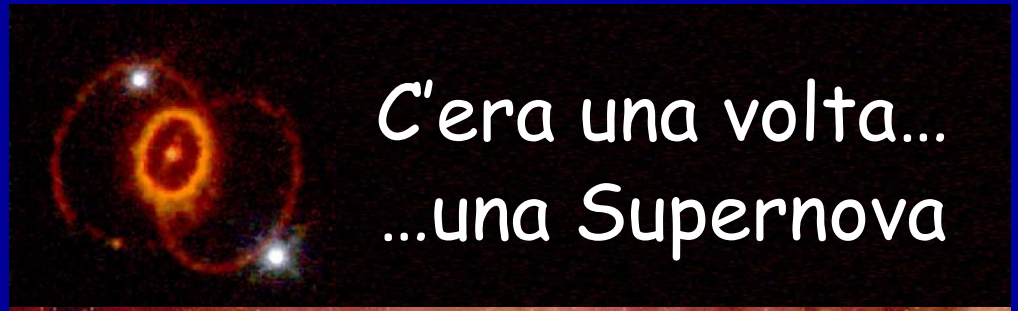


C'era una volta…
…una Supernova

Dip.to di Fisica Generale, INAF - IFSI Torino, INFN -Torino

Il 23 febbraio 1987, nella Grande Nube di Magellano, una stella finiva di vivere con una grande esplosione

Dopo vent'anni ci incontriamo per raccontare cosa abbiamo imparato da questo evento

SN1987a credit: Hubble Heritage Team

by Silvia Vernetto

Cristiani S. "*La SN1987A vista nell'ottico-infrarosso*"

Fulgione W. "*L'osservatorio neutrinico LVD*"

Galeotti P: "*Neutrini da Supernovae*"

Rizzella G. "*La SN1987A e la ricerca di onde gravitazionali*"

Ryazhskaya O. "*Il problema della radiazione di neutrini dalla SN1987A 20 anni dopo*"

Saavedra O. "*L'esperimento LSD al Mt. Bianco e la SN1987A*"

Tornambé A. "*La SN1987A e le altre SN vicine come sonde per la teoria dell'evoluzione stellare e per la cosmologia*"

Organizzatori:
Andrea Chiavassa Livio Ferrero,
Piero Galeotti, Carlo Morello
Oscar Saavedra

Torino, 9 Marzo 2007, Via P. Giuria 1, ore 14:00

Dip.to di Fisica Generale – Aula Magna

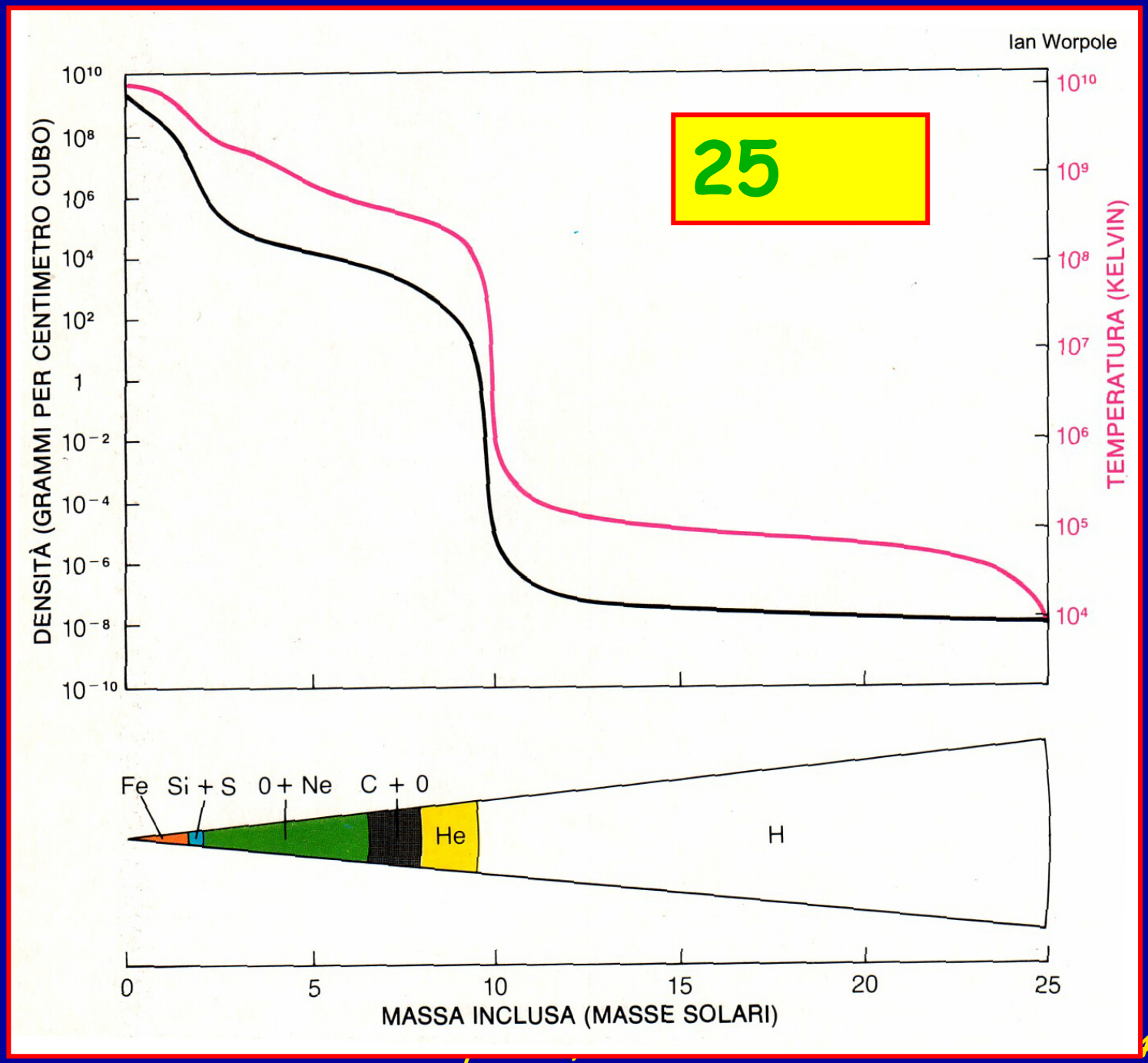
凡十一日沒三年三月乙巳出東南方大中祥符四
年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅
前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執
法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁沒明道元
年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三
日沒至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘
稍沒熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯
箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月
辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸
酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

宋史志卷九

Georg Raffelt, Max-Planck-Institut für Physik (München)

Sanduleak –69 202

Supernova 1987A
23 February 1987


Ian Worpole
25
DENSITÀ (GRAMMI PER CENTIMETRO CUBO)
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
TEMPERATURA (KELVIN)
10^{10}
10^{9}
10^{8}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
Fe
Si + S
0 + Ne
C + 0
He
H
0
5
10
15
20
25
MASSA INCLUSA (MASSE SOLARI)

Supernove di tipo II

- Condizioni fisiche della presupernova $T_c \approx 8\times10^9\,\mathrm{K}$ $\rho_c \approx 10^{10}\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$

- Collasso gravitazionale del core di stelle massive (1.3 $M_\odot$ – 2.5 $M_\odot$) in seguito alla fotodissiciazione nuclei di Ferro
- Neutronizzazione e emissione di neutrini, intrappolati nell'inviluppo

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

- Energia liberata: 10^{53} erg

$$e^+ e^- \rightarrow \nu_x \bar{\nu}_x$$

- Collasso gravitazionale violento del nucleo, in pochi secondi. Se la stella non viene completamente distrutta durante l'esplosione si può avere la formazione di una stella di neutroni o di un buco nero.
- Il collasso si arresta se il nucleo centrale raggiunge una densità $\rho \approx 10^{15}$ gm cm^{-3} con $M \leq 3\ M_{\odot}$: formazione di una ***stella di neutroni***
- Limite di stabilità di una stella di neutroni: limite di Chandrasekhar, con raggi molto minori
- Per masse maggiori il nucleo diviene un ***buco nero***

Collasso stellare

Il collasso stellare è inevitabile quando la massa del core M_C supera la massa di Chandrasekhar

$$M_{Ch} = 5.8 \cdot Y_e^2 M_O \approx 1.44 M_O$$

M_C aumenta per il bruciamento dei gusci intorno al core, M_{Ch} diminuisce perchè diminuisce Y_e in seguito a processi di neutronizzazione, creazione e annichilazione di coppie e fotodissociazione:

$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e, \quad \gamma + \gamma \rightarrow e^+ e^- \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e,$$

$$\gamma + {}^{56}Fe \rightarrow 13\,{}^4He + 4n, \quad \gamma + {}^4He \rightarrow 2p + 2n$$

$$M_c \geq M_{Ch} = 5.76 Y_e^2 M_0$$

$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e$$

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \rightarrow \nu_x + \overline{\nu_x}$$

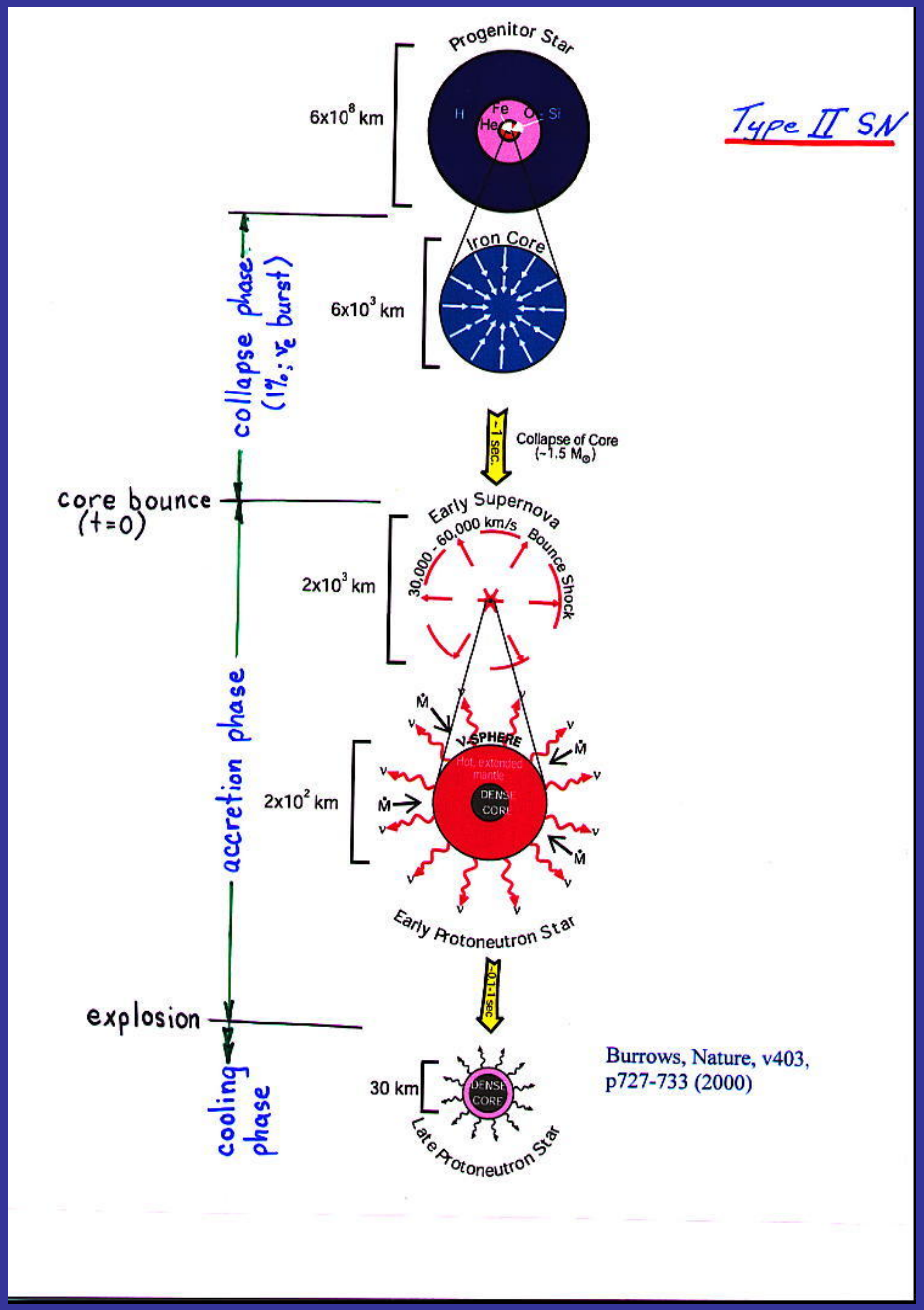
$$\gamma + {}^{56}Fe \rightarrow 13\,{}^{4}He + 4n$$

$$\lambda_\nu = \frac{1}{n\sigma}$$

$$\Delta E_B = \frac{GM^2}{R_{ns}} - \frac{GM^2}{R_c}$$

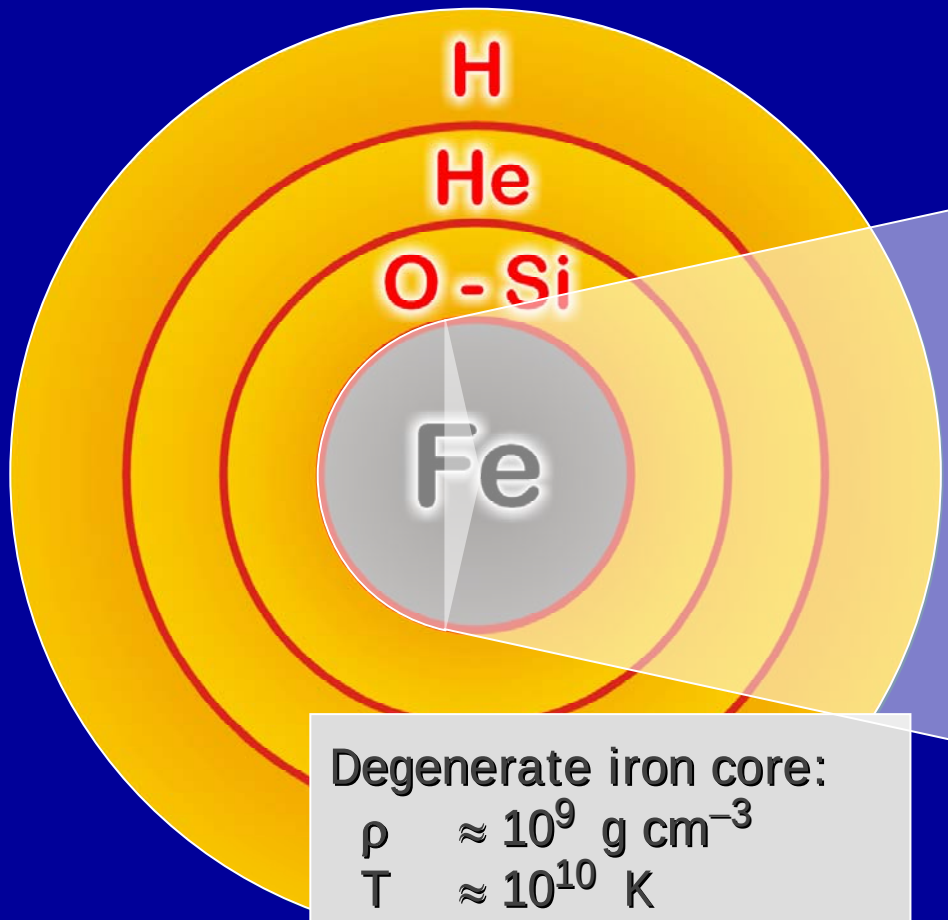
Binding energy emitted as

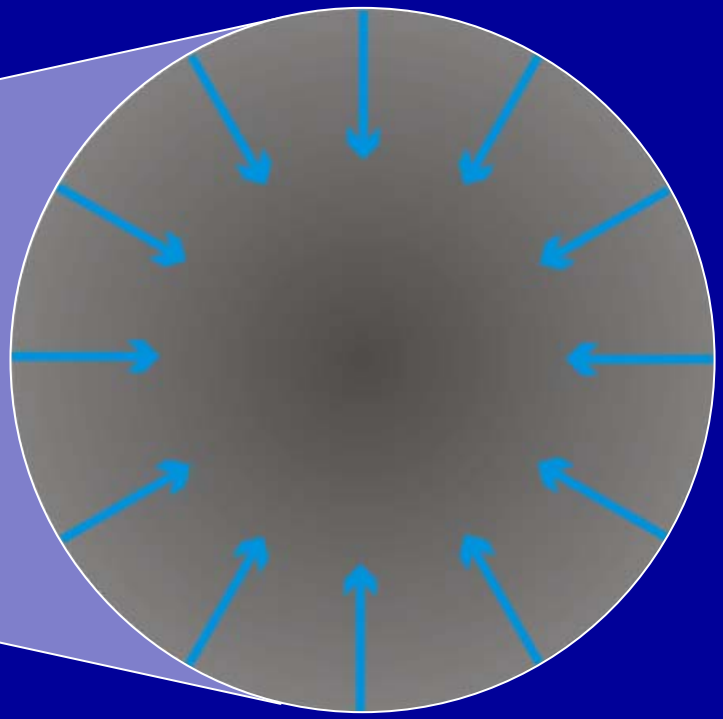
- 99% Neutrinos
- 1% Kinetic energy
- 0.01% Optical luminosity



Onion structure

Collapse (implosion)





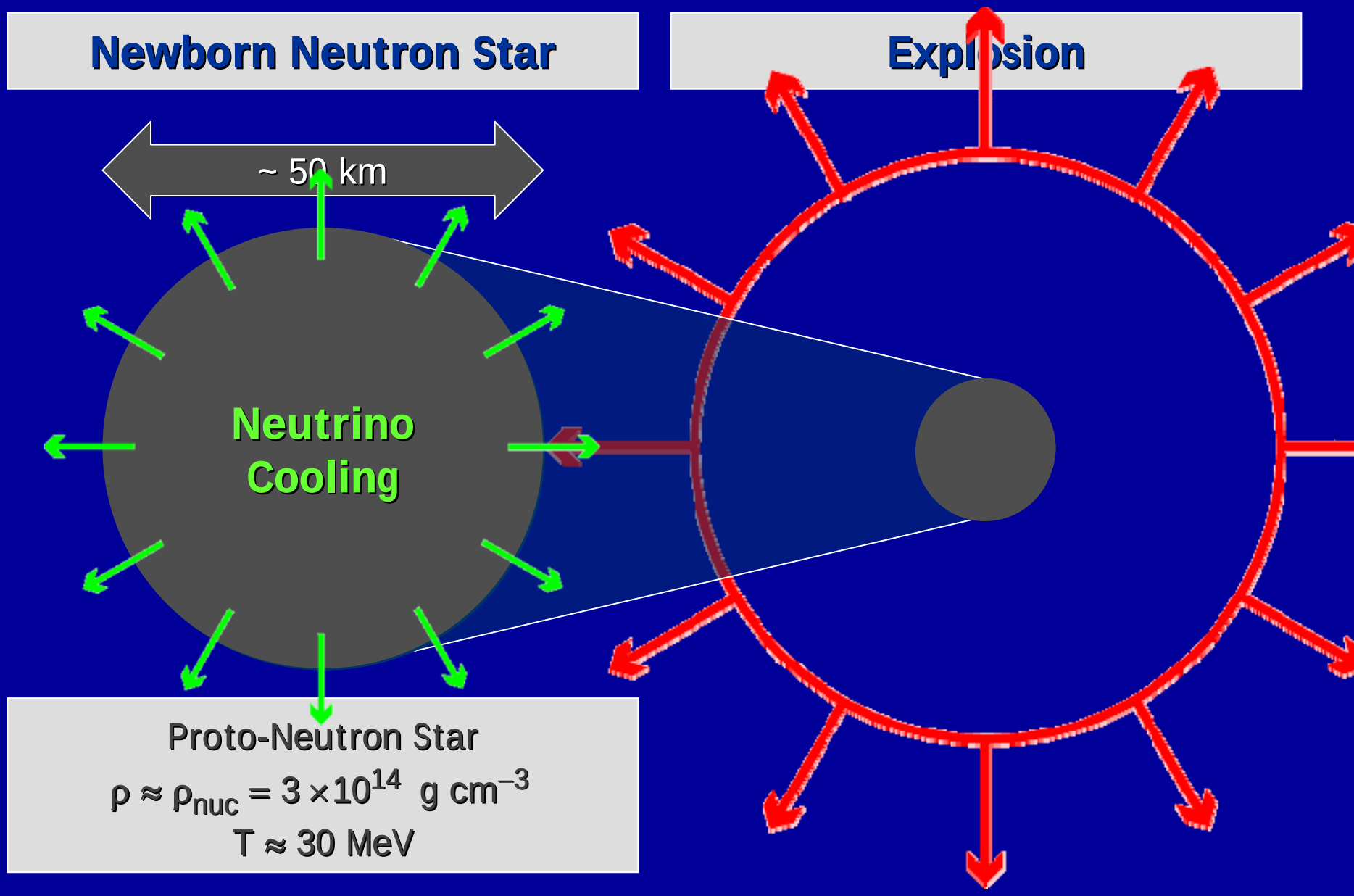
Degenerate iron core:

$\rho \approx 10^9$ g cm^{-3}

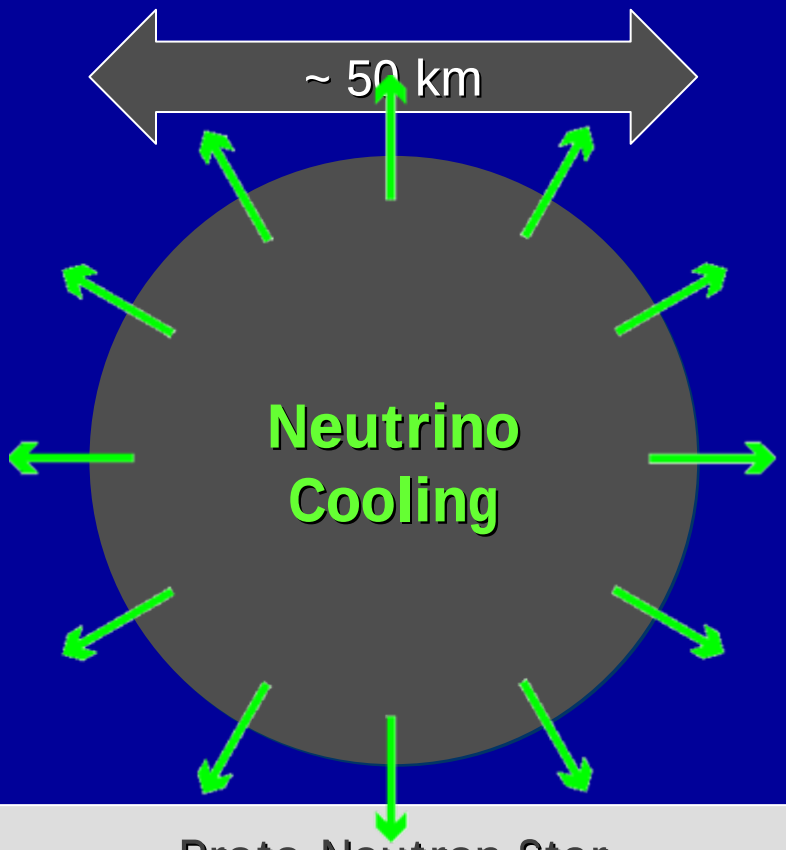
$T \approx 10^{10}$ K

$M_{Fe} \approx 1.5\ M_{sun}$

$R_{Fe} \approx 8000$ km


Newborn Neutron Star
Explosion
~ 50 km
Neutrino Cooling
Proto-Neutron Star
$\rho \approx \rho_{nuc} = 3 \times 10^{14}$ g cm^{-3}
T ≈ 30 MeV

Newborn Neutron Star



Proto-Neutron Star

$\rho \approx \rho_{nuc} = 3 \times 10^{14}$ g cm^{-3}

$T \approx 30$ MeV

Gravitational binding energy

$E_b \approx 3 \times 10^{53}$ erg $\approx$ 17% $M_{SUN}\, c^2$

This shows up as

99% Neutrinos

1% Kinetic energy of explosion
(1% of this into cosmic rays)

0.01% Photons, outshine host galaxy

Neutrino luminosity

$L_\nu \approx 3 \times 10^{53}$ erg / 3 sec
$\approx 3 \times 10^{19}\, L_{SUN}$

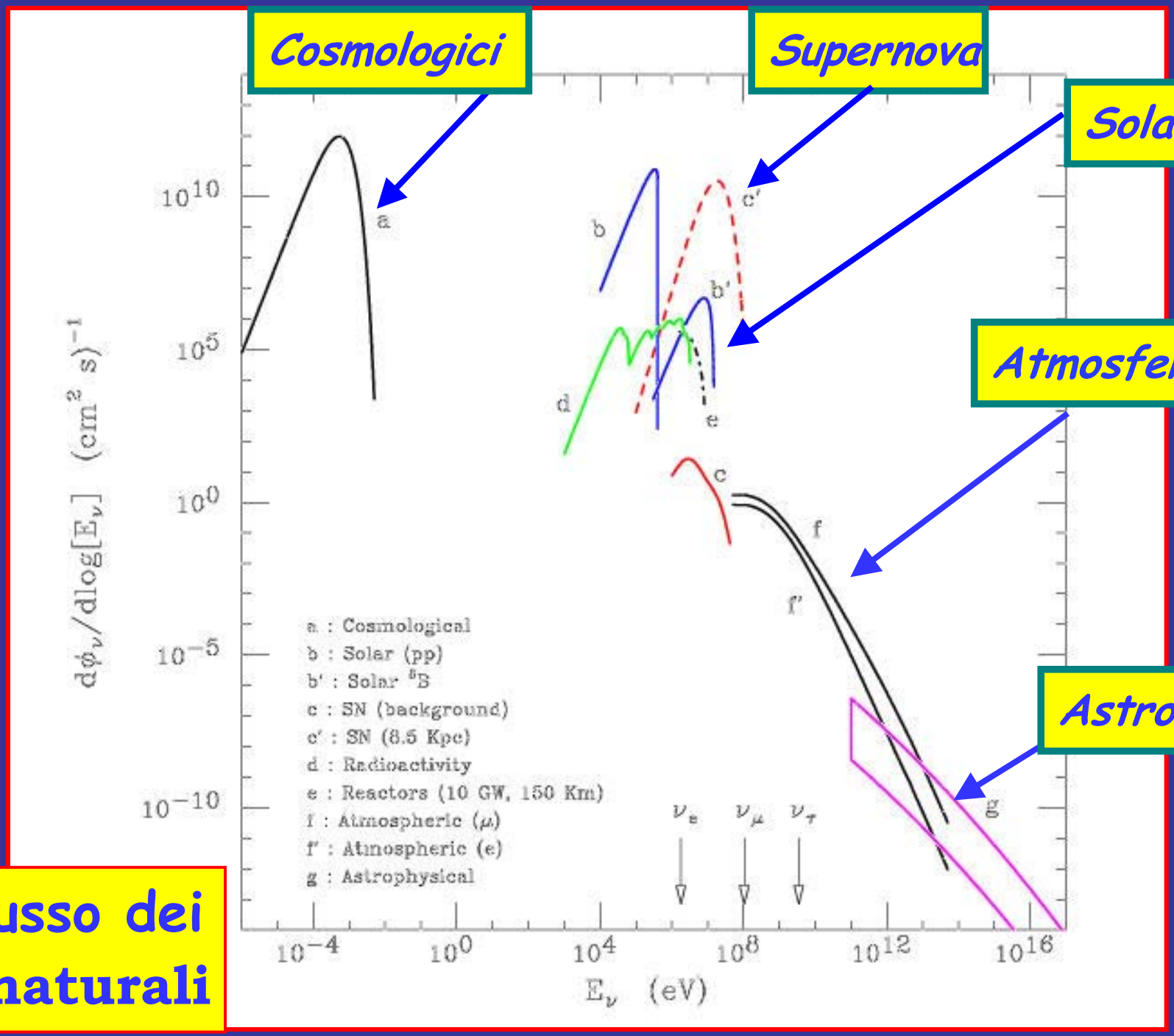
While it lasts, outshines the entire visible universe

Neutrini da collassi stellari

In un core stellare con $M_C \sim M_{Ch}$ ci sono ~ 10^{57} elettroni; quindi il numero massimo di neutrini da neutronizzazione emessi è 10^{57}. Poichè la loro energia media è ~ 10 MeV = 10^{-12} J, in totale l'energia emessa in questa fase è circa 10^{45} J, ossia ~ $10^{-2}\ M_C \cdot c^2$.

L'energia emessa in neutrini durante i processi di annichilazione e^+e^- è ~ 20-30 volte maggiore, ossia $\sim 3 \cdot 10^{46}$ J. Per un collasso al centro della Galassia (d~8.5 kpc) il flusso di ν_e e $\bar{\nu}_e$ a Terra è:

$$\Phi(\nu_e, \bar{\nu}_e) = \frac{\Phi_0(\nu_e, \bar{\nu}_e)}{6 \cdot 4\pi d^2} \approx 10^{16} (\nu_e, \bar{\nu}_e)\ \mathrm{m}^{-2}$$



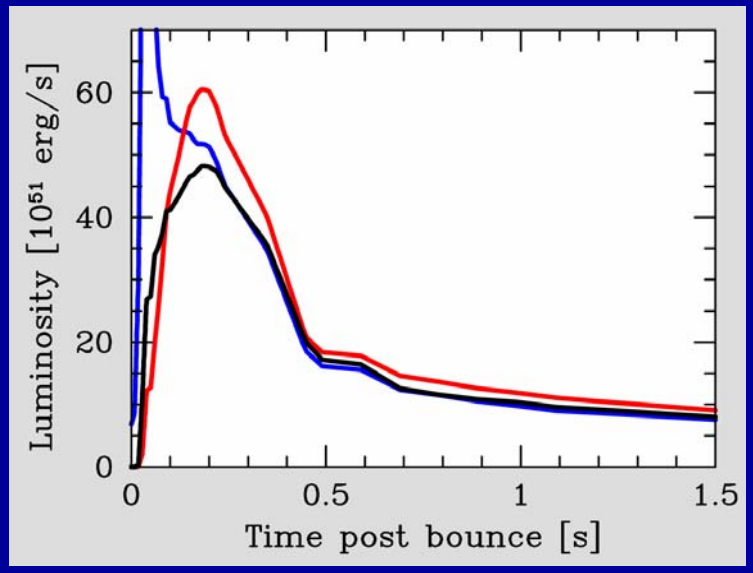
Flusso dei ν naturali

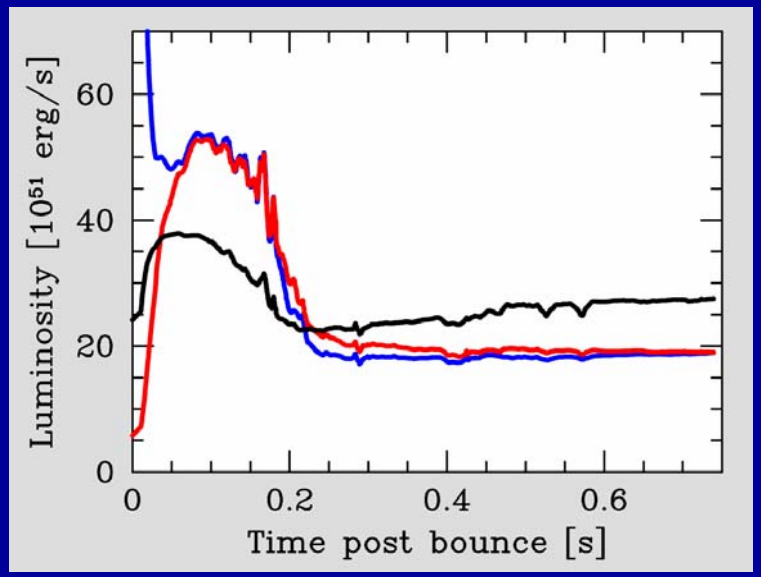
Fase del collasso	*1*	*2*	*3*
Energia totale in neutrini (10^{53} erg)	0,1	1,7	3
Energia media dei neutrini (MeV)	12	14	15
Durata temporale (s)	0,04	3,1	15

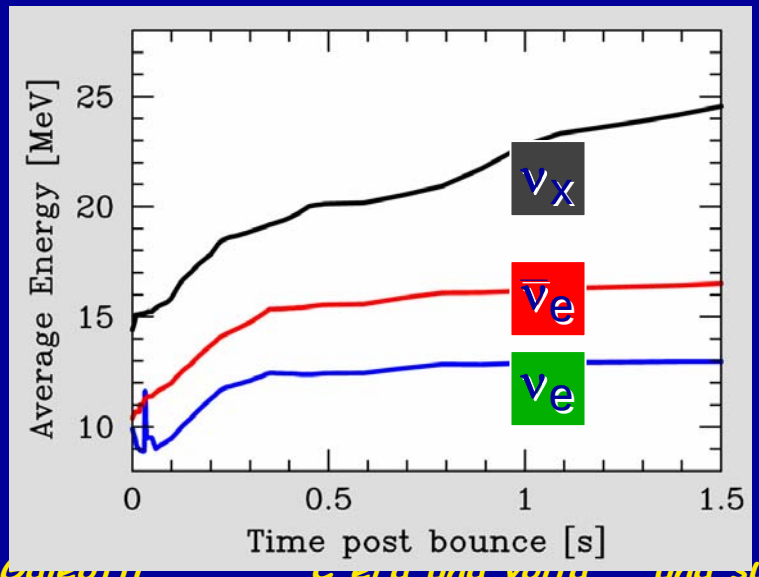
1. Formazione del core opaco ai neutrini (**neutrinosfera**).
2. Accrescimento dell'inviluppo sul core.
3. Raffreddamento Kelvin della neonata stella di neutroni calda.

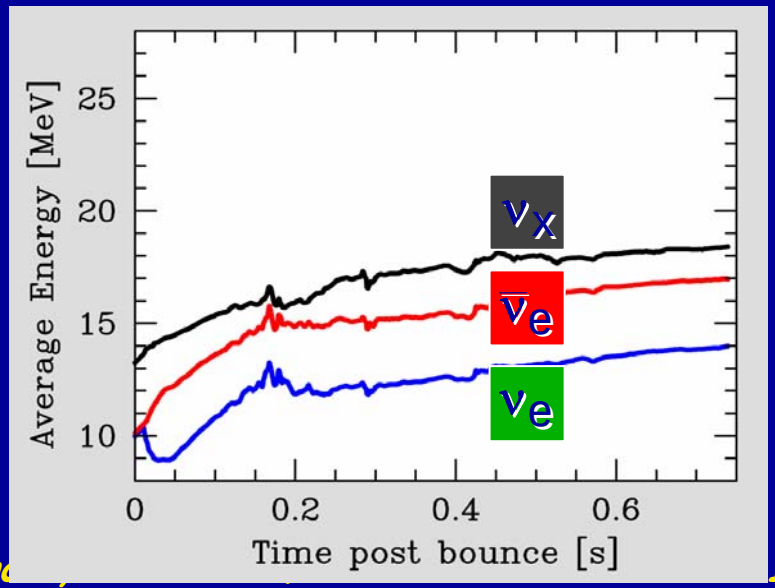
Livermore

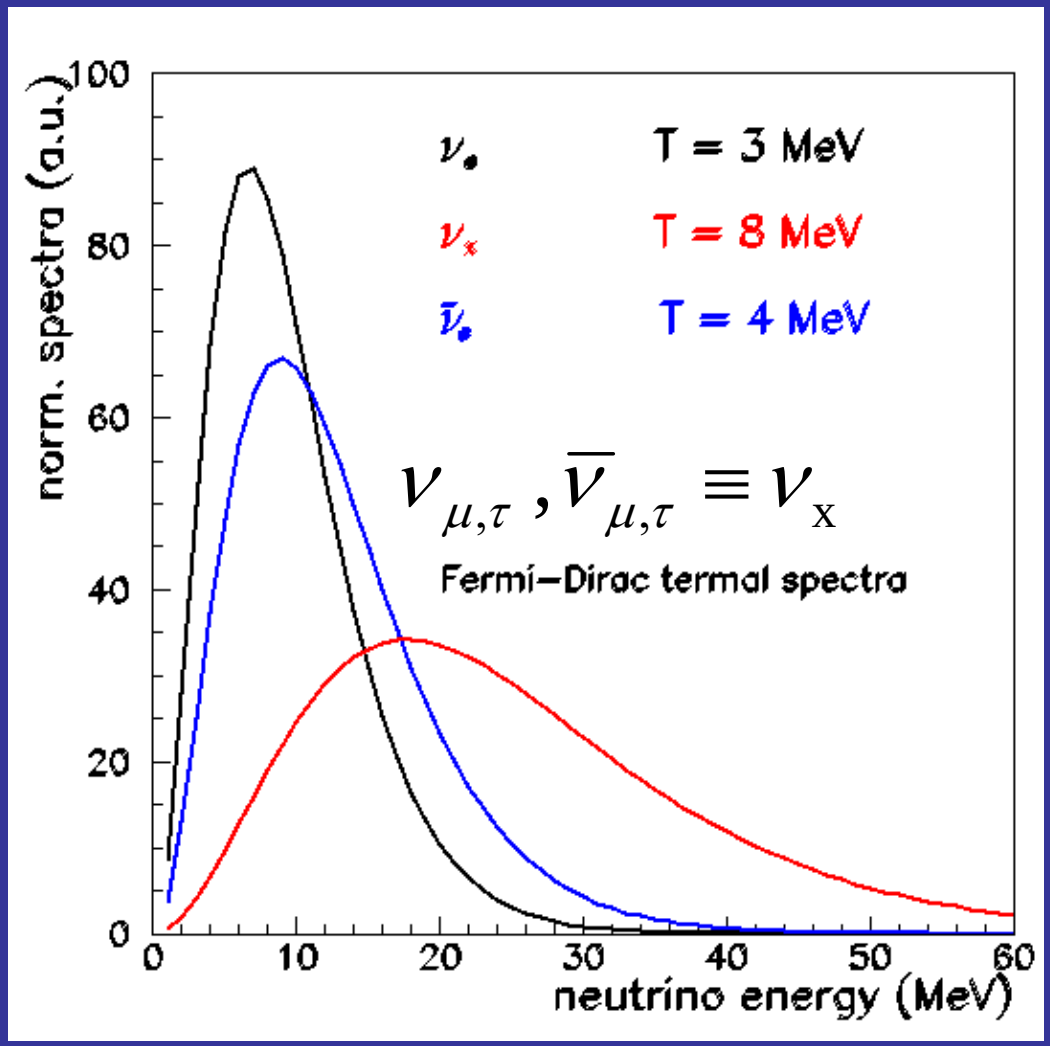
Garching











- Quasi-thermal (Fermi-Dirac) neutrino energy spectra from inner layers of collapsing star (neutrinospheres).
- Uncertainties on values of temperatures.
- Typically:

$$T_{\nu_e} \leq T_{\bar{\nu}_e} < T_{\nu_x}$$

Spettro di Fermi-Dirac

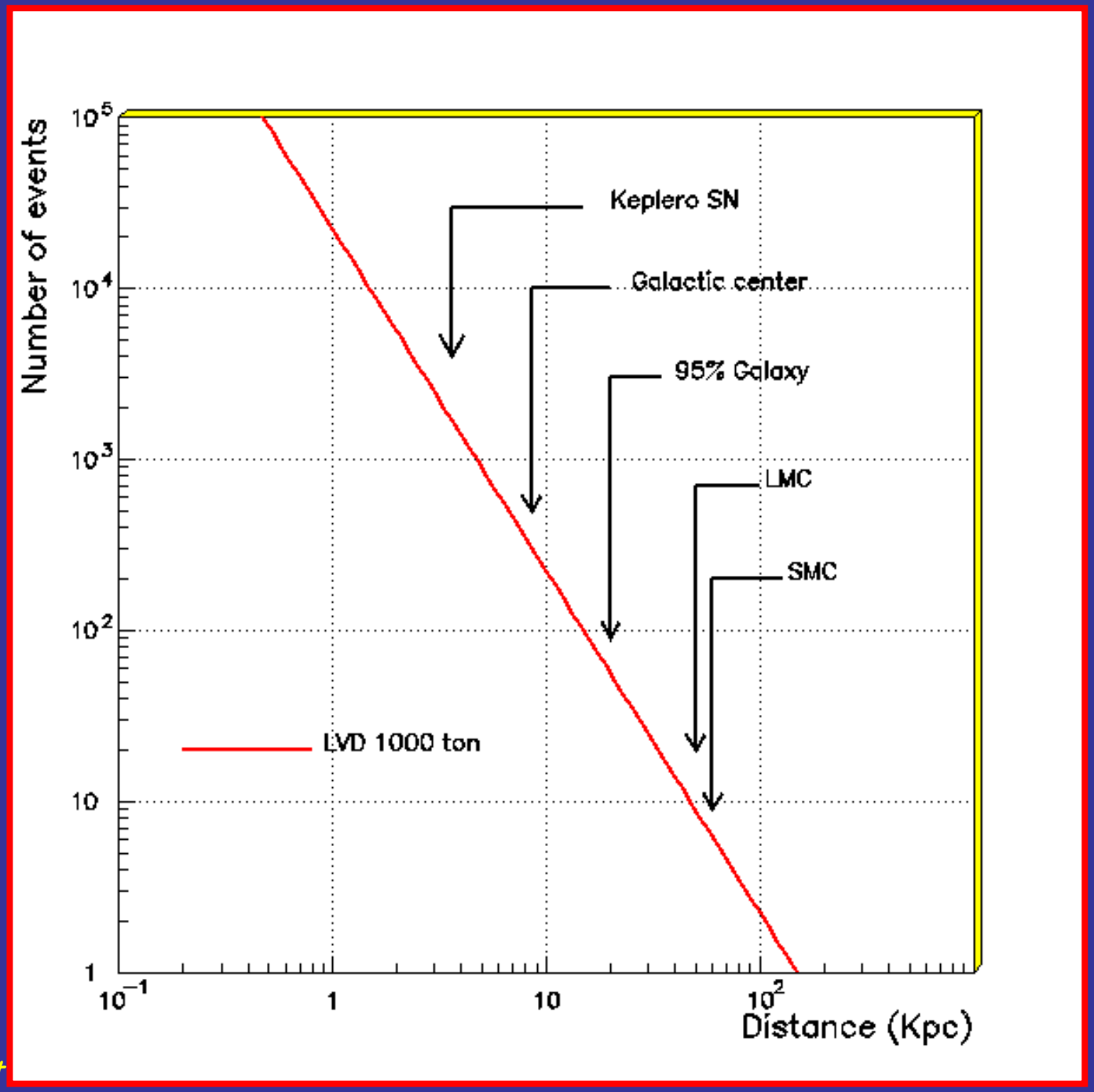
$$\frac{dN}{dE_\nu} = \frac{E_\nu^2}{\left(1+e^{E_\nu/kT}\right)} e^{-\alpha(E_\nu/kT)^2}$$

$$< E > = \frac{\int_0^\infty E \frac{dN}{dE} dE}{\int_0^\infty \frac{dN}{dE} dE} = \frac{kT \int_0^\infty x \frac{x^2}{1+e^x} dx}{\int_0^\infty \frac{x^2}{1+e^x} dx} = kT \frac{F_3(x)}{F_2(x)} = 3{,}15 kT$$

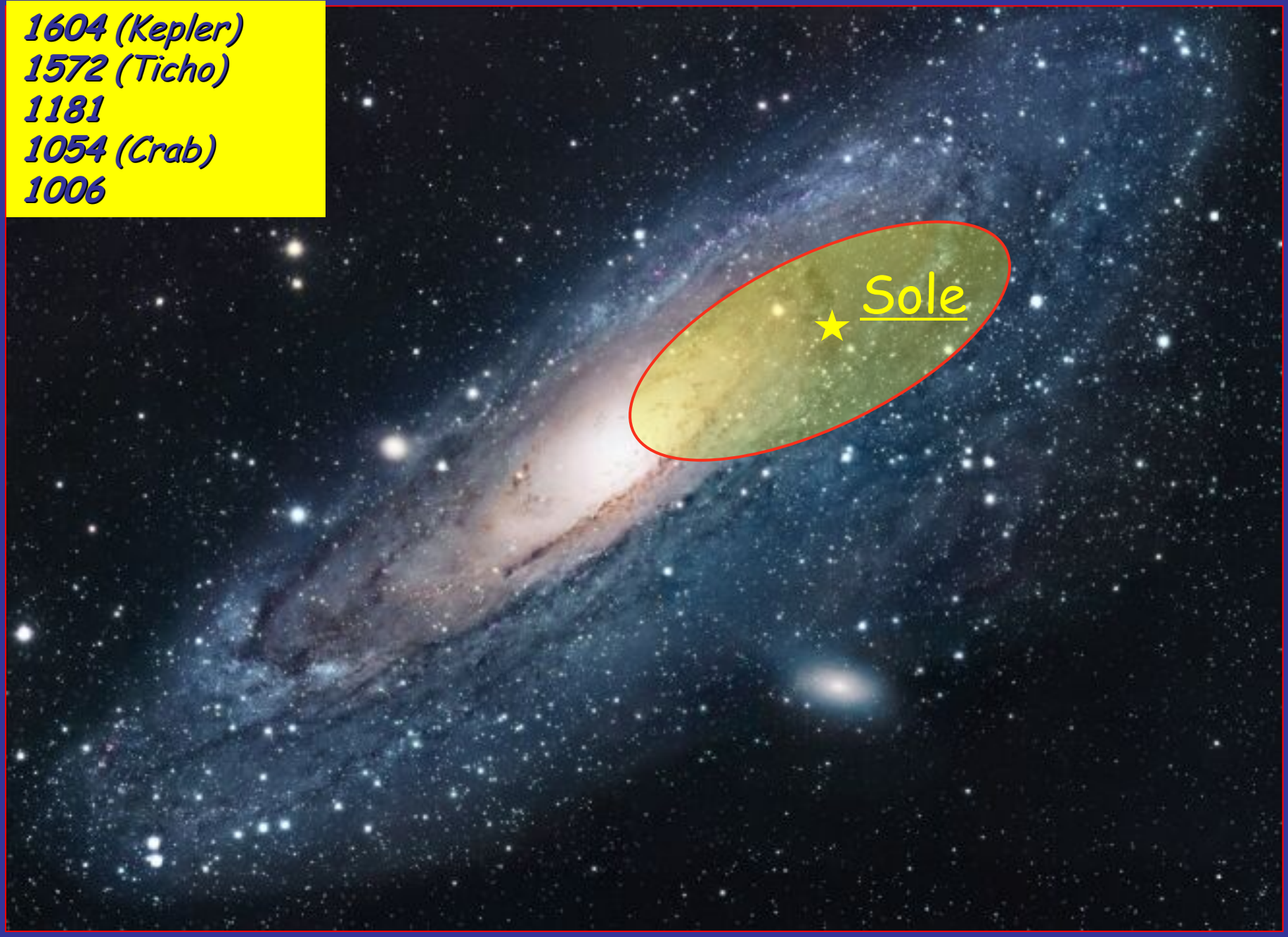
Numero di eventi attesi in un rivelatore

$$N(\tau, E_{th}, d) = q \cdot E_{Tot} \frac{N_p}{4\pi d^2} \int_0^\tau dt \int_{E_{th}}^\infty \frac{d\sigma}{E_\nu dE_\nu} dE_\nu$$

kT (MeV)	E_{th} (MeV)	t (s) 0,01	0,1	1	10	≥ 25
3	5	0,15	2,55	9,3	24,4	35,3
	10	0,08	1,33	4,8	12,7	18,3
	15	0,02	0,39	1,4	3,7	5,4
	20	0,00	0,07	0,3	0,7	1,0
4	5	0,23	4,0	14,5	38	55
	10	0,17	3,0	10,9	29	41
	15	0,09	1,6	5,7	15	22
	20	0,04	0,6	2,2	5,9	8,5
5	5	0,31	5,3	19	51	73
	10	0,27	4,6	16,7	44	64
	15	0,19	3,2	11,7	31	45
	20	0,11	1,8	6,6	17	25


Number of events
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
10^{-1}
1
10
10^2
Distance (Kpc)
Keplero SN
Galactic center
95% Galaxy
LMC
SMC
LVD 1000 ton

1604 (Kepler)
1572 (Ticho)
1181
1054 (Crab)
1006



WHAT HAVE WE LEARNED FROM SN 1987A?

- **Neutrinos:** One or two bursts? Feb. 23.12 and/or Feb 23.32, or a long activity during several hours as suggested by gravitational waves observations?
- Was it a 2 step collapse (first into a NS and 4.7 hours later into a BH or a SQM star)?
- **Light:** A week after the explosion $m_V = 4.5$ and $M_V = -14.5$ being 18.5 the distance module, and $A_V = 0.45$. Hence this SN wouldn't be visible by naked eye if exploded in the disk of our Galaxy, unless closer than ~ 5 kpc (assuming an extinction parameter of ~ 1.5 mag/kpc). However the neutrino burst would have been **100 times stronger!!!**
- **Hidden sources:** Are there sources visible only in neutrinos and not in light? Is the rate of stellar collapses higher than that of SN?