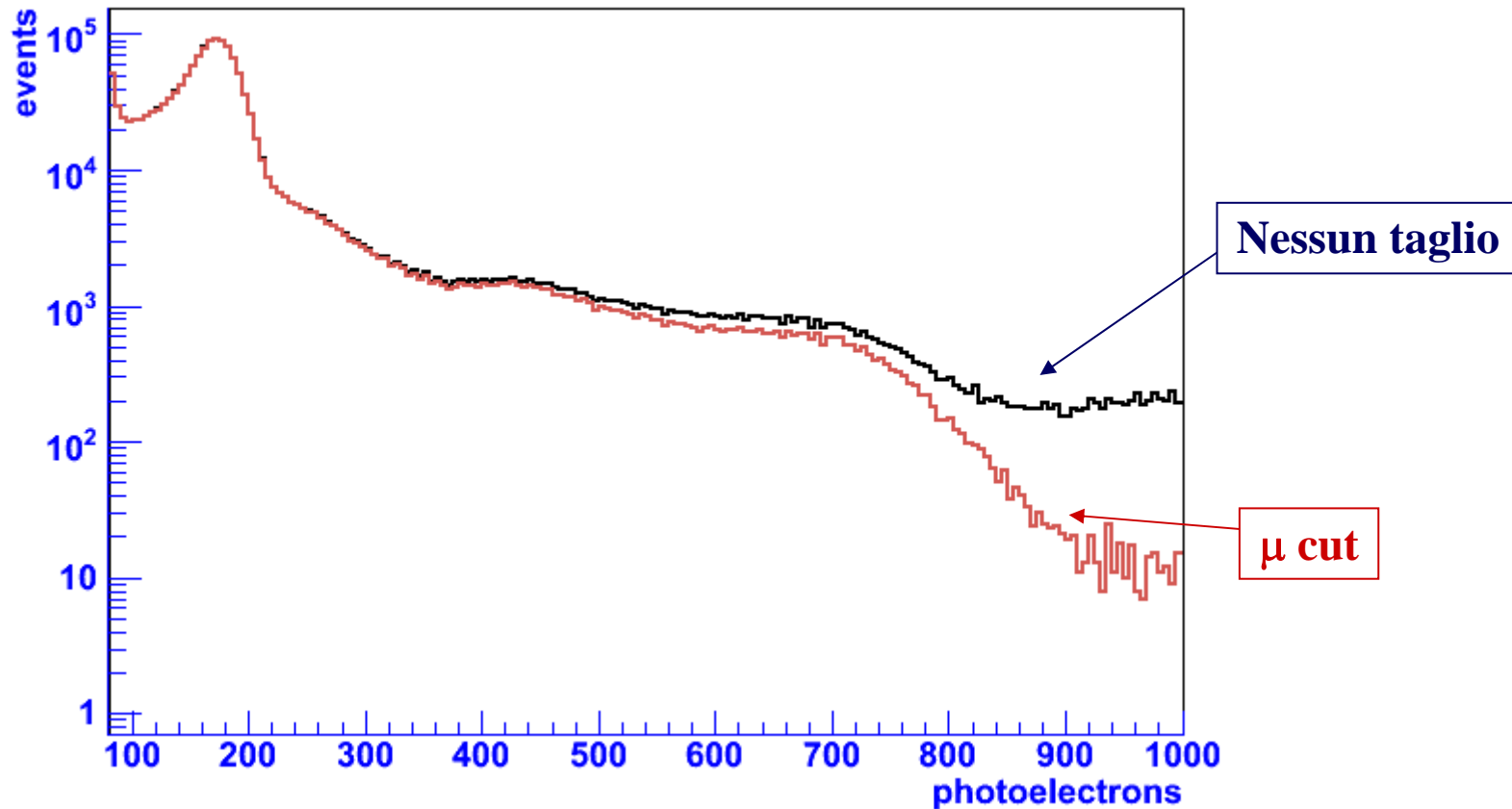
^{11}C e neutroni dopo un muone



- μs producono ^{11}C per spallazione su ^{12}C
 - Nel 95% dei casi la produzione è accompagnata da neutroni
 - Possiamo identificare il primo neutrone
 - Stiamo lavorando per prendere anche gli altri
 - Tutti gli eventi entro 2 ms dopo un μ sono buttati



Spettro dopo il taglio sui μ (sopra il ^{14}C)

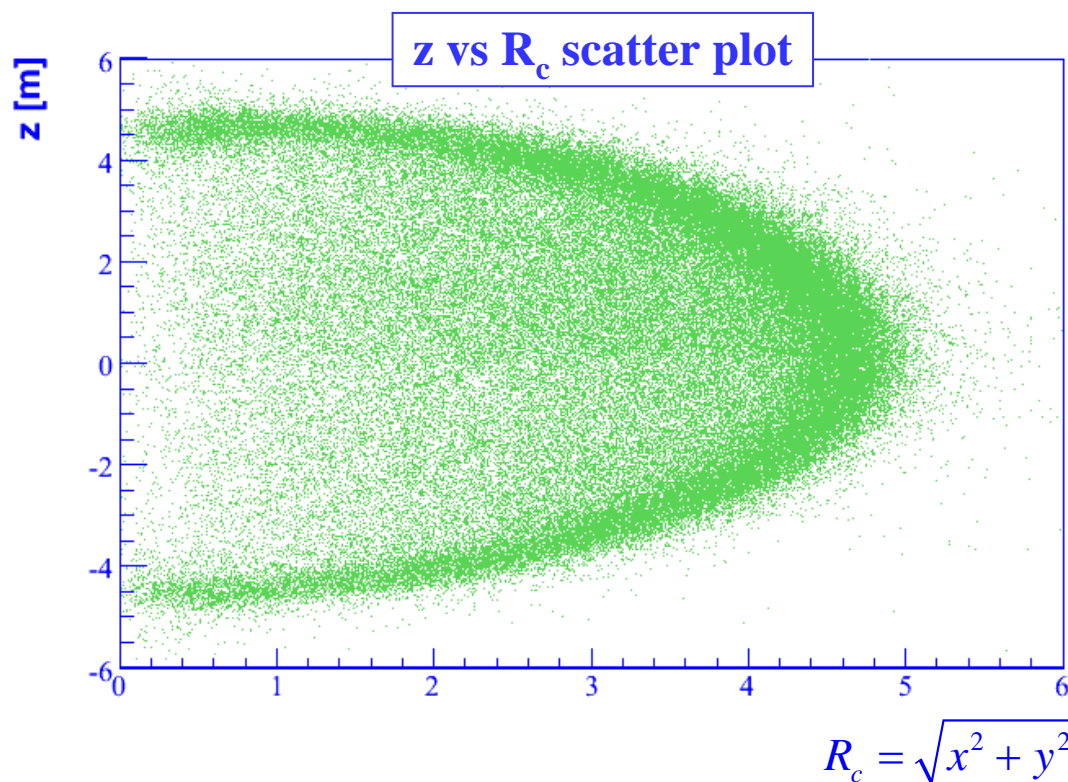


- Dopo i tagli, i μ non sono un problema per l'analisi del ^7Be
 - Fondo residuo stimato : $< 1 \text{ c/d/100 t}$

Ricostruzione della posizione



- Ricostruzione della posizione degli eventi nella sfera
 - Fit della distribuzione temporale degli eventi usando il tempo di volo
 - Verificata su MC e con dati reali (ad esempio ^{214}Bi - ^{214}Po)



Risoluzione

^{214}Bi - ^{214}Po (~800 KeV)

14±2 cm

^{14}C (~100 KeV):

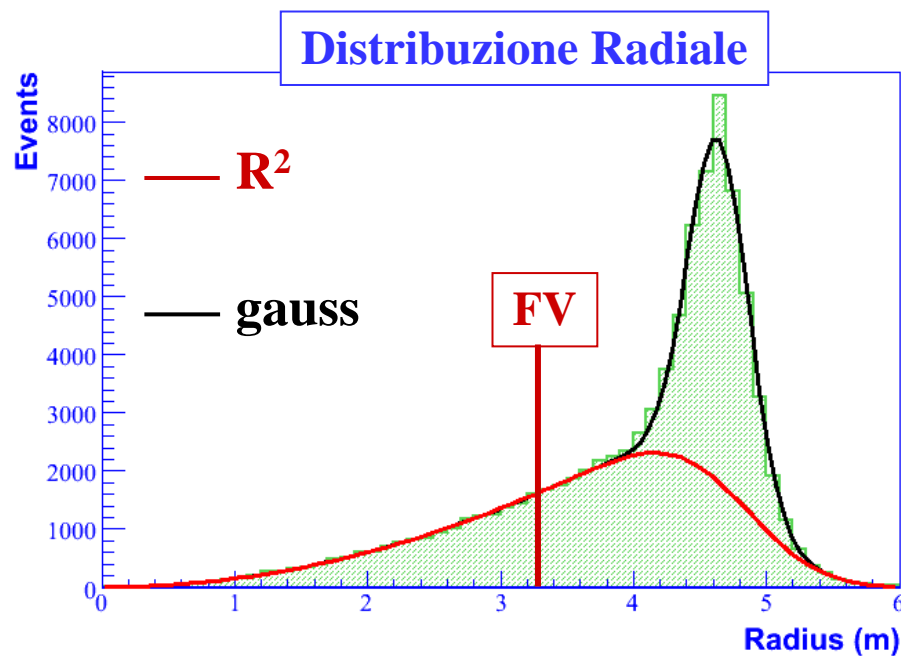
41±4 cm



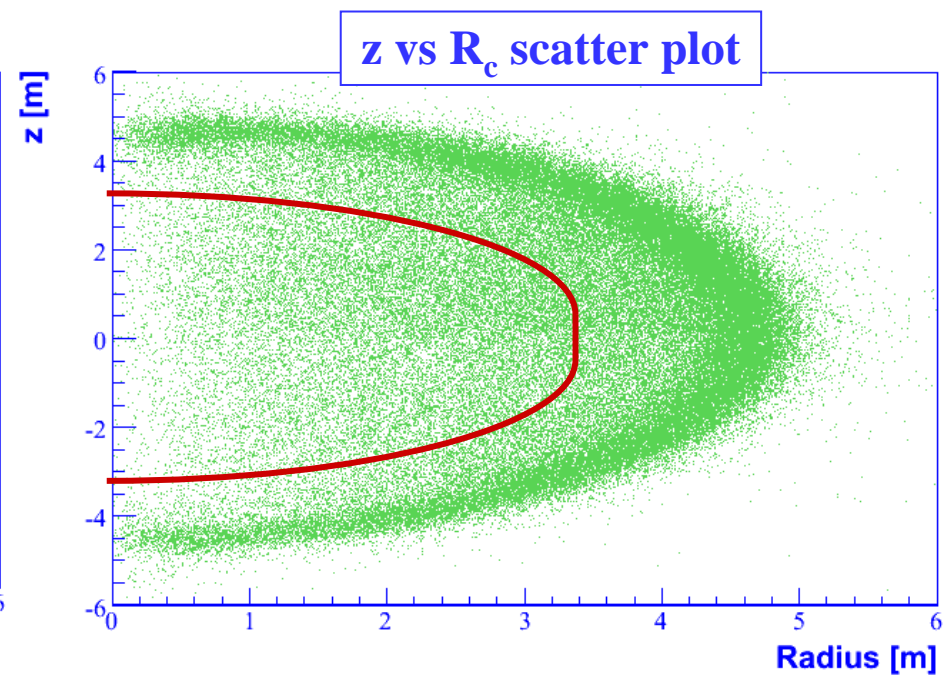
Definizione del volume fiduciale



- Alla periferia del Volume Fiduciale il fondo esterno è dominante
 - γ dai materiali (fototubi, sfera) che superano lo spessore del buffer
 - Sono eliminati con un “taglio di volume fiduciale”
 - Si selezionano le 100 t interne
 - $R < 3.276$ m (100 t massa nominale)

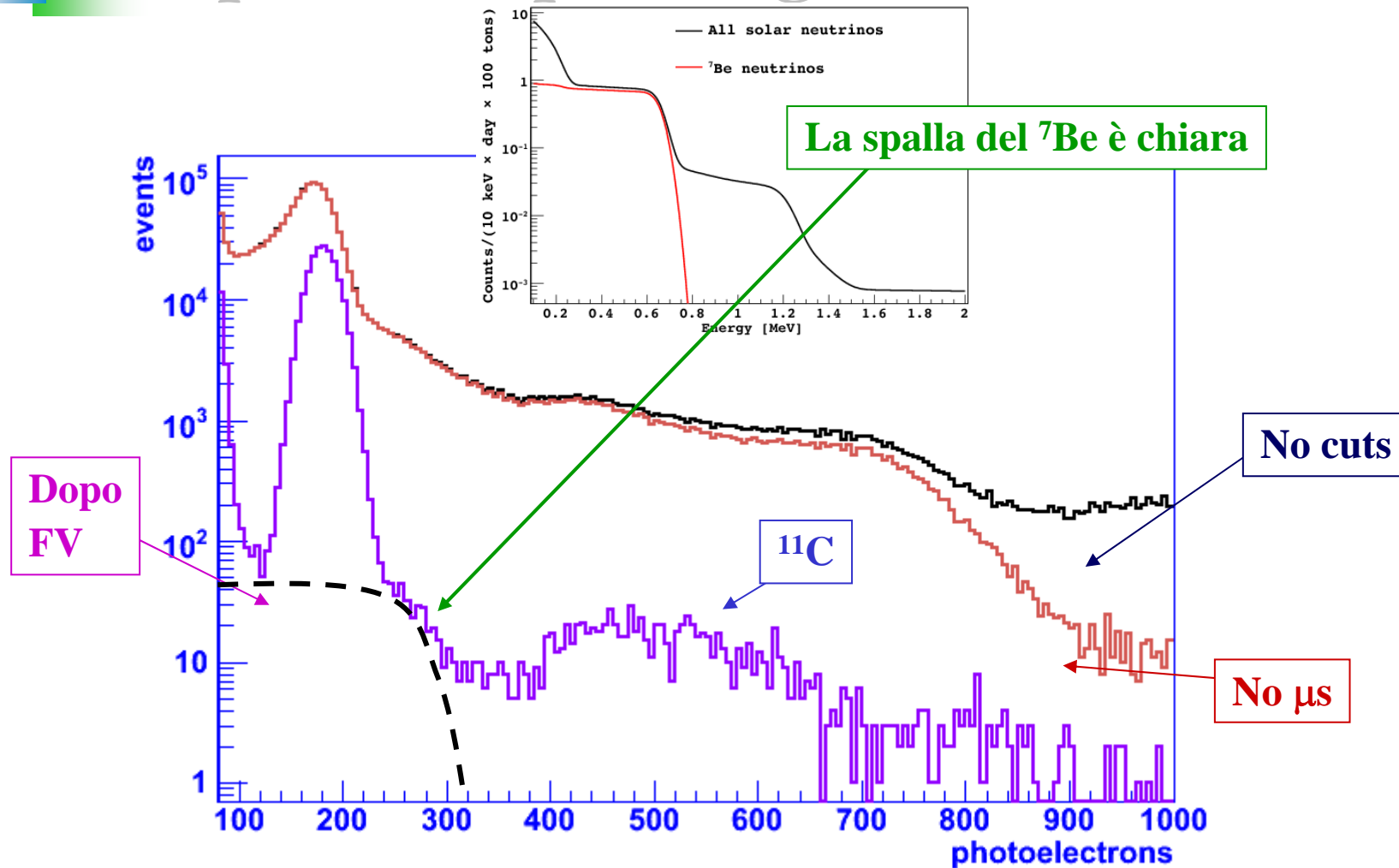


$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$



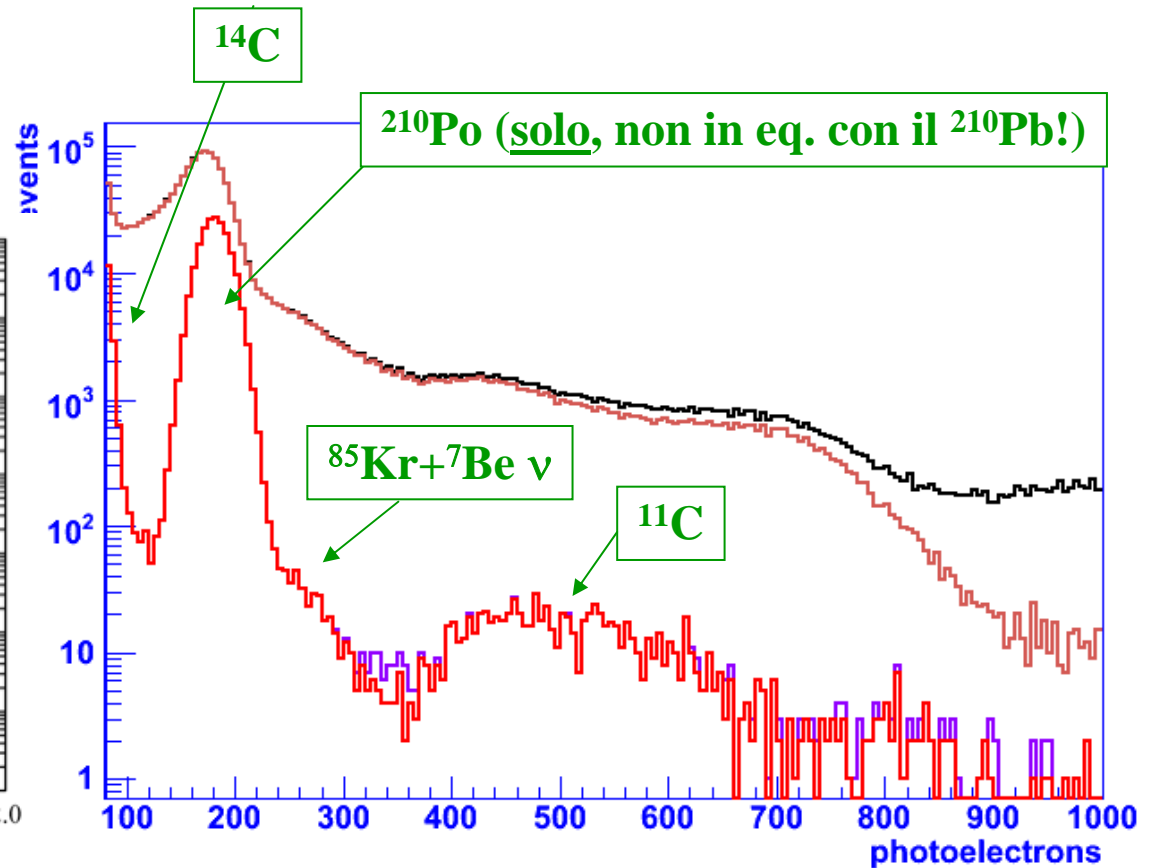
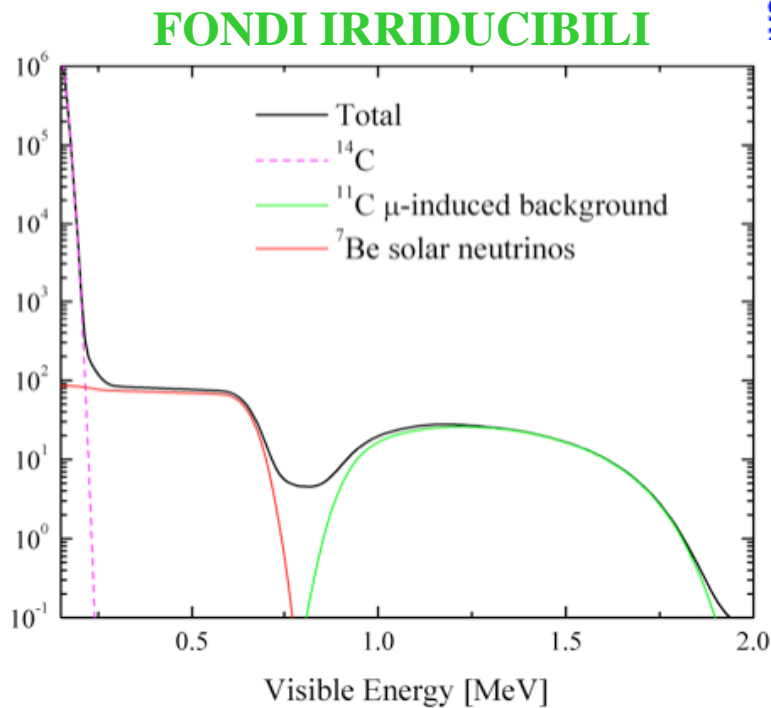
$$R_c = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Spettro dopo il taglio sul FV



- Il fondo esterno è dominante nella “Neutrino Window”, a parte la regione del picco del ^{210}Po

Spettro finale dopo tutti i tagli



A parte il picco dovuto al ^{210}Po e a un modesto contenuto di ^{85}Kr , il fondo è essenzialmente solo quello irriducibile dovuto a ^{14}C e ^{11}C cosmogenico.

Contenuto di ^{238}U and ^{232}Th

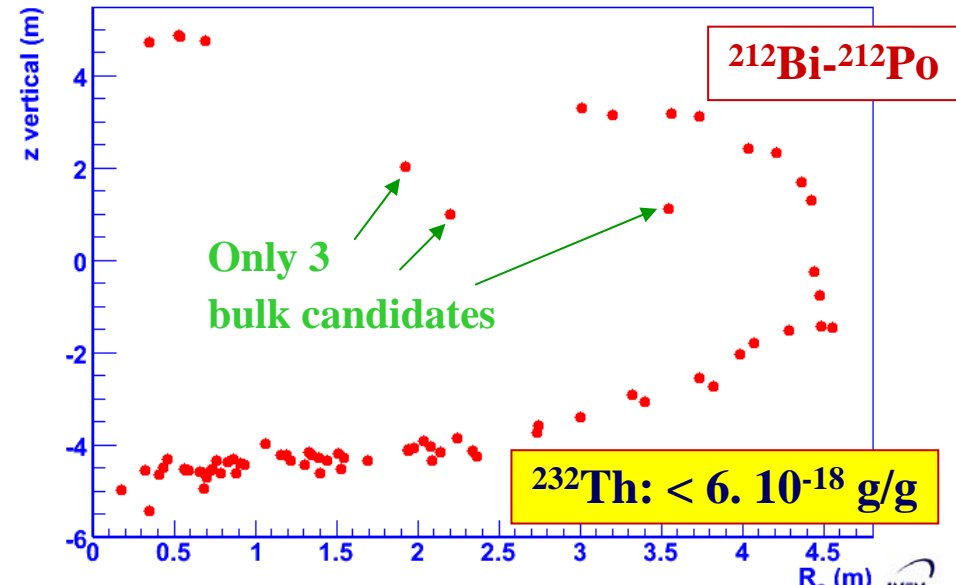
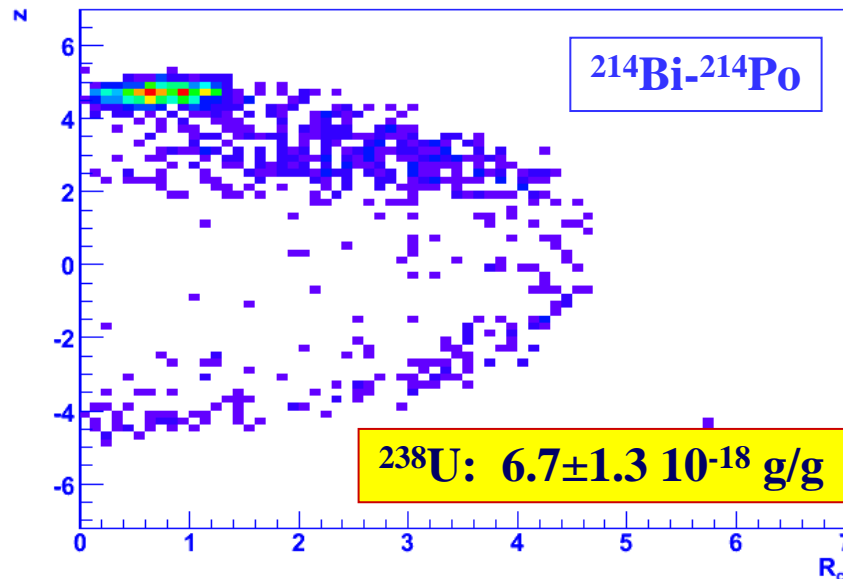
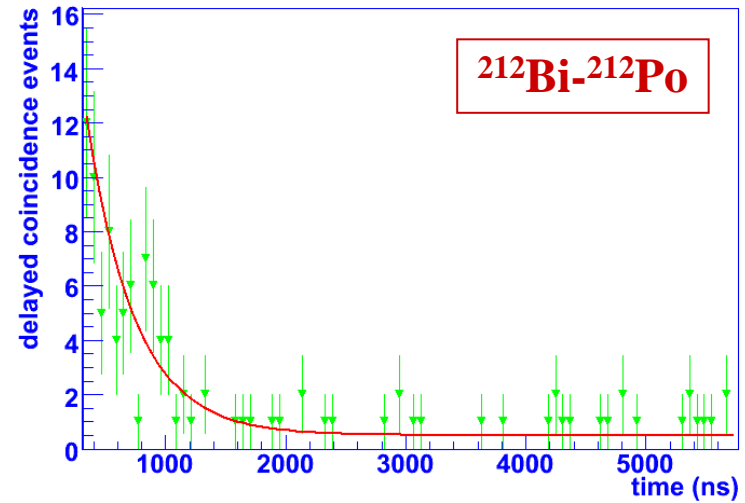


Assumendo equilibrio secolare, ^{232}Th and ^{238}U sono misurabili con le coincidenze veloci:

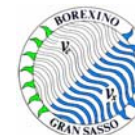
$$\tau = 432.8 \text{ ns}$$



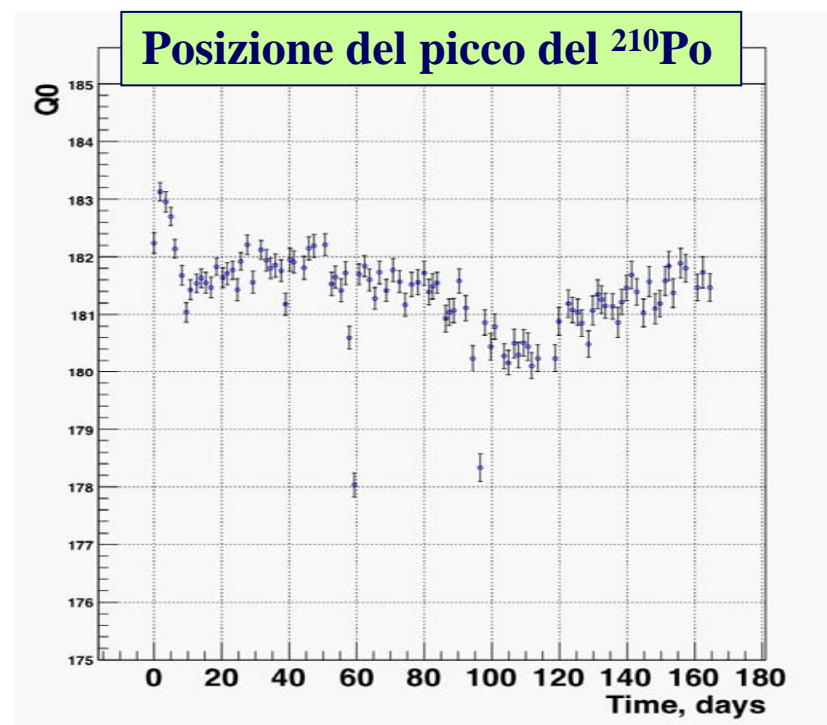
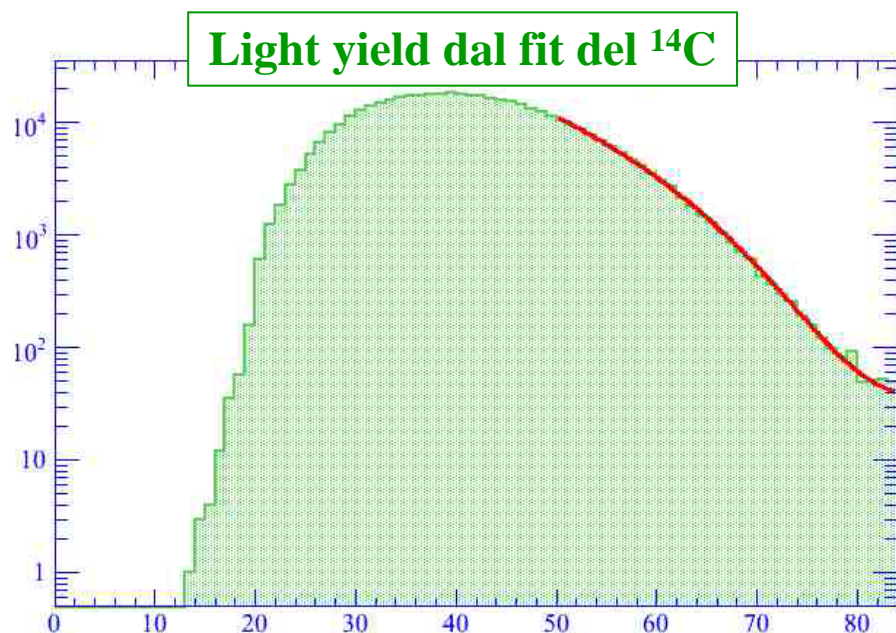
$$\tau = 236 \mu\text{s}$$



Calibrazione in energia e stabilità



- **Finora non abbiamo fatto calibrazioni con sorgenti interne**
 - Non è chiaro quando lo faremo (rischi di contaminazione)
- **La calibrazione attuale è fatta usando l'end point del ^{14}C**
 - Stabilità e risoluzione monitorata usando il **picco α del ^{210}Po**
 - Per ora non è possibile ottenere una grandissima precisione:
 - Spettro del ^{14}C e quenching poco noti



Segnale del ^7Be : fit senza sottrazione α/β

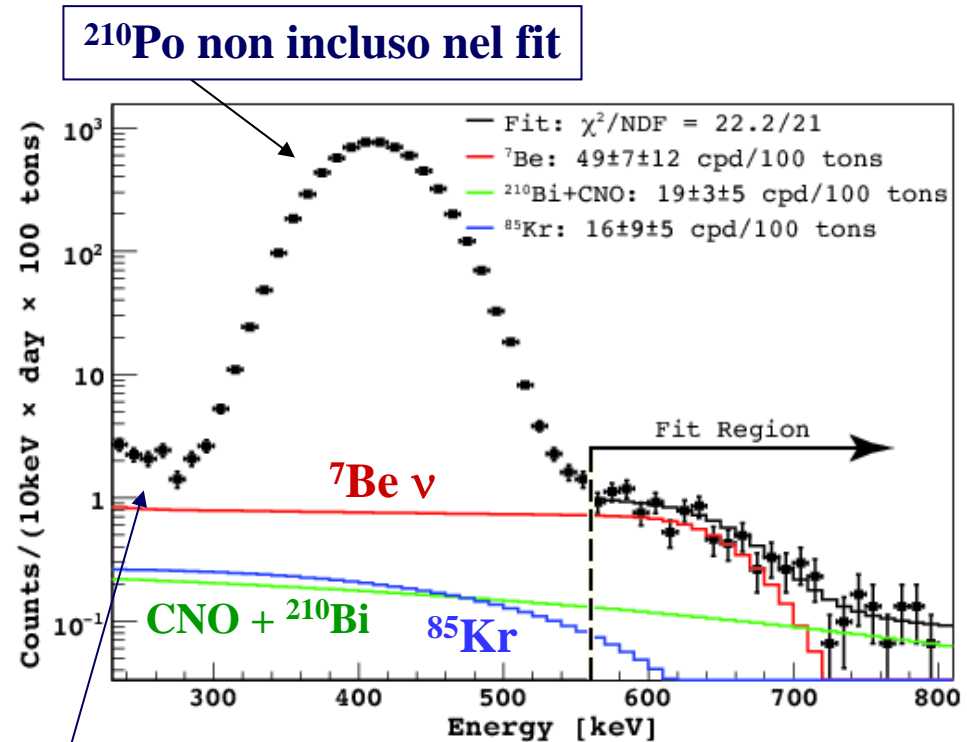


- **Strategia:**

- Fit della sola regione della spalla
- Uso della regione dalla fine del ^{14}C fino al picco del ^{210}Po per limitare il contenuto di ^{85}Kr
- pep fissati al valore atteso SSM-LMA

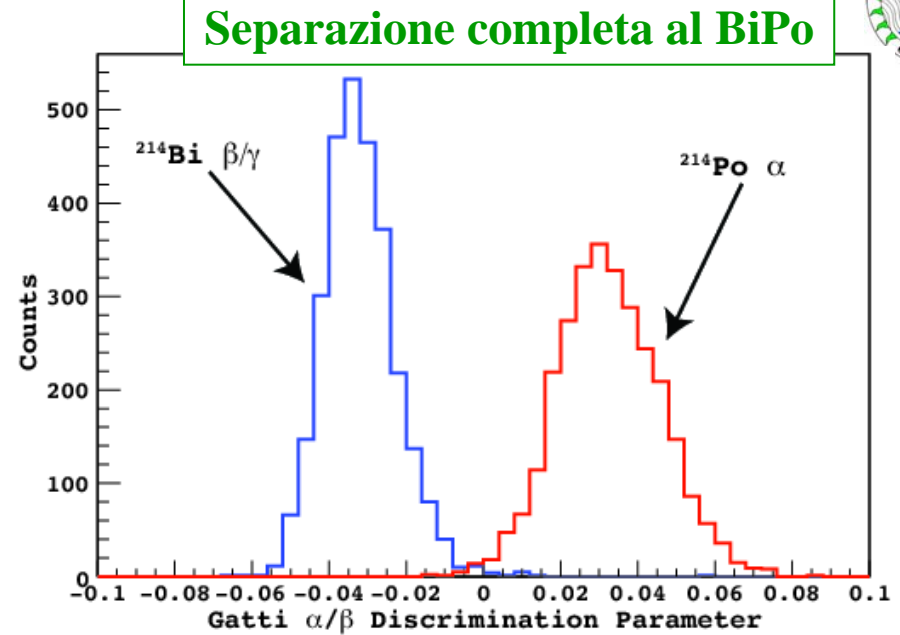
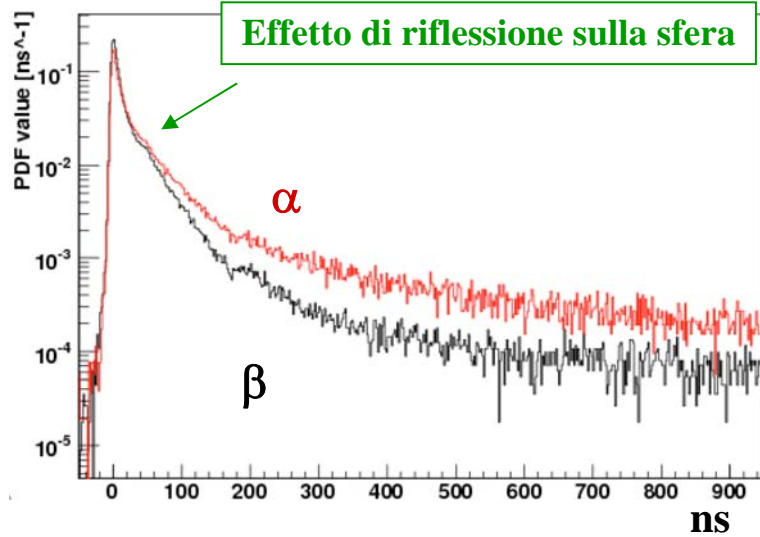
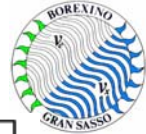
- **Componenti del fit:**

- $^7\text{Be } \nu$
- ^{85}Kr
- **CNO+ ^{210}Bi combinati**
 - Non distinguibili in questa regione di energia
- Light yield lasciato libero

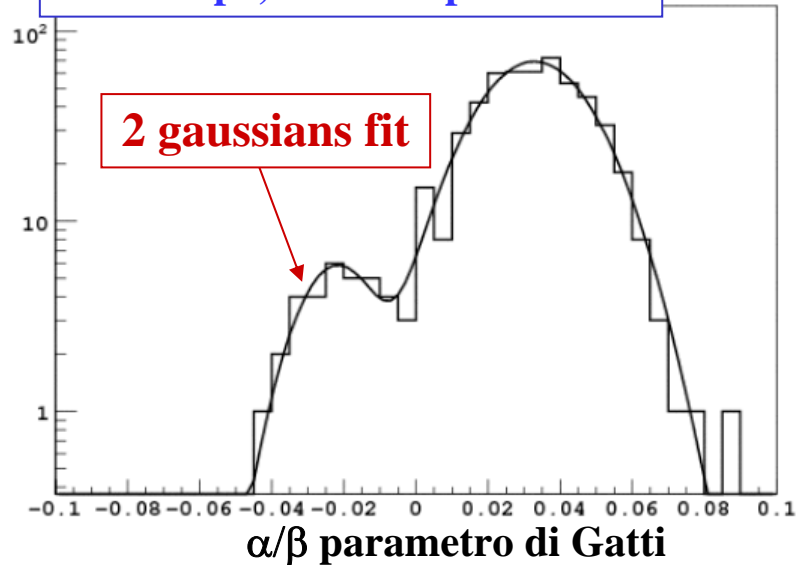


Questi bin limitano il contenuto di ^{85}Kr

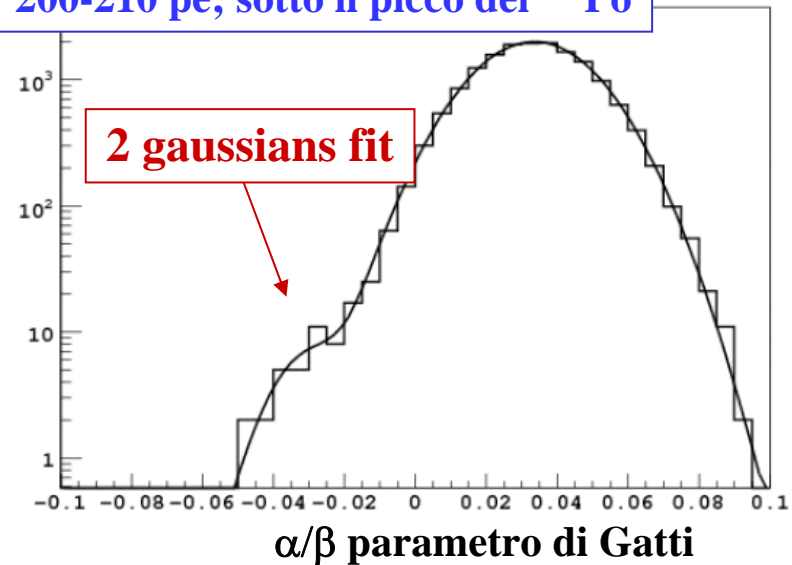
α/β



250-260 pe; vicino al picco ²¹⁰Po



200-210 pe; sotto il picco del ²¹⁰Po



Fit con sottrazione α/β del picco del ^{210}Po



- Il fondo del ^{210}Po è sottratto statisticamente nel modo seguente:

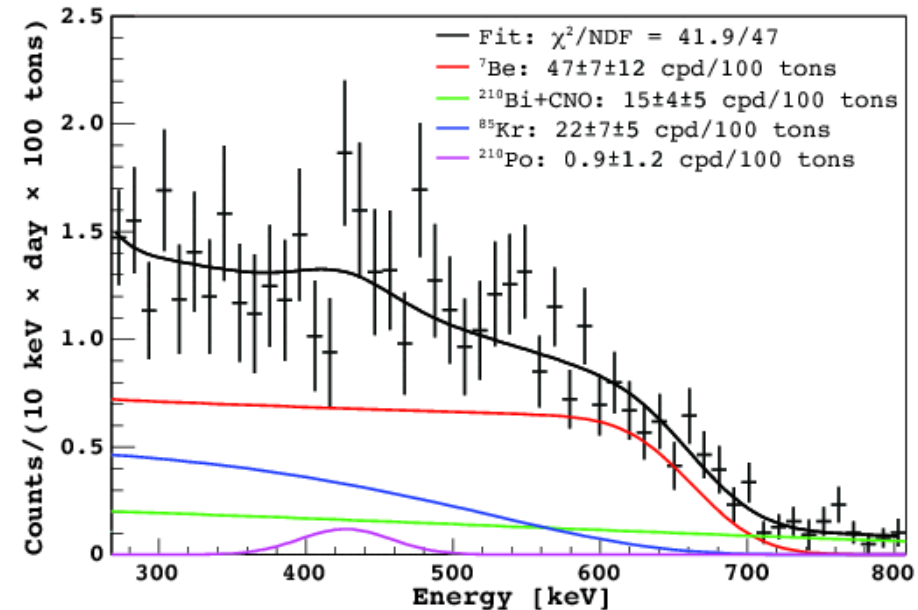
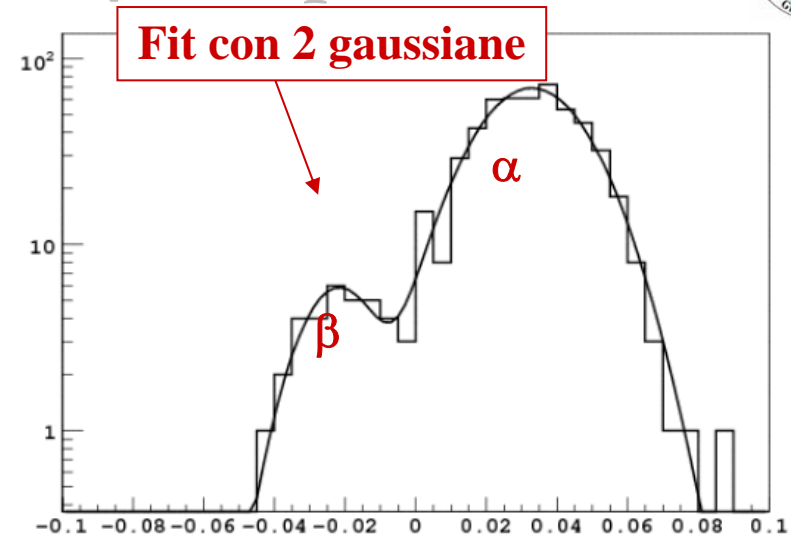
- Per ogni bin in energia, un fit alla variabile α/β di Gatti porge due gaussiane

- Dal fit, il numero di particelle α nel bin può essere misurato

- Si sottrae questo numero

- Lo spettro residuo è fittato fra 270 e 800 KeV

- Risultati consistenti con l'analisi senza sottrazione statistica



Il primo risultato (astro-ph 0708.2251v2)



${}^7\text{Be}$ ν Rate: $47 \pm 7_{\text{STAT}} \pm 12_{\text{SYS}}$ c/d/100 t

- **Errori statistici:**

- Effetto combinato della statistica, della scarsa conoscenza del contenuto di ${}^{85}\text{Kr}$ e della mancanza di una **precisa calibrazione in energia calibration**
- Per ora questi termini sono liberi nel fit e contribuiscono all'errore statistico

- **Errori sistematici:**

- In larga misura legati alla determinazione del **volume fiduciale**
- **Con solo 45 giorni di dati, and senza alcuna calibrazione, l'errore massimo stimato è del 25%**
 - Sarà migliorato rapidamente anche senza calibrazioni interne
 - Le calibrazioni saranno probabilmente indispensabili per la misura di precisione

Prospettive per il futuro



- Dopo il risultato estivo, siamo ottimisti...
 - Misura di precisione del flusso del ${}^7\text{Be}$ nel 2008/2009
 - Upper limit o misura del flusso del CNO
 - Possibilità, del tutto inattese e ancora da verificare, di:
 - Misurare i neutrini del pep
 - Misurare quelli del pp (questo davvero mai nemmeno sperato, si vedrà...)

- Inoltre:
 - Test di modelli geofisici misurando i **geo-neutrini**, i ν emessi dalla radioattività naturale responsabile dell'eccesso termico del pianeta
 - Rivelazione di neutrini da supernova, se c'è e se siamo accesi....
 - Misura del momento magnetico del neutrino con sorgente radioattiva
 - Ricerca di decadimenti rari