

IFAE – Catania, 30 marzo-2 aprile 2005

***MISURE DIRETTE  
DELLA MASSA DEL NEUTRINO***  
*con decadimenti beta a basso Q-valore*



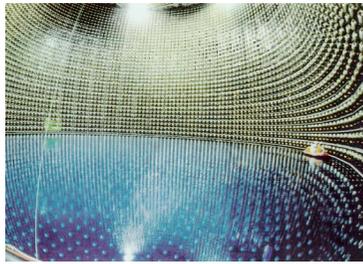
***Francesca Capozzi***

**Universita' di Milano – Bicocca  
INFN – Sezione di Milano**



# PERCHE' MISURARE LA MASSA DEL NEUTRINO?

Recenti risultati di esperimenti con: **NEUTRINI ATMOSFERICI** e **NEUTRINI SOLARI**



Super Kamiokande  
mixing

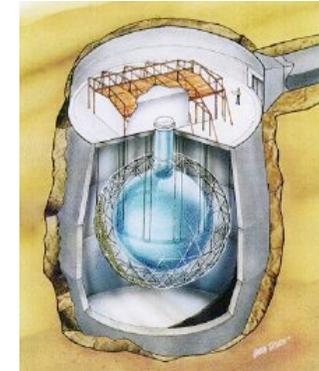
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$m_1, m_2, m_3$

Evidenze di oscillazioni di neutrini



NEUTRINI MASSIVI



SNO

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 c^4}{4E} \frac{L}{\hbar c}\right)$$

Gli esperimenti sulle oscillazioni sono sensibili solo a:

$$\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$$

- ▶ Qual è la scala assoluta delle masse dei neutrini?
- ▶ I neutrini sono particelle di Dirac o di Majorana?



MISURE della massa dei neutrini

# STUDIO DELLE MASSE DEI NEUTRINI

## ► RICERCA INDIRECTA

Ricerca di effetti che possono esistere solo se  $m_\nu \neq 0$

Cosmic Microwave Background measurement

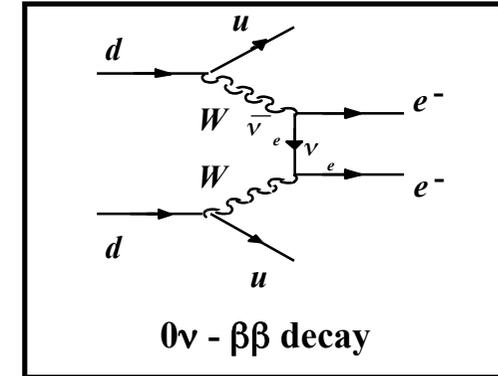
Risultati di WMAP

$$m(\nu_e) < 0.23 \text{ eV}$$

Neutrinoless Double Beta Decay

- Neutrino massivo

- Neutrino particella di Majorana



## ► RICERCA DIRETTA

-  $m(\nu_e) < [0.1-0.9] \text{ eV}$

Heidelberg-Moscow  $^{76}\text{Ge}$

-  $m(\nu_e) < [0.2-1.1] \text{ eV}$

Cuoricino  $^{130}\text{Te}$

Studio cinematico dei processi che inducono la presenza di neutrini nello stato finale

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

Decadimenti beta a basso Q valore

Massa efficace  $\nu_e \longrightarrow m_\beta = \sqrt{\sum |U_{ei}|^2 m_i^2}$



**MISURE DIRETTE SU SCALE < eV**

### Esperimenti con Trizio

(spettrometri)

Mainz - Germania ( $m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV}$ )

Troitsk - Russia ( $m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV}$ )

### KATRIN

(start 2008:  $m_{\nu_e} < 0.25 \text{ eV}$ )

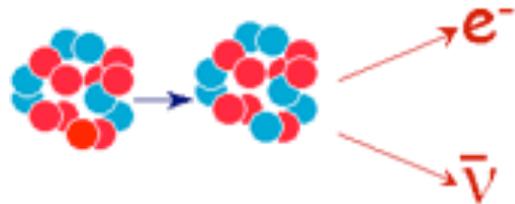
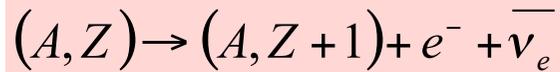
### Esperimenti con Renio

(bolometri)

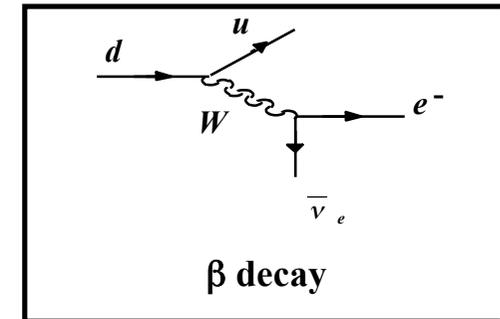
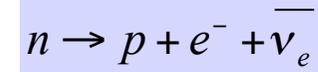
Mibeta - Milano ( $m_{\nu_e} < 15.6 \text{ eV}$ )

Manu - Genova ( $m_{\nu_e} < 26 \text{ eV}$ )

# IL DECADIMENTO BETA



Decadimento a 3 corpi



$$E_0 = M_{atomic}(A, Z)c^2 - M_{atomic}(A, Z + 1)c^2$$

$$\approx T_{e^-} + T_{\bar{\nu}_e}$$

⇒ Spettro continuo delle particelle beta

$$N(E_\beta) = p_\beta (E_\beta + m_e c^2) (E_0 - E_\beta) \sqrt{(E_0 - E_\beta)^2 - m_{\bar{\nu}_e}^2 c^4} F(Z, E_\beta) S(E_\beta) [1 + \delta_R(Z, E_\beta)]$$

Fattore dello spazio delle fasi

Fattore di  
Correzione Coulombiana  
(funzione di Fermi)

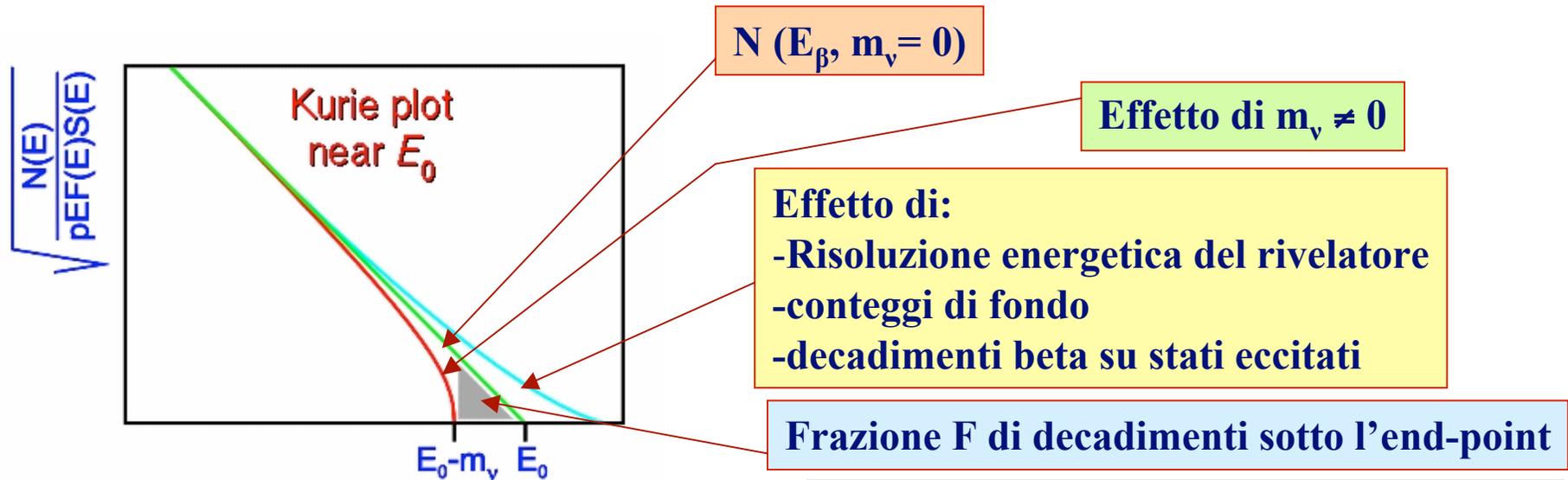
Fattore di forma:  
contiene l'elemento di  
matrice nucleare

Correzione radiativa

# SPETTRO BETA: KURIE PLOT

## CONVENIENTE LINEARIZZAZIONE DELLO SPETTRO BETA

$$K(E_\beta) \equiv \sqrt{\frac{N(E_\beta)}{p_\beta (E_\beta + m_e c^2) S(E_\beta) F(Z, E_\beta)}} = (E_0 - E_\beta) \sqrt{1 - \frac{m_{\nu_e}^2 c^4}{(E_0 - E_\beta)^2}}$$



### RICHIESTE SPERIMENTALI

- ▶ **Alta risoluzione energetica**
- ▶ **Alta statistica all'end-point dello spettro  $\beta$**

⇒ **sorgente  $\beta$  con**

**Alta attività**  
**Basso  $E_0$**

$$F(\delta E) = \int_{E_0 - \delta E}^{E_0} N(E_\beta, m_{\nu_e} = 0) dE \approx 2 \left( \frac{\delta E}{E_0} \right)^3$$

# ***DUE APPROCCI SPERIMENTALI COMPLEMENTARI***



## **SORGENTE SEPARATA DAL RIVELATORE (la sorgente è sempre Trizio)**

- ▶ **SPETTROMETRI MAGNETICI ED ELETTROSTATICI**
- ▶ Determina l'energia dell'elettrone per mezzo di una selezione degli elettroni beta operata attraverso opportuni **campi elettrici e magnetici**
- ▶ Misura l'energia degli elettroni **fuori dalla sorgente**
- ▶ Sensibilità attuale raggiunta: **~ 2 eV**



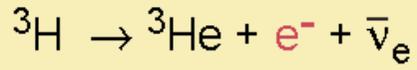
## **SORGENTE COINCIDENTE CON IL RIVELATORE (approccio calorimetrico)**

- ▶ **BOLOMETRI**
- ▶ Determina **tutta l'energia "visibile"** del decadimento con alta risoluzione
- ▶ Misura l'energia del neutrino
- ▶ Sensibilità attuale raggiunta: **~ 15 eV**

**INCERTEZZE SISTEMATICHE COMPLETAMENTE DIFFERENTI**

# IL DECADIMENTO $\beta$ DEL TRIZIO

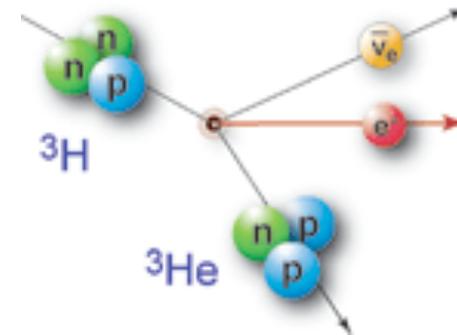
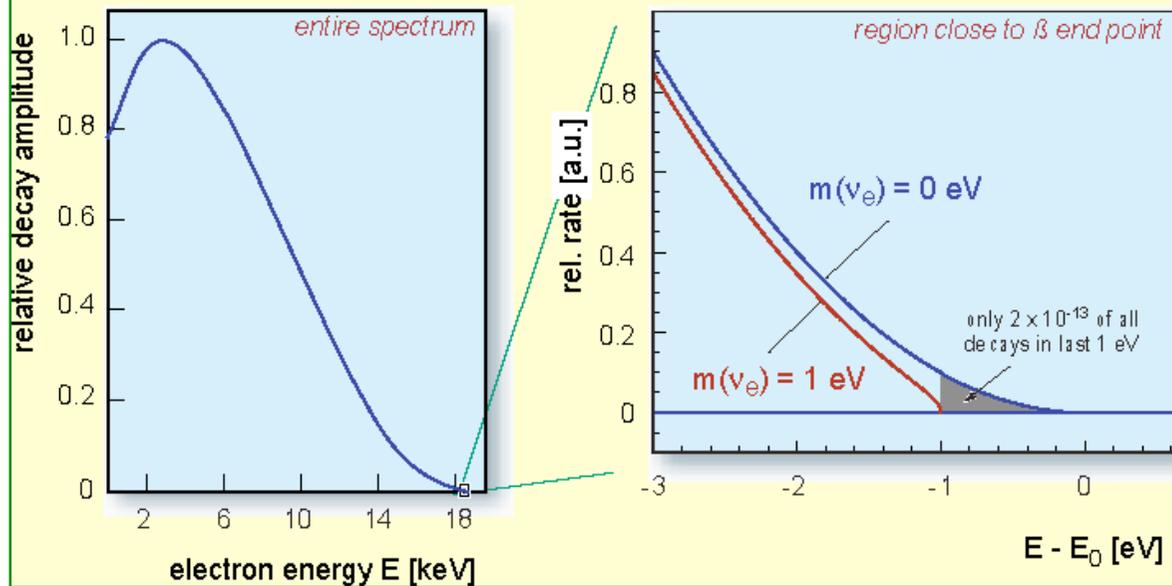
## tritium $\beta$ -decay and the neutrino rest mass



superallowed

half life :  $t_{1/2} = 12.32 \text{ a}$

$\beta$  end point energy :  $E_0 = 18.57 \text{ keV}$



- ▶ basso Q valore
  - buona statistica all'end point
- ▶ moderata vita media
  - elevata attività

- ▶ Semplice configurazione delle shell elettroniche di  ${}^3\text{H}$  ed  ${}^3\text{He}^+$ 
  - minime correzioni dovute a stati finali elettronici
- ▶ Transizione nucleare super-permessa
  - non sono necessarie correzioni per l'elemento di matrice nucleare M (non dipende dall'energia dell'elettrone)

# LA SORGENTE DI TRIZIO

## RICHIESTE

- Alta attività specifica
- Basso auto-assorbimento e scattering inelastico
- Controllo degli stati eccitati → uso di molecole di trizio  $T_2$

## QCTS

### SORGENTE $T_2$ SOLIDA

- ☺ Bassa probabilità di scattering inelastico
- ☺ Sorgente omogenea
- ☹ Backscattering dai substrati
- ☹ Effetti di eccitazione dello stato solido
- ☹ Caricamento della sorgente
- ☹ Irruvidimento della sorgente

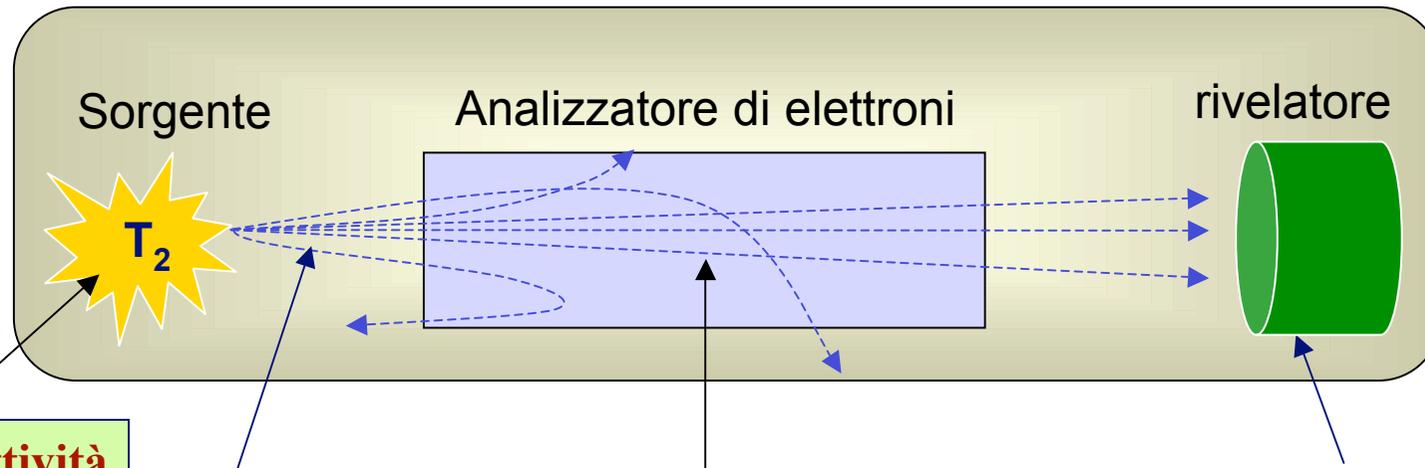


## WGTS

### SORGENTE $T_2$ GASSOSA

- ☺ Attività specifica più alta
- ☺ Minore probabilità di scattering inelastico
- ☺ No caricamento della sorgente
- ☺ No backscattering
- ☺ Omogeneità della sorgente
- ☺ Calibrazione con gas radioattivi
- ☹ Stabilità dell'intensità di sorgente

# Spettroscopia beta con spettrometri elettrostatici e magnetici



Alta attività

Alta luminosità  $L \propto \Delta\Omega/4\pi$   
(frazione di angolo solido trasmesso)

Alta risoluzione energetica

Due tipi

- differenziale: seleziona  $\delta E_e$
- integrale: seleziona  $E_e > E_{th}$

- alta efficienza
- basso fondo

## Procedura sperimentale

- lo spettro del T è misurato a step selezionando l'energia da  $E_{min}$  a  $Q$
- $E_{max} > Q$  per monitorare il fondo
- Per ogni  $E_e$  step, l'acquisizione dura un certo tempo  $\Delta t$ , con  $\Delta t$  crescente con  $E_e$



Stabilità nel tempo di sorgente e spettrometro - eccellente controllo del tempo vivo

# MAINZ E TROITSK: *i risultati*

MAINZ sorgente T<sub>2</sub> solida (QCTS)

Rapporto segnale su fondo: MIGLIORATO

- Riduzione del fondo
- Massimizzazione dell'intensità della sorgente

Irruvidimento della sorgente:

(che induce dispersione nelle perdite di energia) è stato ridotto dal raffreddamento del film di T<sub>2</sub> sotto 1.2 K.

Caricamento della sorgente:

Insieme al relativo profilo del potenziale è stato modellizzato ed incluso nell'analisi.

Perdita di energia nella sorgente:

Studiata con differenti spessori di sorgente

$$m(\nu_e)^2 = (-1.6 \pm 2.5_{\text{stat}} \pm 2.1_{\text{sys}}) \text{ eV}^2$$

$$m(\nu_e) \leq 2.2 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.})$$

TROITSK sorgente T<sub>2</sub> gassosa (WGTS)

Funzione di risposta del rivelatore:

Misure accurate senza T<sub>2</sub> gassoso e con T<sub>2</sub> gassoso a diverse pressioni

Anomalia:

I dati raccolti presentano una anomalia non ancora ben spiegata nello spettro integrale nella regione dell'end-point

$$m(\nu_e)^2 = (-1.0 \pm 3.0_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{sys}}) \text{ eV}^2$$

$$m(\nu_e) \leq 2.2 \text{ eV} \quad (95\% \text{ C.L.})$$

I risultati di Mainz e Troitsk rappresentano attualmente la migliore sensibilità al mondo sulla massa del neutrino in un esperimento di misura diretta.

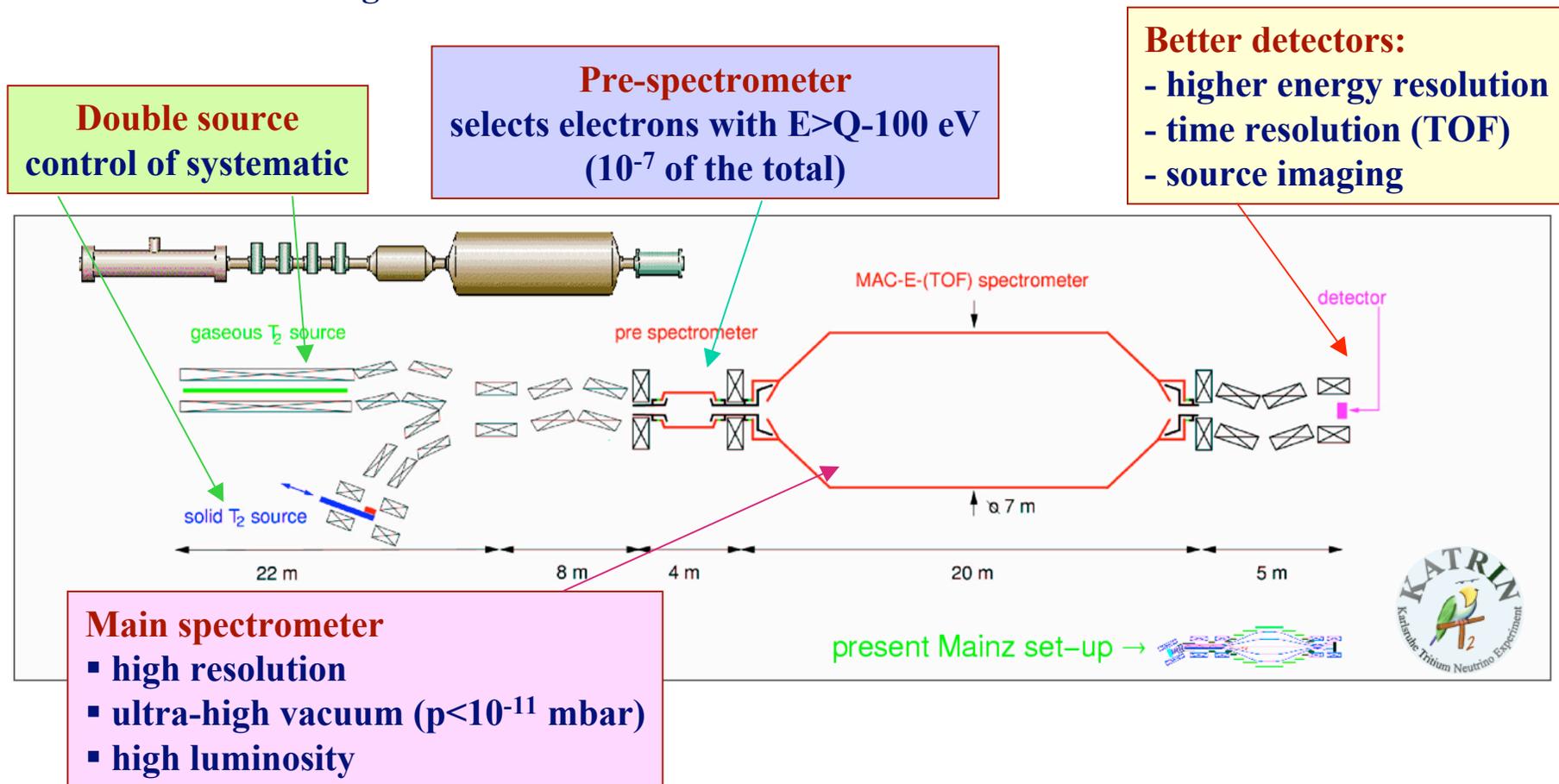
# L'ESPERIMENTO KATRIN: *K*arlsruhe *T*ritium *N*eutrino

**OBIETTIVO:** start 2008, sensibilità su  $m_{\nu_e} < 0.25$  eV

letter of intent  
hep-ex/0109033

**STRATEGIA:**

- migliore risoluzione energetica  $\rightarrow \Delta E_{FWHM} \sim 1$  eV
- migliore statistica  $\rightarrow$  sorgente più intensa, tempo di misura più lungo
- miglior controllo delle sistematiche



# IL DECADIMENTO $\beta$ DEL $^{187}\text{Re}$

## Sorgente $\beta$

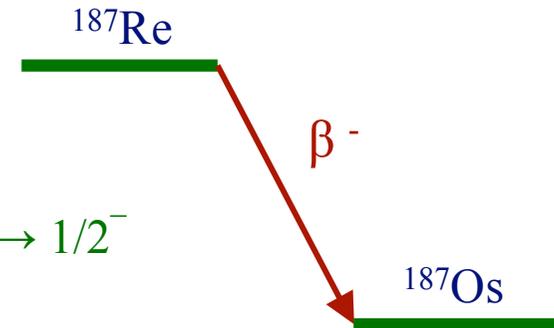
$$Q_\beta = 2.46 \text{ keV}$$

$$T_{1/2} = 43.5 \text{ Gy}$$

A.I.  $\sim 63\%$



Transizione unica prima proibita  $5/2^+ \rightarrow 1/2^-$



## VANTAGGI

- ☺ Q valore più piccolo in natura !!!
- ☺ Elevata abbondanza isotopica

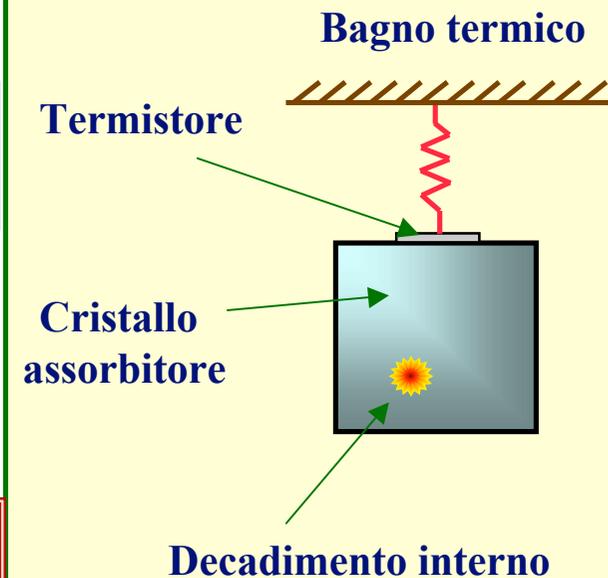
Alta frazione di eventi sotto l'end point

## SVANTAGGI

- ☹ Vita media molto grande  $\rightarrow$  basso rate di decadimento

Massima efficienza  $\rightarrow$  sorgente = rivelatore  
Misura dell'energia di diseccitazione  
di eventuali decadimenti su stati eccitati

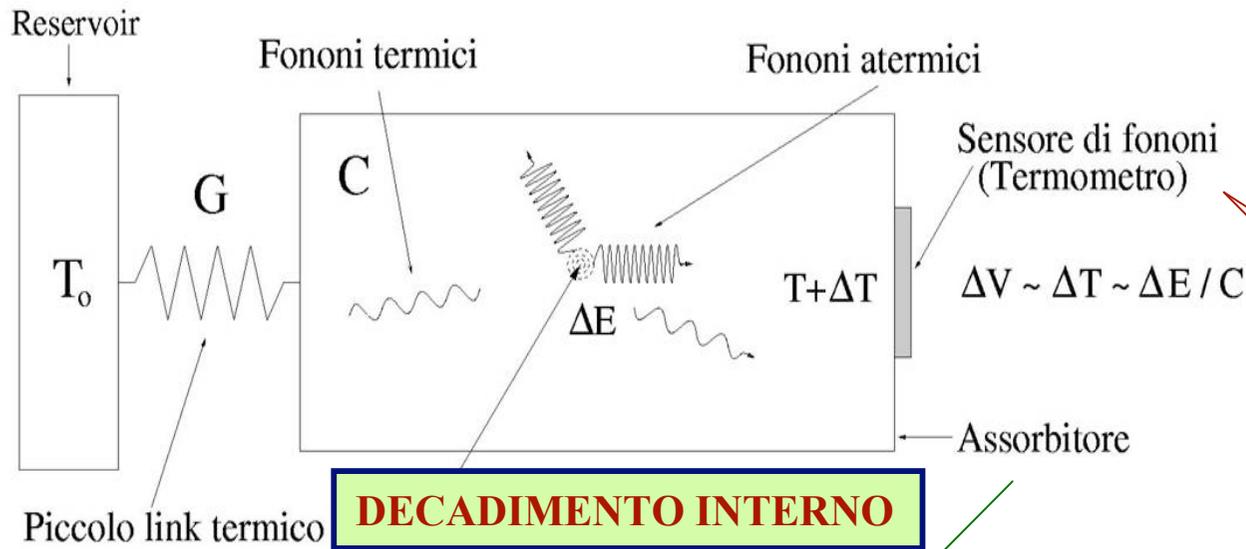
## Rivelatore criogenico



► Ha senso studiare il decadimento  $\beta$  del  $^{187}\text{Re}$  con i bolometri

# I BOLOMETRI : rivelatori termici

- Rivelatori omogenei non convenzionali
  - Sorgente attiva  $\beta$  coincide con il rivelatore



Completa termalizzazione  
 $\downarrow$   
 Sensore di fononi  
 $\downarrow$   
 Sensore di temperatura

Termistori di:  
 Si impiantato  
 Ge NTD

Variable Range Hopping

$$\rho(T) = \rho_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

**CALORIMETRI**  
 misurano tutta l'energia E  
 rilasciata nel decadimento  
 tranne quella del  $v_e$ :  
 $E = E_0 - E_v$

## Assorbitore

- Capacità termica piccola
- Dielettrico, diamagnetico
- Dimensioni ridotte
- T molto basse
- Alta temperatura di Debye

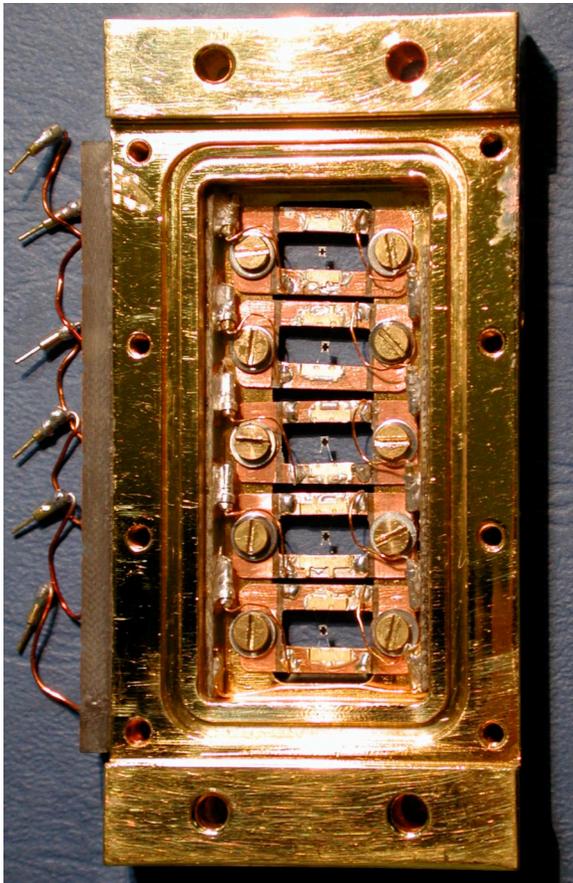
## Legge di Debye

$$C(T) \div \frac{m}{M} \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \quad T < \Theta_D$$

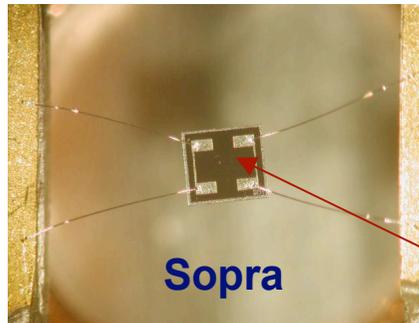
# L'ESPERIMENTO MIBETA: *i rivelatori*

Schiere di microrivelatori bolometrici operanti a bassissime temperature  
(~ 100 mK; criostato a diluizione He3-He4 - L.A.S.A – SEGRATE - MI)

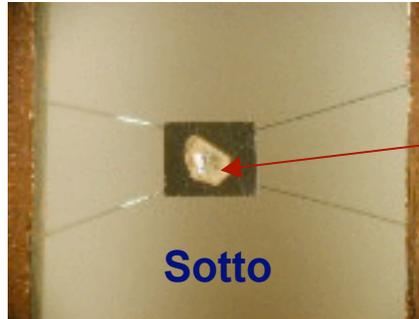
10 MICROBOLOMETRI  
2 array di 5 rivelatori



Singolo rivelatore



Sopra



Sotto

## PRESTAZIONI

- Tempo salita:  $\langle \tau_r \rangle = 492 \mu\text{s}$
- Risoluzione energetica al  $\beta$  end-point  
 $\langle \Delta E_{\text{FWHM}} \rangle = 28.5 \text{ eV}$

Termistore di silicio  
500 x 350 x 0.5  $\mu\text{m}^3$

Cristallo di AgReO4

Massa: 250-285  $\mu\text{g}$   $\rightarrow$   $\langle m \rangle = 270 \mu\text{g}$

Attività  $\beta$ :  $5.4 \times 10^{-4} \text{ Bq}/\mu\text{g}$

**MIBETA:** massa totale acquisita = 2174  $\mu\text{g}$   
attività  $\beta$  totale = 1.17 Bq

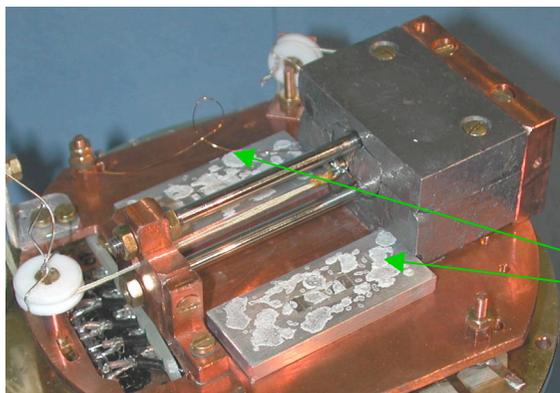
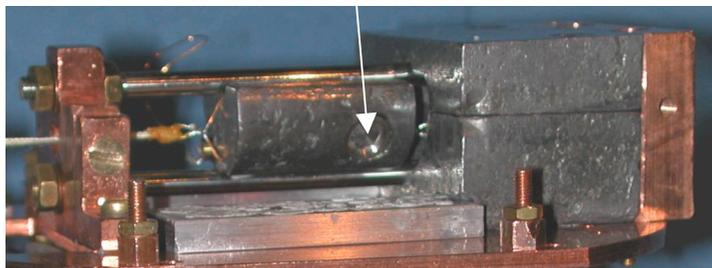
# MIBETA: la calibrazione

## PERIODICA ESPOSIZIONE DEI RIVELATORI A RAGGI X DI FLUORESCENZA DI VARI ELEMENTI

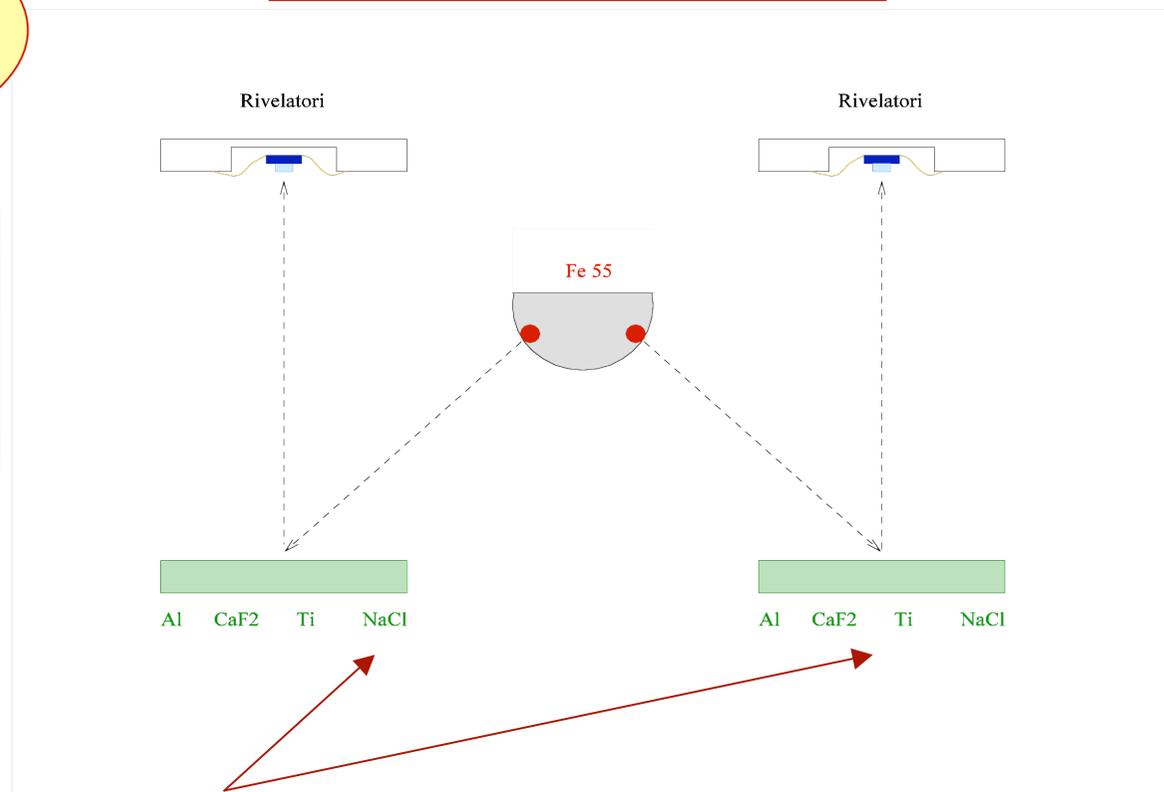
Sorgente primaria:

2 x  $^{55}\text{Fe}$  (5 mCi)

$^{55}\text{Fe} \rightarrow ^{55}\text{Mn}$  C.E.



### PROCESSO A DUE STADI



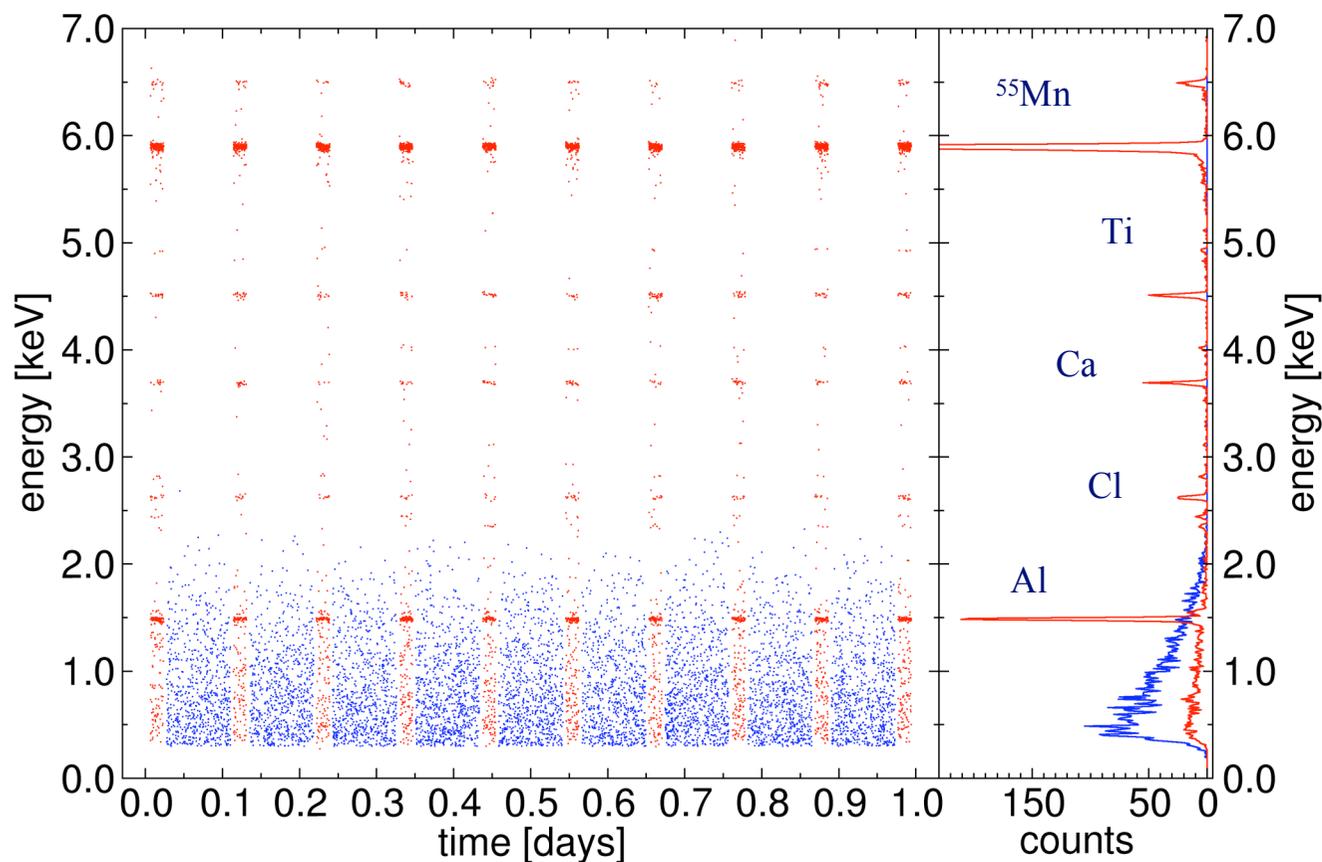
BERSAGLI CON SORGENTI DI FLUORESCENZA  
Al CaF<sub>2</sub> Ti NaCl

# MIBETA: la calibrazione

**PRESA DATI:** 25 min calibrazione, 2 ore acquisizione  $\beta$

**Picchi di fluorescenza:** Al, Cl, Ca, Ti

**Energie (keV) delle righe dello spettro di raggi X di calibrazione**

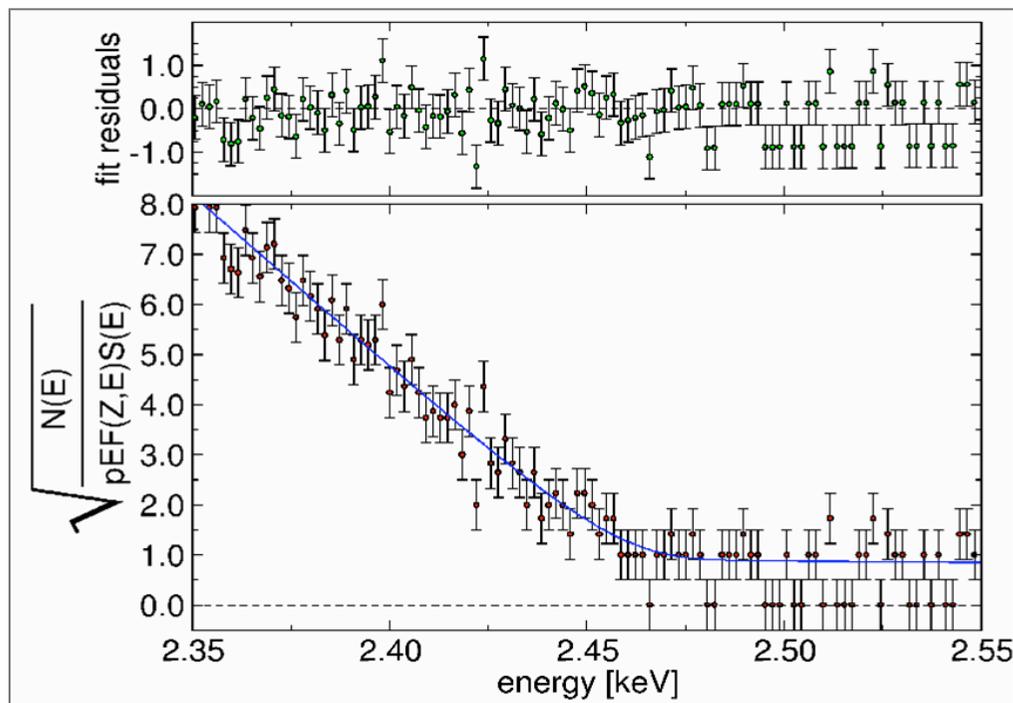


	$K_{\alpha}$	$K_{\beta}$
$^{55}\text{Mn}$	5.89	6.49

	$K_{\alpha}$	$K_{\beta}$
Al	1.49	1.55
Cl	2.62	2.82
Ca	3.69	4.01
Ti	4.51	4.93

# MIBETA: i risultati

## KURIE PLOT



## MASSA DEL NEUTRINO

$$m(\nu_e)^2 = (-112 \pm 207_{\text{stat}} \pm 90_{\text{sys}}) \text{ eV}^2$$
$$m(\nu_e) \leq 15.6 \text{ eV} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

MIBETA ha misurato  
da giugno 2002 fino ad aprile 2003

Tempo vivo : 210 giorni  
Calibrazione: 42 giorni  
Acquisizione  $\beta$  pura: 168 giorni

## Q VALORE

$$Q = 2465.3 \pm 0.5_{\text{STAT}} \pm 1.5_{\text{SYS}} \text{ eV}$$

INDIPENDENTE DALL'INTERVALLO DI FIT

## VITA MEDIA

$$\tau_{1/2} = 43.2 \pm 0.2_{\text{STAT}} \pm 0.1_{\text{SYS}} \text{ Gy}$$

OTTENUTO DALLA DISTRIBUZIONE  
STATISTICA DEGLI INTERVALLI DI  
TEMPO TRA DUE IMPULSI CONSECUTIVI

# MIBETA: *il futuro*

**STRATEGIA:** CONTINUARE A SVILUPPARE LA TECNICA BOLOMETRICA

- AUMENTARE IL NUMERO DI CANALI
- MIGLIORARE LA RISOLUZIONE ENERGETICA
- RIDURRE IL RISE TIME
- RIDURRE IL FONDO E MODELLIZZARLO

## FASE I (start 2007)

☺ RAGGIUNGERE LA SENSIBILITA' DI **2 eV**  
PRIMA DELLA FINE DI KATRIN

## FASE II

☺ RAGGIUNGERE UNA SENSIBILITA' **< eV**  
COME KATRIN

### ► RICHIESTE SPERIMENTALI:

- 200 rivelatori
- $m(\text{AgReO}_4) \sim 450 \mu\text{g/riv}$
- attività  $\beta$  ( $^{187}\text{Re}$ ) = 0.25 Bq/riv
- $\Delta E_{\text{FWHM}} = 10\text{-}15 \text{ eV}$
- risoluzione temporale = 100-200  $\mu\text{s}$
- fondo < 100 cont/keV/anno/riv
- 3 anni di misura

### ► R & D: nuovi termistori

NTD Ge

Si impiantato

IMPORTANTE ESPERIMENTO  
COMPLEMENTARE A KATRIN

# L'ESPERIMENTO MANU2 (Genova)

## Tecnica simile a MIBETA

- Singolo rivelatore
- cristallo di Re metallico (1.5 mg)
- sensore NTD
- $\Delta E_{\text{FWHM}} = 96 \text{ eV}$
- $Q = 2470 \pm 1 \pm 4 \text{ eV}$
- $t_{1/2} = 41.2 \pm 0.02 \pm 0.11 \text{ Gy}$

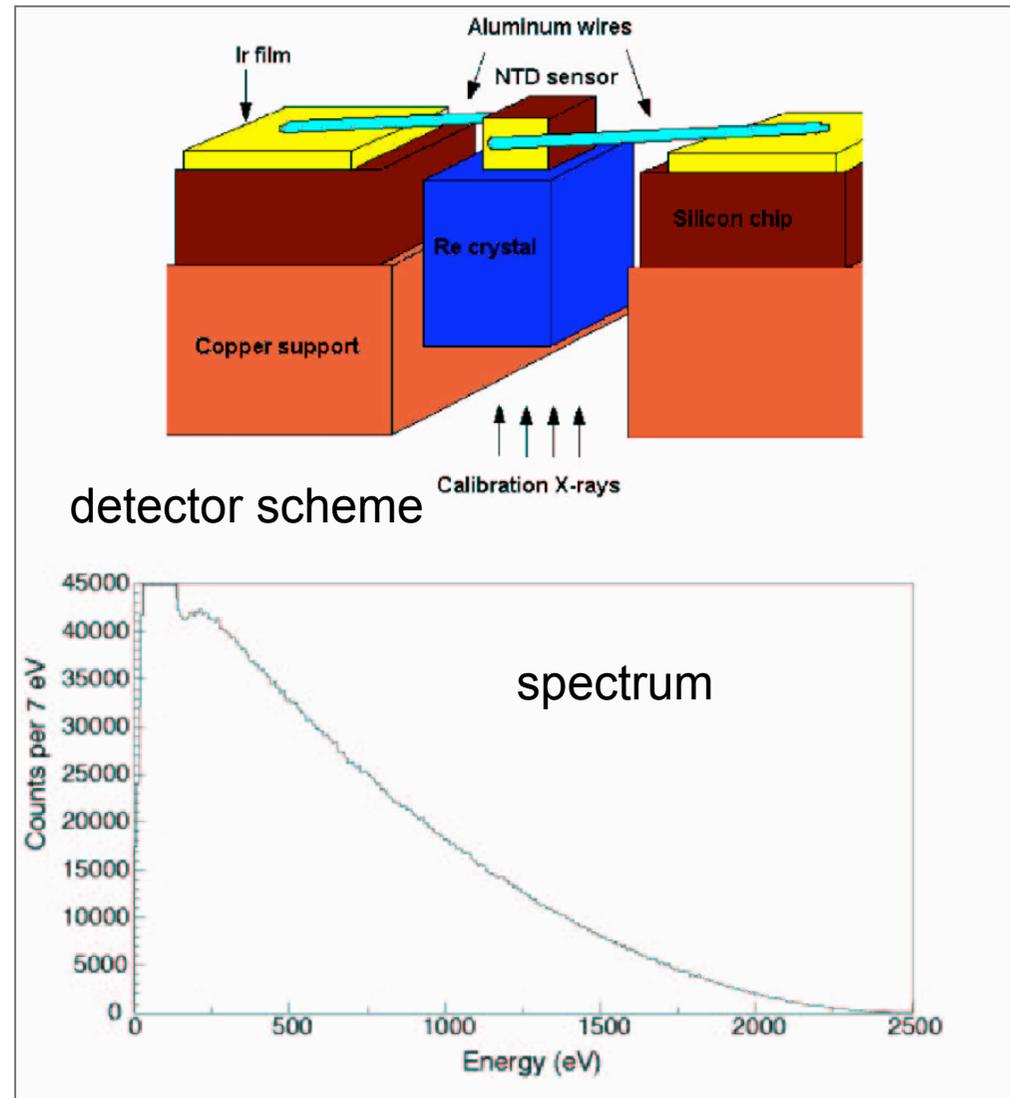
$$M_\nu < 26 \text{ eV (95 \% c.l.)}$$

## Obiettivi futuri

- $A = 10 \text{ Hz}$
- $\Delta E_{\text{FWHM}} = 1 \text{ eV}$
- rise-time  $\cong 1 \text{ ms}$



Nuove tecnologie per termistori  
transition edge sensors (TES)



# CONCLUSIONI

I limiti più stringenti sulla massa del neutrino ottenuti con misura diretta arrivano dagli esperimenti con gli spettrometri **MAINZ** e **TROITSK**

$$m(\nu_e) < 2.2 \text{ eV}$$

Misure indirette della massa del neutrino indicano una sensibilità

$$m(\nu_e) < \text{eV}$$



**NECESSARIE NUOVE MISURE DIRETTE DELLA MASSA DEL NEUTRINO**

- Il futuro esperimento **KATRIN** con spettrometri magnetici ha come obiettivo una sensibilità sulla massa del neutrino inferiore all' eV

**L'APPROCCIO CALORIMETRICO** dell'esperimento **MIBETA** con rivelatori termici a bassa temperatura è un potente **METODO COMPLEMENTARE** con differenti incertezze sistematiche che parallelamente agli spettrometri punta ad una sensibilità sotto l'eV.





## *Esperimenti con spettrometri elettrostatici*

Negli anni '90 due esperimenti basati sullo stesso principio migliorarono il limite sulla massa del neutrino fino a  $\sim 2$  eV al 95 % C.L.

Entrambi gli esperimenti hanno raggiunto la loro sensibilità finale

**MAINZ** (Germania)

- sorgente  $T_2$  solida
- risolta complicata sistematica nella sorgente

**TROITSK** (Russia)

- sorgente  $T_2$  gassosa
- inspiegata anomalia all'end-point

Grande collaborazione internazionale

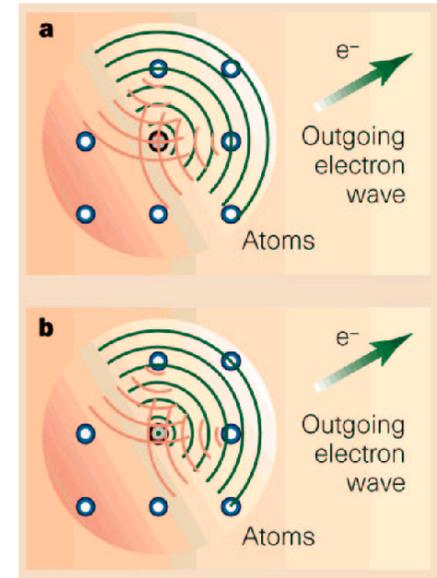
**KATRIN**

**KARlsruhe TRITium Neutrino experiment**

**Sensibilità  $< eV$**

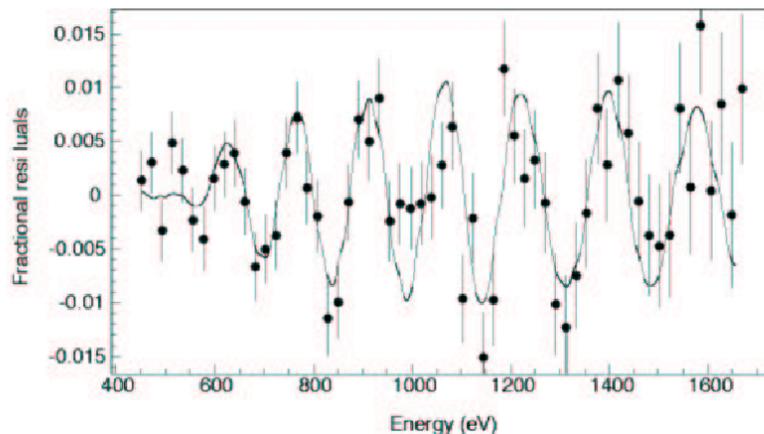
# IL BEFS: *Beta Environmental Fine Structure*

- ▶ Modulazione della probabilità di emissione dell'elettrone dovuta alla presenza di atomi e molecole circostanti il nucleo che decade.
- ▶ Effetto dovuto alla **interferenza quantistica** tra la funzione d'onda uscente dell'elettrone emesso dall'atomo che decade e la funzione d'onda entrante dell'elettrone scatterato dagli atomi vicini.

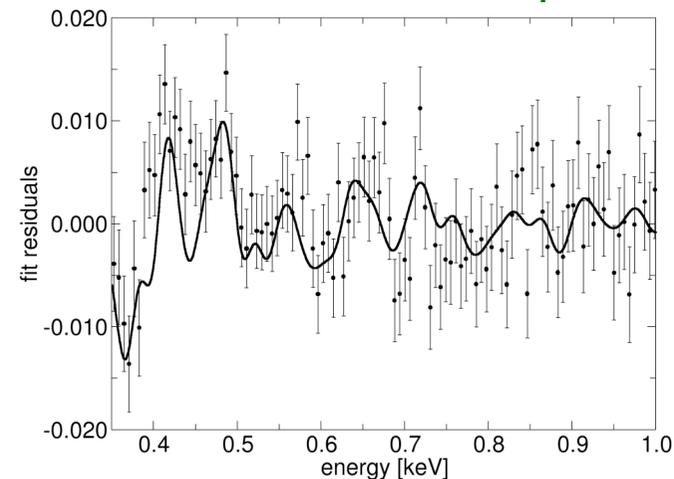


**E' una possibile sorgente di errore sistematico**

**1° - MANU (Ge) Re metallico**

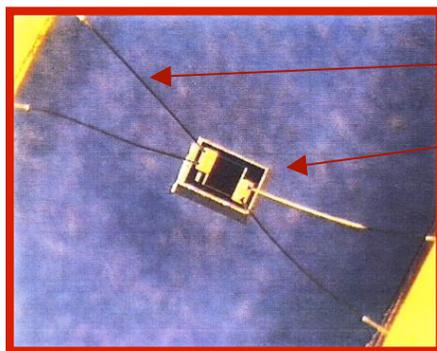


**2° - MIBETA (Mi) AgReO<sub>4</sub> - meno evidente**



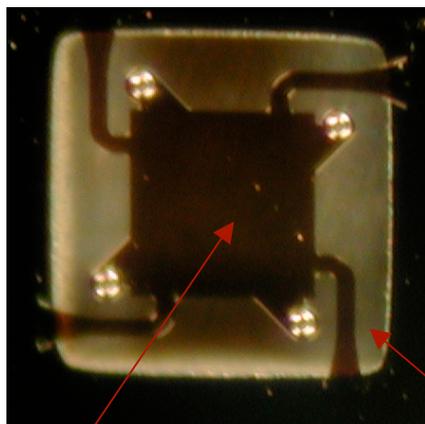
# FASE I - R & D: test di nuovi termistori

Termistori usati fino ad oggi  
nell'esperimento MIBETA  
silicio drogato  
per impiantazione ionica  
IRST - Trento



Al 17  $\mu\text{m}$   
Si - termistore  
500 x 350 x 0.5  $\mu\text{m}^3$

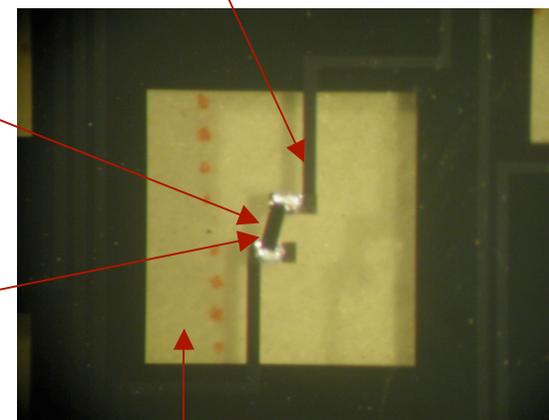
contatto elettrico Niobio



Ottenuti con  
Micro-machining  
NASA

Ge - NTD  
termistore  
100 x 300 x 25  $\mu\text{m}^3$

Bump bonding  
Indio  $2r = 25 \mu\text{m}$



Si - termistore  
300x300x1.5  $\mu\text{m}^3$

conduttanza verso il bagno termico  
e contatto elettrico  
Si - 3  $\mu\text{m}$

conduttanza verso il bagno termico  
Nitruro di silicio  
2.2mm x 2.2mm x 0.5  $\mu\text{m}$

# I DUE METODI A CONFRONTO

## Decadimento $\beta$ del $^3\text{H}$ con spettrometri

### VANTAGGI

- ☺ Moderata vita media del  $^3\text{H}$  → alta statistica
- ☺ Alta risoluzione energetica

### SVANTAGGI

- ☹ Sistematiche dovute ad effetti di sorgente
  - backscattering
  - perdita di energia nella sorgente
- ☹ Sistematiche dovute a dec. su stati eccitati
- ☹ Fondo incontrollato

## Decadimento $\beta$ del $^{187}\text{Re}$ con bolometri

### VANTAGGI

- ☺ Il  $^{187}\text{Re}$  ha il Q-valore più piccolo in natura !!!
- ☺ Il  $^{187}\text{Re}$  ha una elevata abbondanza isotopica
- ☺ Sorgente = rivelatore → massima efficienza
- ☺ No backscattering
- ☺ Misura l'energia di diseccitazione di eventuali decadimenti su stati eccitati
- ☺ Buona risoluzione energetica

### SVANTAGGI

- ☹ Alta vita media del  $^{187}\text{Re}$  → limitata statistica
- ☹ Sistematiche dovute ad effetti di pile-up
- ☹ Fondo dipendente dall'energia

► I DUE METODI SONO COMPLEMENTARI



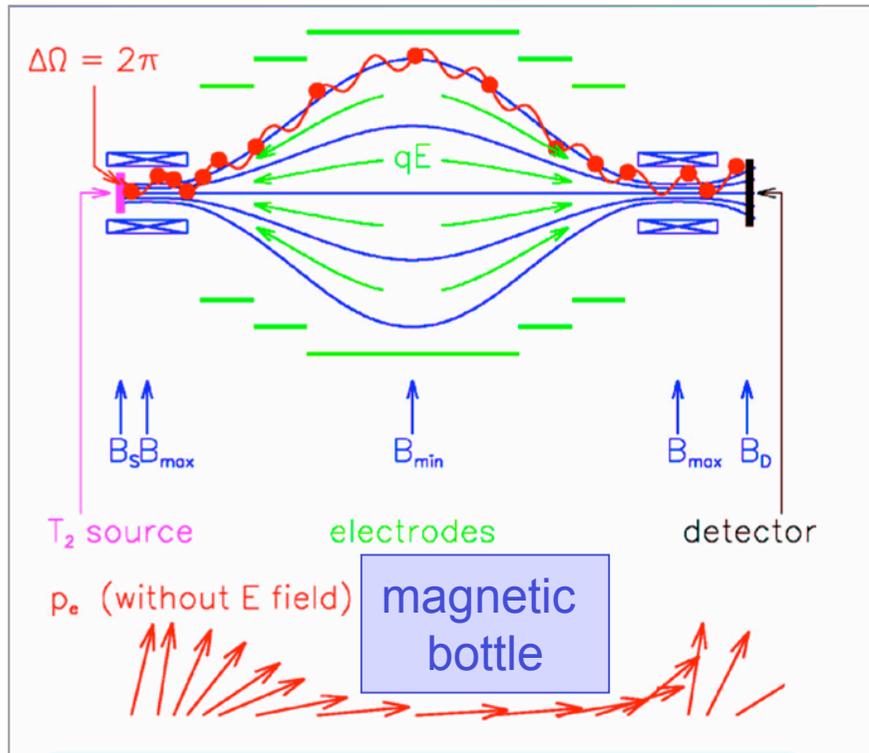


# Spettrometri elettrostatici con collimatore adiabatico magnetico

## MAC-E-filter

Alto campo magnetico  $B_{\max}$  alla sorgente e al rivelatore. Basso campo  $B_{\min}$  al centro.

Tutti gli elettroni emessi in avanti  
Spiraleggiano dalla sorgente al rivelatore



Nel limite adiabatico  
 $E_{k\perp} / B = \text{costante}$

$$E_{k\perp}(\text{centro}) = E_{k\perp}(\text{sorgente}) (B_{\min}/B_{\max})$$

$$E_e = E_{k\perp} + E_{k\parallel} = \text{costante}$$

Efficiente effetto di collimazione al centro

Il campo elettrico ritardante al centro ha massimo potenziale  $U_0$  e ammette elettroni con

$$E_{k\parallel} > eU_0$$

SPETTROMETRO INTEGRALE

Potere risolvete:

$$\Delta E / E = B_{\min} / B_{\max} \approx 2 \times 10^{-4}$$



$$\Delta E \approx 4 \text{ eV at } E \approx 18 \text{ keV}$$