

Neutrinos

Geschichte und Geschichten zum
Nobelpreis 2015

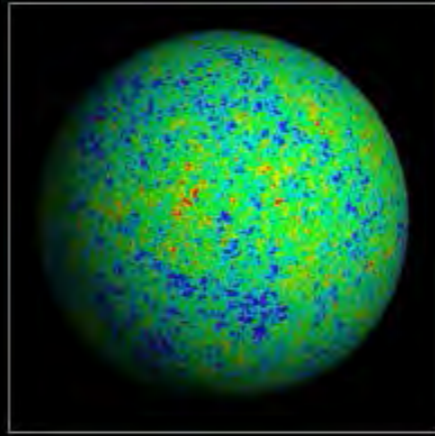


Christian Spiering, Zeuthen, 26.4.2016

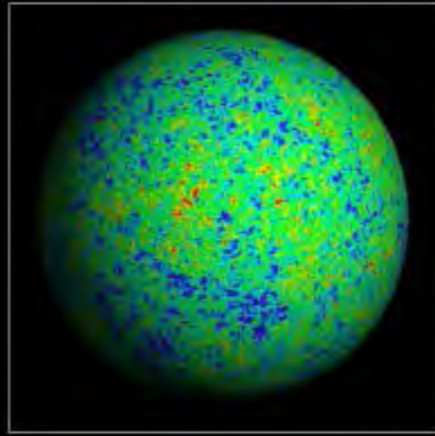


NEUTRINOS SIND ÜBERALL

Urknall
($330 \nu/\text{cm}^3$)



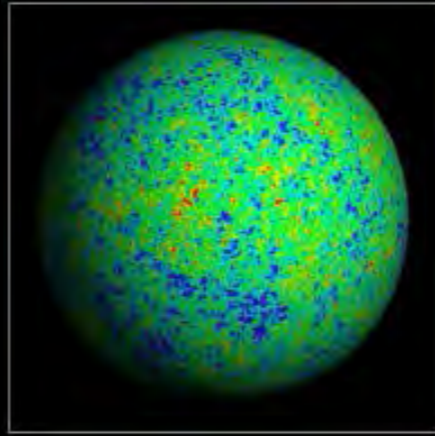
Urknall
(330 ν/cm^3)



Sonne
(60 000 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Urknall
(330 ν/cm^3)



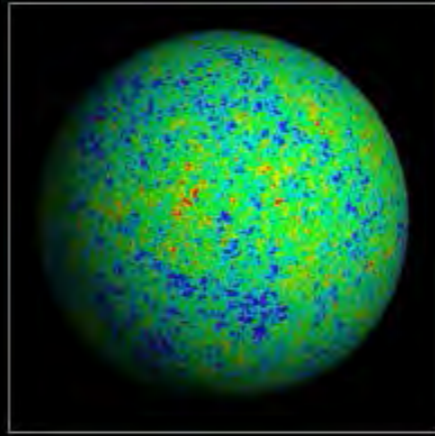
Sonne
(60 000 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Erdkruste
(60 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Urknall
(330 ν/cm^3)



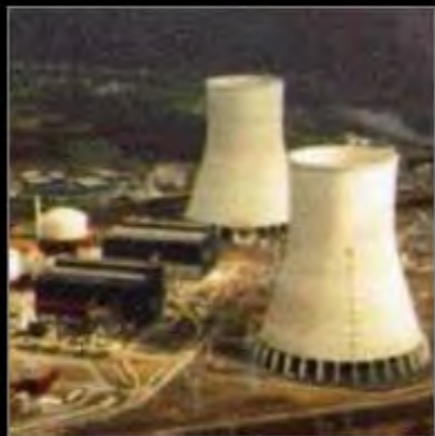
Sonne
(60 000 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



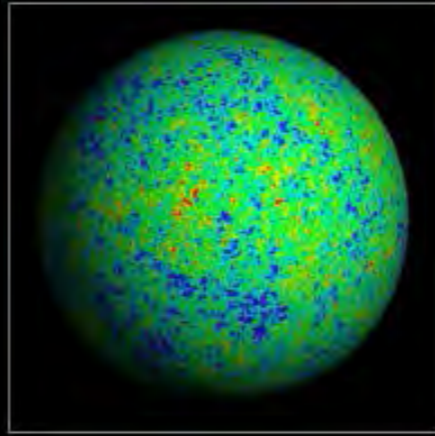
Erdkruste
(60 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Kernreaktoren



Urknall
($330 \nu/\text{cm}^3$)



Sonne
(60 000 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Erdkruste
(60 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)

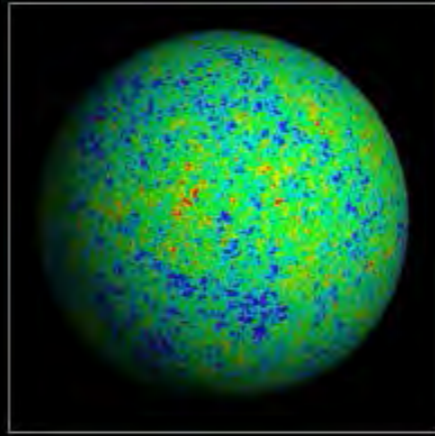


Kernreaktoren



Supernova
(Sternkollaps)

Urknall
($330 \nu/\text{cm}^3$)



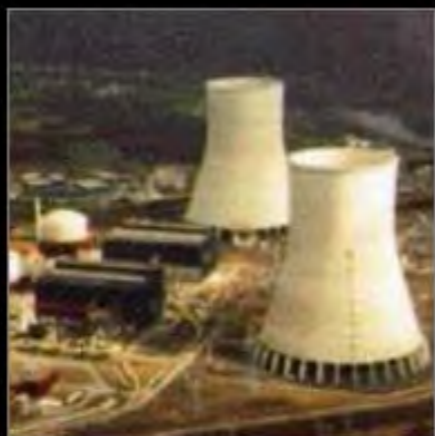
Sonne
(60 000 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Erdkruste
(60 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)



Kernreaktoren

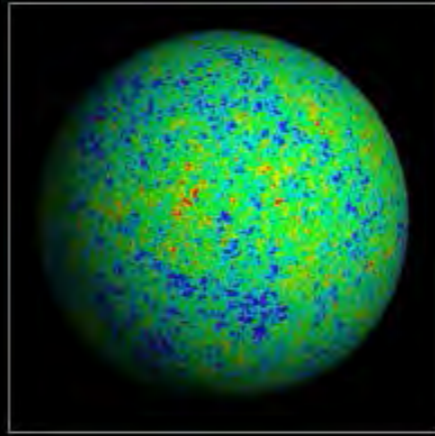


Supernova
(Sternkollaps)



**Teilchen-
beschleuniger**

Urknall
(330 ν/cm^3)



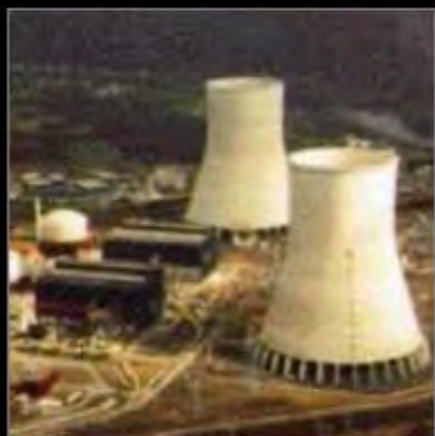
Sonne
(60 000 000 000
pro $cm^2 \times s$)



Erdkruste
(60 000 000
pro $cm^2 \times s$)



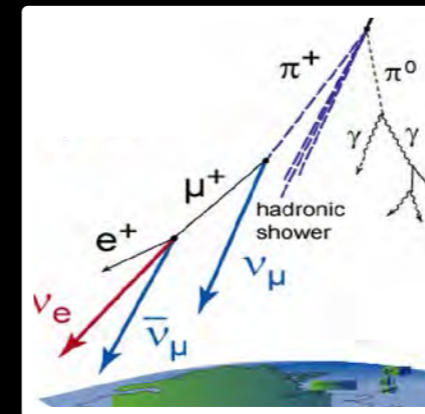
Kernreaktoren



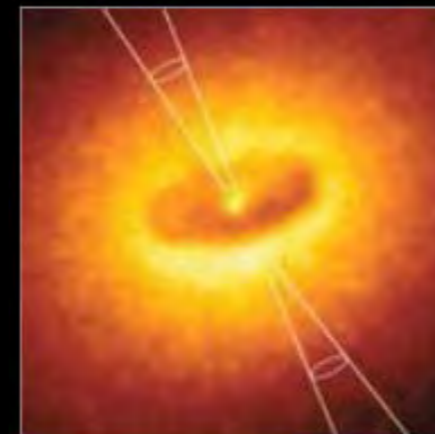
Supernova
(Sternkollaps)



**Teilchen-
beschleuniger**

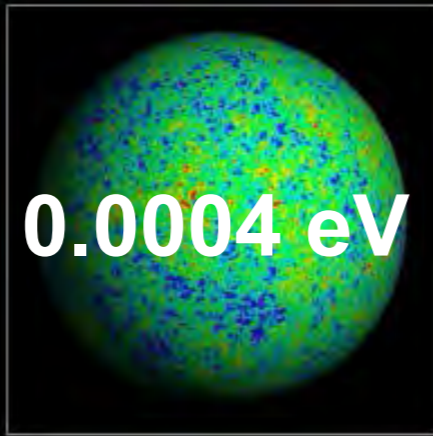


Erdatmosphäre
(~1 pro $cm^2 \times s$)



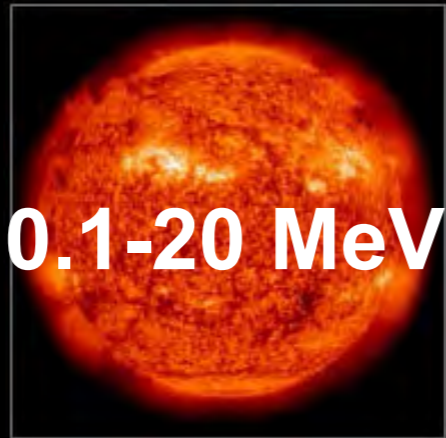
**Kosmische
Beschleuniger**

Urknall
(330 /cm³)



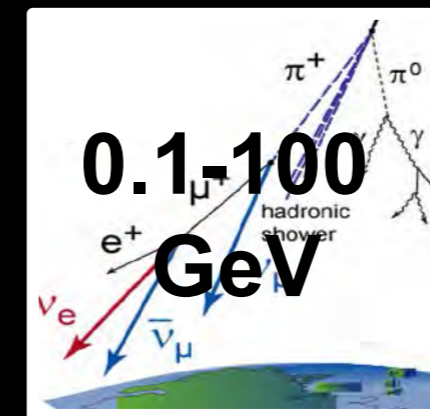
Supernova
(Sternkollaps)

Sonne
(60 000 000 000
pro cm²×s)



**Teilchen-
beschleuniger**

Erdkruste
(60 000 000
pro cm²×s)



Erdatmosphäre
(~1 pro cm²×s)

Kernreaktoren



**Kosmische
Beschleuniger**

Urknall
(330 ν/cm^3)

Sonne
(60 000 000 000
pro $cm^2 \times s$)

Erdkruste
(60 000 000
pro $cm^2 \times s$)

Kernreaktoren



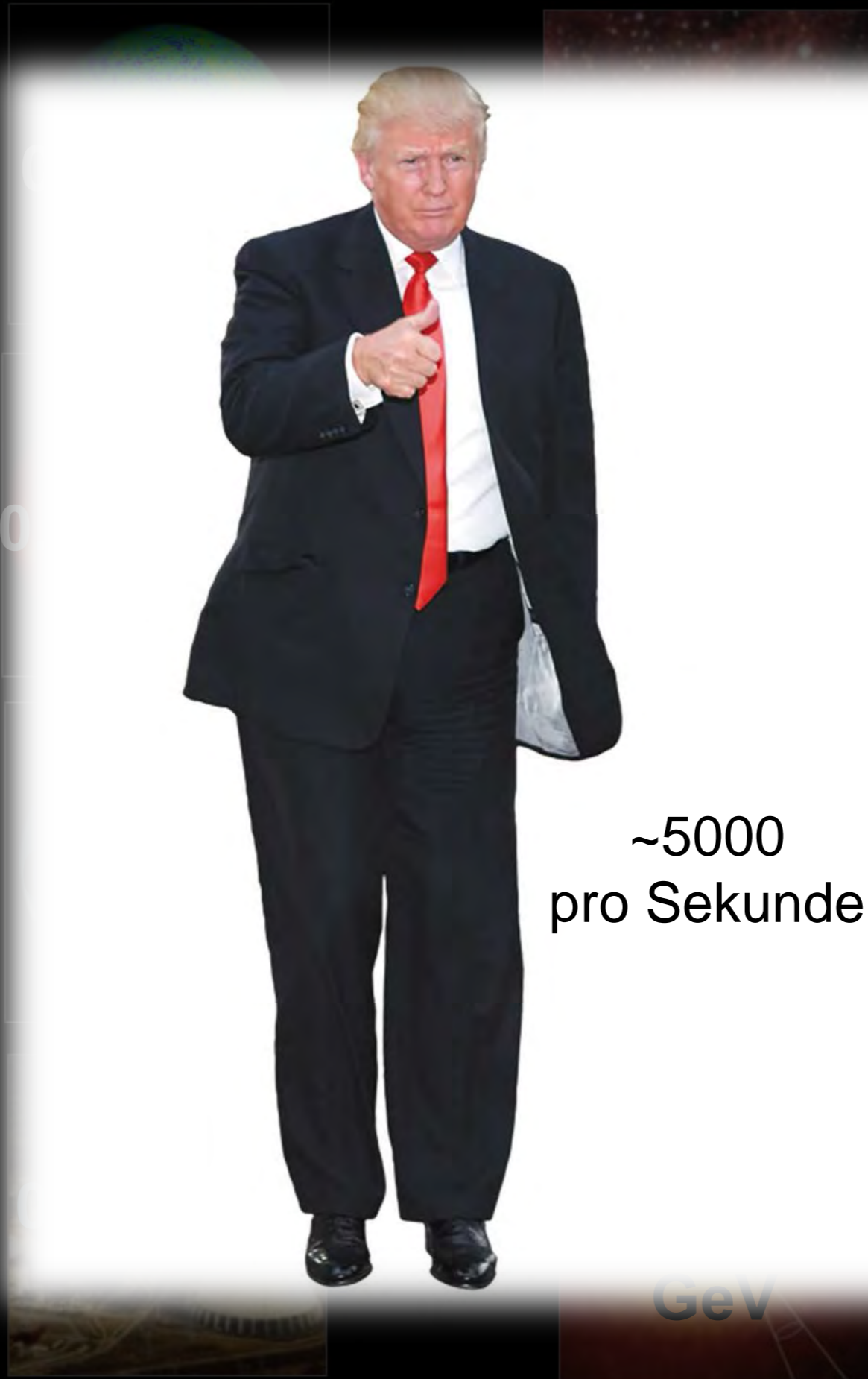
Supernova
(Sternkollaps)

**Teilchen-
beschleuniger**

Erdatmosphäre
(~1 pro $cm^2 \times s$)

**Kosmische
Beschleuniger**

~4000
pro Sekunde



Urknall
($330 \nu/\text{cm}^3$)

Sonne
(60 000 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)

Erdkruste
(60 000 000
pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)

Kernreaktoren

~5000
pro Sekunde

GeV

Supernova
(Sternkollaps)

**Teilchen-
beschleuniger**

Erdatmosphäre
(~1 pro $\text{cm}^2 \times \text{s}$)

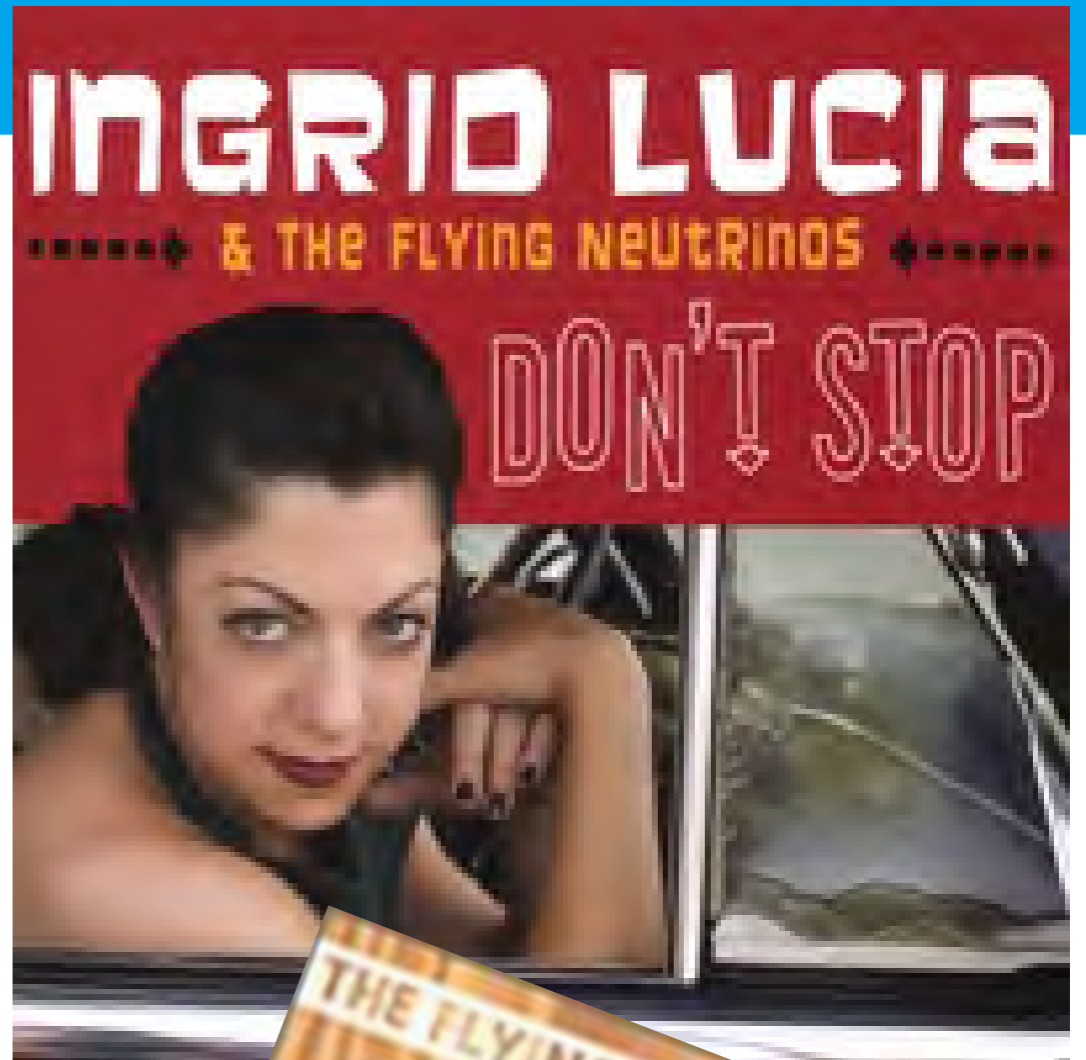
**Kosmische
Beschleuniger**

Neutrinos in der Musik ...

**Ingríd Lucía
& The Flying Neutrinos**



Mr. Zoot Suit



Neutrinos in der Musik ...



... und beim Bergsteigen

Mountain Gear - Neutrino Carabiner - Netscape

File Edit View Go Communicator Help

Back Forward Reload Home Search Netscape Print

Bookmarks Location: http://www.mgear.com/mgear/itempq_3_id?itm

MOUNTAIN GEAR

YOUR ADVENTURE STARTS HERE

Catalog Request | Info | Search | Shopping Cart | E-Mail | Home

~ Climbing ~ Rock Climbing ~ Carabiners

Backpacking
Snow Sports
Climbing
Clothing
Footwear
ON SALE!
Hot Sheet

Your Cart:
Total: \$0.00



Neutrino Carabiner

by Black Diamond Equipment

Original Price: 8.50
Volume Discount: 6 for 7.83 ea...

Named for a subatomic particle with almost zero mass, this is the lightest, full-service carabiner made. That means it's the best choice for anyone who demands super lightweight carabiners without a compromise in strength. The mere 36 grams provide a large rope-bearing surface, a nose hood to protect against "gate rub", and a basket very similar to a Quicksilver 2.

Prev Next QTY: 1 Add to Cart

Style	Weight	Strength	(kN)	Gate Width
	grams	closed	open	(mm)
Neutrino	36	24	8	22

Document Done

Benannt nach einem sub-atomaren Teilchen mit fast verschwindender Masse ...



Das Teilchen, das die Götter lieben

Das Teilchen, das die ~~Götter~~ lieben Nobelpreise

■ **1988**

L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger
“für die Neutrinostrahl-Methode und die
Entdeckung des Myon-Neutrinos”



■ **1995**

F. Reines
“für die Entdeckung des Neutrinos”



■ **2002**

R. Davis, M. Koshiba
“für den Nachweis kosmischer Neutrinos”





■ **2015**


T. Kajita, A. McDonald
“für die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen,
woraus folgt, daß Neutrinos eine Masse haben”


Das Teilchen, das die ~~Götter~~ lieben Nobelpreise

Nobelpriset i fysik 2015 The Nobel Prize in Physics 2015

 Nobelpriset i fysik 2015

 KUNGL. VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES


Takaaki Kajita
Super-Kamiokande Collaboration
University of Tokyo, Kashiwa, Japan


Arthur B. McDonald
Sudbury Neutrino Observatory Collaboration
Queen's University, Kingston, Kanada

"för upptäckten av neutrinooscillationer, som visar att neutriner har massa"
"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

2015-10-06 © Kungl. Vetenskapsakademien

■ **2015**

T. Kajita, A. McDonald

“für die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen,
woraus folgt, daß Neutrinos eine Masse haben”

WIE ALLES BEGANN

DEZEMBER 1930

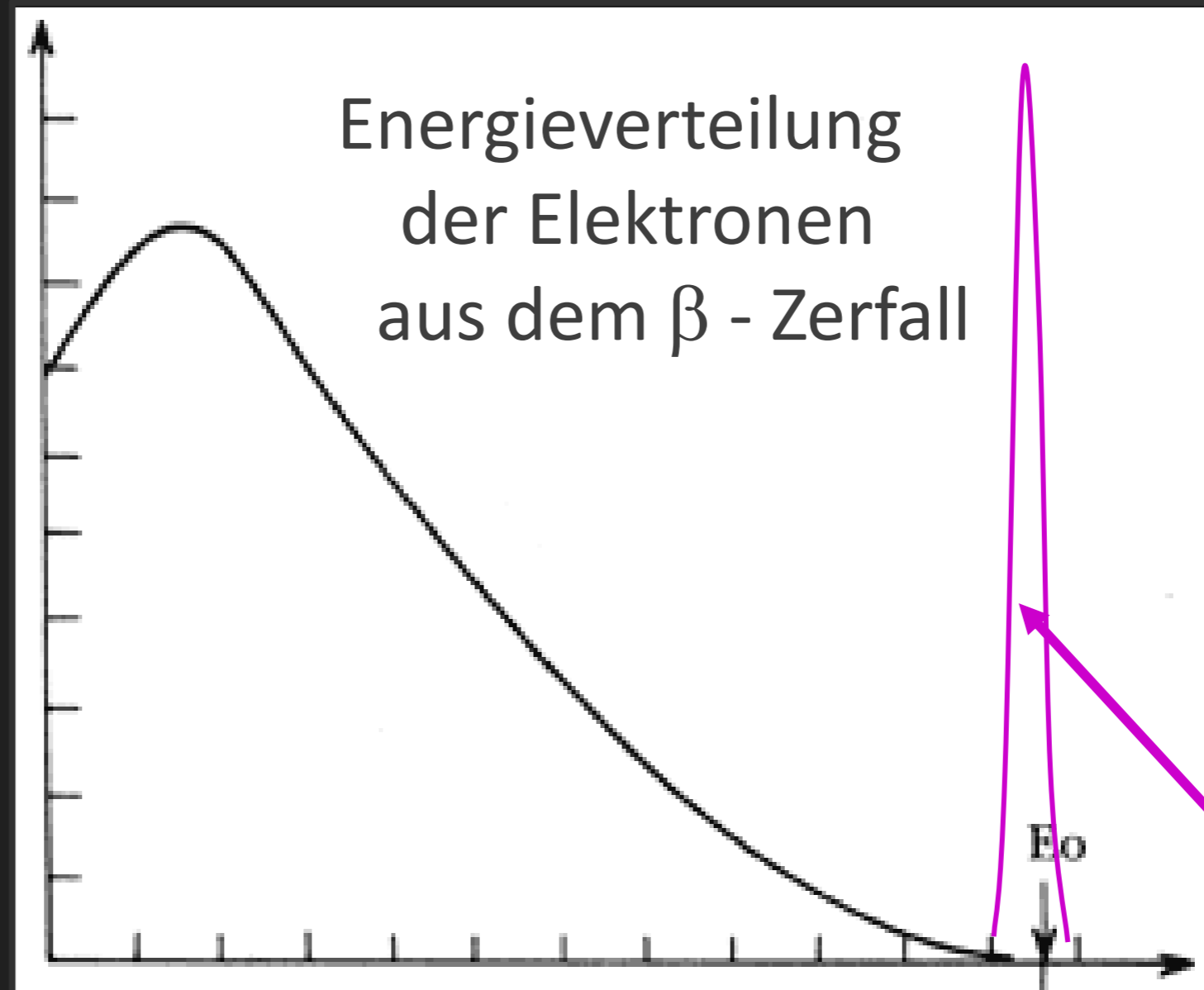


Lise Meitner



Wolfgang Pauli

Anzahl

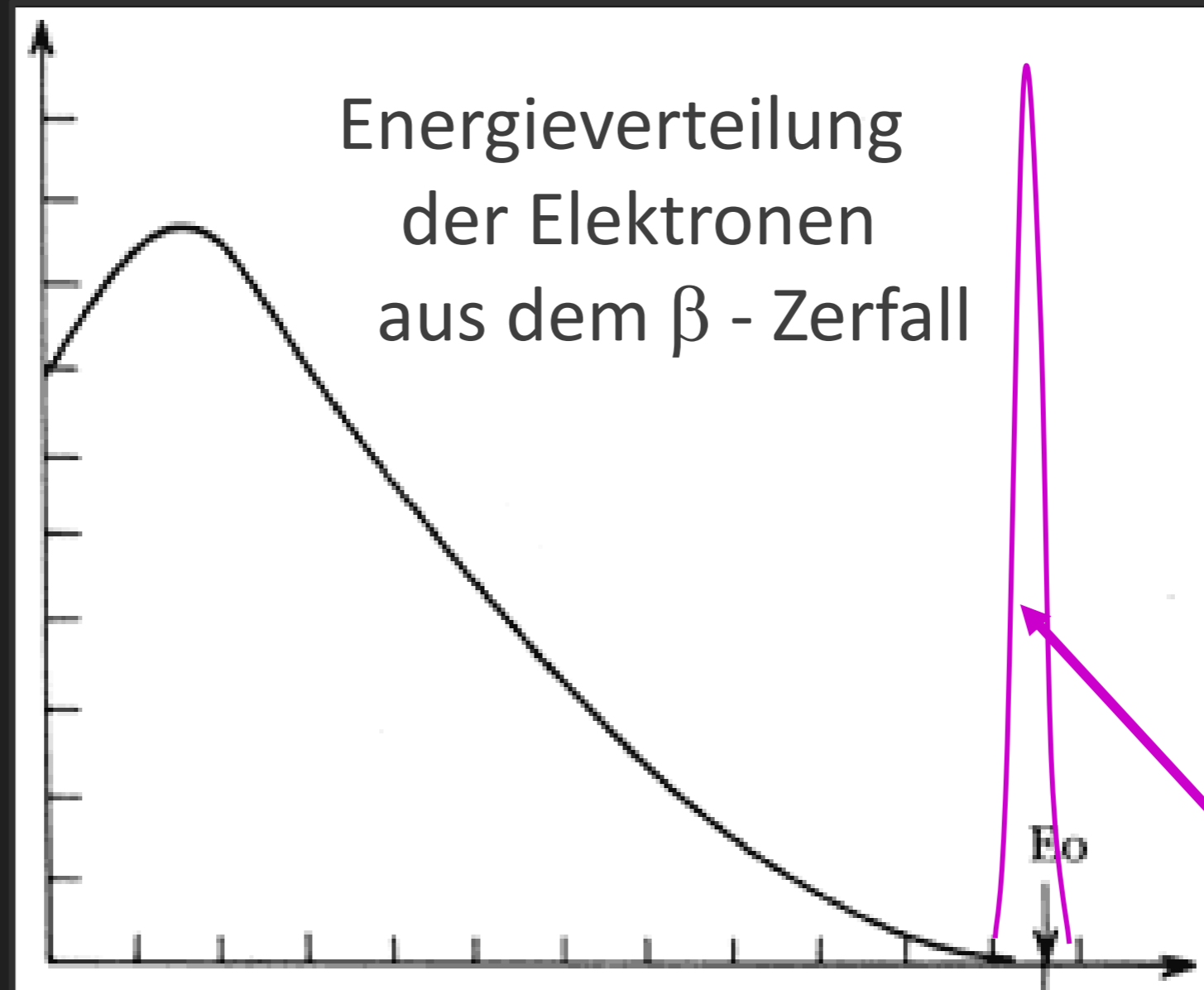


Energie

Erwartetes Spektrum



Anzahl

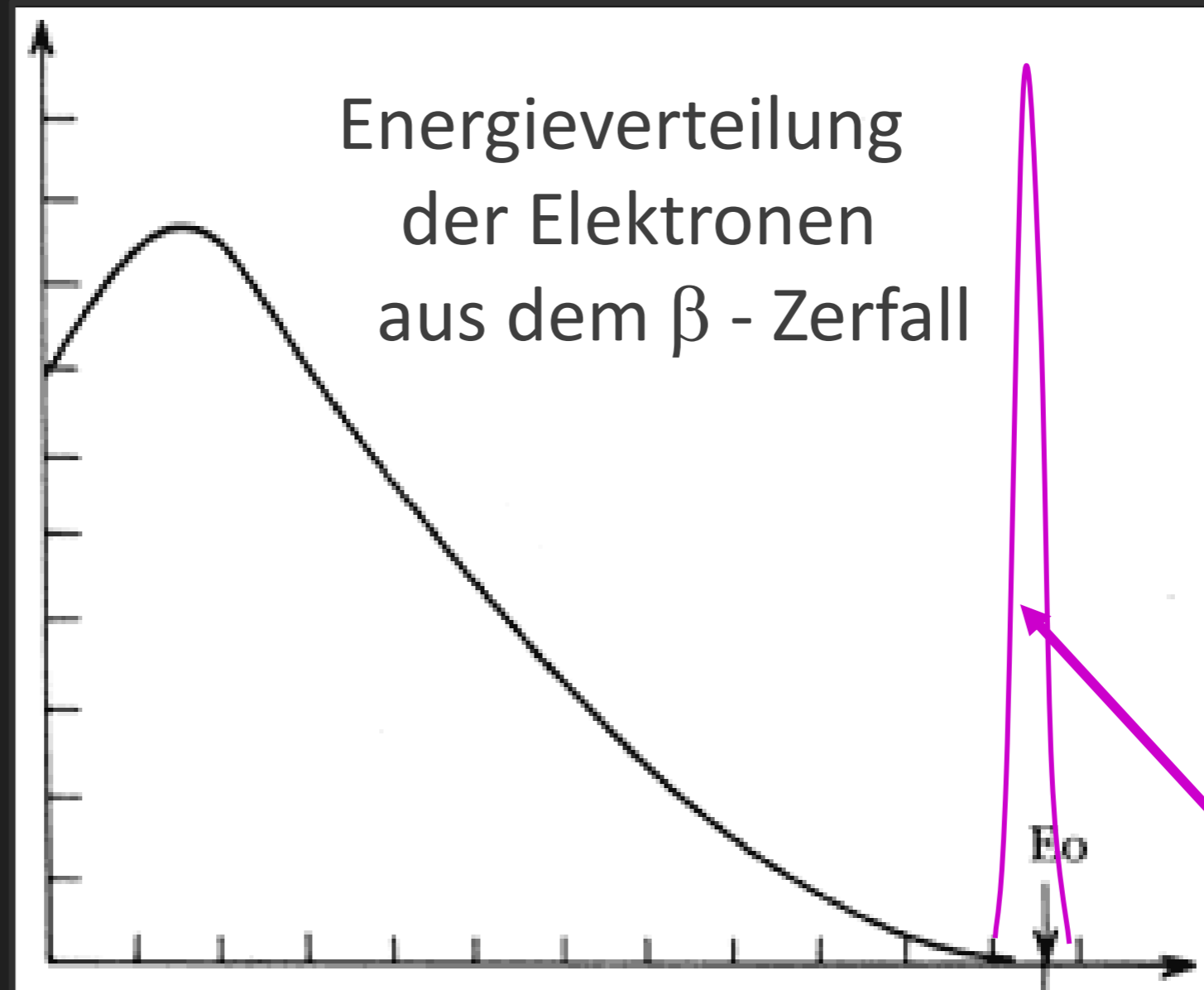


Energie

Erwartetes Spektrum



Anzahl

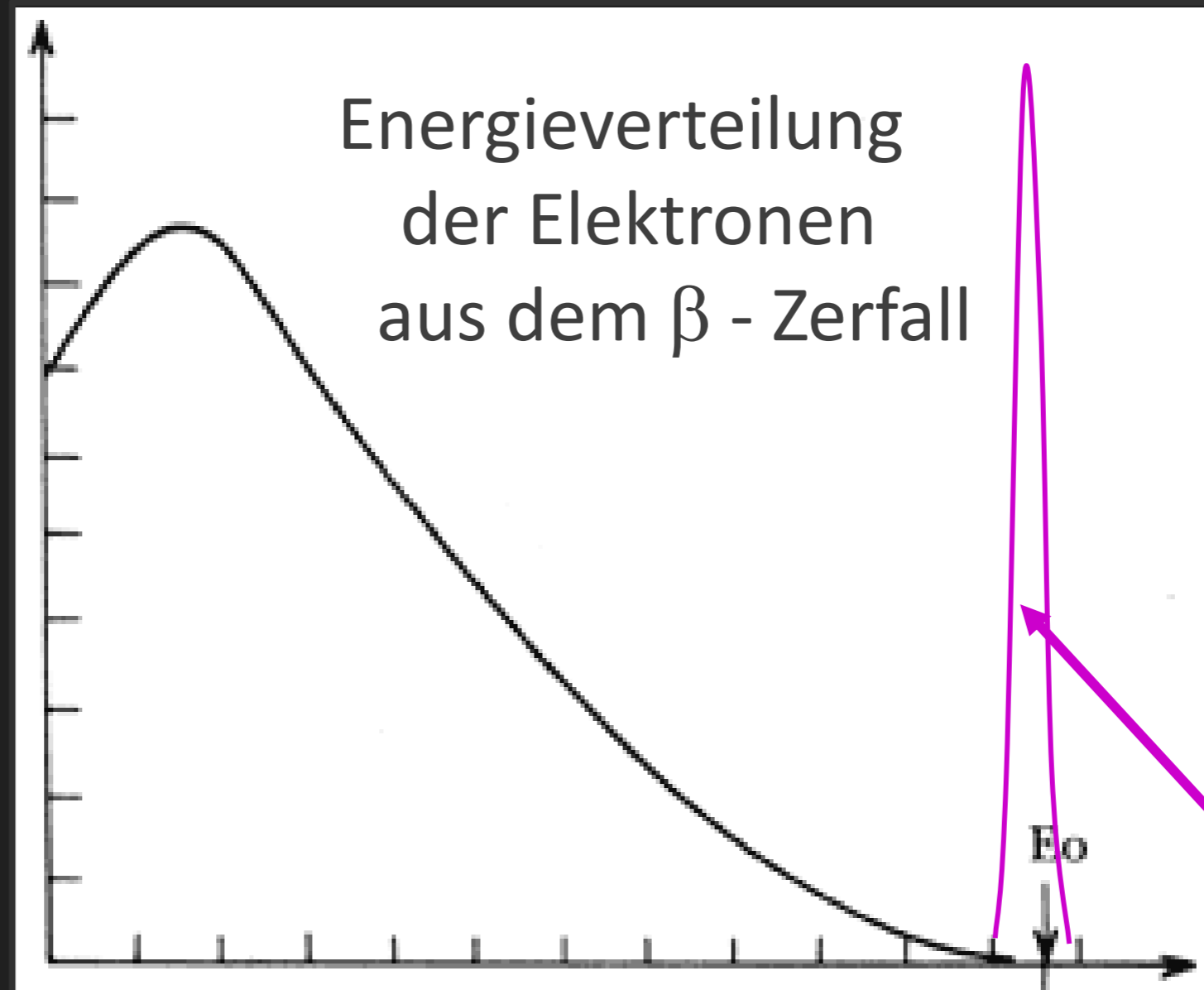


Energie

Erwartetes Spektrum



Anzahl



Energie

Erwartetes Spektrum



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
Cloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich herzlichst
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselst" (1) der Statistik und den Energiezustat
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
dürfte von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. - Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierliche beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers in Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie 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 Nibingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht von 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabsichtlich bin.- Mit vielen Grüßen an Euch, sowie an Herrn Bask, Buer untertänigster Diener

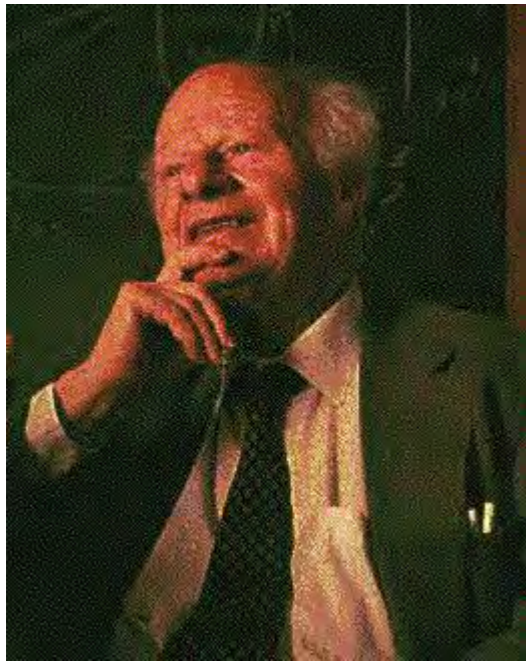
gen. W. Pauli

1933

Enrico Fermi
entwickelt
die Theorie des β -Zerfalls
und der schwachen Wechselwirkung



„Ich habe etwas Schreckliches getan ...“



1934

Hans Bethe und Rudolf Peierls berechnen, dass die Reaktionswahrscheinlichkeit von Neutrinos billionenfach geringer sein muss als die von Elektronen. Bei Energien von einigen MeV:

$$\sigma_{\bar{\nu}p} \sim 5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

Pauli: *“Ich habe etwas Schreckliches getan. Ich habe ein Teilchen vorhergesagt, das man niemals entdecken können wird!”*

Fred Reines, Entdecker des Neutrinos



Kernreaktoren als Neutrinoquelle

1953: Hanford Reaktor

1955: viel stärkerer
militärischer Reaktor
in Savannah River

Clyde Cowan

Fred Reines



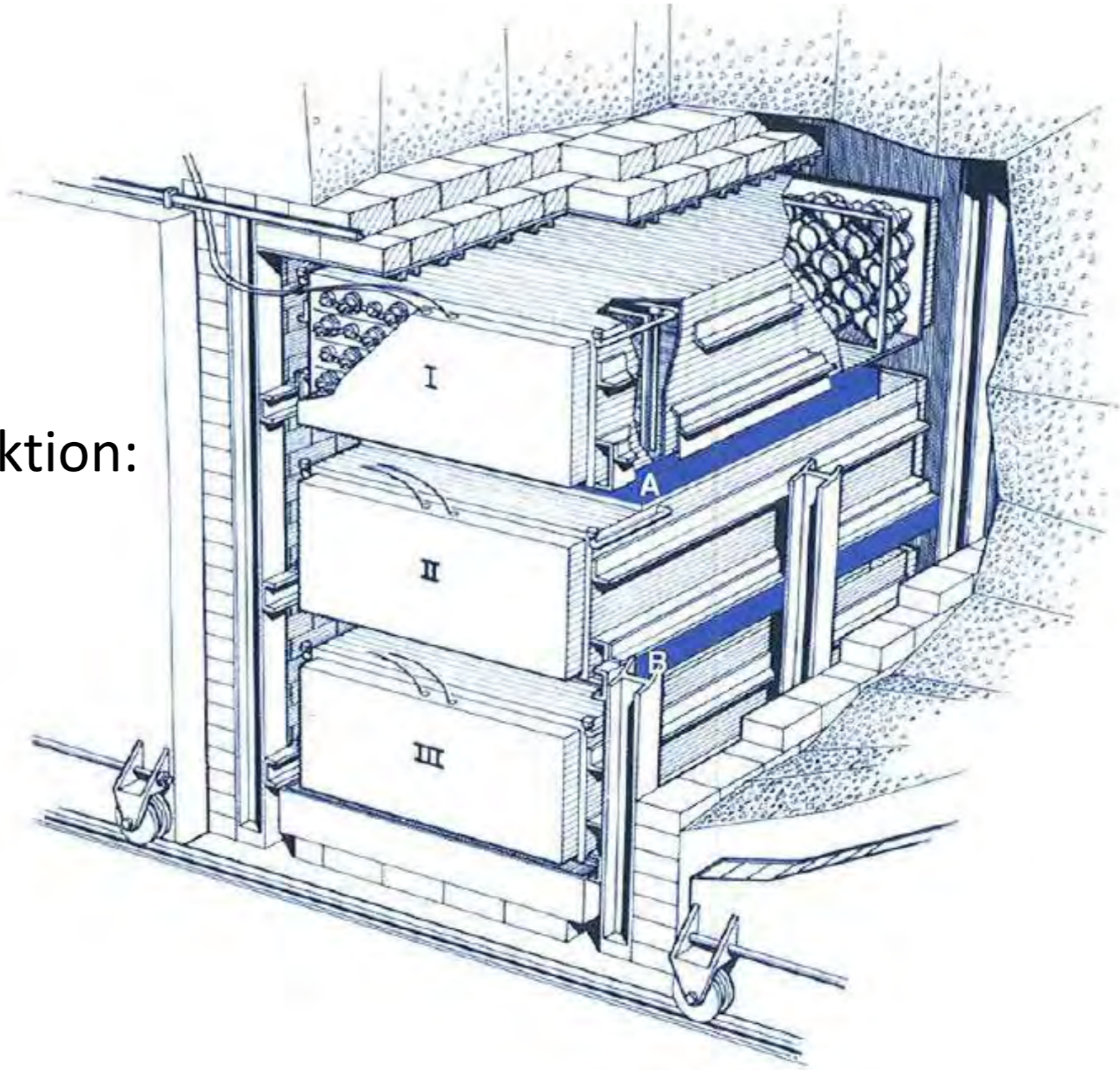
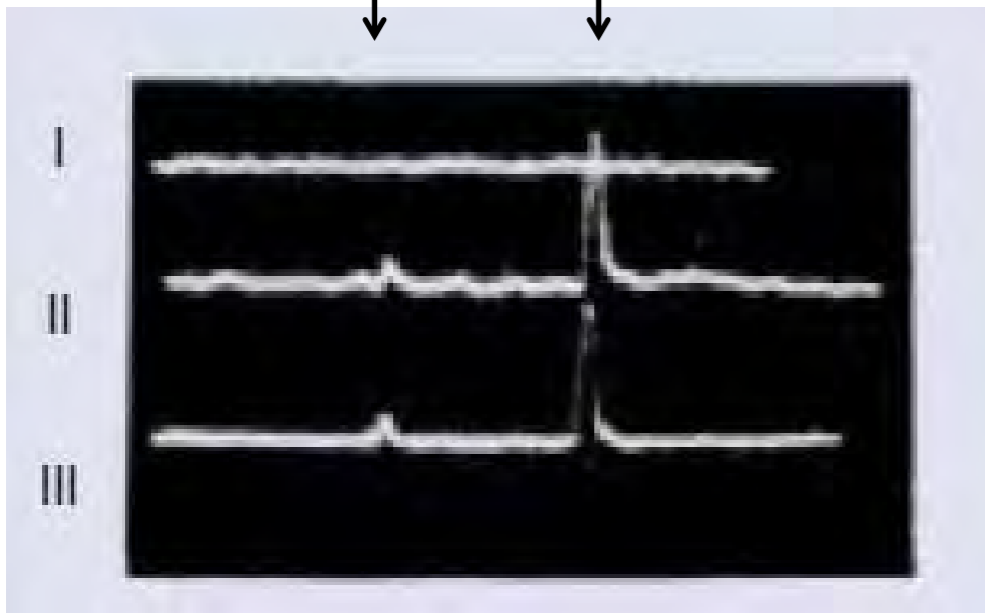
Savannah River: Entdeckung 1956



Nobelpreis 1995

Signalfolge einer Neutrinoreaktion:

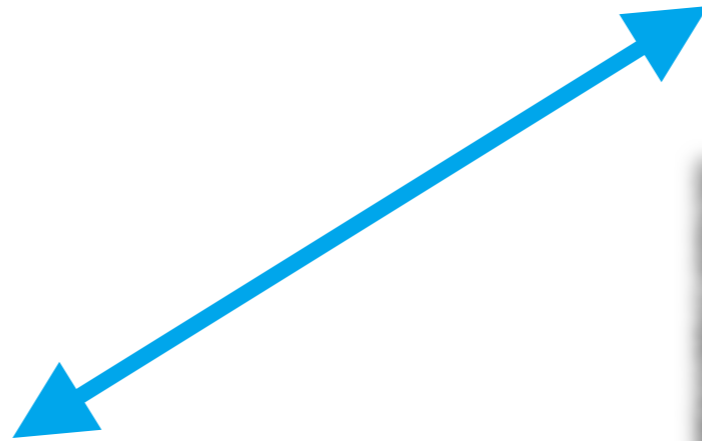
positron neutron



Savannah River: Entdeckung 1956



Nobelpreis 1995



**Warum
erst so spät?**

Paulis Antwort auf Reines' Erfolgsmeldung

Frederick REINES and Olga COVAN
Box 1663, COS ALAMOS, New Mexico
Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.
Pauli

„Everything comes to him who knows how to wait.“

Bruno Pontecorvo

„Mr. Neutrino“



Бруно Понтекорво

Bruno Pontecorvo

- Geboren 1913 in Pisa
- 1929-34: Ingenieurstudium in Pisa, dann Physik in Rom
- Ab 1934: Mitglied der Gruppe von Fermi, beteiligt an Entdeckung d. induzierten Radioaktivität
- Fermi: „... scientifically one of the brightest men to whom I have come into contact in my scientific career“
- 1936: nach Paris, zu Frederic und Irene Joliot-Curie
- 1938: USA
- Arbeit für Ölbohrfirmen („Neutron-Logging“)
- Keine Teilnahme an Manhattan Project (zu viele kommunistische Verbindungen!)



Bruno Pontecorvo

- 1943: Kanada (Reaktorbau, Teilchendetektoren, Eigenschaften von Myonen, kosmische Strahlen)
- 1946: Vorschlag der radio-chemischen Detektion von Neutrinos, die später zur Entdeckung der Sonnenneutrinos führte (Nobelpreis Raymond Davis 2002)
- 1948: Wechsel nach Harwell (England), Nuclear Physics Division
- August 1950: Nach einem Urlaub in Italien verschwindet Pontecorvo samt Familie von der Bildfläche (wie sich später zeigt in die UdSSR)
- **Pontecorvo ein Meisterspion ??** (ziemlich sicher NEIN)
- 1951-55: Experimente am Dubna Synchrozyklotron



Bruno Pontecorvo

- **1956:** Dubna wird Internationales Institut und Pontecorvo wird international wieder sichtbar.
- **1957/58:** Erste Ideen zu Neutrino Oszillationen
- **1959:** Vorschlag wie man die Existenz eines zweiten Neutrintyps testen kann (Myon-Neutrino, ν_μ)
- **1962:** Entdeckung des ν_μ durch Lederman, Schwartz und Steinberger (Nobelpreis 1988)
- **1969—1975:** Gegenwärtige Formulierung der Oszillationshypothese. Vorhersage eines „Defizits“ von Sonnenneutrinos
- **1993:** Pontecorvo stirbt in Dubna



Bruno Pontecorvo

- **1956:** Dubna wird Internationales Institut und Pontecorvo wird international wieder sichtbar.
- **1957/58:** Erste Ideen zu Neutrino Oszillationen
- **1959:** Vorschlag wie man die Existenz eines zweiten Neutrintyps testen kann (Myon-Neutrino, ν_μ)
- **1962:** Entdeckung des ν_μ durch Lederman, Schwartz und Steinberger (Nobelpreis 1988)
- **1969—1975:** Gegenwärtige Formulierung der Oszillationshypothese. Vorhersage eines „Defizits“ von Sonnenneutrinos
- **1993:** Pontecorvo stirbt in Dubna
- **2015:** Nobelpreis an Art McDonald and Takaaki Kajita für die endgültige Bestätigung von Neutrino-Oszillationen, nahezu 23 Jahre nach Pontecorvos Tod ...



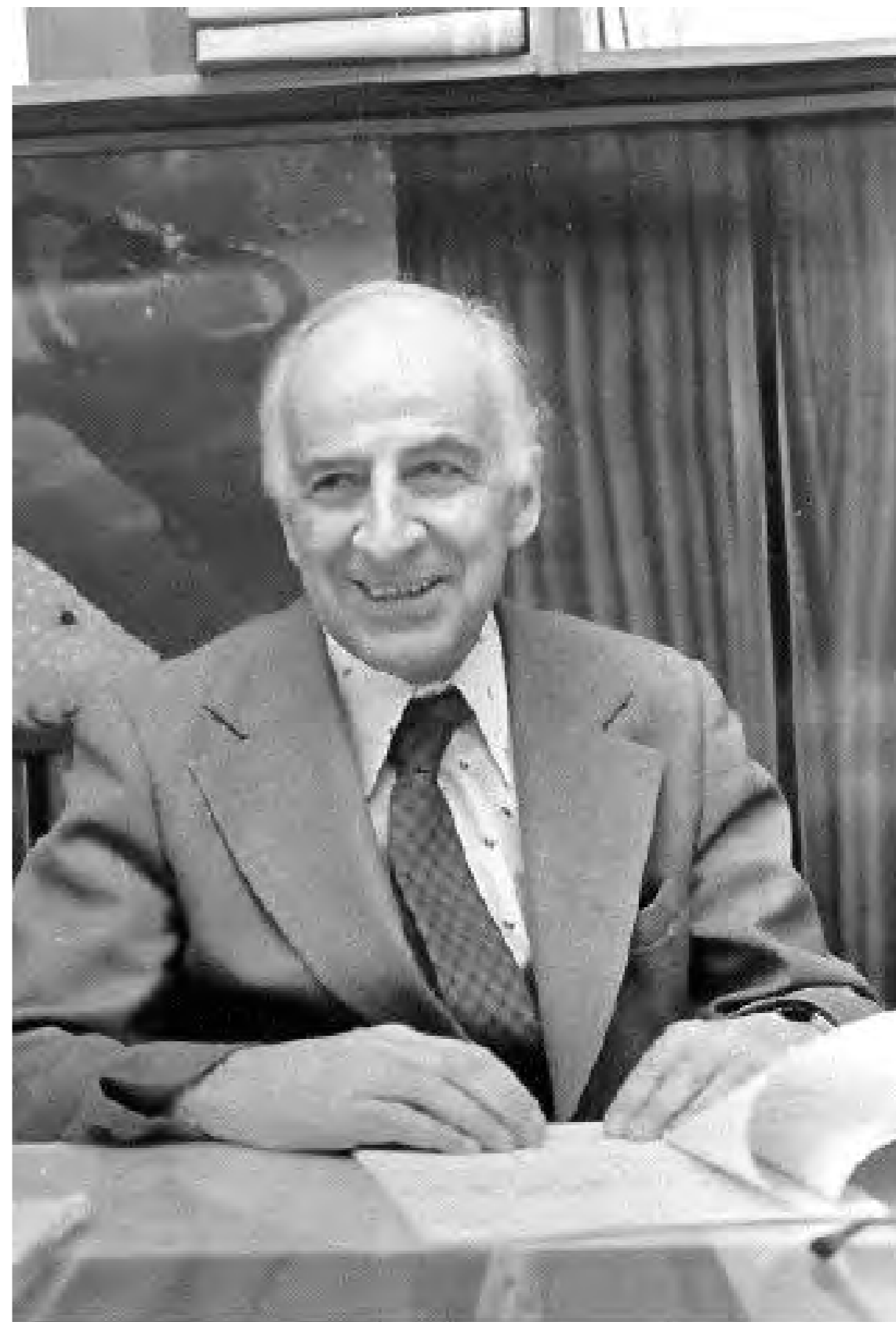
Bruno Pontecorvo



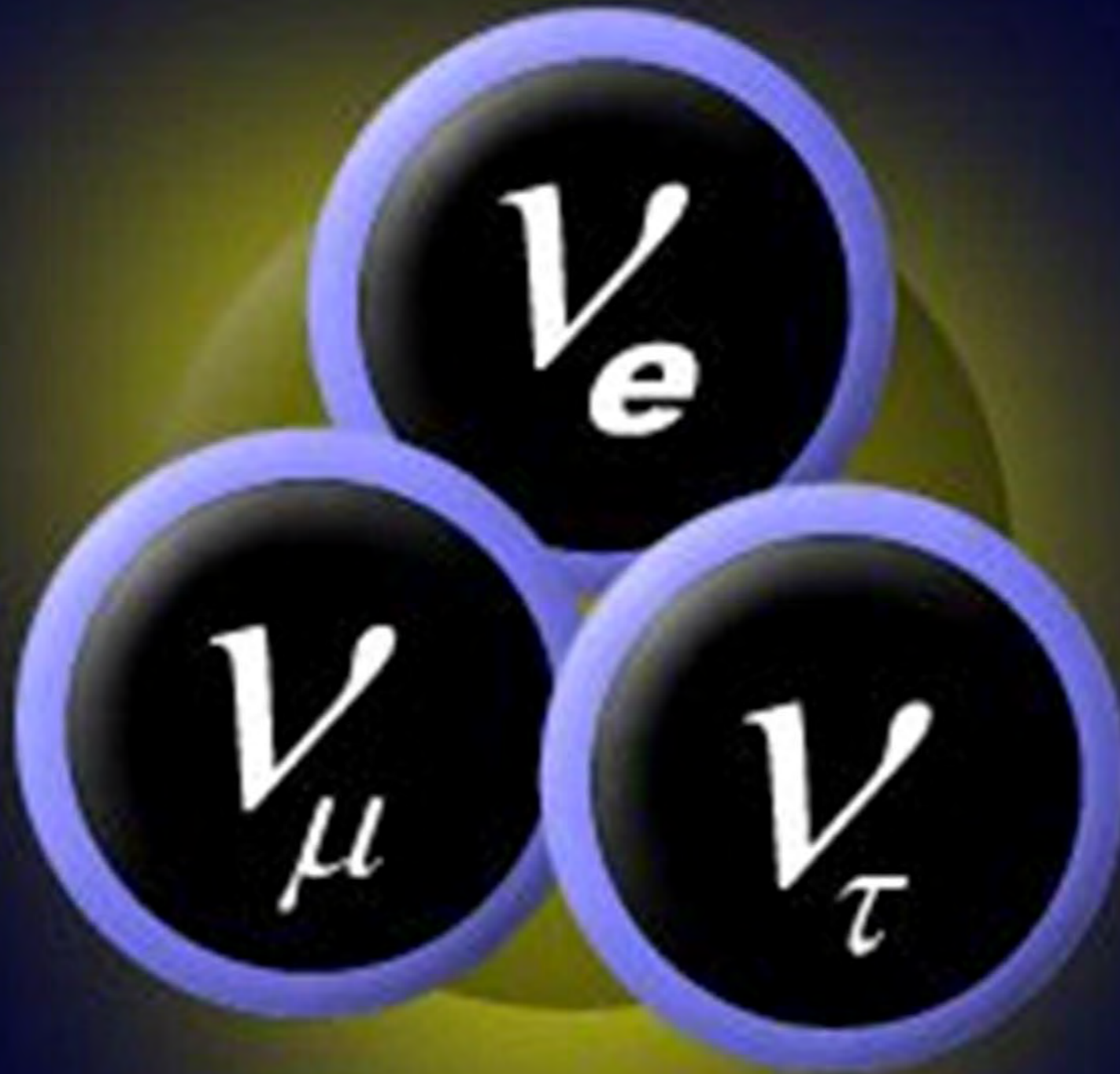
Bruno Pontecorvo



Бруно Понтекорво



1956



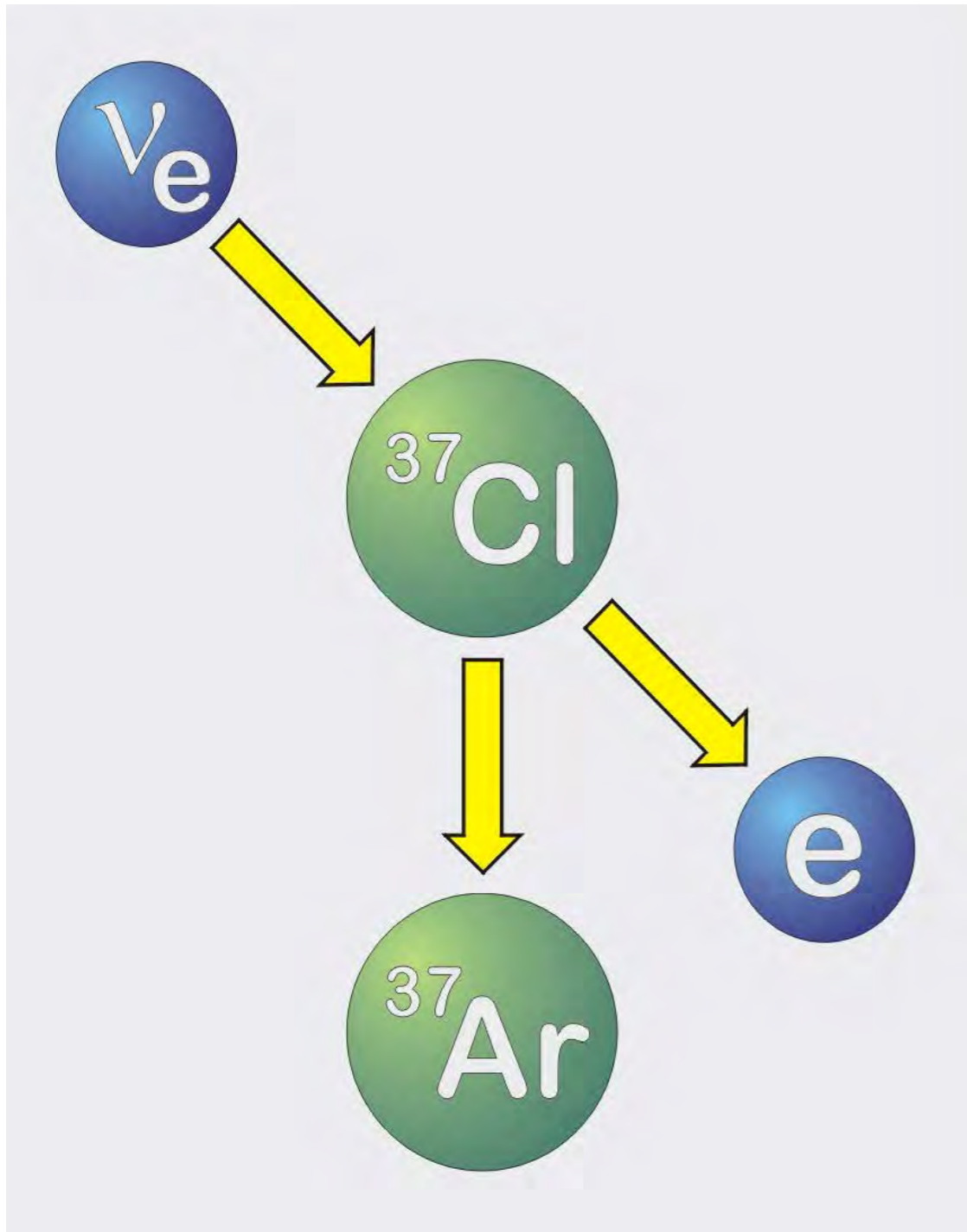
1962

2000

Pontecorvo: Wie weist man Neutrinos nach?

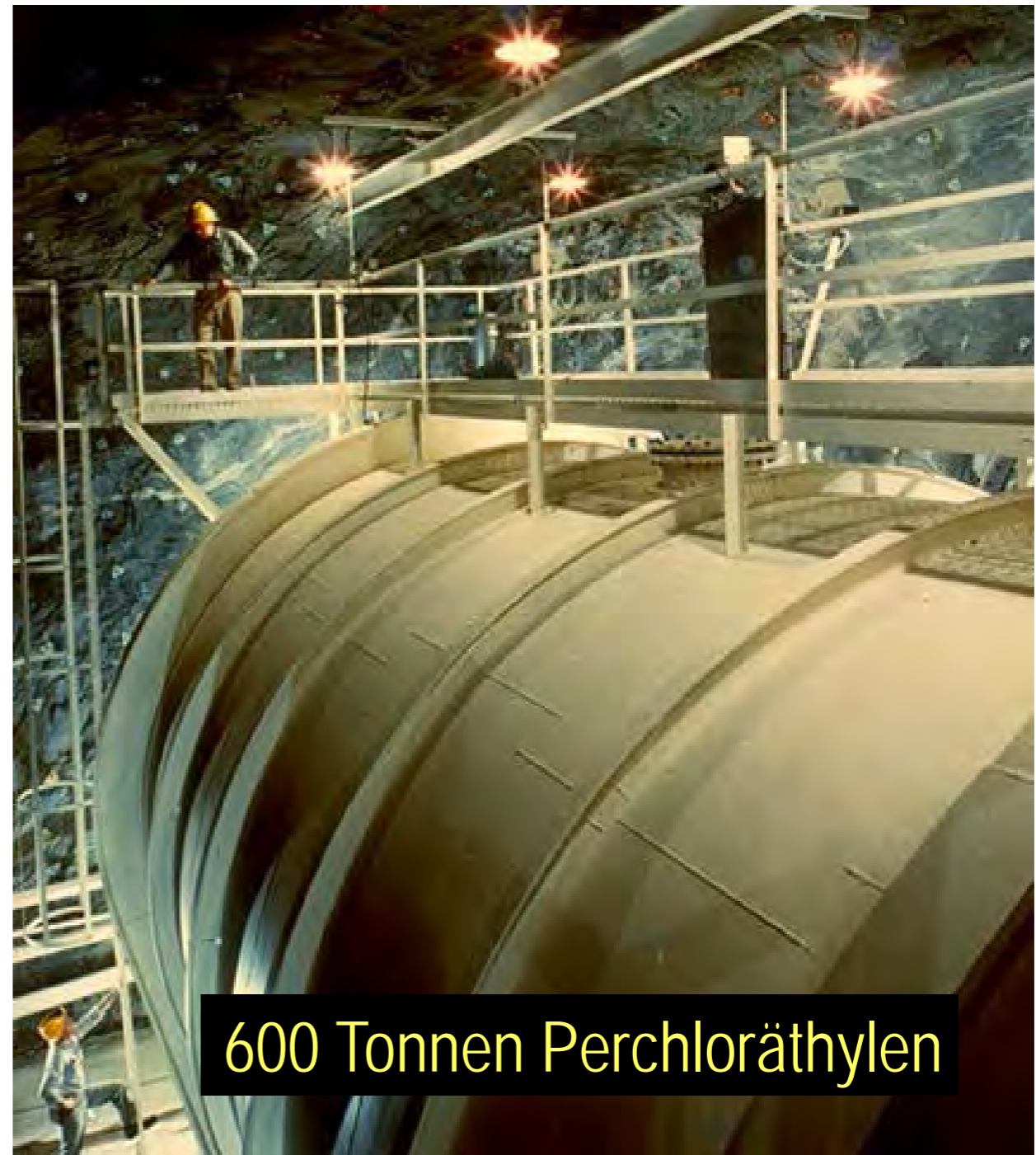
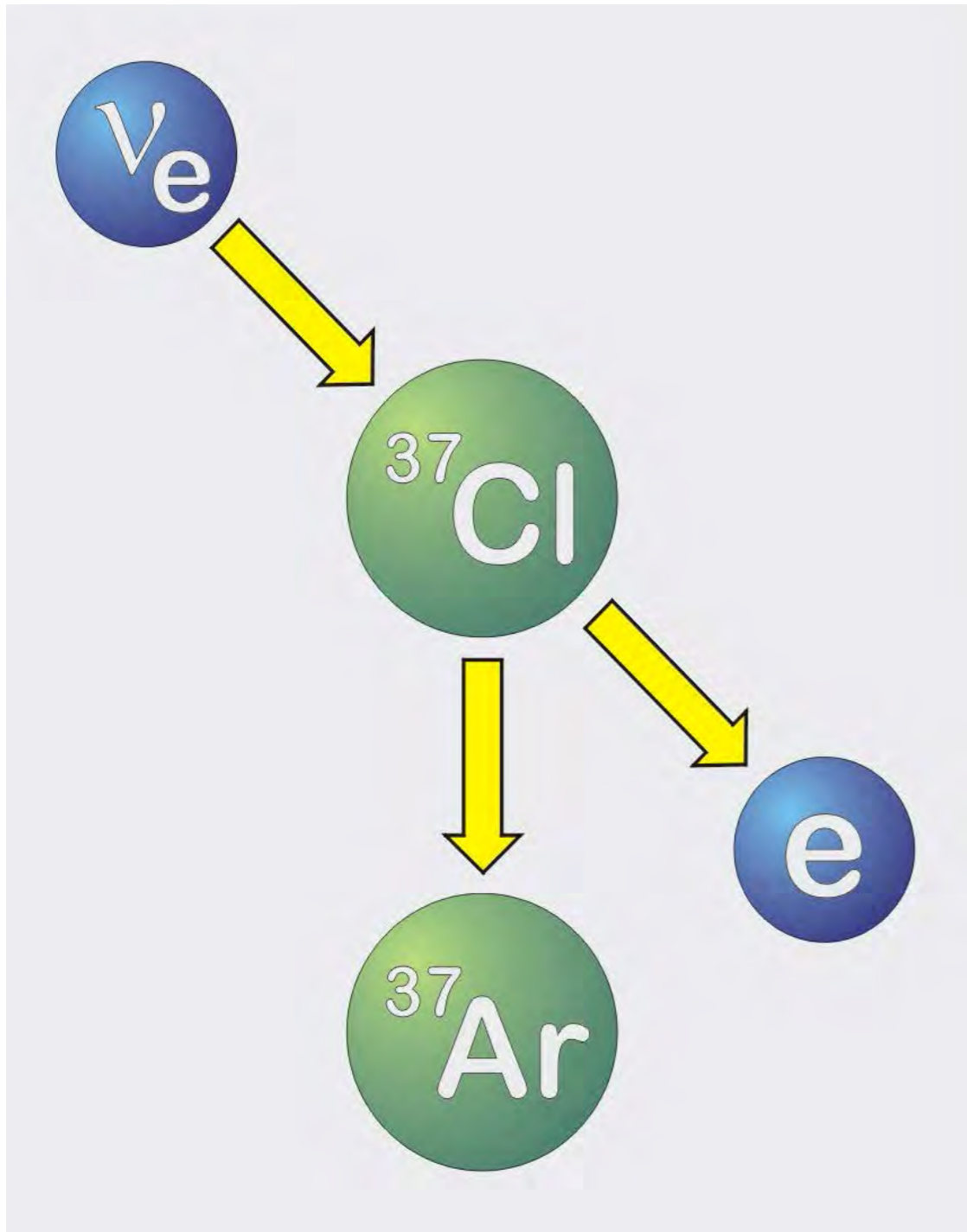
1946:

Vorschlag der „radio-chemischen“ Detektion von Neutrinos



Raymond Davis: Nachweis von Sonnenneutrinos

1967-1994:
Das Homestake-Experiment



$$\frac{\text{Anzahl gemessener Reaktionen}}{\text{Anzahl berechneter Reaktionen}} \sim 1/3$$



■ Experiment falsch ?

(d.h. weniger empfindlich als angenommen)

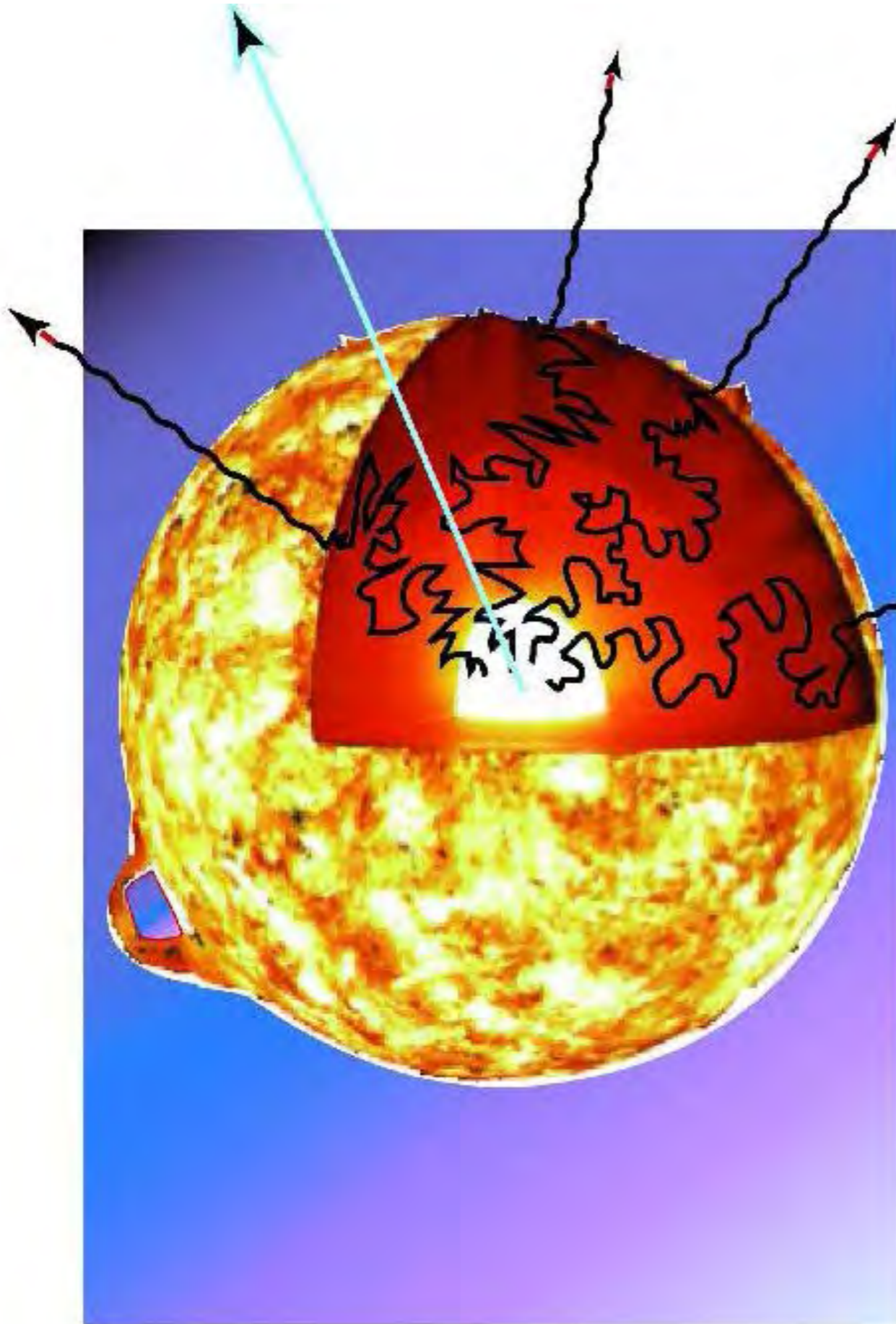
■ Sonnenmodell falsch ?



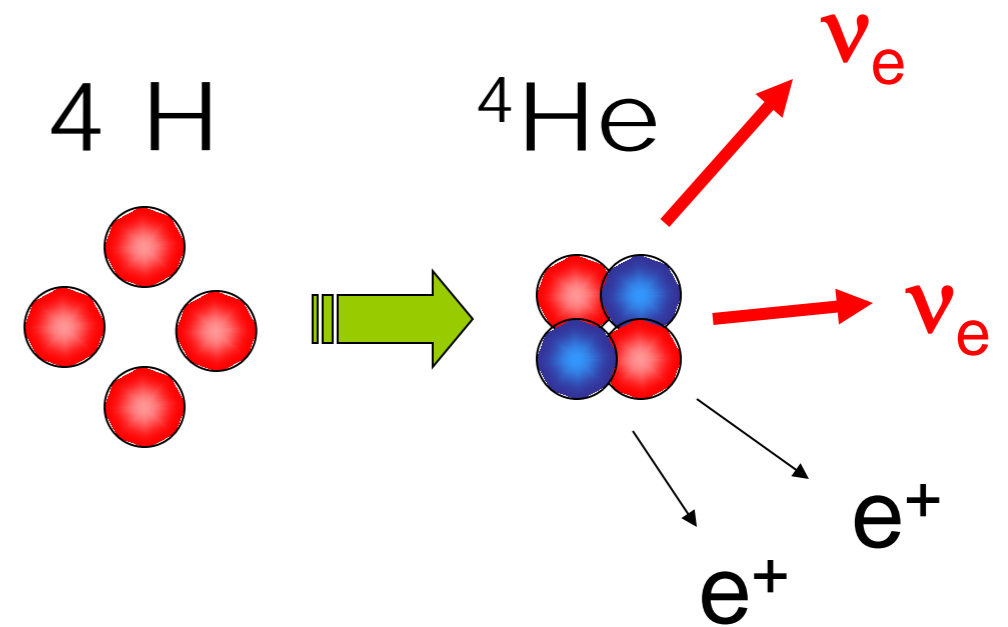
Neutrinos machen irgendwas Unerwartetes ?

Neutrinos

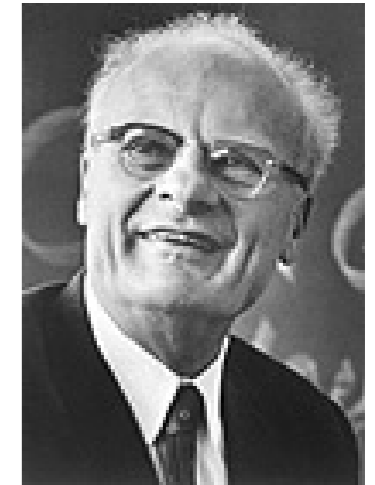
Neutrinos von der Sonne



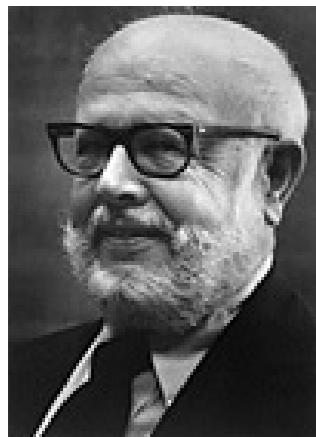
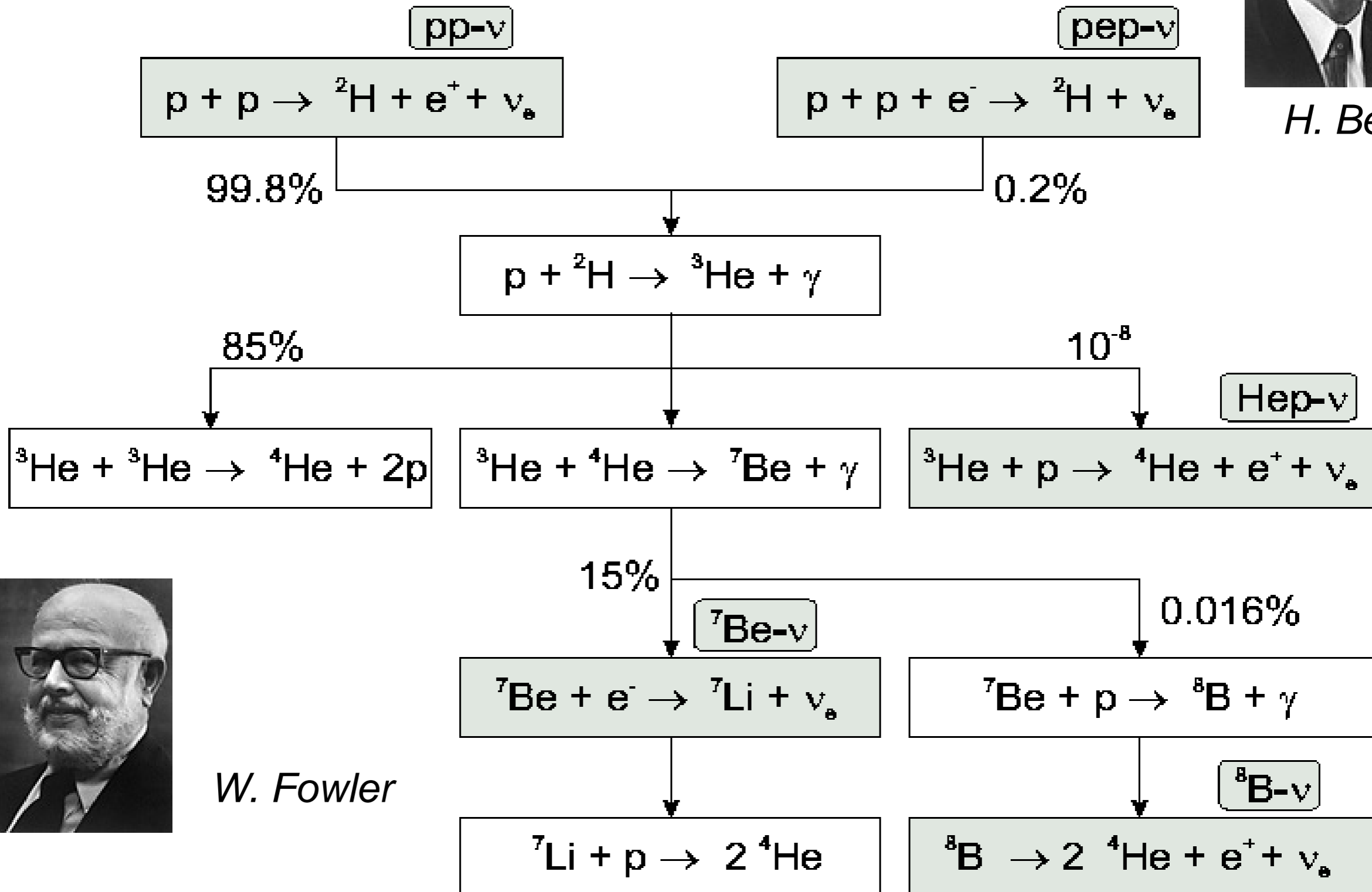
Photonen



H → He im Detail

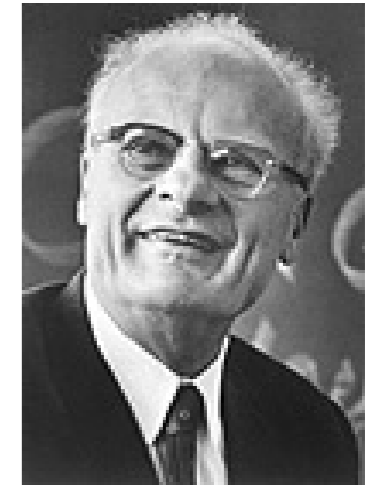


H. Bethe

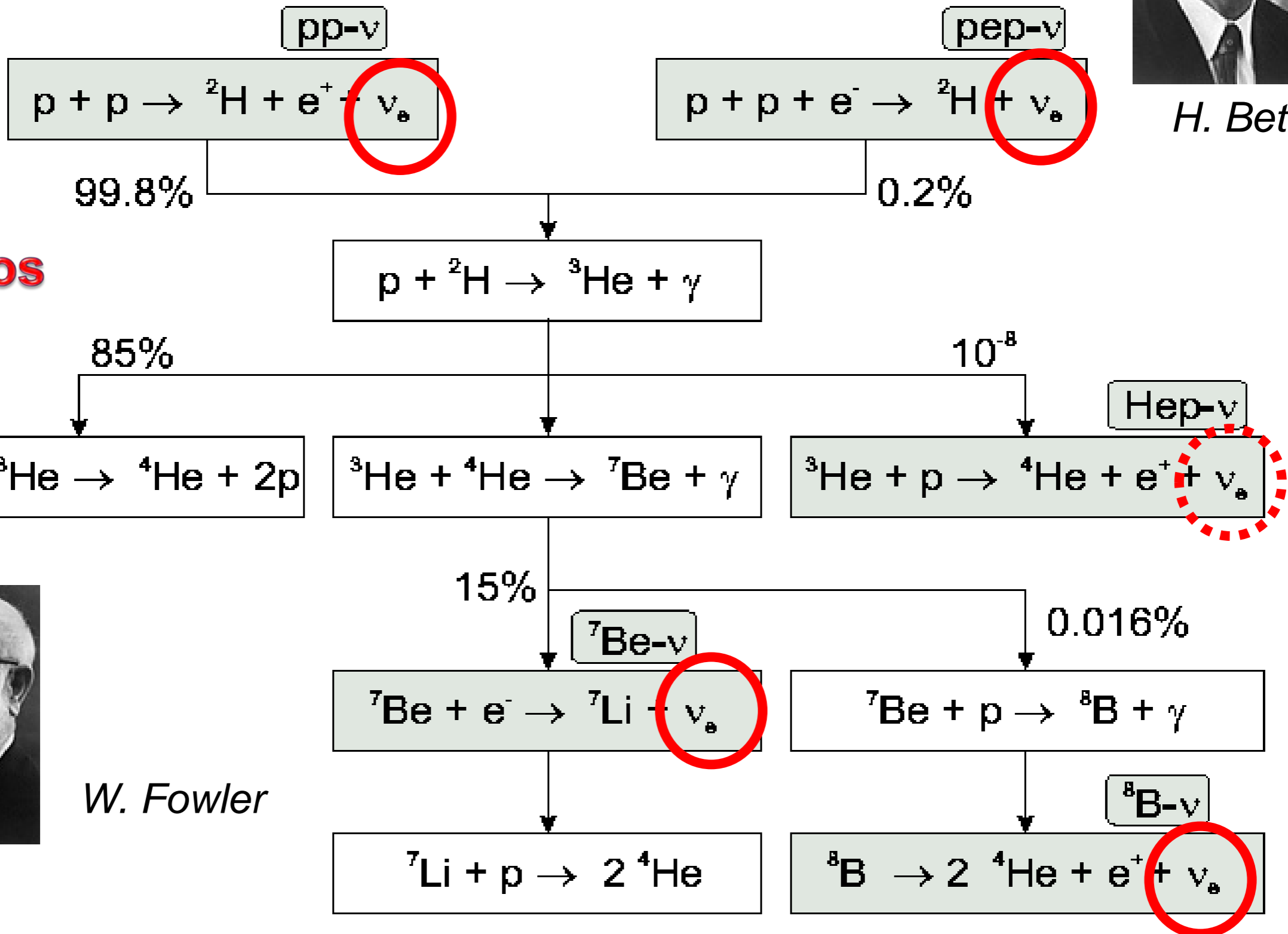


W. Fowler

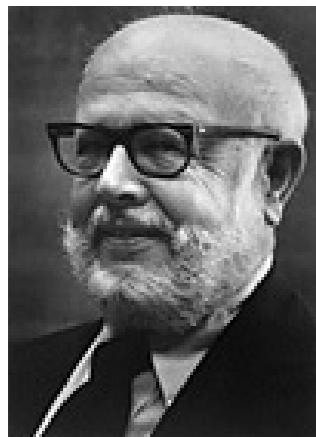
H → He im Detail



H. Bethe

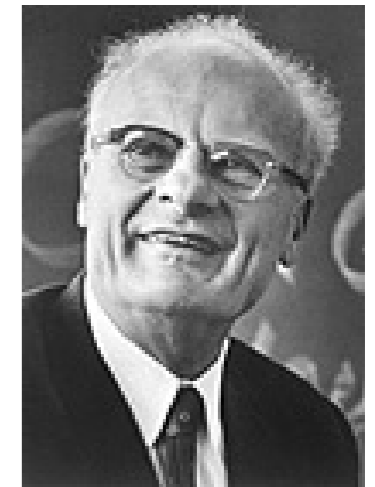


Neutrinos

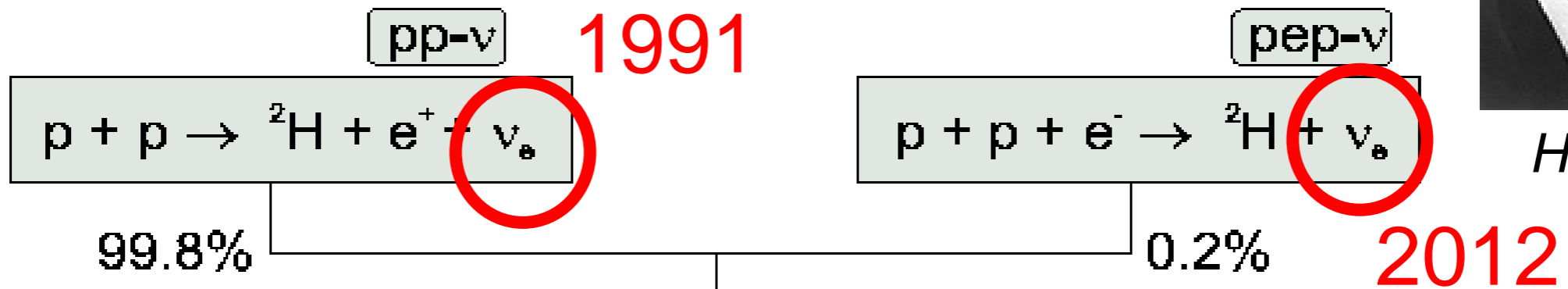


W. Fowler

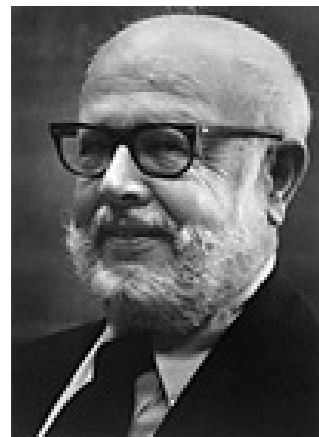
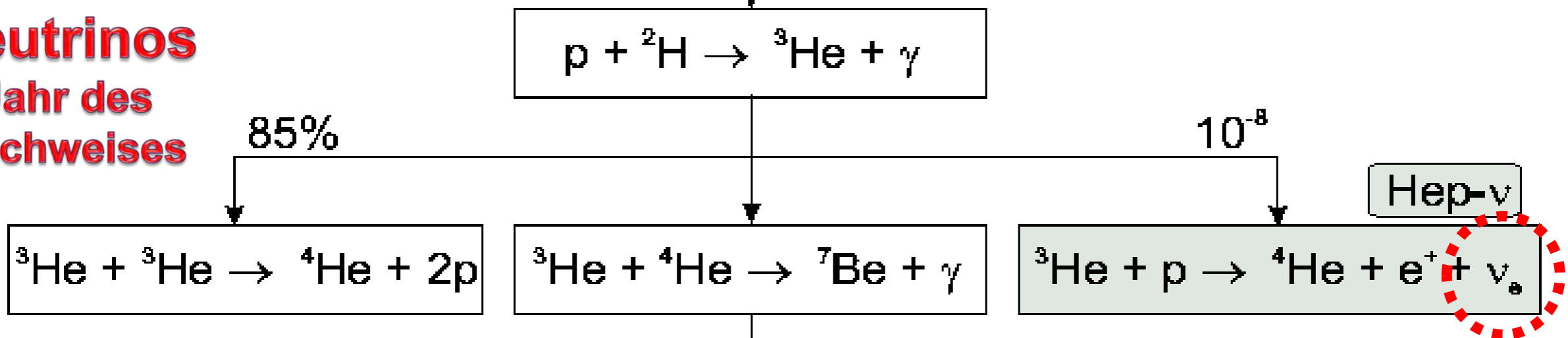
H → He im Detail



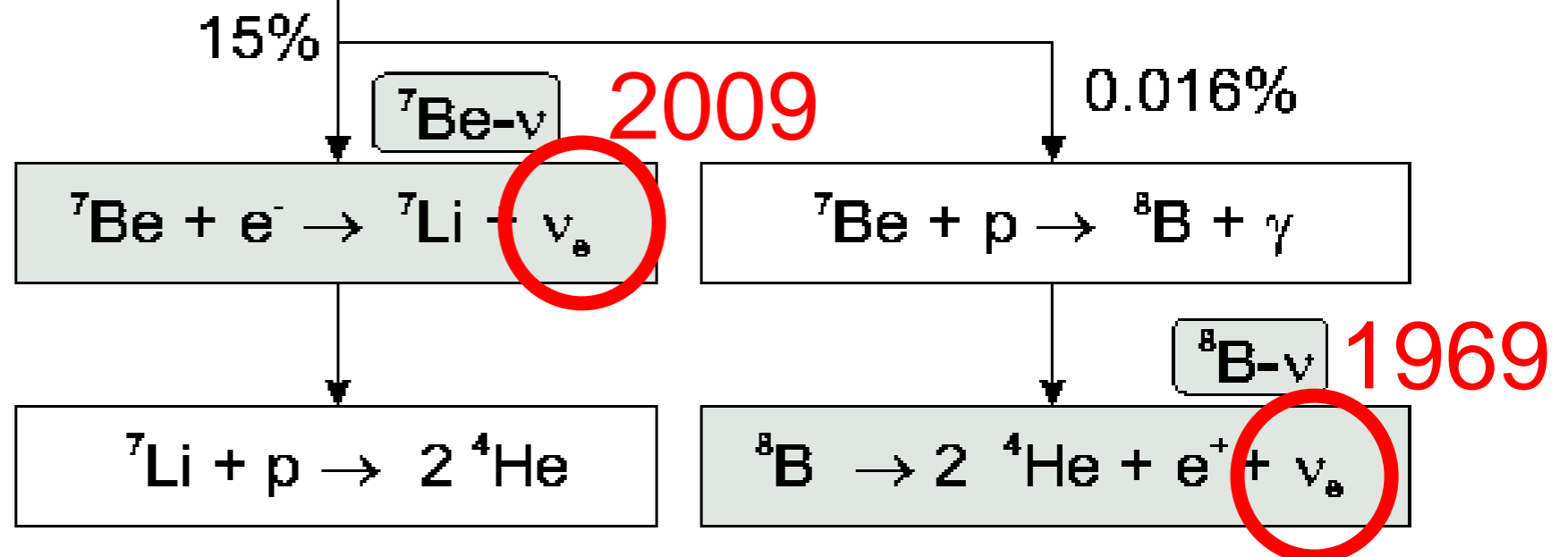
H. Bethe



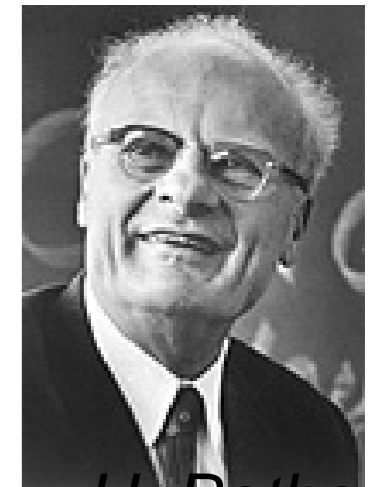
Neutrinos
Jahr des Nachweises



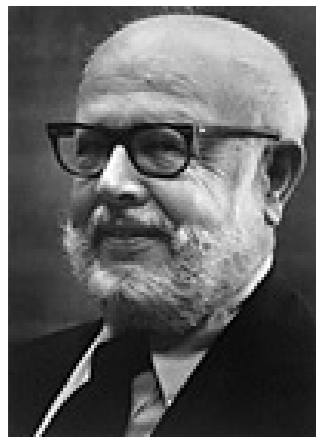
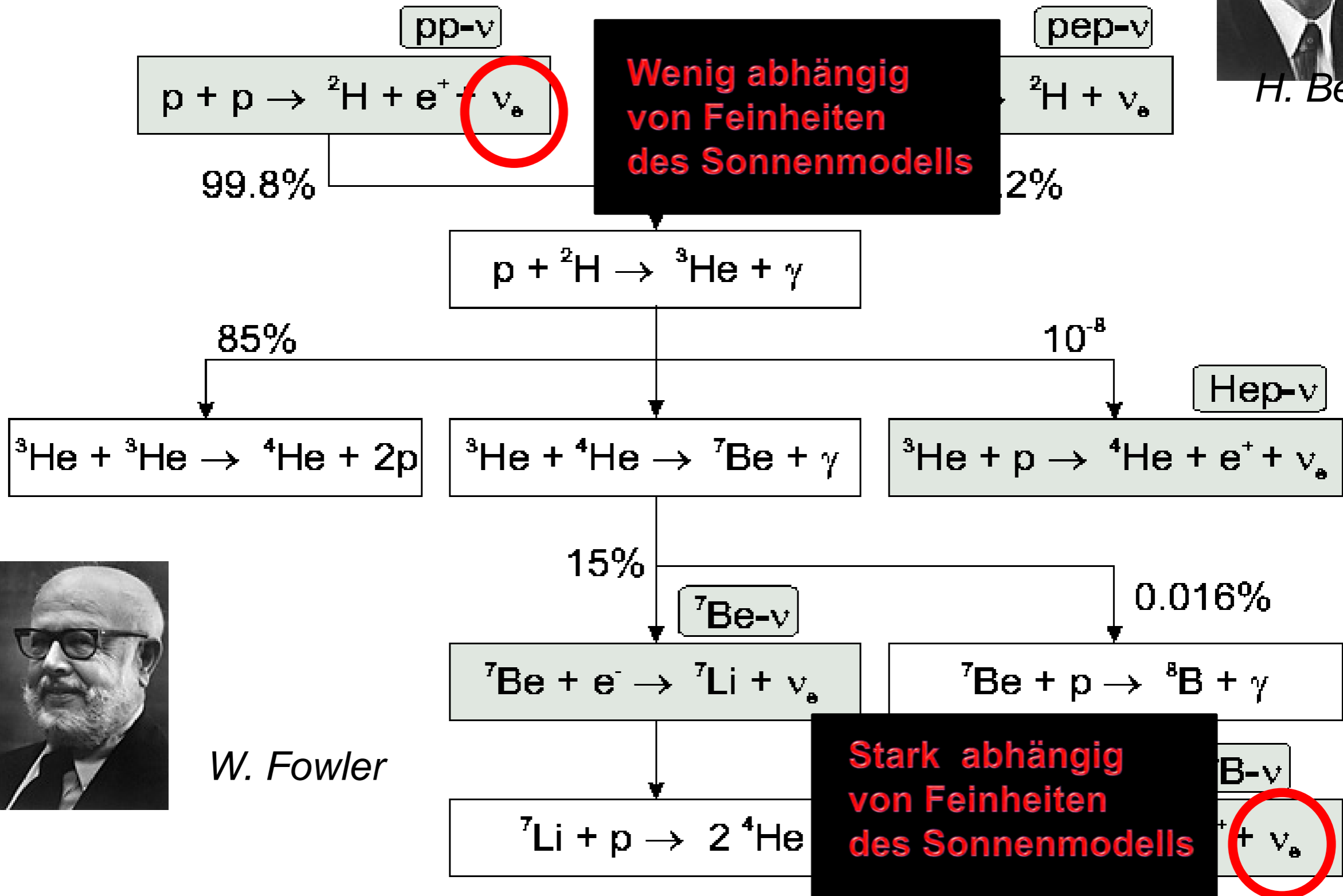
W. Fowler



H → He im Detail

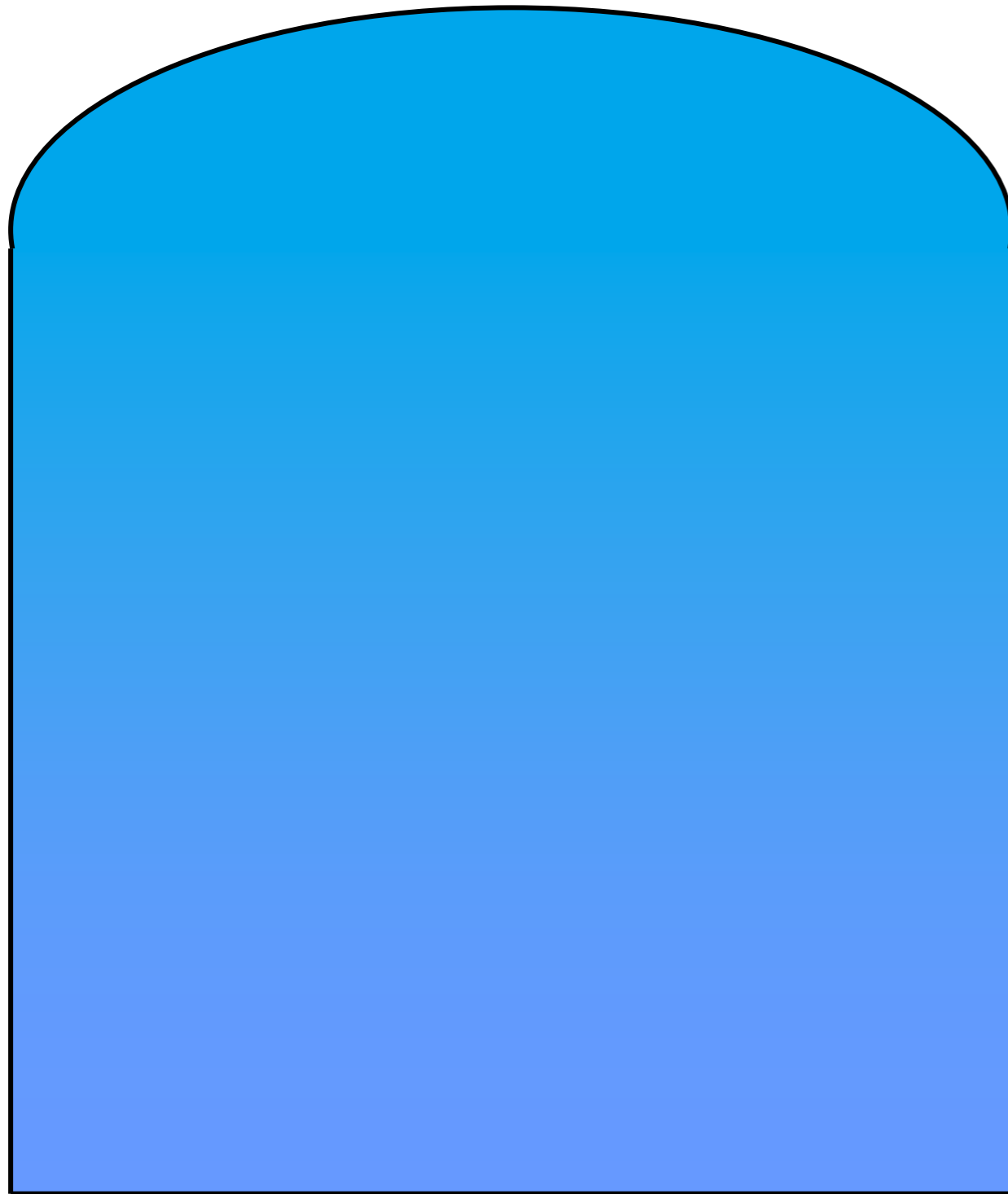


H. Bethe

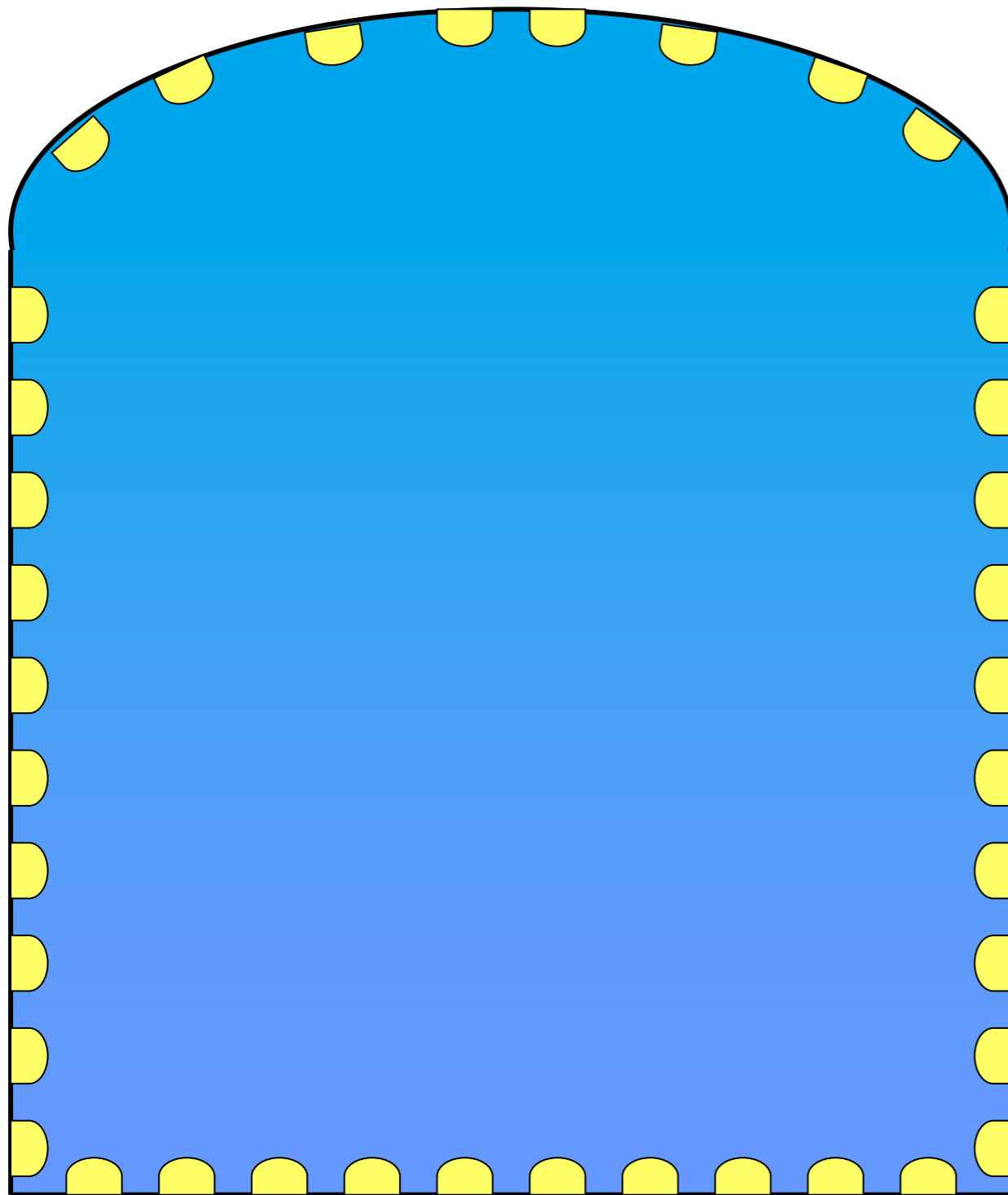


W. Fowler

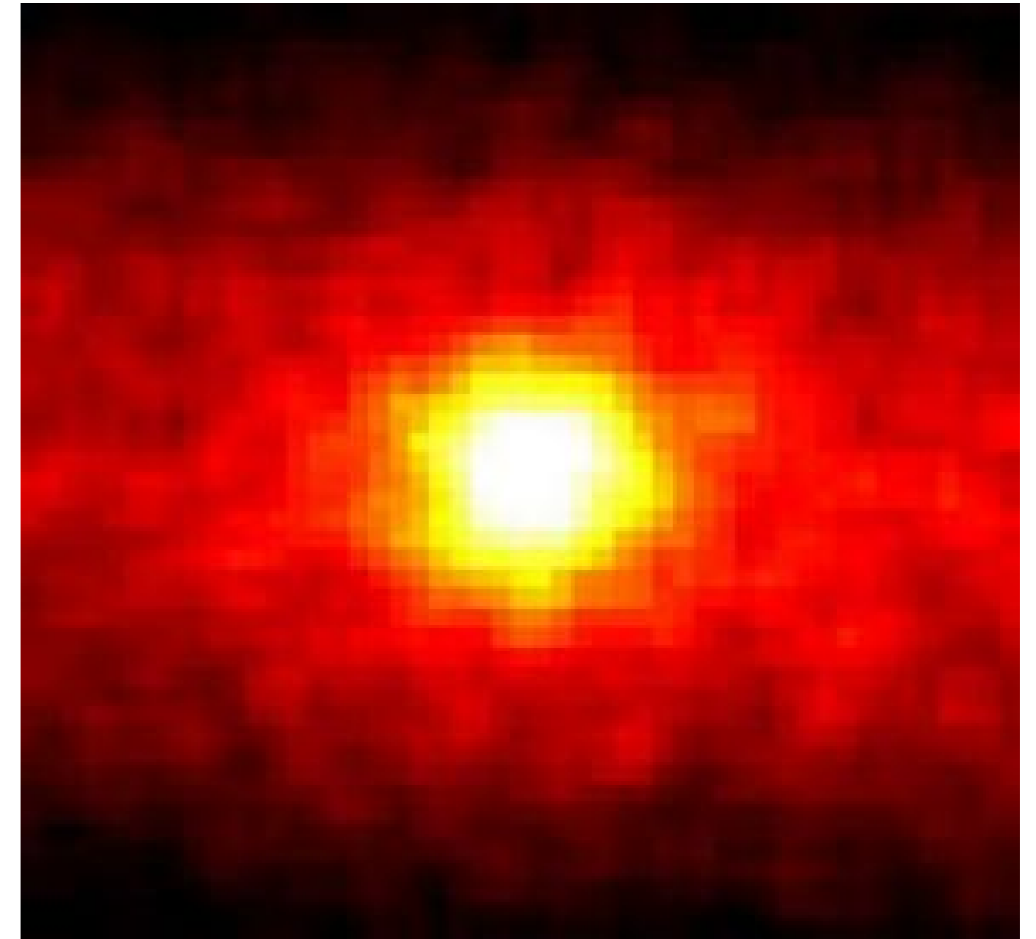
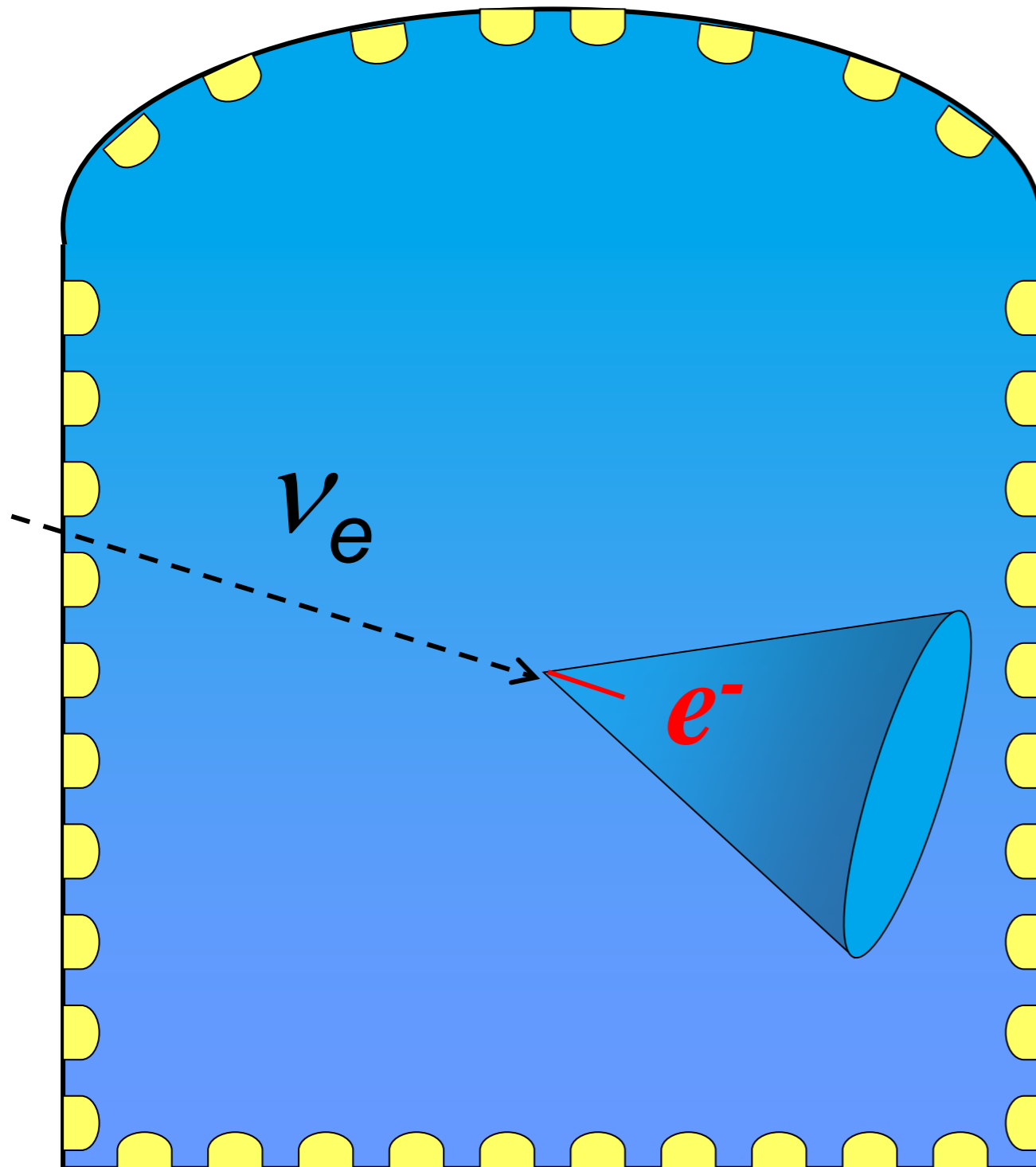
Der KAMIOKA-Detektor



Der KAMIOKA-Detektor



Der KAMIOKA-Detektor



Anzahl gemessener Reaktionen
—
Anzahl berechneter Reaktionen

$\sim 1/2$

■ ~~Experiment falsch ?~~

(d.h. weniger empfindlich als angenommen)

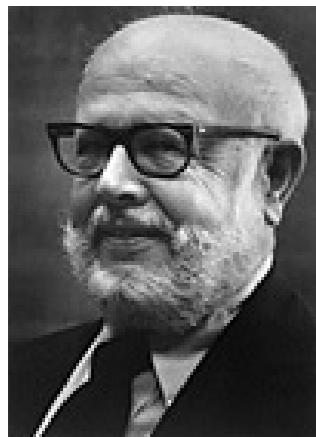
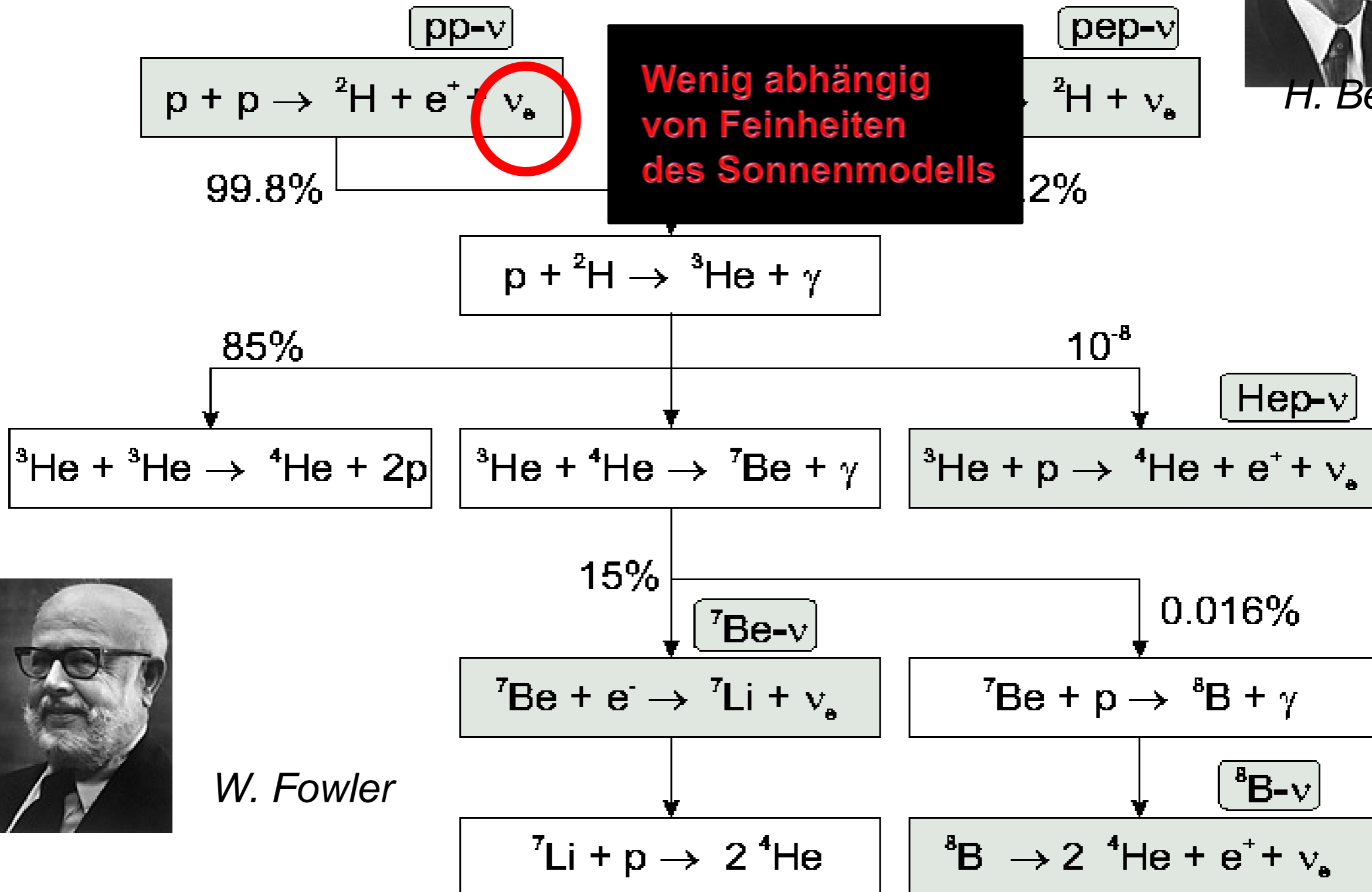
■ Sonnenmodell falsch ?

- Neutrinos machen irgendwas Unerwartetes ?

H → He im Detail



H. Bethe



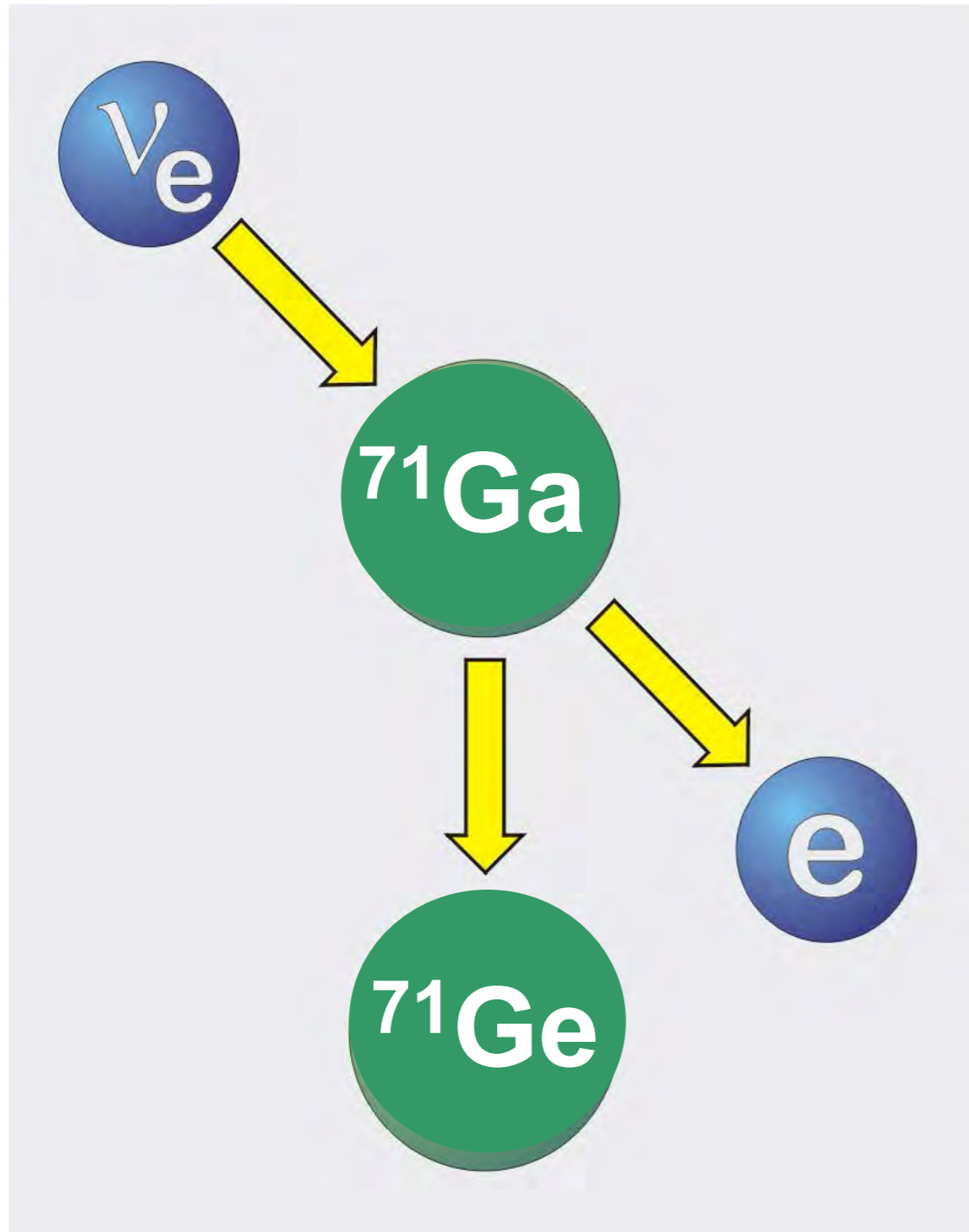
W. Fowler

Die Gallium-Germanium-Detektoren

Ab 1990:

SAGE (Kaukasus) & GALLEX (Gran Sasso Laboratorium, Italien)

(registriert auch Neutrinos aus
der pp-Reaktion)



Anzahl gemessener Reaktionen

Anzahl berechneter Reaktionen

~ **3/5**

■ ~~Experiment falsch ?~~

(d.h. weniger empfindlich als angenommen)

■ ~~Sonnenmodell falsch ?~~

■ Neutrinos machen etwas Unerwartetes !

■ ~~Experiment falsch ?~~

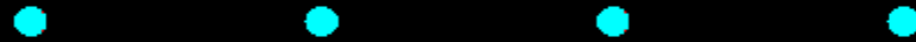
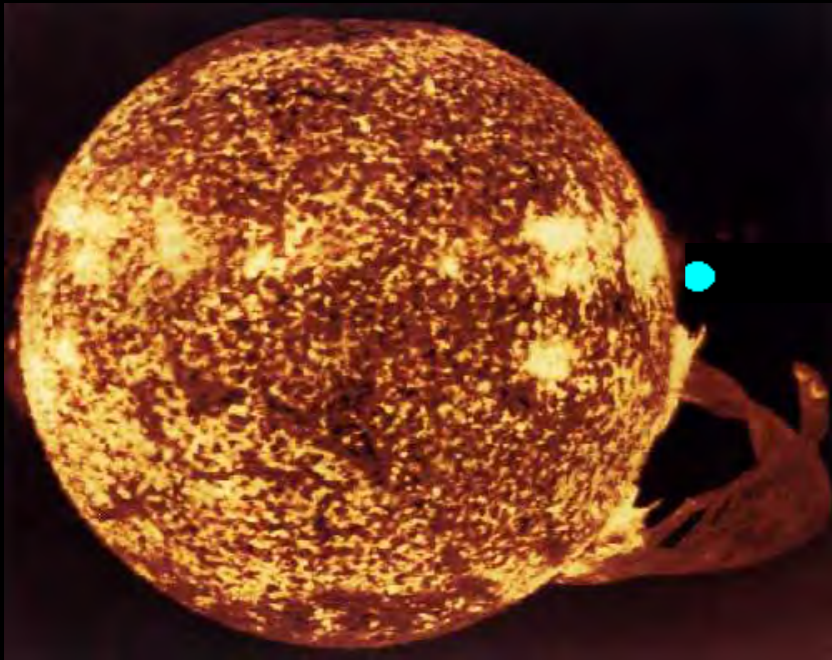
(d.h. weniger empfindlich als angenommen)

■ ~~Sonnenmodell falsch ?~~

■ Neutrinos machen

etwas **Erwartetes** !

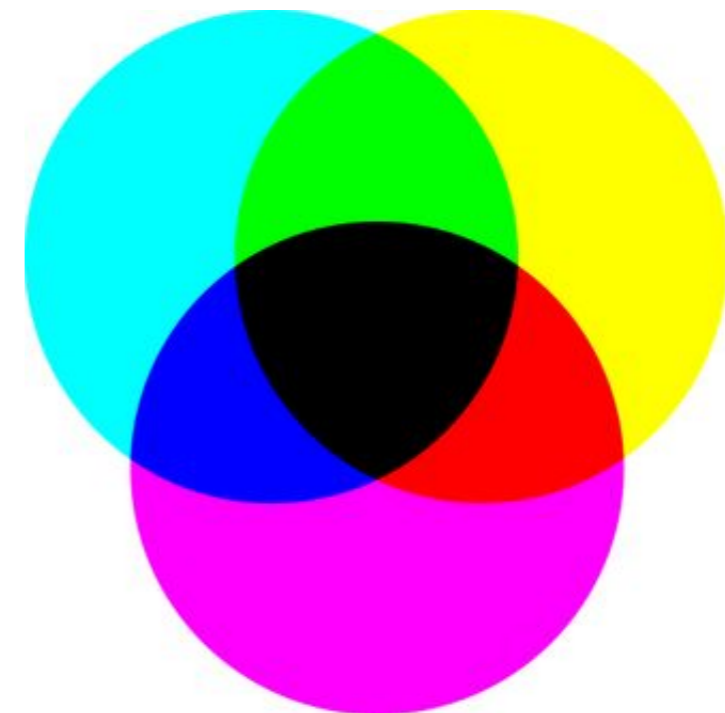
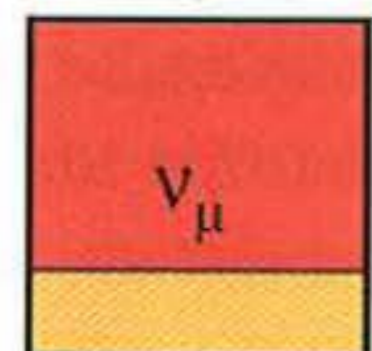
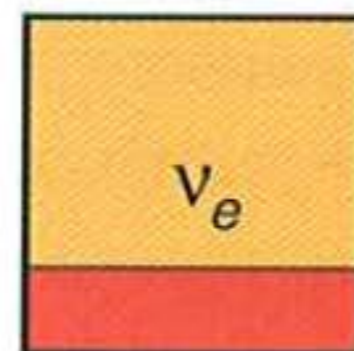
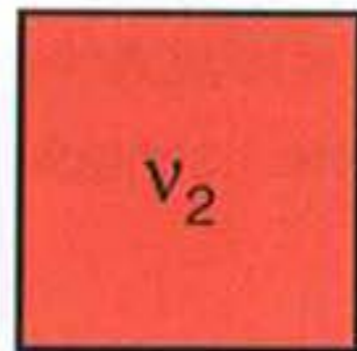
NEUTRINO-OSZILLATIONEN



Бруно Понтекорво

1958 - 1969

- **1958:** Pontecorvo diskutiert die Möglichkeit von $\nu \leftrightarrow \text{anti-}\nu$ Oszillationen
- **1962:** Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata schlagen vor, dass die beobachteten Neutrinozustände (damals: ν_e und ν_μ) aus „wahren“ Neutrinozuständen (ν_1 und ν_2) zusammengesetzt sind.

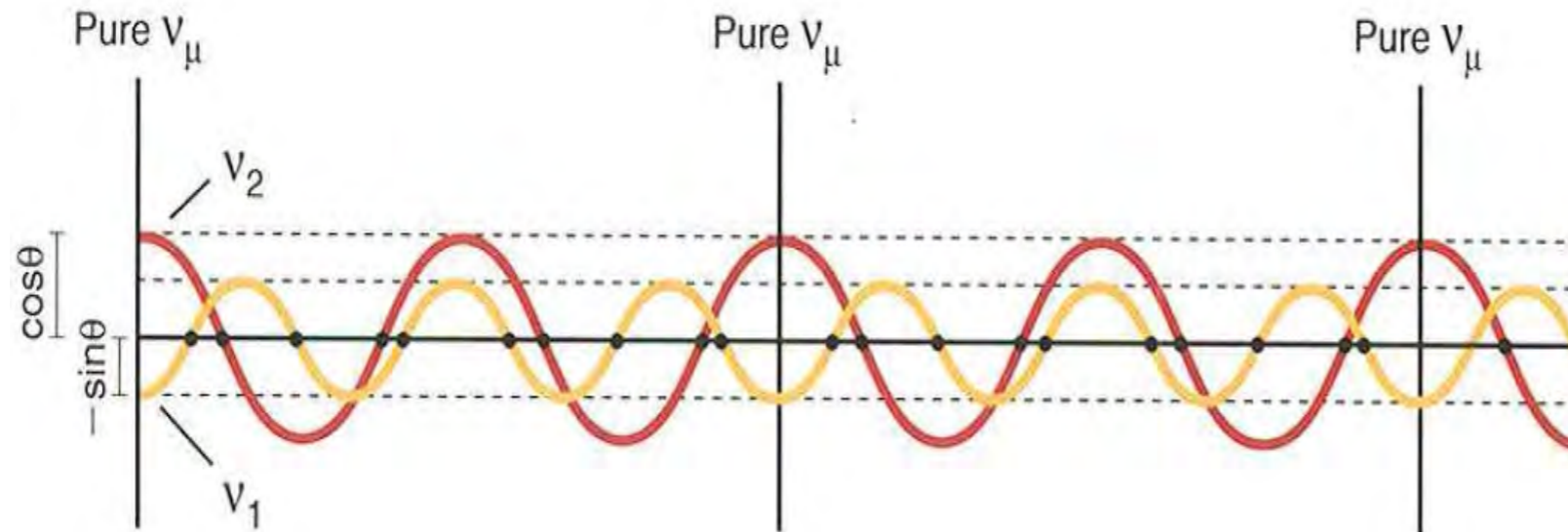


1958-1969

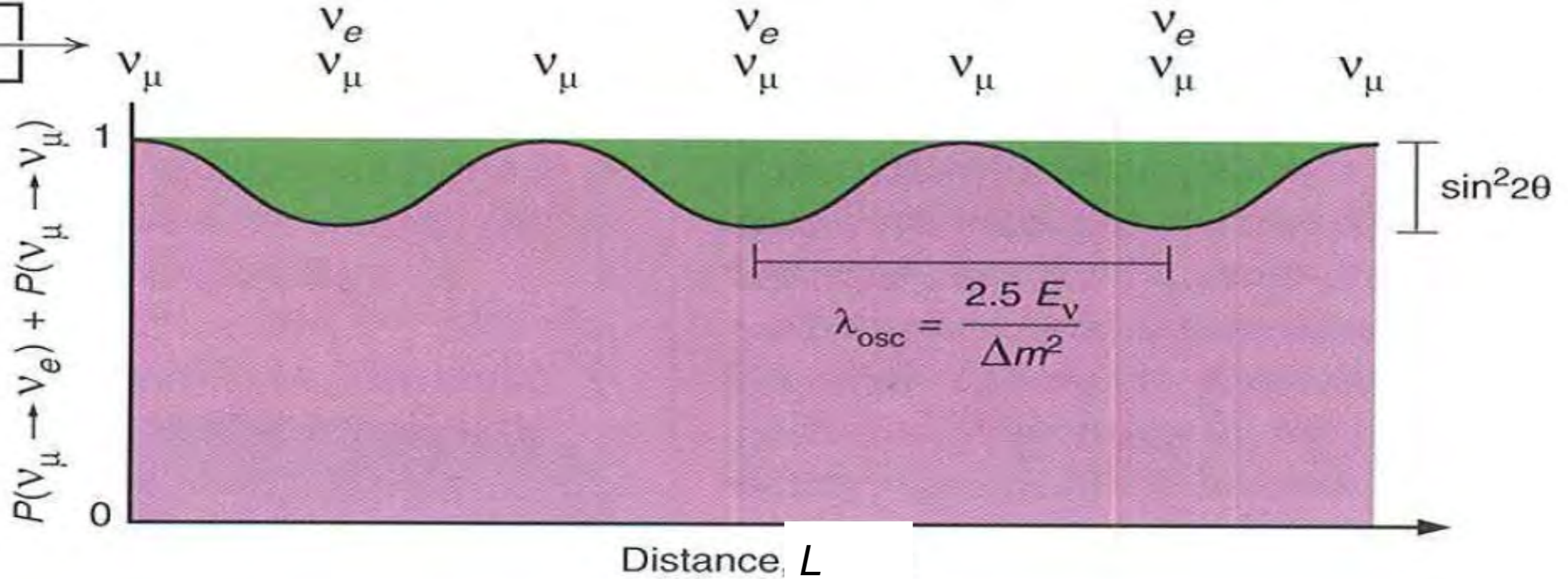
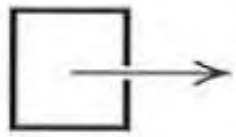
- 1967, Pontecorvo: ν_e linksdrehend \leftrightarrow anti- ν_e linksdrehend
- Weil nur **linksdrehende Neutrinos** und **rechtsdrehende Anti-Neutrinos** an schwachen Wechselwirkungen teilnehmen, müssten 50% der Neutrinos „verschwinden“.
- Pontecorvo sagt schon 1967 ein Defizit von Sonnen-Neutrinos voraus!

1969: Pontecorvo und Gribov: $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ Oszillationen.
Beschreibung der zeitlichen Entwicklung eines anfänglich „reinen“ ν_e oder ν_μ Zustandes.

Neutrino-Oszillationen



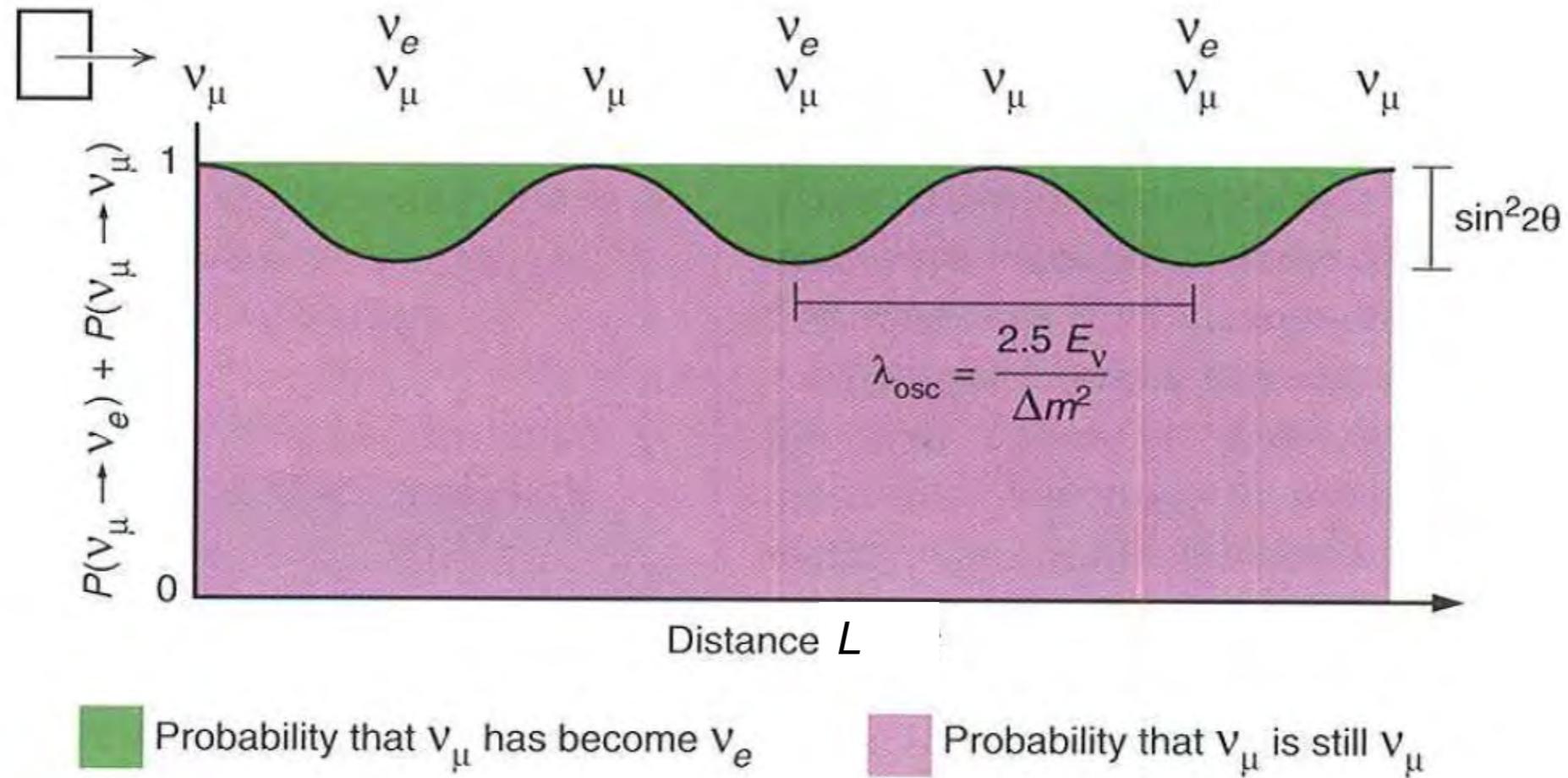
Source



Probability that ν_μ has become ν_e

Probability that ν_μ is still ν_μ


Neutrino-Oszillationen



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$$

$\theta =$ Mischungswinkel, $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$, $E =$ Energie, $L =$ Wegstrecke

Neutrinos müssen eine Masse haben!


$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$$

$\theta =$ Mischungswinkel, $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$, $E =$ Energie, $L =$ Wegstrecke

Neutrino-Oszillationen 1970-76

Bruno Pontecorvo and Samoil Bilenky

**Endgültige Formulierung der Theorie der Neutrino-Mischung
und Neutrino Oszillation.**



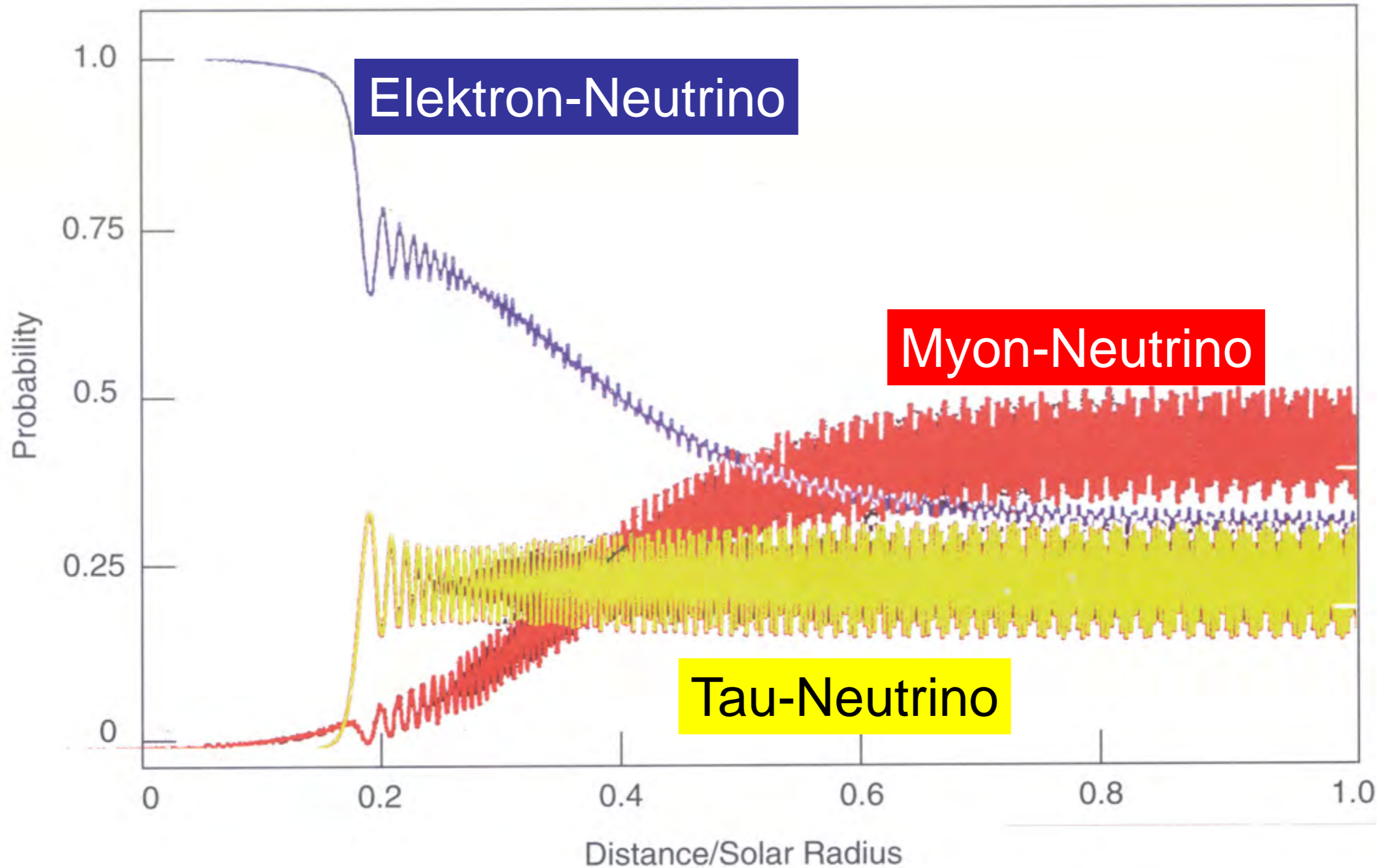
Materie-Oszillationen (MSW effect)

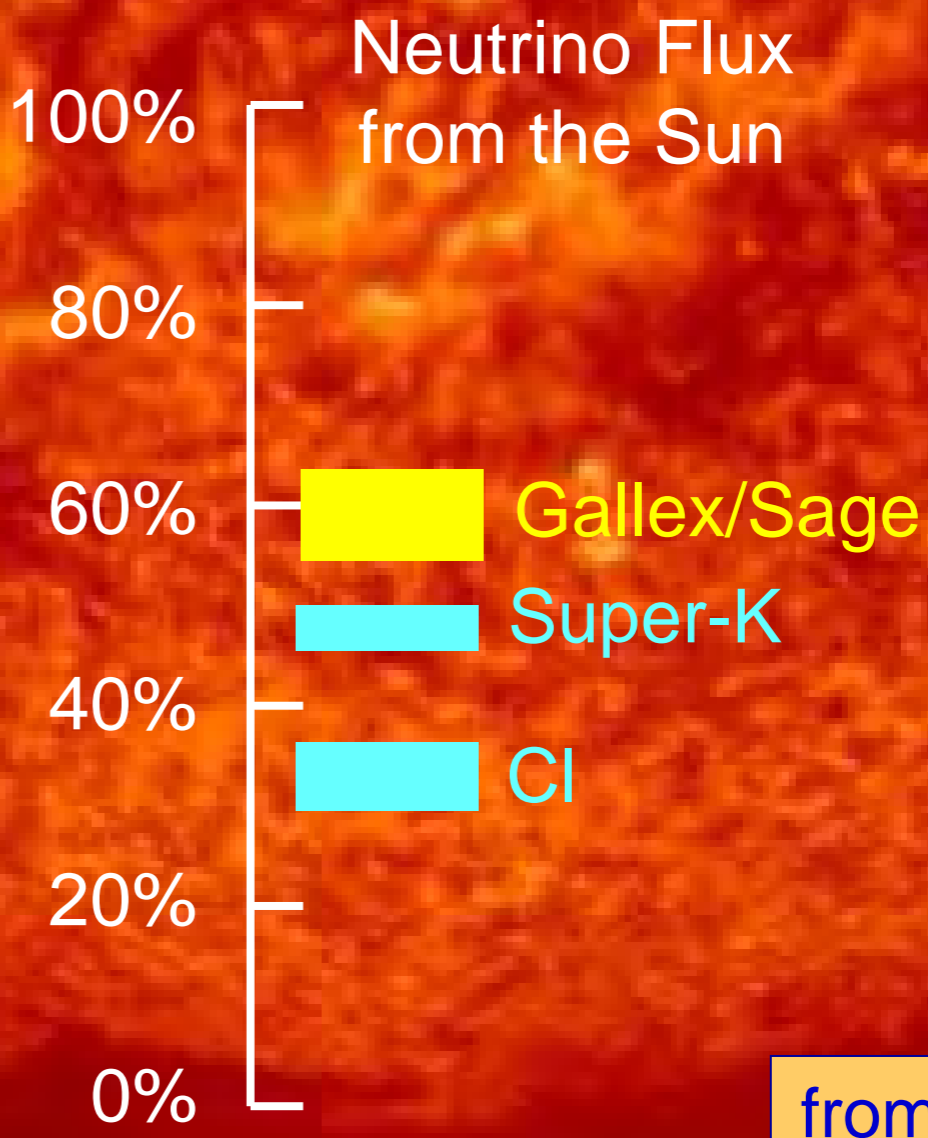
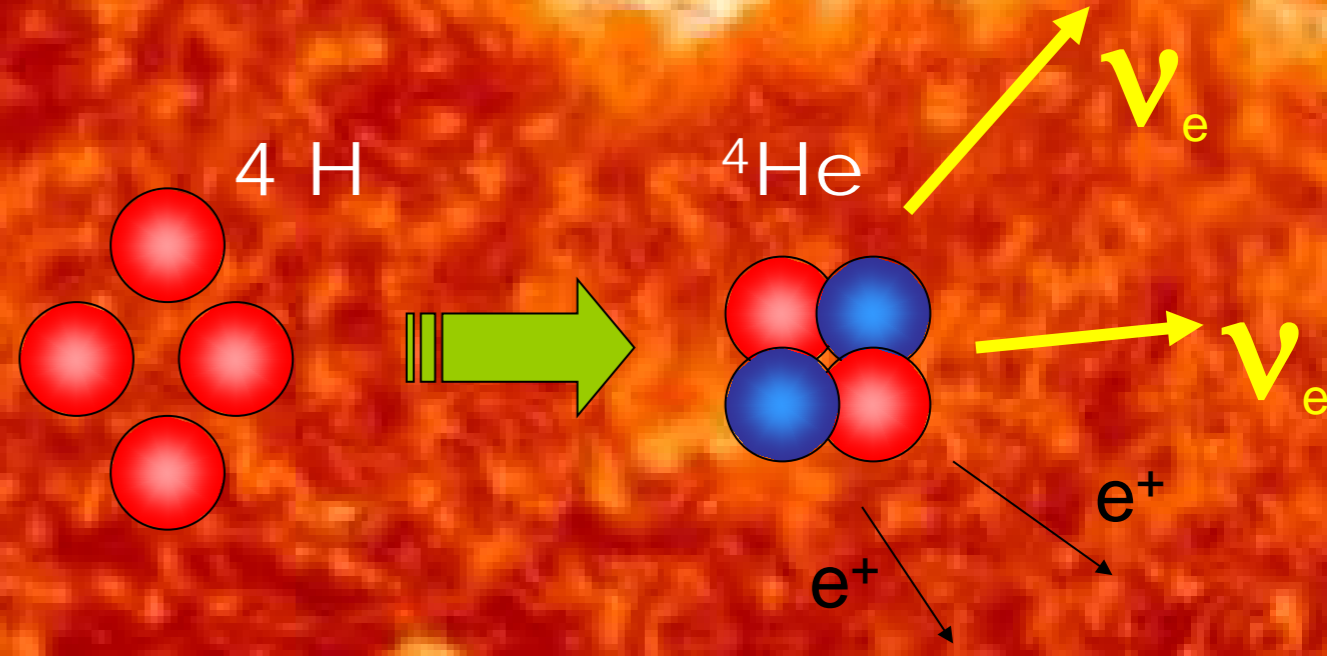
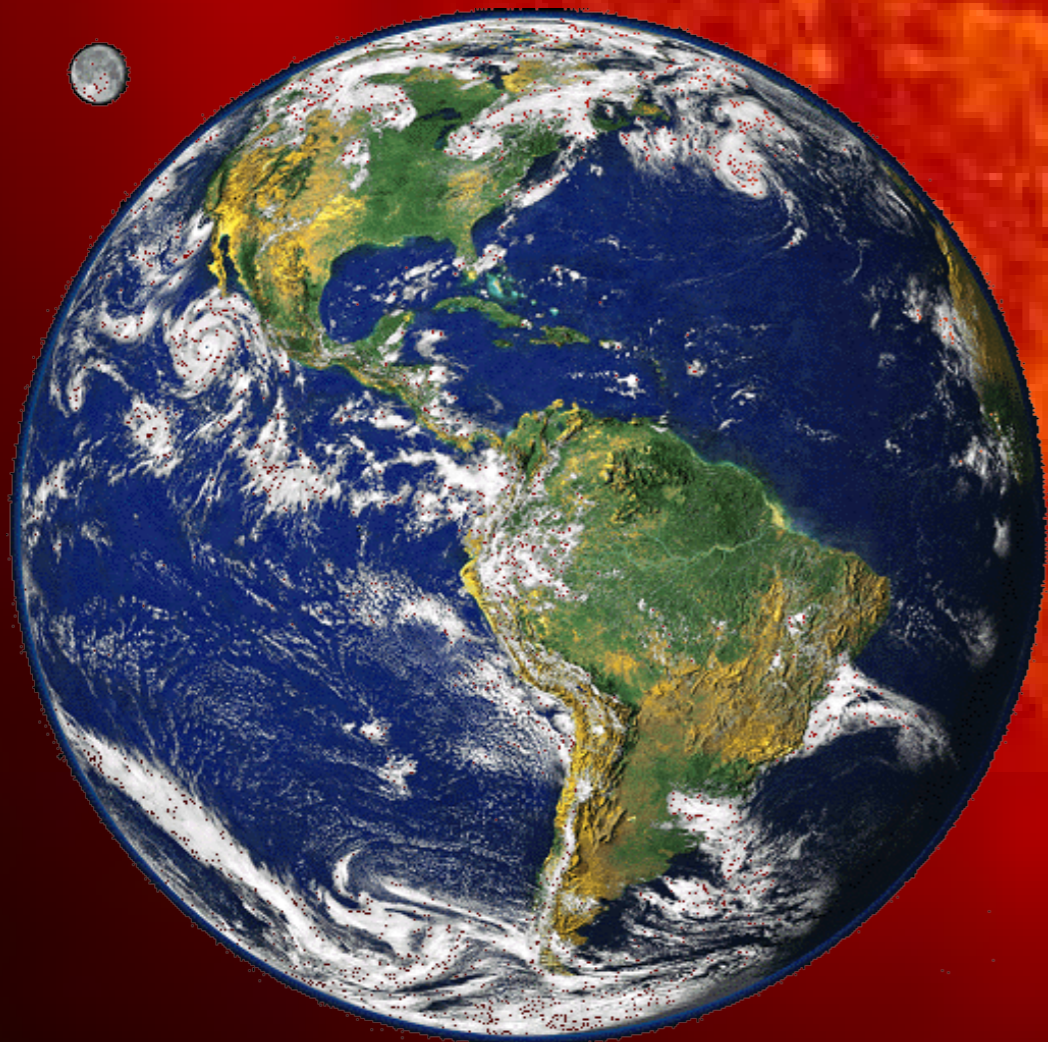
Lincoln Wolfenstein, Stanislav Mikheev
und Alexei Smirnov, finden den
Mechanismus der Materie-Oszillationen



(z.B. in der Sonne und in der Erde!)

Sonnen-Neutrinos und der MSW-Effect





from W. Hofmann

Neutrino-Oszillationen

oder

Neutrino-Zerfall

?

..oder nochwas anderes?

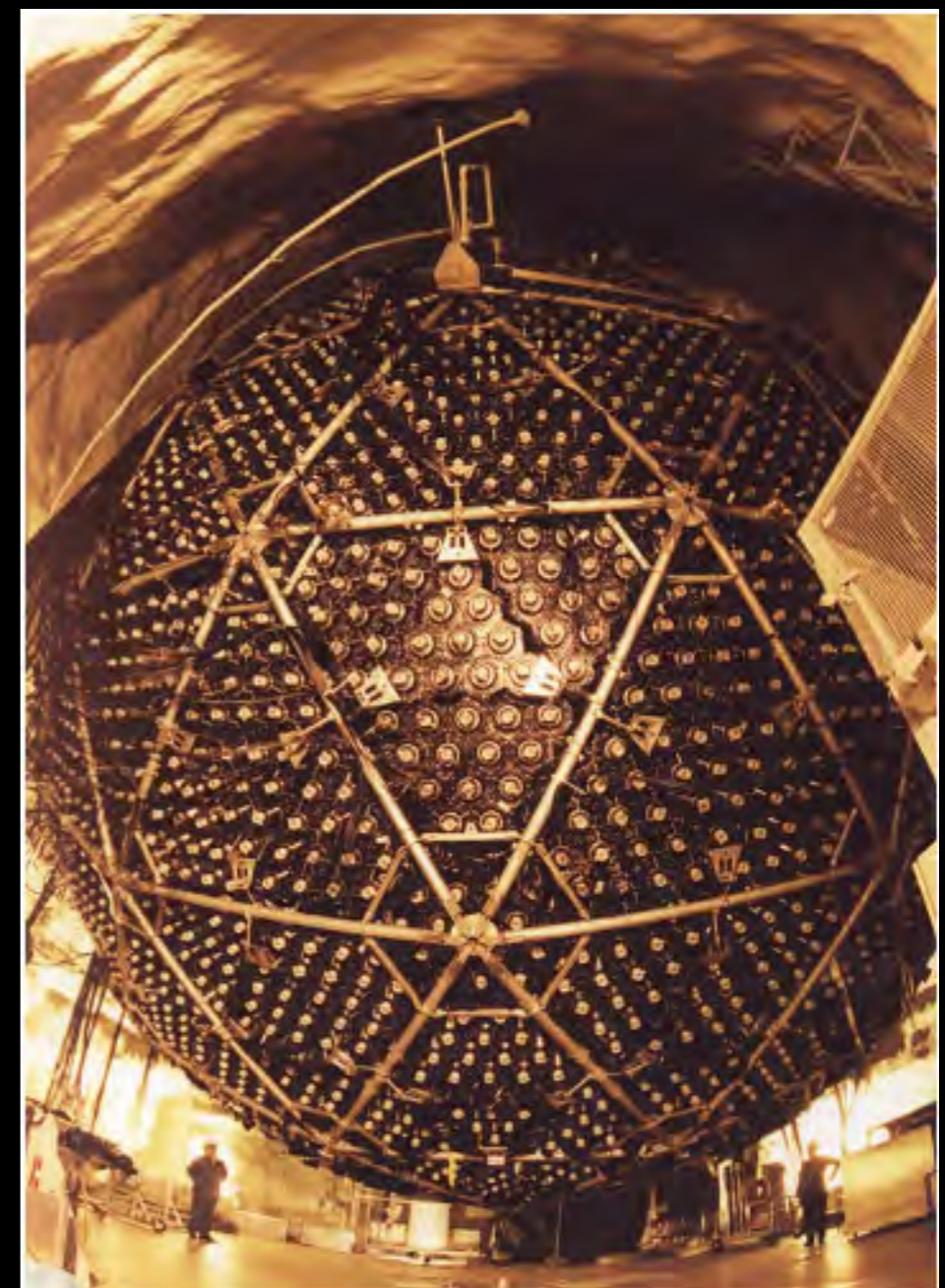
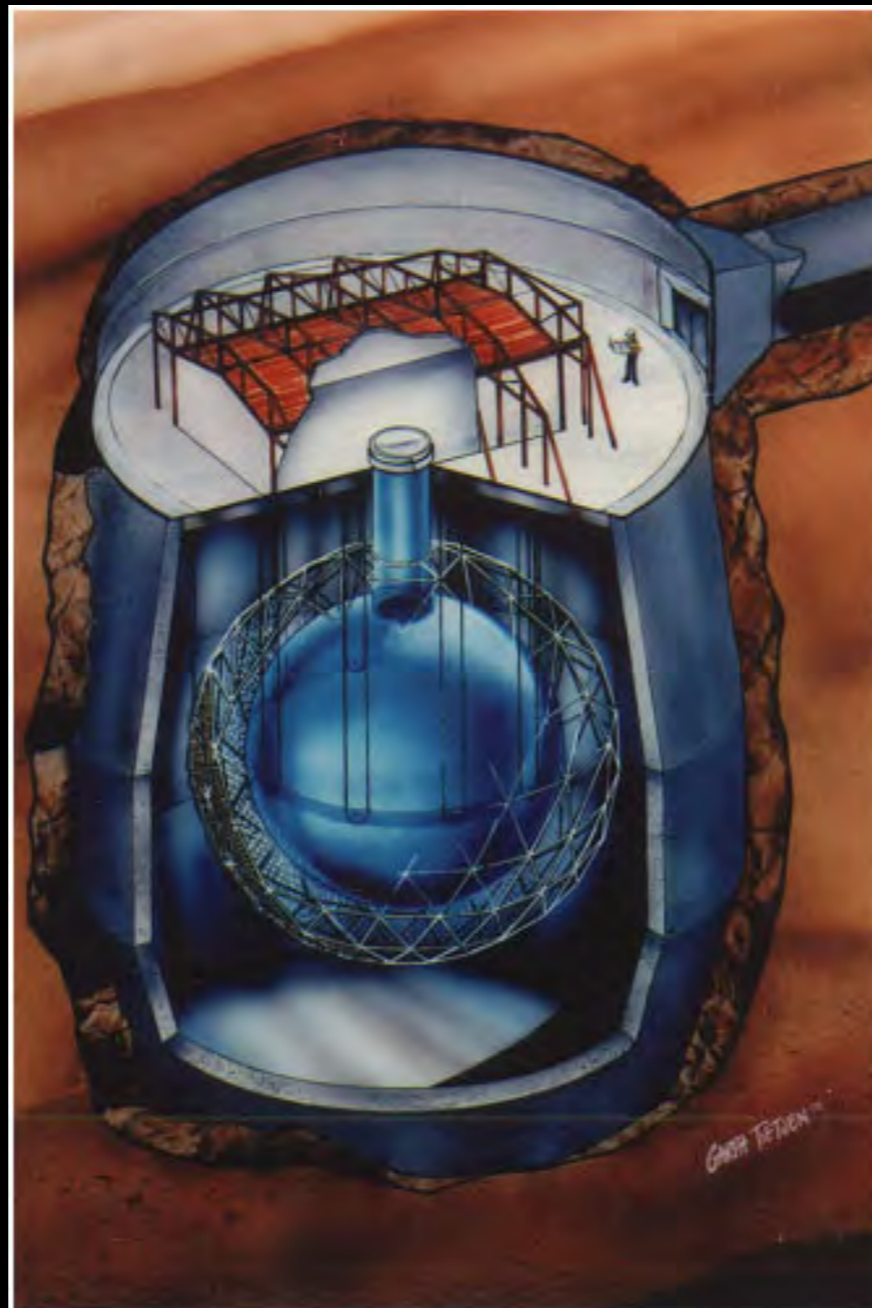
SNO

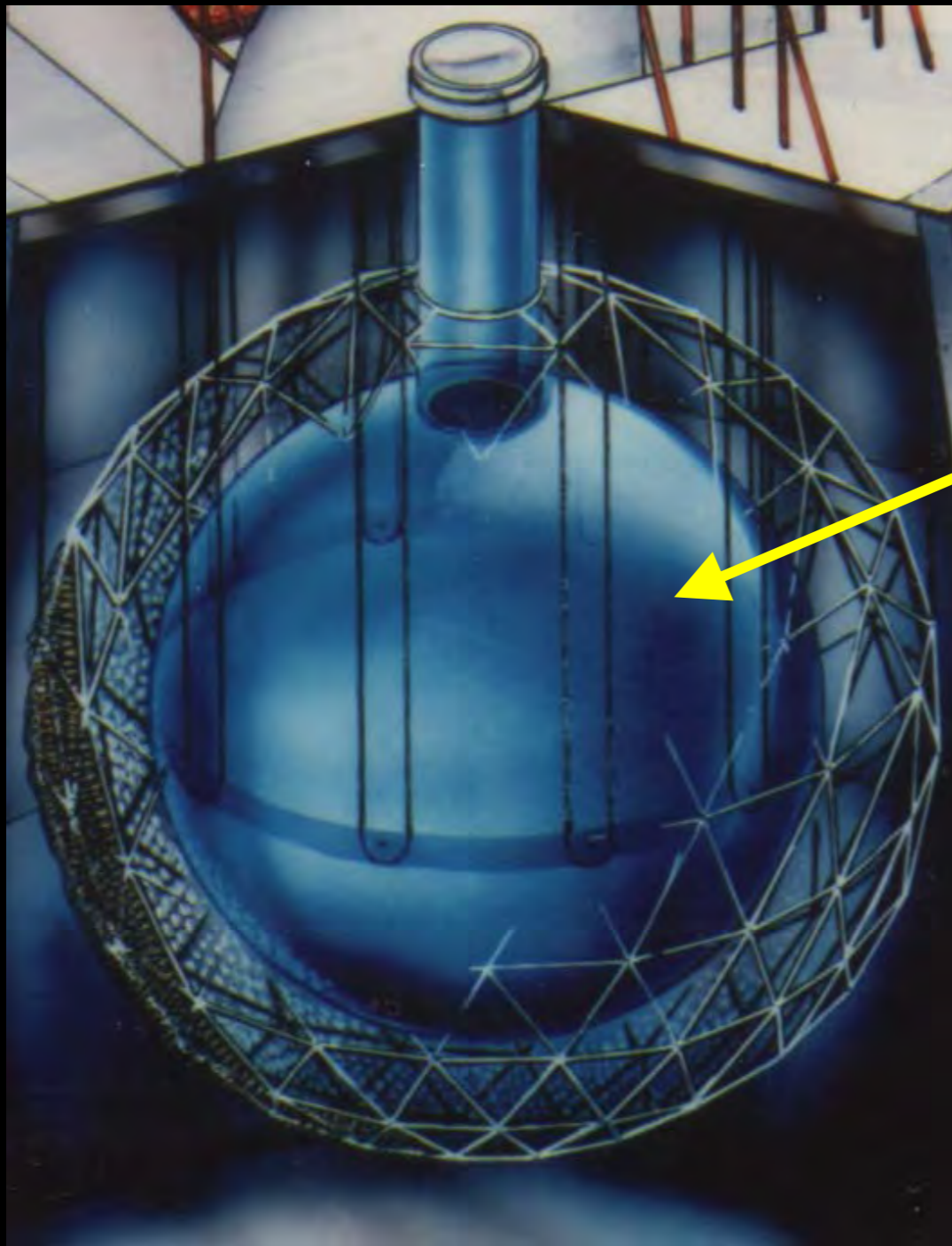
Sudbury Neutrino Observatory, Kanada

Gefüllt mit schwerem Wasser



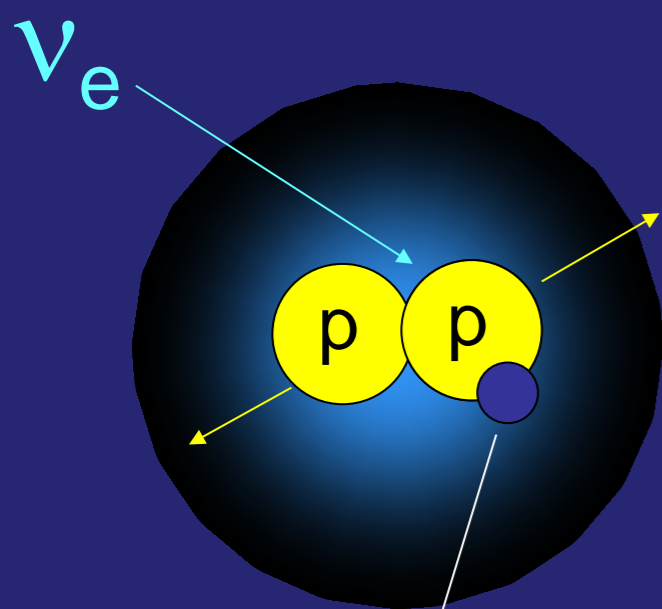
Art McDonald



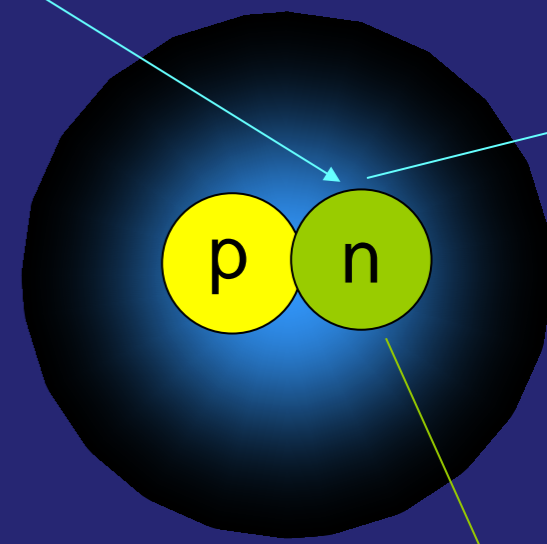


Deuterium

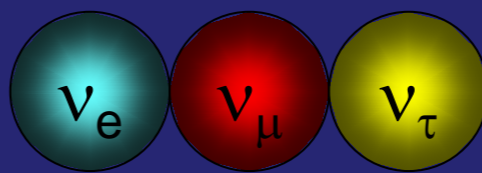
- $\nu_e + D \rightarrow p + p + e$
- $\nu_x + D \rightarrow \nu_x + p + n$
- $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$



Deuterium Atoms
in SNO Tank

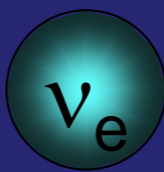
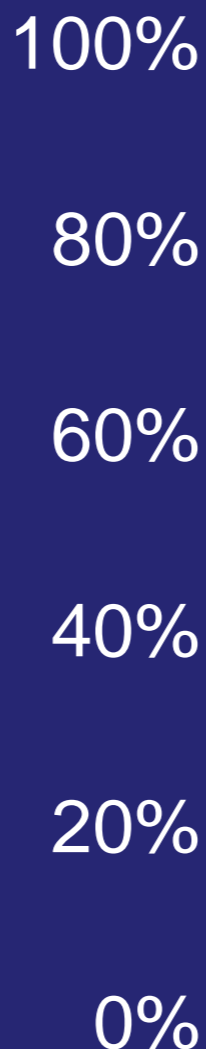


Neutrino Flux
From the Sun

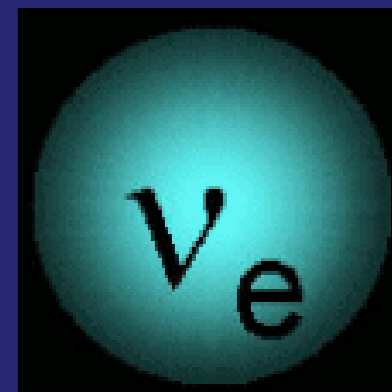


“Charged Current”
only ν_e

Neutral Current
all ν



Neutrino
Oszillationen!

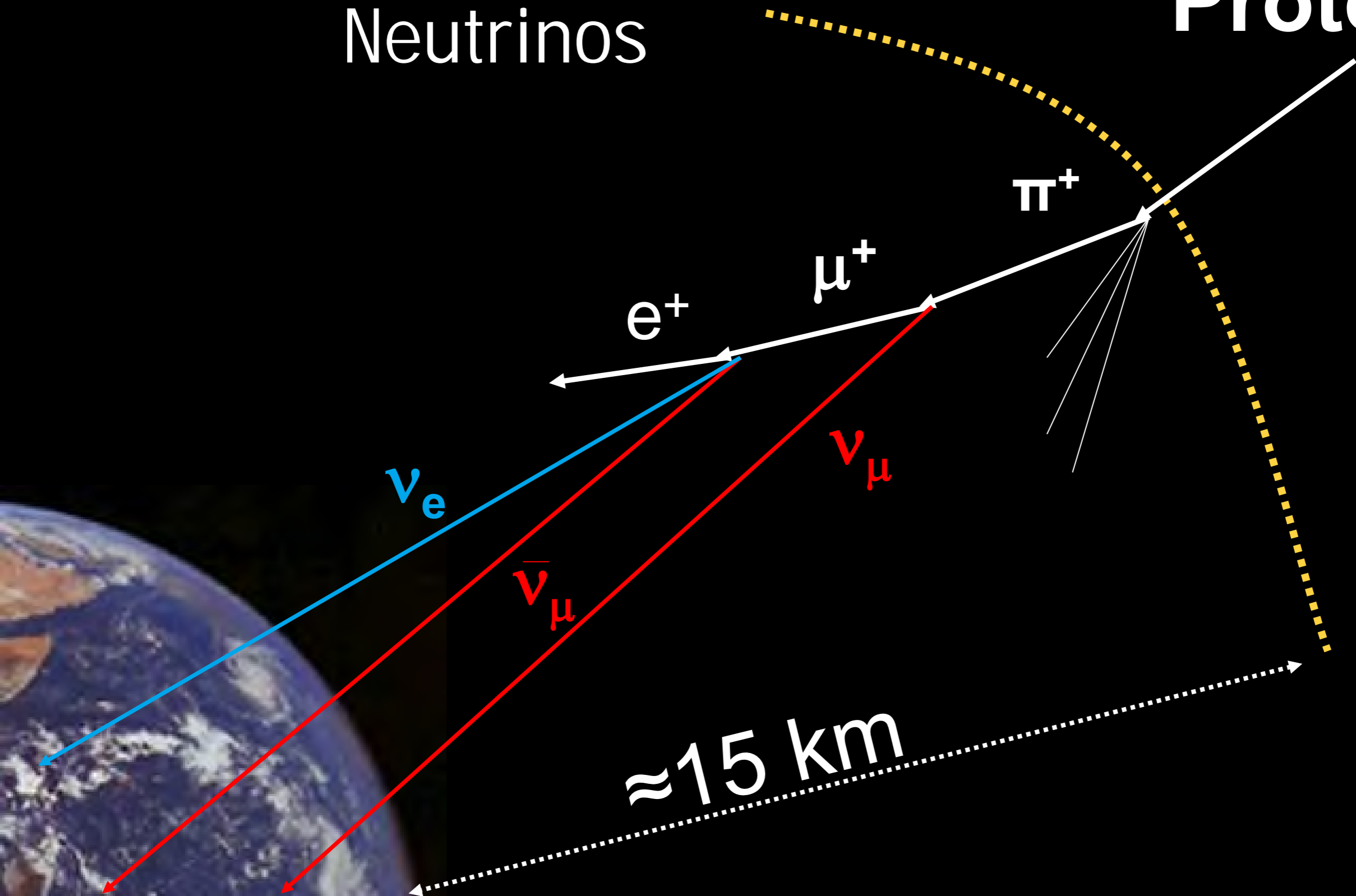


from W. Hofmann

... und Takaaki Kajita ?

„Atmosphärische“
Neutrinos

kosmisches
Proton



$\approx 15 \text{ km}$

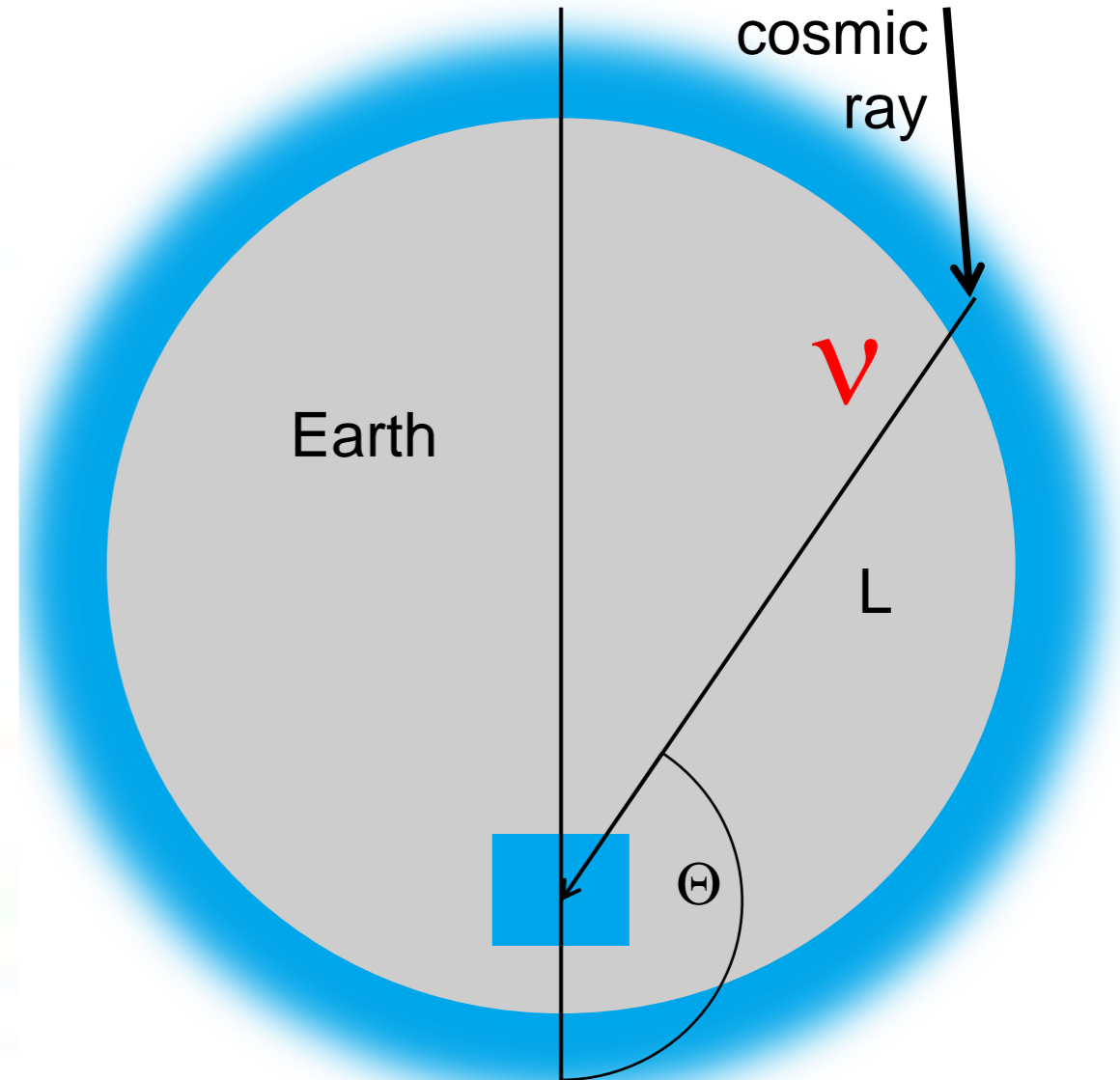
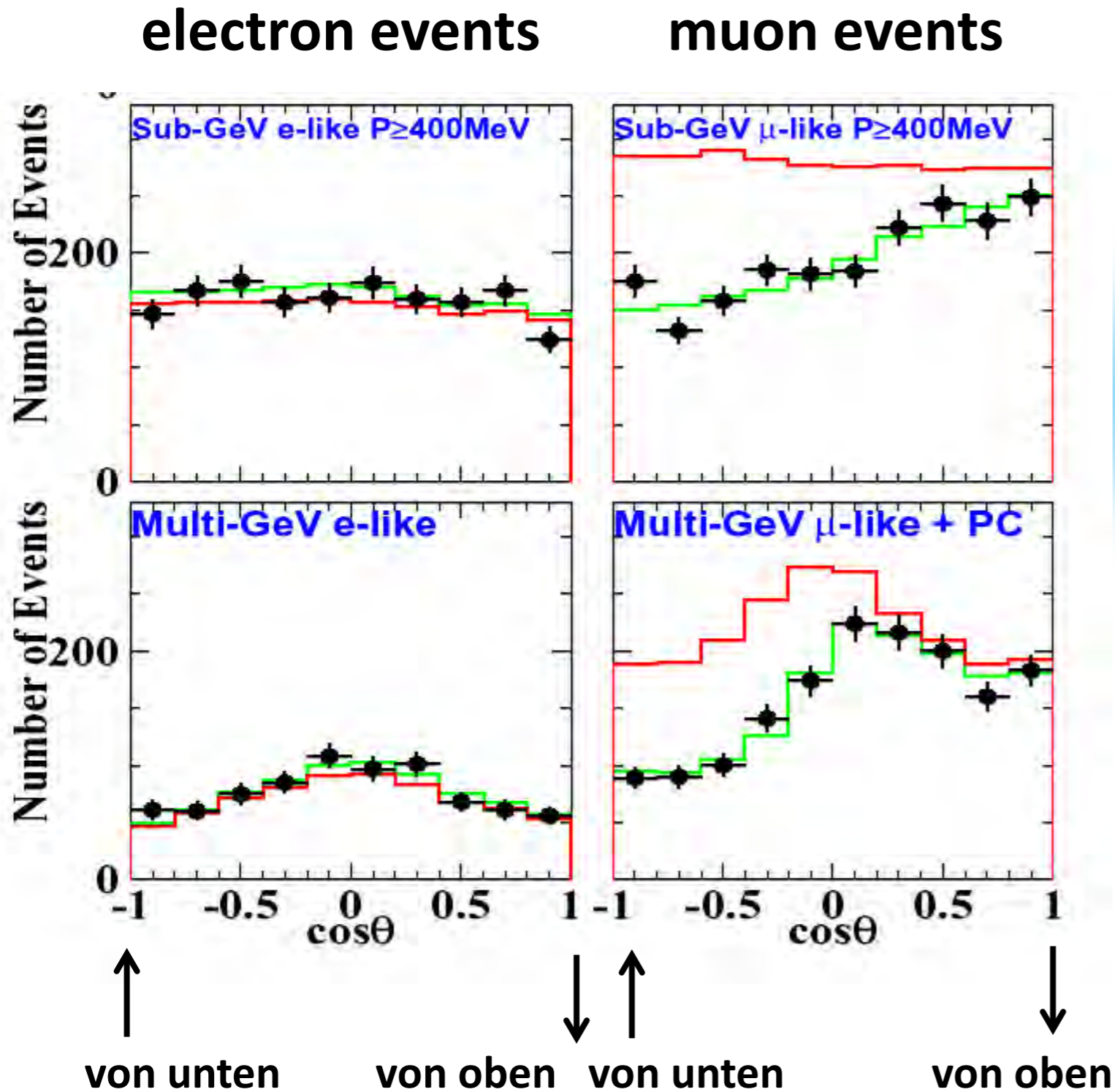
- **Zu wenig Myon-Neutrinos von unten?**
- **Widersprüchliche Resultate von verschiedenen Detektoren**
- **Detektor-Effekte oder
Neutrino-Oszillationen?**

Super-Kamiokande



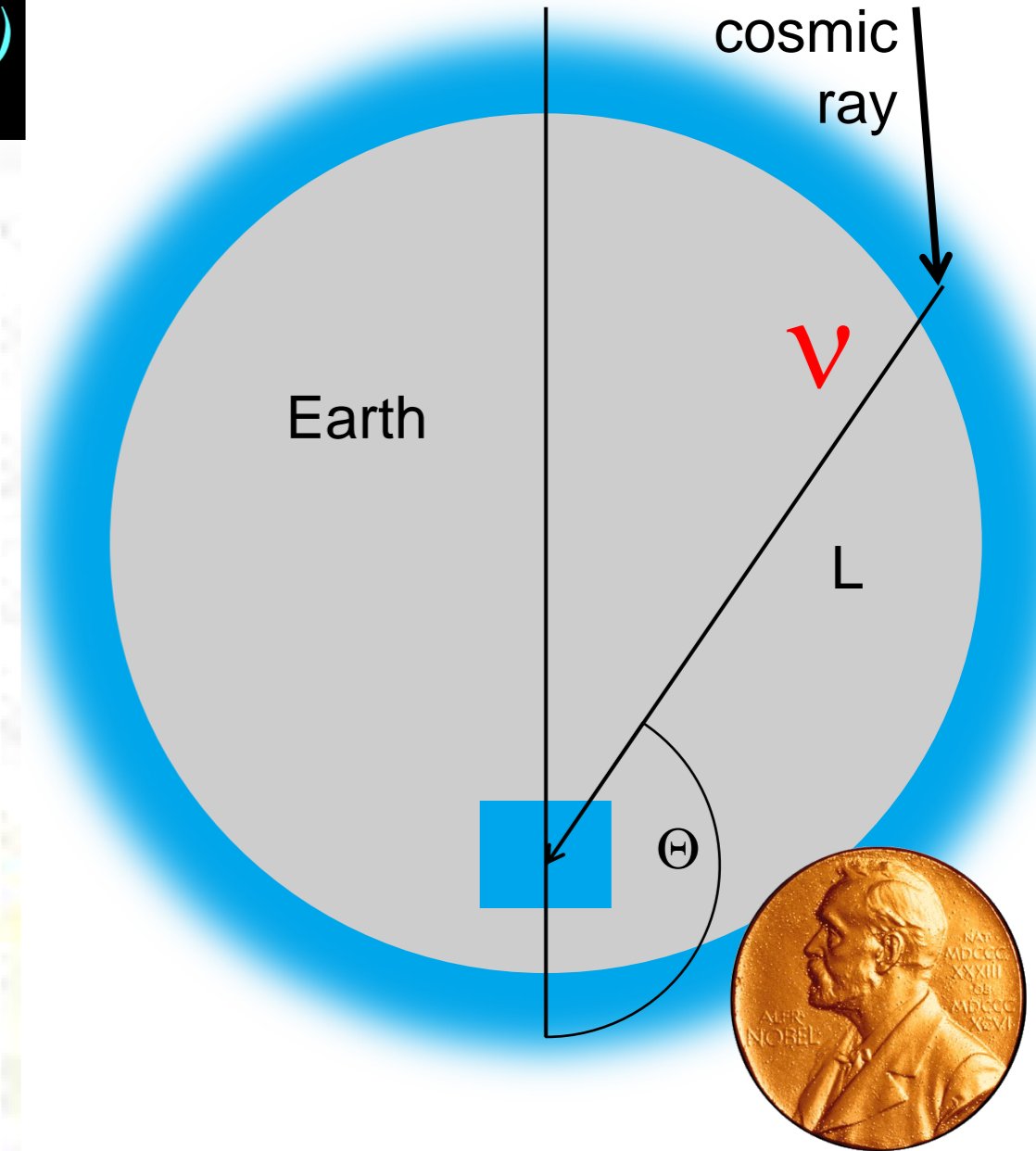
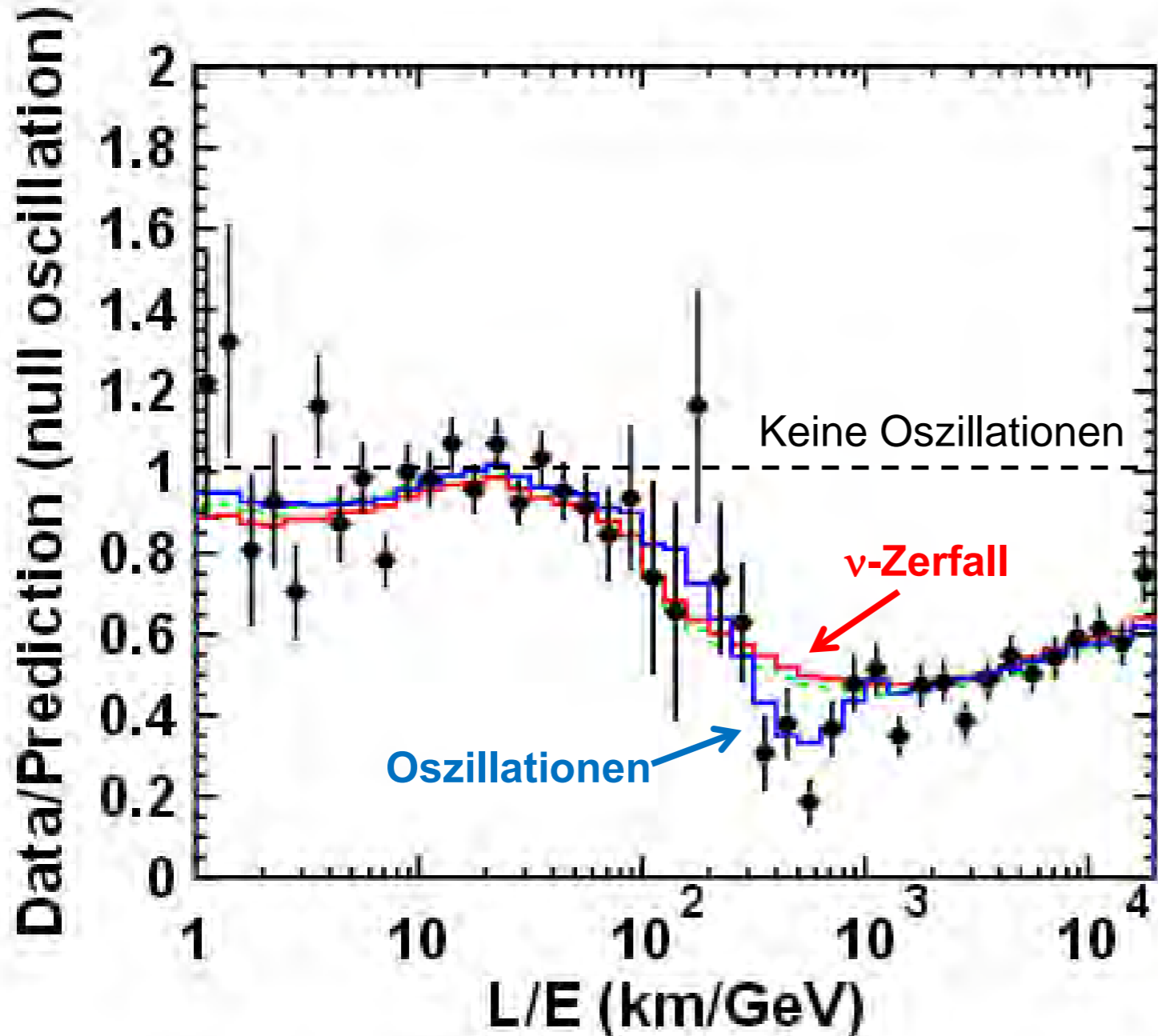
50 kt Wasser, 11000 Photomultiplier

Takaaki Kajita, Super-Kamiokande



Takaaki Kajita, Super-Kamiokande

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_x) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$$



1998

2015

Sonnen- und Reaktor-Neutrinos:

$$\Delta m_{12}^2 = 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} = 34^\circ$$

Atmosphärische Neutrinos und
Neutrinos von Beschleunigern:

$$|\Delta m_{23}^2| = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} = 45^\circ (\pm 7^\circ)$$

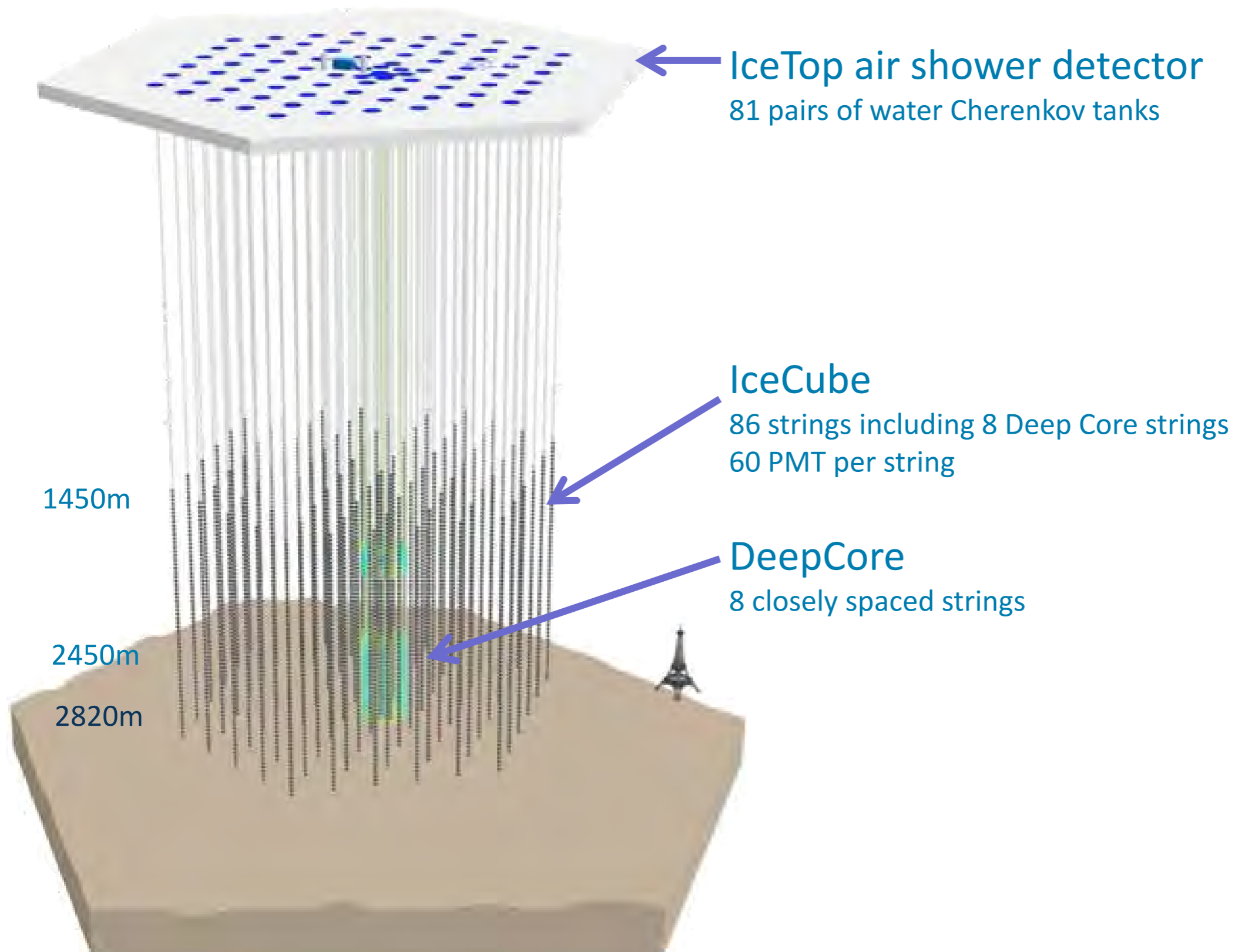
Reaktor- und
Beschleuniger-Neutrinos:

$$|\Delta m_{13}^2| = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{13} = 8.5^\circ (\pm 0.3^\circ)$$

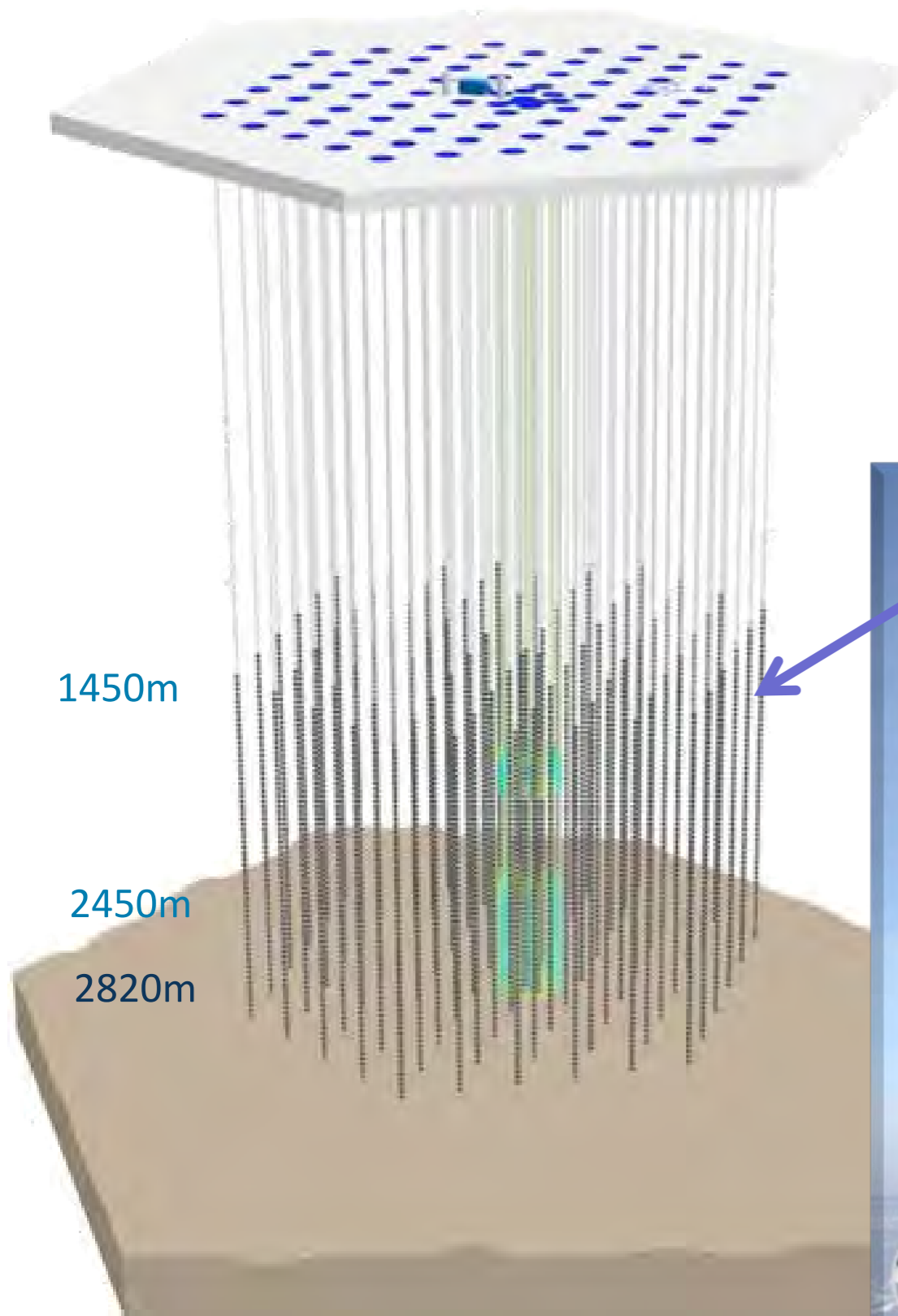
$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

IceCube

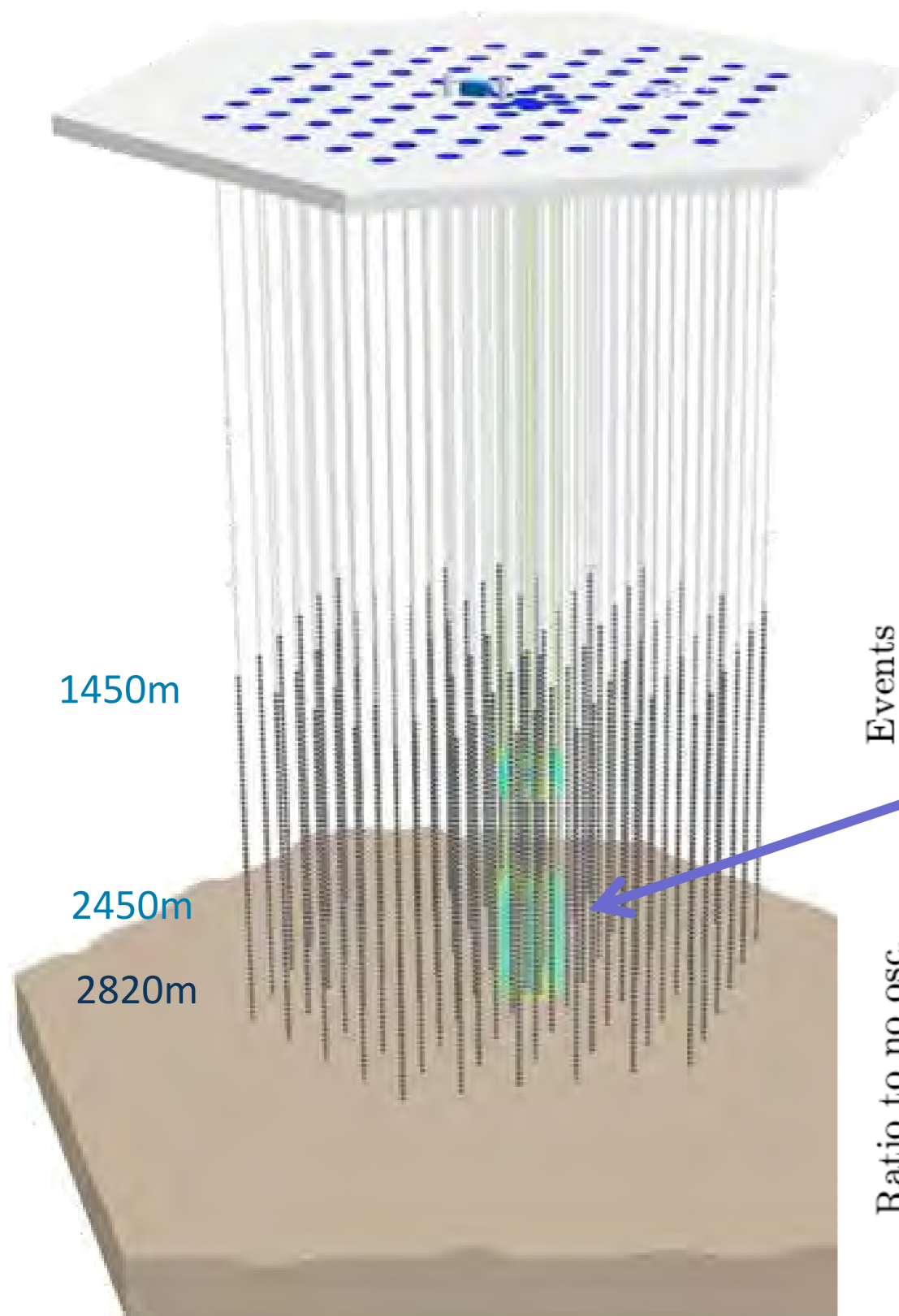


IceCube

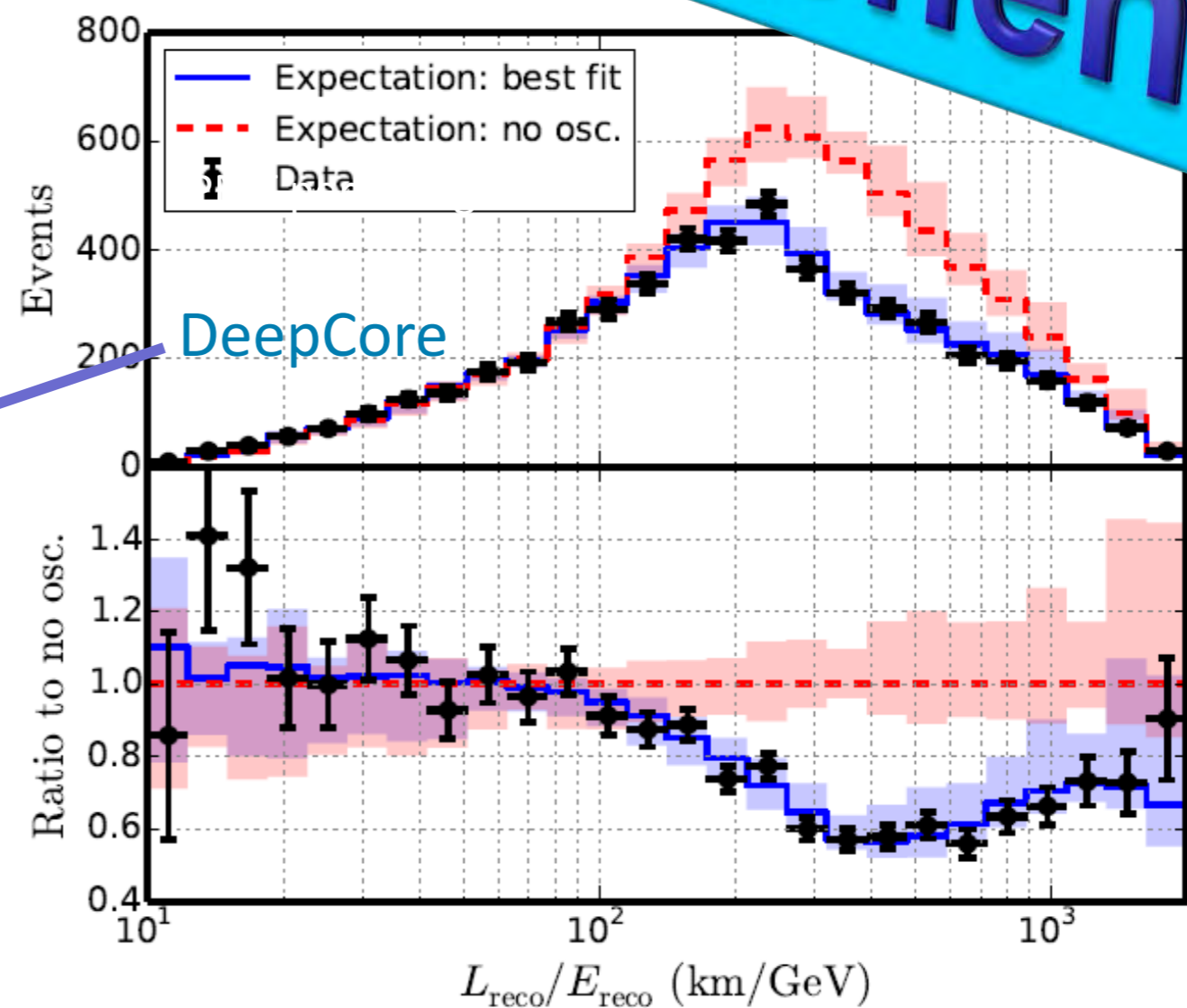
Entdeckung kosmischer Neutrinos



IceCube



Präzisionsmessung von Neutrino- Oszillationen



ORCA PINGU

im Mittelmeer

am Südpol





Es bleibt spannend



***Danke für Ihre
Aufmerksamkeit!***