



Hemmungslose Neutrinos – Nobelpreise für Geisterteilchen



1988: Entdeckung des Myon-Neutrinos

1995: Entdeckung des Elektron-Neutrinos

2002: Neutrinos aus dem Kosmos

Ein Blick ins Internet ...

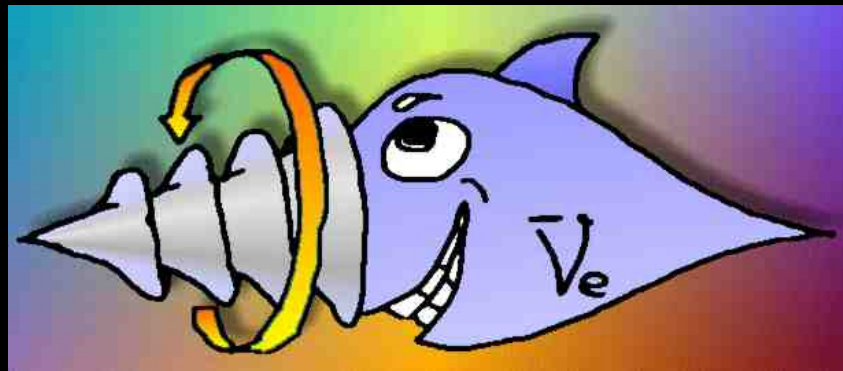


“muon neutrino oscillation” by “electric alligator dance club” video: Michael Huchtinson

Was sind Neutrinos?

DIE ZEIT

Nichts, das sich dreht“

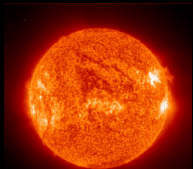


Neutrinos sind überall ...



Neutrinos vom Anfang der Welt:

In jedem cm^3 finden sich ≈ 330 Neutrinos, freigesetzt kurz nach dem Urknall vor 13.7 Milliarden Jahren



Neutrinos von der Sonne:

Sie werden pro Sekunde von 400000 Milliarden Neutrinos durchdrungen



„Ihre“ Neutrinos:

Sie strahlen pro Sekunde ≈ 4000 Neutrinos in Kosmos ab!

...aber Sie merken nichts davon ...

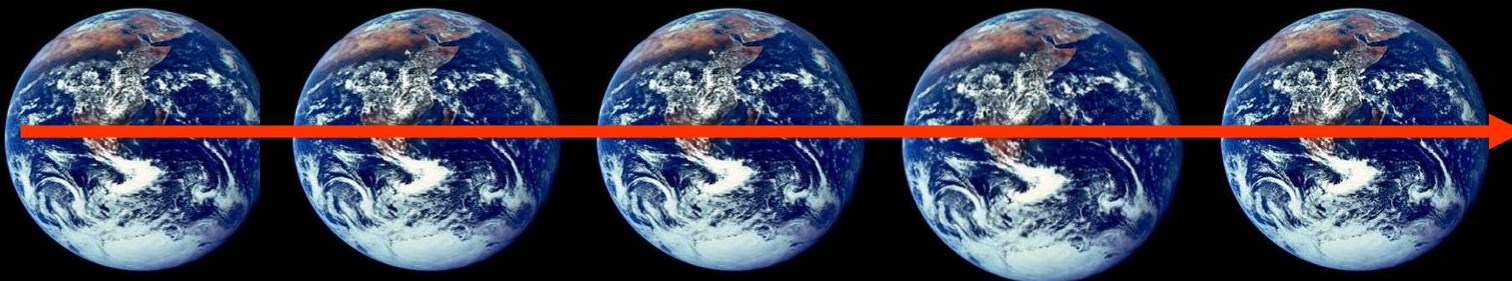
... nur ein Neutrino aus dem All reagiert mit Ihnen in Lebenszeit ...

Kann ein Neutrino aus Sonne die Erde durchdringen?

$$L_{\text{Reaktion}} = \frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Dichte} \times \text{Wirkungsquerschnitt} \times N_{\text{Avogadro}}} =$$

$$\frac{40\text{g/mol}}{5.5\text{g/cm}^3 \times 0.7 \times 10^{-38} (E/\text{GeV})\text{cm}^2 \times 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}}$$

Mittlere Distanz L_{Reaktion} bis Reaktion stattfindet ist $2 \times 10^{13} \text{km} = 2 \text{ Lichtjahre}$:



1.6 Milliarden
Erden!

Größenordnungen

Das Problem mit den vielen Nullen ...

Was kann Mensch begreifen?

Kürzeste Zeit: 0,001 s = 10^{-3} s

Lebenszeit: 2.500.000.000 s =
 $2.5 \cdot 10^9$ s

Haarradius: 0,00002 m

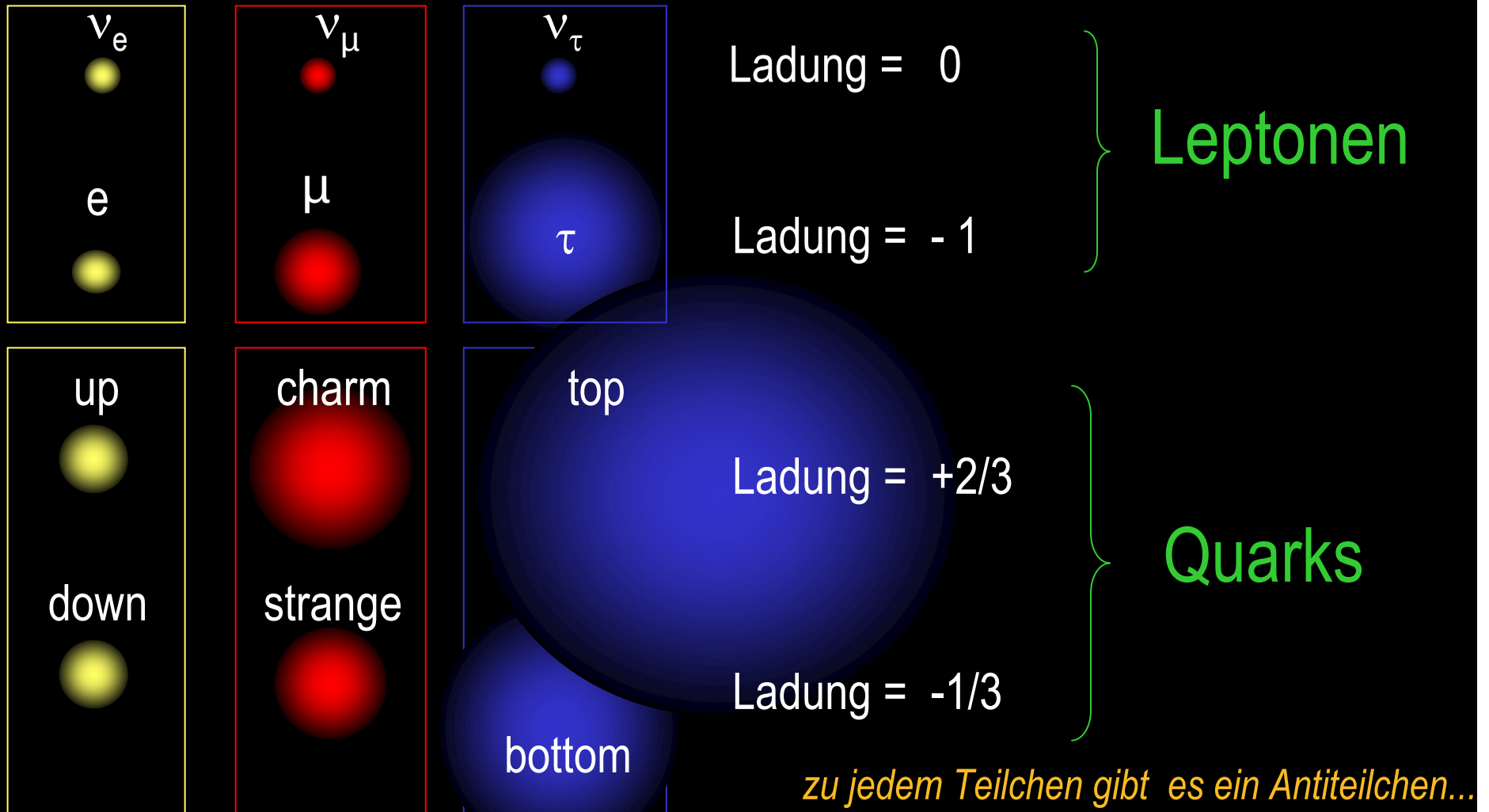
Bergsicht: 300000 m

Mont Blanc > 200 km

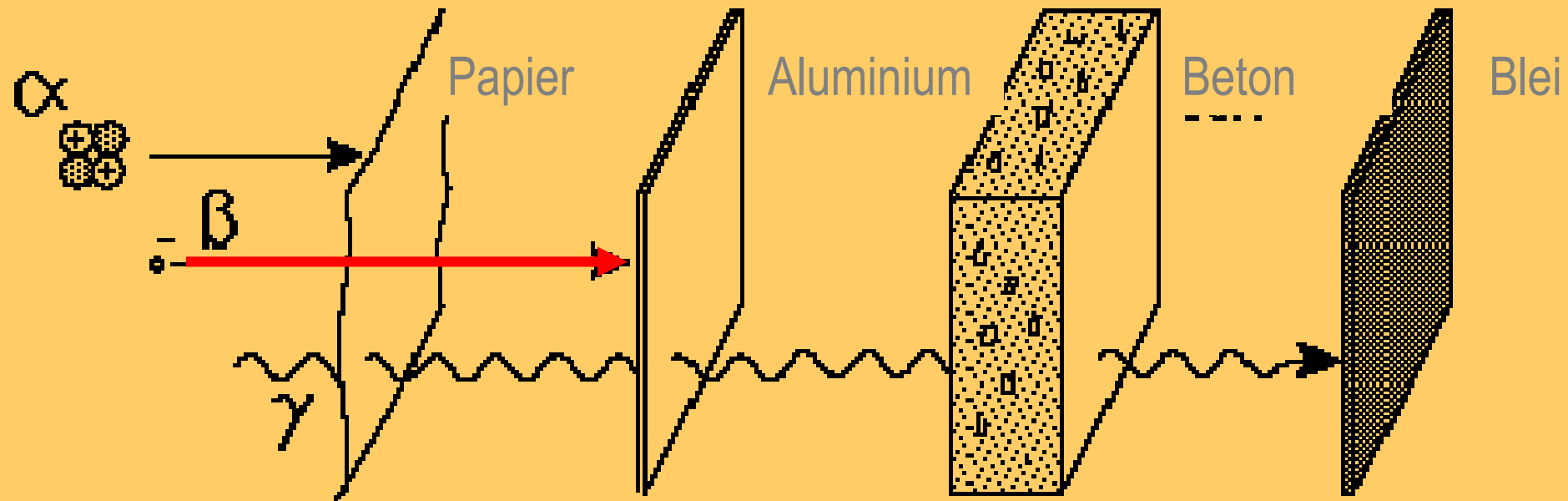


Physik soll Natur von 10^{-15} m (Atomkern) bis 10^{24} m Universum beschreiben !

Die Elementarteilchen



α , β , γ - Strahlung



α -Strahlung sind Heliumatomkerne (2 Protonen + 2 Neutronen)

γ -Strahlung sind Photonen (Licht)

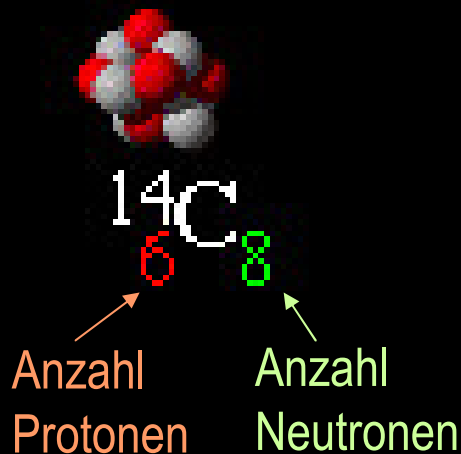
β -Strahlung sind Elektronen

Ötzi (^{14}C : 5350 Jahre)

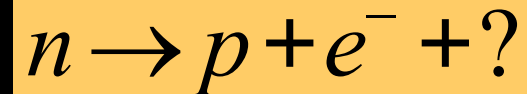


Wie wird β -Strahlung erzeugt?

Beispiel: Kohlenstoff (^{14}C) mit 8 Neutronen und 6 Protonen
kann sich in Stickstoff (^{14}N) umwandeln, da $\text{Masse}(\text{C}) > \text{Masse}(\text{N} + e^-)$



Im Atomkern wandelt sich
Neutron in ein Proton um:

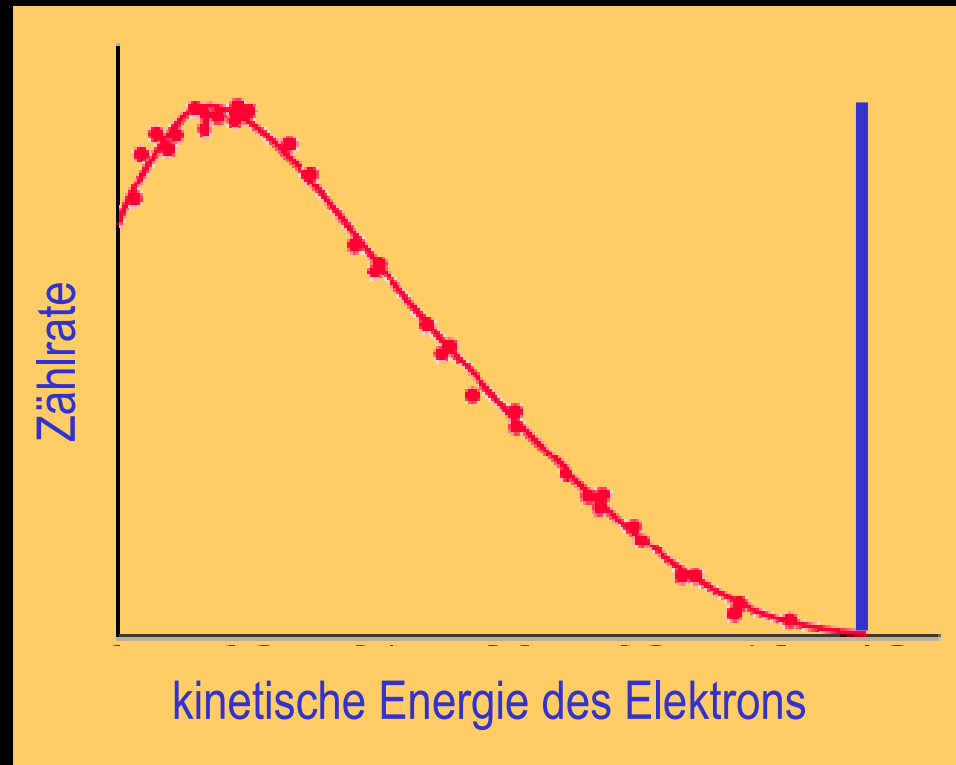


Kinetische Energie = $(m_{\text{C}} - m_{\text{N}} - m_e) \times c^2$ aller Elektronen gleich
Falls nur Elektron entsteht!

Einstein

β -Spektrum der Elektronenergien

Wirklichkeit:
kontinuierliches
Spektrum !!



Erwartung:
alle Elektronen haben
gleiche Energie

Ist die Energieerhaltung verletzt ?? ...gibt es ein zusätzliches Teilchen?

Energieerhaltung ist heilige Kuh!

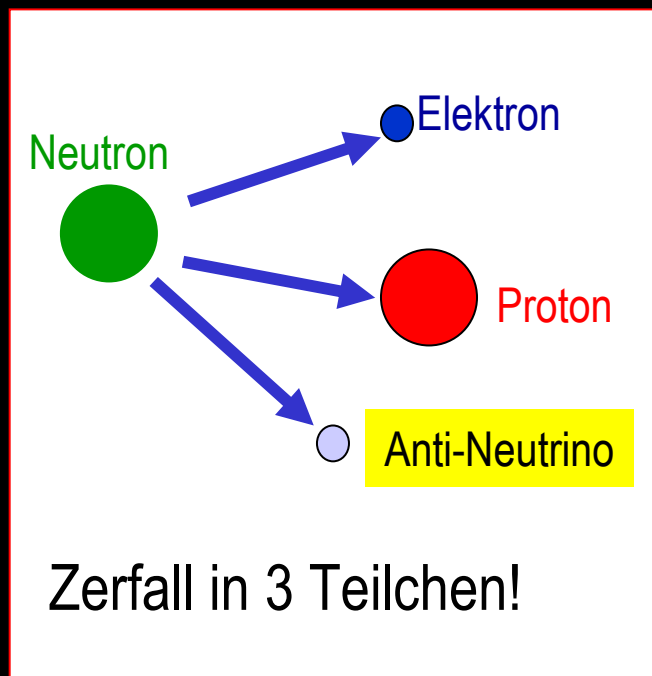


E_{raus}

E_{rein}

Die Erfindung der Neutrinos

Erklärung durch Wolfgang Pauli (1930):



Neutrinos sind extrem leichte, neutrale, kaum nachweisbare Teilchen!



Paulis Brief

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 das auseinandersetzen wird, bin ich angesichts... des kontinuierlichen β -Strahls auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um ... den β -Strahl zu retten.

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

Ihre Masse müßte von derselben Größenordnung sein wie die Elektronenmasse sein. Ich traue mich vorläufig nicht, etwas darüber zu publizieren, und wende mich vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, um zu erfahren, wie es um den experimentellen Nachweis stünde, wenn dieses Neutron existierte. Es würde etwa 100 mal größeres Durchdringungsvermögen besitzen würde wie ein β -Strahl.

Ich gebe zu, daß meine Hypothese von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen mag, weil man die Neutronen schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt, und der Ernst der Sache ist, daß das kontinuierliche β -Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgesetzten, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich gesagt hat: 'Oh, daran soll man am besten denken, so wie an die neuen Steuern.' Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. 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 unabsichtlich bin.

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

Ich habe etwas schreckliches getan:
Ein Teilchen vorhergesagt, das man nicht nachweisen kann!



Neutrिनonachweis erst 1956 !

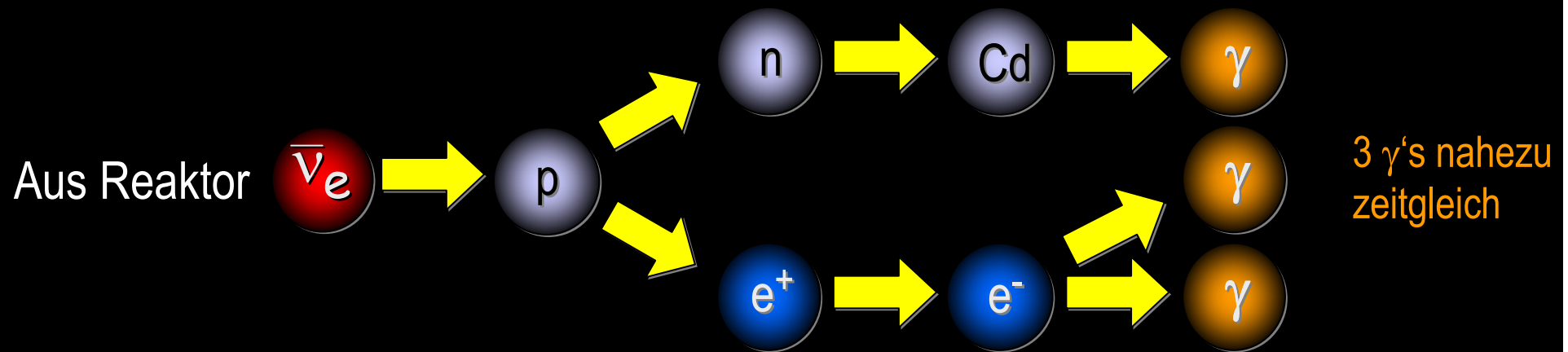


Clyde Cowan
(1919 – 1974)

(a)

Fred Reines
(1918 – 1998)
Nobelpreis 1995

Projekt „Poltergeist“:



Neutrinos aus der Sonne

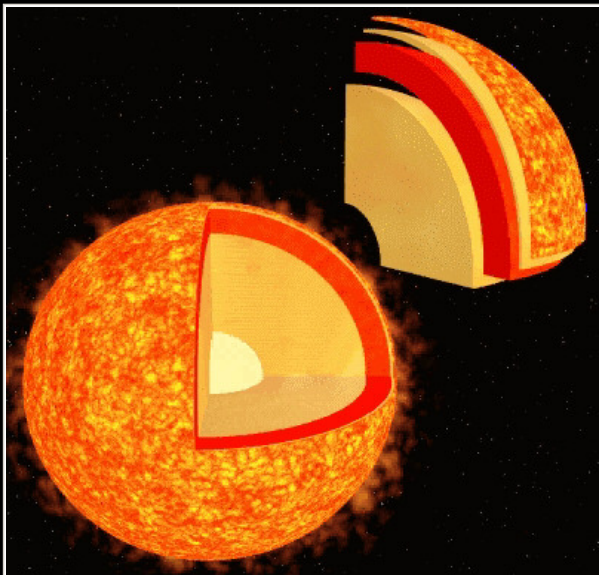


Was feuert die Sonne?

...falls Energie aus „Kohle“ und Sauerstoff: Sonne nach 1500 Jahren ausgebrannt ...

...falls Energie aus Gravitationsenergie: nach 30 Millionen Jahren verbraucht ...

Benötigen Prozess der sehr viel mehr Energie erzeugt und „langsam“ ist:

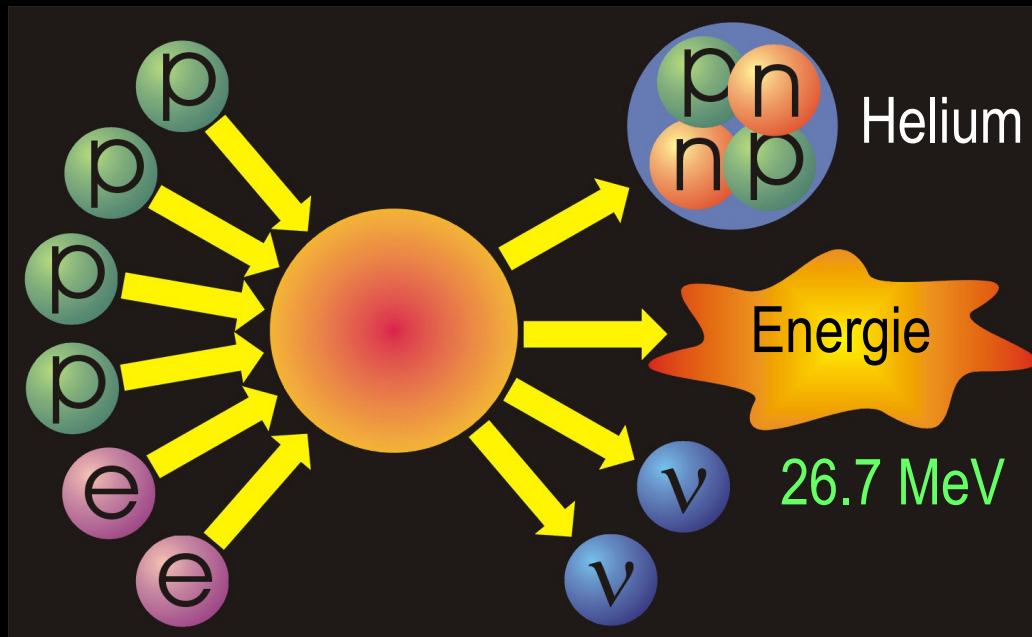


Eddington 1926: Energie aus Massenverlust $E = \Delta m c^2$
 $\Delta m \approx 5 \text{ Millionen Tonnen /s}$

Bethe 1938: Umwandlung Wasserstoff in Helium
Fusion durch „langsame“ schwache Wechselwirkung

Nobelpreis 1976

Der Proton-Proton Zyklus



Masse von 4 H-Atomen:

$$4.0027 * m_{\text{proton}}$$

Masse von ^4He :

$$3.9737 * m_{\text{proton}}$$

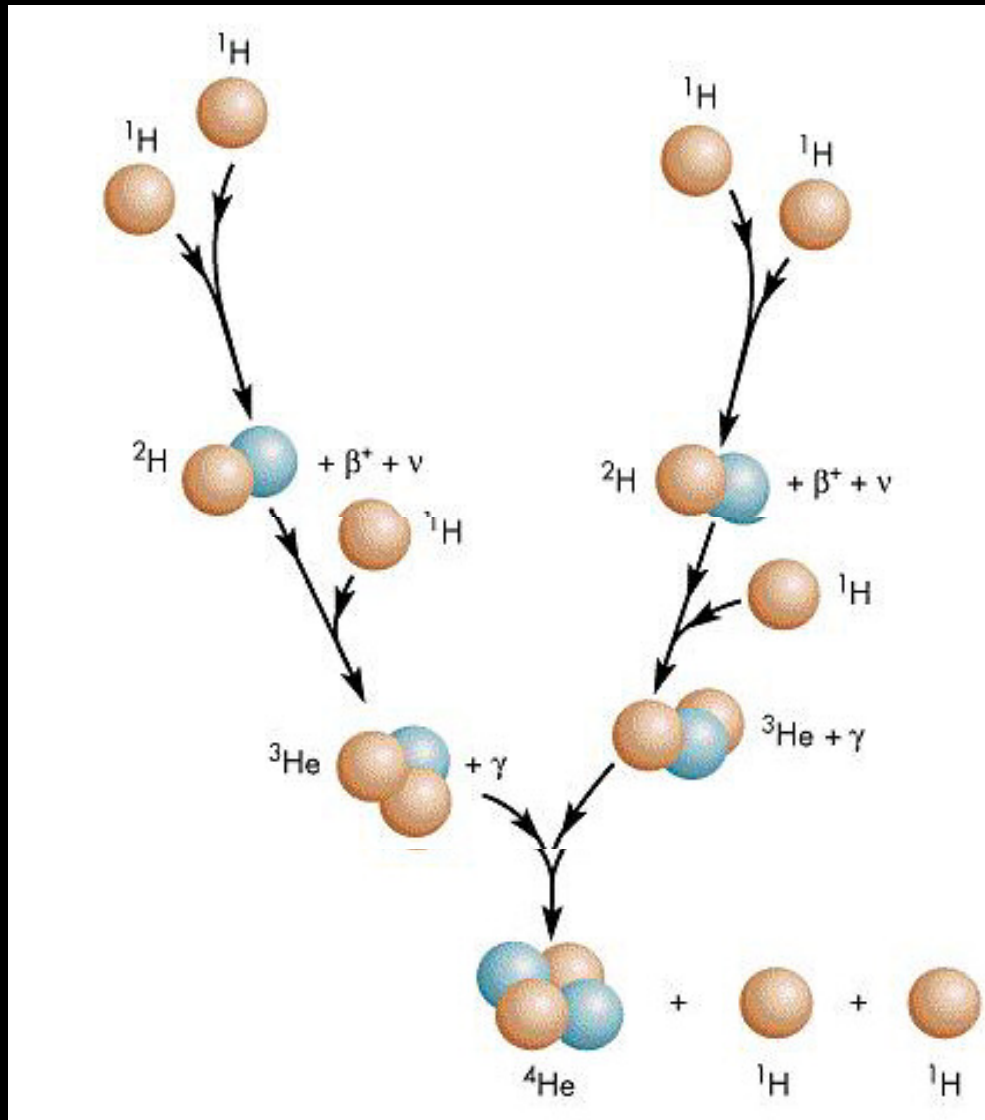


$42.8 \cdot 10^{-13}$ Watt s kinetische Energie wird freigesetzt

+ weitere Reaktionszweige, die z.T. auch Neutrinos erzeugen ...

...das Leben ist komplizierter ...

... Man benötigt Katalysator Prozess



Proton-Proton-Zyklus

$>10^9$ Jahre (schwache WW)

6 Sekunden

10^6 Jahre

Wieviele Neutrinos aus Sonne treffen uns?

Was wissen wir?

- ➡ Energie/m² auf Erde:
1370 Watt/m²
- ➡ Energie pro Helium-Fusion:
42,8 10⁻¹³ Watt s
- ➡ Anzahl Neutrinos / m²s auf Erde:
≈ 640000 Milliarden / m²s
(1370 Watt/m² x 2 / (42,8 10⁻¹³ Watt s))



Gesamtanzahl der erzeugten Neutrino in Sonne:

$$64 \times 10^{13} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 4\pi \cdot (150 \cdot 10^9)^2 \text{ m}^2 \approx 2 \times 10^{38} \text{ Neutrinos/s}$$

Abstand Sonne – Erde: 150 Milliarden m

Raymond Davies Jr.



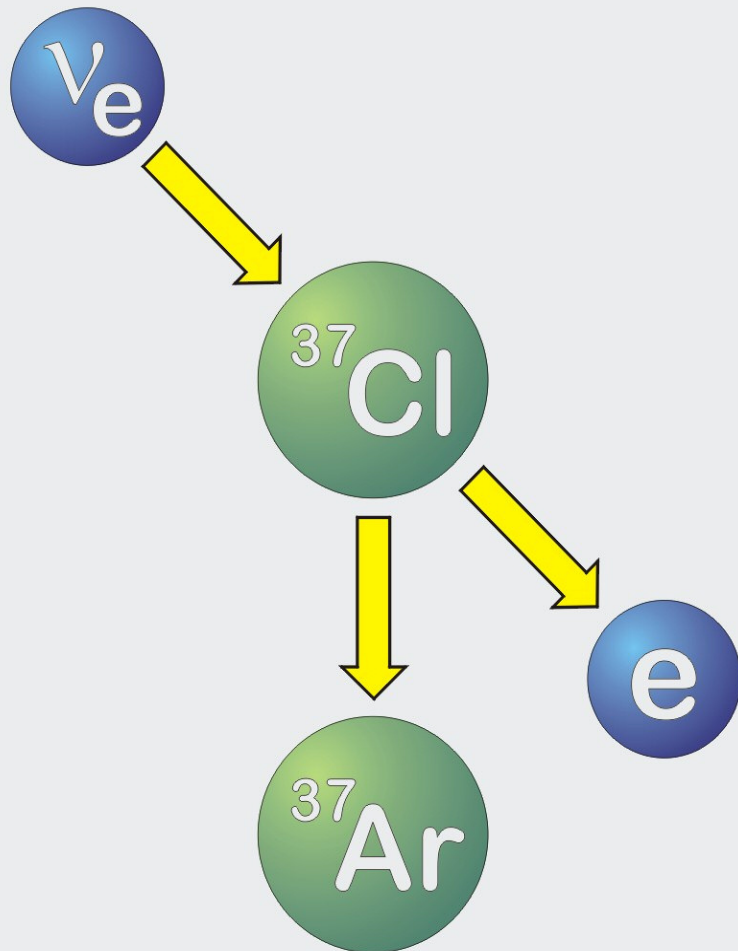
Können wir beweisen, dass Sonne ein Fusionsreaktor ist?



KCTS

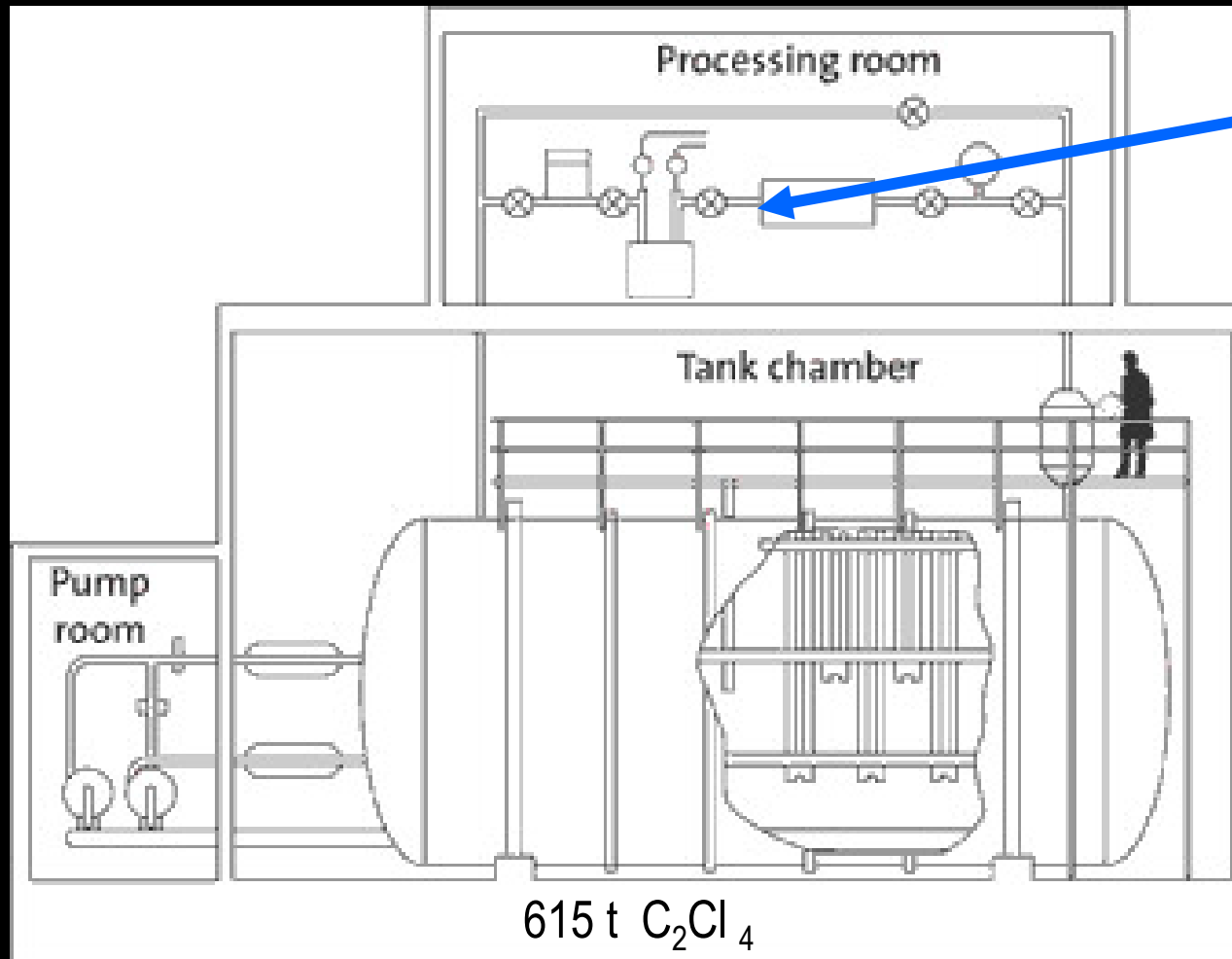
Das Homestake-Experiment

„Umgekehrter“ Beta-Zerfall
(„Neutrino-Einfang“)



600 Tonnen Reinigungsfüssigkeit
Sonnenneutrino-Observatorium
(1967-1994)

Die Nadel (=Argon) im Heuhaufen finden ...



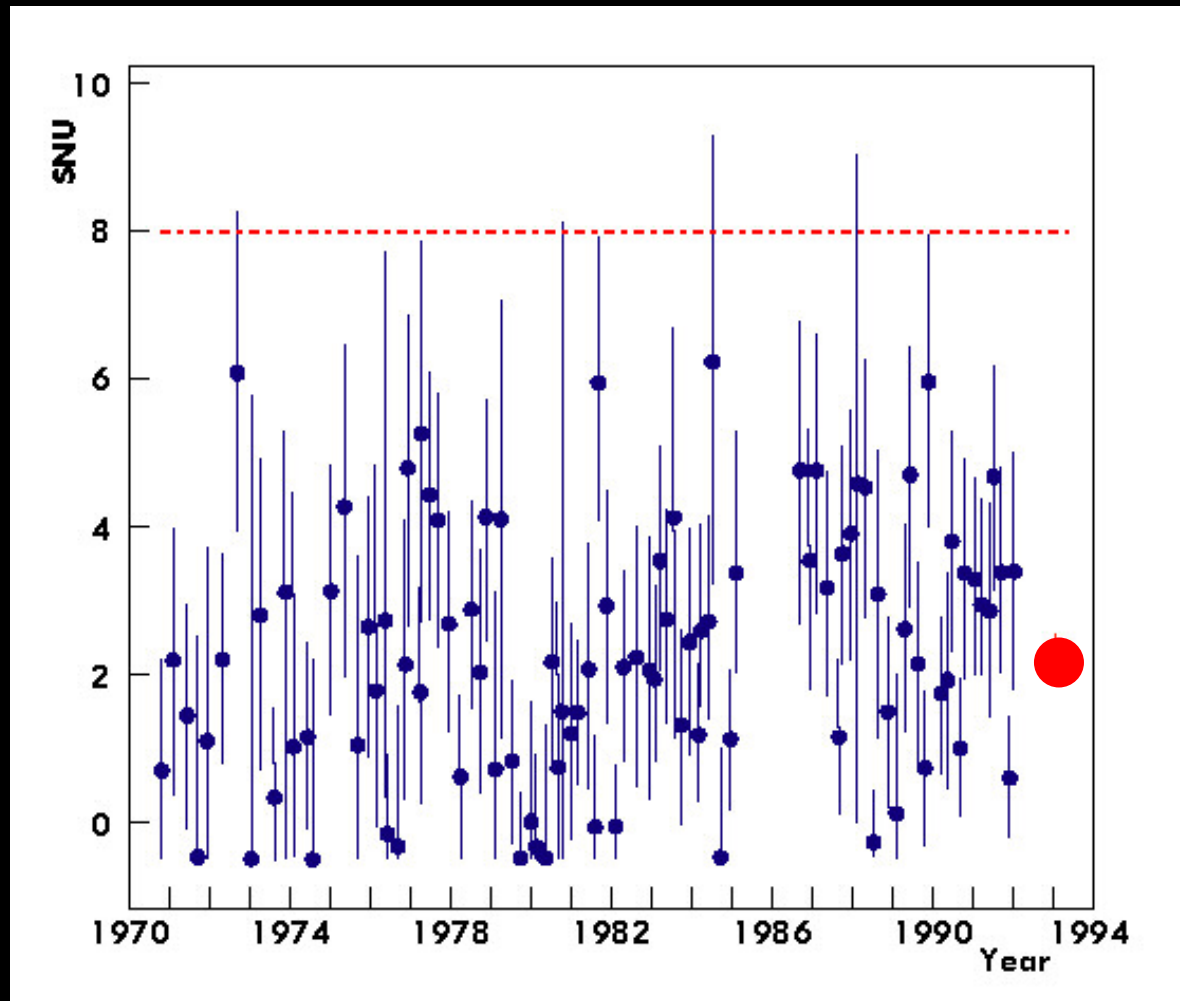
„Auswaschen“
des Argons mit
Helium

10^{19} v's/Tag durch-
fliegen Tank...

nur 2/Tag
nachzuweisen...

2 Argon Atome unter 2×10^{30} Chlor Atomen finden ...
wie ein Sandkorn im gesamten Sand der Sahara ...

Resultat des Experiments



Erwartung

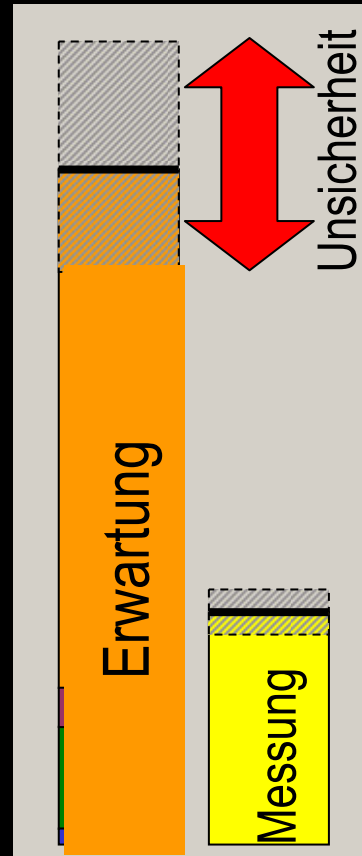
Gemessen

Nach 30 Jahren, nur 2000 Neutrinos gemessen !!!

Vergleich mit Theorie



John Bahcall



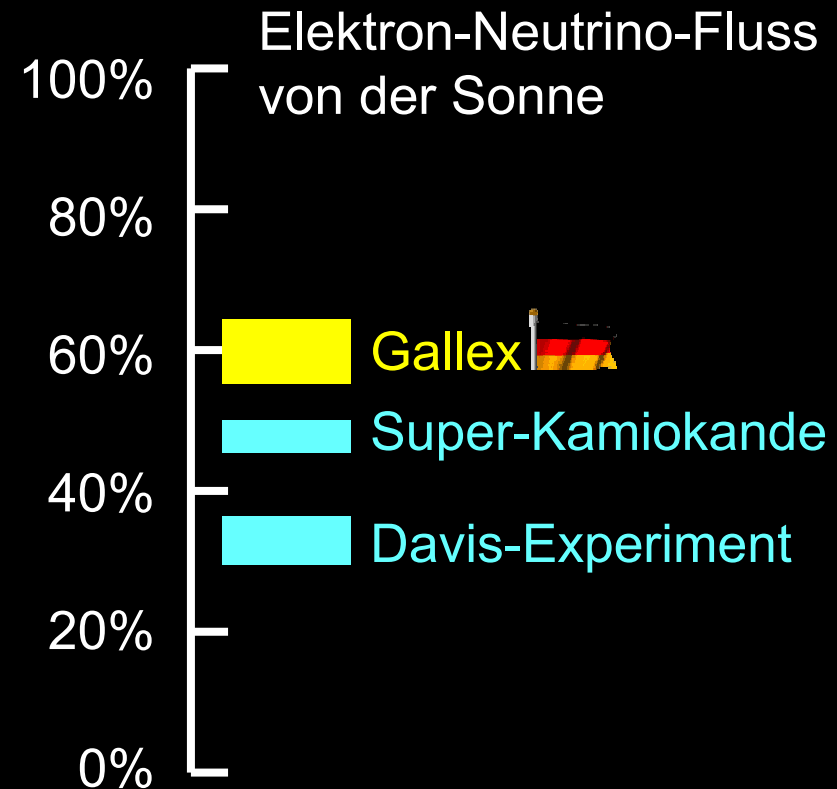
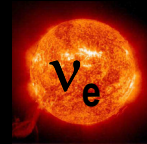
Raymond Davis Jr.

Was nun?

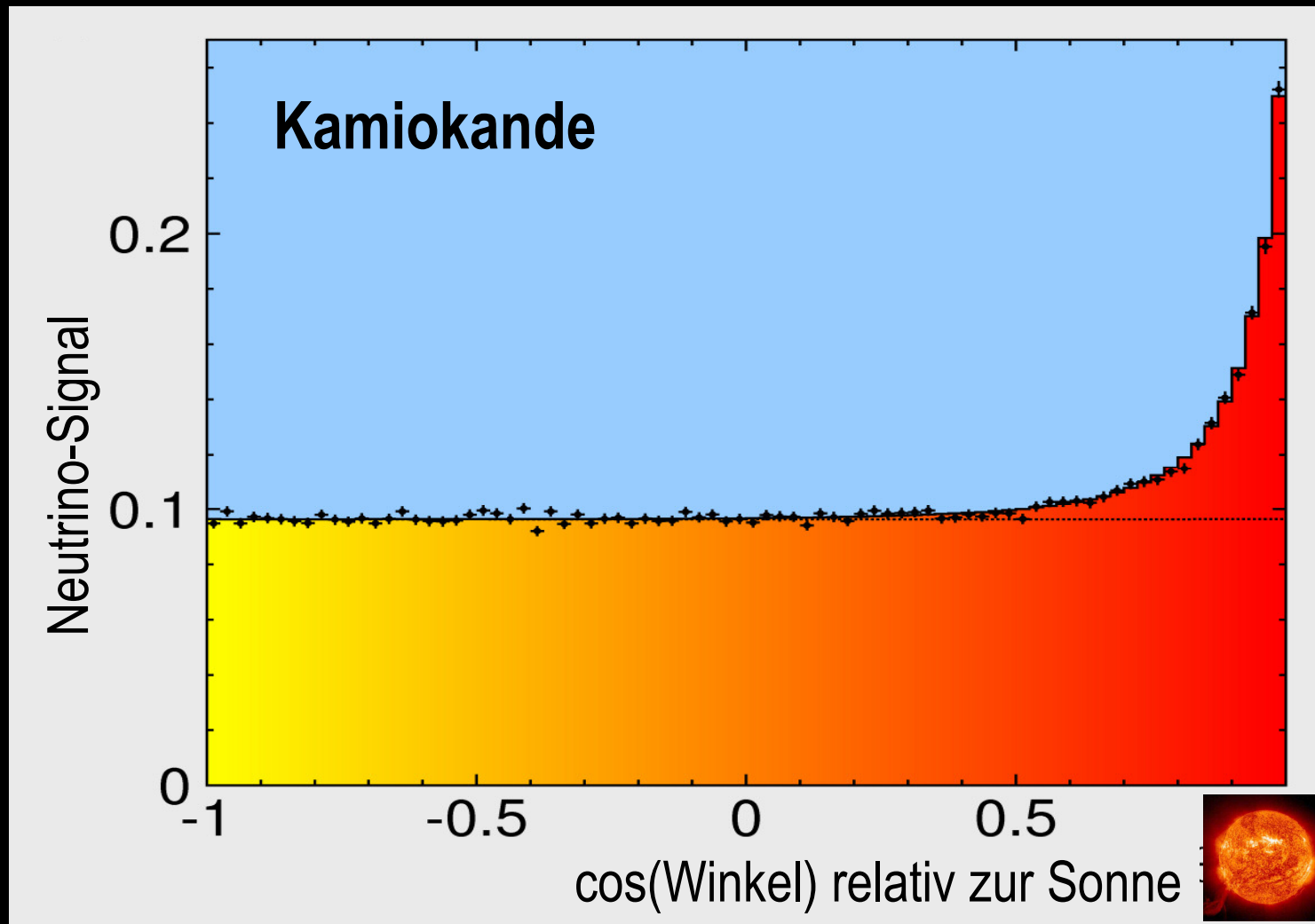
- ➡ Ist Messung von Davies falsch?
lange Zeit wurde Davies belächelt ...
- ➡ Ist Modell des „Fusionsreaktors Sonne“ falsch?
Homestake-Experiment sieht nicht pp-Reaktion ...
- ➡ Gehen Neutrinos irgendwie verloren?
Zerfall? Umwandlung in nicht nachweisbares Teilchen?

mehrere weitere Experimente bestätigen das Resultat ...

Defizit durch andere Experimente bestätigt!



Neutrinos kommen von Sonne!



Was nun?

- ➡ Ist Messung von Davies falsch?
lange Zeit wurde Davies belächelt ...
- ➡ Ist Modell des „Fusionsreaktors Sonne“ falsch?
Homestake Experiment sieht nicht pp-Reaktion ...
- ➡ Gehen Neutrinos irgendwie verloren?
Zerfall? Umwandlung in nicht nachweisbares Teilchen?

...brauchen Gerät, dass alle Neutrinoarten nachweisen kann ...

Sudbury Neutrino Observatory

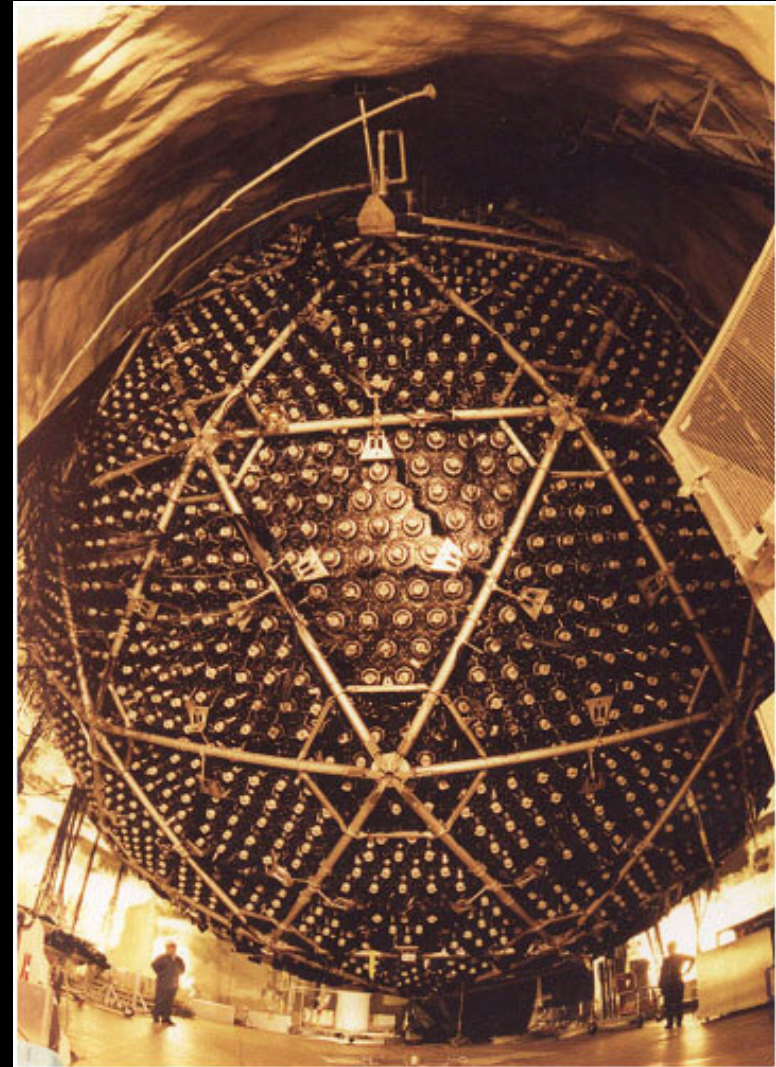
1000 Tonnen schweres Wasser (D_2O)

Kann getrennt messen:

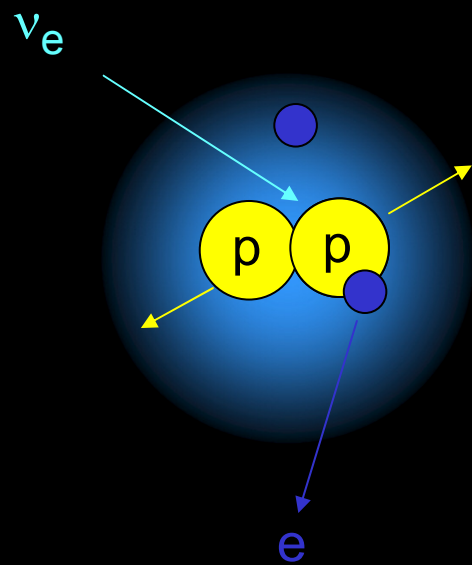
- ☞ Rate **aller** Neutrinos
- ☞ Rate der Elektroneneutrinos

Ergebnisse:

- ☞ Neutrinos gehen nicht verloren
- ☞ Übereinstimmung mit Rechnung
- ☞ Elektroneneutrinos wandeln sich in andere Neutrinos um!



...nach 35 Jahren sind Physiker endlich überzeugt ...



$\nu_e \rightarrow e^-$

Deuterium-Atome
im SNO Tank

Neutrino-Fluss
von der Sonne



100%

80%

60%

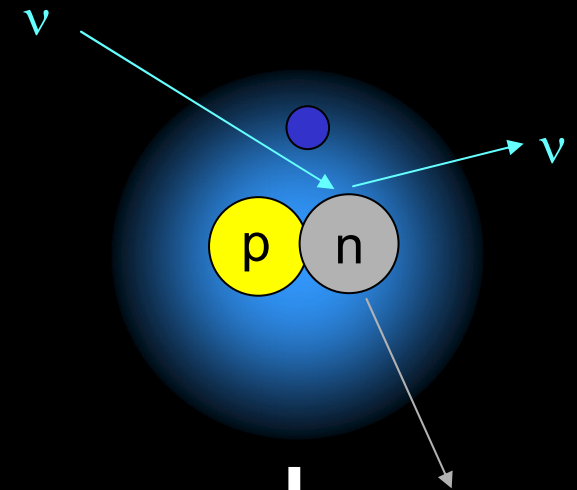
40%

20%

0%

ν_e

Neutrinos wandeln
sich auf dem Weg
von der Sonne zur
Erde um !



“Neutrino erhalten”
geht für alle ν 's!



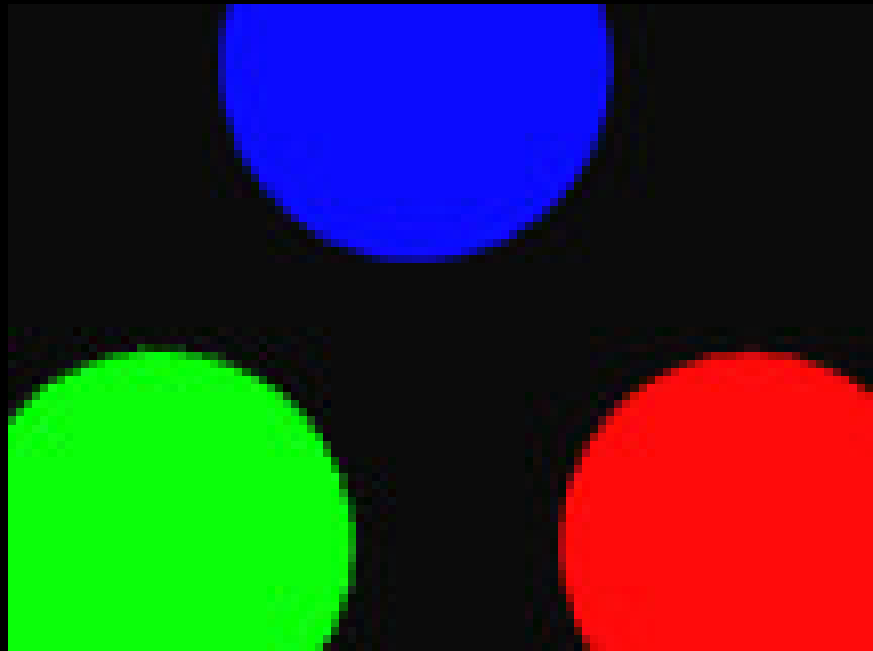
Neutrinos sind Chameleons ...



Kaum Mischung / Umwandlung $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\tau$!!

Analogie: Farbmischung

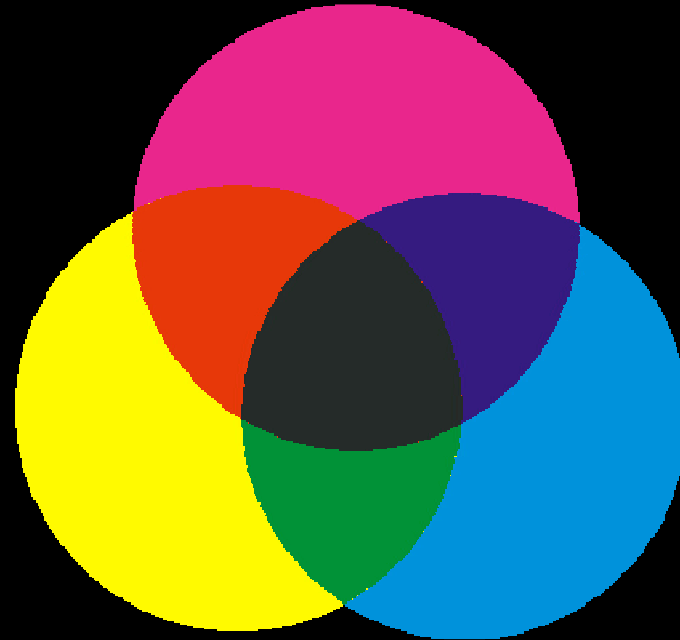
Additive Farbmischung:



„Eigenzustände“ des Auges:
Rot, **Grün**, **Blau**

Subtraktive Farbmischung:

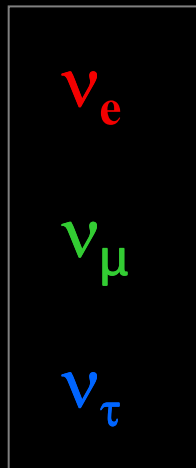
Gelb + **Magenta** = **Rot**



„Eigenzustände“ des Druckers:
Magenta, **Gelb**, **Cyan**

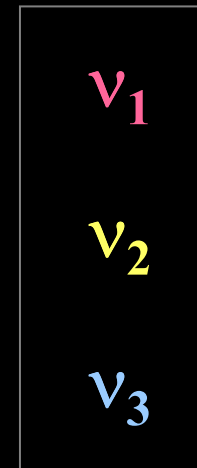
Analogie: Neutrinos?

Eigenzustände der
schwachen Kraft:



ν_e : Neutrino, dass zusammen mit
Elektron entsteht

Eigenzustände mit mit
fester Masse:

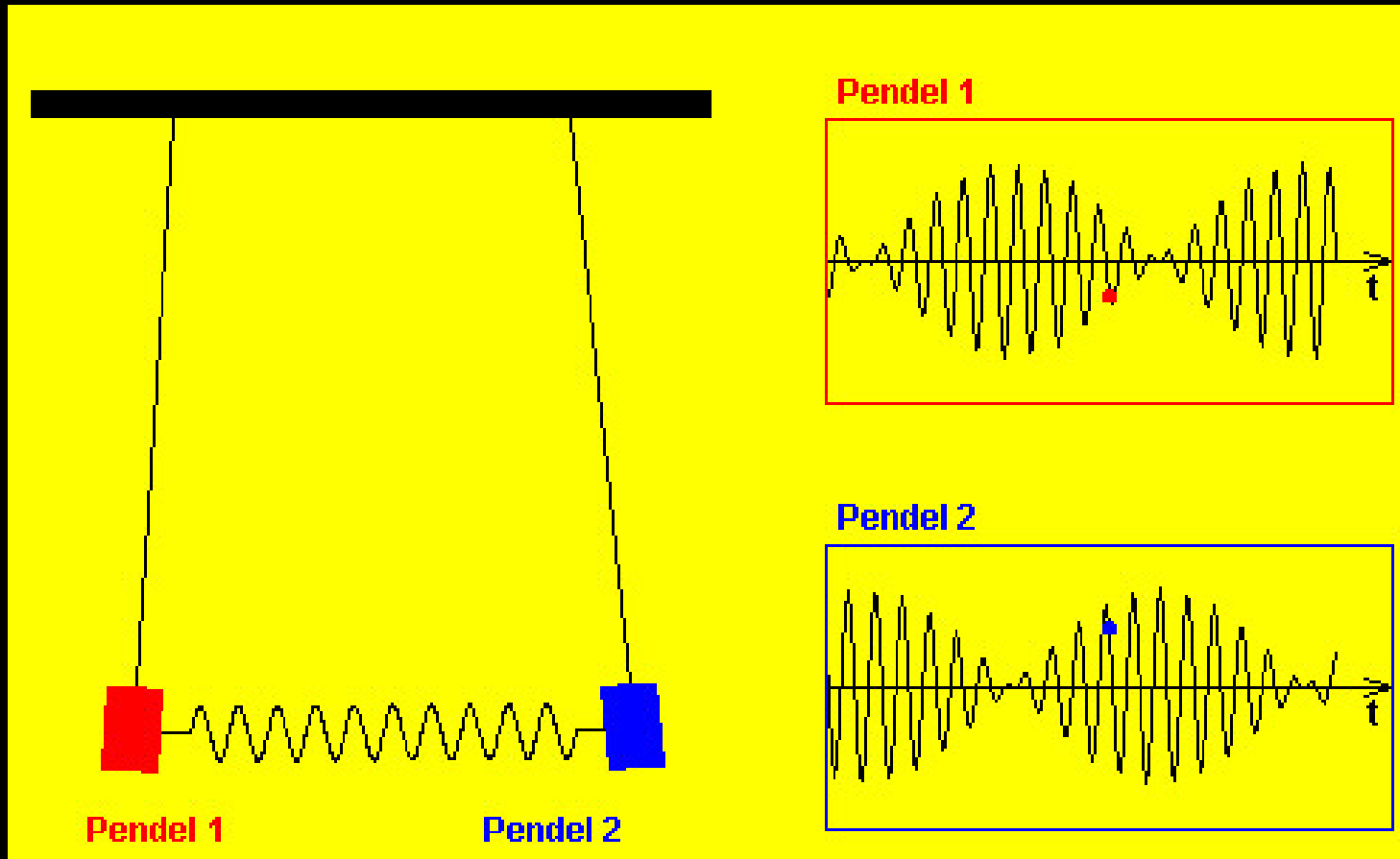


Experiment:

$$\nu_e \approx 1/\sqrt{2} (\nu_1 + \nu_2)$$

...

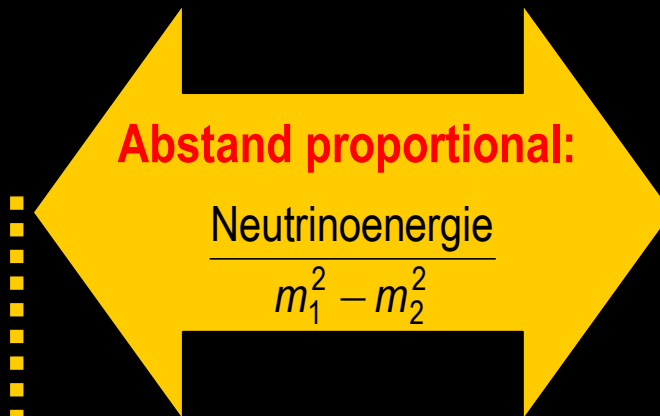
Analogie: gekoppelte Pendel



Neutrinos haben auch “Schwingungs”-Charakter (Quantenmechanik):
Frequenz = Energie / $h \approx 10^{24}$ Hz $\rightarrow$ riesig! $(E=4 \text{ GeV})$

Mischung von Neutrinos

Neutrinos wandeln sich um als Funktion von Zeit oder Ort:



Masse m_1

Masse $m_2 > m_1$

..eine Art Schwebung Akustik!

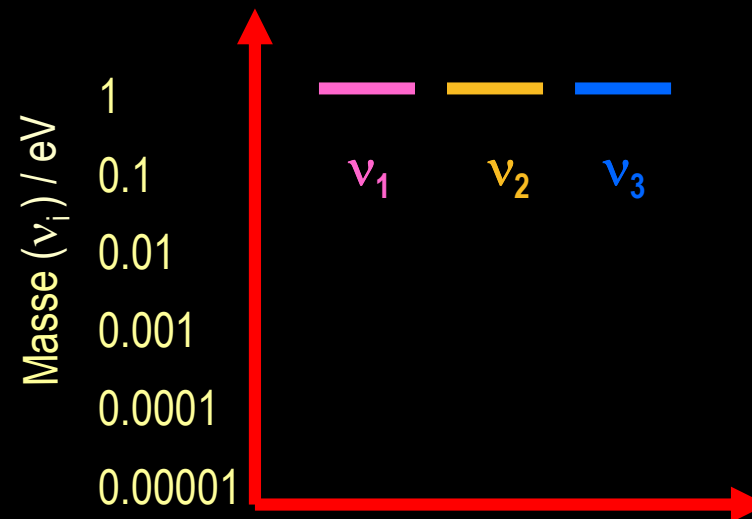
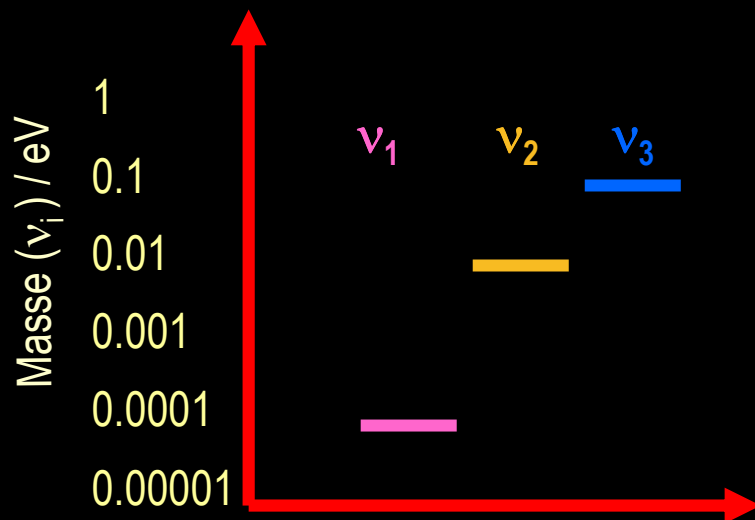
Zusammenfassung

$$| \text{Masse}^2(\nu_2) - \text{Masse}^2(\nu_1) |^{1/2} \approx 5 \times 10^{-9} \text{ Elektronenmasse}$$

$$| \text{Masse}^2(\nu_3) - \text{Masse}^2(\nu_2) |^{1/2} \approx 120 \times 10^{-9} \text{ Elektronenmasse}$$

Achtung: nur Massendifferenz bekannt !

Mehrere Möglichkeiten:



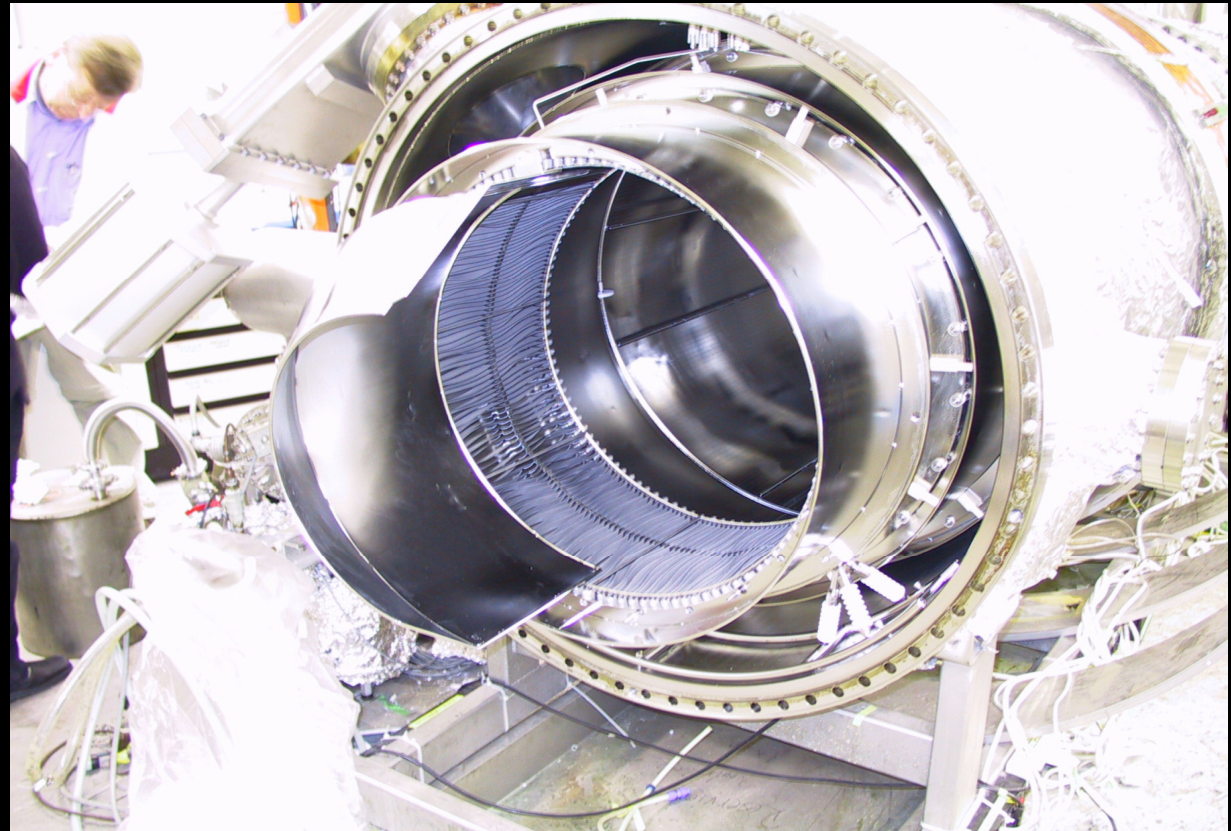
Wichtig für Entwicklung des Kosmos: Neutrinos = Dunkle Materie?

1 Millarde mal mehr Neutrinos als Materie!

Wie die Masse absolut bestimmen?



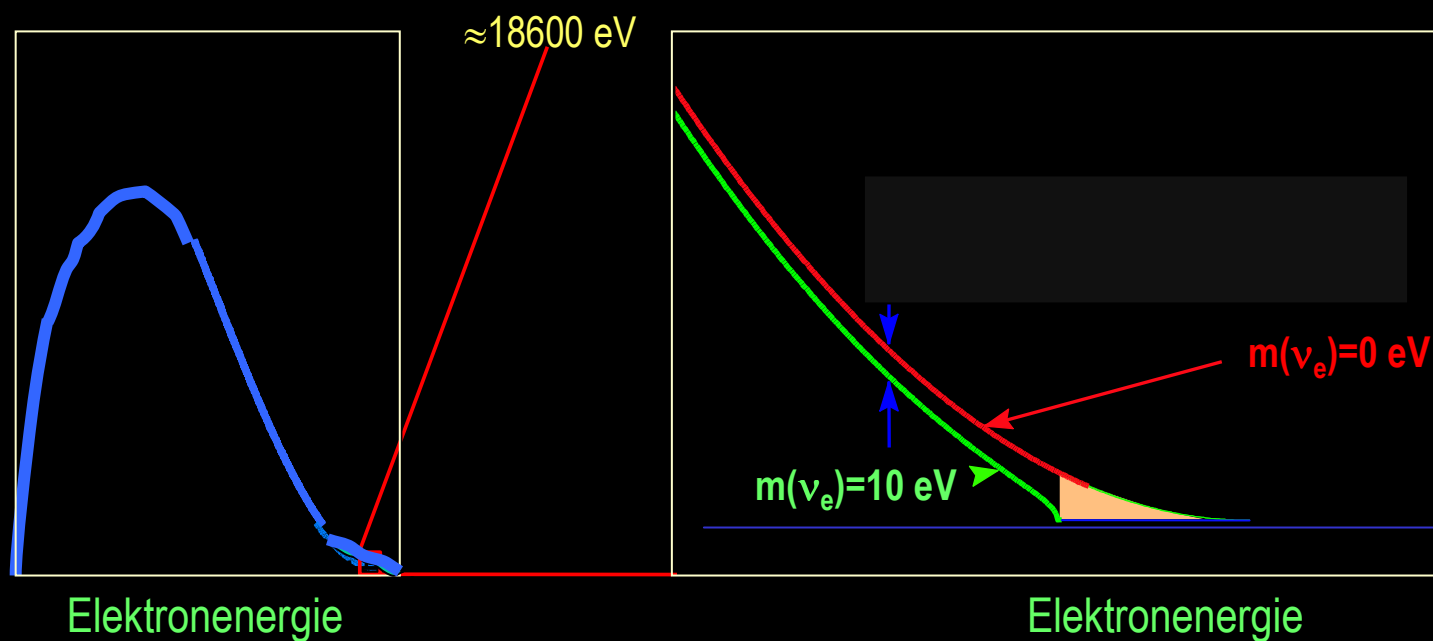
Weltbeste Messung
in Mainz !



Spektrometer (18600 V Spannung)

Tritium – Zerfall

Beta-Spektrum:



$\text{Masse}(\nu_e) \leq 4.3 \times 10^{-6}$ fache Elektronmasse

In Zukunft: „KATRIN“ mit 15-facher Empfindlichkeit!

100%

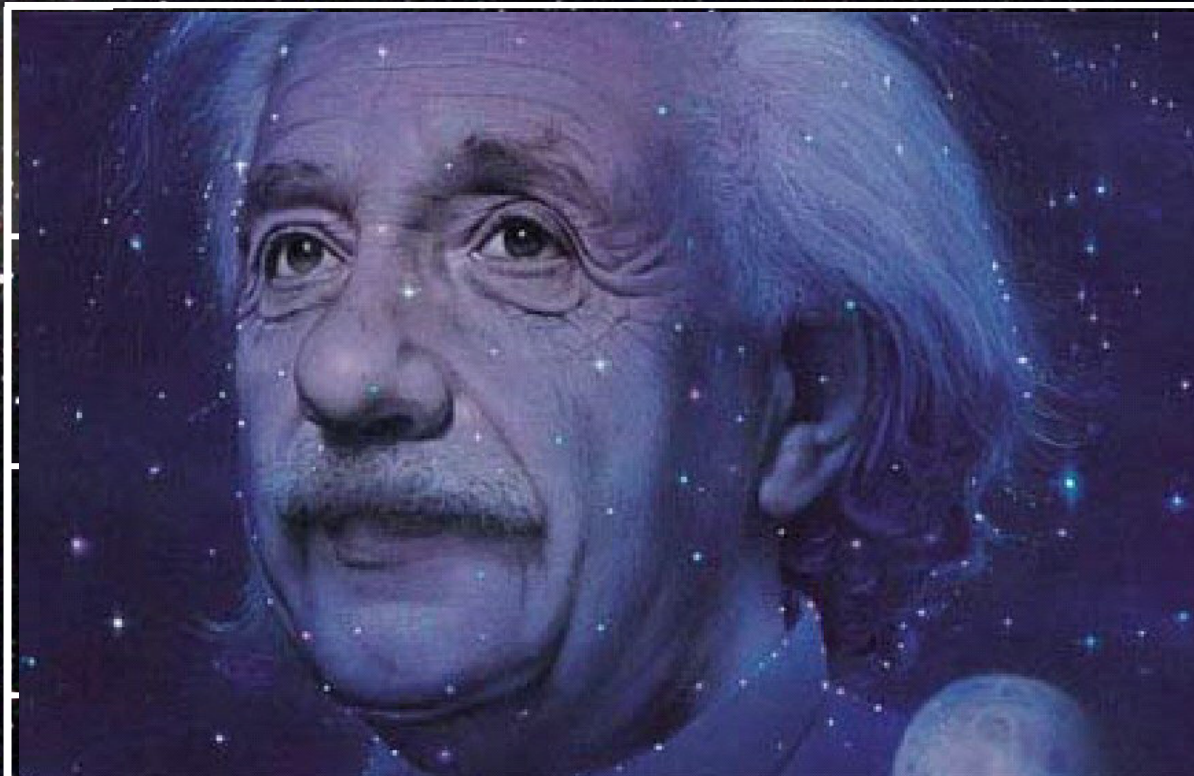
80%

60%

40%

20%

0%



Dunkle
Energie

Neue Form von
Materie

Dunkle
Materie

Neutrinos !

Materie

Sterne



... Astronomie mit Neutrinos



Masatoshi Koshiba



...eine Handvoll Neutrinos

eine Supernova im Neutrinohimmel !

I am happy ..

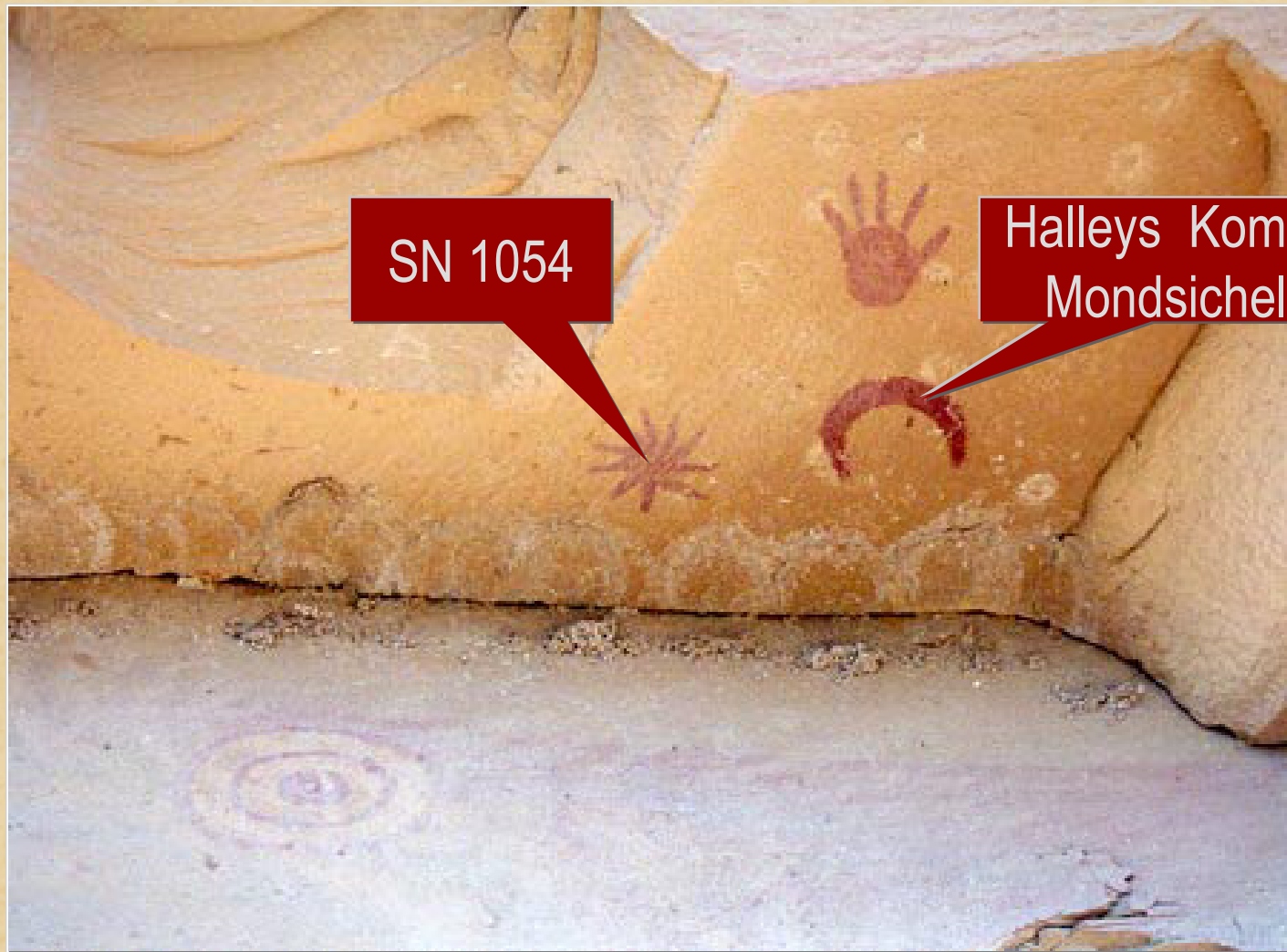


凡十一日没三年三月乙巳出東南方大中祥符四年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁没明道元年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三日没至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘稍没熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯箕乃散三年十一月丁未出天因元祐六年十一月辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

宋史卷九
三十一
主



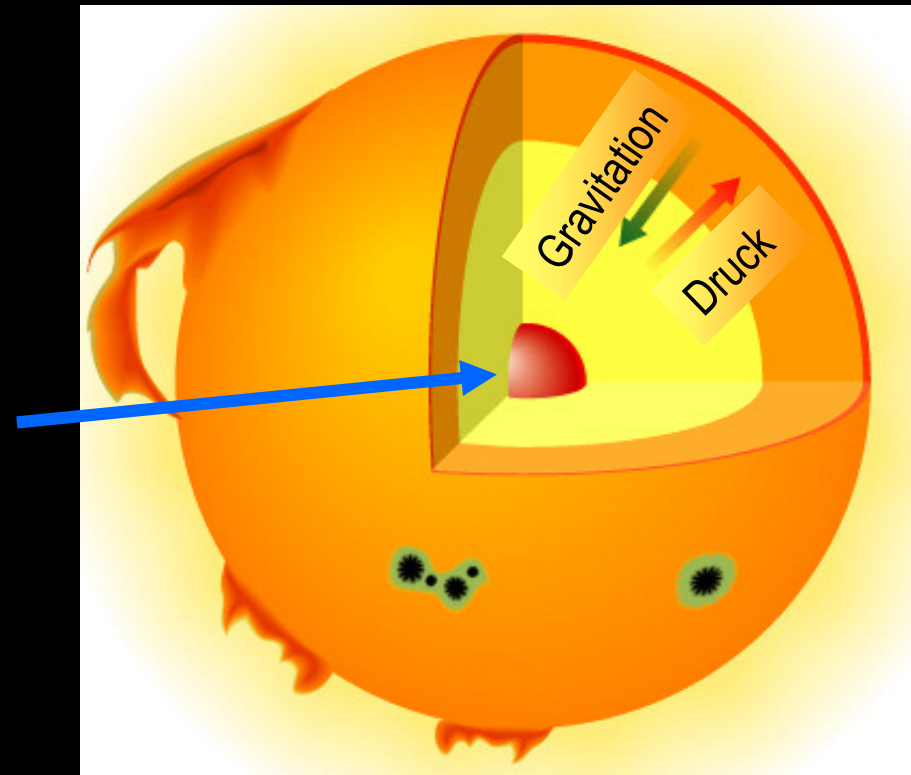
Georg Raffelt, Max-Planck-Institut für Physik, München, Germany



Angeblicher SN 1054 Petrograph des Anasazi-Volkes
(Chaco Canyon, Südwestliche USA)

Supernovae (Typ II)

- ☞ Stabilität eines Sterns:
Gleichgewicht Gravitation-Strahlungsdruck
- ☞ Falls Wasserstoffvorrat erschöpft:
Kollaps des Eisenkerns ($\varnothing \approx 8000$ km)
in Neutronenstern ($\varnothing \approx 50$ km)
- ☞ Gravitationsenergie übertragen auf
 10^{57} Neutrinos !



$$\Delta E \cong G \cdot M_{\text{Stern}}^2 \left(\frac{1}{R_{\text{Neutronenstern}}} - \frac{1}{R_{\text{Eisenkern}}} \right) \approx 2.6 \cdot 10^{46} \text{ J}$$

99% der Energie in Neutrinos!

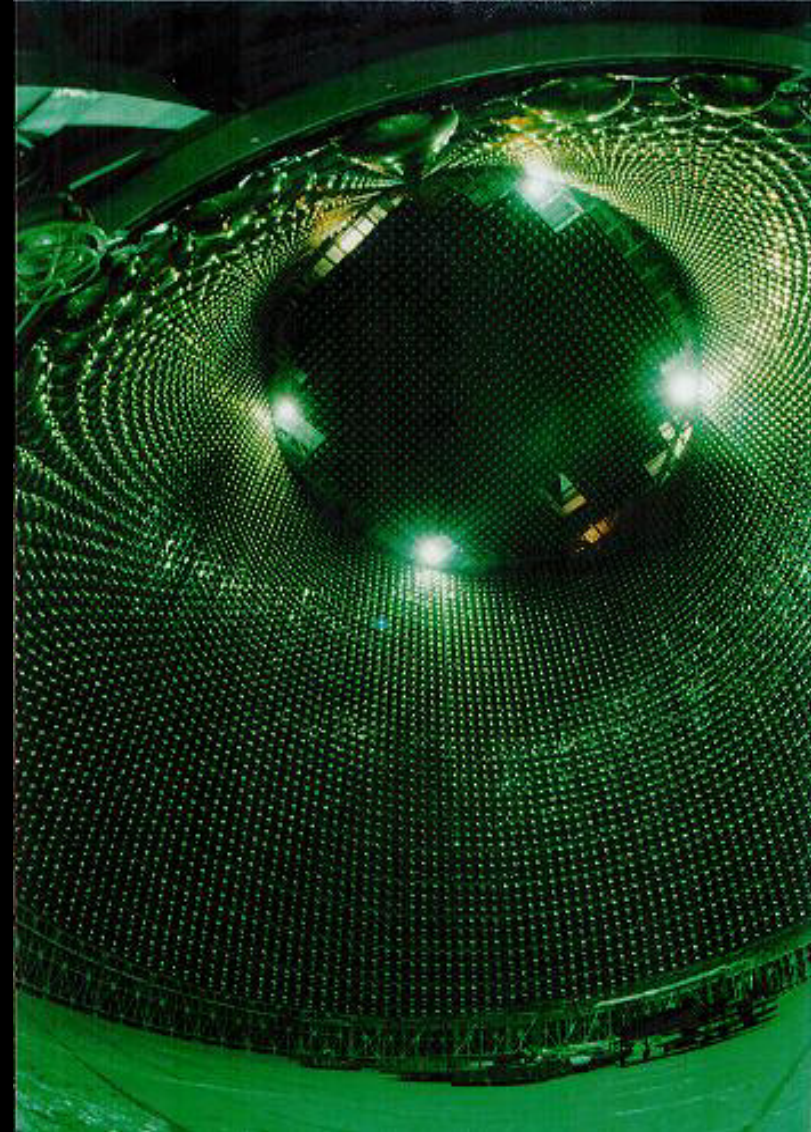
Supernova-Animation

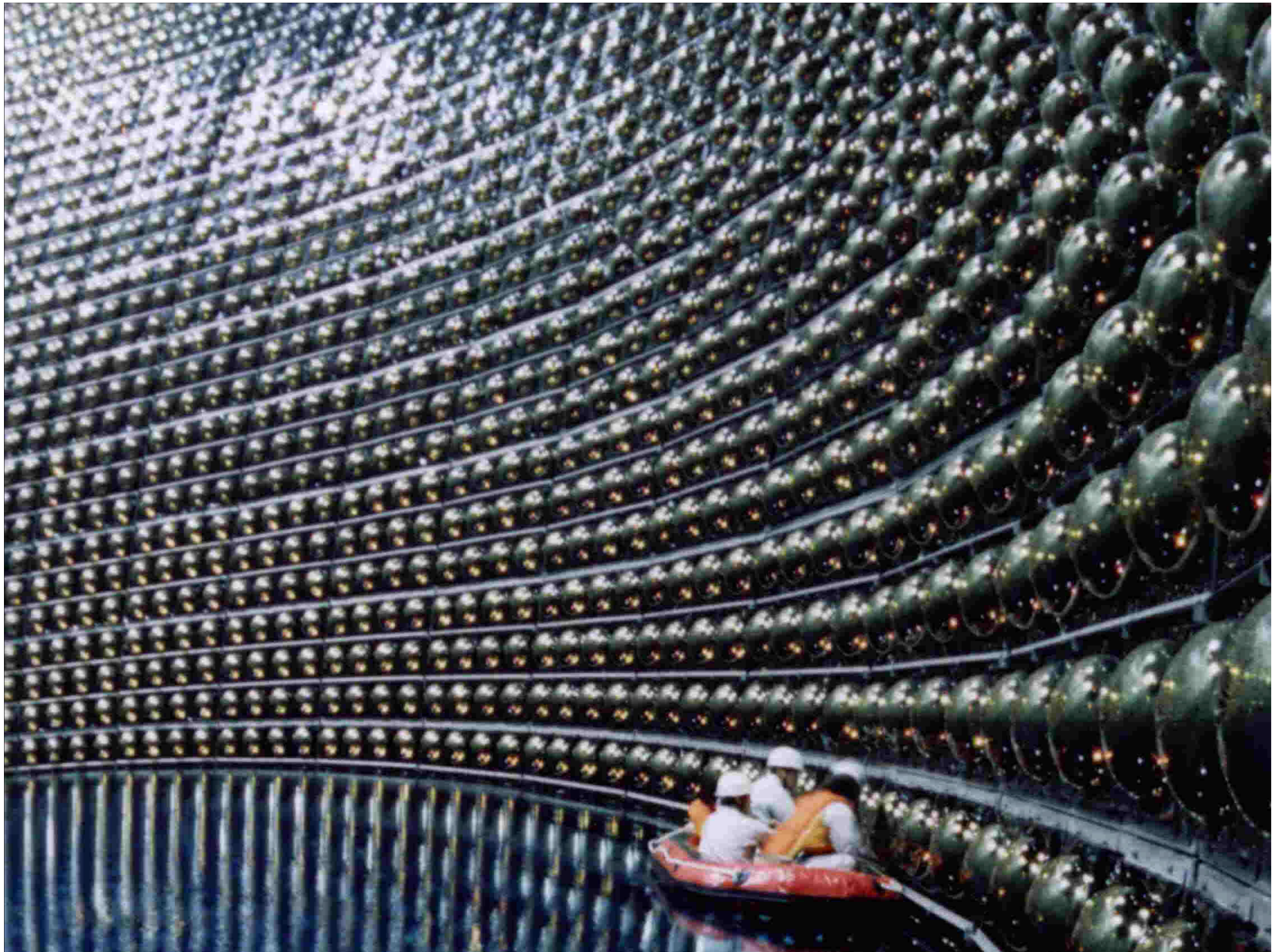


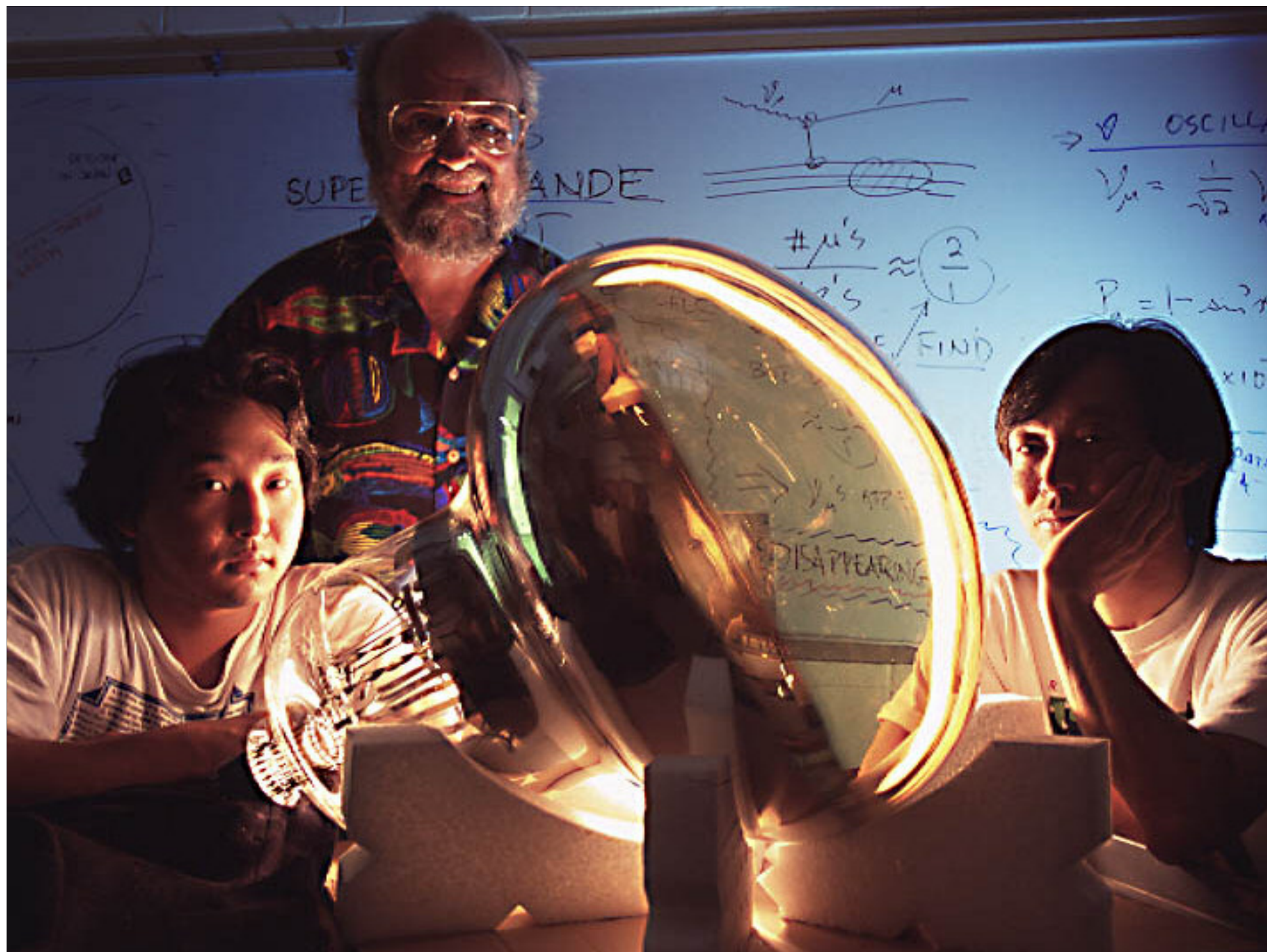
Der (Super)-Kamiokande-Detektor

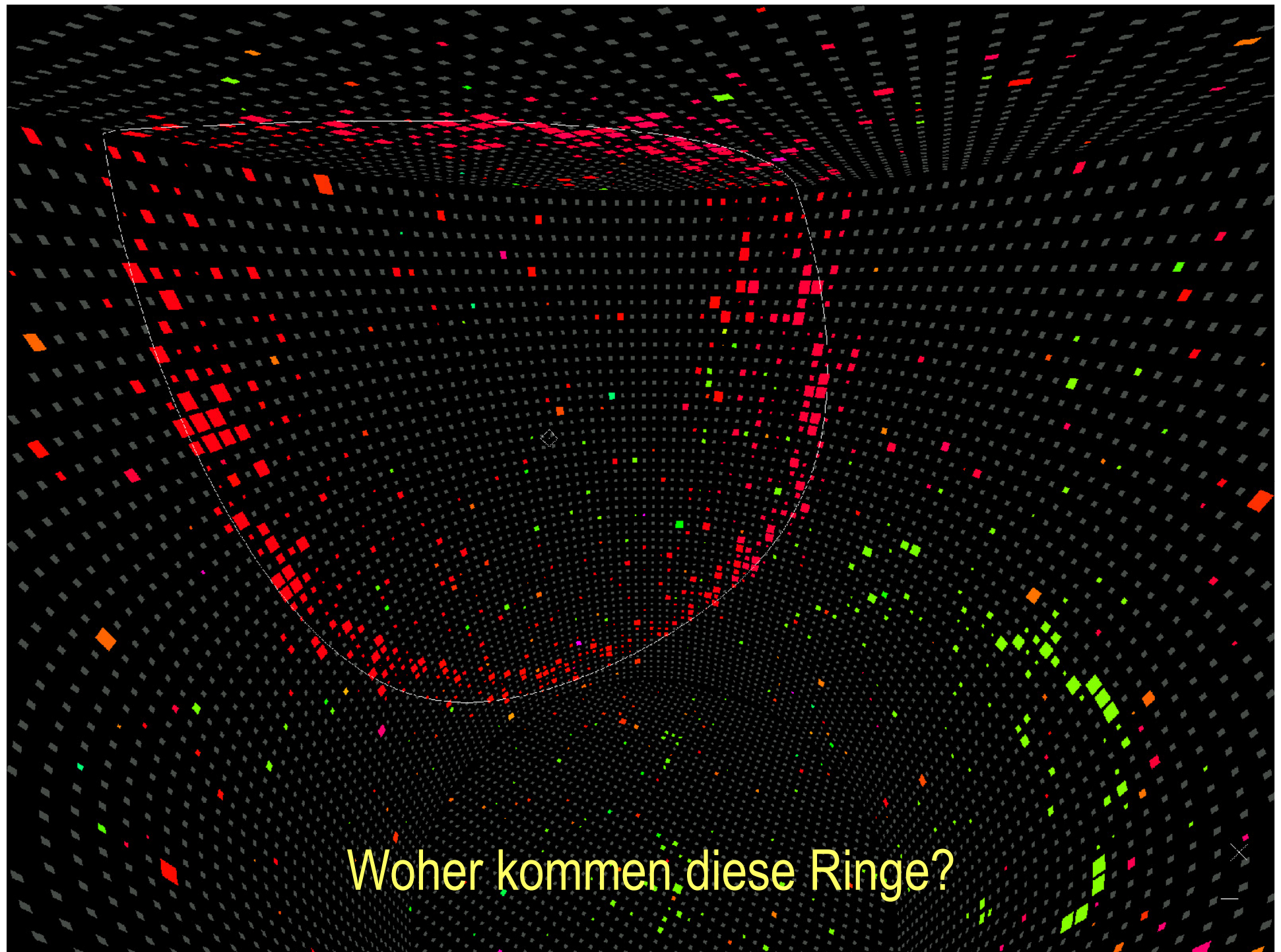


- ☞ Kamioka Mine in japanischen Alpen
1000 m unterirdisch ...
- ☞ 50000 Tonnen hochreines Wasser
- ☞ 13000 Lichtsensoren
„Photovervielfacher“









Woher kommen diese Ringe?



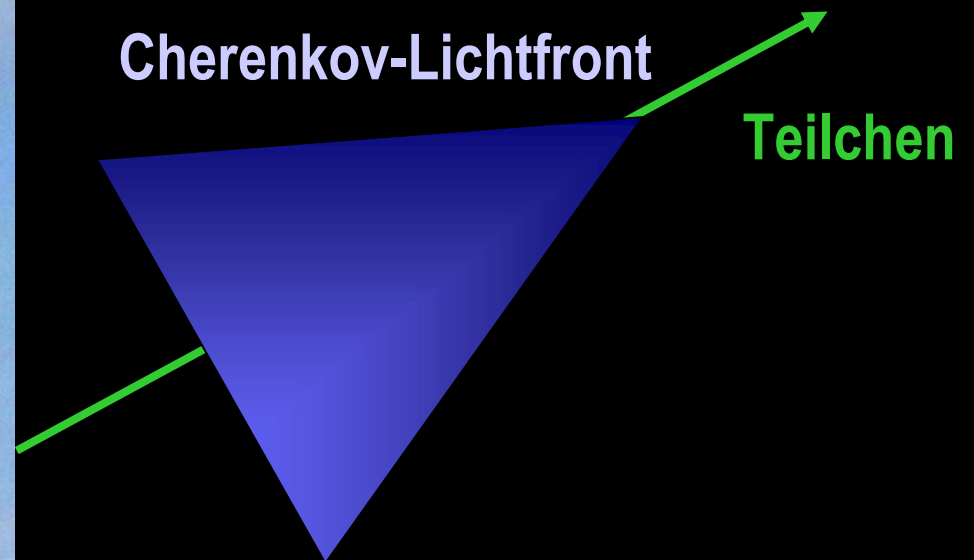
Überschallknall“ = Cherenkovlicht

Schall



Geschwindigkeit = 330 m/s

Licht



Geschwindigkeit $> \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit}}{\text{Brechungsindex}}$

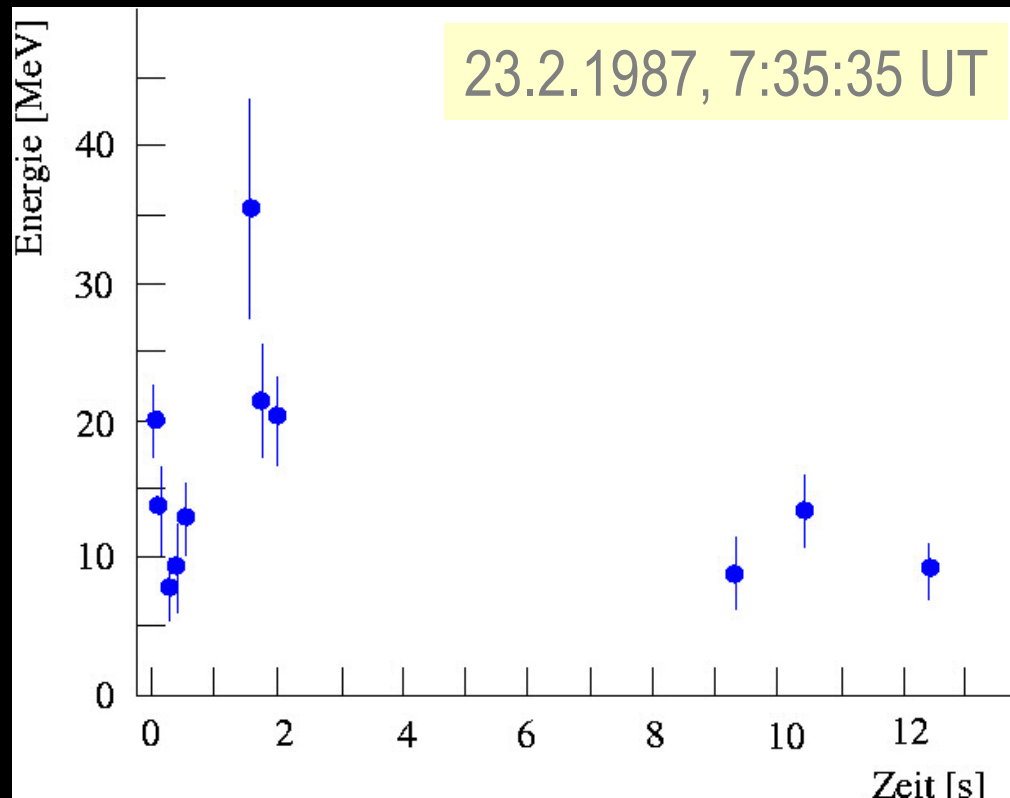
Eine Supernova in der Magellanschen Wolke

Sanduleak -69 202

Supernova 1987A

23. Februar 1987, 10:37

Eine Handvoll Neutrinos ...



10^{16} Neutrinos durch Detektor:
12 in ≈ 10 sec nachgewiesen!

Wenige Ereignisse, aber:

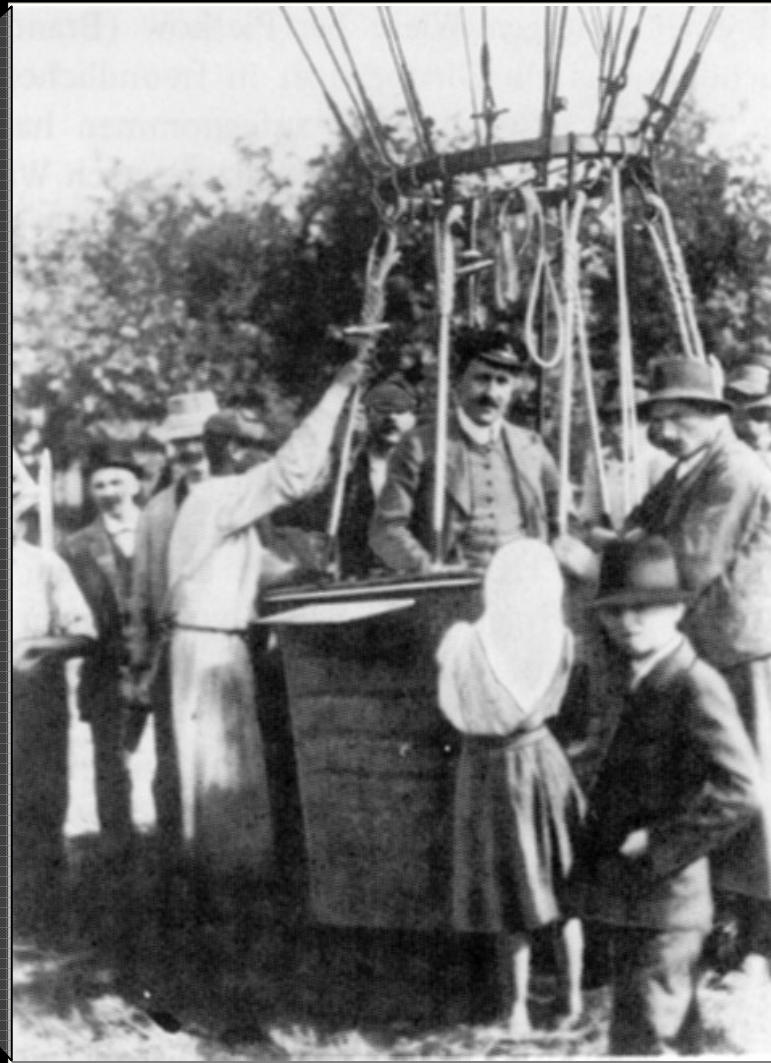
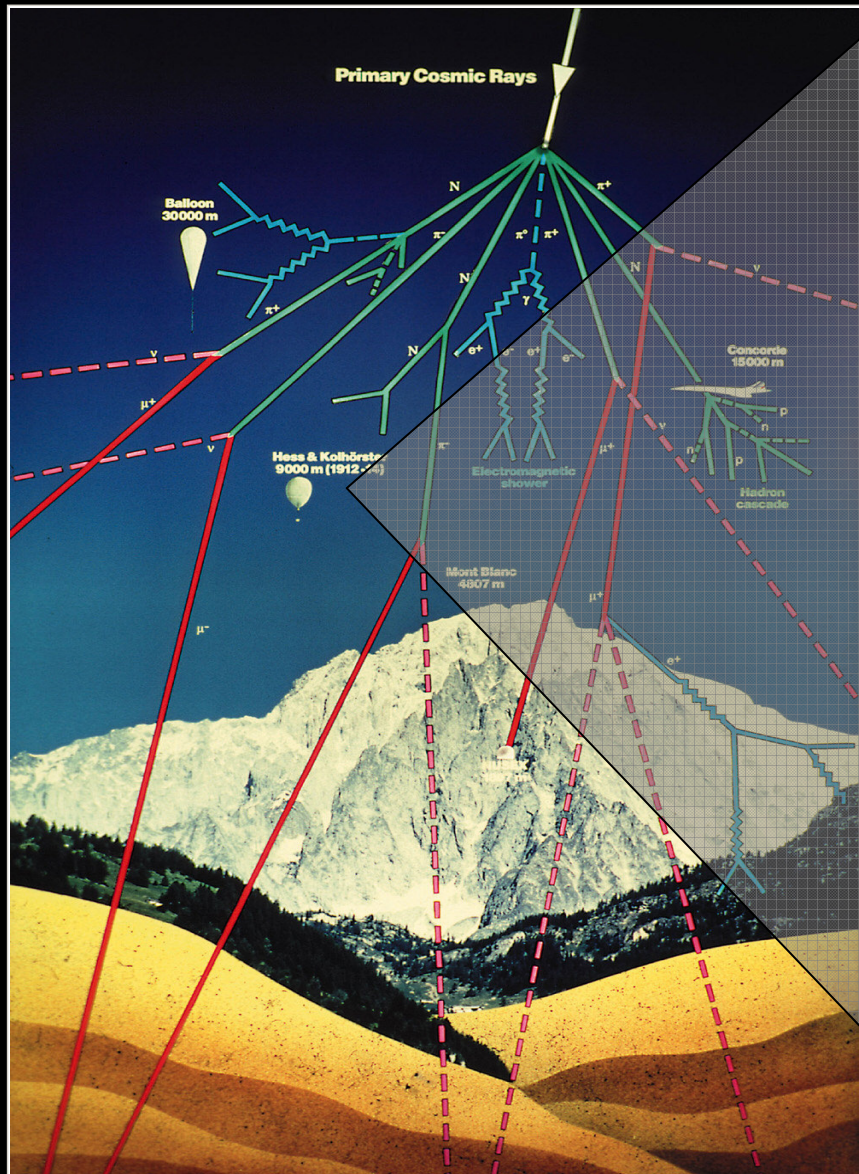
Viel über Supernovae und
Neutrinos gelernt!

Masse, Ladung, Lebensdauer ...

Kosmische Teilchenbeschleuniger



Kosmische Strahlung



Victor Hess (1911)

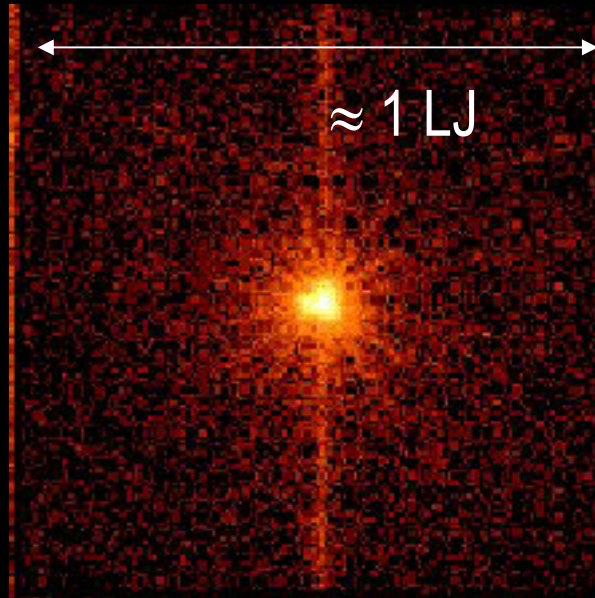
Quellen kosmischer Strahlung

Supernova-Überrest



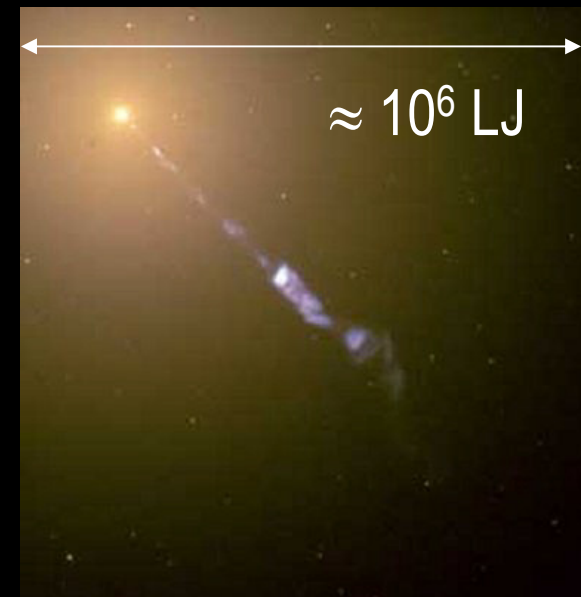
Schockfront durch
Supernova Explosion

Microquasare
(SS433 etc.)



Schwarzes Loch mit
 $\approx$ Sonnemasse

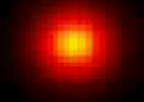
Aktive Galaxien
(Markarian 421 etc)



Schwarzes Loch mit
 10^8 Sonnemassen

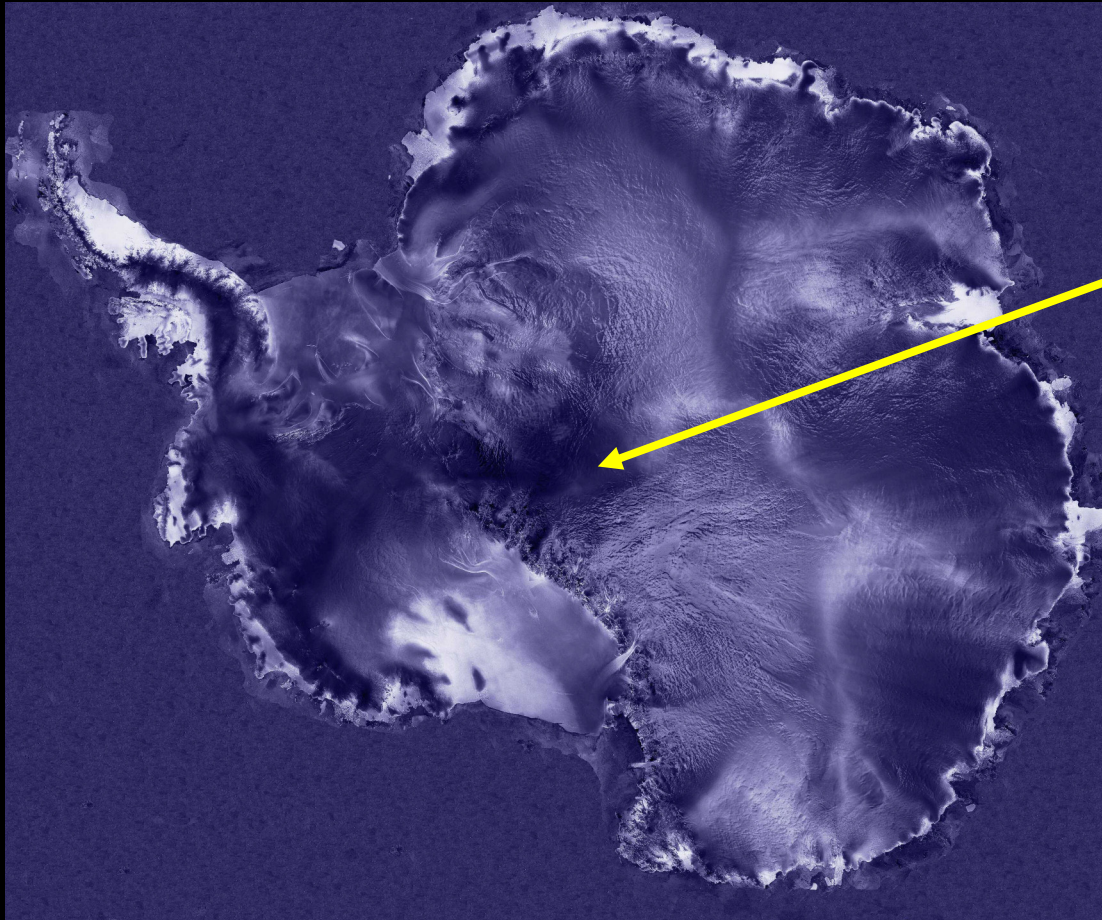
Beschleunigung durch Schockfront oder in „Jets“

Beschleunigung in Schockwellen



Dabei entstehen auch Neutrinos, die durch nichts abgelenkt werden!

Neutrino-fischen am Südpol ...



Radarsat-Bild der Antarktis



Scott-Amundson Station
(Südpol)





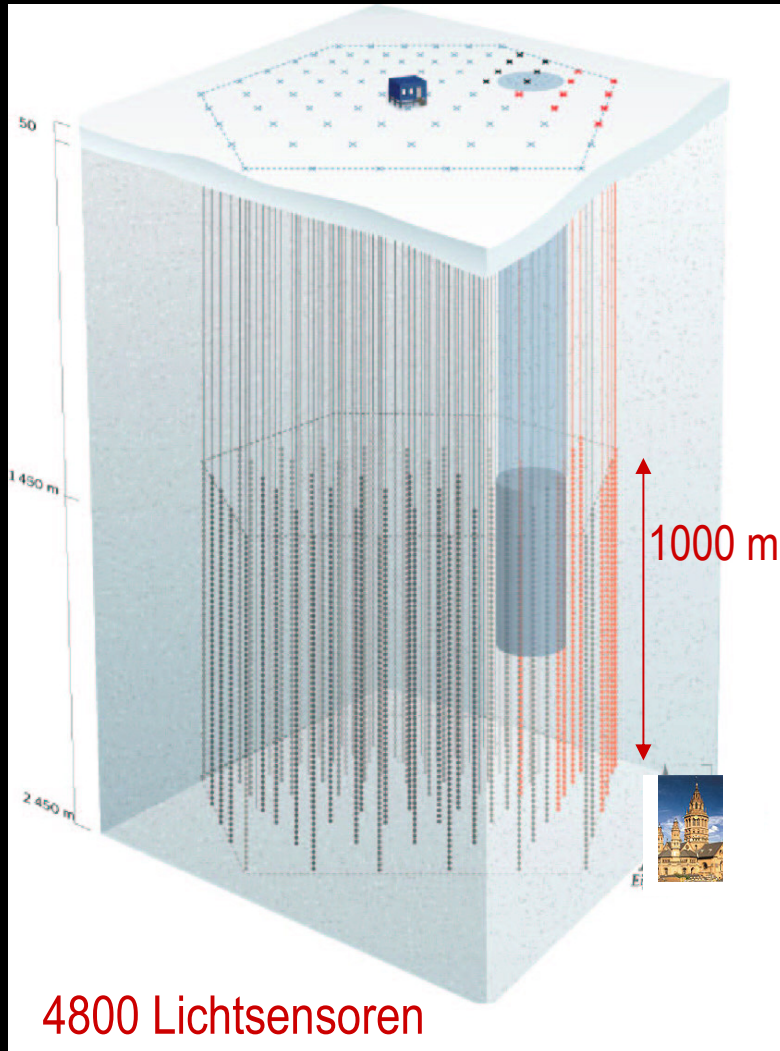




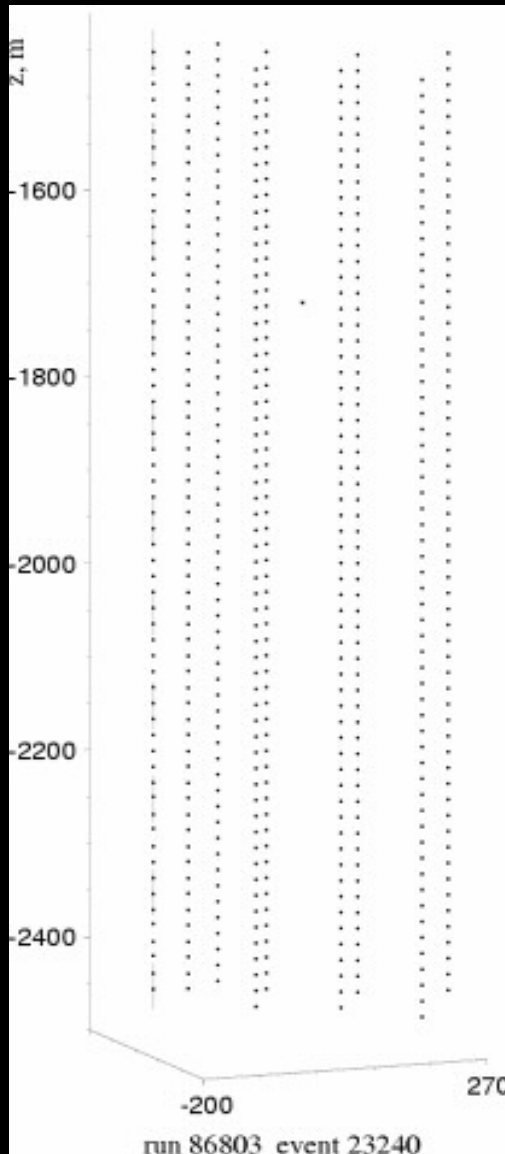
IceCube: weltgrößter ν -Detektor (1 km³!)

2006: 9 von 80 Löchern gebohrt

2011: fertig!



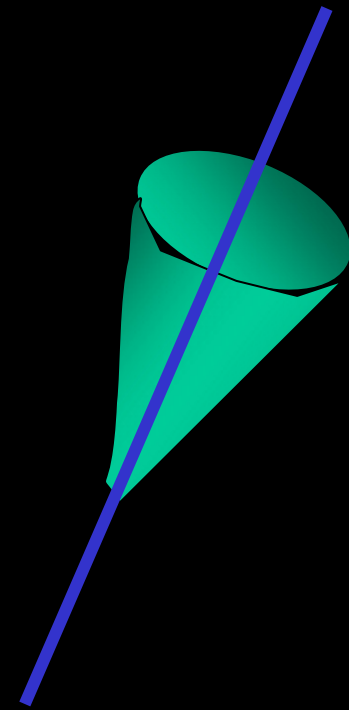
km lange Spur eines kosmischen Myons



früh



spät



„Im Dunkeln“

-68 Grad!



Ein Mainzer ...

Hemmungslose Neutrinos



The End

*Vielen Dank an alle, die zumeist ohne ihr Wissen beigetragen haben:
W. Hofmann, G. Raffelt, J. Ritman, Ch. Spiering, R. Nahnauer usw.*

South Pole Medevac

