Misura diretta della massa del neutrino

Elena Ferri elena.ferri@mib.infn.it

University of Milano-Bicocca and INFN of Milano-Bicocca



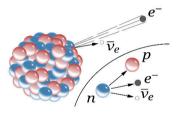
Misura diretta della massa del neutrino



1/20

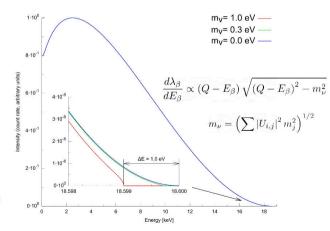
Analisi cinematica di decadimenti deboli

- decadimento beta singolo (³H o ¹⁸⁷Re) o cattura elettronica (¹⁶³Ho)
- indipendente da modelli teorici (modelli cosmolologici o natura del neutrino)
- esperimenti in laboratorio



$$_{Z}^{A}X \rightarrow _{Z+1}^{A}X' + e^{-} + \bar{\nu}_{e}$$

$$Q = m_n \binom{A}{Z} X - m_n \binom{A}{Z+1} X' - m_e - m_{\bar{\nu}_e}$$



Calorimetri, Spettrometri & CRES

107 CONGRESSO NAZIONALS

2/20

Richieste sperimentali:

- Alta statistica all'end-point
- Alto rapporto segnale/rumore
- Piccoli effetti sistematici

Diversi approcci:

- Spettrometrico
- Calorimetrico
- Spettroscopia radiazione di ciclotrone

Spettrometri

Sorgente esterna al rivelatore

- Alta statistica
- Ottima risoluzione energetica
- Sistematiche dovute ad effetti di sorgente
- Sistematiche dovute a decadimenti su stati eccitati
- Fondo

CRES

Sorgente è il rivelatore

- Misura in frequenza ightarrow alta precisione
- La sorgente è trasparente alla radiazione a microonde
- Compatibile con trizio atomico: no broadening dovuto agli stati finali
- Con Trizio molecolare incertezze dovute a stati finali
- Scattering

Calorimetri

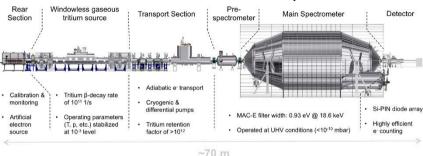
Sorgente contenuta nel rivelatore

- No sistematiche dovute ad effetti di sorgente
- No Sistematiche dovute a decadimenti su stati eccitati
- Statistica limitata
- Pile-up
- Fondo

KATRIN



KATRIN: Karlsruhe TRItium Neutrino Experiment



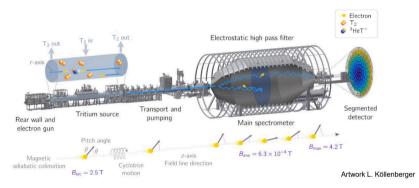
Idee Principali

- Goal scientifico: $m_{\nu} < 0.2 \, eV$
- Sorgente ad alta attività 10¹¹ e/s
- MAC-E filtro per selezionare energia degli elettroni (risoluzione energetica < 1eV)
- Conteggio di elettroni in funzione del potenziale ritardante ightarrow spettro integrale
- Predecessori MAINZ con $m_{\nu} < 2.4~\text{eV}$ e Trotsky $m_{\nu} < 2.05~\text{eV}$





Accensione 14 ottobre 2016



Principali sfide:

- Stabilità sorgente di trizio (0.1%)
- Stabilità della scala di energia (ppm)
- Basso fondo (< 0.1 cps)

KATRIN - Risultati



5/20

- Primo risultato sulla massa del neutrino (I campagna):

$$m_{\nu}$$
 < 1.1 eV 90% CL

Phys. Rev. Lett. 123, (2019) 221802 + Phys. Rev. D 104, (2021) 012005

- Secondo risultato sulla massa del neutrino (II campagna):

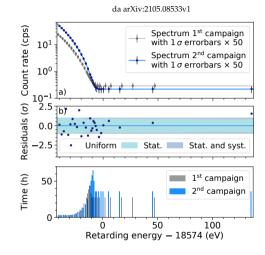
$$m_{\nu}$$
 < 0.9 eV 90% CL

arXiv:2105.08533v1

- Combinazioni delle likelihoods (χ^2) di entrambi i data set:

$$m_{\nu} < 0.8~eV~90\%~CL$$

arXiv:2105.08533v1



Prima misura con sensibilità sotto eV per un esperimento di misura diretta

Ricerca di neutrini sterili con KATRIN - TRISTAN

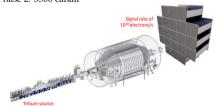


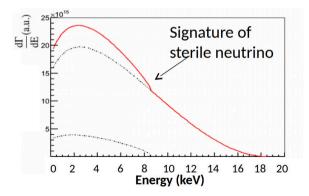
6/20

- Segnatura di un neutrino sterile è un "bump" nello spettro ad energie $E_0 m_{
 u_4}$
 - Abbassare HV dello spettrometro per andare sotto end-point
 - I rivelatori di KATRIN non hanno sufficiente risoluzione energetica e non supportano alti rate 10⁸Hz
- TRISTAN: upgrade di KATRIN con nuovi rivelatori (array di Silicon Drift Detector)
 - Alti rate di conteggio
 - Risoluzione energetica 300 eV a 20 keV

- TRISTAN

- Phase 0: 166 canali in KATRIN Monitor Spectrometer
- Phase1: 1500 canali in KATRIN beamline (2024-2025)
- ▶ Phase 2: 3500 canali





Project 8

107 CONGRESSO NAZIONALE

Idee Principali

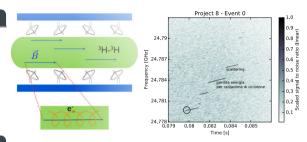
- Sorgente = Rivelatore $10^{11} 10^{13}$ H₂ molecole/cm³
- Uso la frequenza di ciclotrone per determinare $E_{\it e}$
- Misura non distruttiva dell'energia dell'elettrone
- Spettro differenziale
- Goal scientifico: $m_{\nu} < 40 \text{ meV}$ (Fase IV)

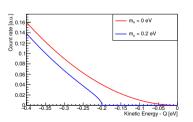
Cyclotron Radiation Emission Spectroscopy - CRES

- Sorgente gassosa in forte B omogeneo
- Elettroni emettono radiazione di ciclotrone
- Radiazione rivelata con antenne
- Ricostruisco energia dell'elettrone dalla frequenza del segnale

$$f_c = \frac{f_{c,0}}{\gamma} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m_e + E_{kin}/c^2}$$

- Intrappolamento con bottiglia magnetica per aumentare tempo di osservazione





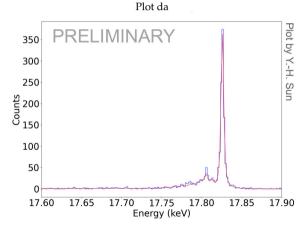
Lo spettro energetico è ricostruito a partire dalla frequenza di start

Maggiori dettagli in Phys. Rev. D 89 (2009) 051301



Per dimostrare la tecnica e caratterizzare l'intero apparato hanno utilizzato una sorgente di ^{83m}Kr

- elettroni monoenergetichi a 18, 30 e 32 keV



- Risoluzione energetica a 2 eV
- Larghezza intrinseca della linea a 2.8 eV
- Strutture a bassa energia spiegate bene da modelli teorici

Project 8 - Risultati



9 / 20

3 mesi di misura con il Trizio conclusi nel 2020

- Misura preliminare dell'energia E_0 del Trizio:

Metodo Bayesiano
$$E_0=18558.0^{+20.6}_{-30.9}~eV~90\%~CL$$

Metodo Frequentista $E_0=18550.6^{+26.3}_{-16.9}~eV~90\%~CI$

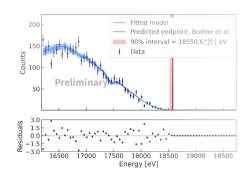
- Limite preliminare sulla massa del neutrino:

$$m_{\nu} \leq 185\,eV$$
 90% CL

- rate di fondo

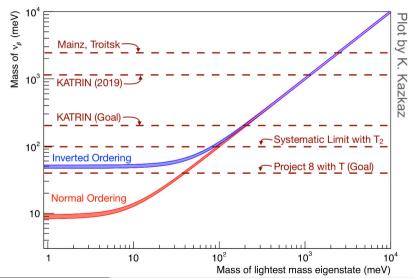
$$m_{\nu} \le 3x10^{-10} \text{ eV}^{-1}\text{s}^{-1} 90\% \text{ CI}$$

Risultati e plot presentati da Christine Claessens & Elise Novitski a TAUP2021



Analisi in corso di finalizzazione o Risultati con il Trizio e il limite su m_{ν} sono in arrivo



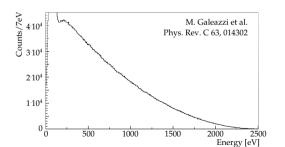


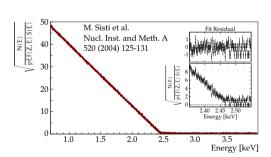


MANU (1999) 6.0×10^6 eventi sopra i 420 eV $m_{\nu} < 26$ eV 95% CL

Phys. Rev. C 63, 014302

MIBETA(1999-2003) 6.2×10^6 eventi sopra i 700 eV $m_{\nu} \le 15$ eV 90% CL NIM A 520 (2004) 125







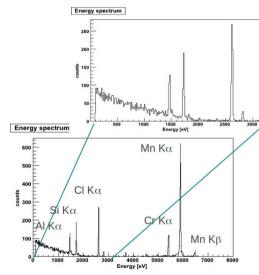
MARE 1: Sensibilità sulla massa del neutrino dell'ordine dell'eV

MARE-1 a Milano

- Collaborazione con Milano/FBK/NASA/Wisconsin
- Goal: $m_{\nu} \leq 2 \text{ eV}$
- Attività singolo rivelatore 0.3 dec/s
- 10¹⁰eventi con 300 sensori
- 8 array di Si:P termistori con AgReO₄
- Risoluzione energetica di 25 eV a 2.6 keV
- Cross-check dei risultati ottenuti con spettrometri

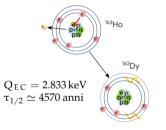
Rivelatori

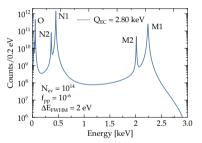
- 31 cristalli incollati in un array da 36
- solamente 16 utilizzabili
- Risoluzione energetica media di 47 eV a Q
- Rise time di 1 ms
 - \rightarrow non suff. per migliorare limite su m ν
 - \rightarrow in un anno si otterrebbe $m_{\nu} \leqslant 10 \text{ eV}$

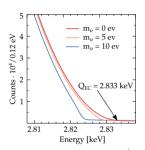




$$^{163} Ho + e^- \to \,^{163} Dy^* + \nu_e \quad$$
 cattura elettronica dalla shell \geqslant M1
$$Dy^* \to \, Dy + E_c$$







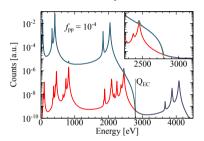
proposto per la prima volta da A. De Rujula e M. Lusignoli in 1982 Phys. Lett. 118B (1982) 429 Nucl. Phys. B219 (1983) 277-301

- Misura calorimetrica delle de-eccitazioni del $\mathrm{D} y^*$ (principalmente non radiative)
- il rate all'end point dipende da ($Q-E_{M1}$): vicinanza M1 aumenta la statiscica all'end-point (i.e. sensibilità su m_{ν})
- $\tau_{1/2} \simeq 4570$ anni: pochi nuclei sono necessari (2x1011 nuclei di 163 Ho =1 Bq)

¹⁶³Ho: spettro di pile-up



$$S(E_c) = \left[N_{ev}(N_{EC}(E_c, m_{\nu}) + f_{pp} \times N_{EC}(E_c, 0) \otimes N_{EC}(E_c, 0)) + B(E_c)\right] \otimes R_{\Delta E}(E_c)$$



N_{ev}: numero totale di eventi

 $N_{EC}(E_c, m_v)$:spettro ¹⁶³Ho

 $R_{\Delta E}(E_c)$: funzione di risposta del rivelatore

 f_{pp} : frazione di eventi di pile-up ΔE intervallo di energia

più dettagli in Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3161

- Impulsi di pile-up quando eventi arrivano ad una distanza temporale inferiore alla risoluzione temporale del rivelatore
- Lo spettro di pile-up dell'163Ho è complesso e presenta picchi vicino all'end-point
- Eventi di pile-up vicini all'end-point alterano forma spettro
- Per risolvere eventi di pile-up servono:
 - Rivelatori veloci
 - Algoritmi di rejezione (Wiener filter, Singular Value Decomposition ...)



Misura diretta della massa del neutrino con calorimetri magnetici (sfruttano dipendenza della magnetizzazione di materiali paramagnetici dalla temperatura.

- ECHo-0

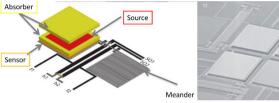
- Primo prototipo con 4 rivelatori ($\Delta E = 7.6eV$)
- Attività 0.01 Bq
- Tempo di misura 4 anni

- ECHo-1k (2015-2018)

- Attività 1 kBq
- ▶ 50 rivelatori con Δ E inferiore a 5 eV e risoluzione temporale $\approx 1 \mu s$
- ► tempo di misura 1 anno $\rightarrow m_{\gamma} < 10 \text{ eV}$

- ECHo-1M (futuro)

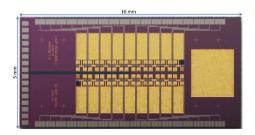
- Attività 1 MBq
- ▶ 1000 rivelatori con ΔE inferiore a 5 eV e risoluzione temporale $\approx 0.1 \mu s$
- ► tempo di misura 1-3 anni $\rightarrow m_{\gamma} < 1 \text{ eV}$

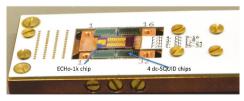




ECHo-1k (2015-2018)

- ▶ 64 pixel per misura calorimetrica + 4 pixel per diagnostica
- Specifiche rivelatori: ΔE inferiore a 5 eV, tempo di salita 90 ns singolo canale e 300 ns multiplexing
- tempo di misura 1 anno
- ► 100% dei rivelatori presentano ottime perfonmance a basse temperature
- ▶ ¹63Ho impiantato a RISIKO



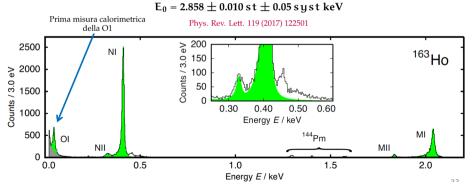




- Limite sulla massa del neutrino:

$$m_{\nu} < 150 \; eV$$
 Eur. Phys. J. C79, 1026 (2019)

- Valore dell'energia dell'end-point:



HOLMES (ERC-2013-AdG no. 340321)



Goal

- Sensibilità sulla massa del neutrino $\approx 1~{\rm eV}$
- Dimostrare la scalabilità tecnica calorimetrica
- Studio delle sistematiche
- Misurare energia di end-point

Rivelatori: Transition Edge sensor con ¹⁶³Ho impiantato

Attività: 300 dec/s (6.5x10¹³ nuclei per rivelatore)

Risoluzione energetica: O(eV)

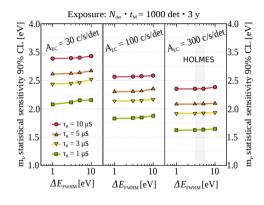
Risoluzione temporale: $\tau_{res} \sim 3~\mu s$ ($\tau_{rise} = 10 - 20~\mu s$)

64 canali per il dimostratore

Lettura con multiplexing a microonde

Configurazione finale

- 1000 rivelatori
- ► 10x10¹³eventi



Maggiori dettagli in Eur. Phys. J. C, (2015) 75:112

Progetto iniziato il 1 febbraio 2014

μmux multiplexing & TES



Read out a microonde

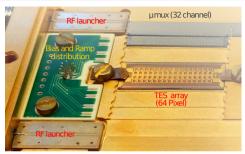
Il cuore del read-out è il μ mux chip sviluppato al NIST

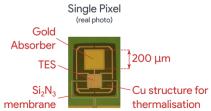
- 32+1 rf-squid in 500 MHz
- Banda risonatore 2 MHz
- $\Delta f = 14 \text{ MHz}$



Design optimizato per essere veloci e avere ottima ΔE

- Fabbricati in differente step (NIST e Italia)
- Risoluzione energetica (4 6) eV a $5.9\,\mathrm{keV}$
- $\tau_{rise} \simeq 20 \ \mu s$
- Side-car design per evitare effetti di prossimità





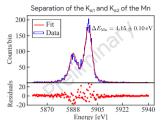
19 / 20

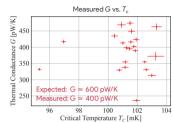
Rivelatori

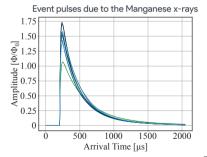


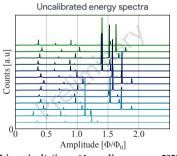
20 / 20

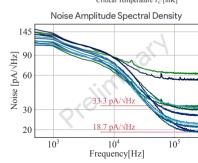
- 32 rivelatori letti in parallelo con µmux (KOH)
- no olmio impiantato nell'assorbitore
- confronto con rivelatori processati al NIST (DRIE)
 - stessa risoluzione energetica e rise time
 - tempo di decadimento più lungo e maggior dispersione di G
 - $\tau_{rise} = 15 \mu s \rightarrow risoluzione temporale 2 μs Eur. Phys. J. C (2021) 81:385$











Prima risultati con 64 canali per marzo 2022