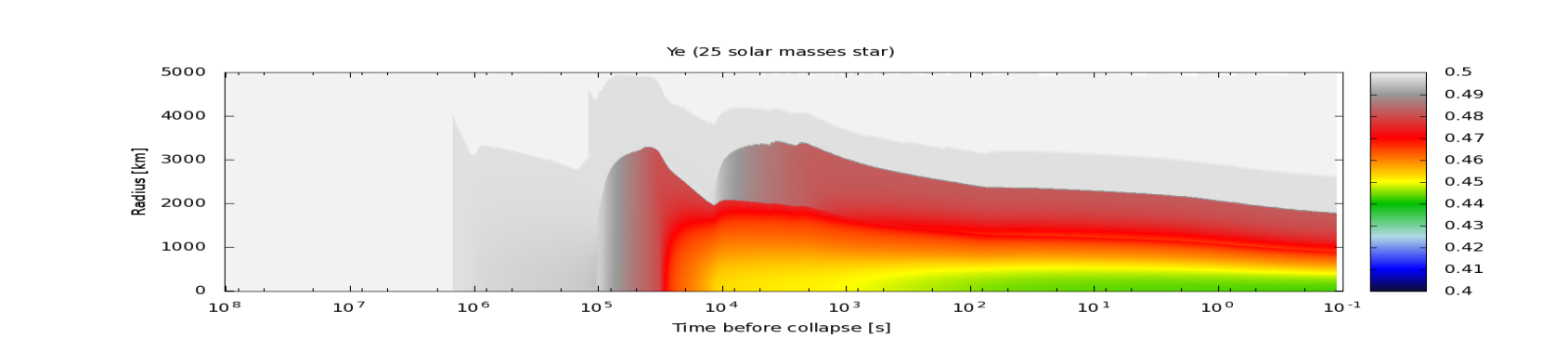
Widma neutrin emitowanych przez zaawansowane ewolucyjnie gwiazdy

Neutrina jako sygnał nadchodzącej supernowej

Andrzej Odrzywołek

Zakład Ogólnej Teorii Względności i Astrofizyki
Uniwersytet Jagielloński, Kraków

Wtorek, 8 września 2009, 17:00



Kiedy w Galaktyce eksploduje supernowa?

- Wszyscy zgromadzeni są zapewne ciekawi ...
- ale nikt nie zna odpowiedzi ...
- Dlaczego?

Kiedy w Galaktyce eksploduje supernowa?

- Wszyscy zgromadzeni są zapewne ciekawi ...
- ale nikt nie zna odpowiedzi ...
- Dlaczego?

Kiedy w Galaktyce eksploduje supernowa?

- Wszyscy zgromadzeni są zapewne ciekawi ...
- ale nikt nie zna odpowiedzi ...
- Dlaczego?

Kiedy w Galaktyce eksploduje supernowa?

- Wszyscy zgromadzeni są zapewne ciekawi ...
- ale nikt nie zna odpowiedzi ...
- Dlaczego?

Dlaczego nie potrafimy udzielić odpowiedzi na tak postawione pytanie?

Nawet w przypadku Betelgeuse, 200 pc od Ziemi, nie jesteśmy w stanie uzyskać dokładności czasowej lepszej niż 100 000 lat!

1. Jądro ewoluuje niezależnie od powierzchni
2. Rozmiar jądra to ($R_c \simeq 10^4$ km) ; promień gwiazdy presupernowej $R_s \simeq 10^7 \ldots 10^9$
3. Ostatnie fazy to $\tau \sim 100$ lat
4. nie znamy ani jednej gwiazdy spalającej w rdzeniu węgiel

Kiedy w Galaktyce eksploduje supernowa?

- Wszyscy zgromadzeni są zapewne ciekawi ...
- ale nikt nie zna odpowiedzi ...
- Dlaczego?

Dlaczego nie potrafimy udzielić odpowiedzi na tak postawione pytanie?

Nawet w przypadku Betelgeuse, 200 pc od Ziemi, nie jesteśmy w stanie uzyskać dokładności czasowej lepszej niż 100 000 lat!

1. Jądro ewoluuje niezależnie od powierzchni
2. Rozmiar jądra to ($R_c \simeq 10^4$ km) ; promień gwiazdy presupernowej $R_s \simeq 10^7 \ldots 10^9$
3. Ostatnie fazy to $\tau \sim 100$ lat
4. nie znamy ani jednej gwiazdy spalającej w rdzeniu węgiel

- wszystko za sprawą neutrin, może więc ich należy szukać !?

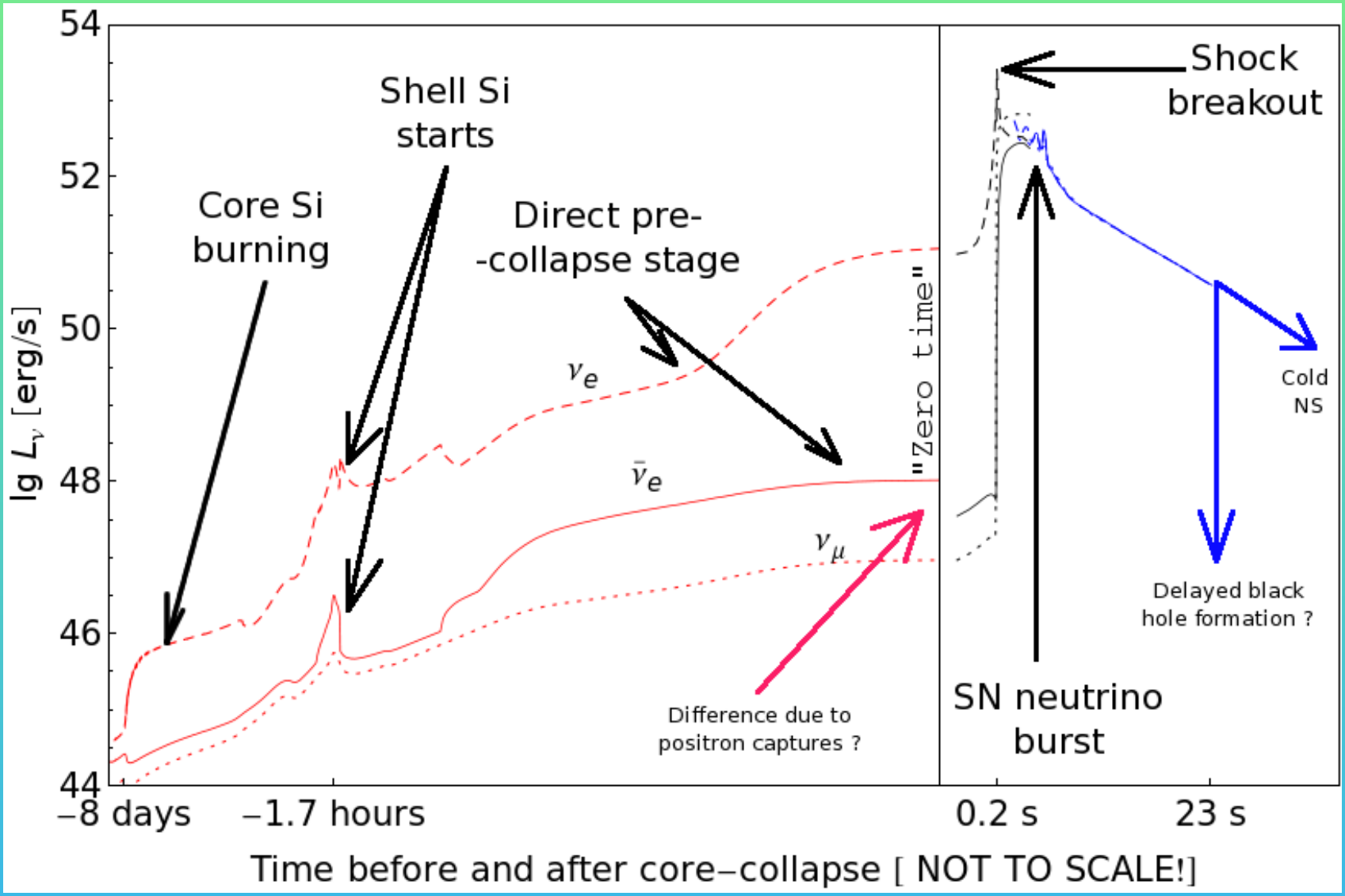
Neutrinowa emisja masywnej gwiazdy

Ewolucja gwiazd dla `astronomów neutrinowych`

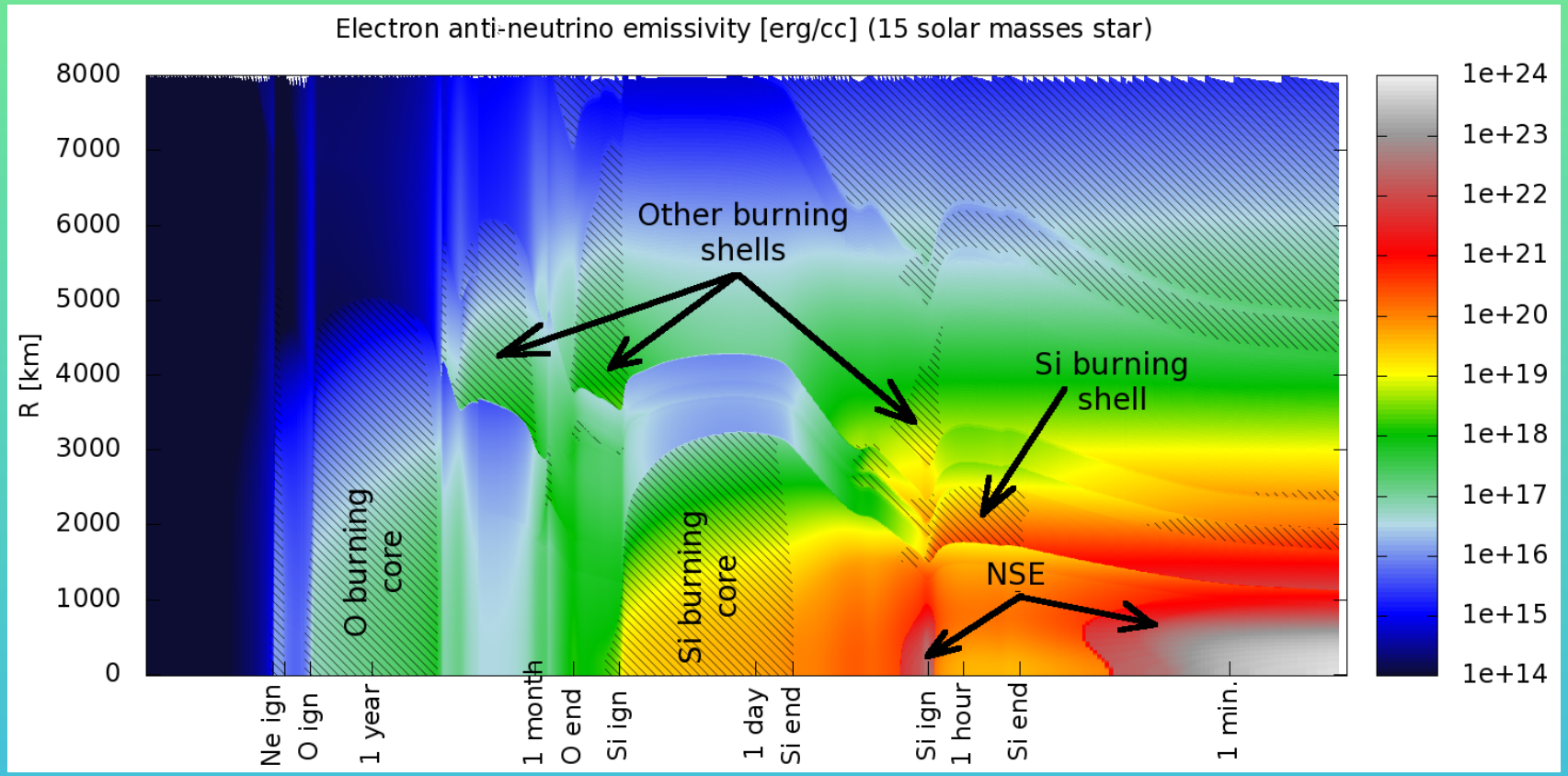
Stage	$\langle L_\nu \rangle$ [erg/s]	E_ν^{tot} [erg]	Czas	$\langle \mathcal{E}_\nu \rangle$ [MeV]	Prozes	Typ
H	10^{36}	10^{52}	10^7 yrs	0.5-1.7	CNO	ν_e
He	10^{31}	10^{49}	10^6 yrs	0.02	plasma	all
Gwiazda-ν	10^{38}-10^{46}	10^{51}	10^4 yrs	0.5-1.5	pair	all
Neutronizacja	10^{54}	10^{51}	10^{-2} sec	10	ϵ^-	ν_e
SN	10^{52}-10^{48}	10^{53}	10 sec	10-40	ν transport	all
Gw. neut.	$< 10^{48}$	$< 10^{51}$	10^4 yrs	1	d(m)URCA	$\nu_e, \bar{\nu}_e$

1. detekcja ν z kolapsu wewnątrz Galaktyki nie stanowi dziś wyzwania
2. uwaga musi zostać skupiona na impulsie neutronizacyjnym, *chłodzeniu gwiazdy neutronowej* oraz **fazie chłodzonej neutrinowo** pre-supernowej

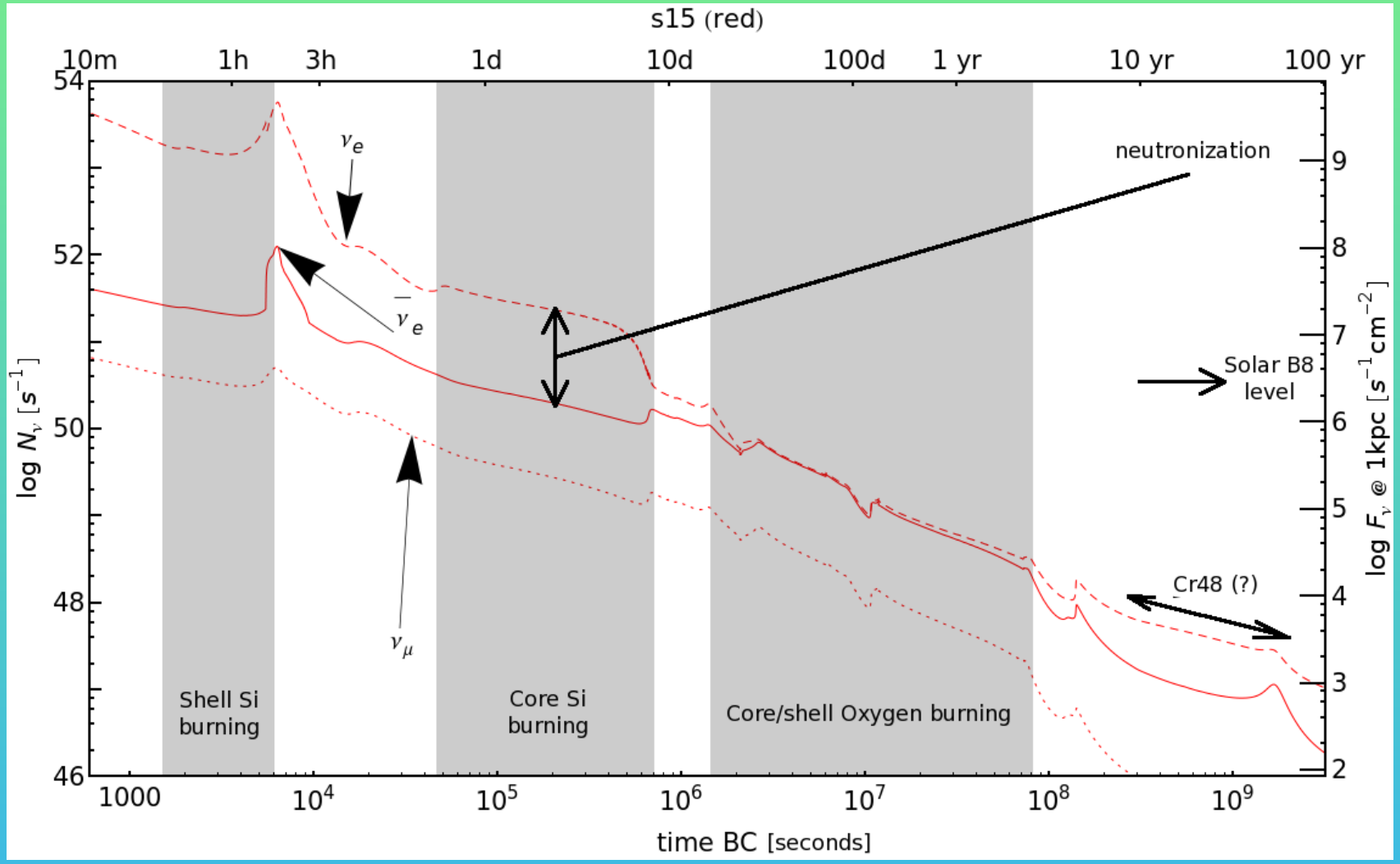
Neutrina PRZED i PO kolapsie



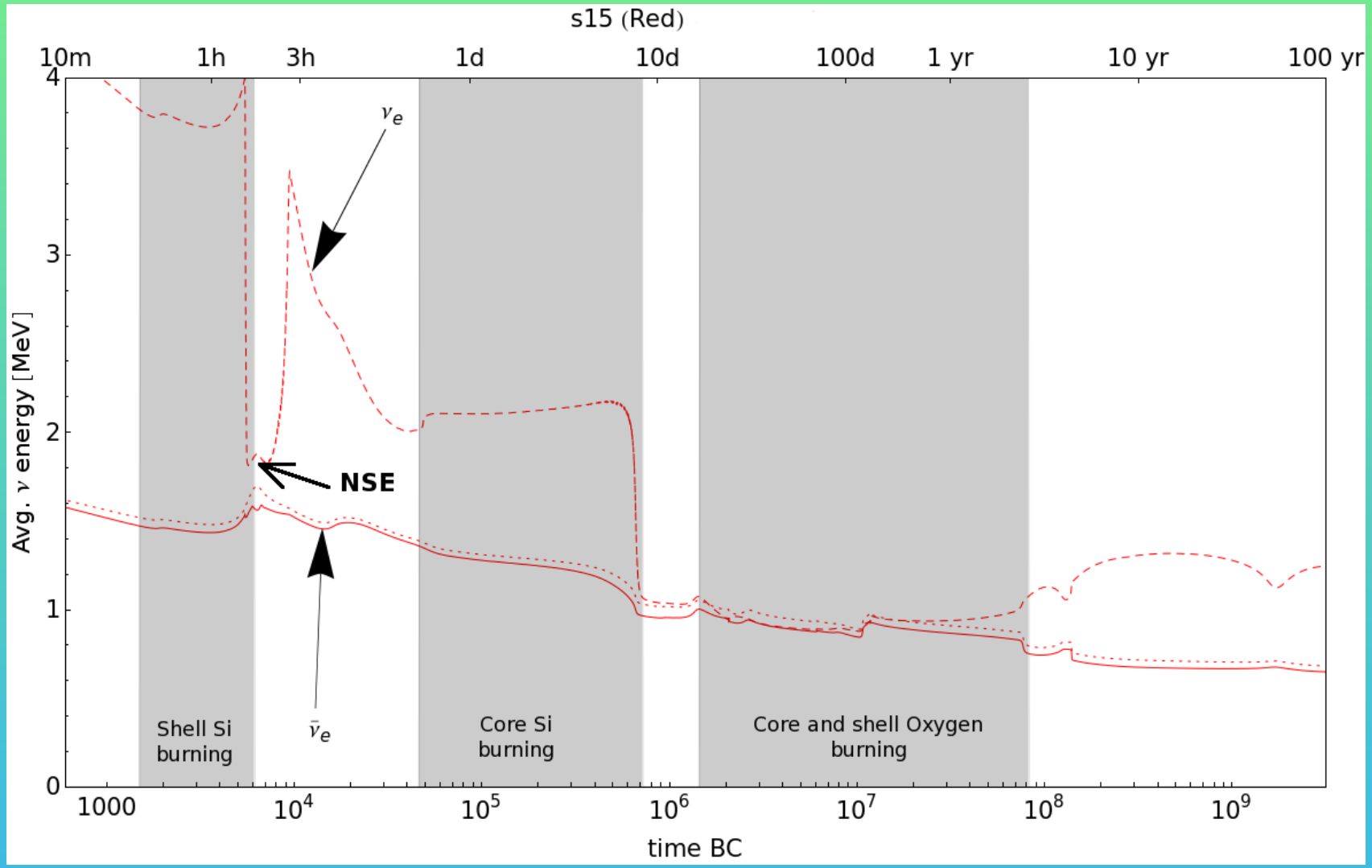
Ostatnie chwile gwiazdy o masie 15 $M_\odot$ (s15)



Strumień neutrin 100 lat przed wybuchem supernowej



Średnia energia $\langle \mathcal{E}_\nu \rangle$ 100 lat przed wybuchem supernowej

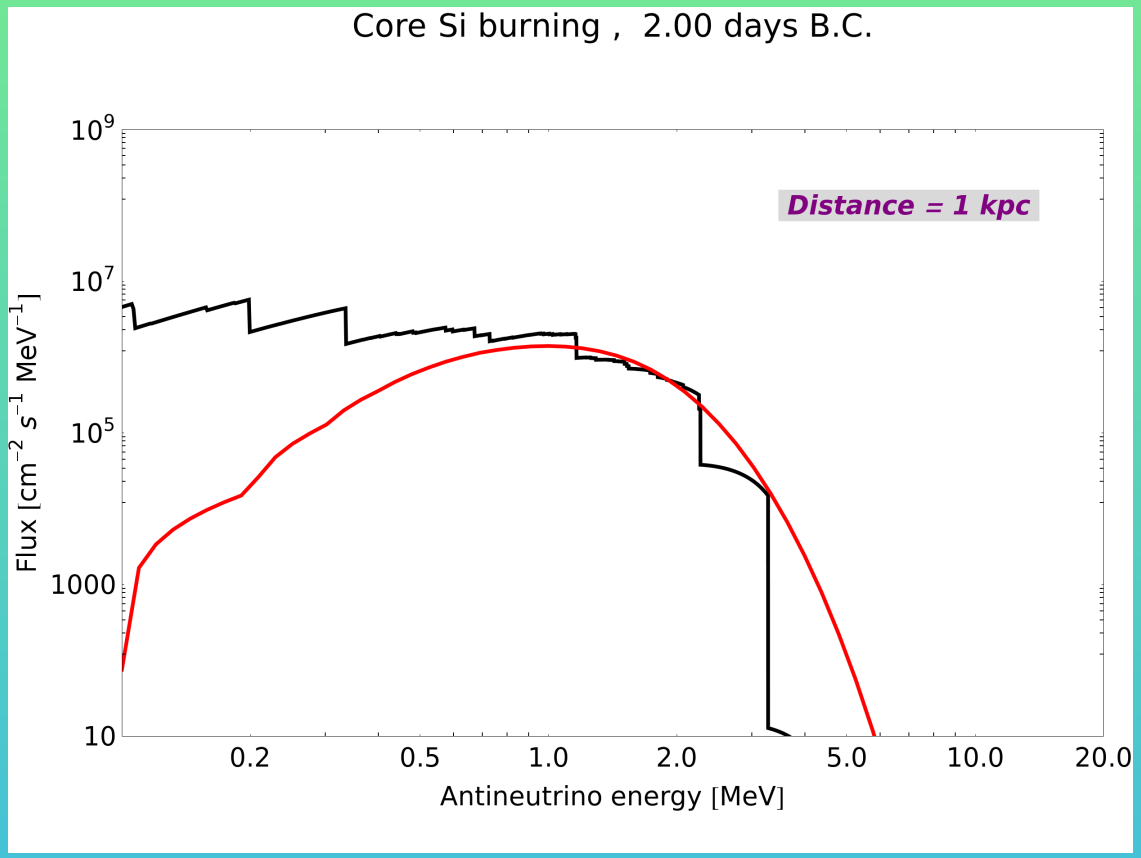


Potencjalnie wykrywalne sygnatury neutrinowe nadchodzącego kolapsu

Gwiazda o masie 15 $M_\odot$

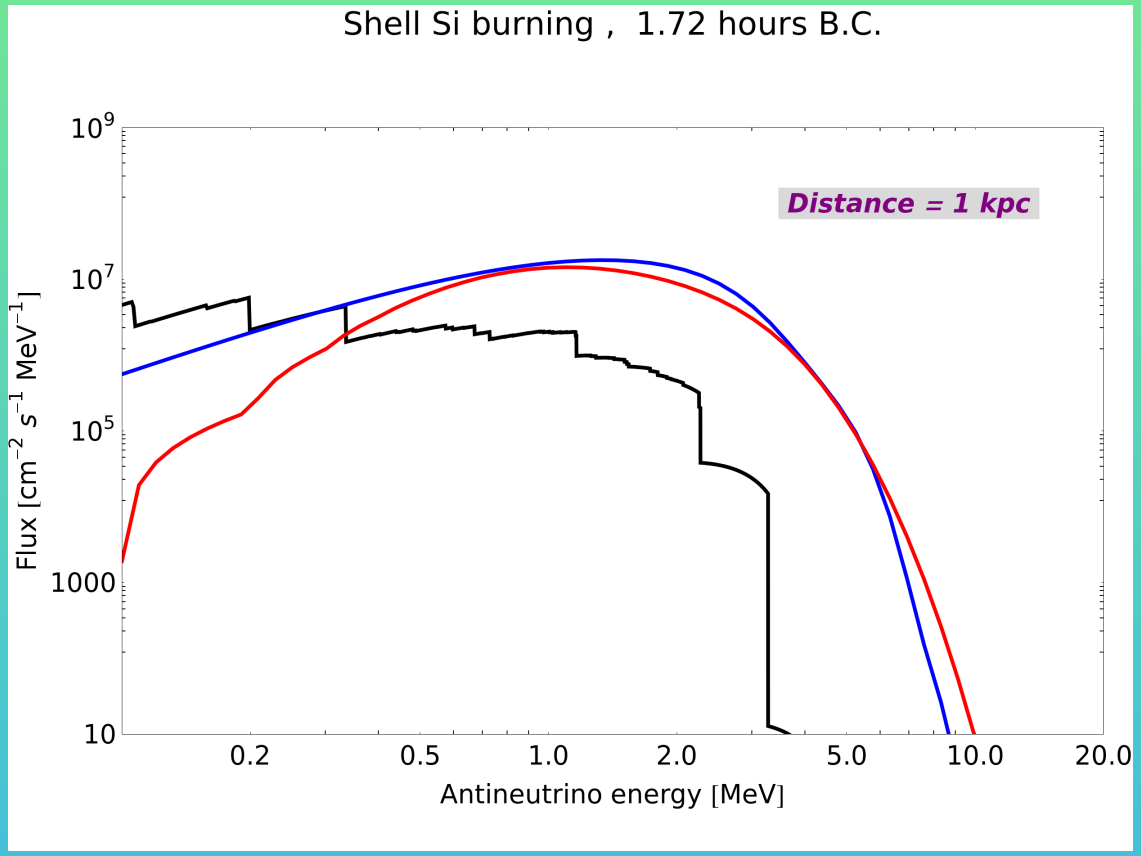
1. core/shell O burning (miesiące przed kolapsem)
   – *detekcja ograniczona do Betelgeuse* ($d = 100 \ldots 200$ *pc*)
2. spalanie Si w jądrze (8 - 0.5 dni przed kolapsem)
   – *dla gwiazd bliżej niż 1-2 kpc*
3. faza maksymalnej kontrakcji i zapłon Si w powłoce (2-0.5 godzin b.c.)
   – *do 10 kpc*
4. faza kurczenia prowadząca bezpośrednio do kolapsu (30 - 0 minut b. c.)
   – *jest to właściwie początek kolapsu, gdyż większość neutrin jest emitowana w ostatniej minucie gładko przechodząc w pik neutronizacyjny*

Widmo $\bar{\nu}_e$ pre-supernowej *vs* geo-neutrina



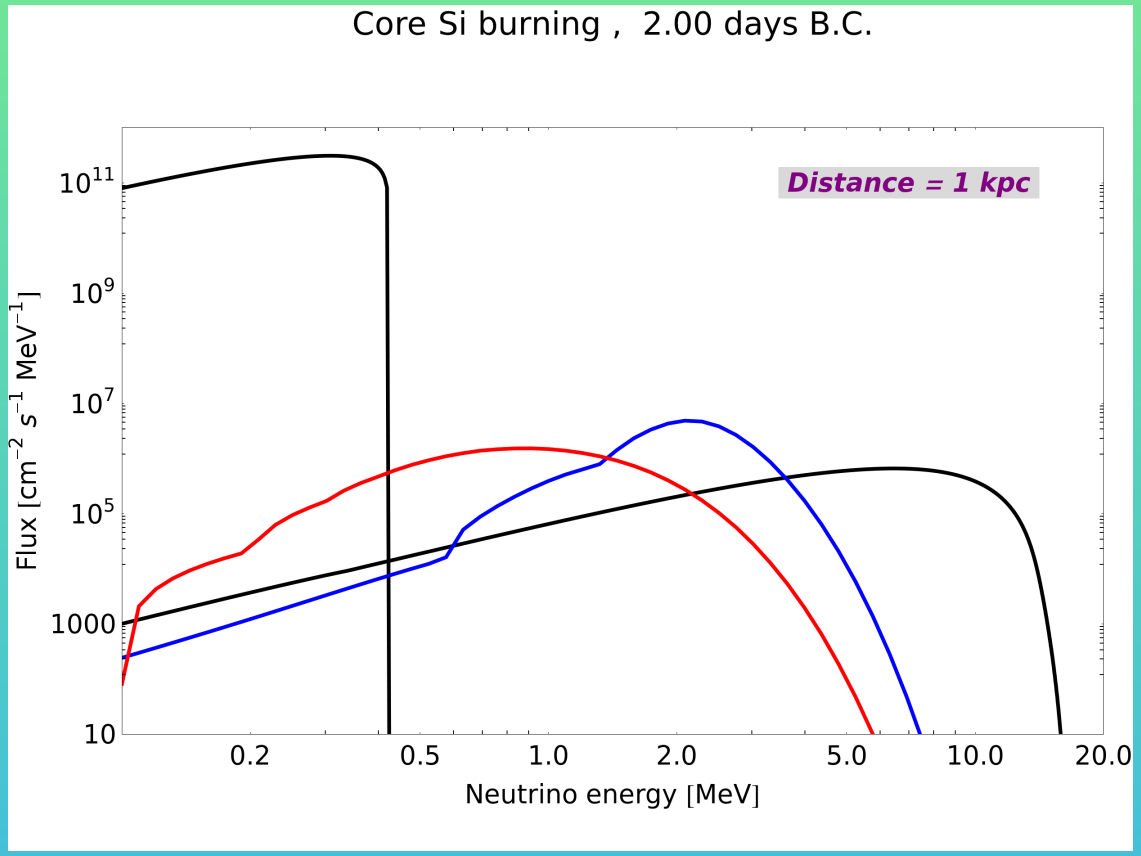
Black - geoneutrino $\bar{\nu}_e$ spectrum (Sanhiro Enomoto PhD)
Red - thermal pre-SN spectrum: pair + plasma
Blue - weak pre-SN spectrum:
– e^- capture for α-network nuclei for kT<0.4 MeV
– NSE neutrinos for kT>0.4 MeV (arXiv:0903.2311v1)

Widmo $\bar{\nu}_e$ pre-supernowej *vs* geo-neutrina



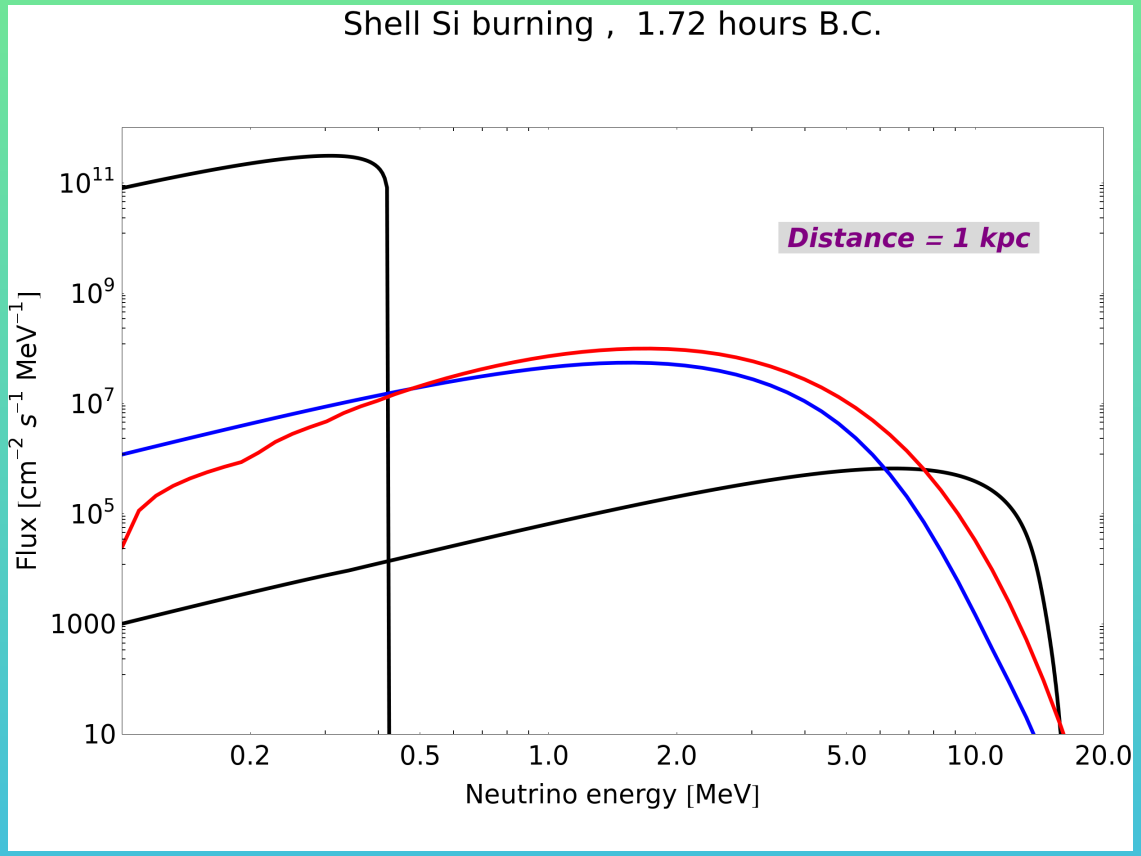
Black - geoneutrino $\bar{\nu}_e$ spectrum (Sanhiro Enomoto PhD)
Red - thermal pre-SN spectrum: pair + plasma
Blue - weak pre-SN spectrum:
– e^- capture for α-network nuclei for kT<0.4 MeV
– NSE neutrinos for kT>0.4 MeV (arXiv:0903.2311v1)

Widmo ν_e pre-supernowej *vs* neutrina słoneczne



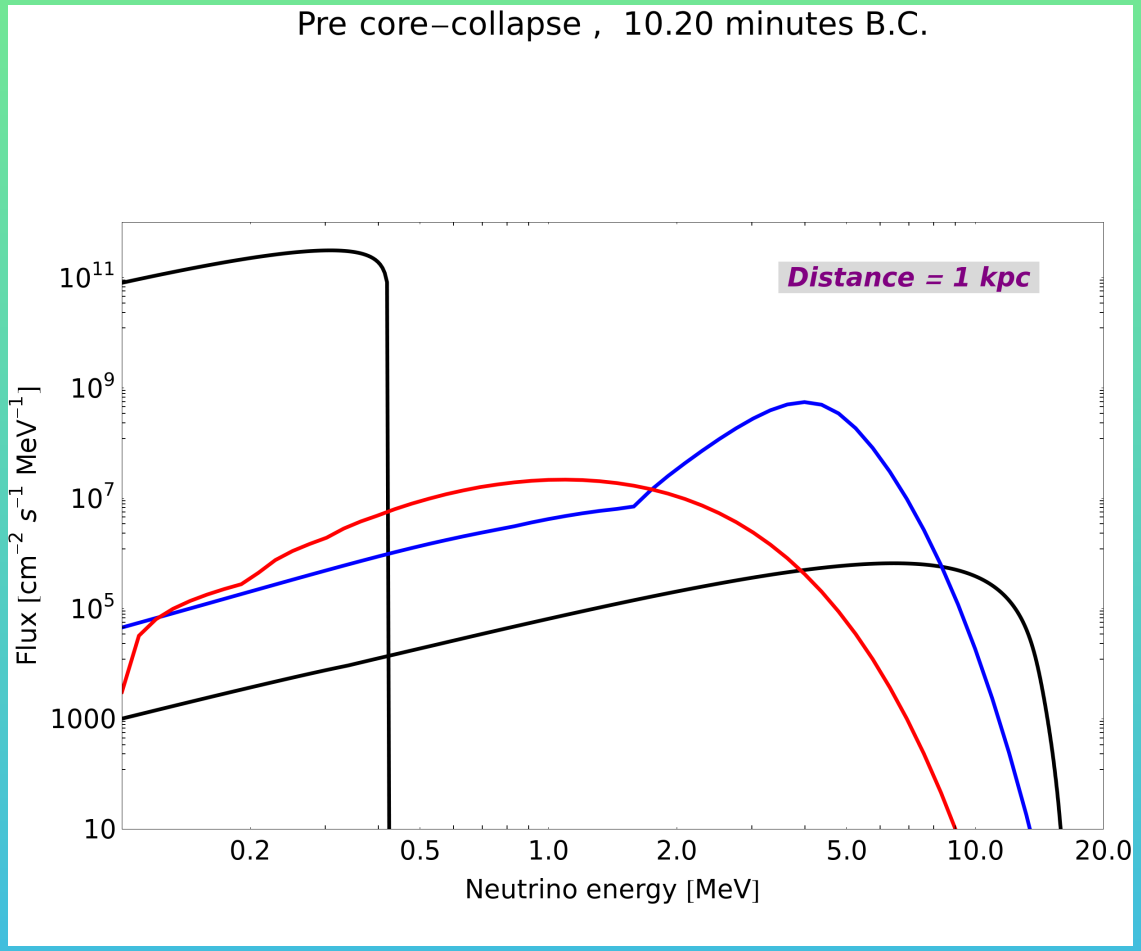
Black - solar ν_e spectrum (SSM)
Red - thermal pre-SN spectrum: pair + plasma
Blue - weak pre-SN spectrum:
– e^- capture for α-network nuclei for kT<0.4 MeV
– NSE neutrinos for kT>0.4 MeV (arXiv:0903.2311v1)

Widmo ν_e pre-supernowej *vs* neutrina słoneczne



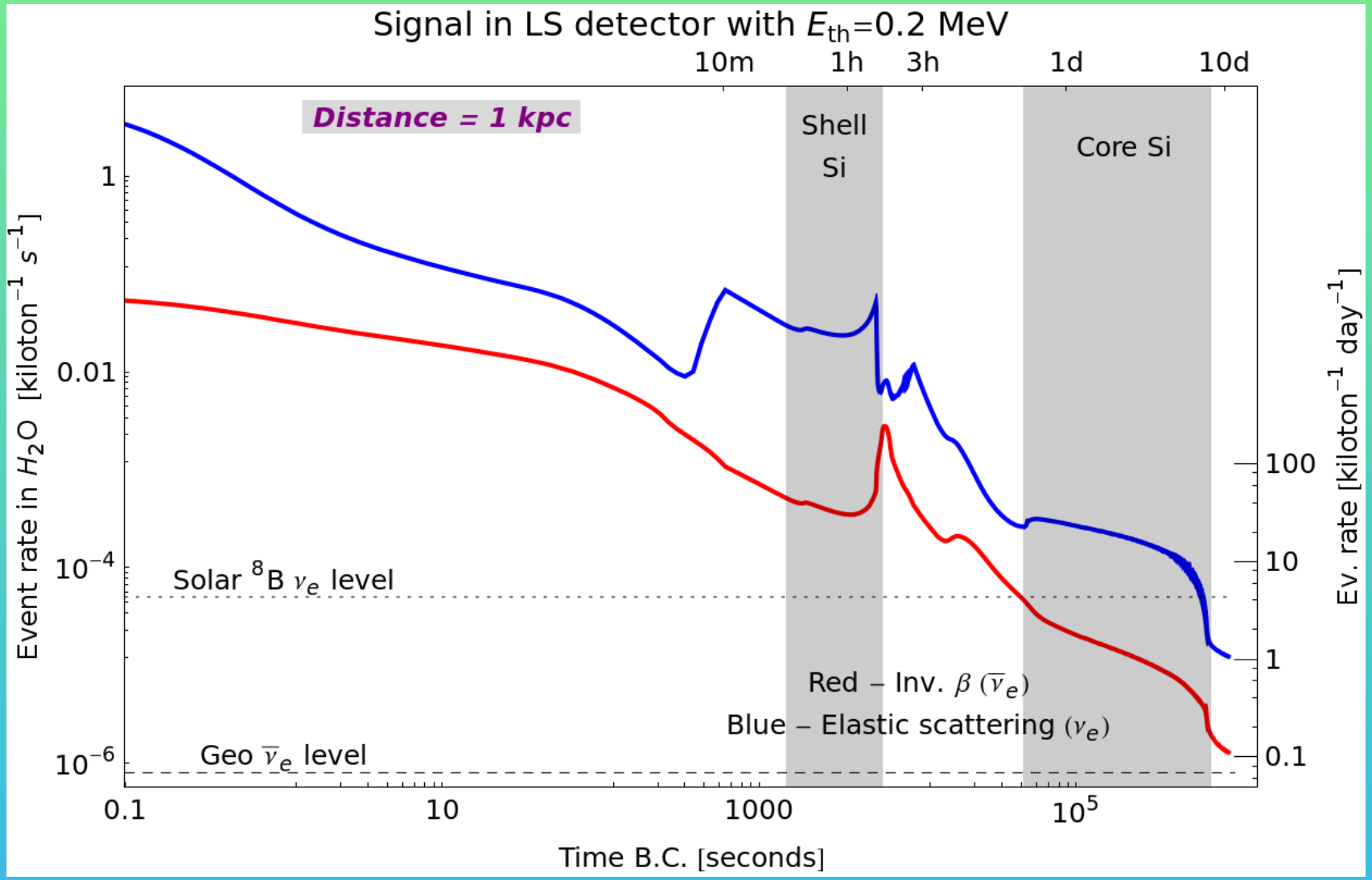
Black - solar ν_e spectrum (SSM)
Red - thermal pre-SN spectrum: pair + plasma
Blue - weak pre-SN spectrum:
– e^- capture for α-network nuclei for kT<0.4 MeV
– NSE neutrinos for kT>0.4 MeV (arXiv:0903.2311v1)

Widmo ν_e pre-supernowej *vs* neutrina słoneczne

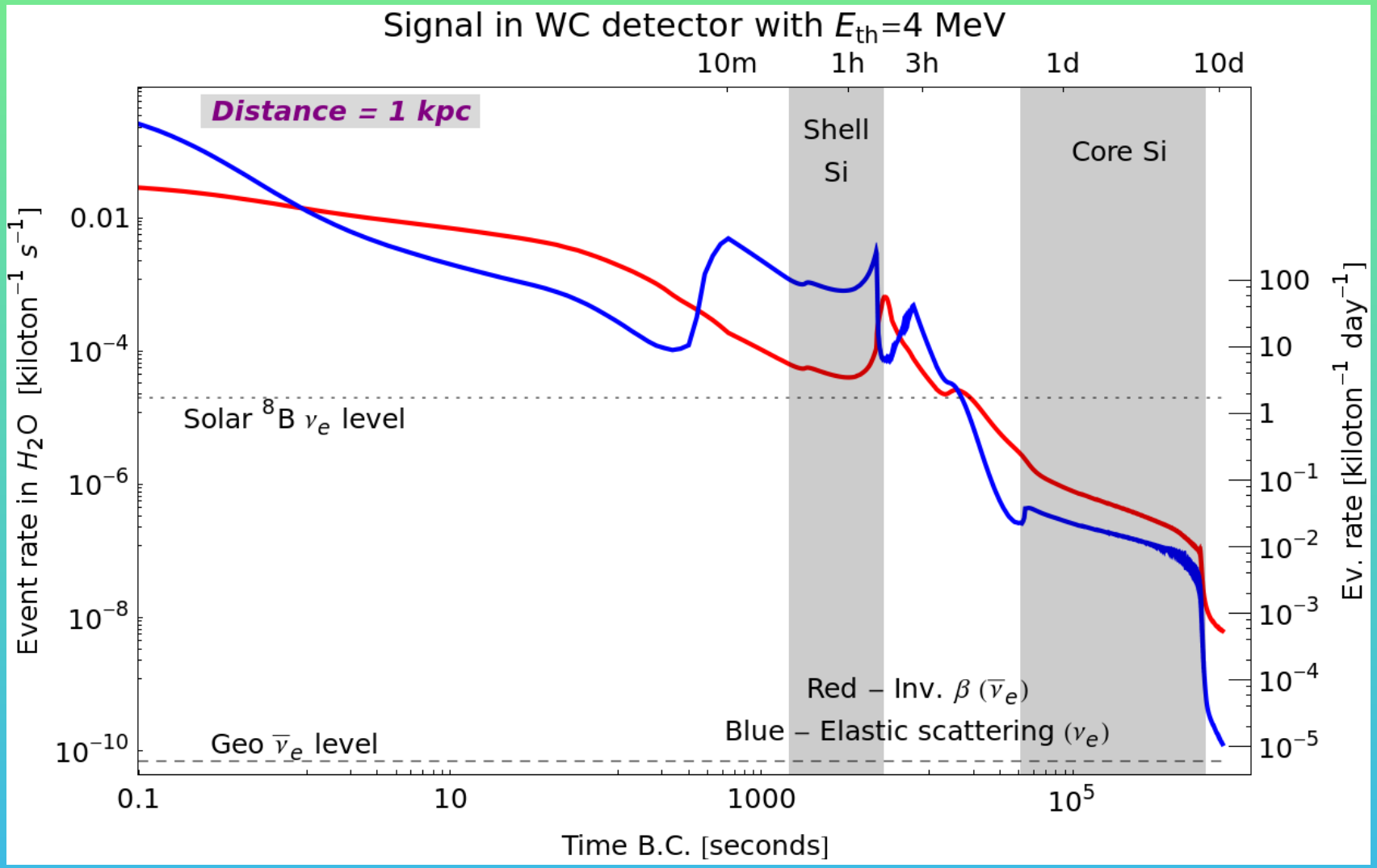


Black - solar ν_e spectrum (SSM)
Red - thermal pre-SN spectrum: pair + plasma
Blue - weak pre-SN spectrum:
– e^- capture for α-network nuclei for kT<0.4 MeV
– NSE neutrinos for kT>0.4 MeV
(arXiv:0903.2311v1)

Sygnał oczekiwany w detektorach scyntylacyjnych

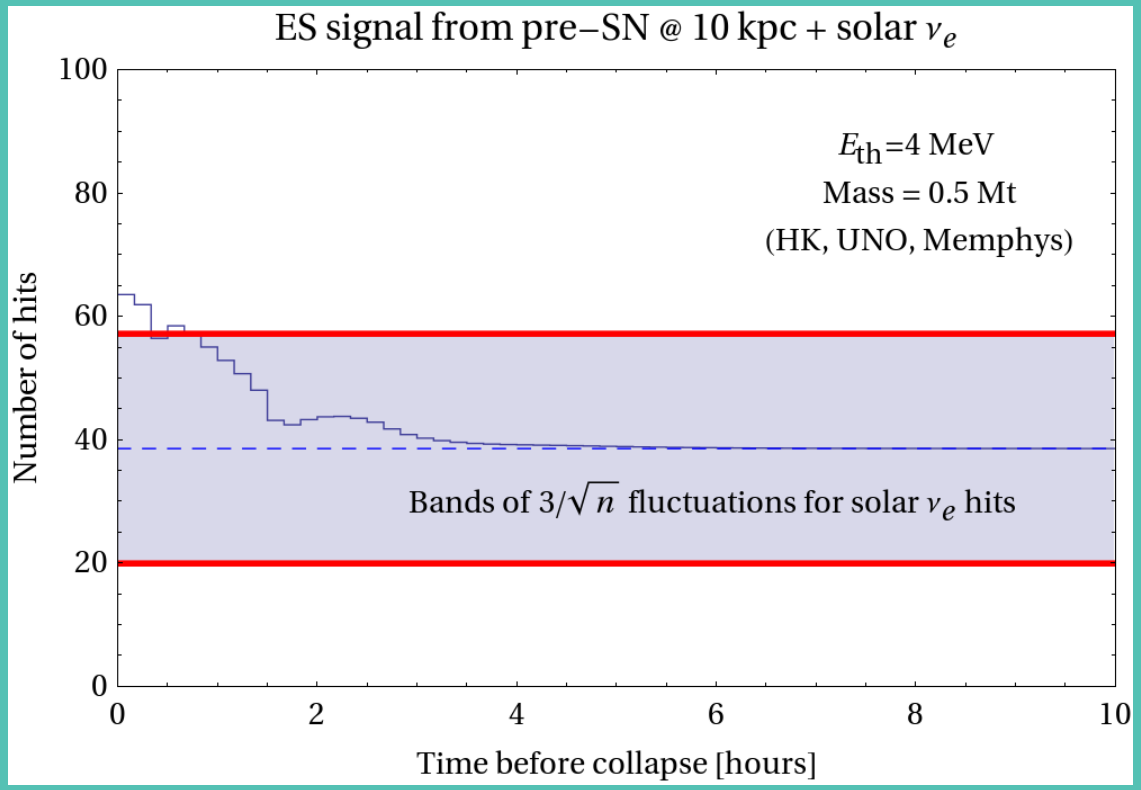


Sygnał oczekiwany w detektorach wodnych (Czerenkowa)



Scenariusz 1: spalanie Si w shell-u (0.5 Mt H_2O)

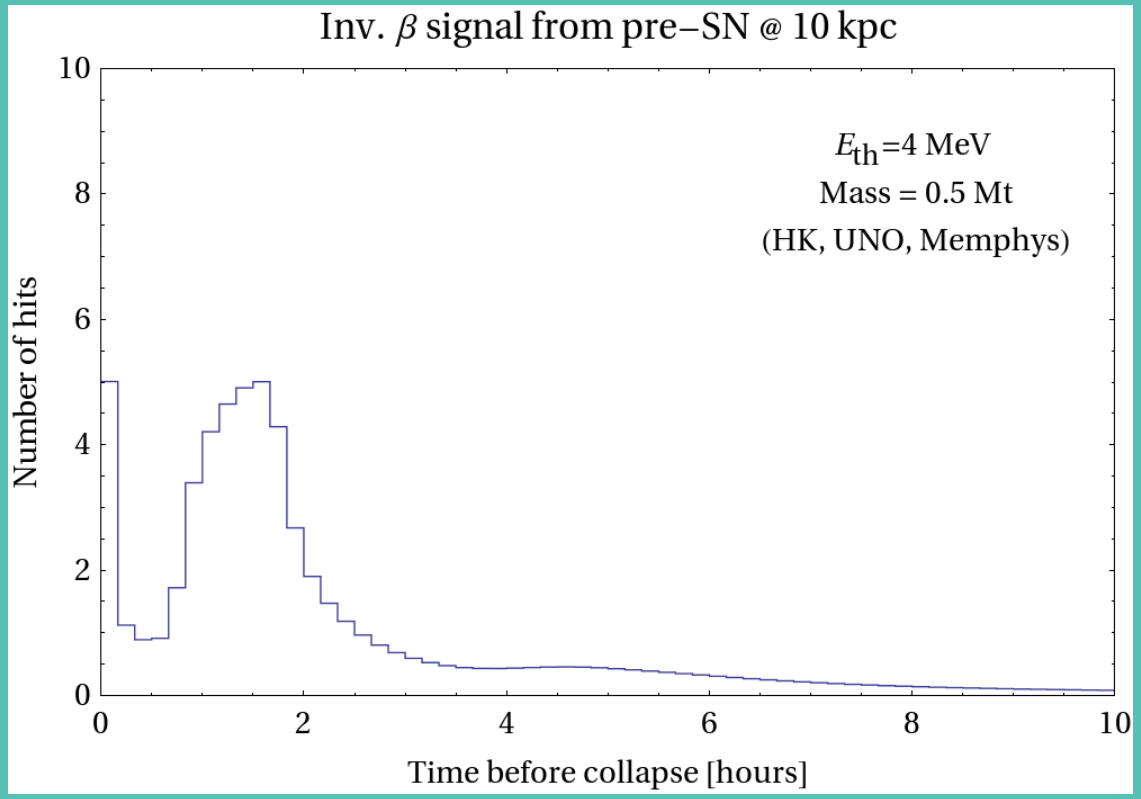
1-Hour moving window signal from 10 kpc



1. ν_e (ES) i $\bar{\nu}_e$ (IBD) dostarczają sygnatury ~1 godzinę przed wybuchem supernowej w 0.5 Mt wodnym detektorze z 10 kpc
2. równoczesna dodatnia fluktuacja ν_e i $\bar{\nu}_e$

Scenariusz 1: spalanie Si w shell-u (0.5 Mt H_2O)

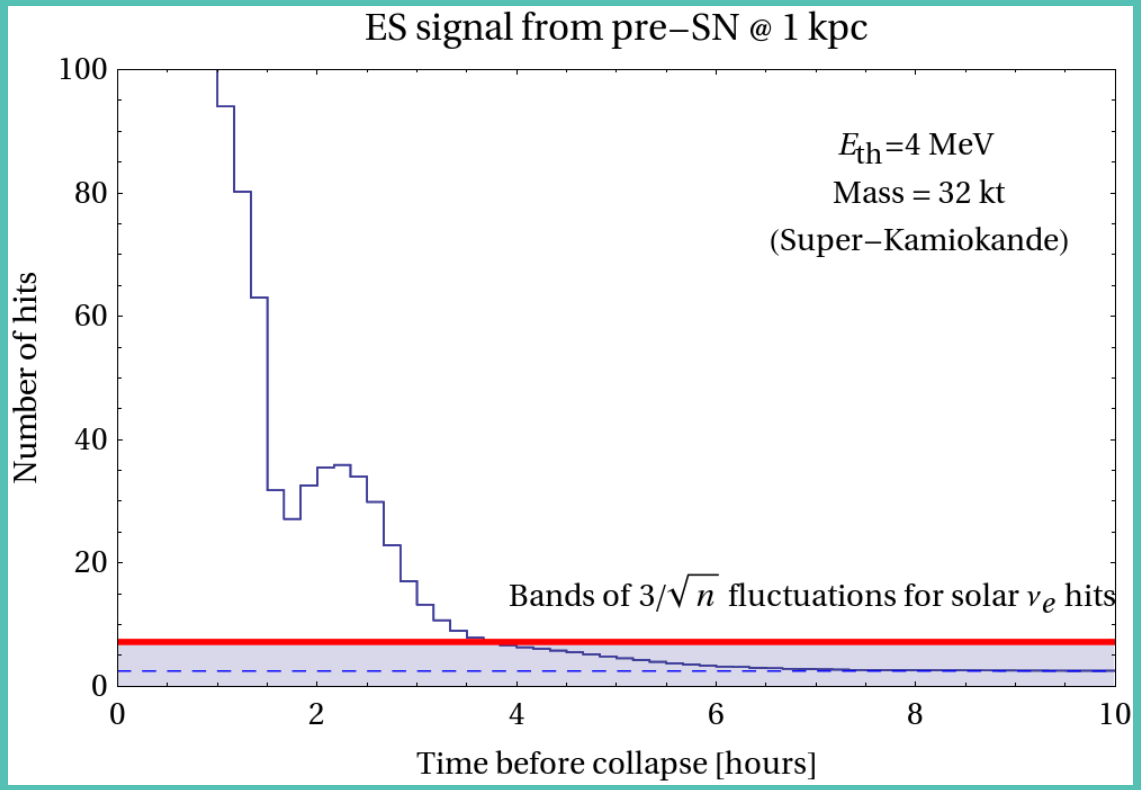
1-Hour moving window signal from 10 kpc



1. ν_e (ES) i $\bar{\nu}_e$ (IBD) dostarczają sygnatury ~1 godzinę przed wybuchem supernowej w 0.5 Mt wodnym detektorze z 10 kpc
2. równoczesna dodatnia fluktuacja ν_e i $\bar{\nu}_e$

Scenariusz 2: spalanie Si w shell-u (0.5 Mt H_2O) (Super-Kamiokande)

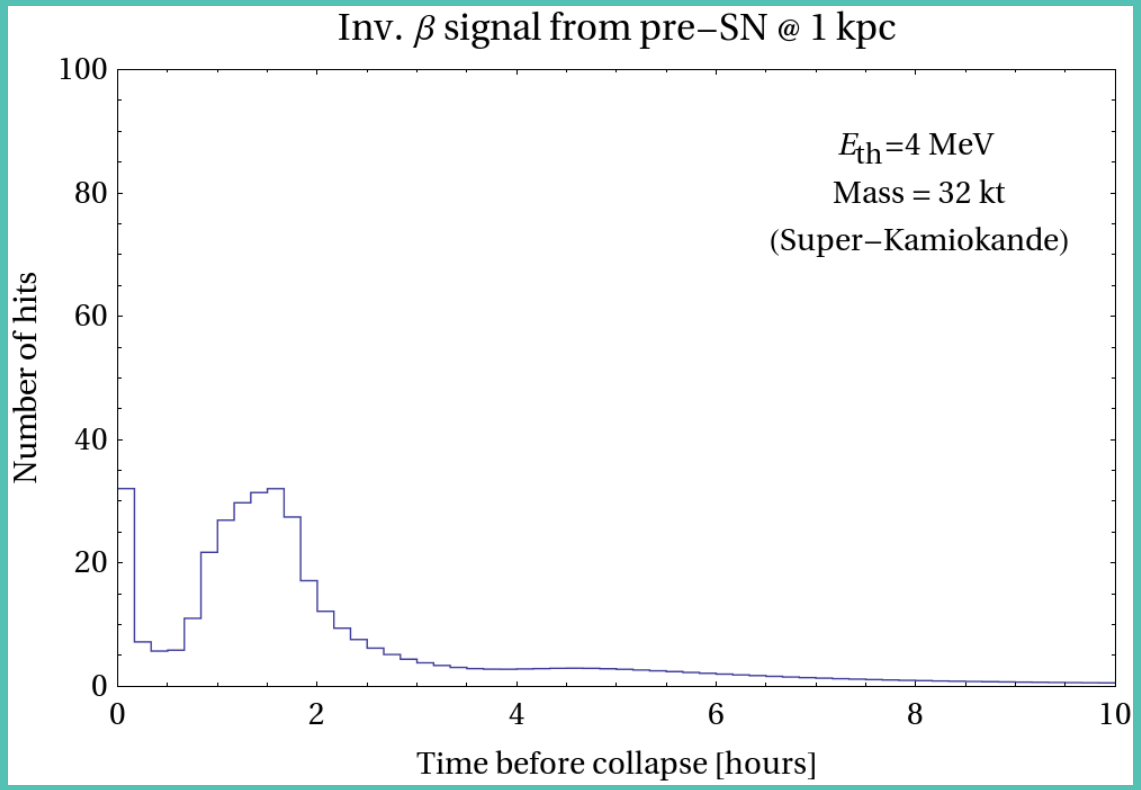
Sygnał w „biegnącym" oknie o szerokości 1 h z 1 kpc



1. ν_e (ES) i $\bar{\nu}_e$ (IBD) dostarczają ~1 h ostrzeżenie w Super-Kamiokande z 1 kpc

Scenariusz 2: spalanie Si w shell-u (0.5 Mt H_2O) (Super-Kamiokande)

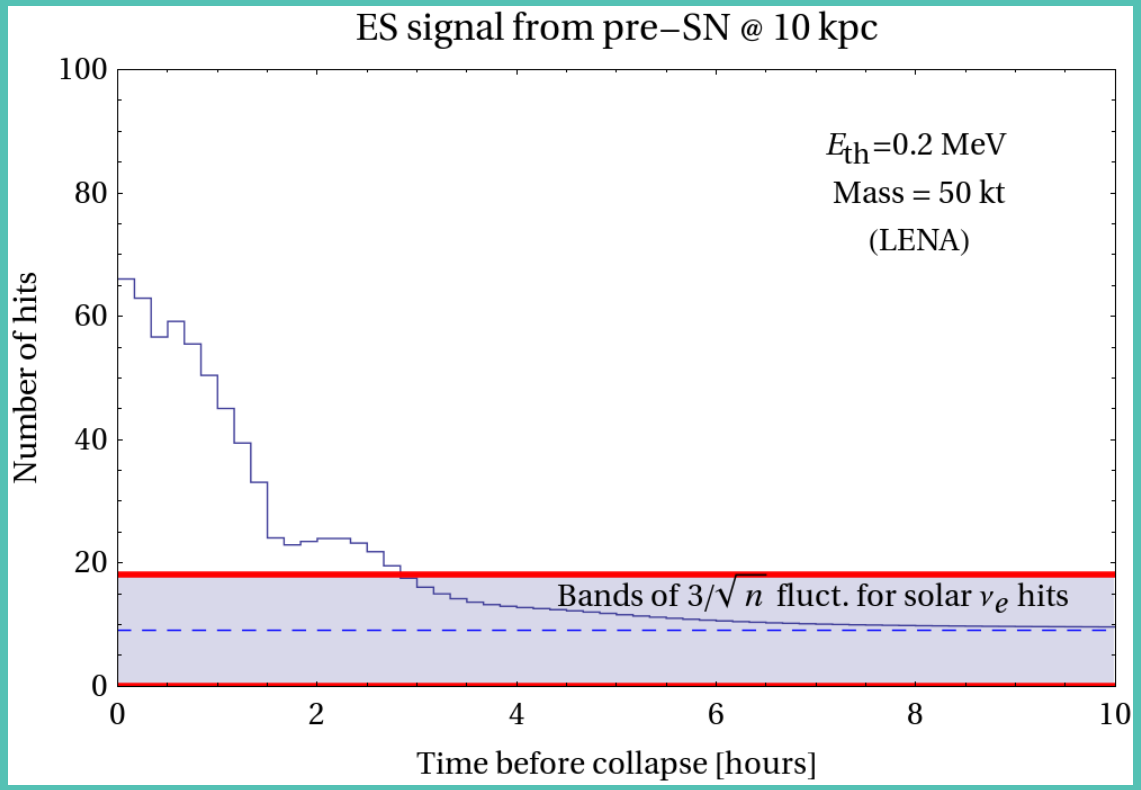
Sygnał w „biegnącym" oknie o szerokości 1 h z 1 kpc



1. ν_e (ES) i $\bar{\nu}_e$ (IBD) dostarczają ~1 h ostrzeżenie w Super-Kamiokande z 1 kpc

Scenariusz 3: spalanie Si w shell-u (LENA, 50 kt)

Sygnał w „biegnącym” oknie o szerokości 1 h z 10 kpc

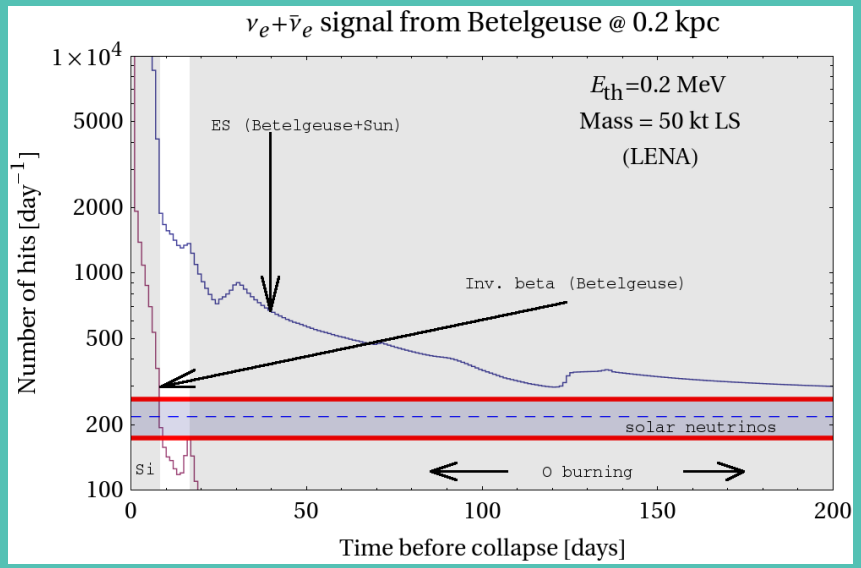


1. ν_e (ES) dostarczają sygnał ∼1 h z 10 kpc
2. Odwrotny rozpad β prawie zaniedbywalny, 0-2 zdarzeń

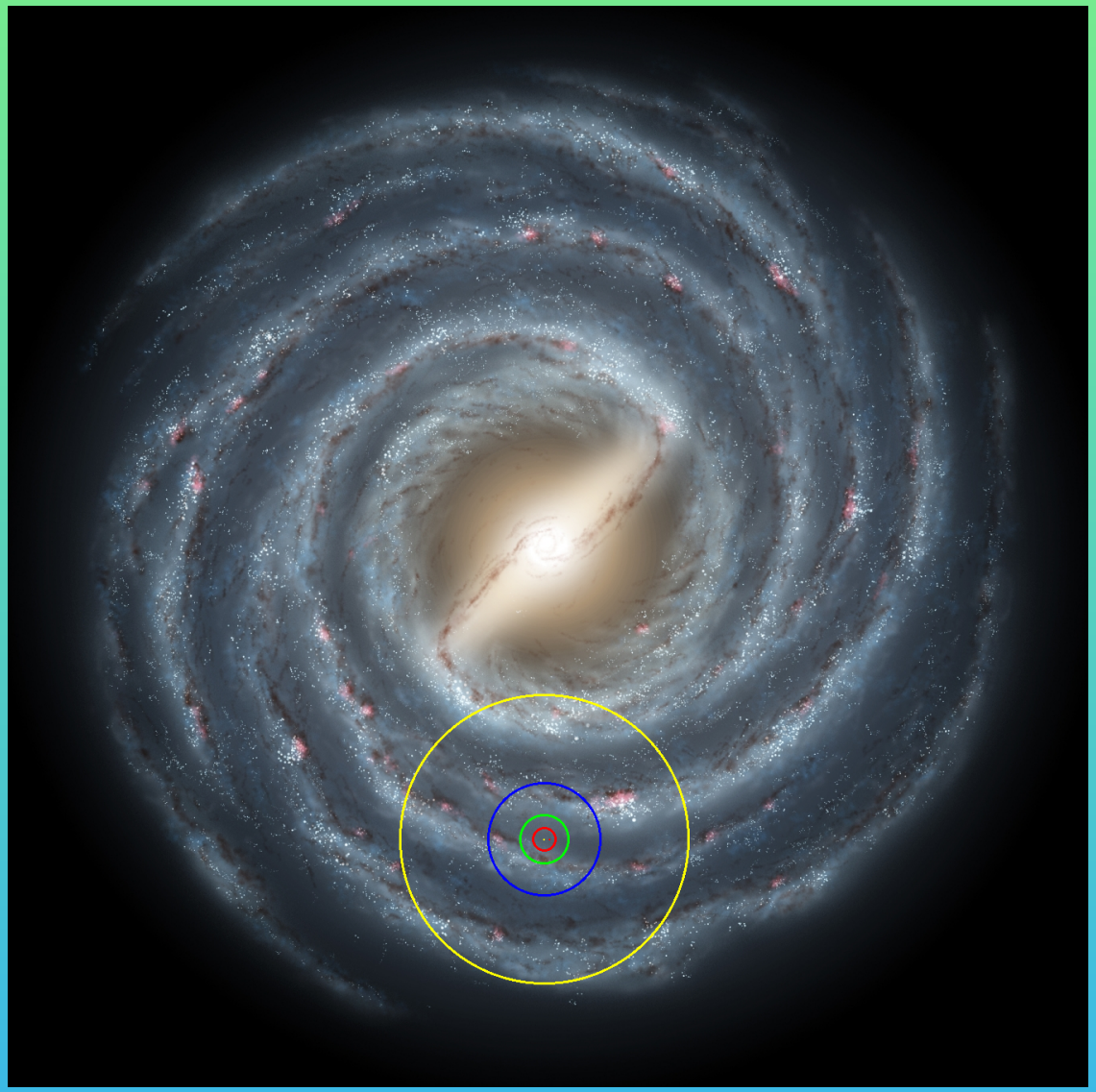
Przypadek Betelgeuse

UWAGA: dotyczy najbliższych gwiazd $d \ll 10$ kpc

Sygnał z Betelgeuse (d=130 pc)

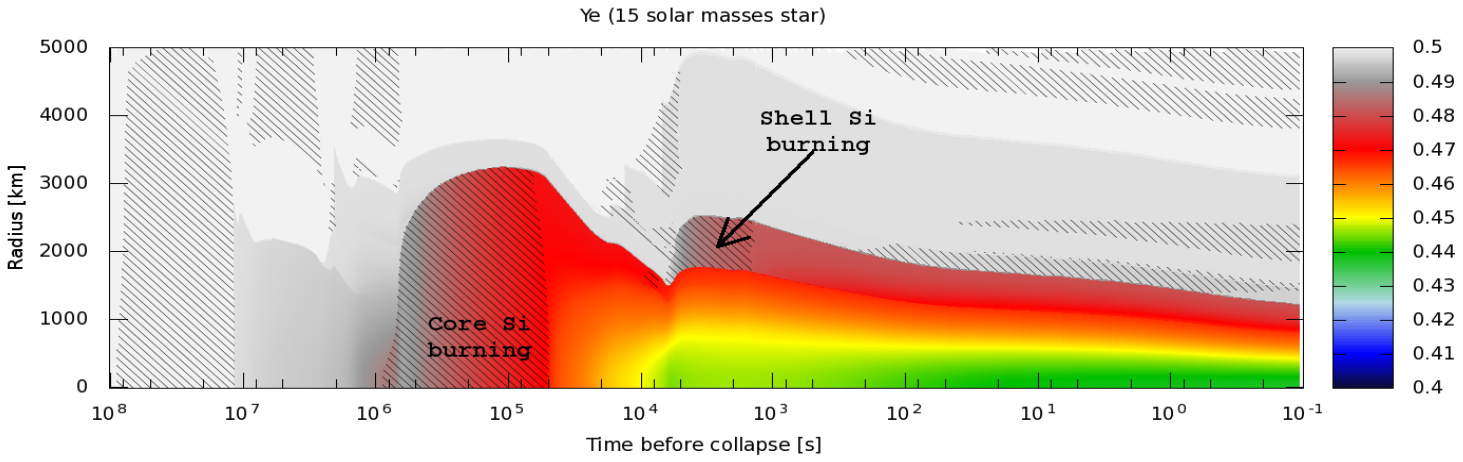


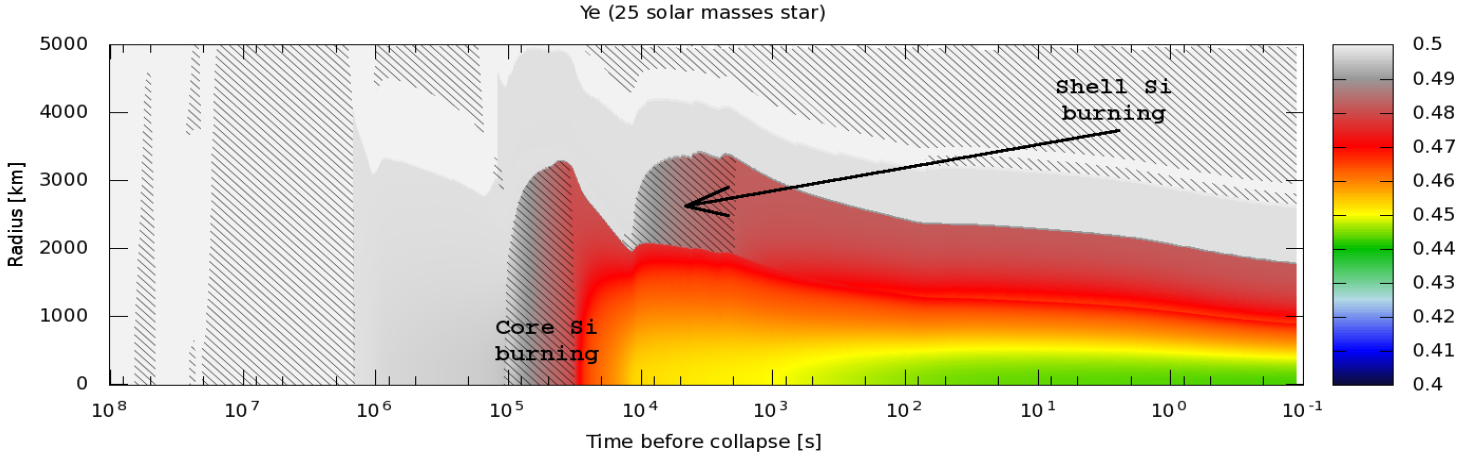
Zasięg przyszłego „monitoringu” i α Ori



15 $M_\odot$ vs 25 $M_\odot$: neutronizacja

Porównanie typowych modeli





Na ile ogólne są powyższe rozważania?

Ewolucja innych pre-supernowych

- 2 pełne modele presupernowych: 15 $M_\odot$ i 25 $M_\odot$ zostały przeanalizowane: w obydwu zachodzi spalanie Si w jądrze, a następnie w powłoce otaczającej jądro
- znane wyjątki:
  – gwiazdy o masach 8-11 $M_\odot$ mogą skolapsować zanim dojdzie do spalania O / Si
  – niektóre gwiazdy mogą kolapsować bez spalania Si w shell-u
  – z drugiej strony, 2 i więcej epizodów spalania Si się zdarza

25 $M_\odot$ *versus* 15 $M_\odot$

- ewolucja dla 25 $M_\odot$ jest znacznie szybsza; strumień ν jest więc większy (zapas paliwa jest zawsze porównywalny)
- neutrina są emitowane w mniej zdegenerowanej materii **wykrywalny sygnał jest mniejszy**
- mniej masywnych gwiazd jest więcej (IMF)

Wnioski

- pre-supernova produkuje stale rosnące strumienie ν_e and $\bar{\nu}_e$ o coraz większych energiach
- nowe (2009) wstepne wyniki zawierają **silny (do 100$\times$ anihilacji) strumień ν_e po zapłonie Si** oraz już zbadany strumień $\bar{\nu}_e$ z procesów termicznych
- energia ν_e oszacowana za pomocą tablic FFN i α-network-u ($\sim$4 MeV) oraz NSE ($\sim$2.5 MeV)
- procesy ewolucyjne: spalanie O, spalanie Si w jądrze, spalanie Si w powłoce oraz bezpośrednia faza kurczenia przed kolapsem dostarczają charakterystycznego sygnału neutrinowego
- szanse detekcji silnie zależą od dystansu do gwiazdy; dla Betelgeuse detektory typu LENA są w stanie wykryć ν_e na **miesiące** przed wybuchem supernowej (!)
- 50% gwiazd w Galaktyce znajduje się dalej niż 10 kpc; dla nich wykrywalny jest jedynie sygnał około 1 godziny przed kolapsem
- ziemskie $\bar{\nu}_e$ i słoneczne ν_e przeszkadzają: *analiza kierunkowa może to zmienić*

Ważniejsze referencje

- **Stellar models s15 and s25:** Woosley, S. E.; Heger, A.; Weaver, T. A., *The evolution and explosion of massive stars*, Reviews of Modern Physics, 2002 **74**, 1015-1071
- **Neutrino spectra & basic processes:** Misiaszek, M.; Odrzywolek, A.; Kutschera, M., *Neutrino spectrum from the pair-annihilation process in the hot stellar plasma* , Physical Review D, **74**, 043006.
  A. Odrzywolek, *Plasmaneutrino spectrum*, Eur. Phys. J. C52, 425-434, 2007
  A. Odrzywolek, *NSE neutrino spectrum*, arXiv:0903.2311v1 [astro-ph.SR]
- **Shock breakout ν_e:** Thompson, Todd A.; Burrows, Adam; Pinto, Philip A., *Shock Breakout in Core-Collapse Supernovae and Its Neutrino Signature*, The Astrophysical Journal, 2003 **592** 434-456
- **Protoneutron star neutrino cooling and delayed black hole formation:** J. A. Pons, J. A. Miralles, M. Prakash and J. M. Lattimer, *Evolution of Proto-Neutron Stars with Kaon Condensates*, The Astrophysical Journal, 2001 **553** 382-393
  A. Odrzywolek, M. Kutschera, *Kaon condensate with trapped neutrinos and high-density symmetry energy behavior*, Acta Phys. Polon. B40, 195, 2009 (arXiv:astro-ph/0703686v1)

Więcej informacji

PSNS WWW : strona poświęcona tematyce post-procesowania modelu astrofizycznych w celu uzyskania wysokiej jakości widm neutrinowych i astronomii neutrinowej http://ribes.if.uj.edu.pl/psns

Animacja modelu s15

Ostatnie 40, 000 przed wybuchem supernowej, po zakończeniu spalania He.
Animation link