

IFAE 2023

Incontri di Fisica delle Alte Energie

RES-NOVA

Neutrini da supernova con l'esperimento RES-NOVA

*Stefano Ghislandi, on behalf of the
RES-NOVA group of interest*



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR PHYSIK

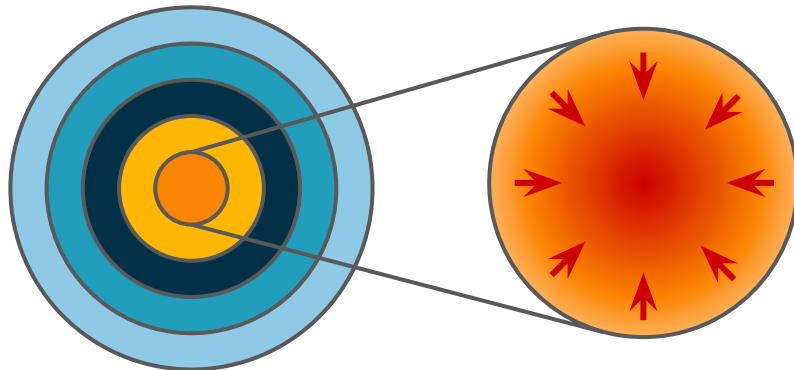


Università
di Genova

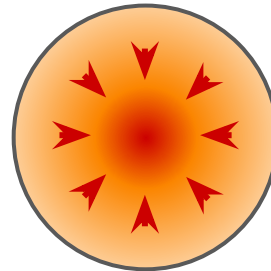


CORE-COLLAPSE (FAILED) SUPERNOVAE:

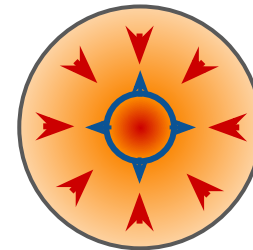
- ❑ Esplosioni di stelle a grande massa ($\geq 8 M_{\odot}$)
- ❑ Energia di legame convertita in onde gravitazionali (GW), fotoni e **neutrini**
- ❑ I neutrini sono **messaggeri diretti dei processi interni alla supernova**
- ❑ I neutrini (insieme alle GW), sono i **segnali prompt** dell'esplosione di una supernova



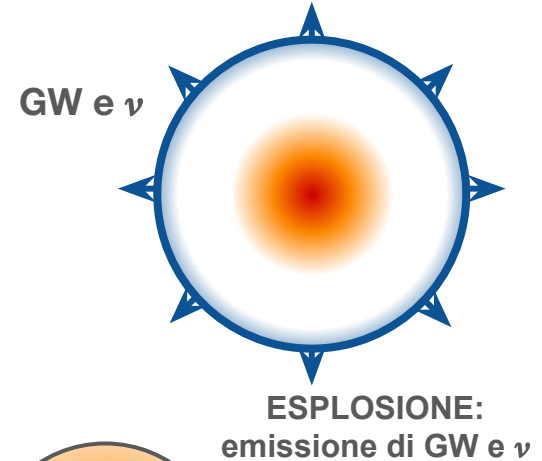
INIZIO COLLASSO



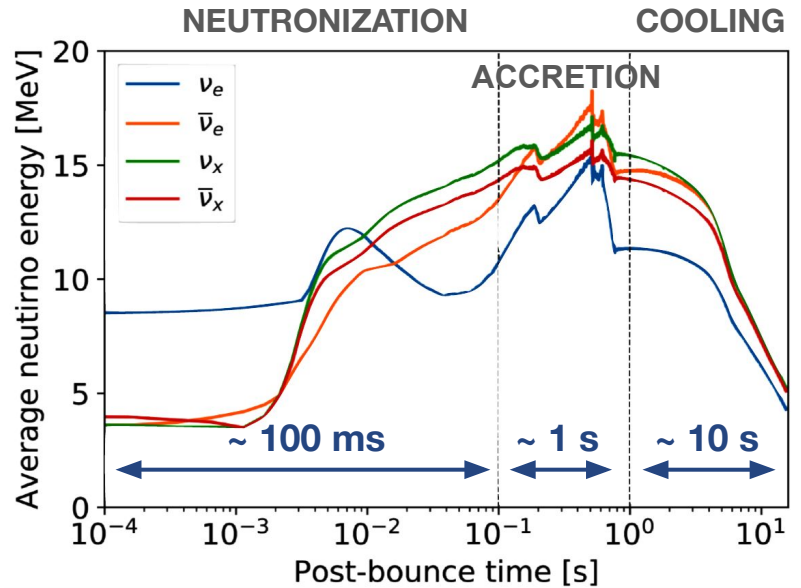
COMPRESSIONE:
il nucleo è sempre più denso



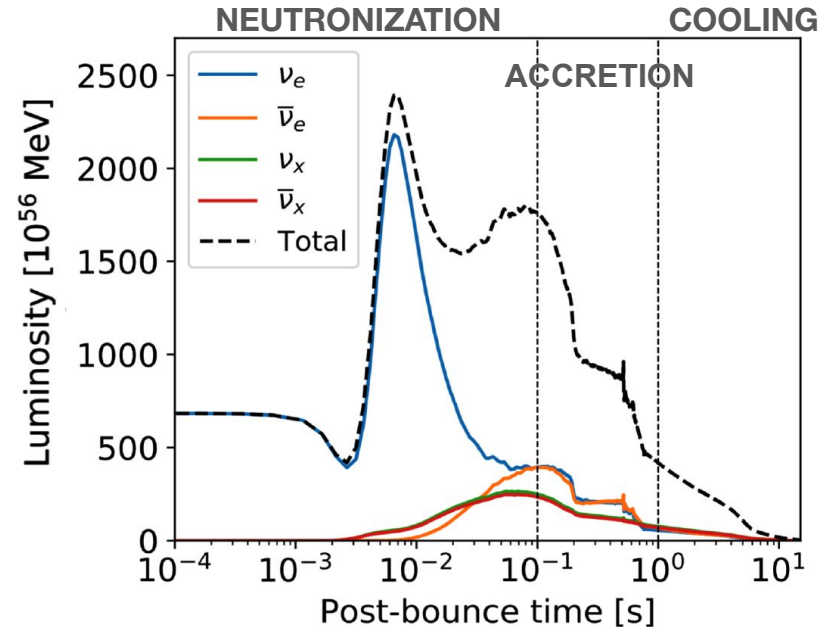
BOUNCE:
formazione dello shock

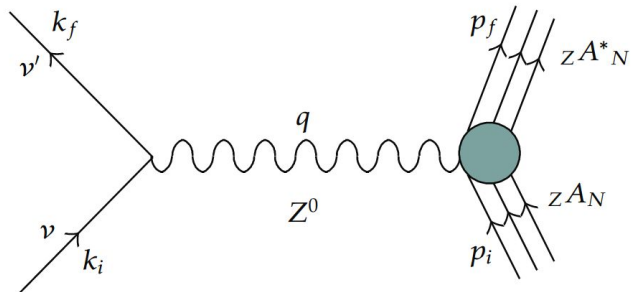


ENERGIA MEDIA PER NEUTRINO



LUMINOSITA' NEUTRINI EMESSI

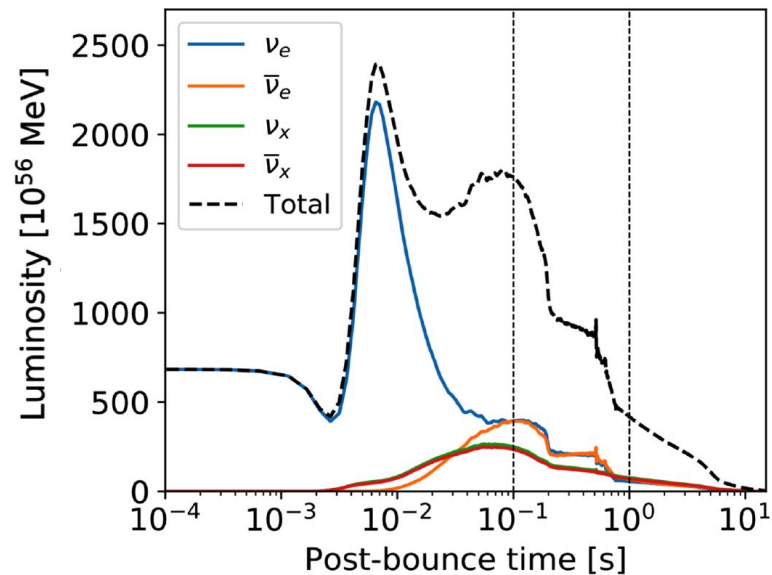


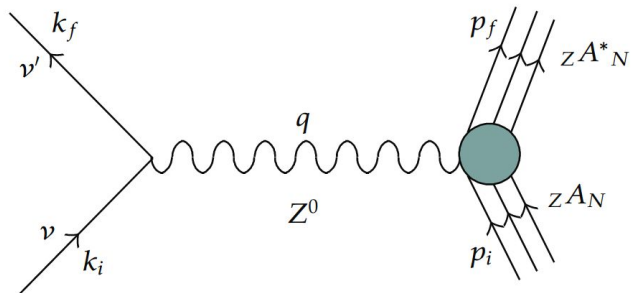


$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{G_F^2 m_N}{8\pi(\hbar c)^4} [(4 \sin^2 \theta_W - 1)Z + N]^2 \left(2 - \frac{E_R m_N}{E^2}\right) \cdot |F(q)|^2$$

PERCHE IL $CE\nu NS$?

- ✓ Sensibile a tutti i flavour dei neutrini
- ✓ Sezione d'urto enorme se comparata con i comuni metodi di rivelazione dei ν
- ✓ Dipendenza da $N \rightarrow$ posso ottimizzare il mio bersaglio
- ✗ Energia media di rinculo bassa

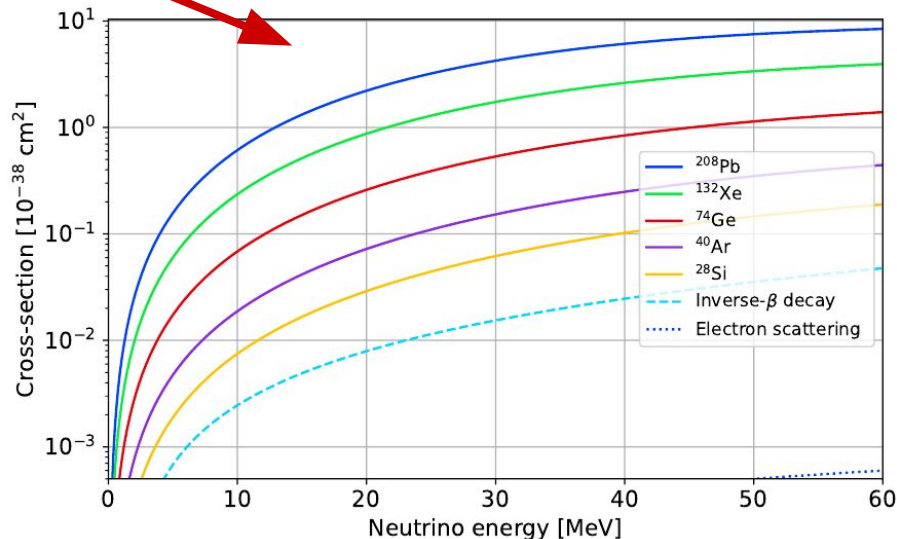


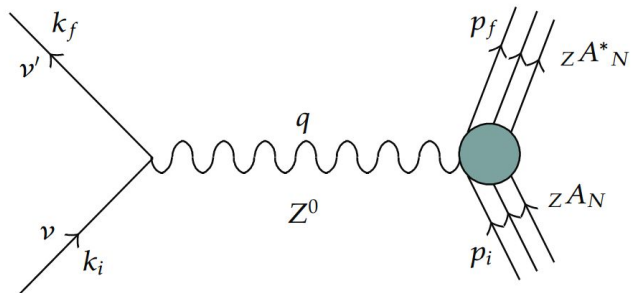


$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{G_F^2 m_N}{8\pi(\hbar c)^4} [(4 \sin^2 \theta_W - 1)Z + N]^2 \left(2 - \frac{E_R m_N}{E^2}\right) \cdot |F(q)|^2$$

PERCHE IL CE ν NS?

- ✓ Sensibile a tutti i flavour dei neutrini
- ✓ Sezione d'urto enorme se comparata con i comuni metodi di rivelazione dei ν
- ✓ Dipendenza da N \rightarrow posso ottimizzare il mio bersaglio
- ✗ Energia media di rinculo bassa

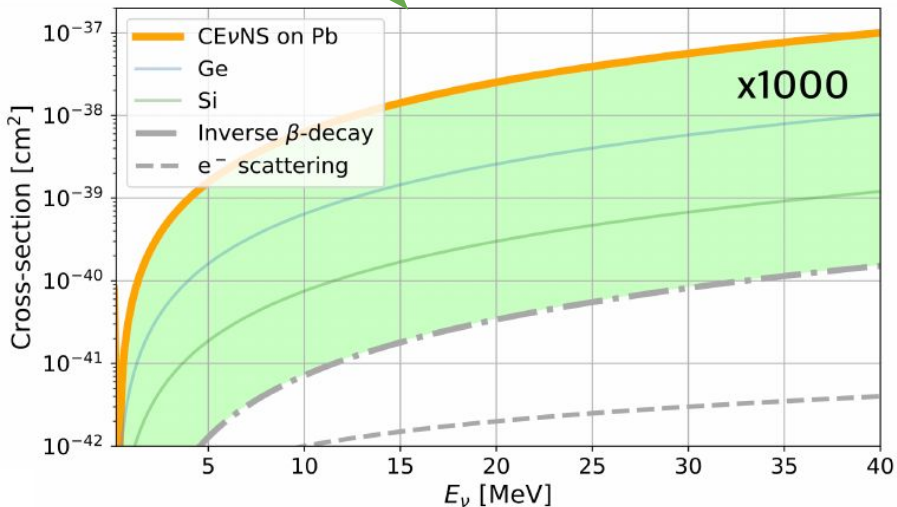


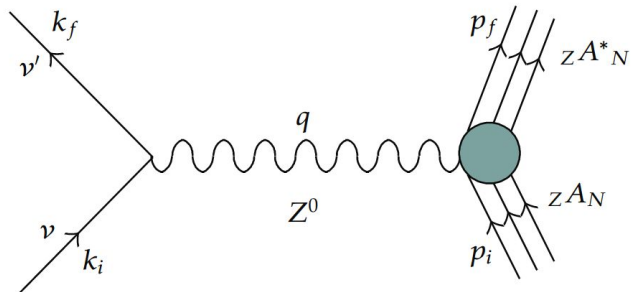


$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{G_F^2 m_N}{8\pi(\hbar c)^4} \left[(4 \sin^2 \theta_W - 1)Z + N \right]^2 \left(2 - \frac{E_R m_N}{E^2} \right) \cdot |F(q)|^2$$

PERCHE IL CE ν NS?

- ✓ Sensibile a tutti i flavour dei neutrini
- ✓ Sezione d'urto enorme se comparata con i comuni metodi di rivelazione dei ν
- ✓ Dipendenza da N \rightarrow posso ottimizzare il mio bersaglio
- ✗ Energia media di rinculo bassa





$$\frac{d\sigma}{dE_R} = \frac{G_F^2 m_N}{8\pi(\hbar c)^4} [(4 \sin^2 \theta_W - 1)Z + N]^2 \left(2 - \frac{E_R m_N}{E^2}\right) \cdot |F(q)|^2$$

PERCHE IL CE ν NS?

- ✓ Sensibile a tutti i flavour dei neutrini
- ✓ Sezione d'urto enorme se comparata con i comuni metodi di rivelazione dei ν
- ✓ Dipendenza da N \rightarrow posso ottimizzare il mio bersaglio
- ✗ Energia media di rinculo bassa

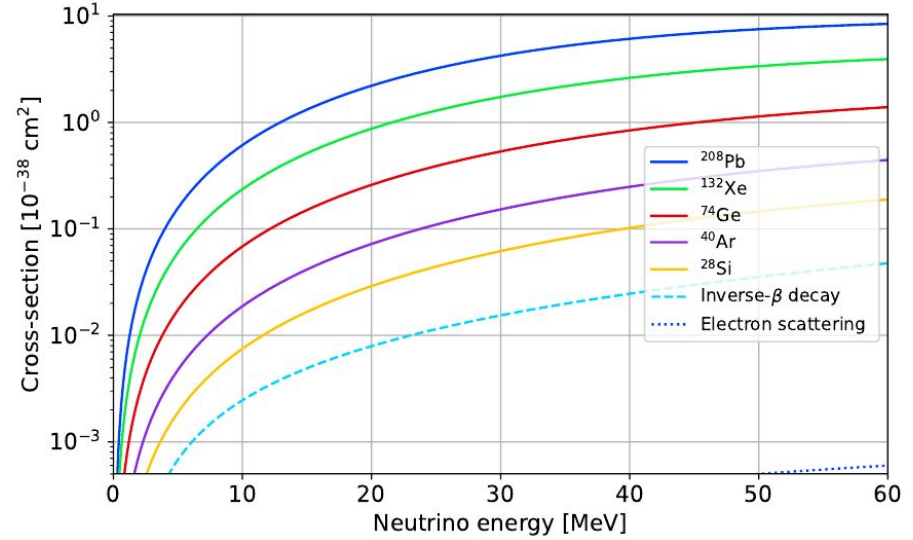
$$\langle E_R \rangle = \frac{2E^2}{3m_N}$$

$$E_\nu \sim 10 \text{ MeV}$$

$$\langle E_R \rangle \sim 100 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$$

$CE\nu NS$

Processo favorito



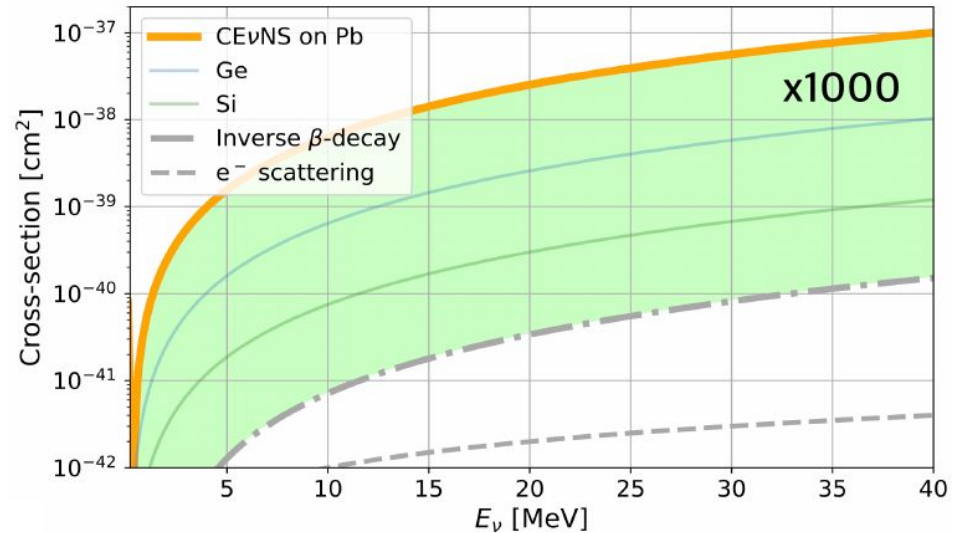
$CE\nu NS$

Processo favorito

+

Rivelatore in Piombo

Sezione d'urto massimizzata



$CE\nu NS$

Processo favorito

+

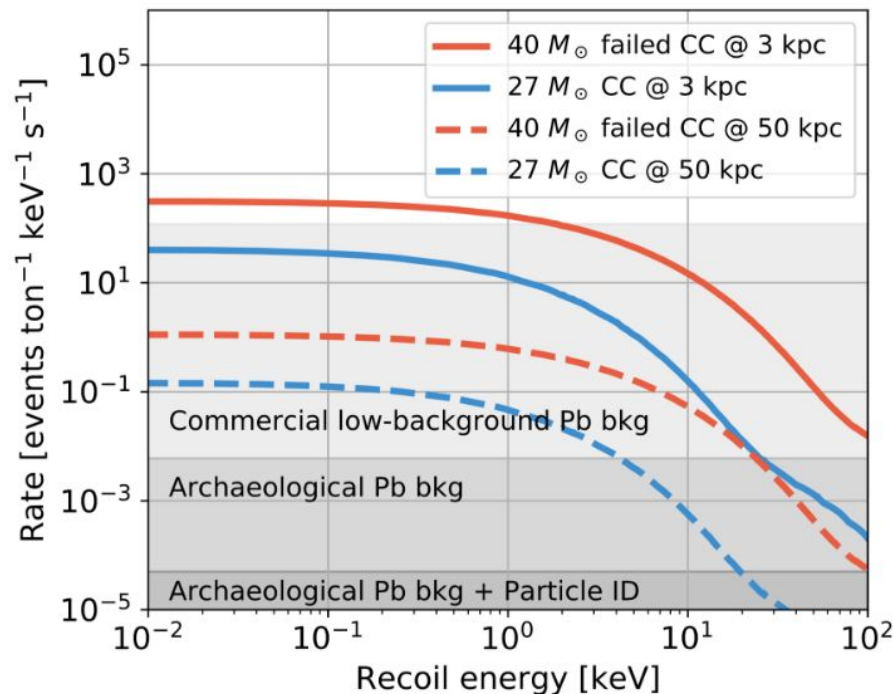
Rivelatore in Piombo

Sezione d'urto massimizzata

+

Archeologico

Fondo estremamente basso



CEνNS

Processo favorito

+

Rivelatore in Piombo

Sezione d'urto massimizzata

+

Archeologico

Fondo estremamente basso

+

Rivelatori criogenici

**Soglia energetica bassa e
risoluzione eccellente**

$CE\nu NS$

Processo favorito

+

Rivelatore in Piombo

Sezione d'urto massimizzata

+

Archeologico

Fondo estremamente basso

+

Rivelatori criogenici

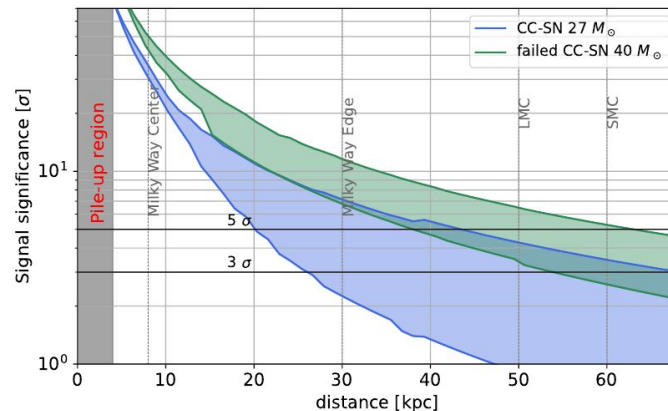
Soglia energetica bassa e
risoluzione eccellente

=



RES-NOVA

Rivelatore di neutrini da supernova che sfrutta cristalli di ${}^{\text{Arch}}\text{PbWO}_4$ criogenici letti da TES

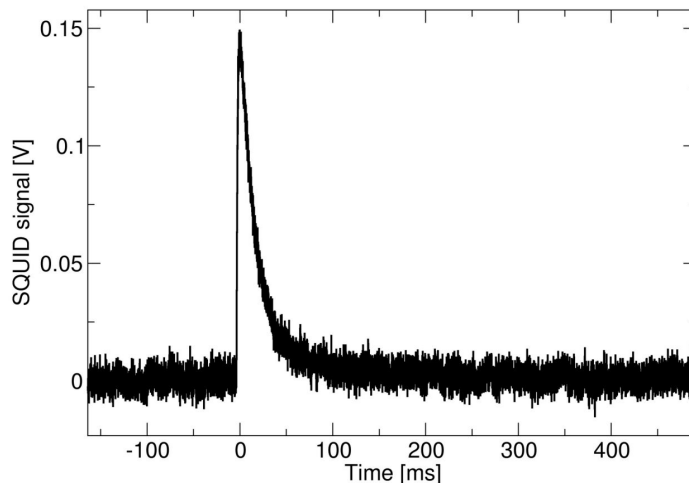
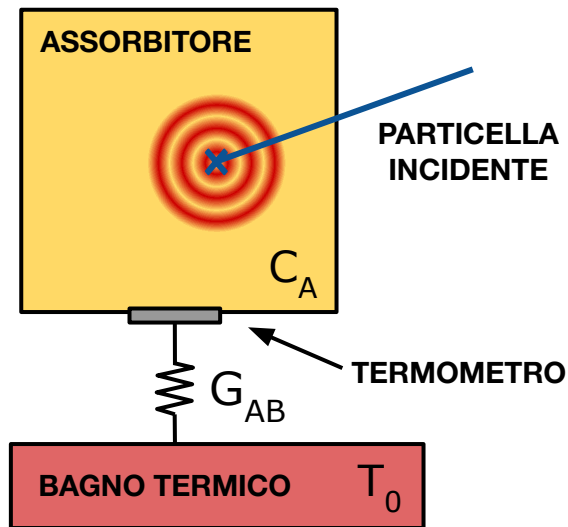


Una particella incidente deposita energia nel cristallo assorbitore

Produzione di fononi e termalizzazione, $T_0 \rightarrow T_0 + \Delta T$

La resistenza del sensore di temperatura cambia (TES)

Preamplificazione e lettura (in questo caso SQUID magnetometro)



$$\begin{cases} \Delta T_{\text{cristallo}} = \frac{\Delta E}{C} \sim \frac{0.1 \text{ mK}}{\text{MeV}} \\ C(T) \sim T^3 \\ \tau = \frac{C}{G} \sim 10 \text{ ms} \end{cases}$$



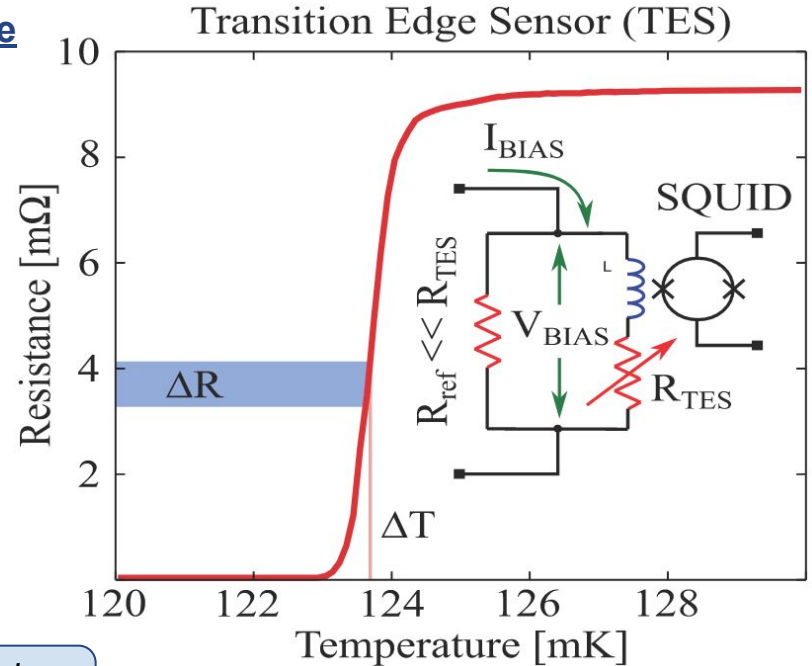
- ❑ **Risoluzione energetica eccellente** ($\sim \%$ - ‰)
- ❑ **Soglia energetica molto bassa**

Sensore termico composto da un film superconduttivo che cavallo della transizione conduttore-superconduttore

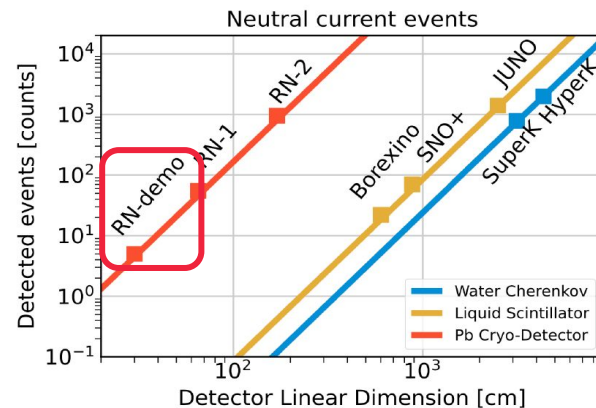
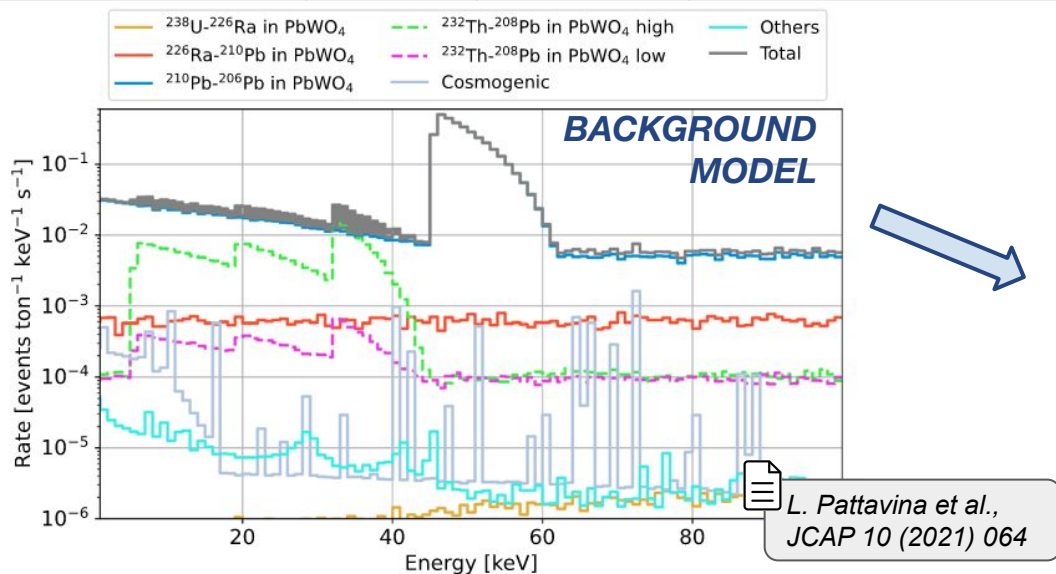
- ❑ **Larghezza della transizione ~ mK**
→ sensitività ($\Delta R/\Delta T$) molto alta
- ❑ **Letture** è fatta tramite amplificazione con **Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)**
- ❑ Se associato a *macrocalorimetro*:
 - **Soglia energetica: $\lesssim 1$ keV**
 - **Risoluzione energetica < 1 keV**
 - **Risoluzione limite:**

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{4kT^2 \frac{C}{\alpha}} \sim 10 \text{ eV}$$

grande margine di miglioramento



Fase	Cristalli	Volume	Conteggi attesi @ 10 kpc
RES-NOVA-demo	54	(30 cm) ³	~ 10
RES-NOVA-1	~ 500	(60 cm) ³	~ 60
RES-NOVA-2	~ 6000	(140 cm) ³	~ 1000

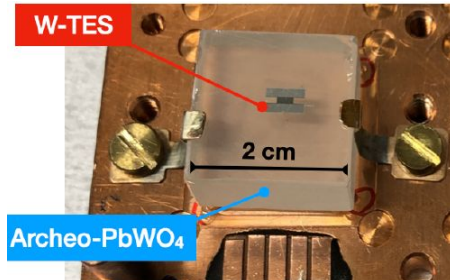


Essenziale avere il fondo sotto controllo

- ❑ **Piombo archeologico:** abbassare il contributo da ²¹⁰Pb
- ❑ **Laboratorio underground (LNGS):** minimizzare il contributo dei raggi cosmici
- ❑ **Analisi a multi-hit**
- ❑ **Discriminazione α / β**

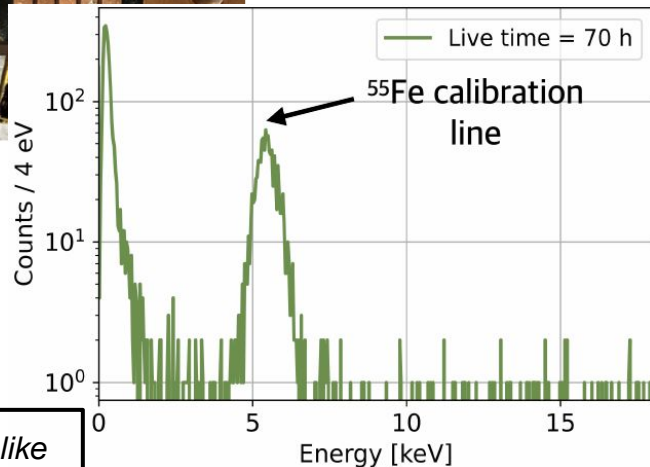
Test per soglia e risoluzione energetica

Above ground @ Max Planck (Monaco)



N. Ferreiro, LP et al., *J.Low Temp.Phys.* 209 (2022) 5-6, 872-878

Risoluzione ~ 60 eV
Soglia ~ 300 eV

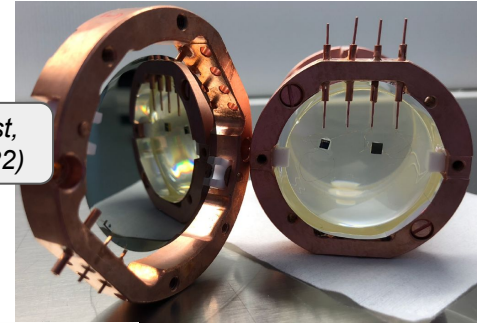


TES CRESST-like

Test radio-purezza

Underground @ LNGS (L'Aquila)

RES-NOVA Group of Interest, *Eur. Phys. J. C* 82, 692 (2022)



Chain	Nuclide	Activity [mBq/kg]	TARGET
^{232}Th	^{232}Th	<0.04	→ < 0.2 mBq/kg
	^{228}Th	0.80 ± 0.09	
^{238}U	^{238}U	<0.03	→ < 0.07 mBq/kg
	^{234}U	<0.03	
	^{230}Th	<0.04	
	^{226}Ra	11.34 ± 0.35	→ < 0.7 mBq/kg
$^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$	22.50 ± 0.49		

NTD CUPID-like

Rivelatori piccoli ma alta statistica

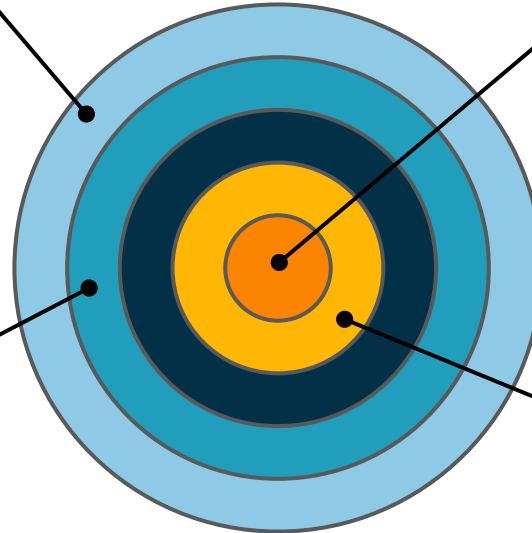
- ❑ Studio di **SN lontane**
- ❑ Misure di precisione di **neutrini solari** (threshold ~ 0.1 keV)
- ❑ L'Alta modularità permette di **ridurre il pile-up** (SN vicine)
- ❑ Fondo diffuso di neutrini da SN

Tecnologia innovativa

- ❑ Possibilità di migliorare risoluzione energetica e soglia
- ❑ Libera scelta sul materiale assorbitore (sempre che contenga Pb)

Diverse sorgenti

- ❑ Neutrini da supernova
- ❑ Neutrini solari
- ❑ **Massa neutrino** da ECEC del tungsteno



Fondo e soglia estremamente bassi

- ❑ Ricerca diretta di **Dark Matter**
- ❑ **Assioni solari**



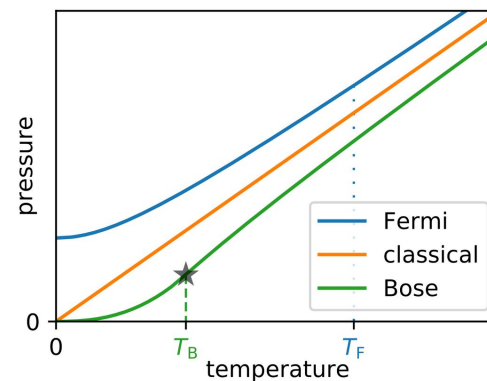
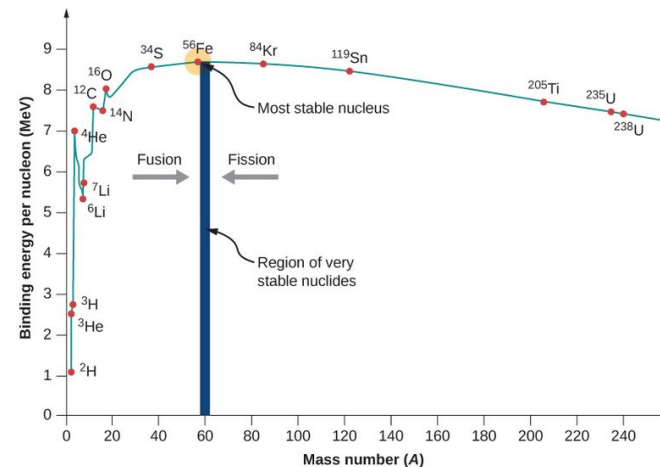
**Grazie per
l'attenzione**

BACKUP SLIDES

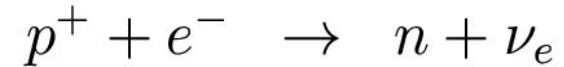
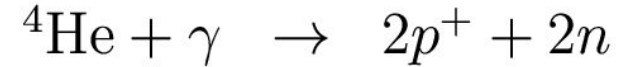
1. La stella inizialmente è un *ammasso di gas leggeri* (H,He)
2. La stella (pressione gravitazionale) inizia ad innescare **reazioni di fusione** producendo elementi più pesanti e **formando la canonica struttura a strati** (nucleo è caratterizzato dalla fusione-produzione degli elementi più pesanti → T e densità molto elevate)
3. Arrivato alla produzione di ^{56}Fe , il nucleo accumula massa ma non produce più T abbastanza alte da eguagliare la pressione gravitazionale
4. Se la massa supera la massa di Chandrasekhar ($\sim 1.2M_{\odot}$), la **pressione di degenerazione degli elettroni** (ora quella dominante) **non supporta più la pressione gravitazionale**



INIZIO DEL COLLASSO



5. Quando il collasso inizia la materia cade verso il nucleo. Il nucleo inizia a scaldarsi rendendo possibile la fotodisintegrazione dei nuclei di ^{56}Fe .
6. Gli elettroni iniziano ad interagire con i protoni via CE ed avviene una copiosa produzione di neutrini. I neutrini “estraggono energia dal nucleo” e “consumano” gli elettroni, responsabili della pressione di degenerazione.
7. Interazioni n-n e pressione di degenerazione del nucleo fermano il collasso producendo un’onda di shock.
8. Lo shock rilascia energia (interazioni con nuclei pesanti) ma viene rinvigorito da neutrini (tutti i flavour) prodotti nel nucleo.
9. La stella esplode → supernova.



NEUTRONIZATION

NEUTRINO BREMSSTRAHLUNG
PAIR ANNIHILATION
ACCRETION

COOLING

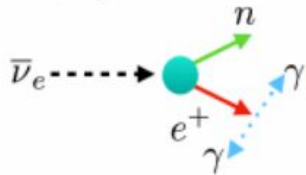
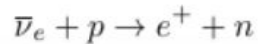
Rivelatori: ~~Kamiokande, IMB, Baksan~~, SuperK, SNO+

Tecnologia: Water Cherenkov, Scintillatori liquidi

Canale di rivelazione: Decadimento beta inverso

Volume rivelatore: $(10\text{m})^3$ $(20\text{m})^3$, monolitico

Inverse beta decay



Elastic scattering

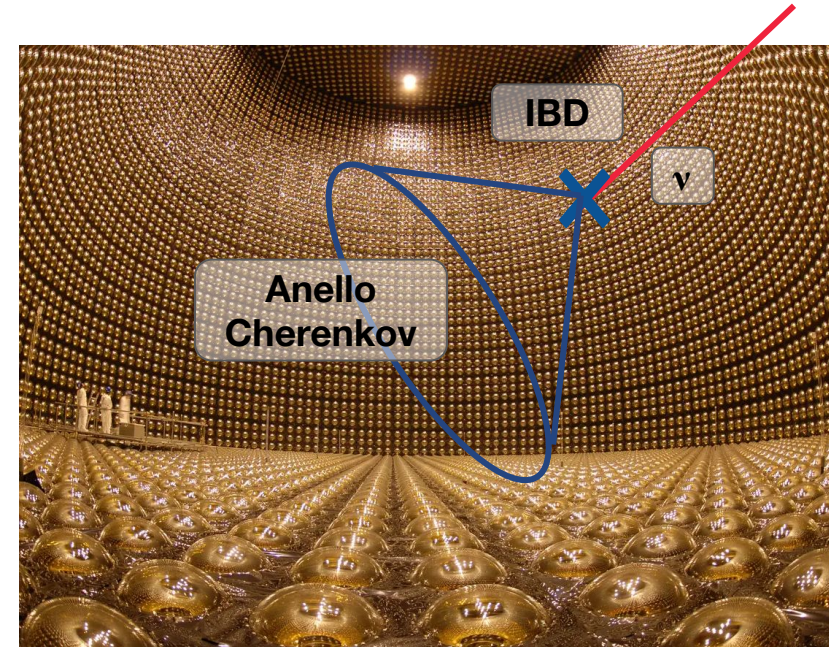
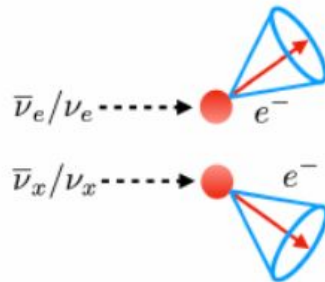
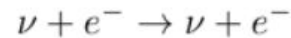
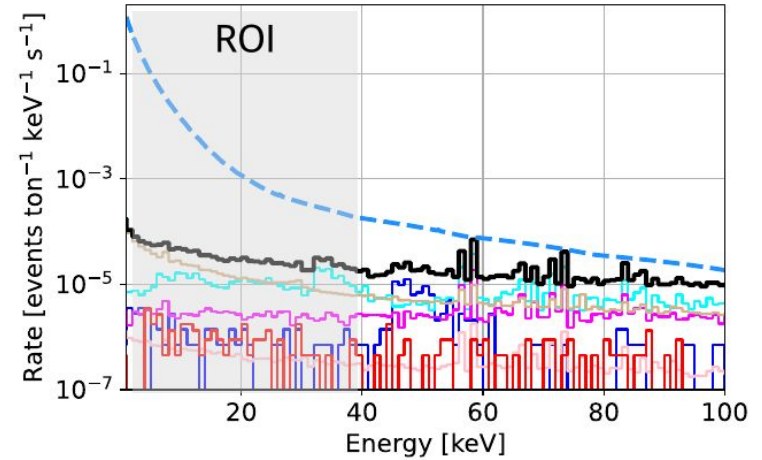
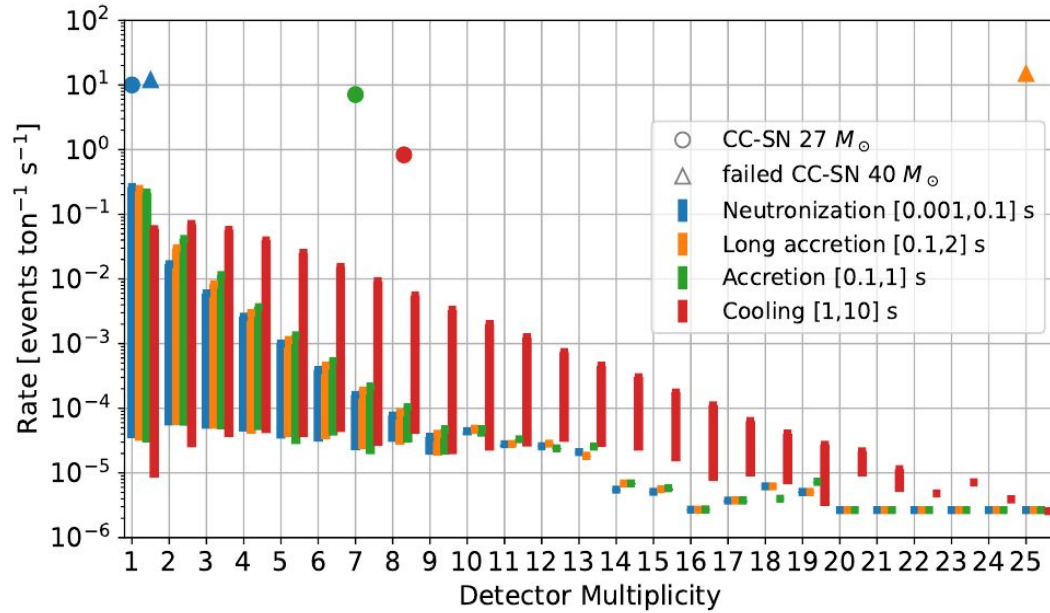
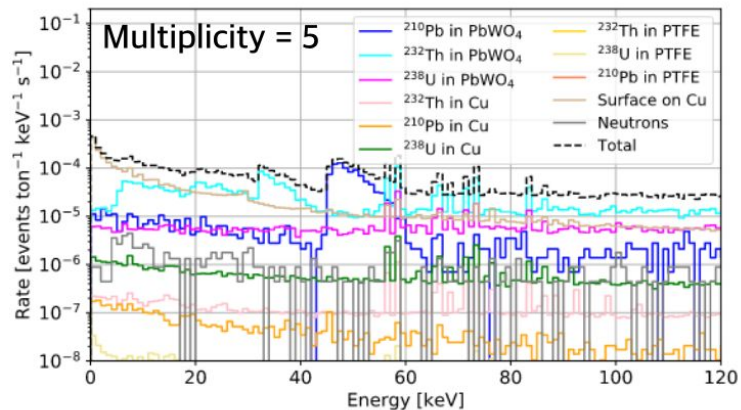
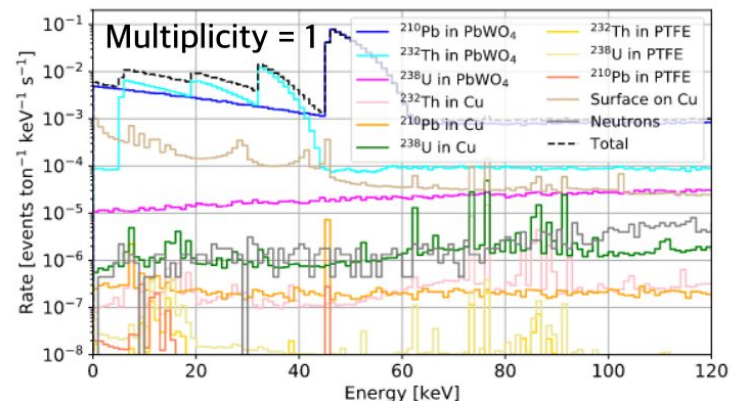


FOTO DALL'ESPERIMENTO SUPER-KAMIOKANDE

	PROTONS	ELECTRONS	NUCLEI
CHARGE CURRENT	<p>Inverse beta decay</p> $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	<p>Elastic scattering</p> $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$	<p>Inelastic scattering</p> $\nu_e/\bar{\nu}_e + (N, Z) \rightarrow e^{-/+} + (N \mp 1, Z \pm 1)$
NEUTRAL CURRENT	<p>Elastic scattering</p> $\bar{\nu}_x/\nu_x + p \rightarrow \bar{\nu}_x/\nu_x + p$	<p>Elastic scattering</p> $\bar{\nu}_x/\nu_x + e^- \rightarrow \bar{\nu}_x/\nu_x + e^-$	<p>Coherent Elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS)</p> $\bar{\nu}_x/\nu_x + A \rightarrow \bar{\nu}_x/\nu_x + A$



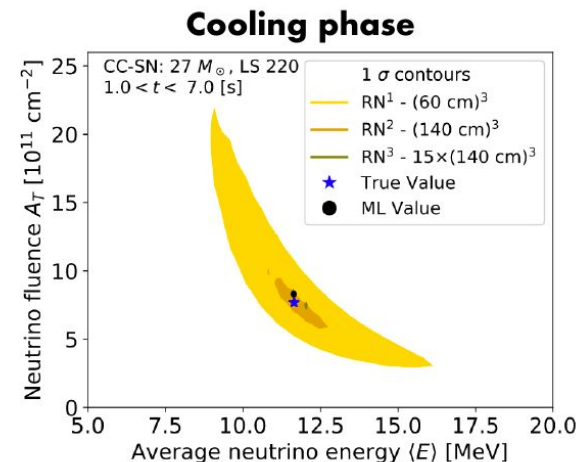
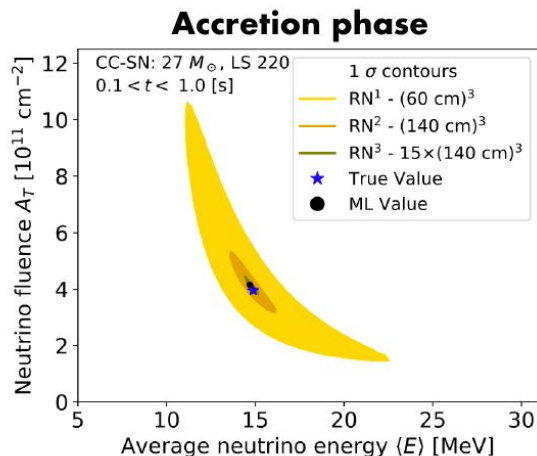
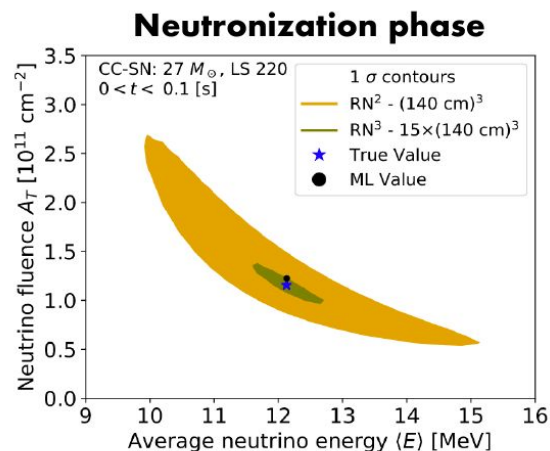


<i>Component</i>	<i>Source Isotope</i>	<i>Activity</i> [Bq/kg] ([Bq/cm ²])	
PbWO ₄ crystals	²³² Th	$< 2.3 \times 10^{-4}$	[50]
	²³⁸ U	$< 7.0 \times 10^{-5}$	[50]
	²¹⁰ Pb	$< 7.1 \times 10^{-4}$	[36]
Cu structure	²³² Th	$< 2.1 \times 10^{-6}$	[35]
	²³⁸ U	$< 1.2 \times 10^{-5}$	[35]
	²¹⁰ Pb	$< 2.2 \times 10^{-5}$	[35]
Cu surface	²³² Th - 10 μm	$(5.0 \pm 1.7) \times 10^{-9}$	[35]
	²³⁸ U - 10 μm	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-8}$	[35]
	²¹⁰ Pb - 10 μm	$< 1.9 \times 10^{-8}$	[35]
	²¹⁰ Pb - 0.1 μm	$(4.3 \pm 0.5) \times 10^{-8}$	[35]
	²¹⁰ Pb - 0.01 μm	$(2.9 \pm 0.4) \times 10^{-8}$	[35]
PTFE holders	²³² Th	$< 6.1 \times 10^{-6}$	[35]
	²³⁸ U	$< 2.2 \times 10^{-5}$	[35]
	²¹⁰ Pb	$< 2.2 \times 10^{-5}$	[35]
Environment	neutrons	$3.7 \times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	[59]

Lo spettro energetico dei neutrini viene parametrizzato: $f^0(E; \langle E \rangle, \alpha_T) = A_T \xi_T \left(\frac{E}{\langle E \rangle} \right)^{\alpha_T} \exp \left(-\frac{(1 + \alpha_T)E}{\langle E \rangle} \right)$

Neutrino fluence
Normalization
Pinching parameter

Ricostruzione dei parametri di interesse tramite *likelihood*



Rivelatori convenzionali:

Monolitici e di massa enorme (kton)



Possibilità di essere limitati da eventi di pile-up

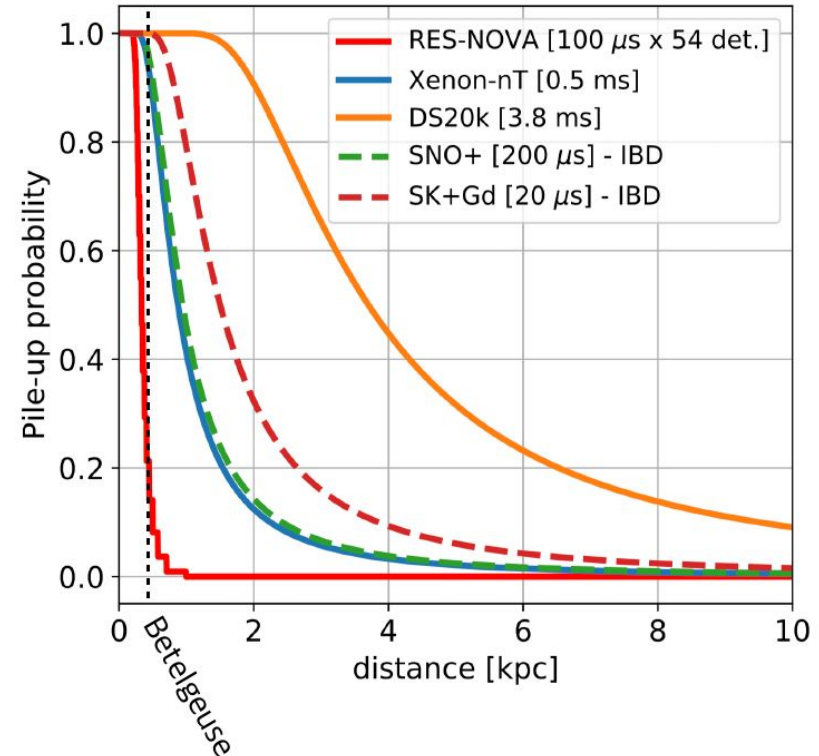
Misure di eventi solo "bolometriche"

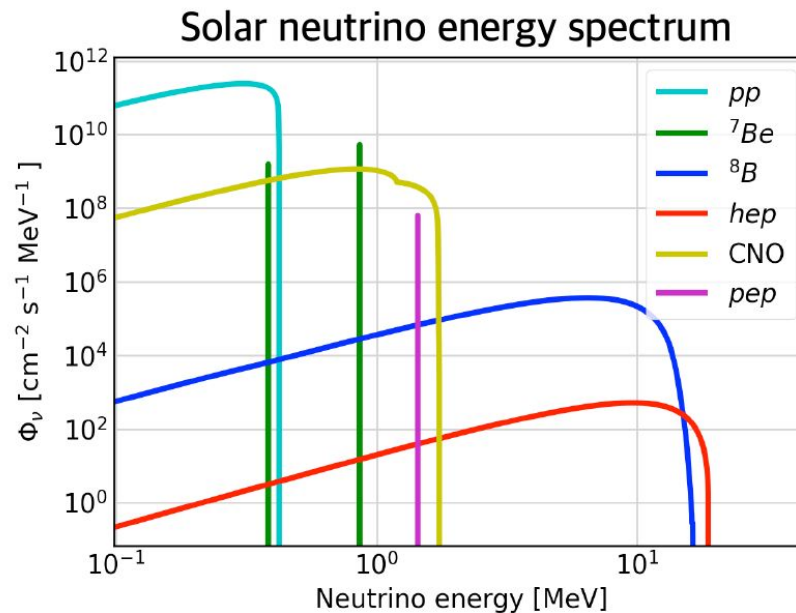
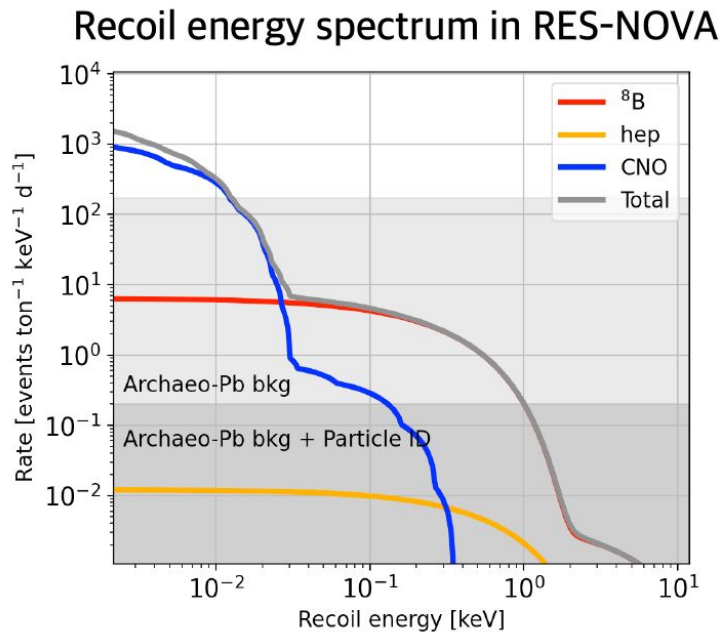
RES-NOVA:

Rivelatore ad alta modularità



Ricostruzione di Energia e Tempo per ogni evento





Studio di neutrini solari possibili quando la soglia è dell'ordine di 100 eV



Rate atteso [$E_{\text{soglia}} = 100 \text{ eV}$] ~ 5 cont. / ton / day

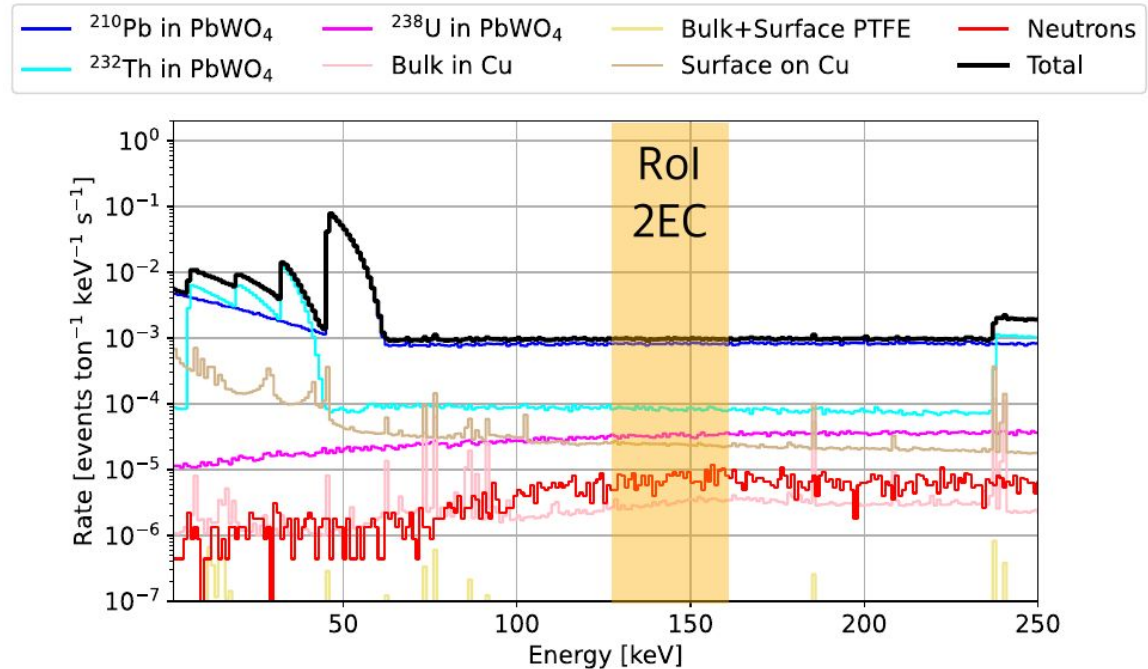
I cristalli di PbWO_4 contengono tracce (0.12% A.I.) di ^{180}W



Isotopo che decade ECEC

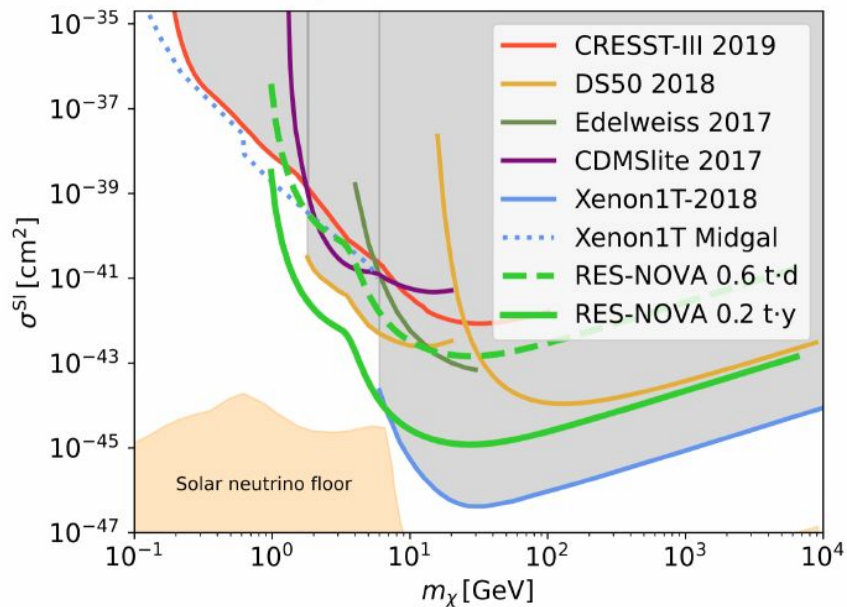


Possibilità che decada $0\nu\text{ECEC}$ e quindi accesso alla massa di Majorana dei neutrini (se sono particelle di Majorana)

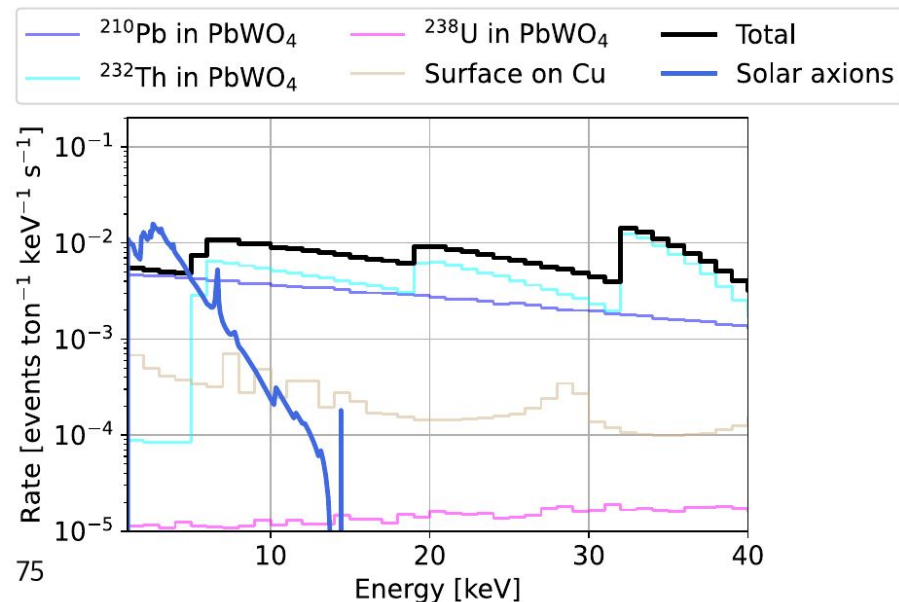


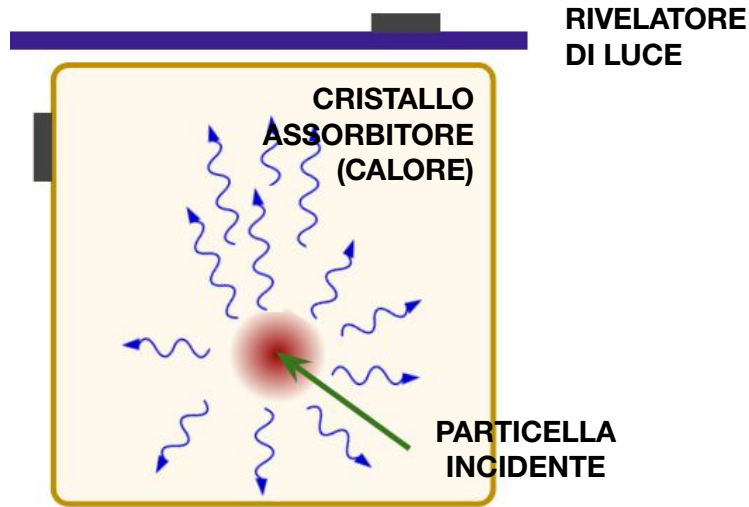
WEAKLY INTERACTING MASSIVE PARTICLES (WIMP)

Current experimental limits on Dark Matter



ASSIONI SOLARI

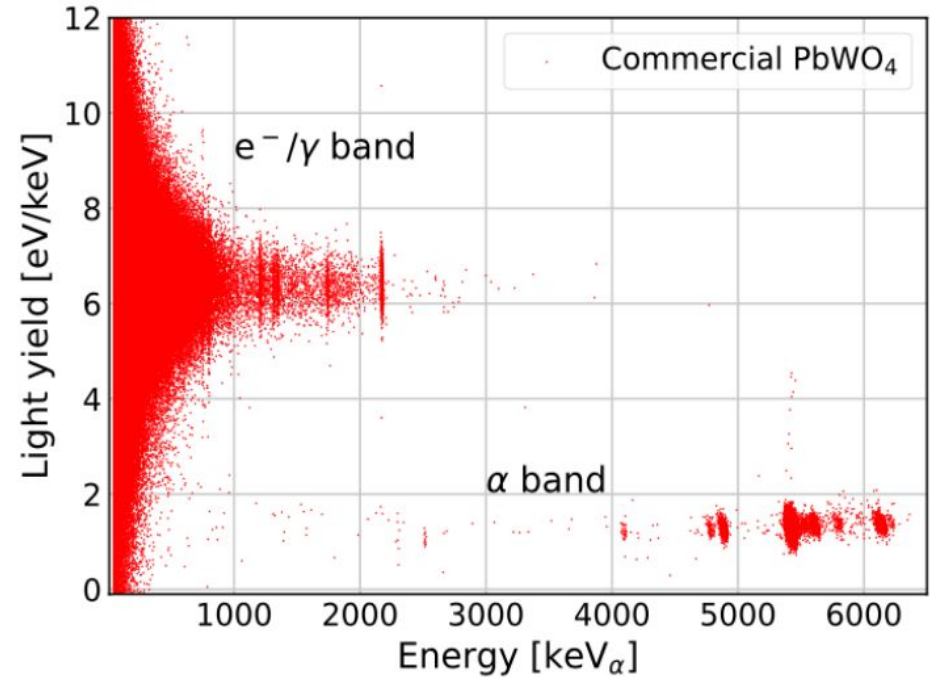




LUCE + CALORE



Identificazione di particelle (alpha, beta/gamma)



J.W. Beeman, LP et al., *Eur. Phys. J. A* 49, 50 (2013)