

RIVELAZIONE DEI NEUTRINI CON FUTURI RIVELATORI A GAS NOBILI

Aldo Ianni

Neutrini solari e massimi
sistemi

LNGS 22 febbraio 2023



+

•

○

I neutrini di bassa energia (<100 MeV) non terrestri

- **Neutrini solari:**



- ✓ $\langle E_\nu \rangle \sim 0.53 \text{ MeV}$, 2% della energia totale

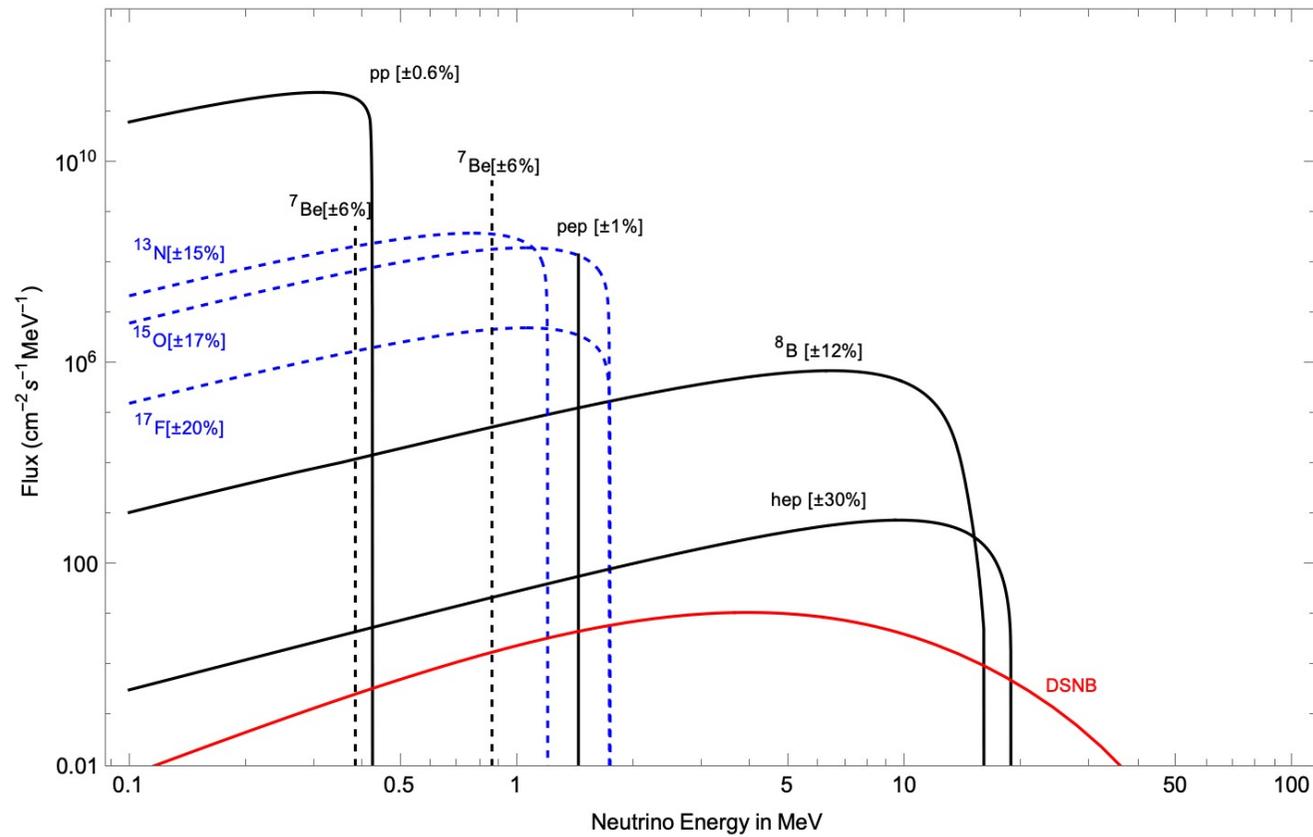
- La fusione di idrogeno in elio è prodotta da due processi:
 - ✓ pp-chain (99%) e ciclo CNO (1%)
- 55 anni di attività sperimentale per la rilevazione di neutrini solari hanno:
 - ✓ definitivamente migliorato la nostra comprensione sul processo di produzione di energia nelle stelle
 - ✓ migliorato la nostra comprensione dei processi di propagazione e interazione dei neutrini nella materia
 - ✓ perfezionato le tecniche sperimentali per la ricerca di eventi rari

- **Neutrini fossili da collasso gravitazionale**

- **Neutrini da collasso gravitazionale**

- Un evento nel 1897 in Kamiokande/Baksan/IMB

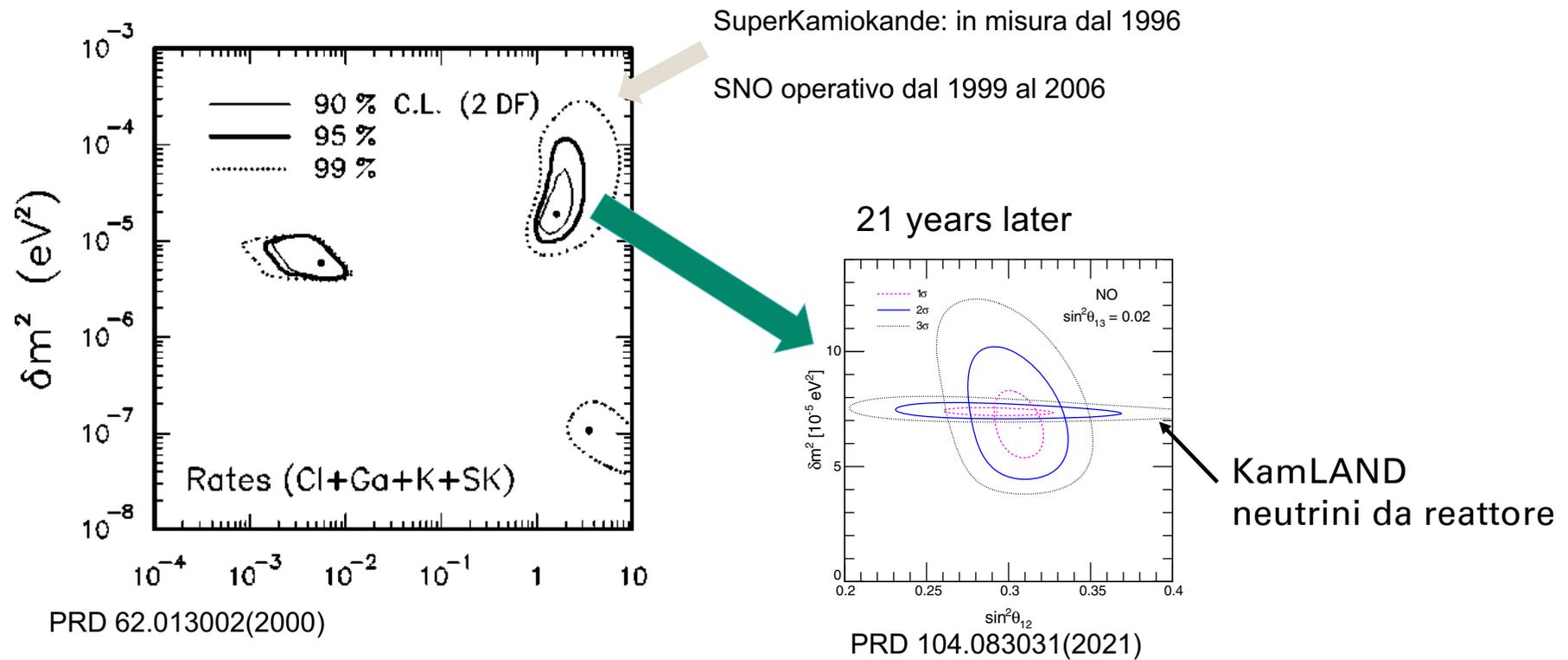
Neutrini <100 MeV da sorgenti extraterrestri



Esperimenti per la ricerca di neutrini solari

Esperimento	Massa bersaglio	Soglia [MeV]	Anni di operatività
Homestake	615 ton C_2Cl_4	0.814	1967-1994
Kamiokande-II/III	3 kton H_2O	9/7.5/7.0	1968-1996
SAGE	50 ton Ga	0.233	1990-2010
GALLEX	30.3 ton $GaCl_3$	0.233	1991-1997
GNO	30.3 ton $GaCl_3$	0.233	1998-2003
SuperKamiokande	50 kton H_2O	7/4.5/3.5	1996-operativo
SNO	1 kton D_2O	6.7/5	1996-2006
Borexino	300 ton C_9H_{12}	0.2	2007-2019
KamLAND	1 kton 80% $C_{12}H_{26}$ + 20% C_9H_{12}	0.4	2009-2011

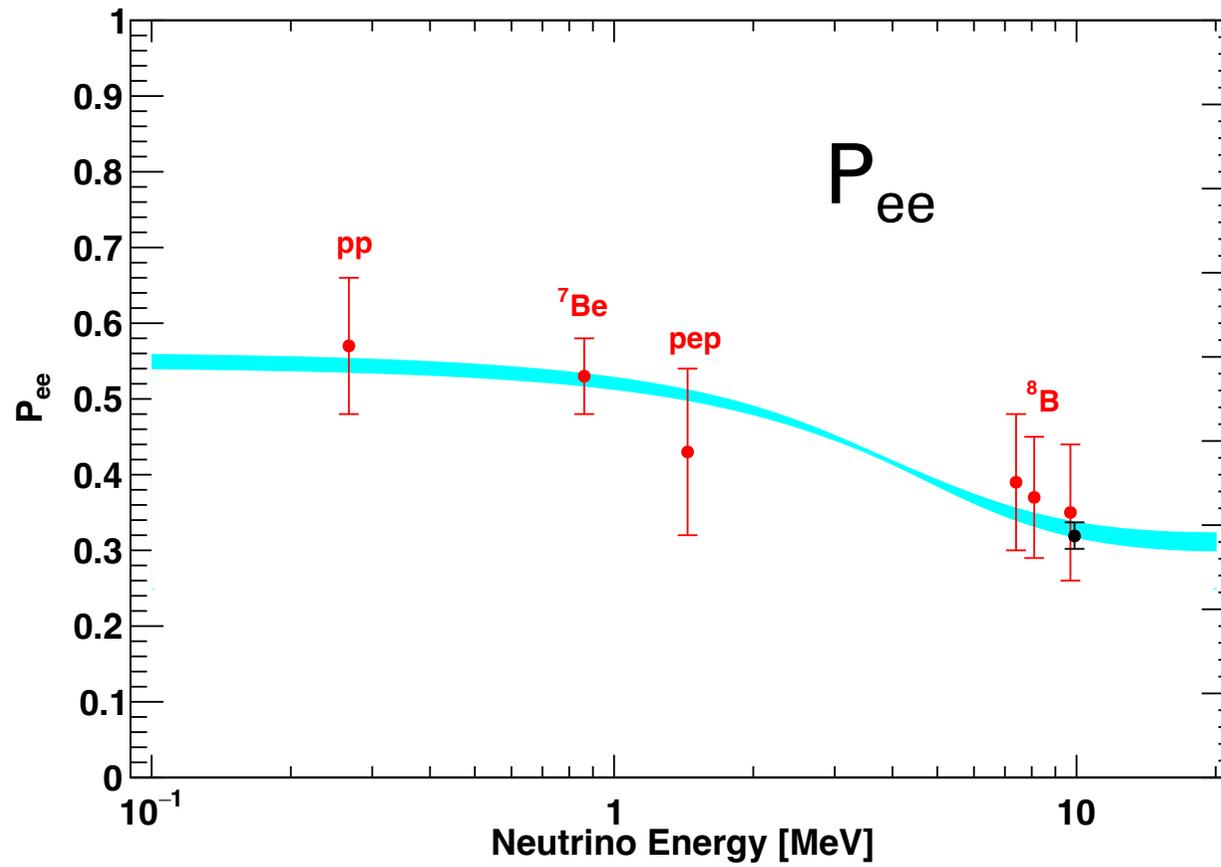
Neutrini solari: 20 anni di ricerca



Neutrini solari: modelli e osservazioni a confronto

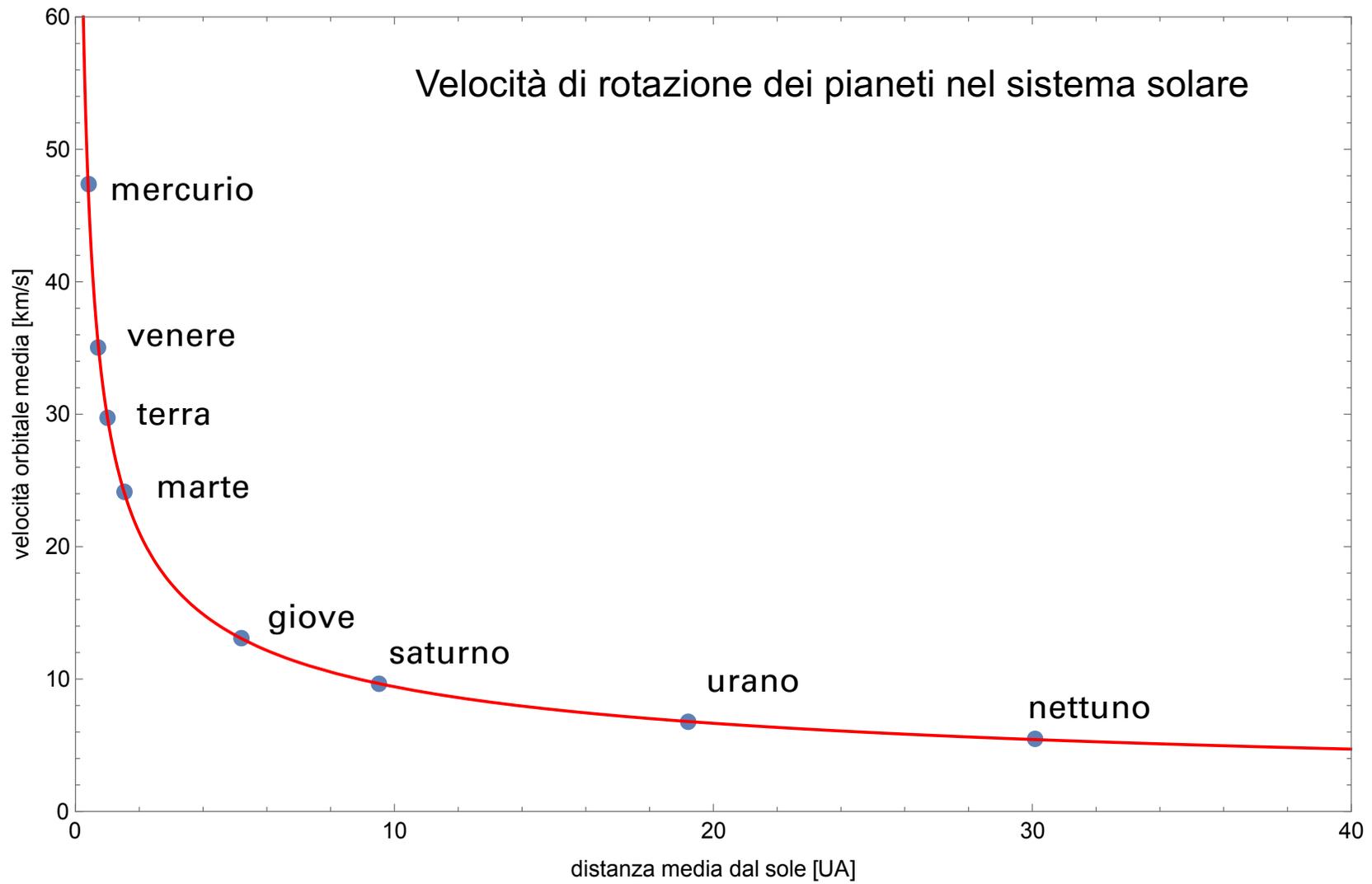
Sorgente	Flusso [cm ⁻² s ⁻¹] SSM-HZ	Flusso [cm ⁻² s ⁻¹] SSM-LZ	Flusso [cm ⁻² s ⁻¹] Data
pp (BX)	5.98(1±0.006)×10 ¹⁰	6.03(1±0.005)×10 ¹⁰	6.1(1±0.10)×10 ¹⁰ w/o luminosity constraint
pep (BX)	1.44(1±0.009)×10 ⁸	1.46(1±0.009)×10 ⁸	1.27(1±0.17)×10 ⁸ (HZ CNO) 1.39(1±0.15)×10 ⁸ (LZ CNO)
⁷ Be (BX)	4.93(1±0.06)×10 ⁹	4.50(1±0.06)×10 ⁹	4.99(1±0.03)×10 ⁹
⁸ B (SK+SNO)	5.46(1±0.12)×10 ⁶	4.50(1±0.12)×10 ⁶	5.35(1±0.03)×10 ⁶
CNO (BX)	4.88(1±0.11)×10 ⁸	3.51(1±0.10)×10 ⁸	6.6 ^{+2.0} _{-0.9} ×10 ⁸
p-value (pp, Be, B)	0.96	0.43	

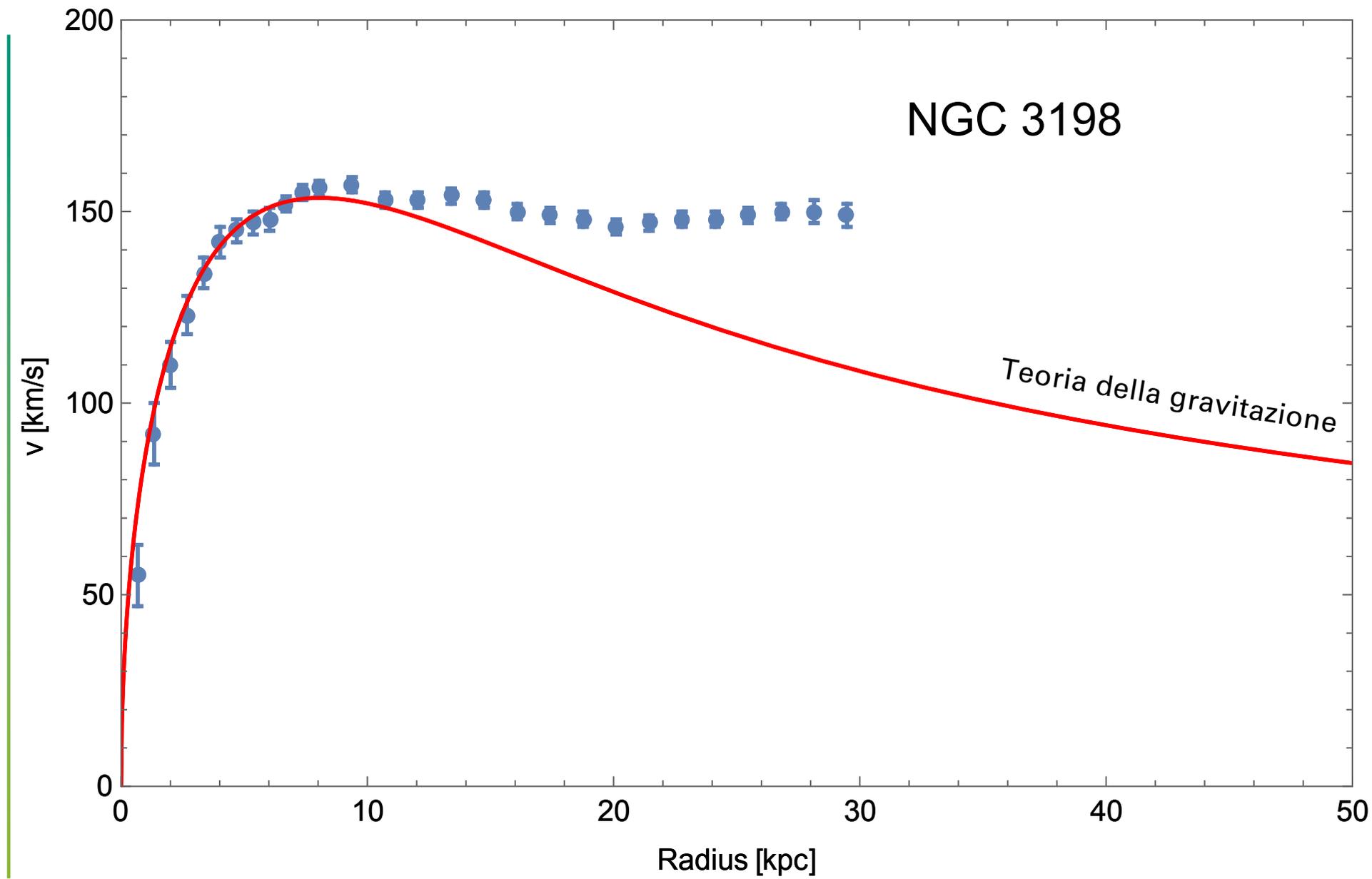
Propagazione dei neutrini nella materia

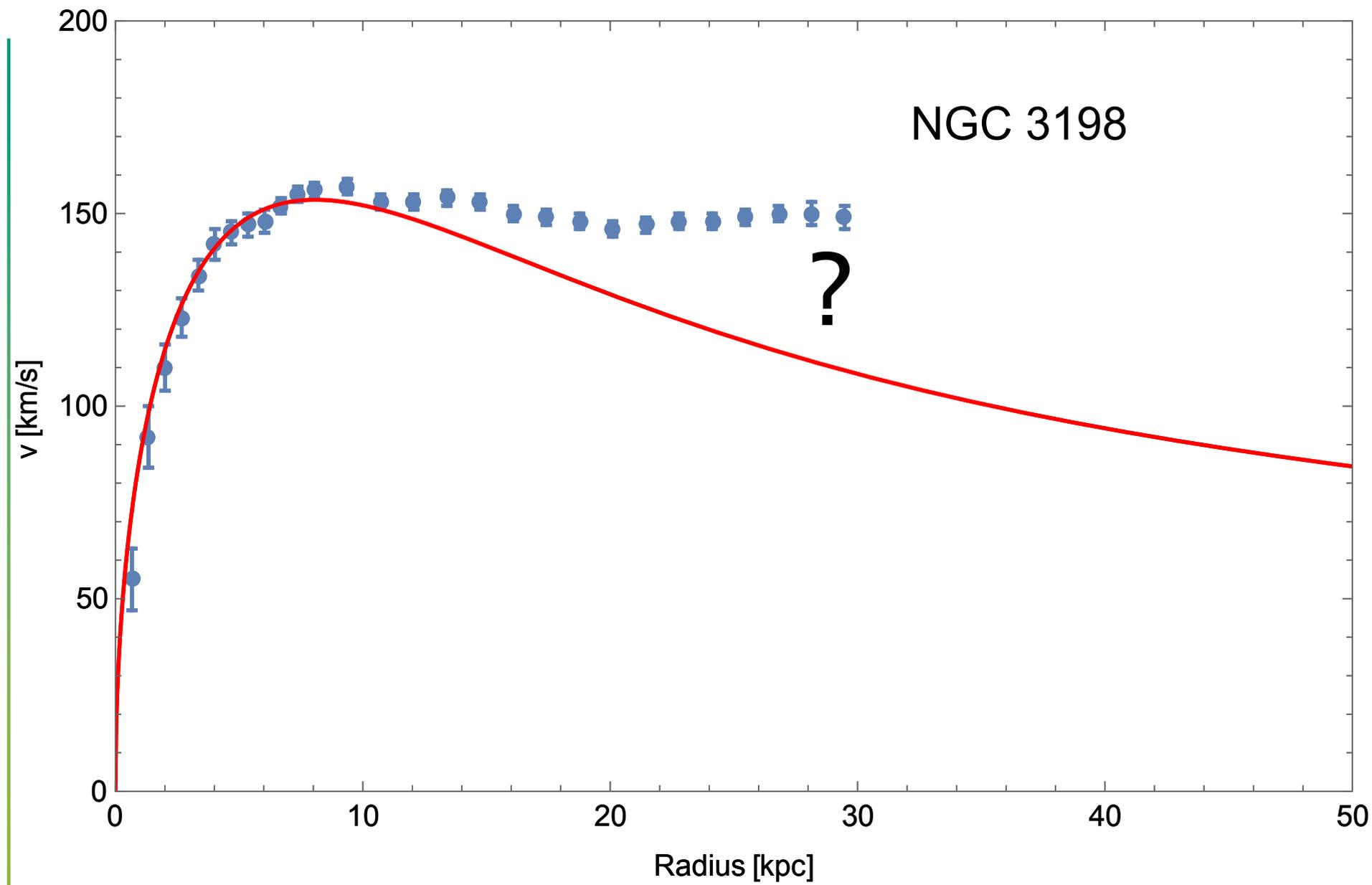


Cerchiamo il futuro della ricerca di neutrini solari e da supernova in ambito della ricerca di Materia Oscura e neutrini di alta energia ($>1\text{GeV}$)

Velocità di rotazione dei pianeti nel sistema solare







La ricerca di Materia Oscura (MO)

- Una possibile teoria per la MO è che sia costituita da particelle debolmente interagenti denominate WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*)
- Le WIMP sono particelle primordiali
- Hanno una massa compresa in circa $1 - 10^4 \text{ GeV}/c^2$
- Una densità locale: $10^{-1} - 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$
 - ✓ in 1L $\sim 1 - 100$ WIMP
- Un flusso pari a $\sim 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ per $100 \text{ GeV}/c^2$
- $\sigma \sim G_F^2 E^2 \sim 4 \times 10^{-38} (E/\text{GeV})^2 \text{ cm}^2$
- Interazione: $\chi + (A, Z) \rightarrow \chi' + (A, Z)^*$
 - ✓ per $m_\chi \sim m_A$ implica $E_A \sim A \text{ keV}$

Eventi di WIMP

$$R = N_t \times \sigma_{\chi A} \times \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \times \langle v \rangle$$

$$R \sim 0.2 \frac{\text{events}}{\text{kg year}} \left(\frac{100}{A} \times \frac{\sigma_{\chi A}}{10^{-38} \text{cm}^2} \times \frac{\langle v \rangle}{250 \text{km/s}} \times \frac{\rho_\chi}{0.4 \text{GeV/cm}^3} \times \frac{100 \text{GeV/c}^2}{m_\chi} \right)$$

Esposizione = 1 ton x anno

Eventi ~ 200, equivalente a ~**6x10⁻³ μBq/kg**

1 μBq/kg of radon ~ 31500 decays

1 ppt ²³⁸U ~ 10 μBq/kg

1 ppt ²³²Th ~ 4 μBq/kg

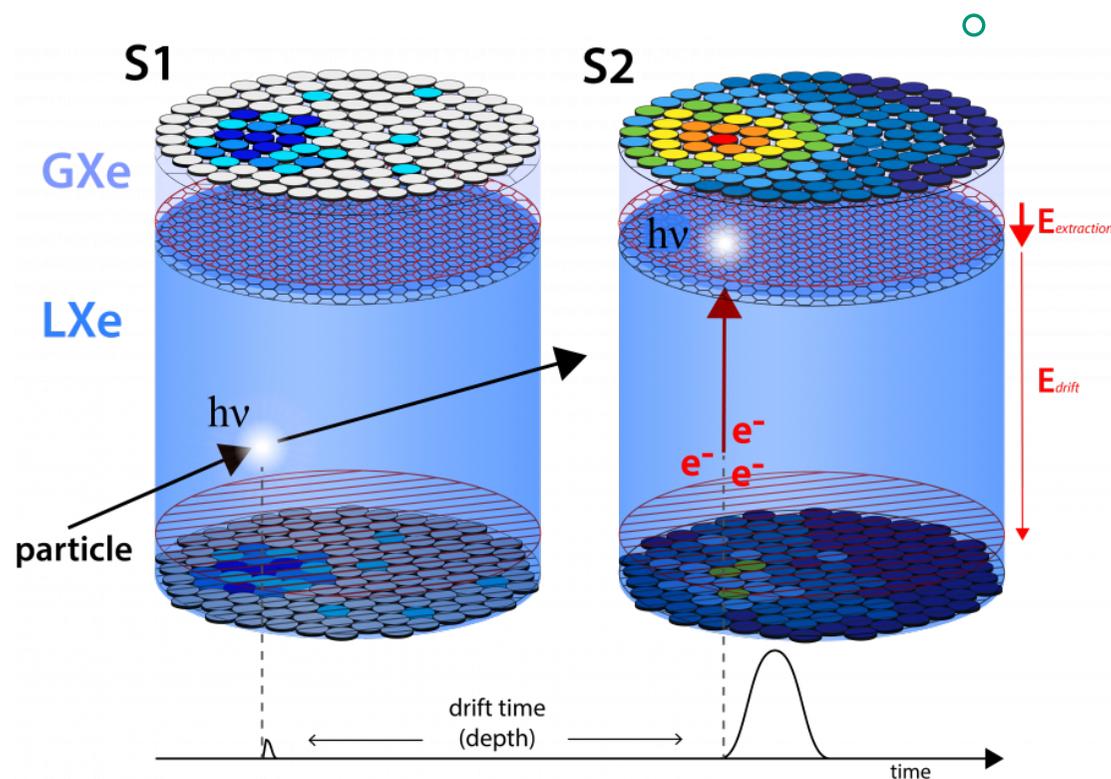
Rivelatore per WIMP: caratteristiche principali

- Estremamente radiopuro
- In sotterraneo
- Alto potere di discriminazione per eventi di fondo
- Grande massa
- Presa dati stabile per >5 anni

Gas nobili criogenici per la ricerca di WIMP

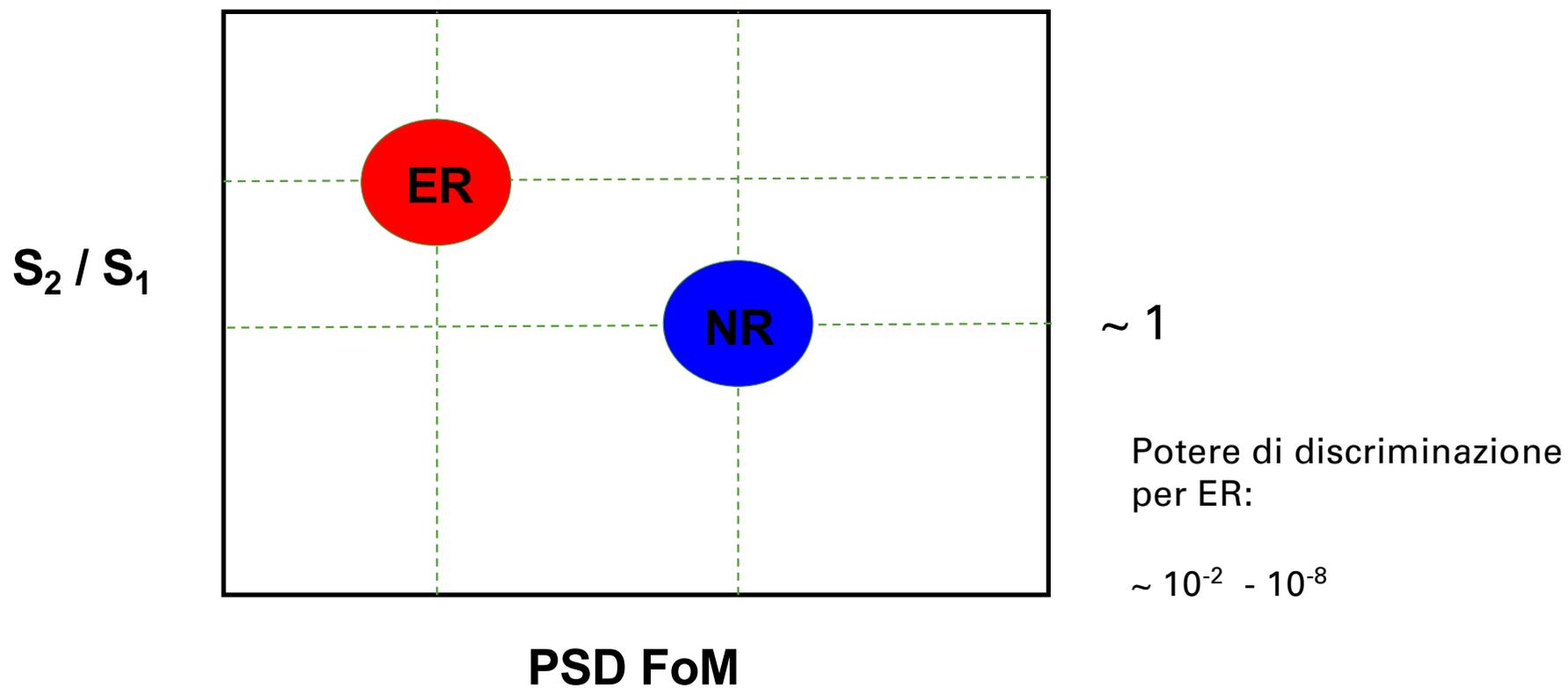
	Ar	Xe
Numero atomico	18	54
Massa atomica	40	131.3
Temperatura ebollizione @ 1atm [C]	-185.8	-108.1
Densità del liquido [g/cm ³]	1.40	2.94
Volume fraction in atmosphere [ppm]	~9500	~0.05
Scintillatione λ [nm]	128	178
Componente veloce della scintillazione [ns]	7	3
Componente lenta della scintillazione [ns]	1600	27

TPC a doppia fase per la ricerca di WIMP



- La particella incidente produce eccitazione e ionizzazione degli atomi
- Gli atomi eccitati producono scintillazione mediante processi di decadimento veloce e lento
- Gli atomi ionizzati liberano elettroni, alcuni si ricombinano
- La densità degli atomi eccitati (diretta o per ionizzazione) è funzione del dE/dx
- Processi non radiativi proporzionali alla densità di atomi eccitati riducono la scintillazione

Discriminazione del fondo nella TPC a due fasi



Le TPC per la ricerca di MO possono essere utilizzate per la ricerca di neutrini di bassa energia ?

TPC a due fasi e neutrini

- Considerate le caratteristiche di questi rivelatori per la discriminazione del fondo: rimozione eventi da ER
- Considerati i progressi per aumentare la massa attiva > 1 ton
- Considerati i progressi per la riduzione del fondo intrinseco, esterno e cosmogenico
- **Questi apparati sperimentali offrono una nuova opportunità per la ricerca dei neutrini astrofisici di bassa energia**

Rivelatori con LXe/LAr e neutrini solari

- Interazione di neutrini in LXe ed in LAr

$$\frac{dR}{dT_R} = N \int_{E_\nu^{\min}(T_R)}^{\infty} dE_\nu \phi(E_\nu) \frac{d\sigma(E_\nu, T_R)}{dT_R}$$

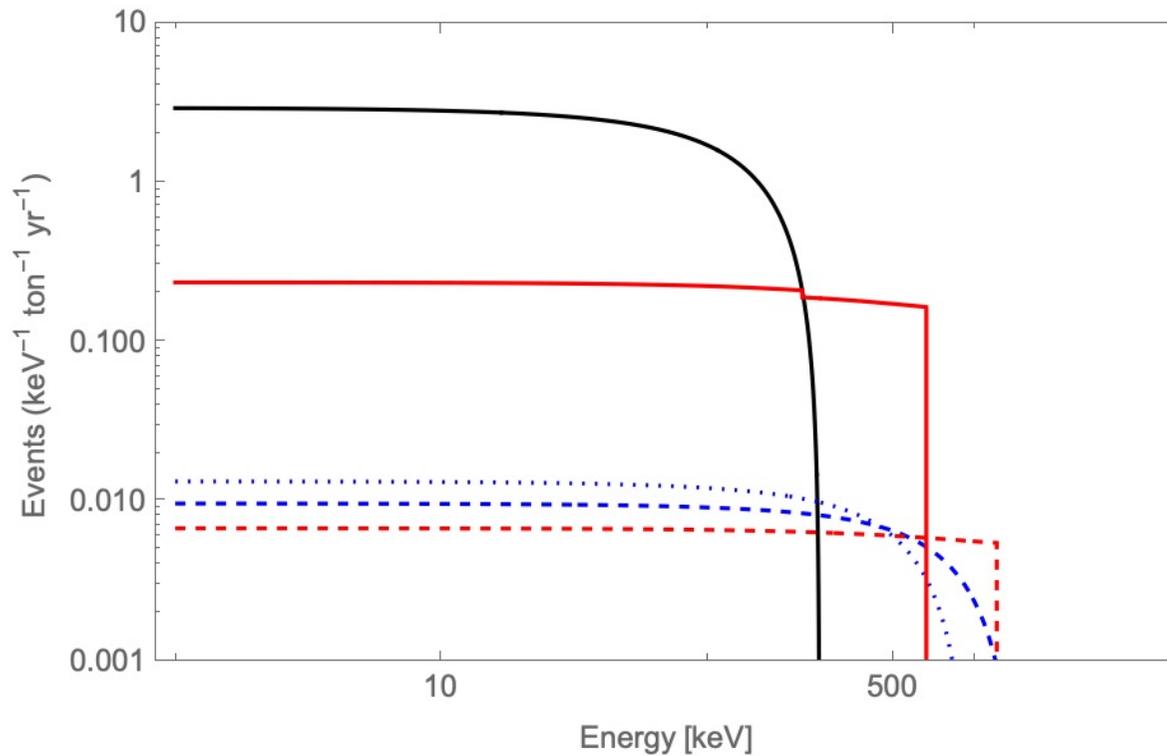
- ✓ scattering elastico: $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

$$E_\nu^{\min}(T_R) = \frac{T}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2m_e}{T_R}} \right)$$

- ✓ scattering coerente neutrino-nucleo: $\nu + (A,Z) \rightarrow \nu + (A,Z)$

$$E_\nu^{\min}(T_R) \approx \sqrt{\frac{T_R m_A}{2}}$$

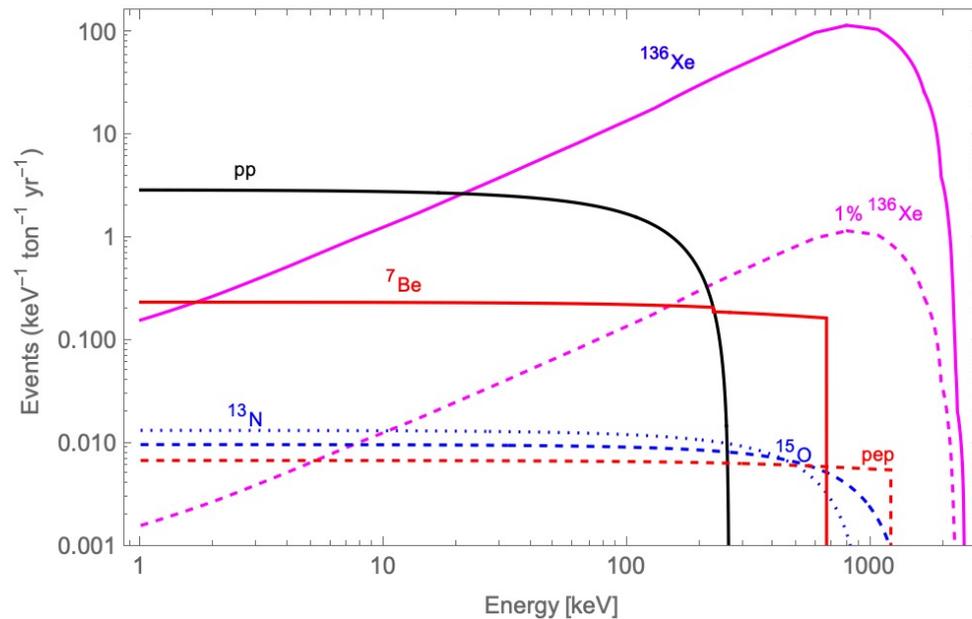
Neutrini solari da Scattering Elastico



Obiettivi principali:

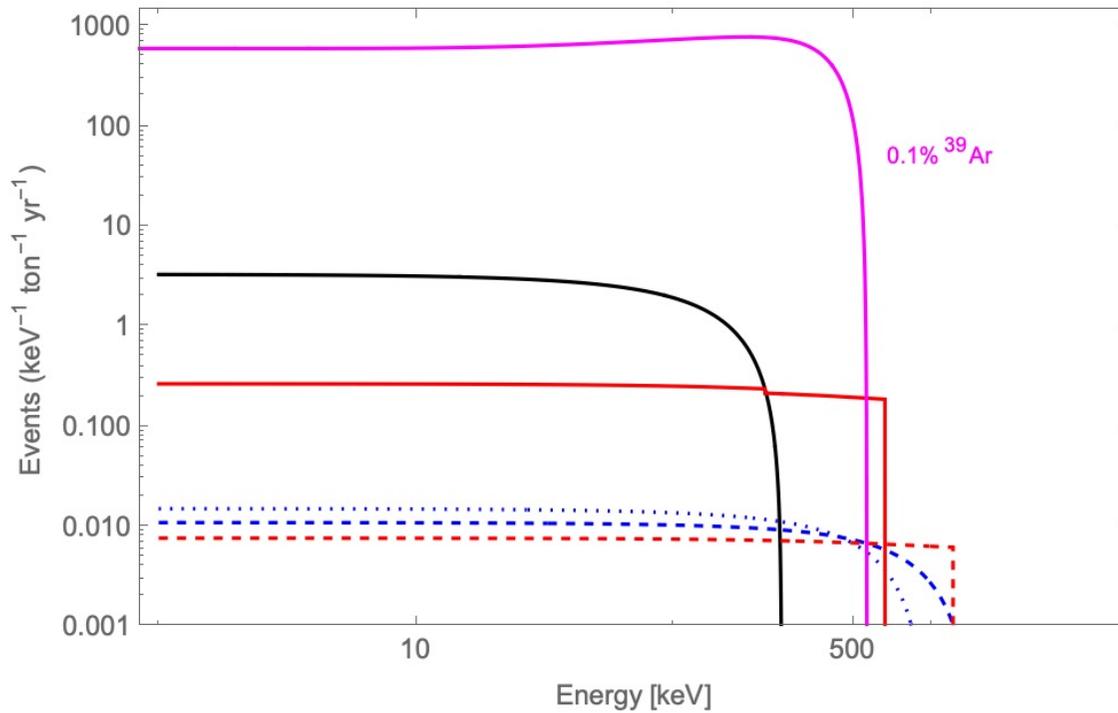
1. migliorare lo studio della transizione vuoto-materia della P_{ee}
2. Migliorare la comprensione del Modello Solare Standard
3. Migliorare l'accuratezza della misura dei neutrini pp e CNO

Fondo da ^{136}Xe in LXe



- Neutrini pp in [1,10] keV ~ 26/ton/yr
- ~2% stat in 100 ton x anno
- Sensibilità a neutrino CNO e pep limitata dalla attività dello ^{136}Xe
- Possibile misura a 3σ dei neutrino CNO con una riduzione dello ^{136}Xe di un fattore 1000 e 1000 ton x anno
- In LAr la presenza di ^{39}Ar svolge un ruolo simile allo ^{136}Xe a bassa energia, $Q_\beta = 0.565$ MeV

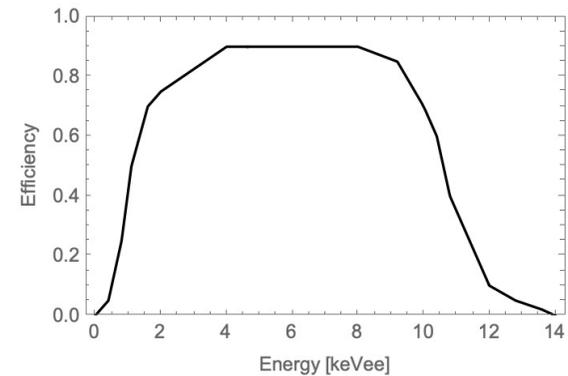
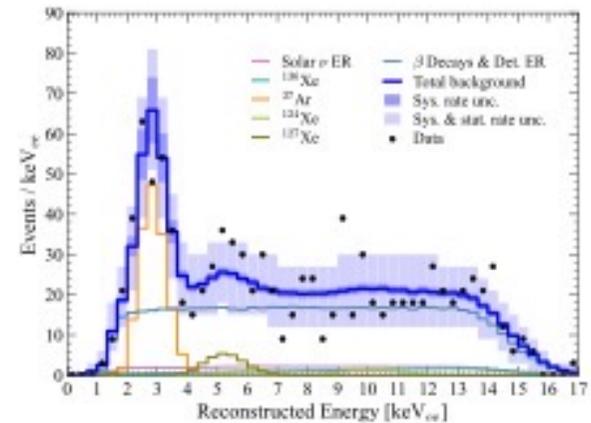
Neutrini solari in LAr



Per $E > Q_{\beta}$ pep $\sim 5\%$ e CNO $\sim 6\%$ stat
in 100 ton x anno

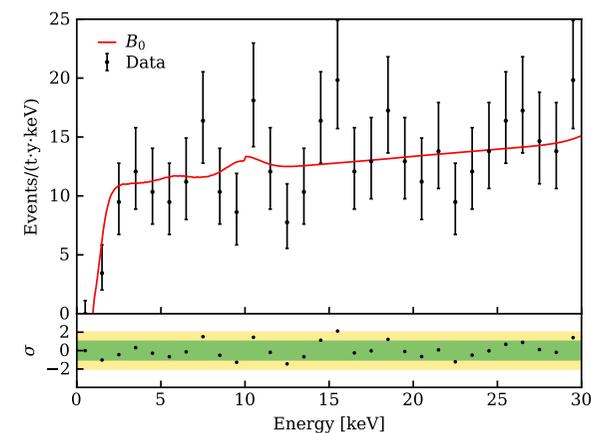
Esperimento LZ 2022

- Esperimento a SURF (SD, USA) con 7 ton di LXe in presa dati con soglia pari a $1 \text{ keV}_{\text{ER}}$
- Veto attivo con scintillatore liquido
- Esposizione primi risultati 2022: 60 giorni x 5.5 ton
- 27 eventi di neutrino solare da scattering elastico
 - ✓ ~10% del totale di eventi ER
 - ✓ efficienza media ~60%



Esperimento XENONnT 2022

- Esperimento a LNGS con 5.9 ton (~ 4.4 fiduciale) di LXe in presa dati con soglia pari a $1 \text{ keV}_{\text{ER}}$
- Veto attivo con Gd disciolto in acqua (futura implementazione)
- Esposizione primi risultati 2022: 1.16 ton x anno
- 300 eventi attesi di neutrino solare da scattering elastico
 - ✓ $\sim 8\%$ del totale ER in $[1,140] \text{ keV}_{\text{ER}}$
- Fondo dominato da ^{214}Pb (da ^{222}Rn , $1.31 \pm 0.17_{\text{stat}} \mu\text{Bq/kg}$) e ^{136}Xe (da DBD 2.479 MeV, 8.9% abbondanza)



ER rate in $[1,30] \text{ keV}$: $15.8 \pm 1.3_{\text{stat}}$ eventi/ton/anno/keV
 $\sim 10^{-2} \mu\text{Bq/kg}$

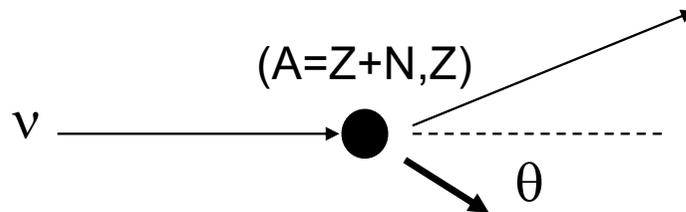
LXe TPC e momento magnetico del neutrino

- Il neutrino solare può essere utilizzato per indagare l'esistenza di un momento magnetico non nullo per il neutrino
- In presenza di un momento magnetico, μ_ν , risulta:

$$\frac{d\sigma_{\nu e}}{dT_e} \propto \mu_\nu^2 \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{E_\nu} \right)$$

- Il basso fondo in prossimità della soglia ha già consentito a LZ e XENONnT di superare le precedenti misure
 - ✓ $\mu_\nu < 6.4 \times 10^{-12} \mu_B$

Scattering Coerente ν -Nucleo (SC ν N)



$$\frac{d\sigma}{dE_r} = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 M \left(1 - \frac{ME_r}{2E_\nu^2}\right) F^2(Q^2)$$

$$Q^2 = 2E_\nu^2(1 - \cos\theta)$$

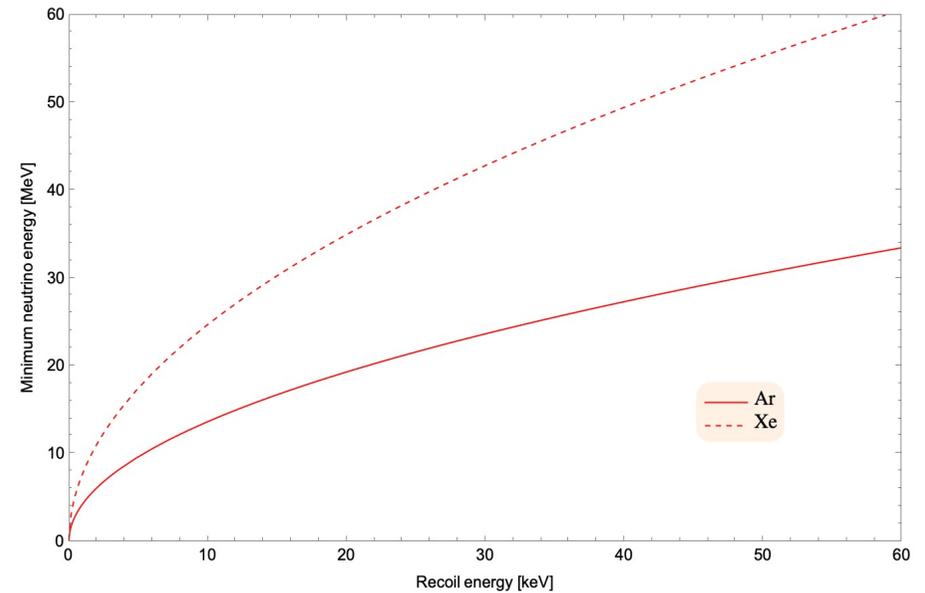
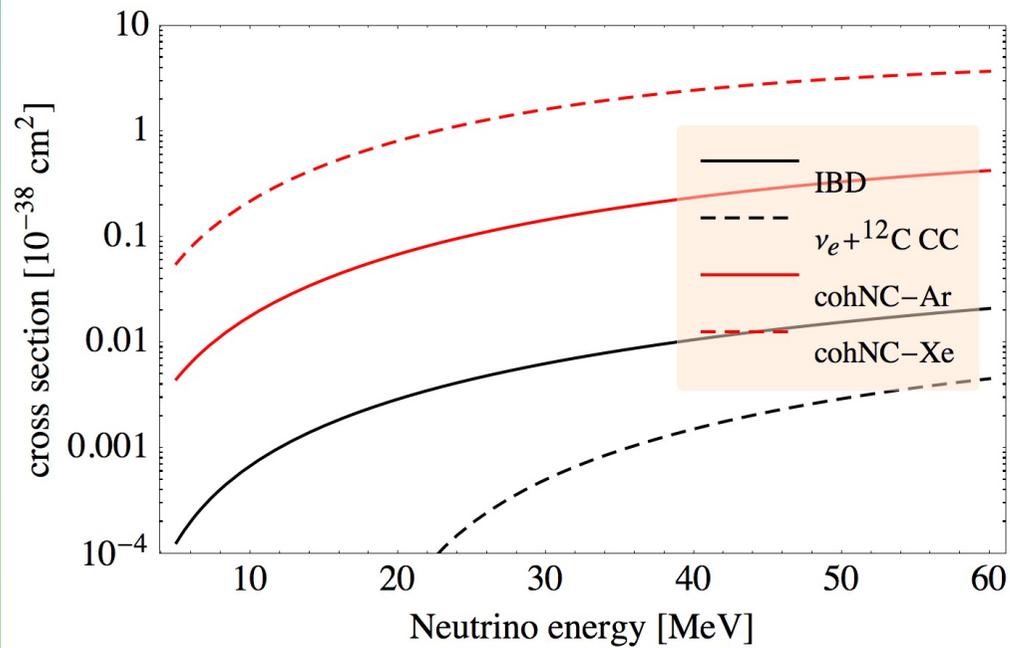
$$Q_W = (1 - 4\sin^2\theta_W)Z - N$$

$$\sigma = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 E_\nu^2 \approx 4.215 \times 10^{-45} Q_W^2 \left(\frac{E_\nu}{\text{MeV}}\right)^2 \text{ cm}^2 \approx 4.215 \times 10^{-45} N^2 \left(\frac{E_\nu}{\text{MeV}}\right)^2 \text{ cm}^2$$

Condizione di coerenza

$$Q(E_\nu) \cdot (r_0 A^{1/3}) \leq 1$$

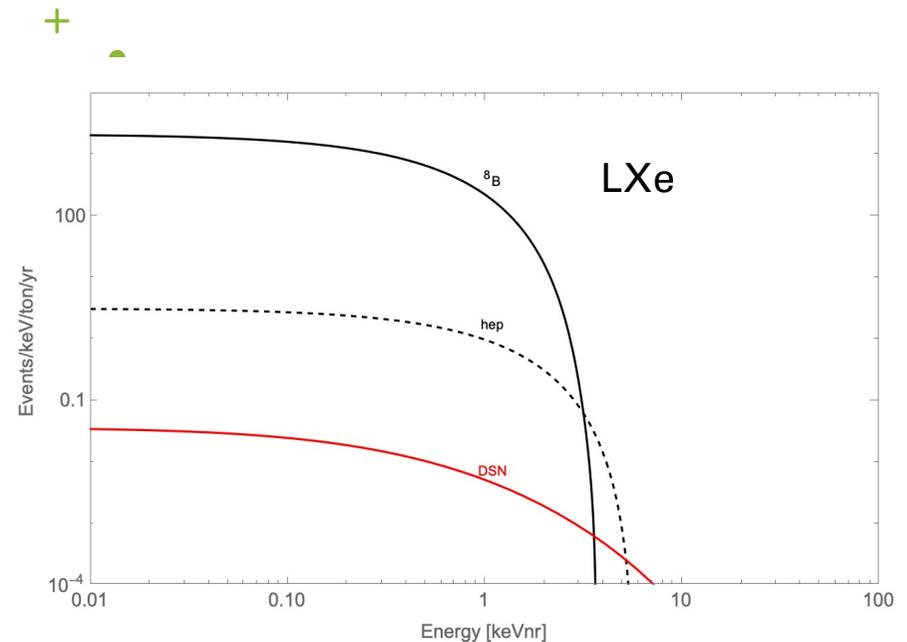
Sezioni d'urto a confronto



Si è dimostrata la possibilità di operare LXe con soglia a sub-keV mediante analisi S2-only

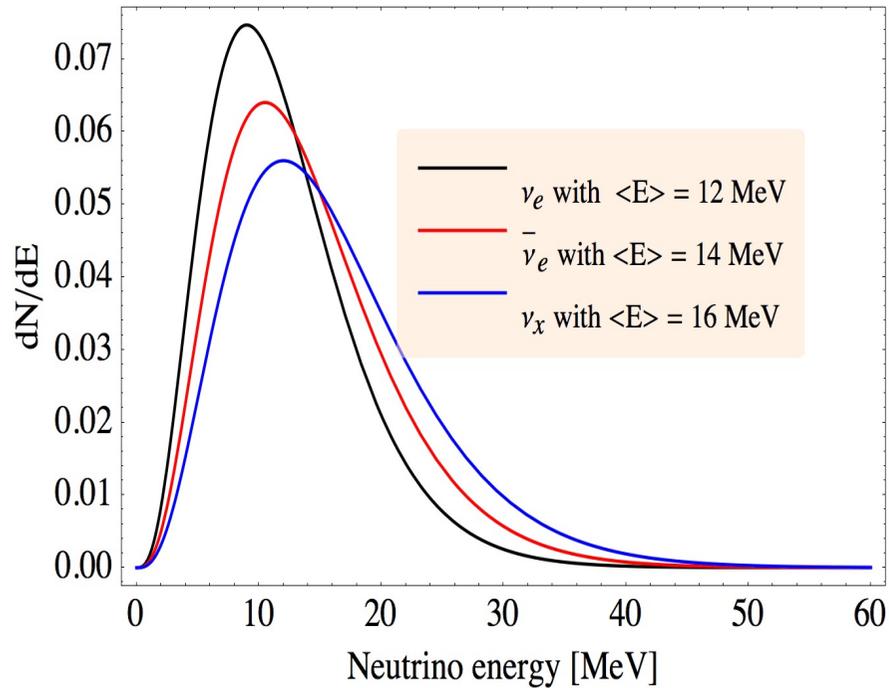
Eventi di NR per neutrini solari da $SC_{\nu N}$

- I neutrino pp hanno un rinculo $\ll 1 \text{ keV}_{NR}$
- I neutrino solari da ${}^8\text{B}$ sono quelli sperimentalmente accessibili con rinculo $< 3.7 \text{ keV}_{NR}$ (< 12 per LAr)
- Il numero di eventi atteso e per neutrino da ${}^8\text{B}$ è circa $\sim 90(120)/\text{ton}/\text{anno}$ in LXe(LAr)
 - $\sim 1\%$ stat con 100 ton x anno
- Il numero di eventi atteso per neutrino da hep è circa $\sim 1/\text{ton}/\text{anno}$
- Questa misura consente di migliorare la comprensione della P_{ee} nella regione $> 1 \text{ MeV}$ e di migliorare la ricerca di possibili effetti da neutrino sterile



Neutrini da collasso gravitazionale

Durata $\sim O(10)$ s



Energia media:

ν_e : $\sim 12-14$ MeV

anti- ν_e : $\sim 14-16$ MeV

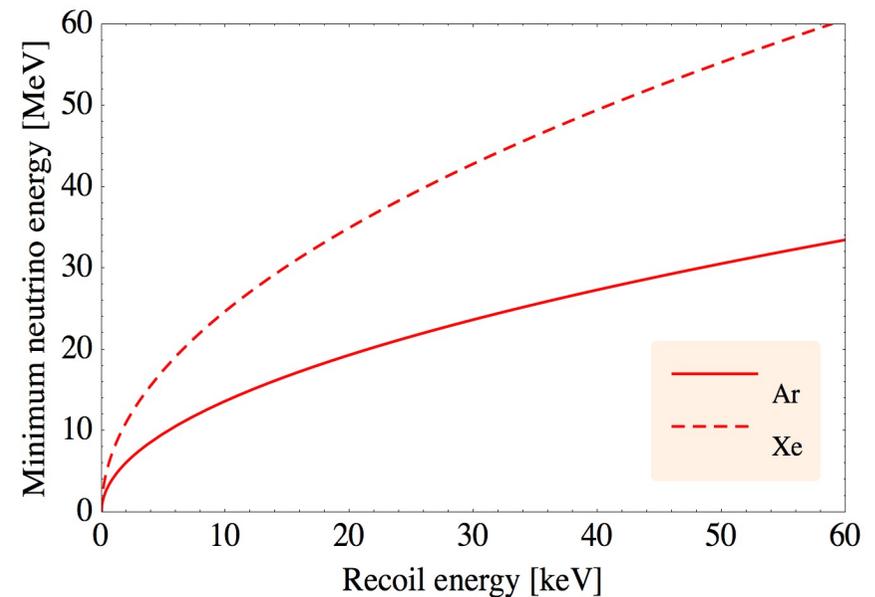
ν_x : $\sim 14-16$ MeV

Eventi tipo NR in una finestra temporale limitata:
fondo ~ 0 !

Neutrini da supernova in Ar e Xe con SCvN

$$\frac{dN}{dE_r} = C \int_{E_{\min}(E_r)}^{\infty} dE_\nu \frac{d\sigma}{dE_r}(E_\nu, E_r) \sum_{i=\nu_e, \bar{\nu}_e, 4\nu_x} F_{\nu_i}^0(E_\nu)$$

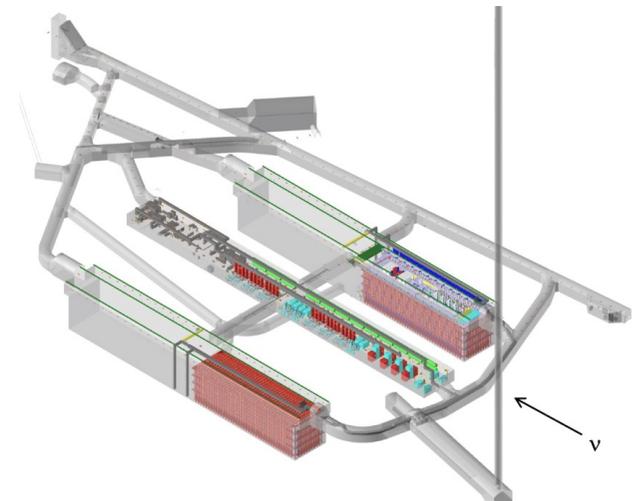
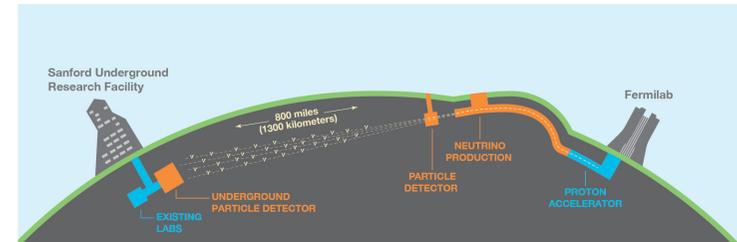
Soglia [keV]	Ar [eventi/ton]	Xe [eventi/ton]
0	7.4 ±20%	26.2 ±20%
5	3.9	4.0
10	2.3	1.0
20	1.0	0.09



In prossimità della soglia il numero atteso di eventi si riduce drasticamente.
 In SuperKamiokande ~ 10⁴ eventi attesi !

DUNE

- Un rivelatore con LAr in sotterraneo per lo studio di neutrini da fascio (Fermilab – SURF)
- 4 moduli da 10 kton
- Interazioni da neutrino solare ($E_\nu > 5 \text{ MeV}$)
 - $\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}$
 - scattering elastico ν -e
- Per scattering elastico e 100 kton x anno:
 - ${}^8\text{B} \sim 0.3\% \text{ stat}$
 - Hep $\sim 6\% \text{ stat}$



Conclusioni

- Possibilità di osservare neutrini da ${}^8\text{B}$ con i presenti apparati sperimentali
- Nuovi apparati sperimentali da aggiungere alla rete di rivelatori per neutrini da supernova e come osservatori per i neutrini solari
- Ruolo complementare tra LXe e LAr
- I rivelatori per MO in LXe/LAr di prossima generazione possono offrire una opportunità lo studio di neutrini di bassa energia con esposizioni dell'ordine di 300/200 ton x anno e ulteriori sforzi nella riduzione del fondo

Origine di segnali di fondo nella ricerca di WIMP

