

Supernova Detektion mit dem IceCube Neutrino Teleskop

Richtungsbestimmung von SN und Messung der Neutrinomasse
und mittlerer Neutrinoenergie

Benjamin Eberhardt

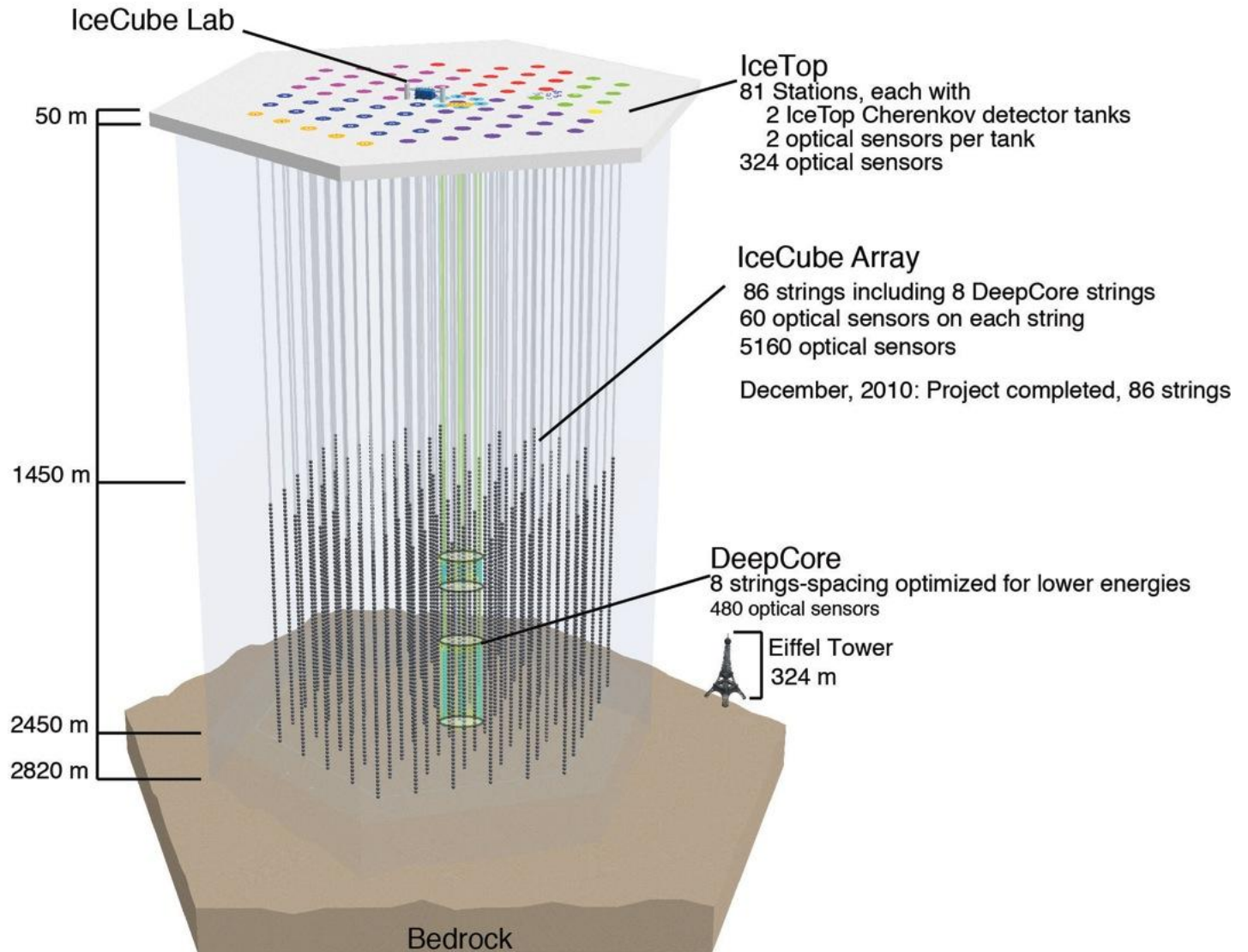
15/10/2014

Schule für Astroteilchenphysik 2014
Obertrubach Bärnfels

Aufbau IceCube Neutrinoobservatorium



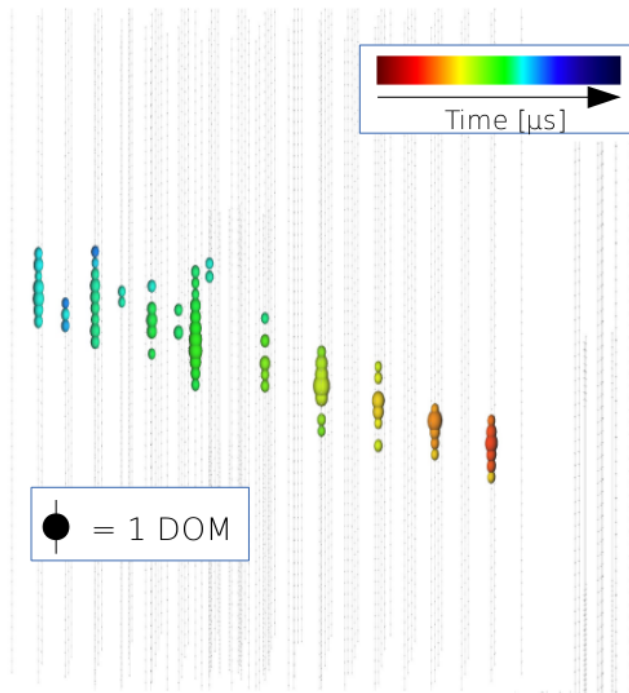
Aufbau IceCube Neutrinoobservatorium



Neutrino event signatures

Muon neutrino, CC

$$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$$



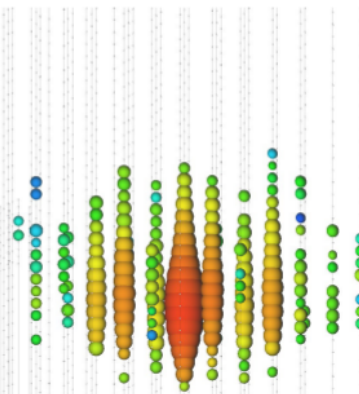
track
~ 30 TeV ν_{μ}

Electron neutrino, CC

$$\nu_e + N \rightarrow e + X$$

All flavors, NC

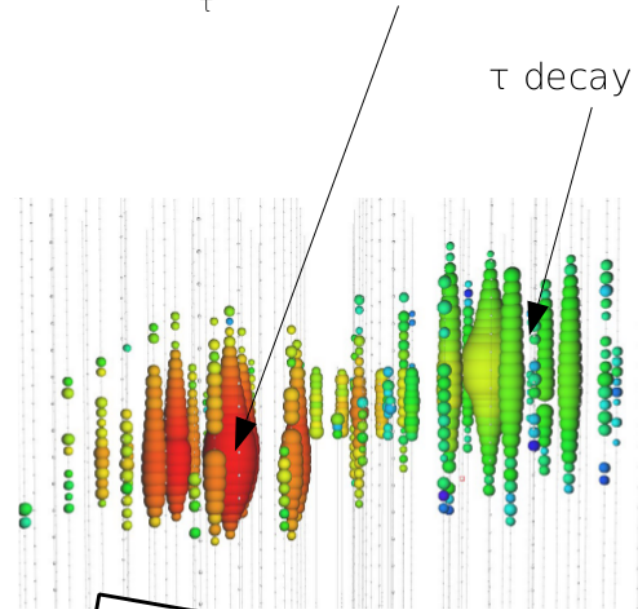
$$\nu_x + N \rightarrow \nu_x + X$$



cascade
~ 150 TeV ν_e

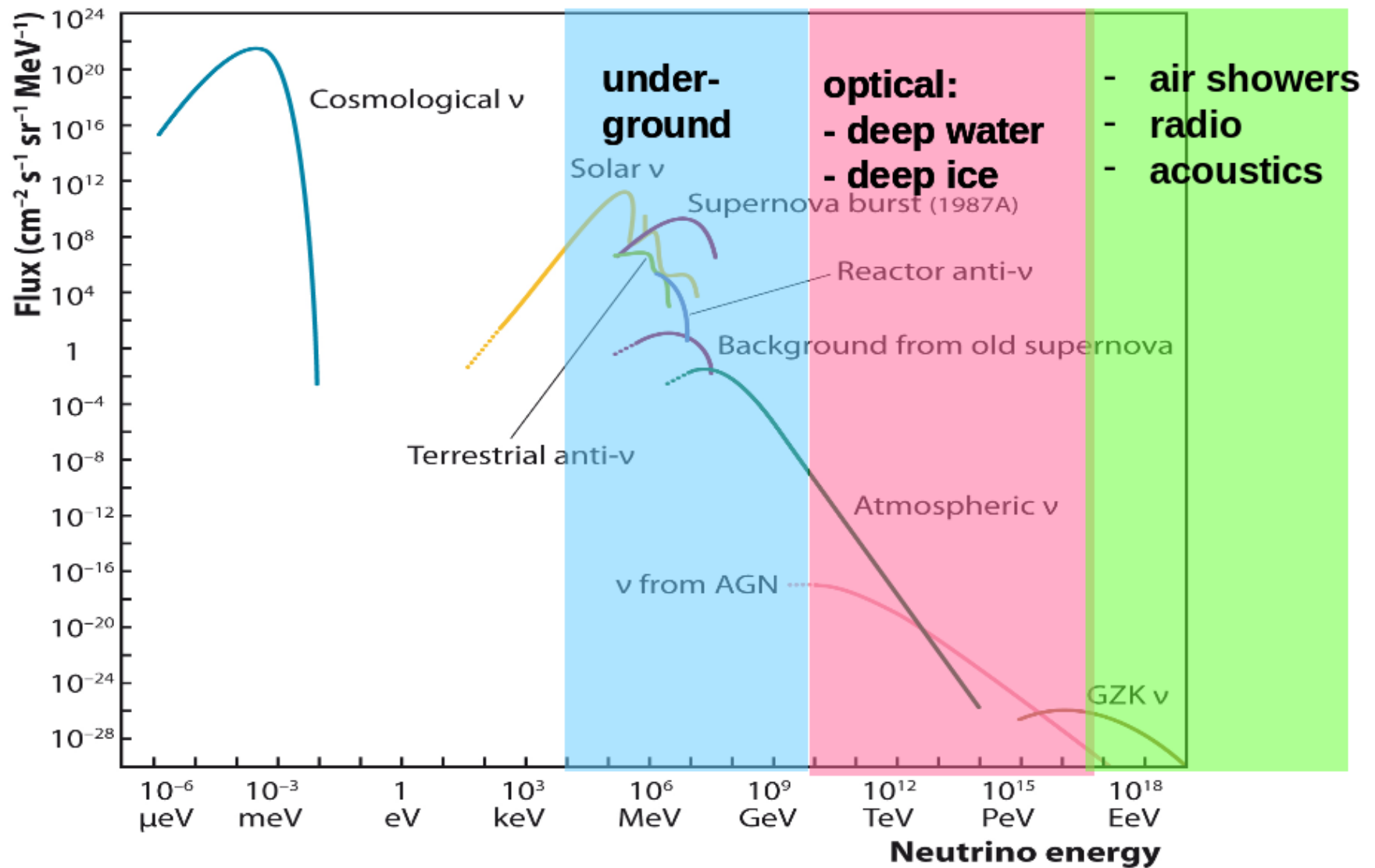
Tau neutrino, CC

$$\nu_{\tau} + N \rightarrow \tau + X$$

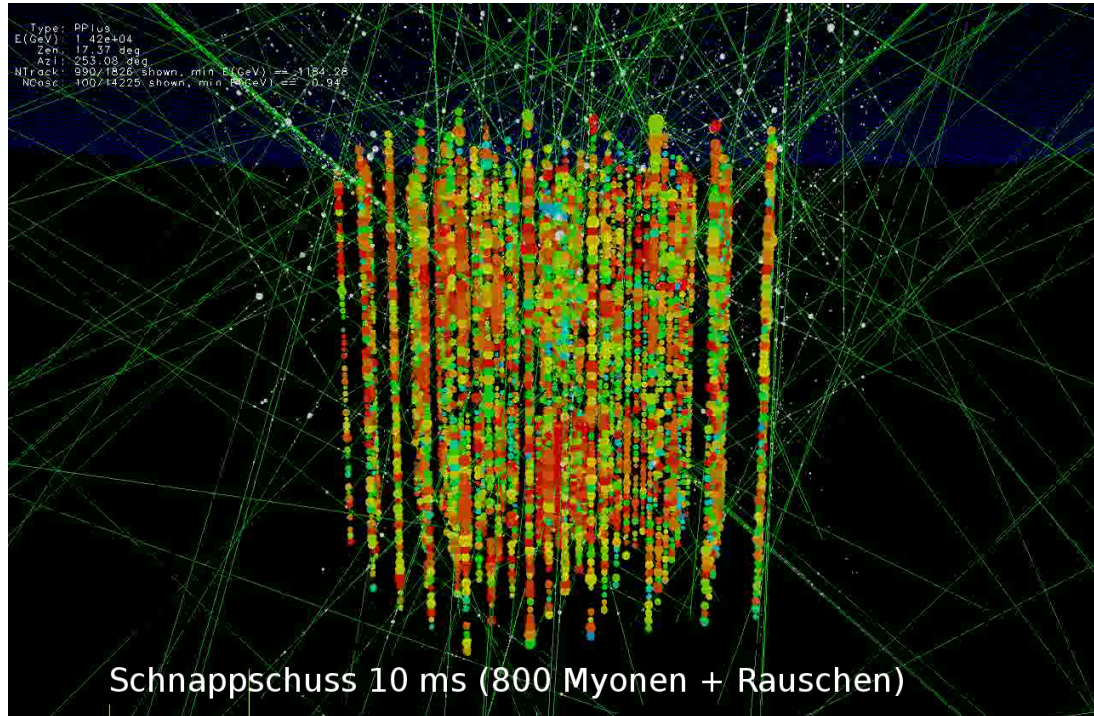


"double bang"
~ 5 PeV ν_{τ}

Erwartete Flüsse kosmischer Neutrinos



Detektion von SN Neutrinos mit IceCube



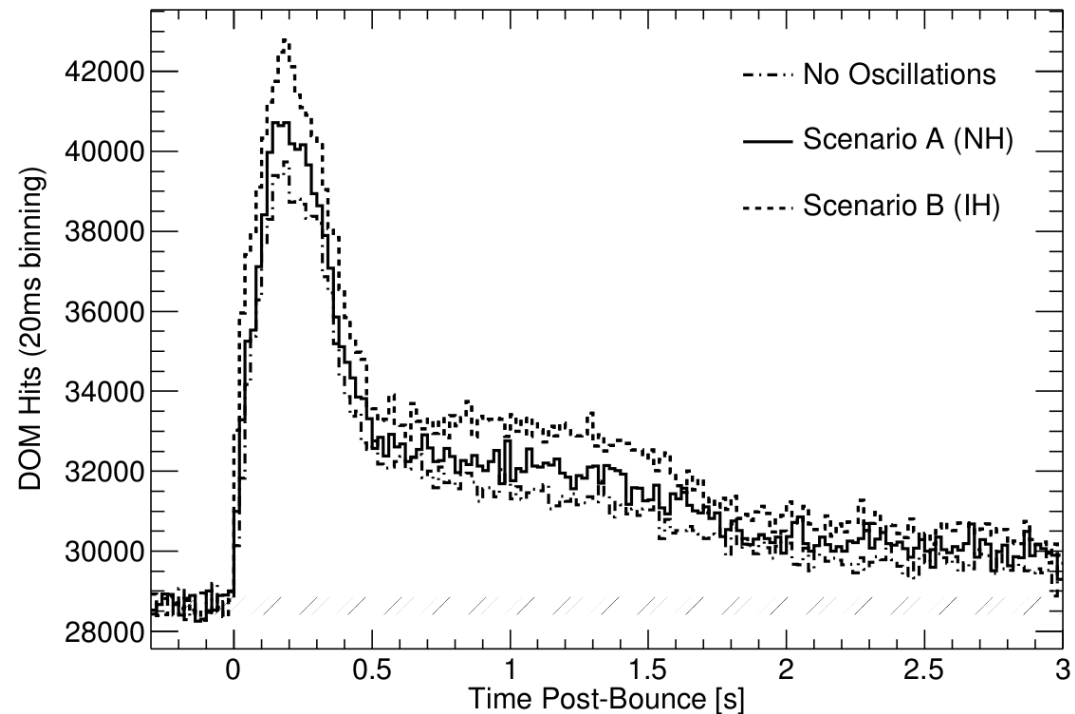
- SN Neutrinos haben eine Energie von O(MeV) und sind mit IceCube nicht einzeln aufzulösen.
- Für die SN Detektion werden die Rauschraten aller Module pro Zeitintervall (0,5/ 1,5/ 4/ 10 s) auf signifikante Überhöhungen überwacht.

Simuliertes SN Signal in IceCube

IceCube wird die statistisch genaueste Neutrino-Leuchtkurve für SN in der Milchstraße bereitstellen.

~ 40.000 x mehr Ereignisse als SN1987A für eine SN im Zentrum der Galaxie (~ 10 kpc)

Ereignis liefert Informationen über den Stern sowie Eigenschaften der Neutrinos -
> SN interessant für Astro- und Teilchenphysiker sowie Astronomen (SNEWS)

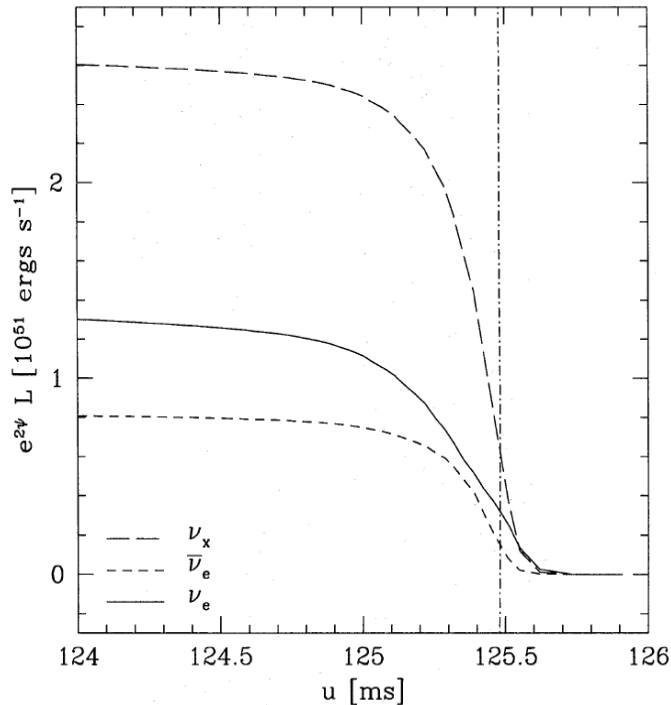


Aber: keine Information über die Richtung der SN und über die mittlere Energie der SN Neutrinos aus der Leuchtkurve.

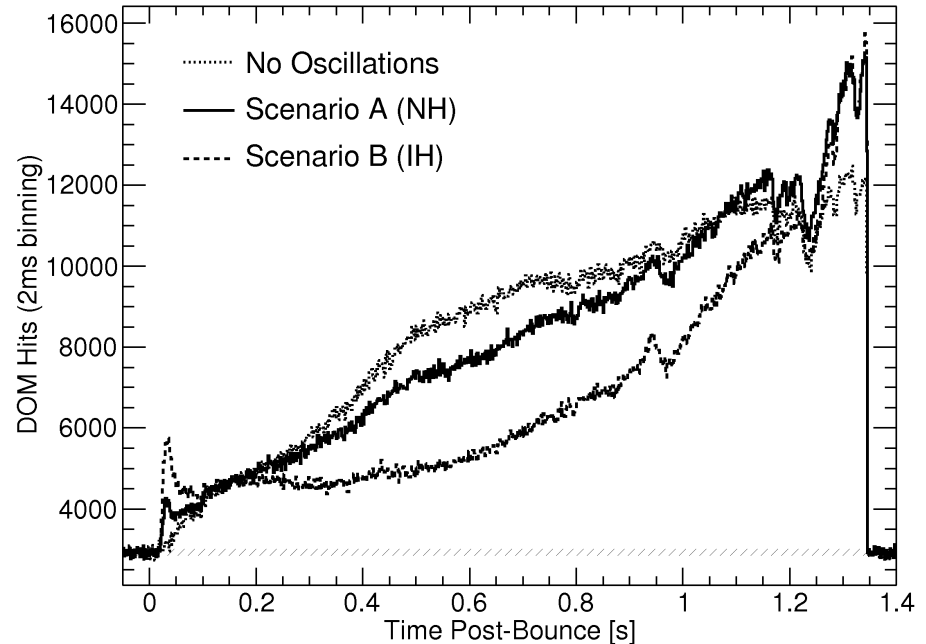
Lösung: speichere ungefilterte Trefferdaten in zeitlich feinerer Auflösung

Richtungsbestimmung von Supernovae

Neutrinofluss am Stern:



Erwartete Leuchtkurve:



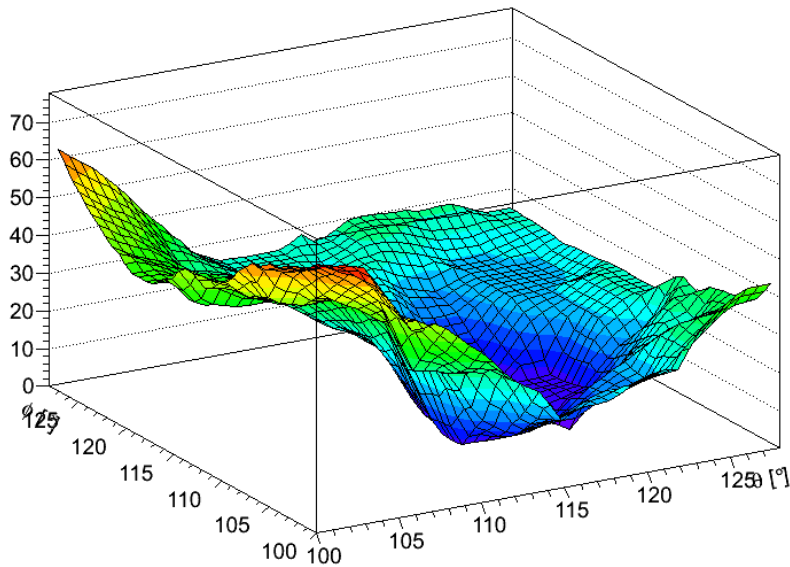
- Ebene Neutrinowelle durchquert den Detektor mit $0,3 \text{ km}/\mu\text{s}$
- Benötige Signaländerungen von $O(\mu\text{s})$
- SN Signal variiert mit $O(10 \text{ ms})$
- Aber: Formierung eines Schwarzen Loches in $O(100 \mu\text{s})$

Richtungsbestimmung von Supernovae

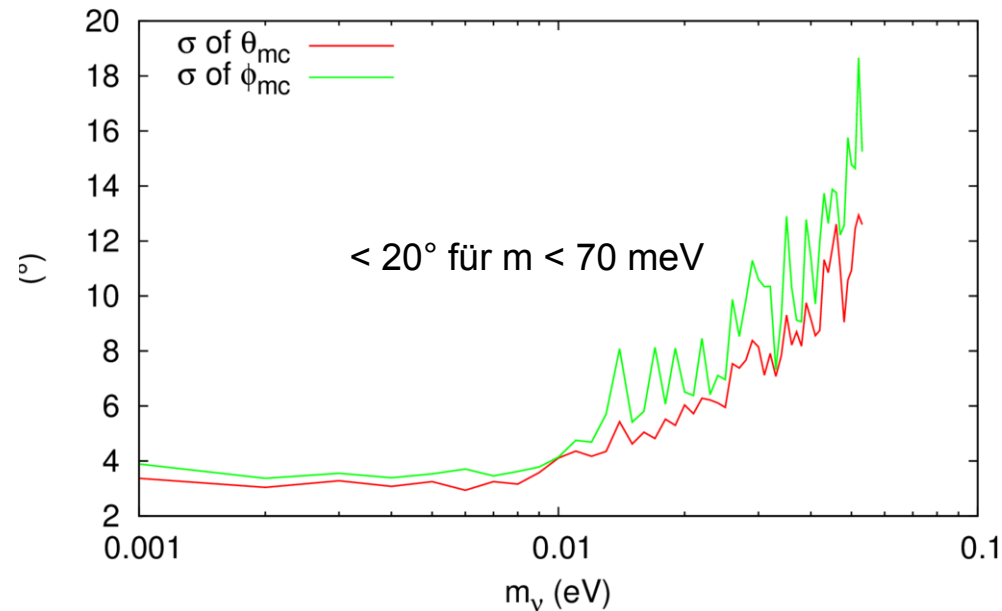
Simulation für instantane Formierung eines Schwarzen Loches
Abstand 3 kpc

$$P(\phi, \theta) = \prod_{j=1}^{j=m_{hit}} \left(N_{\text{signal}} \cdot p_{\text{signal}}(\phi, \theta, t_j) + \frac{N_{\text{noise}}}{T} \right) / (N_{\text{signal}} + N_{\text{noise}})$$

Probability density function



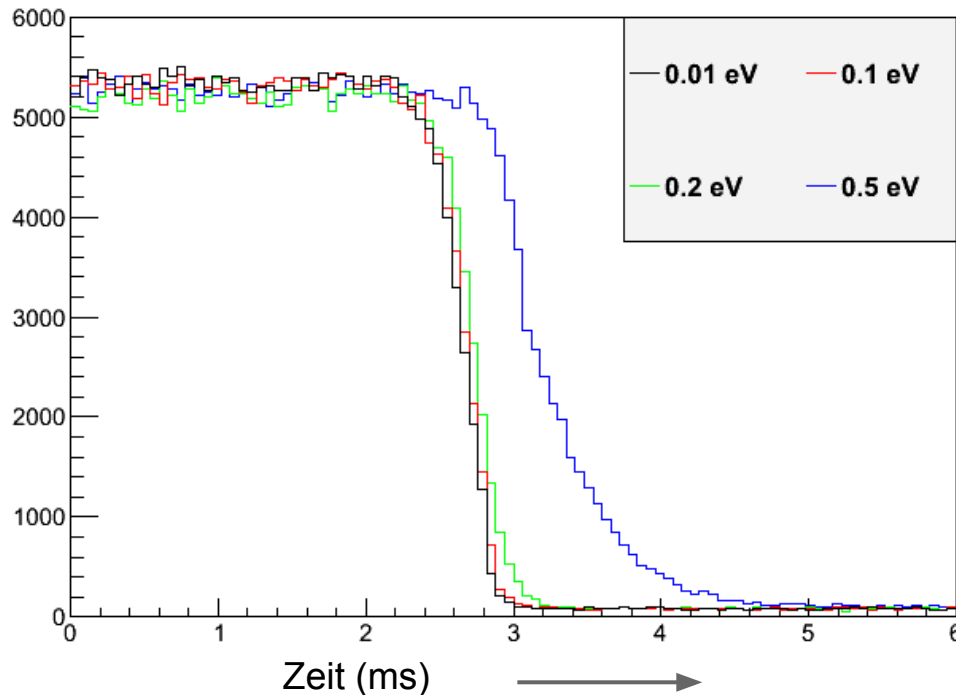
m_ν -scan bei $\phi_{\text{true}} = 115^\circ$, $\theta_{\text{true}} = 115^\circ$, $d = 3$ kpc



Methode noch nicht anwendbar für verzögerte Formierung eines Schwarzen Loches

Bestimmung der Neutrinomasse aus SN Signal

Treffer/ 2 ms



Neutrinosignal einer verzögerten
Formierung eines Schwarzen
Loches im Abstand 3 kpc mit
verschiedenen e-Neutrinomassen

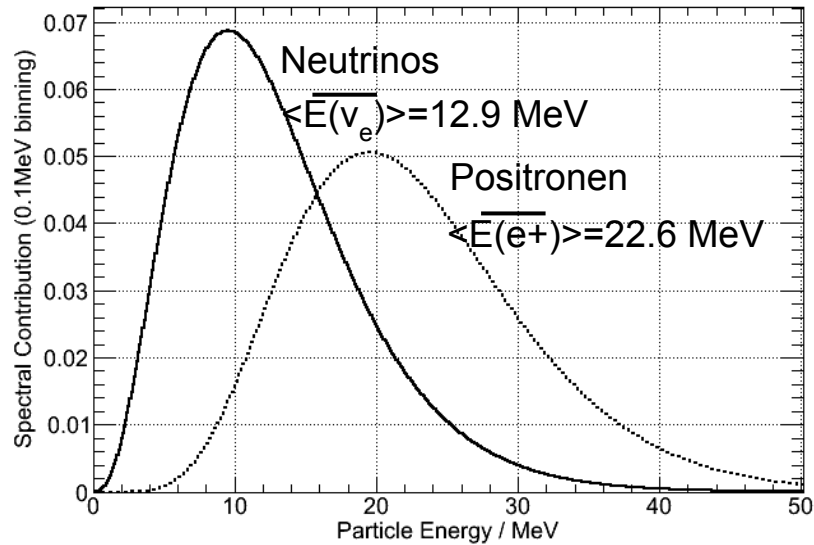
$$m_\nu = 15\eta eV$$

$$\Delta\tau \simeq \frac{L}{2c} \left(\frac{m_\nu}{E_\nu} \right)^2 = 0.5 \eta^2 s$$

Im Falle der Bildung eines
schwarzen Loches kann die SN
Leuchtkurve an verschiedene SN
Modelle mit unterschiedlichen
Neutrinomassen gefitted werden.

Bestimmung der mittleren SN-Neutrinoenergie

8.8 M progenitor O-Me-Mg core (1s after bounce)

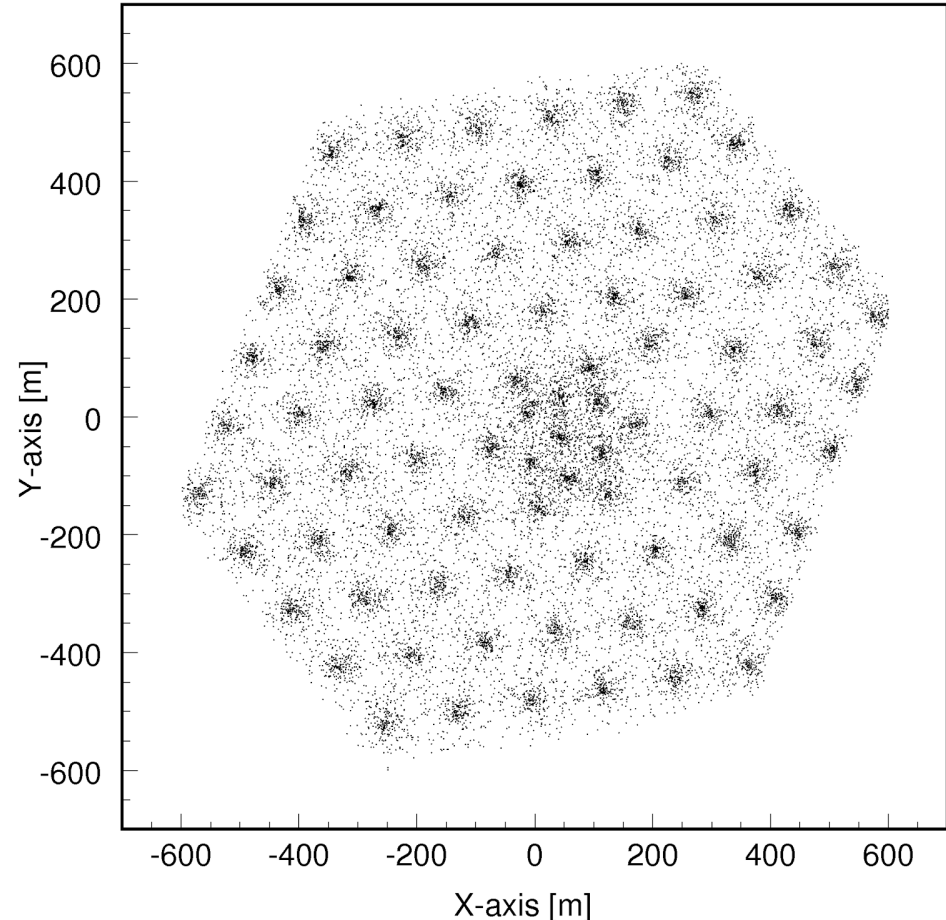


Dominanter Prozess: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

Anzahl an Cherenkov Photonen:
 $N[300-600 \text{ nm}] = 188 \times E_{e^+} / \text{MeV}$

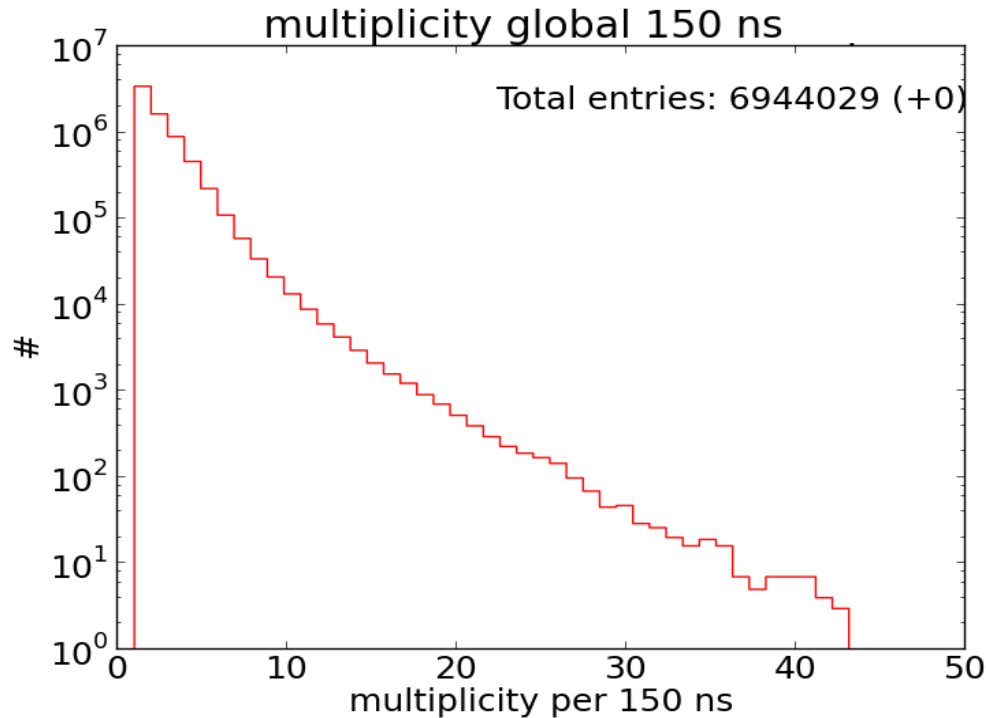
Effektives Positron Volumen:
 $V_{e^+}^{\text{eff}} = 29.5 \text{ m}^3 \times E_{e^+} / \text{MeV}$

Für $E_{e^+} = 22 \text{ MeV}$:
 „volle Effizienz in einer Kugel mit $r = 5.5 \text{ m}$ “



Koinzidenzwahrscheinlichkeit 2.8%
 Sehr kleine Überlappung der Effektiven
 Volumina der optischen Module

Bestimmung der mittleren SN-Neutrinoenergie



Gesamte Koinzidenzen aller
Treffer pro SN Ereignis in
150 ns Intervallen

Simulation für eine SN
Neutrino Energieverteilung

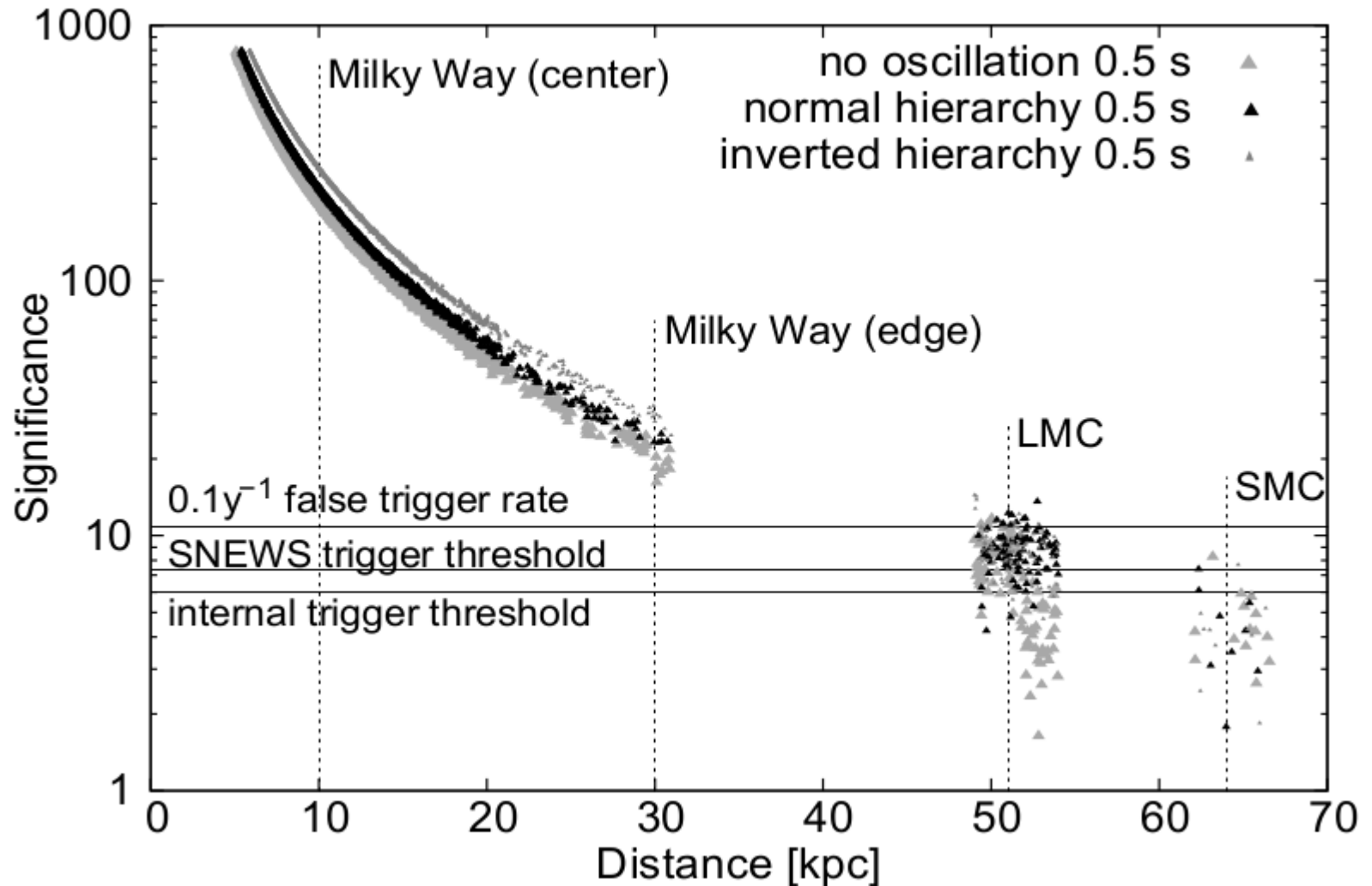
Zeitliche und räumliche
Koinzidenzen im Detektor
sind abhängig von der
Energie der SN-Neutrinos

Ziel: Extraktion der mittleren Neutrinoenergie aus der Multiplizitätsverteilung.
Weitere Simulationen mit verschiedenen Neutrino-Energieverteilungen
notwendig.

Ausblick

- IceCube wird die statistisch genaueste Neutrino-Leuchtkurve für SN in der Milchstraße bereitstellen.
- SN Frühwarnsystem für Astronomen (SNEWS)
- Weitere Simulationen zur Bestimmung von Neutrinomasse, Neutrinoenergie und SN Richtung.

SN Auflösung von IceCube



Reaktionskanäle

Reaction	# Targets	# Signal Hits	Signal Fraction	Reference
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	$6 \cdot 10^{37}$	134 k (157 k)	93.8 % (94.4 %)	Strumia & Vissani (2003)
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$	$3 \cdot 10^{38}$	2.35 k (2.25 k)	1.7 % (1.4 %)	Marciano & Parsa (2003)
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$	$3 \cdot 10^{38}$	660 (720)	0.5 % (0.4 %)	Marciano & Parsa (2003)
$\nu_{\mu+\tau} + e^- \rightarrow \nu_{\mu+\tau} + e^-$	$3 \cdot 10^{38}$	700 (720)	0.5 % (0.4 %)	Marciano & Parsa (2003)
$\bar{\nu}_{\mu+\tau} + e^- \rightarrow \bar{\nu}_{\mu+\tau} + e^-$	$3 \cdot 10^{38}$	600 (570)	0.4 % (0.4 %)	Marciano & Parsa (2003)
$\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + X$	$3 \cdot 10^{37}$	2.15 k (1.50 k)	1.5 % (0.9 %)	Kolbe et al. (2002)
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + X$	$3 \cdot 10^{37}$	1.90 k (2.80 k)	1.3 % (1.7 %)	Kolbe et al. (2002)
$\nu_{\text{all}} + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_{\text{all}} + X$	$3 \cdot 10^{37}$	430 (410)	0.3 % (0.3 %)	Kolbe et al. (2002)
$\nu_e + {}^{17/18}\text{O}/{}^2\text{H} \rightarrow e^- + X$	$6 \cdot 10^{34}$	270 (245)	0.2 % (0.2 %)	Haxton (1999)

Notes. The approximate number of targets in a 1 km^3 ice detector, the detected number of hits at 10 kpc distance and their fraction in stars are given in the second, third and fourth column, respectively. In order to indicate the effect of neutrino oscillations in the star, signal hits and fractions are presented both assuming a normal neutrino hierarchy (Scenario A) and - in brackets - assuming an inverted hierarchy (Scenario B). The numbers are taken from the Garching model using the equation of state by [Lattimer & Swesty \(1991\)](#), integrating over 0.8 s and averaging over the neutrino incidence angle.