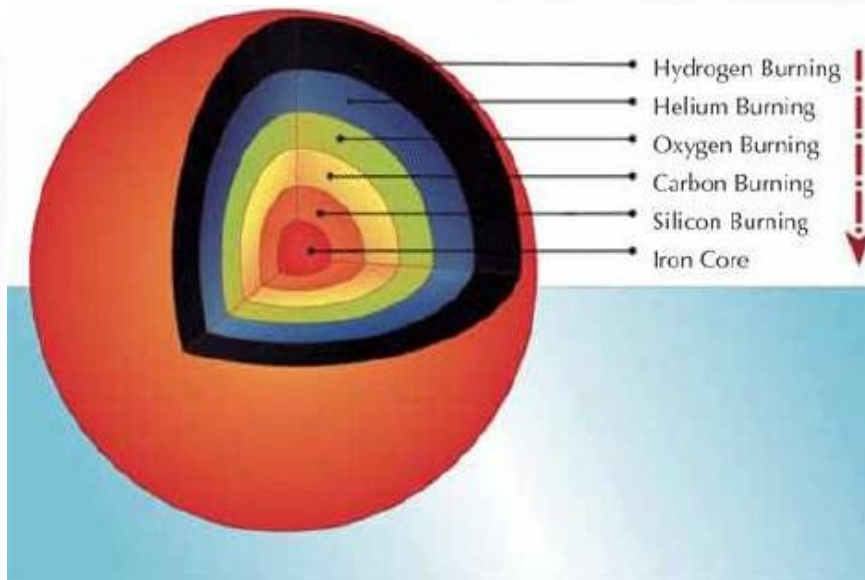


Seminario del 2° anno di dottorato

Andrea Molinario
XXIV ciclo

Il collasso gravitazionale stellare



Destino finale di stelle di grande massa, $M > 8M_{\text{sole}}$

Termine delle reazioni di fusione nucleare nel centro

Collasso parti centrali, formazione di un core compatto, onda d'urto, forte emissione neutrinica

Meccanismo alla base delle supernovae tipo II

Generazione elementi più pesanti del Ferro

Diffusione nuovi elementi nello spazio

Formazione stella di neutroni o buco nero

Emissione onda gravitazionale

Il collasso gravitazionale stellare

*Manca una descrizione completa dei meccanismi che, dal collasso delle parti centrali, portano all'**espulsione dell'involuppo esterno**.*



Crab Nebula – SN 1054



SN 1987A

v da collasso gravitazionale stellare

Non basta l'osservazione della sola componente elettromagnetica

*Circa il 99% dell'**energia** ($\sim 3 \cdot 10^{46}$ J) è emessa in neutrini e antineutrini di tutti i tipi su un tempo scala di 20 s.*

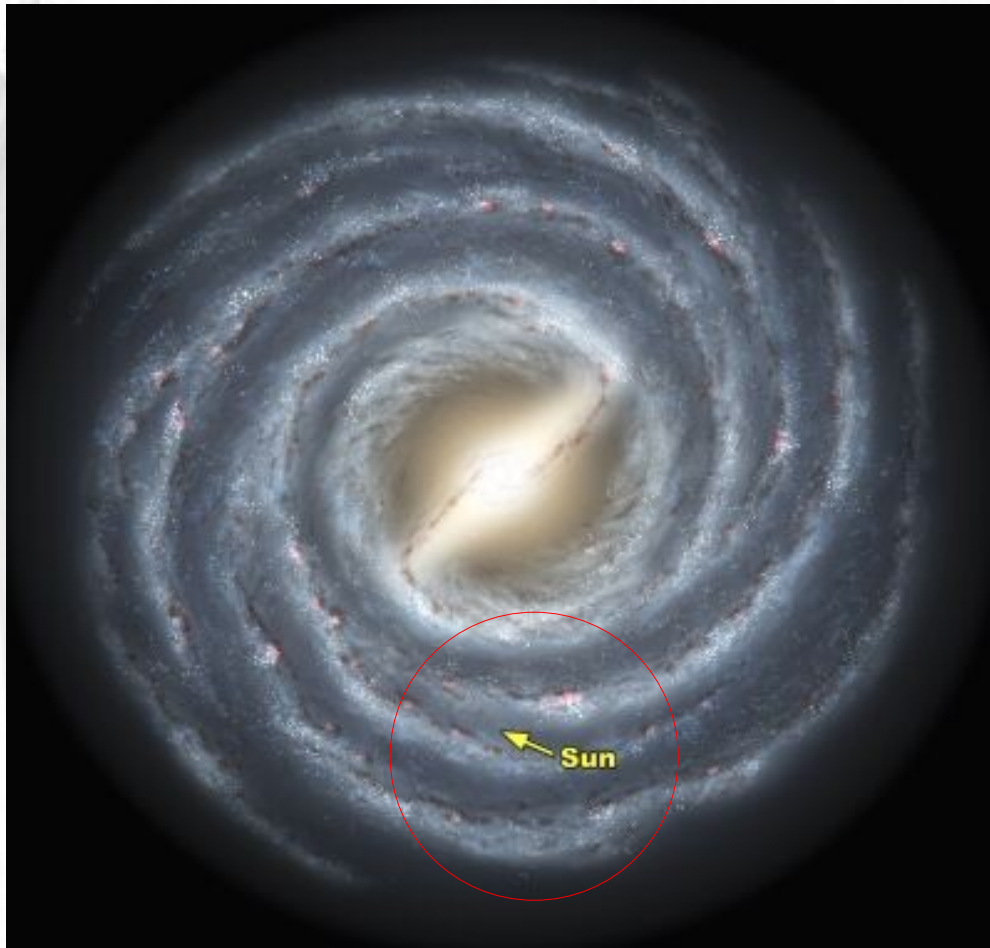
*I neutrini provengono direttamente dalle **parti centrali della stella** e giungono alcune ore prima dei fotoni.*

*Danno il **riferimento temporale** per la ricerca dell'onda gravitazionale.*

***Attraversano praticamente indisturbati la materia**, i fotoni possono essere assorbiti.*

*Giocano un **ruolo cruciale** per consentire l'esplosione degli strati esterni della stella.*

v da collasso gravitazionale stellare

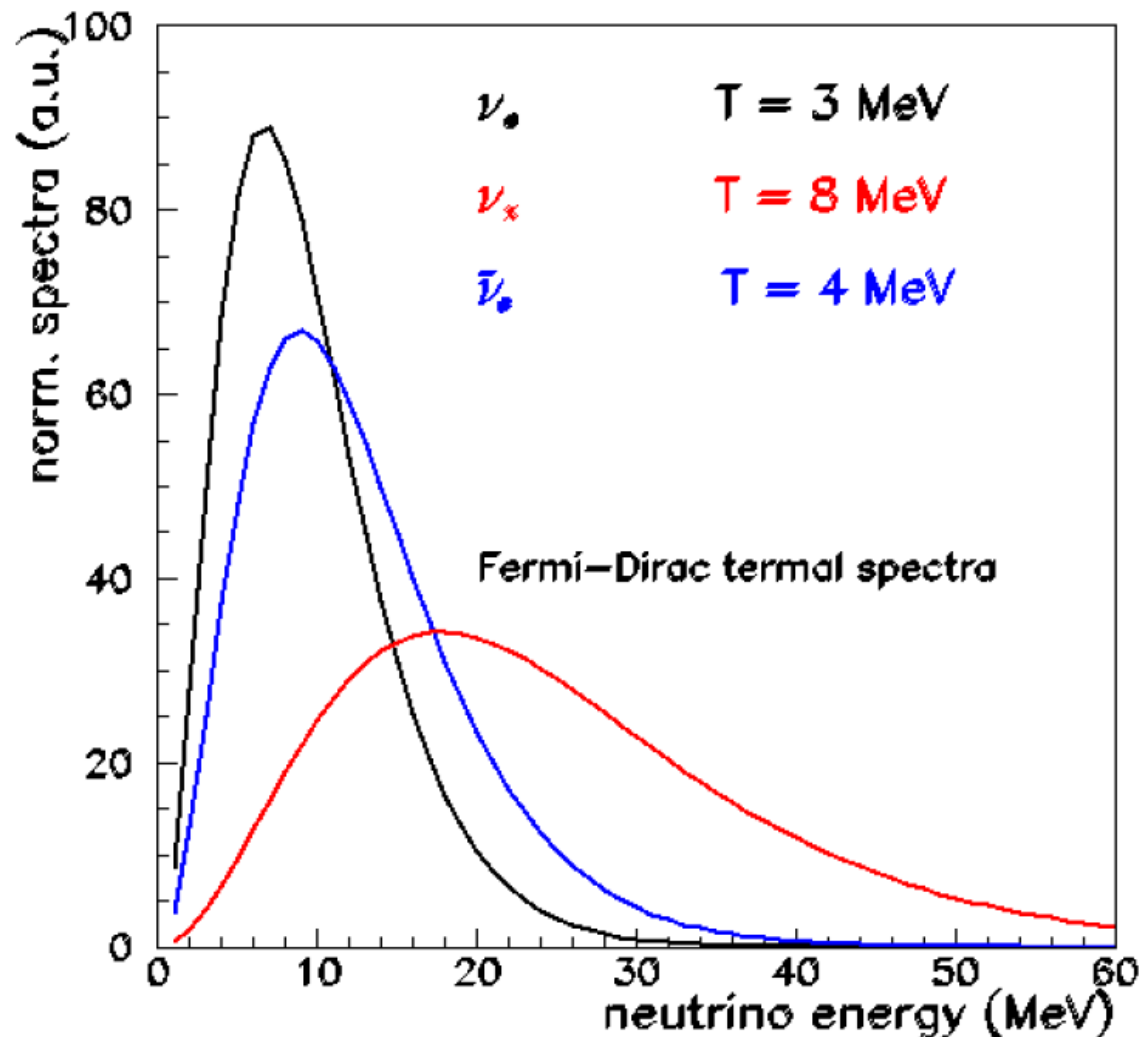


Nell'**ottico** si può monitorare solo il 20% circa delle supernovae nel piano galattico.

Negli ultimi 1000 anni sono state registrate 7 supernovae galattiche.

Il **rate di collassi gravitazionali** stimato per la nostra Galassia è di 1 ogni 30-50 anni.

ν da collasso gravitazionale stellare



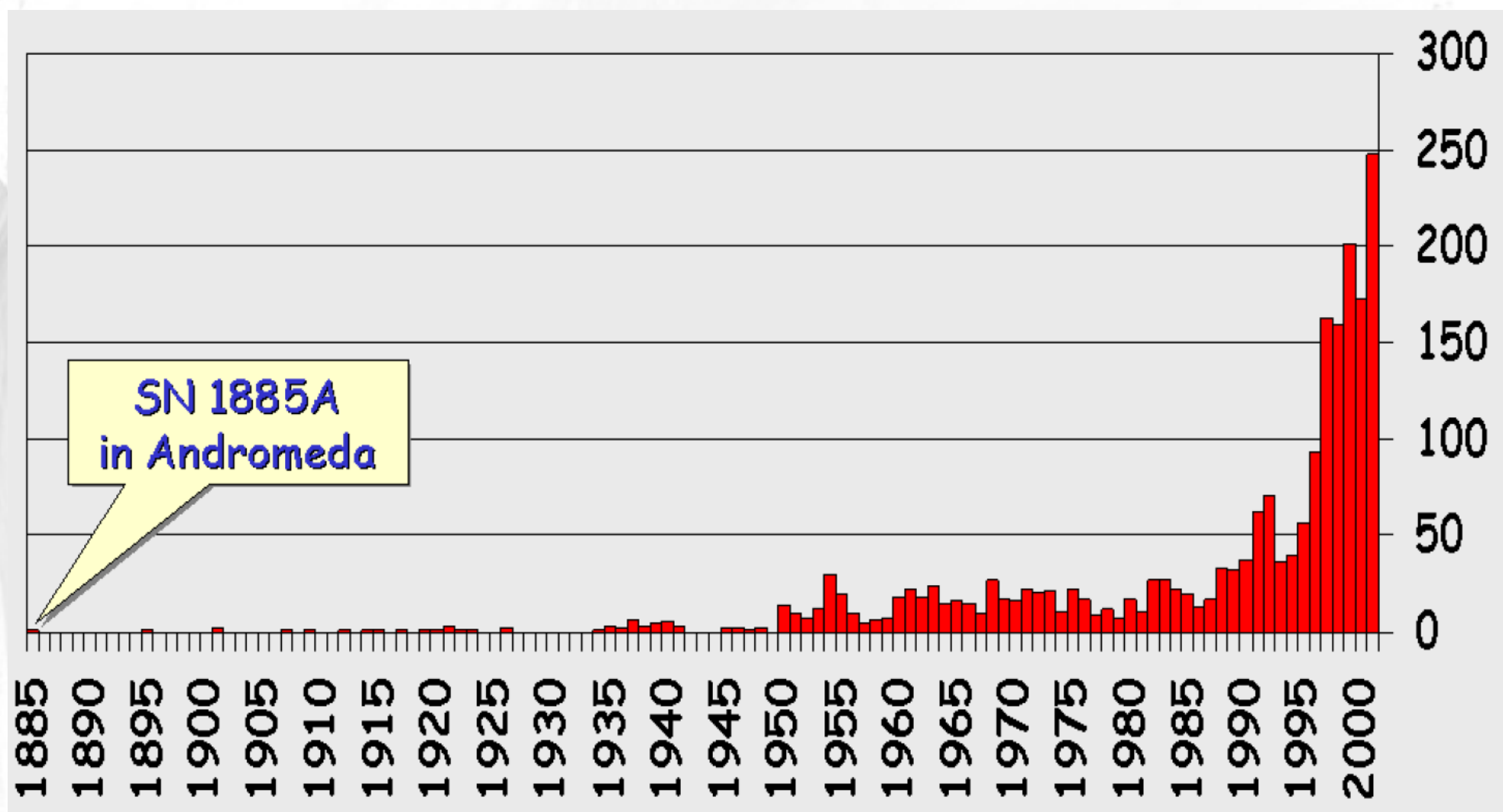
*Energie medie tipiche
dei neutrini emessi*

$\langle E_{\nu e} \rangle = 12-14 \text{ MeV}$

$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 14-16 \text{ MeV}$

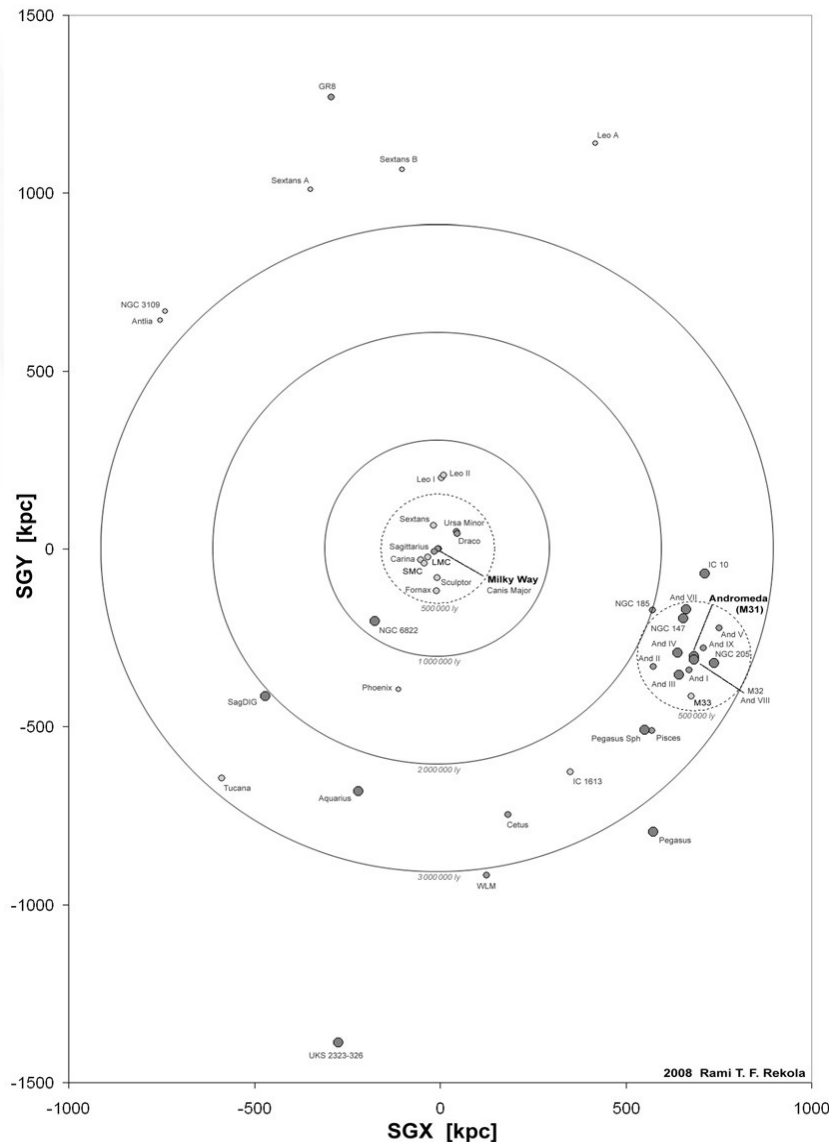
$\langle E_{\nu x} \rangle = 20-22 \text{ MeV}$

*In totale sono emessi
circa 10^{58} neutrini di
tutti i tipi.*



*Scoperta di supernovae 1885-2001
(osservazione nell'ottico)*

v da collasso gravitazionale stellare



Solo una di queste è stata osservata anche in neutrini!

→ *SN1987A nella Grande Nube di Magellano*

Evento raro a causa della
sensibilità limitata dei rivelatori (max 100 kpc).

Si attende un ***collasso gravitazionale galattico.***

$$1 \text{ kpc} = 3.1 \cdot 10^{19} \text{ m}$$

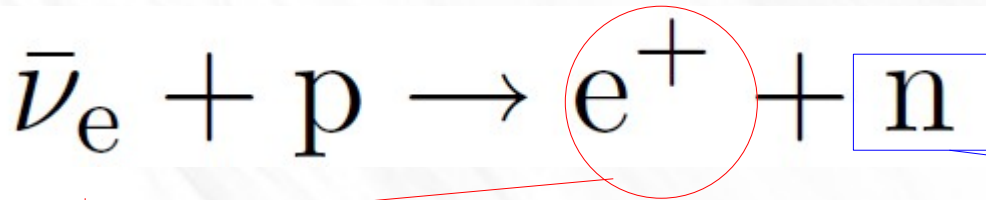
Rivelatori di ν

Ne esistono due grandi classi:

a effetto Cherenkov in acqua

a scintillatore liquido

*Il principale canale di interazione ($\sim 90\%$ dei segnali) è il **decadimento beta inverso** (IBD).*



*Segnale
"prompt"*

*Può essere catturato e
dare un segnale ritardato*

Altri canali dipendono dallo specifico rivelatore.

Large Volume Detector



Underground : Hall A dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Grande massa : 1 kt di scintillatore liquido

Alto duty cycle per un monitoraggio continuo

Identificazione dell'IBD

Vari canali di interazione: CC e NC su ^{12}C , e^- , Ferro.

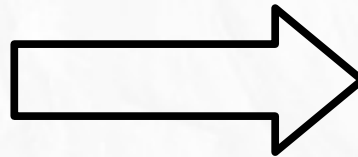
Large Volume Detector

1 contatore a scintillazione

1 X 1 X 1.5 m³

1.2 t di scintillatore liquido

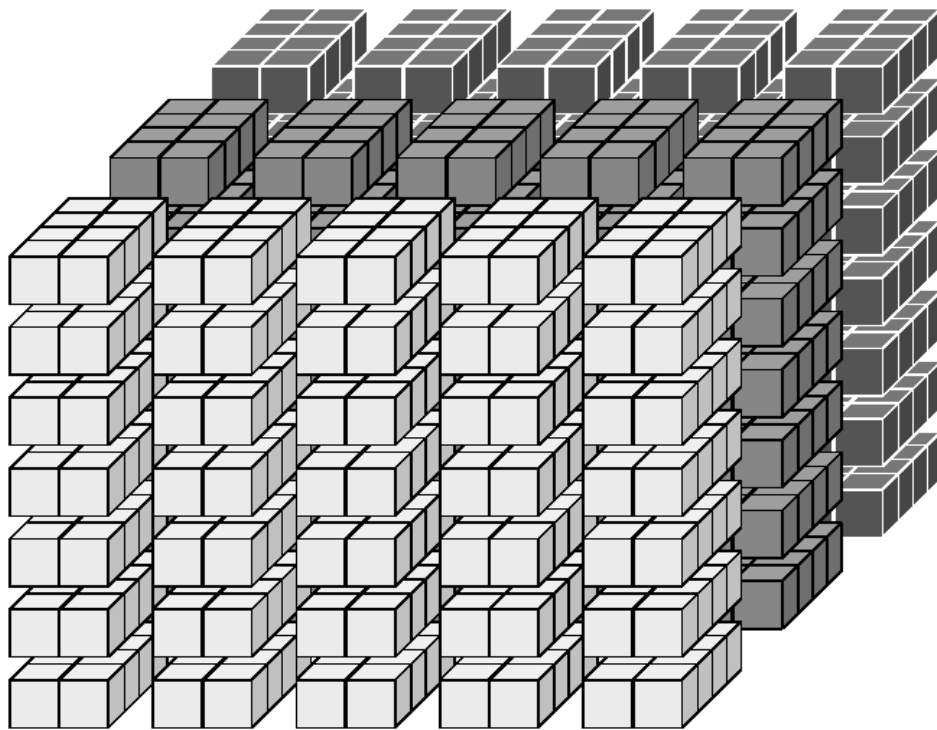
3 fotomoltiplicatori (PM)



Trigger con coincidenza tripla dei PM di un singolo contatore sopra soglia H. → Energia circa 4 MeV

Ricerca dell'eventuale segnale ritardato (cattura neutrone) abbassando la soglia di coincidenza tripla al livello L (circa 0.5 MeV) nel contatore dove il trigger è avvenuto per 1 ms.

Large Volume Detector



840 contatori
disposti in una
struttura modulare

*Permette l'alto duty
cycle*

Ricerca di burst di neutrini sia online che offline.

Analisi temporale dei segnali alla ricerca di cluster al
di sotto di una certa frequenza di imitazione.

Attività del dottorato

Studio dettagliato dei rivelatori di ν da supernova oggi esistenti.

Esame di una possibilità per l'aumento della sensibilità: drogaggio con Gadolinio.

Discussione di prospettive future: fisica dei ν nei rivelatori a gas nobile liquefatto a bassissima soglia.

Analisi dati di LVD, turni di controllo dell'esperimento, partecipazione a SNEWS.

Studio dei rivelatori odierni

*Qual è lo stato dell'arte
per la rivelazione di ν da supernova?*

Utile poter incrociare i dati di tutti gli esperimenti.

*Applicazione di un **modello unico** di emissione
neutrinica a una serie di esperimenti*

Obiettivi :

*descrizione delle potenzialità dei rivelatori nel
complesso*

messa a punto di strumenti di analisi

Studio dei rivelatori odierni

*Almeno **due problemi** legati alla descrizione del flusso di neutrini:*

Parametri astrofisici e scenari di oscillazione risultano accoppiati.

Manca un'adeguata descrizione dell'evoluzione temporale del segnale.

Modello parametrico che viene tarato sui dati della SN1987A.

*Pagliaroli et al., Astroparticle Physics **31** (2009) 163–176*

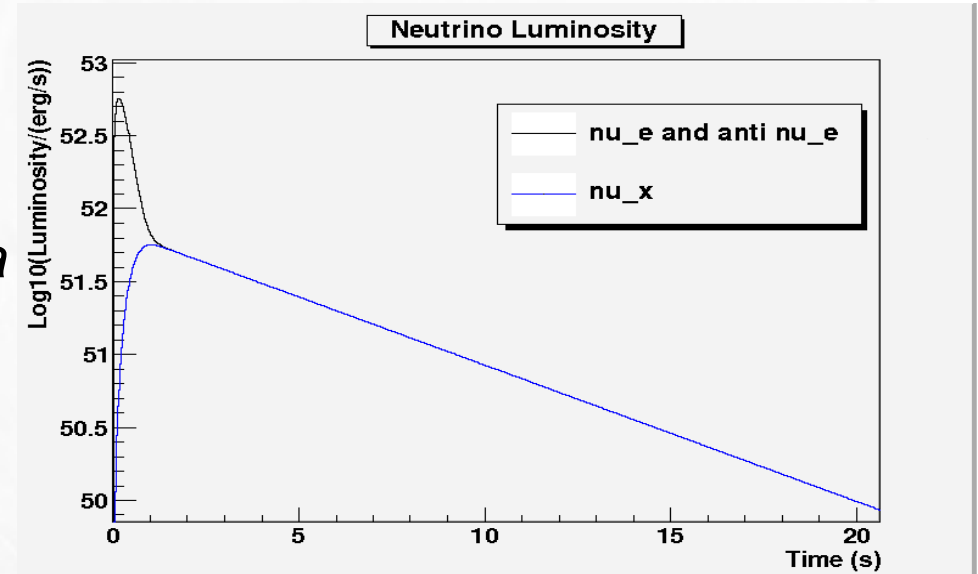
Studio dei rivelatori odierni

FASE DI ACCRESCIMENTO

La materia accresce sul nucleo centrale compatto

Emissione di ν_e e $\bar{\nu}_e$ su un tempo scala di 1s

Circa il 20% dell'energia totale in neutrini

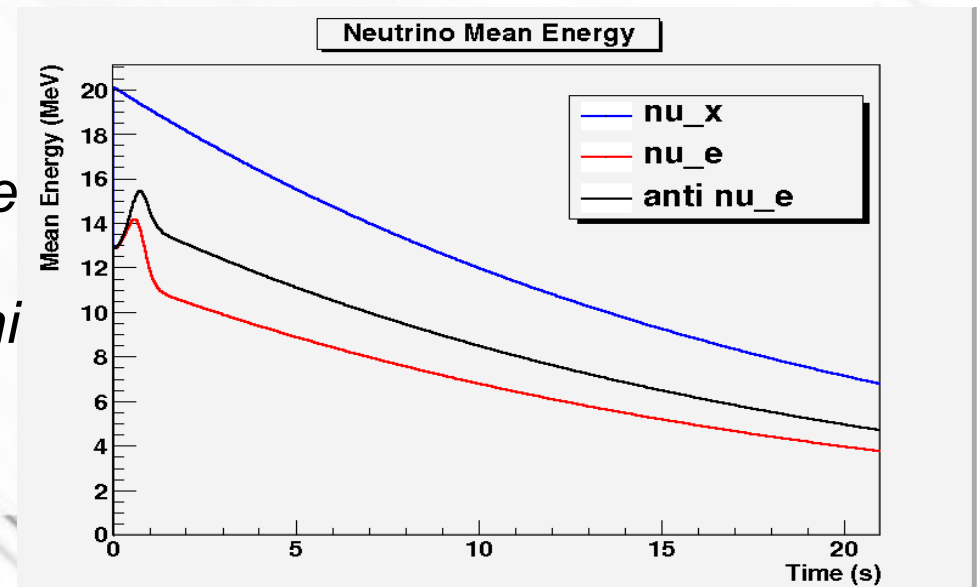


FASE DI COOLING

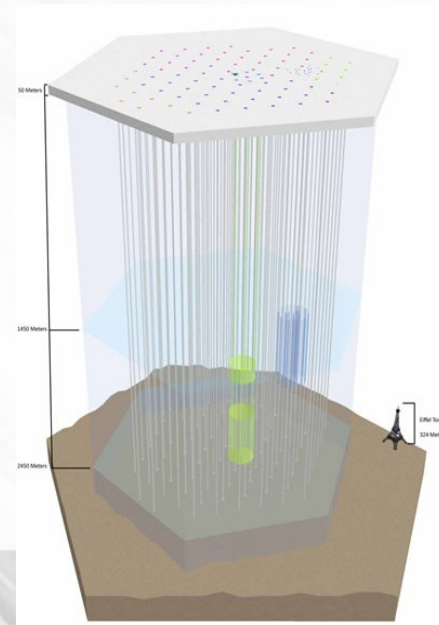
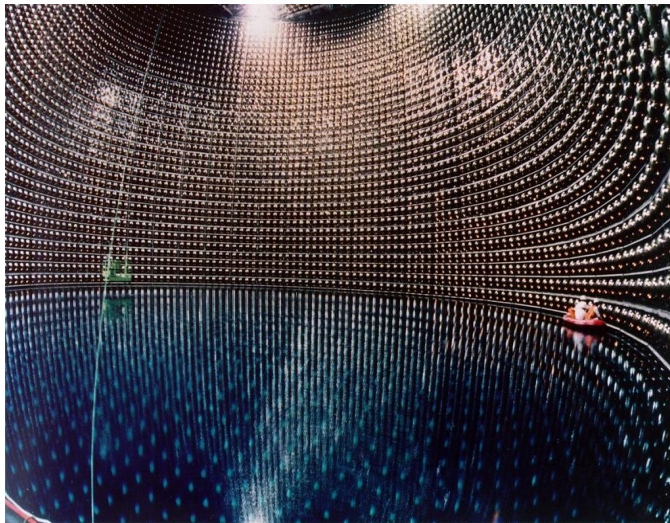
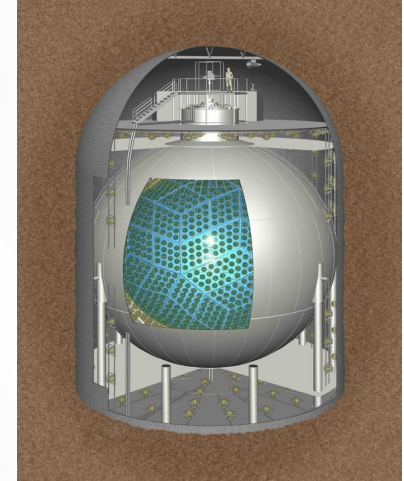
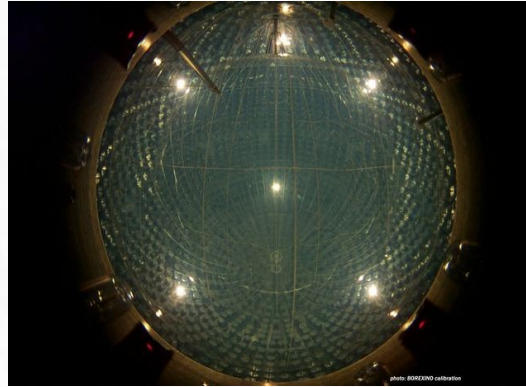
Raffreddamento della proto-stella di neutroni

Emissione di tutti i flavours di neutrini e antineutrini

Circa 80% dell'energia totale in neutrini



Studio dei rivelatori odierni



Studio dei rivelatori odierni

Aspetti di fisica

Flusso dei ν

Oscillazioni dei ν

Sezioni d'urto

Prodotti dell'interazione

Descrizione del rivelatore

Numero di bersagli

*Risposta in funzione
dell'energia*



Programma di simulazione

The diagram consists of two arrows pointing downwards from the 'Aspetti di fisica' and 'Descrizione del rivelatore' sections towards the 'Programma di simulazione' section at the bottom.

Studio dei rivelatori odierni : risultati

Table 2: Expected events in liquid scintillator detectors, supernova at 10 *kpc*

Interaction	Non adiabatic			NH ad		
	LVD	BRX	KAM	LVD	BRX	KAM
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$	247	55	257	246	55	257
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	9	4	13	8	4	12
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	3	1	3	3	1	4
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	3	1	3	3	1	3
$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + {}^{12}\text{C} + \gamma_{15.1\text{MeV}}$	6	3	10	6	3	10
$\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* + e^-$	7	-	-	8	-	-
$\bar{\nu}_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Mn} + e^+$	2	-	-	2	-	-
$\nu_x + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow \nu_x + {}^{56}\text{Fe}^*$	4	-	-	4	-	-
$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$	-	9	30	-	9	30
Neutronization peak	0.17	0.06	0.19	0.07	0.02	0.08
TOT	281	73	316	280	73	316

Table 3: Expected events in liquid scintillator detectors, supernova at 10 *kpc*

Interaction	IH ad		
	LVD	BRX	KAM
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$	175	39	182
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	8	4	12
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	3	1	3
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	3	1	3
$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + {}^{12}\text{C} + \gamma_{15.1\text{MeV}}$	6	3	10
$\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* + e^-$	7	-	-
$\bar{\nu}_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Mn} + e^+$	2	-	-
$\nu_x + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow \nu_x + {}^{56}\text{Fe}^*$	4	-	-
$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$	-	9	30
Neutronization peak	0.17	0.06	0.19
TOT	208	57	240

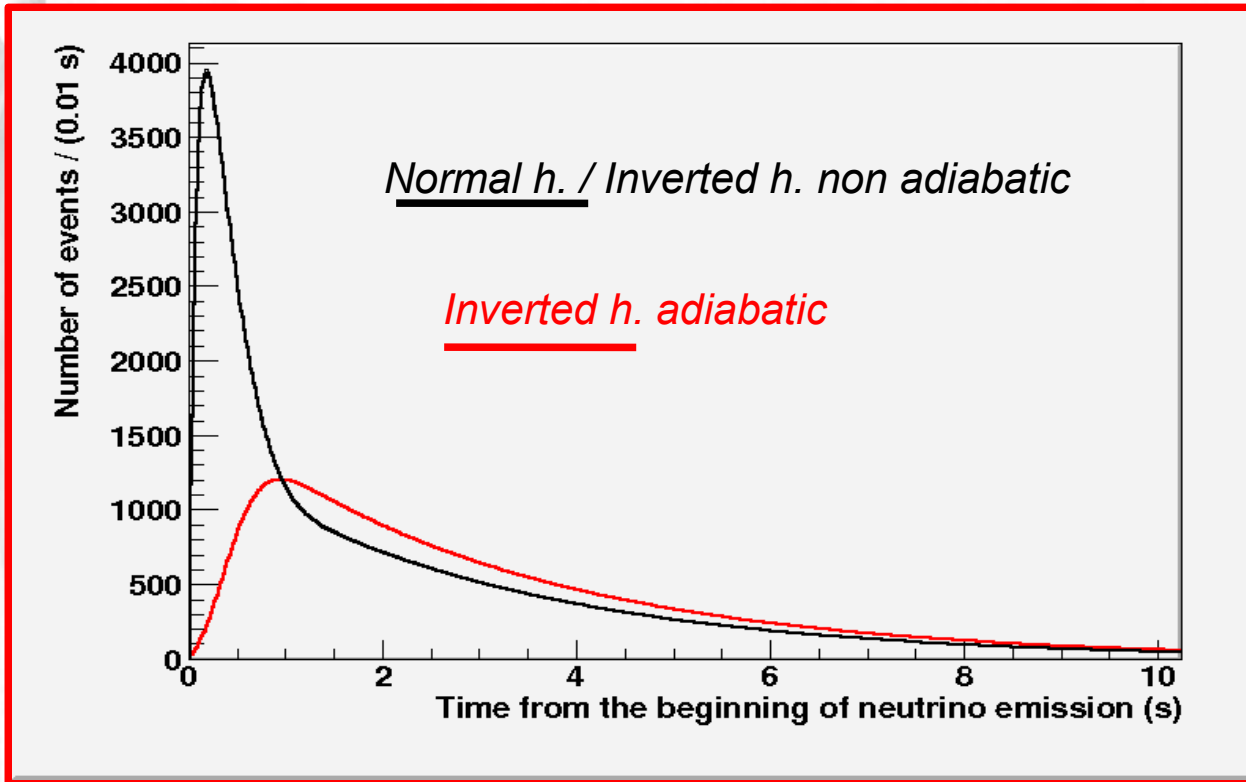
Scintillatori liquidi: LVD, Borexino (BRX), KamLAND (Kam)

Table 5: Expected events in water Cherenkov detectors

Interaction	Non adiabatic		NH ad		IH ad	
	SK	IC	SK	IC	SK	IC
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$	4233	516010	4233	516010	3022	423006
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	165	15719	158	15183	151	14628
$\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{16}\text{F} + e^-$	36	7159	46	9413	36	7159
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{16}\text{N} + e^+$	44	7285	44	7285	54	10252
$\nu_x + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_x + {}^{16}\text{O} + \gamma$	34	487	34	487	34	487
Neutronization peak	2.6	208	1.1	86	2.6	208
TOT	4515	546868	4516	548464	3300	455740

Water Cherenkov: Super Kamiokande (SK), Ice Cube (IC)

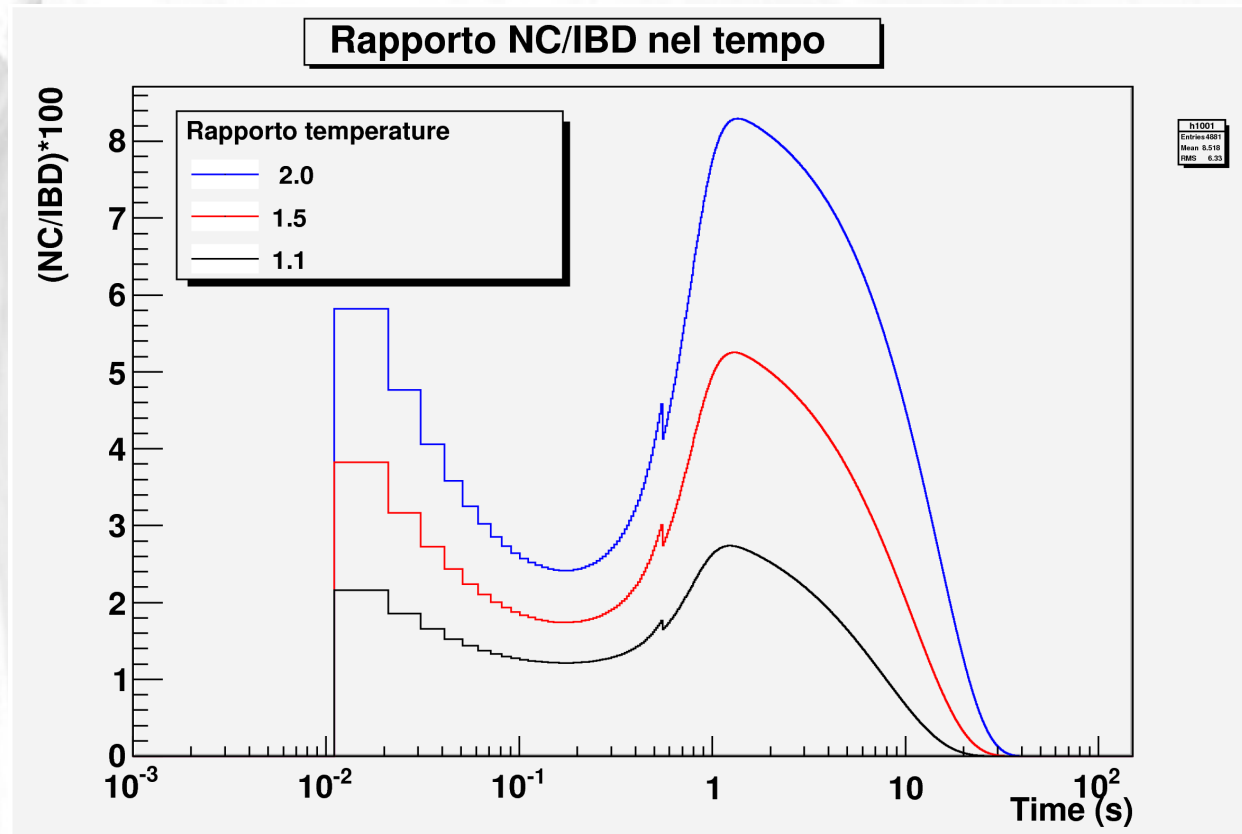
Studio dei rivelatori odierni : risultati



Netta differenza
nell'evoluzione
temporale del
segnale:
rapporto
picco/plateau

Dipende dal neutrino come particella ed è *indipendente*
dai parametri astrofisici della stella che li emette.

Studio dei rivelatori odierni : risultati



*Il rapporto tra
interazioni a
corrente neutra e
interazioni IBD nel
tempo, a seconda
del rapporto tra le
temperature di
neutrosfera.*

*Rendendosi indipendenti dallo scenario di
oscillazione si sondano i parametri astrofisici.*

Studio dei rivelatori odierni

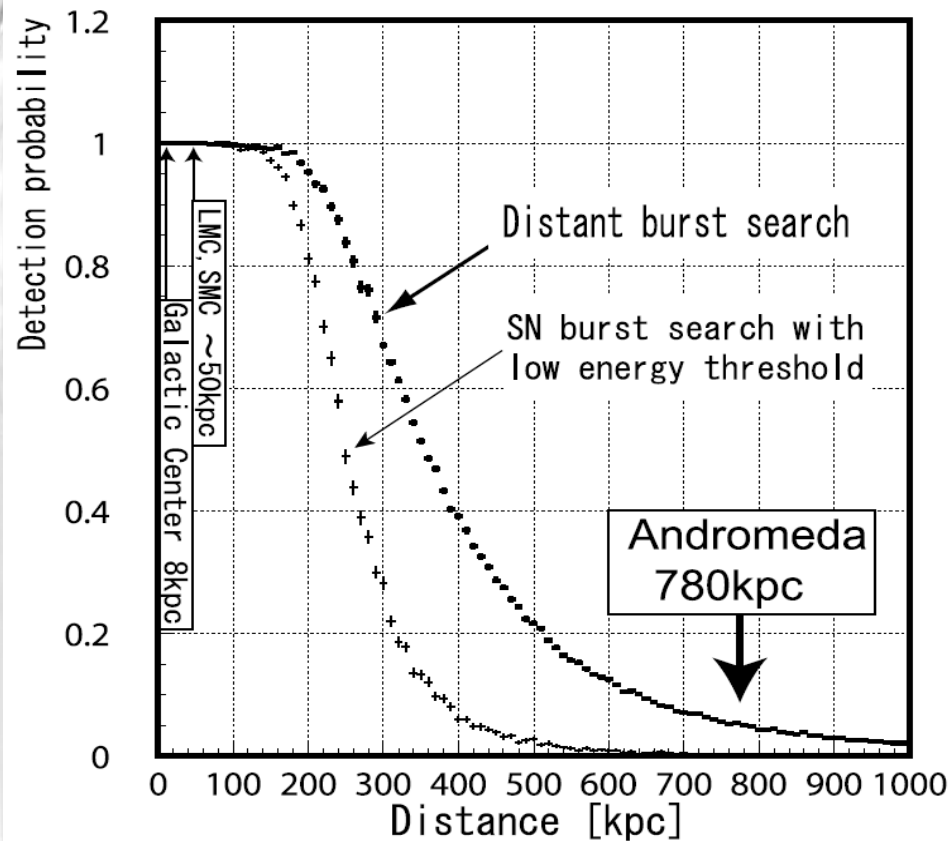
*Descrizione generale dei rivelatori, e **calcolo di segnali attesi** in ognuno di essi con l'applicazione del modello di emissione neutrinica sotto esame.*

***Discussione delle curve di luce** e delle possibilità di distinguere lo scenario di oscillazione.*

*Illustrazione del **metodo delle correnti neutre** come strumento per sondare i parametri astrofisici. Loro sensibilità al variare delle temperature di emissione.*

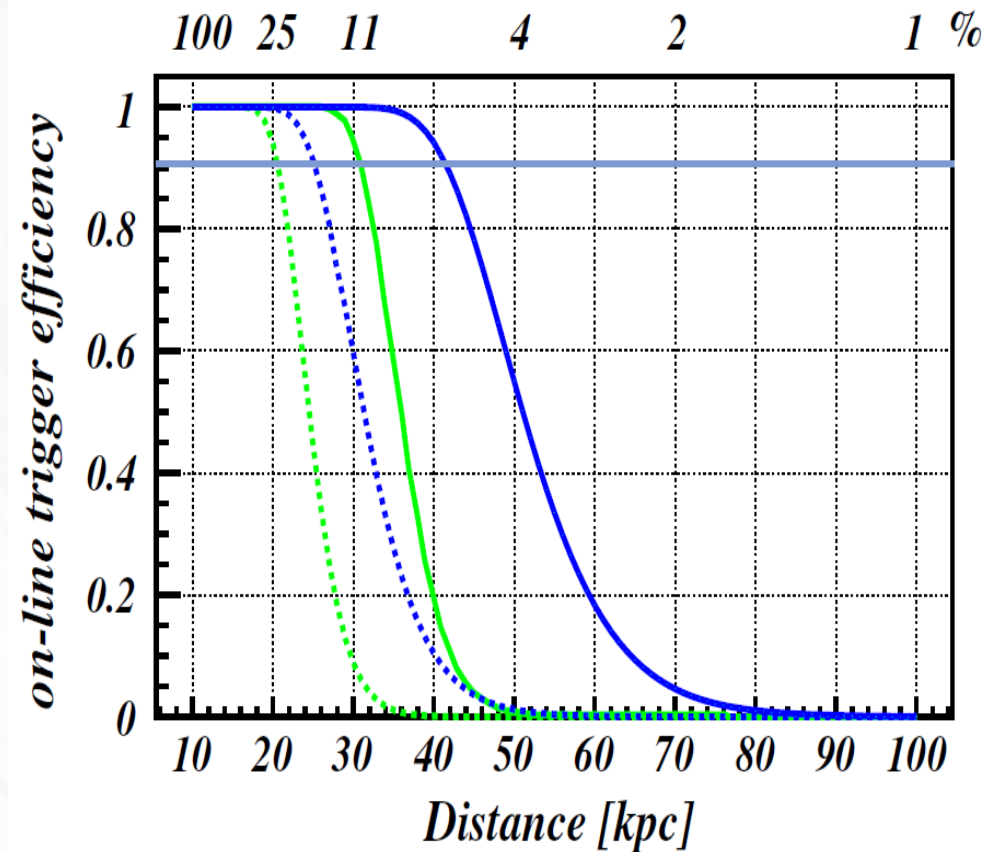
Articolo in preparazione in collaborazione col gruppo teorico dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Aumento di sensibilità



Super Kamiokande

The Astrophysical Journal 669 (2007) 519-524



Large Volume Detector

LVD Coll., Astroparticle Physics 28 (2008) 516-522

Aumento di sensibilità

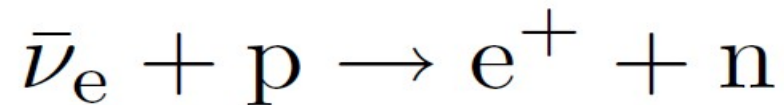
$$S/N \propto \frac{M \cdot \epsilon}{D^2} / \sqrt{N_{bk}}$$

La strada non è solo l'aumento della massa, M

*Si cerca una **selezione** che lasci l'efficienza ϵ inalterata, o addirittura migliore, facendo diminuire N_{bk} in modo importante.*

Aumento di sensibilità

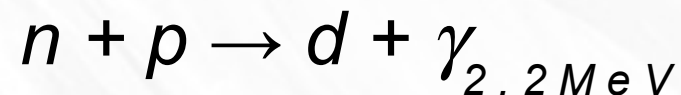
Principale canale di interazione



Coincidenza

segnale prompt (e^+) - segnale ritardato (cattura n)

Già ora avviene con cattura su protone ($\tau = 185 \mu s$)



Drogaggio dello scintillatore liquido con un ottimo
catturatore di neutroni : il ***Gadolinio***

Aumento di sensibilità : il Gd

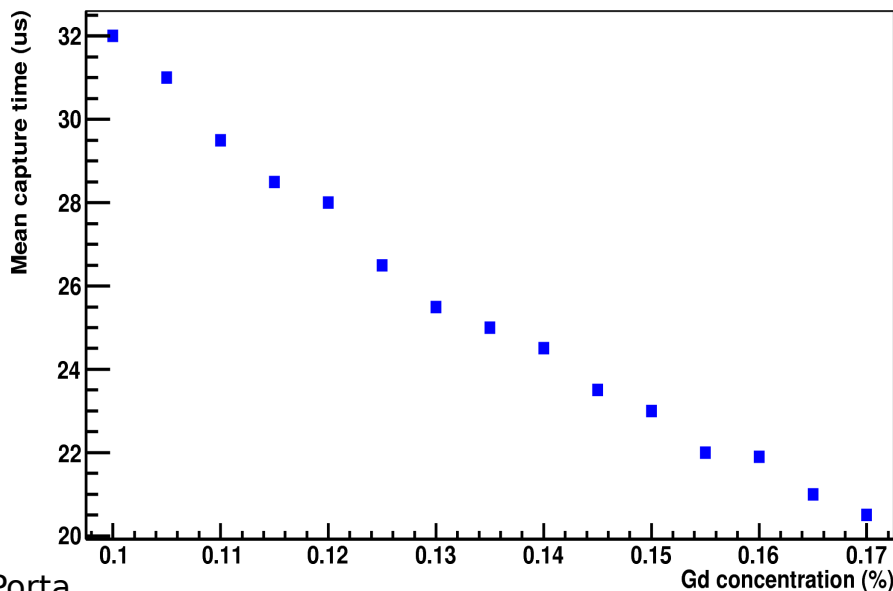
Vantaggi rispetto all'Idrogeno:

aumento efficienza di cattura → segnale

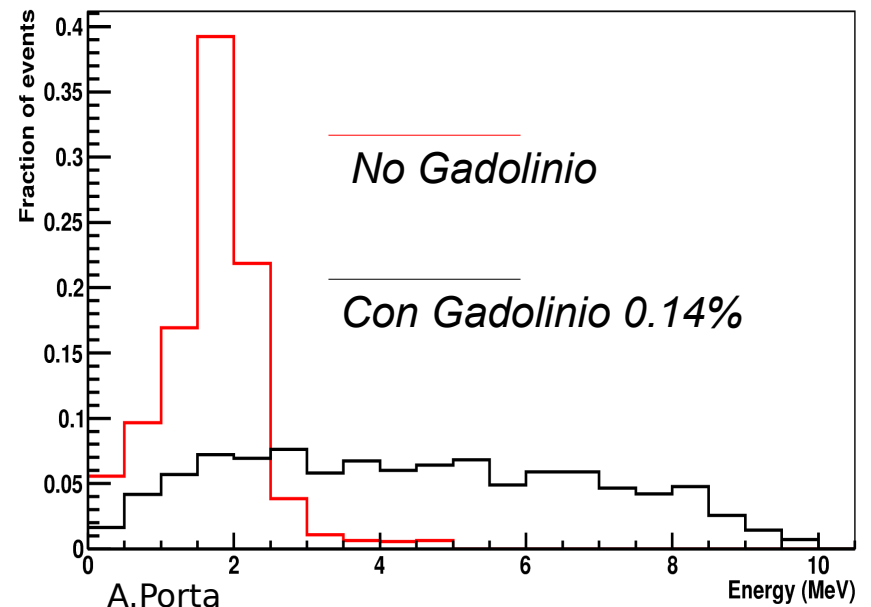
maggior rilascio energetico → segnale e reiezione fondo

minor tempo di cattura → reiezione fondo

Tempo medio di cattura



Rilascio di energia



Aumento di sensibilità : il Gd

Quale sarebbe l'effetto sulla sensibilità a burst di neutrini se tutto LVD fosse dopato con Gd (0.14%)?

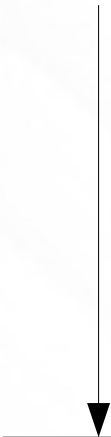
Calcolo del numero di segnali neutrinici attesi dopo drogaggio con Gd, per vari possibili tagli in energia.

Valutazione del nuovo background dell'esperimento, simulando la risposta al flusso di neutroni in galleria.

Disegno delle nuove curve di sensibilità e confronto con quelle attuali.

Aumento di sensibilità : il Gd

E_{th} [MeV]	η_n [%]	$R(E_{th})$ [s^{-1}]	$P(E_{th})$	S/N
0.5	79	330	$3 \cdot 10^{-2}$	3.1 $\delta t = 85 \mu s$
1.0	75	190	$2 \cdot 10^{-2}$	3.6
1.5	71	47	$4 \cdot 10^{-3}$	7.7
2.0	65	21	$2 \cdot 10^{-3}$	10.0
2.5	60	7	$6 \cdot 10^{-4}$	16.9
3.0	54	2.1	$2 \cdot 10^{-4}$	26.3
No Gd	58	240	0.16	1.0 $\delta t = 650 \mu s$



E_{th} → soglia in energia sul segnale ritardato

η_n → efficienza di rivelazione della cattura

$R(E_{th})$ → rate di fondo in un contatore sopra E_{th}

$P(E_{th})$ → probabilità di avere un segnale dal fondo nella finestra di ricerca, δt

S/N → rapporto segnale rumore

Aumento di sensibilità : il Gd

	$E \geq 7MeV$			$E \geq 10MeV$		
Data selection	N_ν	$f_{bk}[\text{Hz}]$	$D50\%[\text{kpc}]$	N_ν	$f_{bk} [\text{Hz}]$	$D50\%[\text{kpc}]$
No selection	230	$2 \cdot 10^{-1}$	37	215	$3 \cdot 10^{-2}$	49
Gd $E_{th} = 0.5MeV$	182	$6 \cdot 10^{-3}$	52	170	$8 \cdot 10^{-4}$	68
Gd $E_{th} = 1.0MeV$	172	$3 \cdot 10^{-3}$	55	161	$5 \cdot 10^{-4}$	66
Gd $E_{th} = 1.5MeV$	163	$8 \cdot 10^{-4}$	66	153	10^{-4}	75
Gd $E_{th} = 2.0MeV$	150	$3 \cdot 10^{-4}$	63	140	$5 \cdot 10^{-5}$	72
Gd $E_{th} = 2.5MeV$	138	10^{-4}	71	129	10^{-5}	69
Gd $E_{th} = 3.0MeV$	124	$3 \cdot 10^{-5}$	68	116	$5 \cdot 10^{-6}$	65

N_ν → Segnali di ν per un core collapse a 10 kpc

f_{bk} → Frequenza di fondo

$D50\%$ → Distanza oltre cui la probabilità di rivelazione del burst neutrino scende sotto il 50%.

Non tiene ancora conto del flusso di neutroni in galleria.

Aumento di sensibilità : il Gd

PREPARED FOR SUBMISSION TO JCAP

Doping the 1 Kton Large Volume Detector with Gd

M.Aglietta,^{a,b} A.Bonardi,^{b,c} G.Bruno,^{d,e} W.Fulgione,^{a,b} E.Kemp,^f
A.A.Machado,^e A.Malgin,^g A.Molinario,^b A.Porta^b and C.Vigorito^{b,c}

^aIstituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, INAF, Corso Fiume 4, Torino, Italy

^bINFN, Via Pietro Giuria 1, Torino, Italy

^cUniversity of Torino, Via Pietro Giuria 1, Torino, Italy

^dUniversity of L'Aquila,L'Aquila, Italy

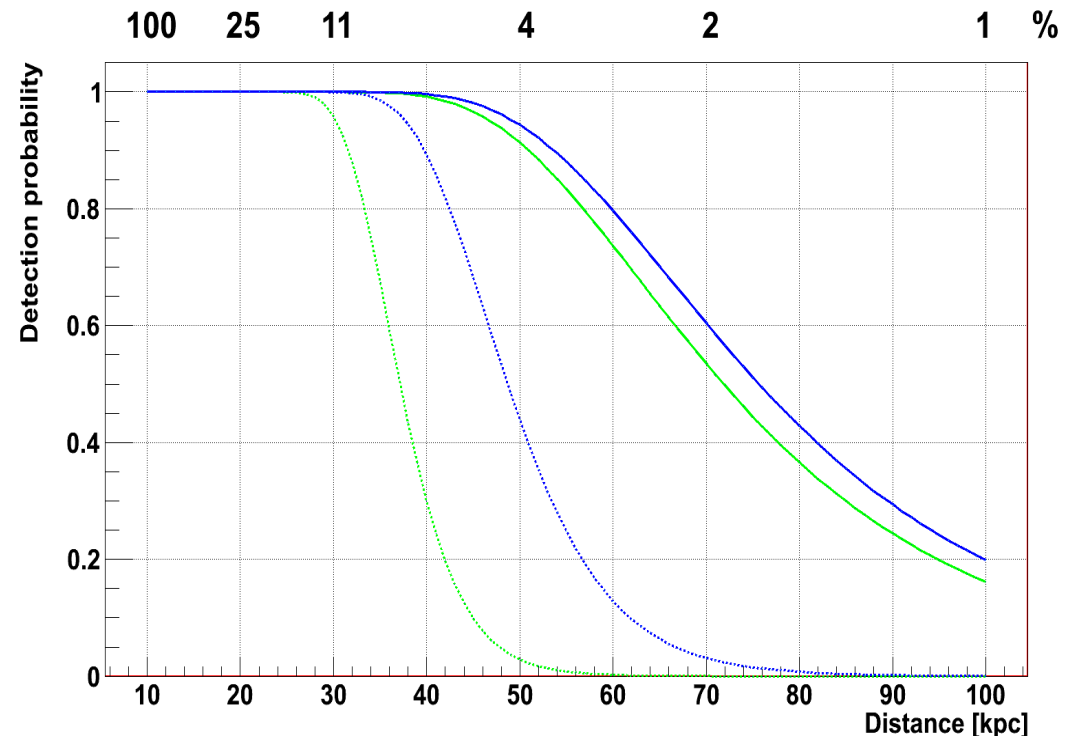
^eLaboratori Nazionali del GranSasso, INFN, s.s. 17bis Km 18+910, Assergi (AQ), Italy

^fUniversity of Campinas, UNICAMP, Campinas, San Paolo, Brasil

^gInstitute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: walter.fulgione@to.infn.it

Abstract. The Large Volume Detector (LVD) in the Gran Sasso Laboratory of INFN is an observatory mainly devoted to the search of neutrinos from core collapse supernovae. In this paper we evaluate the improvements that LVD can obtain when all its active scintillator mass (1 kton) is doped with a small amount (0.14% in weight) of Gadolinium. We simulated neutron captures following $\bar{\nu}_e$ inverse beta decay reactions in one LVD counter (1.2 ton) with Gd doped liquid scintillator and we obtained an efficiency for the detection of this process of $\eta_{\text{Gd}} = 80\%$ and a mean capture time $\tau = 24 \mu\text{s}$. This implies a gain of a factor 3.9 in the signal to noise ratio for neutron capture detection with respect to the undoped liquid scintillator. Due to the energy spectrum of the released γ , there is the possibility after a trigger to select only those pulses whose energy is greater than a certain value E_{th} . The best results in terms of the distance from which a $\bar{\nu}_e$ burst from core collapse supernovae is detected are obtained for different trigger energies. In particular it is demonstrate that doping the 1 Kton Large Volume Detector with Gd would assure a 90% detection efficiency at the distance of the Large Magellanic Cloud (52 kpc).



Curve tratteggiate: sensibilità attuale

Curve continue: sensibilità con Gd

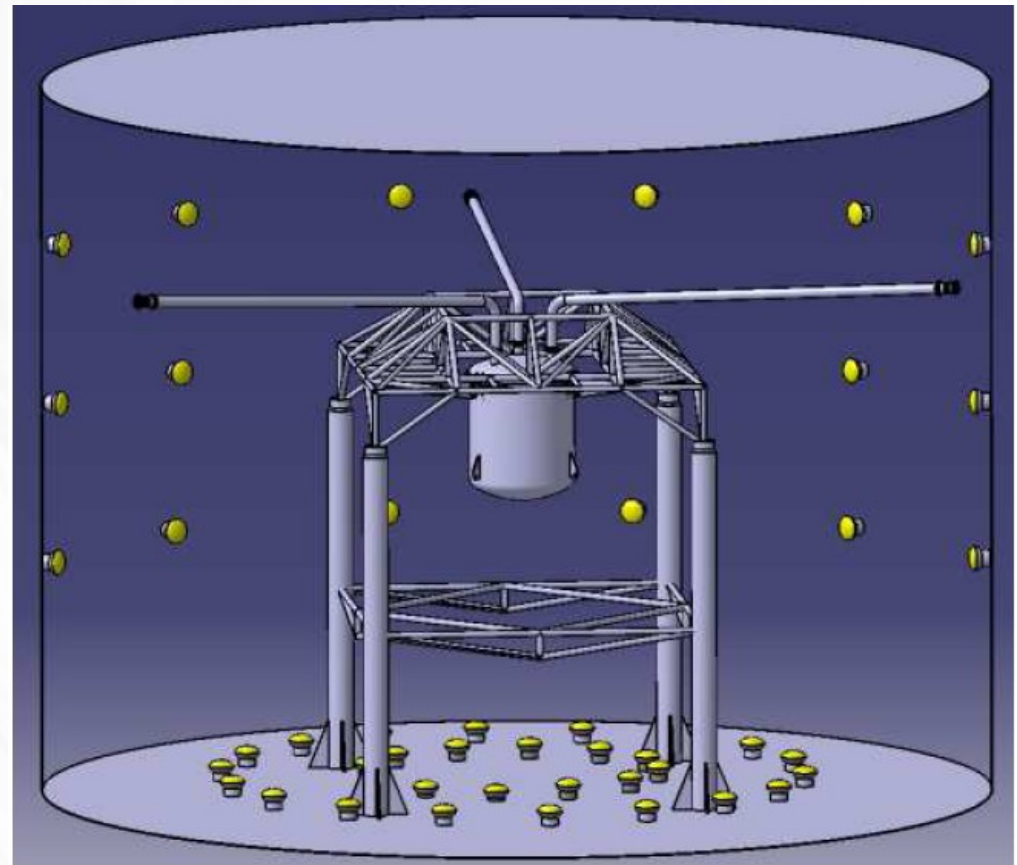
Verde per selezione trigger con energia > 7MeV, blu > 10MeV

Prospettive future

*Possibilità offerte in astrofisica
neutrinica dai nuovi rivelatori
per ricerca di Dark Matter, in
particolare **Xenon1T**.*

*Rivelatore criogenico a
bassissima soglia (100eV),
doppia fase.*

*Possibilità di osservare ν a
energie del MeV attraverso lo
scattering coerente sui nuclei
di Xenon.*



Sezione d'urto 300 volte quella per IBD alla stessa energia

Rinculo a energie dell'ordine del centinaio di eV

Analisi dati

Search for Supernova Neutrino Bursts at the LVD Observatory:
results on 6000 days of continuous monitoring

N.Y.Agaonova¹, M.Aglietta^{2,4}, P.Antonioli⁵, G.Bari⁵, A.Bonardi^{2,4}, V.V.Boyarkin¹,
G.Bruno^{2,6}, W.Fulgione², P.Galeotti^{2,3,4}, M.Garbini^{5,7}, P.L.Ghia^{2,6}, P.Giusti⁵, F.Gomez^{2,4},
E.Kemp⁸, V.V.Kuznetsov¹, V.A.Kuznetsov¹, A.S.Malguin¹, H.Menghetti⁵, A.Molinario^{2,3,4},
A.Pesci⁵, R.Persiani⁵, I.A.Pless⁹, A.Porta^{2,5}, V.G.Ryasny¹, O.G.Ryazhskaya¹,
O.Saavedra^{2,3,4}, G.Sartorelli⁵, M.Selvi⁵, C.Vigorito^{2,3,4}, L.Votano⁶, V.F.Yakushev¹,
G.T.Zatsepin¹, A.Zichichi⁵

Received _____; accepted _____

¹Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Physics of Interplanetary Space, INAF, Torino, Italy

³Department of Physics, University of Torino, Torino, Italy

⁴INFN-TORINO, Torino, Italy

⁵University of Bologna and INFN-Bologna, Italy

⁶INFN-LNGS, Assergi, Italy

⁷Museo Storico della Fisica, Centro Studi e Ricerche "E.Fermi", Rome, Italy

⁸University of Campinas, Campinas, Brazil

⁹Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

¹⁰INFN-LNF, Frascati, Italy

*Partecipazione all'**analisi**
dati di LVD per
ricerca di neutrini da
supernova*

*Contributo in particolare
nella discussione dei
candidati selezionati*

*Definizione di tecniche
di selezione fine.*

Sommario

Il mio dottorato si svolge nel campo dell'astrofisica neutrinica, con aspetti sia teorici che sperimentali

Ho affrontato lo studio dettagliato della risposta dei rivelatori neutrinici oggi esistenti a un preciso modello di emissione di neutrini da collasso gravitazionale.

Intendo discutere i metodi per la discriminazione tra scenari di oscillazione dei neutrini e per la determinazione dei parametri astrofisici a partire dai segnali previsti.

Sto studiando le potenzialità del drogaggio del liquido scintillatore di LVD con Gadolinio.

Affronterò il calcolo delle interazioni attese per neutrini da collasso gravitazionale nei nuovi rivelatori criogenici per Dark Matter.

Sommario

*Collaboro all'analisi dati dell'esperimento LVD per la ricerca di burst
neutrinici*

*Prendo parte ai turni di controllo dell'esperimento LVD e a quelli del
network internazionale di rivelatori di neutini, SNEWS.*

*Ho presentato parte di questi lavori ad alcune conferenze:
International Cosmic Ray Conference 2009 (comunicazione),
Neutrino 2010 (poster), SIF 2010 (comunicazione).*