



IFAE 2012

Incontri di Fisica delle Alte Energie
Ferrara, 11-13 Aprile 2012

Prestazioni a bassa soglia e rivelazione coerente di neutrini da supernova in CUORE-0 e CUORE

Matteo Biassoni⁽¹⁾

⁽¹⁾Università degli Studi di Milano-Bicocca
e INFN - Sezione di Milano-Bicocca

L'esperimento CUORE

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

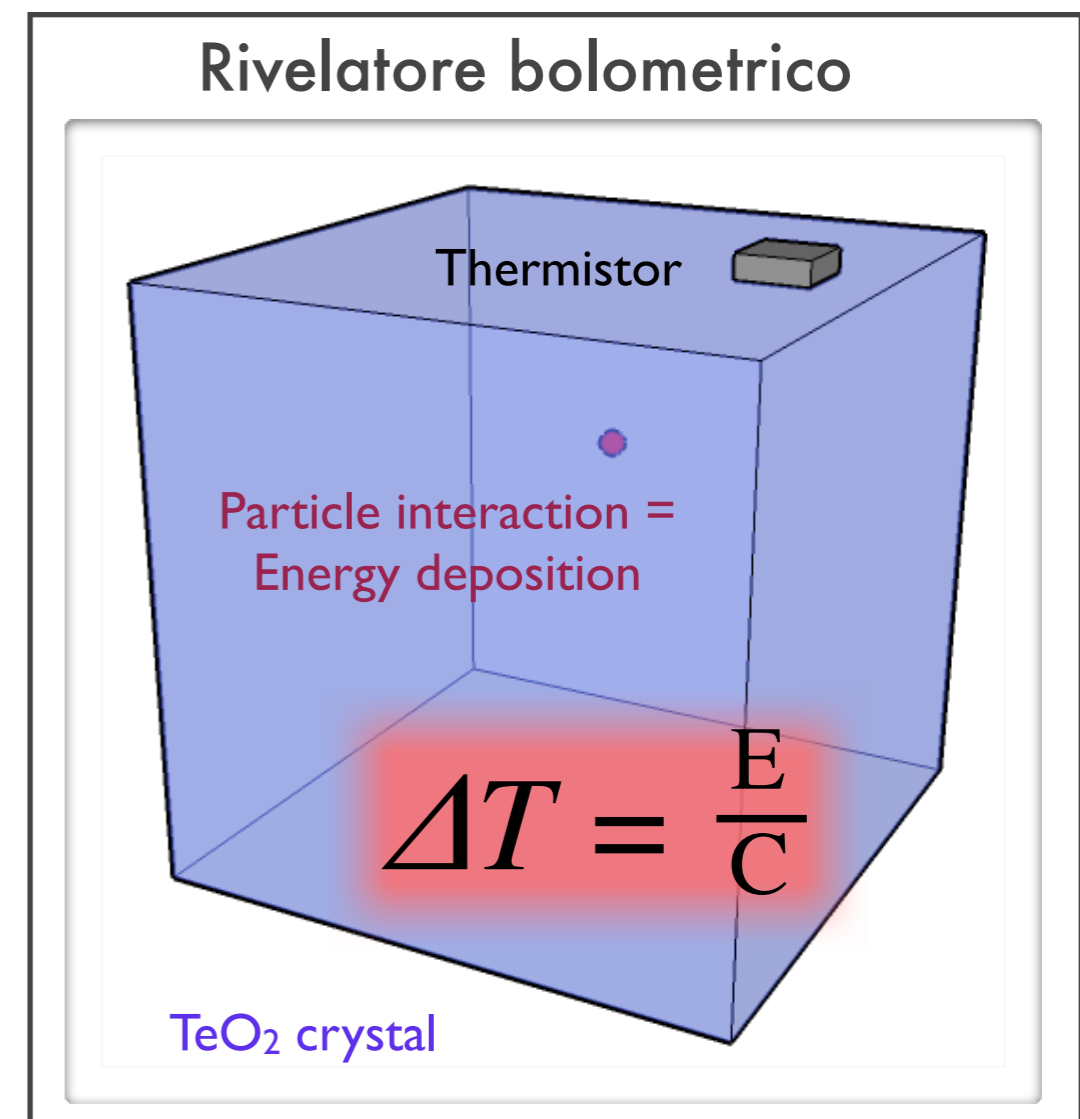
CUORE è un esperimento in costruzione presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Obiettivo principale = ricerca del **decadimento boppio beta senza neutrini**

Caratteristiche necessarie per $\beta\beta 0\nu$:

- grande massa (741 kg massa attiva di TeO_2)
- ottima risoluzione energetica ==> bassa soglia
- basso fondo (@LNGS, selezione dei materiali)
- frammentazione
- alta efficienza

Queste caratteristiche fanno di CUORE un potente strumento per lo studio di altri fenomeni

OBSERVATORY for RARE EVENTS



Motivazioni

Neutrini da SN

Studio della sensibilità di CUORE nella rivelazione di neutrini da supernova.

INGREDIENTI:

- modello per gli spettri energetici di emissione
- modello per il profilo temporale
- fattore di forma nucleare
- calcolo del segnale atteso e confronto con il fondo atteso
- studio di un sistema di trigger

IPOSTESI STANDARD: esplosione di una supernova di tipo II (star core collapse) nel centro della nostra galassia, $d \simeq 8.5$ kpc

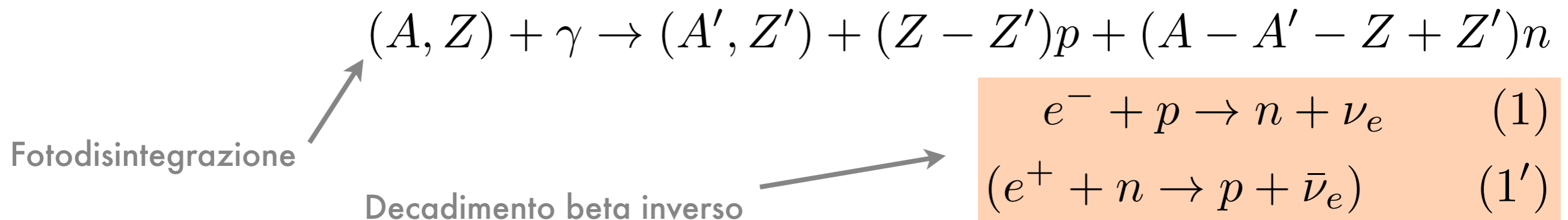
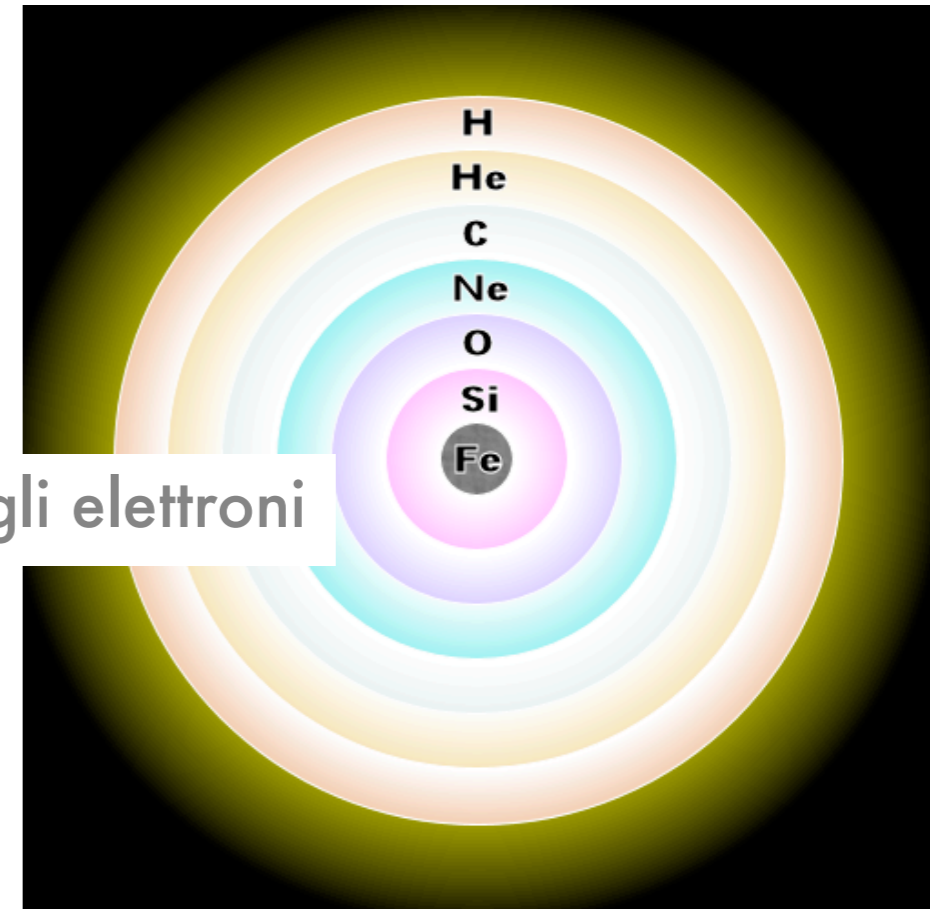
MOTIVAZIONE: comprendere se CUORE ha la possibilità di identificare una supernova galattica (SNEWS?) e raccogliere informazioni sui parametri dei modelli di supernova.

Fisica delle SN (1)

Fisica delle SN

Supernova di tipo II:

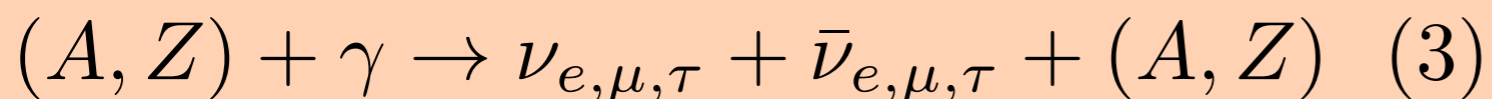
- $M_{\text{star}} > 9 M_{\text{sun}}$
- fusione di elementi progressivamente più pesanti
==> struttura "a cipolla"
- ferro: no fusioni, no produzione di energia
==> solo pressione di degenerazione degli elettroni
- massa nucleo di ferro $>$ Chandrasekhar limit ($1.4 M_{\text{sun}}$)
==> COLLASSO
- compressione del nucleo e aumento della temperatura



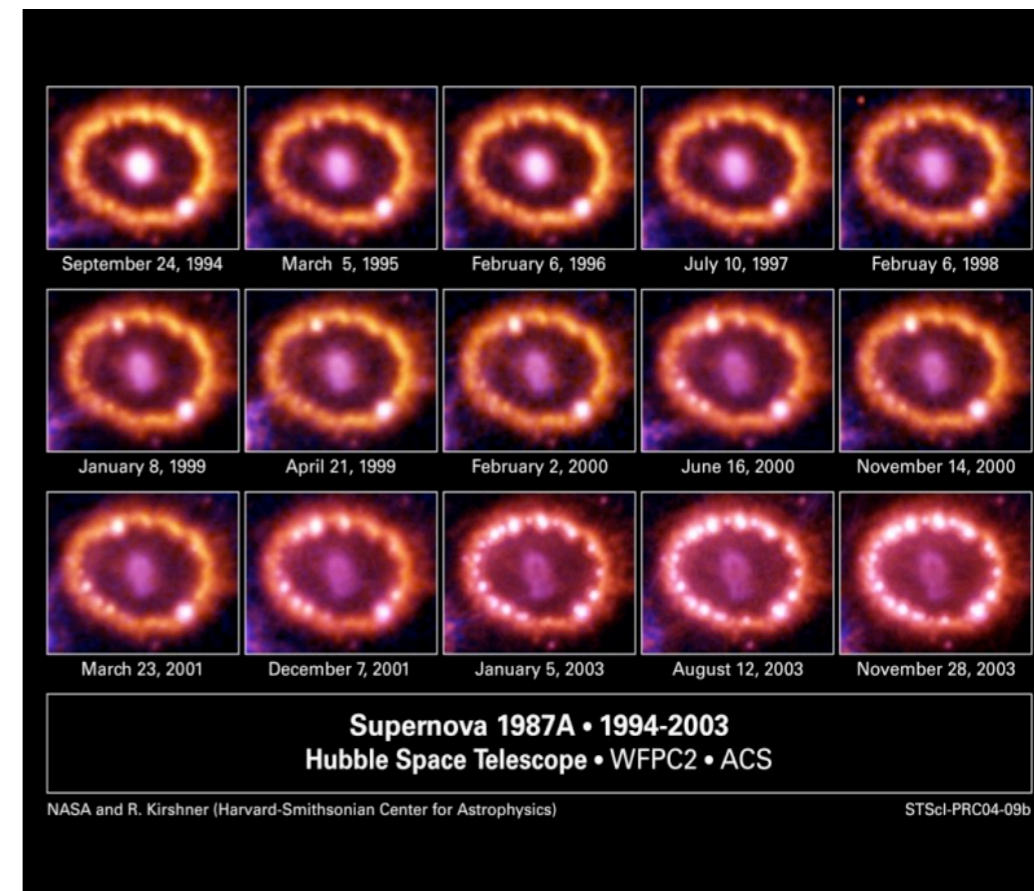
Fisica delle SN (2)

Supernova di tipo II:

- quando la densità del nucleo della SN si avvicina alla densità del nucleo atomico interazione forte e degenerazione neutronica impediscono un ulteriore collasso ==> la materia in caduta "rimbalza"
- l'onda d'urto che si genera dissocia la materia nucleare perdendo tutta la sua energia
- il nucleo si raffredda attraverso **pair-annihilation** e **bremsstrahlung**



- 0.1% dei neutrini interagisce con la materia dell'onda d'urto riportando la sua energia a valori positivi ==> espulsione della materia non più legata = ESPLOSIONE



Fisica delle SN (3)

1,1', 2 e 3 sono i meccanismi che generano i flussi di neutrini.

Contributi al flusso totale:

$$1+1' \implies 10-20\%$$

$$2+3 \implies 80-90\%$$

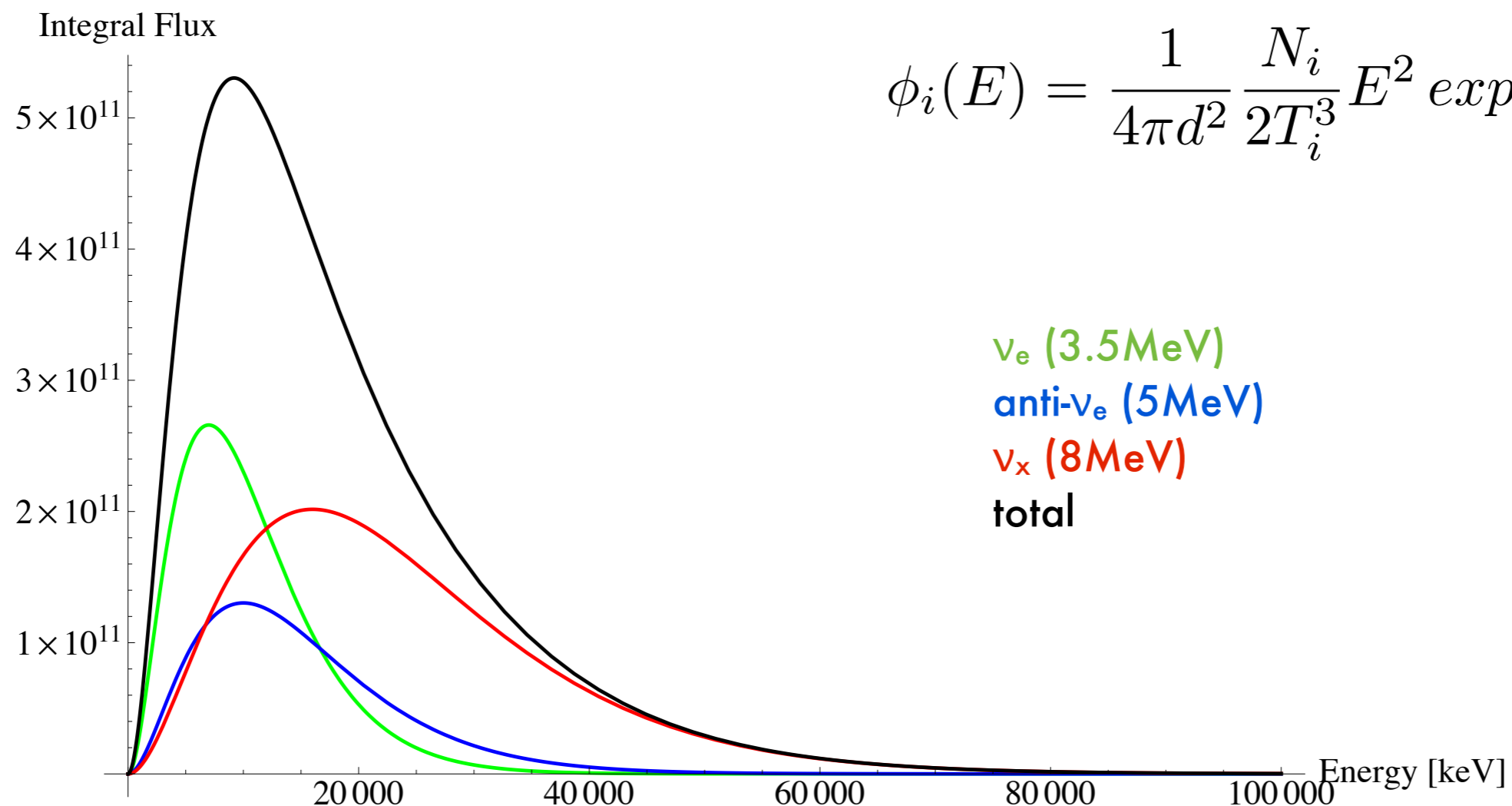
L'analisi è stata condotta considerando solo il contributo dominante 2+3 (*Cooling Phase*), trascurando i processi 1+1' (*Accretion Phase*). Questa approssimazione è ampiamente utilizzata in letteratura ed è particolarmente valida se si considera un meccanismo di rivelazione *flavor-blind*.

Il profilo temporale dell'emissione della *Cooling Phase* è ben approssimato (SN1987A) da un'esponenziale con tempo caratteristico = 3.5s

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \tau \simeq 3.5\text{s}$$

Fisica delle SN (4)

- 10^{53} ergs emessi come neutrini
- equipartizione dell'energia tra le sei specie
- spettri differenti per ν_e , anti- ν_e and ν_x (diversi liberi cammini medi = diversi raggi delle neutrinosfere = diverse temperature all'emissione)
- finestra temporale di circa 10s contiene tutta l'emissione



Astrofisica con CUORE (1)

Rivelazione in CUORE

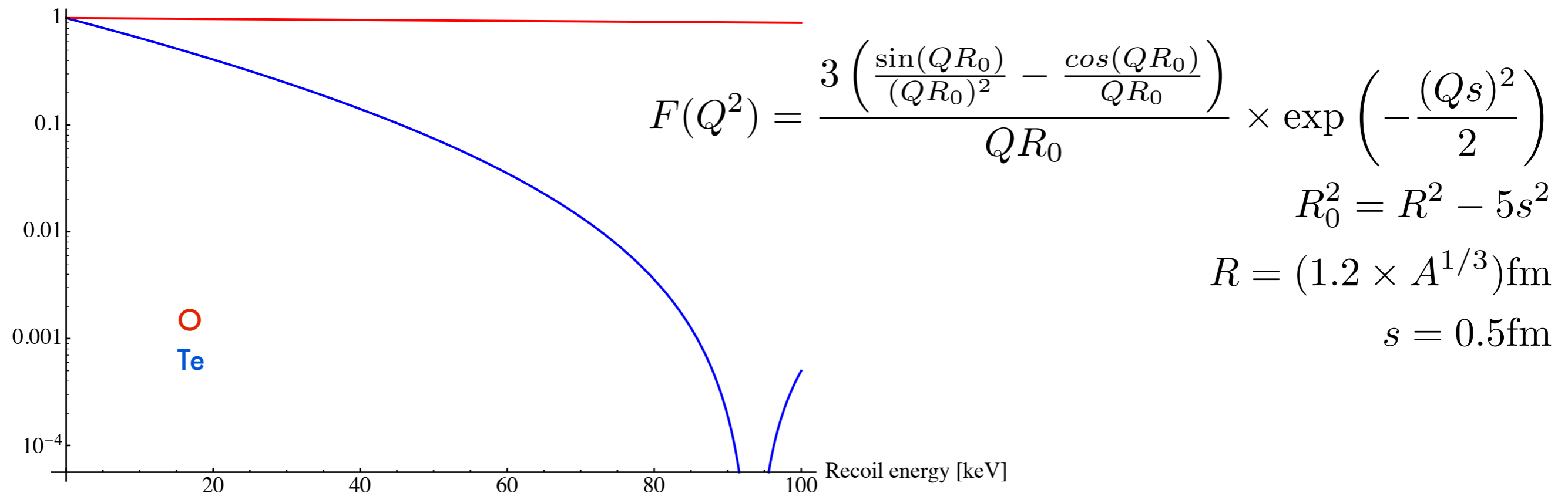
Meccanismo di rivelazione in CUORE: scattering coerente in NC (momento trasferito $< 1 \text{ fm}^{-1}$) elastico sui nuclei del bersaglio. **CUORE misura l'energia di rinculo dei nuclei.**

La sezione d'urto dipende dalle proprietà del nucleo attraverso:

- carica debole:

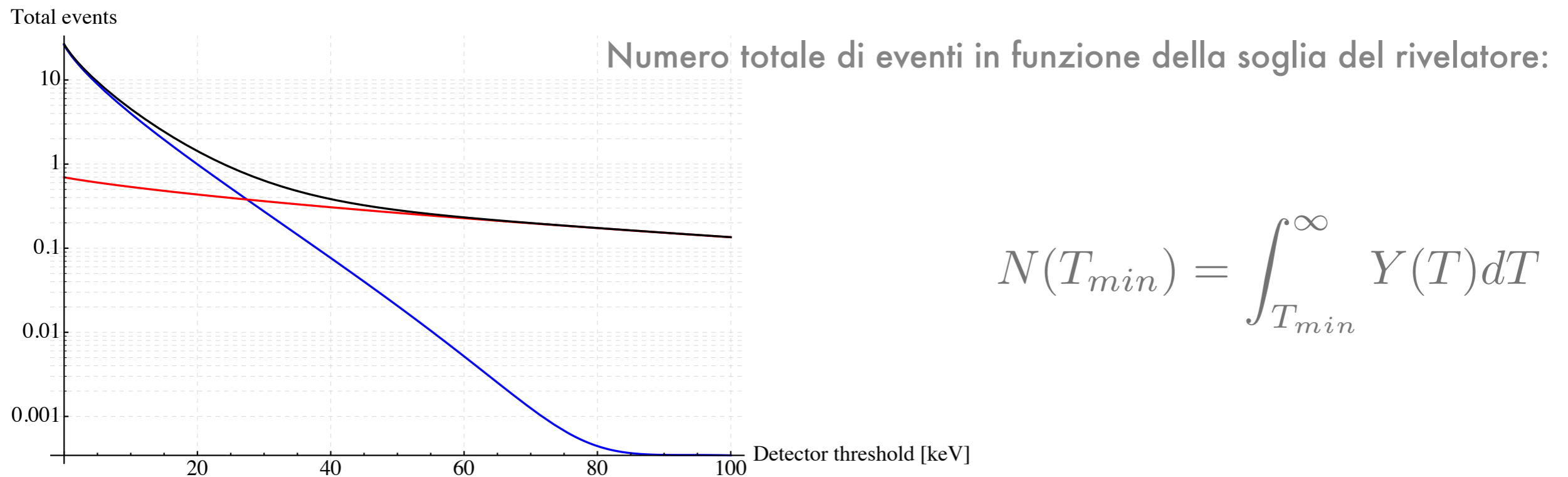
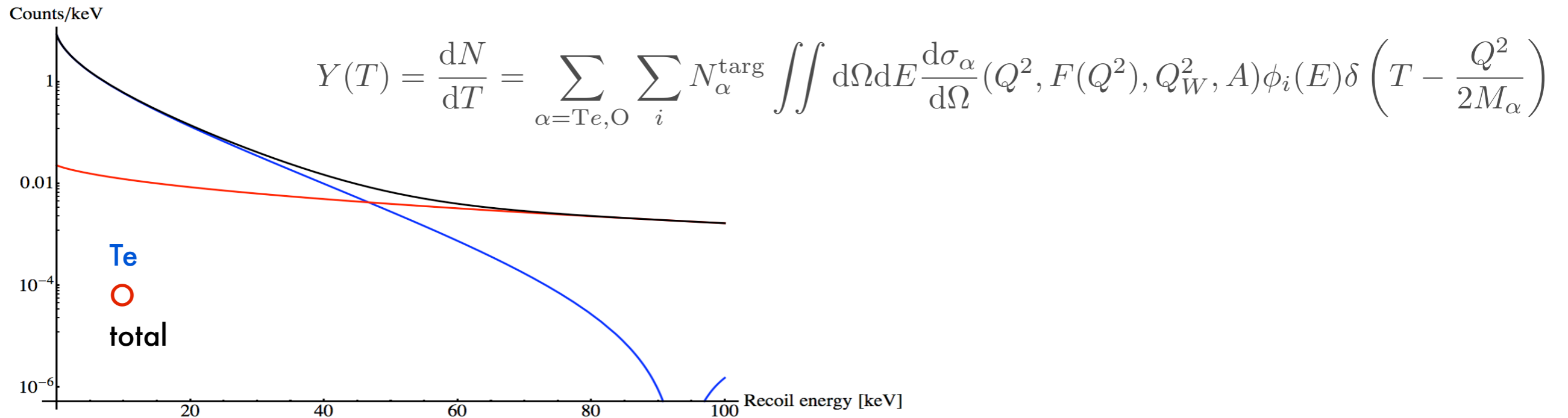
$$Q_w = N - (1 - 4 \sin^2 \theta_W) Z$$

- fattore di forma nucleare:

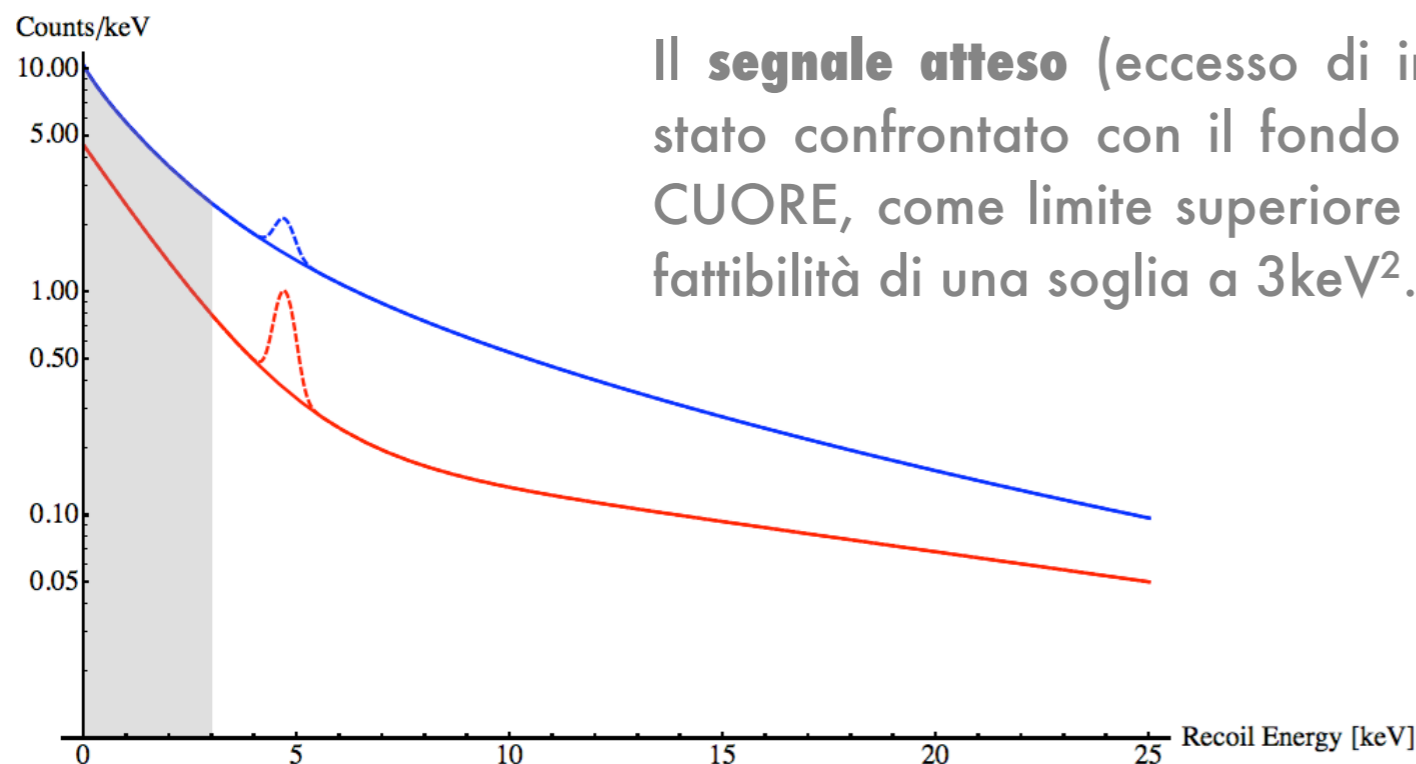


Astrofisica con CUORE (2)

Spettro dei rinculi nucleari: l'integrazione numerica genera lo spettro atteso dei rinculi nucleari, **ovvero ciò che l'esperimento rivela** effettivamente



Astrofisica con CUORE (3)



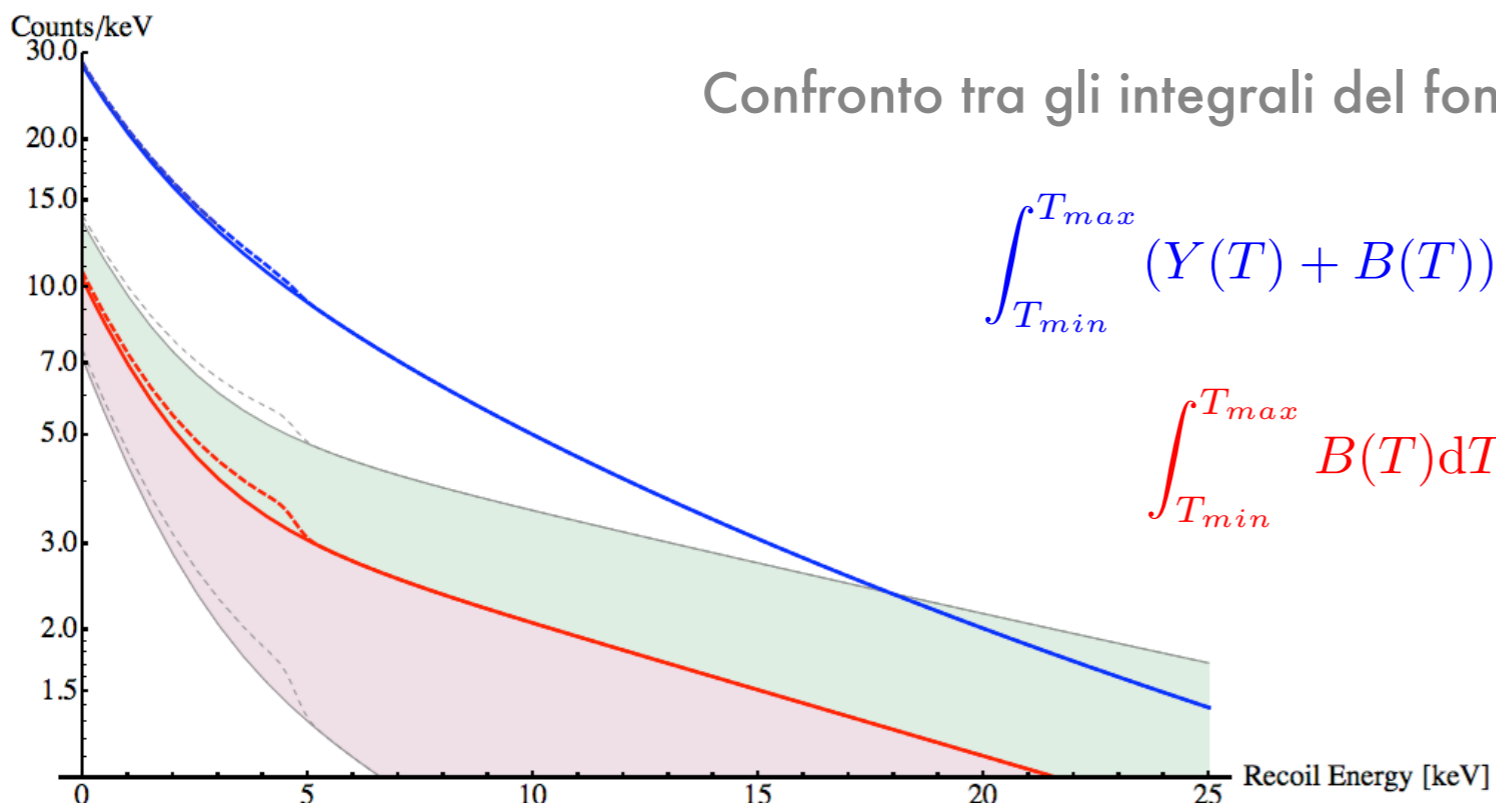
Il **segnale atteso** (eccesso di interazioni in una opportuna finestra temporale) è stato confrontato con il fondo di CCVR2¹ (run di test) riscaldato per la massa di CUORE, come limite superiore per il fondo di CUORE. CCVR2 dimostra anche la fattibilità di una soglia a 3keV².

Segnale

Bkg CUORE estrapolato

1) arXiv:1108.4757

2) articolo in preparazione



Confronto tra gli integrali del fondo e del segnale in funzione della soglia:

$$\int_{T_{min}}^{T_{max}} (Y(T) + B(T)) dT$$

$$\int_{T_{min}}^{T_{max}} B(T) dT$$

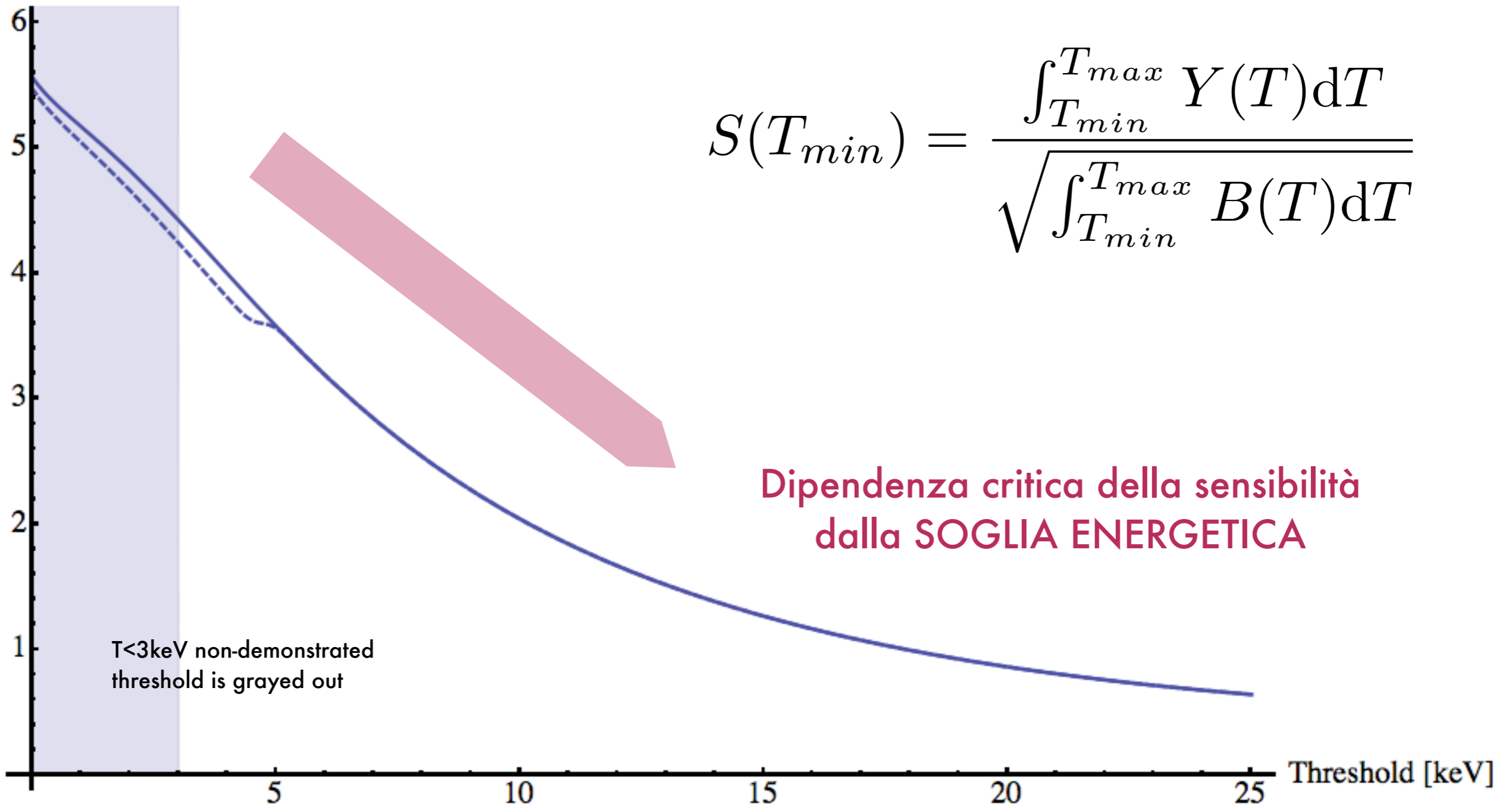
T_{max} è un'energia di cutoff scelta in modo che tutti gli eventi di segnale siano contenuti ma il fondo sia ancora comparabile col segnale

Bande colorate = intervalli normali al 68%

Astrofisica con CUORE (4)

La sensibilità è calcolata come il rapporto tra il numero totale di eventi di segnale e la fluttuazione statistica del numero totale di eventi di fondo

Sensitivity [σ]



Bassa soglia (1)

La sensibilità alla rivelazione di neutrini da supernova (in generale a fenomeni che coinvolgono scattering sui nuclei) è fortemente dipendente dalla SOGLIA ENERGETICA dei rivelatori

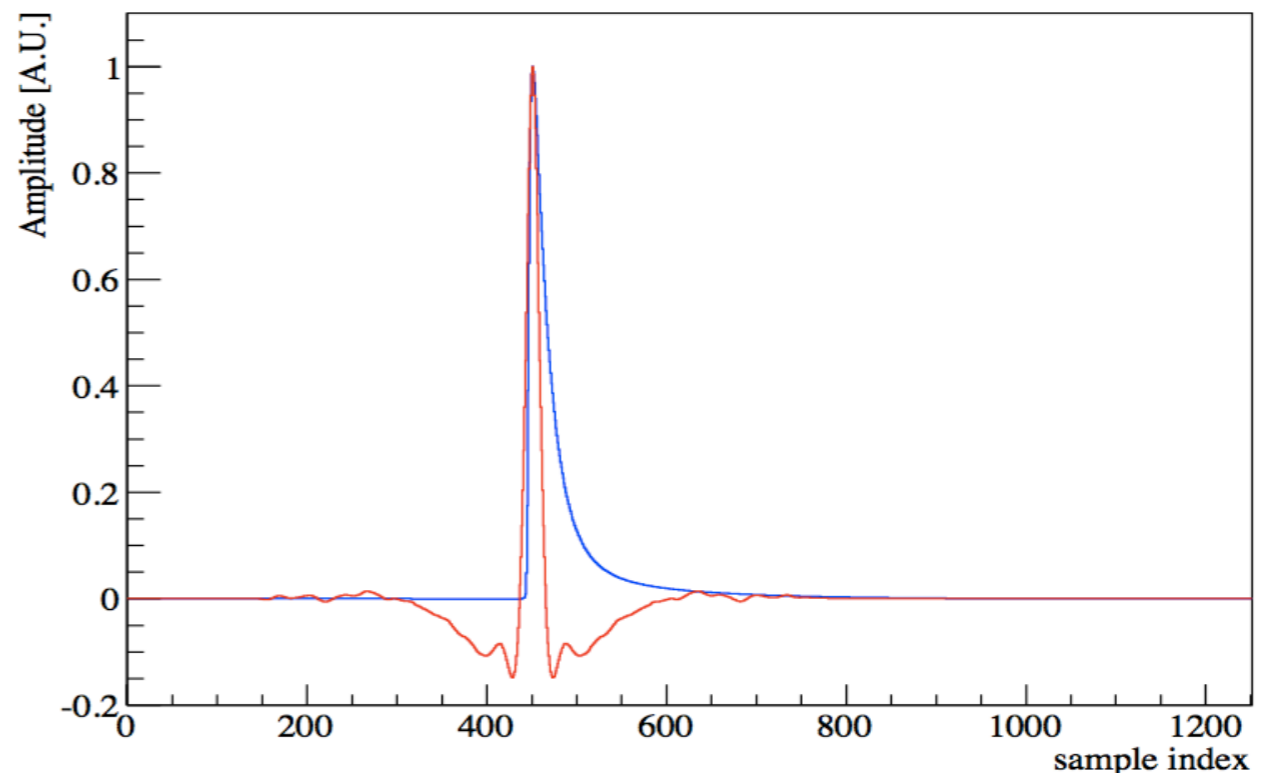
DAQ trigger basato sul *FILTRO OTTIMO* = **OPTIMUM TRIGGER**

- massimo rapporto segnale/rumore teorico
- massima risoluzione energetica teorica
- agisce nel dominio delle frequenze
- richiede la conoscenza di:
 - ✓ forma attesa dell'impulso => impulso medio $s(\omega)$
 - ✓ "forma" del rumore atteso => spettro di potenza di rumore medio $N(\omega)$

Funzione di trasferimento:

$$H(\omega) = h \frac{s^*(\omega)}{N(\omega)} e^{-i\omega t_{\text{Max}}}$$

$$h = \left(\sum_k \frac{|s(\omega)|^2}{N(\omega)} \right)^{-1}$$

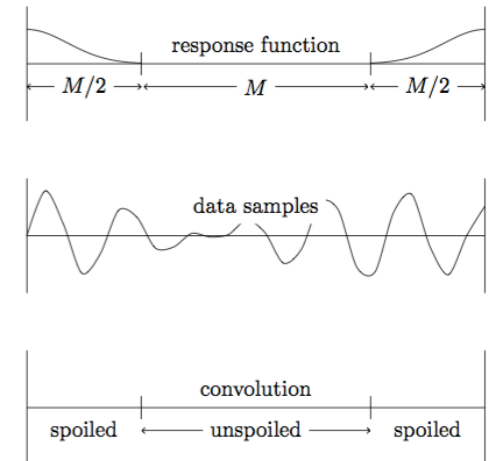


Bassa soglia (2)

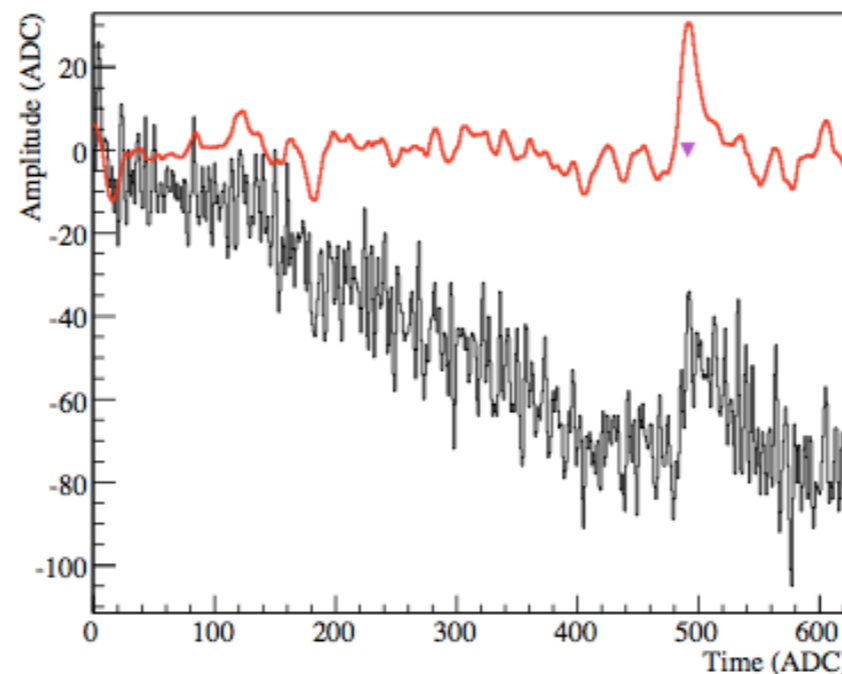
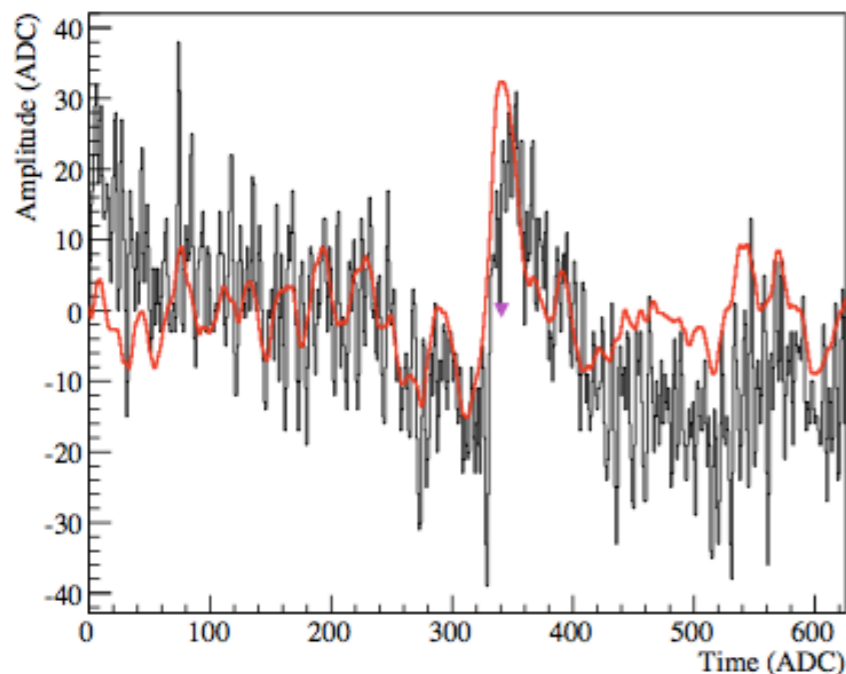
La sensibilità alla rivelazione di neutrini da supernova (in generale a fenomeni che coinvolgono scattering sui nuclei) è fortemente dipendente dalla SOGLIA ENERGETICA dei rivelatori

DAQ trigger basato sul *FILTRO OTTIMO* = **OPTIMUM TRIGGER**

Implementazione online = *DFT convolution wraparound* :
tecnica per filtrare buffer di dati senza distorsioni dovute alla non periodicità del segnale



RISULTATI



- miglioramento del rapporto segnale/rumore
- soppressione delle frequenze non interessate dal segnale

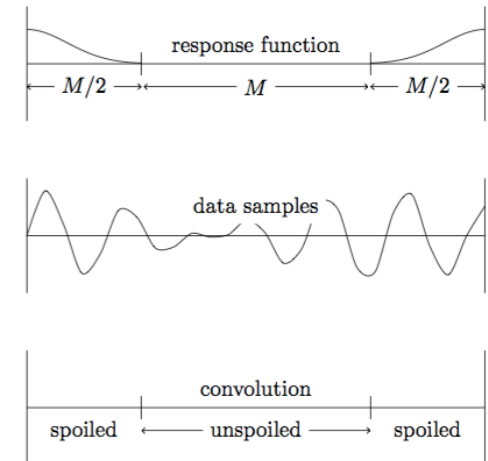
Miglioramento della
risoluzione/soglia

Bassa soglia (2)

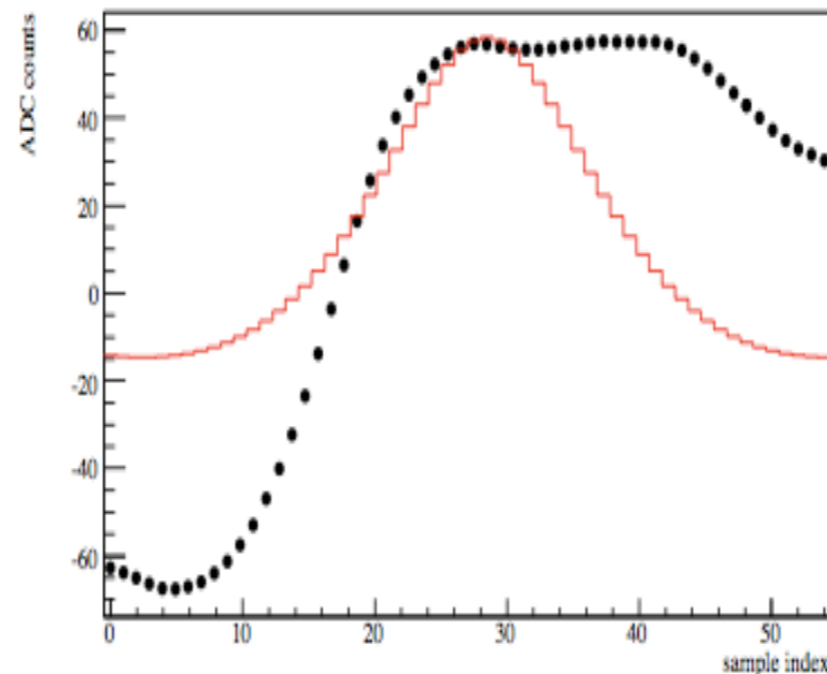
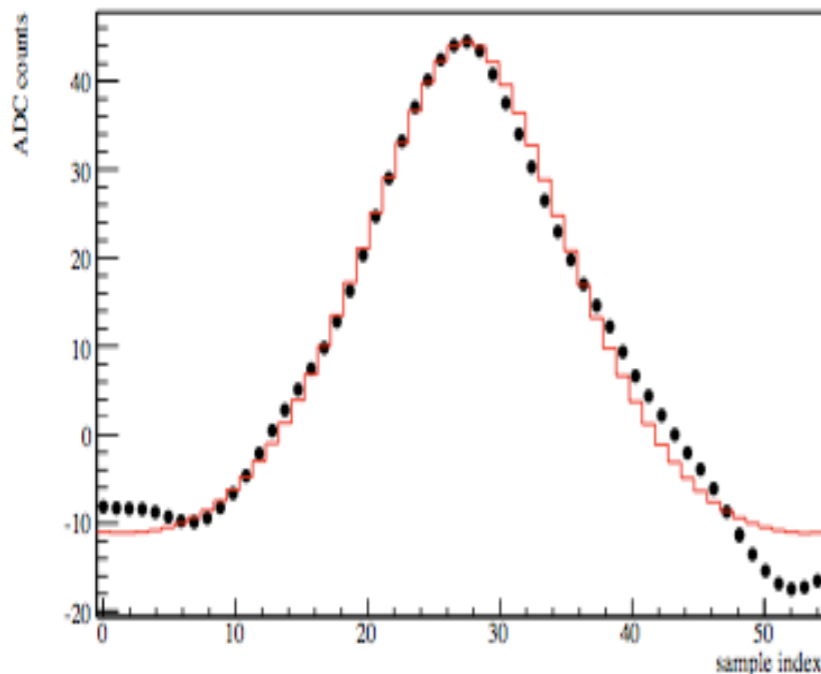
La sensibilità alla rivelazione di neutrini da supernova (in generale a fenomeni che coinvolgono scattering sui nuclei) è fortemente dipendente dalla SOGLIA ENERGETICA dei rivelatori

DAQ trigger basato sul *FILTRO OTTIMO* = **OPTIMUM TRIGGER**

Implementazione online = *DFT convolution wraparound* :
tecnica per filtrare buffer di dati senza distorsioni dovute alla non periodicità del segnale



RISULTATI



- calcolo "online" di un parametro di forma sulla base del confronto con il segnale atteso
- reiezione "online" di impulsi spuri

Riduzione del rate
totale

Trigger per SN (1)

Algoritmo di trigger minimale

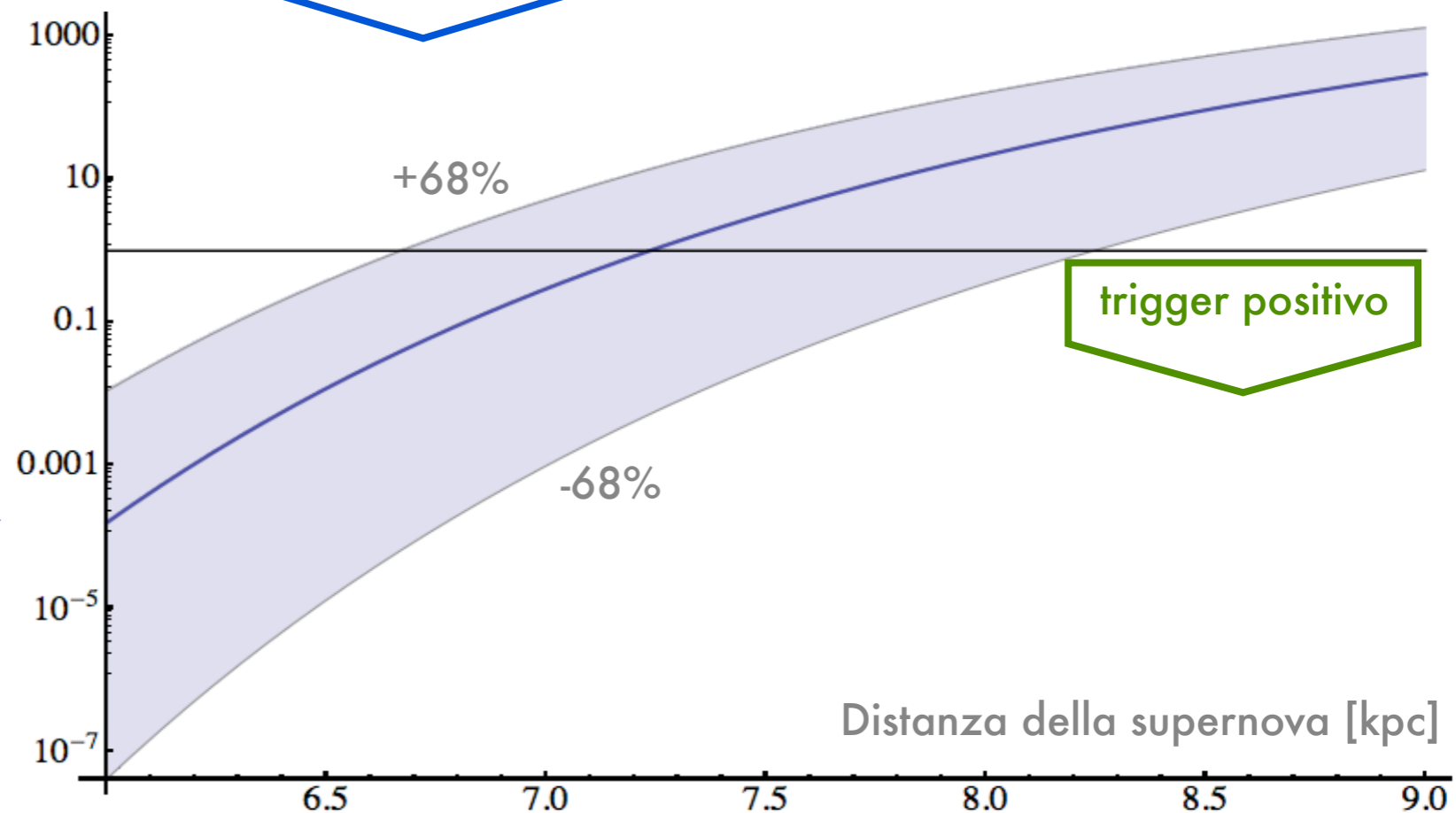
Trigger minimale: **soglia** sul **numero di particelle** che interagiscono nel rivelatore nella **regione energetica** di interesse ($E < 50 \text{ keV}$) in una **finestra temporale** ottimizzata per sfruttare il profilo temporale esponenziale dell'emissione.

Numero di eventi (SN) molto basso \Rightarrow TRIGGER rate dominato da **falsi positivi** = fluttuazioni del numero di interazioni nella finestra temporale

Principio del trigger = **rate di falsi positivi fisso** (Es: 1/week)

Dipende da:

- rate di interazioni (fondo)
- soglia (adattiva)



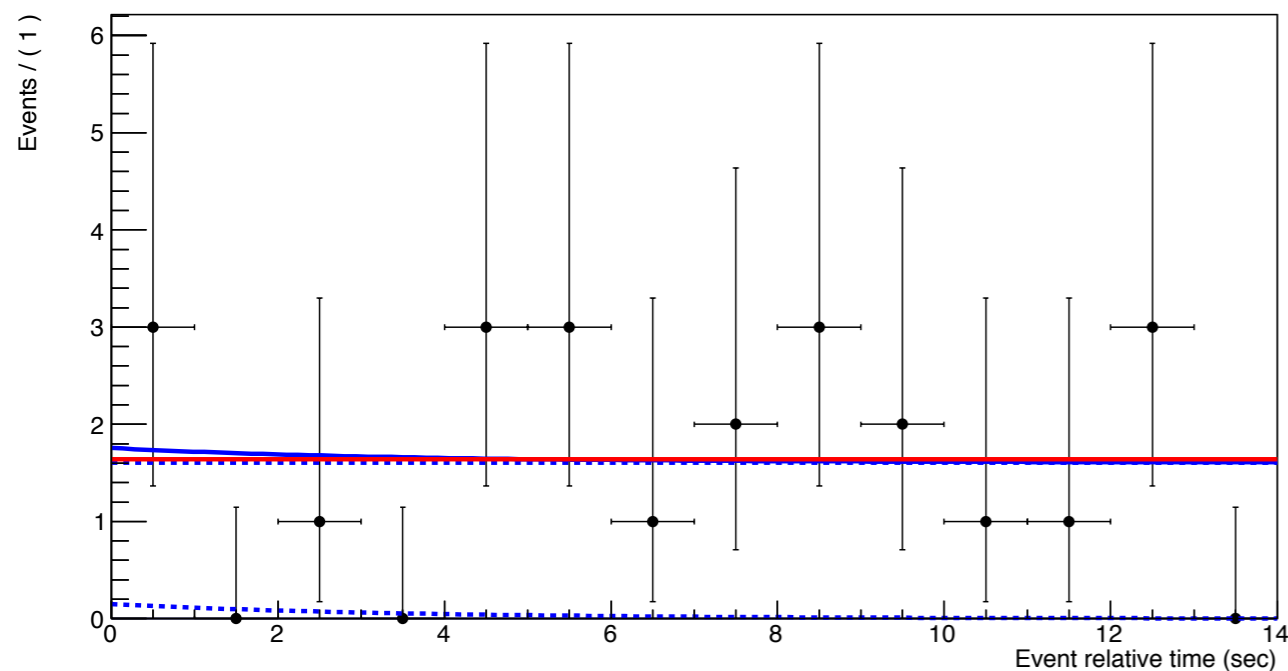
Trigger per SN (2)

Algoritmo di trigger Maximum-Likelihood Test

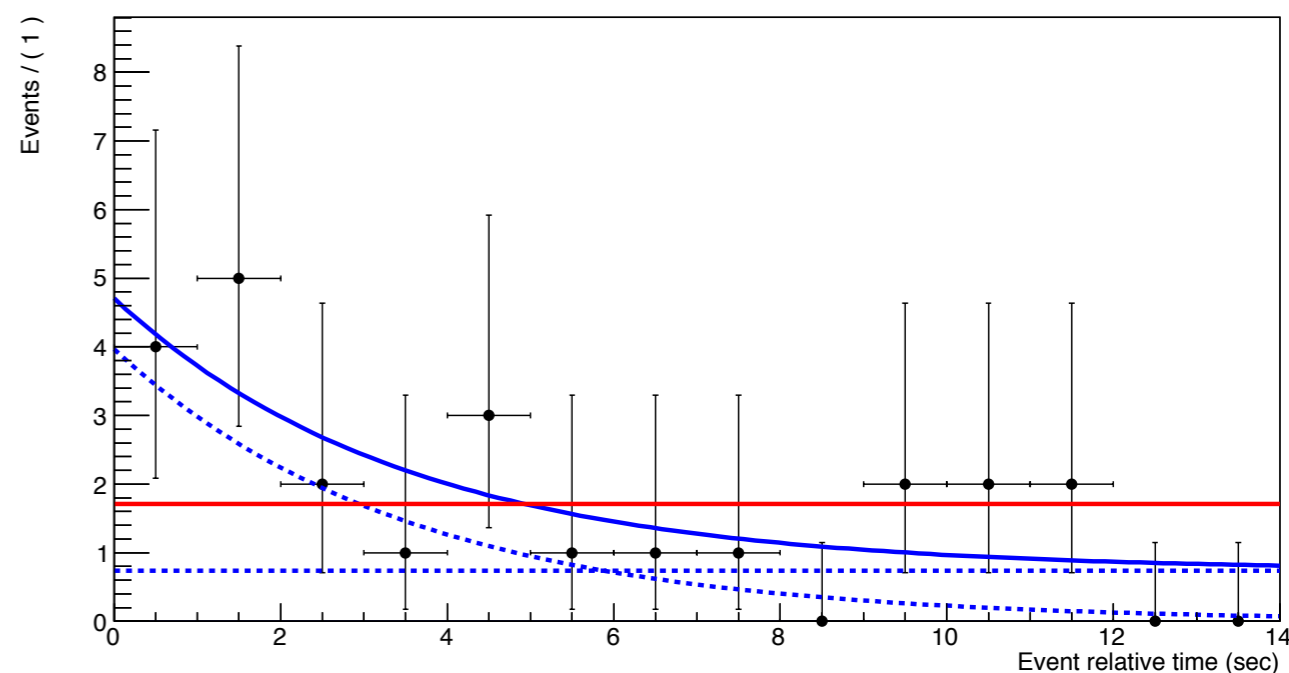
Trigger più sofisticato: **test di ipotesi** sulla **distribuzione temporale** di eventi in finestre di larghezza ottimale.

1. ad ogni evento associato ad una particella ($E < 50 \text{keV}$) nel rivelatore vengono associati tutti gli eventi successivi entro una finestra temporale di 14sec
2. sui dati vengono calcolate le Unbinned Maximum Likelihood di due modelli: solo **fondo** (distribuzione piatta dei tempi relativi degli eventi) e **fondo+segnale** (distribuzione piatta sovrapposta a esponenziale con vita media = 3.5sec)
3. il **rapporto tra le likelihood** costituisce il parametro a cui applicare la soglia di trigger.

No signal events/1Hz bkg



8 signal events/1Hz bkg



Trigger per SN (3)

Algoritmo di trigger Maximum-Likelihood Test

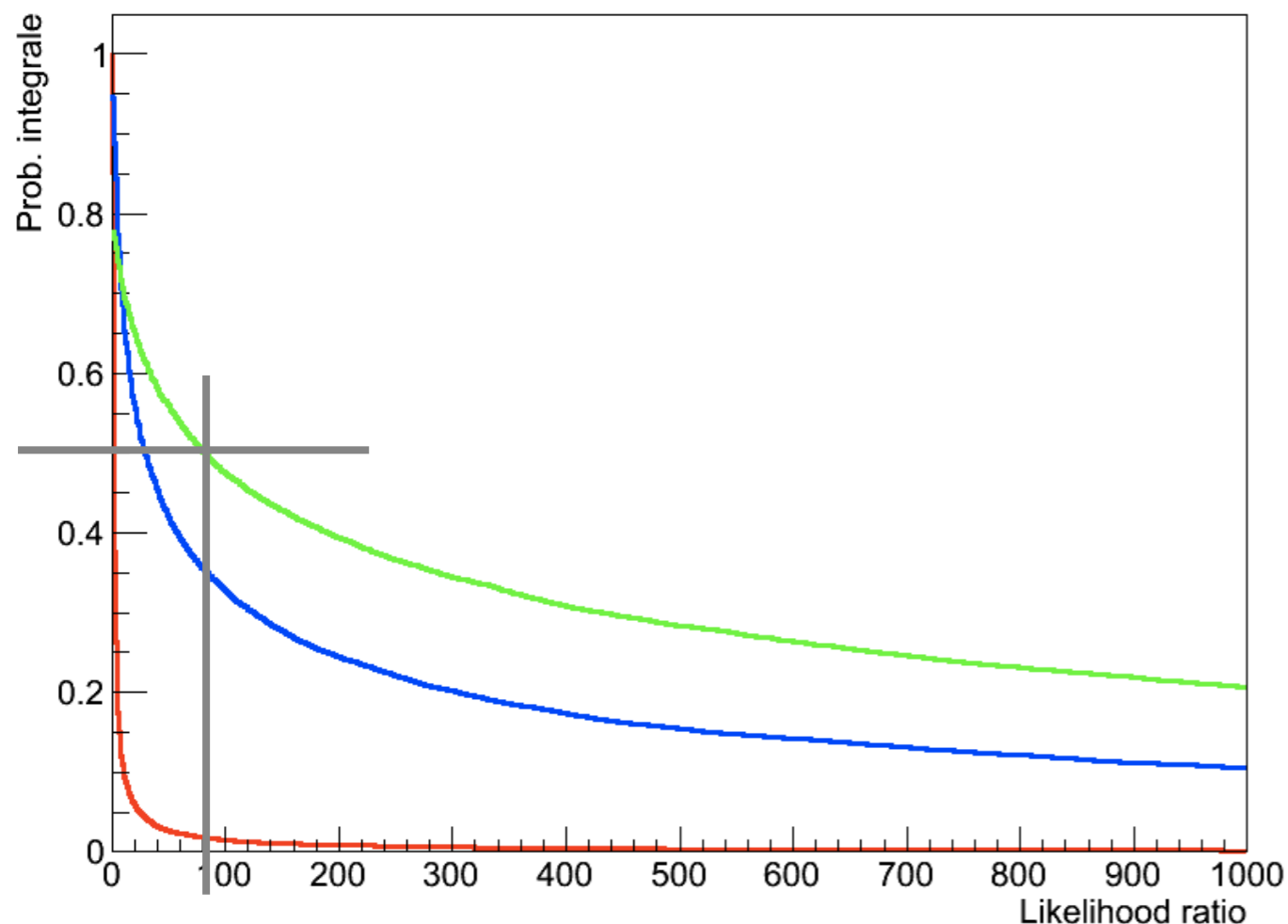
“Calibrazione” dell’algoritmo di trigger:

- determinazione della soglia
- potere di scoperta
- rate di falsi positivi



Toy Montecarlo:

si simula un grande numero di finestre contenenti solo fondo o fondo+segnale (corrispondente a varie distanze) e si studiano le distribuzioni dei rapporti di likelihood



7kpc
8.5kpc
solo fondo

Conclusioni

Conclusioni

- rivelazione “cieca” di neutrini (non sterili) di tutti i sapori
- supernova galattica (8-10kpc) entro la sensibilità di CUORE a più di 4 sigma
- trigger di una supernova a 6.5kpc con efficienza $>80\%$ e rate falsi positivi $<1/\text{week}$
- ampio margine di miglioramento della sensibilità con riduzione del fondo
- ampio margine di miglioramento della sensibilità e del numero di eventi con riduzione della soglia

Astrofisica con CUORE (B1)

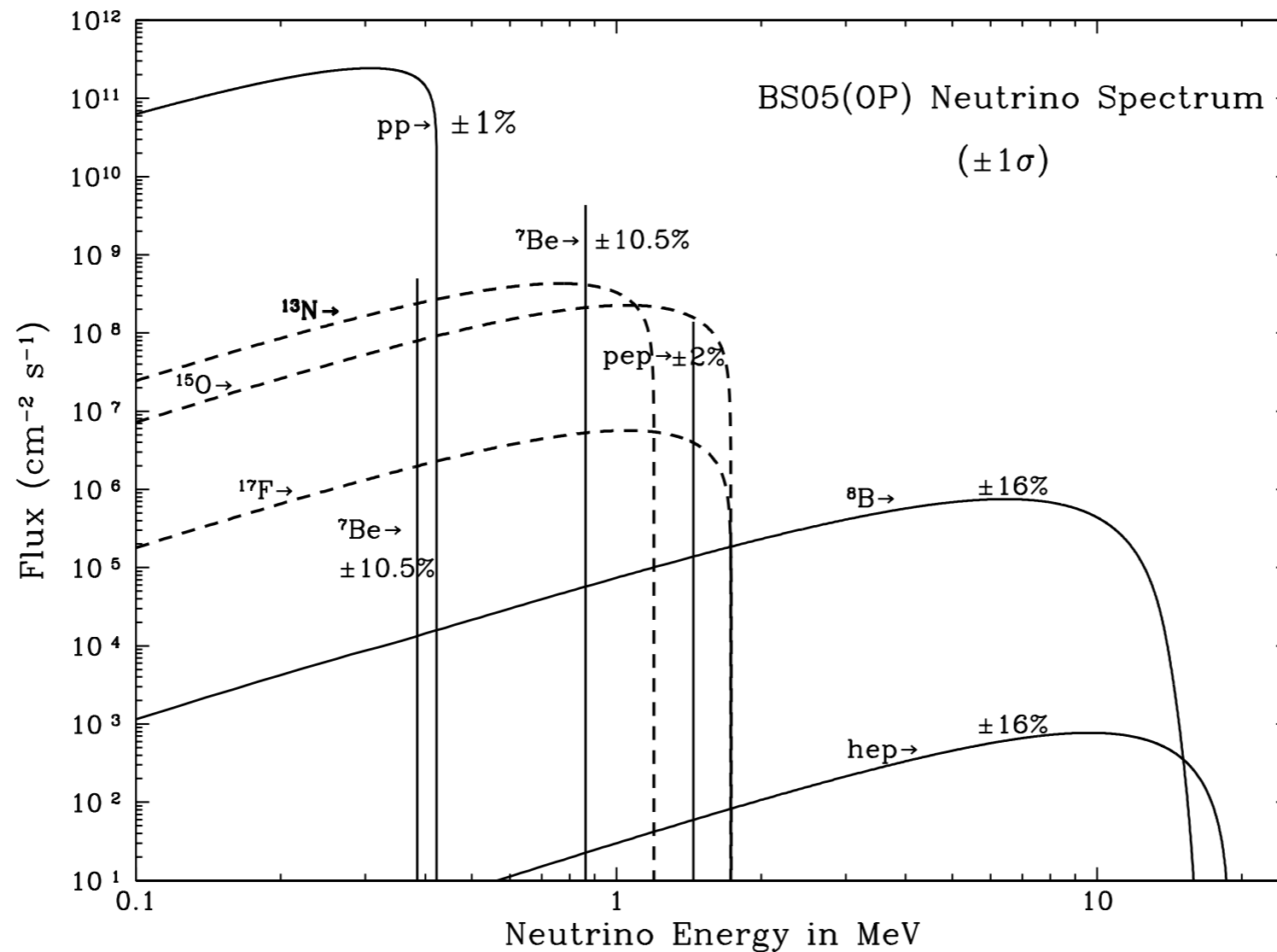
Sistematiche legate al fondo

Eventi da supernova = cluster di interazioni su scale temporali $O(10s)$
Studio del fondo di test runs per CUORE con trigger dedicato: no fenomeni che possano riprodurre fluttuazioni del rate di interazioni su queste scale temporali.

Astrofisica con CUORE (B2)

Solar neutrinos background:

- pp flux $O(10^{11})$ but $E_{\max} = 0.42\text{MeV} \implies$ recoil energy too low
- other fluxes too small $<10^9$



Astrofisica con CUORE (B3)

Pile-up:

- 0 threshold $\implies Y = 29$ eventi di segnale+fondo in 10 secondi
- distribuzione spaziale uniforme nel rivelatore
- rivelatore approssimato ad un cubo, $10 \times 10 \times 10$ cristalli
- MC: genera casualmente N volte Y eventi nel cubo e conta quante volte (P) n cristalli sono interessati
- P/N è la probabilità che n cristalli vengano interessati dagli Y eventi

Astrofisica con CUORE (B4)

