Universität Zürich[UZH]

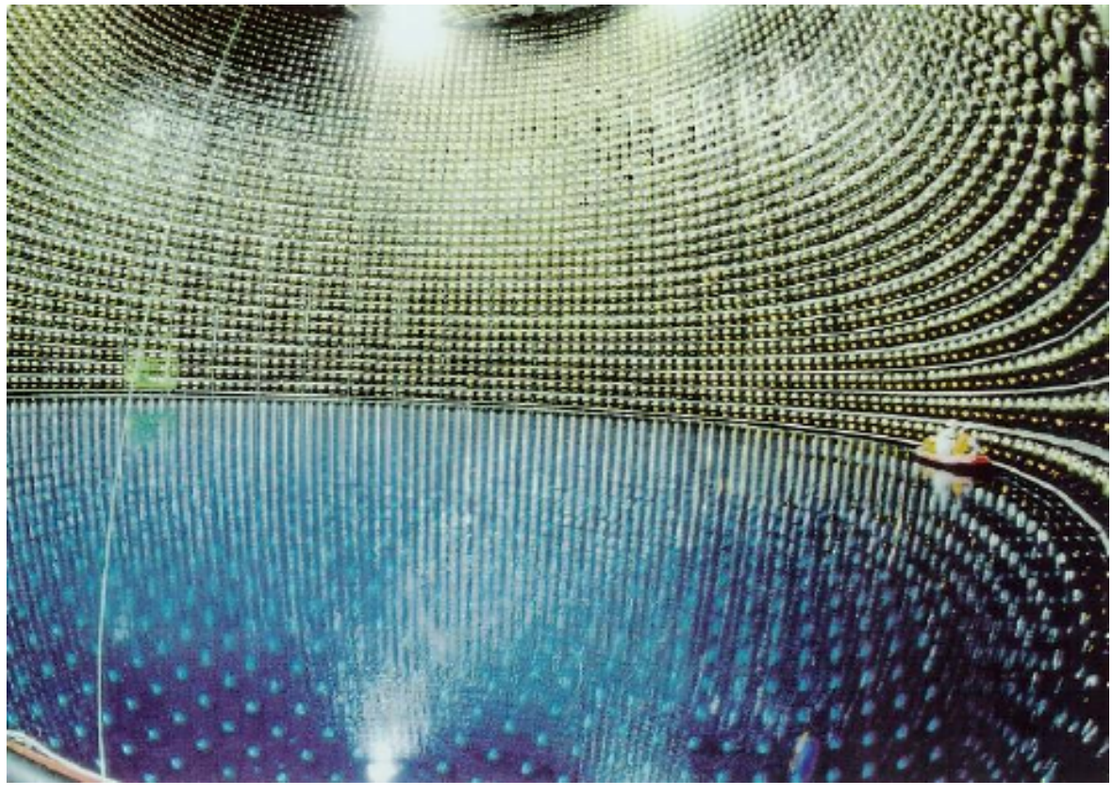
Die unerträgliche Leichtigkeit der Neutrinos

Laura Baudis
Physik-Institut, Universität Zürich

Senioren-Universität Zürich
Zürich, 8. März 2016

Geheimnisvolle Boten aus dem Weltall

- 23. Februar, 7:35 Uhr UT, 1987: **Milliarden über Milliarden von extragalaktischen Boten fegen durch die Erde**
- **Nur wenige davon wurden gestoppt.** Eigentlich hinterliessen **genau 11 Boten ein Signal** in einem Multitonnen Wasser-Cherenkovdetektor in der Kamiokamine in Japan
- **Drei Stunden später erreichte das Licht einer Supernovaexplosion in einer nahen Galaxie die Erde;** es war die naheste Supernova, die seit der Erfindung des Teleskops stattgefunden hatte



Der Super-Kamiokande Detektor in Japan

Supernova SN1978A

Was war passiert?

- **Ein Stern, 20 mal schwerer als die Sonne, war vor etwa 168’000 Jahren explodiert**

  (diese Supernovaexplosion fand in der Grossen Magellanschen Wolke statt, eine der elf Zwerggalaxien, die die Milchstrasse umkreisen)

- **Die Boten, die die Erde als Erste erreichten, waren Neutrinos** - *diese hatten den Tod des Sterns direkt mitbekommen, auf ihrem Weg vom kollabierenden Kern nach Aussen*

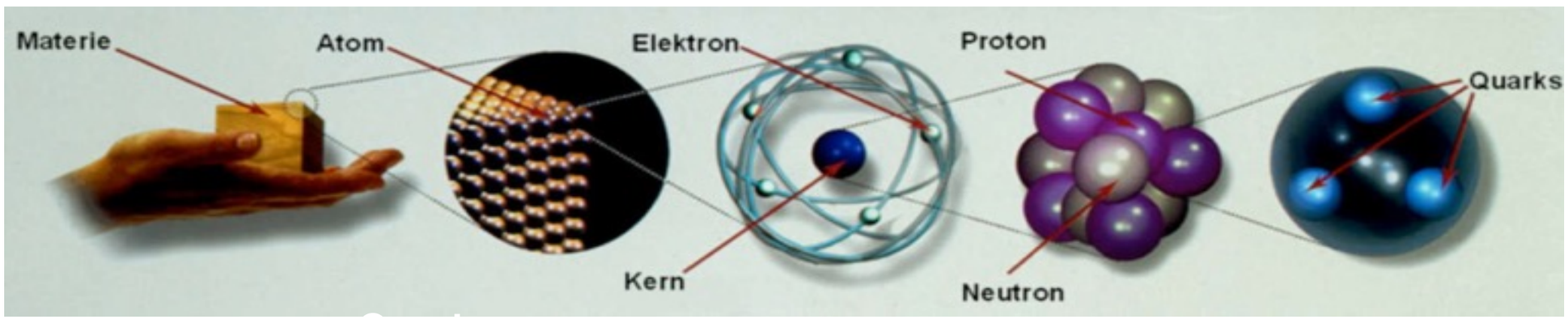
- Es dauerte einige extra Stunden bis die Photonen (die Lichtquanten) die Oberfläche des explodierenden Sterns erreichen konnten

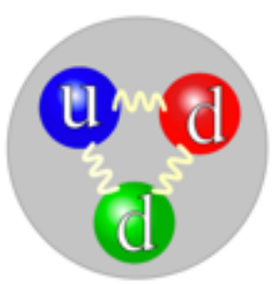
Die Grosse Magellansche Wolke, 168’000 Lichtjahre entfernt

Der Supernovaüberrest

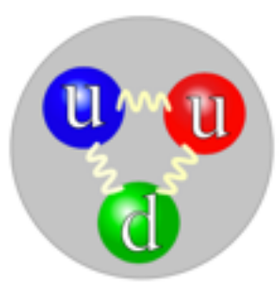
Was sind Neutrinos?

- **Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik**
- Dieses beschäftigt sich mit der Zusammensetzung der Materie auf den kleinsten Skalen, mit Symmetrien und mit Wechselwirkungen zwischen den Konstituenten der Materie





Neutron



Proton

Up

Down

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

Elektron-Neutrino

Elektron

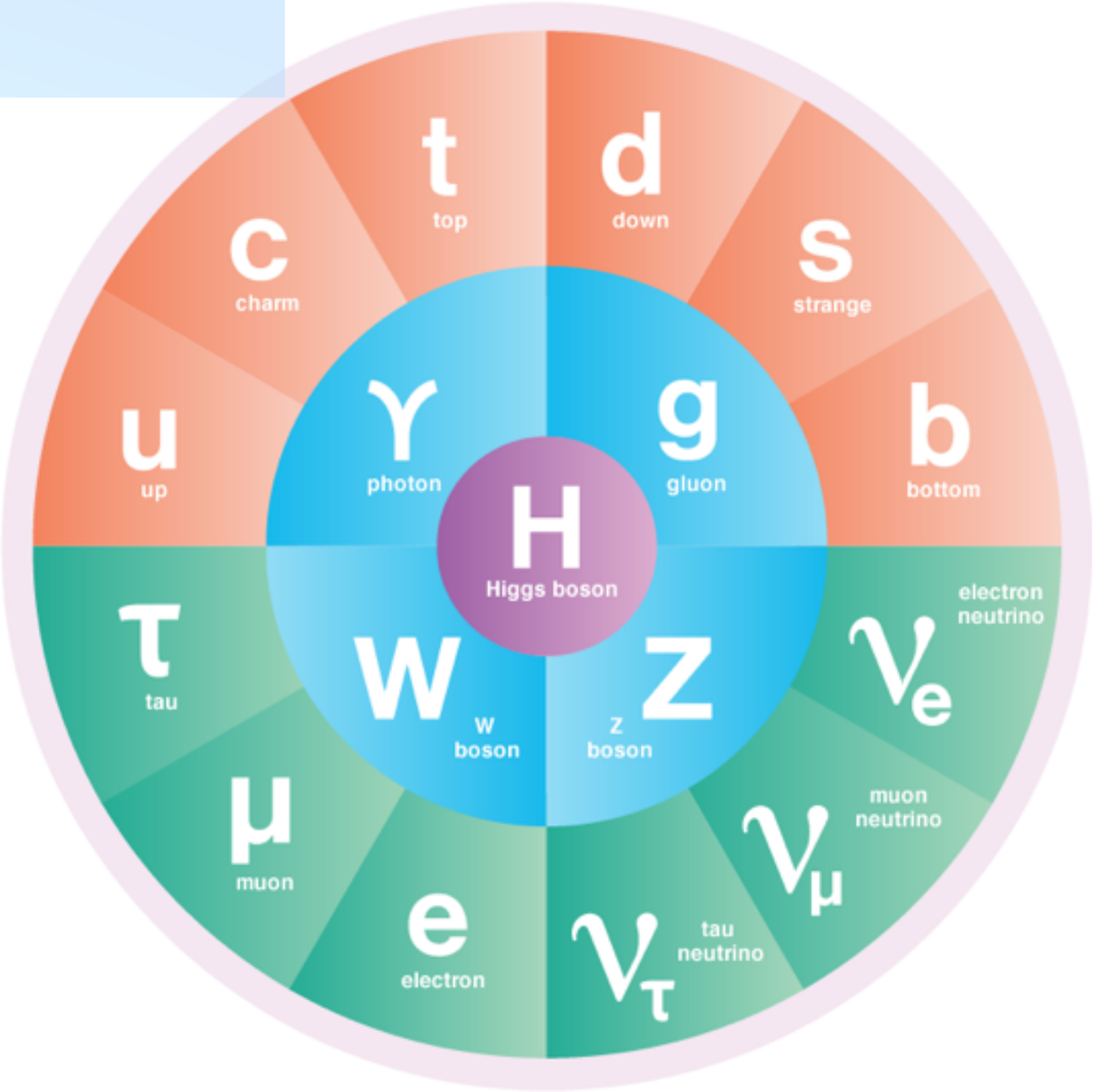
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

Neutrinos werden bei bestimmten radioaktiven Zerfällen emittiert

Was sind Neutrinos?

Neutrinos sind elektrisch neutral und interagieren nur über die schwache Kraft

Wir kennen jeweils drei Familien von Quarks und Leptonen



Kräfte: Teilchen, die Bosonen genannt werden, vermitteln die Wechselwirkungen zwischen Leptonen und Quarks

Aber zuerst, etwas Geschichte...

- **Zürich, der 4. Dezember 1930:** Wolfgang Pauli, ein 30 Jahre alter Professor an der ETH, verfasste einen der berühmtesten Briefe der modernen Physik: "Liebe Radioaktive Damen und Herren..."

- Dieser Brief war hauptsächlich an Lise Meitner adressiert; sie arbeitete an der Radioaktivität seit 1907 und befand sich gerade bei einem Treffen in Tübingen (Pauli konnte nicht teilnehmen "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")

- Pauli schlug einen "verzweifelten Ausweg" aus **einem Paradoxon** vor, der in dem neuen Feld der Kernphysik aufgekommen war

- Er schlug ein "furchtbares Ding" vor - ein neues subatomares Teilchen, **das Neutrino.** Ein Teilchen, "das nicht nachgewiesen werden kann"

- In 1930 waren nur das Elektron, das Proton und das Photon bekannt, **und Pauli's Idee war tatsächlich radikal!**

Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

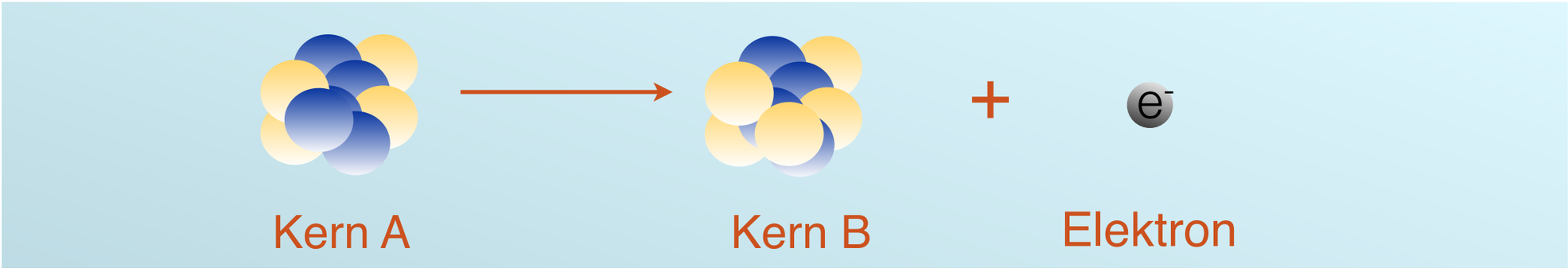
Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

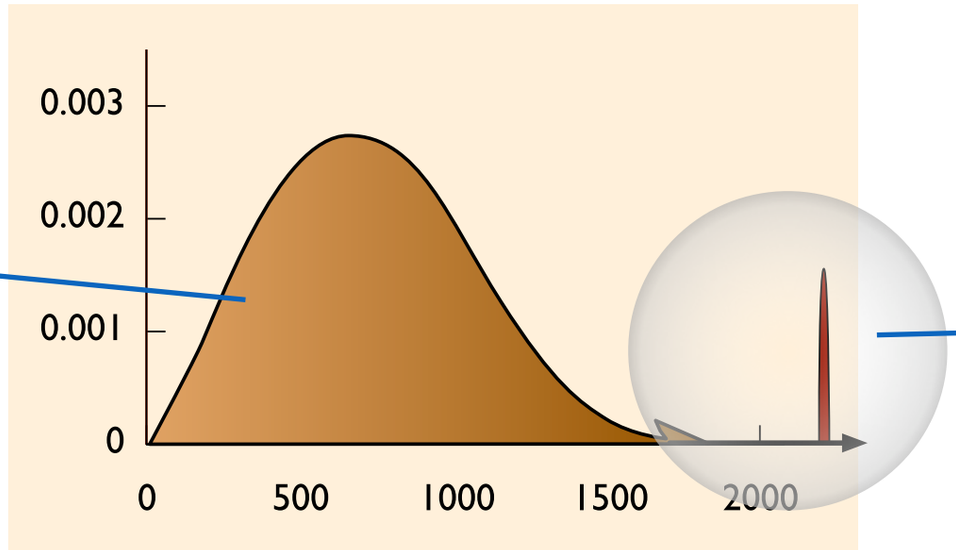
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N

Und das Paradoxon war... die Energiekrise

- In vielen Experimenten war beobachtet worden, dass manche Kerne nicht stabil sind, sondern durch die Emission von “Betastrahlung” (Elektronen) zerfallen
- Die Energie der emittierten Elektronen konnte gemessen werden - und das Spektrum war kontinuierlich
- Dies schien ein wohl respektiertes Gesetz der Physik zu verletzen: die Energieerhaltung!



Gemessenes Energiespektrum



Erwartete Energie der Elektronen

$mc^2 = E$: die Massendifferenz der beiden Kerne wird in die Energie des Elektrons umgewandelt

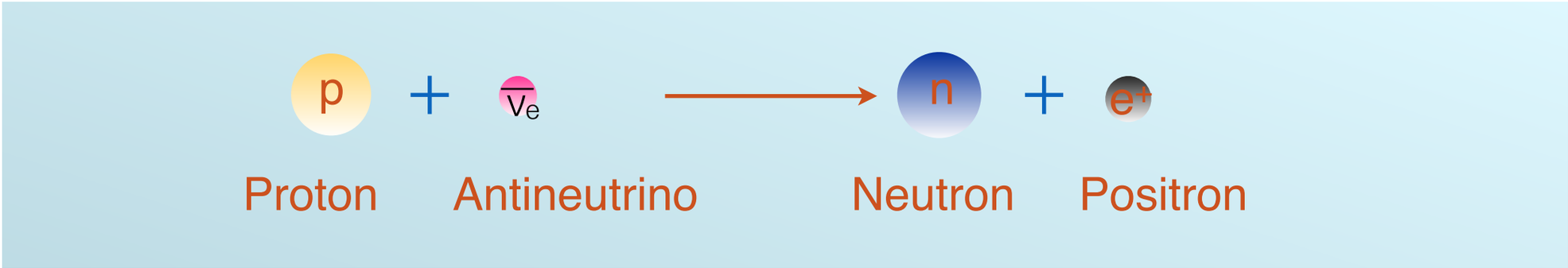
Es gab nur einen vernünftigen Ausweg...

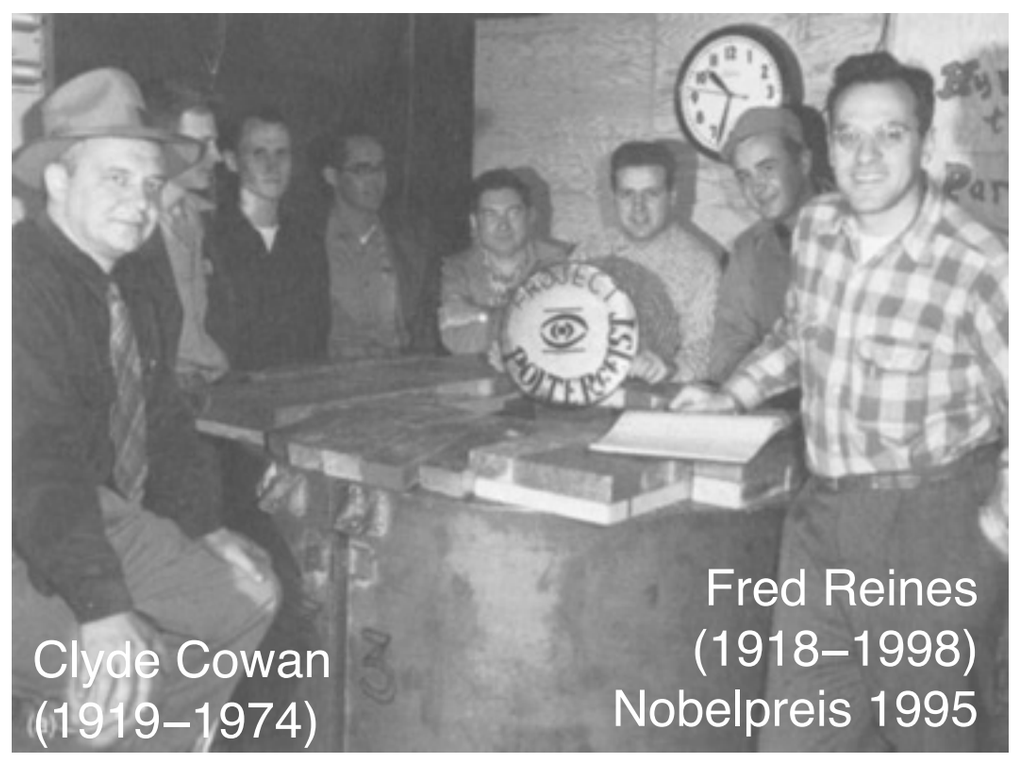
- **Ein neues Teilchen: das Neutrino.** Dieses würde die Energie mit dem Elektron teilen, man würde es jedoch aufgrund seiner sehr schwachen Wechselwirkung mit Materie nicht beobachten

- **Niels Bohr, 1934:** *"I must confess that I don't really feel fully convinced of the physical existence of the neutrino"*
- **Arthur Eddington, 1939:** *"I am not much impressed by the neutrino theory.... Dare I say that physicists will not have sufficient ingenuity to make neutrinos?"*
- Dieser Vorschlag wurde von vielen Physikern als eine höchst nützliche Hypothese betrachtet, jedoch **glaubten nur wenige, dass das Neutrino ein reelles Teilchen sein könnte,** bis...

Neutrinos in Hülle und Fülle

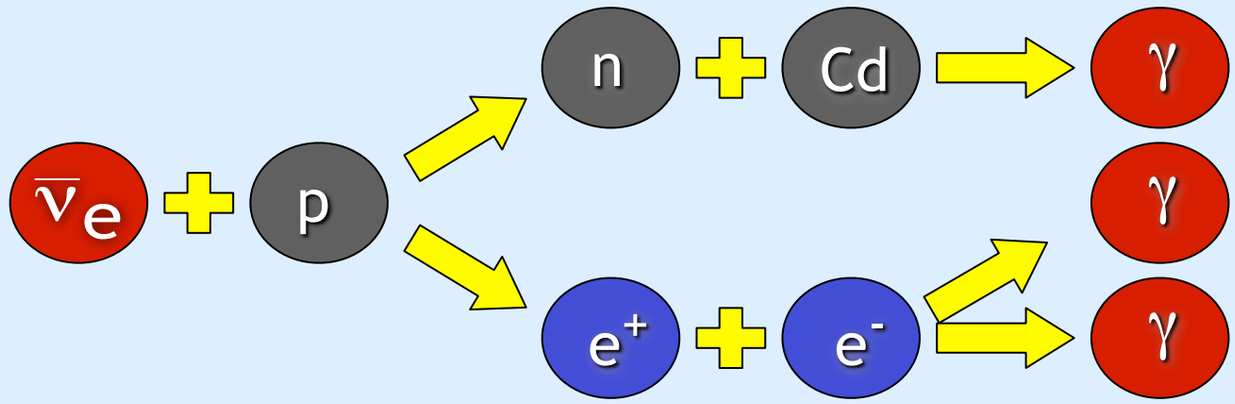
- **... etwa 30 Jahre später,** als Clyde Cowan und Fred Reines das “Projekt Poltergeist” starteten und endlich (Anti)Neutrinos am Savannah River Reaktor in South Carolina nachwiesen!





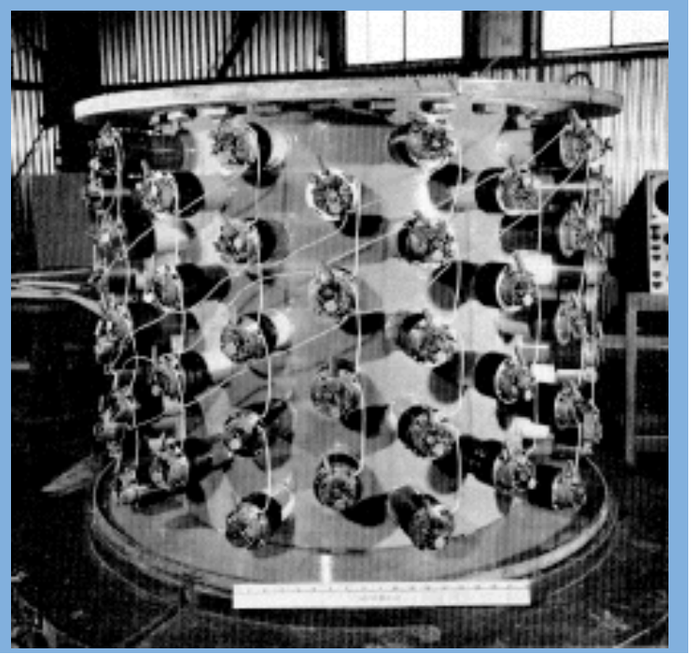
Das Projekt Poltergeist

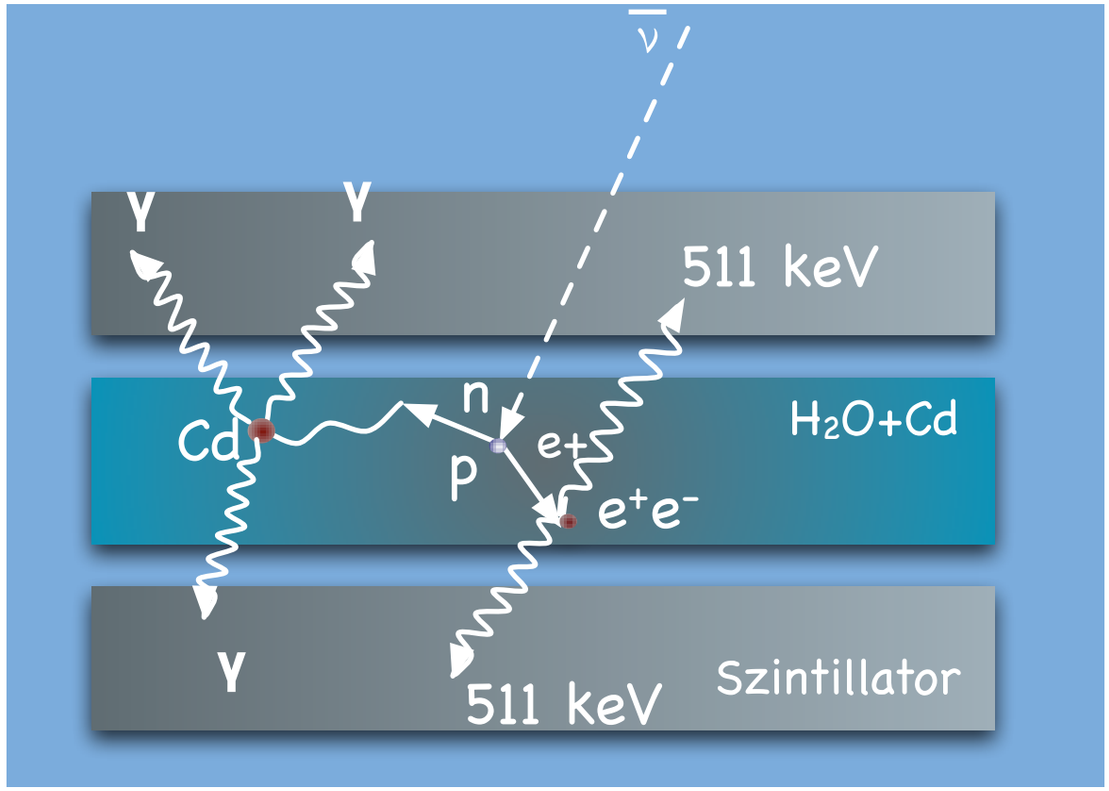
Anti-Elektron Neutrinos vom Reaktor



Drei Gamma-quanten in Koinzidenz

Neutrino-Detektor: 400 l Wasser und $CdCl_2$ durch 90 Photosensoren beobachtet

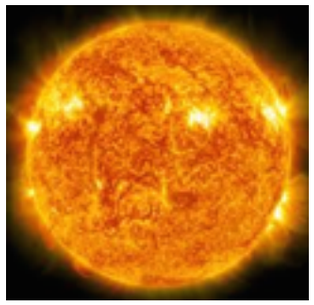




- und dies war nur der Anfang des grossen Abenteuers...

Wir kennen heute viele Neutrinoquellen

Reaktoren

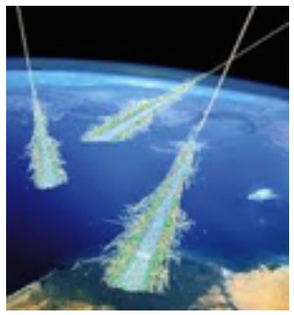


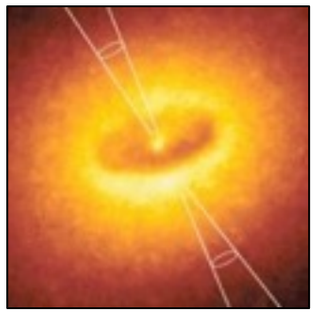
Sonne

Teilchenbeschleuniger

Supernovae
SN 1987A

Erdatmosphäre
(kosmische Strahlung)





Extraterrestrische Neutrinos
Vor Kurzem beobachtet

Erdkruste
(natürliche Radioaktivität)

Das frühe Universum
(Heute ~ 330 v/cm^3)
Indirekte Evidenz

und Menschen!

Neutrinos dominieren sogar das Universum!

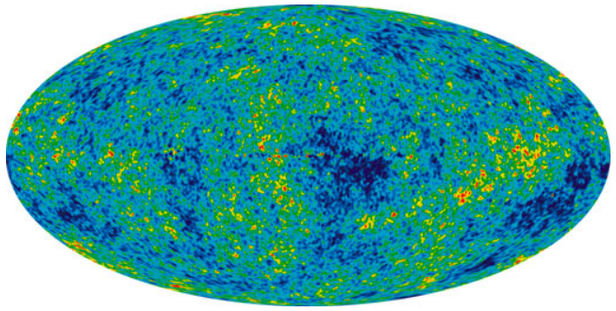
- Die Welt um uns herum (Menschen, Bäume, Steine, Gebäude, Polenta, die Erde...) **besteht aus Elektronen, Protonen und Neutronen**

- **Frage:** besteht das gesamte Universums aus Elektronen, Protonen und Neutronen?

NEIN!

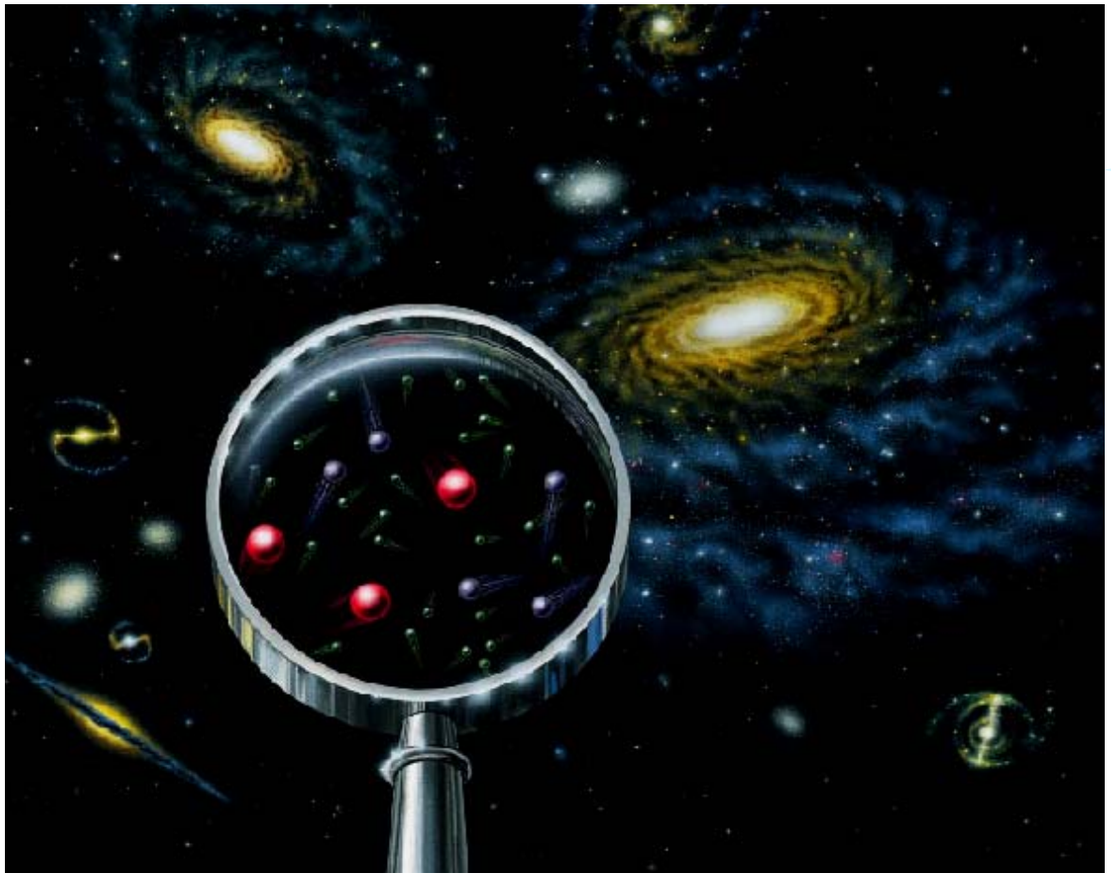
- Dies sind absolute Raritäten; für jedes davon, enthält **das Universum eine Milliarde Neutrinos!**
- **Um das Universum zu verstehen, müssen wir also mehr über Neutrinos wissen**

Neutrinos aus dem Urknall



- Genauso wie mit den Photonen **der kosmischen Hintergrundstrahlung** (im Mikrowellenbereich, und sehr präzise mit den WMAP und Planck Satelliten nachgewiesen)...

  ist das Universum mit einem See aus Neutrinos gefüllt, diese entkoppelten von den anderen Teilchen etwa 10 Sekunden nach dem Urknall



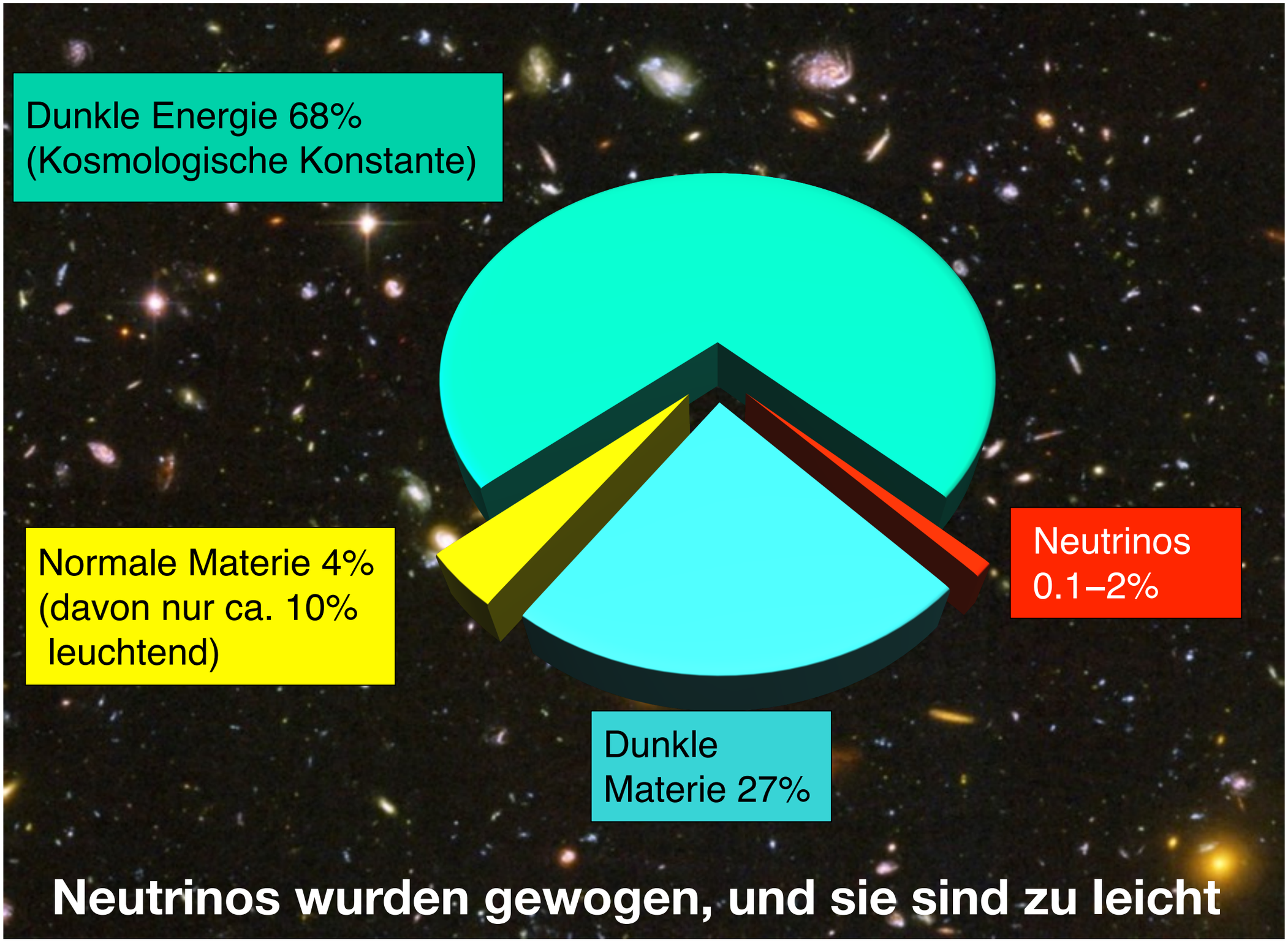
Jeder Kubikmeter im Raum enthält etwa **300 Millionen primordialen Neutrinos**

Frage: könnten Neutrinos also die dunkle Materie im Universum ausmachen?

NEIN!

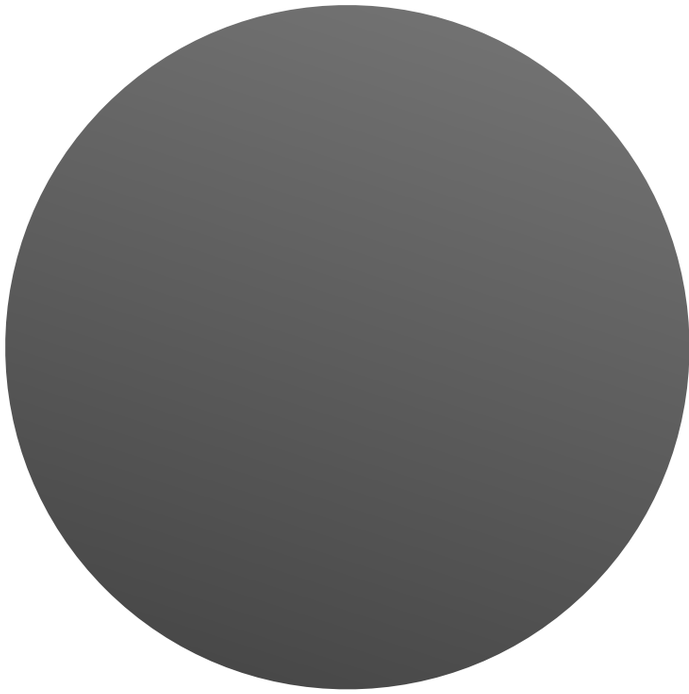
Die Masse der Neutrinos ist viel zu klein...

Neutrinos - zu leicht für die dunkle Materie?



Neutrinos, die Sonne und wir

- Trotzdem sind Neutrinos sehr wichtig für unser Leben
- **Keine Neutrinos würde bedeuten:**
  - ➡ keine Energie, die uns wärmt
  - ➡ keine Atome komplizierter als Wasserstoff
  - ➡ kein Kohlenstoff, kein Sauerstoff, kein Wasser
  - ➡ keine Erde, kein Mond, keine Menschen....

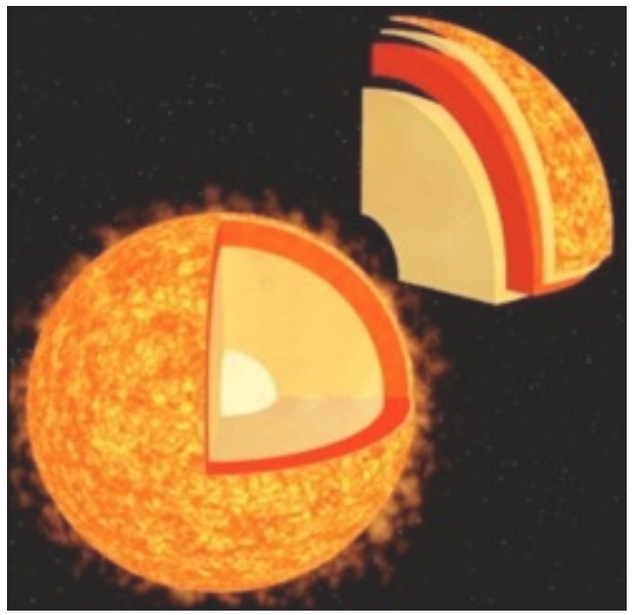


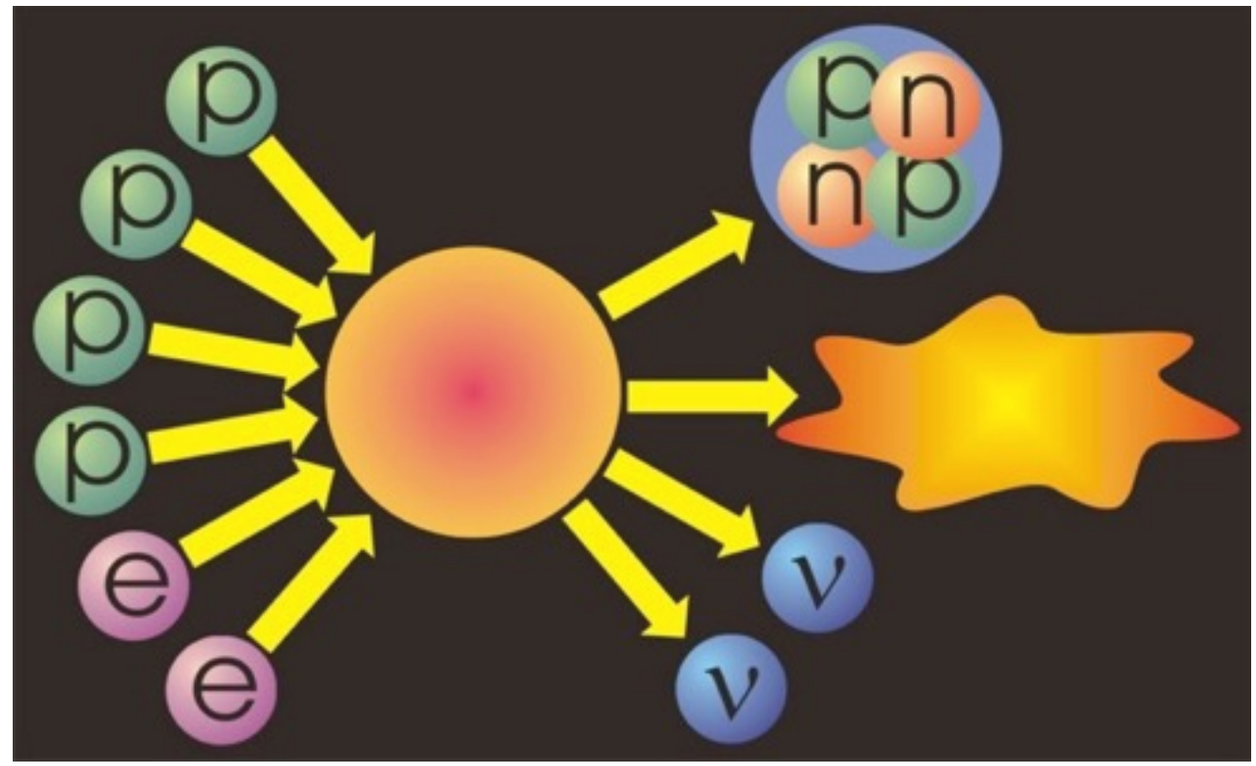
Keine Neutrinos wären also schlechte Nachrichten

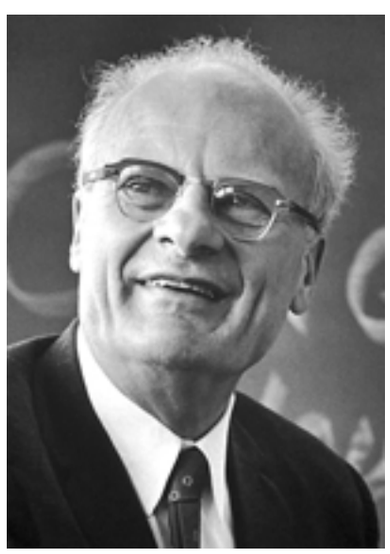
Das Universum wäre ein recht langweiliger Ort

Sonnenneutrinos

- **Unsere Sonne ist ein gigantischer Fusionsreaktor, sie scheint, indem sie Protonen zu Heliumkerne konvertiert**







Sonnenabstrahlung: 98 % Licht
2 % Neutrinos
Hier 66 Milliarden Neutrinos/(cm^2 s)

Hans Bethe (1906–2005, Nobelpreis 1967)
Thermonukleare Reaktionsraten (1938)

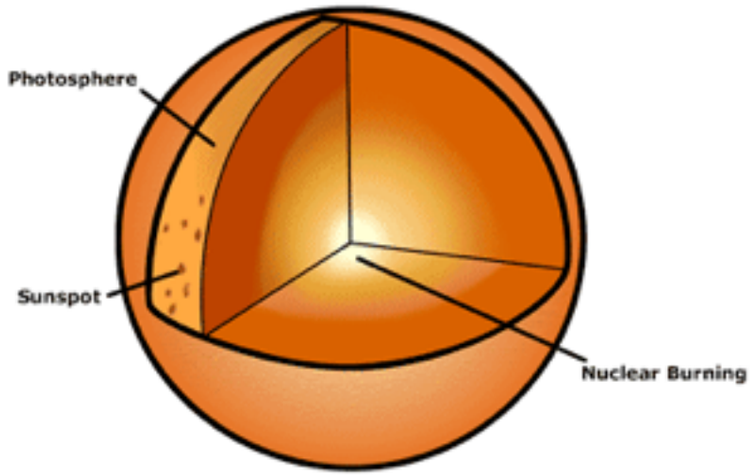
Sonnenneutrinos

- Die Reaktionsraten werden durch die schwache Kraft bestimmt, daher scheint die Sonne für eine sehr lange Zeit

- Der Neutrinofluss auf der Erde ist **66 Milliarden Sonnenneutrinos pro cm² und Sekunde!**

Fast all diese Neutrinos rauschen durch die Erde und durch uns hindurch, wobei **rein gar nichts passiert**

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Sonnenneutrino mit einem von uns interagiert ist:
1/10’000’000’000’000’000’000



T_{Kern} = 15‘000‘000 Kelvin

Sonnenbrille für Neutrinos?

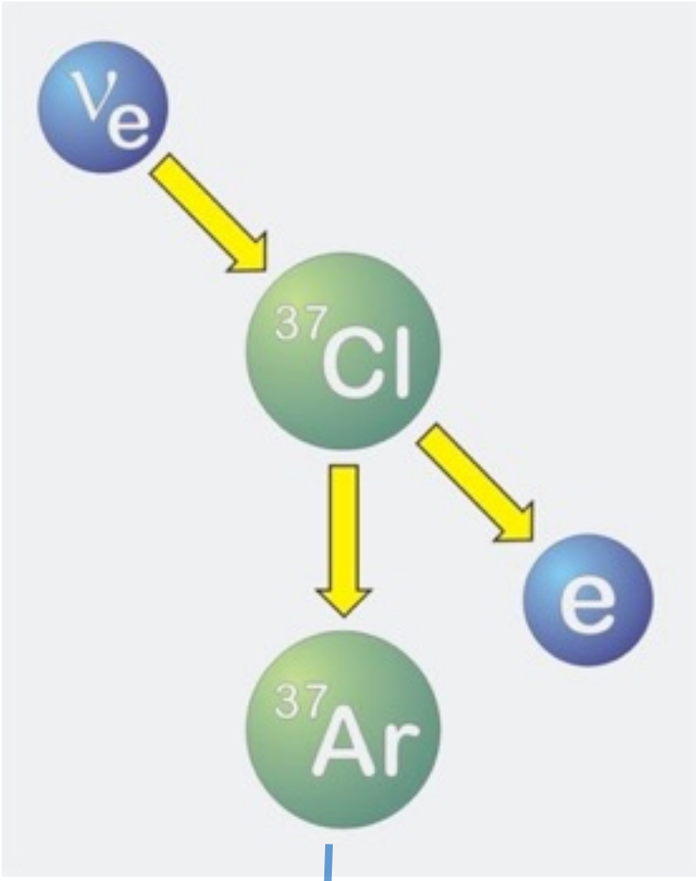
Eine Bleischicht der Dicke von mehreren Lichtjahren wäre nötig!

Bethe & Peierls, 1934

”... dies bedeutet, dass man offensichtlich niemals in der Lage sein wird, ein Neutrino zu beobachten”

Die erste Messung der Sonnenneutrinos

Reaktion: inverser Beta-Zerfall (Neutrino-Einfang)



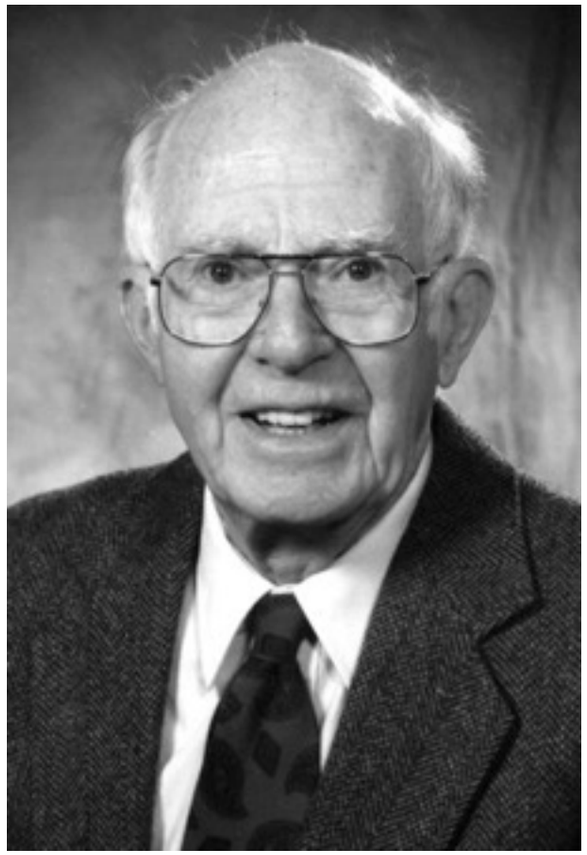
$T_{1/2}$ = 35 Tage

$$^{37}Cl + e^{+} + \nu_e$$

Homestake Sonnenneutrino-Observatorium, 1967 - 2002

Die Ar-Atome wurden alle 60-70 Tage durch Spülen mit He-Gas extrahiert und nachgewiesen

Physik-Nobelpreis 2002 für Neutrino-Astronomie

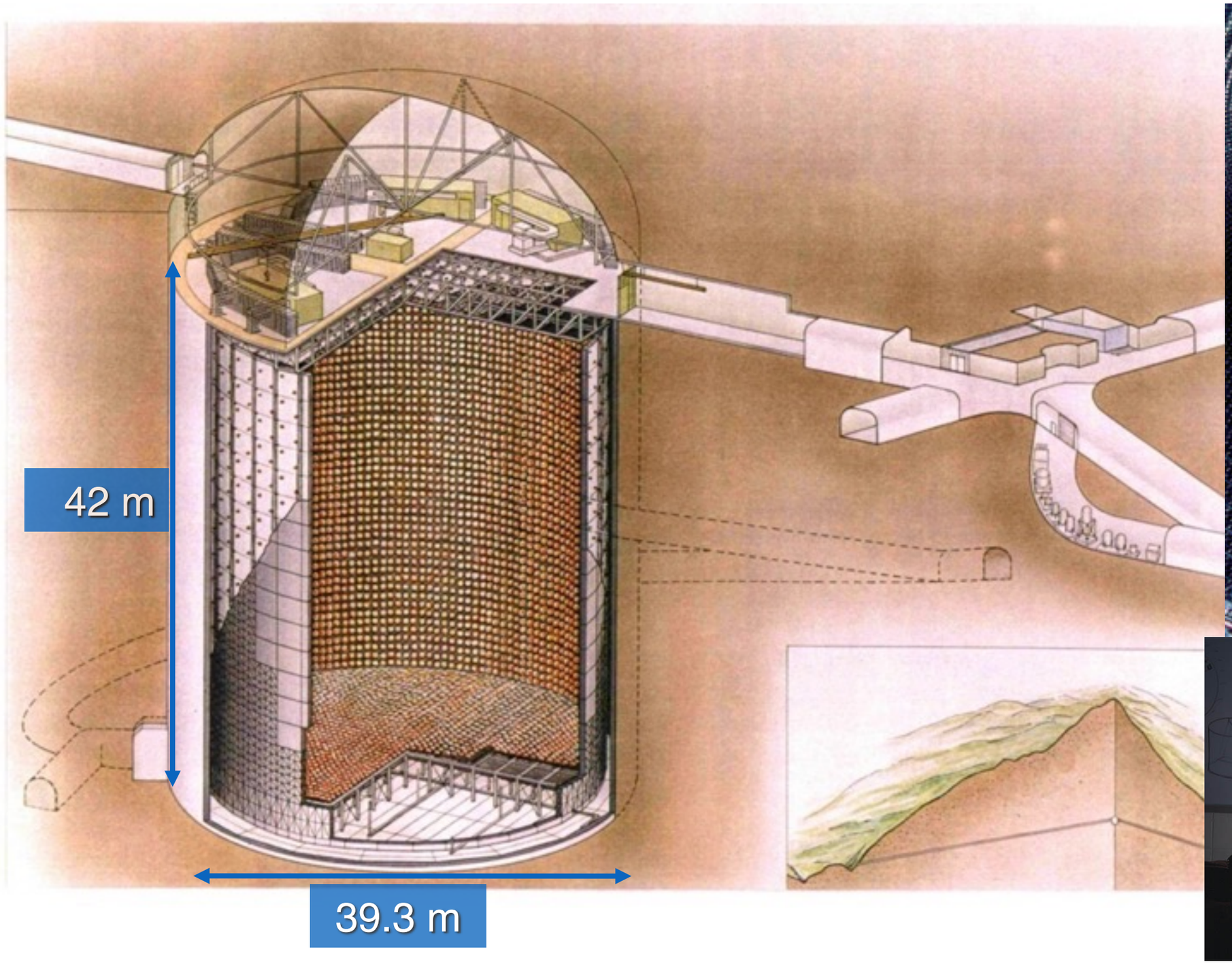


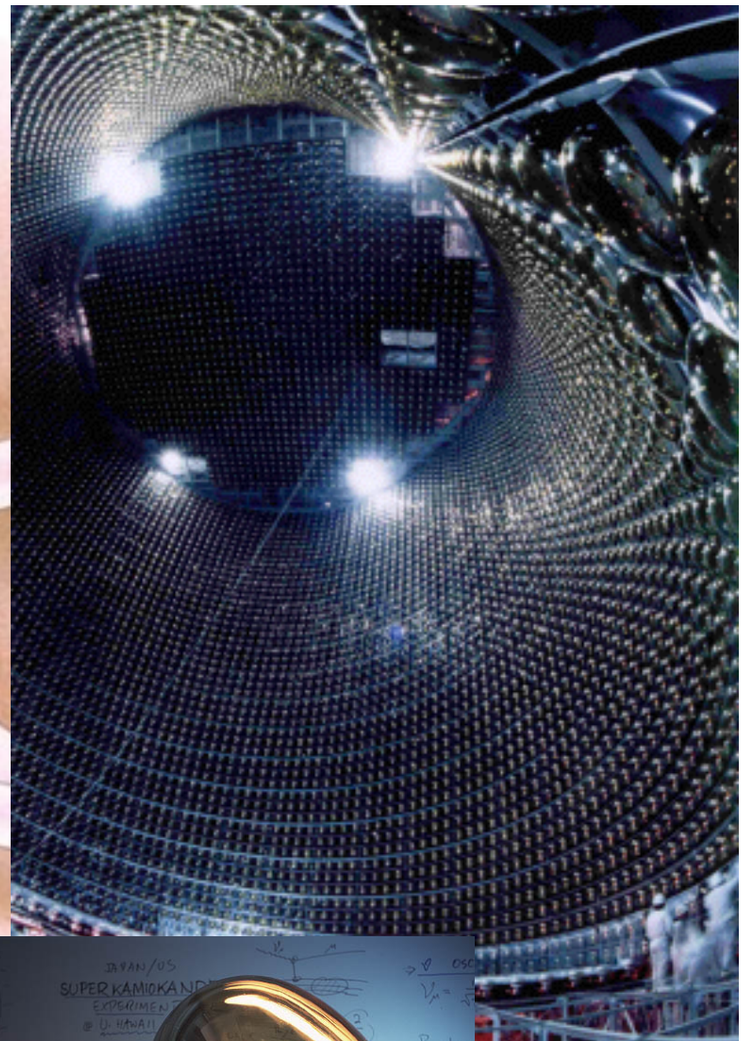
Ray Davis Jr.
(1914–2006)

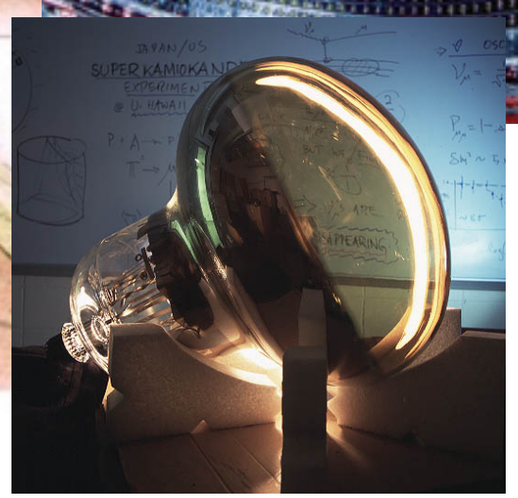
Masatoshi Koshiba
(*1926)

„für Pionierbeiträge zur Astrophysik, insbesondere für den Nachweis kosmischer Neutrinos”

Der Super-Kamiokande Detektor in Japan

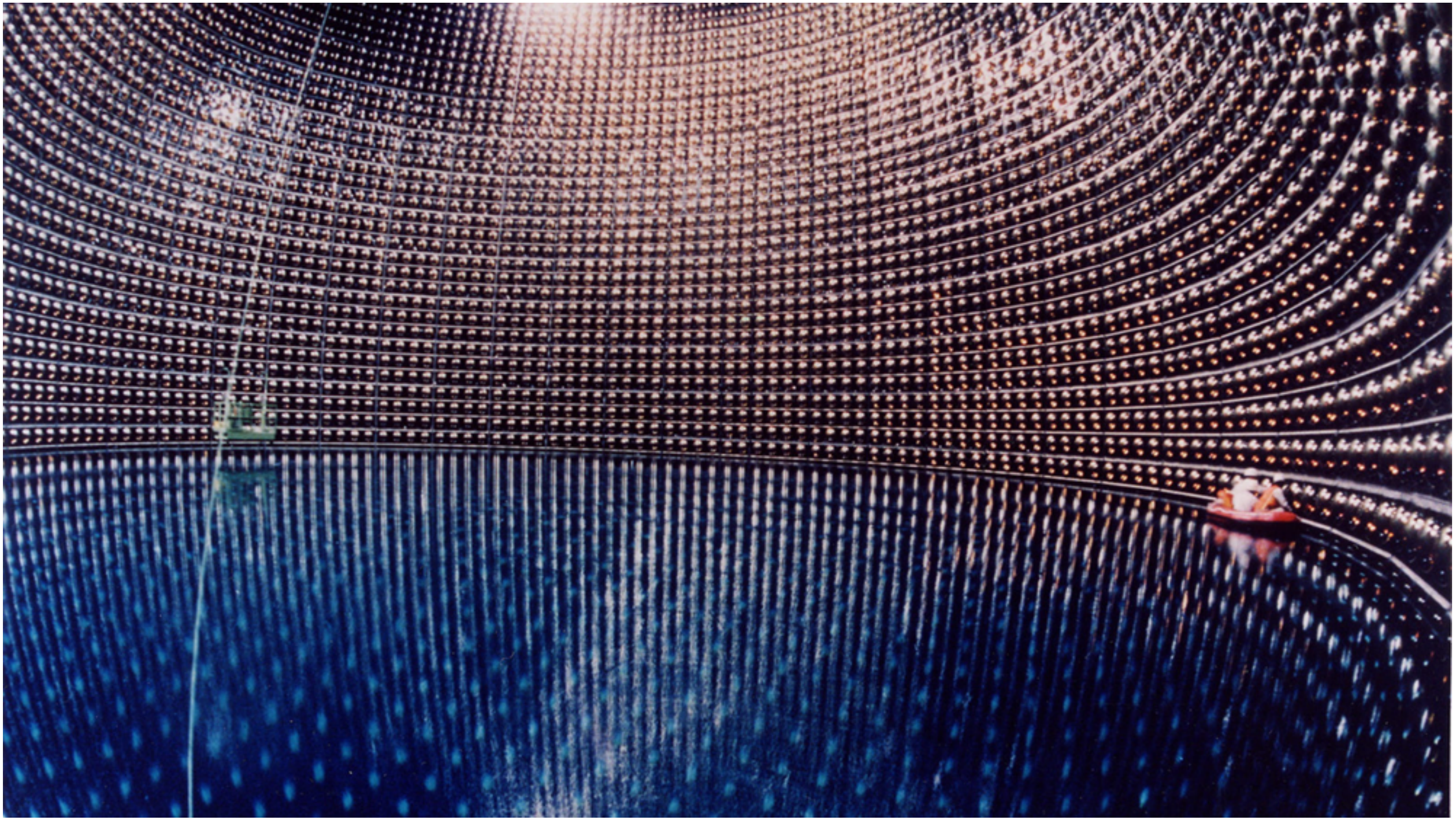




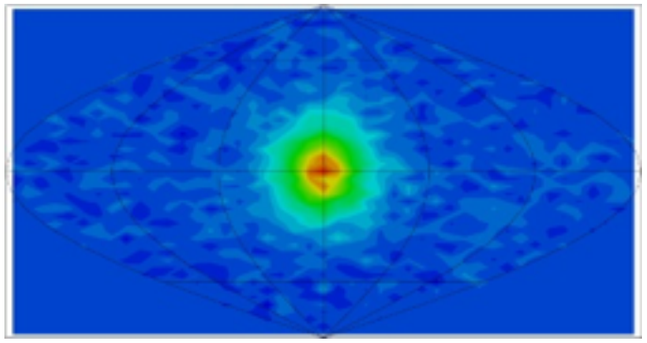


50’000 Tonnen Wasser-Cherenkov Detektor mit 11’000 Photodetektoren

Der Super-Kamiokande Detektor in Japan

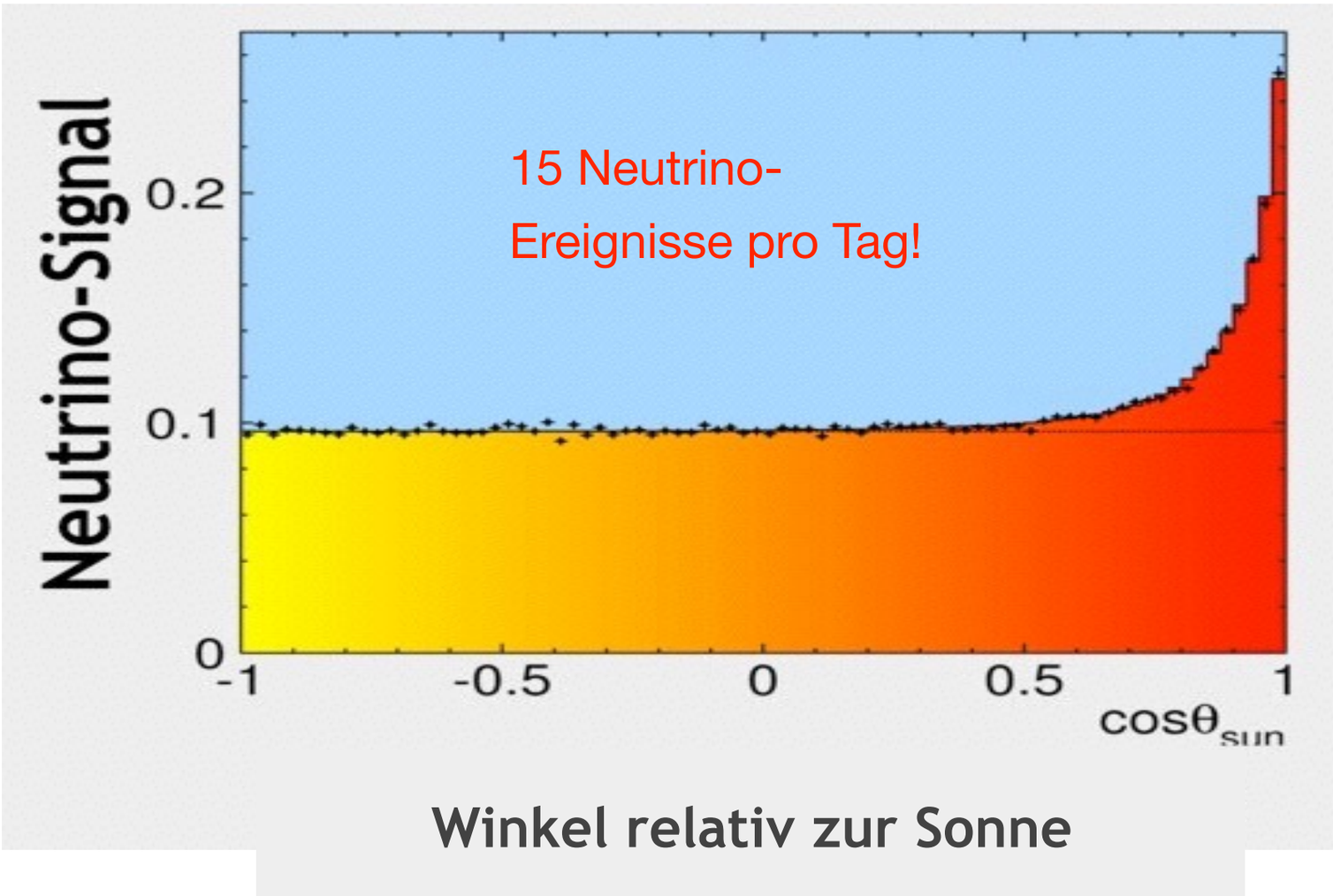


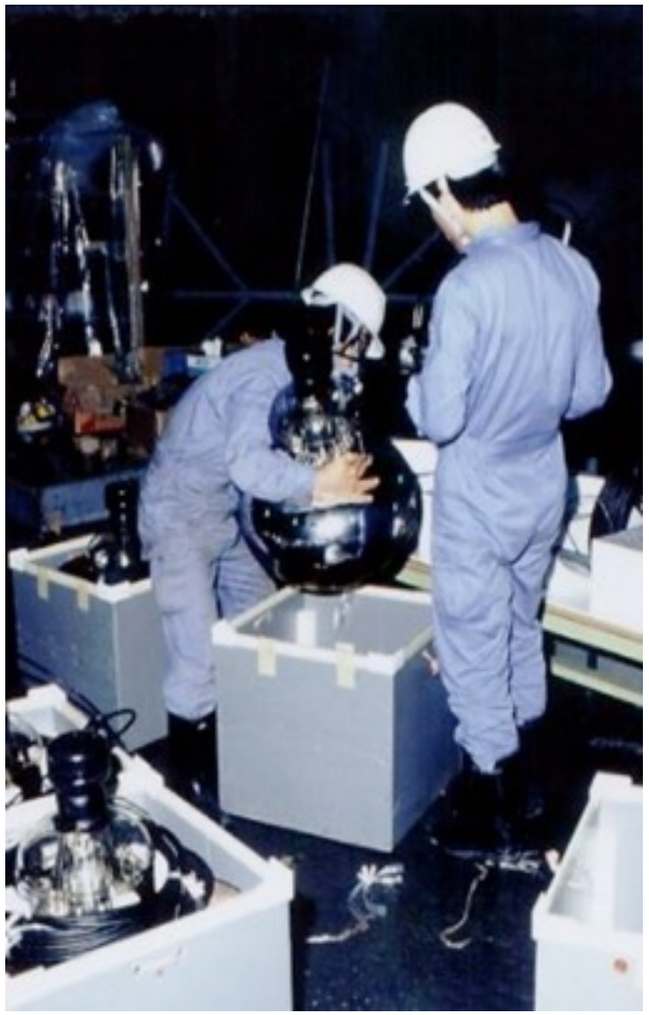
Die Sonne im Neutrinolicht



Super-Kamiokande konnte zum ersten Mal **die Sonne in Neutrinos beobachten**

Es liefert uns ein **direktes Bild des Sonnenkerns**



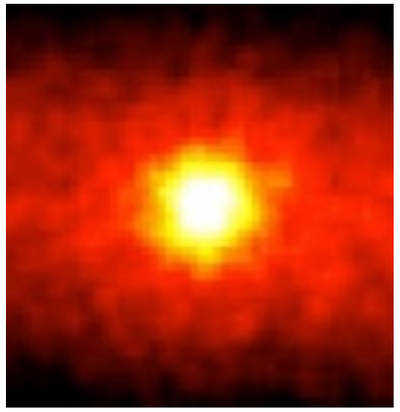


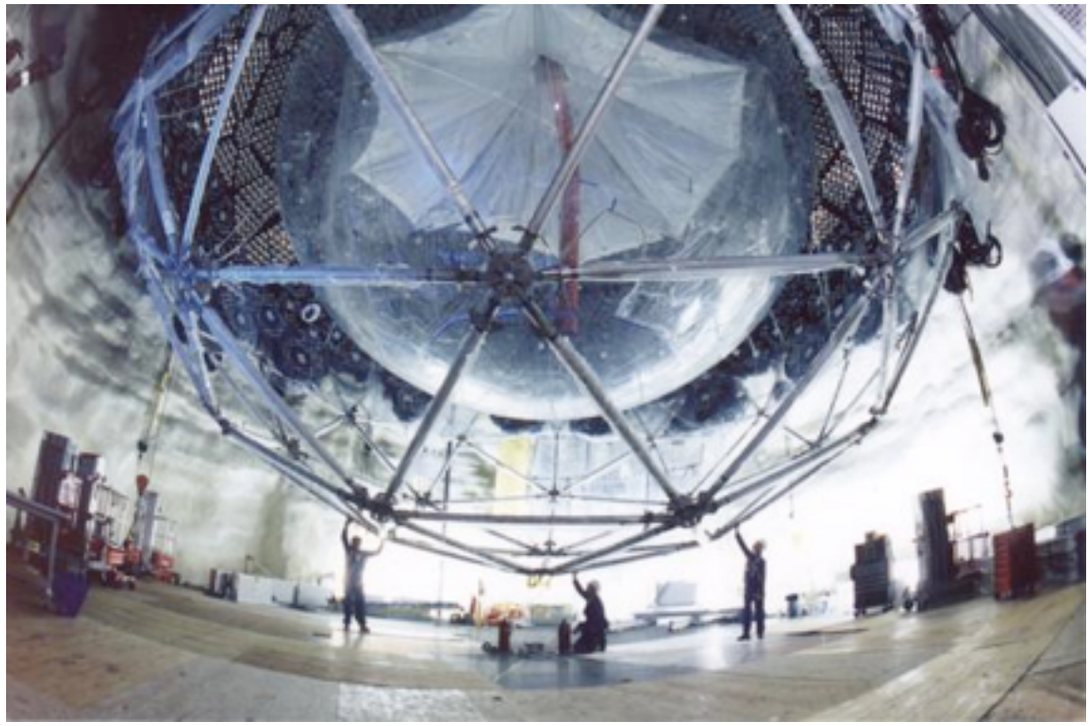
Echtzeit Experiment: Information über Zeit und die Richtung des Neutrinos!

Gigantische Detektoren für Sonnenneutrinos

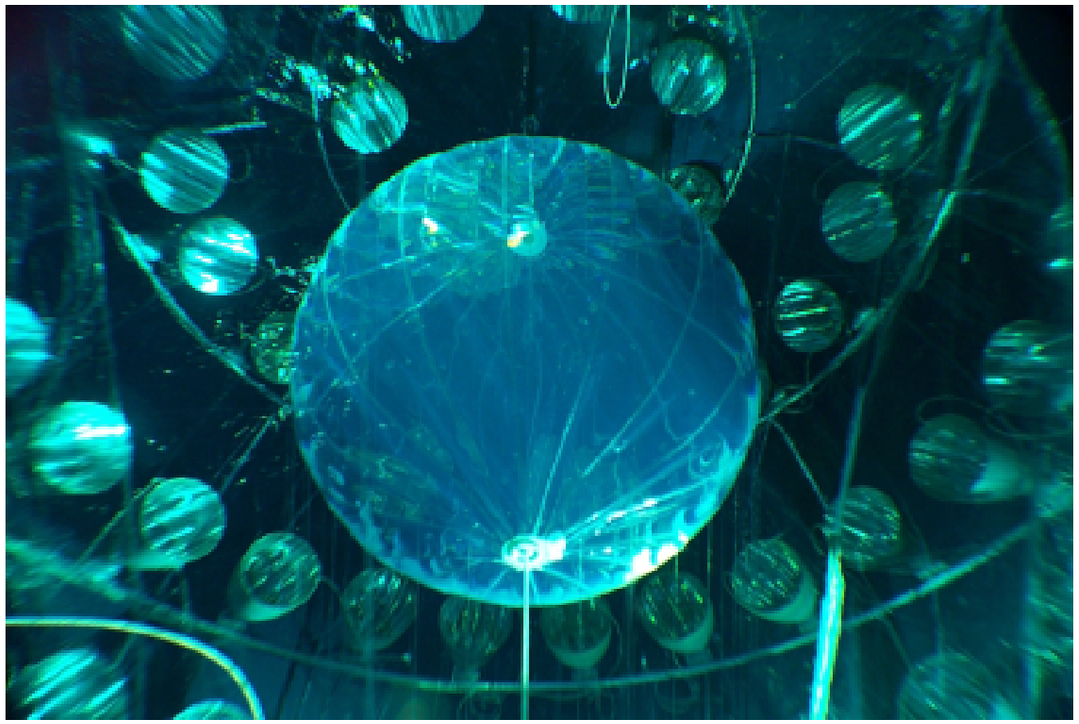
- Wir beobachten also die Sonne in Neutrinos
- Eigentlich werden heutzutage Sonnenneutrinos routinemässig in vielen Experimenten in Untergrundlabors nachgewiesen
- Aus solchen Beobachtungen lernen wir nicht nur über das Innere der Sonne

  sondern auch über die flüchtigen Teilchen selbst!





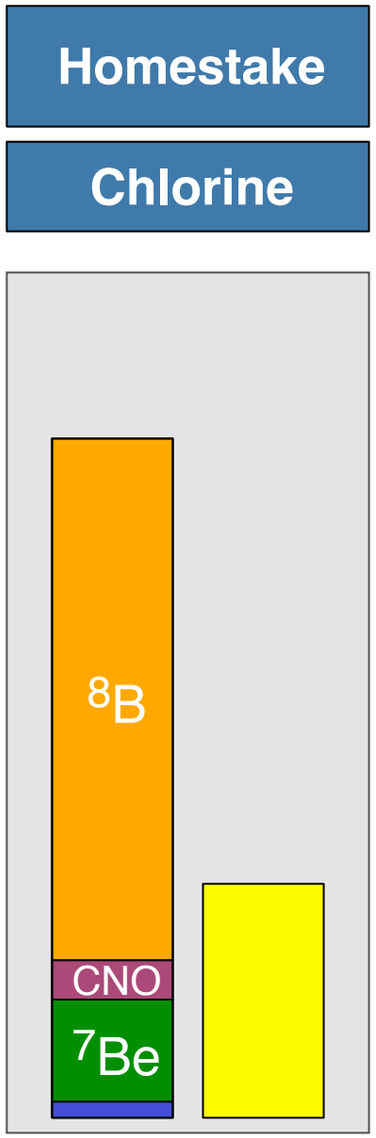
Das SNO Experiment in Kanada
(Sudbury Mine)



Das BOREXINO experiment in Italien
(Gran Sasso Untergrundlabor)

Das Problem der “fehlenden” Sonnenneutrinos

John Bahcall
1934 – 2005

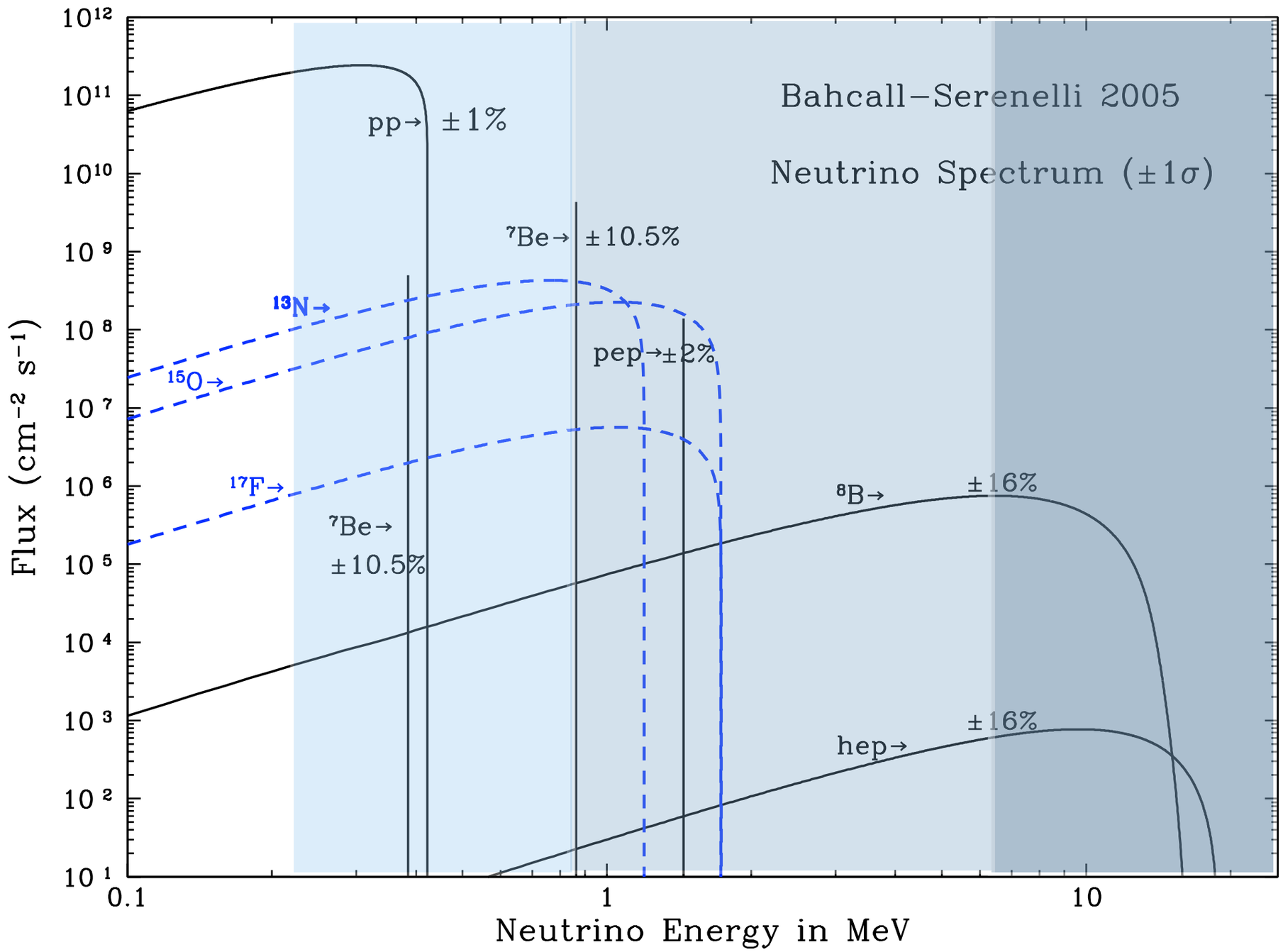


Raymond Davis Jr.
1914 – 2006

Nur etwa ein Drittel des vorhergesagten Flusses konnte nachgewiesen werden!

Das Spektrum der Sonnenneutrinos

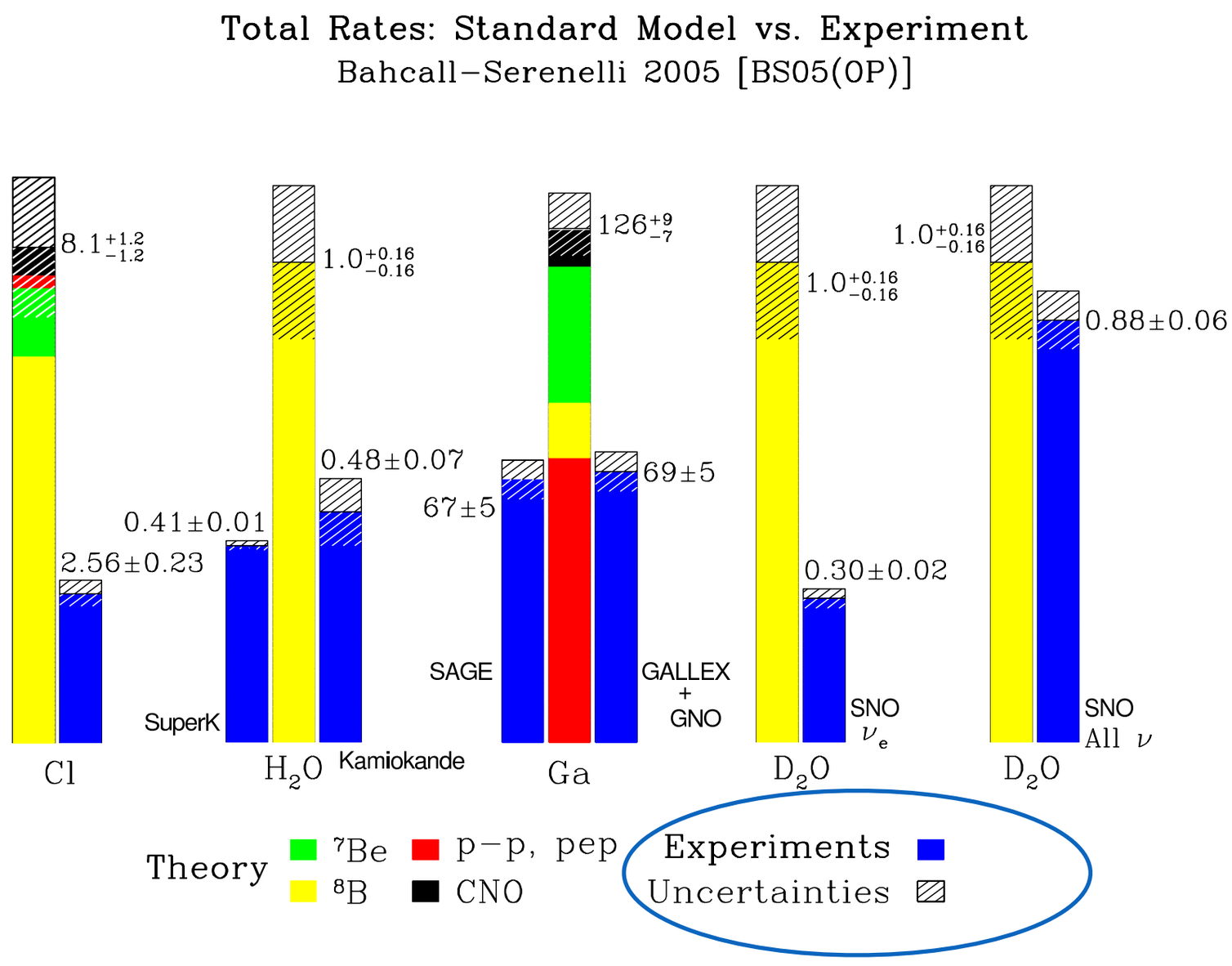
Bahcall und andere konnten das erwartete Energiespektrum und die Flüsse aber sehr genau vorhersagen; und mit dem Detektor schien auch alles in Ordnung zu sein...



Vorhersagen und Messungen

Des Weiteren haben alle existierenden Experimente kleinere Flüsse als vorhergesagt gemessen!

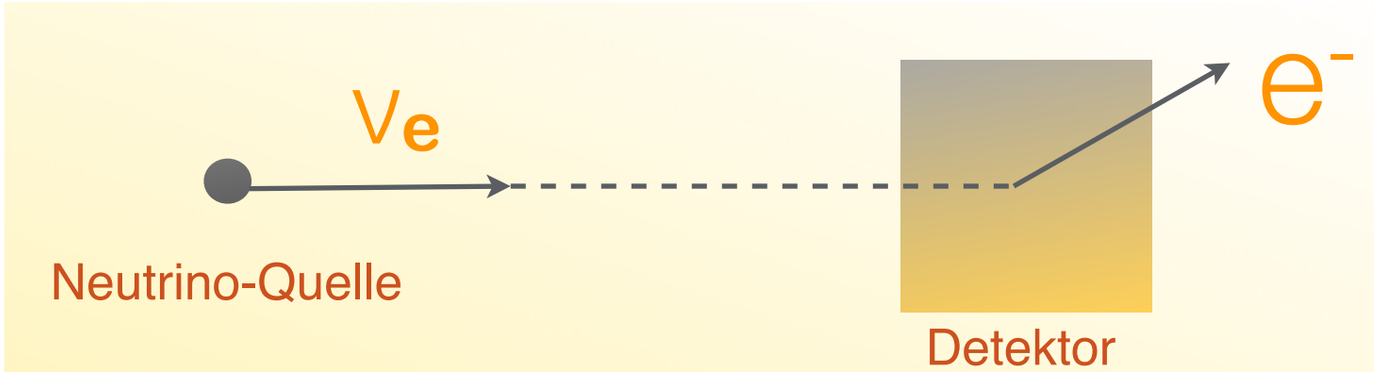
Liegt es wohl doch an der Sonne? Oder...

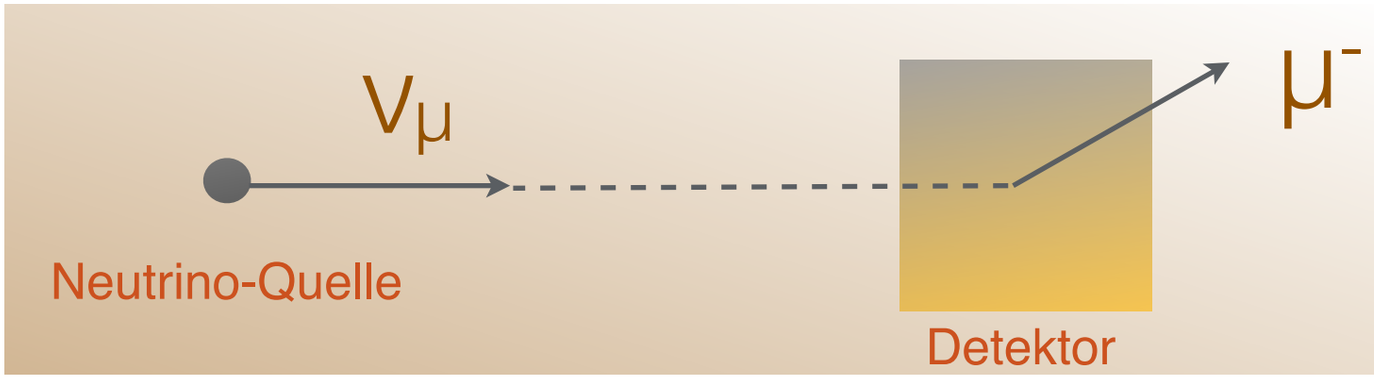


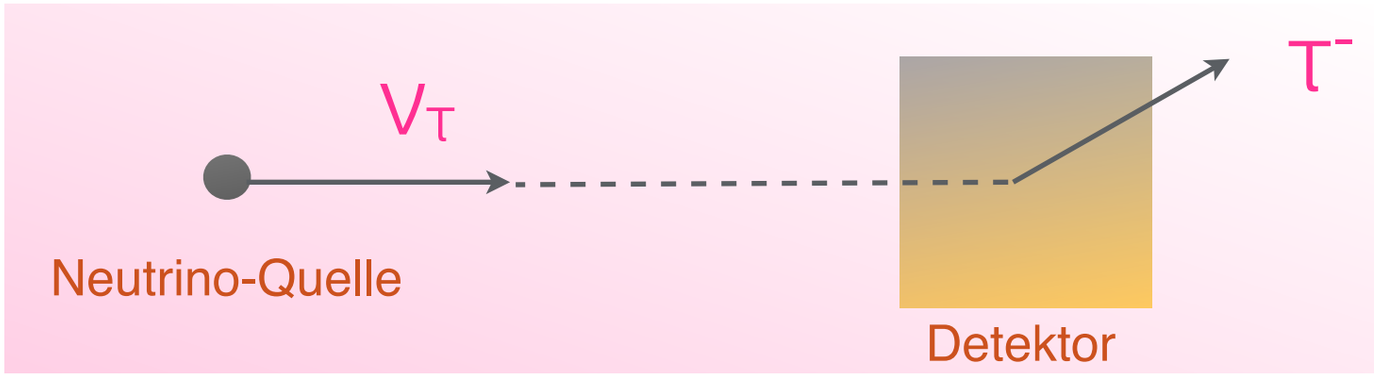
Was wissen wir eigentlich über Neutrinos?

- **Sie kommen in drei Sorten vor**

ν_e	ν_μ	ν_τ
Vanille	Schokolade	Erdbeer





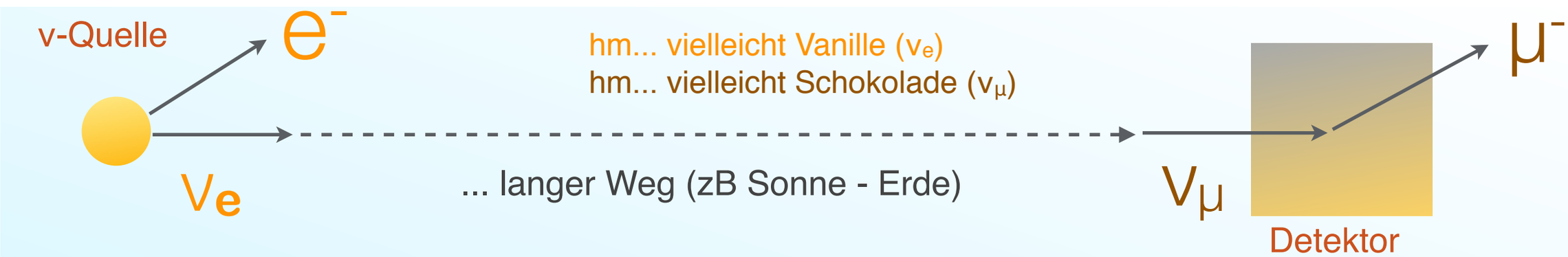


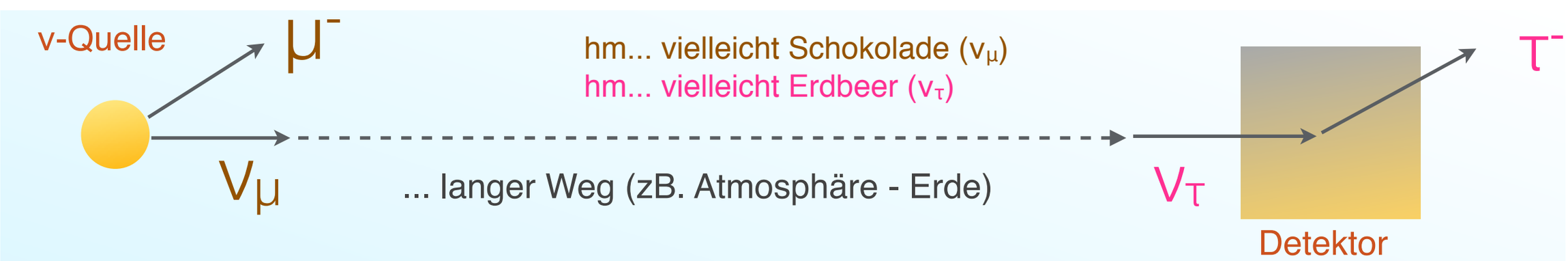
Neutrino Quellen

- die Sonne
- der Urknall
- Supernovae
- Kernreaktoren
- Beschleuniger
- die Atmosphäre
- natürliche Radioaktivität
- Menschen

Vanille, Erdbeer oder Schokolade?

- **Neutrinos können sich manchmal nicht zwischen den 3 Sorten entscheiden**
- sie oszillieren also zwischen den “flavours”:





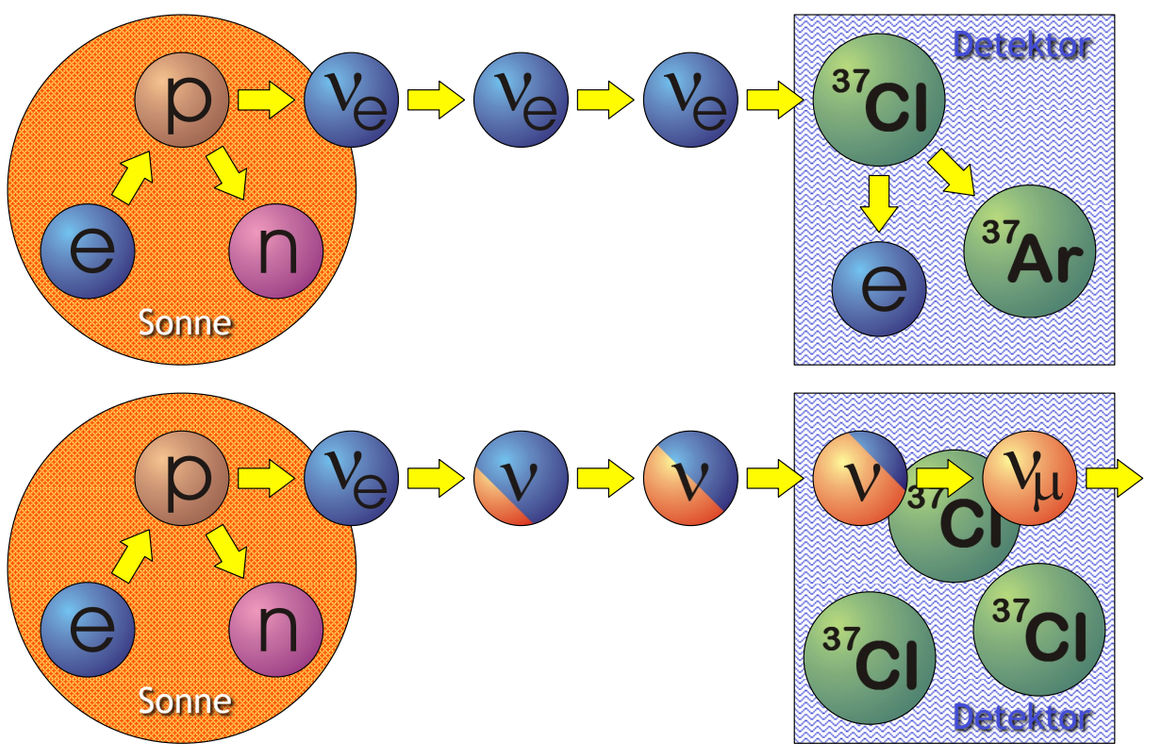
- Dies ist ein bekannter quantenmechanischer Effekt...

Neutrinooszillationen

- **Und kann nur dann stattfinden, falls Neutrinos eine endliche Masse haben**
- Die Oszillationswahrscheinlichkeit ist:

Wahrscheinlichkeit $\sim [(\text{Masse}_{\text{schokolade}})^2 - (\text{Masse}_{\text{erdbeer}})^2] \times \text{Distanz} \times 1/\text{Energie}$

- **Das Problem der fehlenden Sonnenneutrinos war also gelöst!**

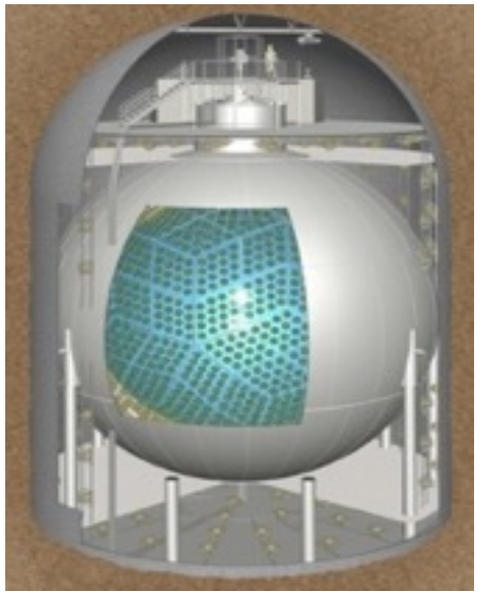


Neutrinooszillationen

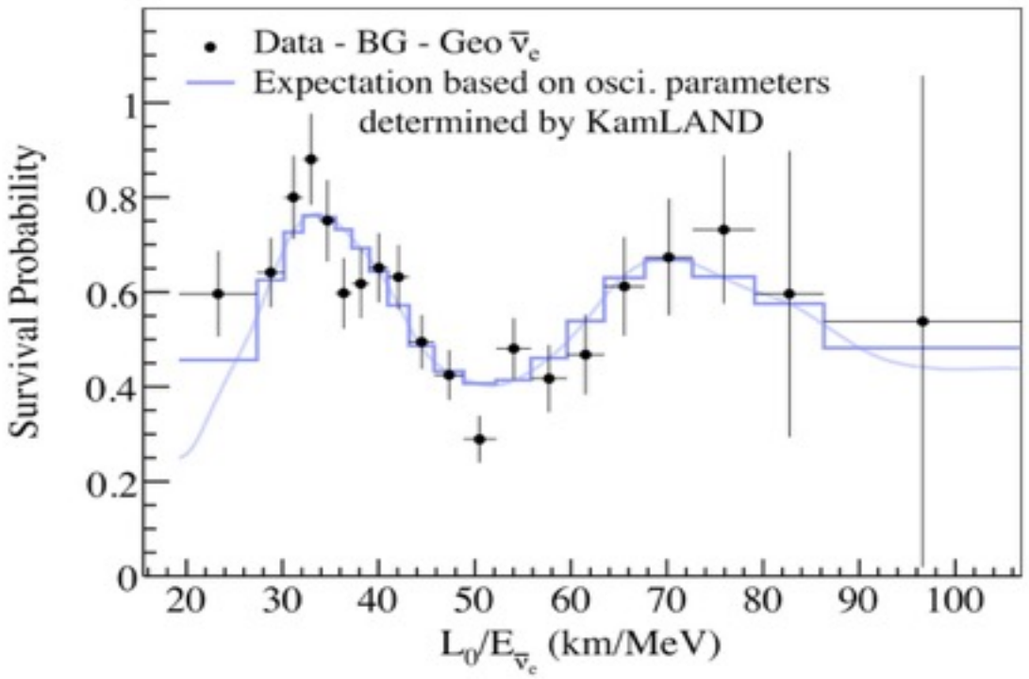
- Das Phänomen der Neutrinooszillationen wurde mittlerweile mit Neutrinos aus der Atmosphäre, aus Reaktoren und aus Beschleunigern bestätigt
- Diese Messungen können uns aber nicht die absoluten Neutrinomassen, sondern nur die Massendifferenzen liefern

$$(\text{Masse}_{\text{schokolade}})^2 - (\text{Masse}_{\text{erdbeer}})^2 = 0.002\ \text{eV}^2$$

$$(\text{Masse}_{\text{vanille}})^2 - (\text{Masse}_{\text{schokolade}})^2 = 0.00008\ \text{eV}^2$$



KamLAND Szintillatordetektor in Japan (1'000 Tonnen)



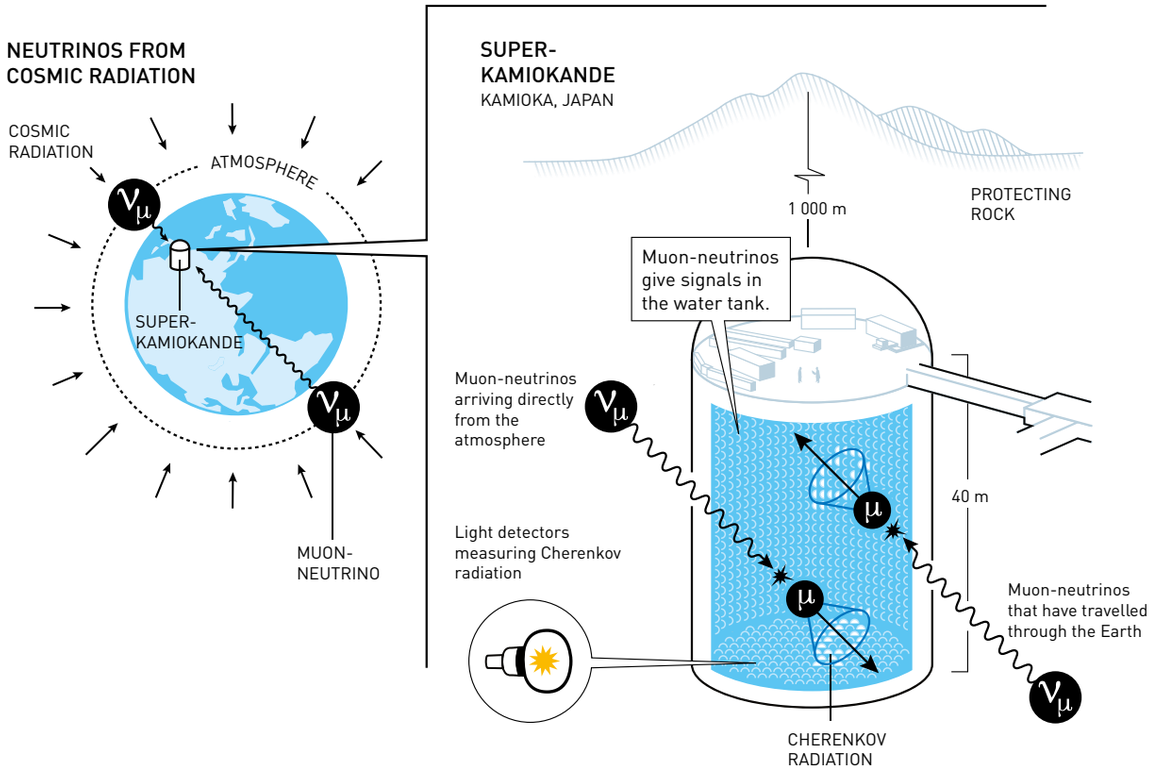
Oszillationsmuster für Reaktorneutrinos als Funktion der Energie

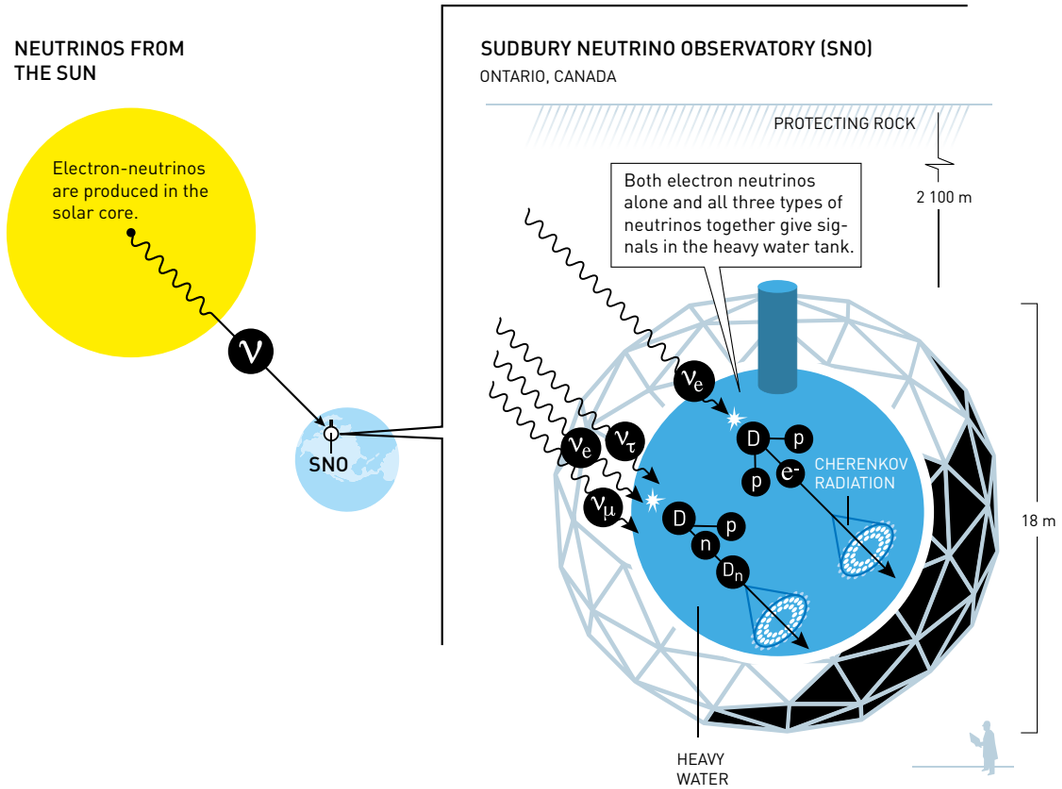
Physiknobelpreis 2015

- Für die Entdeckung der Neutrinooszillationen, die beweisen, dass Neutrinos Masse haben

Takaaki Kajita, U Tokyo

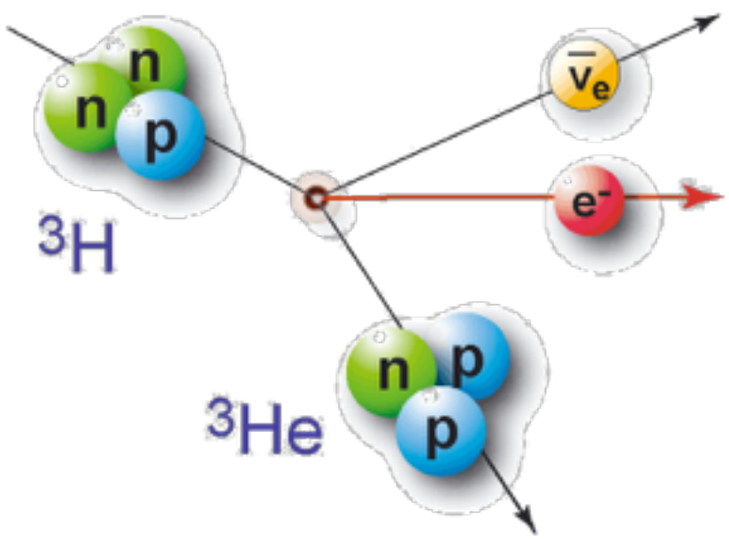
Art McDonald, Queens U





Eine der grossen offenen Fragen: die Neutrinomasse

- **Was ist die absolute Masse der Neutrinos?**
- **Erinnerung:** 1 Milliarde Neutrinos für jedes Proton (Neutrinos, auch wenn sie sehr sehr leicht sind, beeinflussen die grossräumigen Strukturen im Universum)
- Aus Experimenten, die den Tritium Betazerfall nach 3-Helium nachweisen, wissen wir:



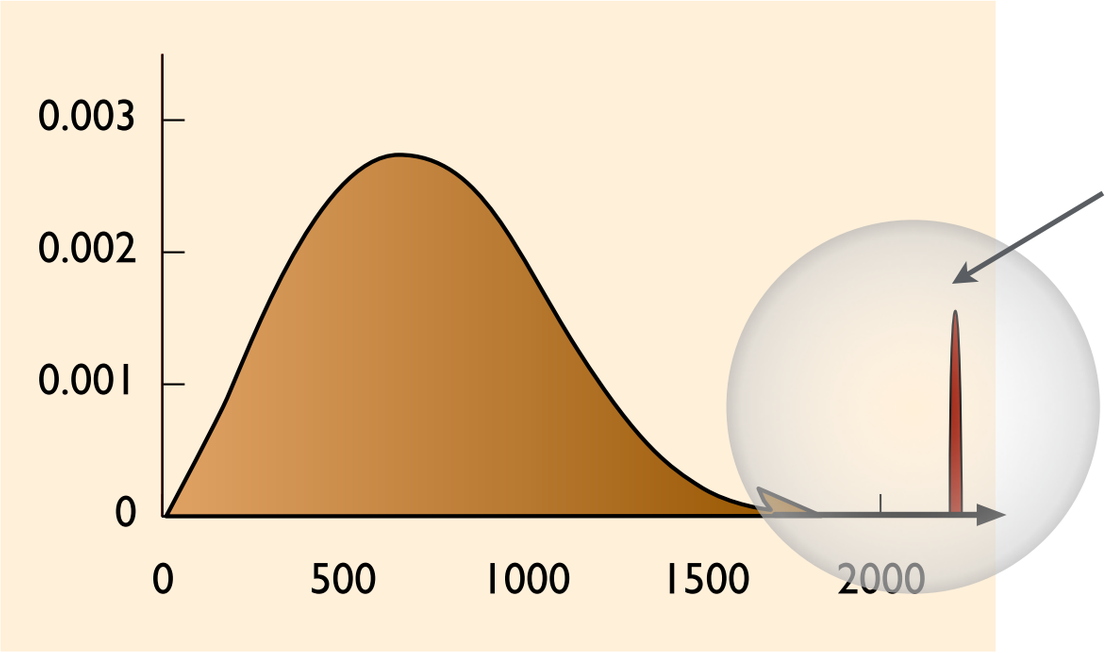
Das KATRIN Experiment auf dem langen Weg nach Karlsruhe

- die Neutrinomasse **muss kleiner sein als ~1.7 eV** (~1/300’000 × der Masse des Elektrons)

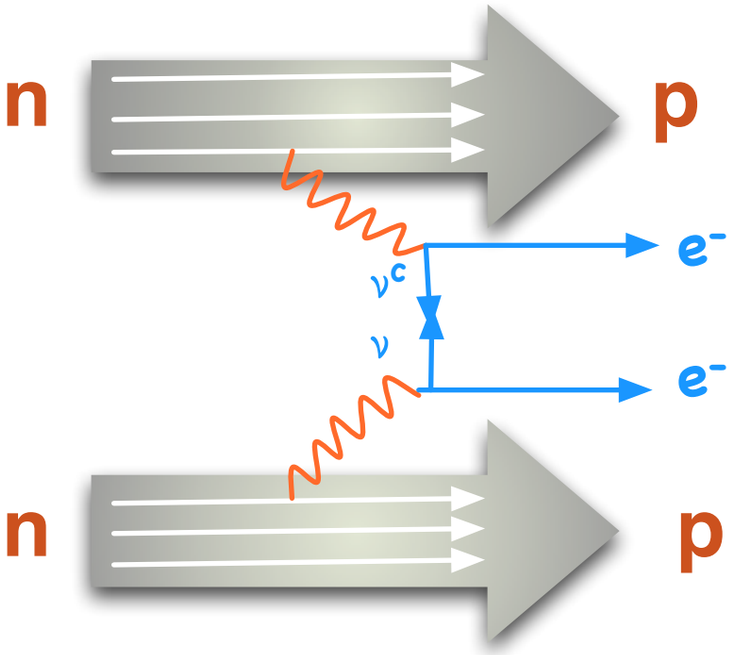
Das KATRIN Experiment in Karlsruhe

Wir sind zurück beim (neutrinolossen doppelten) Betazerfall

- Ein seltener Kernzerfall, mit einer **Halbwertszeit > 10 Milliarden mal grösser als das Alter des Universums!**
- **Kann nur dann stattfinden, falls das Neutrino eine endliche Masse hat,** *die Halbwertszeit des Zerfalls is umgekehrt proportional zu der Neutrinomasse*

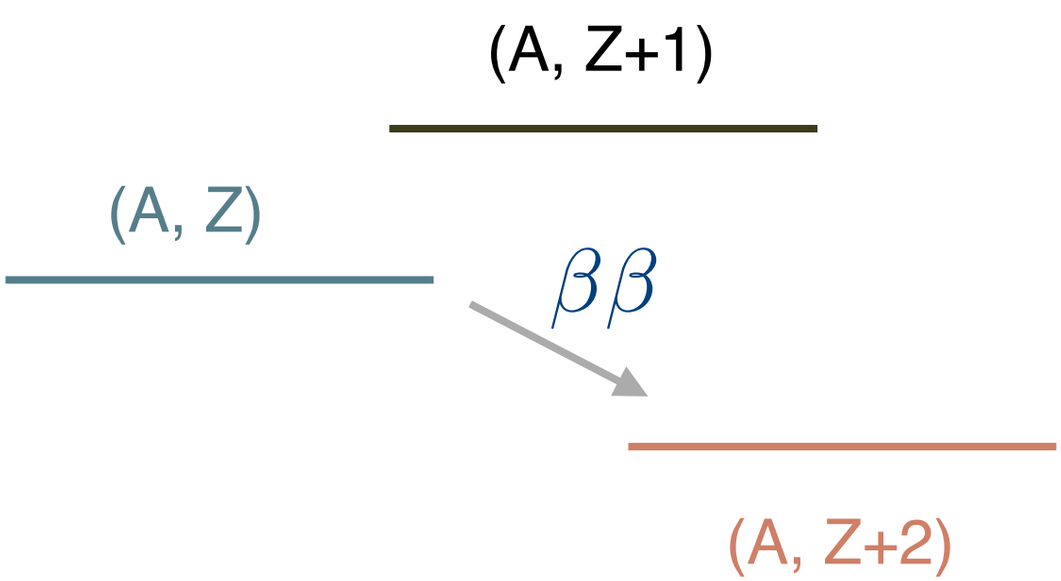


Erwartetes Signal: eine scharfe Linie!



Der (neutrinobegleitete) Doppelbetazerfall

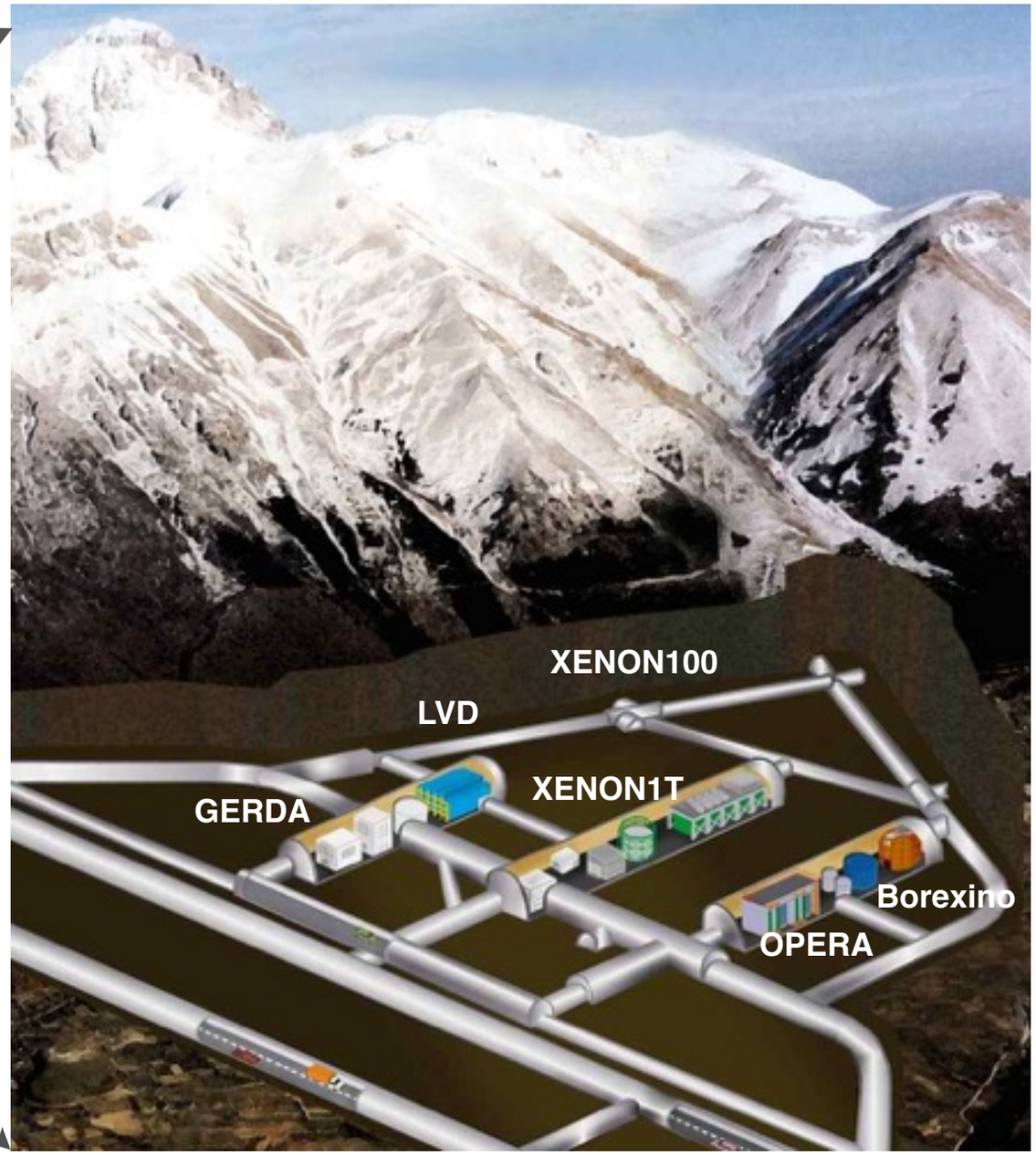
- Vorhergesagt von Maria-Goeppert Mayer, 1935
- Nobelpreis 1963, für Arbeiten zur Struktur des Atomkerns (Schalenmodell)
- Der Zerfall mit 2 Neutrinos wurde bereits in 11 Kernen beobachtet, mit $T_{1/2} > 10^{18}$ y
- ^{48}Ca, ^{76}Ge, ^{82}Se, ^{96}Zr, ^{100}Mo, ^{116}Cd, ^{128}Te, ^{130}Te, ^{136}Xe, ^{150}Nd, ^{238}U



Das GERDA Experiment am Gran Sasso Labor

- Das Gran Sasso Untergrundlabor in Italien: mehrere Neutrinoexperimente
- Es wird von einem 1400 m hohen Fels von der kosmischen Strahlung abgeschirmt

Der “Corno Grande”
in den Abruzzen

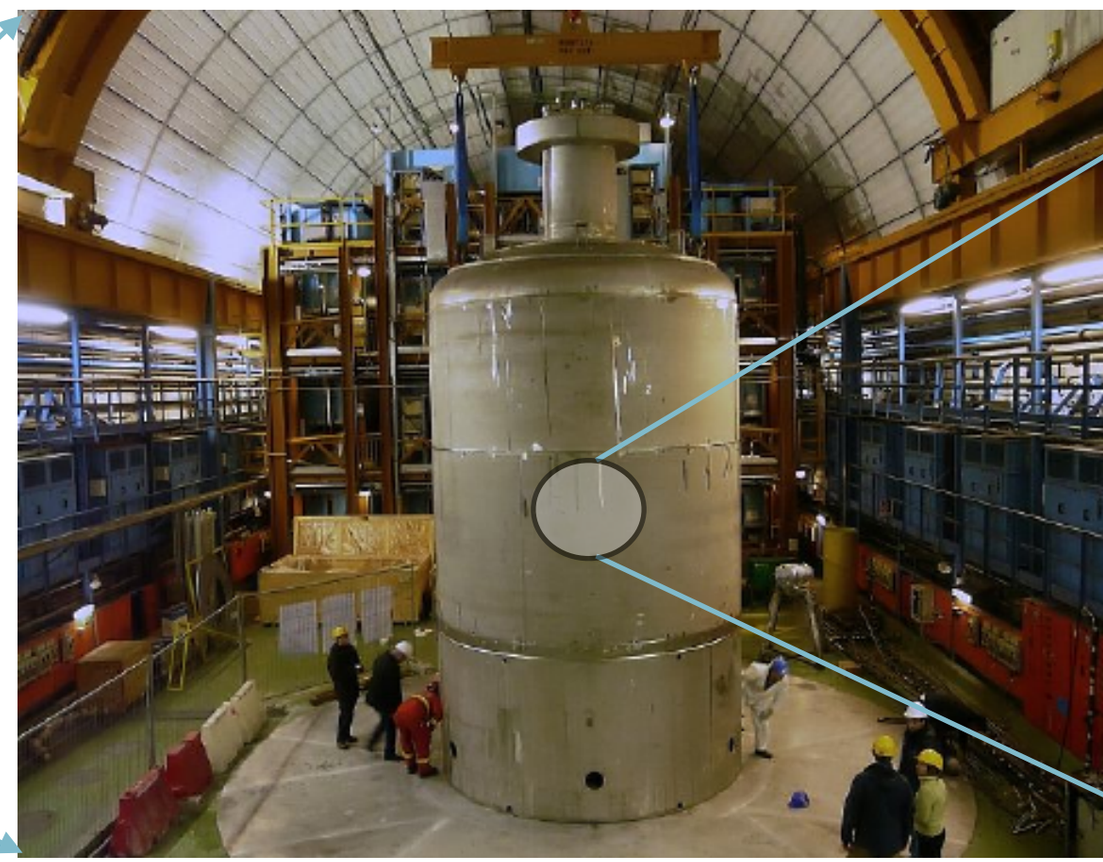


Ein riesiges Physiklabor,
tief unter dem Fels

GERDA: GERmanium Detector Array

- **Ein Experiment, das angereicherte ^{76}Germanium Kristalle** in 650 Tonnen flüssiges Argon (bei -186 Grad Celsius) betreibt

Der Kryostat mit flüssigem Argon während der Installation



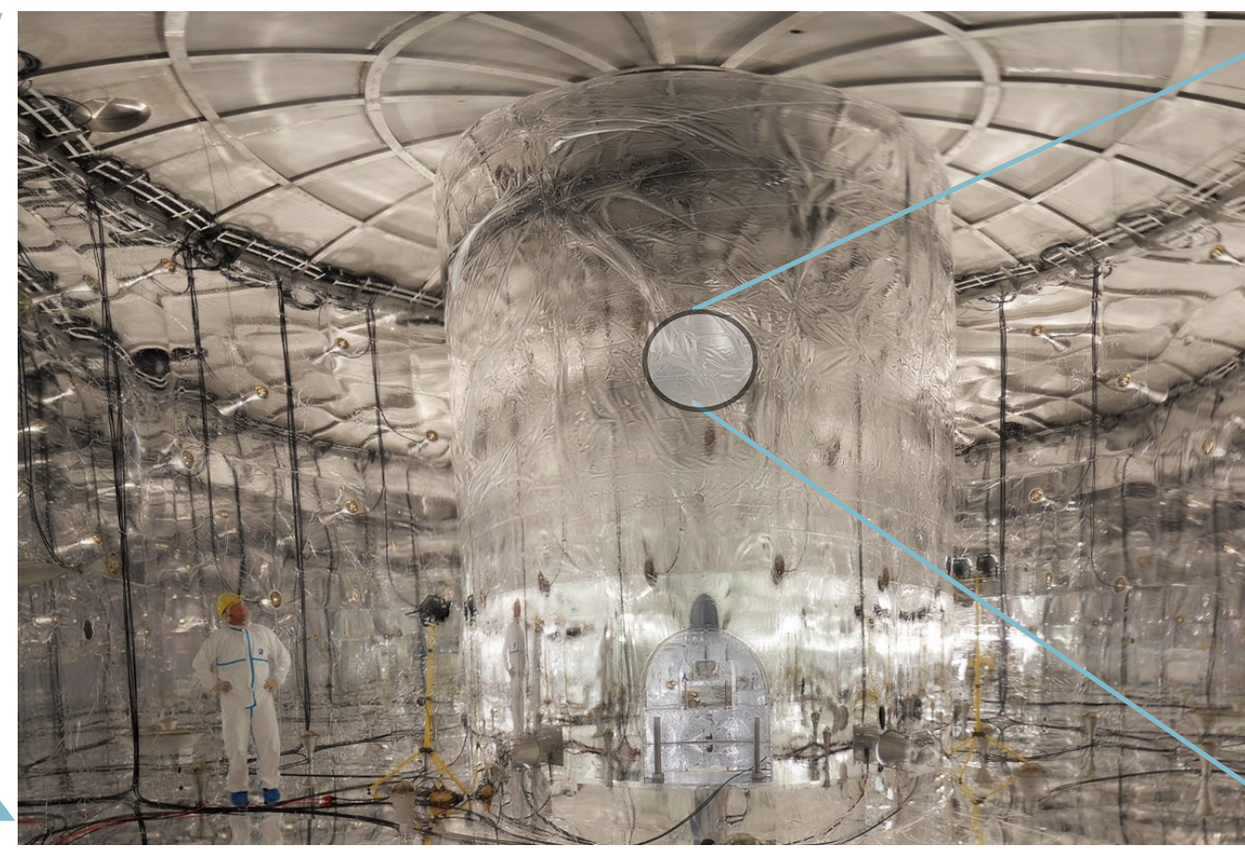
Ziel: die Neutrinomasse bis hinunter zu 0.1 eV zu messen

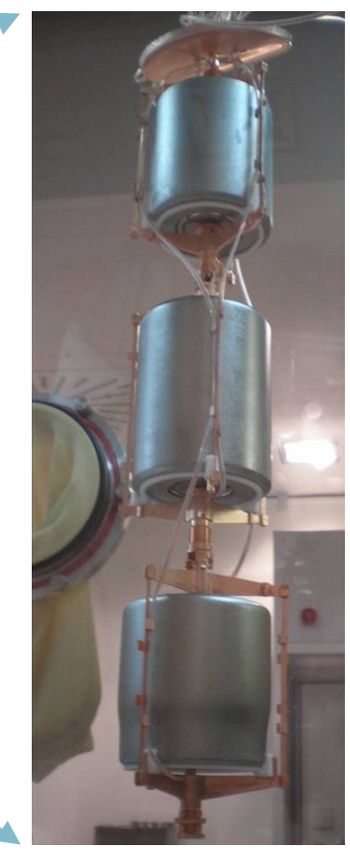
(zB, die Masse des Elektrons: 511’000 eV)

GERDA: GERmanium Detector Array

- **Ein Experiment, das angereicherte ^{76}Germanium Kristalle** in 650 Tonnen flüssiges Argon (bei -186 Grad Celsius) betreibt

Der Kryostat mit flüssigem Argon während der Installation



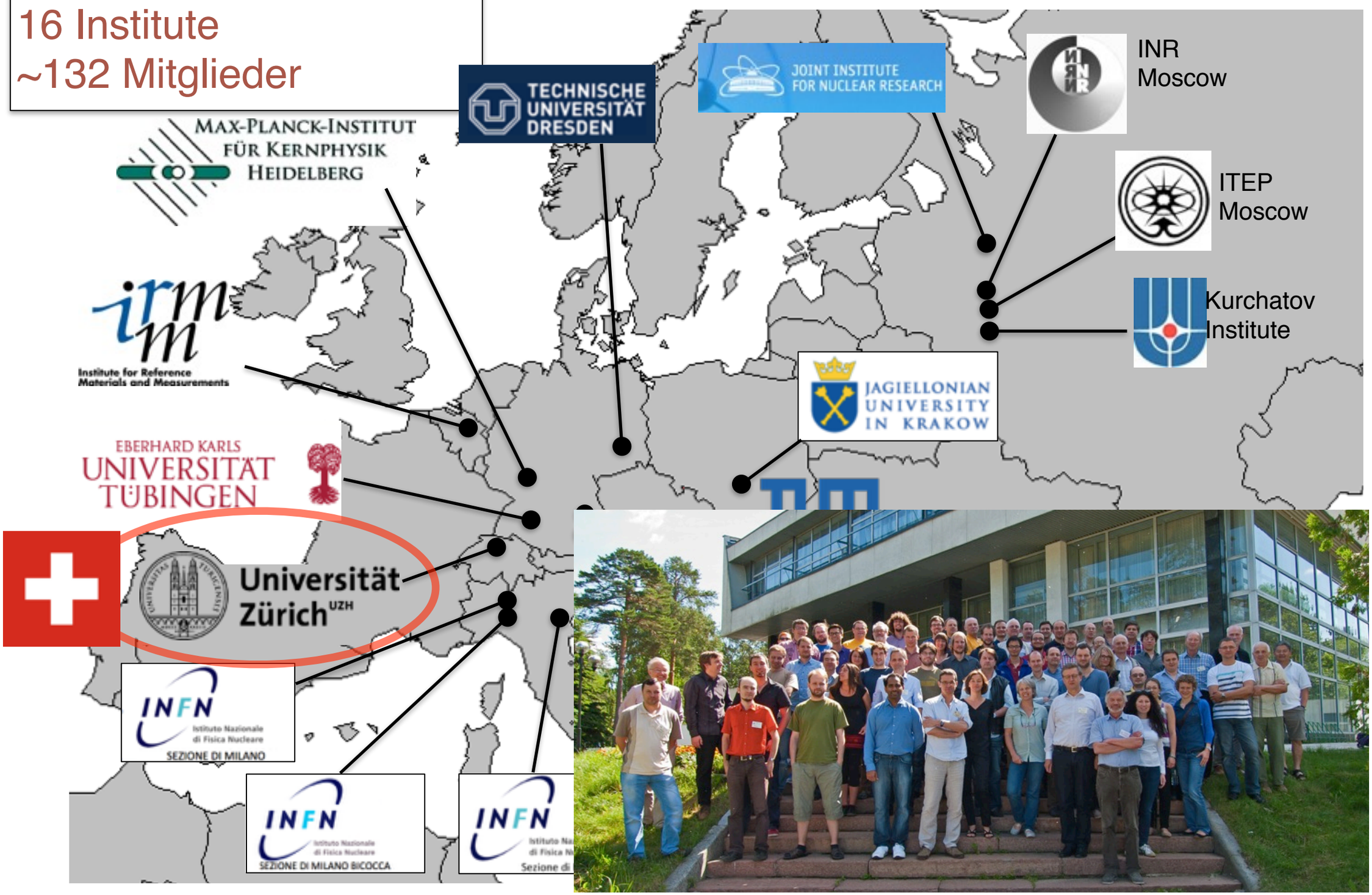


Ziel: die Neutrinomasse bis hinunter zu 0.1 eV zu messen

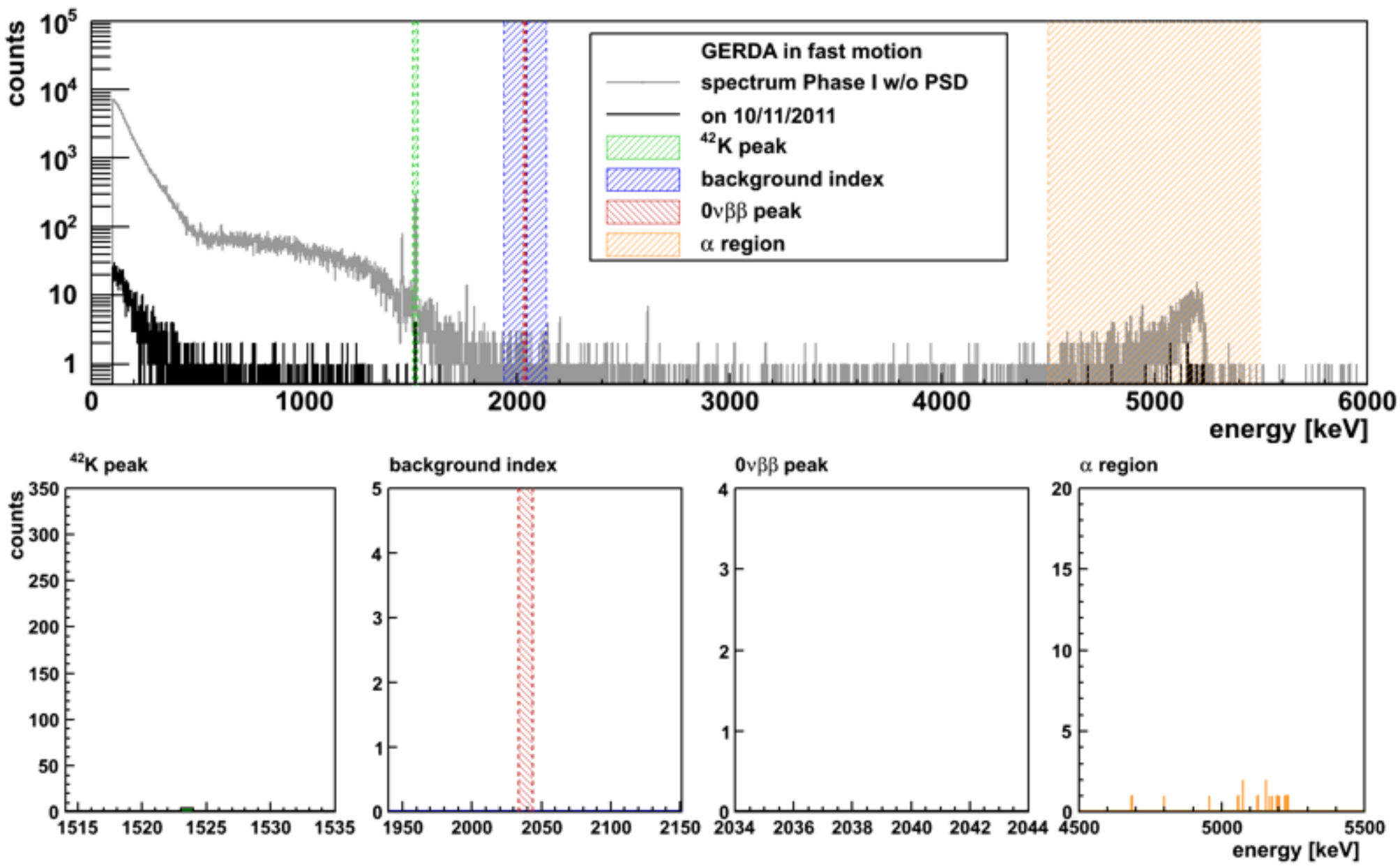
(zB, die Masse des Elektrons: 511’000 eV)

Die GERDA Kollaboration

16 Institute
~132 Mitglieder

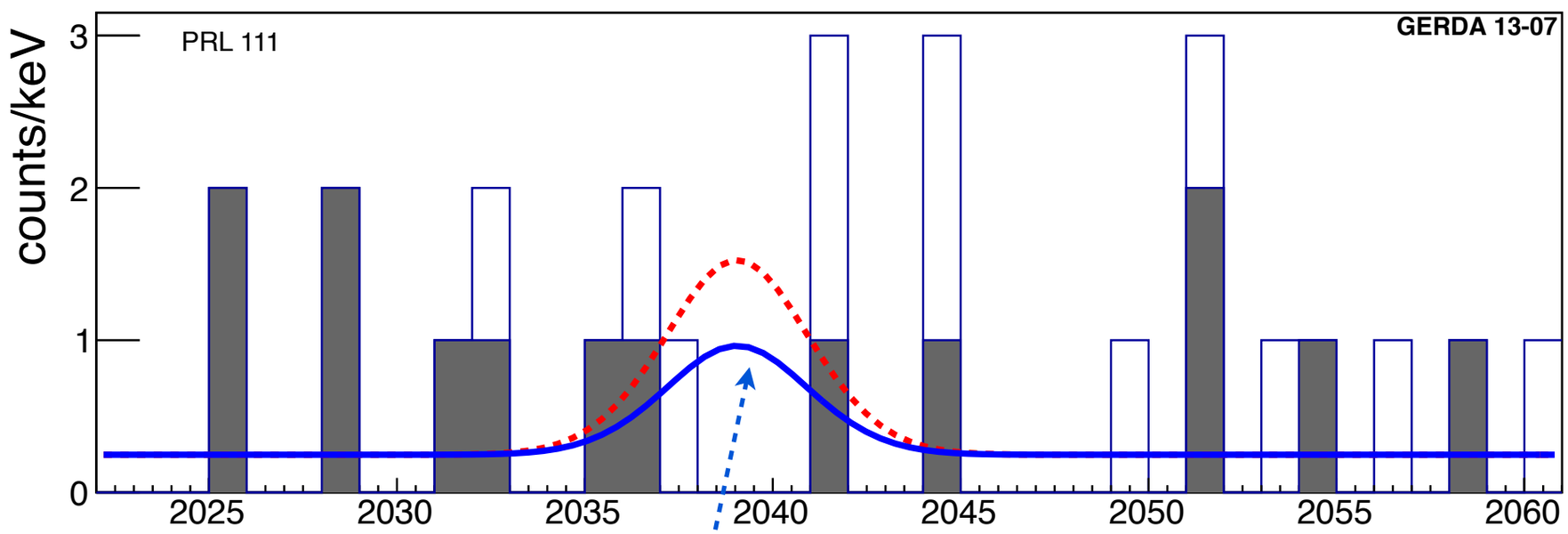


GERDA Phase I Untergrund



GERDA Phase I Ergebnis

- Bisher kein Nachweis des neutrinolosen Doppelbetazerfalls
- Untere Grenze auf die Halbwertszeit des Zerfalls:

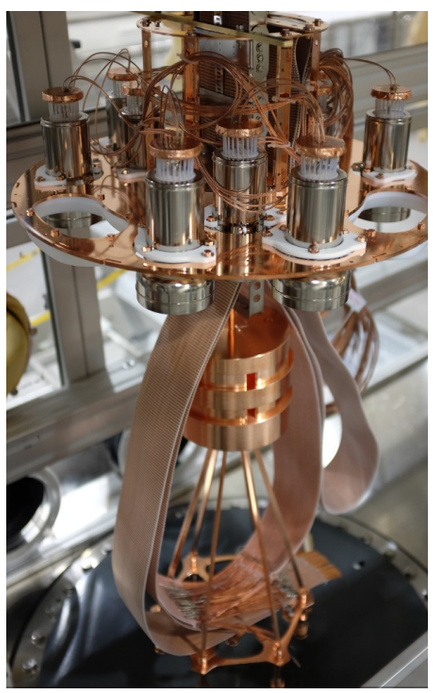


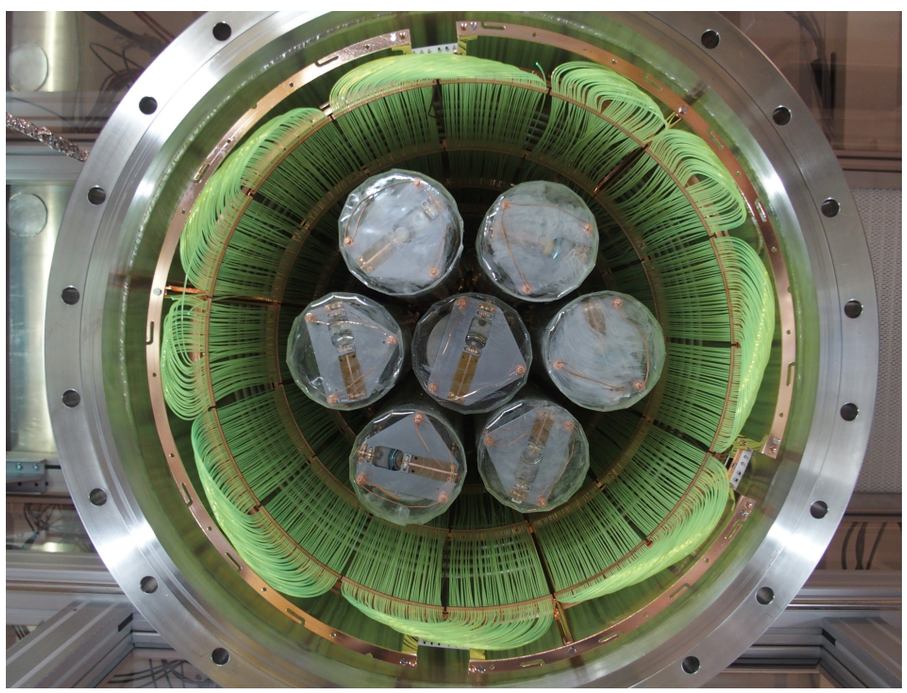
$$T^{0\nu}_{1/2} > \ 2.1 \times 10^{25}\,\mathrm{yr}\ (90\%\,\mathrm{C.L.})$$

$$m_{\beta\beta} < 0.2 - 0.4\,\mathrm{eV}$$

GERDA Phase II

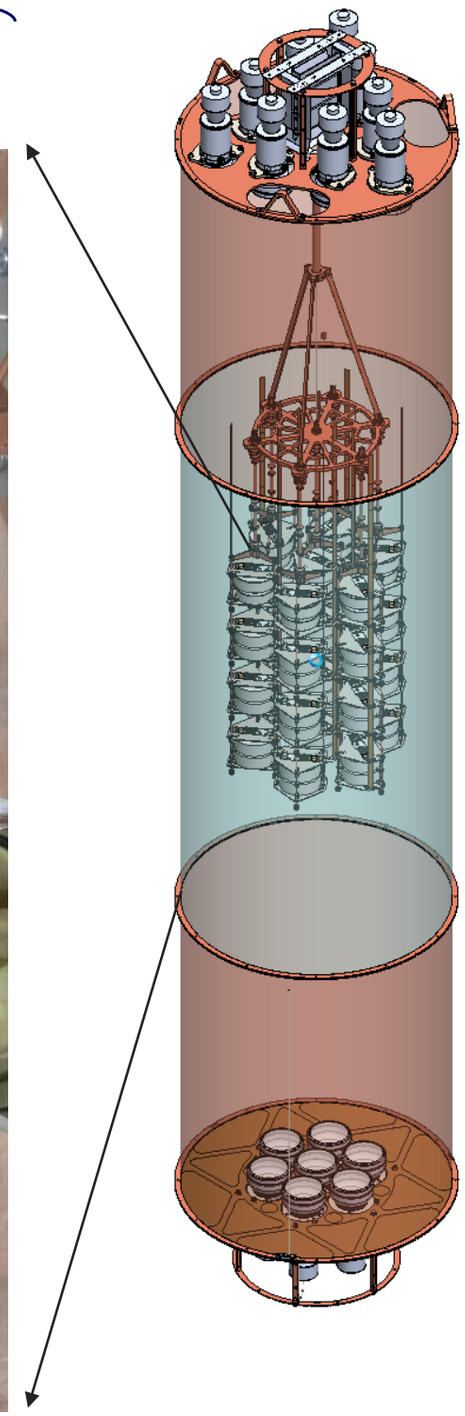
- 30 neue Germanium-Detektoren installiert
- Flüssiges Argon mit Photodetektoren instrumentiert
- Start der Datenaufnahme: Januar 2016
- Ziel: $T_{1/2} \geq 10^{26}$ Jahre zu messen





Phase II

4 strings /w BEGe det
+3 strings coaxial det



Ø = 0.49 m
h = 2.6 m

Zusammenfassung

- **Neutrinos sind *anders*!**
- Starke Evidenz für Neutrinomassen (und daher Physik jenseits des Standardmodells)
- **Jedoch bleiben viele Fragen offen:**

  ➡ was ist die absolute Massenskala der Neutrinos, und was ist ihre Rolle bei der Strukturbildung im Universum?

  ➡ sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen? $\nu = \bar{\nu}$?

  ➡ verhalten sich Neutrinos und Antineutrinos gleich?

  ➡ haben Neutrinos etwas mit der Beobachtung zu tun, dass es im Universum viel mehr Materie als Antimaterie gibt?

  ➡ warum sind Neutrinos so viel leichter als die anderen Leptonen und Quarks?

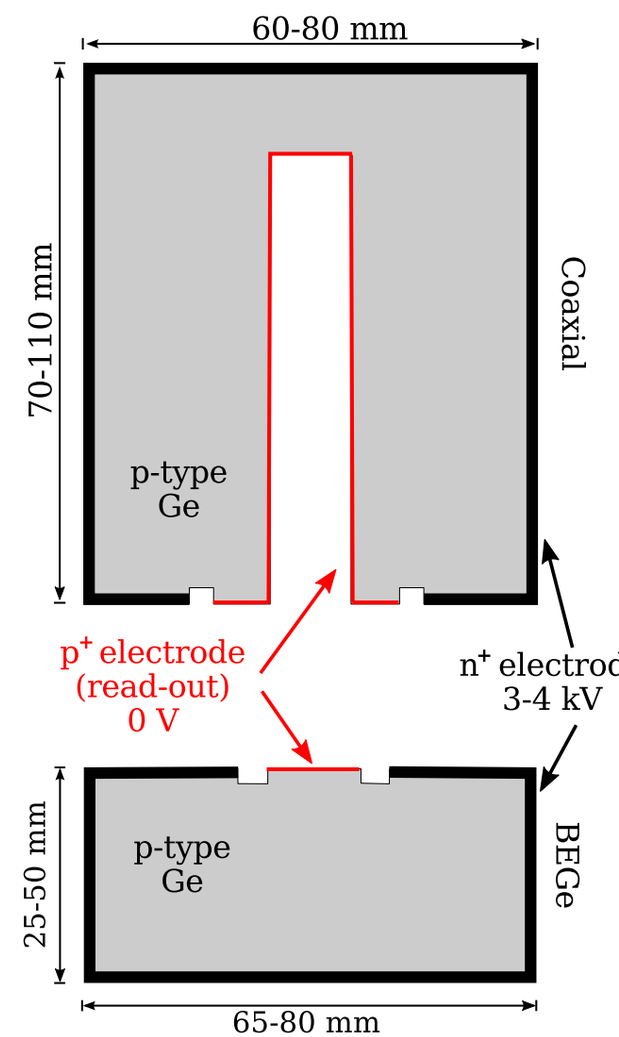
- **Neutrinos haben uns ein neues Fenster zum Universum eröffnet! Und es bleibt weiterhin spannend...**

Ende

Die GERDA Detektoren

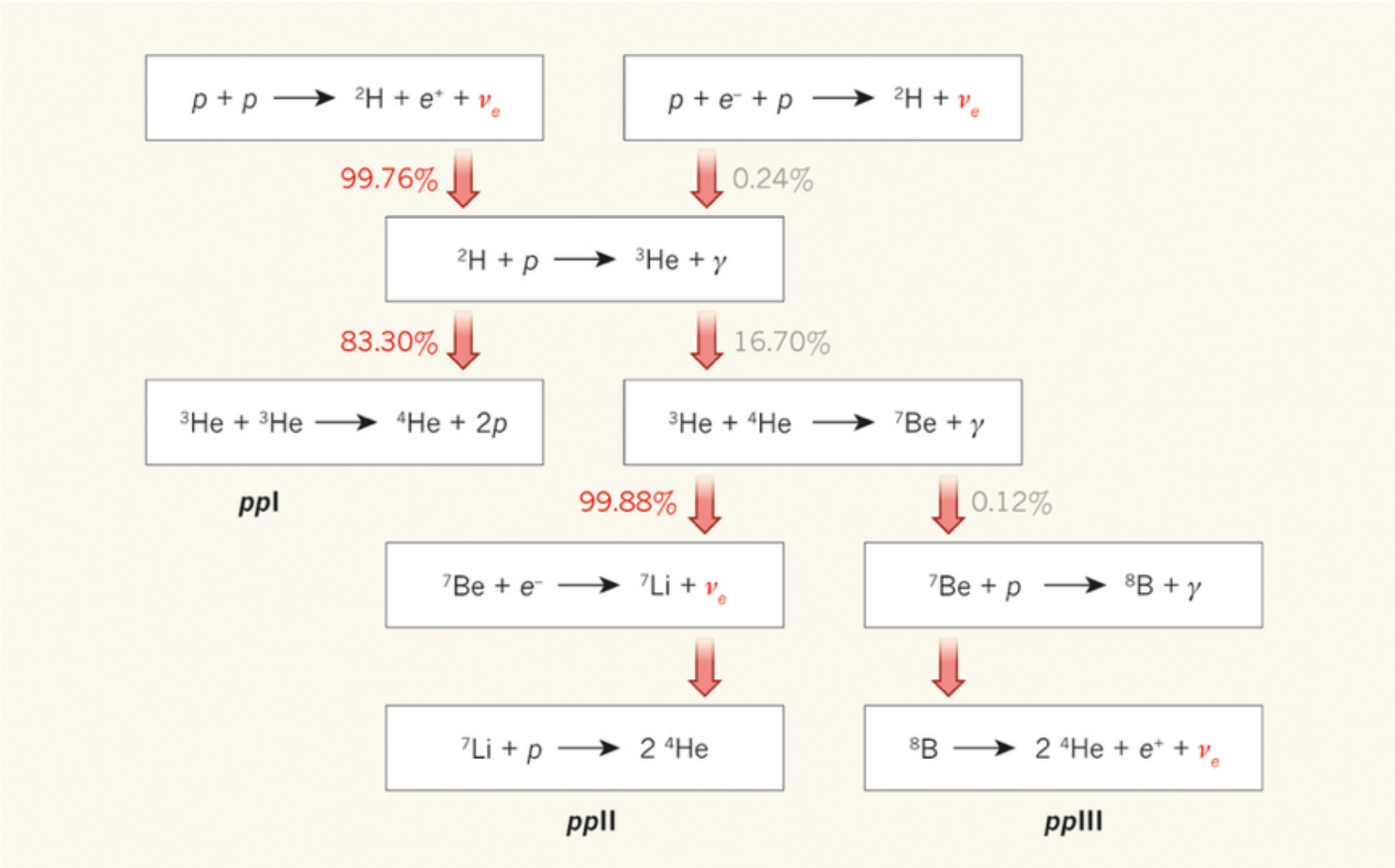
- Gesamtmasse in Phase I = 17.7 kg
  - ➡ Angereichert in ^{76}Ge: 86%

- Coaxial, p-type, 2.4‰ FWHM at Q_{bb}



- Broad energy germanium (BEGe): p-type,1.6‰ FWHM at Qbb

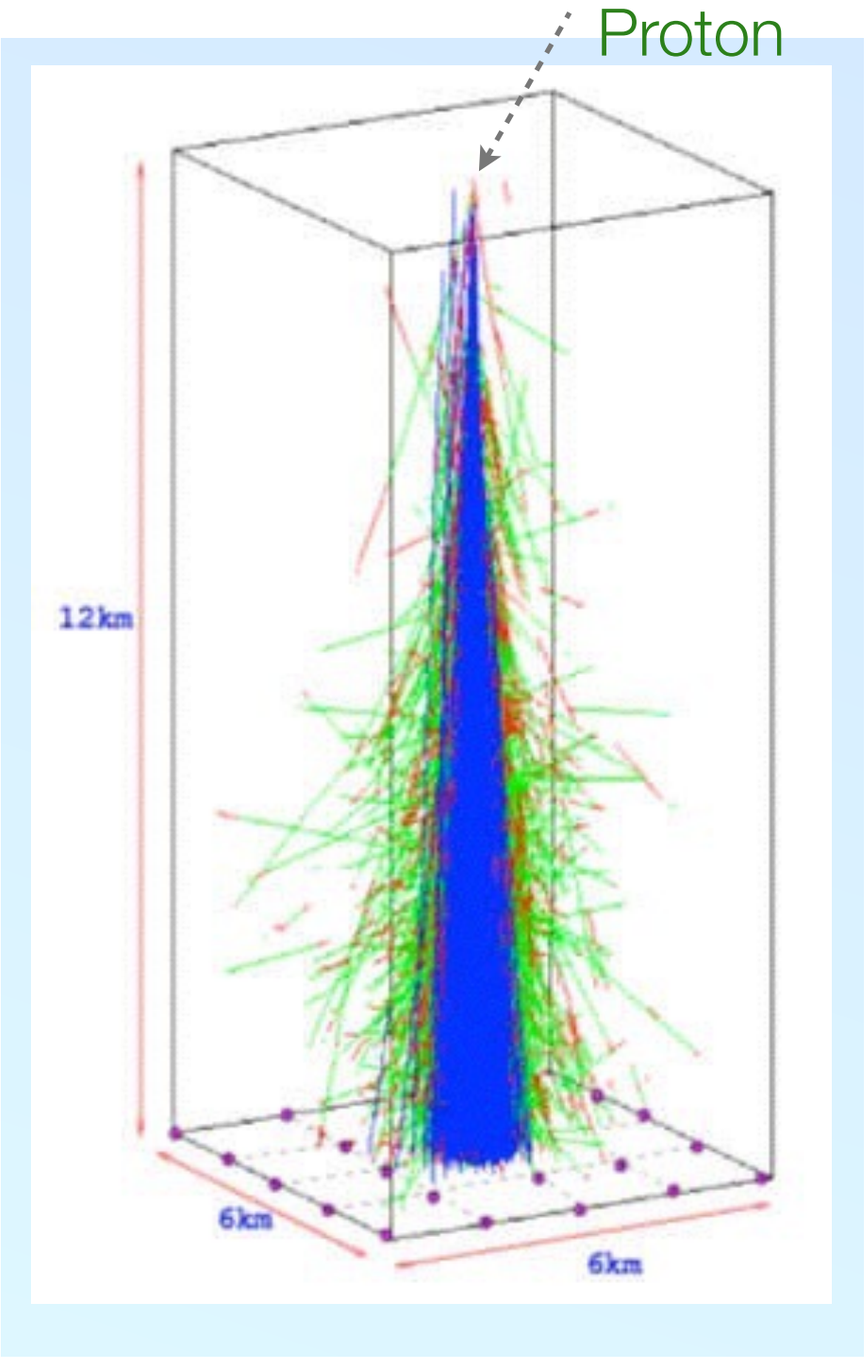
Die pp-Kette in der Sonne



Neutrinos und Kosmische Strahlung

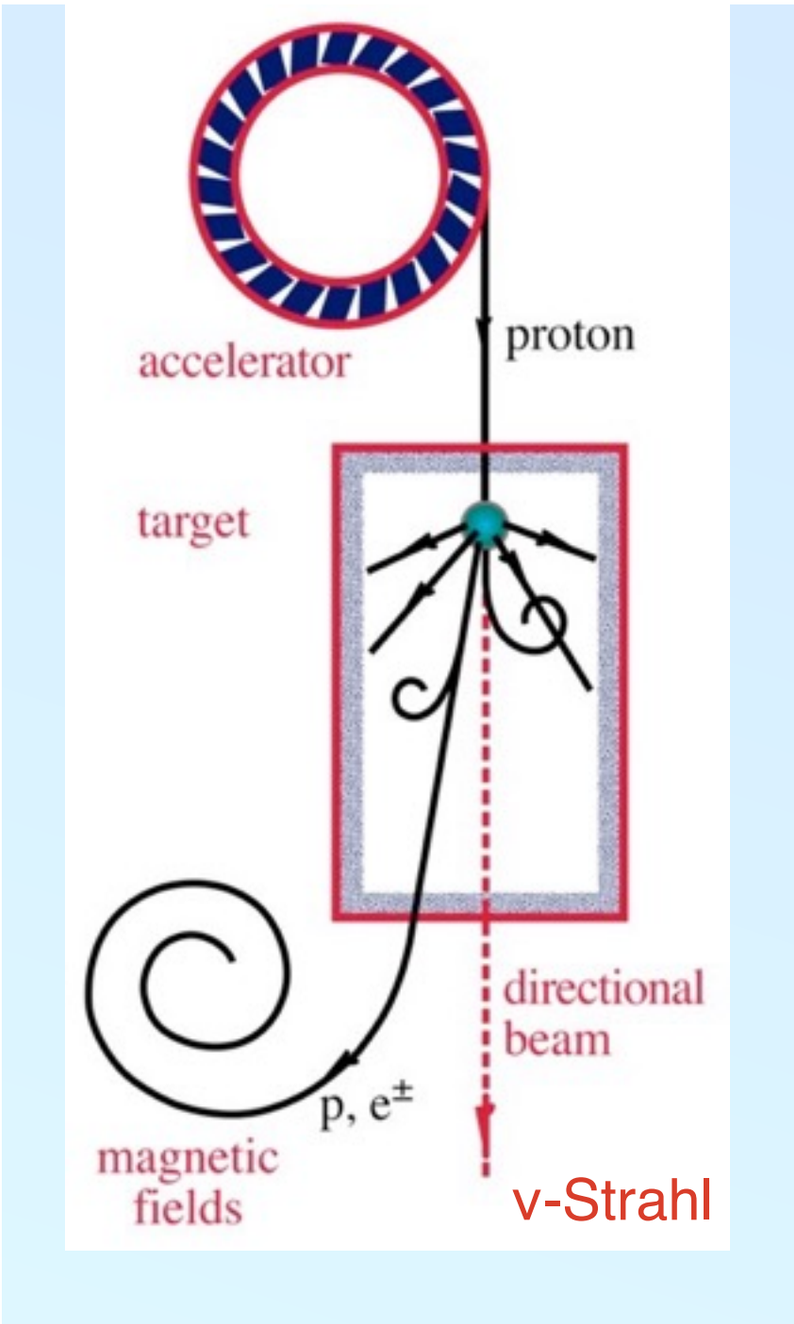
- **Eine weitere offene Frage:** woher kommt die primäre kosmische Strahlung?

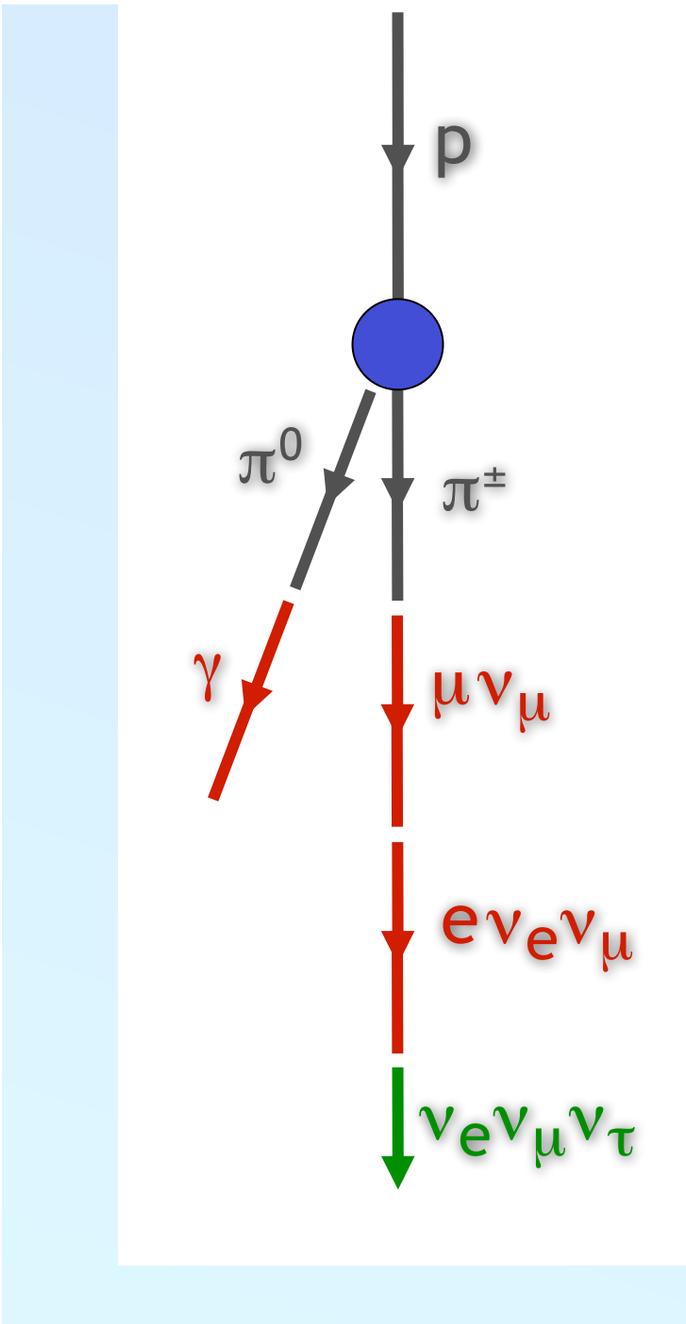
Luftschauer:
10^{19} eV primäres Teilchen
100 Milliarden sekundäre Teilchen auf Meereshöhe



Neutrino-Strahlen aus dem Weltall

Beschleuniger im Weltall funktionieren ähnlich wie Beschleuniger auf der Erde....





Primäres Teilchen: ein Proton

Target:
Protonen oder Photonen

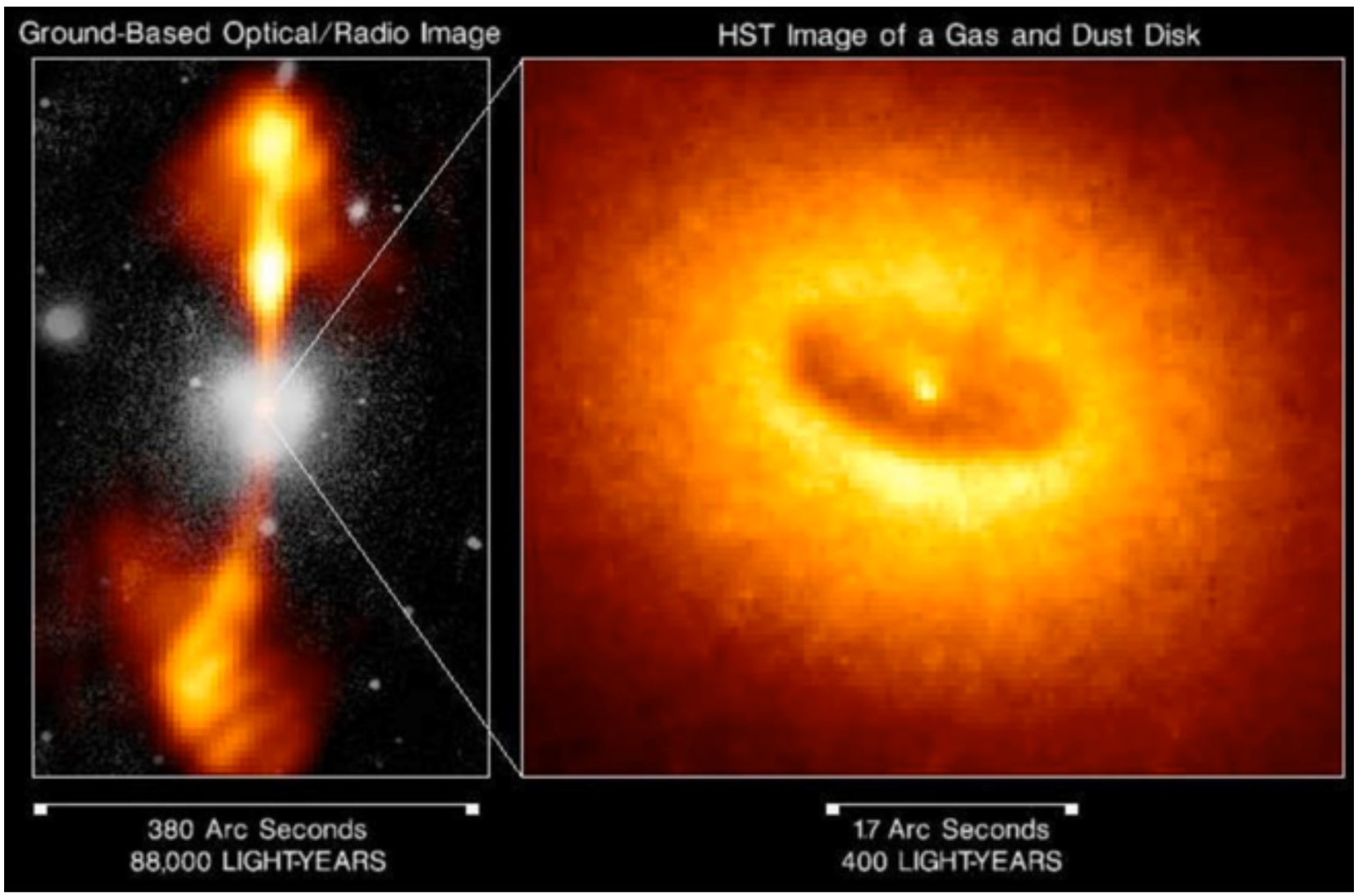
Vergleichbare Flüsse von Photonen und Neutrinos

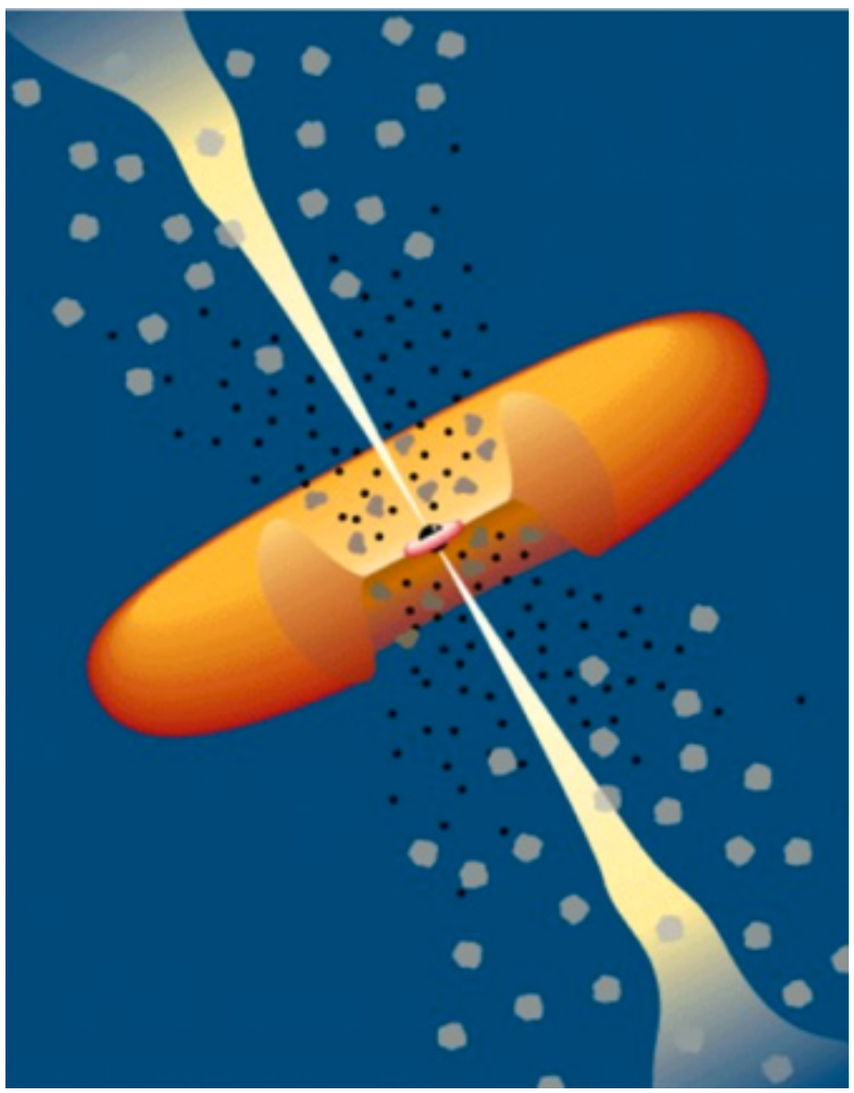
Gleiche Flüsse aller Flavours durch Oszillationen

Neutrinos werden nicht durch magnetische Felder abgelenkt - zeigen daher direkt zur Quelle

Kosmische Beschleuniger: Aktive Galaktische Kerne

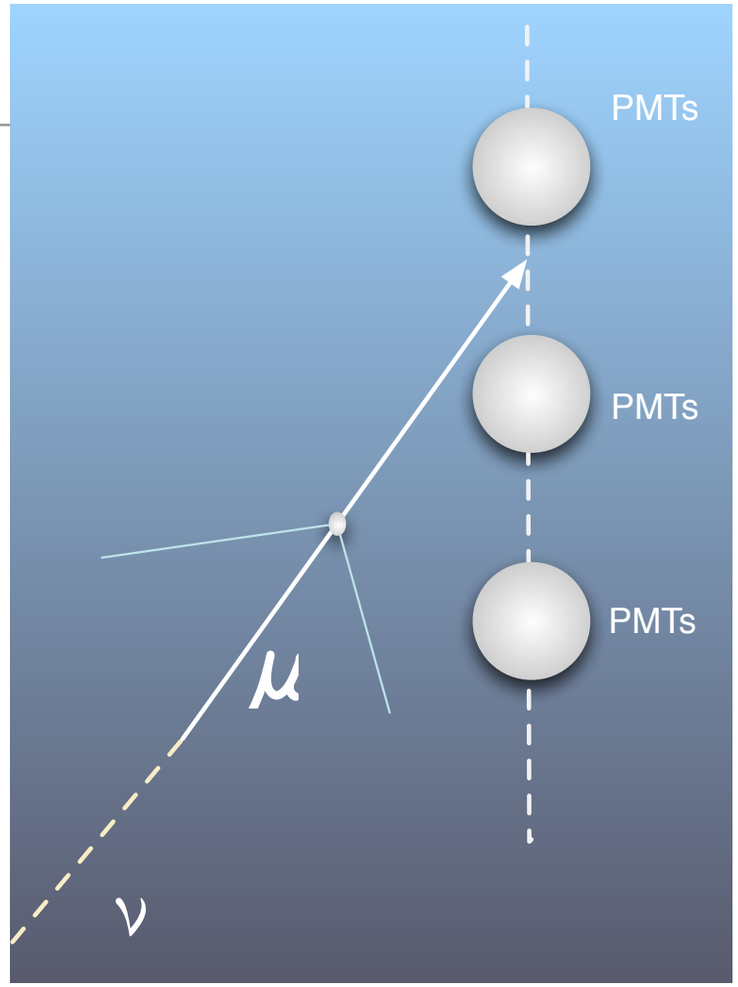
AGNs: zentrale Maschine ist eine Akkretionsscheibe, die um ein supermassives schwarzes Loch rotiert





Hier: optisches und Radiobild eines AGNs im Virgohaufen
Zentrales Objekt: ein schwarzes Loch mit 10 Millionen Sonnenmassen

Neutrino-Teleskope



- **Prinzip**:

  Hochenergetische Neutrinos erzeugen Myonen unterhalb des Teleskops

  Myonen produzieren Cherenkov-Licht im Medium

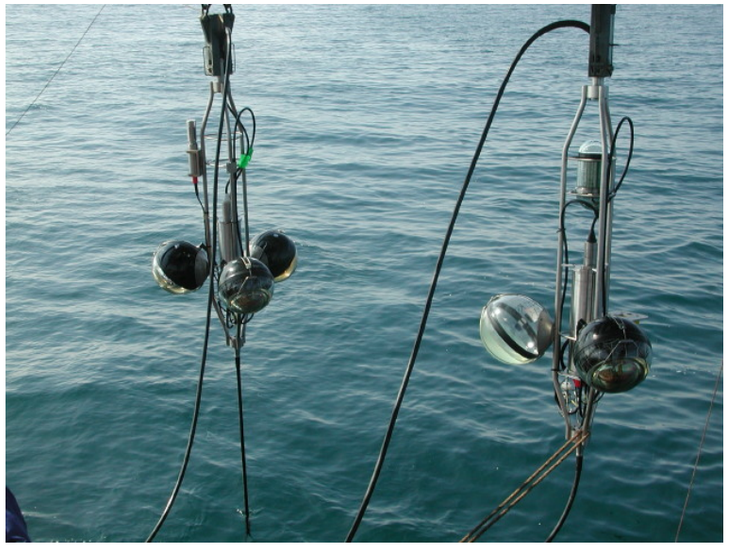
  aus dem Cherenkovkegel => Myonenspur => Neutrinorichtung

- Erde: schirmt den Detektor gegenüber kosmischer Strahlung ab

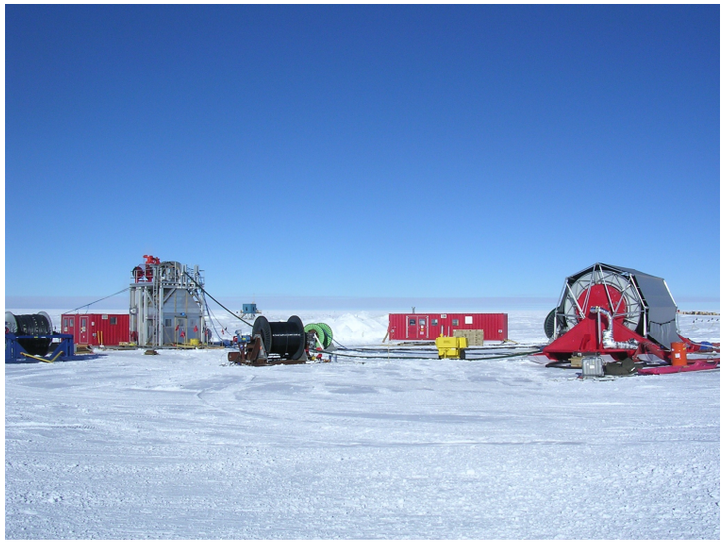
- **Typische Teleskope/Detektoren:**

  Wasser oder Eis + Photodetektoren (PMTs)

Baikalexperiment am Baikalsee



Antares im Mittelmeer

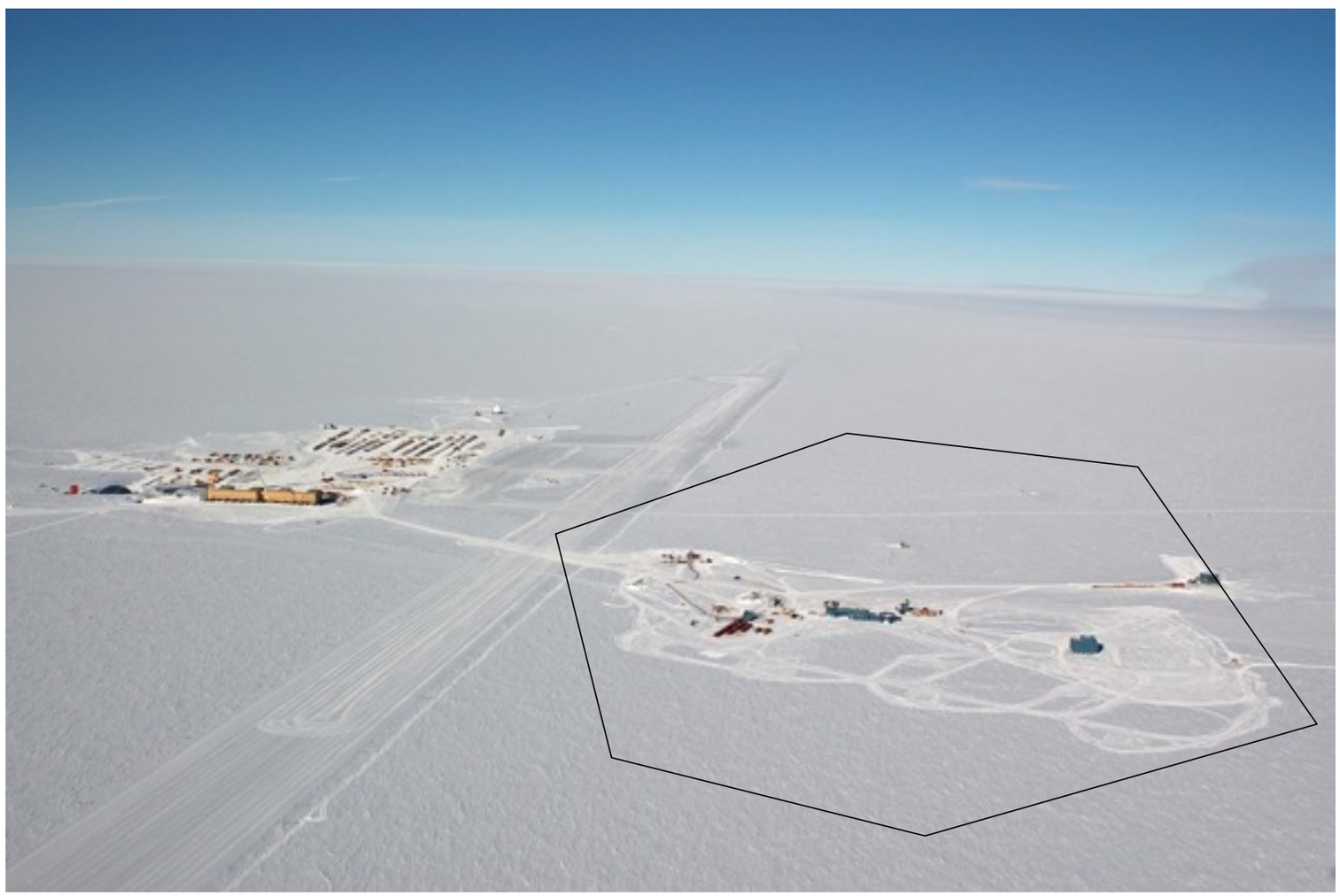


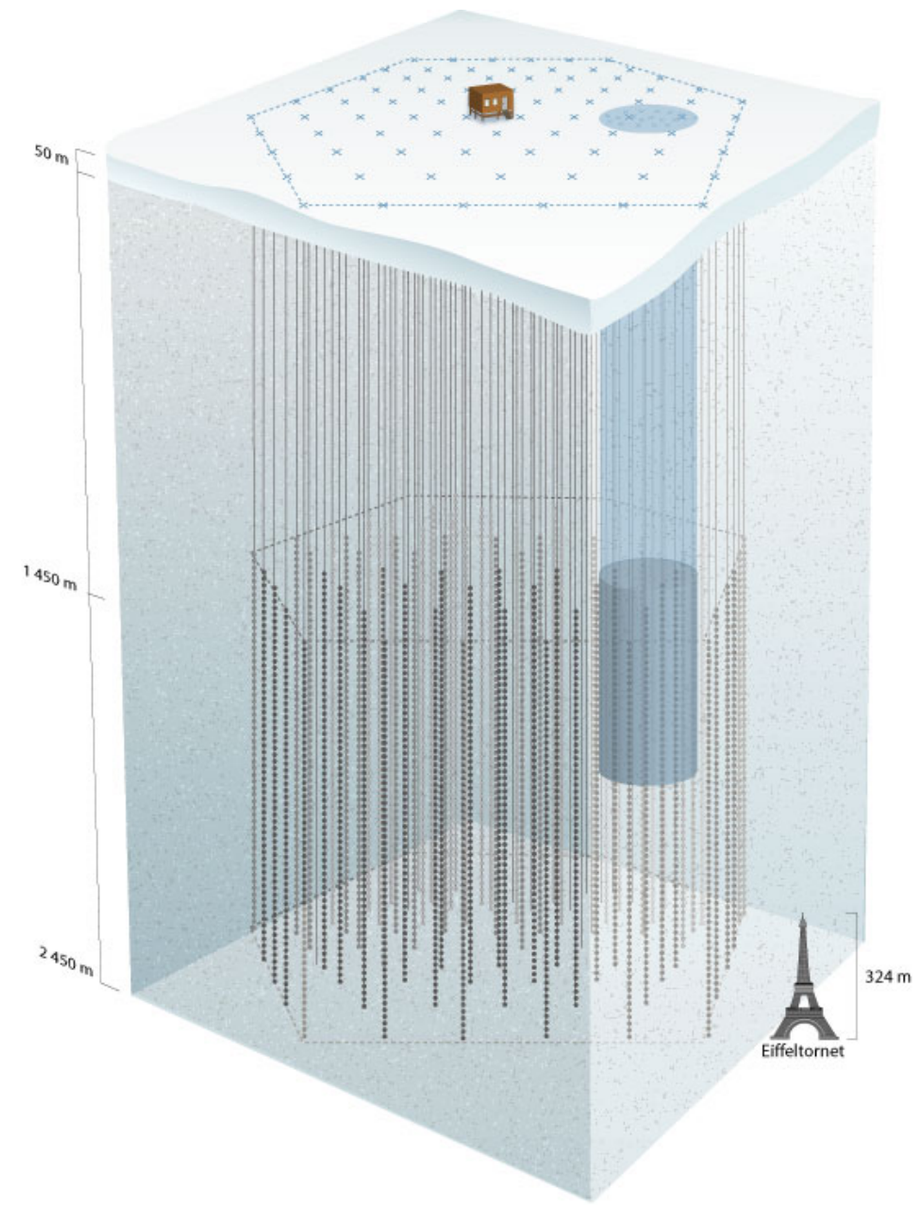
IceCube am Südpol

Scott Amundsen Station am Südpol

1 Kubikkilometer Eis ist mit Photodetektoren instrumentiert

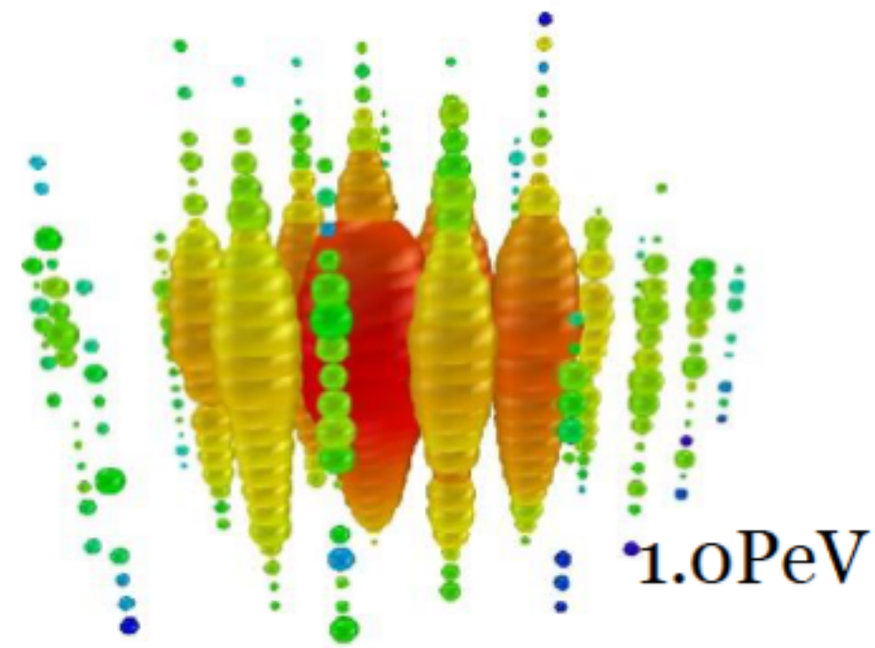
- 86 Strings, 5160 digitale, optische Module

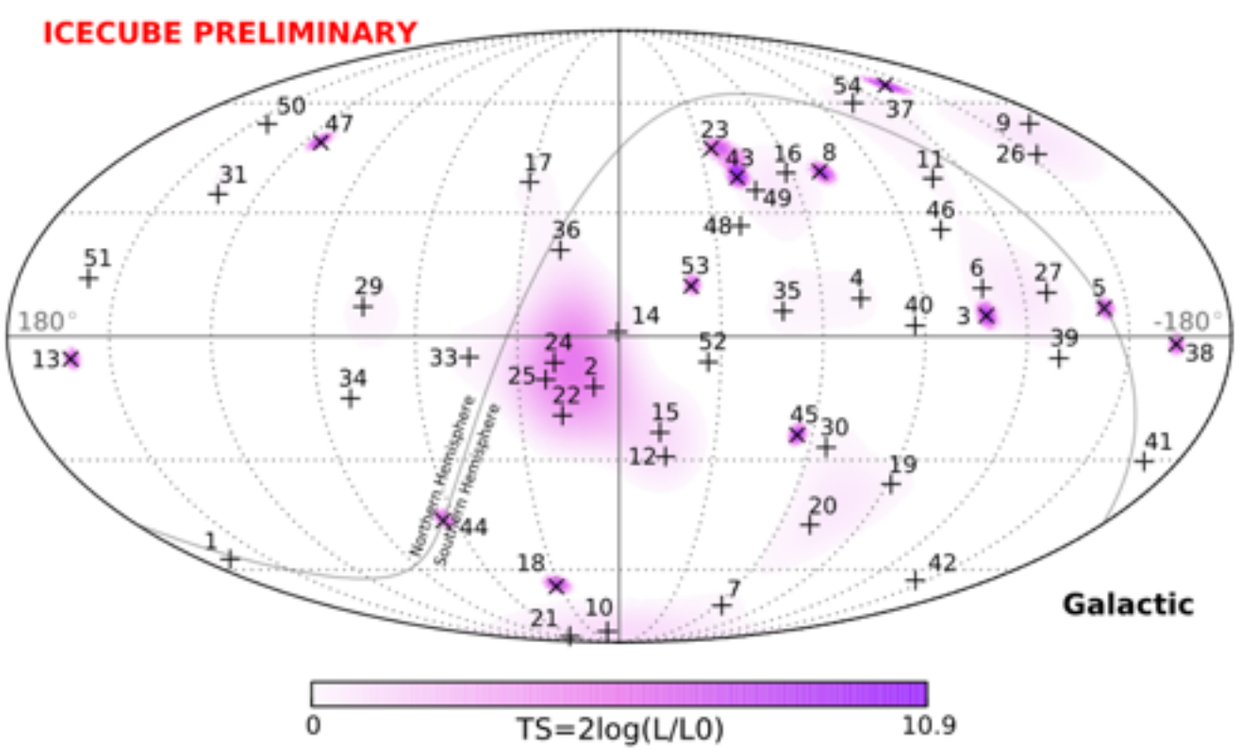


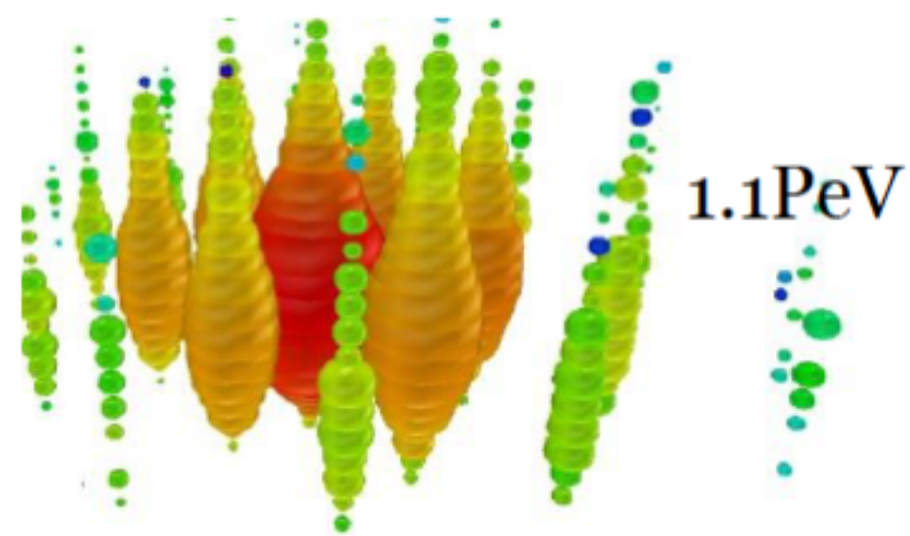
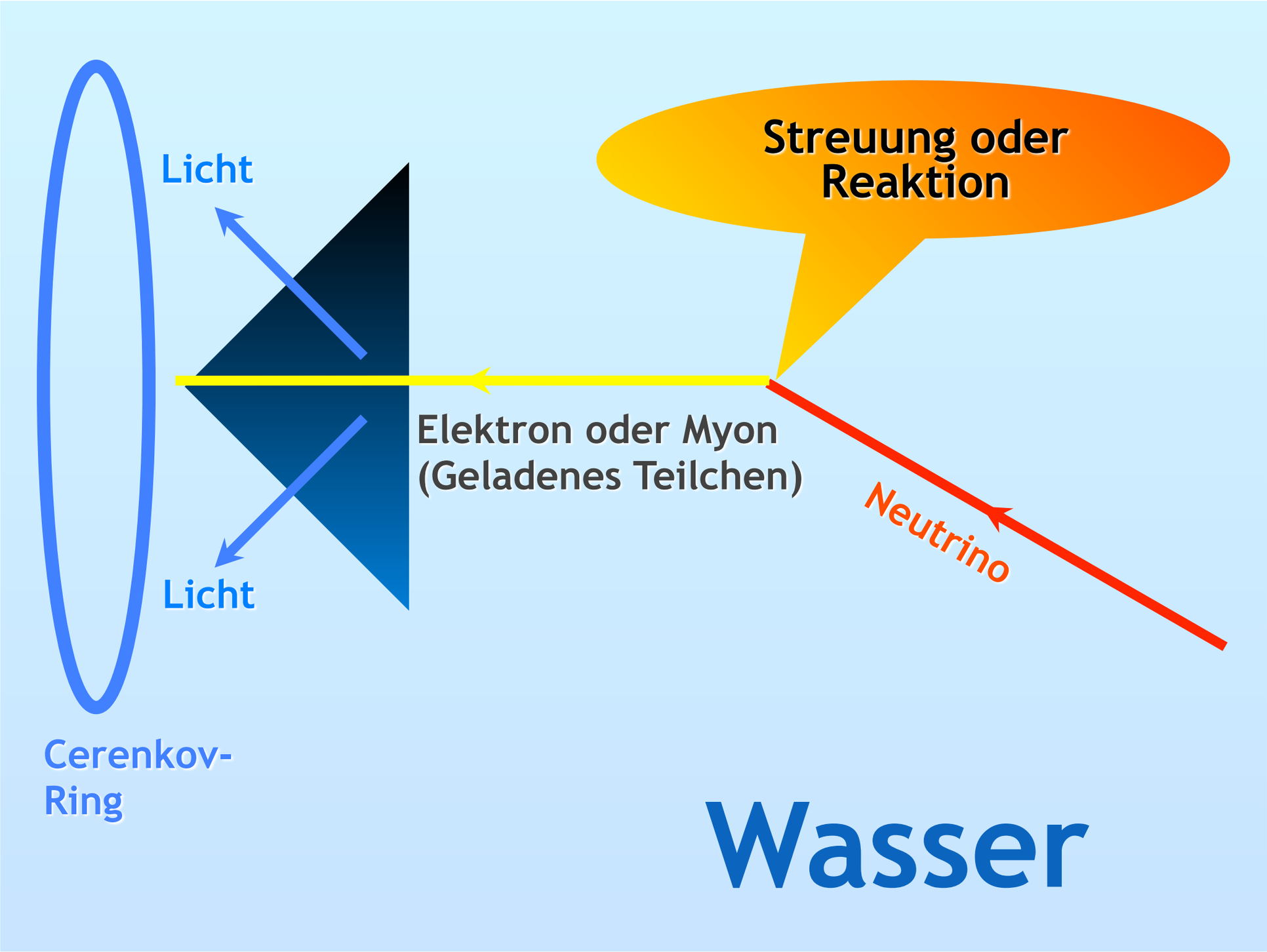


IceCube am Südpol

- Erster Nachweis extra-terrestrischer Neutrinos, mit Energien ≥ 1000 TeV
- Insgesamt 28 Ereignisse mit sehr hohen Energien
- Wo kommen diese her?







Der Cerenkov Effekt