

The background features a series of golden, semi-transparent spheres arranged in a grid that recedes into the distance, creating a strong sense of perspective and depth. The spheres are set against a dark, almost black background. In the lower portion of the image, there is a dark, reflective surface that mirrors the golden spheres above, with some light-colored ripples and reflections. The overall aesthetic is futuristic and scientific.

LENA

Low Energy Neutrino Astronomy

Experimente und Grenzen des Standardmodells

Sommersemester 2011

Volker Braunert

10.06.11

Überblick

- Motivation Neutrinophysik
- Neutrino
 - Quellen & Eigenschaften
 - Energiebereiche
- Detektoren-Motivation
- LENA-Detektor
 - LENA-Motivation
 - Pyhäsalmi-Mine
 - Detektor-Design
 - Nachweis von Neutrinos
 - Beiträge zur Neutrinophysik
 - Proton-Zerfall
 - Signal-Untergrund
- Zusammenfassung

Motivation Neutrinophysik

Neutrinos sind äußerst reaktionsunfreudig

Wieso also überhaupt **Neutrino-Physik**?

- Genau diese Eigenschaft macht den Vorteil aus
 - Photonen scheitern an Massen
- Neutrinos durchqueren den Weg zu uns nahezu ungehindert
- Blick ins Universum reicht hiermit viel weiter als über Photonen
- Neutrinos eignen sich also hervorragend als kosmische Boten

Neutrino-Quellen

Typen

Solare Neutrinos

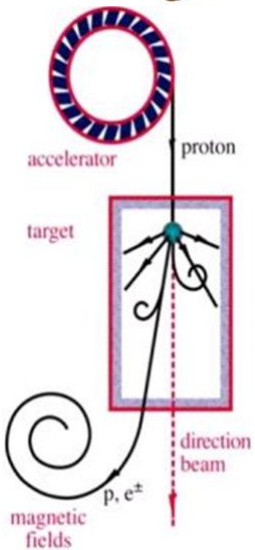
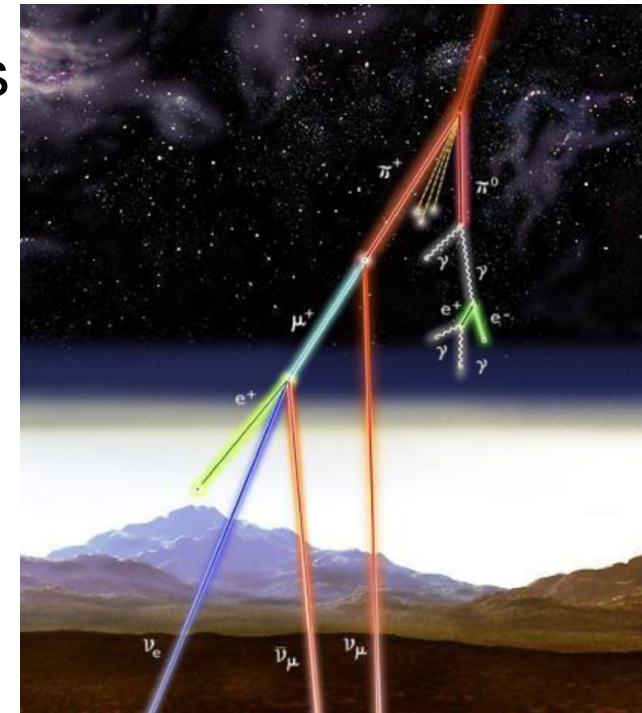
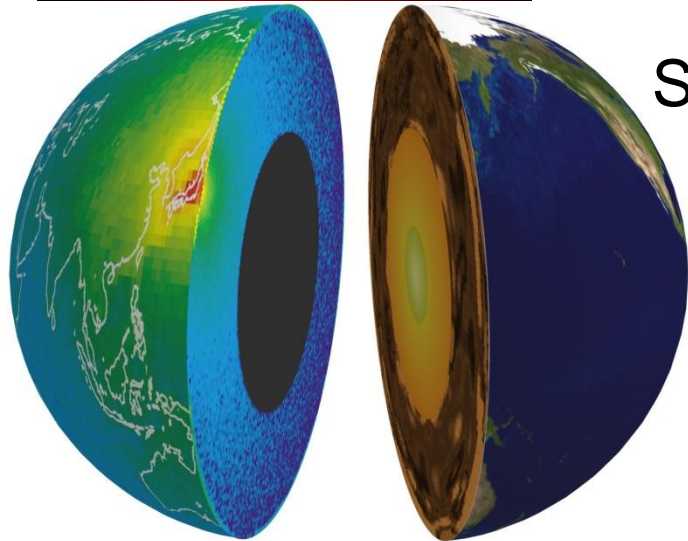
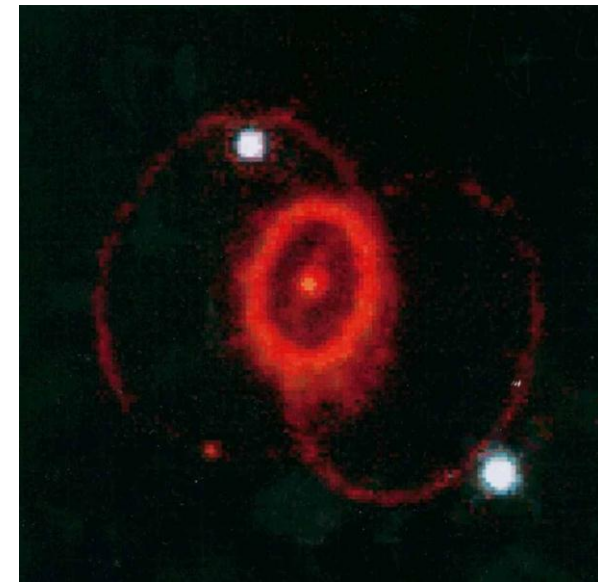
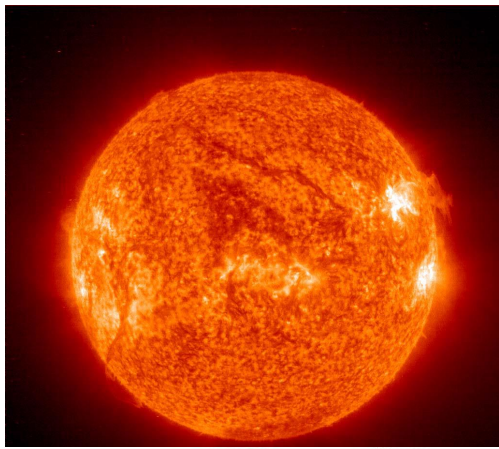
Supernova (Typ II) Neutrinos

Geo-Neutrinos

Atmosphärische Neutrinos

Reaktor-Neutrinos

Neutrino-Strahlen

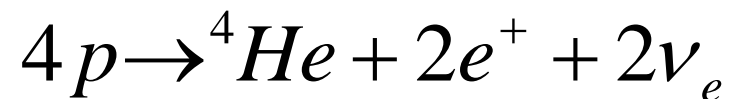


10.06.2011

Neutrino-Quelle: Typ I

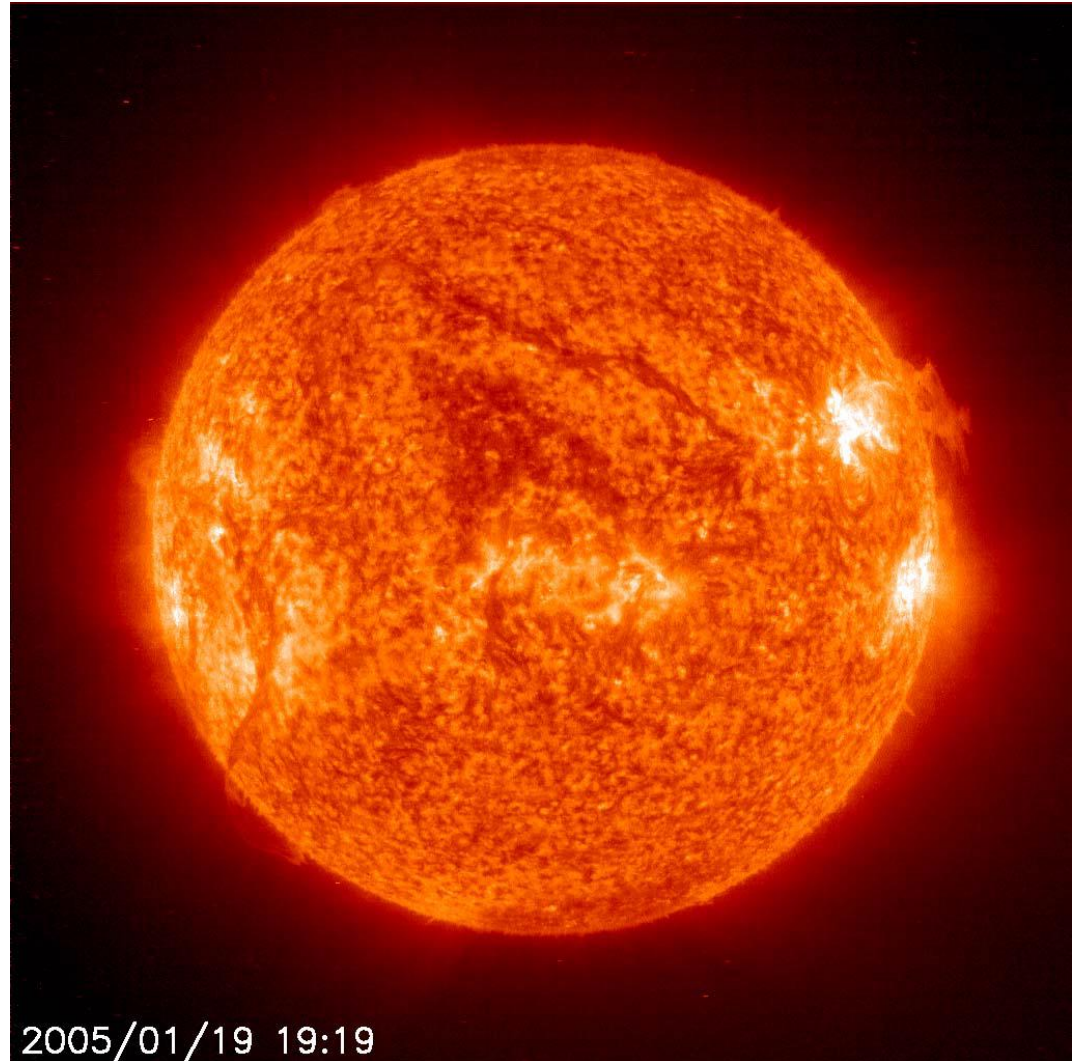
Solar

- Kernfusion



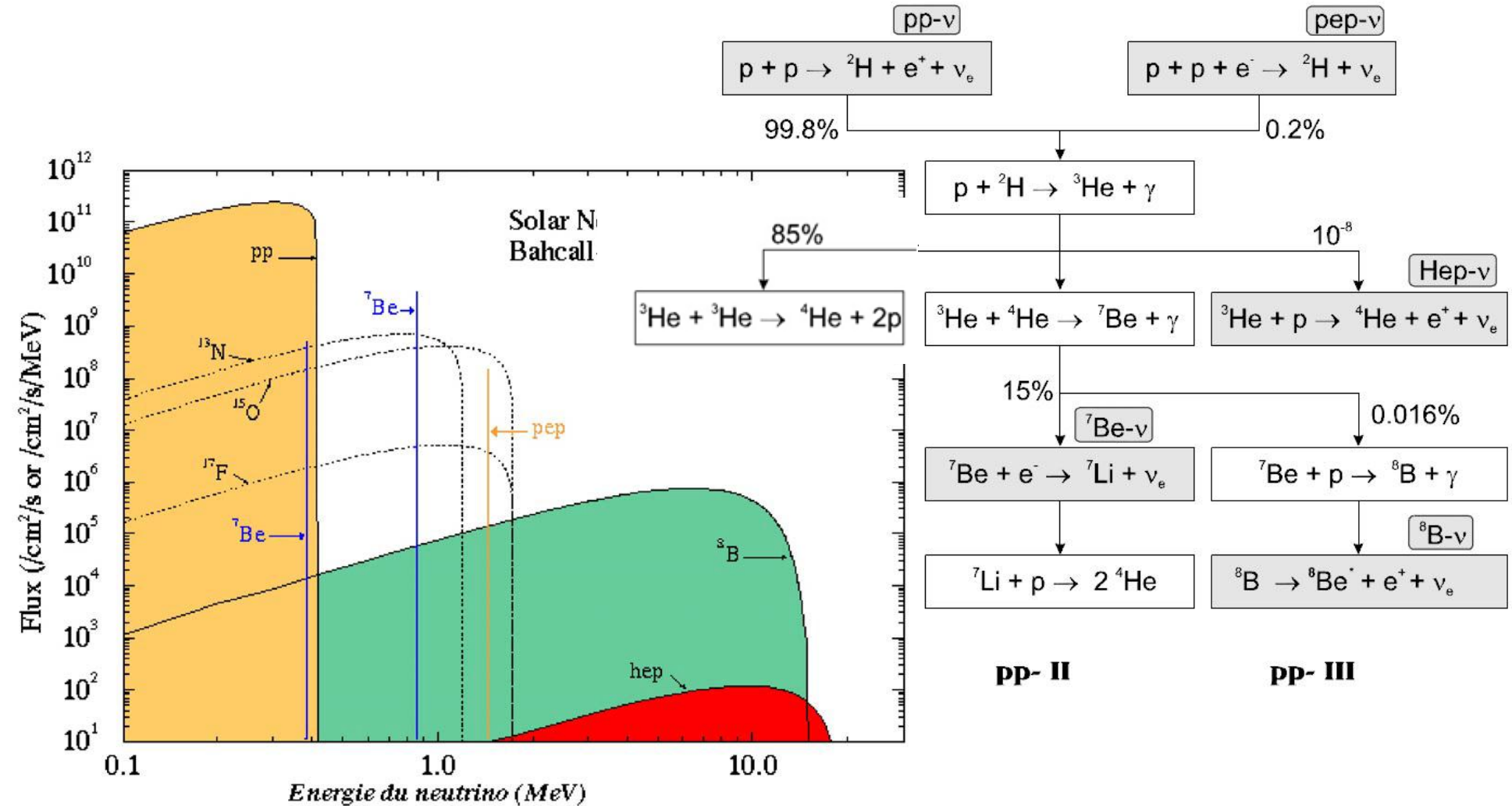
Erwartung

$$\sim 6 \cdot 10^{10} \nu / s \cdot \text{cm}^2$$



Neutrino-Quelle: Typ I

neutrino production in the sun: pp cycle



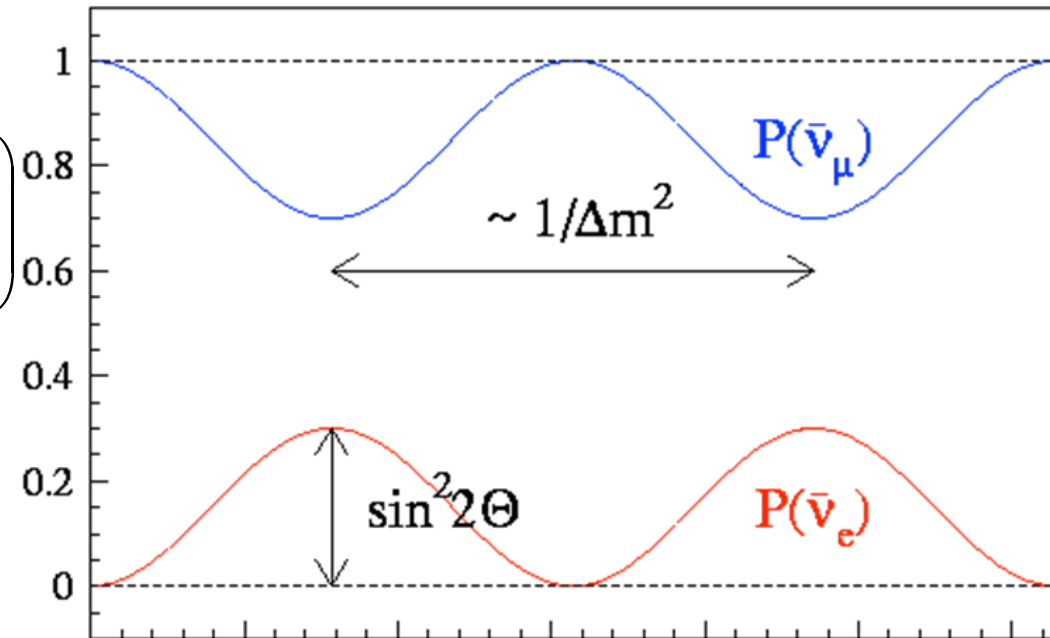
Überlebenswahrscheinlichkeit eines Elektrons

- Quantenmechanische Möglichkeit von Flavourwechseln

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2 \cdot \theta_{12}) \cdot \sin^2 \left(1,27 \cdot \frac{\frac{\Delta m_{12}^2}{eV^2} \cdot \frac{L}{m}}{\frac{E}{MeV}} \right)$$

- Oszillations-Frequenz: $\frac{L}{E}, \Delta m_{12}^2$

- Amplitude: θ_{12}



Neutrino-Oszillationen

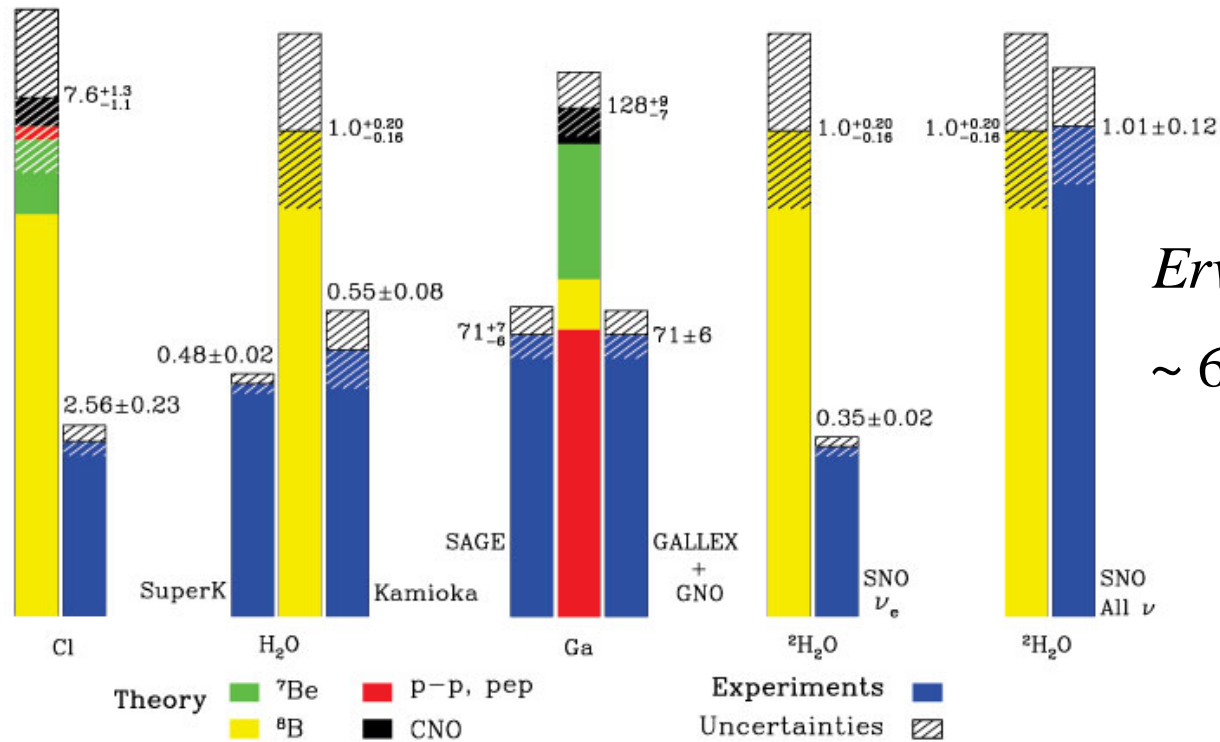
Pontecorvo-*Maki-Nakagawa-Sakata*-Matrix

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- Flavour-Eigenzustände $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$
 - Massen-Eigenzustände (ν_1, ν_2, ν_3)
 - Mischungswinkel θ_{ij}
 - Imaginäre Phase δ
 - Solare Neutrinos: $\theta_{12} \approx 35^\circ$, Atmosphärische Neutrinos $\theta_{23} \approx 45^\circ$, θ_{13} noch unbekannt \rightarrow Reaktor-Neutrino-Experimente
- Neutrinomasse:
Obergrenze von 2,2eV
Aus Messungen des
Beta-Spektrums von
Tritium

Solares Neutrino Defizit

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

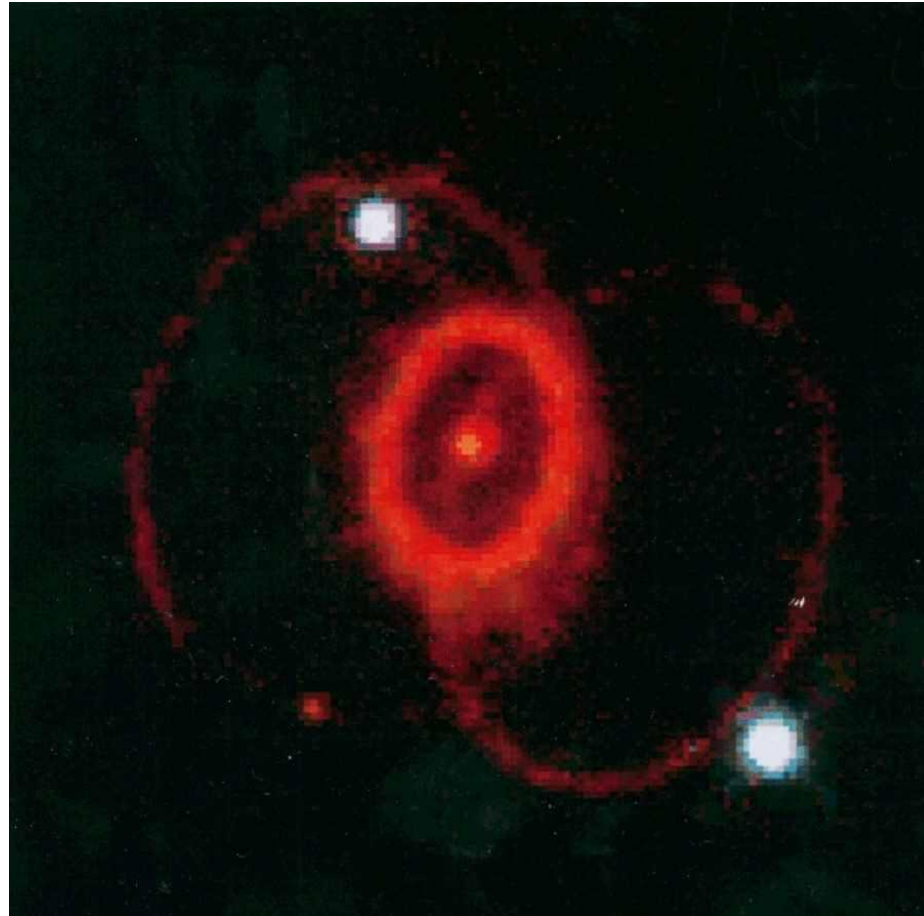


Erwartung
 $\sim 6 \cdot 10^{10} \nu/s \cdot \text{cm}^2$

Alle solaren Neutrinoexperimente messen nur etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{3}$ des vorhergesagten Flusses!

Neutrino-Quelle: Typ II

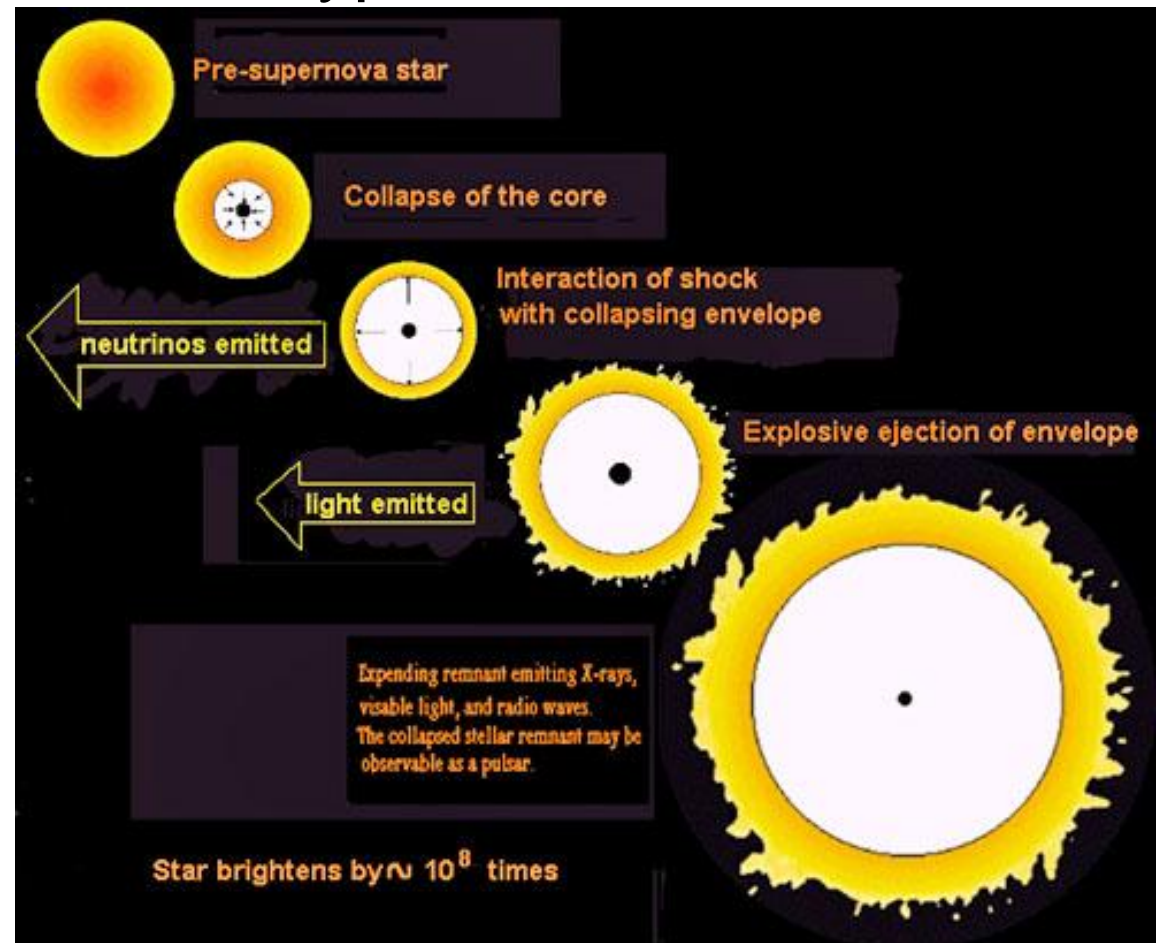
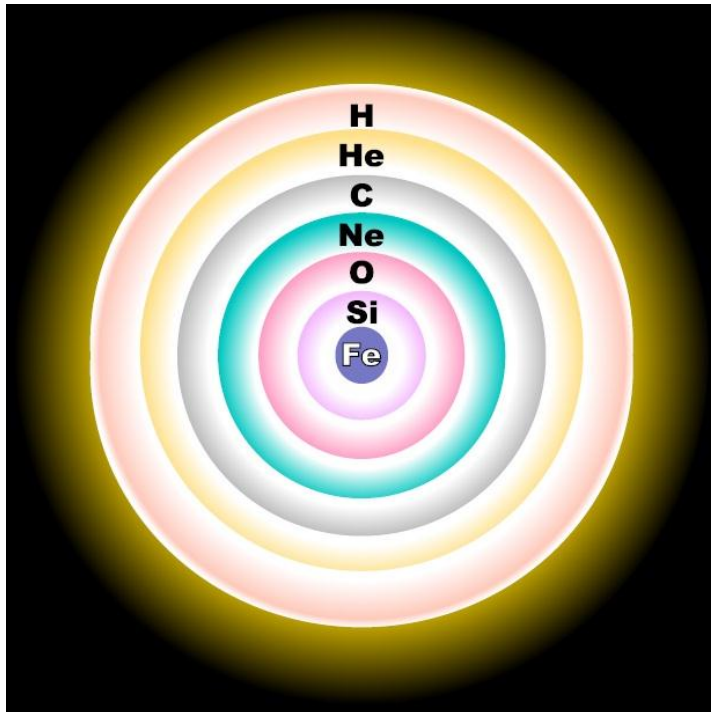
Supernova-Neutrinos



Neutrino-Quelle: Typ II

Supernova-Neutrinos

Supernova Typ II



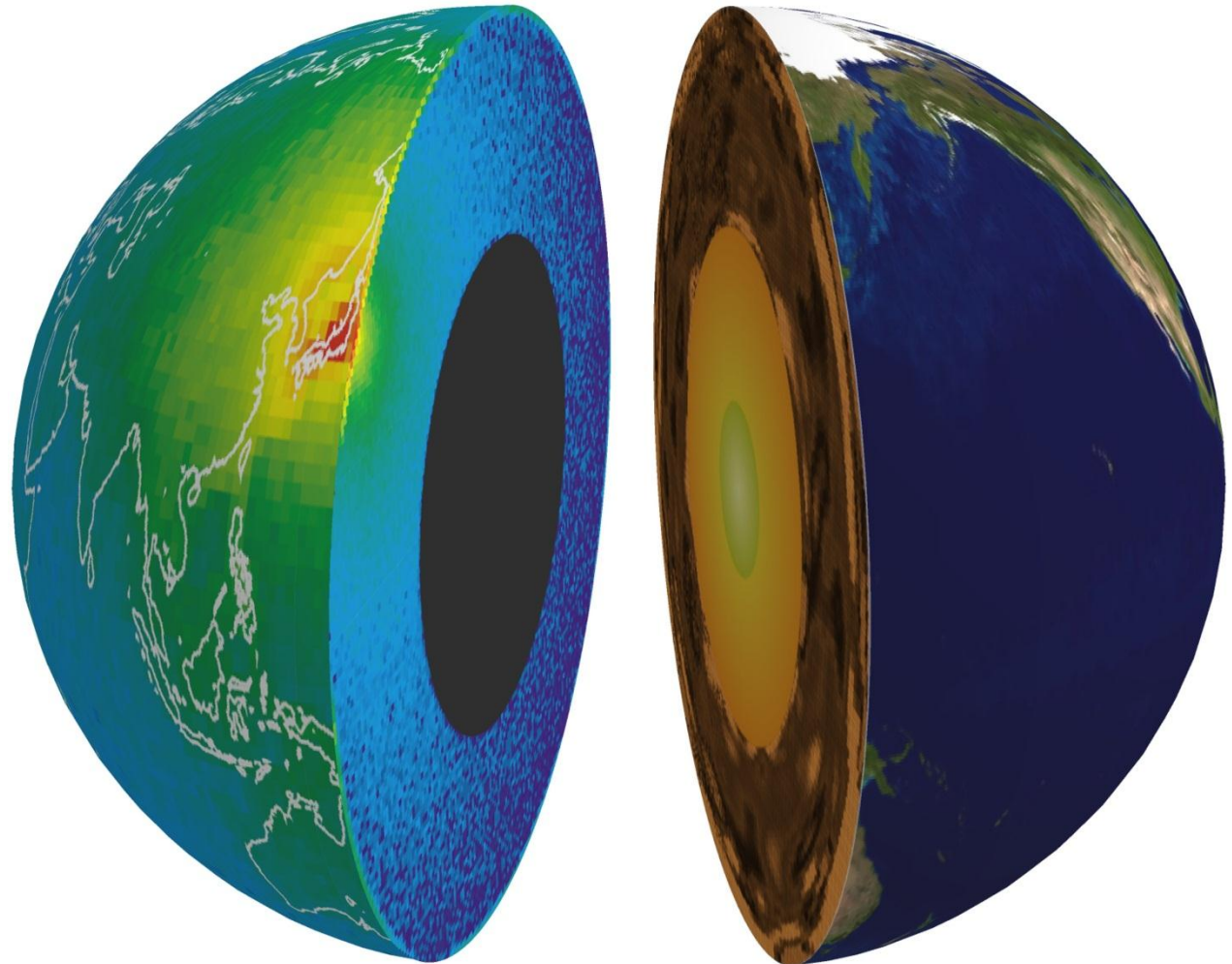
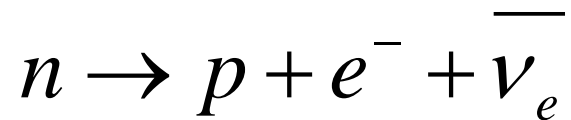
Brennstoff geht aus
⇒ Gravitation gewinnt Überhand
⇒ Kern kollabiert
⇒ Elektronen werden in Protonen gedrückt $e^- + p \rightarrow n + \nu$

Neutrino-Quelle: Typ III

Geo-Neutrinos

- Elektron-Anti-Neutrinos
 - Entstehung in der Erde über Beta-Zerfall natürlich vorkommender radioaktiver Elemente

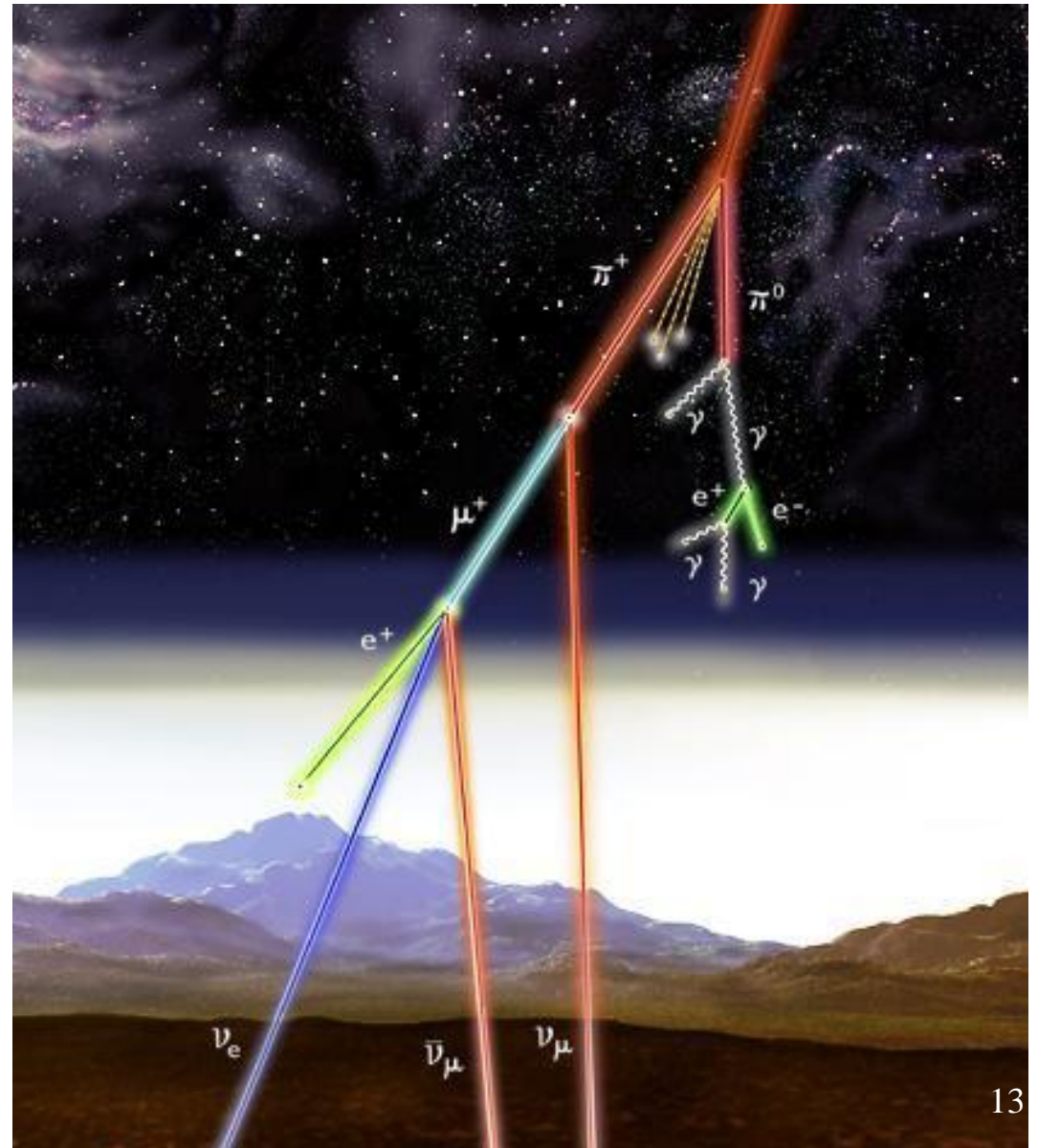
β^- – Zerfall :



Neutrino-Quelle: Typ IV

Atmosphärisch

- Hochenergetisches Proton trifft auf Atmosphäre
- Zerfall in Pionen und Kaonen
- Zerfall in Myonen unter Abstrahlung von Neutrinos
- Zerfall in Elektronen unter Abstrahlung von Neutrinos

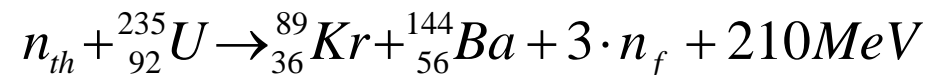
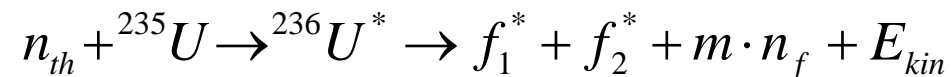
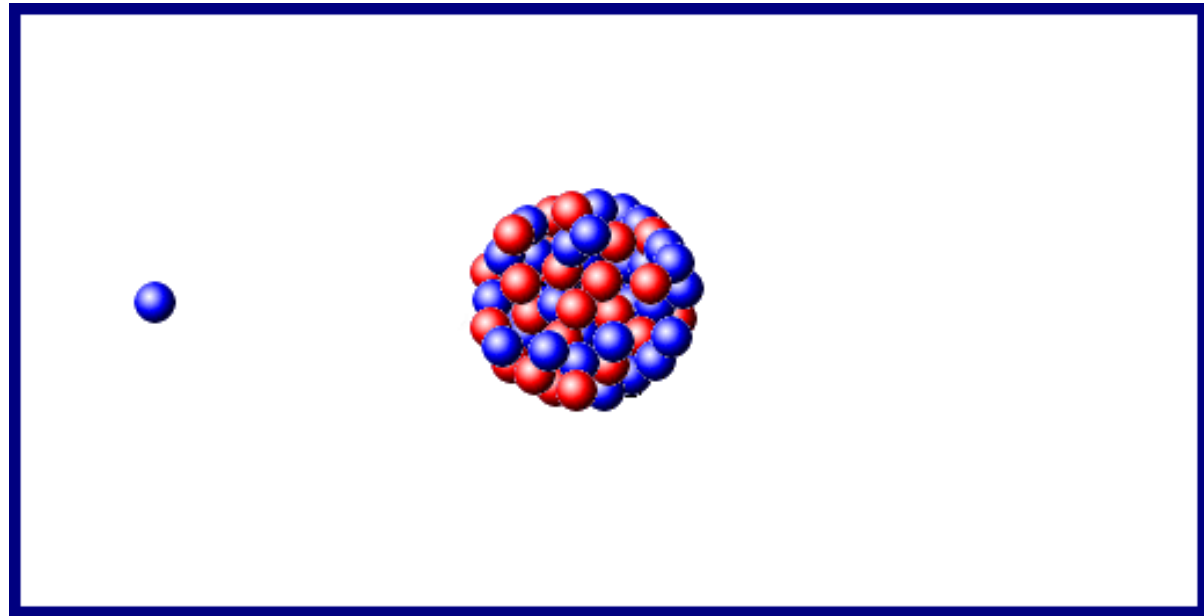


Neutrino-Quelle: Typ V

Reaktorneutrinos

Einfache Kernspaltung im AKW:

- Radioaktive Elemente
 - Beschuss mit thermischen Neutronen
 - Spaltprodukte plus schnelle Neutronen
 - Spaltprodukte neutronenreich, also angeregt
- ⇒ Zerfall!!! Bis zu stabilen Zuständen Freisetzung von 6 Elektron-Anti-Neutrinos

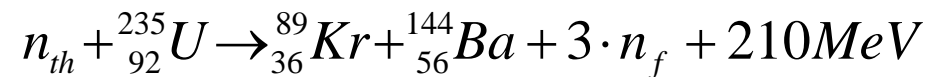
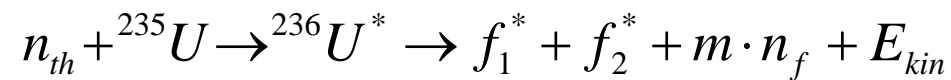


Neutrino-Quelle: Typ V

Reaktorneutrinos

Einfache Kernspaltung im AKW:

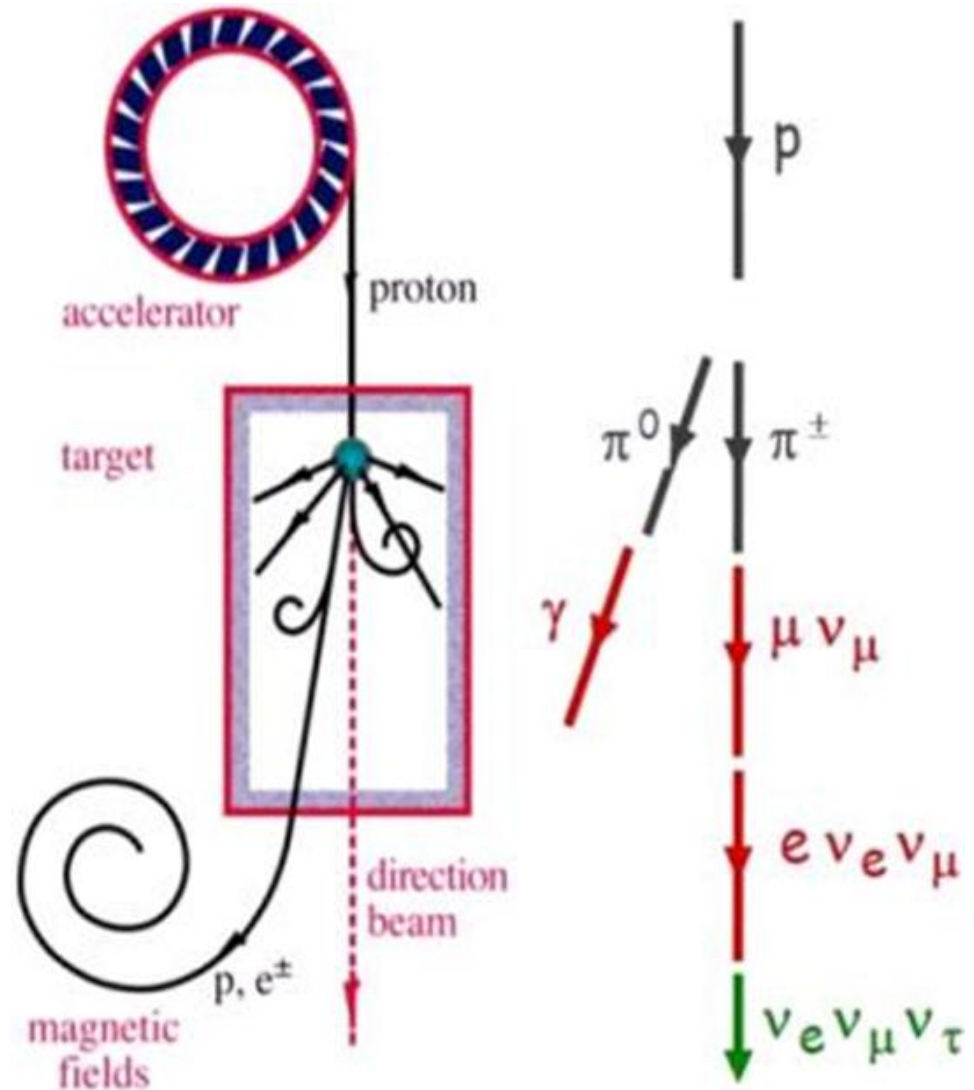
- Radioaktive Elemente
 - Beschuss mit thermischen Neutronen
 - Spaltprodukte plus schnelle Neutronen
 - Spaltprodukte neutronenreich, also angeregt
- ⇒ Zerfall!!! Bis zu stabilen Zuständen Freisetzung von 6 Elektron-Anti-Neutrinos



Neutrino-Quelle: Typ VI

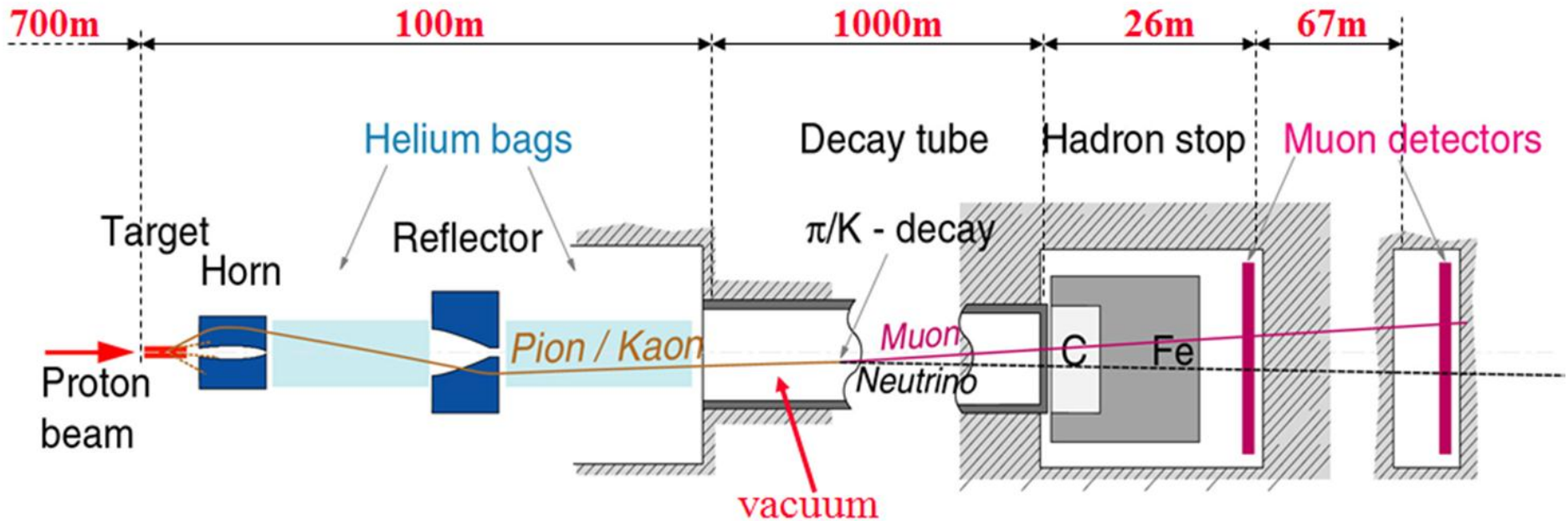
Beschleuniger

- Proton trifft auf Target
- Zerfall in Pionen und Kaonen
- Zerfall in Myonen und zugehörige Neutrinos
- Selektion

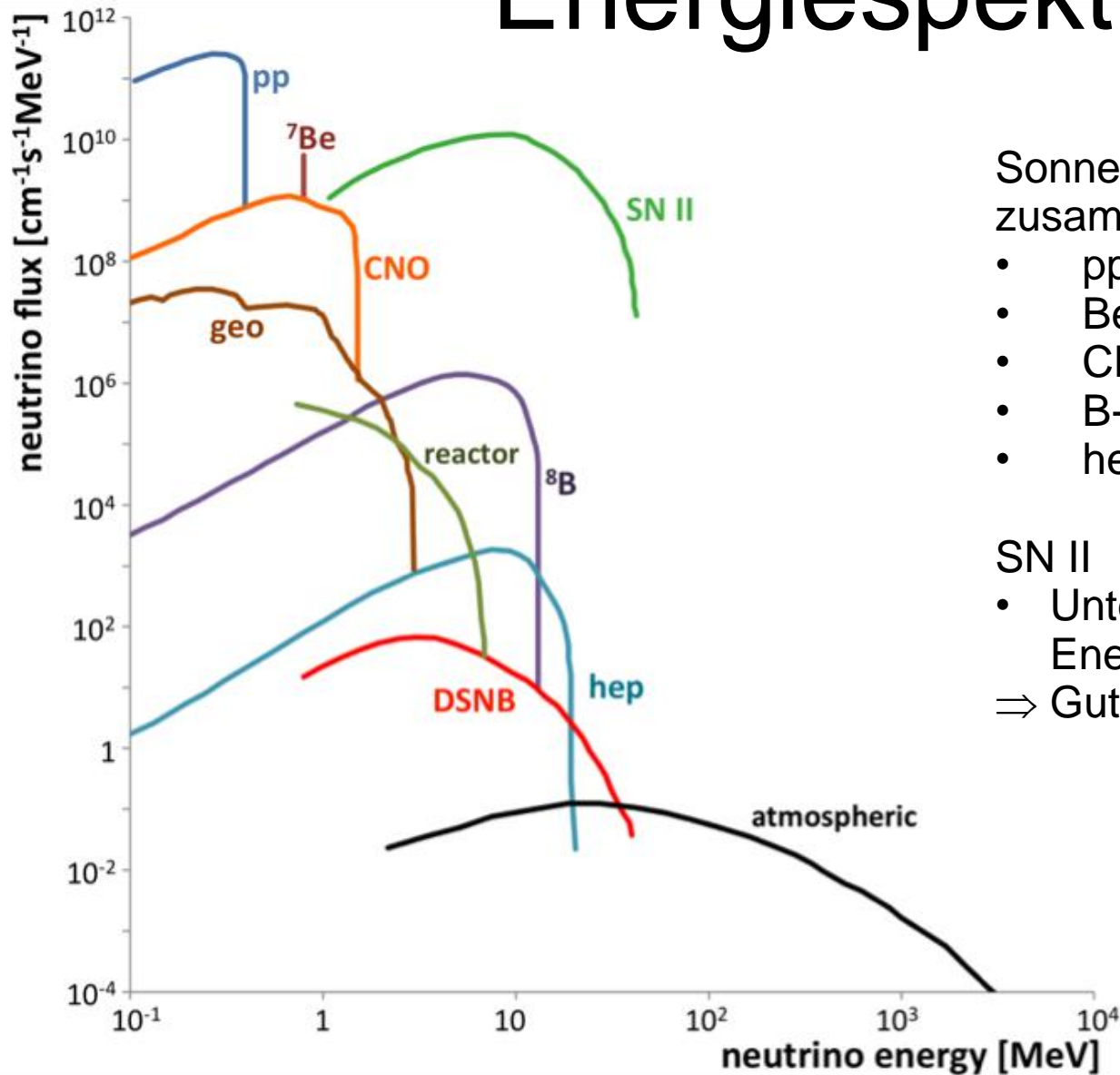


Neutrino-Quelle: Typ VI

„künstliche Neutrinoerzeugung am SPS“



Energiespektrum



Sonnen-Neutrino-Energie-Spektrum zusammengesetzt aus:

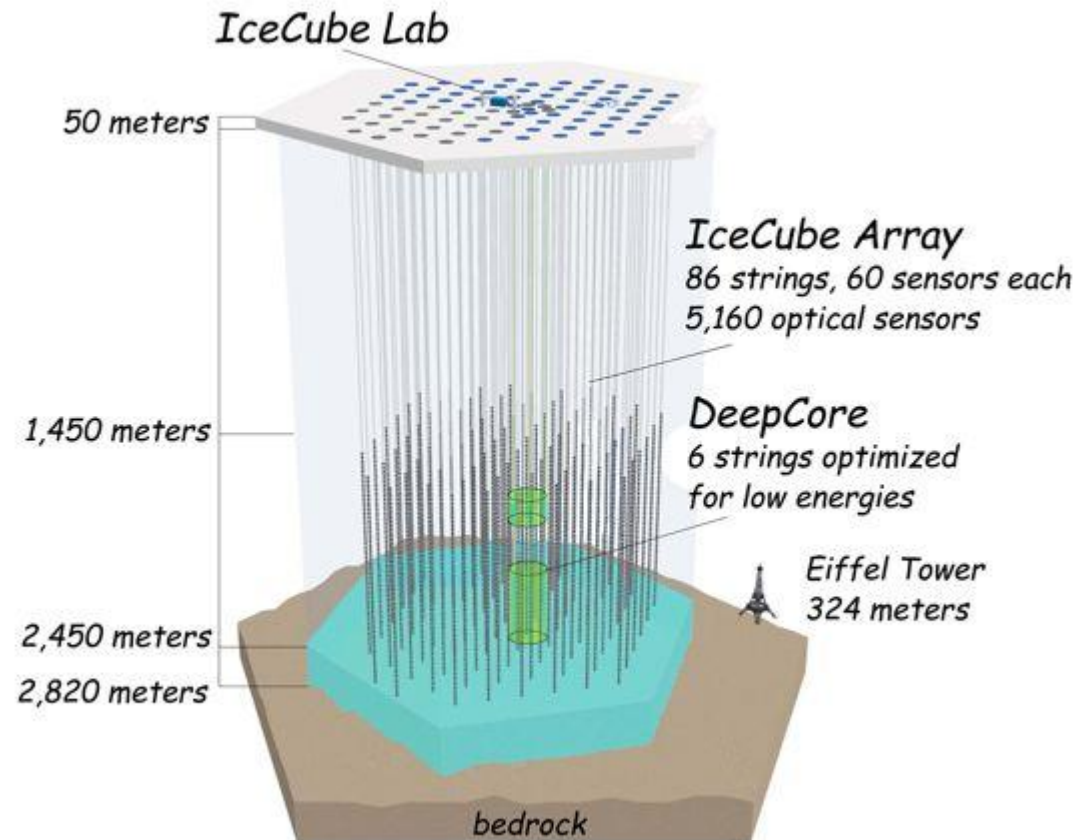
- pp
- Be-7
- CNO
- B-8
- hep

SN II

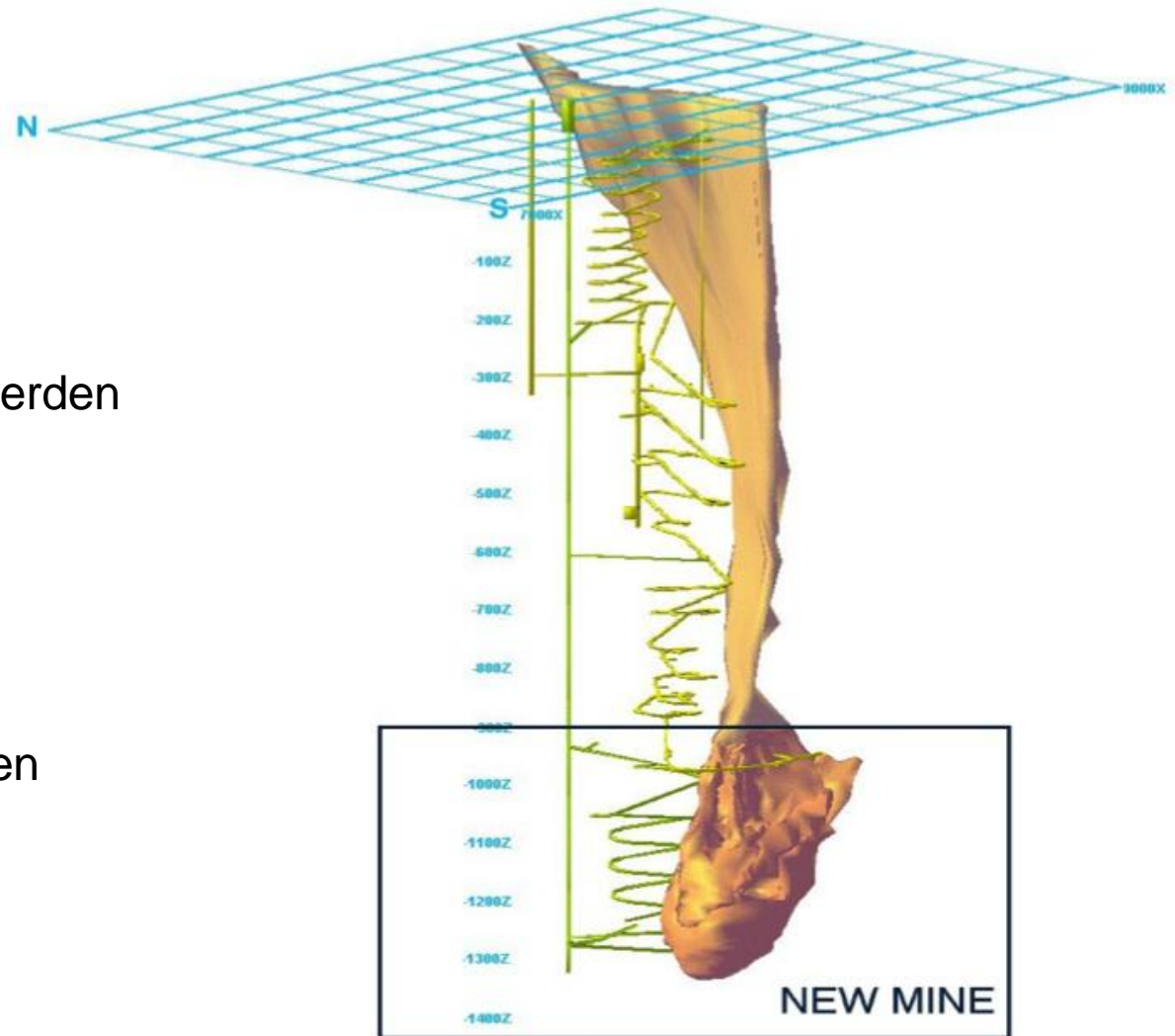
- Untergrund-Fluss in diesem Energiebereich sehr niedrig
⇒ Gut Messbarkeit

Detektor-Motivation

- Einige Detektoren in Unterwasserlaboratorien
 - Zur Reduktion von kosmischem/atmosphärischem Hintergrund muss der Detektor in enorme Tiefen vordringen (Beispiel: IceCube Neutrino Observatory 2,4km tiefe Detektionsfläche auf 1km² Eisfläche)
- Hohe Energien
- Große Flächen
- Prozentual aber sehr kleine Detektionsabdeckung!!!



Detektor-Motivation



Allgemeiner Vorteil von Untergrund-Detektoren:

- Detektor kann in bestehende Untergrundanlagen eingebracht werden (beispielsweise Minen)
- Hadronen werden eher gestoppt
- Kleine Energien
- Kleinere Detektorflächen
- Prozentual große Detektionsflächen

LENA

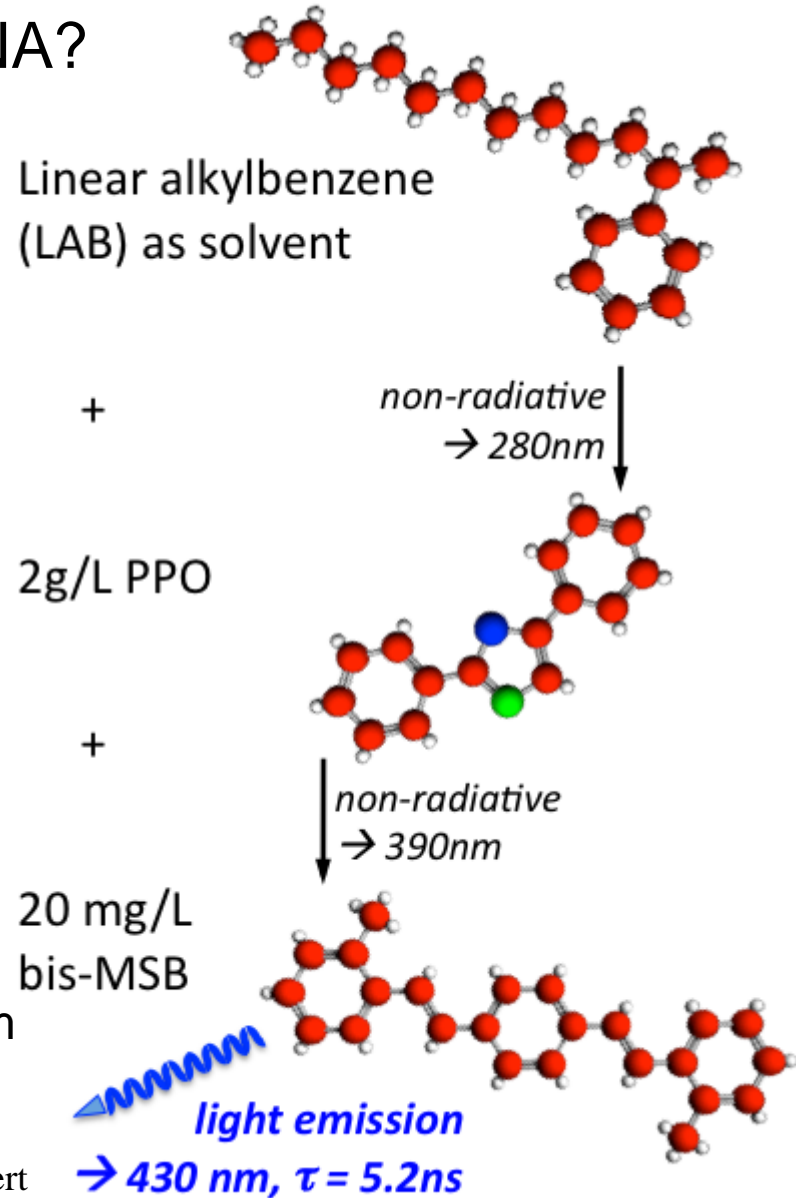
(*Low Energy Neutrino Astronomy*)



LENA-Motivation

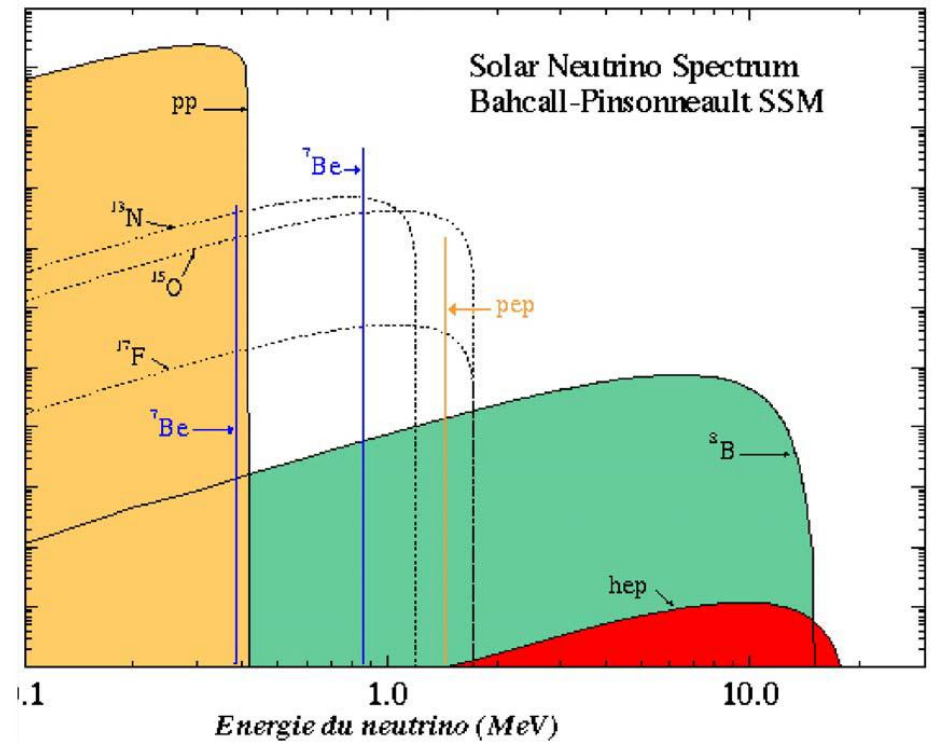
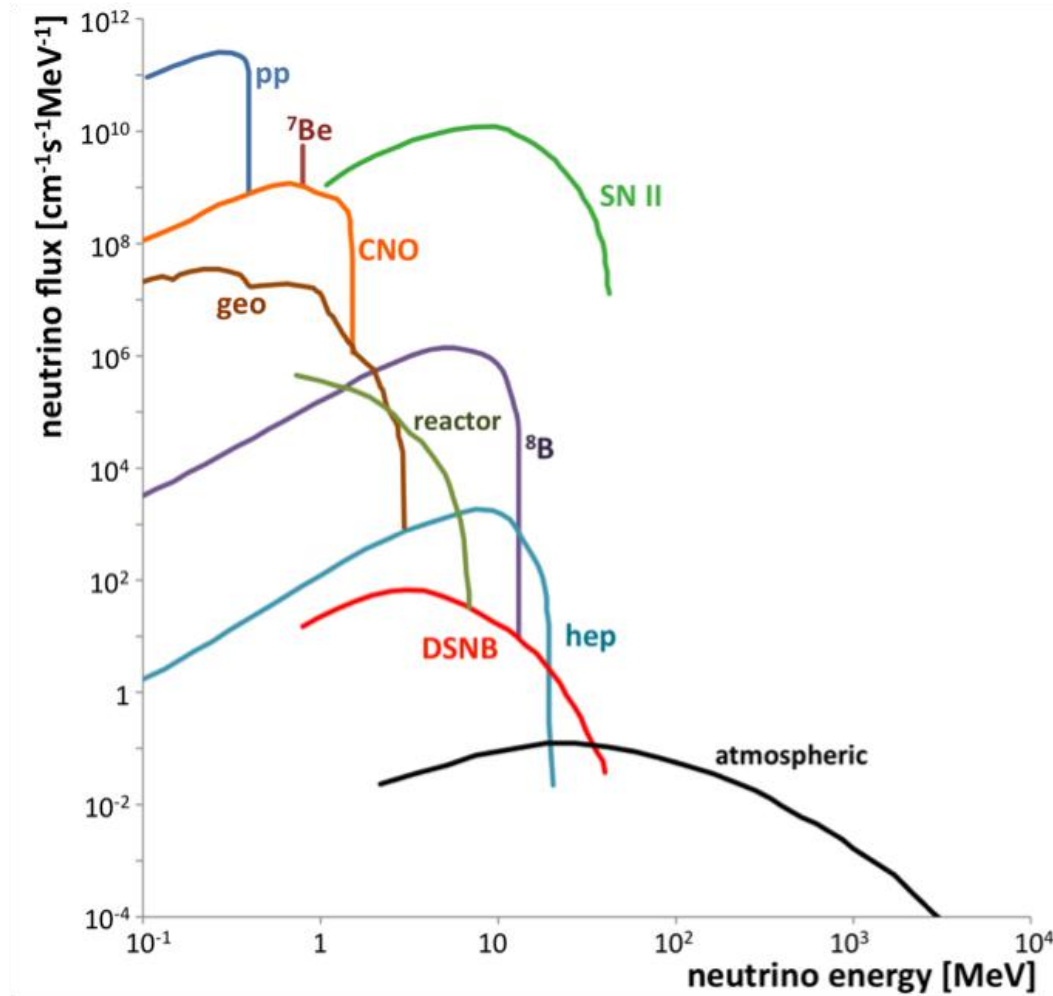
Wieso LENA?

- Teilchen ionisieren LAB
- Abstrahlung von Photonen
- PPO dient als erster Wellenlängenschieber
- Bis-MSB zweiter Wellenlängenschieber
- Licht-Emission mit Wellenlänge von etwa 430nm



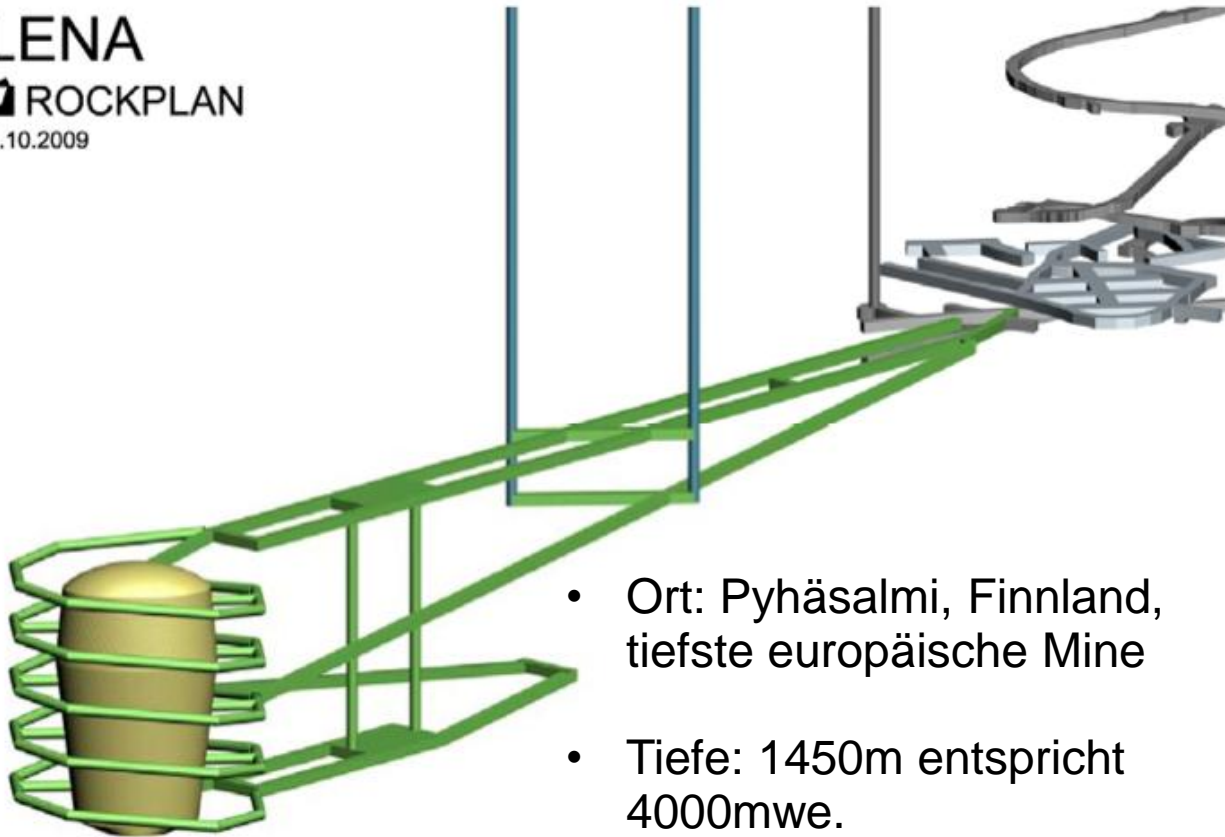
LENA-Motivation

Wieso LENA?

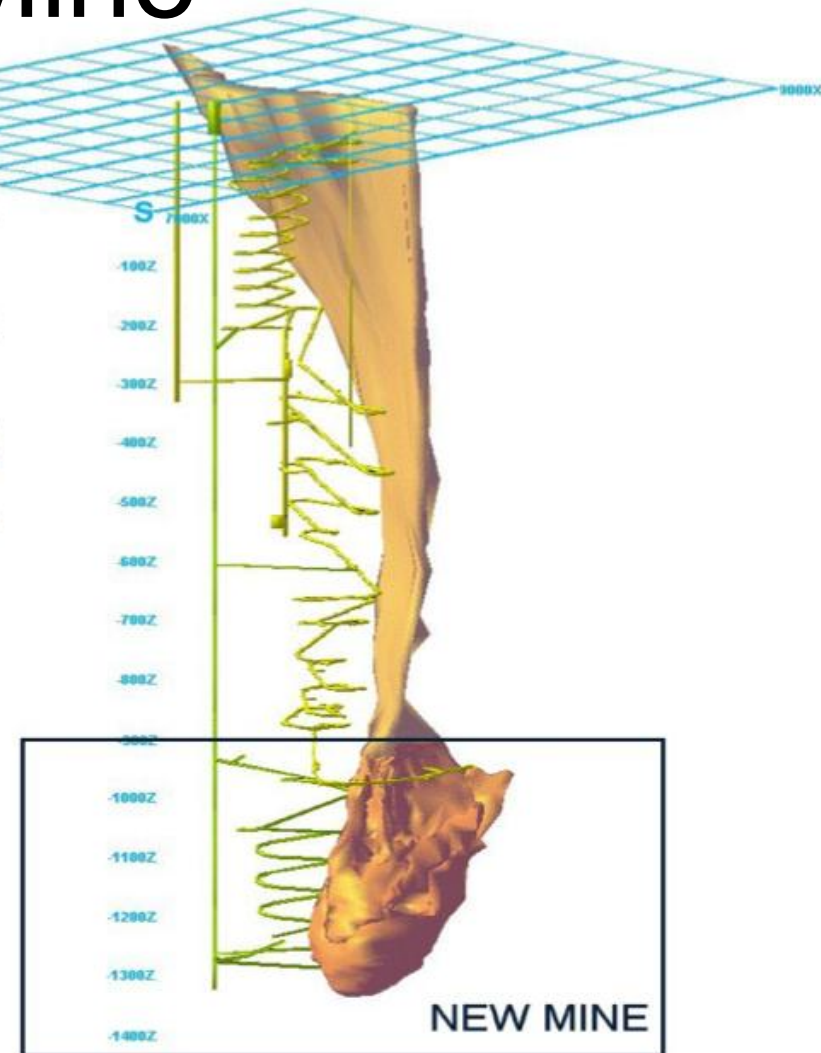


Pyhäsalmi-Mine

LENA
ROCKPLAN
7.10.2009



- Ort: Pyhäsalmi, Finnland, tiefste europäische Mine
- Tiefe: 1450m entspricht 4000mwe.
- Distanz zum CERN: 2288km



Detektor-Design

Cavern

height: 115 m, diameter: 50 m
shielding from cosmic rays: ~4,000 m.w.e.

Muon Veto

plastic scintillator panels (on top)
Water Cherenkov Detector
3,000 phototubes
100 kt of water
reduction of fast
neutron background

Steel Cylinder

height: 100 m, diameter: 30 m
70 kt of organic liquid
30,000 – 50,000 phototubes

Buffer

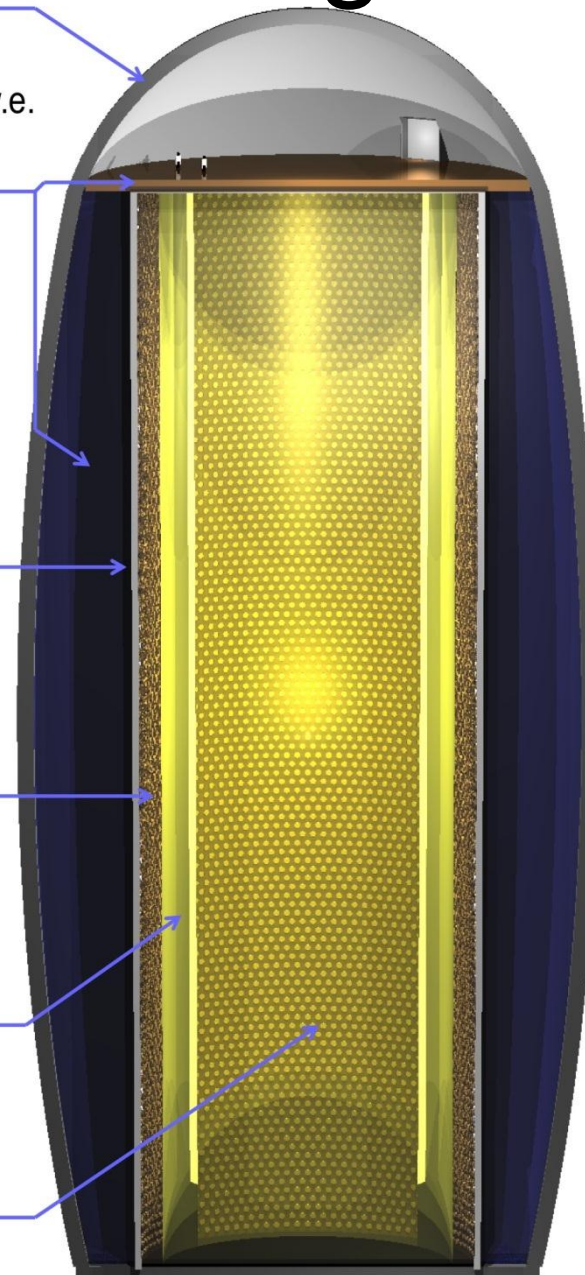
thickness: 2 m
non-scintillating organic liquid
shielding from external radioactivity

Nylon Vessel

separating buffer liquid
and liquid scintillator

Target Volume

height: 100 m, diameter: 26 m
50 kt of liquid scintillator

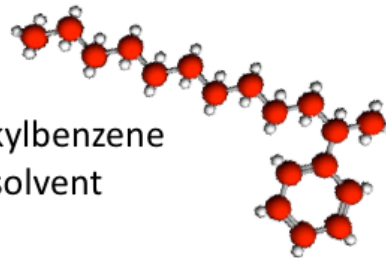


Detektor-Design

Target Volume:

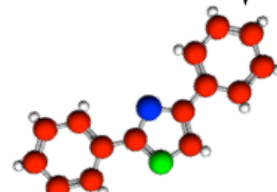
- Ultrareiner, organischer Flüssigszintillator
 - Ionisationsmoleküle + Wellenlängenschieber
- Volumen: $5,3 \cdot 10^4 m^3$
 - Höhe: 100m
 - Durchmesser: 13m

Linear alkylbenzene (LAB) as solvent



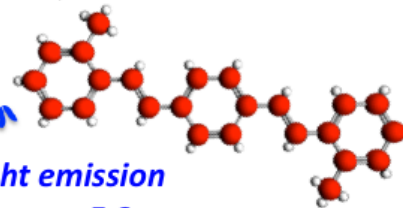
non-radiative
→ 280nm

2g/L PPO

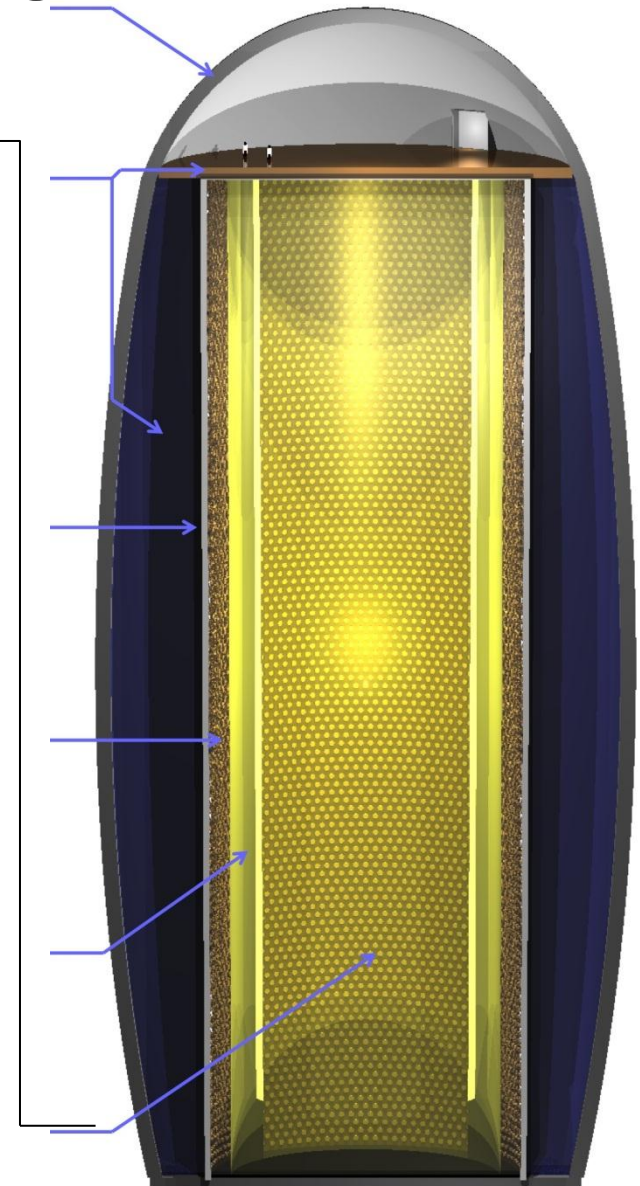


non-radiative
→ 390nm

20 mg/L bis-MSB



light emission
→ 430 nm, $\tau = 5.2ns$



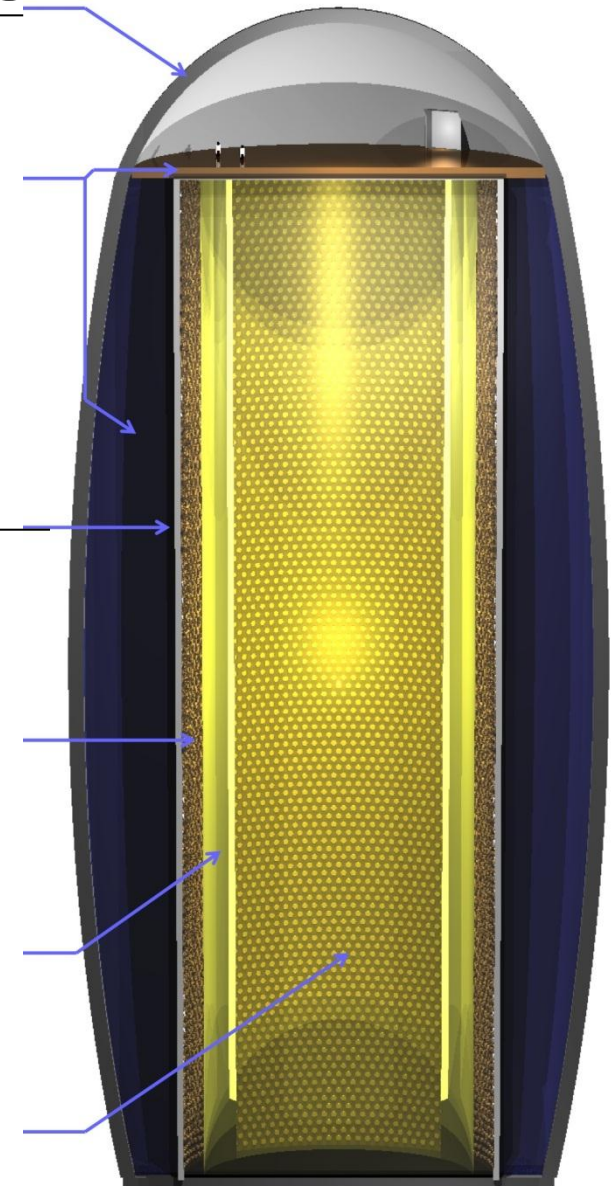
Detektor-Design

Labor:

- Höhe: 115m
- Durchmesser: 50m
- Abschirmung durch den Berg: ~4000m.w.e

Stahl Zylinder:

- Höhe: 100m
- Durchmesser: 30m
- Füllung:
 - 70kt organischer Flüssigszintillator
 - 30.000-50.000 Photomultiplier



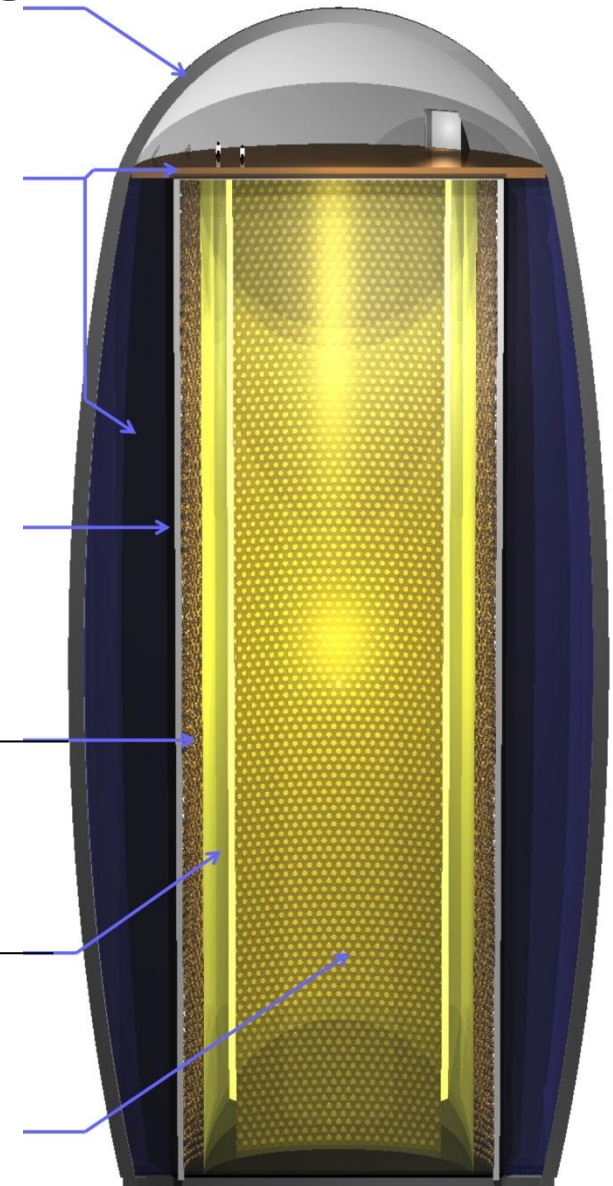
Detektor-Design

Buffer:

- LAB ohne Wellenlängenschieber
→ keine Szintillation
- Rand gefüllt mit Wasser auf 2m Breite
 - Abschirmung vor Radioaktivität aus Gestein und Myon-induzierten Neutronen

Nylon Ballon:

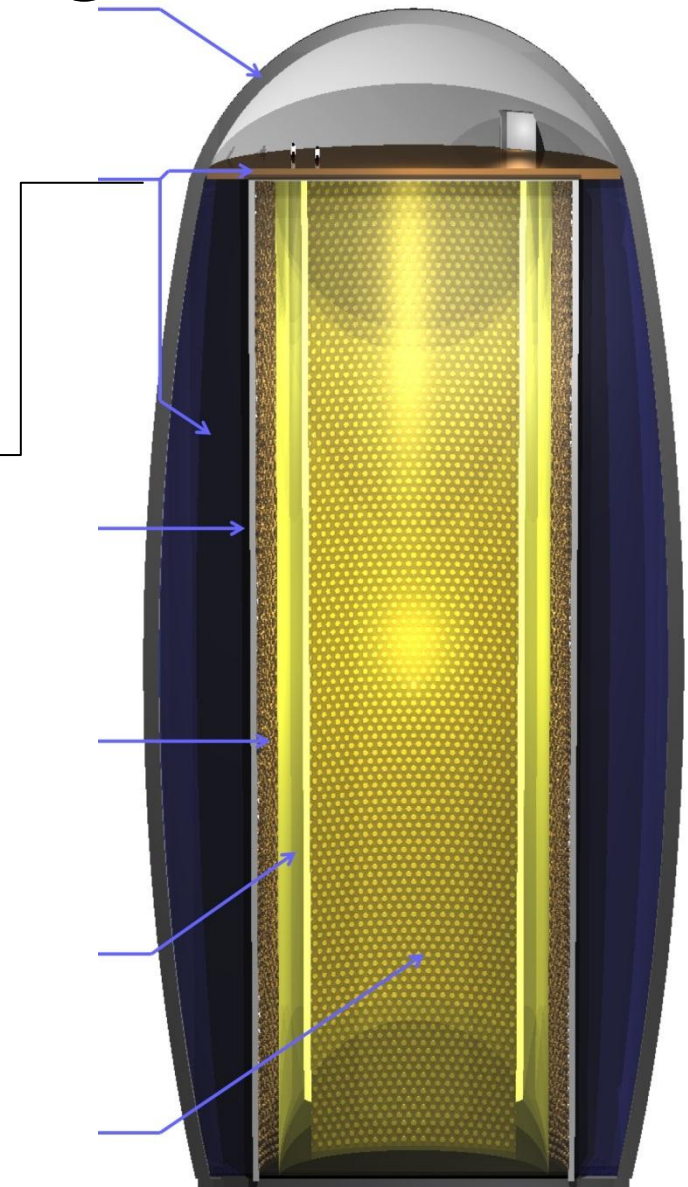
- Dünner Nylon Ballon
 - Verhinderung der Durchmischung von Bufferflüssigkeit und Flüssigszintillator



Detektor-Design

Myon Veto:

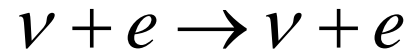
- Plastiksziintillatoren auf dem Detektor:
 - Zur Identifikation von kosmischen Myonen
- Wasser-Cherenkov-Detektor um den Detektor:
 - 100kt Wasser zur Reduktion von Hintergrund aus schnellen Neutronen



Nachweis von Neutrinos

- Elektron-Neutrinos

- Nachweis über elastische Neutrino-Elektron-Streuung:

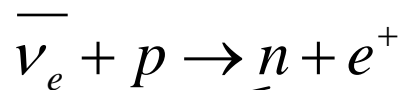


- Vorteil: keine energetische Schwelle
- Nachteil: Untergrund durch natürliche Radioaktivität

- Elektron-Anti-Neutrinos

- Nachweis über inversen Beta-Zerfall

Direkter Nachweis in PMT's



Mindestenergie: $\sim 1,8\text{MeV}$

Einfang durch H-Atom ($\sim 52\mu\text{s}$)
Resultat: $(2,2\text{MeV})\gamma$

- Vorteil: nahezu untergrundfrei

Beiträge zur Neutrinophysik

Erwartung:

15.000 Ereignisse für Standard-SN von
8 Sonnenmassen in einer Entfernung
von etwa 10kpc

- Supernova Neutrinos
 - Aufbau eines SNEWS (SuperNova Early Warning System)
 - Beantwortet damit wahrscheinlich fundamentale Fragen über Kern-Zusammenbrüche und die Rolle von Neutrinos und anderen Teilchen im Universum
 - Niedrige Energieschwelle, hohe Energieauflösung und Multi-Channel-Fähigkeit ermöglichen das Enträtseln der flavour-abhängigen Eigenschaften der Neutrino-Signale und ermöglichen die Identifikation von feinen Modulationen, die durch „Erdeffekte“ entstanden

Beiträge zur Neutrinophysik

Erwartung:

15.000 Ereignisse für Standard-SN von
8 Sonnenmassen in einer Entfernung
von etwa 10kpc

- Supernova Neutrinos
 - Astrophysik:
 - Erkenntnisse über Ablauf von Kernkollapsen
 - Neutrinoeigenschaften:
 - θ_{13}
 - Massenhierarchie
 - Kollektive Oszillationen (Erzeugung von „Masseneffekten“ durch hohe Neutrinodichten)

Beiträge zur Neutrinophysik

Erwartung:

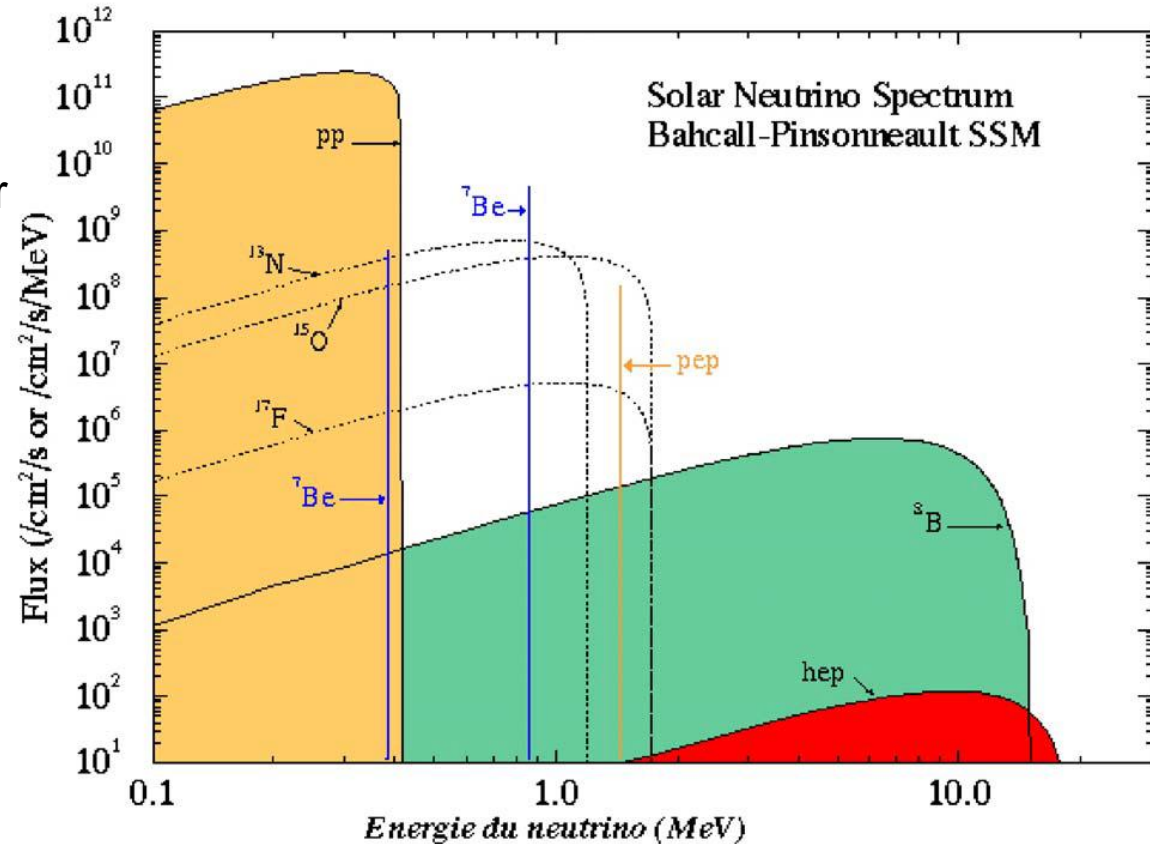
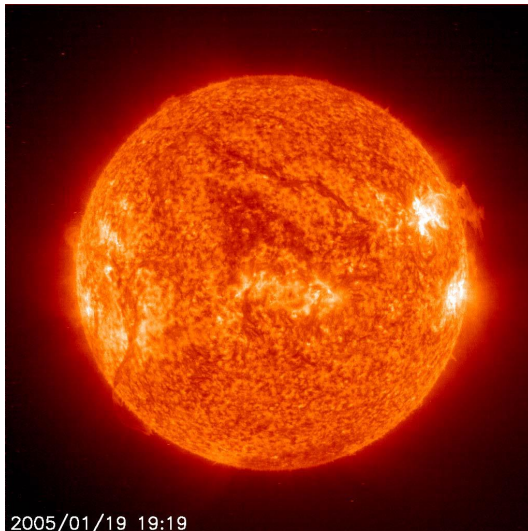
Etwa 10 Elektron-Anti-Neutrinos pro Jahr

- Neutrinos aus Supernova-Relikten
 - Aus allen Supernovae im Universum entsteht ein steter Fluss an Neutrino-Hintergrund
 - In diesem Energiebereich werden atmosphärischer und Reaktor-Neutrino-Hintergrund so klein, dass sie leicht kontrollierbar sind
 - ⇒ Mittleres Elektron-Anti-Neutrino-Spektrum für alle Typen von SN
 - Messungen des Elektron-Anti-Neutrino-Emissions-Spektrum können helfen Modelle im Bereich Supernovae, Emissionsvariation und Neutrino-Eigenschaften zu testen

Beiträge zur Neutrinophysik

Erwartung:
Etwa 10.000 Ereignisse pro Tag

- Detektion von solaren Neutrinos
 - Bestimmung der solaren Parameter (Vorkommen schwerer Elemente, Beteiligung des CNO-Zyklus)
 - Suche nach zeitlichen Modulationen des Be-7-Neutrino-Flusses



10.06.2011

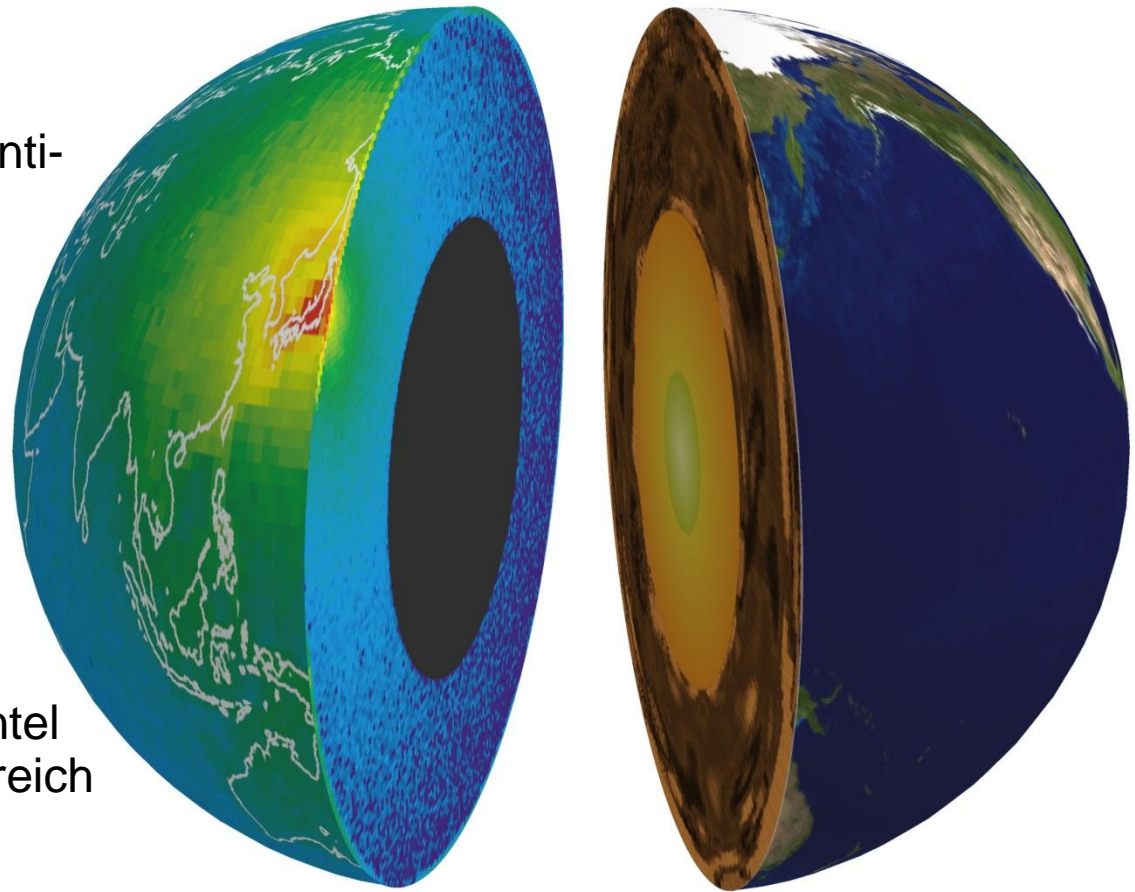
2005/01/19 19:19

Volker Braunert
Experimente und Grenzen des
Standardmodells

34

Beiträge zur Neutrinophysik

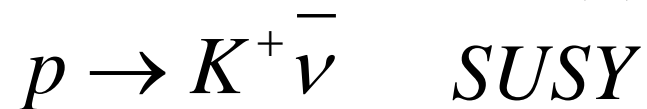
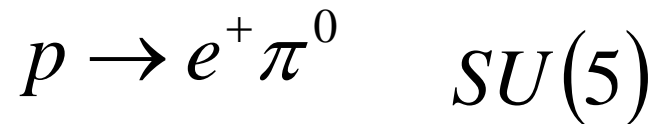
- Geoneutrinos
 - Untersuchung von Elektron-Anti-Neutrinos aus natürlichem β – Zerfall
 - Auskunft über Überschüsse und Verteilungen von radioaktiven Elementen
 - Nach Messzeit kann die Verteilung der Uran- und Thorium-Vorkommen in Planetenkruste bzw. -mantel mit Fehlern im Prozentbereich angegeben werden
 - Diese Informationen sind notwendig für geochemische und geophysikalische Modelle



Erwartung:
Etwa 1.000 Ereignisse pro Jahr

Proton-Zerfall

- Theoretisch bevorzugte Zerfallskanäle



- Zweiter Kanal ergibt in Flüssigszintillatoren eine klare Signatur

- Vorausgesagte Lebensdauer:

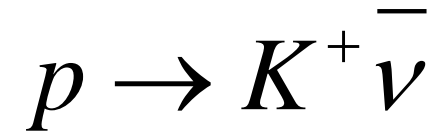
$$\tau \sim 4 \cdot 10^{34} \text{ Jahre}$$

- Super-Kamiokante: (90% C.L.)

$$\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \geq 5,4 \cdot 10^{33} \text{ Jahre}$$

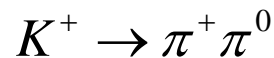
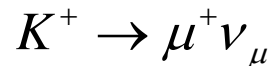
$$\tau(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) \geq 2,3 \cdot 10^{33} \text{ Jahre}$$

Proton-Zerfall

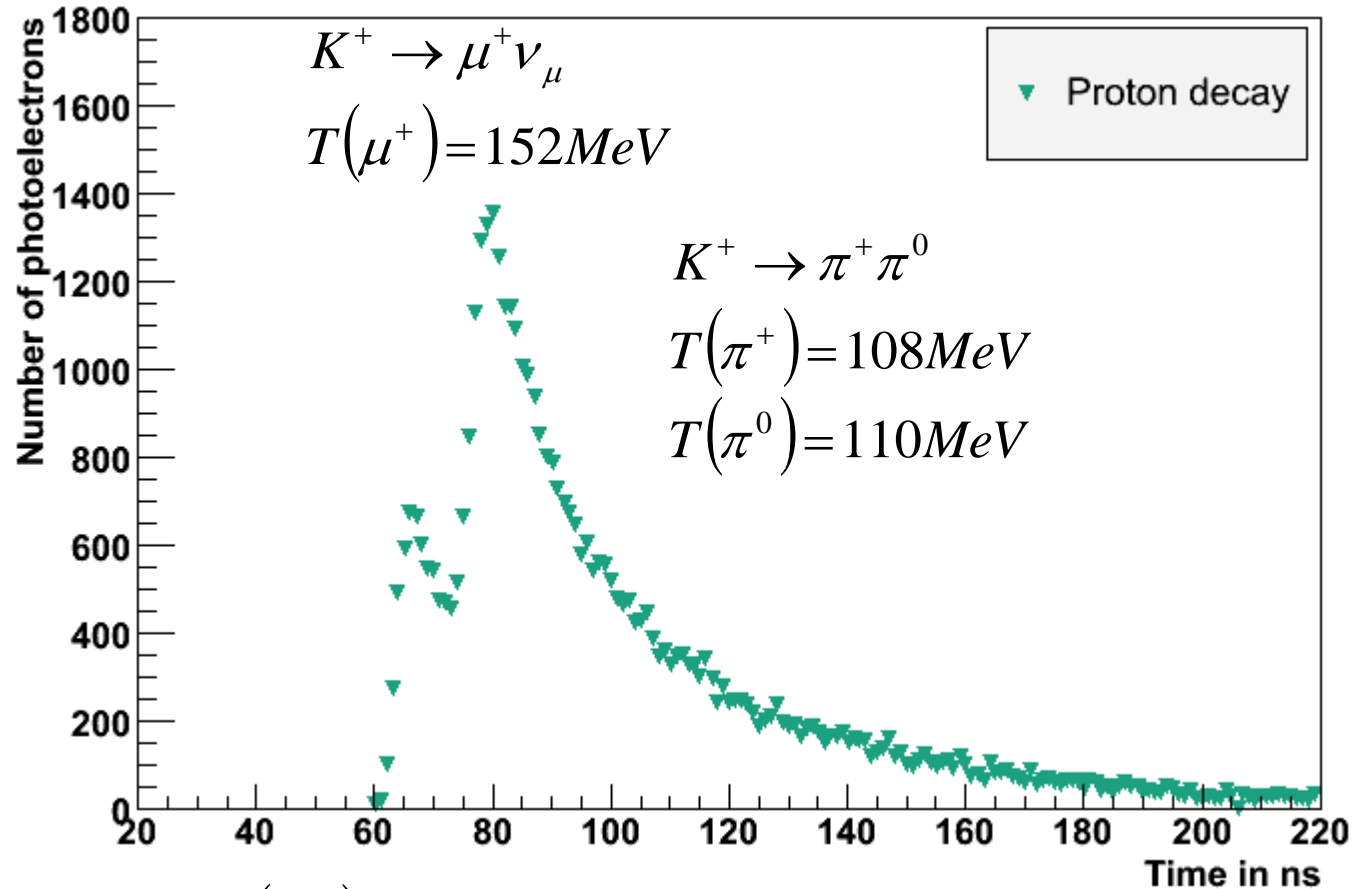


Zerfall des Protons:

- ⇒ Energie wird im Szintillator deponiert
- ⇒ Kaon ist entstanden
- ⇒ Kaon zerfällt
- ⇒ Weitere Energie wird nach charakteristischer Zeit deponiert
- ⇒ Zerfallsprodukte:



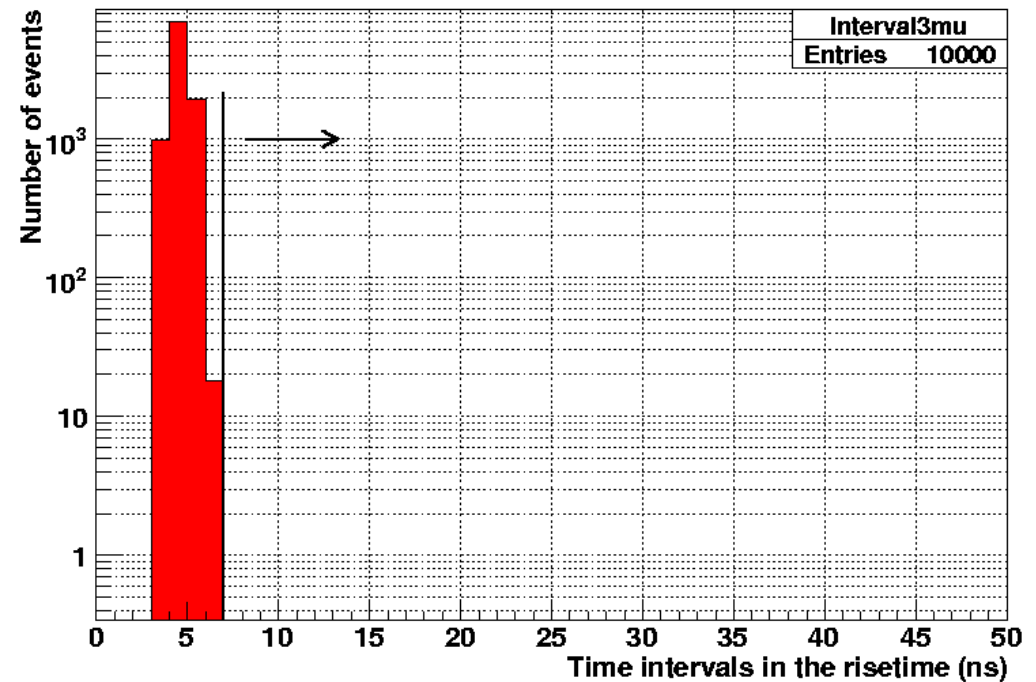
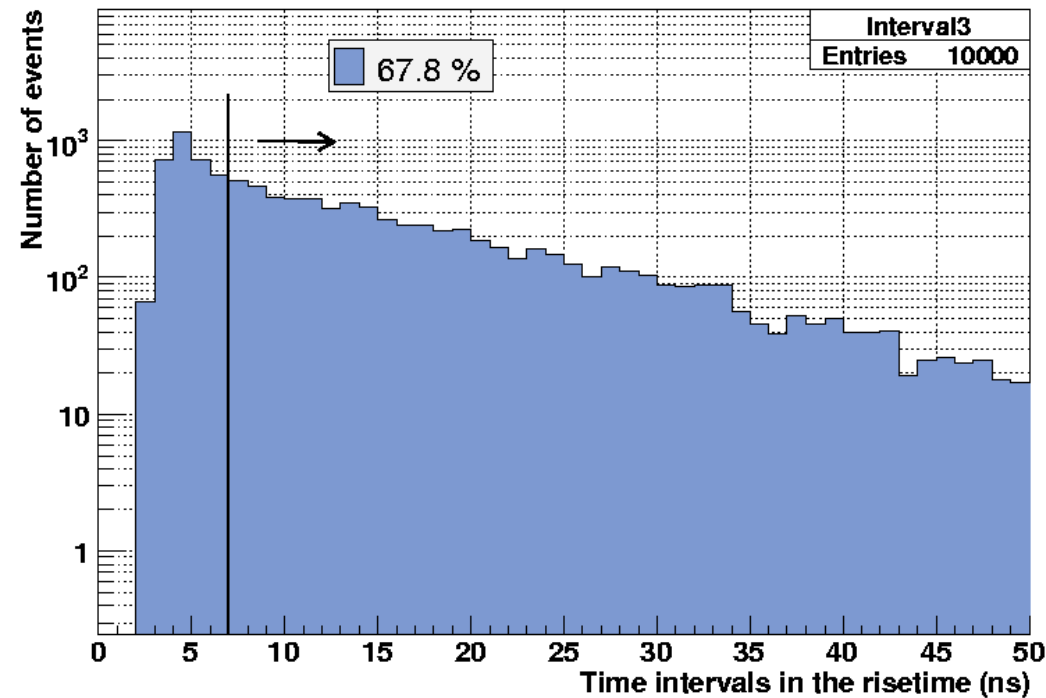
- ⇒ Diese Teilchen können wieder zerfallen
- ⇒ Theoretisch weitere Peaks möglich



$$T(K^+) = 105 \text{ MeV}$$

$$\tau(K^+) = 12,8 \text{ ns}$$

Signal-Untergrund



- Untergrund: Atmosphärische Neutrinos
 - Anstieg schneller als 7ns
 - Cut bei 7ns
 - Kaon-Zerfall bei ~13ns
- ⇒ Detektionseffizienz von etwa 65%

Zusammenfassung

LENA

- Hochreine Flüssigszintillatoren sind sehr attraktive Detektionsmittel für die nächste Generation von voluminösen Neutrino-Detektoren
 - Die organischen Flüssigkeiten sind in großen Mengen in der Industrie verwendet
 - Also auch in großen Mengen verfügbar und billig zu produzieren
 - Ebenso kann die Flüssigkeit industriell weiterverwendet werden
 - Der extrem hohe Level an Reinheit, der erreicht werden kann, wurde schon in anderen Experimenten, wie Borexino, bewiesen, so dass sehr seltene Prozesse bei niedrigen Energien von bis zu 200keV untersucht werden können (Wasser $\sim 5\text{MeV}$)
 - Flüssigkeiten lassen sich mittels chemischen Methoden reinigen (Destillation...)
 - 50-fache Lichtemission durch Szintillation im Gegensatz zu Wasser-Cherenkov-Detektoren

Zusammenfassung

LENA

- Neben Elektronen und Protonen bieten sich organische Flüssigkeiten als Target-Material für Neutrinos an => die erhöhte Zahl von Reaktions-Kanälen bietet bessere Möglichkeiten zwischen den Flavours von (Anti-) Neutrinos zu unterscheiden
- Diese Möglichkeiten könnten entscheidend sein zur Untersuchung der komplexen Neutrino-Signatur von Supernova-Explosionen und zur Beschreibung der starken Verzerrung des Spektrums der ursprünglichen Flavour
- Genauigkeit von Richtungsinformationen und Identifikation von Teilchen im GeV-Bereich sind unerwartet stark verbessert worden → Nutzung als ferner Detektor für Neutrinostrahl
- Die Vielseitigkeit des Detektors ist ein starker Vorteil, da seine Sensitivität von der sub-MeV- bis zur GeV-Skala reicht und damit eine große Forschungsfläche im Bereich Neutrinophysik, Geologie und Astronomie abdeckt

Zusammenfassung

- Neutrinos liefern Informationen teils aus Bereichen des Universums, die wir über Photonen nicht einsehen können
- Neutrinos lassen sich aus einer Vielzahl von Quellen detektieren
- Lieferung von Beiträgen zu astronomischen Themen, wie Modellen des Kernkollapses von Sternen, Struktur der Sonne,...
- Genauso Eigenschaften von Neutrinos, wie dem letzten Mischungswinkel aus der PMNS-Matrix, der noch unbekannt ist
- Erhöhung der erwarteten Proton-Lebensdauer um einen Faktor 10



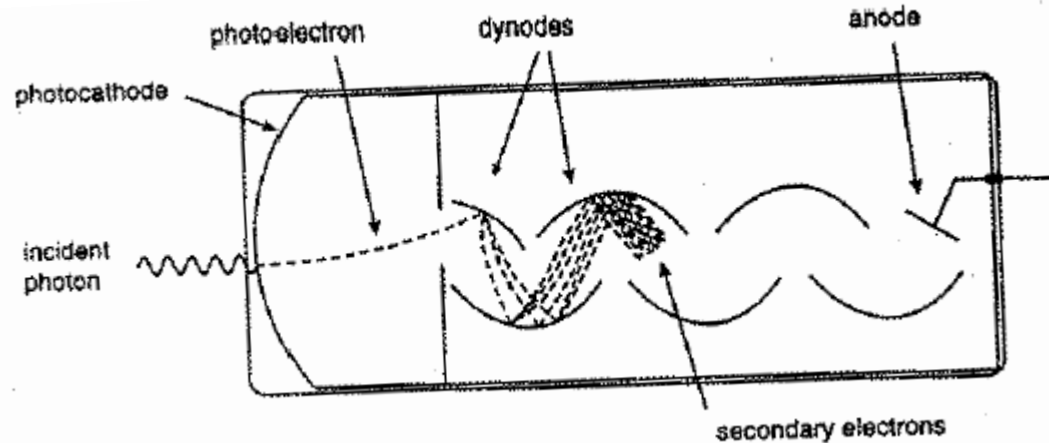
Vielen Dank
für die
Aufmerksamkeit

Quellen

- M. Wurm et al: *The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA* (2011), [arXiv:1104.5620v1](#)
- T. Marrodan et al: *Low energy neutrino astronomy with the large liquid scintillation detector LENA* (2006), [arXiv:hep-ph/0605229v1](#)
- P.-H. Gu et al: *A minimal type II seesaw model* (2006), [arXiv:hep-ph/0606302v3](#)
- I. Dorsner et al: *Predictions from type II see-saw mechanism in SU(5)* (2007), *Nuclear Physics B* 796 (2008) 123-136
- H.S. Goh et al: *Proton decay in a minimal SUSY SO(10) model for neutrino mixings* (2004), *Physics Letters B* 587 (2004) 105-116
- Borexino Collaboration: *Observation of Geo-Neutrinos* (2010), [arXiv:1003.0284v1](#) (2010)
- M. Blennow et al: *Solar Neutrino Day-Night Effect*, as summary of:
 - M. Blennow et al: *Day-night-effect in solar neutrino oscillations with three flavors* (2004), [arXiv:hep-ph/0311098v3](#)
- G. Senjanovic: *Proton decay and grand unification* (2009), [arXiv:0912.5375v1](#)
- M.Wurm et al: *The physics of the LENA detector* (2009), [arXiv:1004.3474v1](#)
- K.S. Babu: *Suggested New Modes in Supersymmetric Proton Decay* (1997), [arXiv:hep-ph/9712307v1](#)
- L. Maiani: *The Problem of Proton Decay* (2006), http://axpd24.pd.infn.it/NO-VE2006/talks/NOVE_Maiani.pdf
- D. Emmanuel-Costa et al: *Proton Decay in a consistent supersymmetric SU(5) GUT model* (2003), [arXiv:hep-ph/0302272v2](#)
- M. Hierholzer: *Supernovae & Neutrinos* (2011), *Forschungsgruppeninterner Vortrag*

Backup

Messung mittels Photomultipliern



- Photonen treffen auf Photoschicht
 - Absorption
 - Abgabe von Elektronen
 - Elektron-Anzahl-Vervielfältigung von Dynode zu Dynode
- ⇒ Verstärktes, messbares Signal

