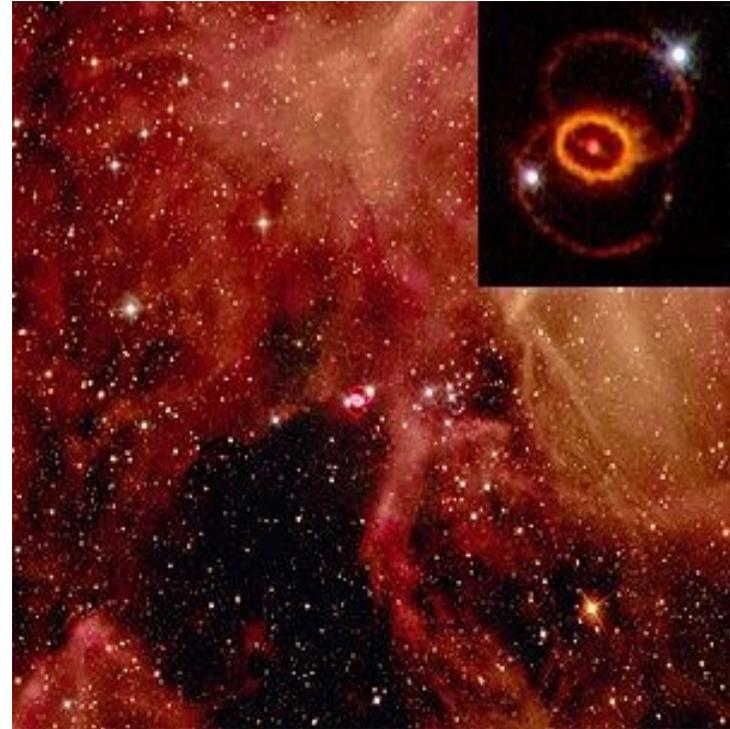
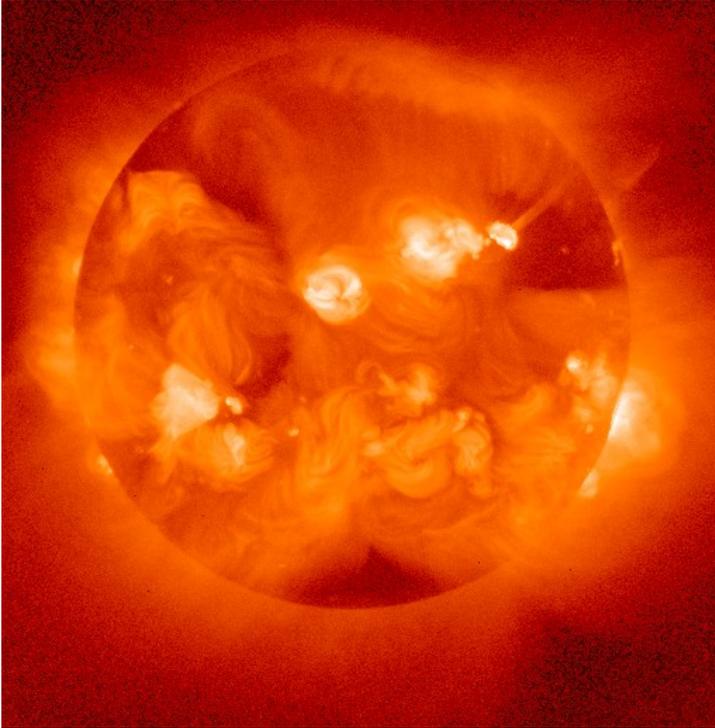


# Neutrinos aus der Sonne und Supernovae



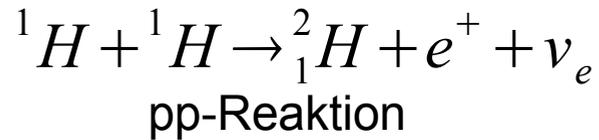
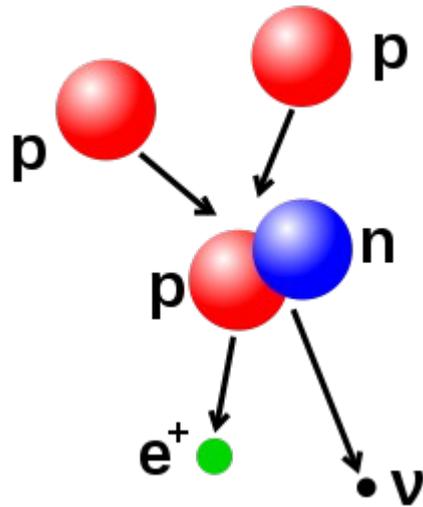
Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik (WS 2009/10)  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg

	Quarks		Leptonen	
	Ladung +2/3	Ladung -1/3	Ladung -1	Ladung 0
1. Familie	Up u	Down d	Elektron e	e-Neutrino $\nu_e$
2. Familie	Charm c	Strange s	Myon $\mu$	$\mu$ -Neutrino $\nu_\mu$
3. Familie	Top t	Bottom b	Tauon $\tau$	$\tau$ -Neutrino $\nu_\tau$
Gravitation				
Schwache Wechselwirkung				
Elektromagnetische Wechselwirkung				
Starke Wechselwirkung				

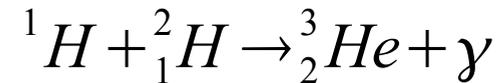
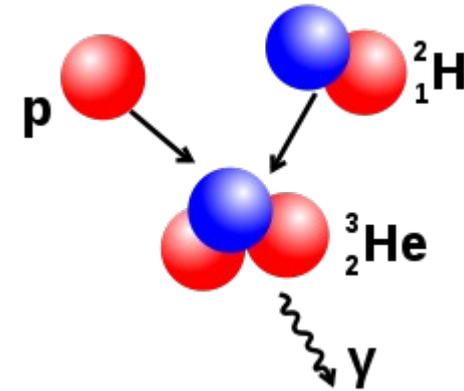
Neutrinos besitzen laut Standardmodell keine Masse, Massengrenzen bestimmt zu:  $m(\nu_e) < 0,46 \text{ eV}$       $m(\nu_\mu) < 0,19 \text{ MeV}$       $m(\nu_\tau) < 18,2 \text{ MeV}$   
 Da sie nur über die schwache WW und Gravitation mit Materie interagieren, besitzen sie im Allgemeinen sehr große freie Weglängen, so zum Beispiel für

- die Sonne (Dichte  $\bar{\rho} \approx 1 \text{ g cm}^{-3}$ ):  $l_\nu = \frac{1}{n\sigma} = \frac{\mu m_H}{\rho\sigma} = 100 \text{ pc}$
- einen weißen Zwerg (Dichte  $\bar{\rho} \approx 10^6 \text{ g cm}^{-3}$ ):  $l_\nu = 3000 R_\odot$

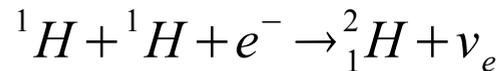
Der Fusionsreaktor der Sonne:  
Startreaktionen:



Neutrinoenergie bis ~0,4MeV

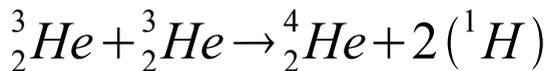
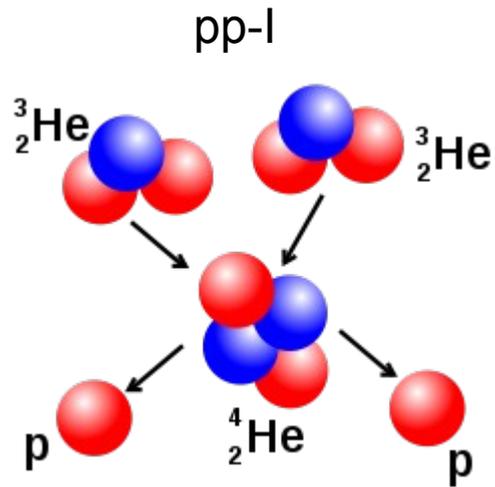


Alternative zur pp-Reaktion: pep (Proton-Elektron-Proton)



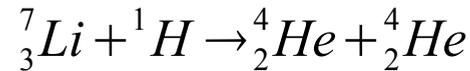
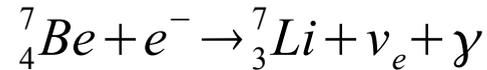
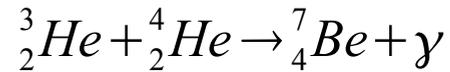
seltener als pp (1:400), Neutrinoenergie 1,44MeV

Folgereaktionen:



86% des Helium-3  
nehmen diesen  
Weg

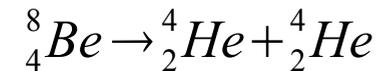
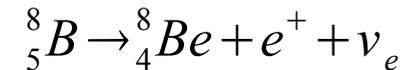
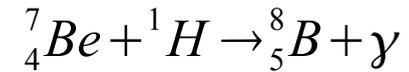
pp-II



14% des Helium-3 und  
99,89% des Beryllium-7

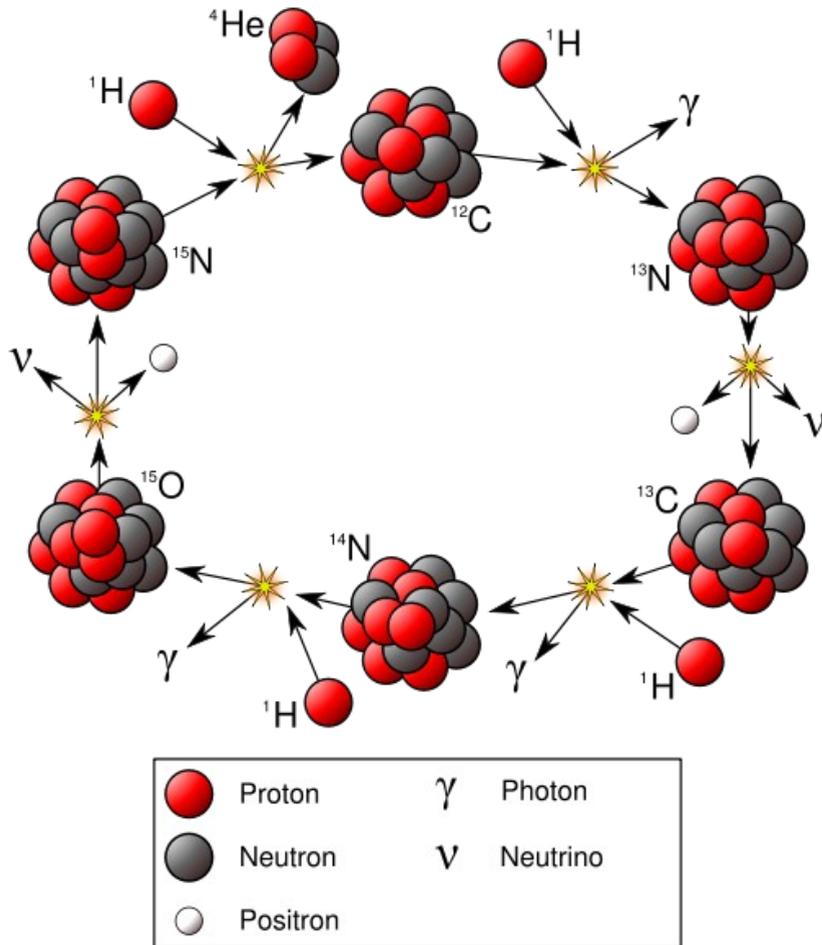
Neutrinoenergie:  
90% 0,861MeV  
10% 0,383 MeV  
abhängig vom Anregungs-  
zustand des Lithium

pp-III



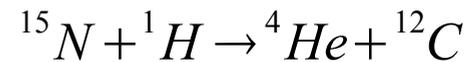
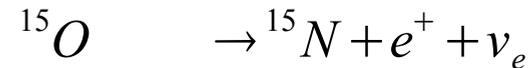
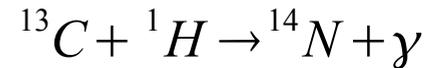
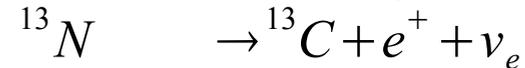
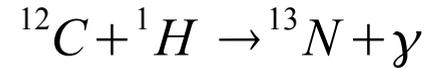
0,11% des Beryllium-7

Neutrinoenergie:  
bis zu 14,06 MeV

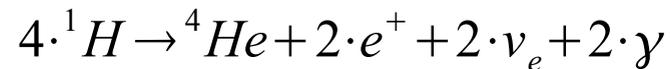


CNO-Zyklus:

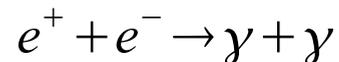
liefert ~2% der Energie der Sonne



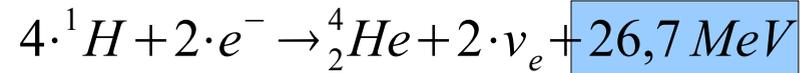
Netto:



Annihilation der entstehenden Positronen:



Gesamtreaktion:



als Photonen abgestrahlt

➔ 1 Elektronneutrino pro  $13,4 \text{ MeV} = 2,1 \cdot 10^{-12} \text{ Joule}$

Strahlungsleistung der Sonne an der Oberfläche:

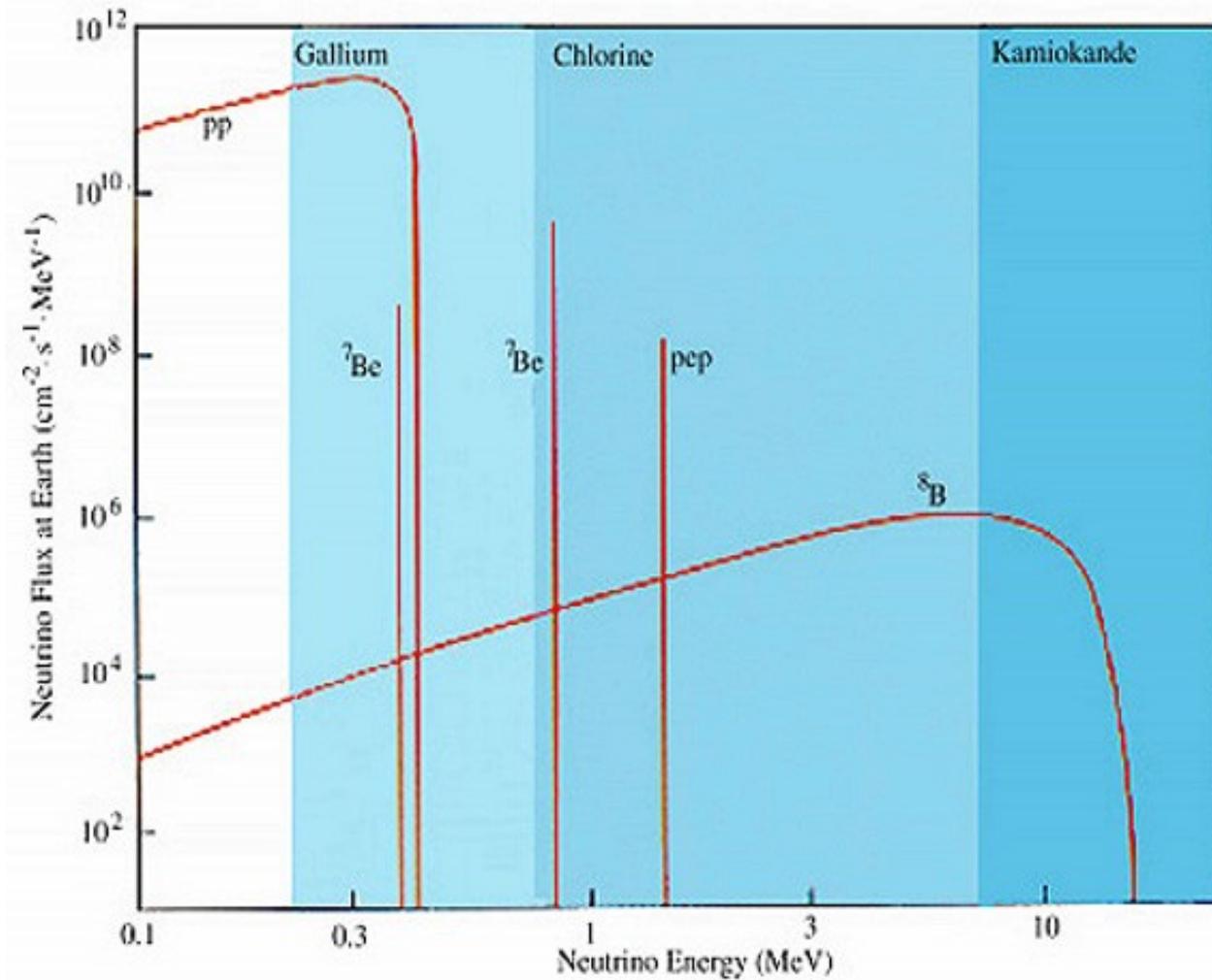
$$L_{\odot} = 0,13 \frac{W}{cm^2}$$

➔ Flussdichte der Neutrinos an der Sonnenoberfläche:

$$\Phi_{\nu} = \frac{0,13}{2,1 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{1}{cm^2 \cdot s} = 6 \cdot 10^{10} \cdot \frac{1}{cm^2 \cdot s}$$

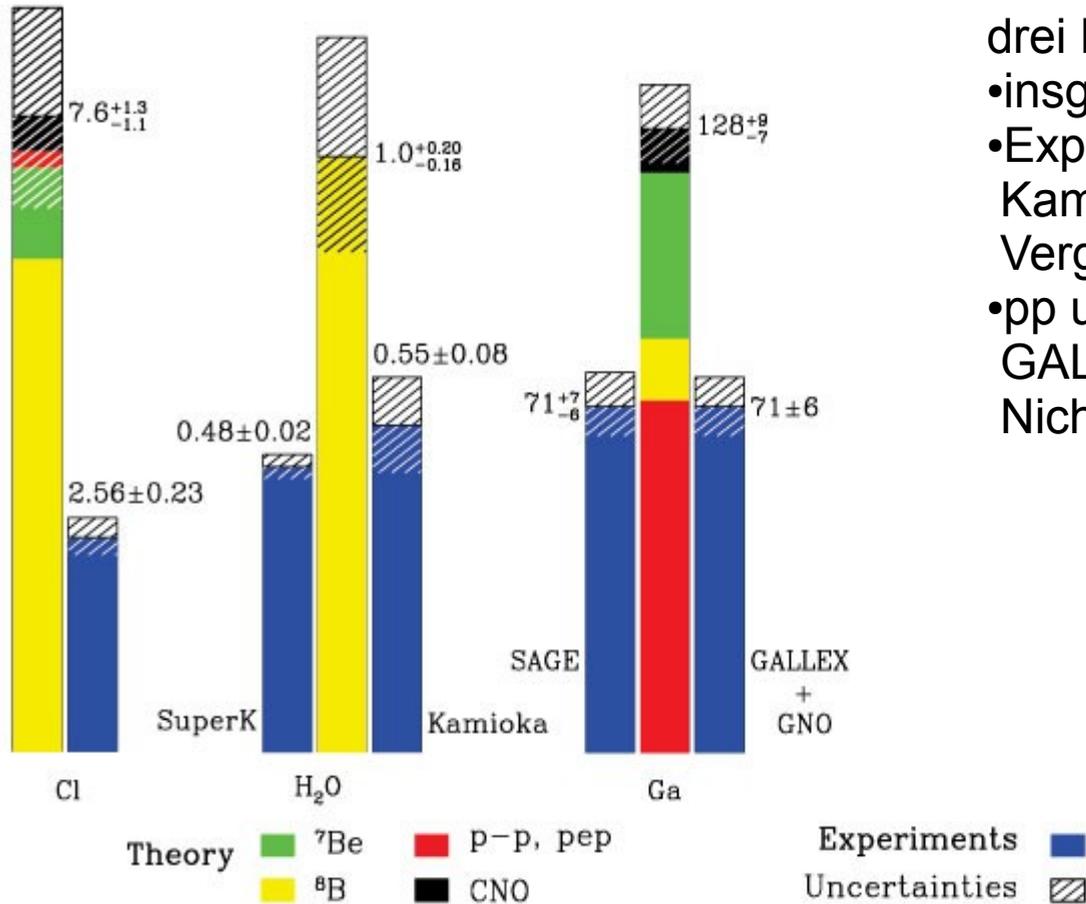
Da sich die Neutrinos mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, entspricht dies ca 2 Neutrinos pro Kubikzentimeter an der Sonnenoberfläche.

Erwarteter Fluss an Elektronenneutrinos von der Sonne auf der Erde laut Standardmodell:



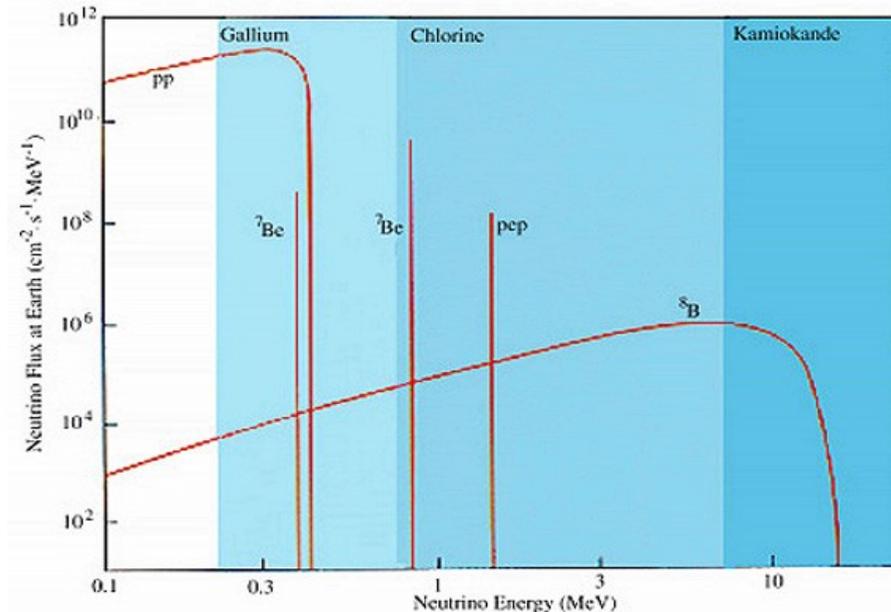
## Total Rates: Standard Model vs. Experiment

### Bahcall–Pinsonneault 2000



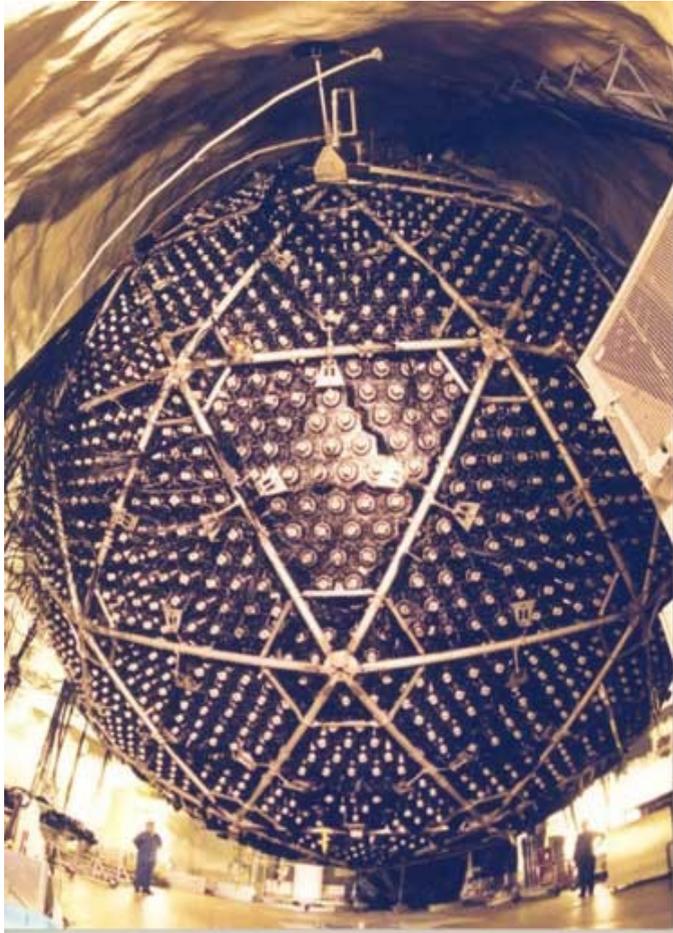
drei Probleme:

- insgesamt zu wenig Neutrinos
- Experimente widersprechen einander: Kamiokande sieht zu viele Neutrinos im Vergleich zum Chlordetektor
- pp und pep Neutrinos reichen bei SAGE, GALLEX und GNO aus, impliziert Nichtexistenz von Beryllium-7-Neutrinos



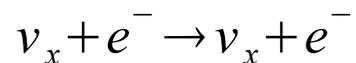
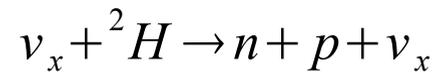
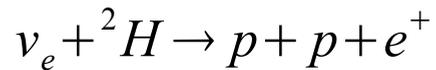
mögliche Erklärungen für das Fehlen der Neutrinos:

- falsches Verständnis der Prozesse bei Kernfusion
  - fehlerhaftes Sonnenmodell, eventuell keine Kernfusion?
  - unbekanntes Phänomen der Neutrinos  
Neutrinozerfall, Neutrinooszillation?
1. ausgeschlossen durch Forschung für Wasserstoffbombe
  2. unwahrscheinlich, da Sonnenmodell gut begründet  
und Neutrinos vorhanden  
ausgeschlossen durch Helioseismologie
  3. Hinweis auf Neutrinooszillationen durch  
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



## Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

- Cherenkov-Detektor
- 6010m Wasseräquivalent unter Erdboden in Mine nahe Sudbury, Kanada
- innere Kugelschale transparent, aus Acryl mit 12m Durchmesser, gefüllt mit schwerem Wasser
- äußere Kugelschale mit 17,8m Durchmesser gefüllt mit (leichtem) Wasser, aussen ca 9500 Photomultiplier
- Nachweis der Neutrinos über drei Reaktionen:  
 geladener Strom (charged current, CC)  
 neutraler Strom (neutral current, NC)  
 Streuung an Elektronen (electron scattering, ES)



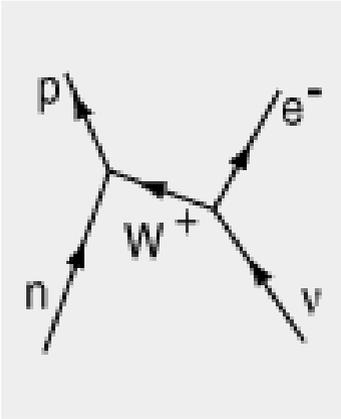
(CC)

(NC)

(ES)

} (x=e,μ,τ)

## Total Rates: Standard Model vs. Experiment Bahcall-Pinsonneault 2000

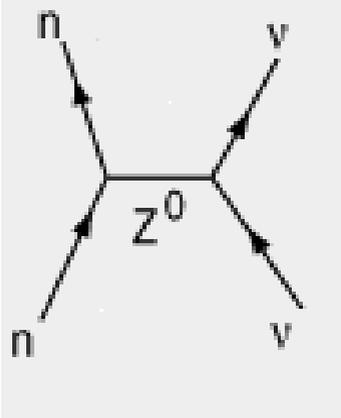


nur für Elektronneutrinos  
aus der Sonne möglich, da  
Ruhemasse  $\mu, \tau$  wesentlich  
größer als Neutrinoenergie

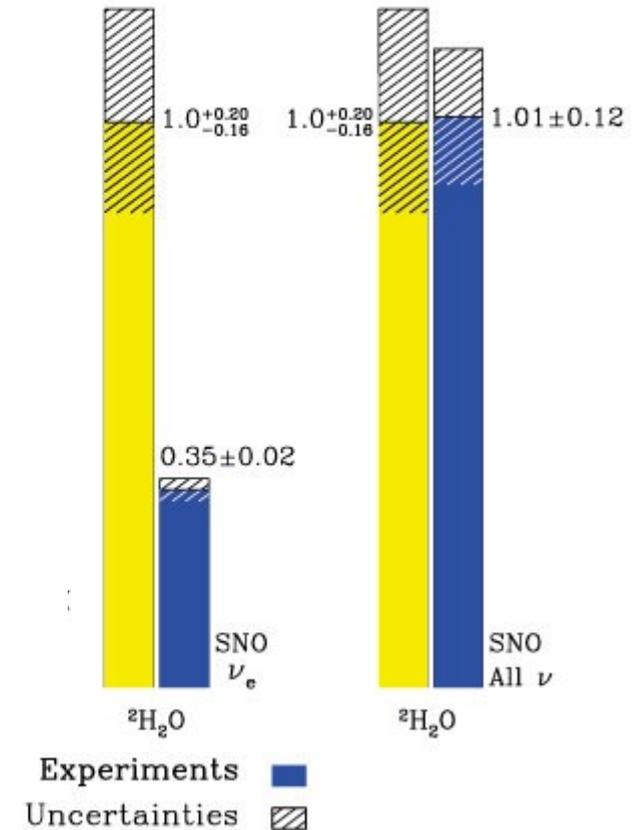
$$m_e = 0,511 \text{ MeV}$$

$$m_\mu = 105,66 \text{ MeV}$$

$$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$$



für alle Neutrino flavours  
gleichermaßen möglich



Neutrinooszillationen bestätigt!

## Was sind Neutrinooszillationen?

- Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung (Flavourzustände) sind nicht die Masseneigenzustände

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

( $\nu_x$  Superposition aus  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  zur Vereinfachung)

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta \cdot |\nu_1\rangle + \sin \theta \cdot |\nu_2\rangle, \quad |\nu_x\rangle = \cos \theta \cdot |\nu_2\rangle - \sin \theta \cdot |\nu_1\rangle$$

- Propagation findet mit Masseneigenzuständen statt, nicht mit Flavourzuständen:

$$|\nu_i(t)\rangle = \exp(-i \cdot (E_i \cdot t - \vec{p}_i \cdot \vec{x})) \cdot |\nu_i(0)\rangle$$

( $i=1,2$ )

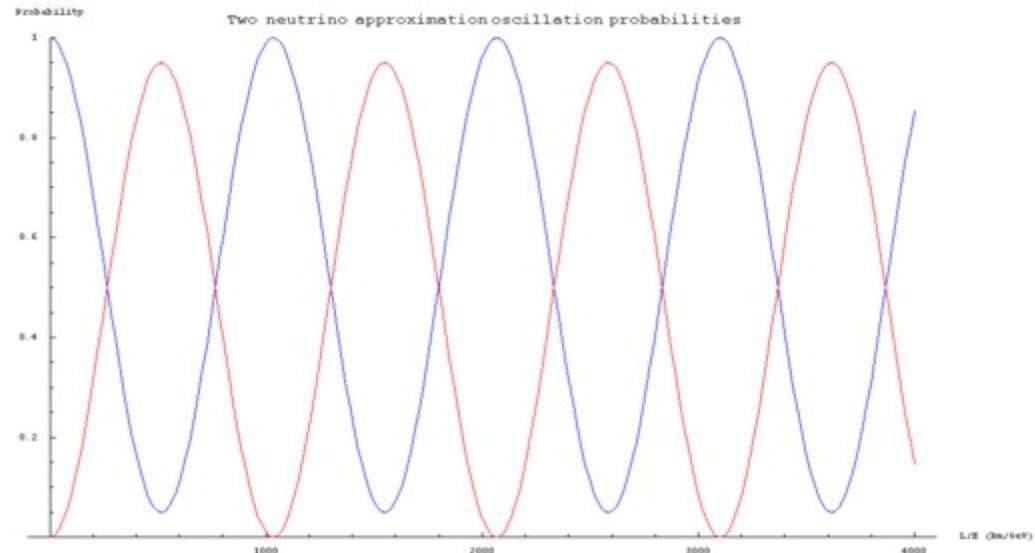
$$E^2 = p^2 + m^2 \Leftrightarrow p = \sqrt{E^2 - m^2}$$

$$\sqrt{E^2 - m^2} \approx E - \frac{m^2}{2E}, \quad L = c \cdot t = t \quad (\text{mit } c=1)$$

$$\Rightarrow |\nu_i(L)\rangle = \exp(i \frac{m_i^2}{2E} \cdot L) \cdot |\nu_i(0)\rangle$$

- Wahrscheinlichkeit für Flavourwechsel:

$$\begin{aligned} P_{e \rightarrow x}(L) &= \left| \langle \nu_e(0) | \nu_x(L) \rangle \right|^2 = \\ &= \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4E}\right) \end{aligned}$$

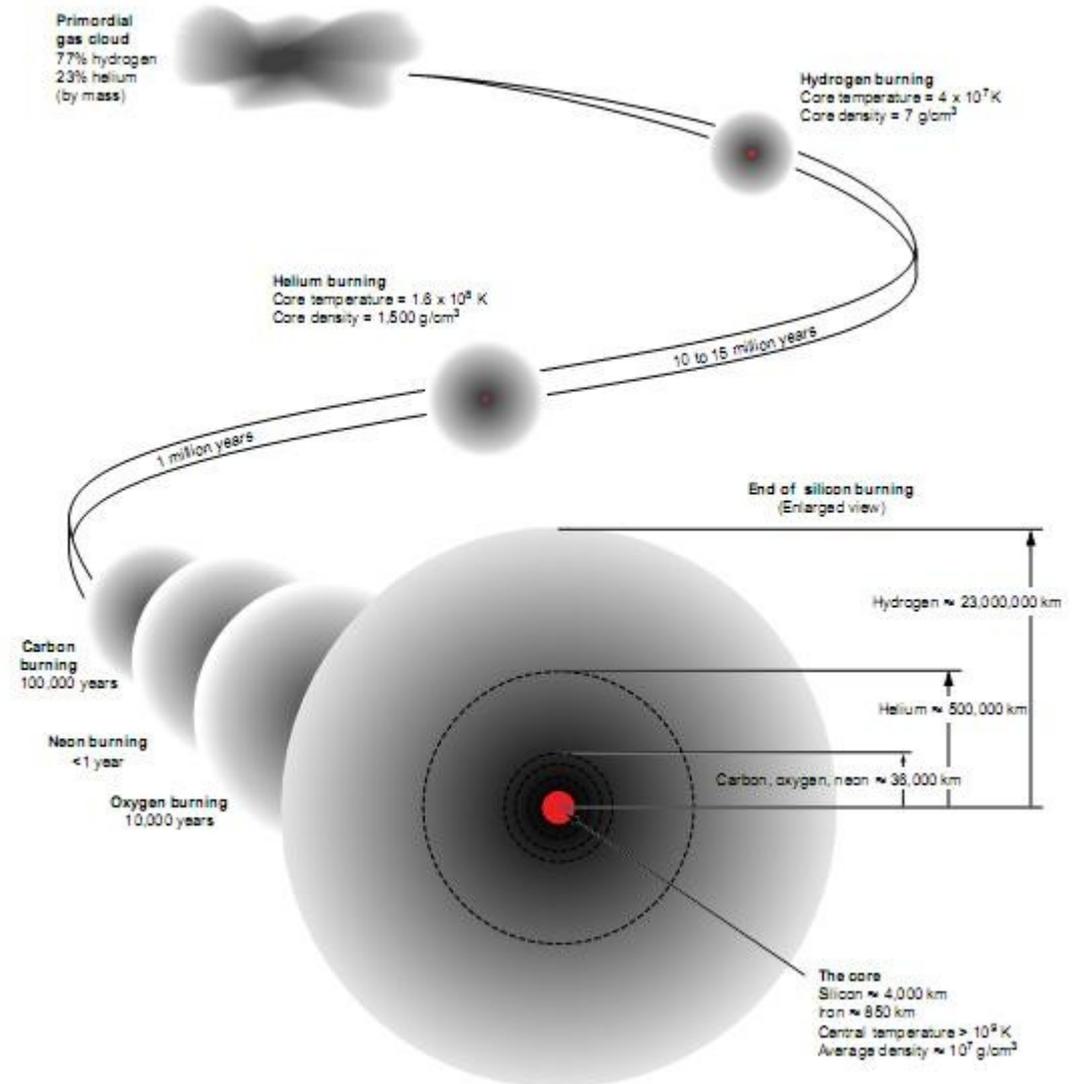


# Neutrinos aus Supernovae

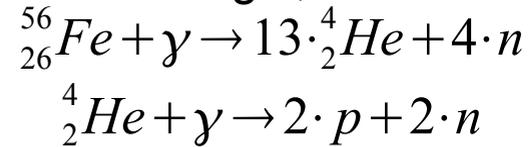
Entwicklung einer Supernova vom Typ II aus einem Stern mit Masse größer  $8 M_{\odot}$

Während einer Brennphase besteht immer ein hydrostatisches Gleichgewicht zwischen der nach innen drückenden Gewichtskraft und dem nach außen gerichteten Gas- und Strahlungsdruck.

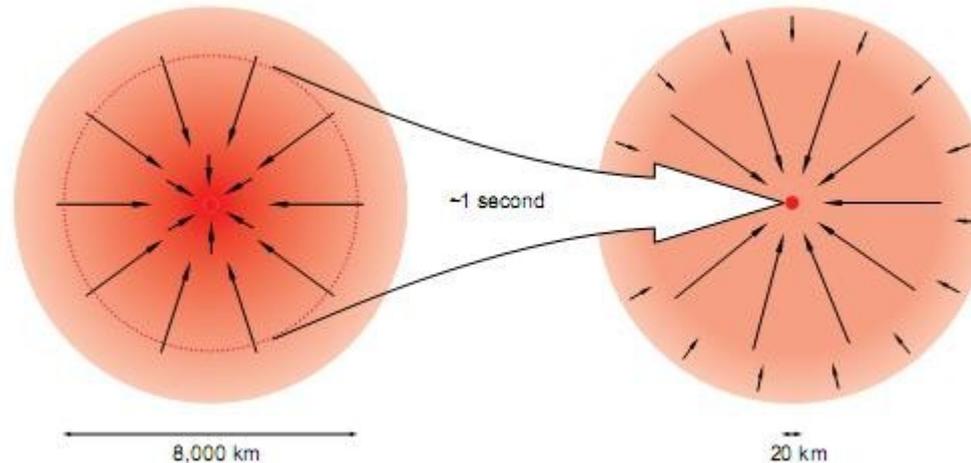
Im Laufe seines Lebenszyklus baut der Stern eine Schalenstruktur auf, bis ein Kern aus Silizium und Eisen entsteht, so dass im Zentrum keine Fusion mehr stattfindet.



- schon während den letzten Brennphasen führen steigende Temperaturen im Kern zu Photodesintegration, bei der schwerere Kerne gespalten werden, was dem Kern thermische Energie, und damit Druck nach außen, nimmt

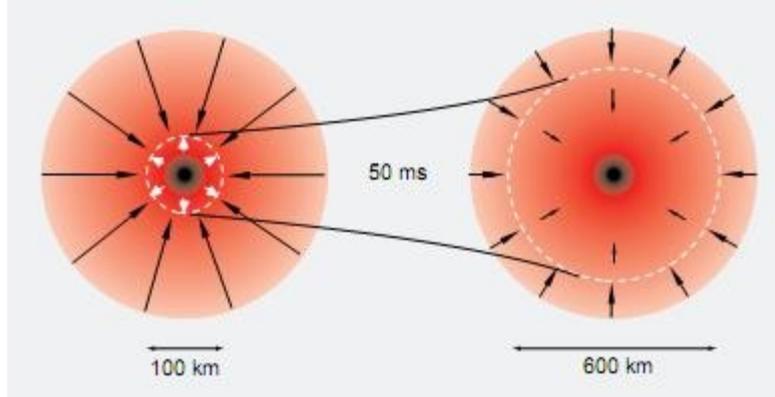


- Beginn des Kollaps durch Eigengravitation des Kerns (Chandrasekhar-Grenze  $\sim 1,44 M_{\odot}$ )



- durch steigende Dichte bekommen einige entartete Elektronen Energien  $> 2.25\text{MeV}$   
 $\Rightarrow p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ , Wirkungsquerschnitt hierfür  $\sim E_e^2$   
 $\Rightarrow$  Neutronisation des Kernes, Reduktion des Elektron-Entartungsdruckes  
 insgesamt entstehen  $\sim 10^{57} \nu_e$  durch diesen Prozess ( $\sim 10\%$  der entstehenden Neutrinos)

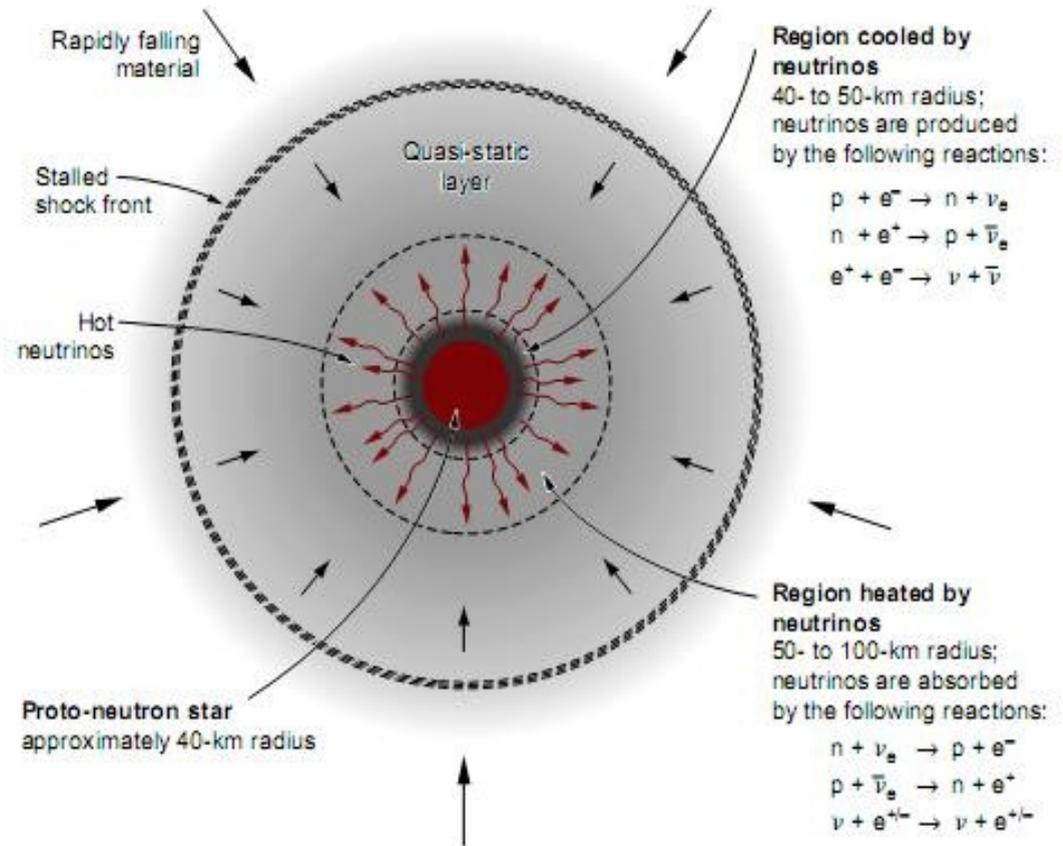
- bei einer Dichte von  $\sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$  entartet das Nukleongas im Kern
- Entartungsdruck stoppt den Kollaps bei  $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$  im Innersten ( $\sim 10 \text{ km}$ ) des Kerns
- dann plötzliche Reexpansion dieses Kern-Zentrums (core-bounce)  
=> Stoßwelle entsteht, die von außen einfallendes Sternmaterial wegdrückt

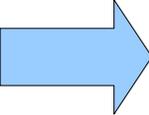


- Die Stoßwelle wird gebremst durch von aussen einfallende Sternmaterie, kommt schließlich fast zum Stehen, es bildet sich eine sehr dichte Schicht aus Materie, welche von den nach und nach aus dem entstandenen PNS entweichenden Neutrinos aufgeheizt wird und schließlich doch nach aussen dringt



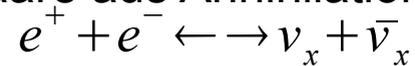
## Supernova




 Wie wird die Schicht hinter der (ehemaligen) Schockfront durch Neutrinos geheizt und woher kommen diese Neutrinos, beziehungsweise warum erst jetzt?

Woher die Neutrinos kommen:

- einerseits aus oben genannter Neutronisation
- andererseits können durch die hohen Temperaturen während dem Kollaps Neutrino/Antineutrino Paare aus Annihilation von Elektronen und Positronen entstehen:



Entweichende Neutrinos kühlen den Kern

Energieverteilung der einzelnen Arten  $x=e,\mu,\tau$  entspricht Fermi-Dirac-Verteilung mit

$$\langle E(\nu_x) \rangle = 3,5 \cdot k \cdot T(\nu_x)$$

Die zugehörigen Temperaturen:

$$T(\nu_e) \approx 3 \frac{\text{MeV}}{k}, \quad T(\nu_\mu) \approx 4,5 \frac{\text{MeV}}{k}, \quad T(\nu_\tau) \approx 6 \frac{\text{MeV}}{k}$$

Unterschiedliche Temperaturen durch unterschiedliche Wirkungsquerschnitte für zb CC-Reaktion, dadurch stammen die Elektroneneutrinos aus höheren, relativ kühleren Schichten.

Warum die Neutrinos erst jetzt auftauchen:

- durch die extrem hohe Dichte im PNS ( $\sim 10^{12} - 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ) haben die Neutrinos dort eine geringe freie Weglänge:

$$l_\nu \approx 1\text{m}$$

=> Neutrinodiffusion, über folgende Reaktionen ( $x=e,\mu,\tau$ ):

- elastische Streuung an Core-Materie, bezeichnet mit A (NC)



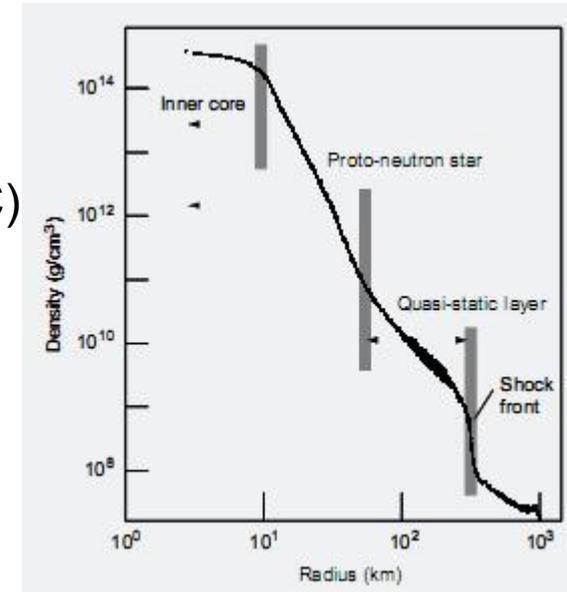
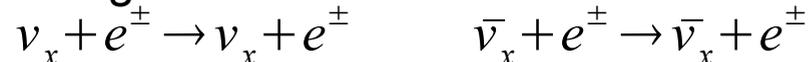
- elastische Streuung an Protonen und Neutronen (NC)



- Neutrinoeinfang (CC, hauptsächlich Elektronneutrinos)

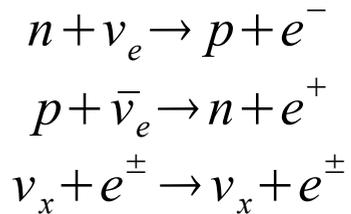


- elastische Streuung an Elektronen oder Positronen (ES)



Neutrinos entfliehen dem Kern nicht sofort, sondern werden über einen Zeitraum von 10-20s abgegeben

Aufheizen des „quasi static layer“, der dichten Schicht hinter der (ehemaligen) Schockfront:



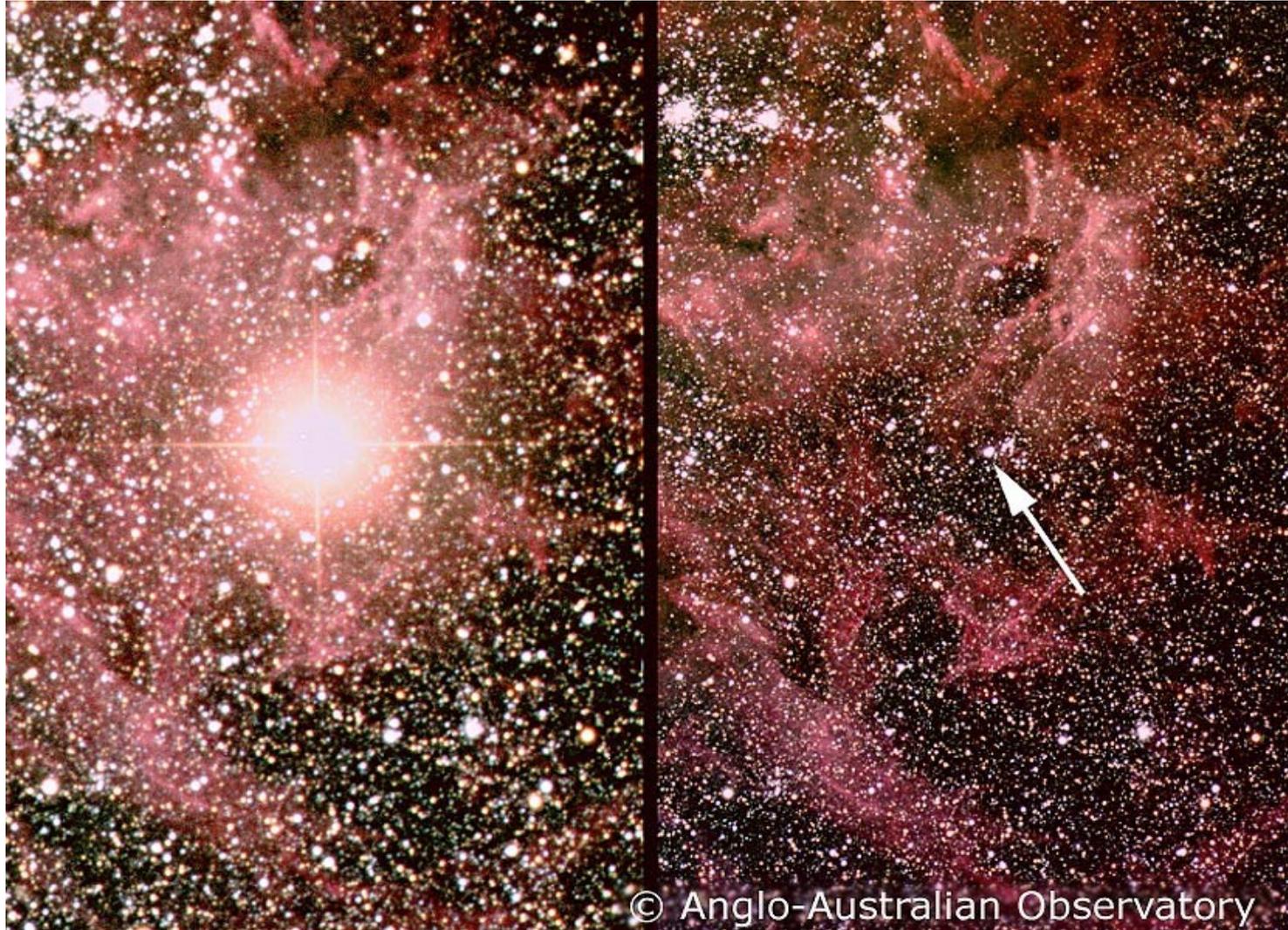
Abschätzung der freiwerdenden Energie bei einer Supernova des Typ II:

$$\Delta E \simeq \frac{3}{5} \frac{G \cdot M_{NS}^2}{R_{NS}} - \frac{3}{5} \frac{G \cdot M_{NS}^2}{R_{core}} \simeq 3 \cdot 10^{53} \text{ ergs} = 3,2 \cdot 10^{46} \text{ Joule}$$

Davon gehen ca  $10^{42}$  *Joule* in elektromagnetische Strahlung,  
ca  $10^{44}$  *Joule* in die Explosion der Hülle  
und der Rest, ca 99% der Energie wird durch Neutrinos abgestrahlt.

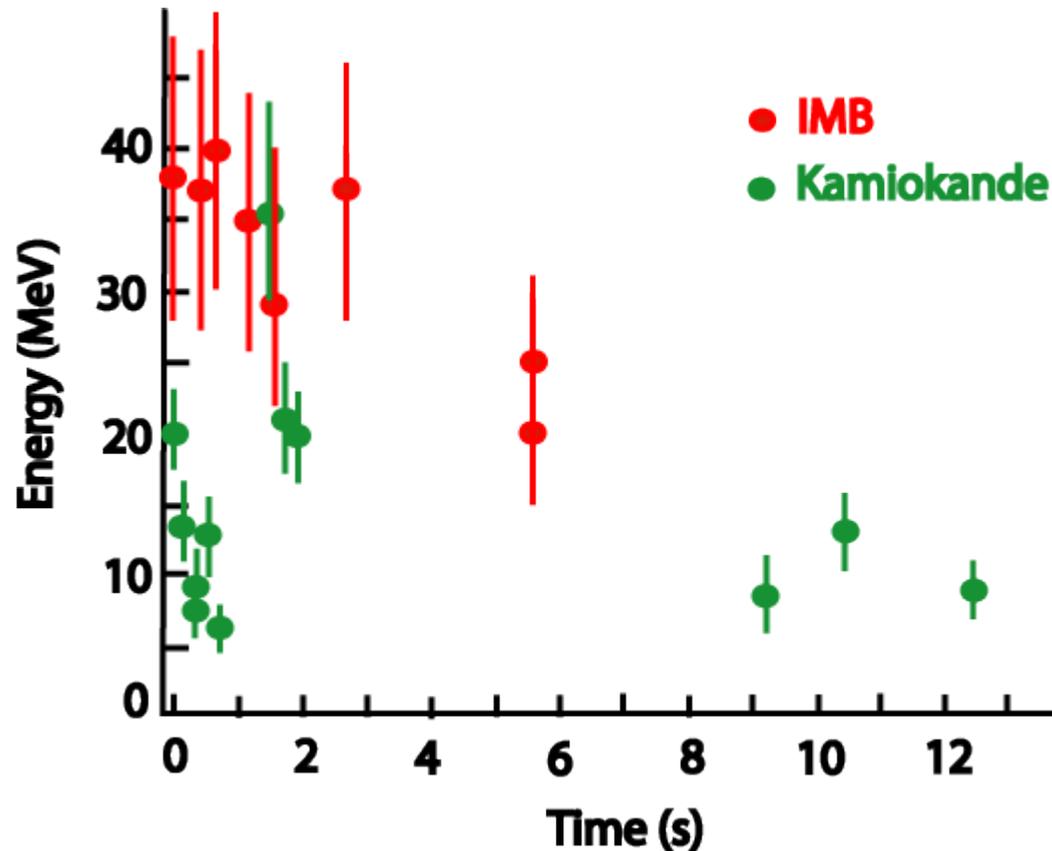
Obwohl einige Neutrinos durch das Heizen der Stoßwelle verlorengehen, kommen sie dennoch mehrere Stunden aus dem explodierenden Stern, bevor die Stoßwelle, oder Photonen aus dem Inneren von außen sichtbar wären.

Bisher einzige Supernova aus der Neutrinos nachgewiesen wurden:



SN1987A

## Gemessene Neutrinos:



gute Übereinstimmungen mit dem Modell:

- Neutrinopulsdauer  $\sim 10\text{-}20$  s
- Temperatur der Neutrinoquelle zum Pulsbeginn
- Abfall der Neutrinoenergie entsprechend Kühlvorgang
- Neutrinos kamen an, bevor die Supernova sichtbar war

## Für die Zukunft: SNEWS

(SuperNova Early Warning System)

- Netzwerk von Neutrinodetektoren, zusammengeschalten mit Koinzidenzschaltung
- momentane Mitglieder: Sudbury Neutrino Observatory (USA)  
Super-Kamiokande (Japan)  
Large Volume Detector (Italien)  
Antarctic Muon And Neutrino Detector Array
- Bei einem Supernovaausbruch in der Milchstraße erwartet man ca  $10^4$  Ereignisse in Super-Kamiokande und ca  $10^3$  in den anderen Detektoren zusammengenommen.
- Man geht von ca 3 SN pro Jahrhundert in der Milchstraße aus
- Dadurch, dass man bereits im Voraus wüsste, dass eine Supernova in einem bestimmten Himmelsgebiet ( $\sim 3^\circ$  Genauigkeit) sichtbar sein wird, könnte man den (Photonen-)Ausbruch (vor allem den Beginn) wesentlich besser studieren.
- Eine Supernova ausserhalb der Milchstraße, in einem Umkreis von ca 1Mpc erwartet man ca 1 mal pro Jahr, allerdings wesentlich schwieriger zu detektieren: erwartet  $\sim 1$  event in Hyperkamiokande (noch nicht gebaut). Zur Identifizierung als SN-Ausbruch mindestens zwei Neutrinos oder Koinzidenz mit optischem Ausbruch nötig.

## Quellenliste:

- International Neutrino Summer School 2009  
<http://indico.fnal.gov/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=2341>
- „Solar Fusion & Neutrinos“  
<http://www.tim-thompson.com/fusion.html>
- „MINOS talks“  
<http://www-numi.fnal.gov/talks/results06.html>
- SNO website  
<http://www.sno.phy.queensu.ca/>
- SNEWS website  
<http://snews.bnl.gov/>
- „Los Alamos Science“, Ausgabe 25 von 1997  
<http://la-science.lanl.gov/lascience25.shtml>
- verschiedene Präsentationen von Georg Raffelt (Max-Planck-Institut für Physik, München)
- „Fundamental Forces“  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/funfor.html>
- Wikipedia