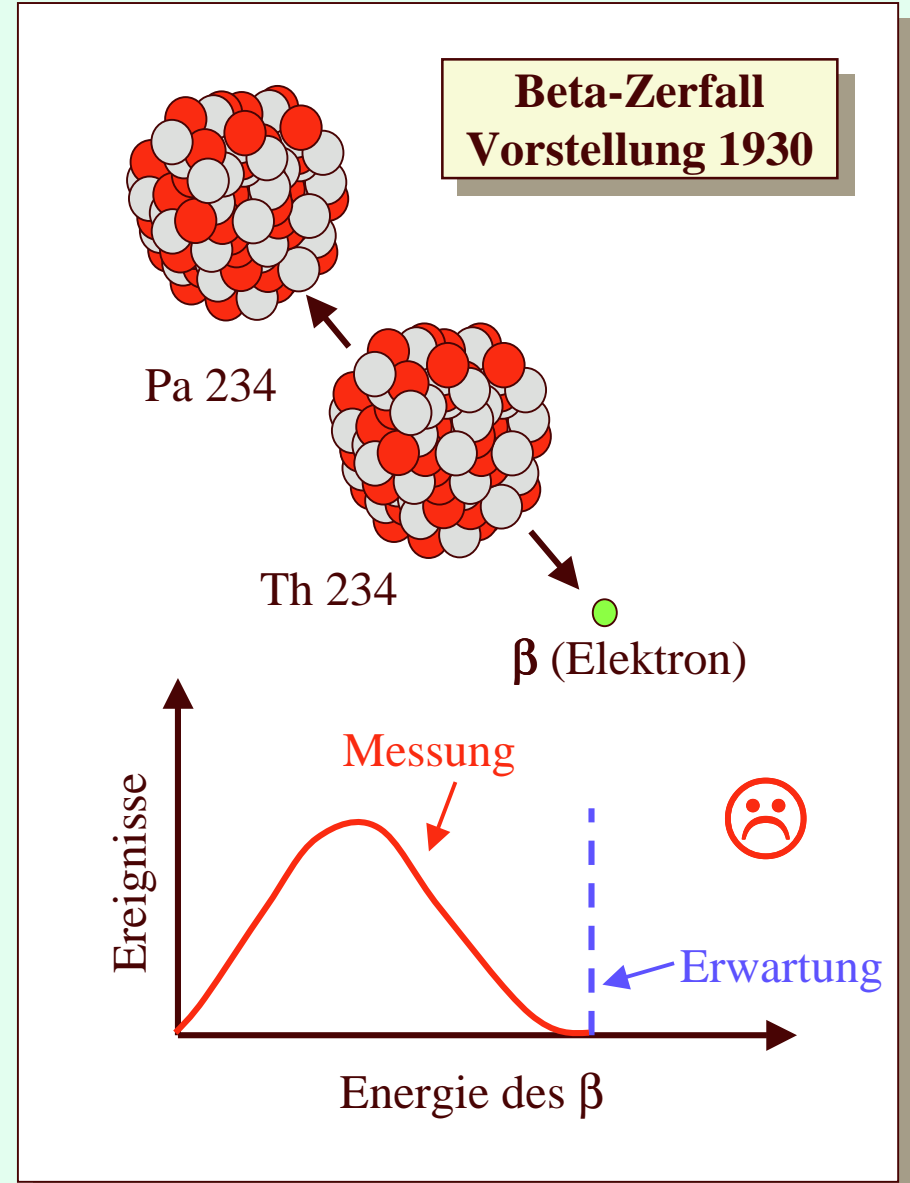
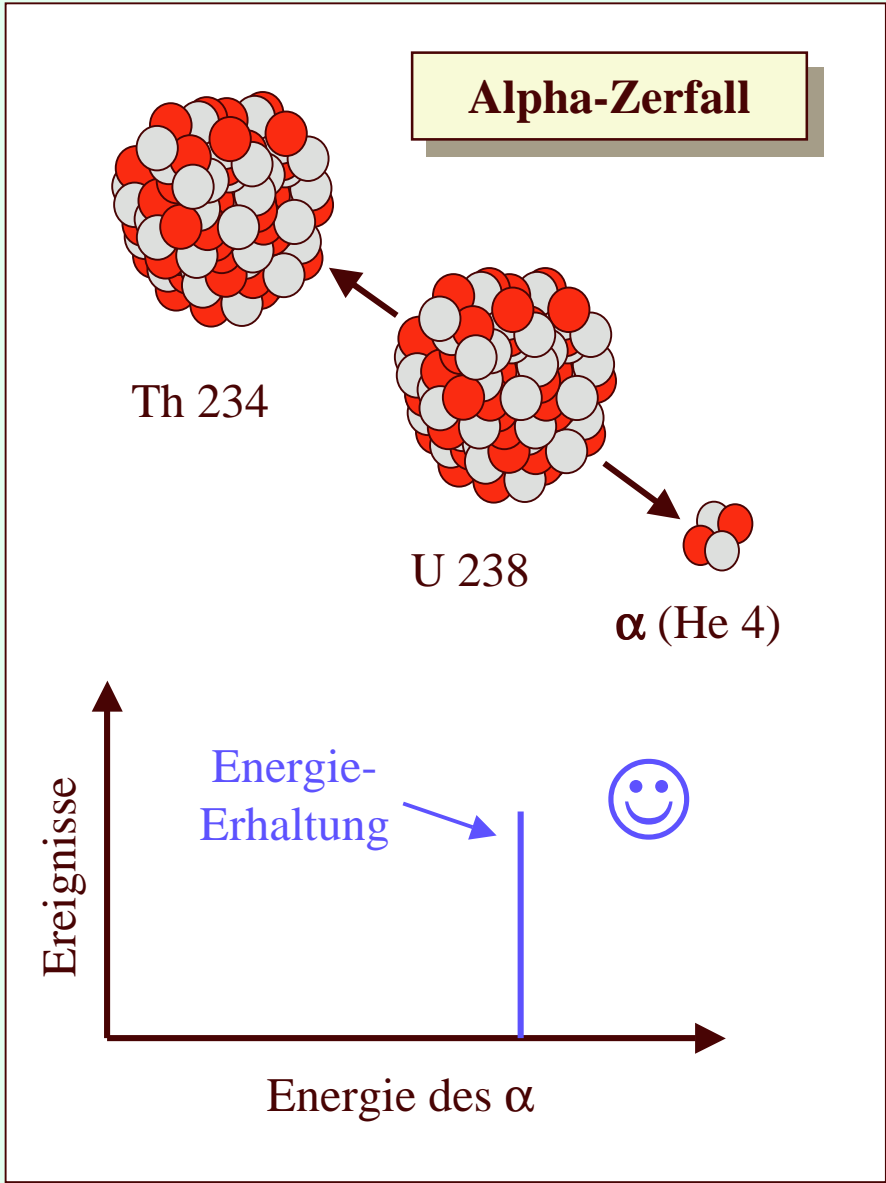


## 1930: Krise in der Physik



„Oh, daran denkt man am besten gar nicht, wie an die neuen Steuern“

# 1930: Energie-Erhaltung im Beta-Zerfall verletzt??





## 4.12.1930: W. Pauli an Tagung in Tübingen

Physikalisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, den 4. Dezember 1930:

Liebe radioaktive Damen und Herren,

wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts... des kontinuierlichen Beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um ... den Energiesatz zu retten.

Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche das Ausschließungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten außerdem noch dadurch unterscheiden, daß sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen.

Ihre Masse müßte von derselben Größenordnung wie die Elektronenmasse sein.

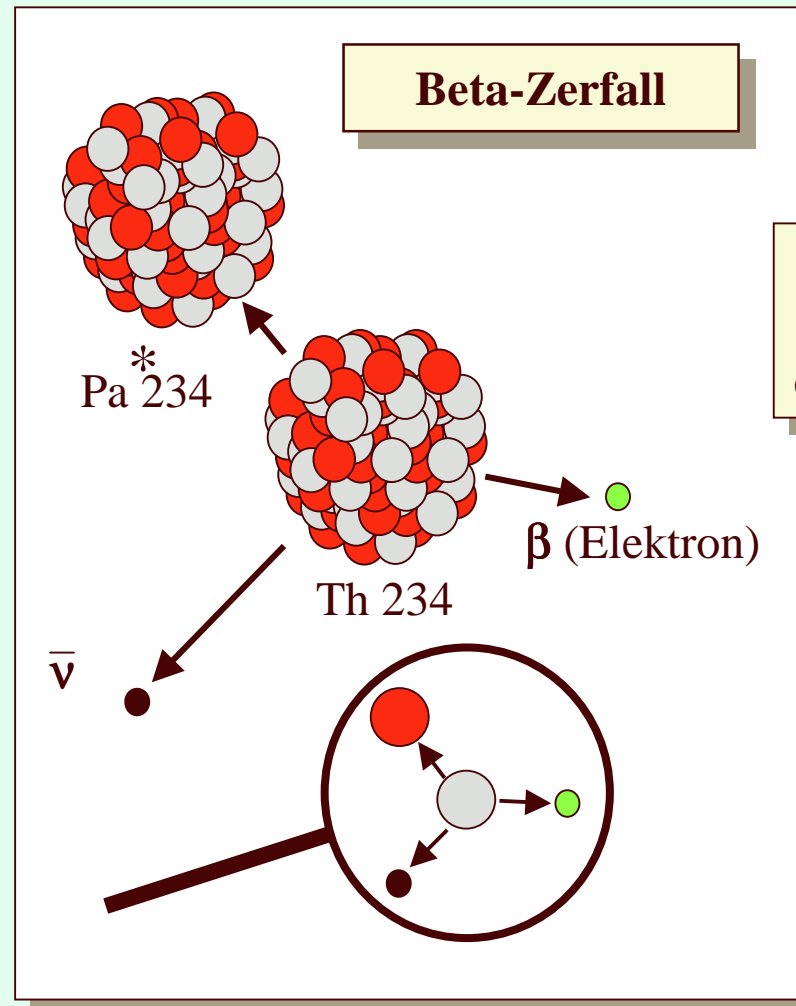
Ich traue mich vorläufig nicht, etwas über diese Idee zu publizieren, und wende mich vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis stände, wenn dieses Neutron ein ebensolches oder etwa 100 mal größeres Durchdringungsvermögen besitzen würde wie ein Röntgenstrahl.

Ich gebe zu, daß mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen mag, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt, und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen Beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amte, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich gesagt hat: 'Oh, daran soll man am besten gar nicht denken, so wie an die neuen Steuern.' Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. Also, liebe Radioaktive, prüfet und richtet. Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dezember in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.

Mit vielen Grüßen an Euch, Euer untertänigster Diener ... Wolfgang Pauli



## Paulis neues Teilchen



Neben dem Elektron entsteht ein  
neutrales, leichtes Teilchen, das  
die „fehlende Energie“ wegträgt!

*Fermi 1934: „Neutrino“*

*1930 bekannt:  
Proton, Elektron, Photon*

"Heute habe ich etwas getan, was man in der theoretischen Physik nie tun darf. Ich habe etwas, was nicht verstanden ist, durch etwas erklärt, was man nicht beobachten kann!"

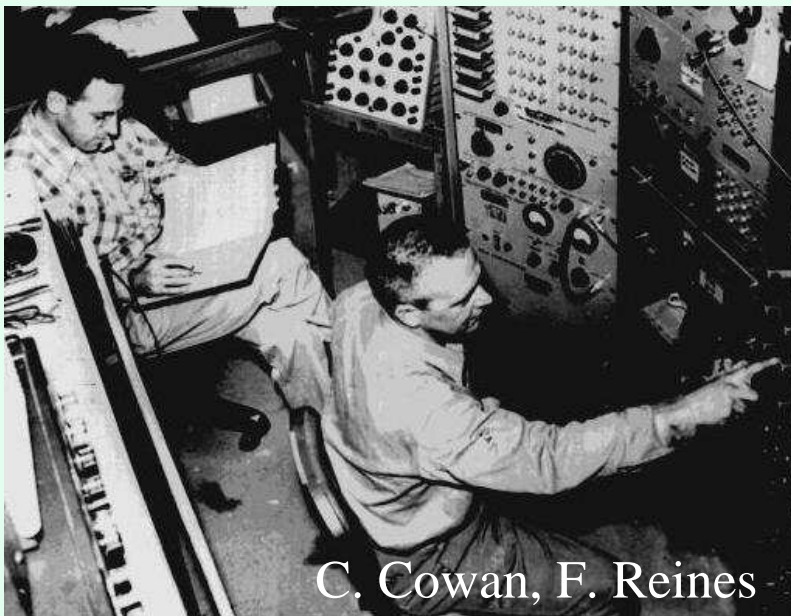
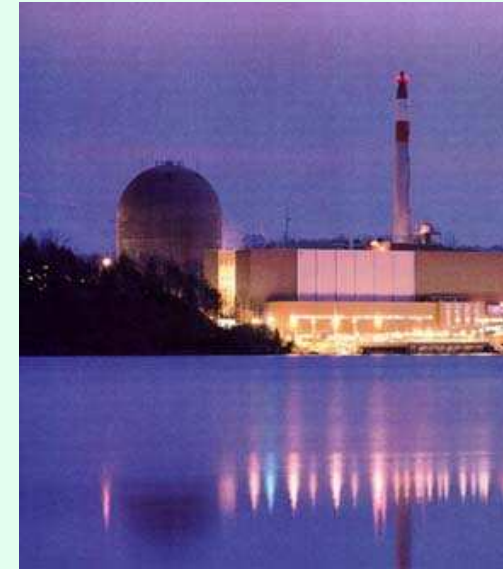
## Antineutrinos aus der Kernspaltung



Kernreaktor: etwa 10 Antineutrinos pro Spaltung!  
C. Cowan und F. Reines 1956

$10^{13}$  Antineutrinos pro  $\text{cm}^2$  pro Sekunde (10 m entfernt)

Etwa **3 Antineutrino-Reaktionen pro Stunde** in einem  
5 Tonnen - Detektor .



C. Cowan, F. Reines

*Nobelpreis 1995*

*W. Pauli 1956*



## Energiequelle der Sonne

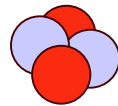
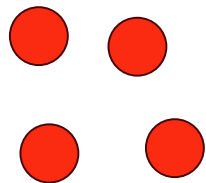


- Die Sonne strahlt enorme Energiemengen ab
- seit einigen Milliarden Jahren!

➤ welche Energiequelle?

Chemische Reaktionen:	2500 Jahre	☹️
Gravitationsenergie:	20 Millionen Jahre	☹️
Kernfusion:	10 Milliarden Jahre	😊

### Wasserstoff-Fusion:



*Neutrinos*

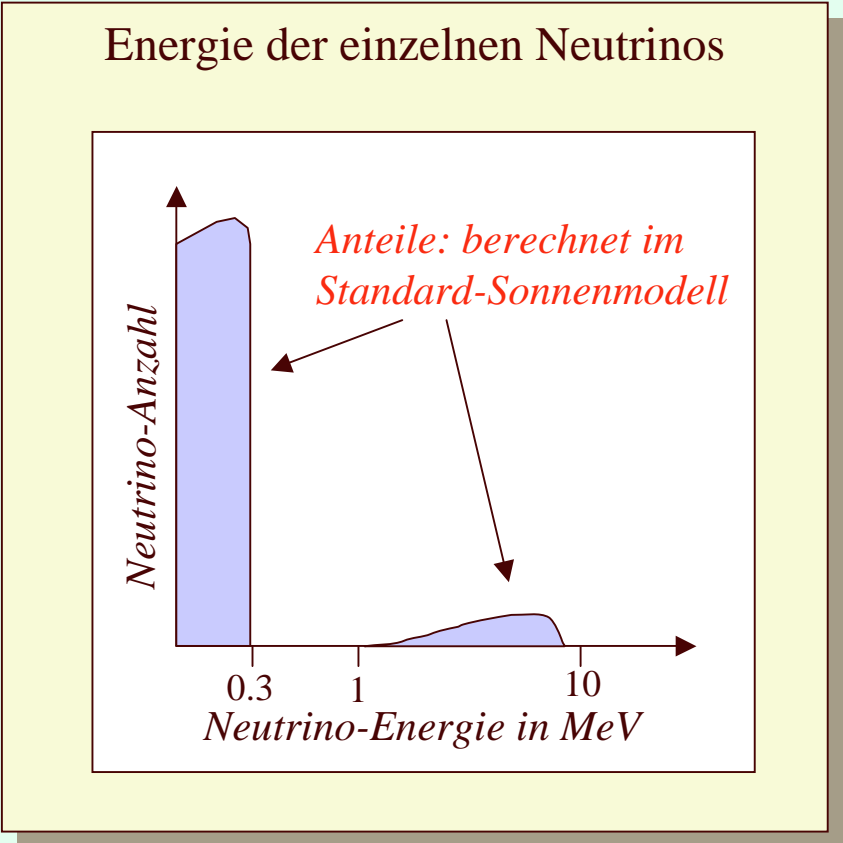
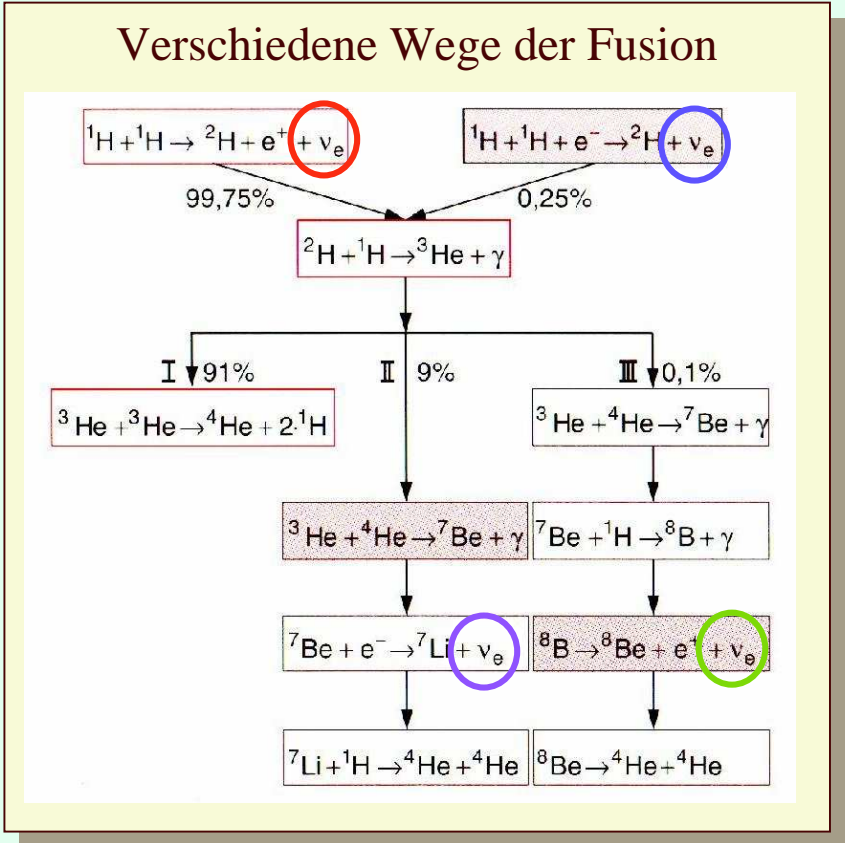
Energie aus 1g Wasserstoff: 200000 kWh

- Protonen tragen elektrische Ladung
  - Protonen stoßen einander ab
- Fusion findet nur bei hohen Dichten und Temperaturen statt
- Im Zentrum der Sonne!

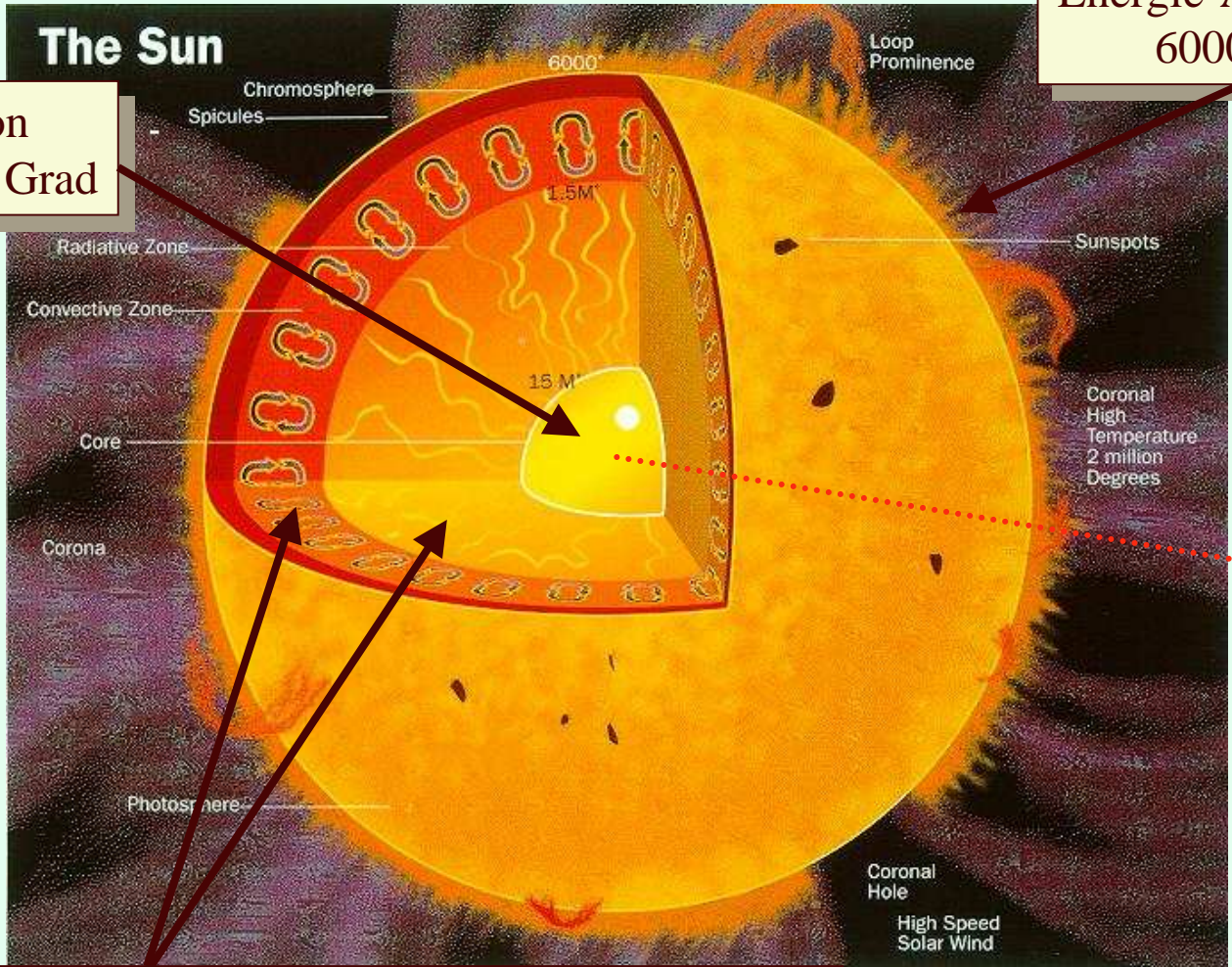
# Neutrinos aus der Sonne

$$4 \text{ Protonen} \rightarrow \text{Heliumkern} + 2e^+ + 2\nu + 26\text{MeV}$$

- Bekannt: insgesamt abgestrahlte Energie
- Bekannt: Energie pro Fusionsprozess
- Anzahl der pro s erzeugten Neutrinos!  
**Auf Erde: 66 Milliarden  $\nu$  pro s pro  $\text{cm}^2$**



# Aufbau der Sonne



Kernfusion  
15 Millionen Grad

Energie-Abstrahlung  
6000 Grad

Energie-Transport, Dauer: 10 Millionen Jahre

v  
Neutrinos  
2,3 Sekunden

Radius: 700 000 Kilometer





Ausbruch der Supernova 1987a: mit bloßem Auge gerade noch sichtbar

Entdeckung: Ian Shelton *am Las Campanas Observatory, Chile*: 6:30 Uhr 24. Februar

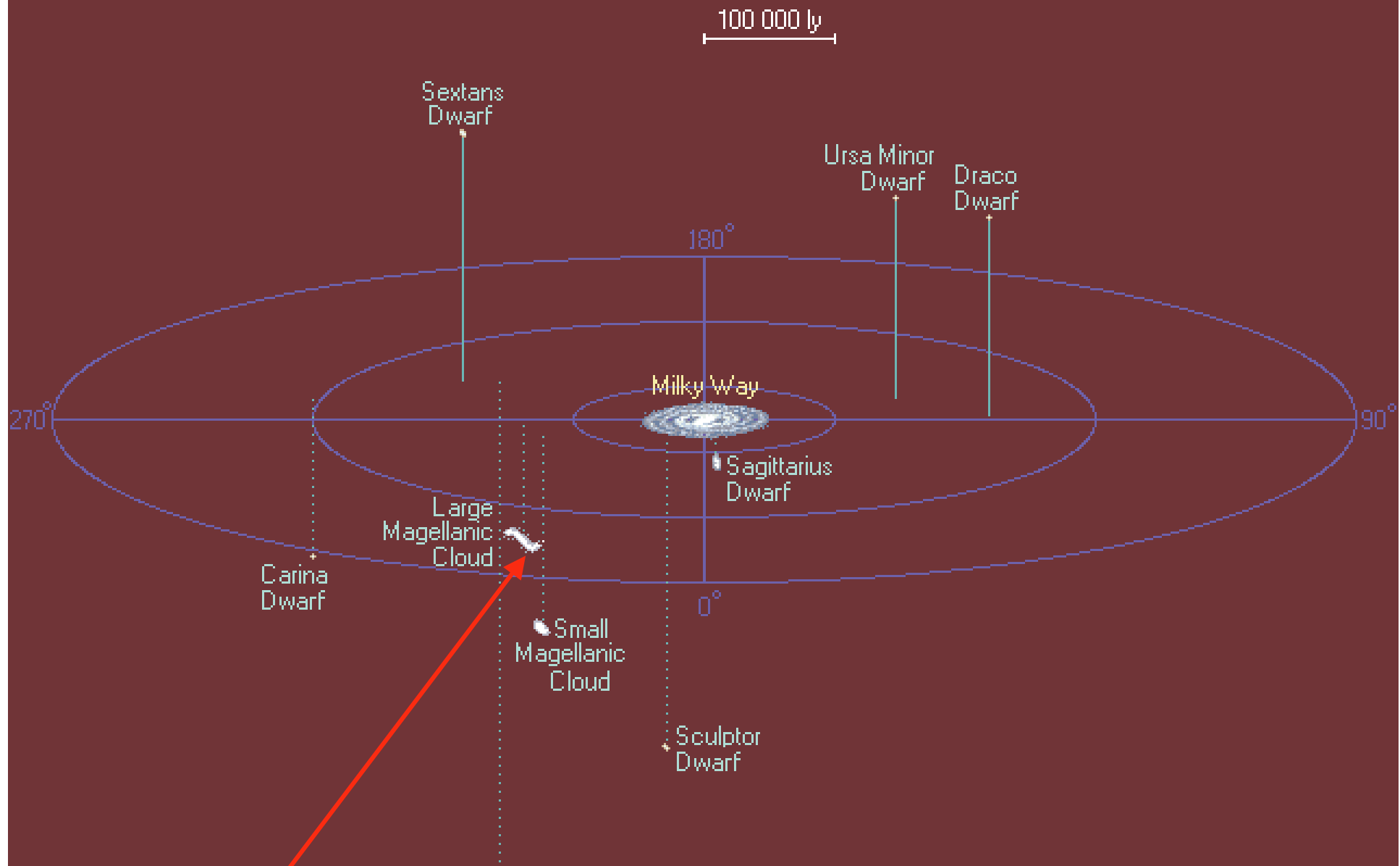
Letzte Beobachtung ohne Supernova: 9:30 Uhr 23. Februar

Erste Beobachtung (auf Fotoplatte): 10:30 Uhr 23. Februar

Neutrino-Ereignisse in Kamiokande, IMB, Baksan 7:35 Uhr 23. Februar

*Zeiten GMT*

# Umgebungskarte der Milchstraße



23. Februar 1987: Supernova in der Grossen Maggelanschen Wolke beobachtet

## Nachweis von solaren Neutrinos

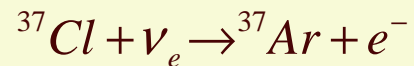


*R. Davis*  
1964 Homestake-Goldmine

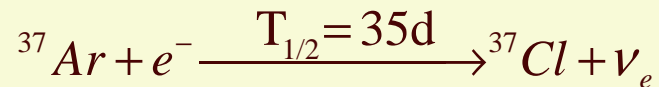


*M. Koshiba*  
1986 Kamiokande

### Einfang von Neutrinos an $^{37}\text{Cl}$ -Kernen



### Nachweis des radioaktiven $^{37}\text{Ar}$



Mindest-Neutrinoenergie:

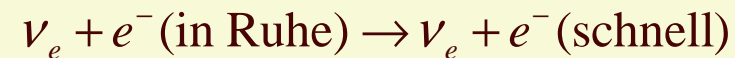
**0.8 MeV**

5 Milliarden  $\nu$  /s/cm<sup>2</sup>

Erwartete Umwandlungen  
in 600t C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> pro Tag:

**1,5**

### Stoß von Neutrinos mit Elektronen



### Nachweis der schnellen Elektronen

$$v_{\text{Elektron}} > \frac{c}{n_{\text{Wasser}}} \rightarrow \checkmark \text{Cherenkov-Licht in Wasser}$$

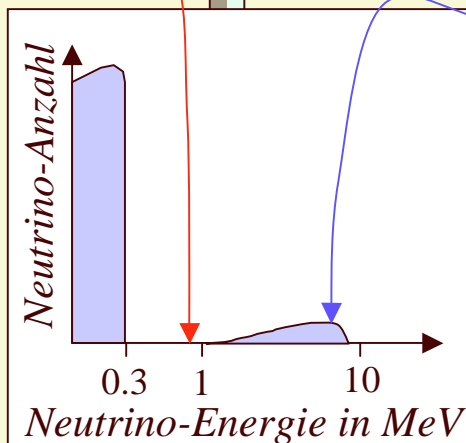
Mindest-Neutrinoenergie:

**7.5 MeV**

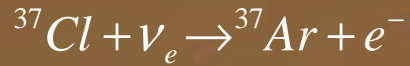
5 Millionen  $\nu$  /s/cm<sup>2</sup>

Erwartete Ereignisse  
in 4500t Wasser pro Tag:

**0,3**



## Das Davis-Experiment



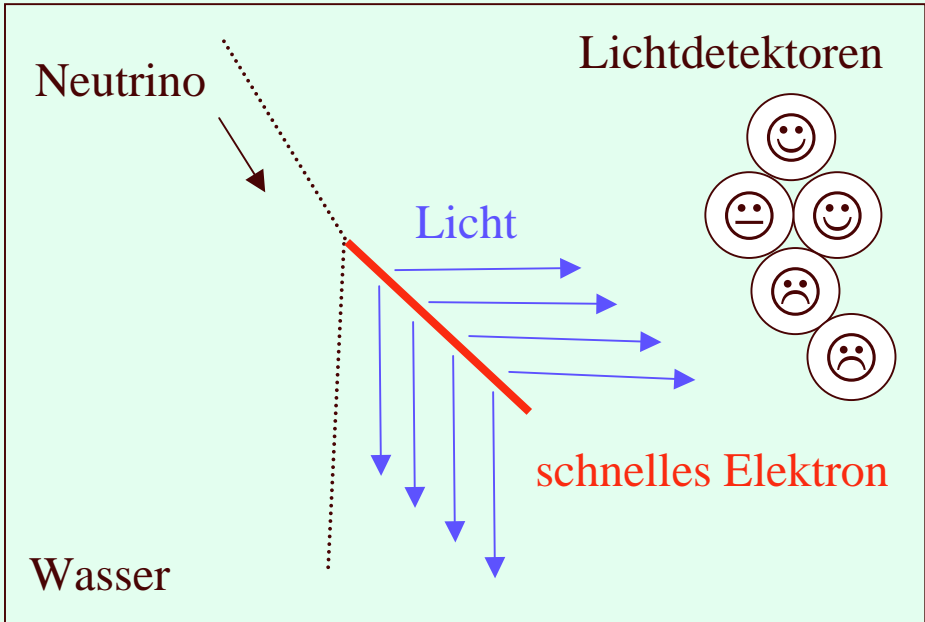
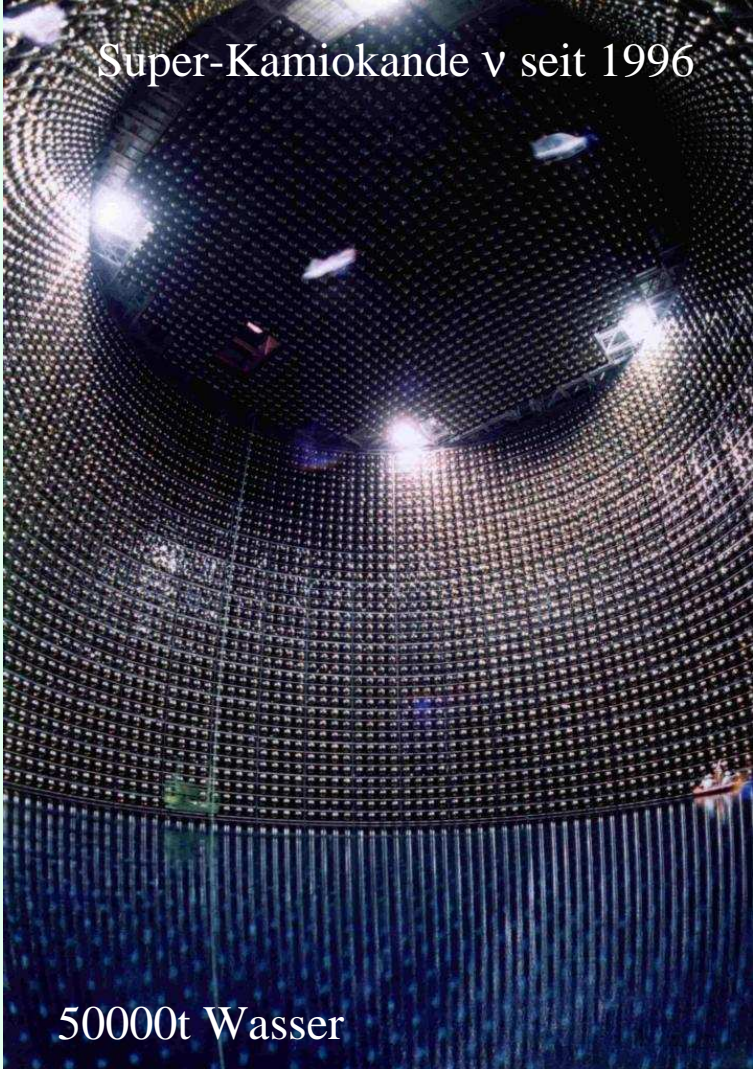
Homestake-Goldmine: unter 1400m Fels  
Tank mit 600t (380 000l)  $\text{C}_2\text{Cl}_4$

Verlauf eines Messzyklus (40 Tage):

- Zugabe von 0.2ml  $^{38}\text{Ar}$  (6 Trillionen Atome)
- 40 Tage Neutrino-Bestrahlung...
- Erwartet: 60 Atome  $^{37}\text{Ar}$
- Ausspülen des Argon mit Helium
- Trennung des Ar vom He durch Ausfrieren
- Etwa 95% des zugesetzten Argon werden wiedergewonnen, es sollten also auch 95% des entstandenen  $^{37}\text{Ar}$  gefunden werden
- Nachweis der Anzahl gefundener  $^{37}\text{Ar}$  Kerne durch ihren Zerfall.

Ergebnis: es lassen sich statt der erwarteten 60 nur etwa 20 Umwandlungen nachweisen!

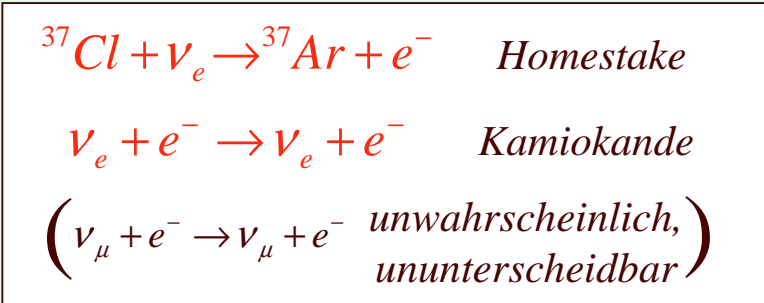
# Kamiokande, Super-Kamiokande



Ergebnis: weniger als die Hälfte der vorhergesagten Sonnen-Neutrino-Ereignisse!

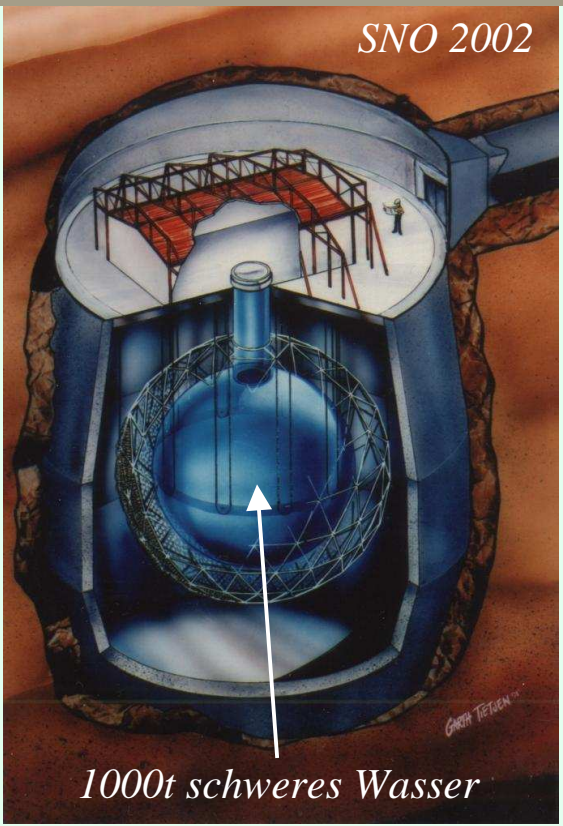
# Überprüfung der Oszillations-Hypothese für solare Neutrinos

Bisher: Nachweis nur der **Elektron-Neutrinos**



SNO: Nachweis **verschiedener Neutrino-Sorten** durch verschiedene Reaktionen an D<sub>2</sub>O

Sudbury Neutrino Observatory, Kanada



Nur **Elektron-Neutrino**:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad \text{Nachweis}$$

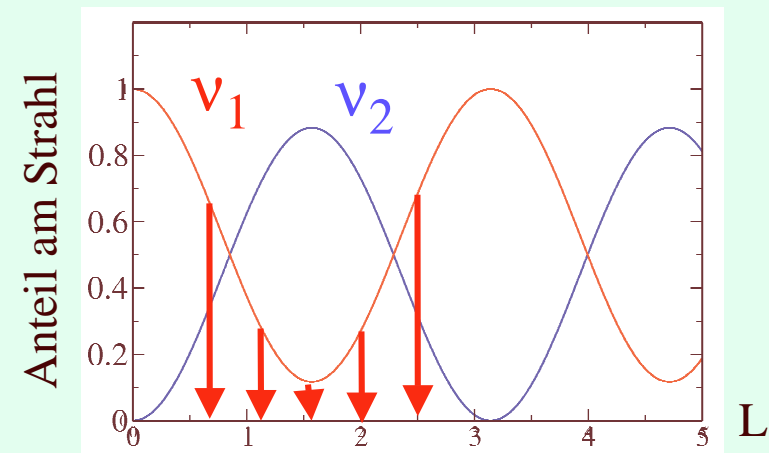
Mit gleicher Wahrscheinlichkeit für **alle Neutrinos**:

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \quad \text{Nachweis}$$

## Nachweis von Neutrino-Oszillationen

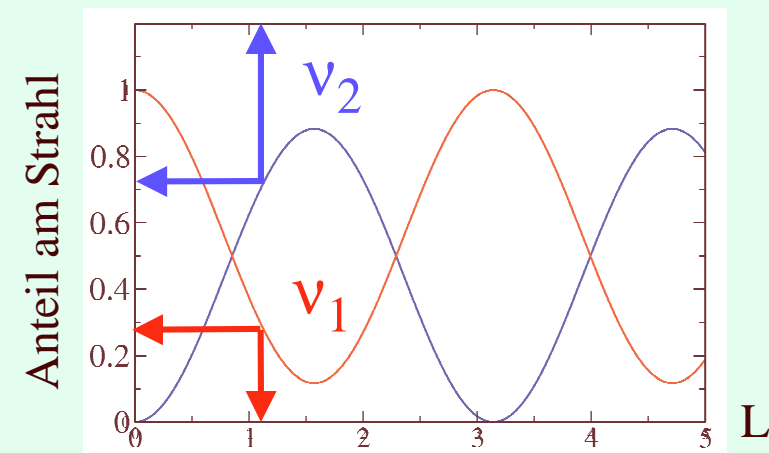
1

Messung der **ursprünglichen** Neutrinosorte in verschiedenen Abständen  $L$  von der Quelle



2

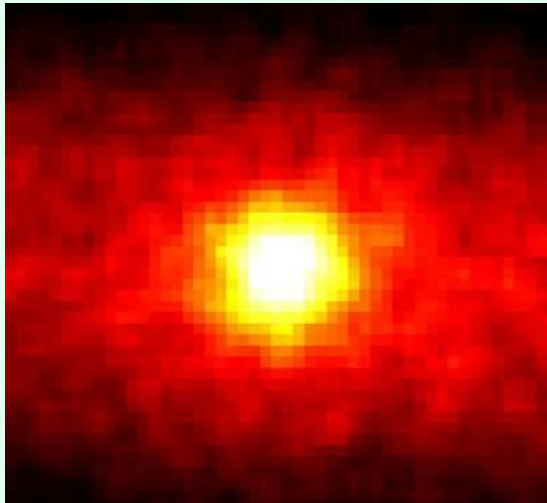
Messung der **ursprünglichen** und der **entstehenden** Neutrinosorte im Abstand  $L$



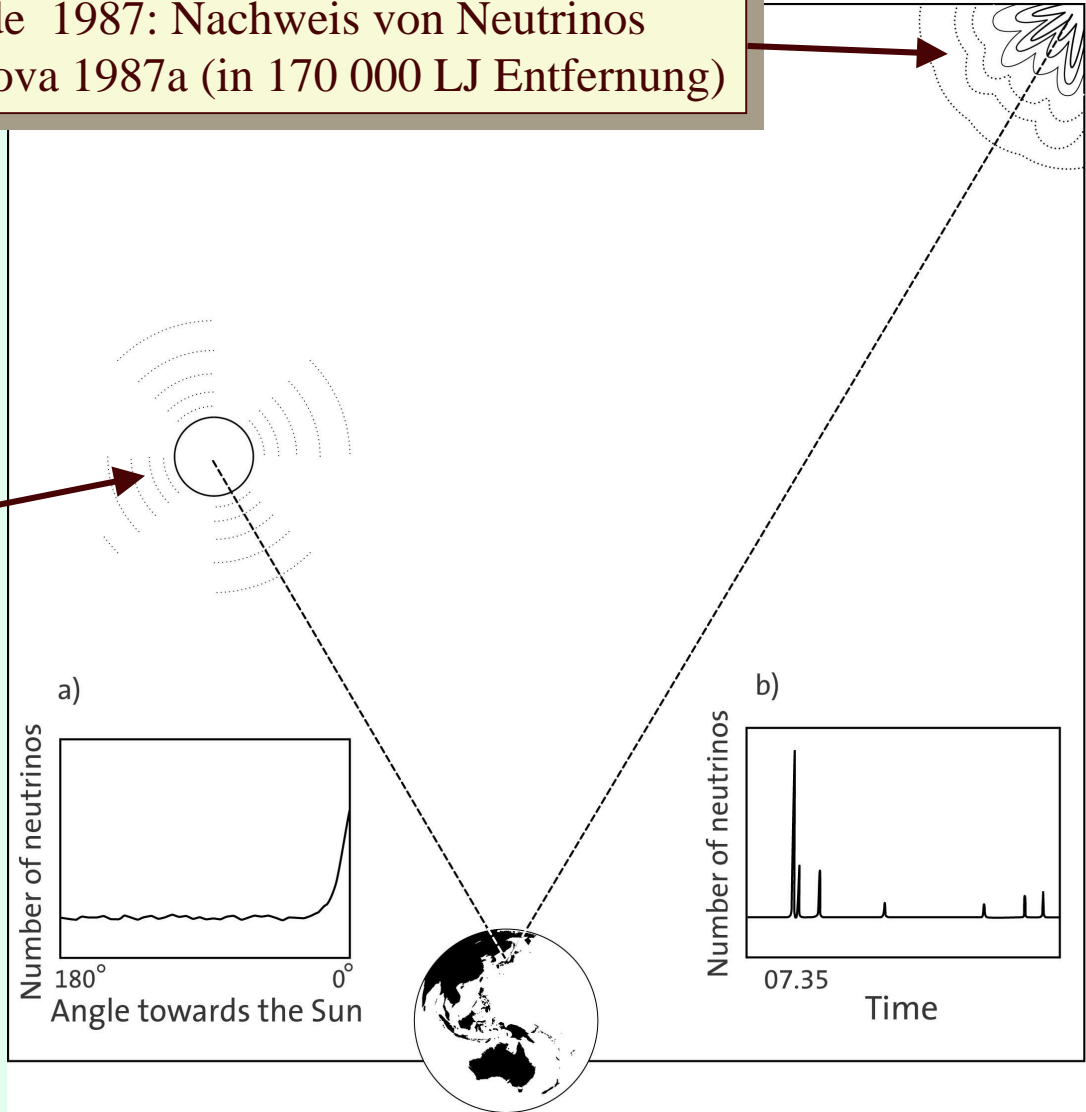
1998: Nachweis der Oszillation zwischen Myon- und Tau-Neutrinos mit Methode **1**  
durch Super-Kamiokande (Myon-Neutrinos aus der Atmosphäre)

# Kamiokande, SK: Beginn der Neutrino-Astronomie!

Kamiokande 1987: Nachweis von Neutrinos der Supernova 1987a (in 170 000 LJ Entfernung)

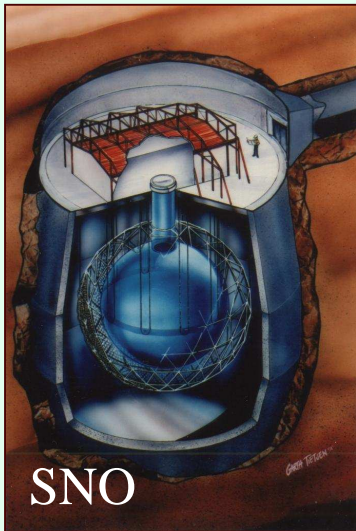


Super-Kamiokande  
Neutrino-Aufnahme der Sonne





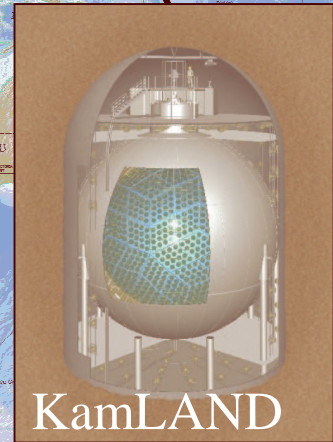
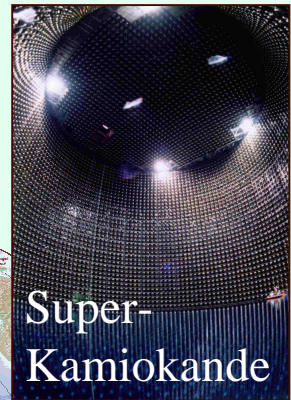
# SuperNova Early Warning System



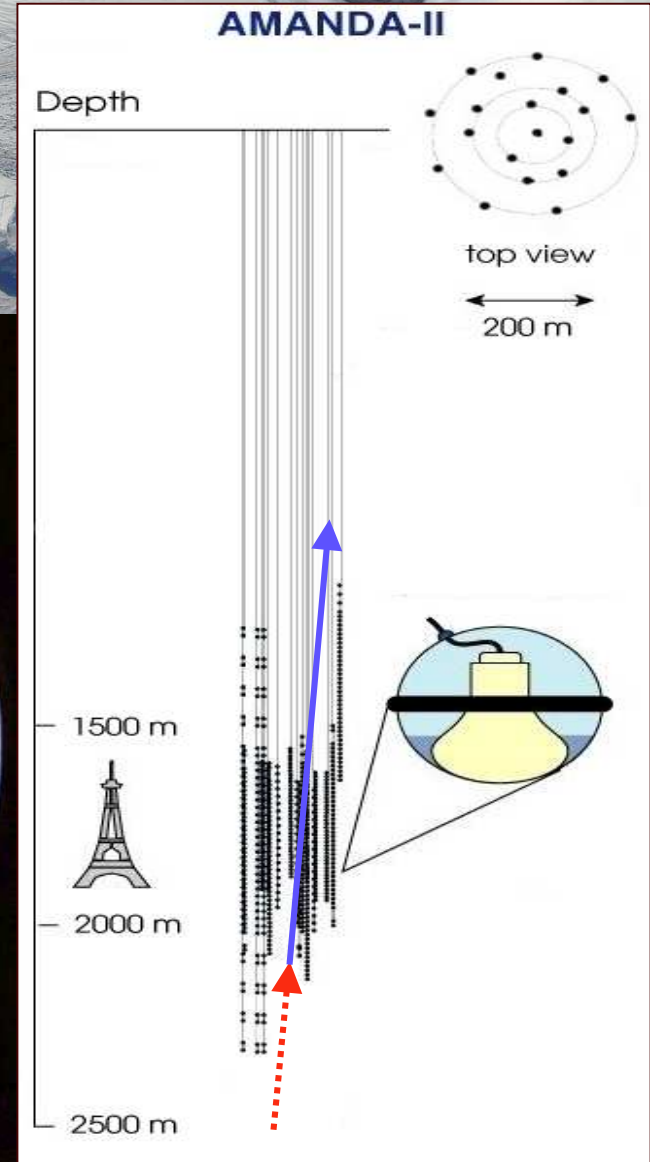
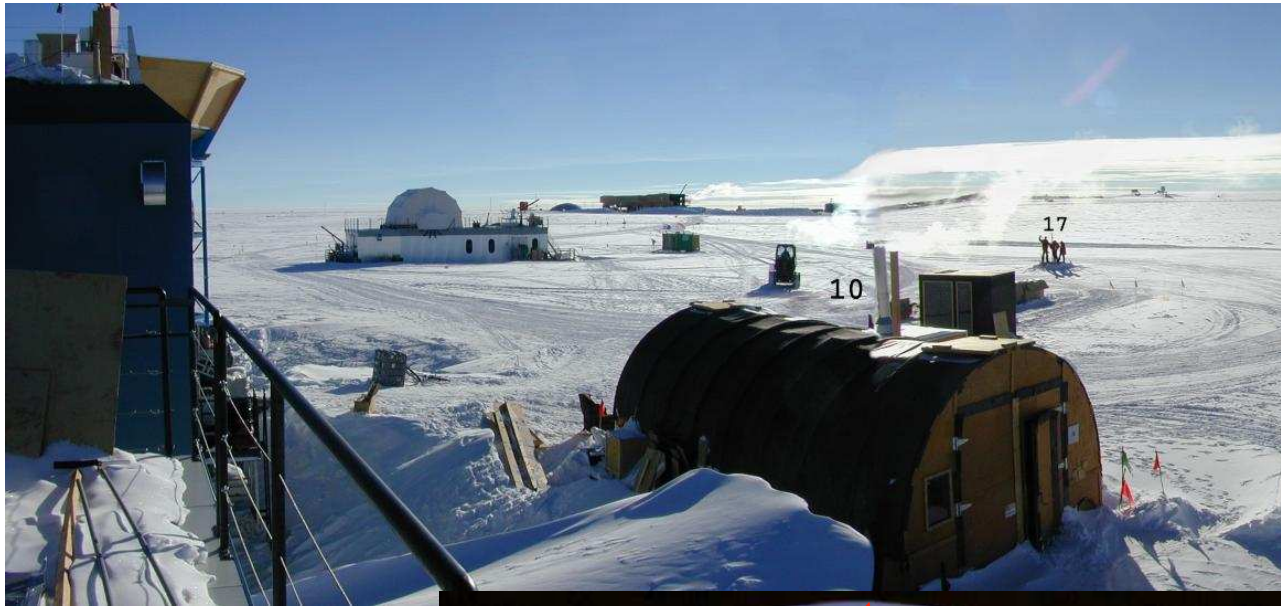
Sudbury

Gran Sasso

Kamioka



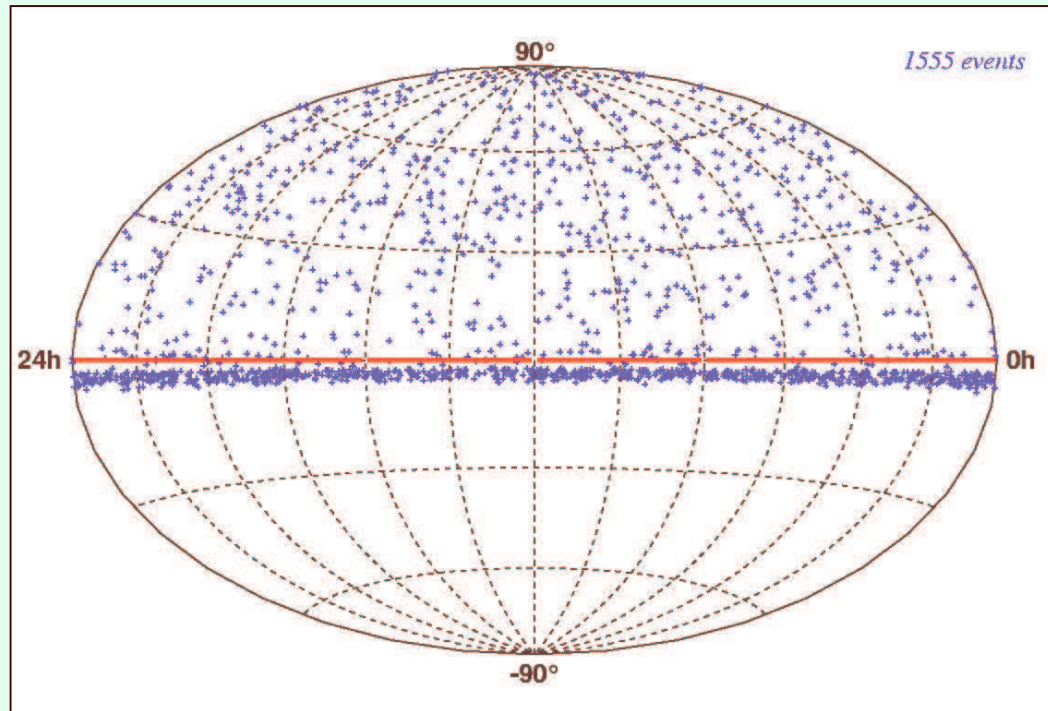
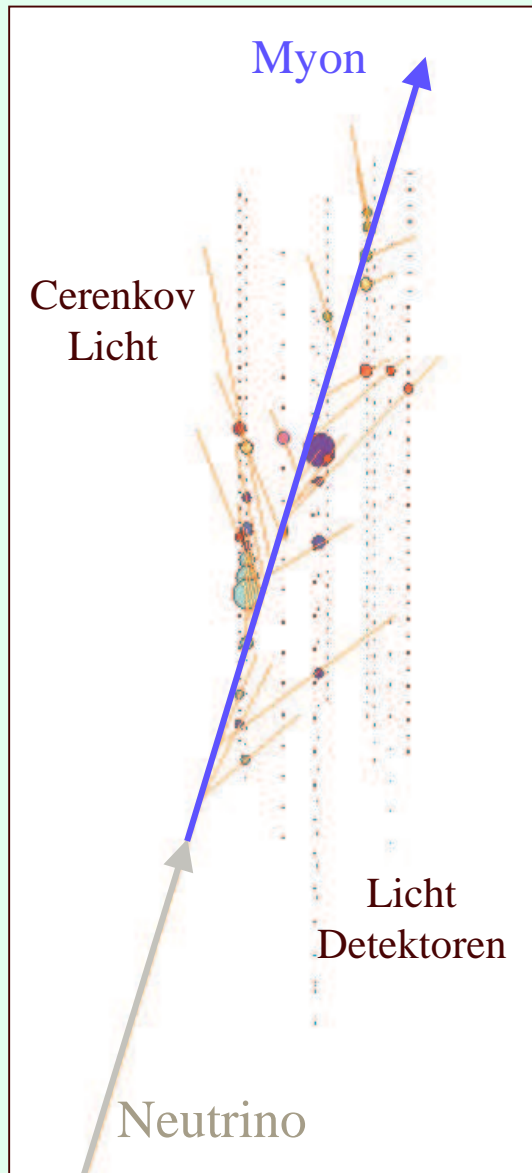
Südpol



Amanda:  
Neutrino-Observatorium  
für den Nordhimmel  
... am Südpol!

Neutrino

## Ereignis in Amanda



## Amanda: Neutrino-Himmelskarte

- Supernova-Frühwarn-Netzwerk
- Neutrino-Punktquellen
- Neutrinos höchster Energien

Heute: ein Ereignis alle 7 Stunden

Zukunft: **Ice Cube**