Alfons Weber
Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia

Neutrinos

Die kleinen Wechselgeister!

Bachelor Vortragsreihe
6. Mai 2025
Mainz

Alfons Weber
Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia

Neutrinos

Die kleinen Wechselgeister!

Bachelor Vortragsreihe
6. Mai 2025
Mainz

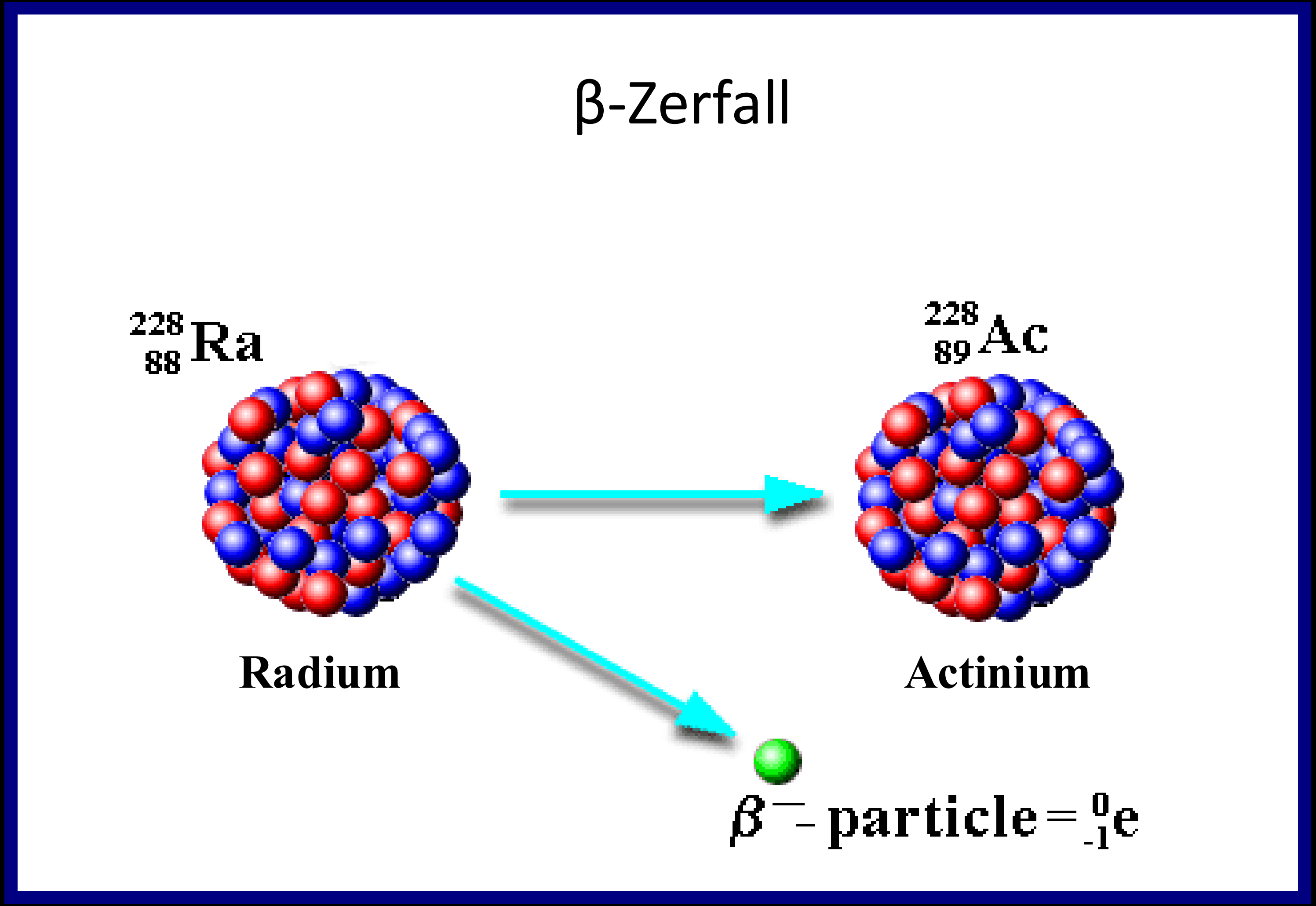
Alfons Weber
Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia

Neutrinos

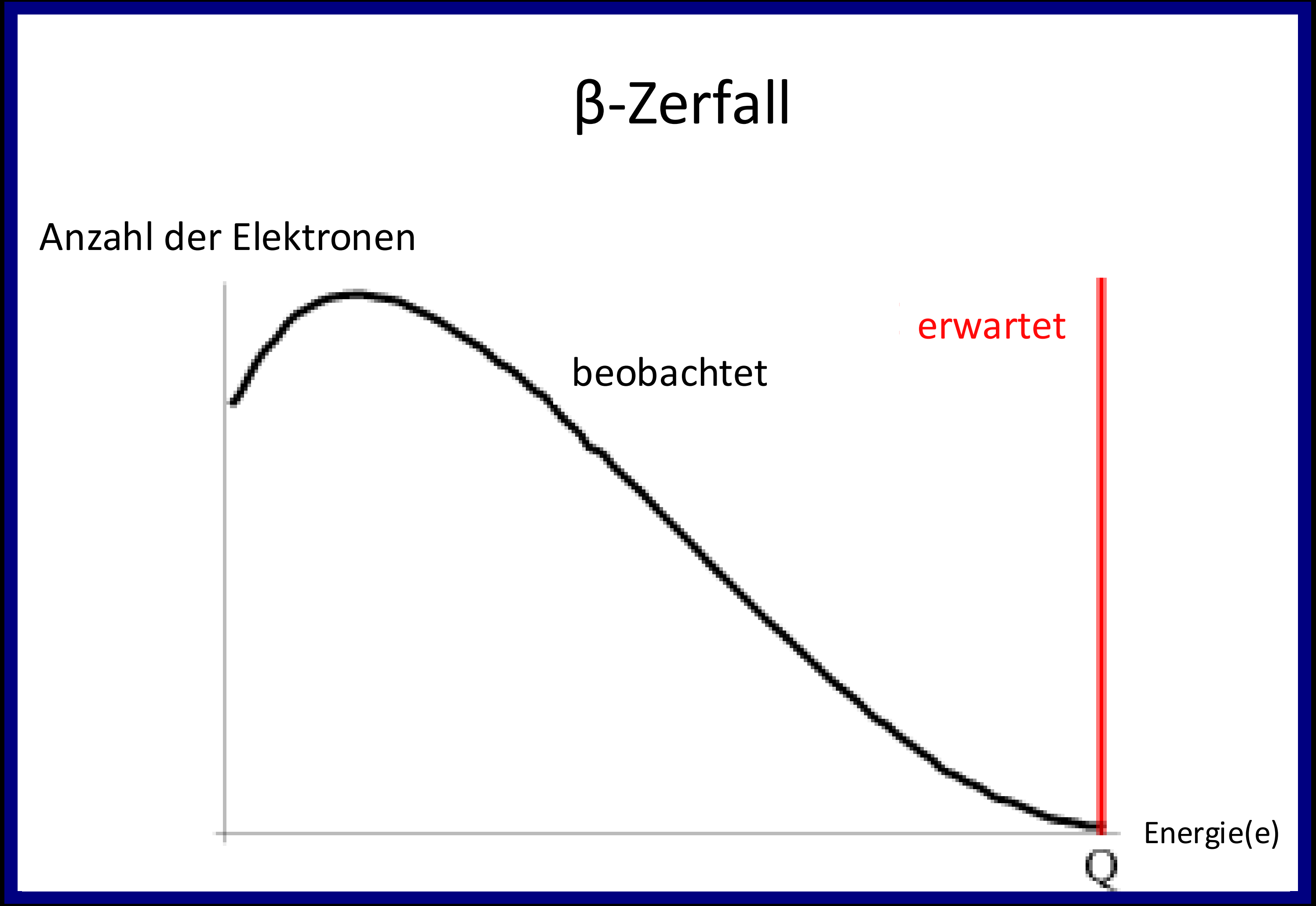
Der Grund unserer Existenz?

Bachelor Vortragsreihe
6. Mai 2025
Mainz

Krise


β-Zerfall
$^{228}_{88}\mathrm{Ra}$
Radium
$^{228}_{89}\mathrm{Ac}$
Actinium
β^{-}- particle = $^{0}_{-1}\mathrm{e}$

$$\text{Energie(Ra)} \neq \text{Energie(Ac)} + \text{Energie(e)}$$



$$\text{Energie(Ra)} \neq \text{Energie(Ac)+Energie(e)}$$

Neils Bohr
(vor 1930)

"Beim jetzigen Verständnis der Atomtheorie haben wir keinen Grund anzunehmen, dass die Energieerhaltung auch beim β-Zerfall gilt."

Emmy Noether

Noether-Theorem (1919)

„Zu jeder Invarianz gehört eine Erhaltungsgröße.“

Zeitinvarianz

⇔

Energieerhaltung

Wolfgang Pauli
(in 1930)

„Liebe radioaktive Damen und Herren

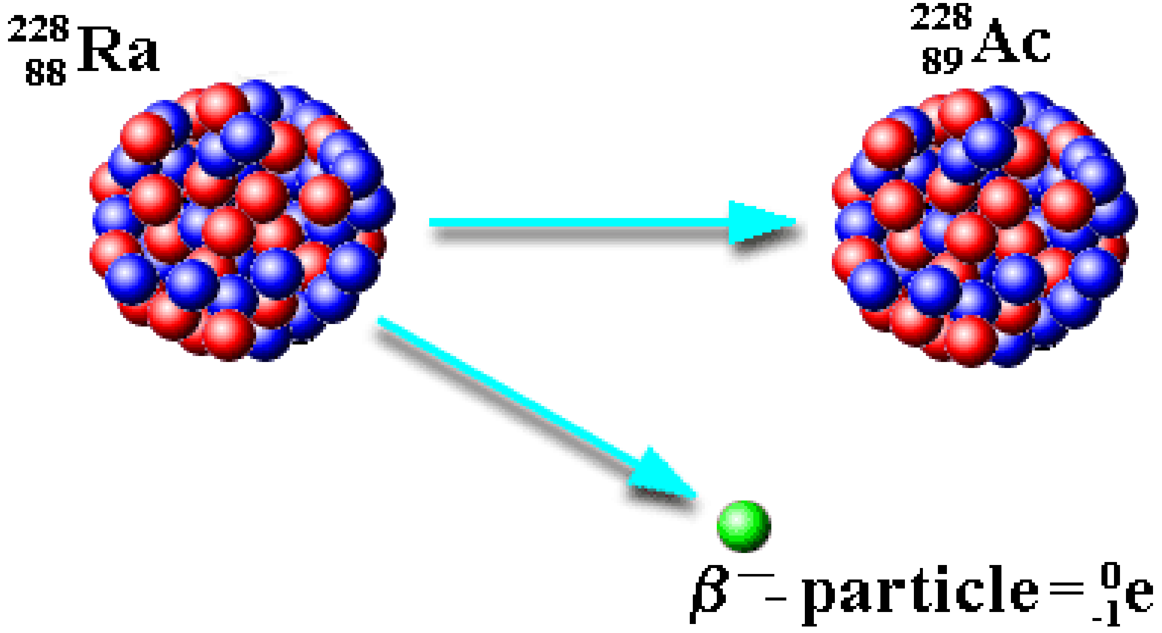
… verzweifelt Ausweg …..

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren…

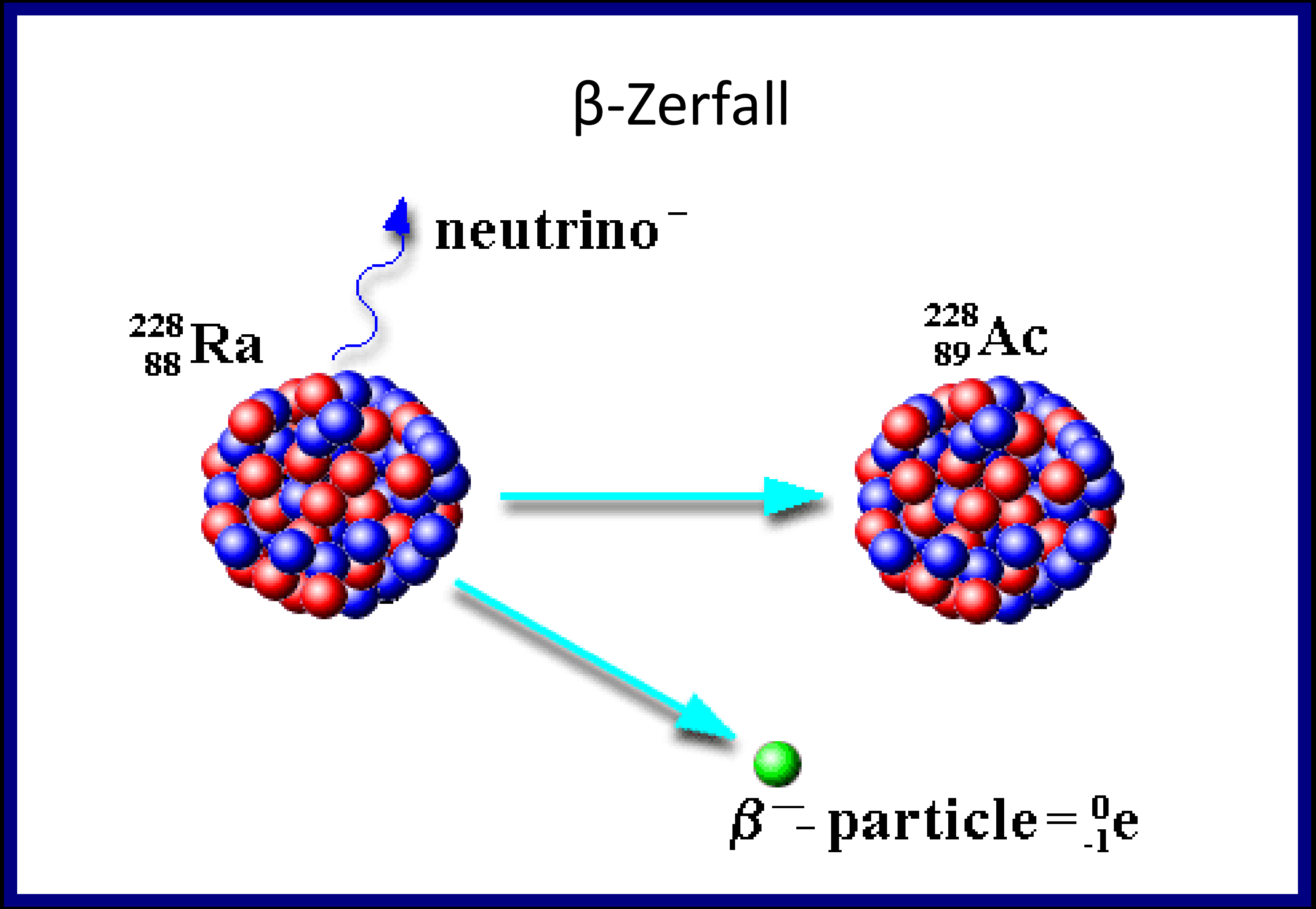
… prüfet, und richtet. –

Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines
Balles hier unabkömmlich bin. “

β-Zerfall


$^{228}_{88}\mathrm{Ra}$
$^{228}_{89}\mathrm{Ac}$
β^{-}- particle = $^{0}_{-1}\mathrm{e}$

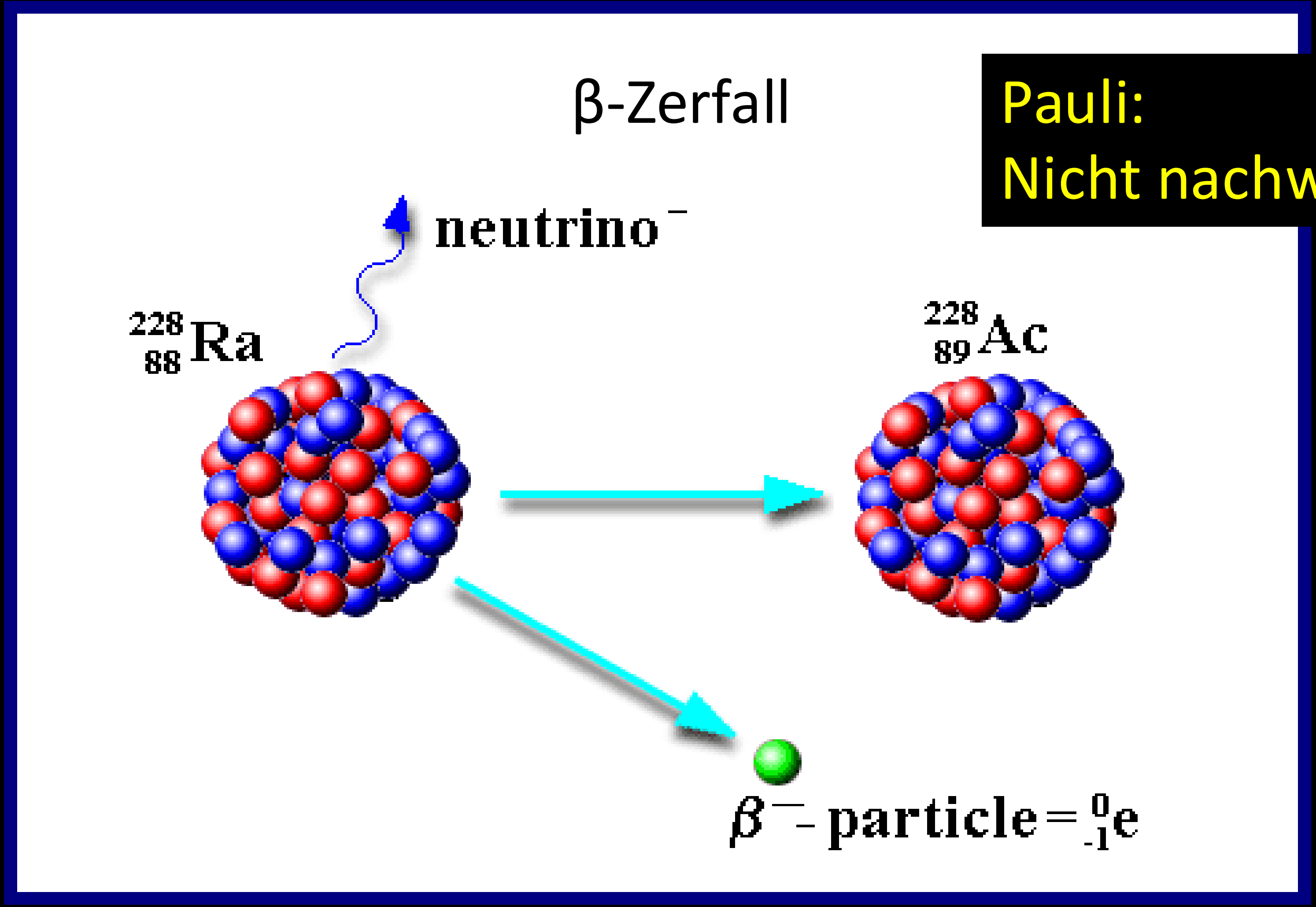
$$\text{Energie(Ra)} \neq \text{Energie(Ac)} + \text{Energie(e)}$$


β-Zerfall

neutrino⁻
$^{228}_{88}\mathrm{Ra}$
$^{228}_{89}\mathrm{Ac}$
β^{-}- particle = $^{0}_{-1}\mathrm{e}$

Energie(Ra) = Energie(Ac) + Energie(e)
+ Energie(Neutrino)

β-Zerfall

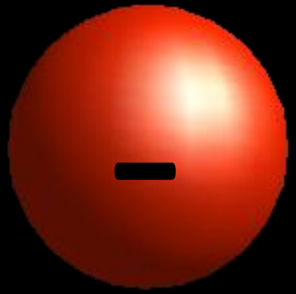

neutrino⁻
$^{228}_{88}$Ra
$^{228}_{89}$Ac
β^-- particle = $^{0}_{-1}$e

Pauli:
Nicht nachweisbar!

Energie(Ra) = Energie(Ac) + Energie(e)
+ Energie(Neutrino)

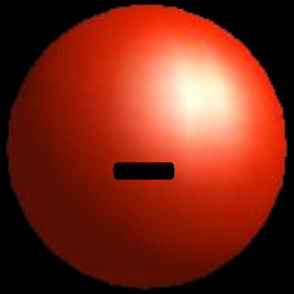
Was ist eine Neutrino?

Elektron, e



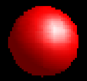
Kleine Masse
2000x leichter
als Proton

Elektron, e



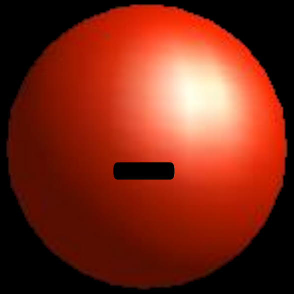
Kleine Masse
2000x leichter
als Proton

Elektronneutrino, ν_e



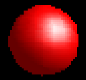
0

Elektron, e



Kleine Masse
2000x leichter
als Proton

Elektronneutrino, ν_e



0

Sehr kleine Masse
1,000,000x leichter
als Elektron

Woher kommen sie?

Von überall her!

Nur ein paar!

(Kalium)

Vom Urknall

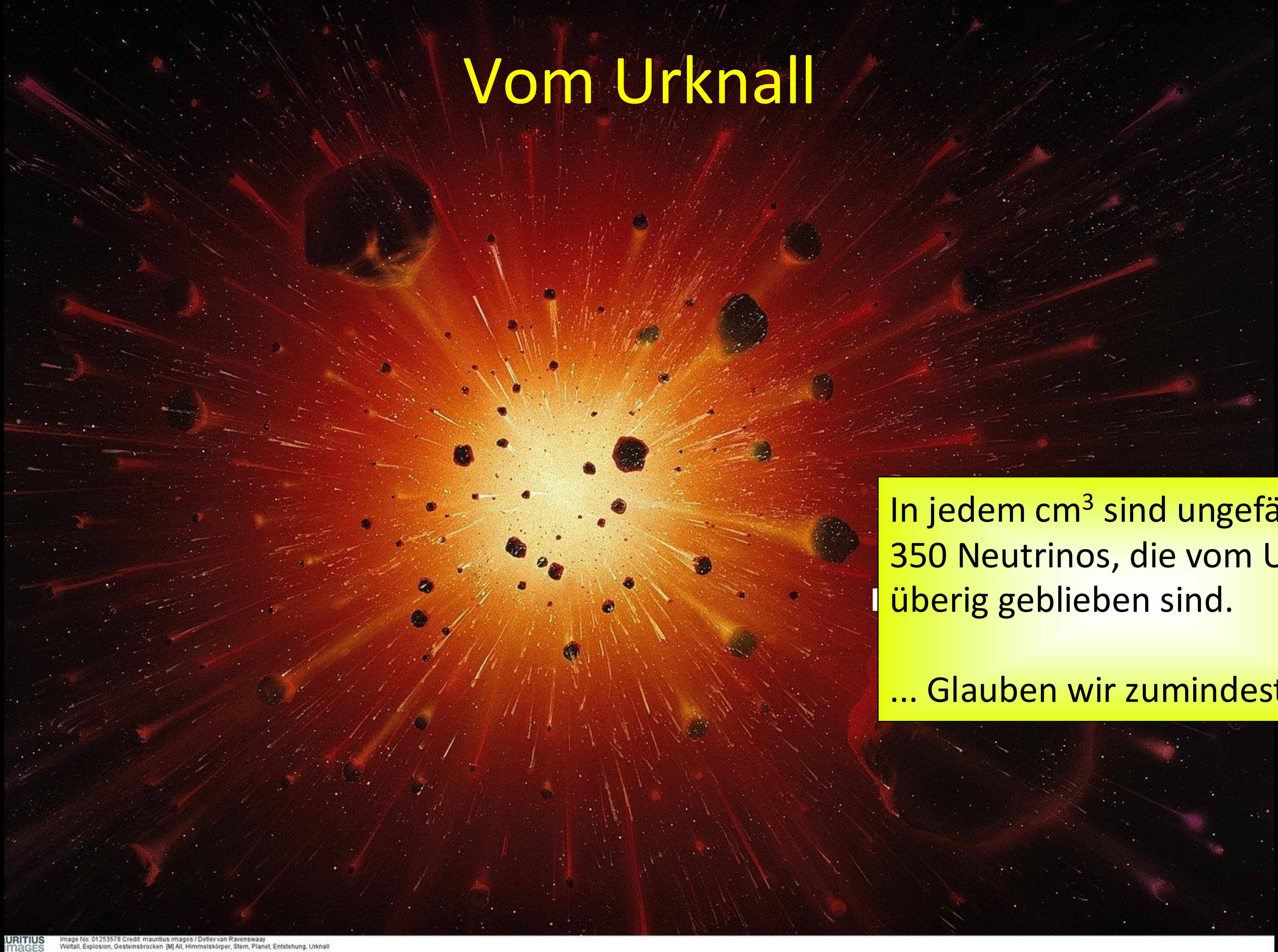
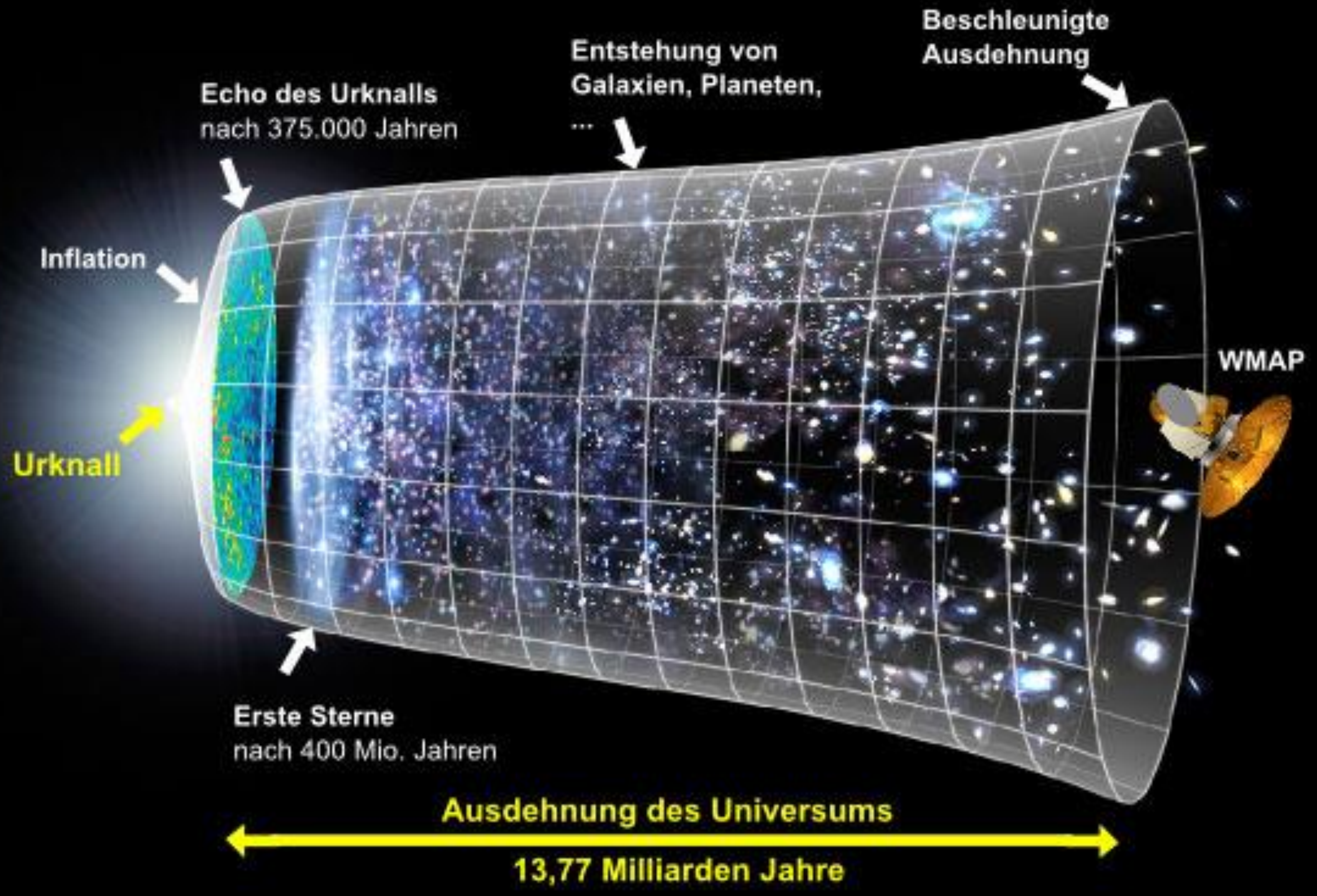


Image No: 01253578 Credit: mauritius images / Detlev van Ravenswaay
Weltall, Explosion, Gesteinsbrocken [M] All, Himmelskörper, Stern, Planet, Entstehung, Urknall

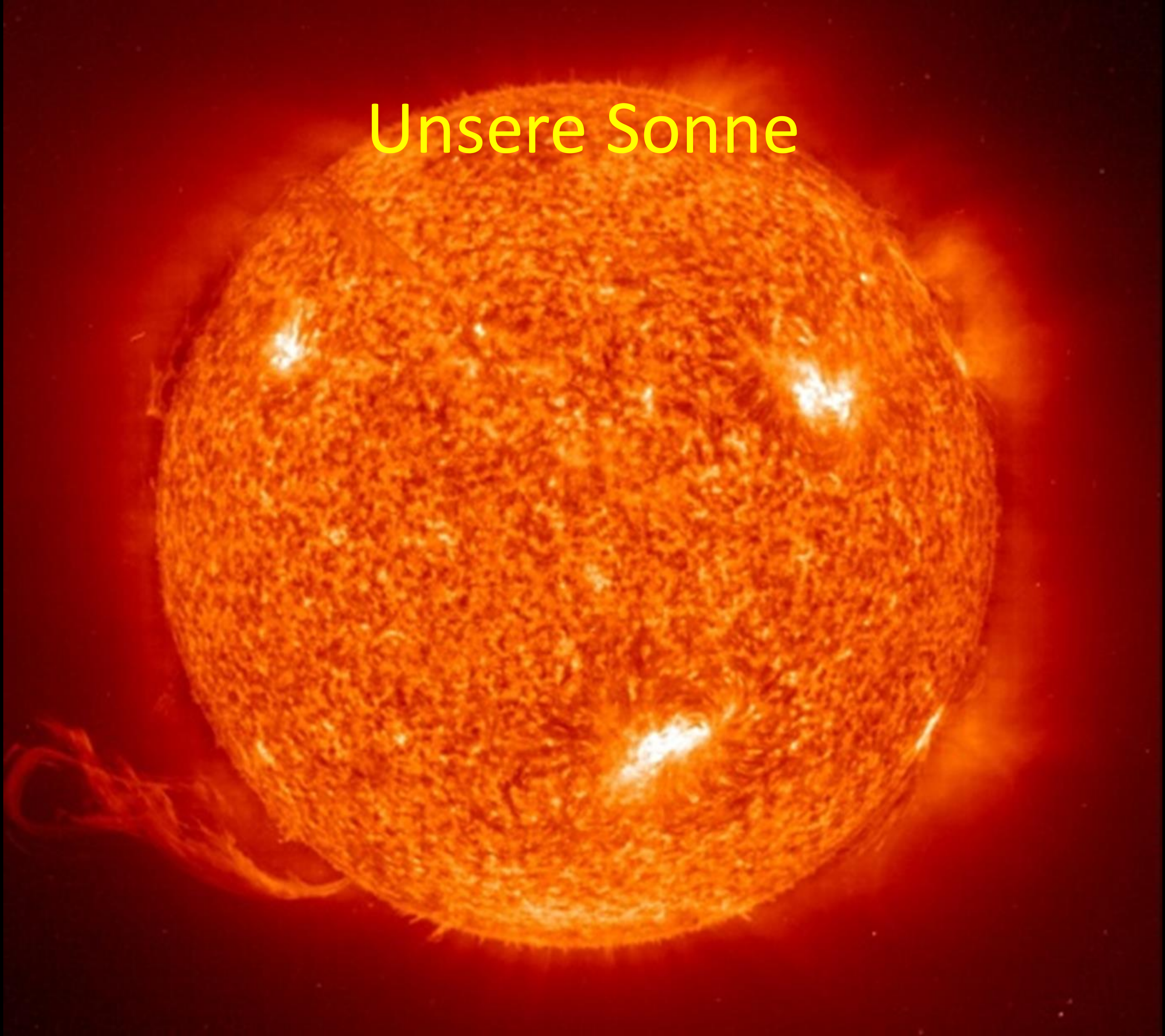
In jedem cm^3 sind ungefähr 350 Neutrinos, die vom Urknall überig geblieben sind.

... Glauben wir zumindest!

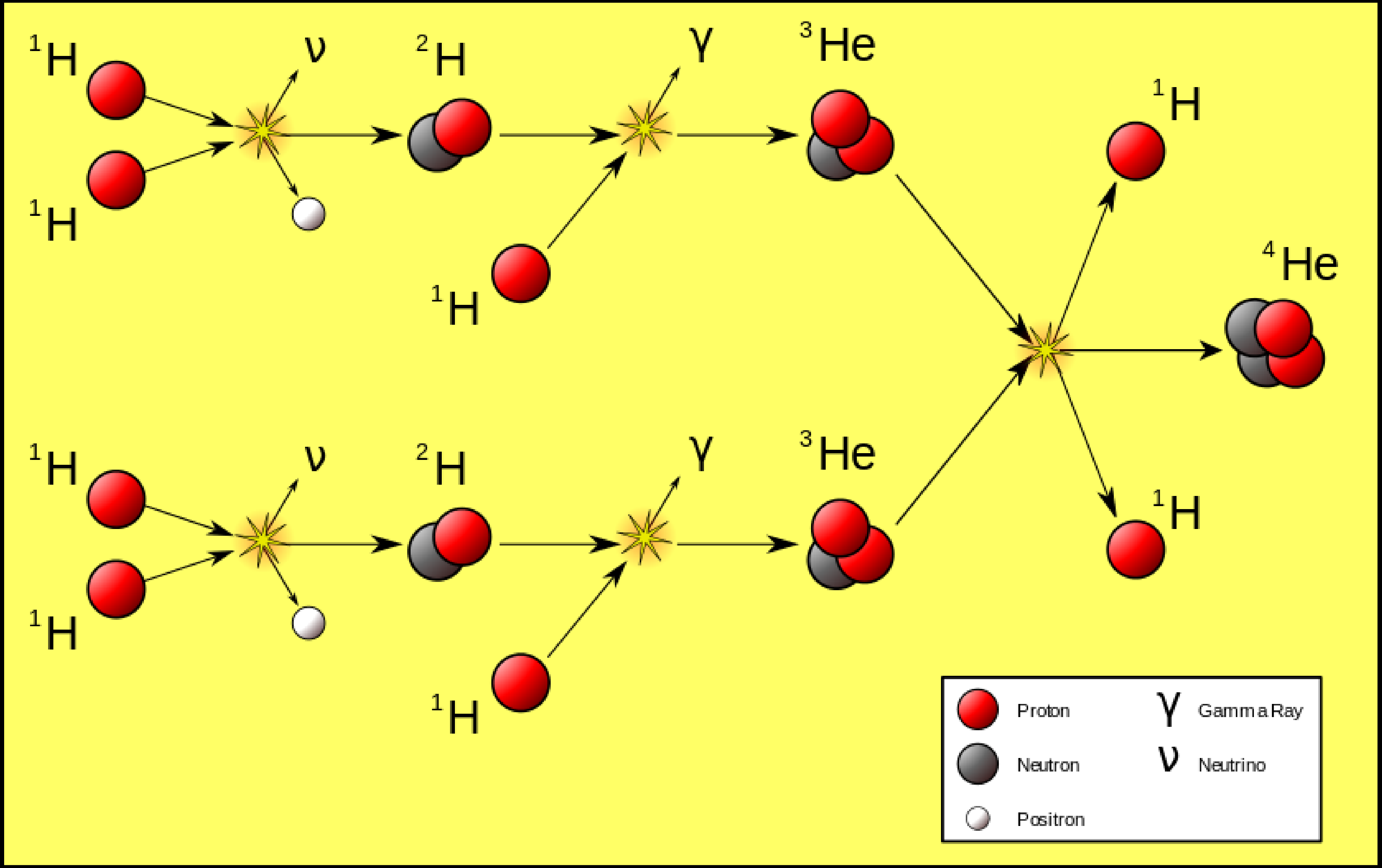
Vom Urknall


Beschleunigte Ausdehnung
Entstehung von Galaxien, Planeten, ...
Echo des Urknalls nach 375.000 Jahren
Inflation
WMAP
Urknall
Erste Sterne nach 400 Mio. Jahren
Ausdehnung des Universums
13,77 Milliarden Jahre

Unsere Sonne



Neutrinos aus der Sonne



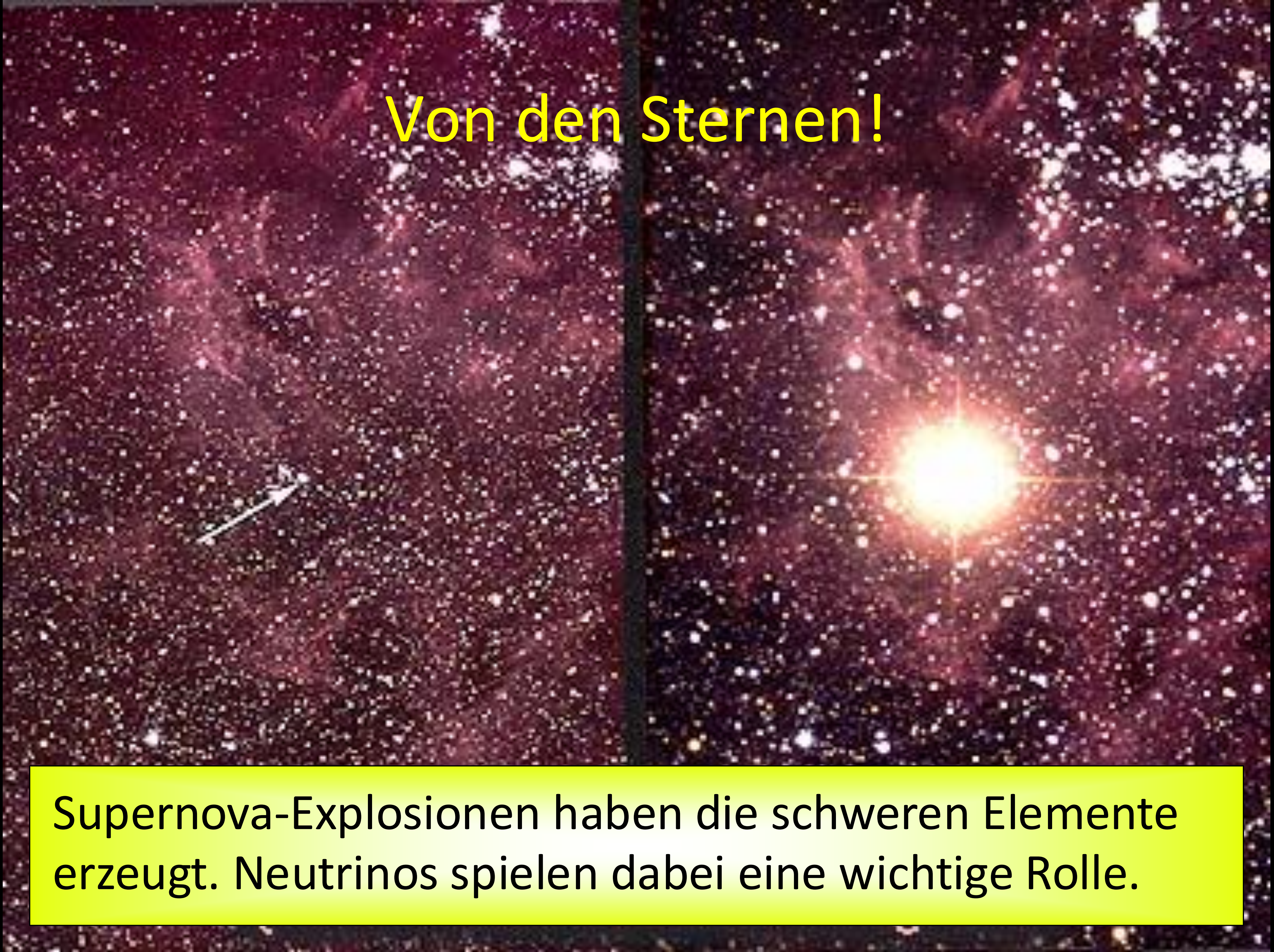
¹H
¹H
ν
²H
¹H
γ
³He
¹H
⁴He
¹H
¹H
ν
²H
¹H
γ
³He
¹H
Proton
Neutron
Positron
γ Gamma Ray
ν Neutrino

Ein Bild der Sonne mit Neutrinos aufgenommen (Neutrino-Astronomie)

Ein Bild der Sonne mit Neutrinos aufgenommen (Neutrino-Astronomie)

500.000.000.000.000 solare Neutrinos sind im Laufe dieses Vortrags durch jeden von uns geflogen!

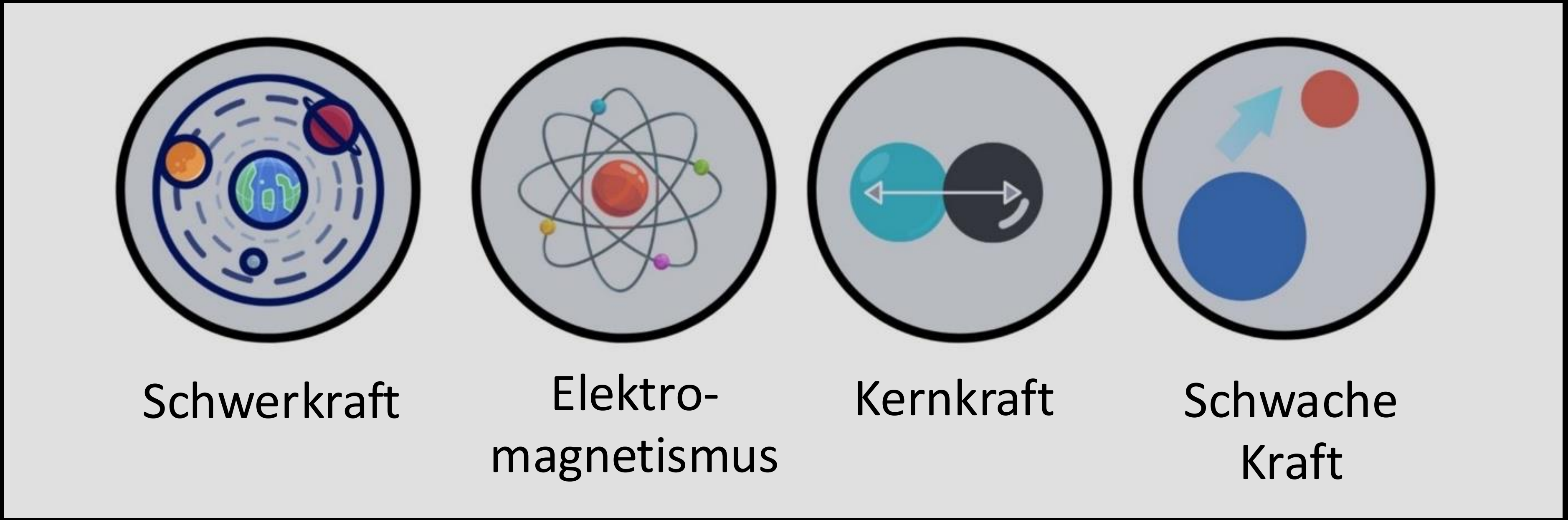
Von den Sternen!



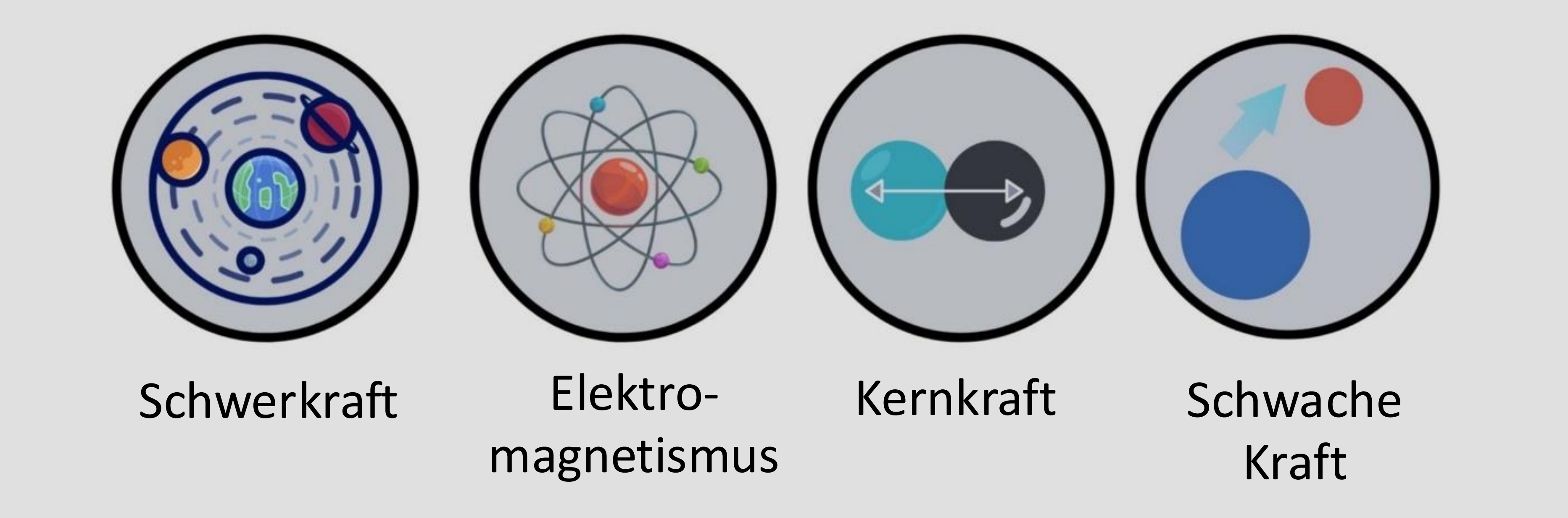
Supernova-Explosionen haben die schweren Elemente erzeugt. Neutrinos spielen dabei eine wichtige Rolle.

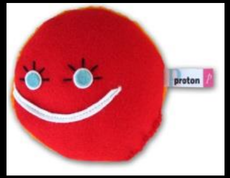
Warum bemerken wir sie nicht?

Warum bemerken wir sie nicht?


Schwerkraft
Elektro-magnetismus
Kernkraft
Schwache Kraft

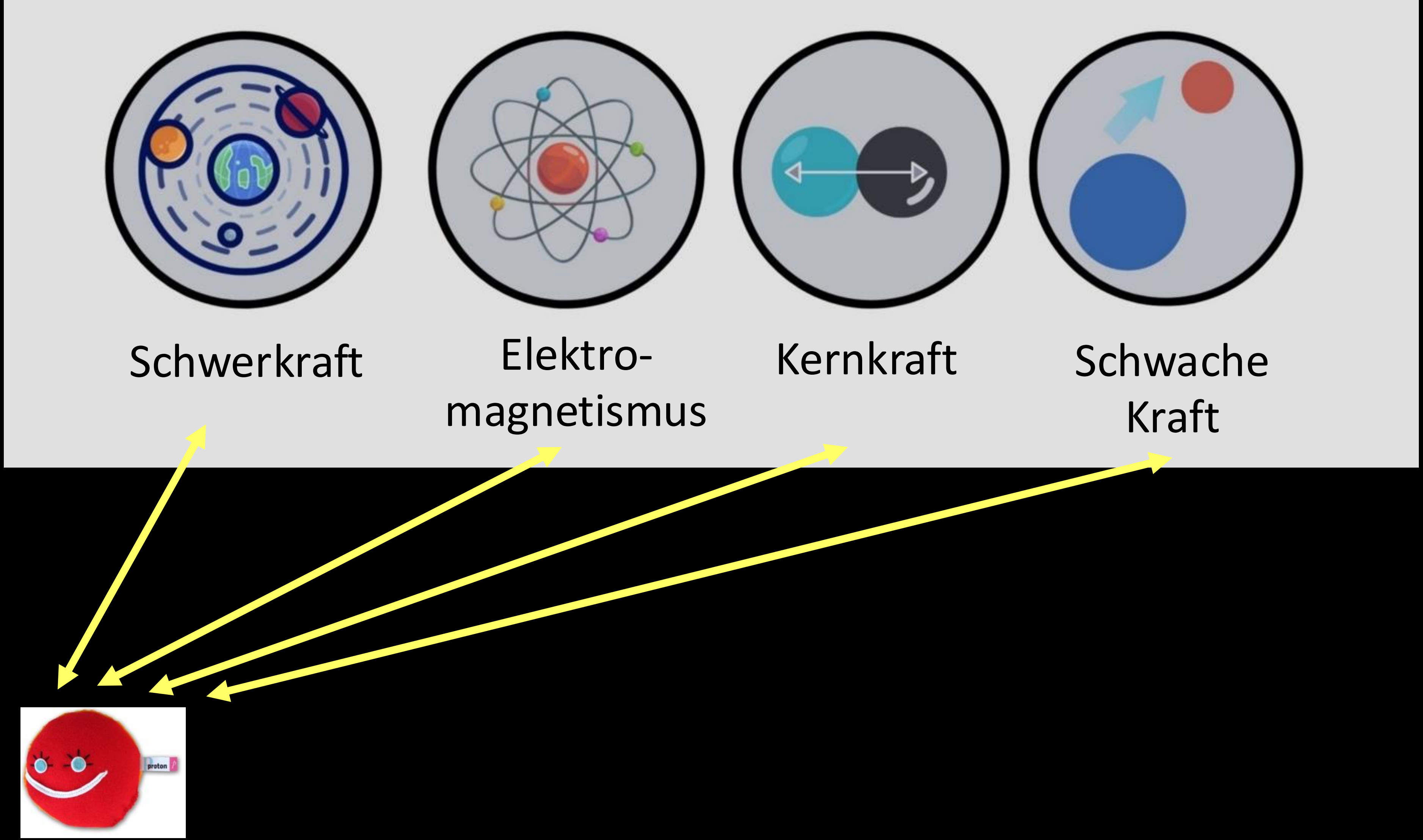
Warum bemerken wir sie nicht?


Schwerkraft
Elektro-magnetismus
Kernkraft
Schwache Kraft



Proton & Neutron

Warum bemerken wir sie nicht?



Schwerkraft

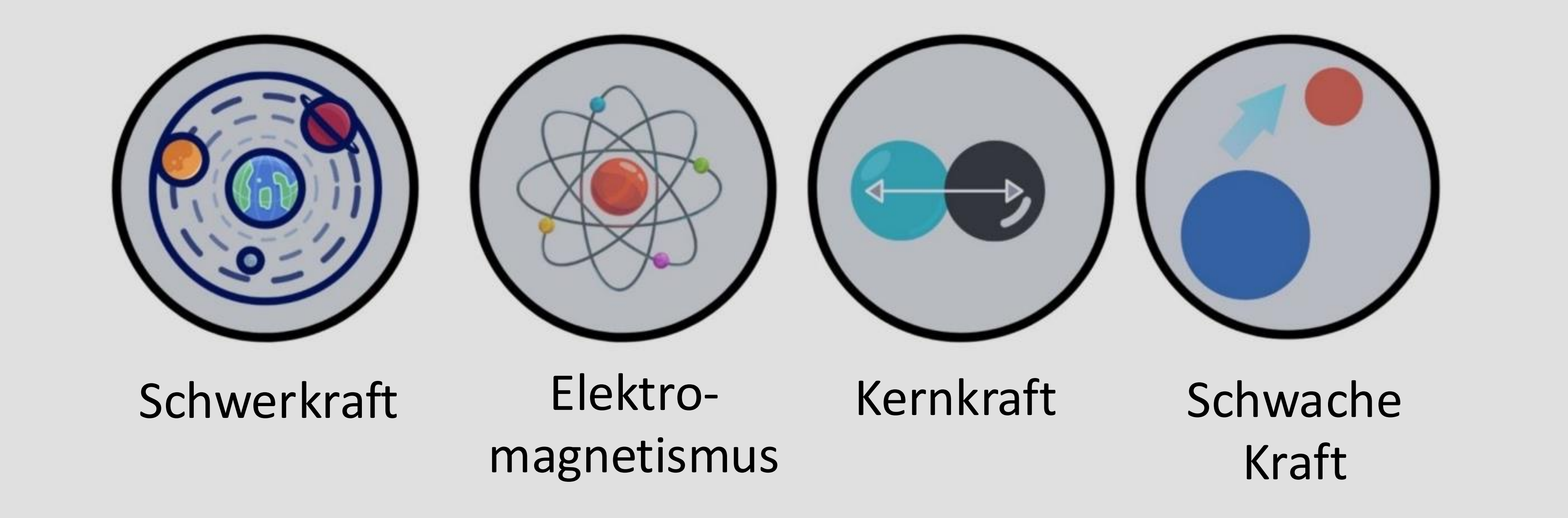
Elektro-
magnetismus

Kernkraft

Schwache
Kraft

Proton & Neutron

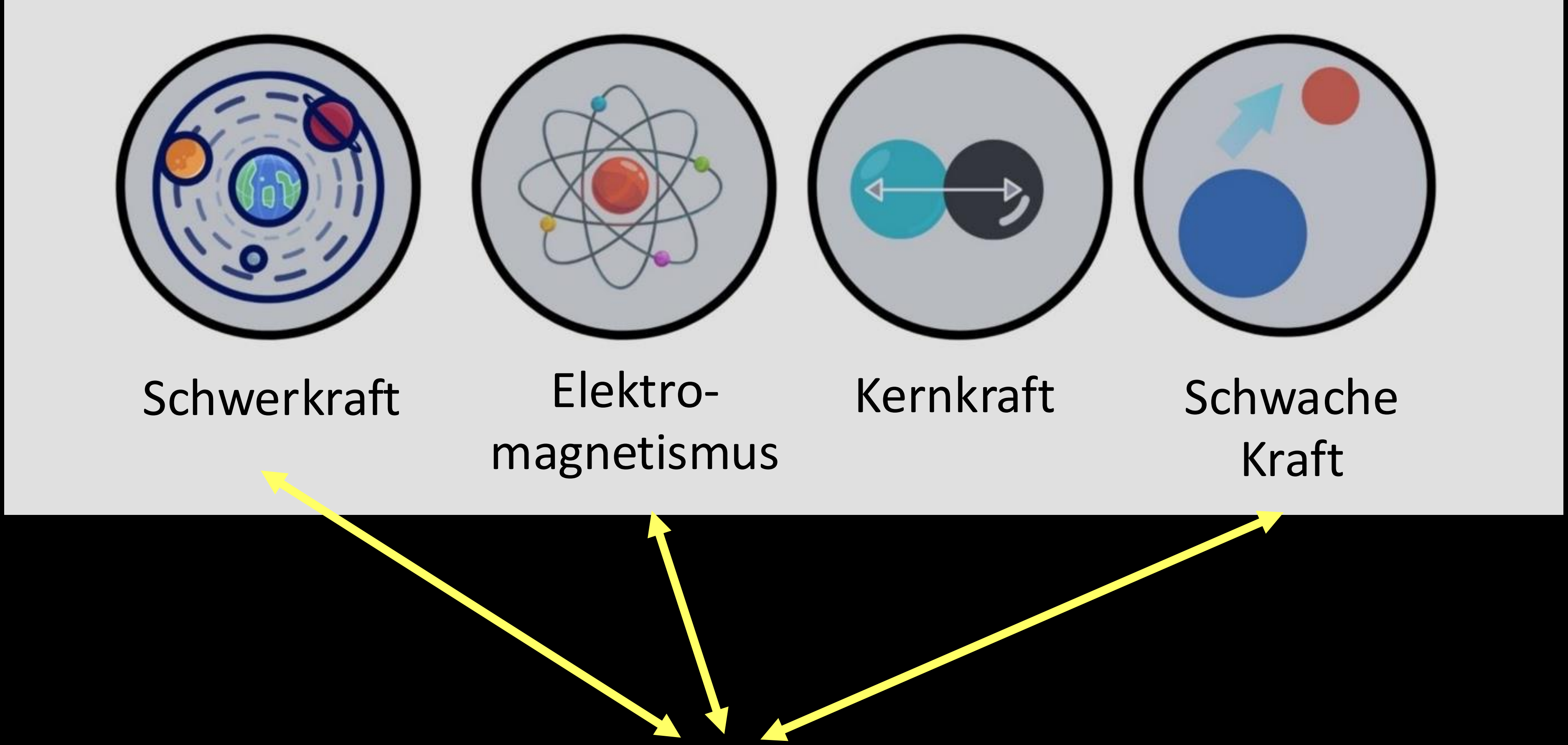
Warum bemerken wir sie nicht?


Schwerkraft
Elektro-magnetismus
Kernkraft
Schwache Kraft

Proton & Neutron

Elektron

Warum bemerken wir sie nicht?



Schwerkraft

Elektro-magnetismus

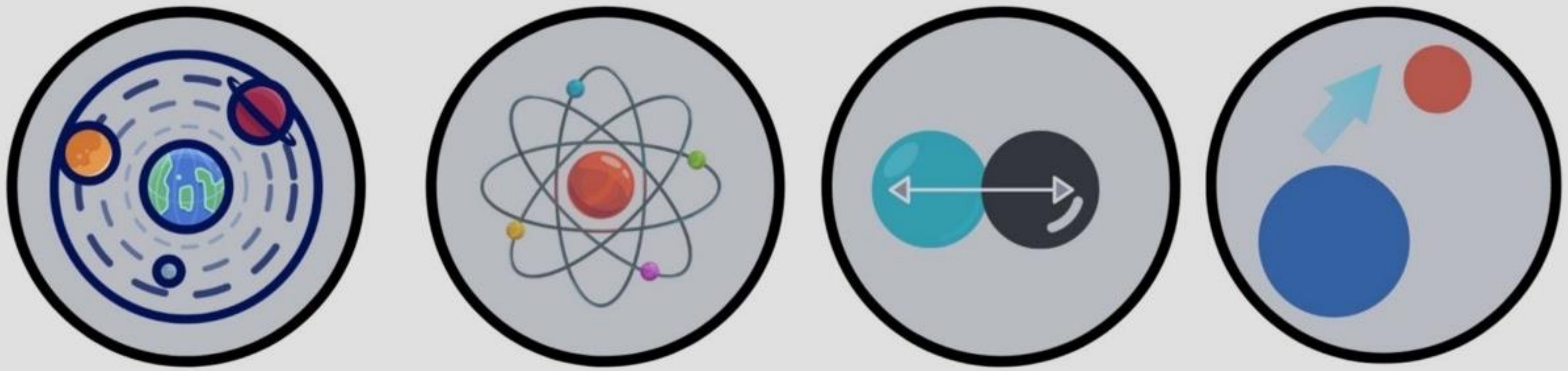
Kernkraft

Schwache Kraft

Proton & Neutron

Elektron

Warum bemerken wir sie nicht?



Schwerkraft

Elektro-
magnetismus

Kernkraft

Schwache
Kraft

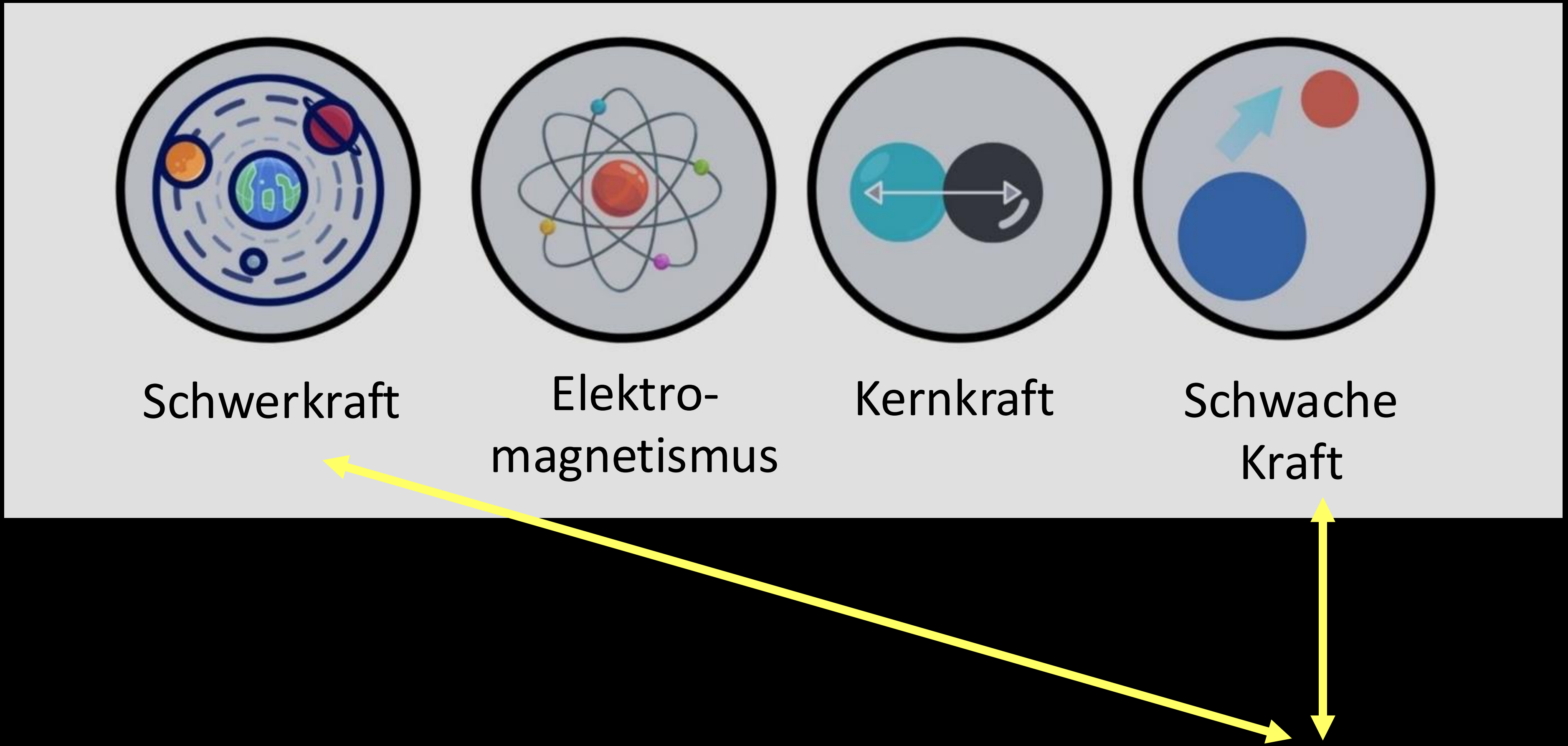
Proton & Neutron

Elektron

electron-
neutrino

Neutrino

Warum bemerken wir sie nicht?



Schwerkraft

Elektro-magnetismus

Kernkraft

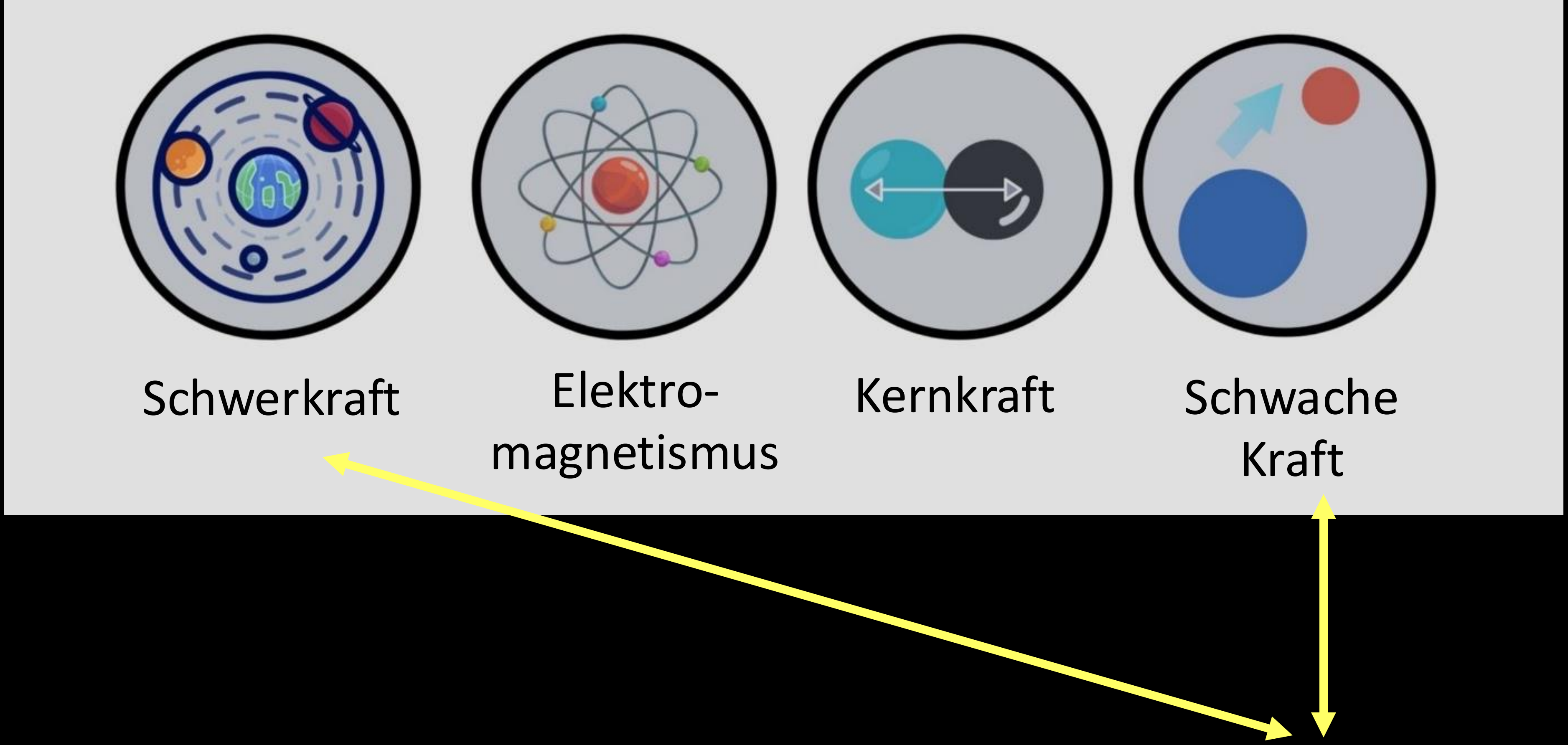
Schwache Kraft

Proton & Neutron

Elektron

Neutrino

Warum bemerken wir sie nicht?



Schwerkraft

Elektro-
magnetismus

Kernkraft

Schwache
Kraft

Proton & Neutron

Elektron

Neutrino

https://www.particlezoo.net/

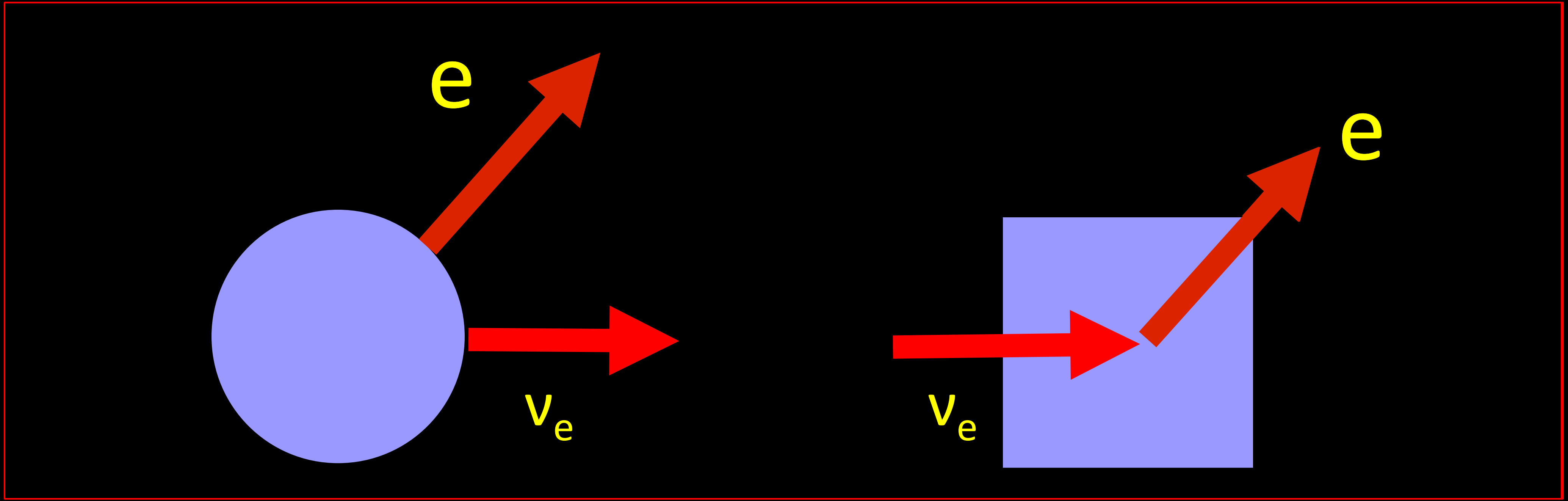
Man kann sie einfach nicht aufhalten…

Man kann sie einfach nicht aufhalten…

… außer man hat einen 1 Lichtjahr dicken Bleiabsorber.

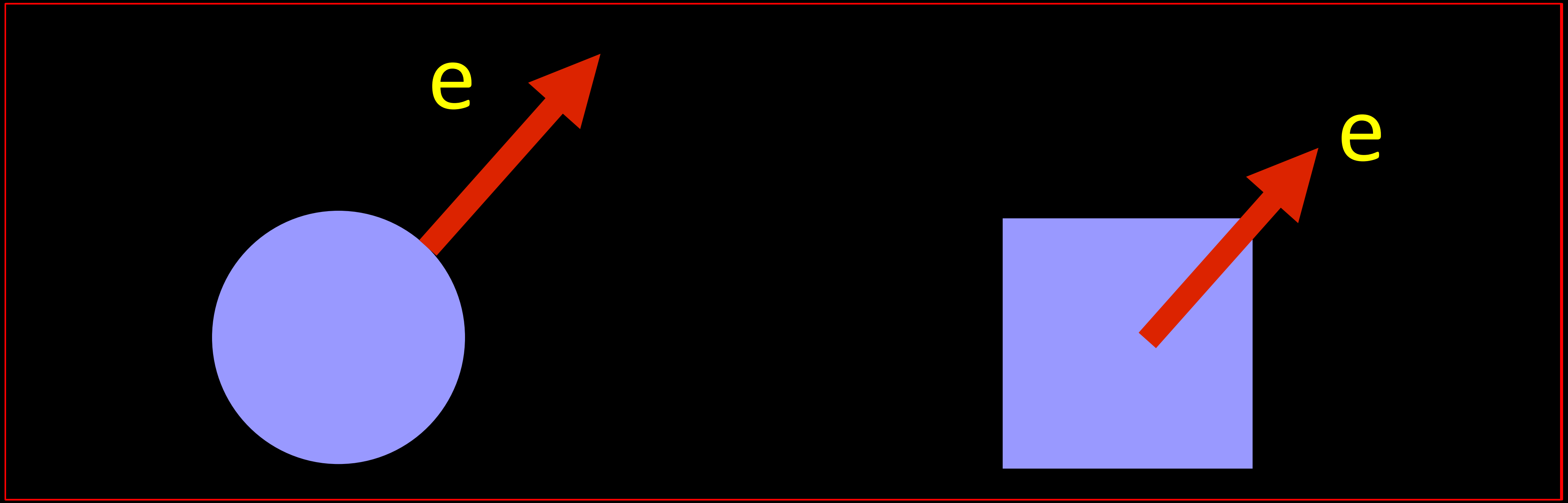
Pauli hatte recht:
Kein Physiker hat **JEMALS** ein Neutrino gesehen.

Man kann nur sie nur über die Beiprodukte ihrer Wechselwirkung mit Materie nachweisen.



Pauli hatte recht:
Kein Physiker hat **JEMALS** ein Neutrino gesehen.

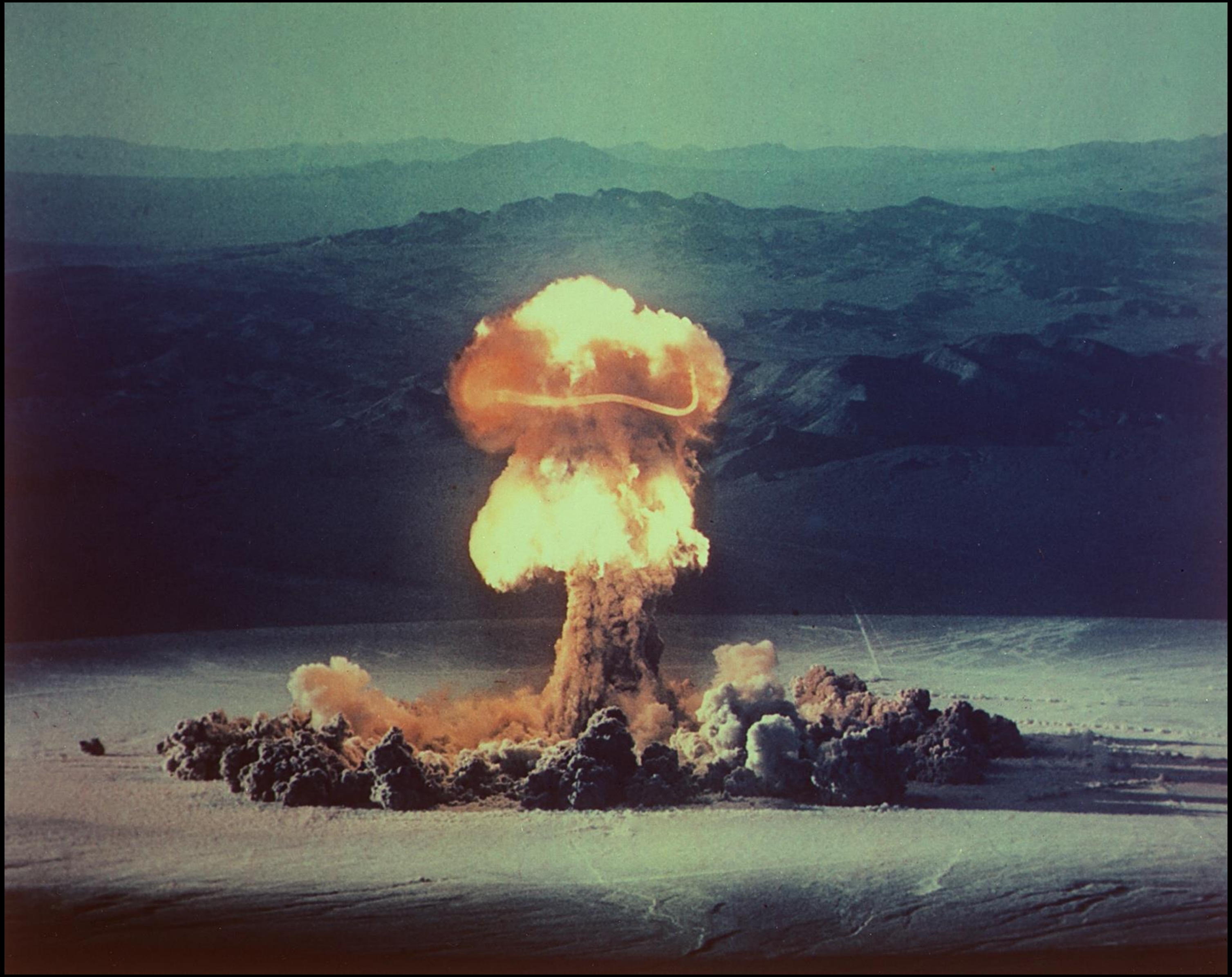
Man kann nur sie nur über die Beiprodukte ihrer Wechselwirkung mit Materie nachweisen.



Project Poltergeist
Reines & Cowan (1956)

PROJECT POLTERGEIST
Hypo-thetical Particle
3

Intesive Neutrinoquellen

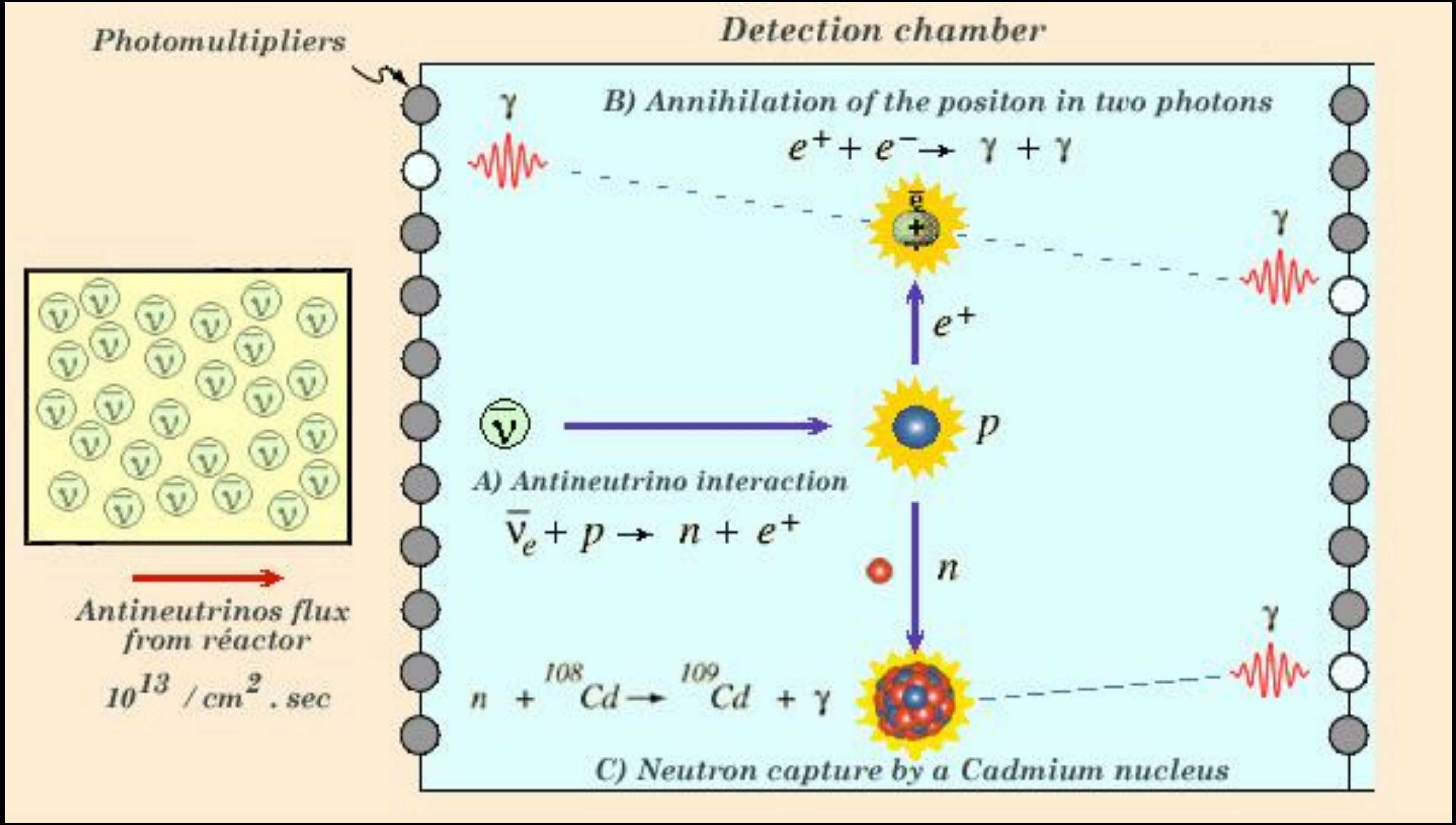


Intesive Neutrinoquellen

Nicht zuhause nachmachen!

Intesive Neutrinoquellen

Die Entdeckung des Anti-Neutrinos


Photomultipliers
Detection chamber
B) Annihilation of the positon in two photons
$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
γ
γ
e^+
p
A) Antineutrino interaction
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$
n
γ
$n + {}^{108}Cd \rightarrow {}^{109}Cd + \gamma$
C) Neutron capture by a Cadmium nucleus
Antineutrinos flux from réactor
10^{13} / cm^2 . sec

Elektron, e

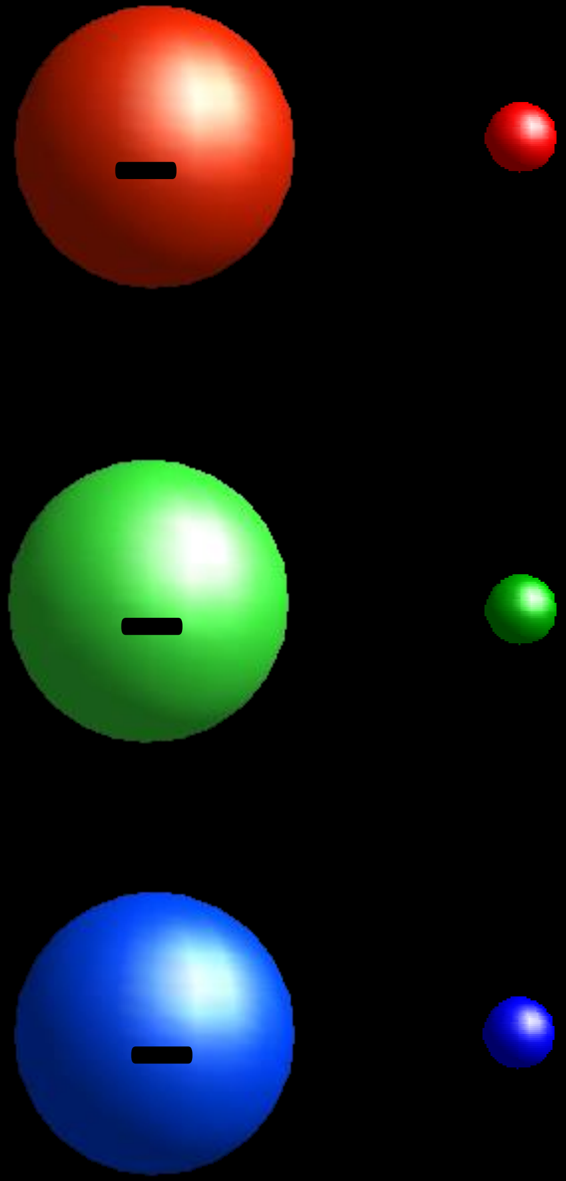
Masse (1)

Myon, μ

Masse (200)

Tau, τ

Mass (3500)

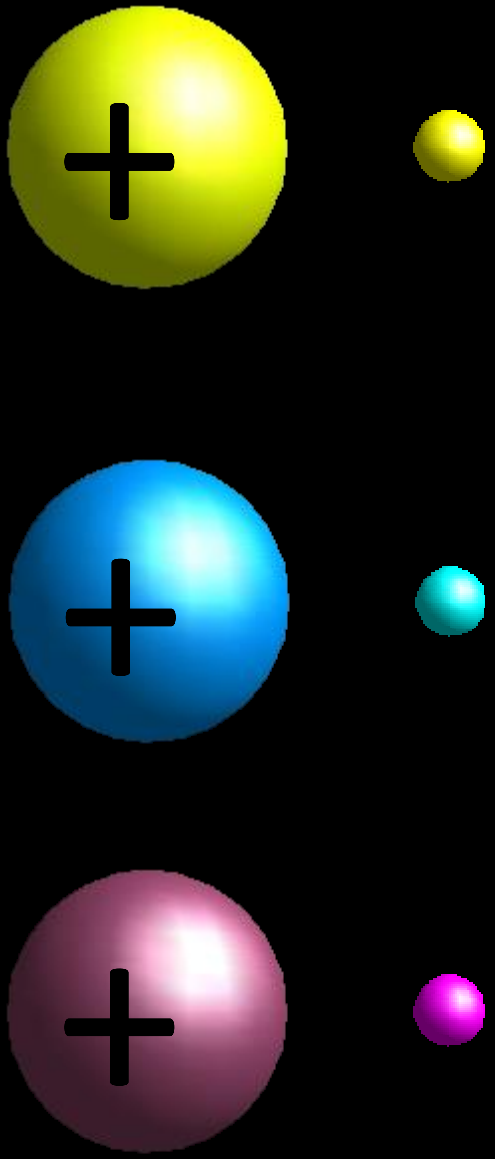


Elektronneutrino, ν_e

Myonneutrino, ν_μ

Tauneutrino, ν_τ

3 Lepton-Arten



Positron, e^+

Masse (1)

Anti-Elektronneutrino, ν_e

Anti-Myon, μ^+

Masse (200)

Anti-Myonneutrino, ν_μ

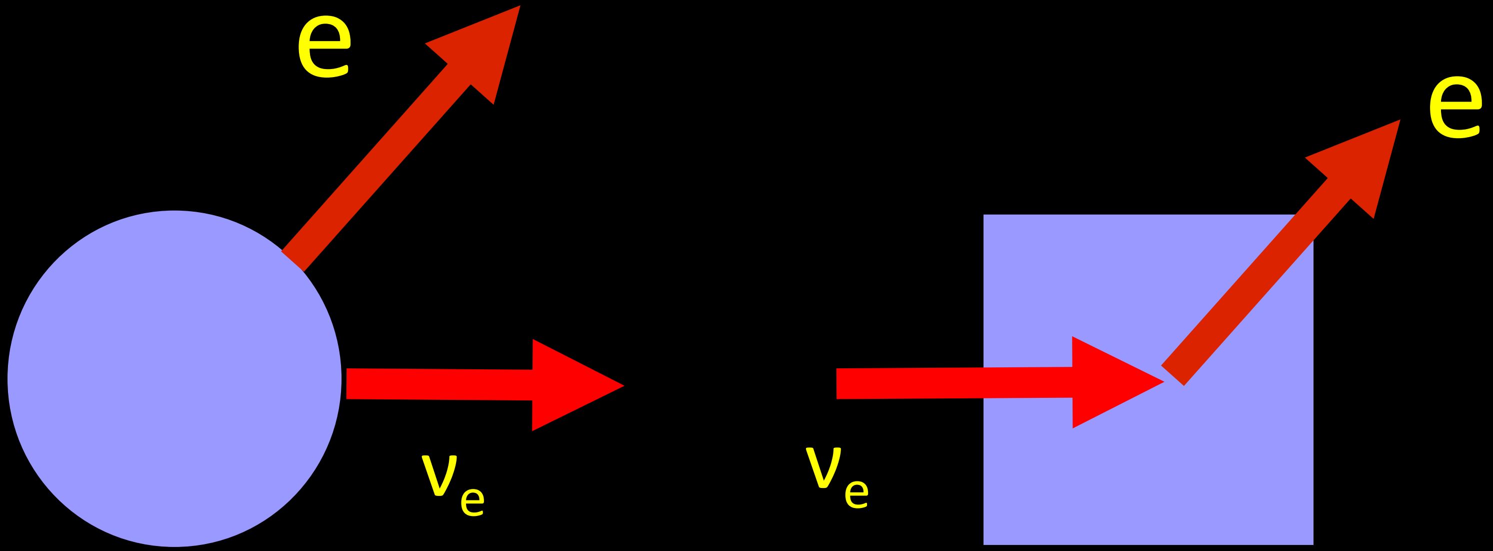
Anti-Tau, τ^+

Masse (3500)

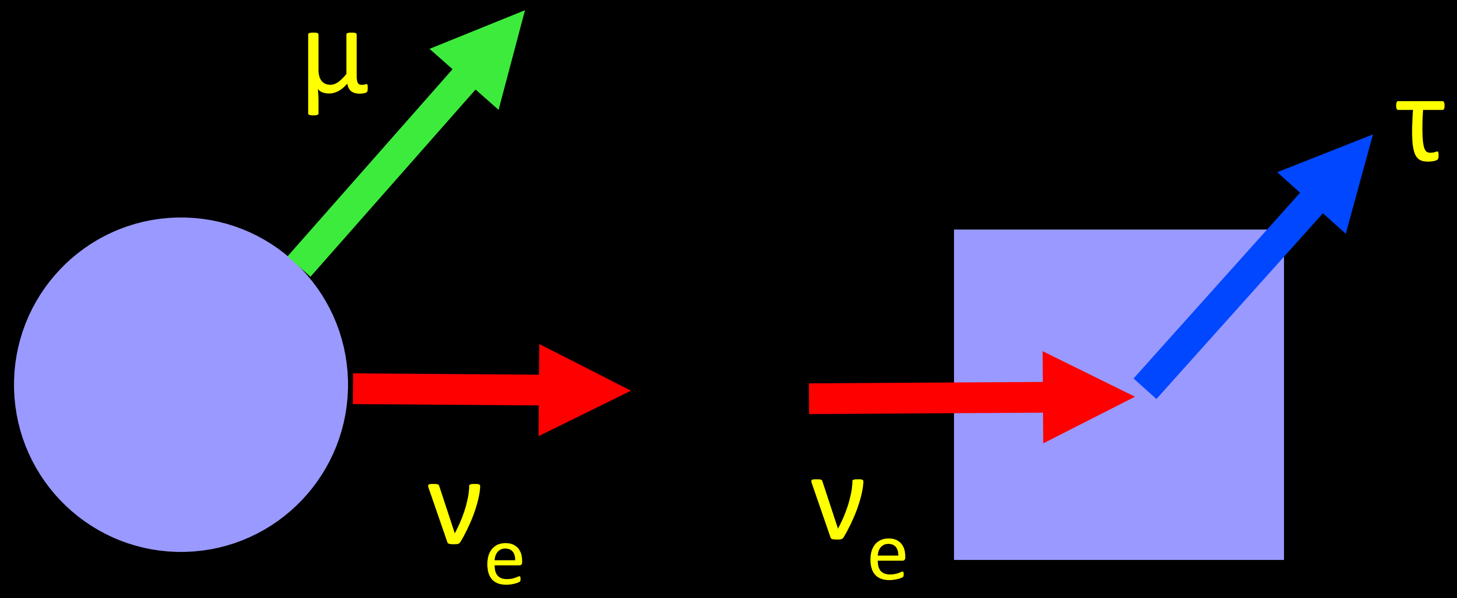
Anti-Tauneutrino, ν_τ

3 Antineutrinos

Immer...

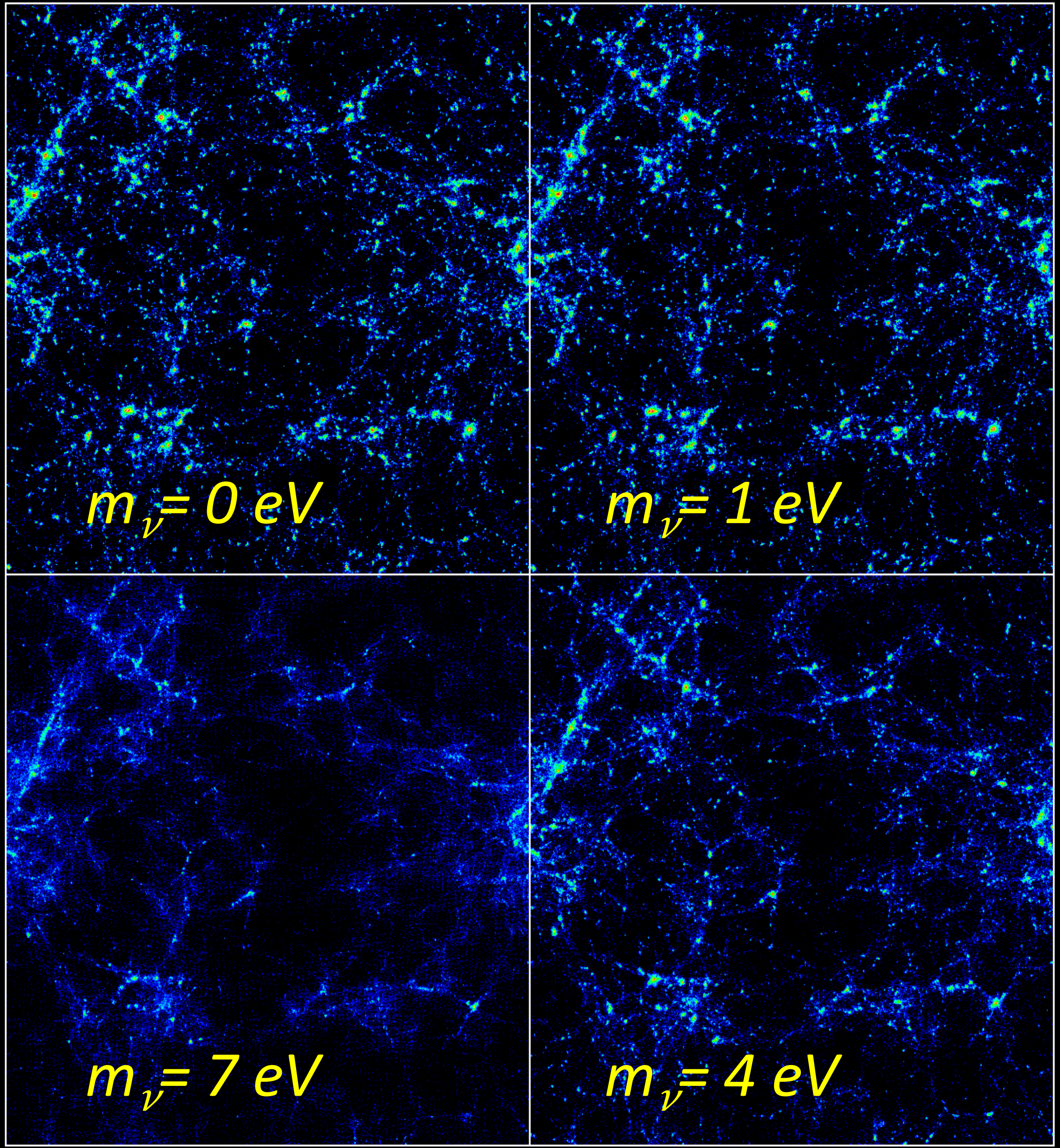


Niemals…

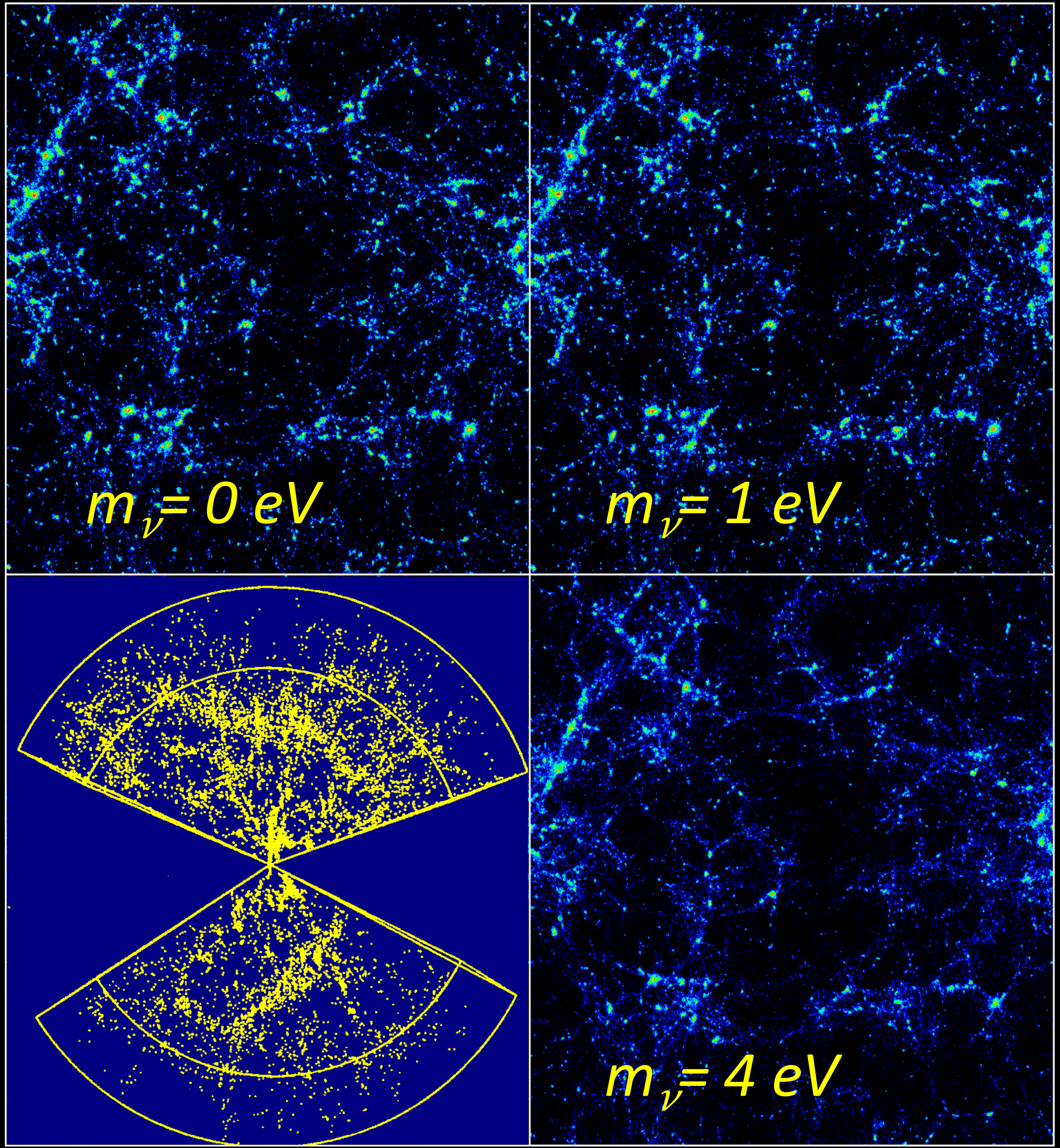


Warum sind Neutrinos interessant?

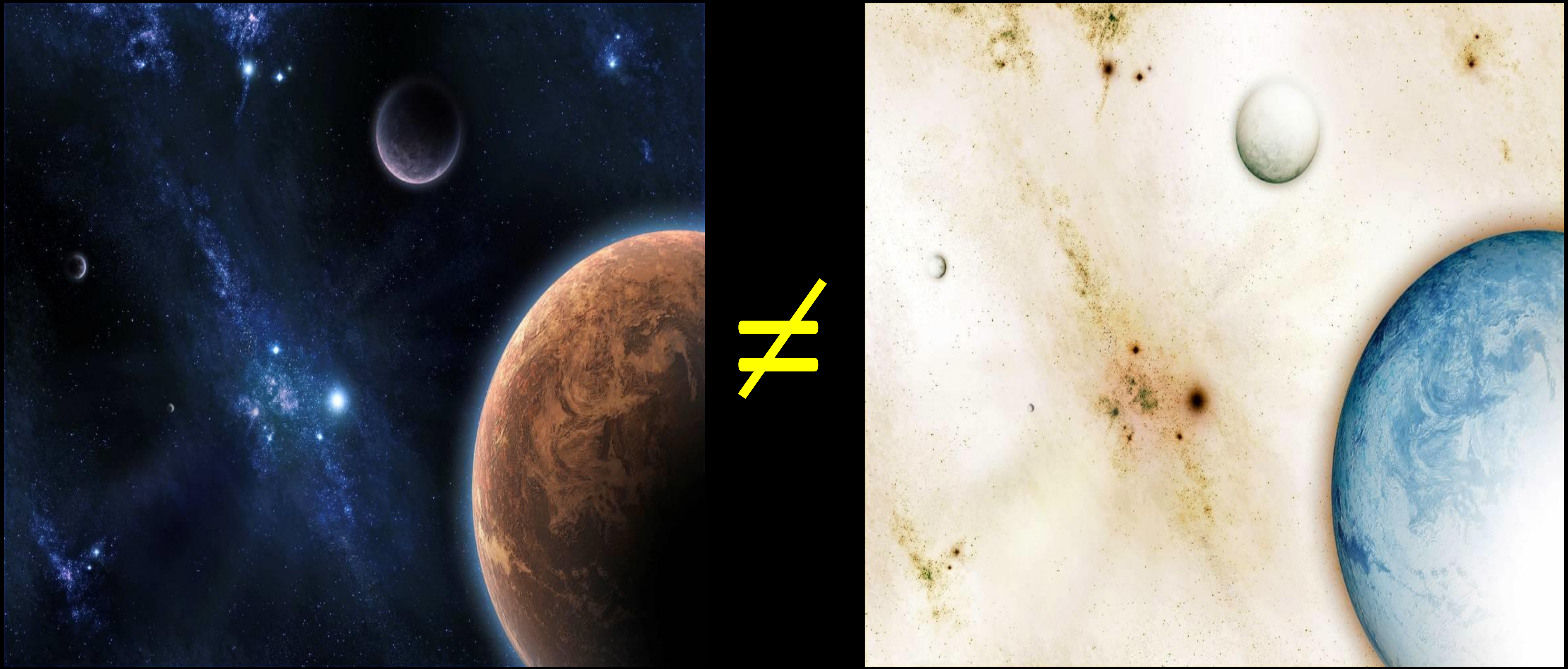
Die Struktur des Universums


$m_\nu = 0$ eV
$m_\nu = 1$ eV
$m_\nu = 7$ eV
$m_\nu = 4$ eV

Die Struktur des Universums



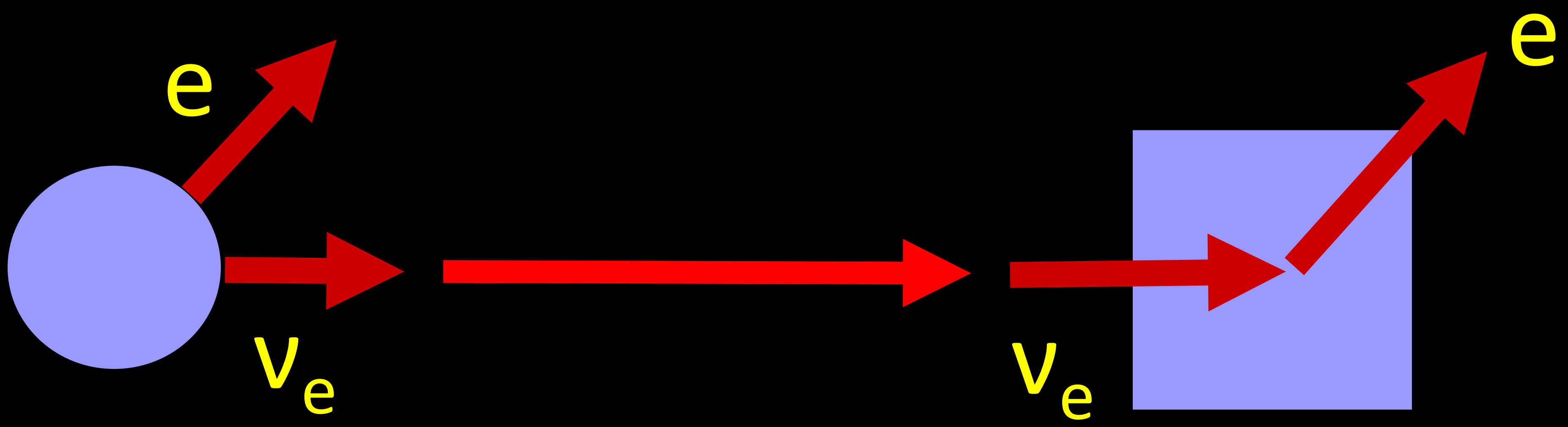
Warum gib es mehr Materie als Anti-Materie?



Wie kann man Neutrinos studieren?

Neutrino-Oszillationen

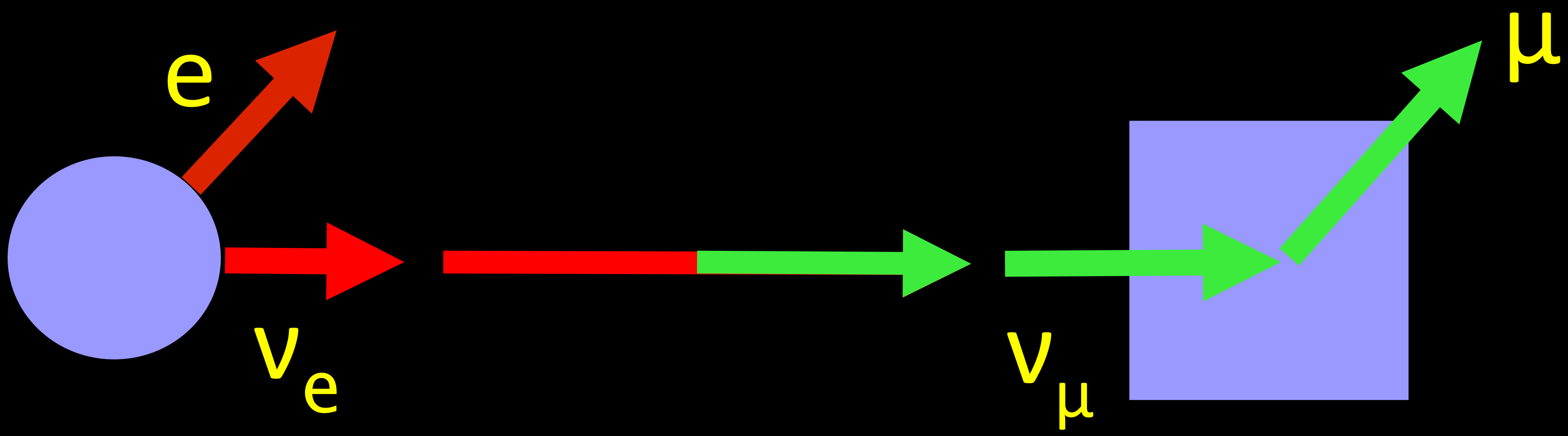
Die Entdeckung der letzten 20 Jahre



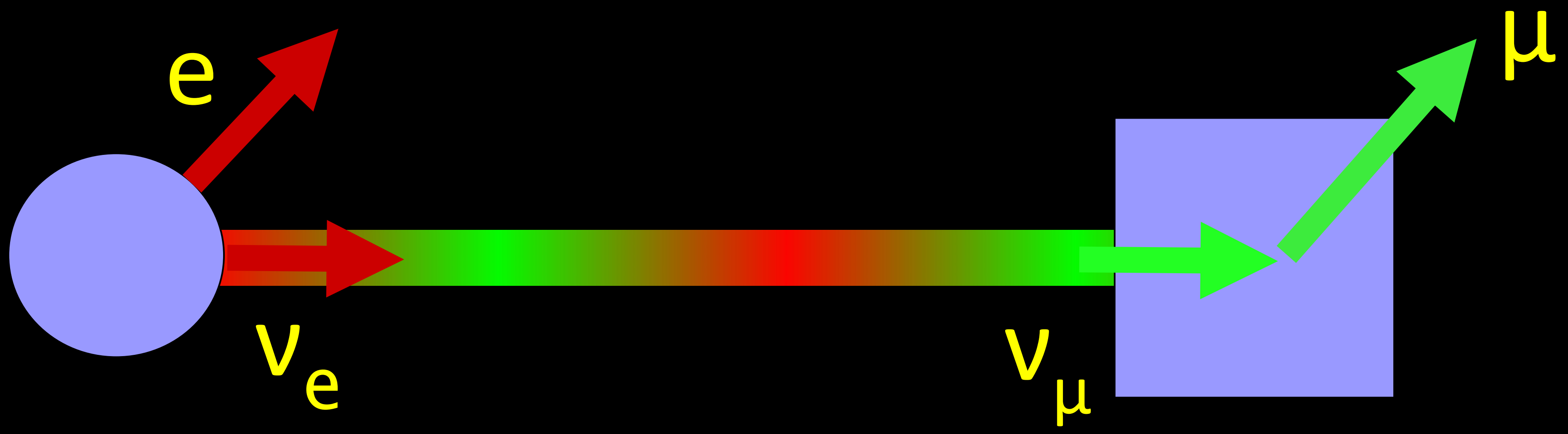
Ein typisches Neutrinoexperiment

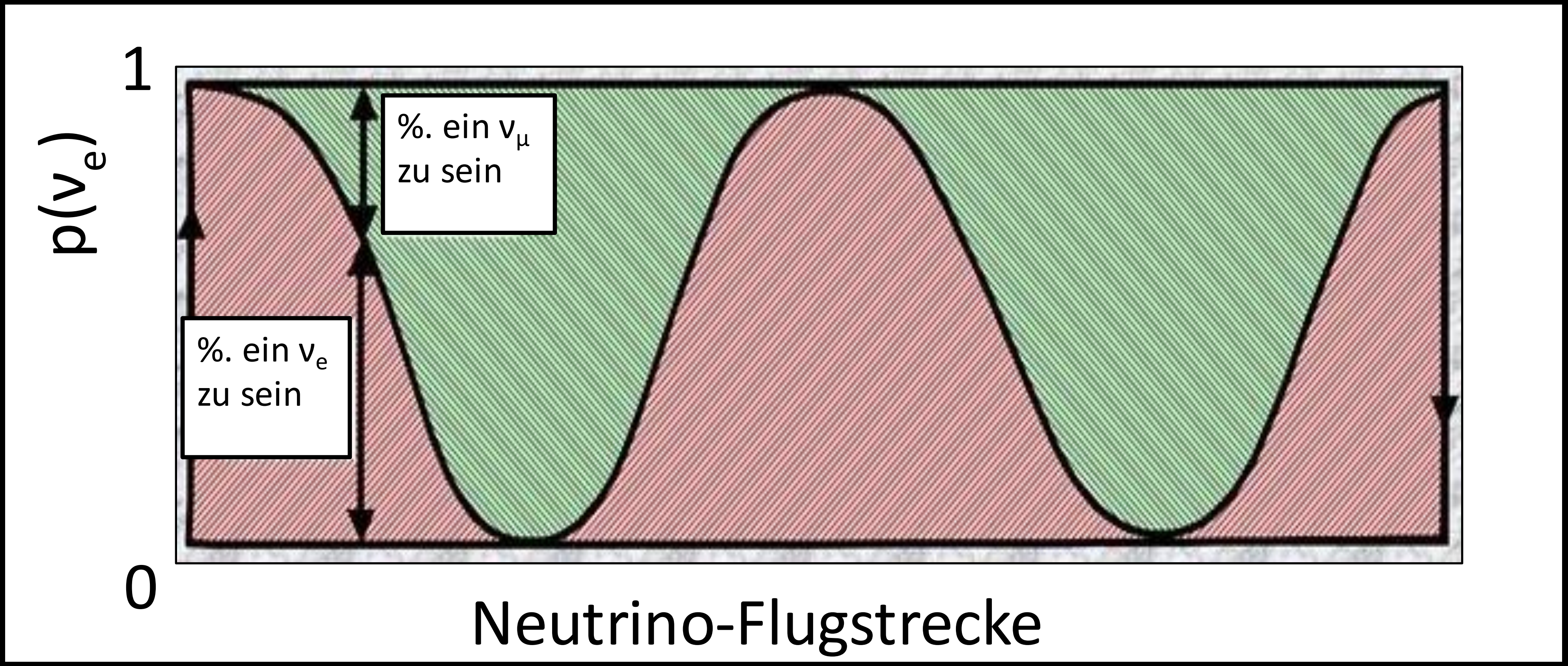
Neutrino-Oszillationen

Die Entdeckung der letzten 20 Jahre



Neutrinos transformieren sich
zwischen Produktion und Nachweis!

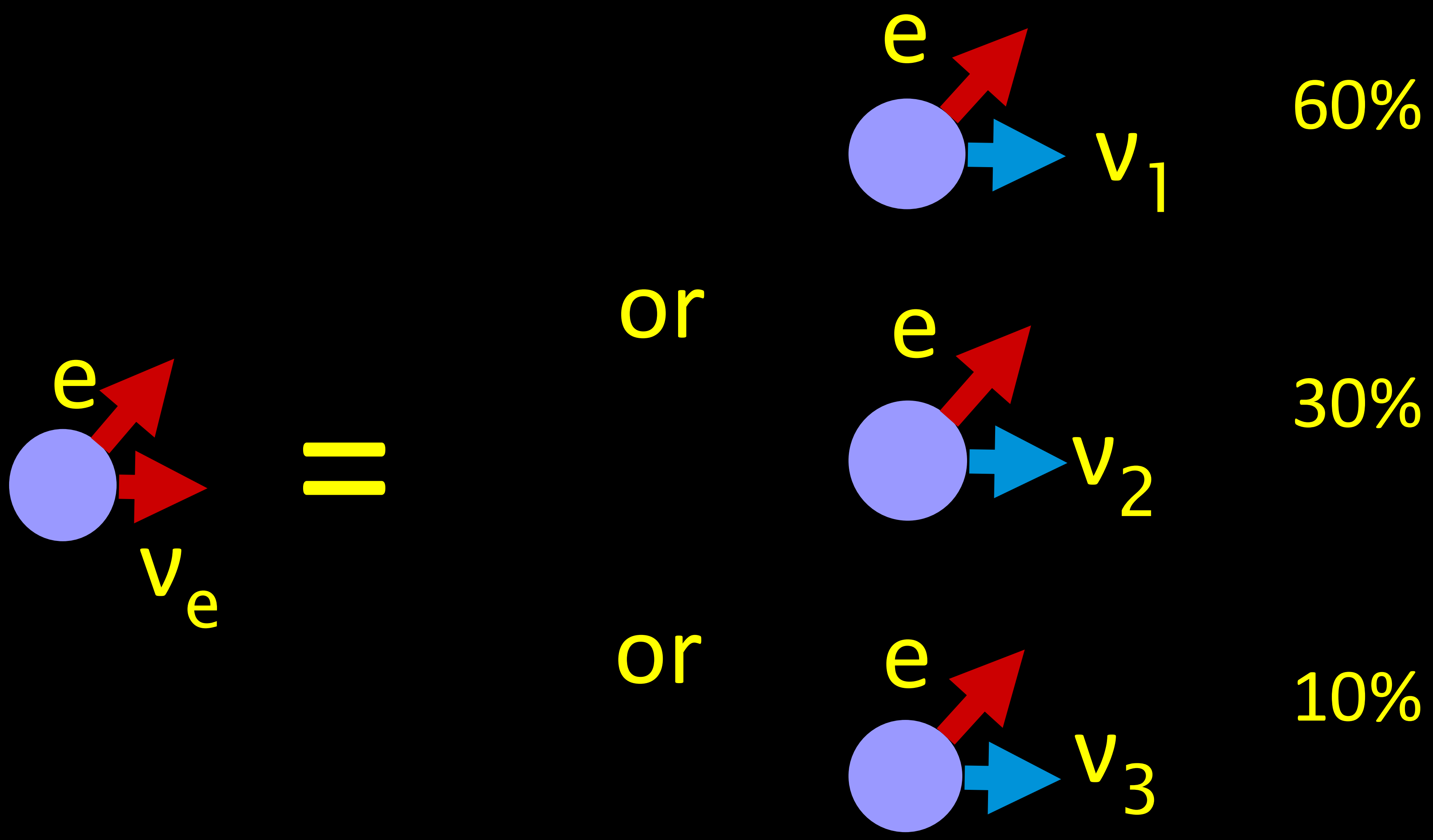

e
ν_e
ν_μ
μ


1
0
$p(\nu_e)$
%. ein ν_μ zu sein
%. ein ν_e zu sein
Neutrino-Flugstrecke

Frucht-Oszillationen

Frucht-Oszillationen

Quantum Mechanics



e

ν_e

=

e

ν_1

60%

or

e

ν_2

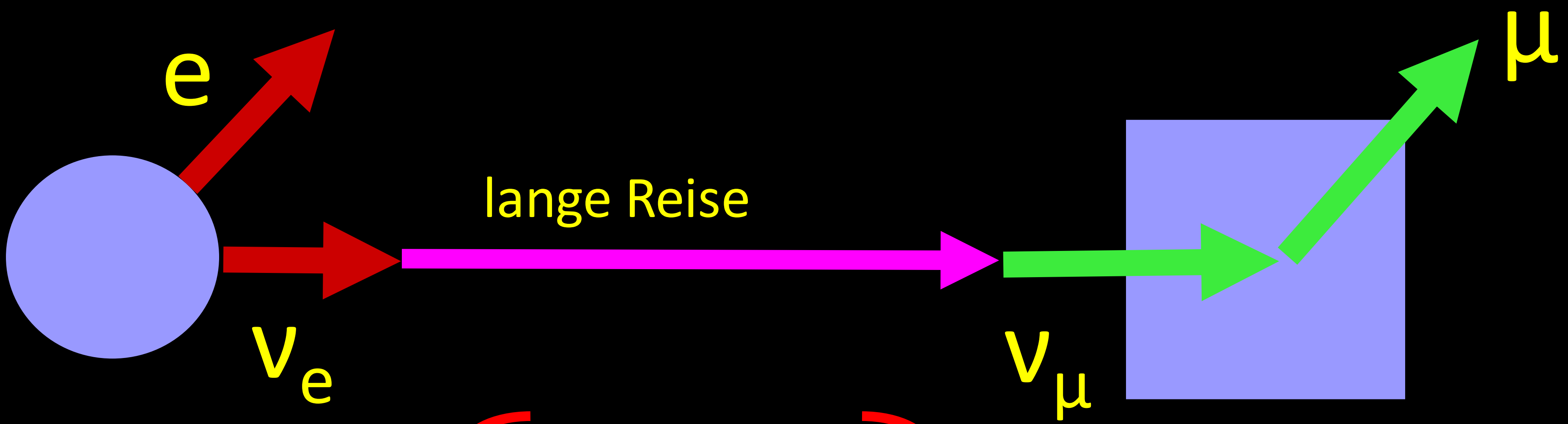
30%

or

e

ν_3

10%


e
lange Reise
μ
ν_e
ν_μ

Original
ν_1, ν_2, ν_3
Mischung

ν_1, ν_2, ν_3
unterschielich
schnell

Andere
ν_1, ν_2, ν_3
Mischung

- Passiert nur, wenn ν_1, ν_2, ν_3 unterschiedliche Massen haben
- Hängt von der Energie und der Entfernung ab

Two-Flavor mixing (for simplicity)

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Time development for an initially pure $|\nu_\alpha>$ beam:

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \cos\theta\, e^{-iE_1 t}|\nu_1\rangle + \sin\theta\, e^{-iE_2 t}|\nu_2\rangle$$
$$= \left[\cos^2\theta\, e^{-iE_1 t} + \sin^2\theta\, e^{-iE_2 t}\right] \cdot |\nu_\alpha\rangle$$
$$+ \left[\cos\theta \sin\theta \left(e^{-iE_1 t} - e^{-iE_2 t}\right)\right] \cdot |\nu_\beta\rangle$$

Definite momentum p; same for all mass eigenstate components

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} = p + \frac{m_i^2}{2\mathrm{p}}$$

$$E_2 - E_1 = \frac{m_1^2 - m_2^2}{2\mathrm{p}} \approx \frac{\Delta m^2}{2E}$$

$$(\text{assuming } \mathrm{p}_i \text{ is the same})$$

$$t = \mathrm{L}/\beta \quad \mathrm{w}/\ \beta \approx 1:$$

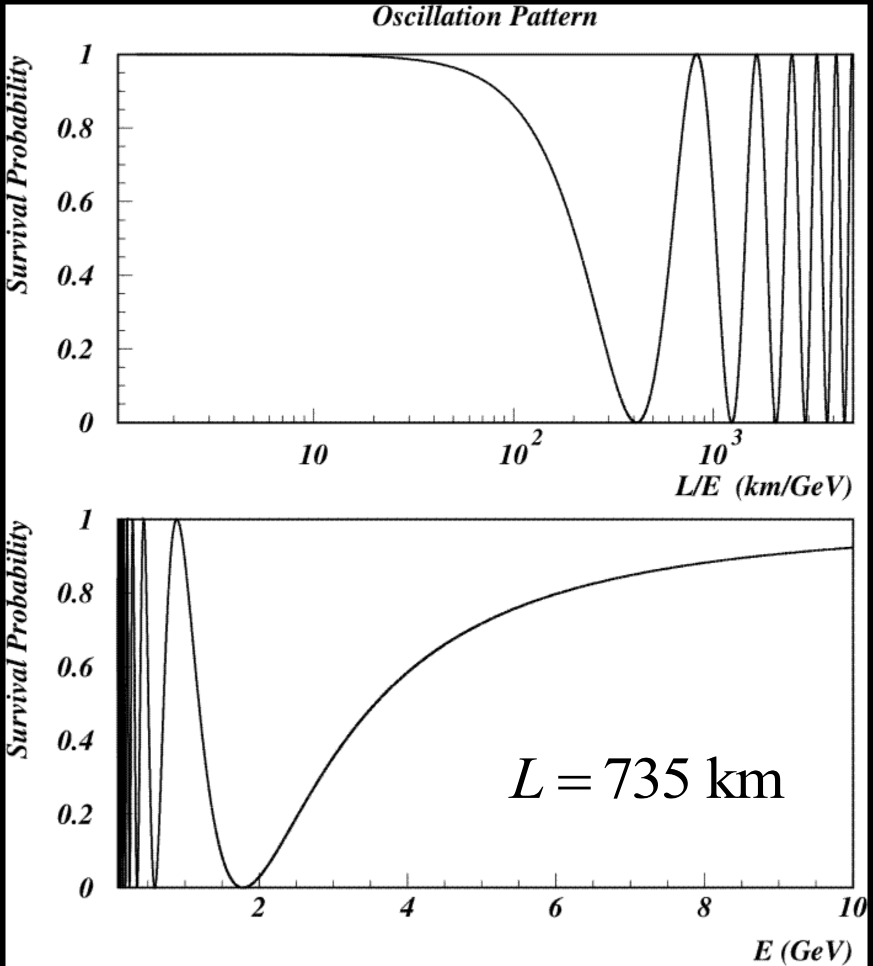
$$(E_2 - E_1)\, t = \frac{\Delta m^2}{2E} L$$

Mixing probability:

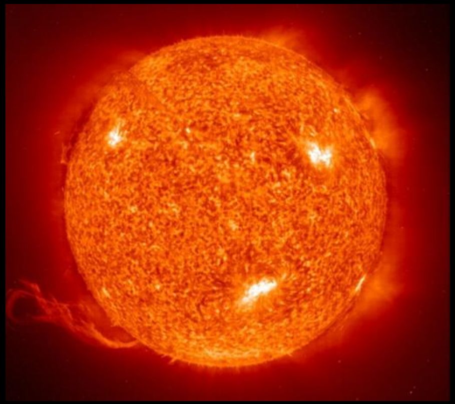
$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta,\ t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t)\rangle|^2 = 2(\cos\theta \sin\theta)^2 \left[1 - \cos^2 \frac{E_2 - E_1}{2} t\right]$$

$$\boxed{P(\nu_\alpha \to \nu_\beta,\ t) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right)} = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \cdot \Delta m^2 [eV]}{4E[GeV]} L[km]\right)$$

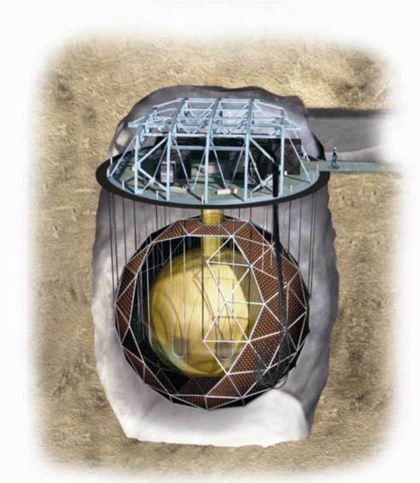
$$P(\nu_\mu \to \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta)\sin^2\left(1.27\Delta m^2 \frac{L}{E_\nu}\right)$$



2015



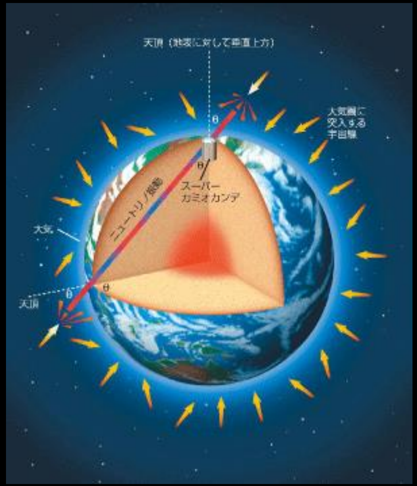
SNO

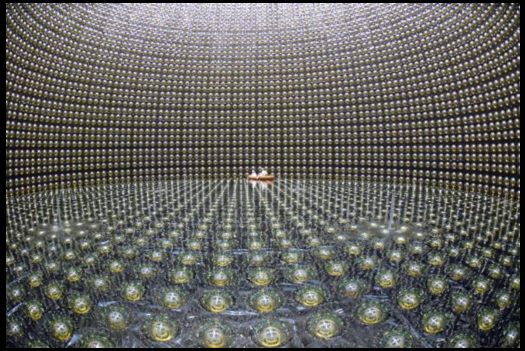


NAT.
MDCCC
XXXIII
OB.
MDCCC
XCV.
ALFR.
NOBEL

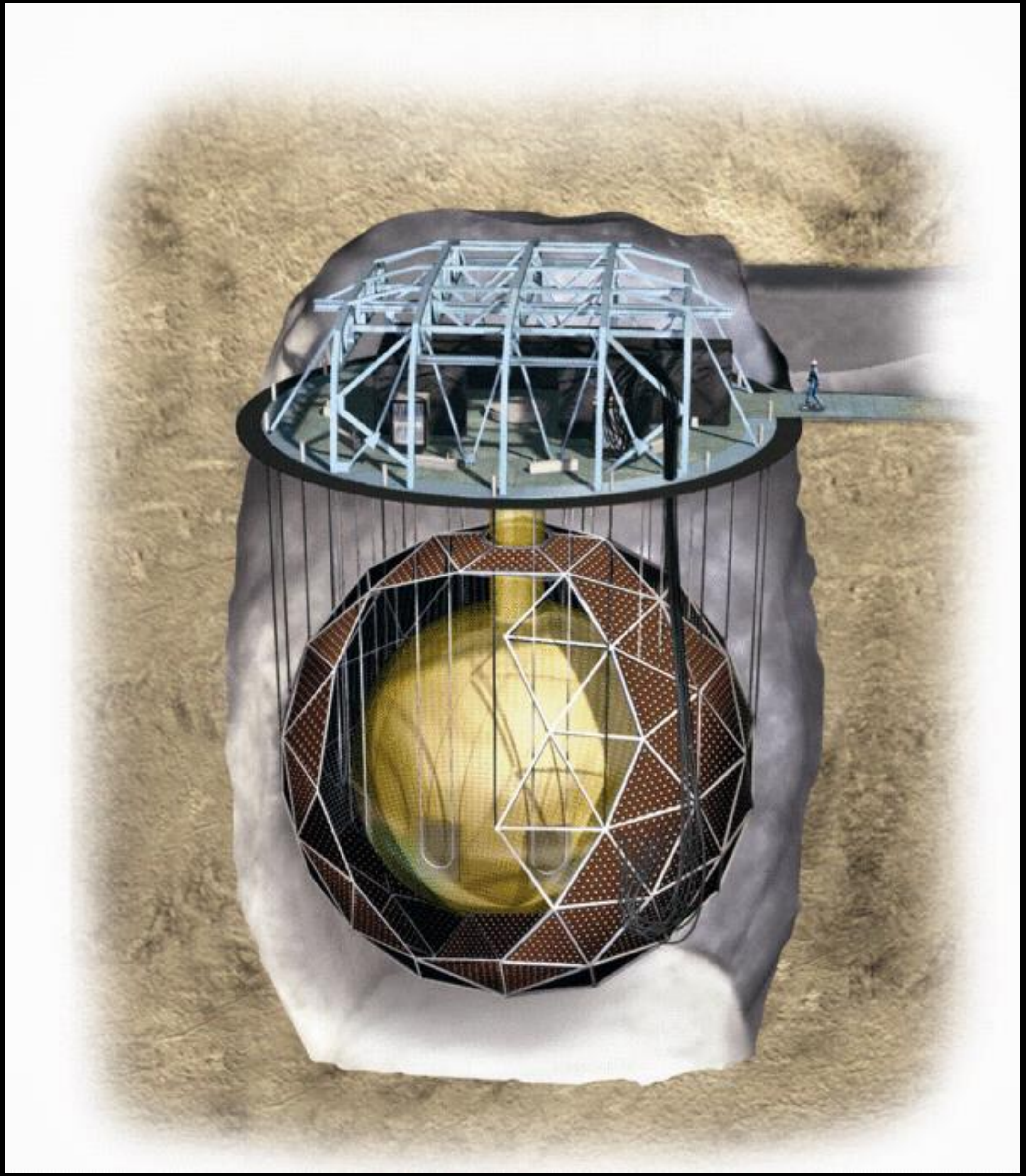
INVENIAS VITAM IUVAT EXCOLUISSE PER ARTES
NATURA
SCIENTIA
LINUS PAULING
MCMLIV

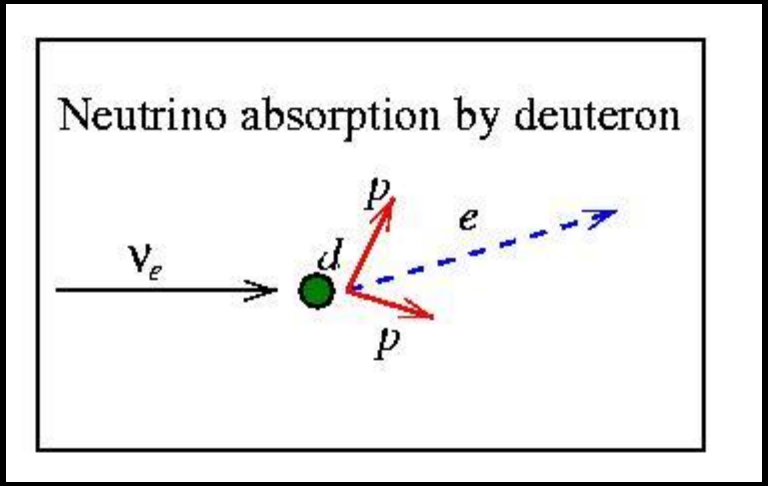
SuperK


天頂（地表に対して垂直上方）
大気圏に突入する宇宙線
θ
スーパーカミオカンデ
大気
天頂

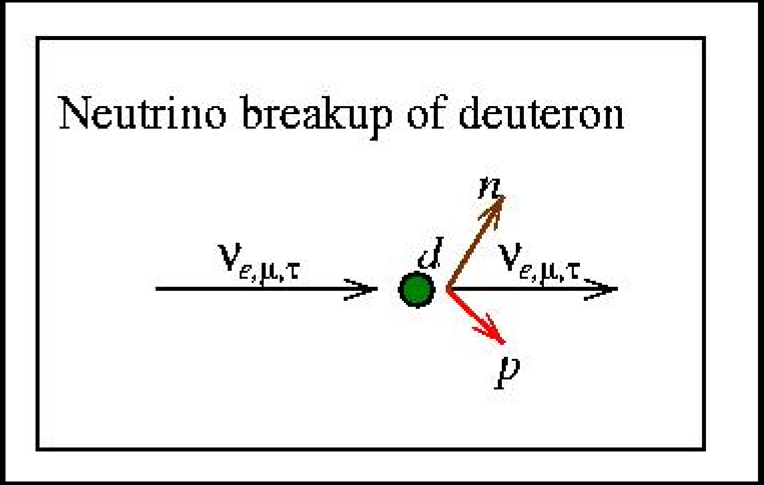


SNO Experiment





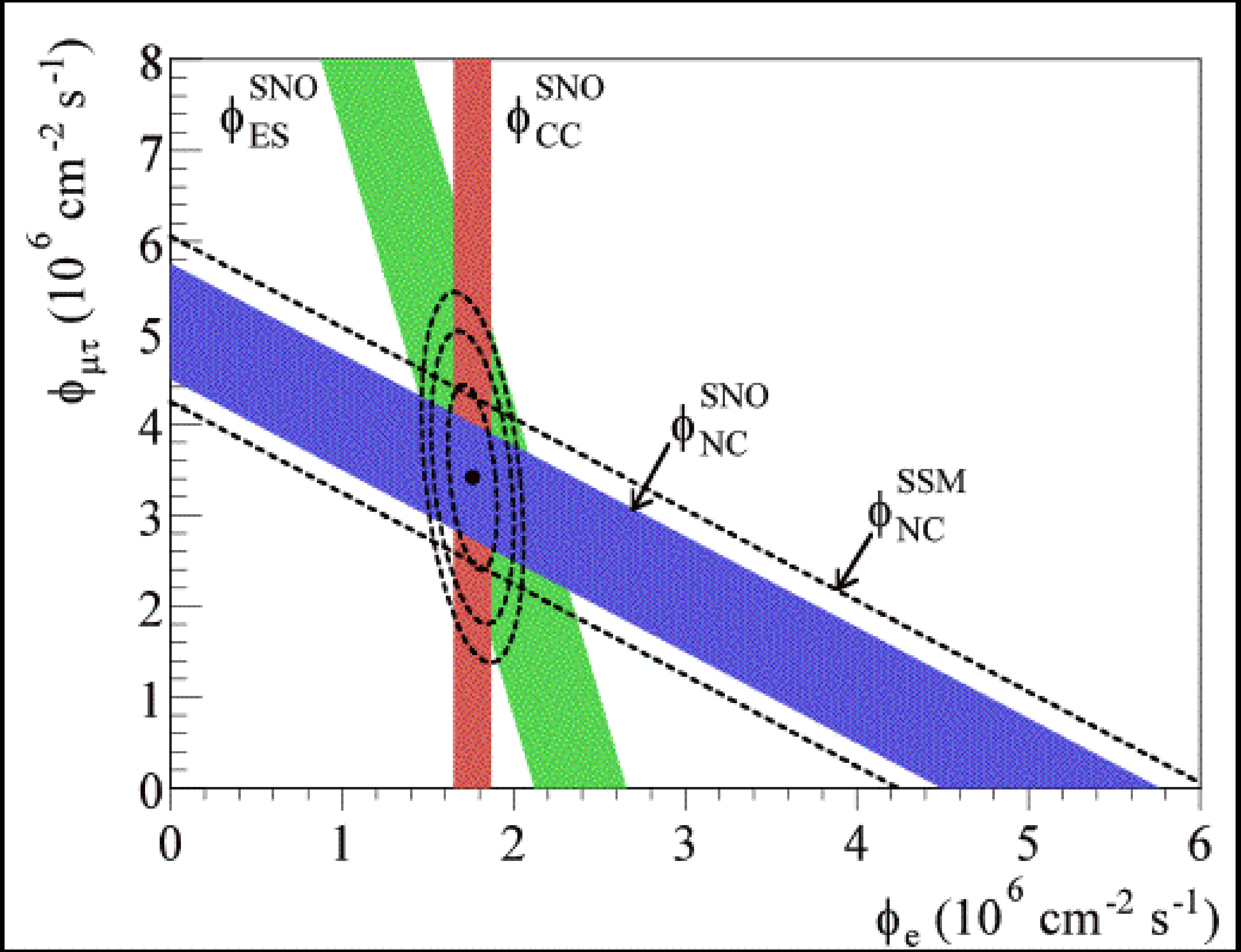
Neutrino absorption by deuteron



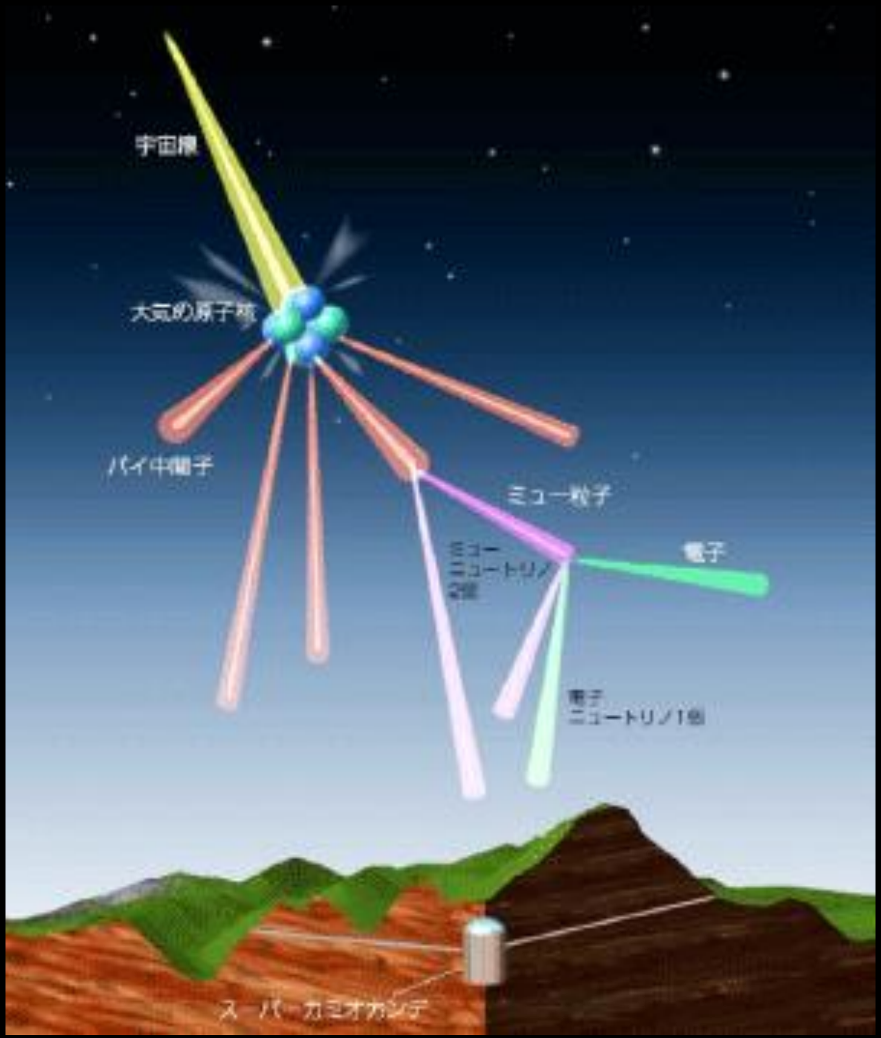
Neutrino breakup of deuteron

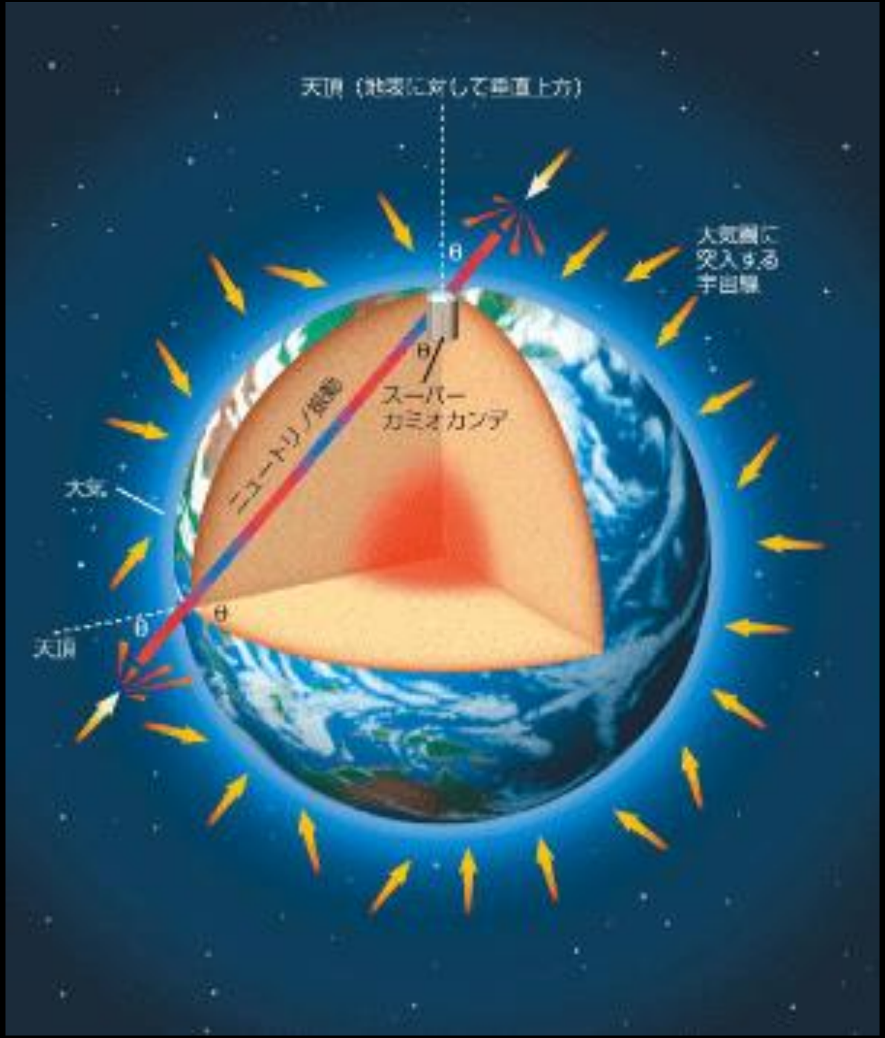
$\nu_{e,\mu,\tau}$
d
n
$\nu_{e,\mu,\tau}$
p

Nobelpreis (Teil I)

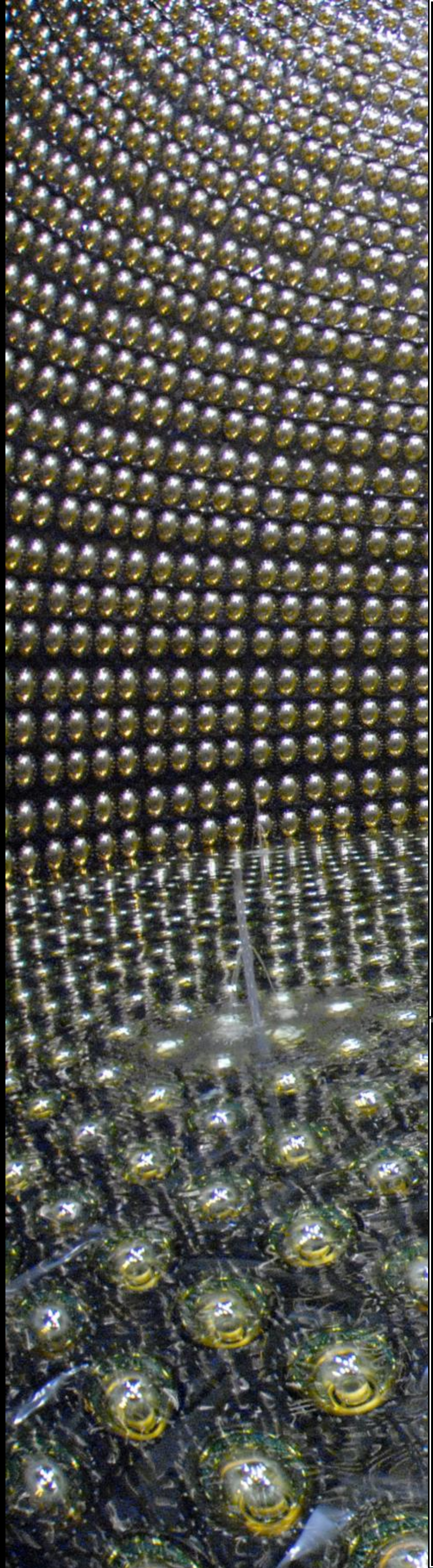
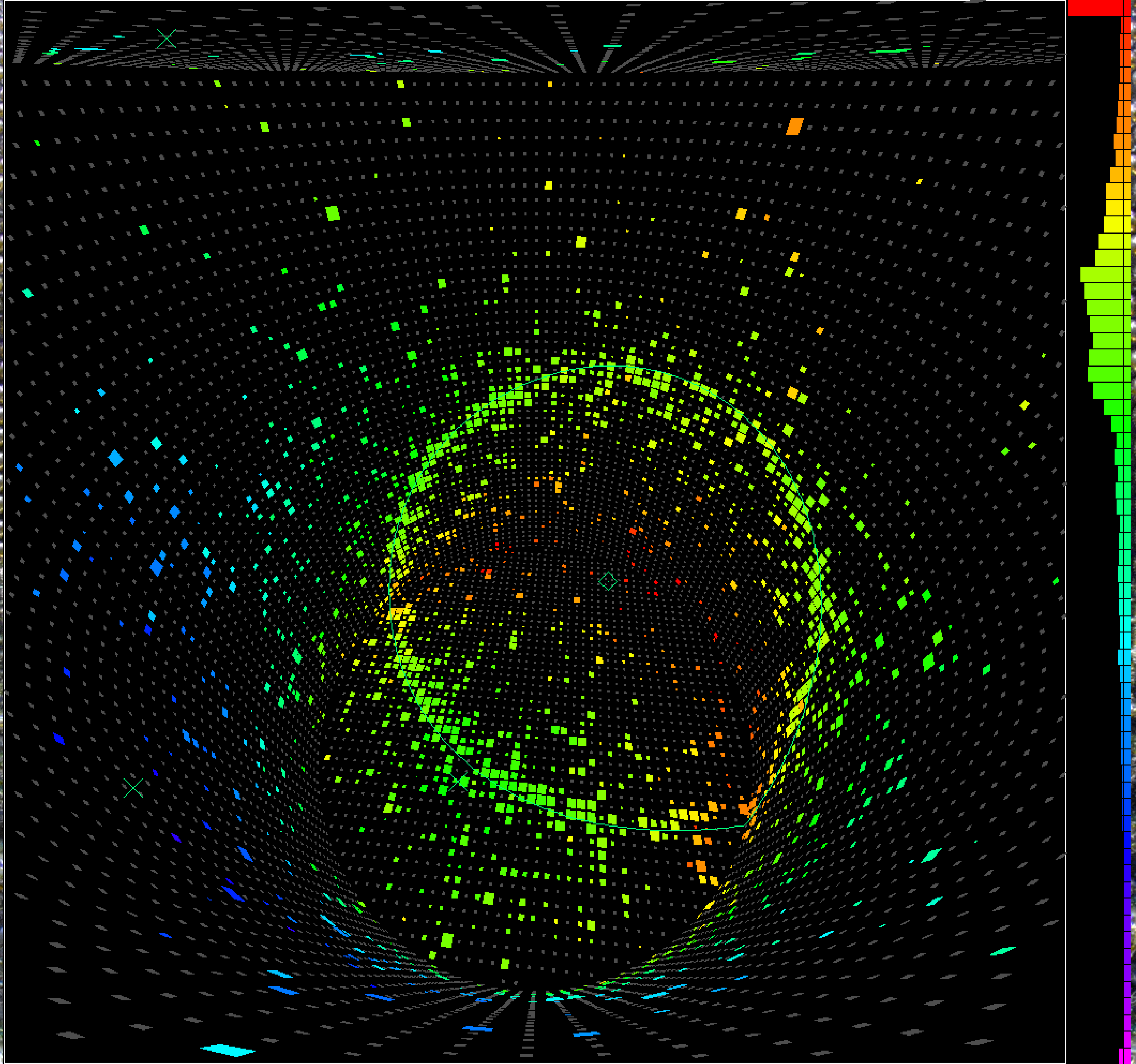
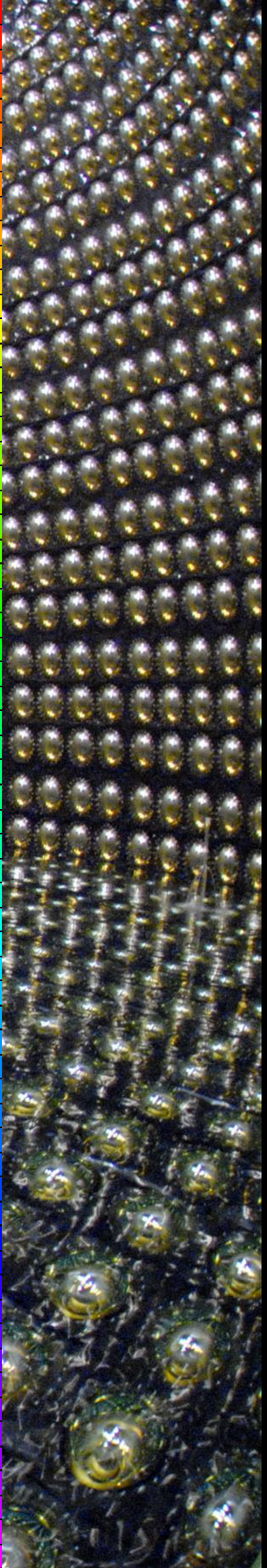


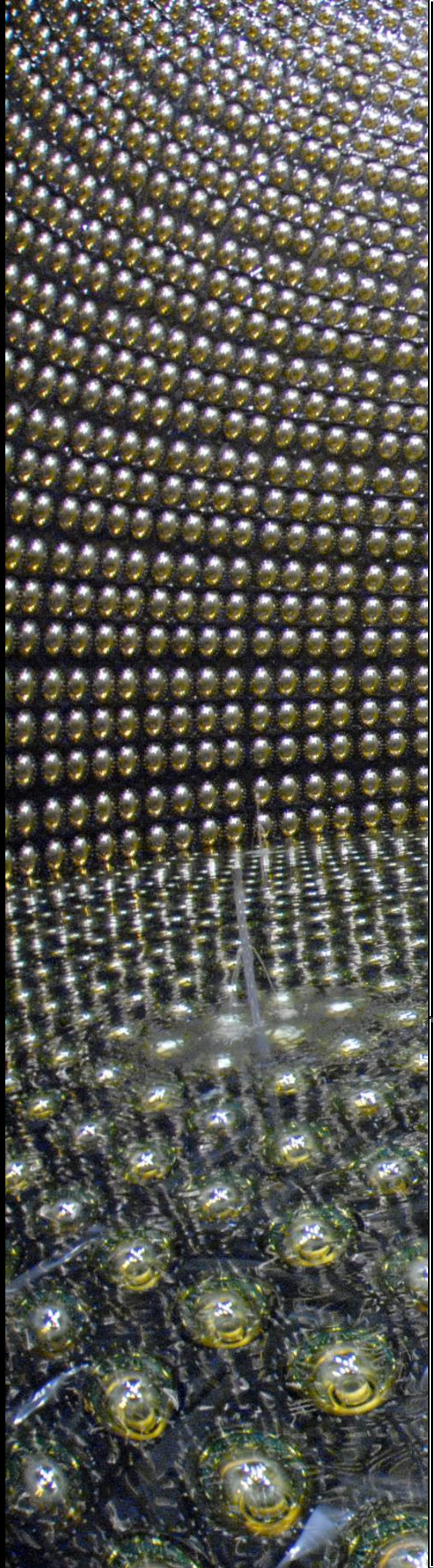
Neutrinos aus der Höhenstrahlung (Atmosphärische Neutrinos)

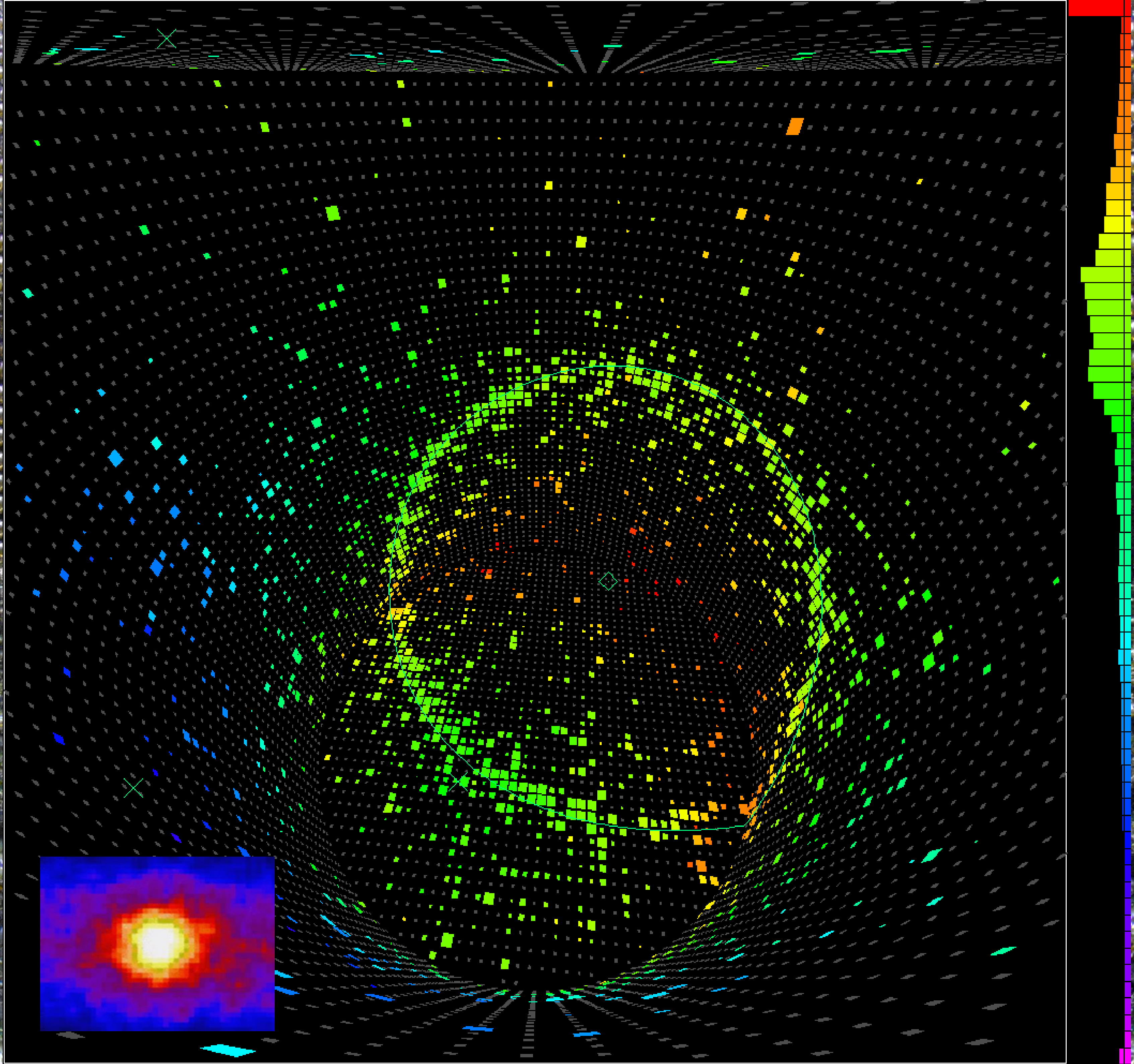

宇宙線
大気の原子核
パイ中間子
ミュー粒子
ミュー
ニュートリノ
2個
電子
電子
ニュートリノ1個
スーパーカミオカンデ

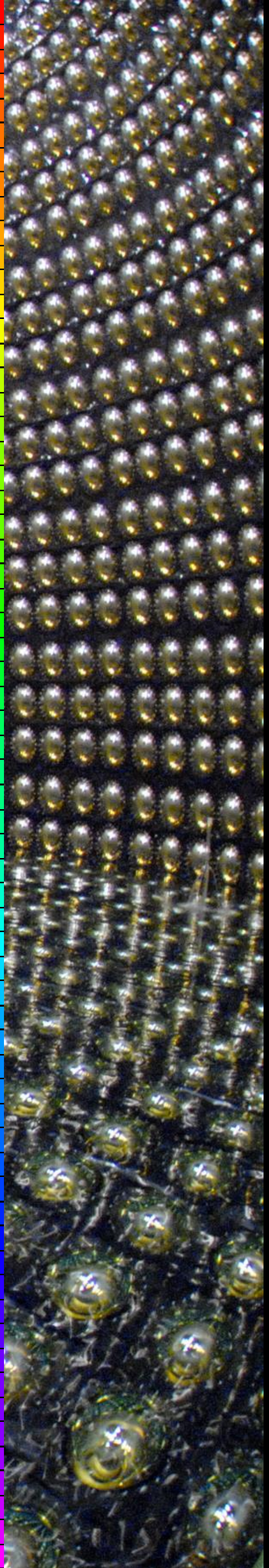

天頂（地表に対して垂直上方）
θ
大気圏に
突入する
宇宙線
θ
スーパー
カミオカンデ
ニュートリノ飛跡
大気
θ
θ
天頂

SuperKamiokande

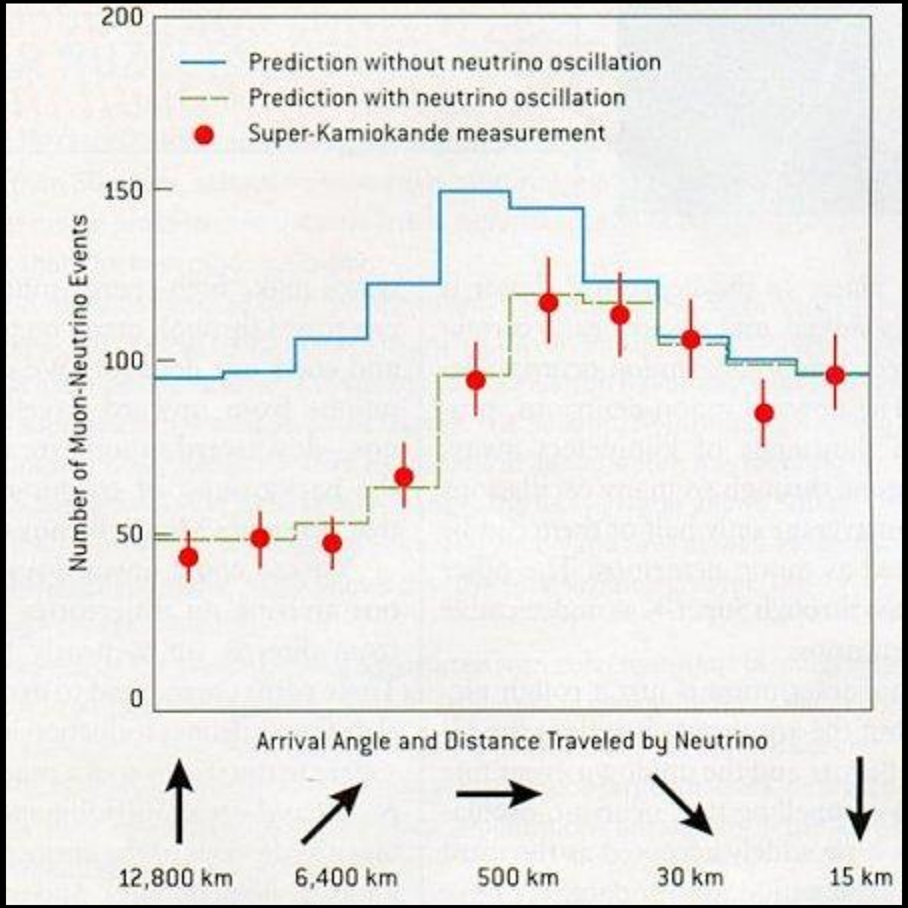










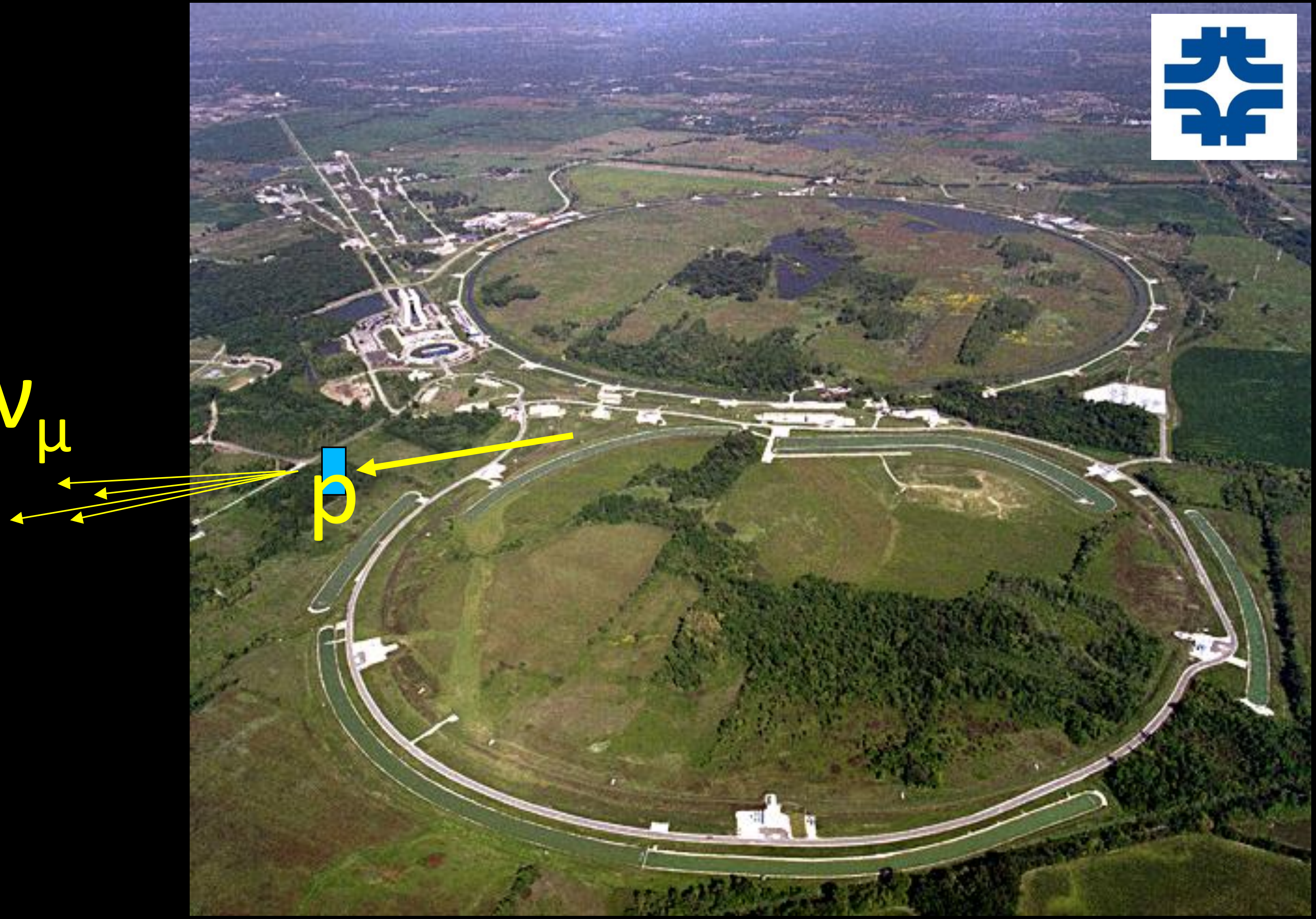
Nobelpreis (Teil II)



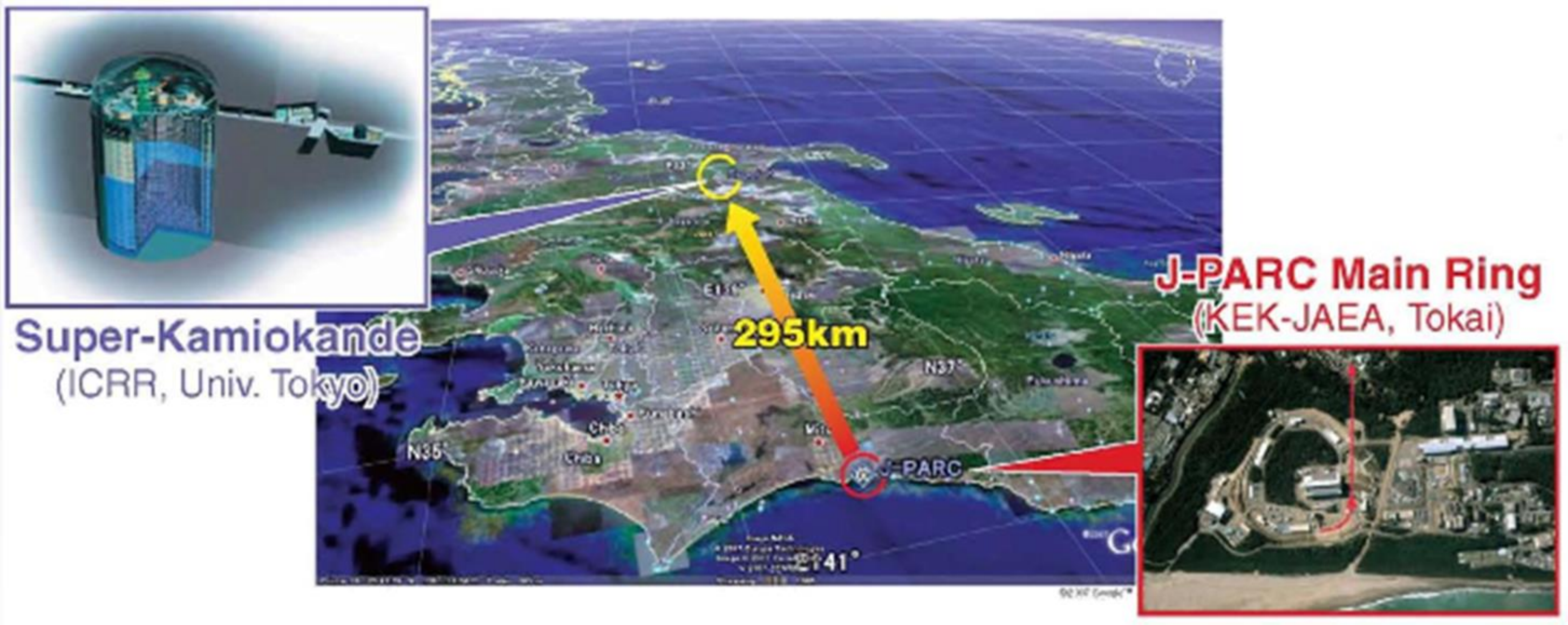
Beschleuniger-Neutrinos

Beschleuniger-Neutrinos

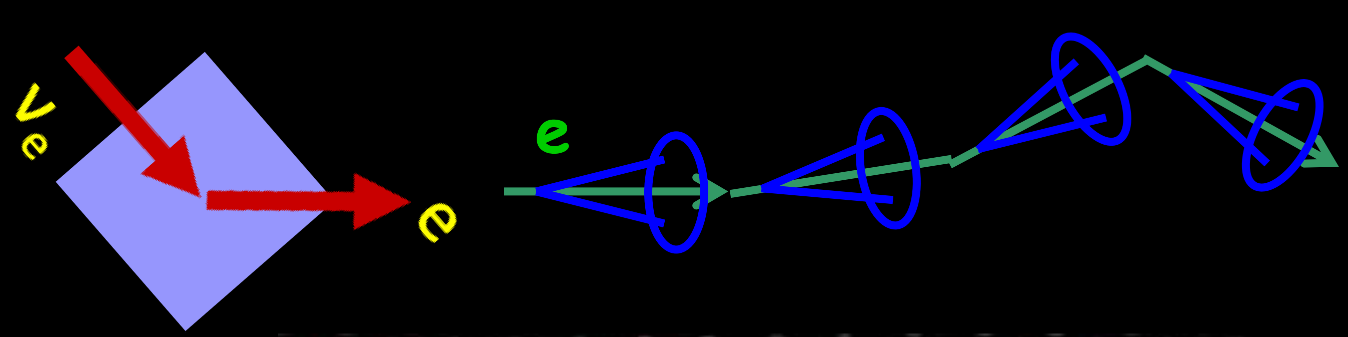
Beschleuniger-Neutrinos

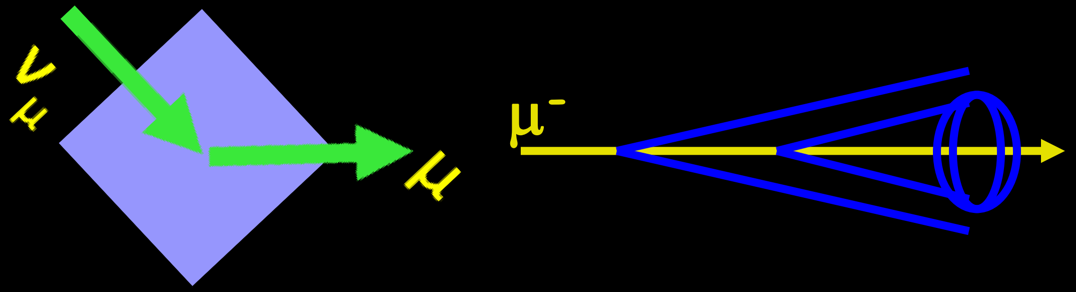


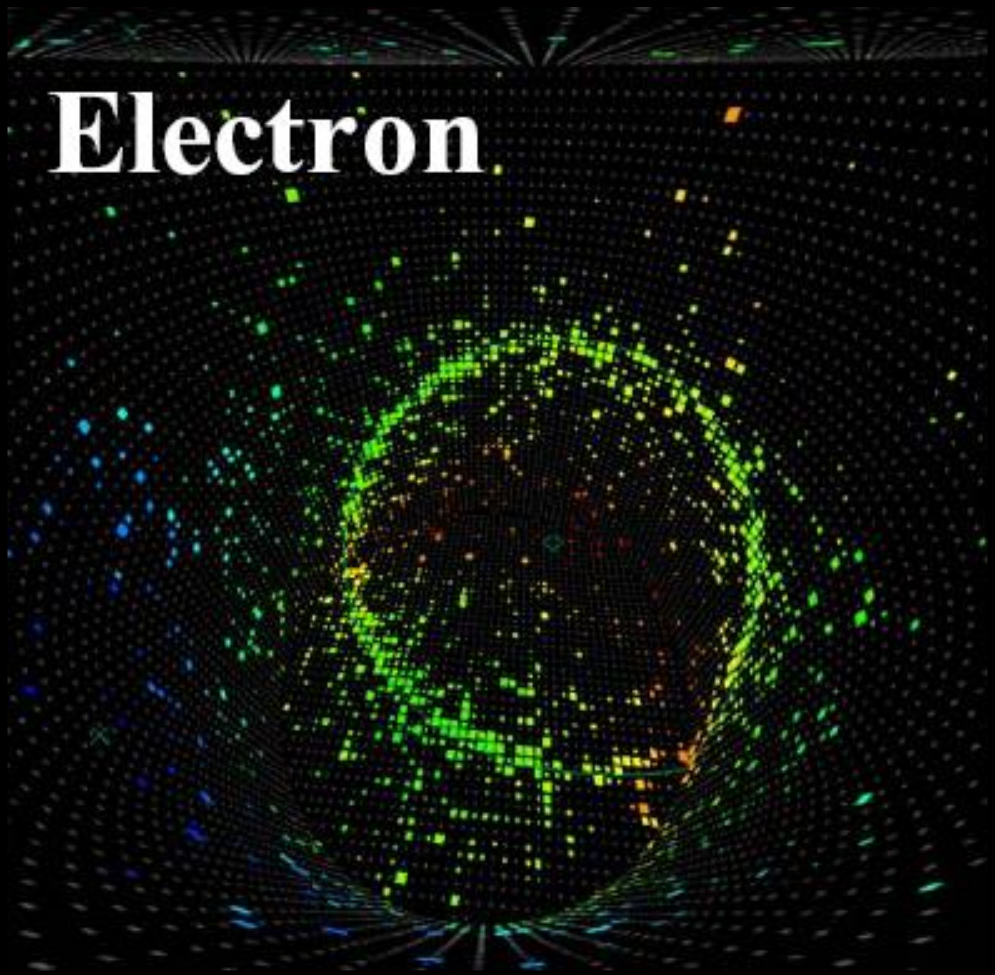
Neutrino-Oszillations-Experiment
T2K

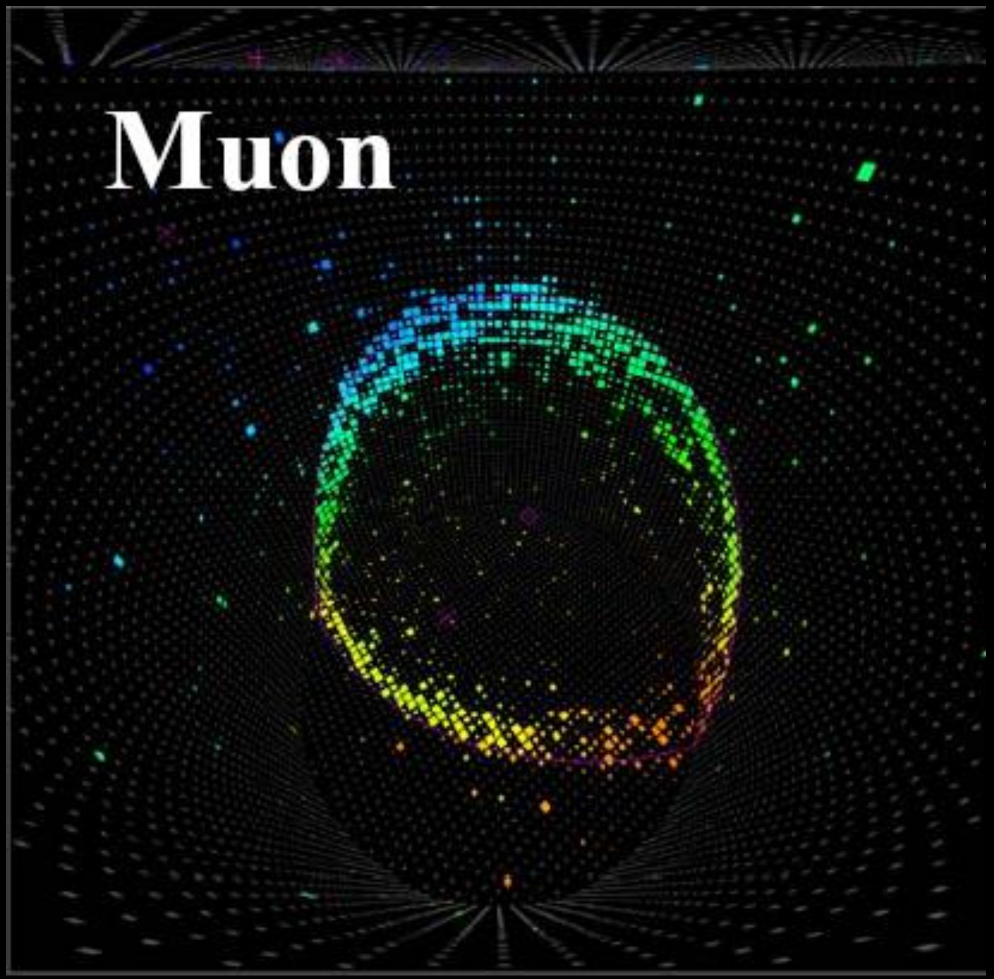

Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)
295km
J-PARC
J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)
N37°
N35°
E141°

Wie kann man Neutrinos identifizieren?



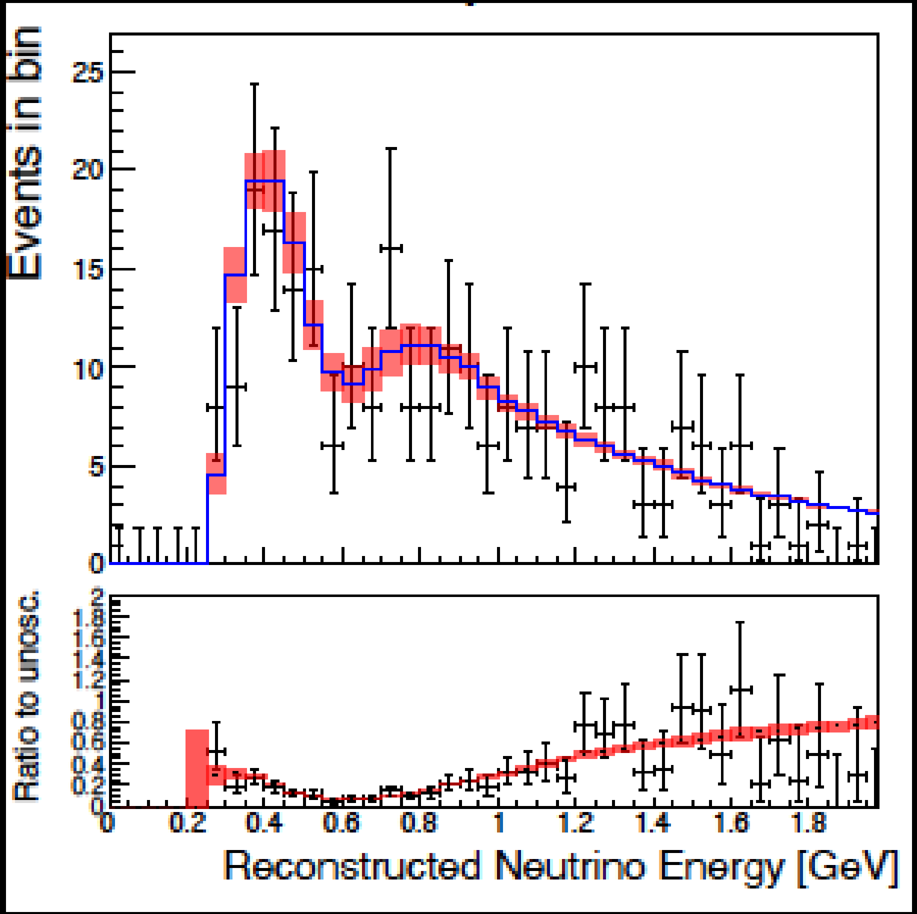




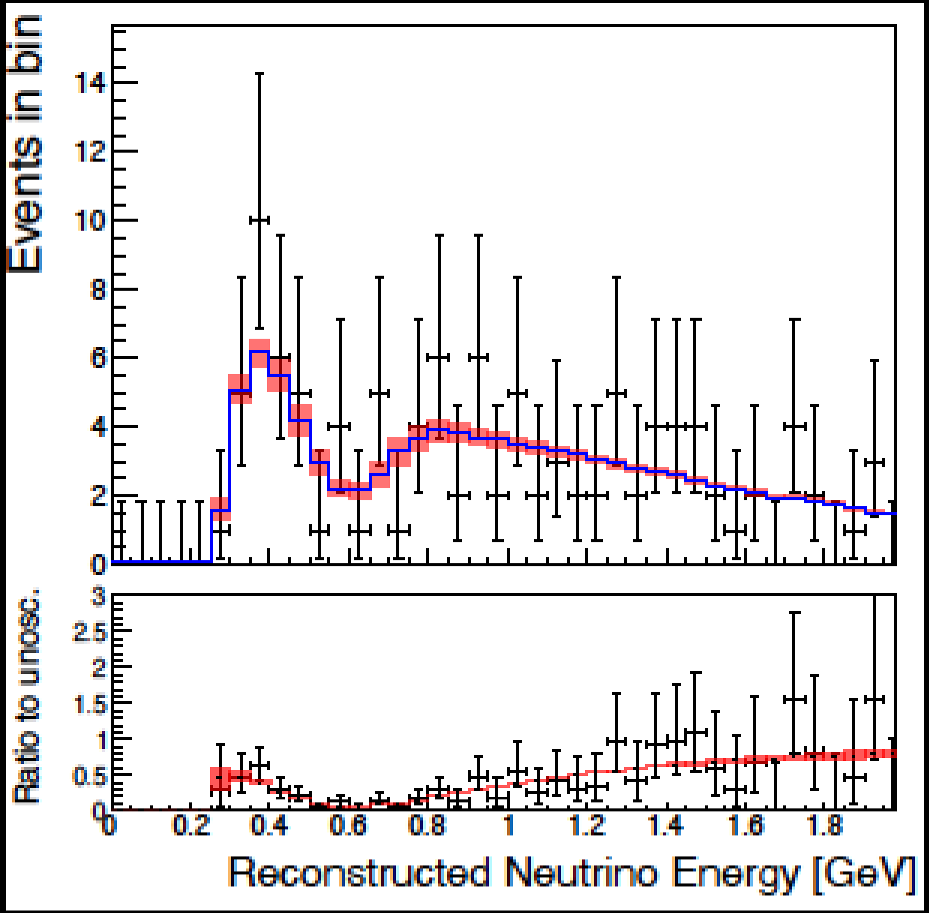


Neutrinos und Anti-Neutrinos verschwinden

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$

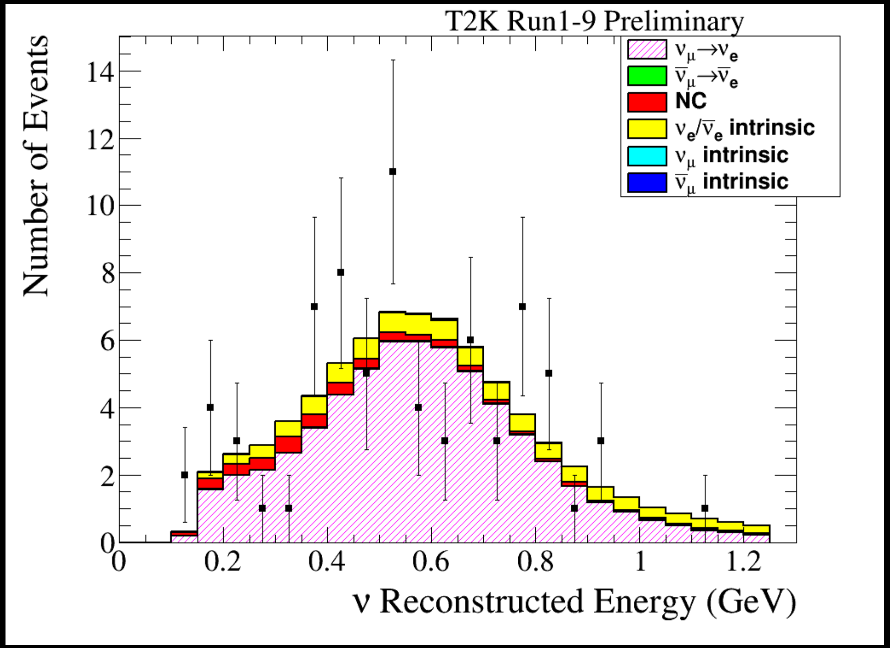


$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$

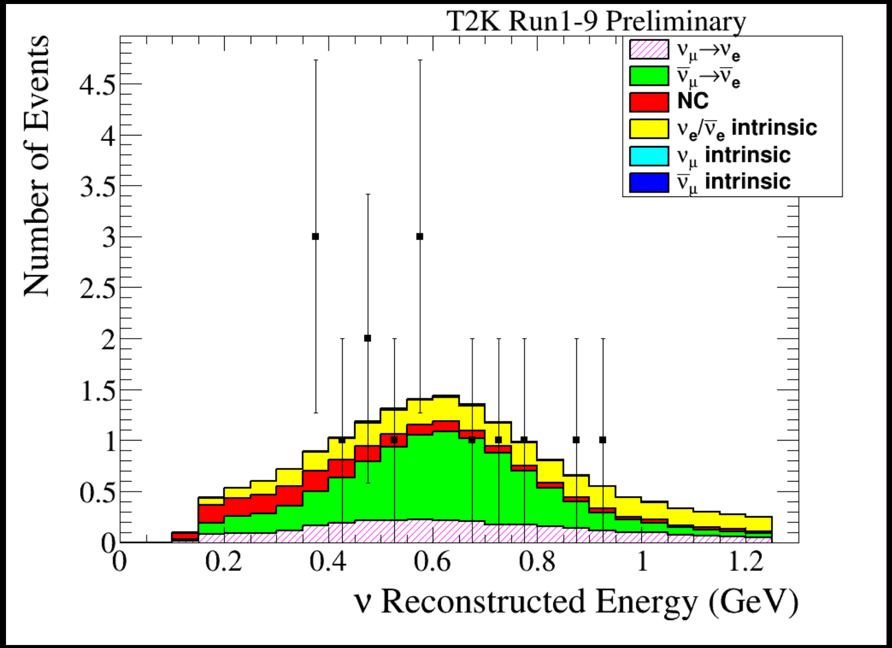


Neutrinos und Anti-Neutrinos erscheinen

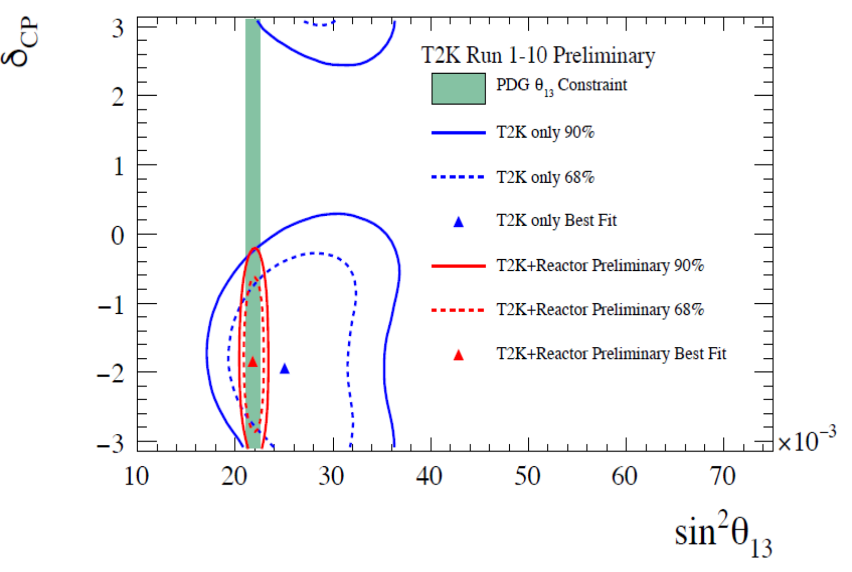
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

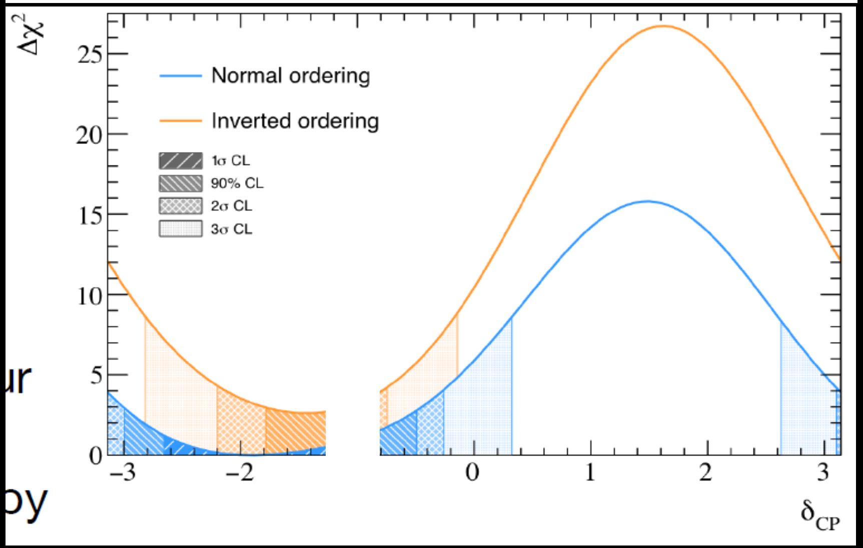


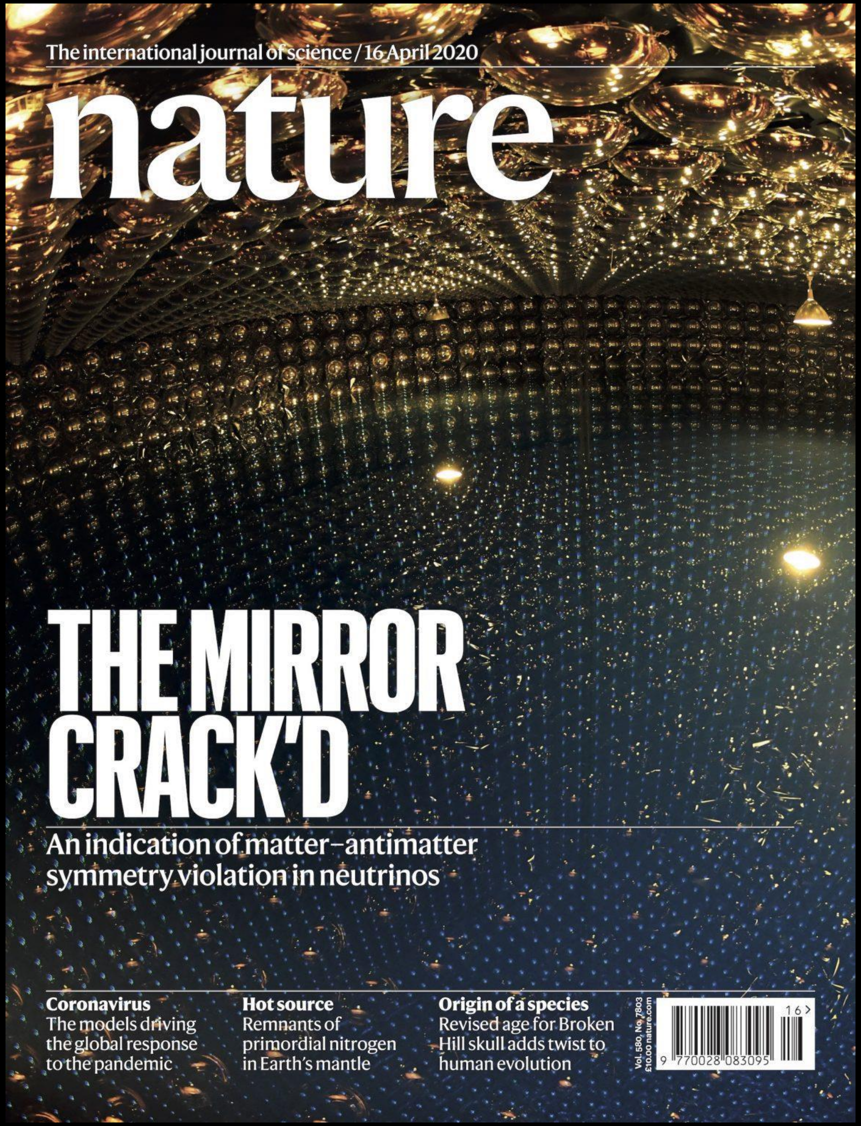
$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$



Materie-Antimaterie-Asymmetrie







The international journal of science / 16 April 2020

nature

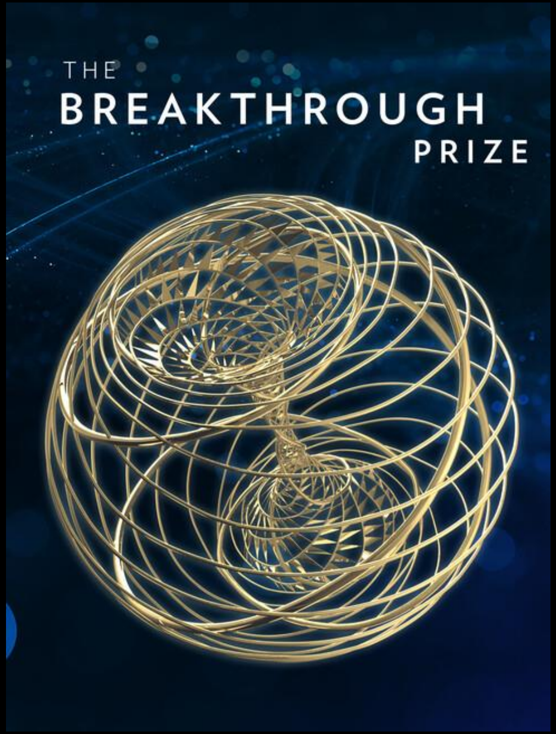
THE MIRROR CRACK'D

An indication of matter–antimatter symmetry violation in neutrinos

Coronavirus
The models driving the global response to the pandemic

Hot source
Remnants of primordial nitrogen in Earth's mantle

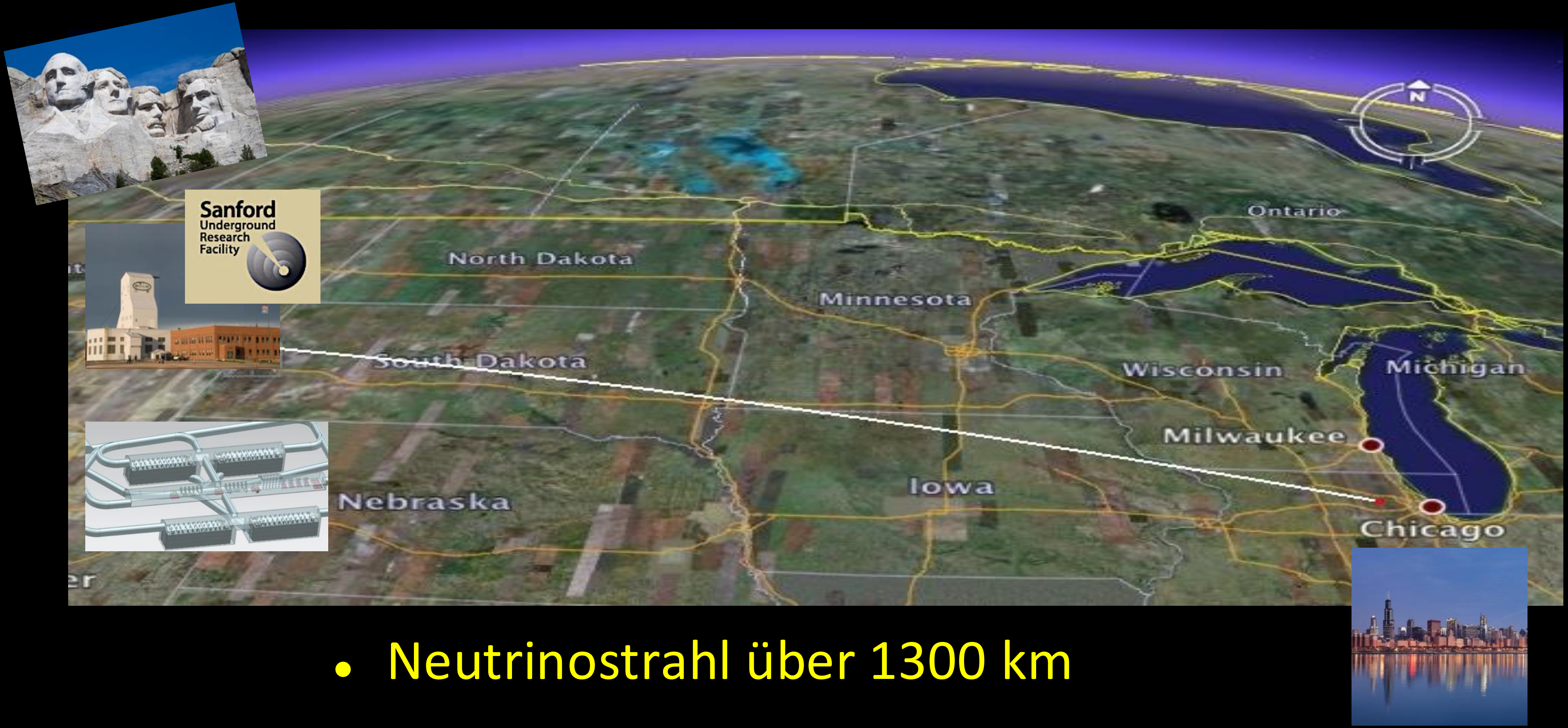
Origin of a species
Revised age for Broken Hill skull adds twist to human evolution



Was sind die wichtigen Fragen?

- Warum sind Neutrinos so leicht?
- Wie leicht sind Neutrinos?
- Sind Neutrinos ihre eigenen Anti-Teilchen?
- Oszillieren Neutrinos und Anti-Neutrinos gleich?

DUNE


Sanford Underground Research Facility
North Dakota
South Dakota
Minnesota
Nebraska
Iowa
Wisconsin
Michigan
Milwaukee
Chicago
Ontario
N

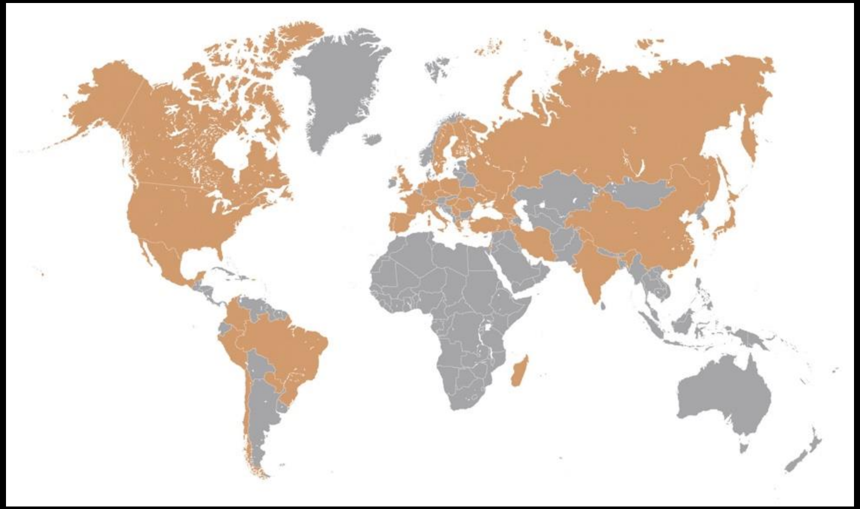
- Neutrinostrahl über 1300 km
- Stahlleistung
  - 1.2 MW → 2.4 MW
- Ein 40 000 t Detektor-System
  - In einer alten Miene (SURF)

Intenationale Kollaboration

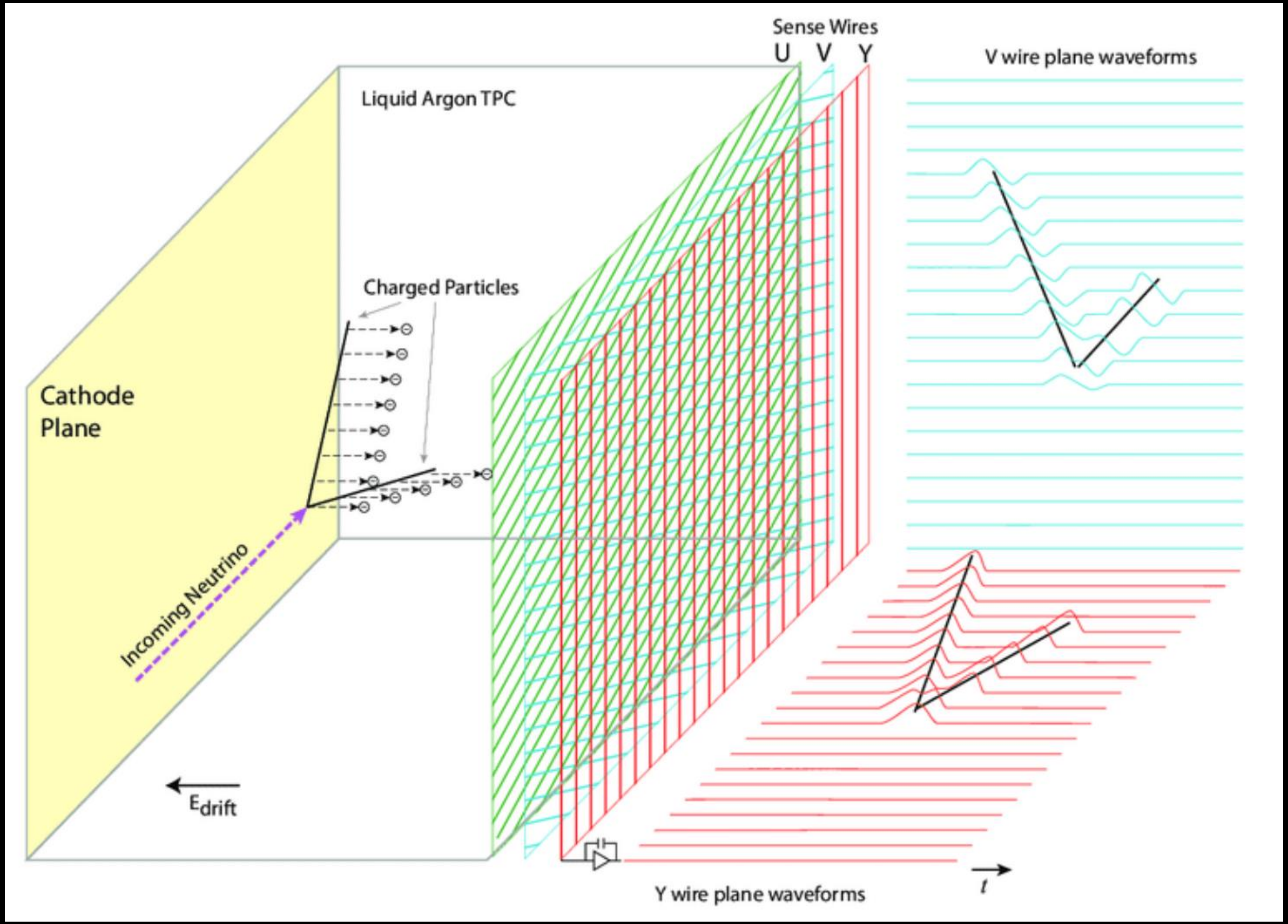
DEEP UNDERGROUND NEUTRINO EXPERIMENT

1350 Mitglieder

mehr als 200 Institutionen
in 34 Ländern (inkl. CERN)



Wie weisen wir Neutrinos nach?

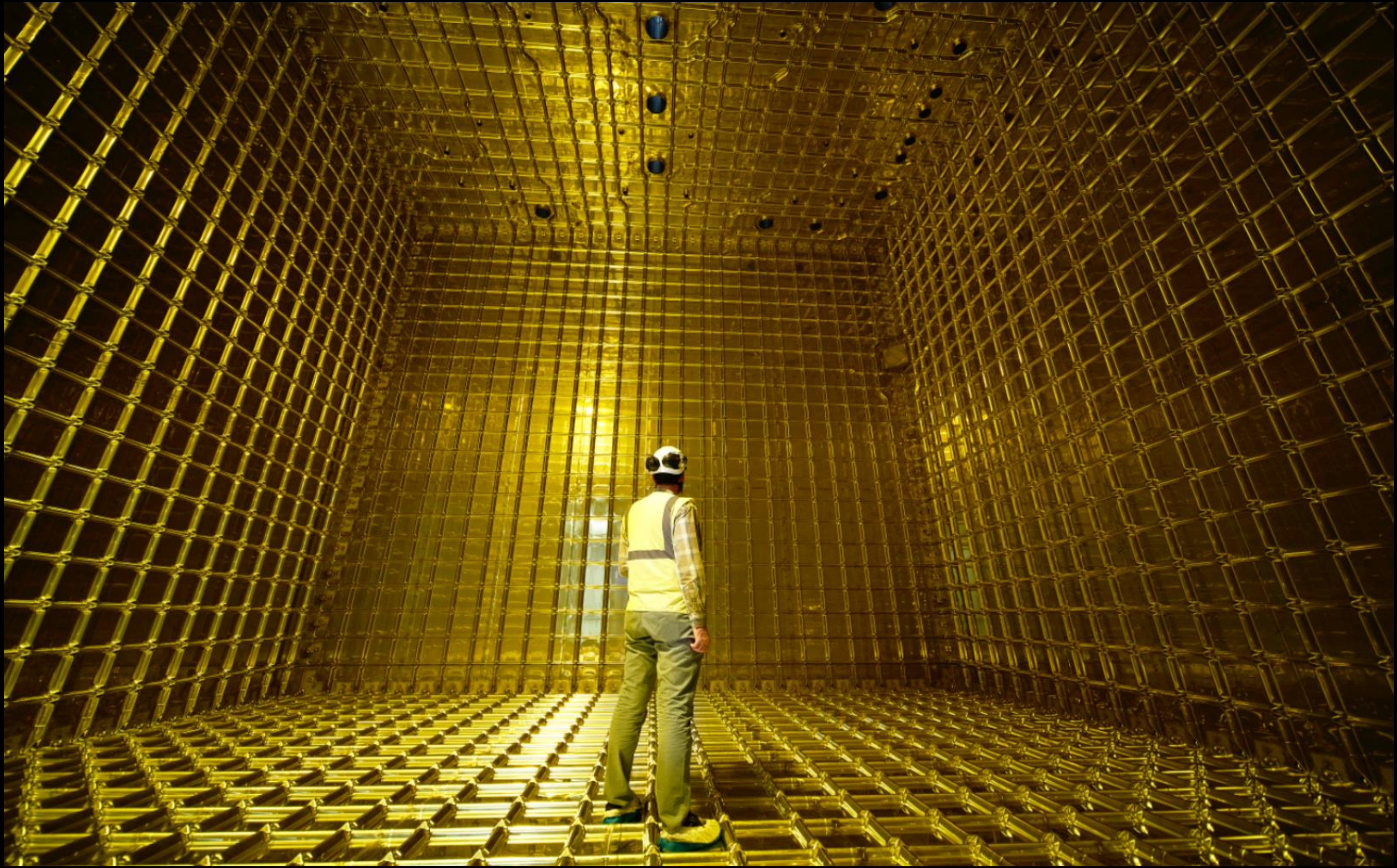

Sense Wires
U V Y
V wire plane waveforms
Liquid Argon TPC
Charged Particles
Cathode Plane
Incoming Neutrino
E_{drift}
Y wire plane waveforms
t

Warum flüssiges Argon?

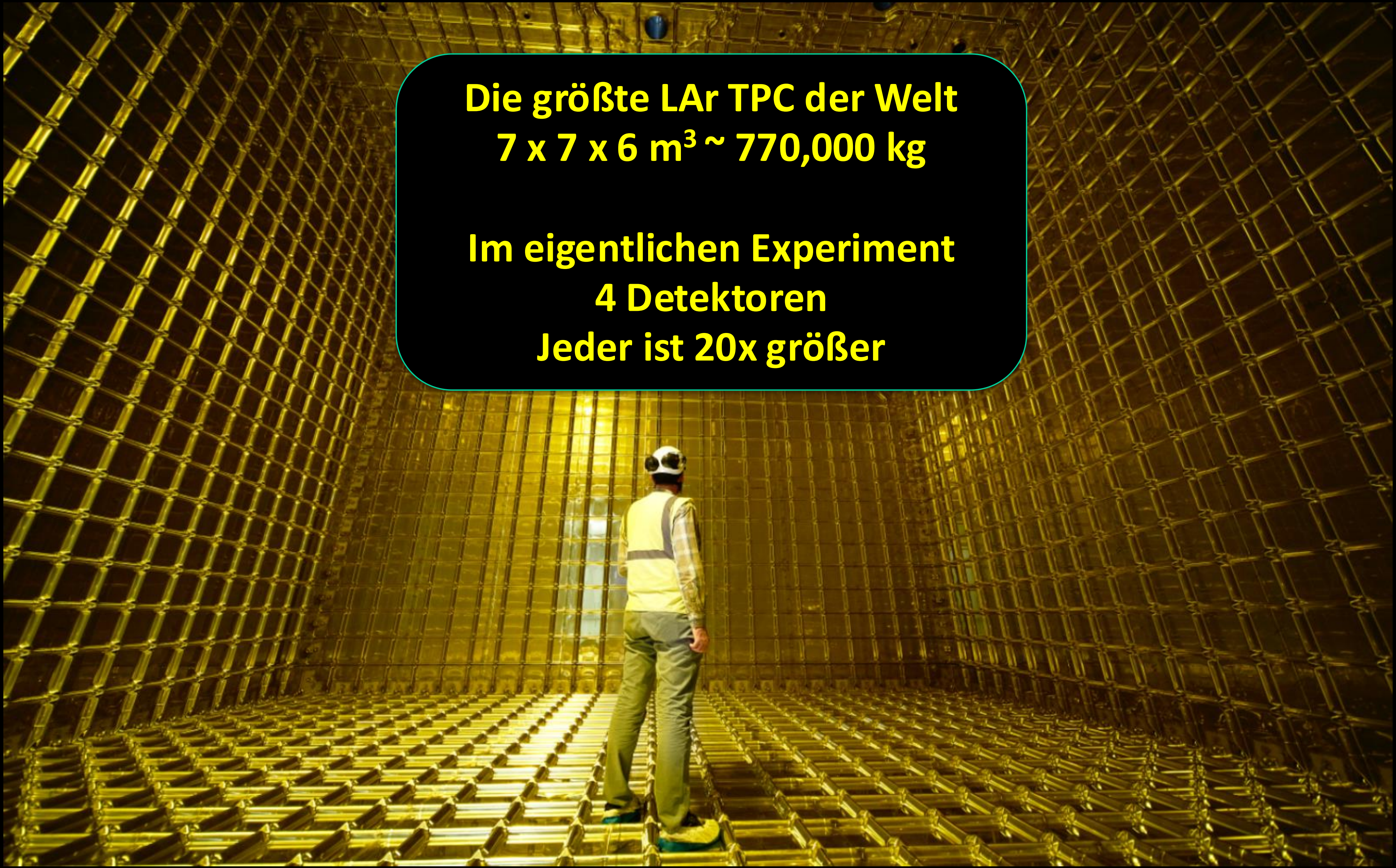
- **Dichte**:
  40% dichter als Wasser
- **Billig**:
  1% der Atmosphere
- **Einfach zu ionisieren**:
  55,000 Elektrons/cm
- **Super Szintillator**
  20,000 photons/MeV @ 500 V/cm

He
Ne
Ar
Kr
Xe

Leerer Kryostat @ CERN



Leerer Kryostat @ CERN

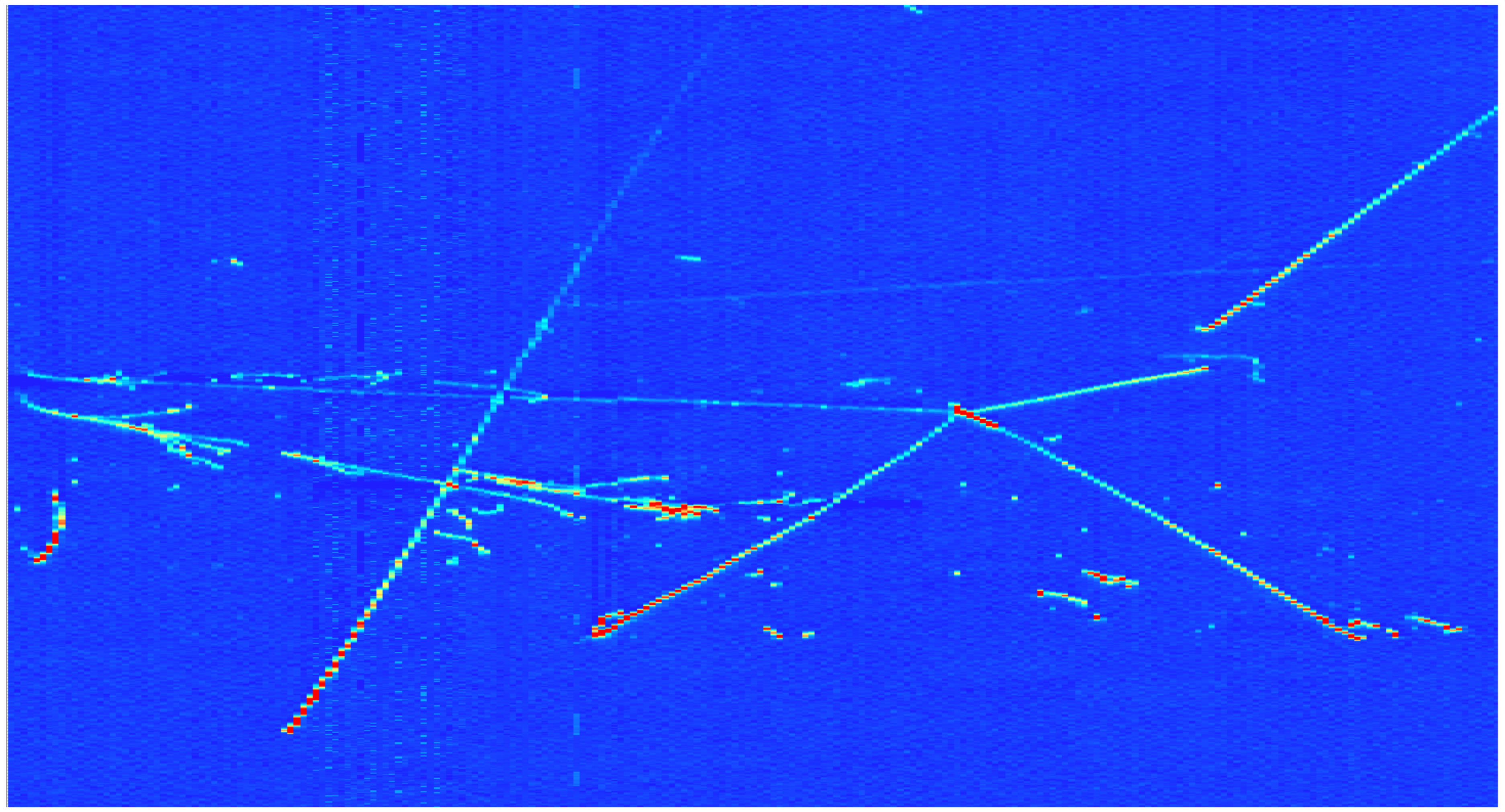


Die größte LAr TPC der Welt
7 x 7 x 6 m^3 ~ 770,000 kg

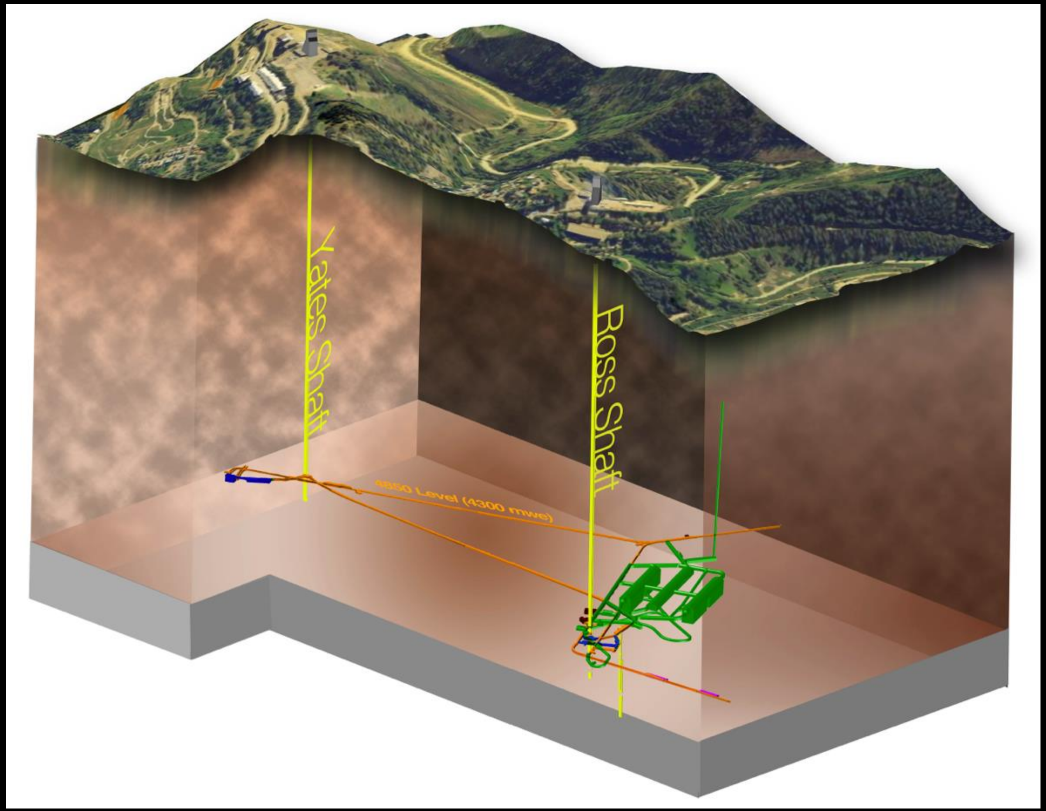
Im eigentlichen Experiment
4 Detektoren
Jeder ist 20x größer

Detektor-Konzert

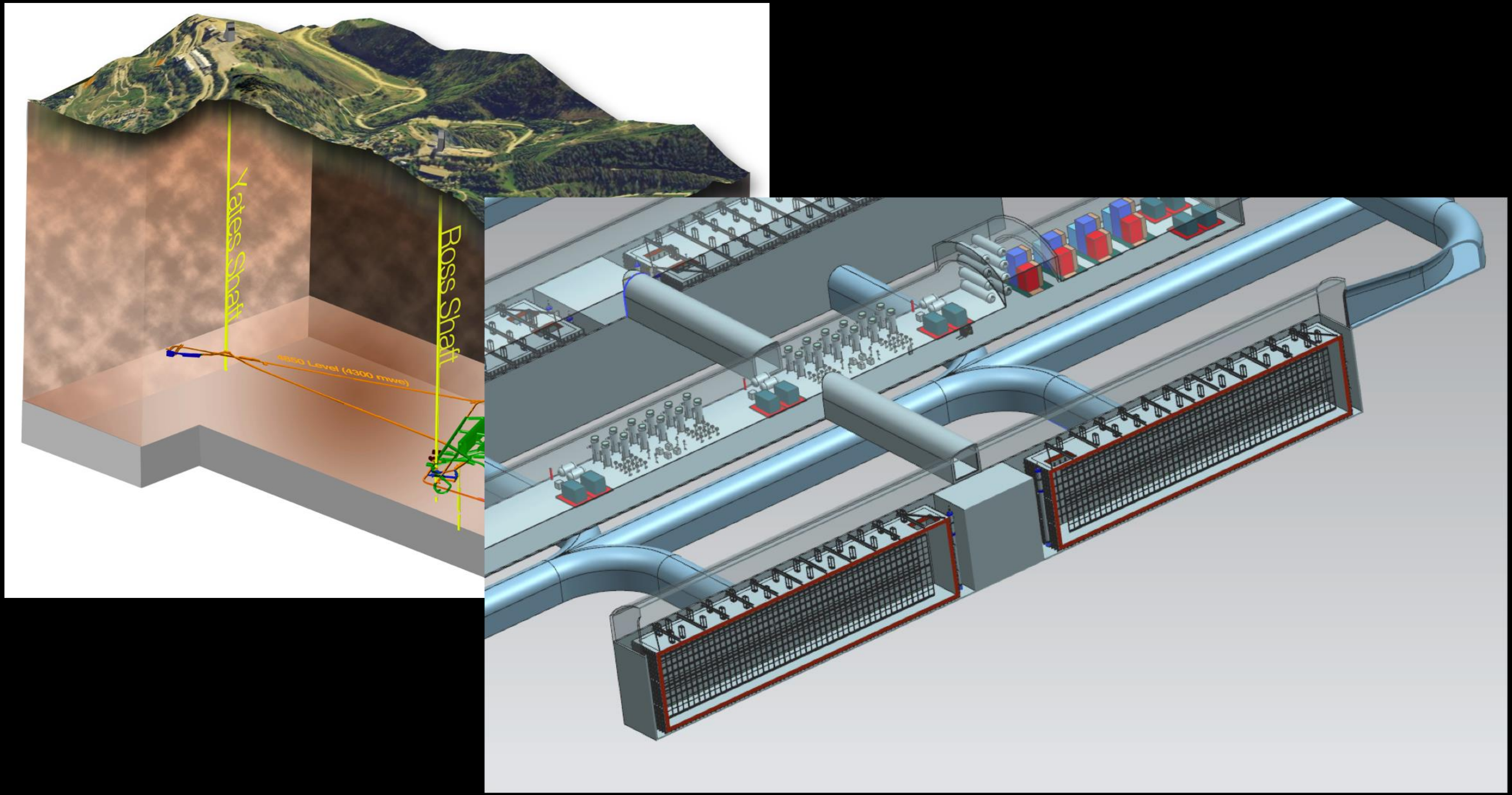
Aufgezeichnete Ereignisse



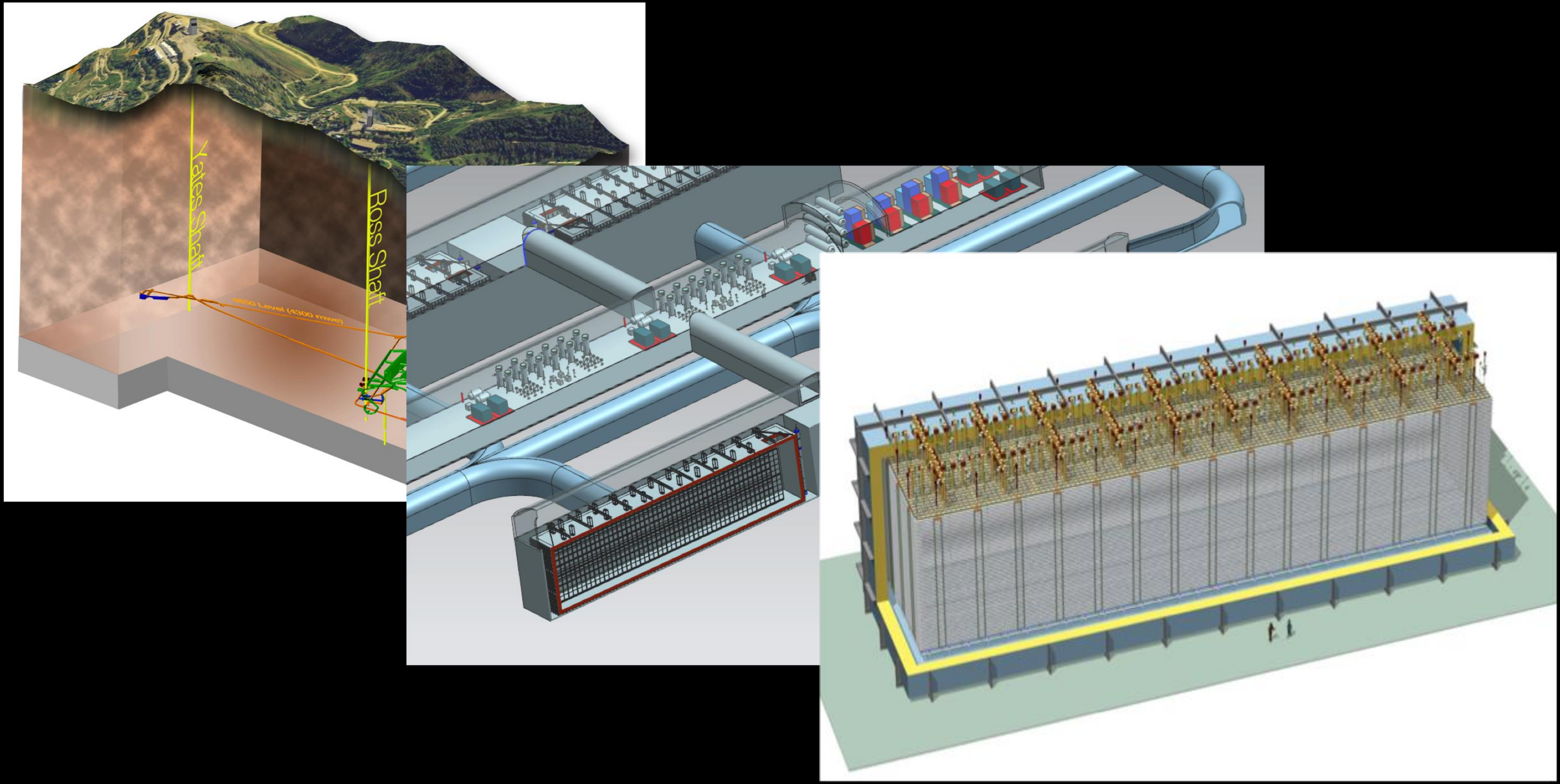
DUNE @ SURF

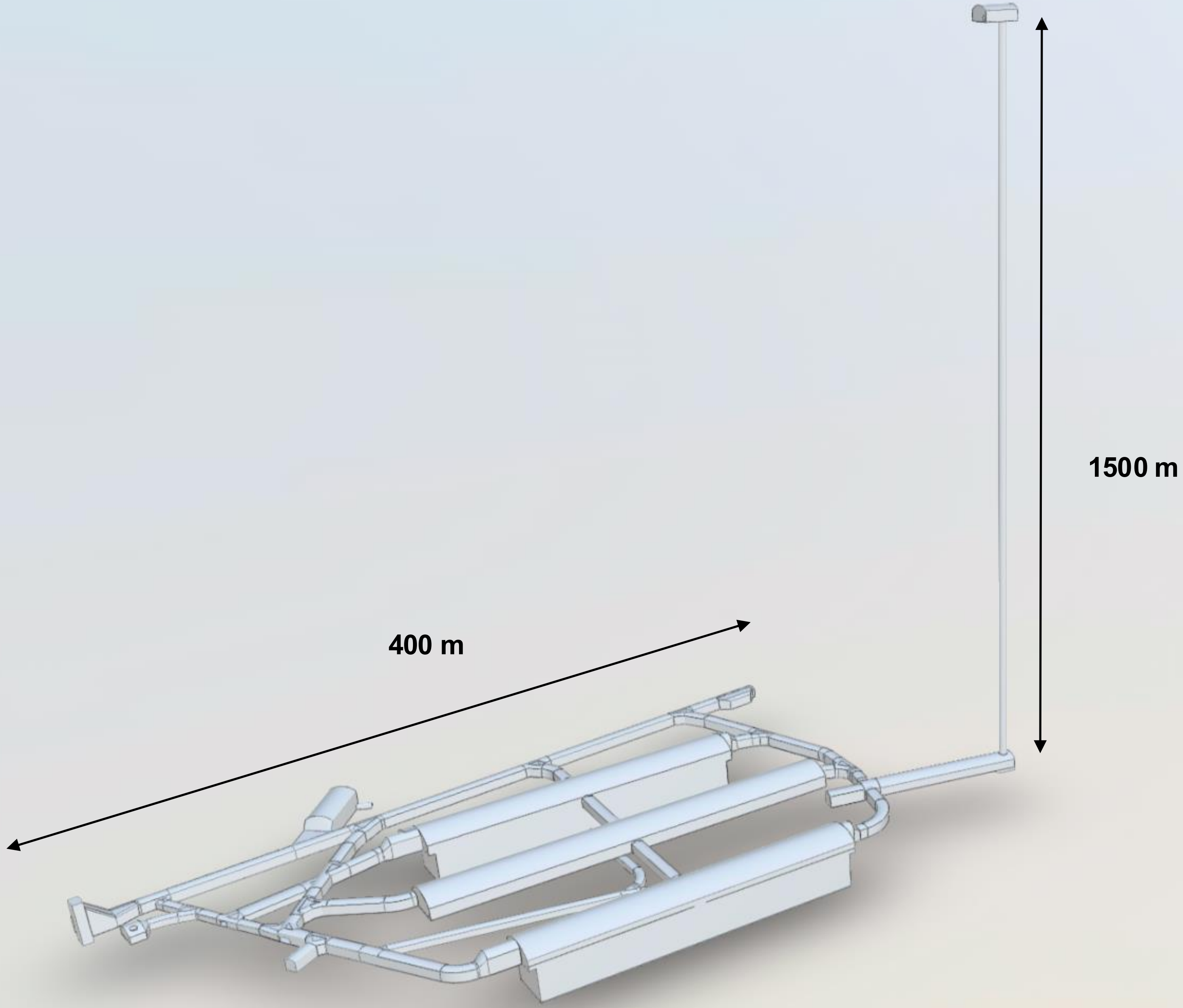

Yates Shaft
Ross Shaft
4850 Level (4300 mwe)

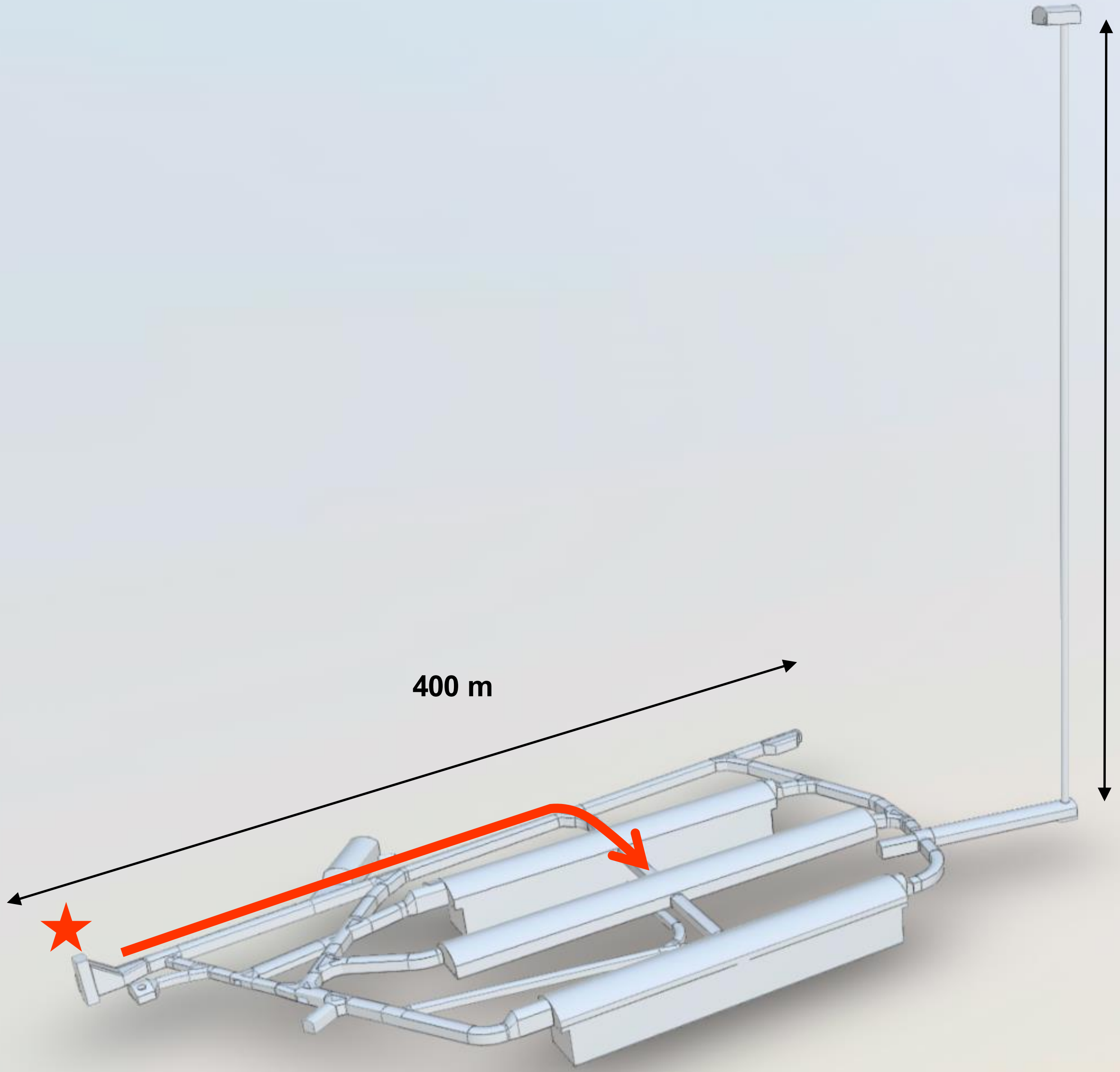
DUNE @ SURF


Yates Shaft
Ross Shaft
4850 Level (4300 mwe)

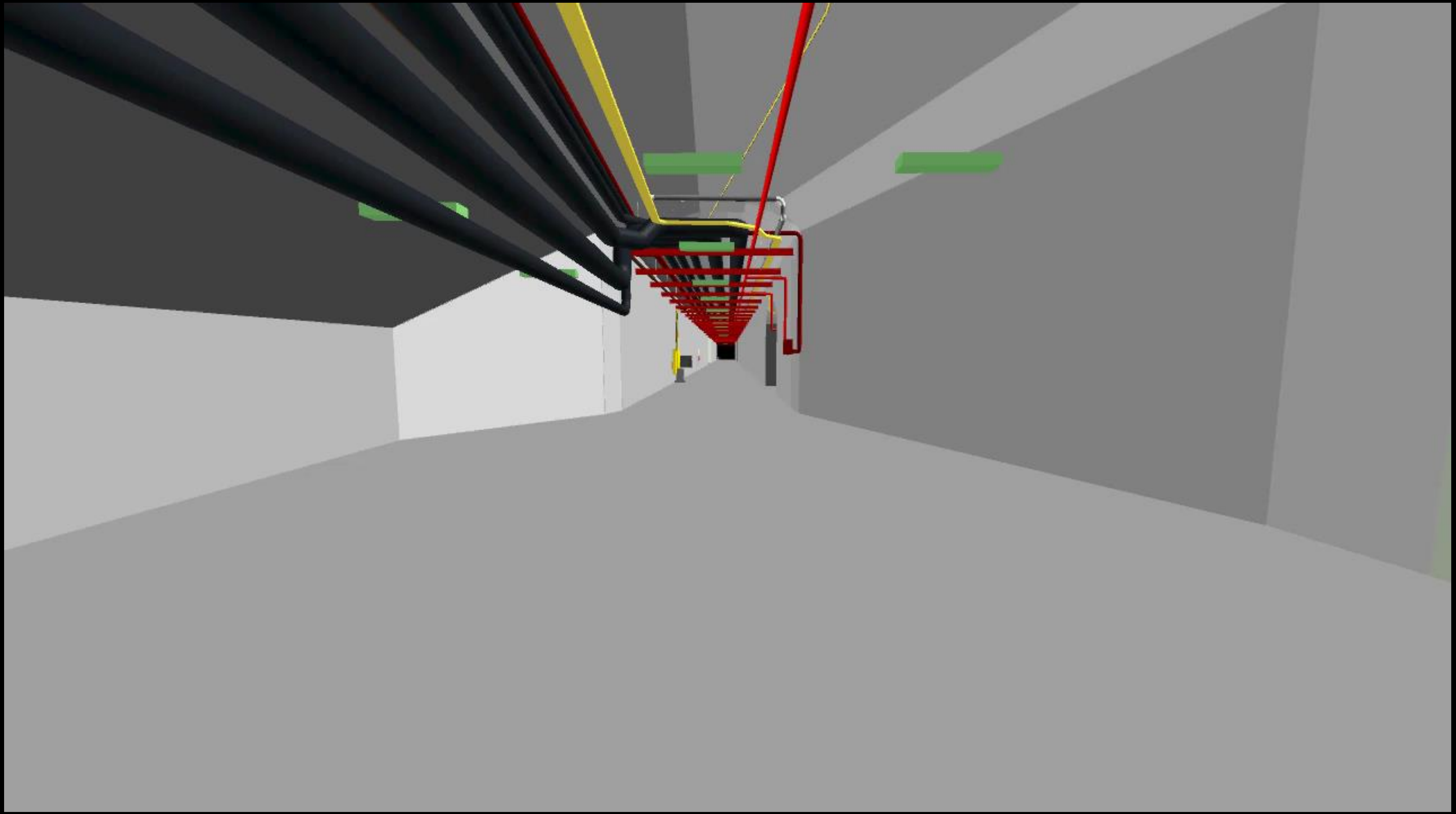
DUNE @ SURF


Yates Shaft
Ross Shaft
4850 Level (4300 mwe)

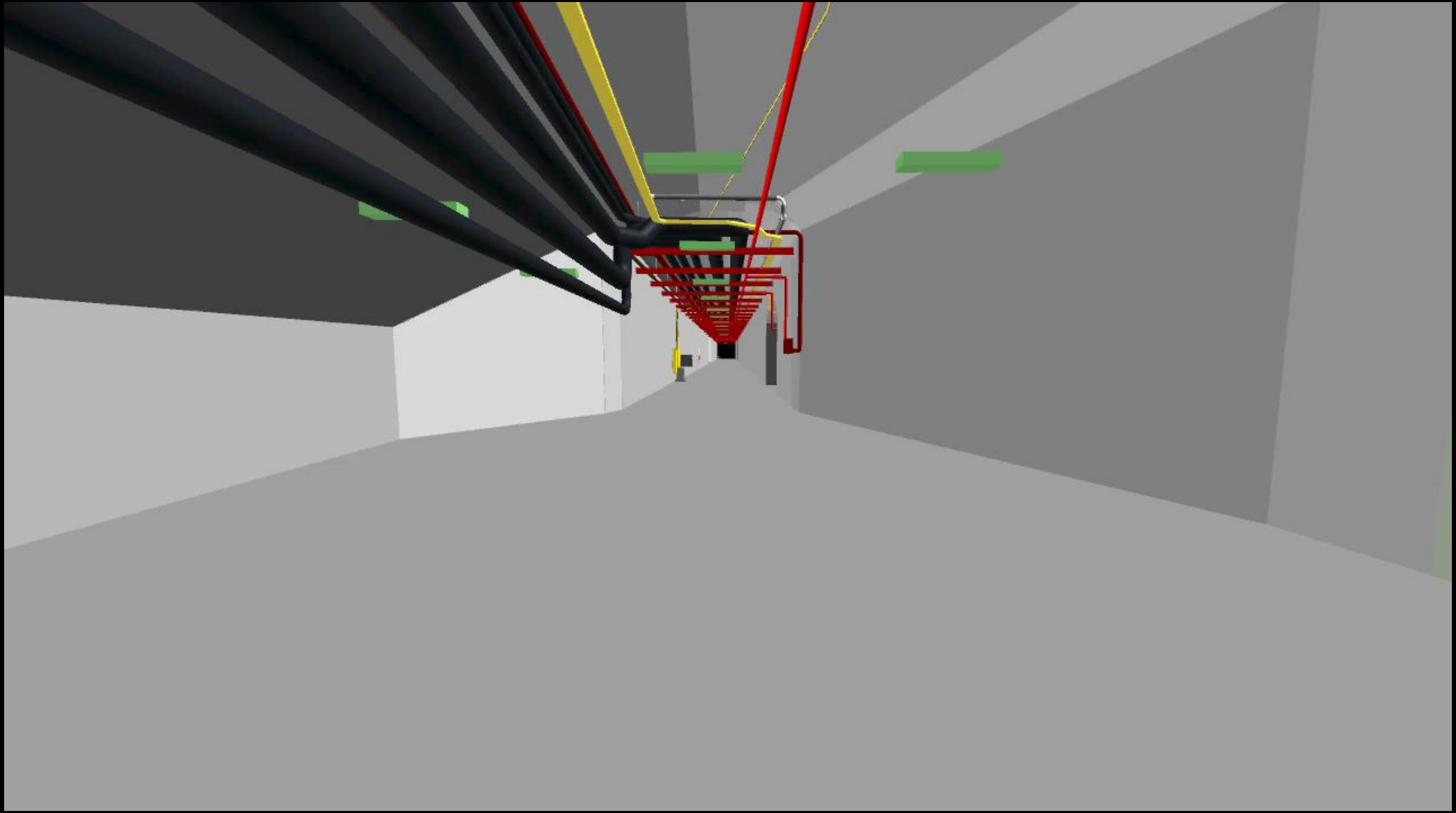

1500 m
400 m


1500 m
400 m

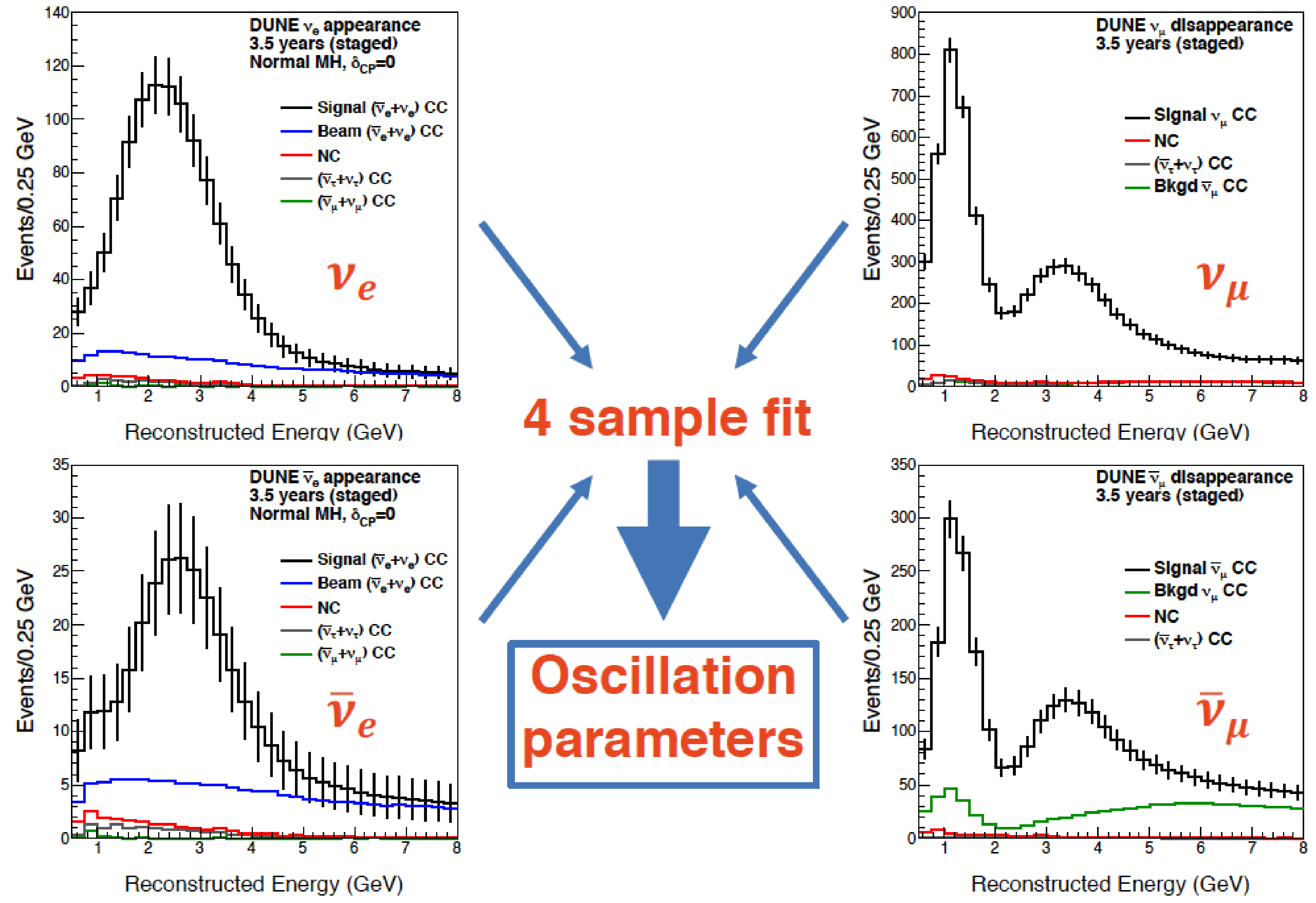
Spaziergang durchs Labor



Spaziergang durchs Labor



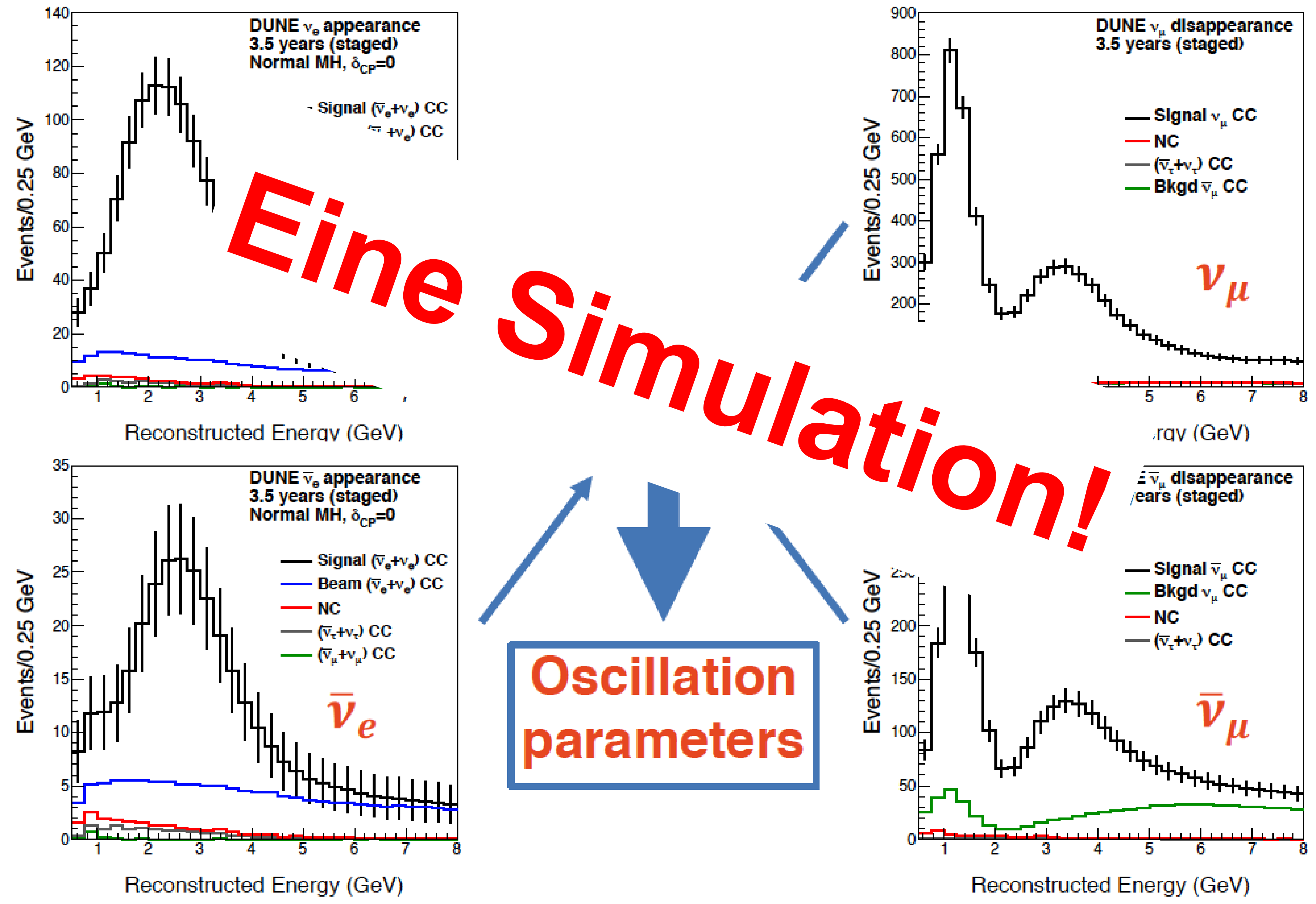
Messstrategie



4 sample fit

Oscillation parameters

Messstrategie



Eine Simulation!

Oscillation parameters

Ergebnis

Ergebnis

?

Sind Neutrinos der Grund unserer Existenz?

Ja!

Ja!

- Sie prägen die Struktur unseres Universums!

Ja!

- Sie prägen die Struktur unseres Universums!
- Die Kernfusion in der Sonne würde ohne Neutrinos nicht funktionieren!

Ja!

- Sie prägen die Struktur unseres Universums!
- Die Kernfusion in der Sonne würde ohne Neutrinos nicht funktionieren!
- Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung schwerer Elemente in Supernova-Explosionen!

Ja!

- Sie prägen die Struktur unseres Universums!
- Die Kernfusion in der Sonne würde ohne Neutrinos nicht funktionieren!
- Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung schwerer Elemente in Supernova-Explosionen!
- Vielleicht liefern sie einen Hinweis warum es im Universum fast nur Materie gibt.

The End

“This discovery may not mean much to most of us... the larger issue is that these kind of findings have implications that are not limited to the laboratory. They affect the whole of society — not only our economy, but our very view of life, our understanding of our relations with others, and our place in time.”

(Bill Clinton on SK)

Warum bemerken wir sie nicht?

Neutrinos sind praktisch Geister, die nur SEHR SCHWACH mit Materie wechselwirken

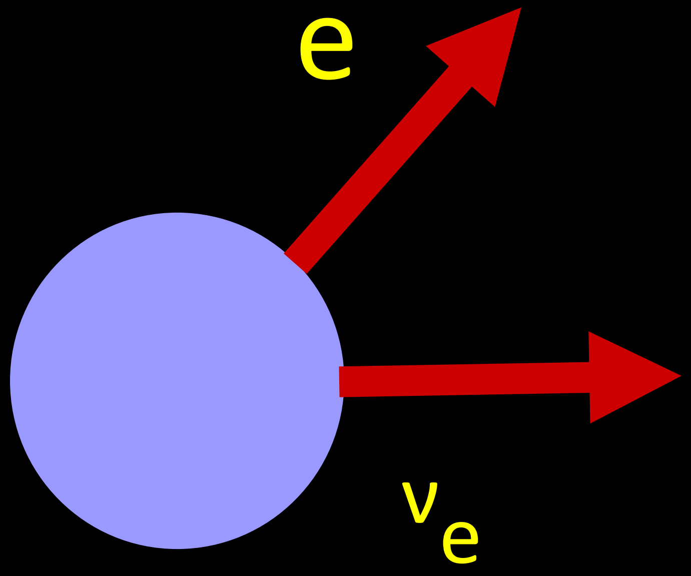
Für ein Neutrino ist die Erde praktisch nicht vorhanden.

Fred Reines: *Das kleinste Quantum der Realität, das jemals von einem Menschen ersonnen wurde.*

?????????????

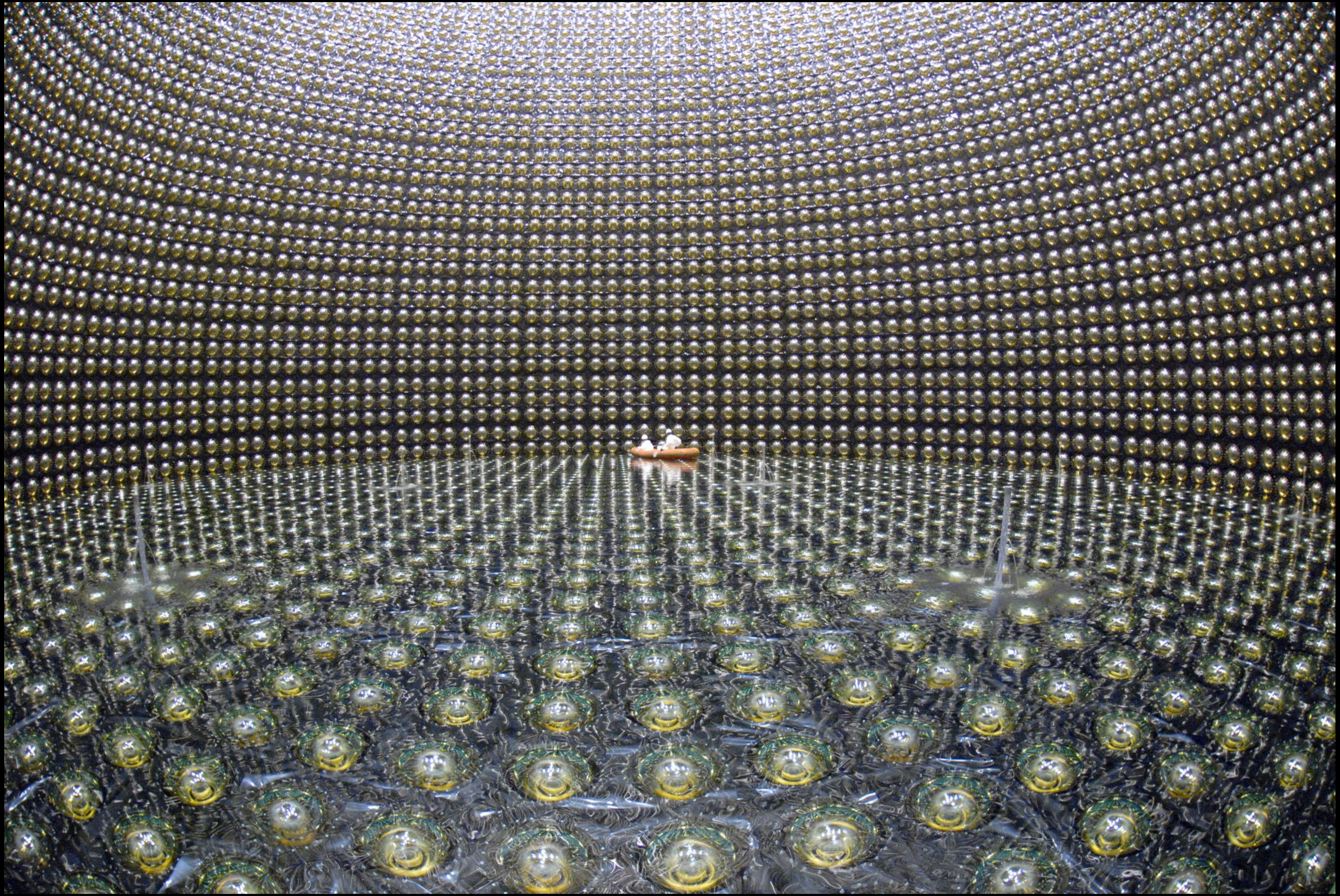
Q. How can a ν_e spontaneously turn into a ν_μ?

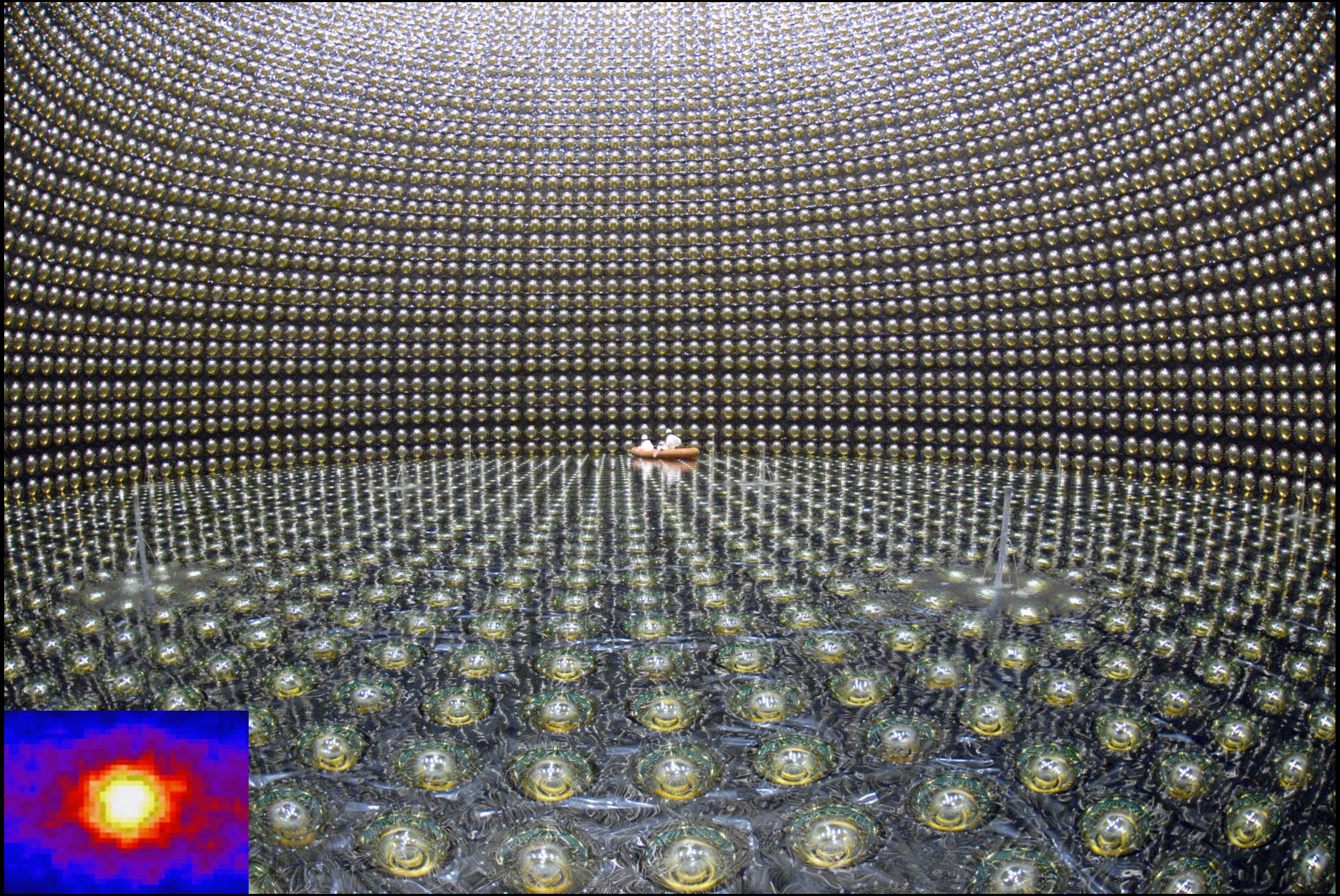
A. The ν_e isn't *a* particle. It's three!



$\nu_e \equiv$ "that thing which was always produced/detected with an electron"

Der SuperKamiokande-Detektor



Der SuperKamiokande-Detektor