

# Neutrini fantastici e dove trovarli: Tristan

Matteo Biassoni e Stefano Pozzi  
29 Aprile 2020



# Outlook



- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con Tristan@KATRIN
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

# Outlook



- **I neutrini e le loro stranezze**
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con `Tristan@KATRIN`
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

# I neutrini e le loro stranezze

Three Generations of Matter (Fermions) spin  $\frac{1}{2}$

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
name →	<b>u</b> Left up Right	<b>c</b> Left charm Right	<b>t</b> Left top Right	<b>g</b> gluon
				0
				<b><math>\gamma</math></b> photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	<b>d</b> Left down Right	<b>s</b> Left strange Right	<b>b</b> Left bottom Right	91.2 GeV 0
				<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0 eV 0	0 eV 0	0 eV 0	>114 GeV 0
	<b><math>\nu_e</math></b> Left electron neutrino Right	<b><math>\nu_\mu</math></b> Left muon neutrino Right	<b><math>\nu_\tau</math></b> Left tau neutrino Right	<b>H</b> Higgs boson
				spin 0
Leptons	0.511 MeV -1	105.7 MeV -1	1.777 GeV -1	80.4 GeV $\pm 1$
	<b>e</b> Left electron Right	<b><math>\mu</math></b> Left muon Right	<b><math>\tau</math></b> Left tau Right	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

Bosons (Forces) spin 1

## I neutrini nel Modello Standard

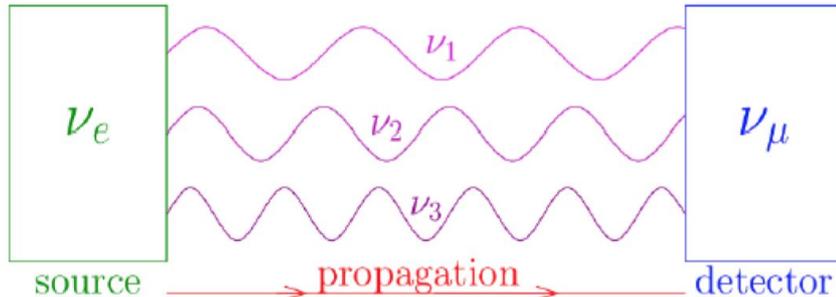
- leptoni, carica elettrica nulla
- solo componente left-handed
- solo accoppiamento debole con violazione massimale di parità
- **nessun termine di massa da accoppiamento con Higgs**

# I neutrini e le loro stranezze

## I neutrini oltre il Modello Standard: evidenze sperimentali

Oscillazione, fenomeno quantistico:  
autostati di interazione (produzione, rivelazione)  
 $\neq$   
autostati di **massa** (propagazione)

$$|\nu(t=0)\rangle = |\nu_e\rangle = U_{e1} |\nu_1\rangle + U_{e2} |\nu_2\rangle + U_{e3} |\nu_3\rangle$$



Cartoon from C. Giunti (INFN, Torino)

- almeno due autostati di massa devono avere autovalori non-nulli
- differenze di massa al quadrato determinano la probabilità di oscillazione
- misurabili sperimentalmente

Masse piccole  $\rightarrow$  Effetto piccolo

MA

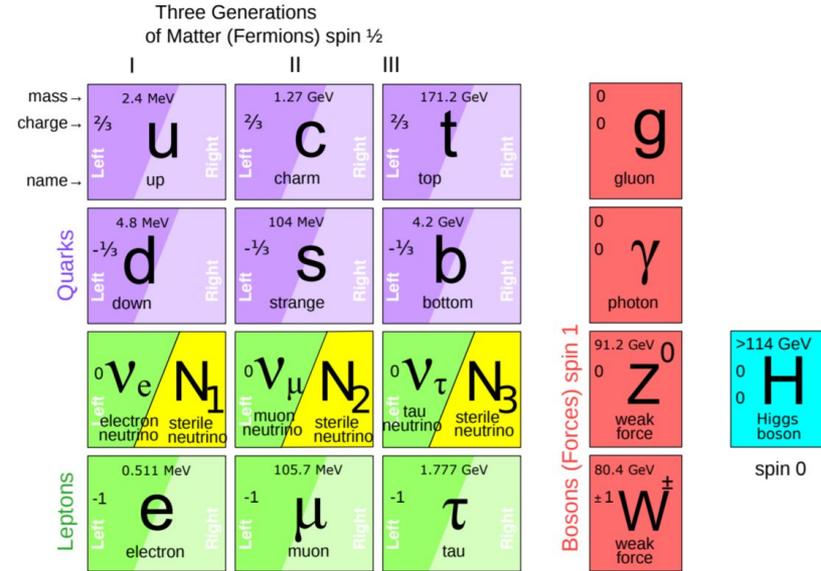
**teoria oltre SM necessaria**

# I neutrini e le loro stranezze

## I neutrini oltre il Modello Standard: $\nu$ MSM

- molte teorie possibili, arbitrariamente complesse
- $\nu$ MSM = estensione minimale dello SM per giustificare masse dei neutrini
- **3 neutrini RH** = singoletti SU(2)xU(1), piccola o nessuna interazione SM se non attraverso mixing
- può generare termine di massa di Dirac (come per leptoni carichi)
- se i neutrini sono particelle di Majorana, la massa può assumere facilmente ~ qualunque valore
- può spiegare perché le masse dei neutrini attivi sono piccole (seesaw mechanism)

$\nu$ MSM



# I neutrini e le loro stranezze

## I neutrini oltre il Modello Standard: massa

Teorie oltre lo SM (inclusa estensione minimale)

almeno un neutrino sterile con massa  $\sim$  arbitraria

$O(\text{eV})$

- suggerito da alcuni risultati di oscillazione, escluso da altri
- tensione con cosmologia che prevede solo 3 neutrini con mixing rilevante
- tensione con meccanismo seesaw

$O(\text{keV})$

- **promettente candidato DM**
- possibile hint raggi X (3.5 keV) da decadimento in sorgenti astrofisiche
- può esistere in  $\nu$ MSM insieme a due autostati pesanti per spiegare seesaw

$O(\text{MeV} \rightarrow M_p)$

- buona sensibilità agli acceleratori
- nessuna evidenza per valori di mixing  $O(1e-10)$

# Outlook



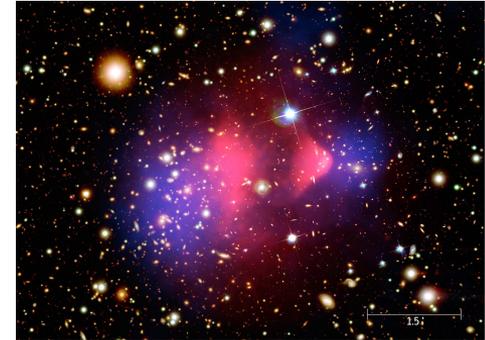
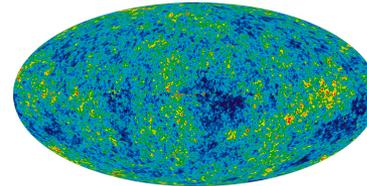
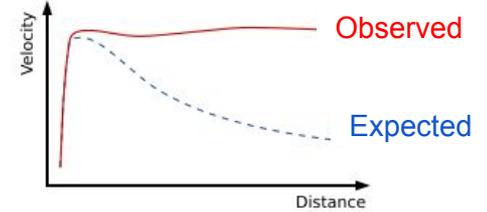
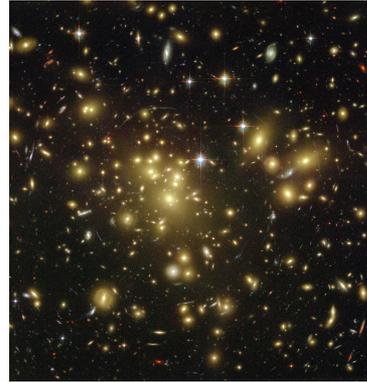
- I neutrini e le loro stranezze
- **Neutrini e Dark Matter**
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con `Tristan@KATRIN`
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

# Neutrini e Dark Matter

Molte “anomalie” in ambito astronomico/cosmologico si risolvono ipotizzando l’esistenza della Materia Oscura, molto più abbondante nell’Universo di quella luminosa:

- velocità di rotazione e delle stelle nelle galassie
- gravitational lensing
- Cosmic Microwave Background
- formazione ed evoluzione di strutture su larga scala
- dinamica di galassie (bullet cluster)
- misure di espansione (redshift, supernovae)

## Perché la Materia Oscura?



# Neutrini e Dark Matter

Che caratteristiche ha la materia oscura?

E' stabile su tempi  
confrontabili con la vita  
dell'Universo

Interagisce  
gravitazionalmente

E' abbastanza pesante da non  
essere (quasi) più relativistica  
quando si è disaccoppiata dalla  
materia ordinaria

Effetti  
OSSERVABILI ma  
NESSUNA  
informazione sulla  
sua NATURA

Possibili informazioni sulla  
sua natura ma  
MISURA sperimentale molto  
DIFFICILE

Non interagisce  
elettromagneticamente  
o forte

Se interagisce debolmente lo fa  
con probabilità molto più  
piccola di qualunque altra  
particella SM

# Neutrini e Dark Matter

Opzione più accreditata

=

## WIMP: Weak Interacting Massive Particle

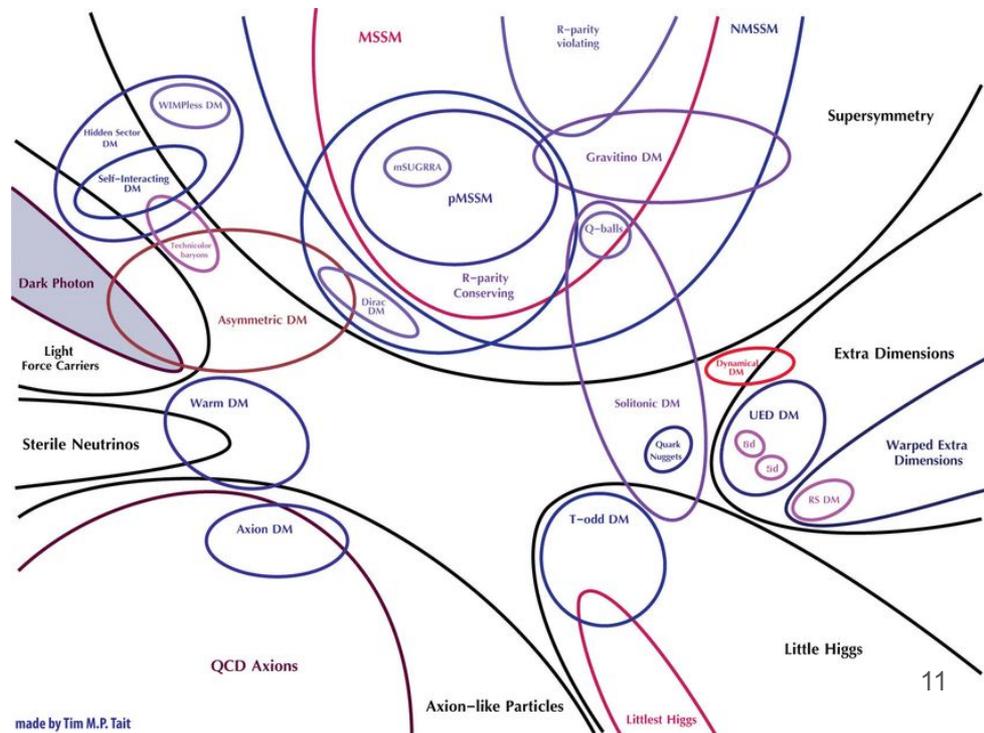
- definizione molto generica
- non specifica la teoria di cui fa parte/da cui è prevista
- riassume le caratteristiche della particella:
  - interagisce debolmente
  - è molto pesante ( $\gtrsim$ EW scale)  $\rightarrow$  Cold DM
- comoda perché rivelabile con ricerche dirette e indirette

MA

LIMITI SPERIMENTALI  
(acceleratori, direct  
detection) molto stringenti

TENSIONE con modelli di  
strutture cosmologiche su  
piccola scala

Ma... cos'è la materia oscura?



# Neutrini e Dark Matter

## Neutrini come Dark Matter?

Opzione molto promettente

=

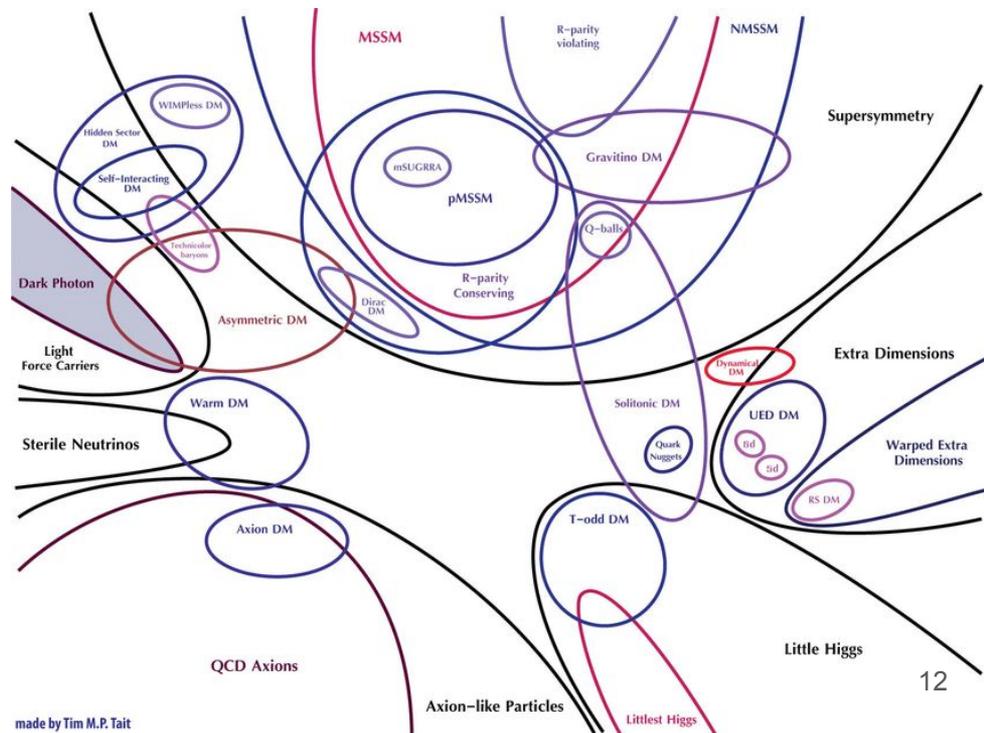
**keV sterile neutrino**

- previsto da un'estensione minimale del SM
- compatibile con meccanismo seesaw per spiegare le masse dei neutrini attivi
- più leggeri: ESCLUSI da strutture a larga scala
- più pesanti: ESCLUSI da non-osservazione di decadimento in neutrino attivo + X-ray
- compatibile con osservazioni e modelli cosmologici, inclusa carenza di strutture su piccola scala:
  - stesso effetto delle WIMP su scale  $\gg$  galassie
  - riduzione di strutture su scala  $\sim$  galassie

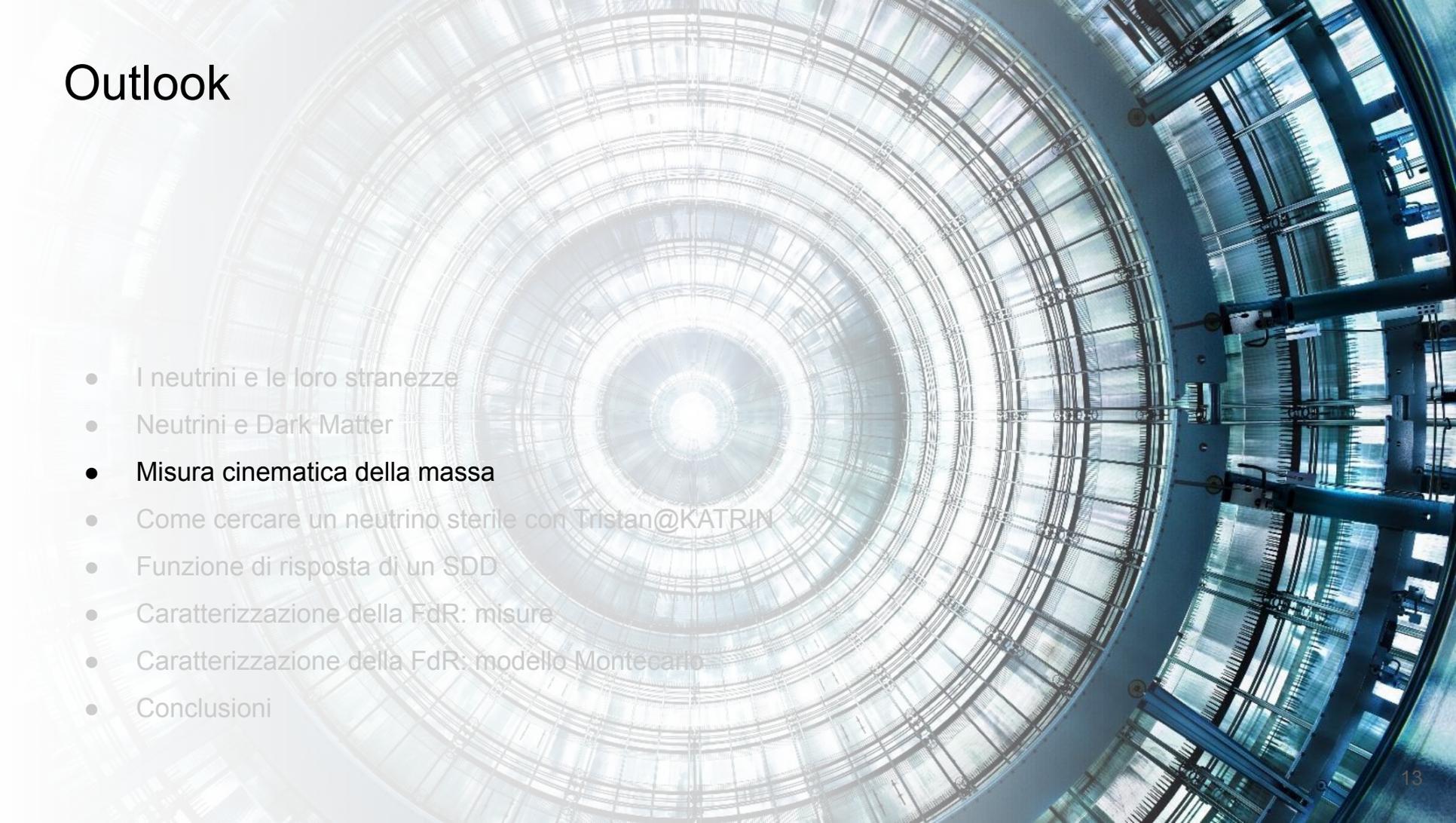
LIMITI SPERIMENTALI  
(astrofisica) non molto  
stringenti

Misura in  
LABORATORIO  
competitiva

Ma... cos'è la materia oscura?



# Outlook



- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- **Misura cinematica della massa**
- Come cercare un neutrino sterile con `Tristan@KATRIN`
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

# Misura cinematica della massa, neutrini attivi

**PRINCIPIO:** misuro con grande precisione l'energia delle particelle visibili in un decadimento in cui viene emesso un neutrino

$$m_\nu = 0$$
$$\sup \left( \sum_{i=\text{visible}} E_i \right) = Q$$

$$m_\nu \neq 0$$
$$\sup \left( \sum_{i=\text{visible}} E_i \right) < Q$$

**SPETTRO ENERGETICO  
delle particelle visibili  
DISTORTO**

# Misura cinematica della massa, neutrini attivi

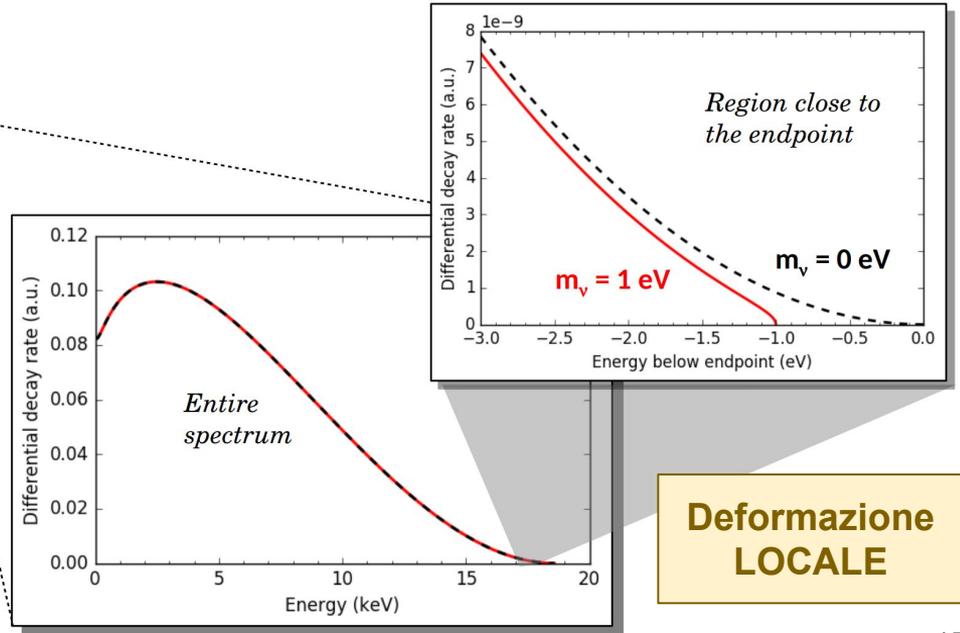
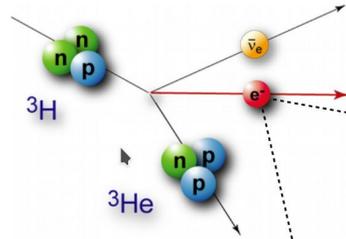
PRINCIPIO: misuro con grande precisione l'energia delle particelle visibili in un decadimento in cui viene emesso un neutrino

Decadimento beta del  ${}^3\text{T}$  (Q-value  $\sim 18.6$  keV)

ROI = pochi eV  
intorno all'end-point

PRO

- energia bassa  $\rightarrow$  molti eventi vicino al Q-valore  $\rightarrow$  piccola incertezza statistica
- spettro atteso (relativamente) facile da calcolare e sorgente gassosa molecolare  $\rightarrow$  incertezze sistematiche piccole
- alta attivit  specifica  $\rightarrow$  poca sorgente



# Misura cinematica della massa, neutrini attivi

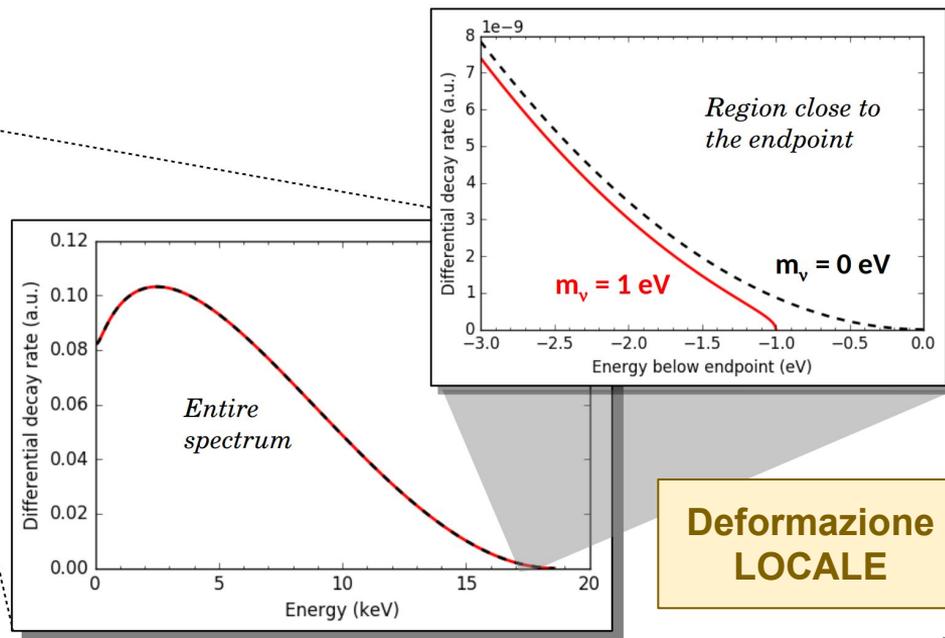
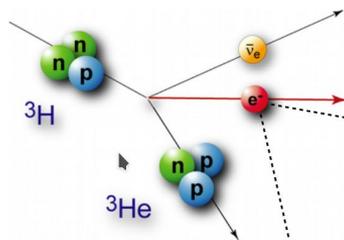
PRINCIPIO: misuro con grande precisione l'energia delle particelle visibili in un decadimento in cui viene emesso un neutrino

Decadimento beta del  $^3\text{T}$  (Q-value  $\sim 18.6$  keV)

ROI = pochi eV intorno all'end-point

CONTRO

- sorgente molecolare  $\rightarrow$  deformazioni dello spettro
- sorgente gassosa  $\rightarrow$  scattering su molecole
- alta attivit  specifica + gas  $\rightarrow$  rischio radiologico



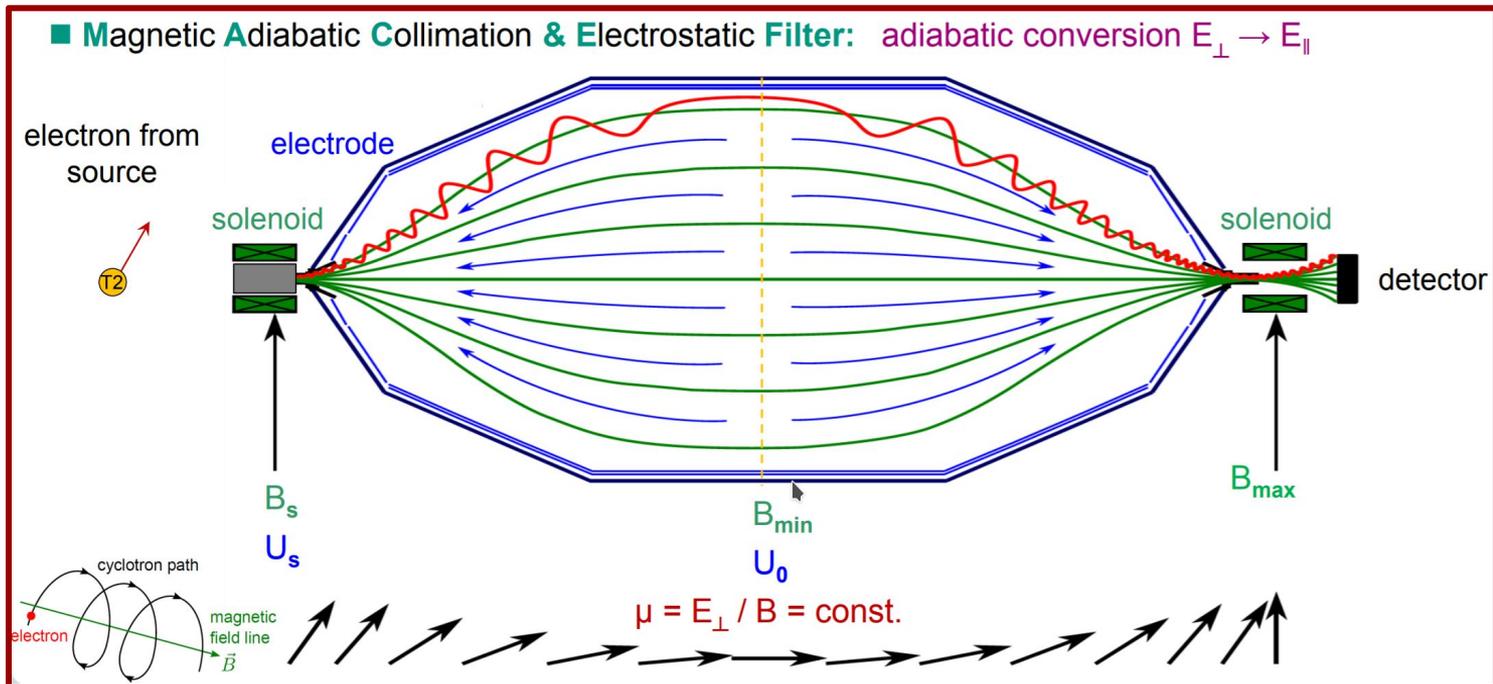
# Misura cinematica della massa, neutrini attivi

PRINCIPIO: misuro con **grande precisione** l'energia delle particelle visibili in un decadimento in cui viene emesso un neutrino

Risoluzione energetica  $< 1$  eV  
@20 keV

Impossibile con rivelatori di particelle convenzionali

**KATRIN**



# Misura cinematica della massa, neutrini attivi

## KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment)

### MAC-E Filter

la risoluzione è determinata dalla precisione con cui viene impostato il potenziale ritardante  $U_S - U_0$

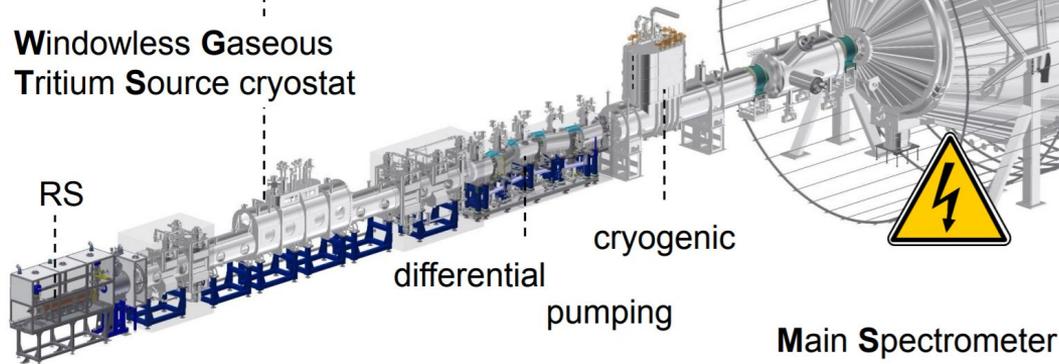


### Studio solo

l'end-point, basso rate di conteggi  $\sim 1$  cps



Windowless Gaseous Tritium Source cryostat

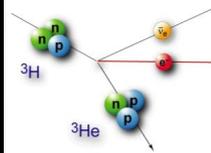


RS

differential

cryogenic  
pumping

Main Spectrometer



Karlsruhe Institute of Technology



# Misura cinematica della massa, neutrino sterile keV

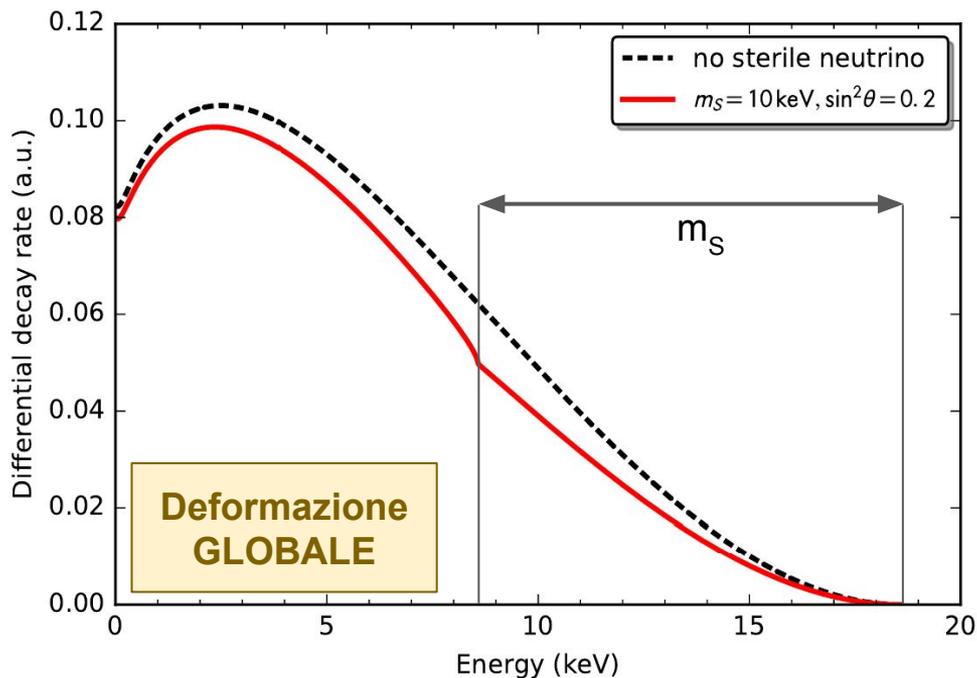
PRINCIPIO: misuro con grande precisione l'energia delle particelle visibili in un decadimento in cui viene emesso un neutrino

Decadimento beta del  ${}^3\text{T}$  (Q-value  $\sim 18.6$  keV)

ROI = tutto lo spettro!

SFIDA

- Misura differenziale di elettroni di qualche decina di keV
- Rivelatore ad alta risoluzione  $\sim 300$  eV @20keV
- Alto rate di conteggi ( $\times 10^8$ )
- Capacità di risolvere single-hit
- Capacità di ricostruire l'energia dell'elettrone correttamente



# Misura cinematica della massa, neutrino sterile keV

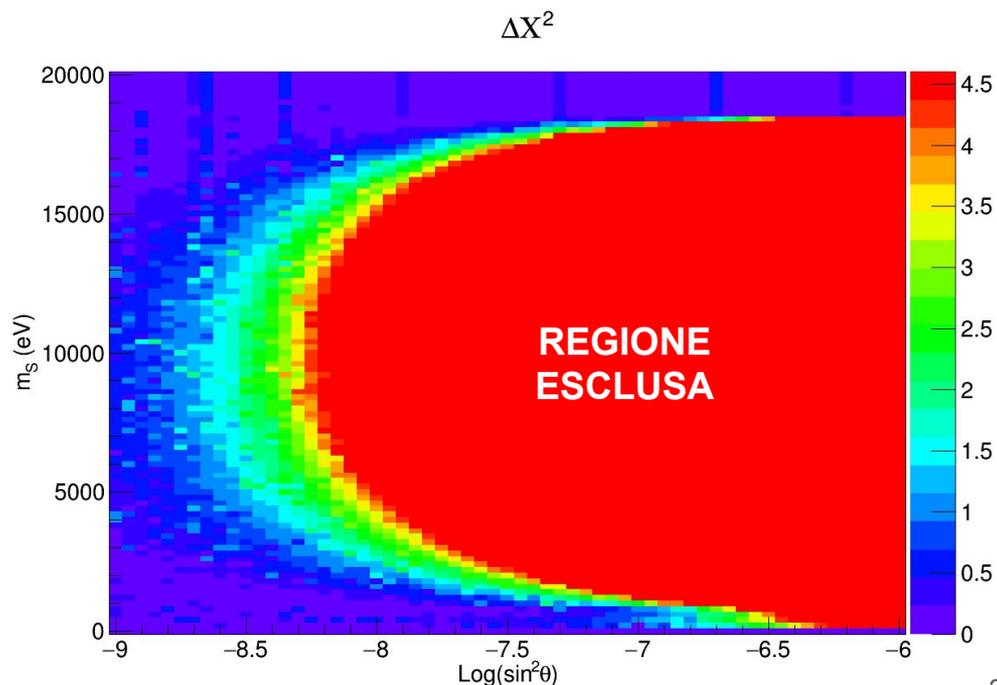
PRINCIPIO: misuro con grande precisione l'energia delle particelle visibili in un decadimento in cui viene emesso un neutrino

Decadimento beta del  ${}^3\text{T}$  (Q-value  $\sim 18.6$  keV)

ROI = tutto lo spettro!

SFIDA

- Misura differenziale di elettroni di qualche decina di keV
- Rivelatore ad alta risoluzione  $\sim 300$  eV @20keV
- Alto rate di conteggi ( $\times 10^8$ )
- Capacità di risolvere single-hit
- Capacità di ricostruire l'energia dell'elettrone correttamente



# Outlook

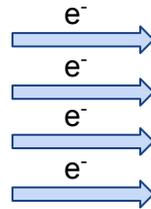


- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- **Come cercare un neutrino sterile con Tristan@KATRIN**
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

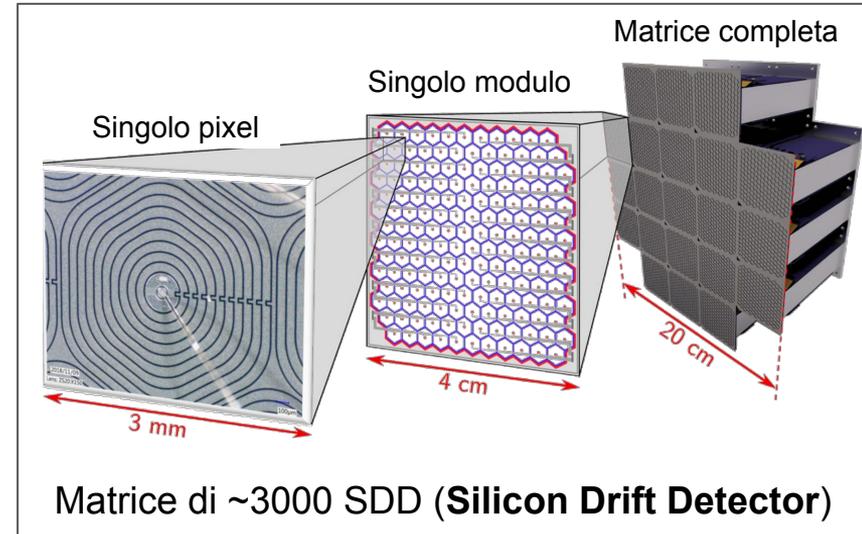
# Tristan@KATRIN

TRISTAN: utilizzare la **sorgente** gassosa ad alta intensità di KATRIN unita a un **nuovo rivelatore**

## Windowless Gaseous Tritium Source (WGTS)



$T_2$ , HT, DT, etc...



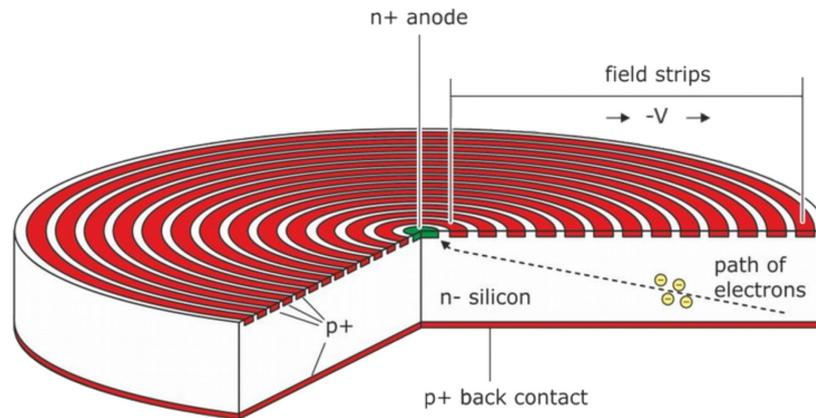
Infrastruttura unica al mondo in grado di gestire  $\sim 10^{11}$  Bq di trizio gassoso e iniettare solo gli elettroni nello spettrometro

# Tristan@KATRIN

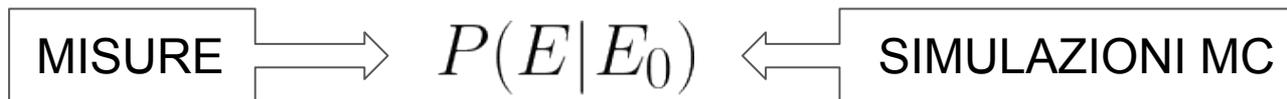
TRISTAN: utilizzare la **sorgente** gassosa ad alta intensità di KATRIN unita a un **nuovo rivelatore**

## SFIDA

- Misura differenziale di elettroni di qualche decina di keV
- Rivelatore ad alta risoluzione  $\sim 300$  eV @20keV
- Alto rate di conteggi ( $\times 10^8$ )  $\rightarrow$  migliaia di pixel
- Capacità di risolvere single-hit  $\rightarrow$  migliaia di pixel
- Capacità di ricostruire l'energia dell'elettrone correttamente



Aspetto MOLTO CRITICO: devo sapere con quale probabilità un elettrone di energia vera  $E_0$  viene ricostruito con energia  $E$



# Outlook



- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con [Tristan@KATRIN](mailto:Tristan@KATRIN)
- **Funzione di risposta di un SDD**
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

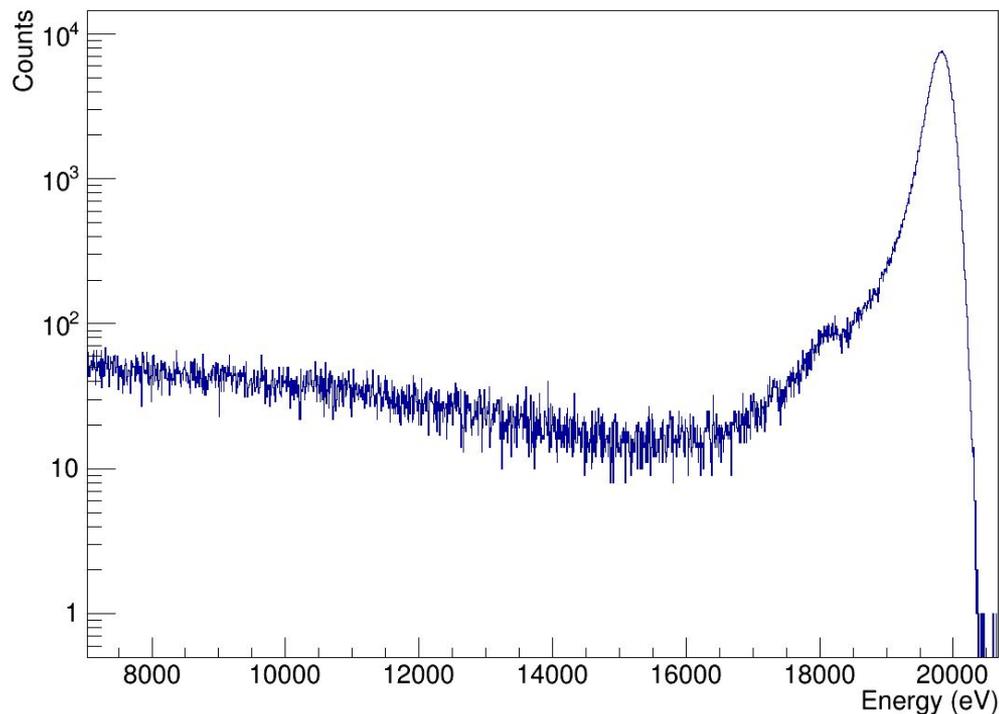
# Funzione di risposta di un SDD

**Funzione di risposta:** probabilità di misurare un'energia  $E$  quando l'energia dell'elettrone incidente è  $E_0$

$$E_0 = 20 \text{ keV}$$

Fondamentale in TRISTAN, dove la segnatura è una deformazione dello spettro continuo

In un SDD, una delle principali componenti della funzione di risposta è l'uniformità del campo elettrico



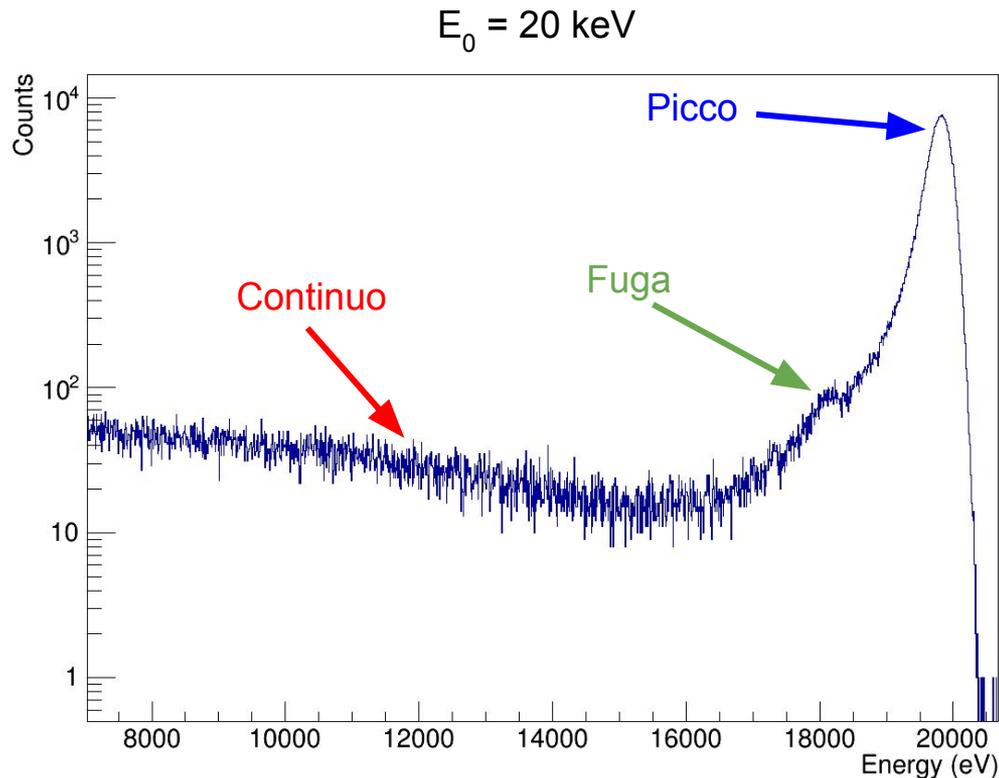
# Componenti della funzione di risposta

Componenti “fisiche”:

- Picco (risoluzione)
- Continuo (backscattering, bremsstrahlung...)
- Picco fuga (X del Si ~1.7 keV)

Dipendono dalla forma e dal materiale del rivelatore  
e dell'ambiente circostante

Riproducibile con una simulazione MC



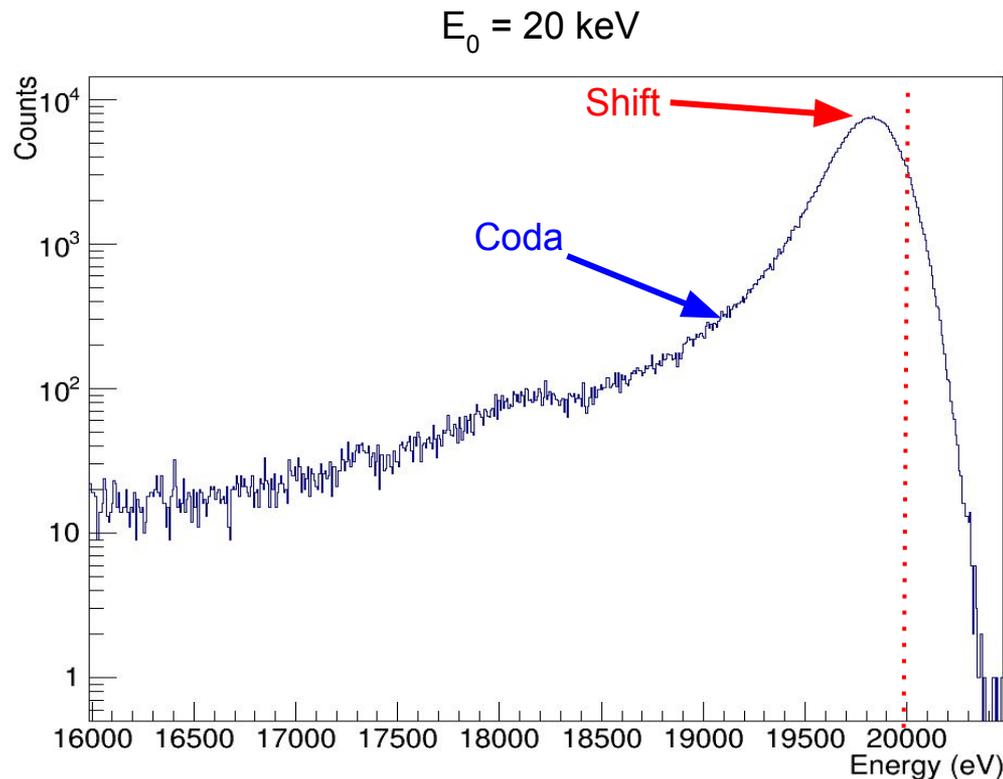
# Componenti della funzione di risposta

Componenti dovute a disuniformità di campo:

- Shift del picco
- Coda in prossimità del picco

Causa: raccolta parziale delle cariche

Richiederebbe la simulazione del campo elettrico e dell'intero processo di trasporto/raccolta di carica



# Componenti della funzione di risposta

- Disuniformità del campo elettrico in prossimità dei bordi dell'SDD
- Charge sharing: segnale dovuto a un evento in un SDD adiacente nella matrice
- Strato morto: sottile strato di SiO<sub>2</sub> superficiale e parziale raccolta di carica in uno strato successivo



I nostri studi iniziali di caratterizzazione di SDD si sono concentrati sullo strato morto

Utilizziamo un singolo pixel (niente charge sharing) e una sorgente collimata per poter evitare gli effetti di bordo

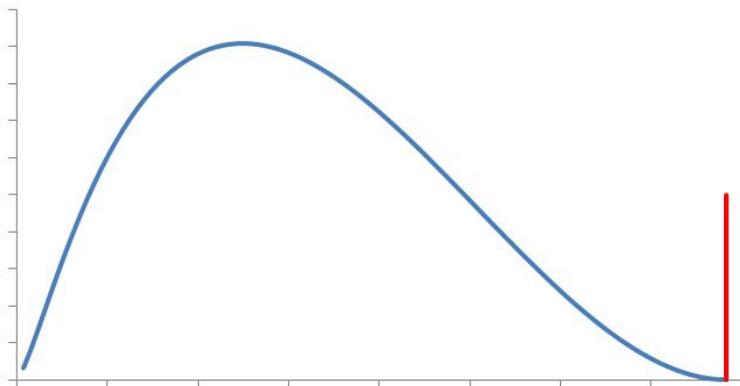
# Outlook



- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con [Tristan@KATRIN](mailto:Tristan@KATRIN)
- Funzione di risposta di un SDD
- **Caratterizzazione della FdR: misure**
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- Conclusioni

# Studio della FdR: sorgenti di elettroni

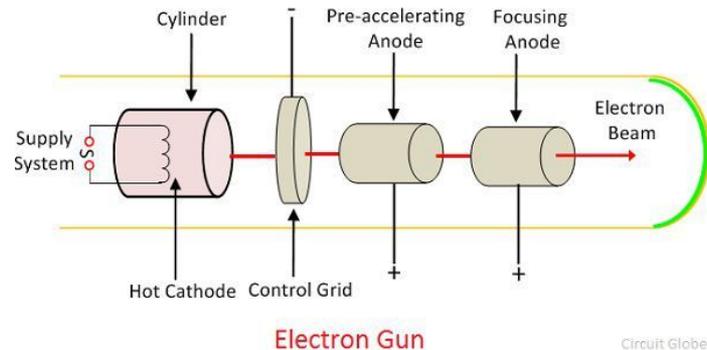
## Sorgenti radioattive



- **Decadimento  $\beta^-$** : spettro continuo, poche sorgenti “pure”
- **Conversione interna**: elettroni monocromatici

In generale complicato, sistematiche sulla FdR (autoassorbimento nella sorgente, collimatore...)

## Electron gun

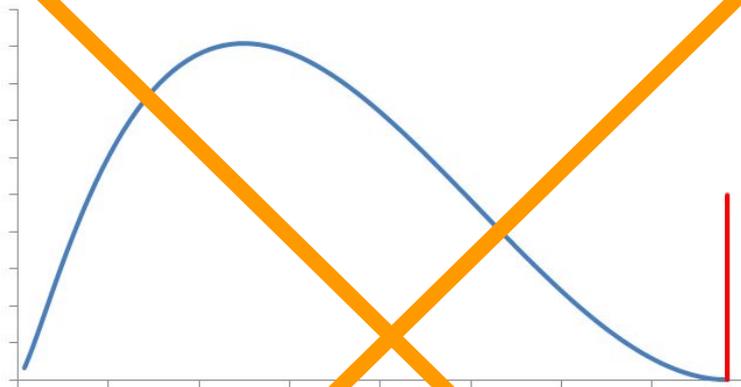


Elettroni monocromatici con energia nota

Sistematica dovuta alla sorgente molto ridotta

# Studio della FdR: sorgenti di elettroni

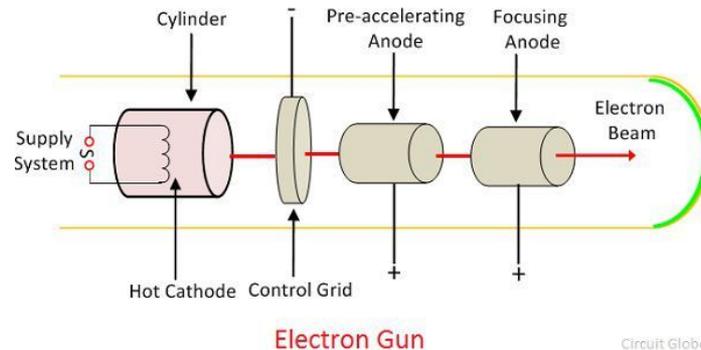
## Sorgenti radioattive



- **Decadimento  $\beta$** : spettro continuo, poche sorgenti "pure"
- **Conversione interna**: elettroni monocromatici

In generale complicato, sistematiche sulla FdR (autoassorbimento nella sorgente, collimatore...)

## Electron gun

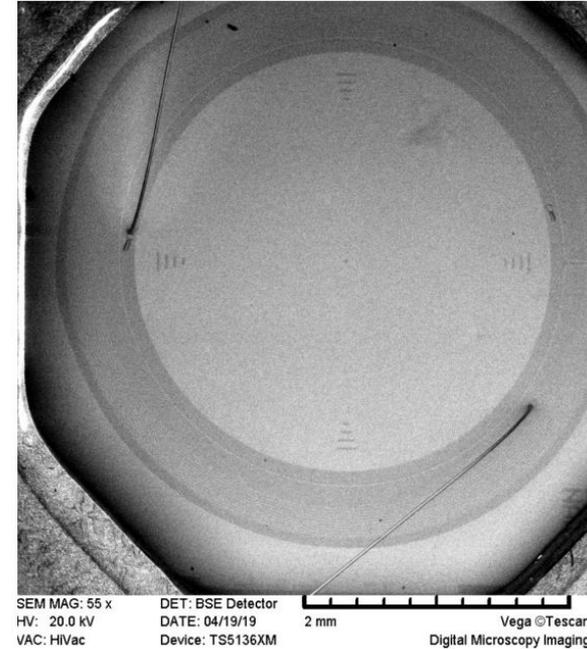
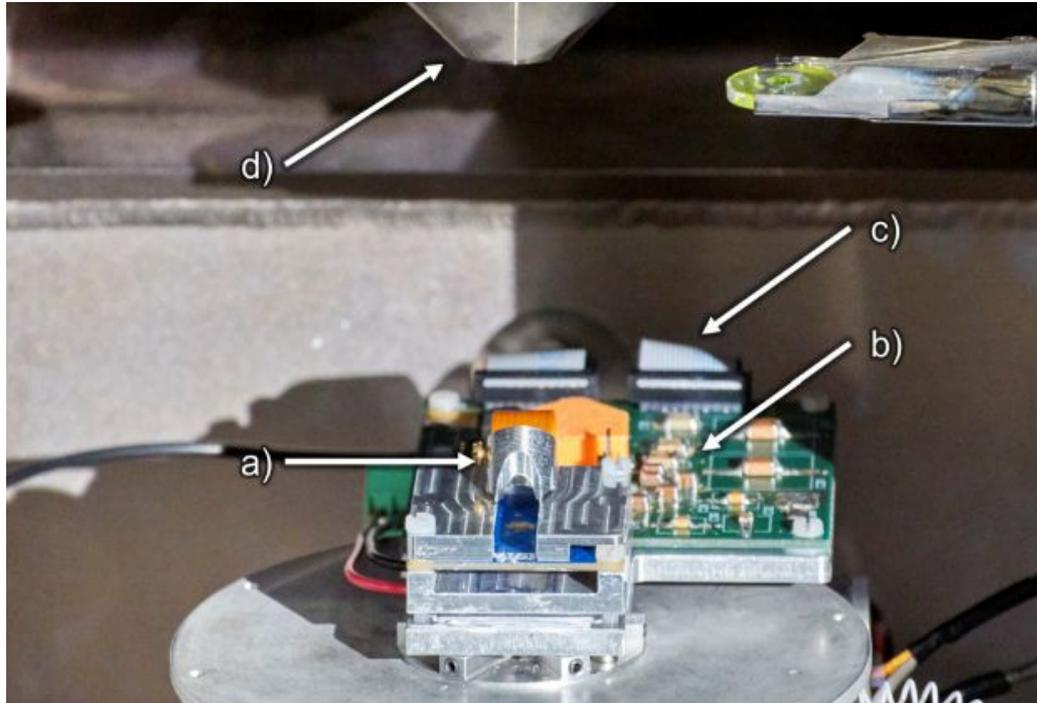


Elettroni monocromatici con energia nota

Sistematica dovuta alla sorgente molto ridotta

# Setup sperimentale

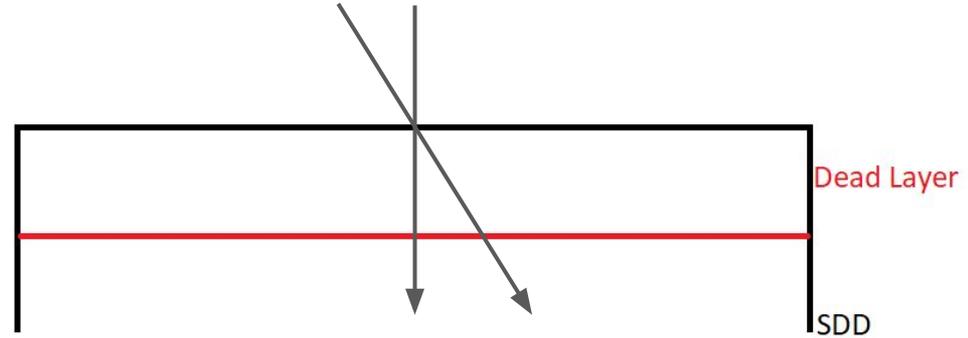
SDD posto nel microscopio a scansione elettronica (SEM) in dotazione al  
dipartimento di Scienze dei Materiali



- a. SDD (singolo pixel, raggio 1.6 mm)
- b. Preamplificatore
- c. Trasmissione del segnale fuori dalla camera a vuoto
- d. Sorgente di elettroni

# Setup sperimentale

- Fascio collimato di elettroni monocromatici (5, 10, 20 keV)
- Sorgente X di  $^{55}\text{Fe}$  all'interno del SEM per monitorare la calibrazione
- Possibilità di ruotare l'SDD per variare l'angolo di incidenza degli elettroni e sondare lo strato morto (0-65°, step 5°)



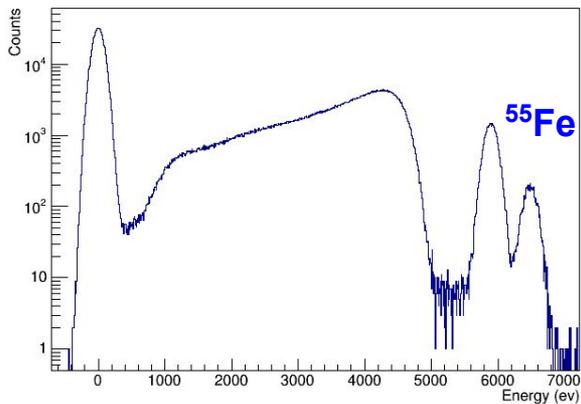
Obiettivo:

parametrizzare l'effetto del dead layer per modificare la funzione di risposta data da simulazioni MC

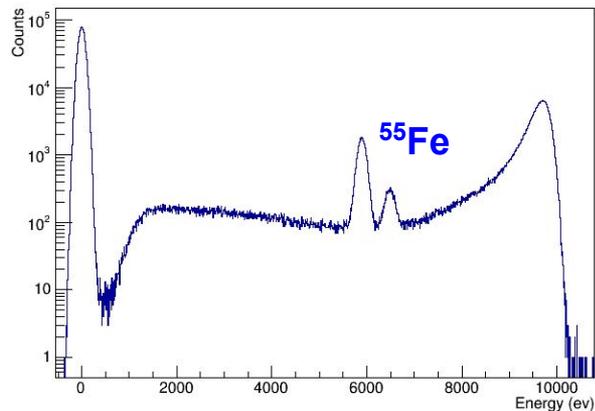
Un'unica parametrizzazione deve essere in grado di spiegare tutte le combinazioni di energia/angolo

# Spettri misurati: energia

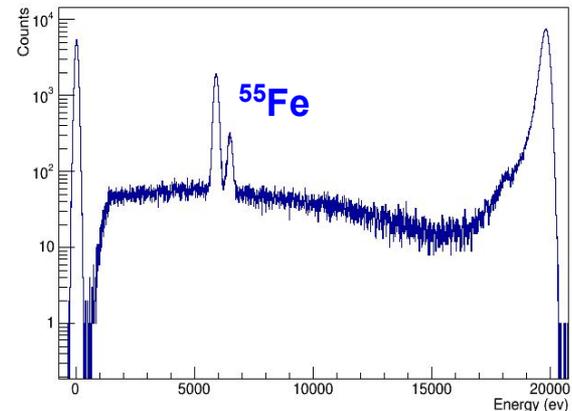
$E_0 = 5 \text{ keV}$



$E_0 = 10 \text{ keV}$

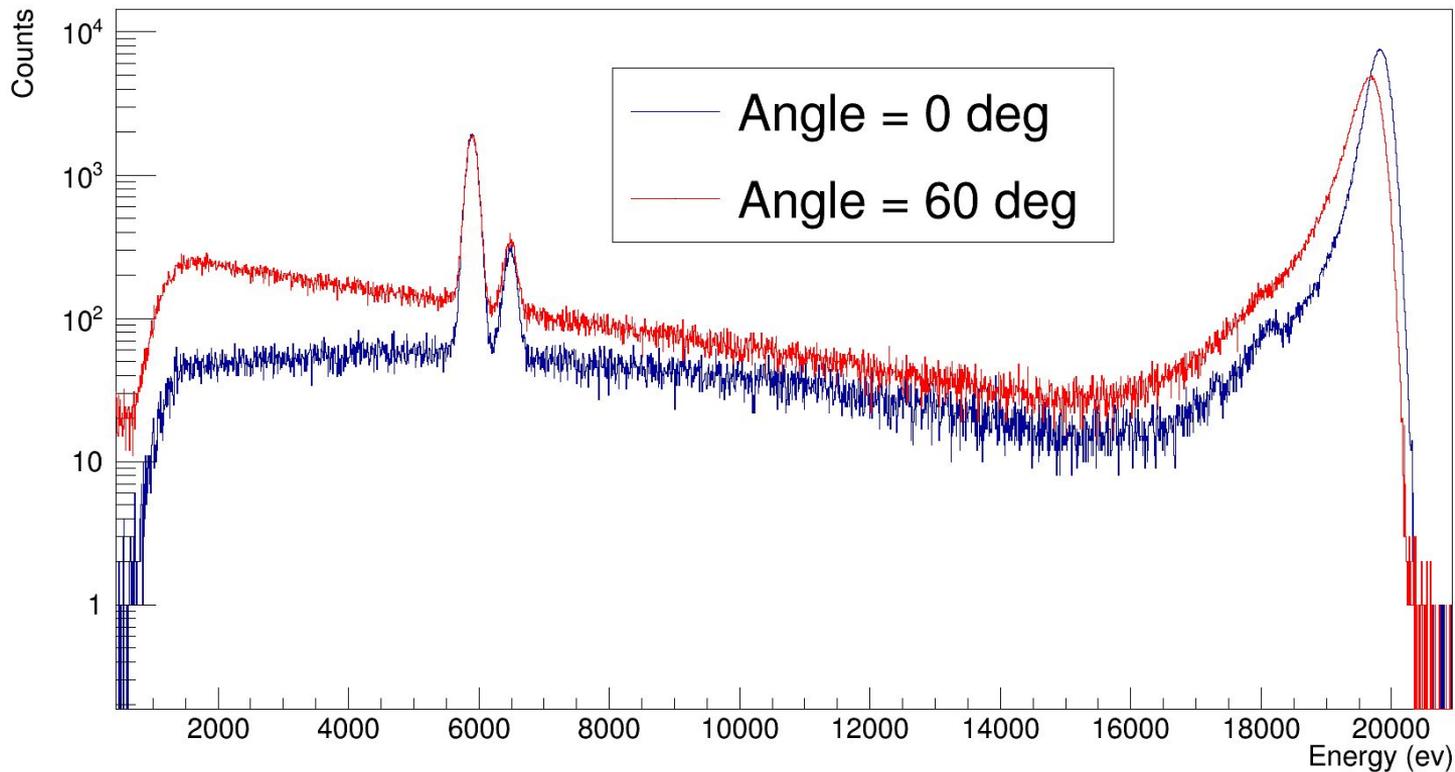


$E_0 = 20 \text{ keV}$

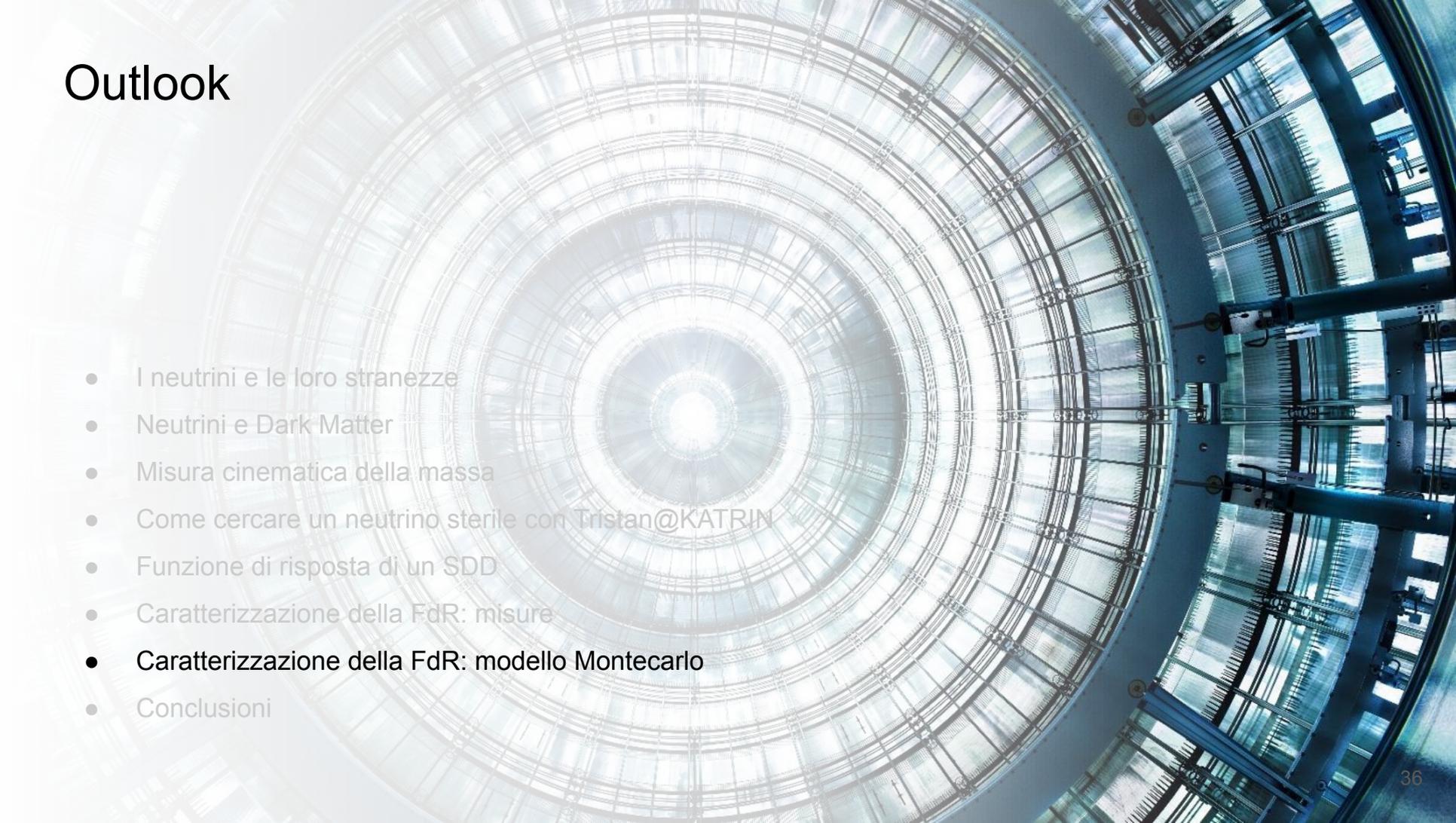


# Spettri misurati: angolo

$E_0 = 20 \text{ keV}$



# Outlook



- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con Tristan@KATRIN
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- **Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo**
- Conclusioni

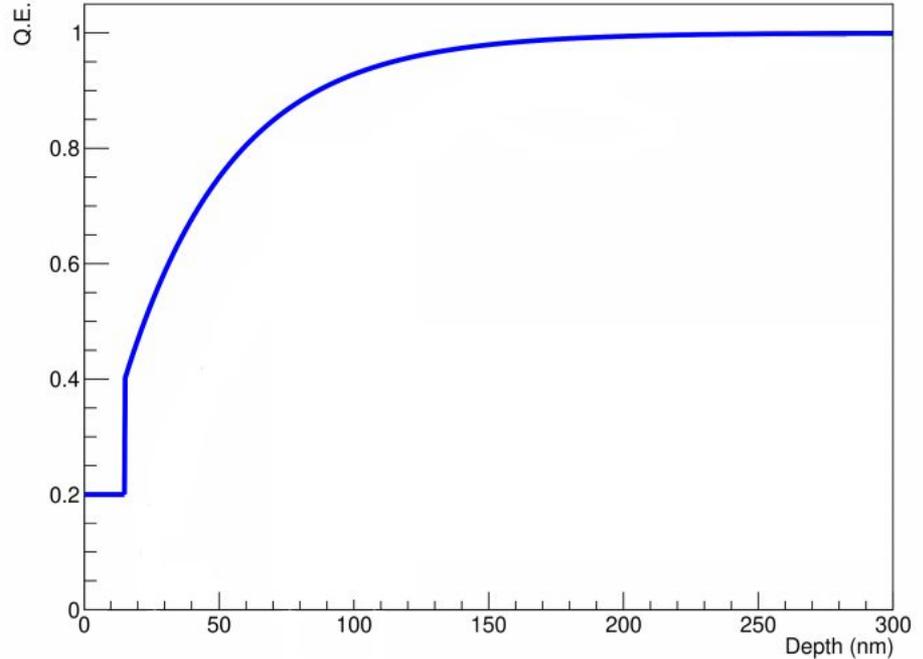
# Dead layer: parametrizzazione

Efficienza di raccolta in funzione della profondità della deposizione di energia nell'SDD

Assumiamo un profilo esponenziale con un possibile offset iniziale, con effetto su qualche centinaio di nm

$$f_{QE}(z; t, p_0, p_1, \lambda) = \begin{cases} p_0 & z < t \\ 1 + (p_1 - 1) \exp\left(-\frac{z - t}{\lambda}\right) & z > t \end{cases}$$

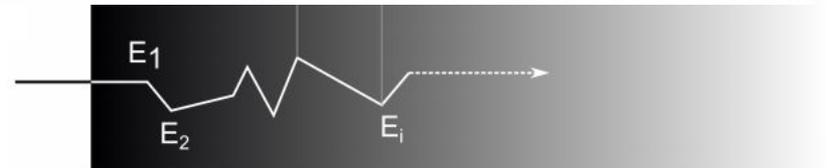
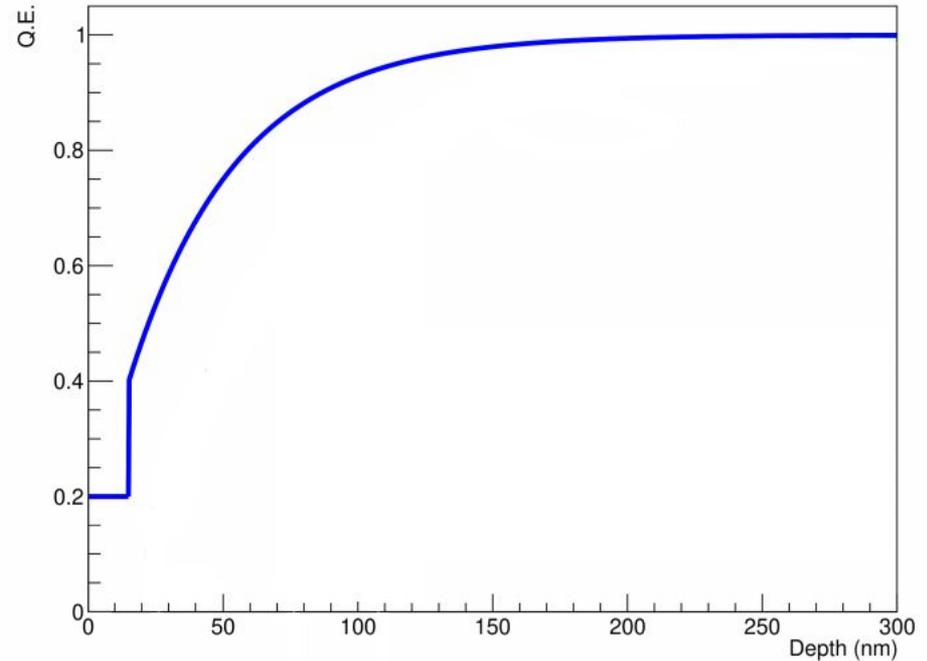
- **z**: profondità nell'SDD
- **t**: spessore dello strato di SiO<sub>2</sub> (noto, ~20 nm)
- **p0**: Q.E. nello strato di SiO<sub>2</sub>
- **p1**: Q.E. al termine del SiO<sub>2</sub>
- **λ**: parametro dell'esponenziale



# Tecnica di analisi

- Simulazione MC per ogni combinazione di energia/angolo di incidenza
- Vengono salvate profondità e  $\Delta E$  per ogni step di propagazione degli elettroni nel Si (step 10 nm)
- Ogni  $\Delta E$  viene corretto per la Q.E. relativa alla profondità a cui è avvenuta la deposizione

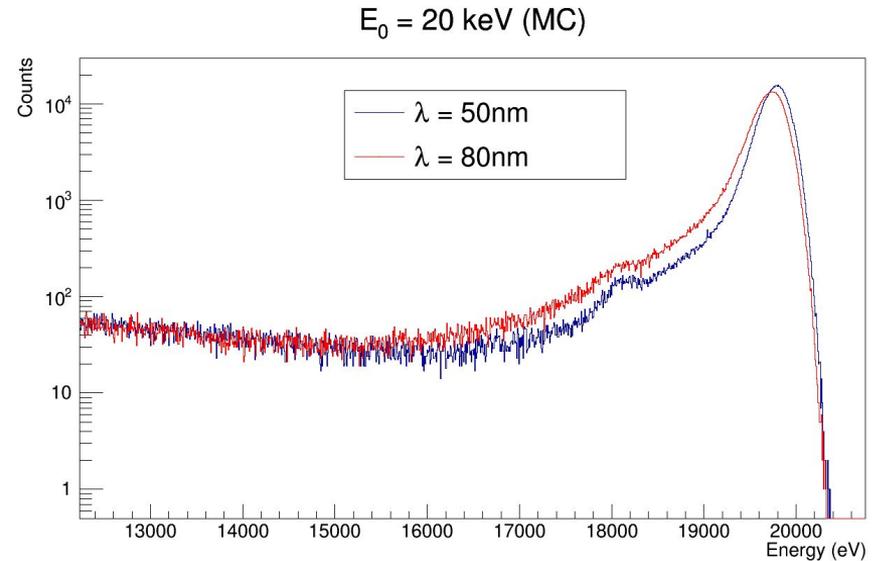
$$E' = \sum_{i=0}^{N_{step}} QE(z_i; p_0, p_1, \lambda) \cdot \Delta E$$



# Tecnica di analisi

$$E' = \sum_{i=0}^{N_{step}} QE(z_i; p_0, p_1, \lambda) \cdot \Delta E_i$$

- Scansione discreta di  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $\lambda$
- Viene generato un istogramma MC di  $E'$  per ogni combinazione
- Viene valutato il  $\chi^2$  tra ogni istogramma e lo spettro misurato corrispondente

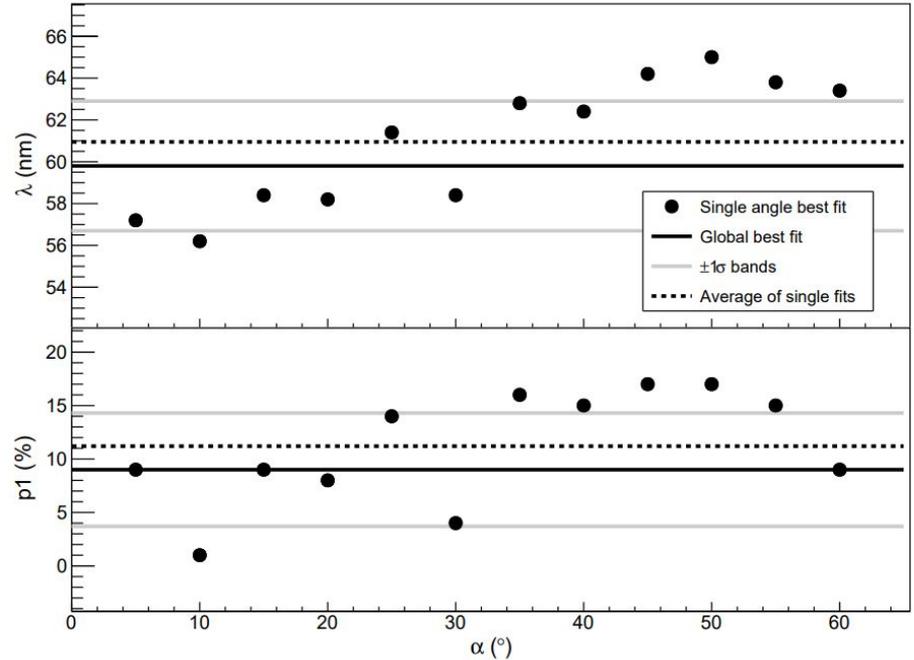


I parametri  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $\lambda$  vengono determinati con un fit combinato su tutte le energie e gli angoli,  
in modo da ottenere un'unica parametrizzazione

# Risultati

$$f_{\text{QE}}(z; t, p_0, p_1, \lambda) = \begin{cases} p_0 & z < t \\ 1 + (p_1 - 1) \exp\left(-\frac{z - t}{\lambda}\right) & z > t \end{cases}$$

- $p_0$  risulta sempre compatibile con 0 (lo strato di SiO<sub>2</sub> è “veramente” morto)
- $p_1$  e  $\lambda$  hanno errore statistico insignificante
- Ripetiamo la procedura di fit sulle singole misure; utilizziamo lo spread dei valori di  $p_1$  e  $\lambda$  come sistematica

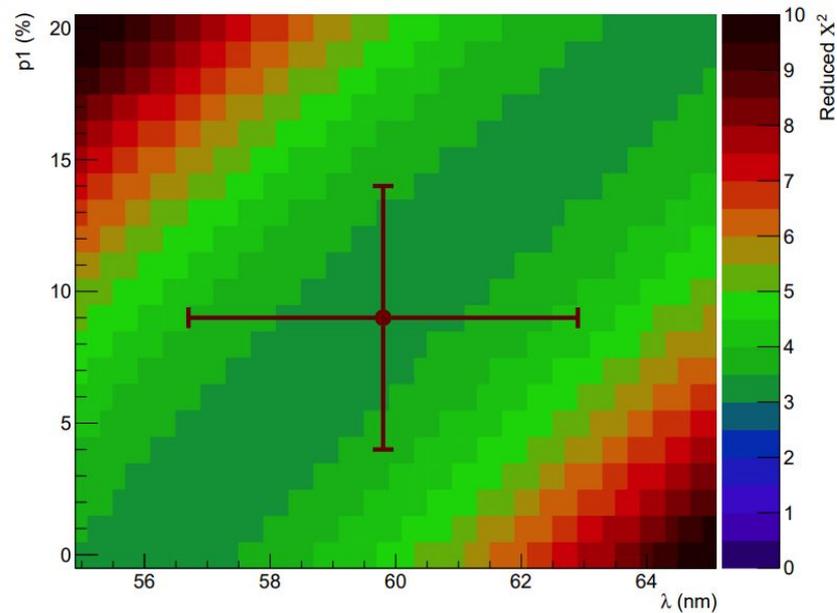
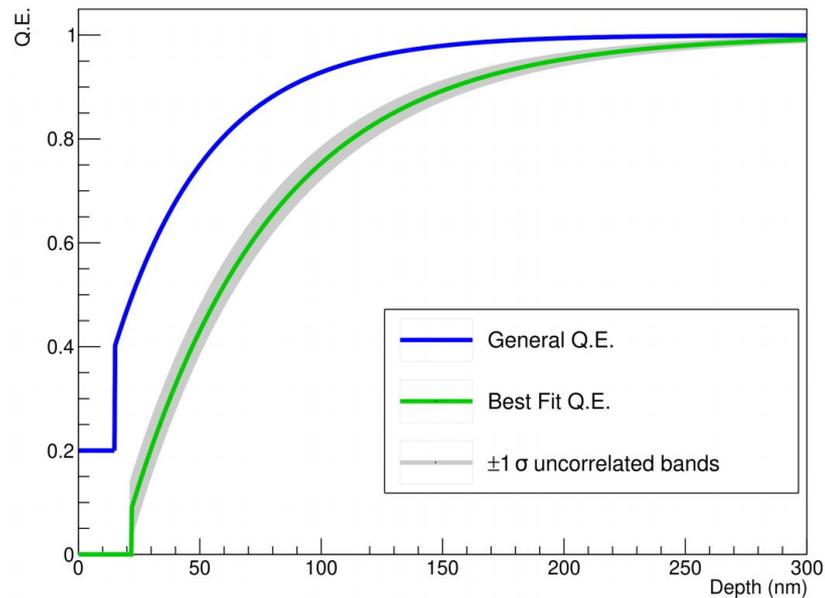


# Risultati

Best fit combinato (errori dominati dalla sistematica)

$$\lambda = (59.8 \pm 3.1) \text{ nm}$$

$$p_1 = (9 \pm 5)\%$$



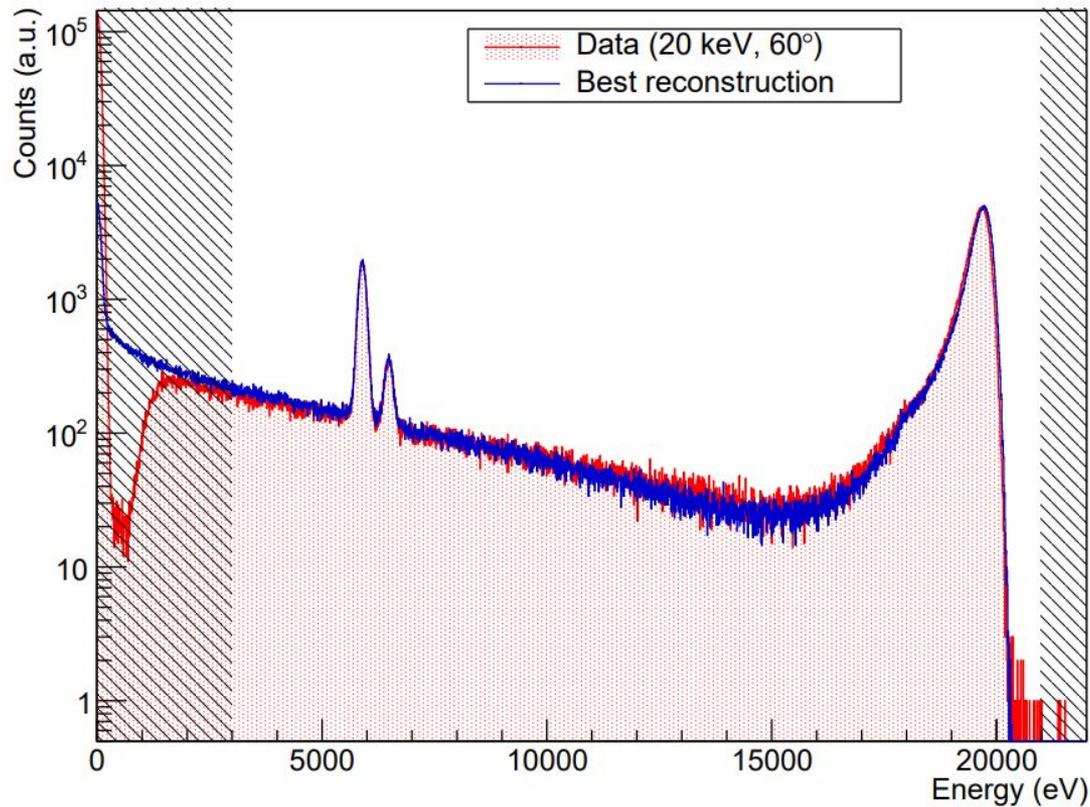
# Risultati - 20 keV

Esempio di ricostruzione di una misura  
con elettroni da 20 keV

Parametri del dead layer da fit globale

Nelle regioni ombreggiate non viene  
effettuato il calcolo del  $\chi^2$

Ottima ricostruzione di tutte le feature  
dello spettro



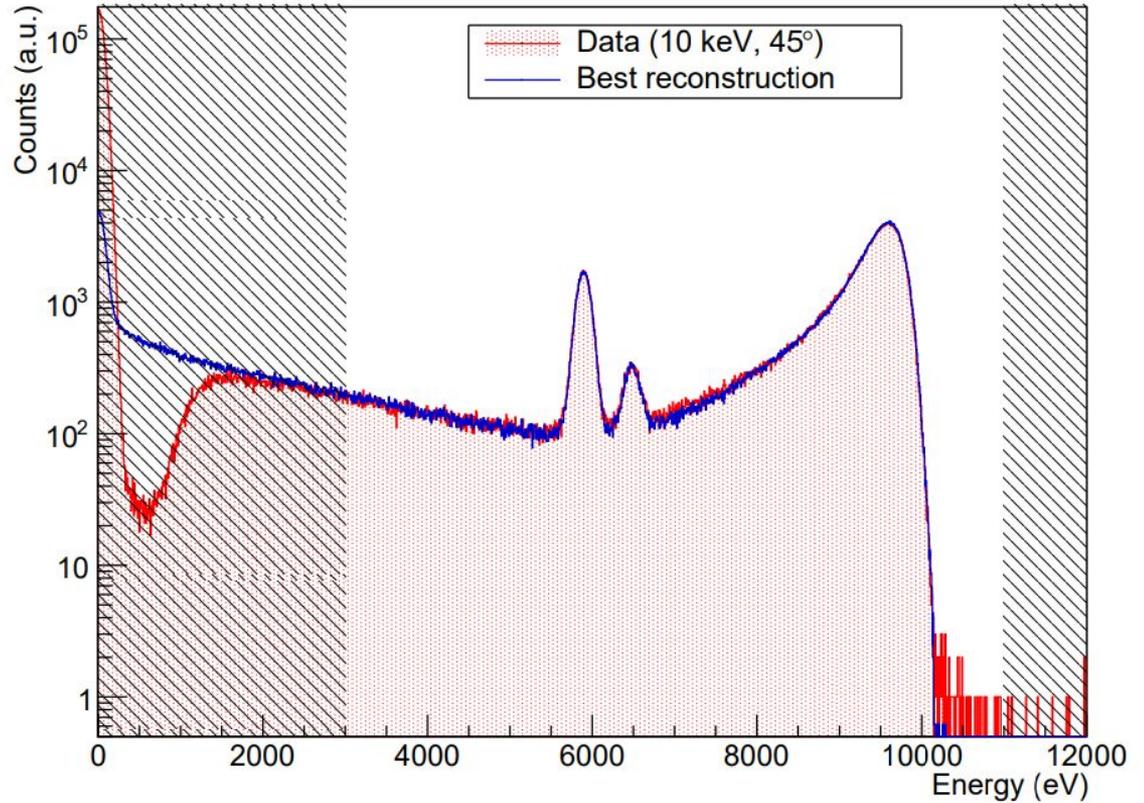
# Risultati - 10 keV

Esempio di ricostruzione di una misura  
con elettroni da 10 keV

Parametri del dead layer da fit globale

Nelle regioni ombreggiate non viene  
effettuato il calcolo del  $\chi^2$

Ottima ricostruzione di tutte le feature  
dello spettro



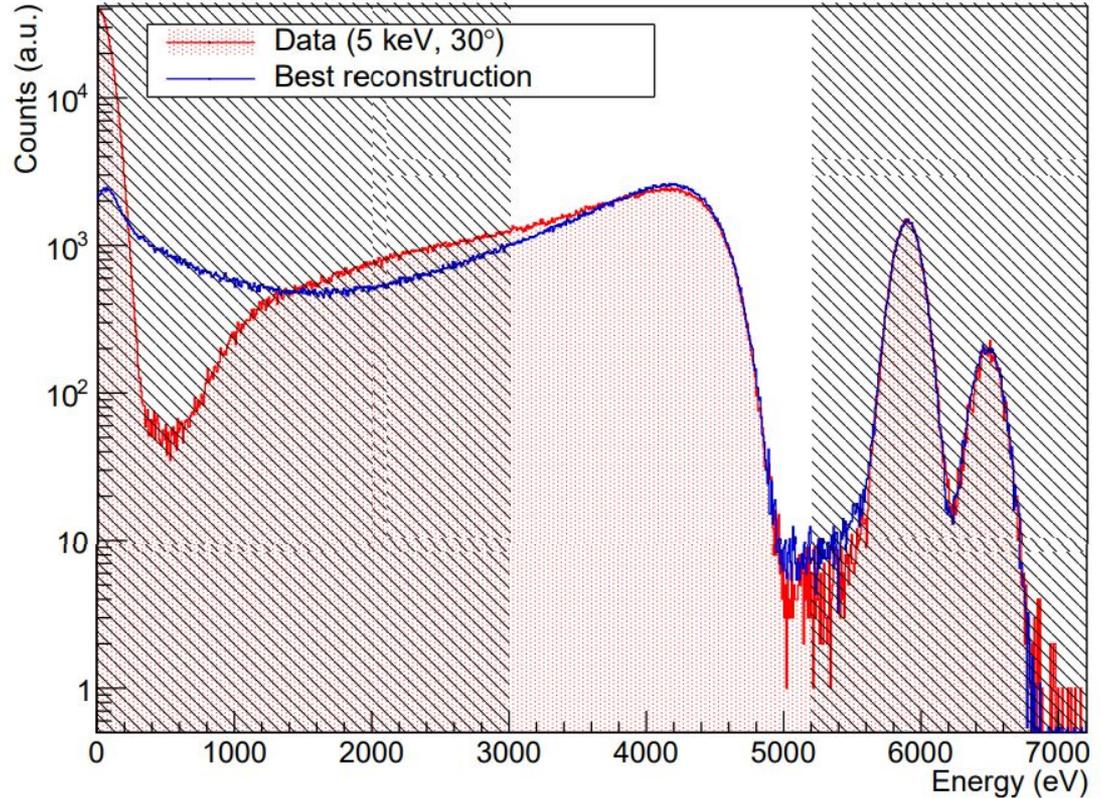
# Risultati - 5 keV

Esempio di ricostruzione di una misura  
con elettroni da 5 keV

Parametri del dead layer da fit globale

Nelle regioni ombreggiate non viene  
effettuato il calcolo del  $\chi^2$

Ricostruzione meno riuscita;  
limite del metodo, oppure effetti  
strumentali non considerati



# Outlook



- I neutrini e le loro stranezze
- Neutrini e Dark Matter
- Misura cinematica della massa
- Come cercare un neutrino sterile con `Tristan@KATRIN`
- Funzione di risposta di un SDD
- Caratterizzazione della FdR: misure
- Caratterizzazione della FdR: modello Montecarlo
- **Conclusioni**

# Conclusioni

- Il neutrino sterile con massa di qualche keV è una soluzione elegante a una serie di problemi aperti (DM, masse dei neutrini attivi)
- Tristan è un upgrade del rivelatore di KATRIN che consente di analizzare lo spettro completo del decadimento beta del  ${}^3\text{T}$  alla ricerca della distorsione dovuta all'esistenza di un neutrino con massa  $O(\text{keV})$
- Tristan utilizzerà SDD (Silicon Drift Detector) come rivelatori
- L'INFN si occupa di un aspetto molto critico dell'utilizzo di questi rivelatori, ovvero la costruzione di un modello della risposta del rivelatore a elettroni con energia  $O(10\text{keV})$

