

Unfassbare Neutrinos

Die Vermessung der Geisterteilchen von tief unter der Erde bis an den Südpol

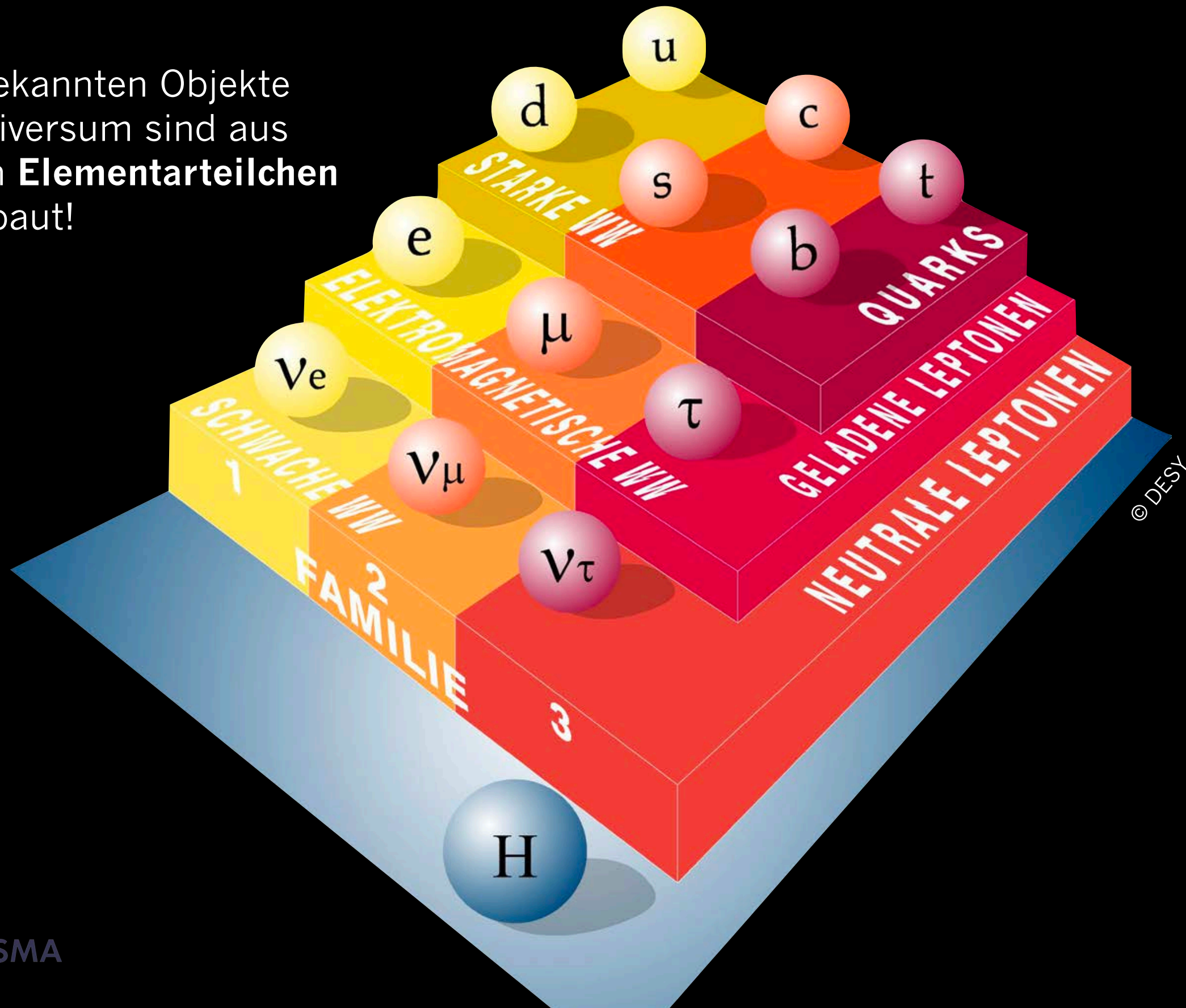
Prof. Dr. Michael Wurm

Prof. Dr. Sebastian Böser

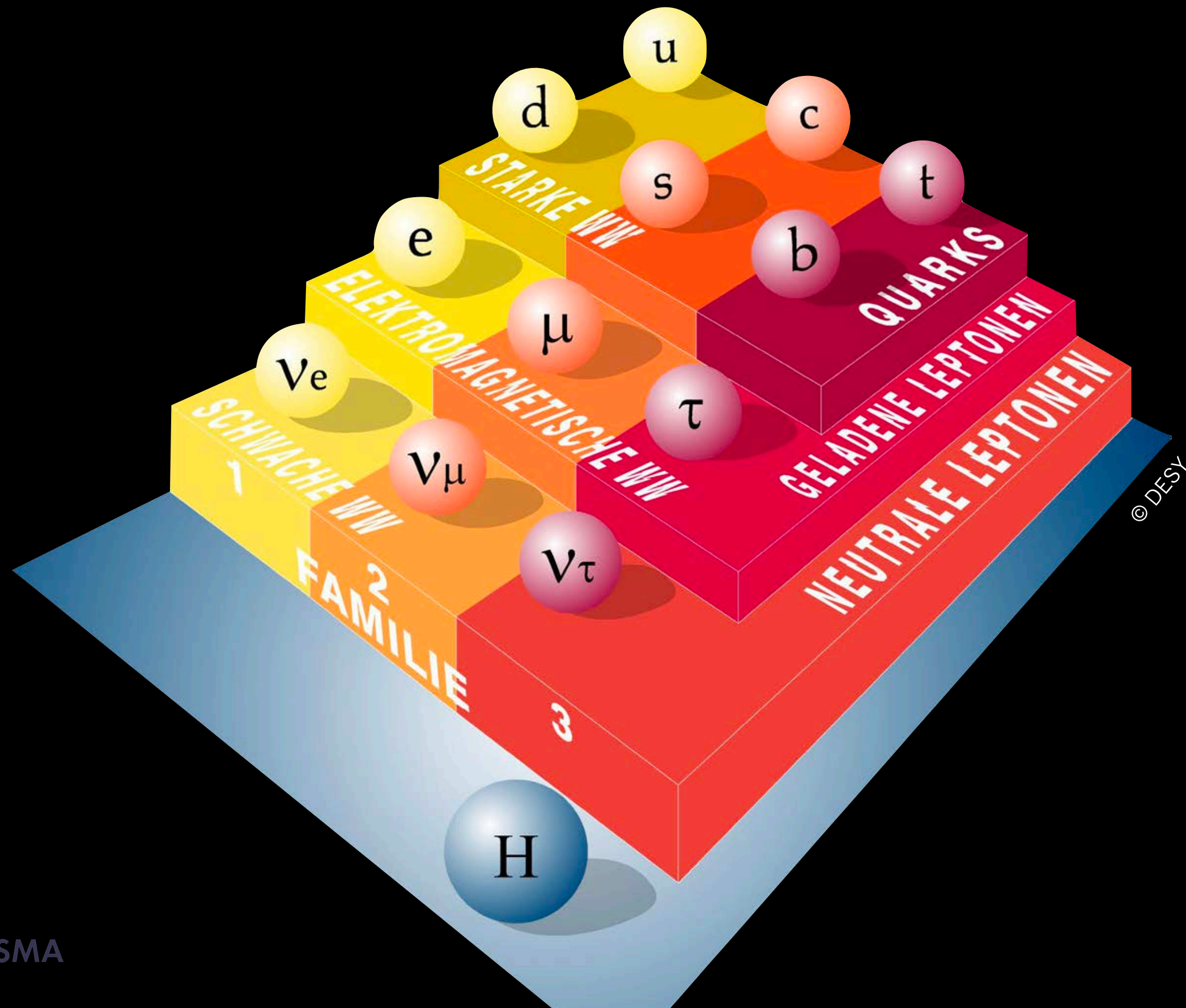
Bachelorseminar | Mainz | 04. Mai 2022

Standardmodell der Teilchenphysik

Alle bekannten Objekte im Universum sind aus diesen **Elementarteilchen** aufgebaut!

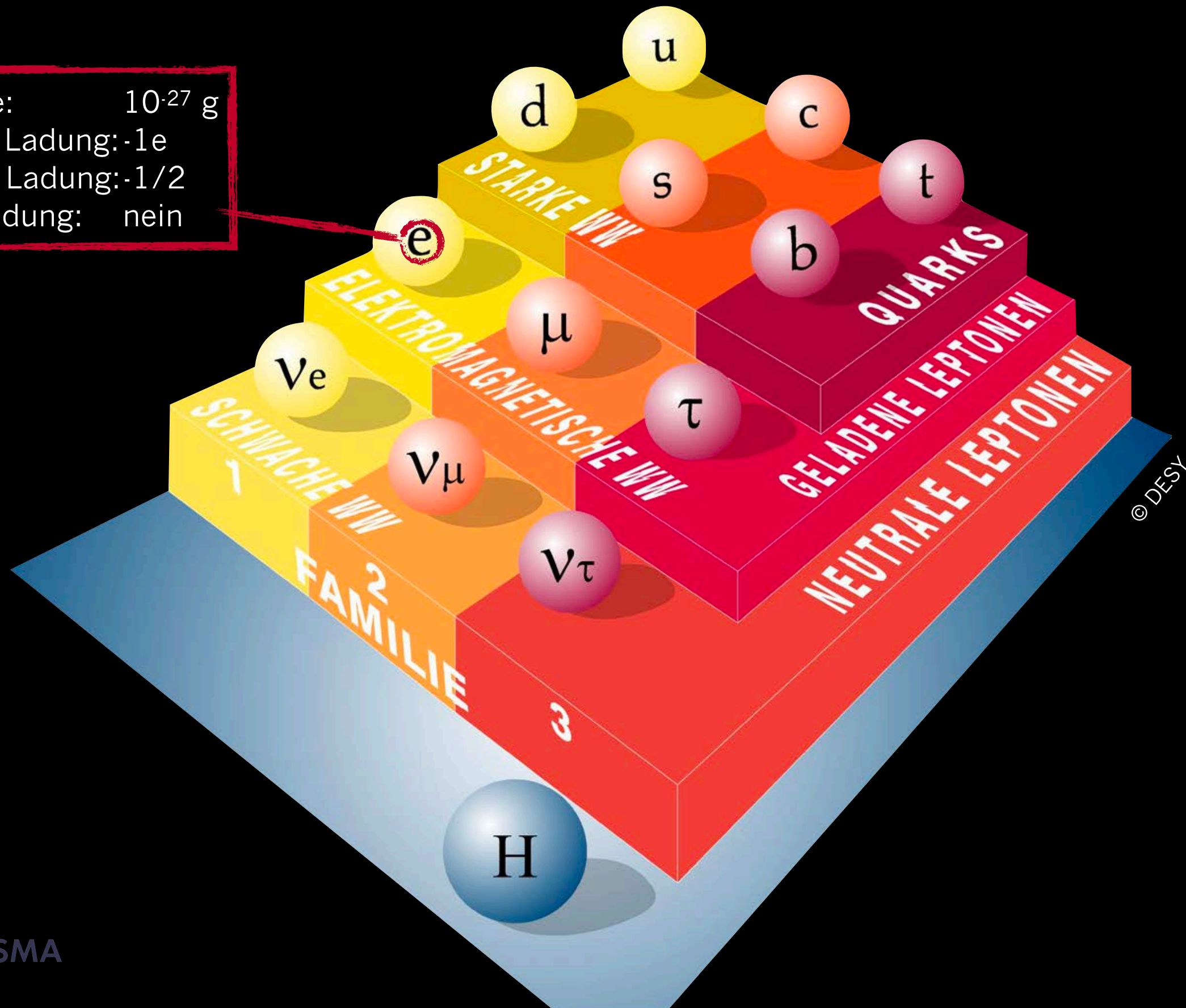


Standardmodell der Teilchenphysik

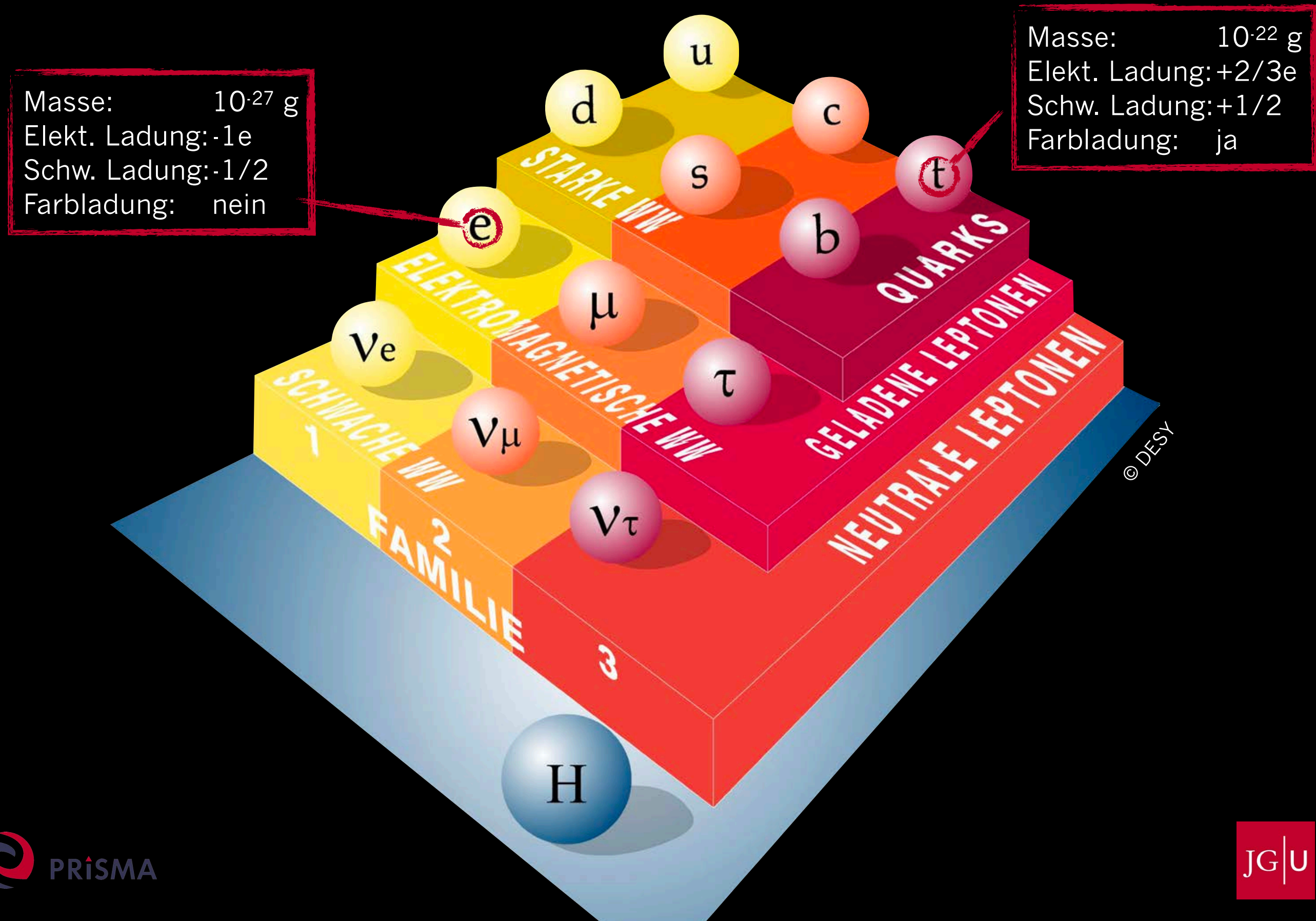


Standardmodell der Teilchenphysik

Masse: 10^{-27} g
Elekt. Ladung: $-1e$
Schw. Ladung: $-1/2$
Farbladung: nein



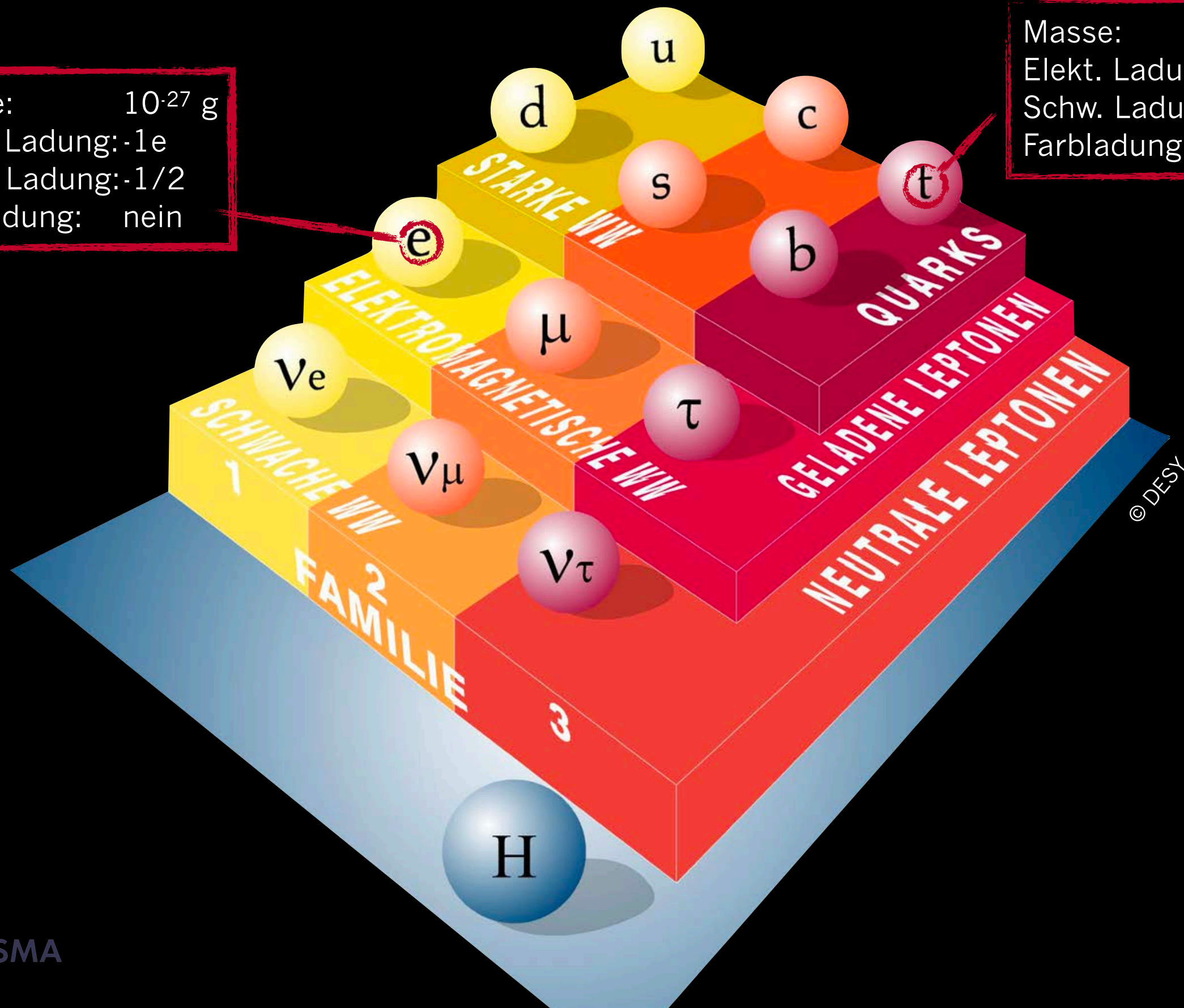
Standardmodell der Teilchenphysik



Standardmodell der Teilchenphysik

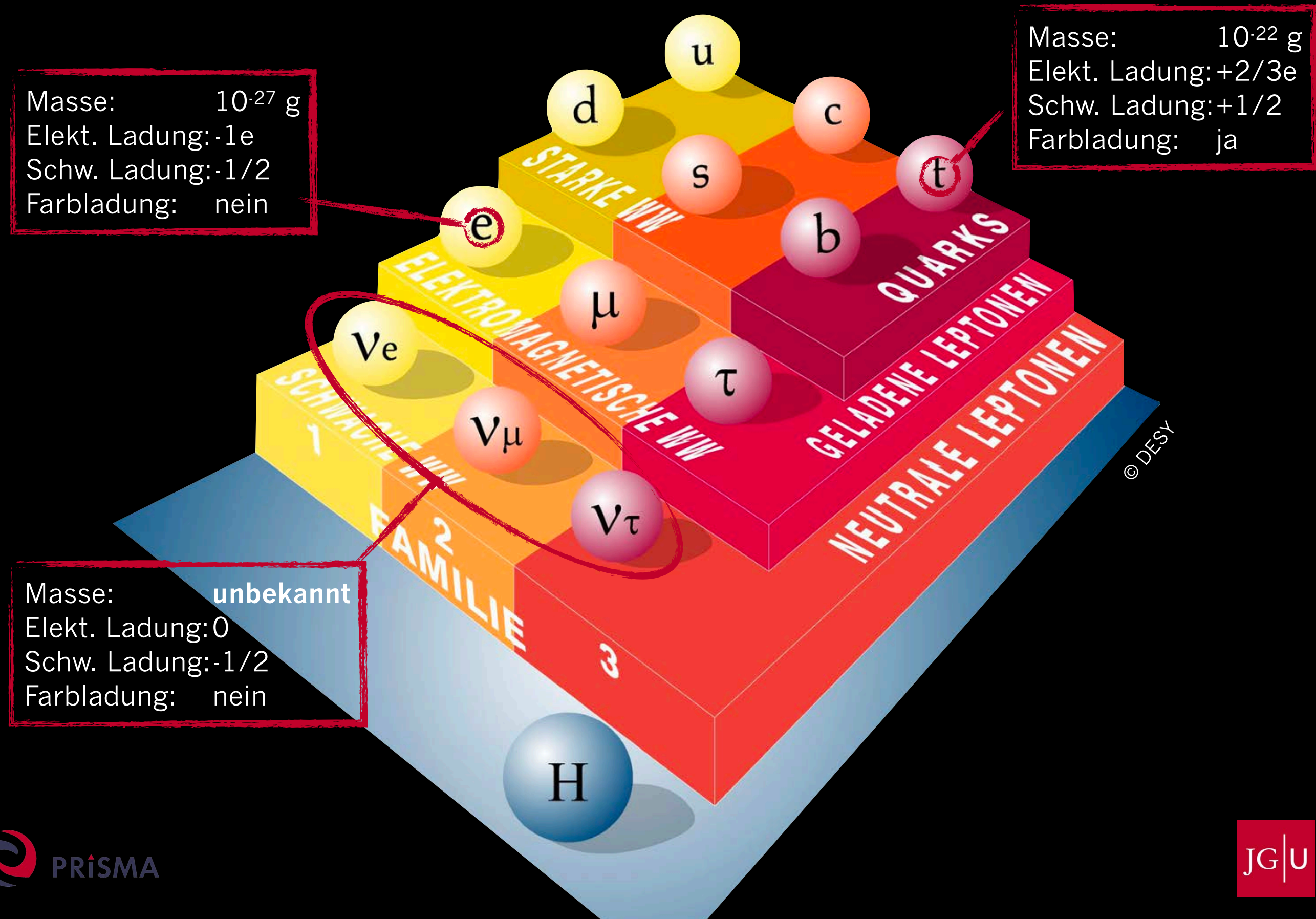
Masse: 10^{-27} g
Elekt. Ladung: $-1e$
Schw. Ladung: $-1/2$
Farbladung: nein

Masse: 10^{-22} g
Elekt. Ladung: $+2/3e$
Schw. Ladung: $+1/2$
Farbladung: ja



© DESY

Standardmodell der Teilchenphysik



Massen und Waagen

Containerschiff



200.000.000 kg
(+ Eigengewicht)

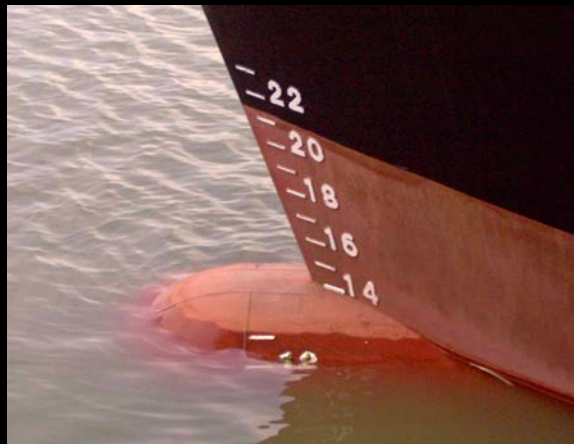


Massen und Waagen

Containerschiff



200.000.000 kg
(+ Eigengewicht)



Mensch



80 kg
(+Weihnachten)



Massen und Waagen

Containerschiff



200.000.000 kg
(+ Eigengewicht)



Mensch



80 kg
(+Weihnachten)



Pollen



$1\mu\text{g} = 10^{-6} \text{ kg}$

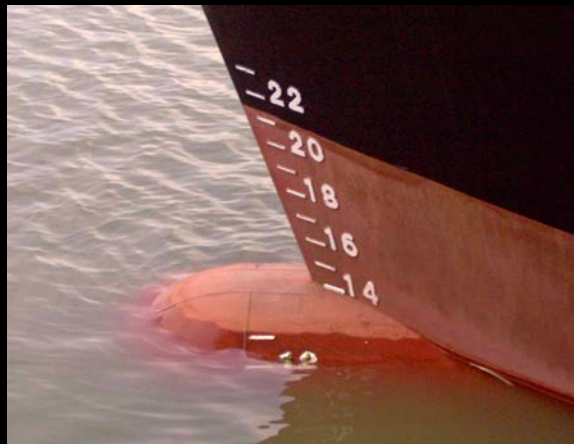


Massen und Waagen

Containerschiff



200.000.000 kg
(+ Eigengewicht)



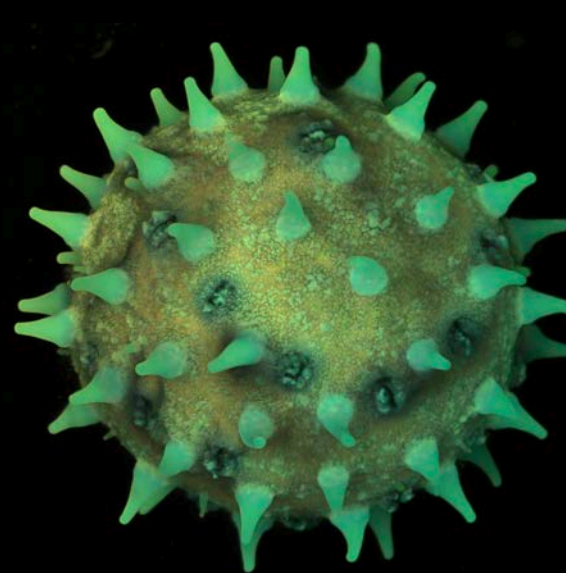
Mensch



80 kg
(+Weihnachten)



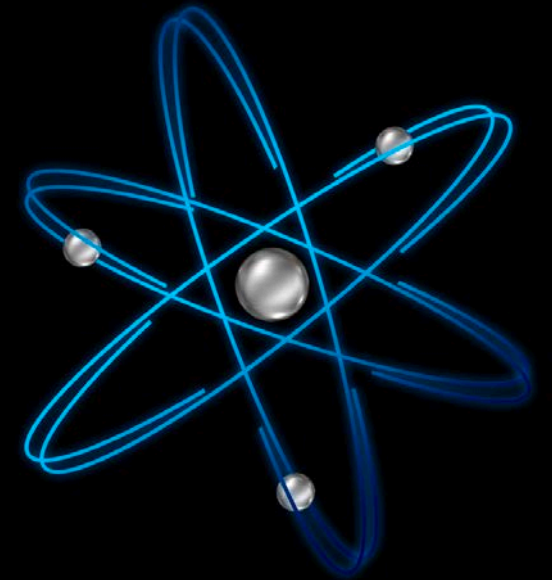
Pollen



$1\mu\text{g} = 10^{-6} \text{ kg}$



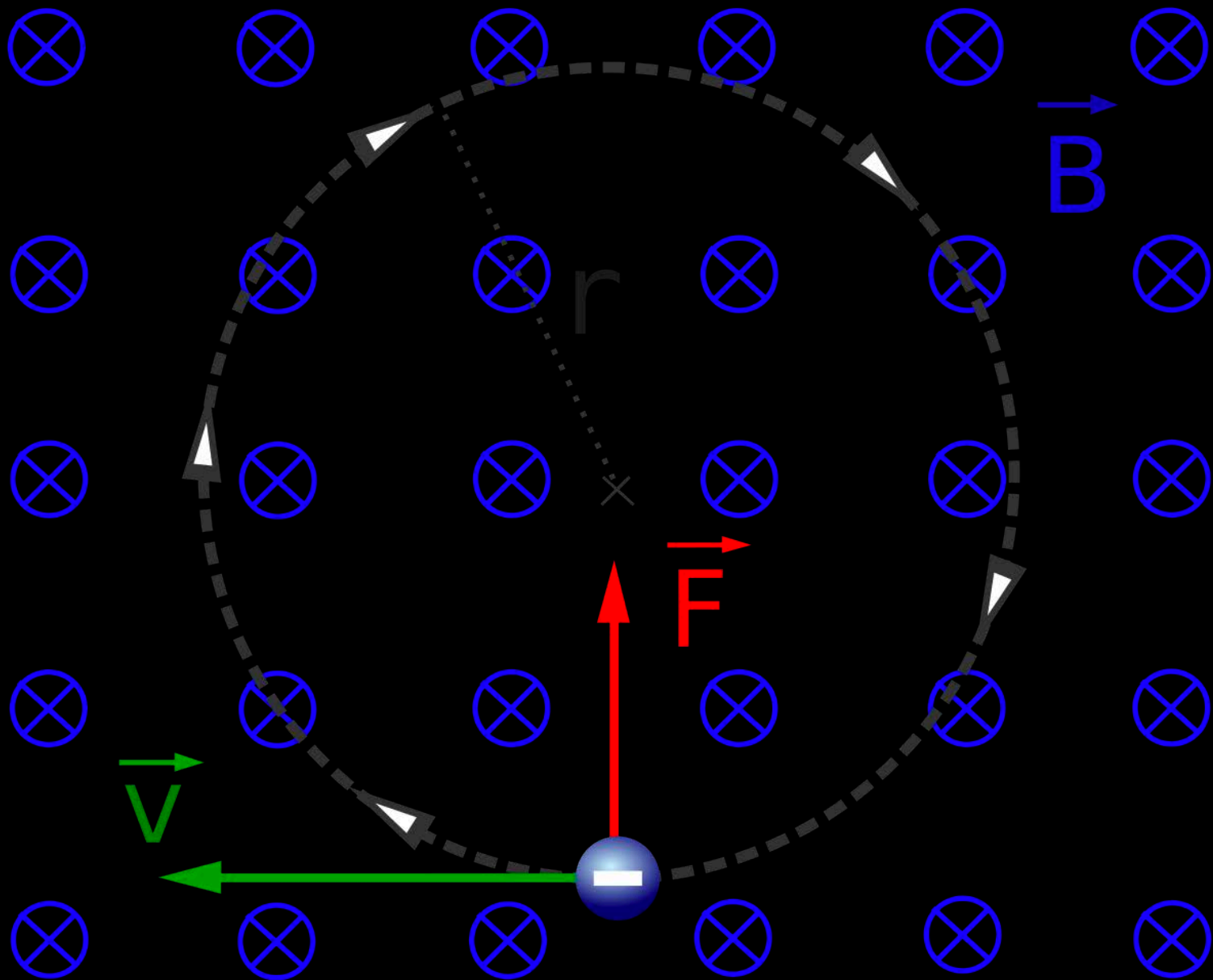
Atom



$\sim 10^{-21} \mu\text{g}$



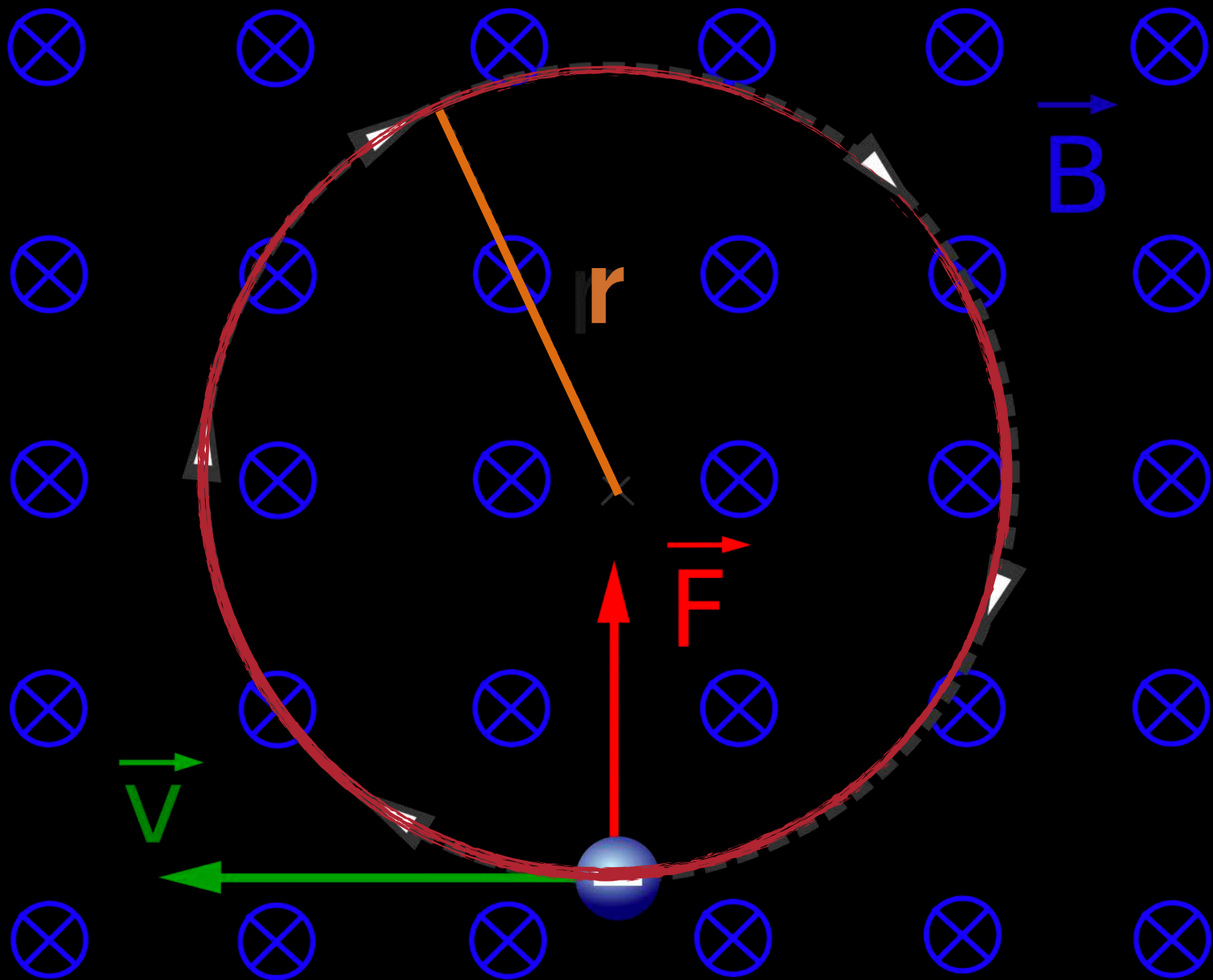
Gyro-Radius



Lorentzkraft = Zentripetalkraft

$$qv_{\perp}B = \frac{mv^2}{r}$$

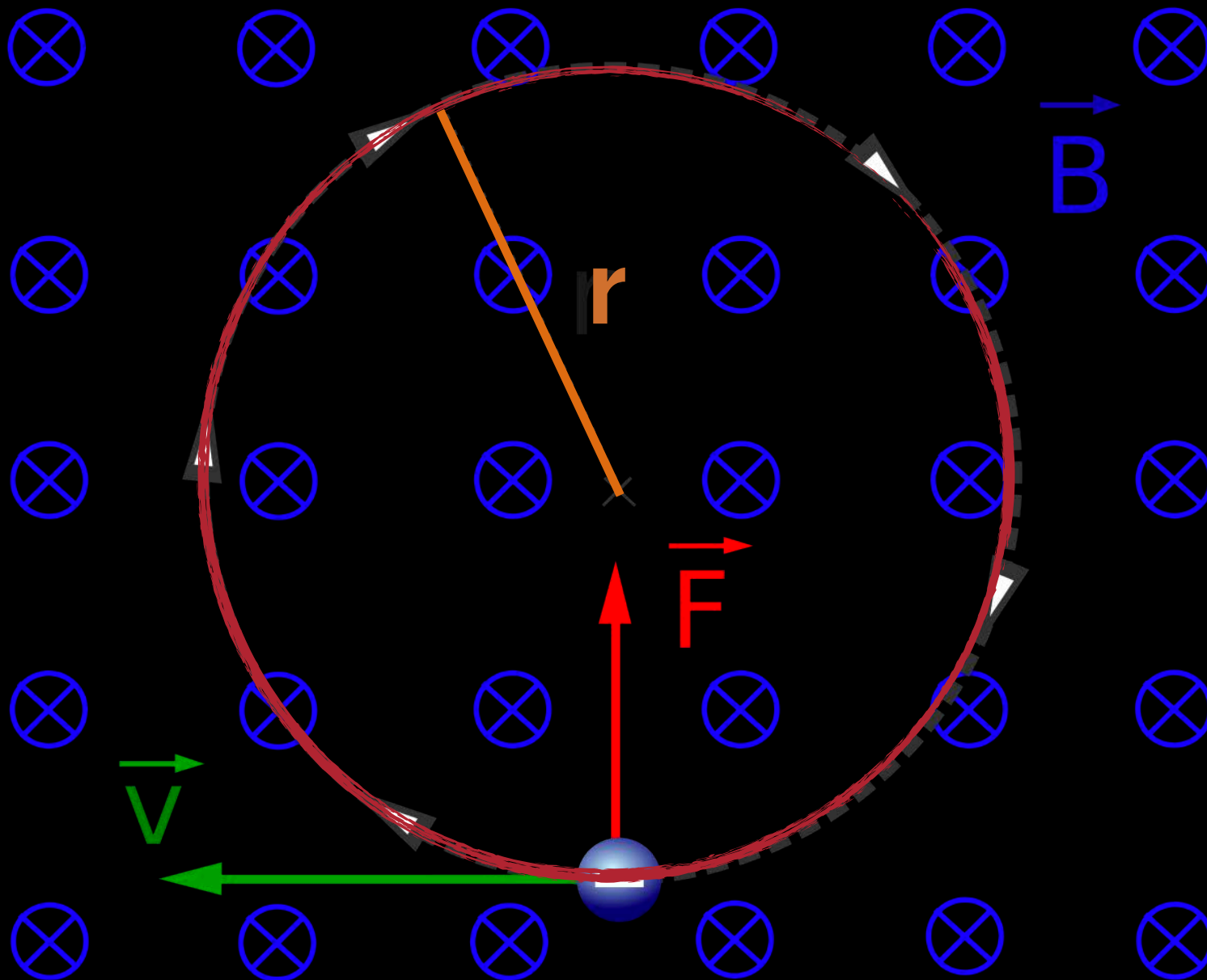
Gyro-Radius



Lorentzkraft = Zentripetalkraft

$$qv_{\perp}B = \frac{mv^2}{r}$$

Gyro-Radius



Lorentzkraft = Zentripetalkraft

$$qv_{\perp}B = \frac{mv^2}{r}$$

Ladung:

■ Elementarladung

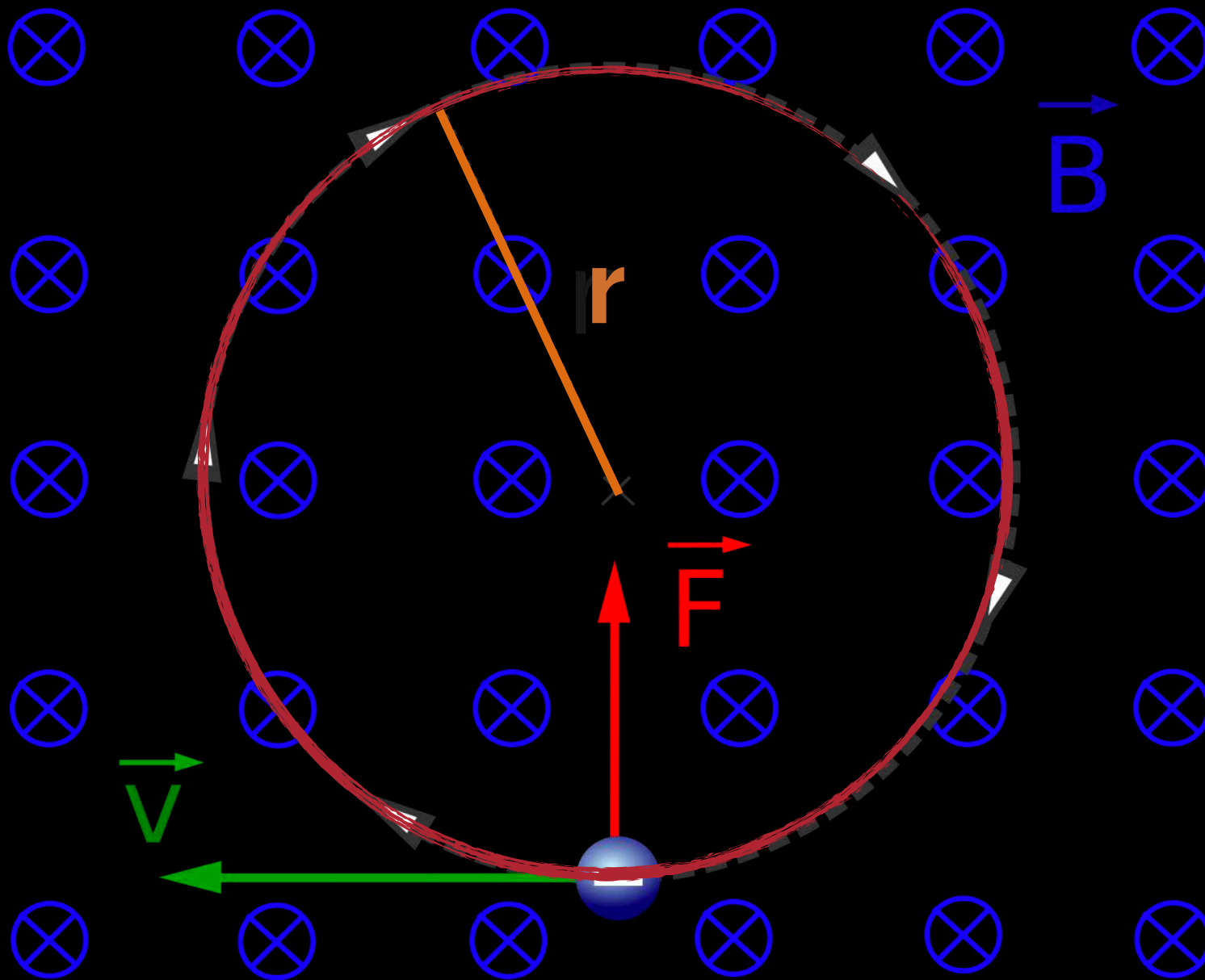
► $q = e$

Geschwindigkeit

■ sehr, sehr hoch

► $v = c$

Gyro-Radius



Lorentzkraft = Zentripetalkraft

$$qv_{\perp}B = \frac{mv^2}{r}$$

Ladung:

■ Elementarladung

► $q = e$

Geschwindigkeit

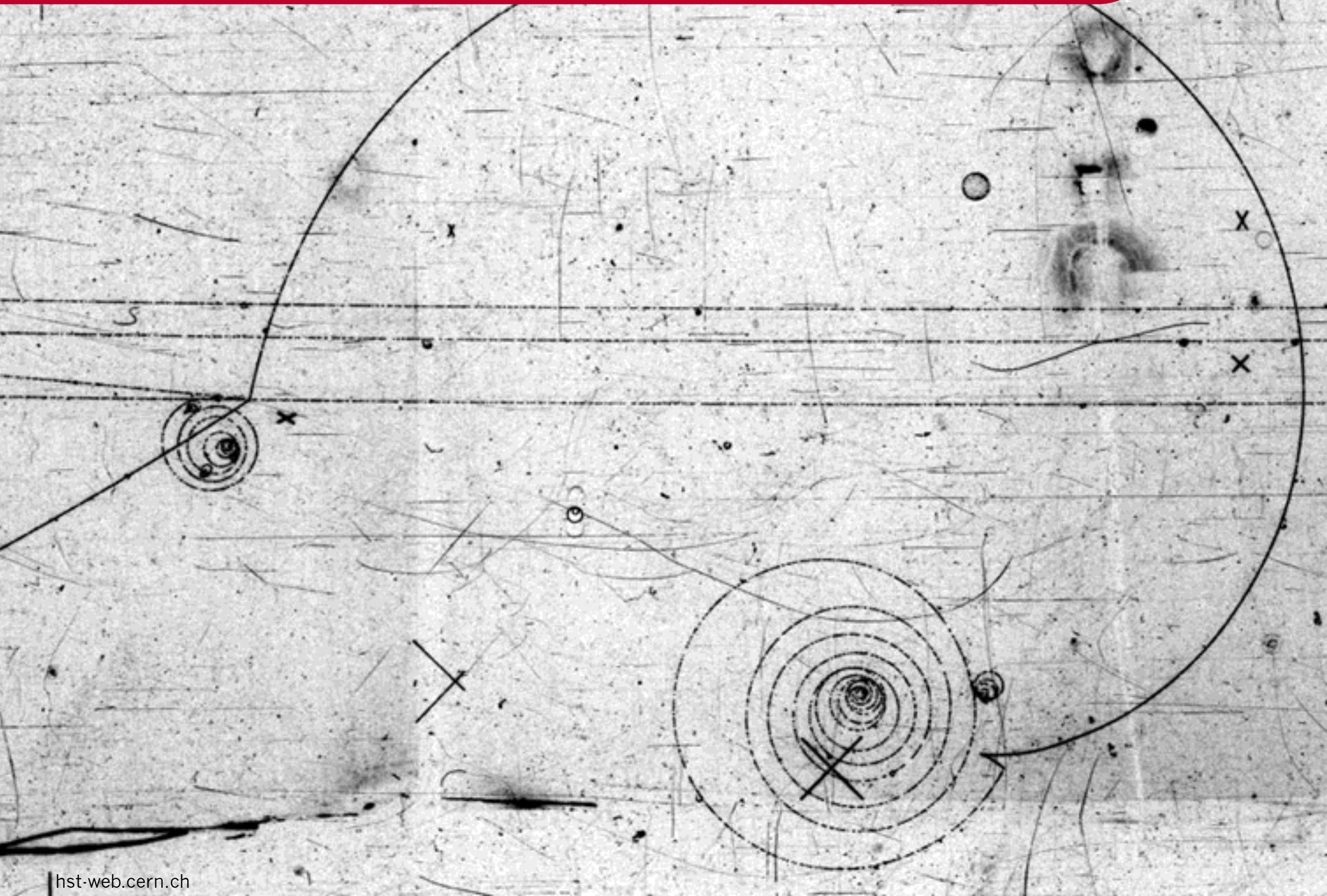
■ sehr, sehr hoch

► $v = c$

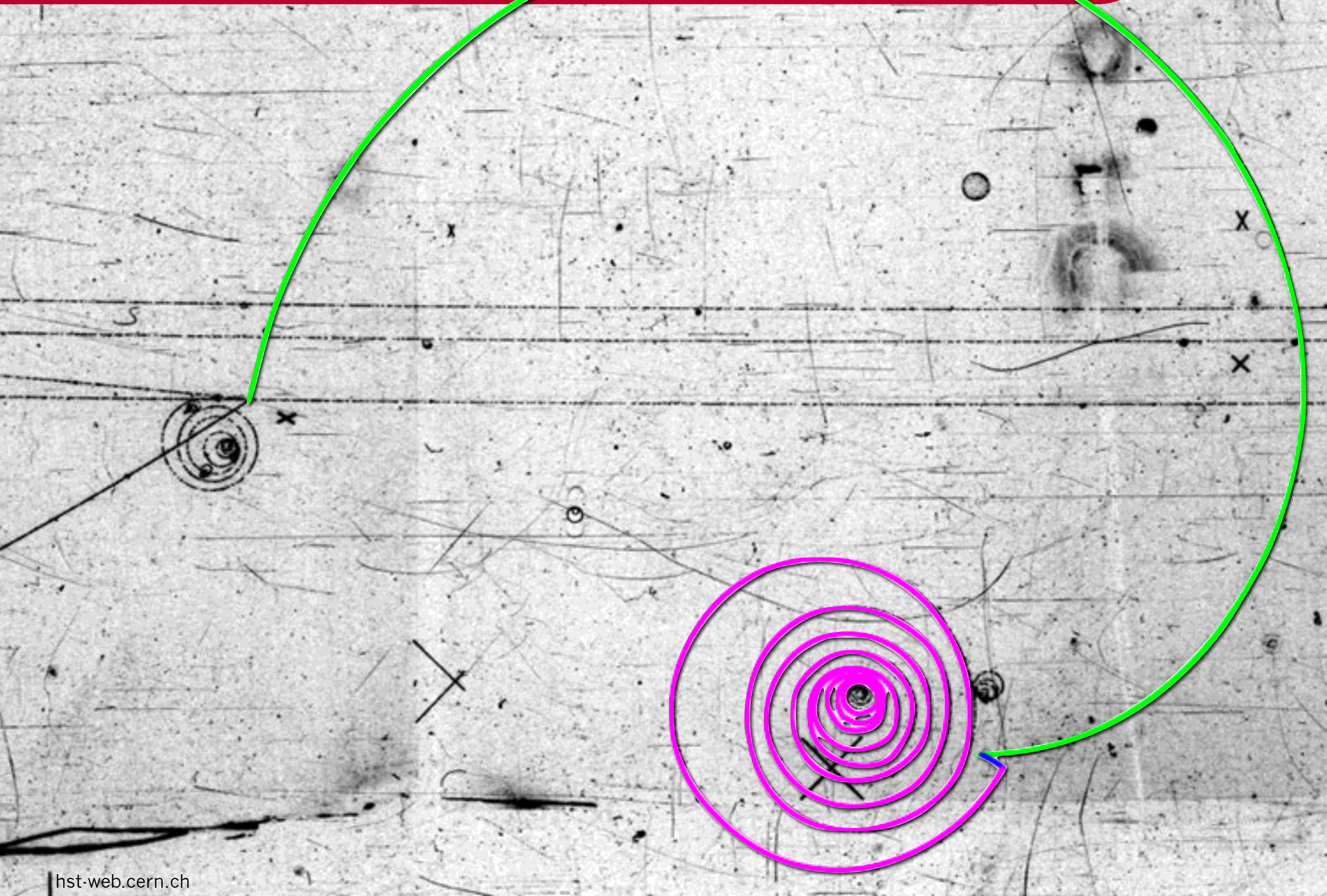
Massenbestimmung

$$m = \frac{r \cdot c}{eB}$$

Blasenkammer ('60er)

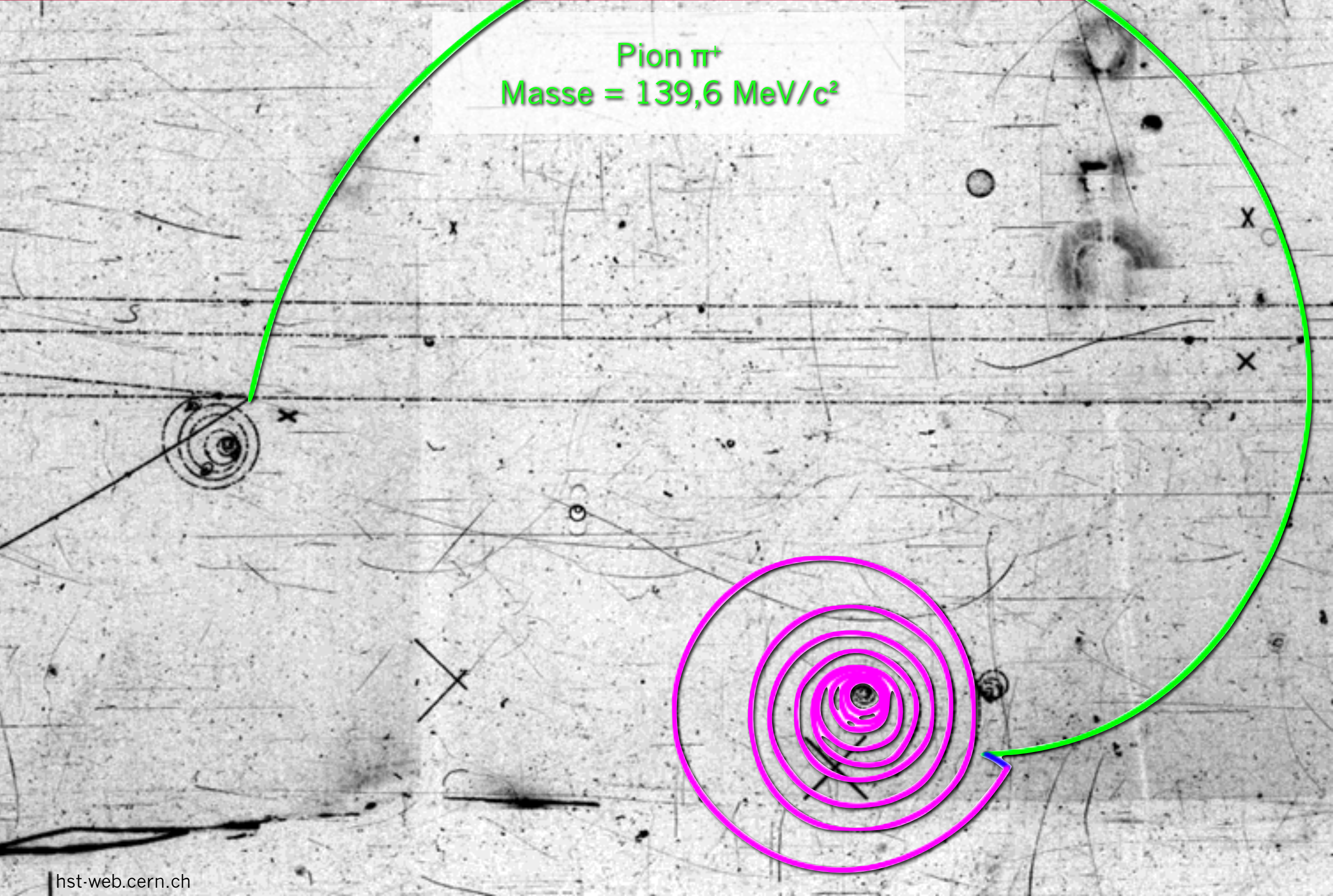


Blasenkammer ('60er)



Blasenkammer ('60er)

Pion π^+
Masse = 139,6 MeV/c²



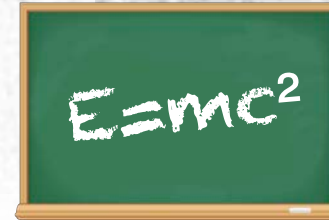
Blasenkammer ('60er)

Pion π^+
Masse = 139,6 MeV/c²
= 2.49 · 10⁻²⁸ kg



Blasenkammer ('60er)

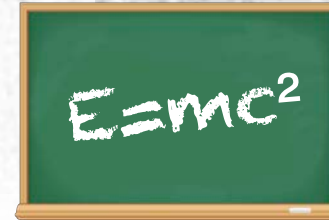
Pion π^+
Masse = $139,6 \text{ MeV}/c^2$
 $= 2.49 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$



Anti-Myon μ^+
Masse = $105,6 \text{ MeV}/c^2$

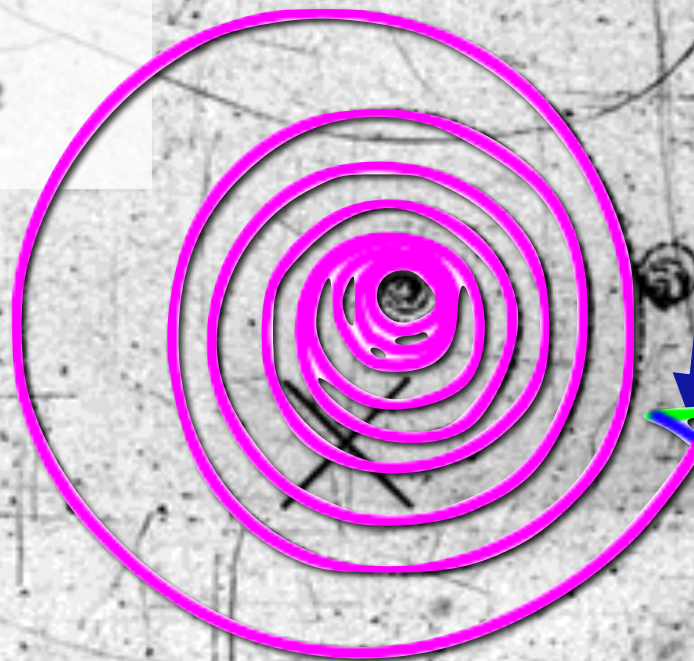
Blasenkammer ('60er)

Pion π^+
Masse = $139,6 \text{ MeV}/c^2$
 $= 2.49 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$



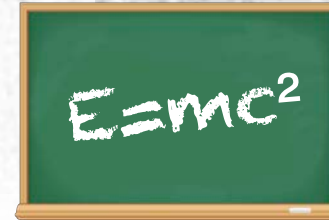
Anti-Myon μ^+
Masse = $105,6 \text{ MeV}/c^2$

Positron e^+
Masse = $0,511 \text{ MeV}/c^2$



Blasenkammer ('60er)

Pion π^+
Masse = $139,6 \text{ MeV}/c^2$
 $= 2.49 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$



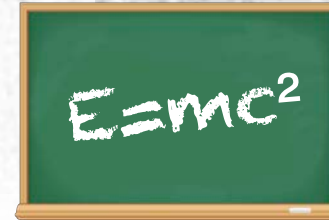
Anti-Myon μ^+
Masse = $105,6 \text{ MeV}/c^2$

Positron e^+
Masse = $0,511 \text{ MeV}/c^2$

Myon-Neutrino ν_μ

Blasenkammer ('60er)

Pion π^+
Masse = $139,6 \text{ MeV}/c^2$
 $= 2.49 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$



Anti-Myon μ^+
Masse = $105,6 \text{ MeV}/c^2$

Positron e^+
Masse = $0,511 \text{ MeV}/c^2$

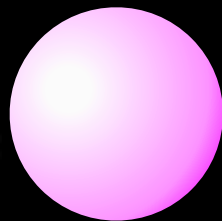
Myon-Neutrino ν_μ

Elektron-
Neutrino ν_e

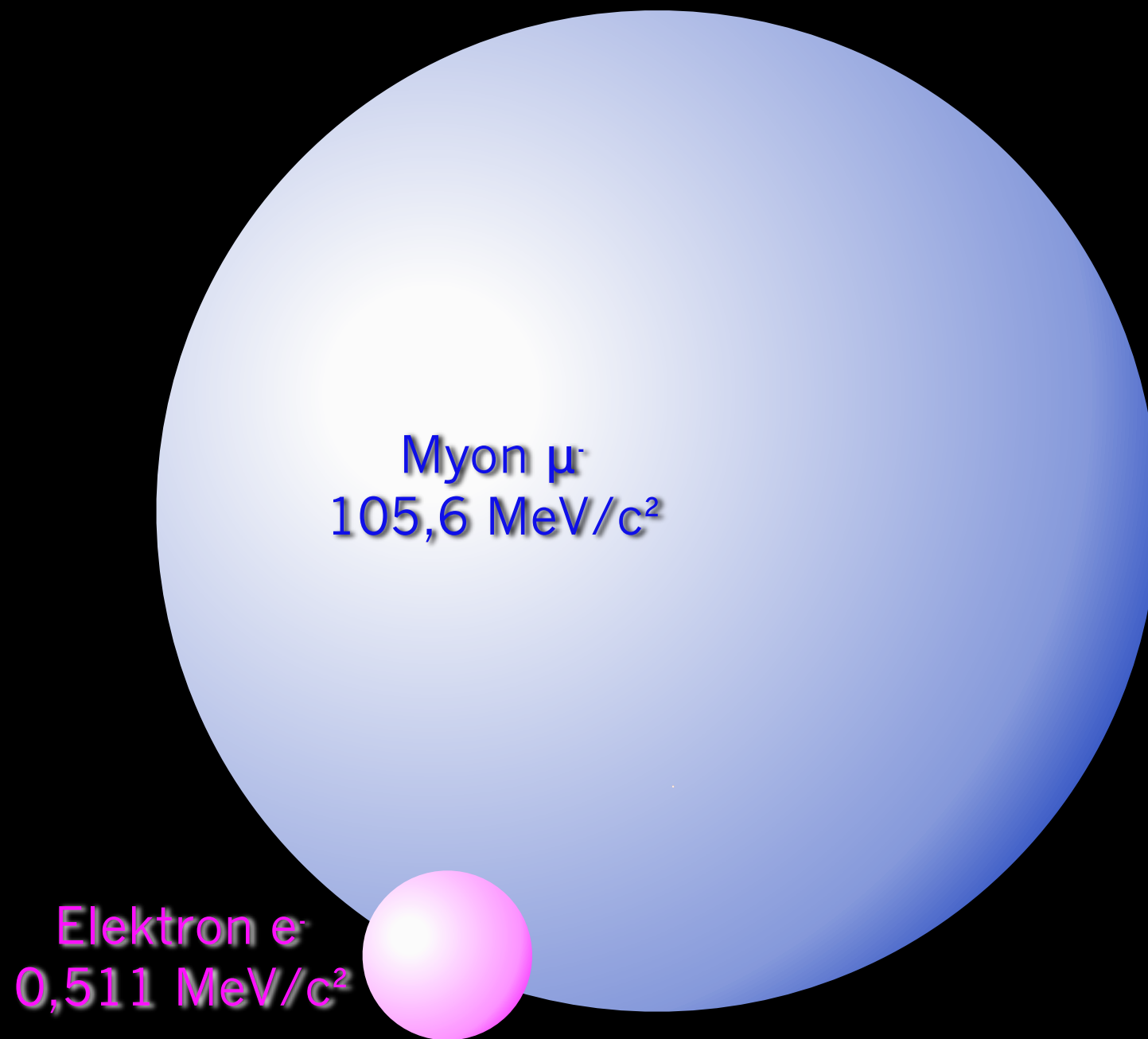
Anti-Myon-Neutrino $\bar{\nu}_\mu$

Teilchenmassen im Vergleich

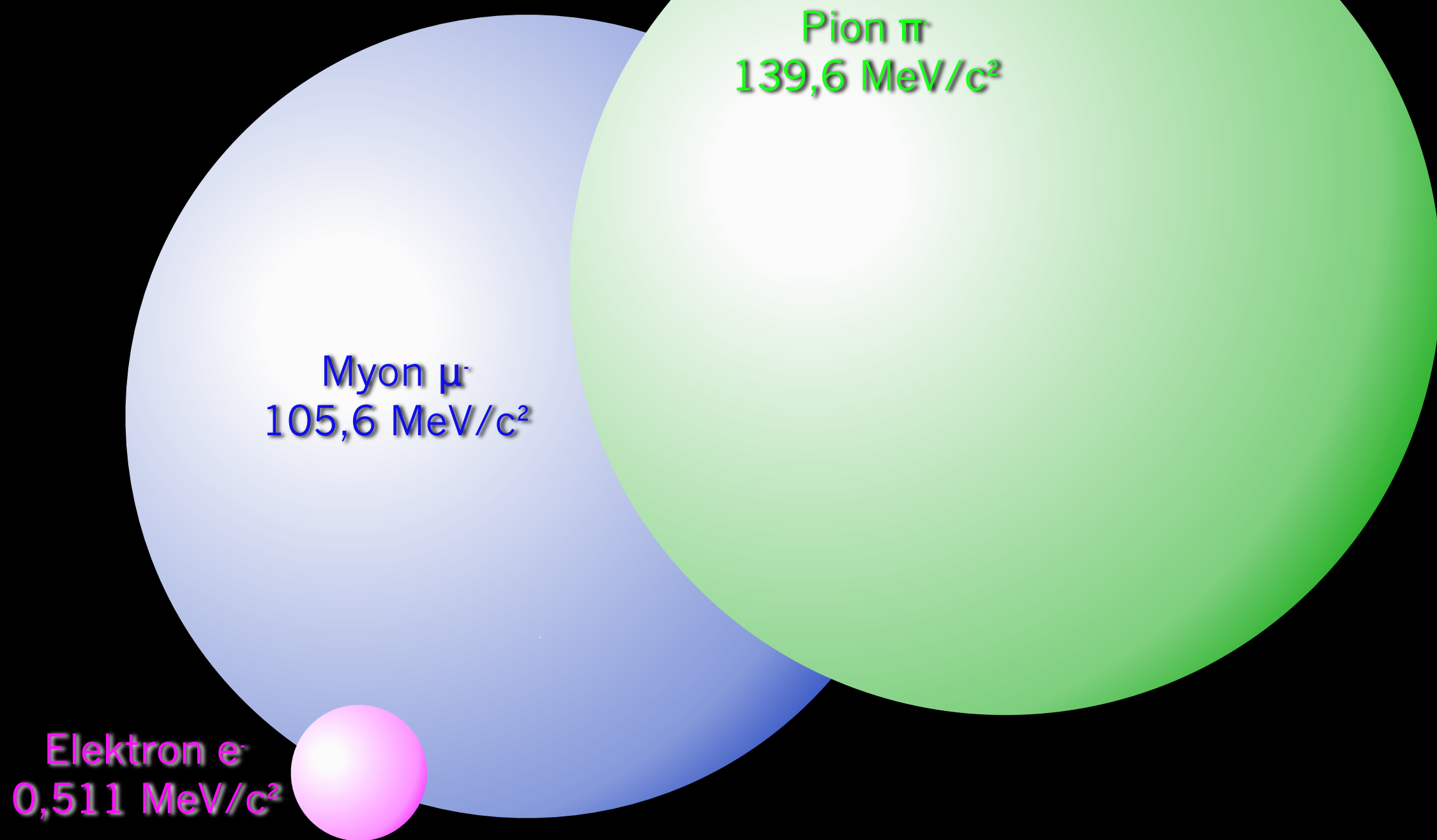
Elektron e^-
 $0,511 \text{ MeV}/c^2$



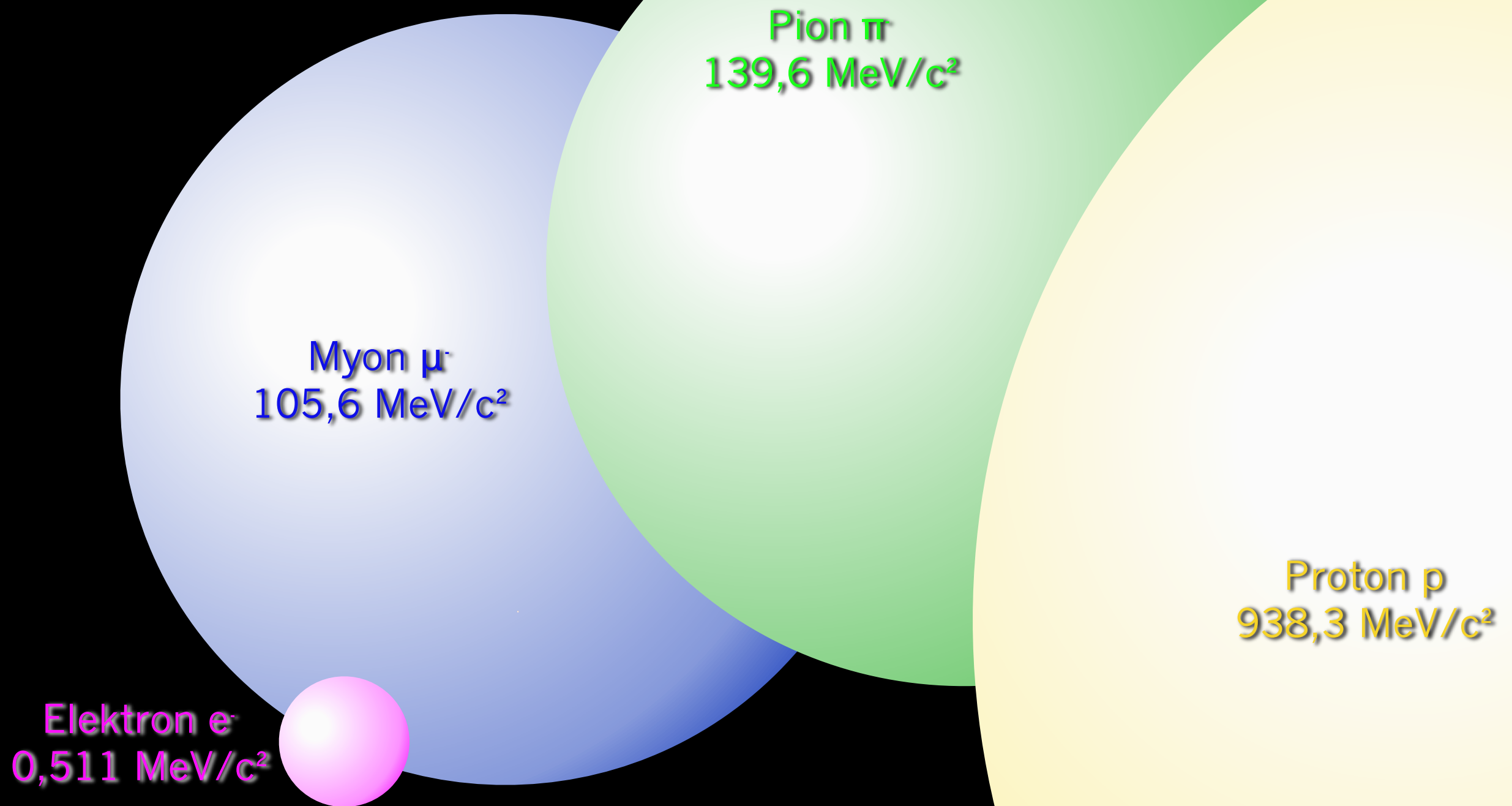
Teilchenmassen im Vergleich



Teilchenmassen im Vergleich



Teilchenmassen im Vergleich



Teilchenmassen im Vergleich

Pion π
139,6 MeV/c²

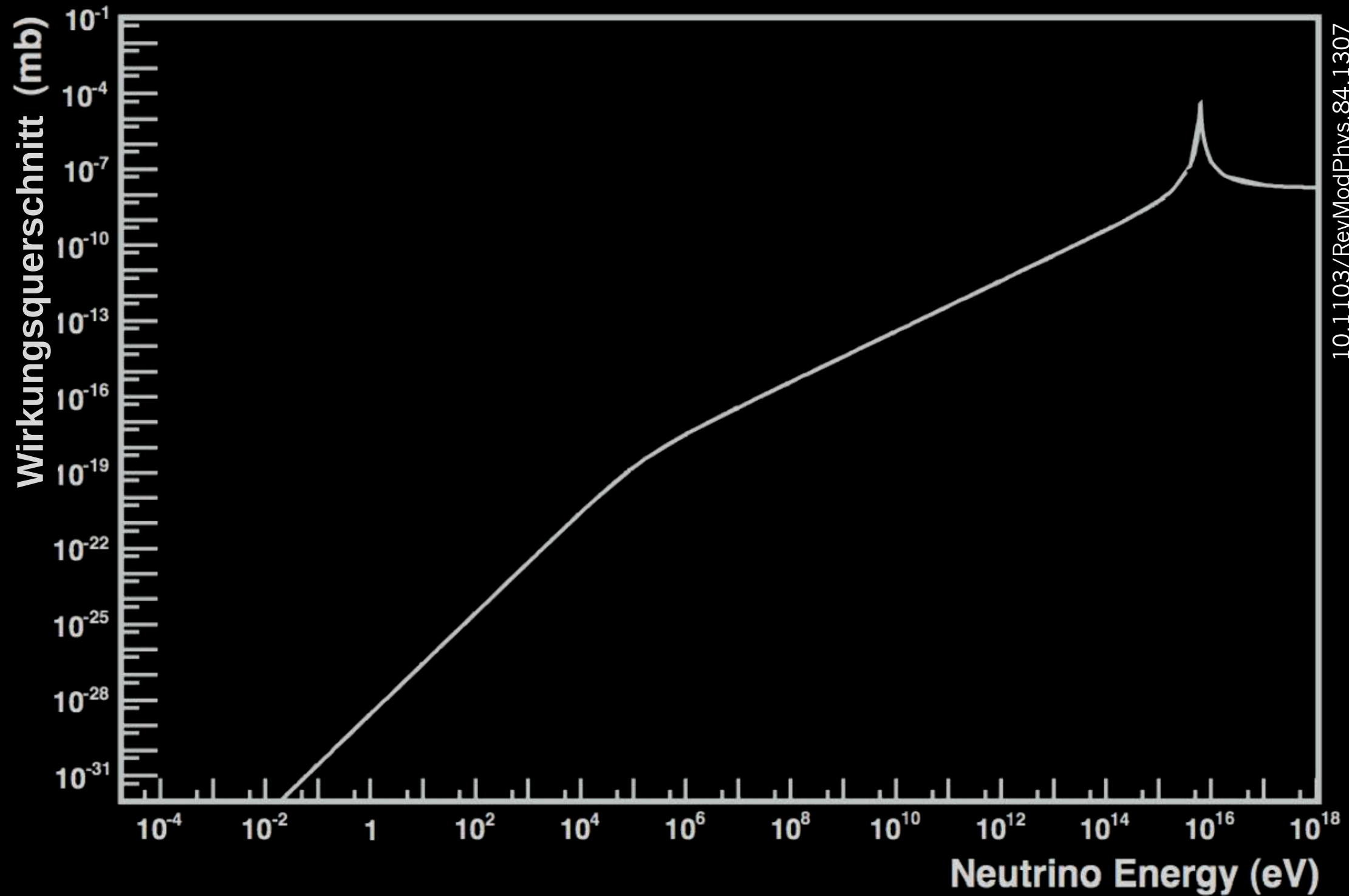
Myon μ
105,6 MeV/c²

Elektron e^-
0,511 MeV/c²

Elektron-Neutrino
< 0.000001 MeV/c²

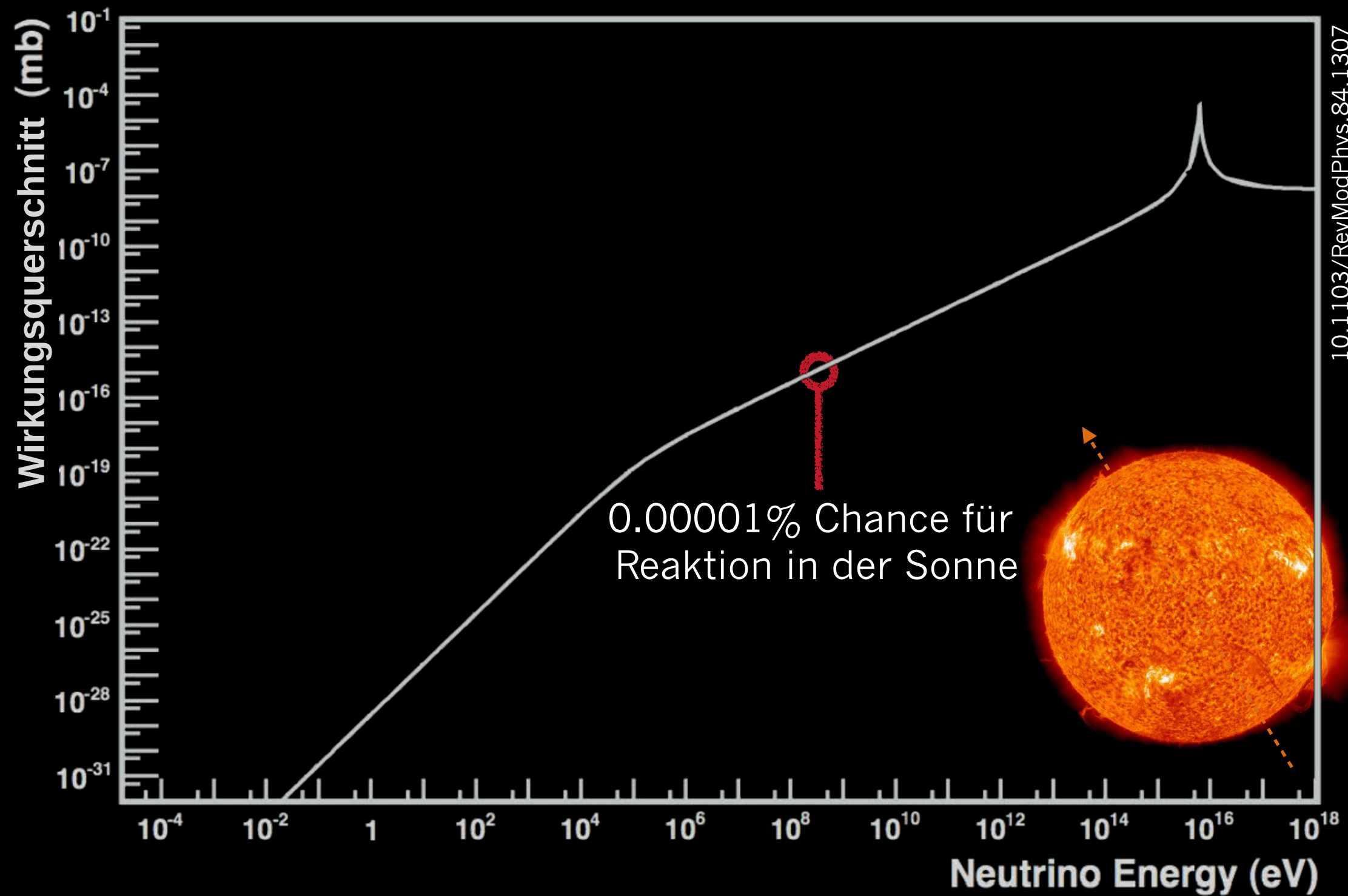
Proton p
938,3 MeV/c²

Unfassbare Neutrinos



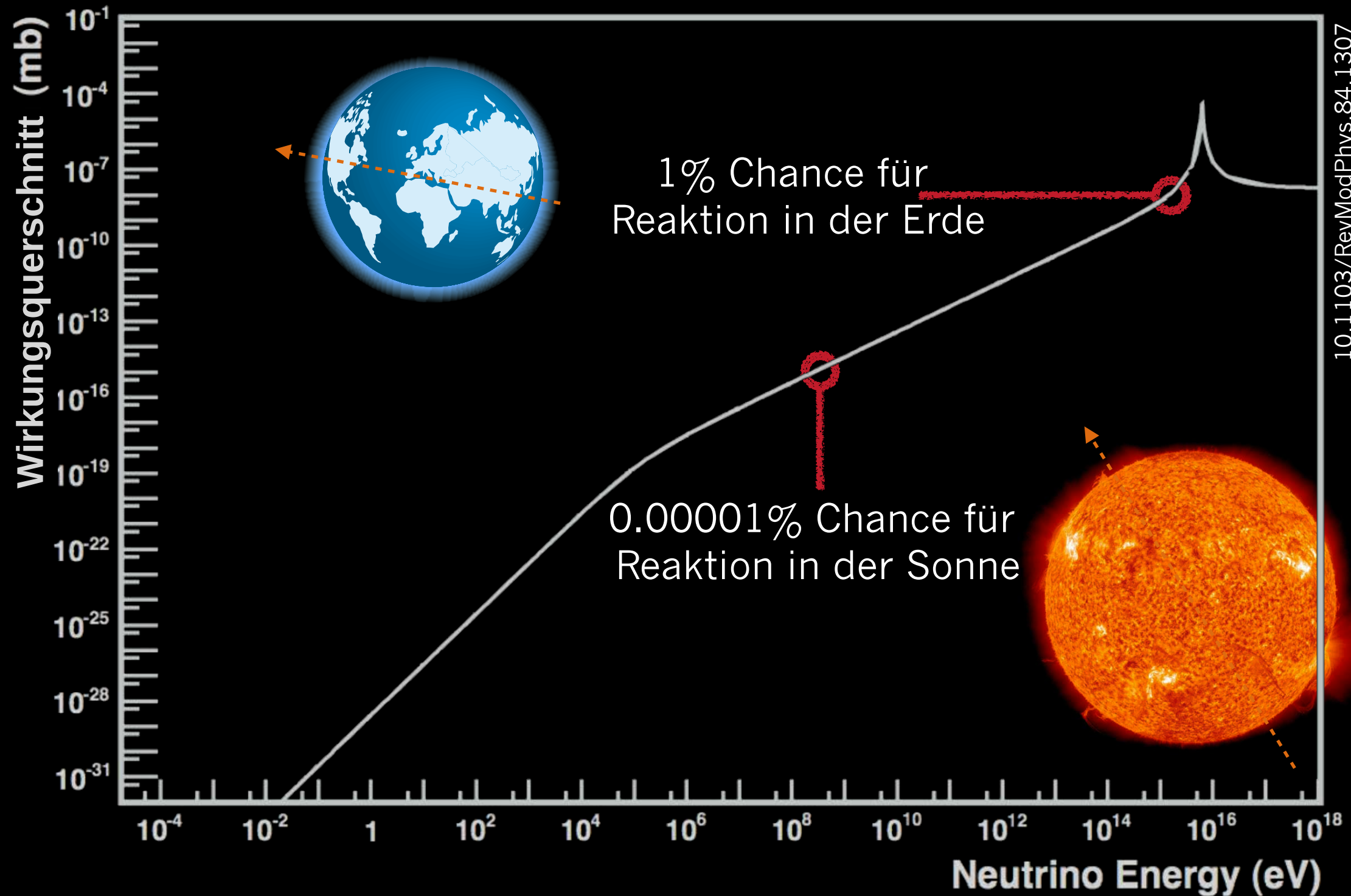
10.1103/RevModPhys.84.1307

Unfassbare Neutrinos

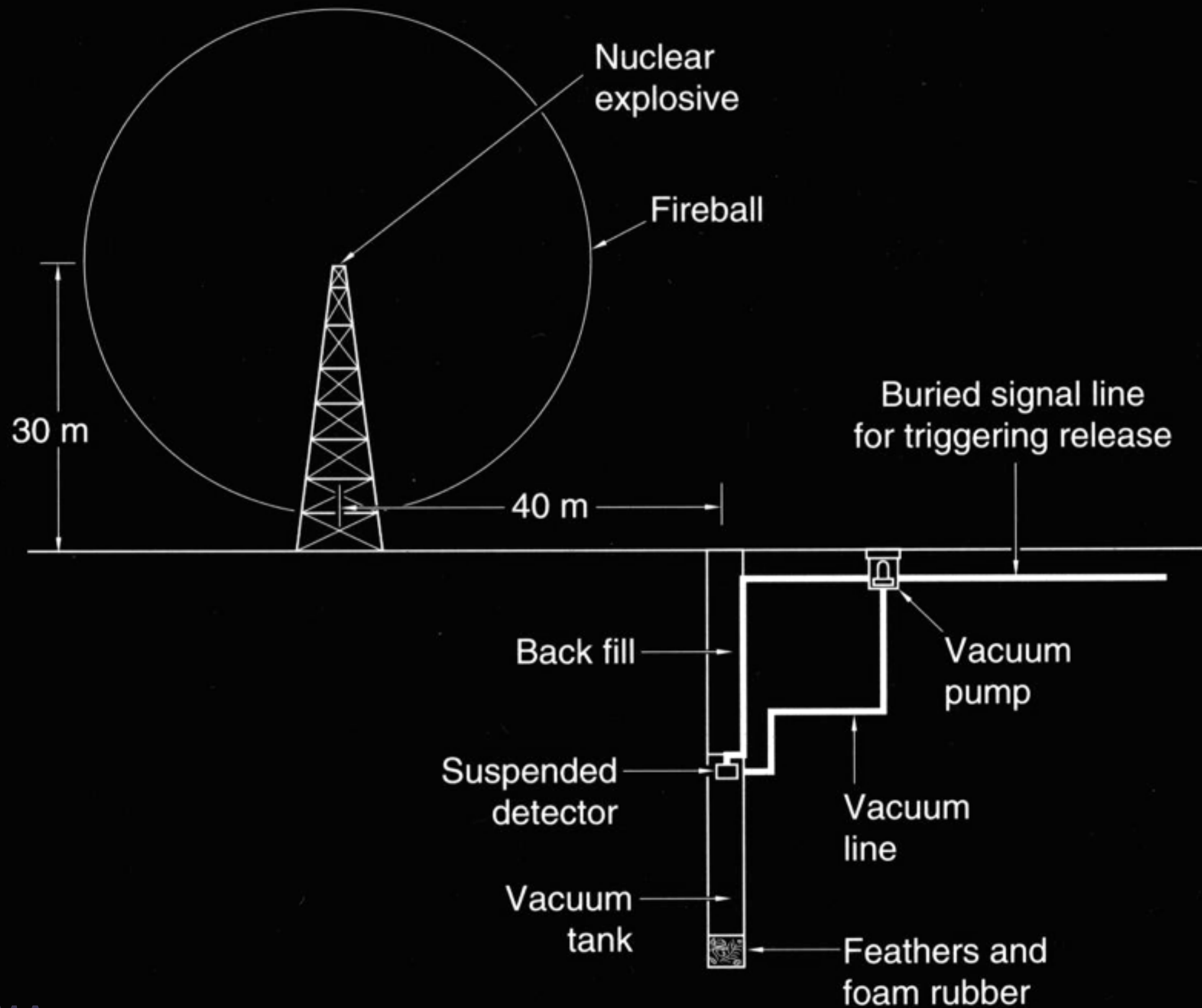


10.1103/RevModPhys.84.1307

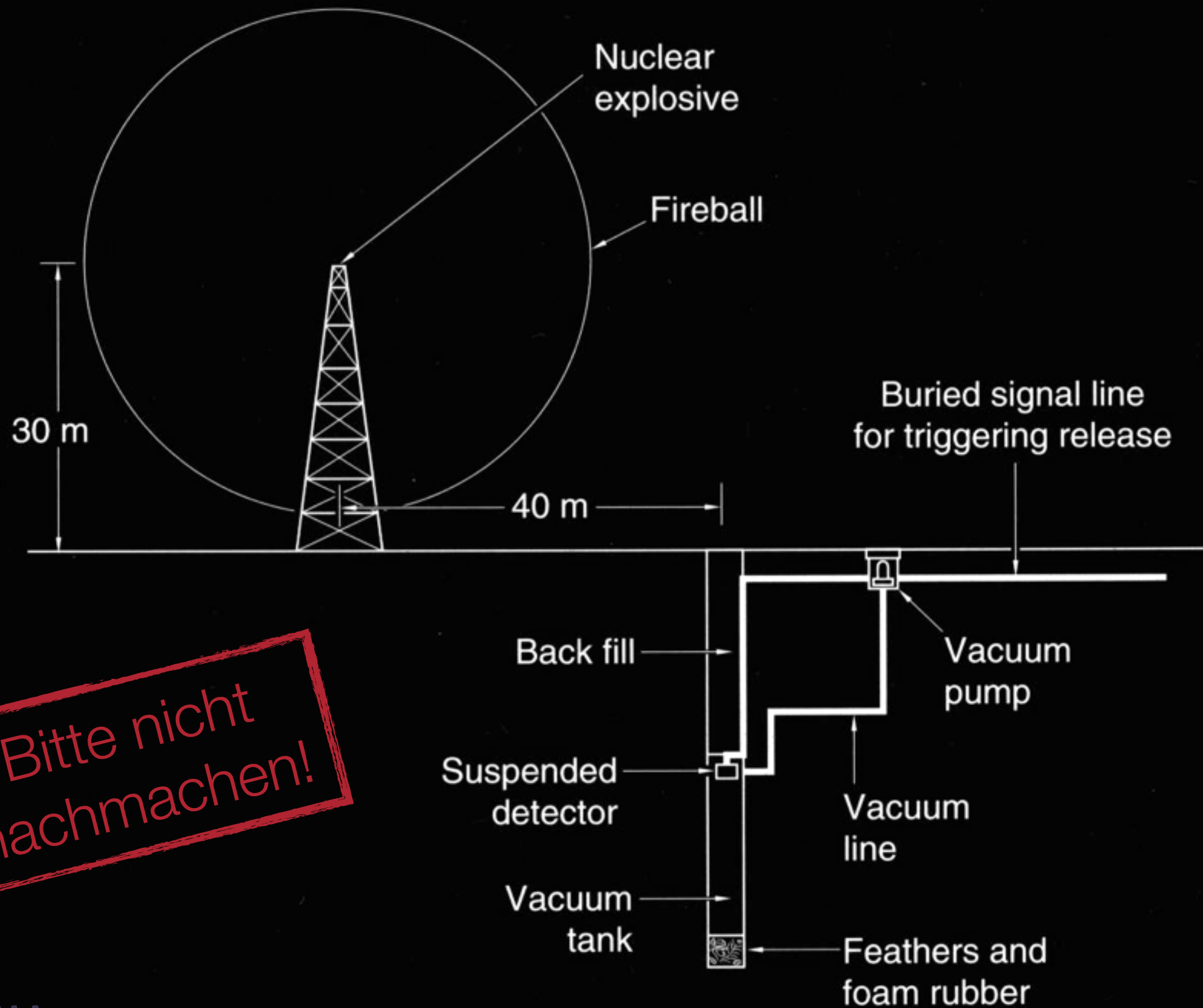
Unfassbare Neutrinos



Neutrino-nachweis: erster Versuch



Neutrino-nachweis: erster Versuch

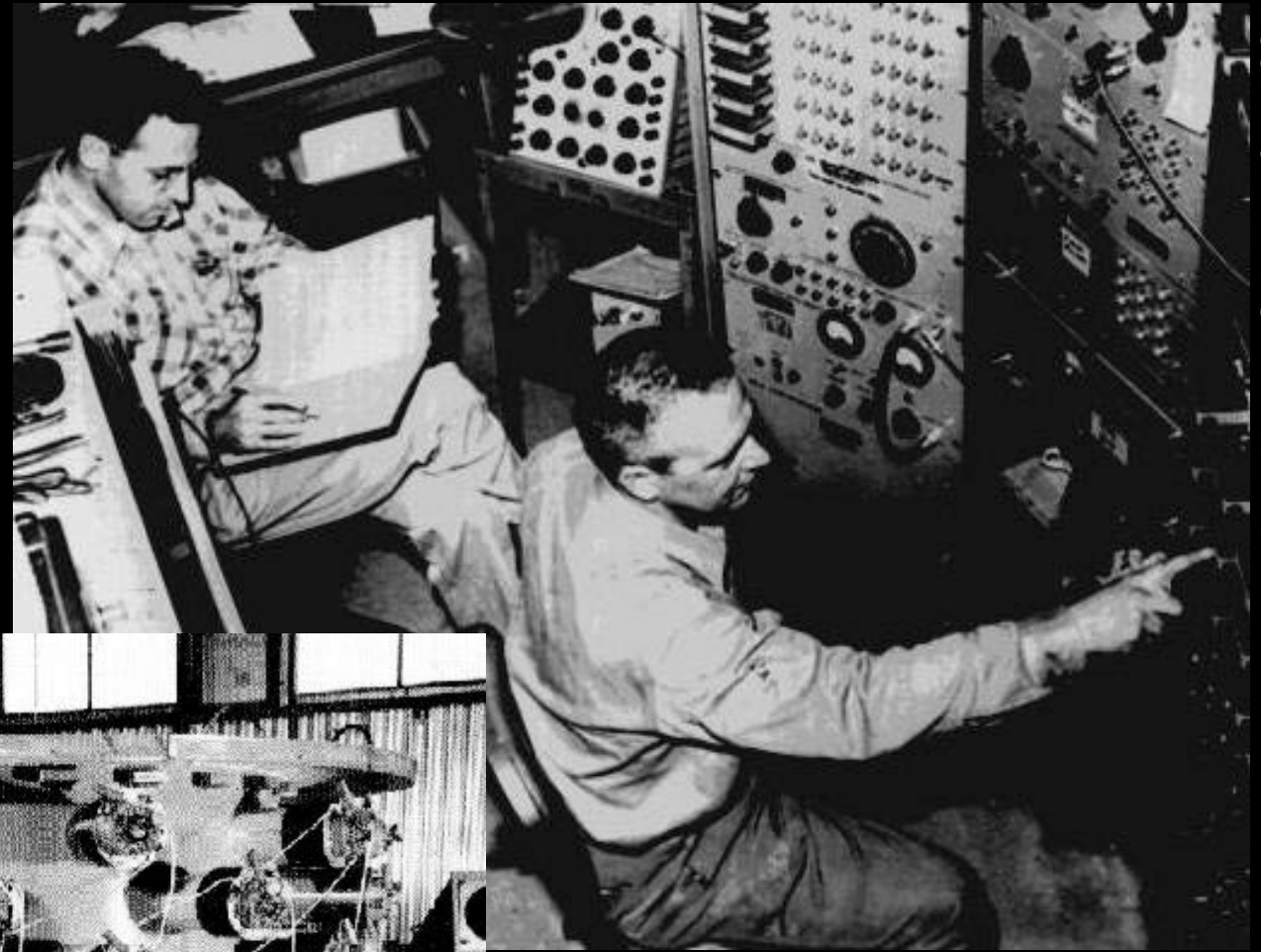


Bitte nicht
nachmachen!

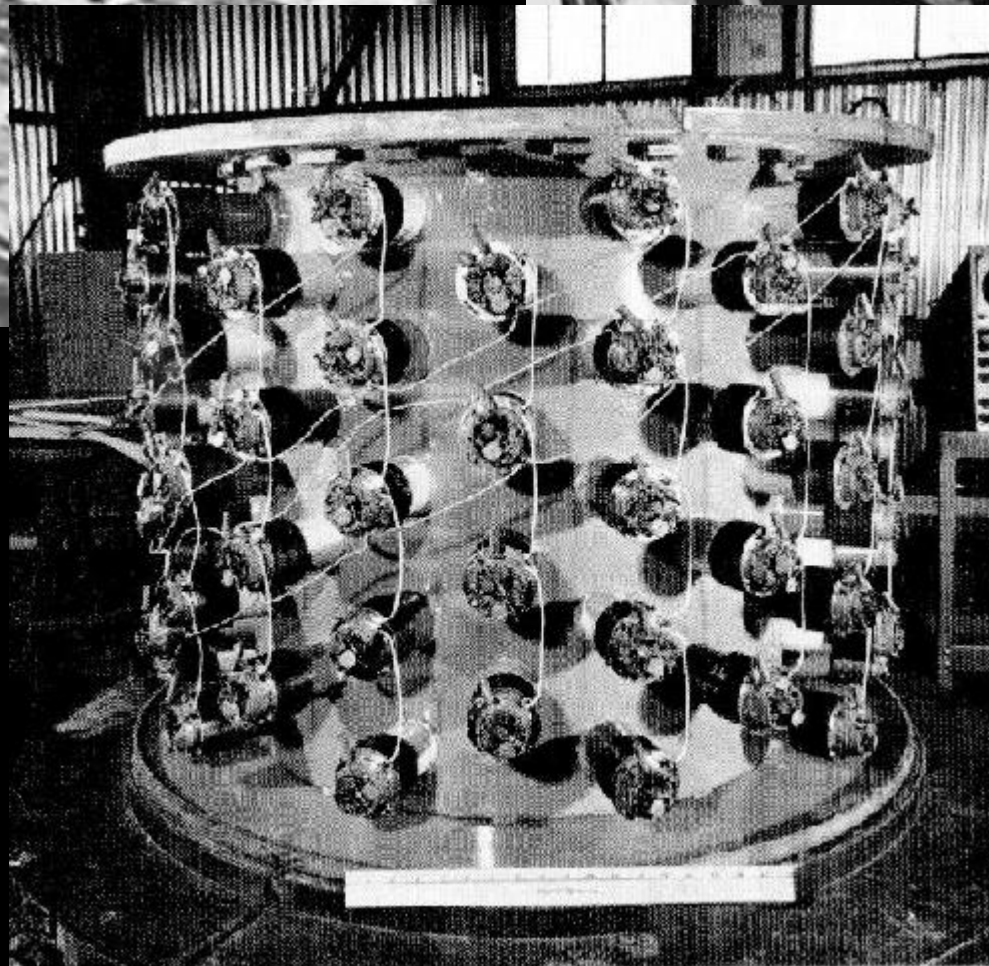
Neutrino-nachweis: zweiter Versuch



Savannah-River
Reaktor



Reines & Cowen



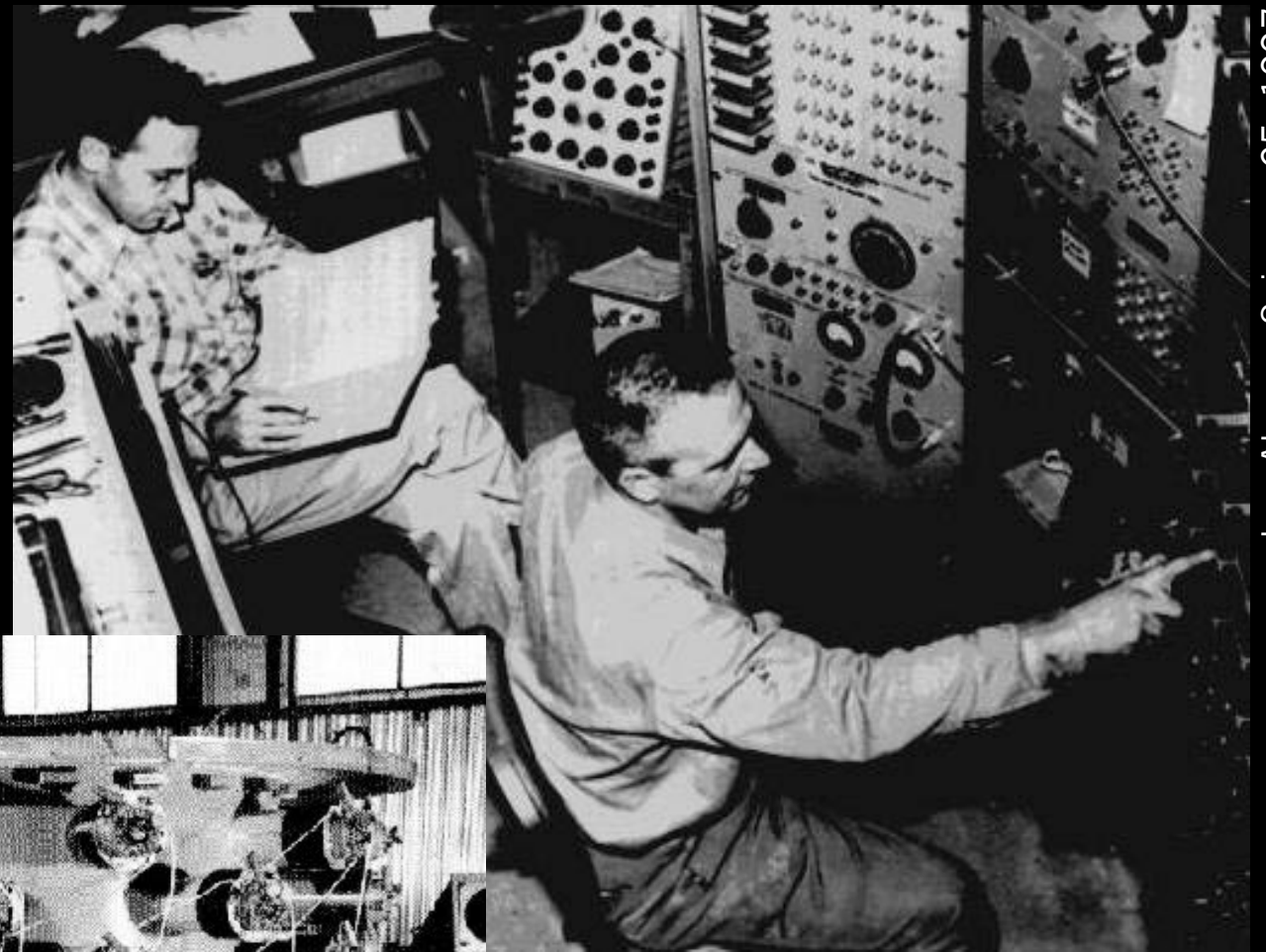
Neutrino-
Detektor

Los Alamos Science. 25, 1997

Neutrino-nachweis: zweiter Versuch



Savannah-River
Reaktor



Reines & Cowen

Los Alamos Science. 25, 1997

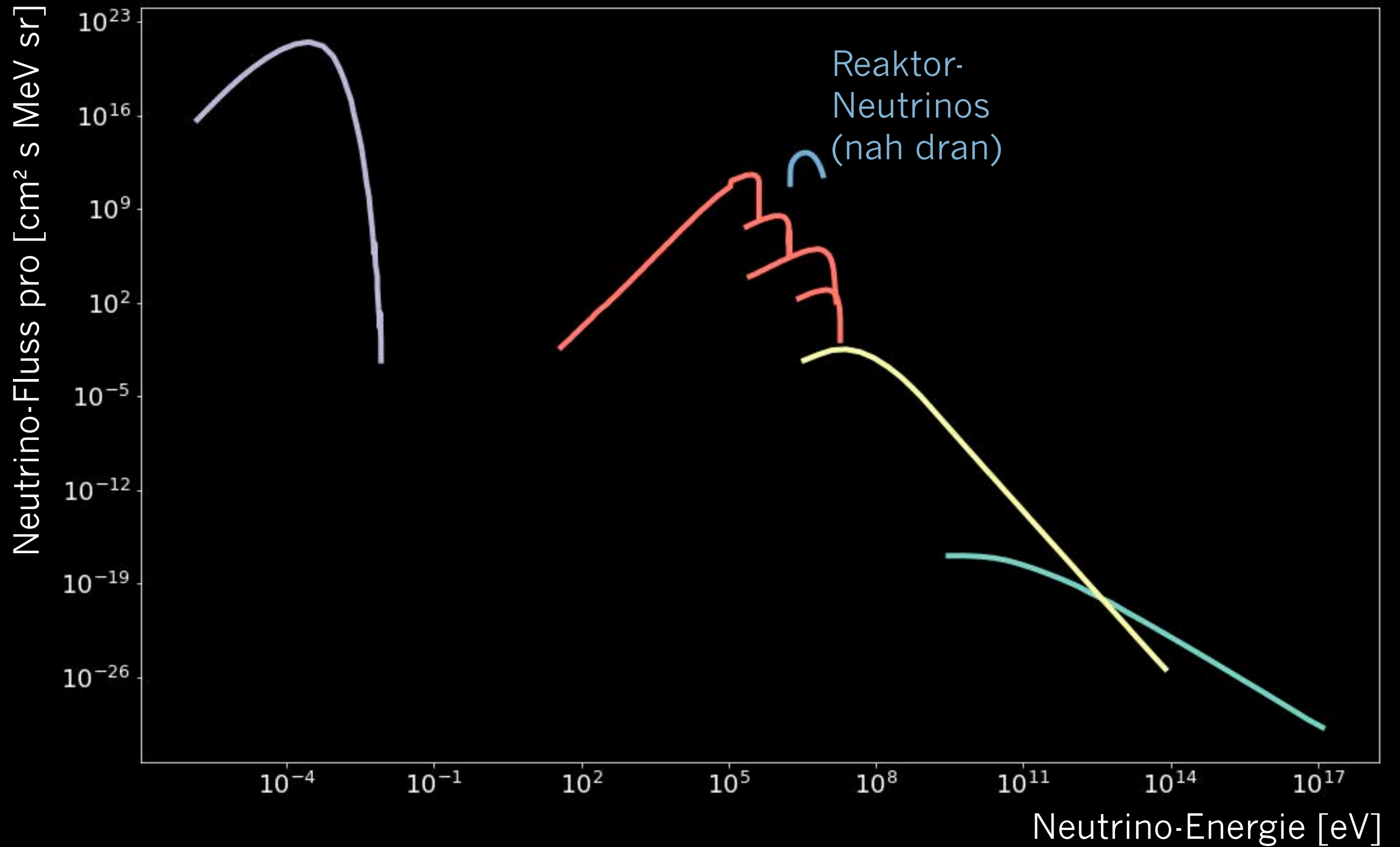


Neutrino-
Detektor

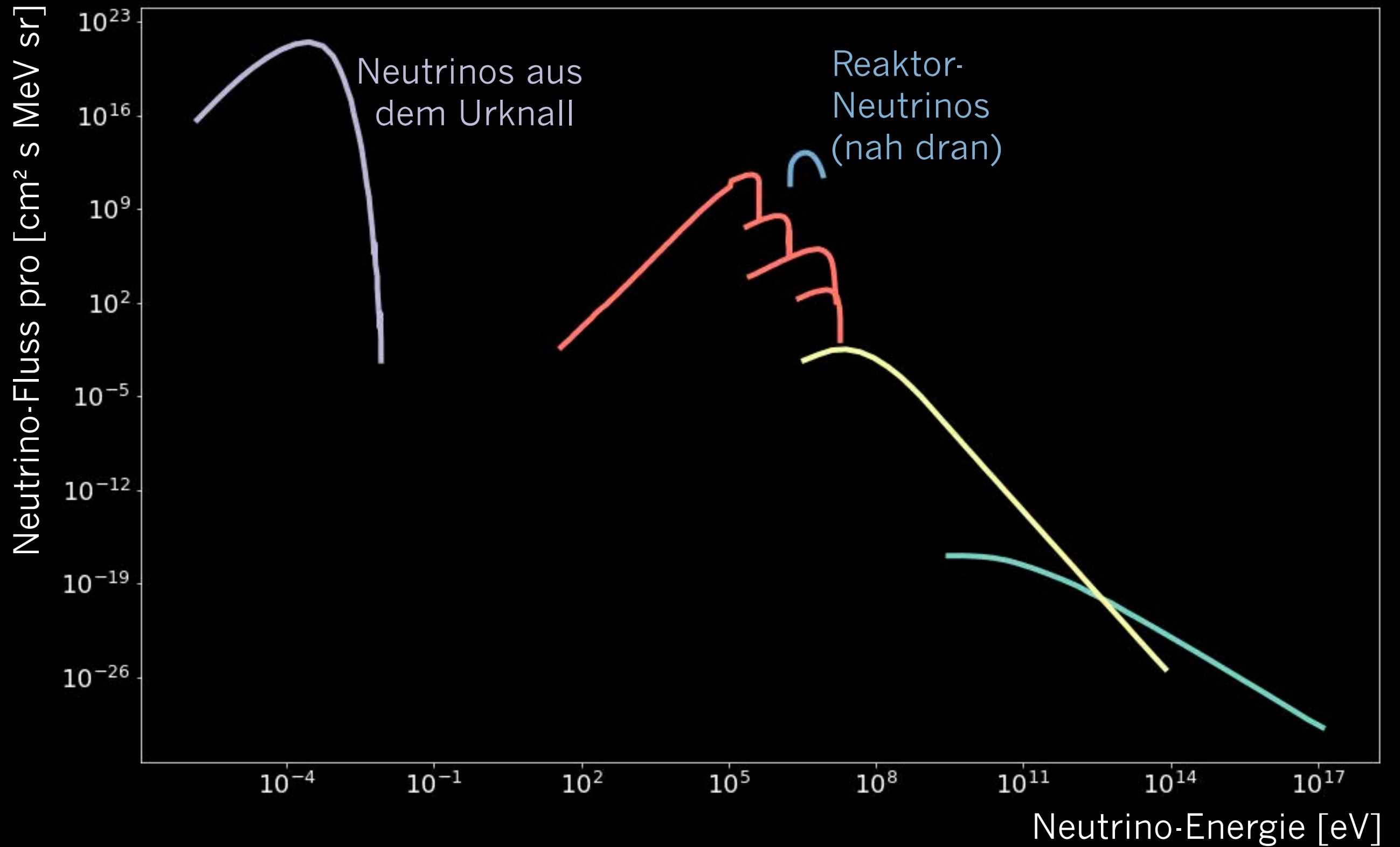
circa 100 Neutrinos pro Tag!

Neutrinos überall...

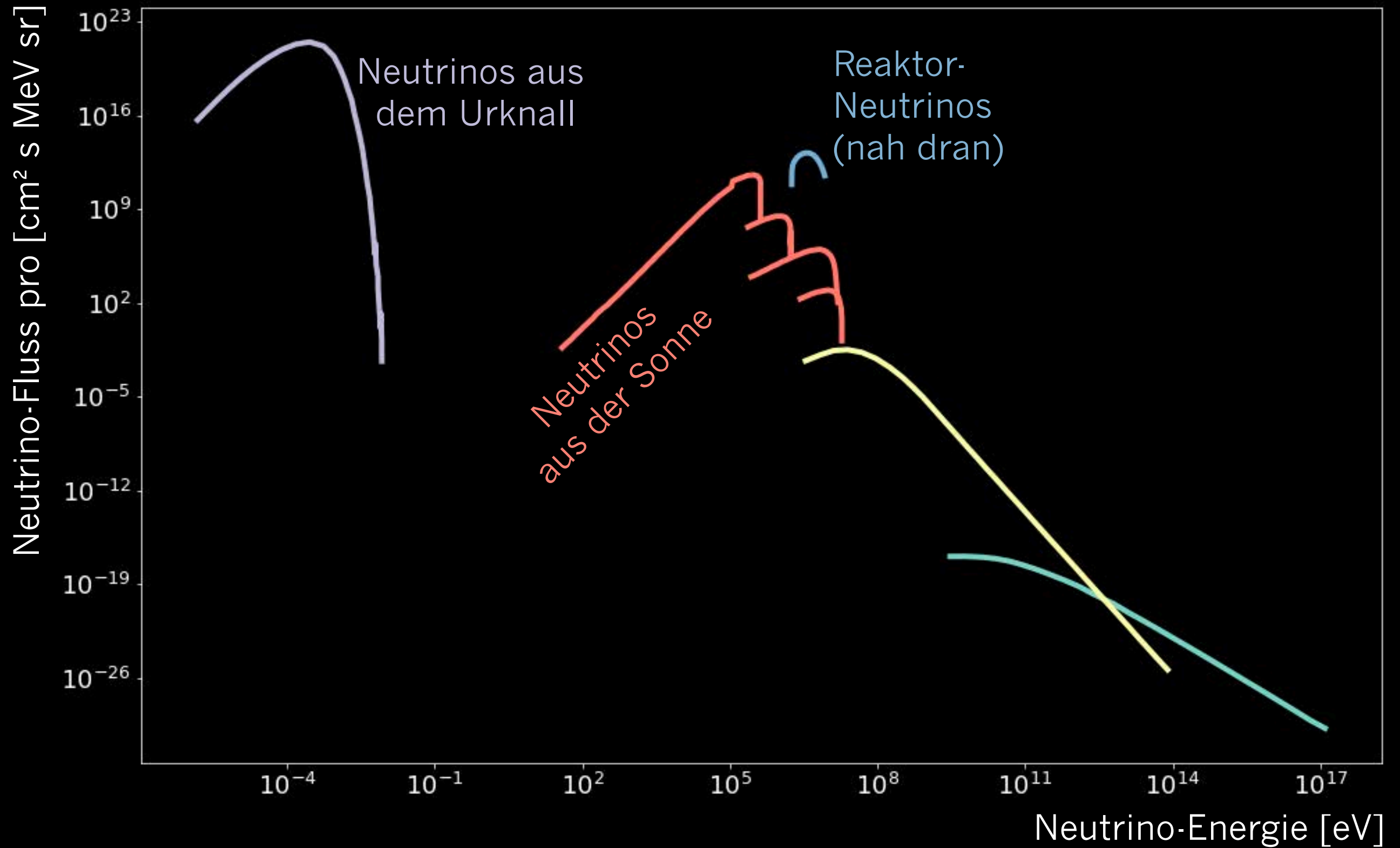
Neutrinos überall...



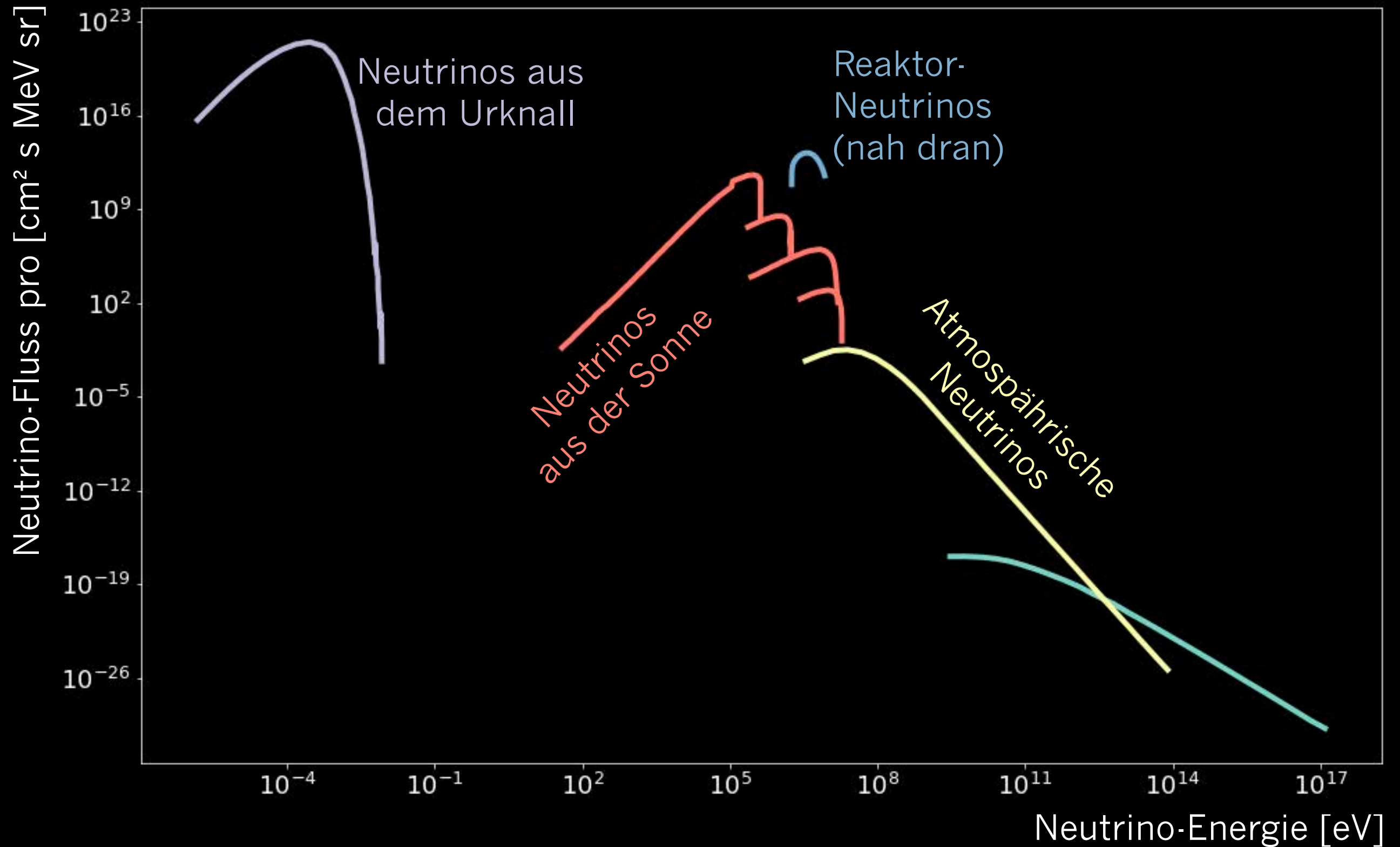
Neutrinos überall...



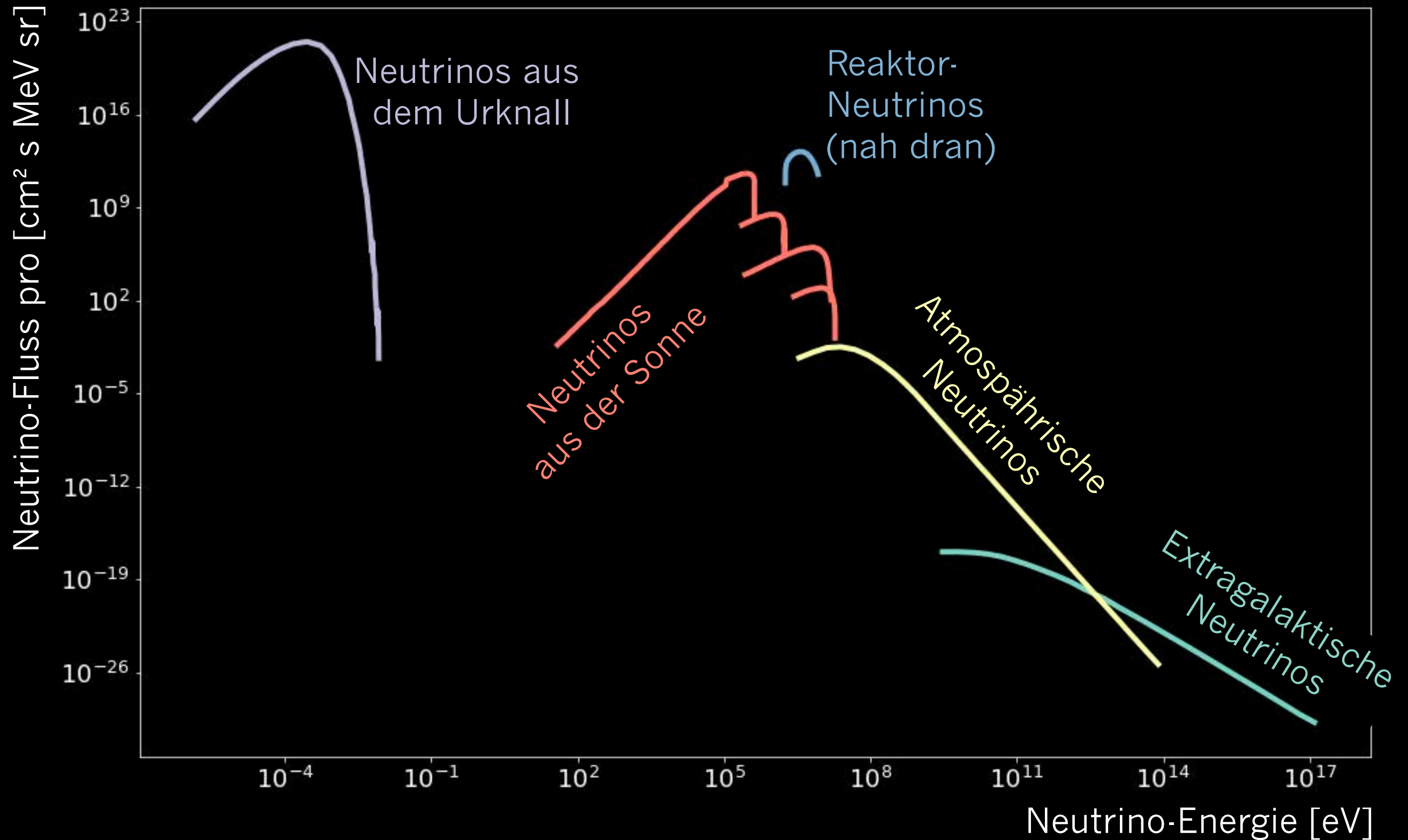
Neutrinos überall...



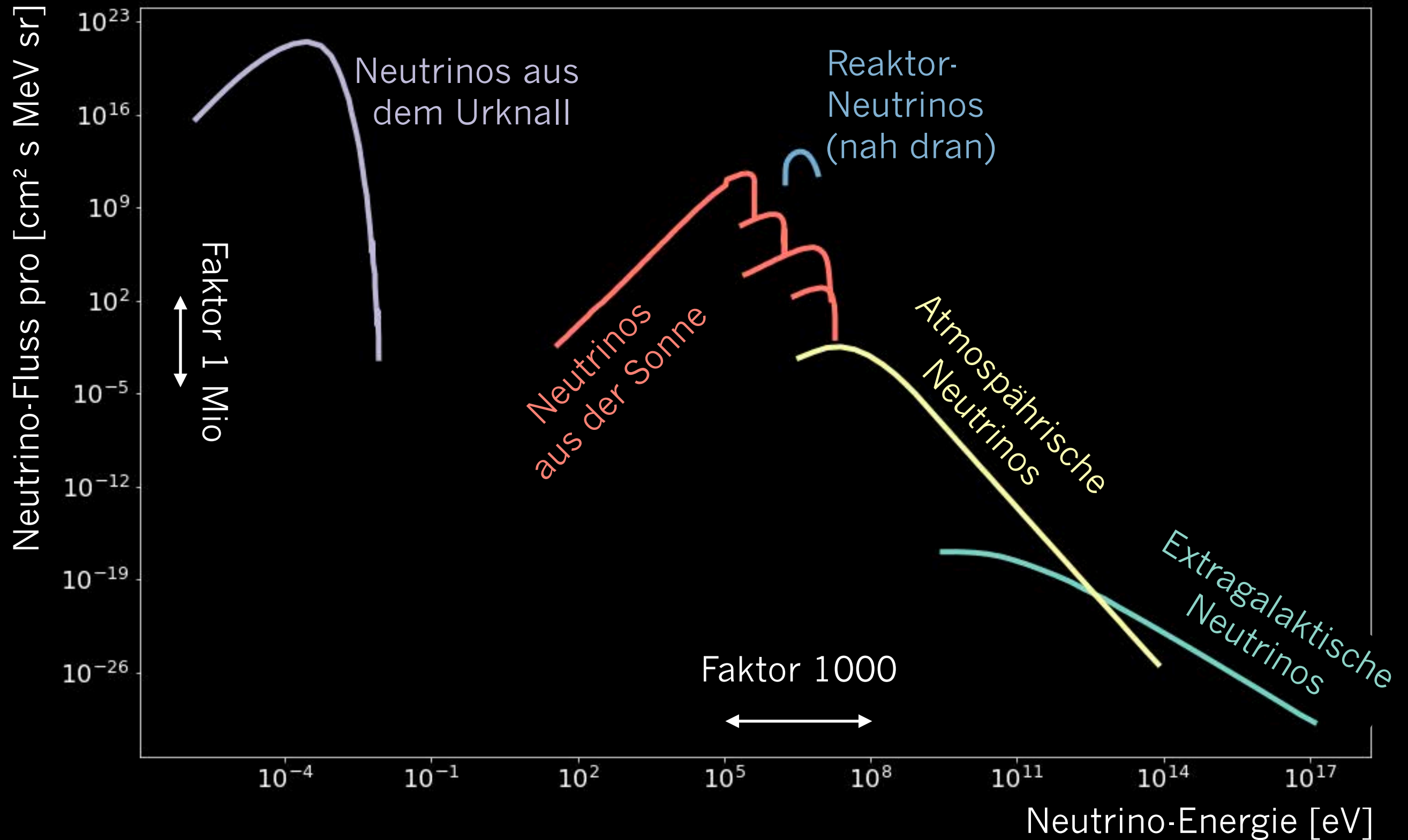
Neutrinos überall...



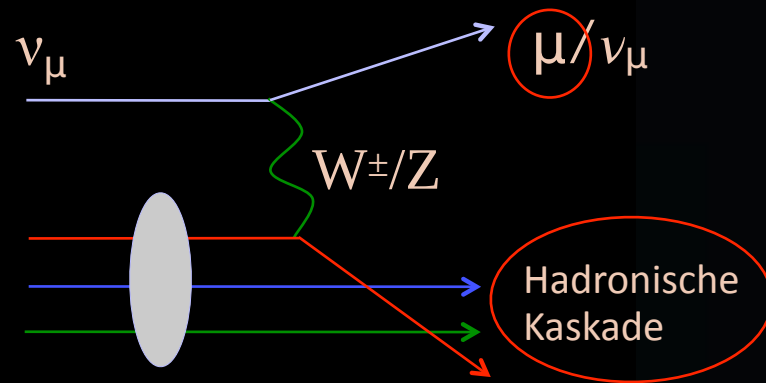
Neutrinos überall...



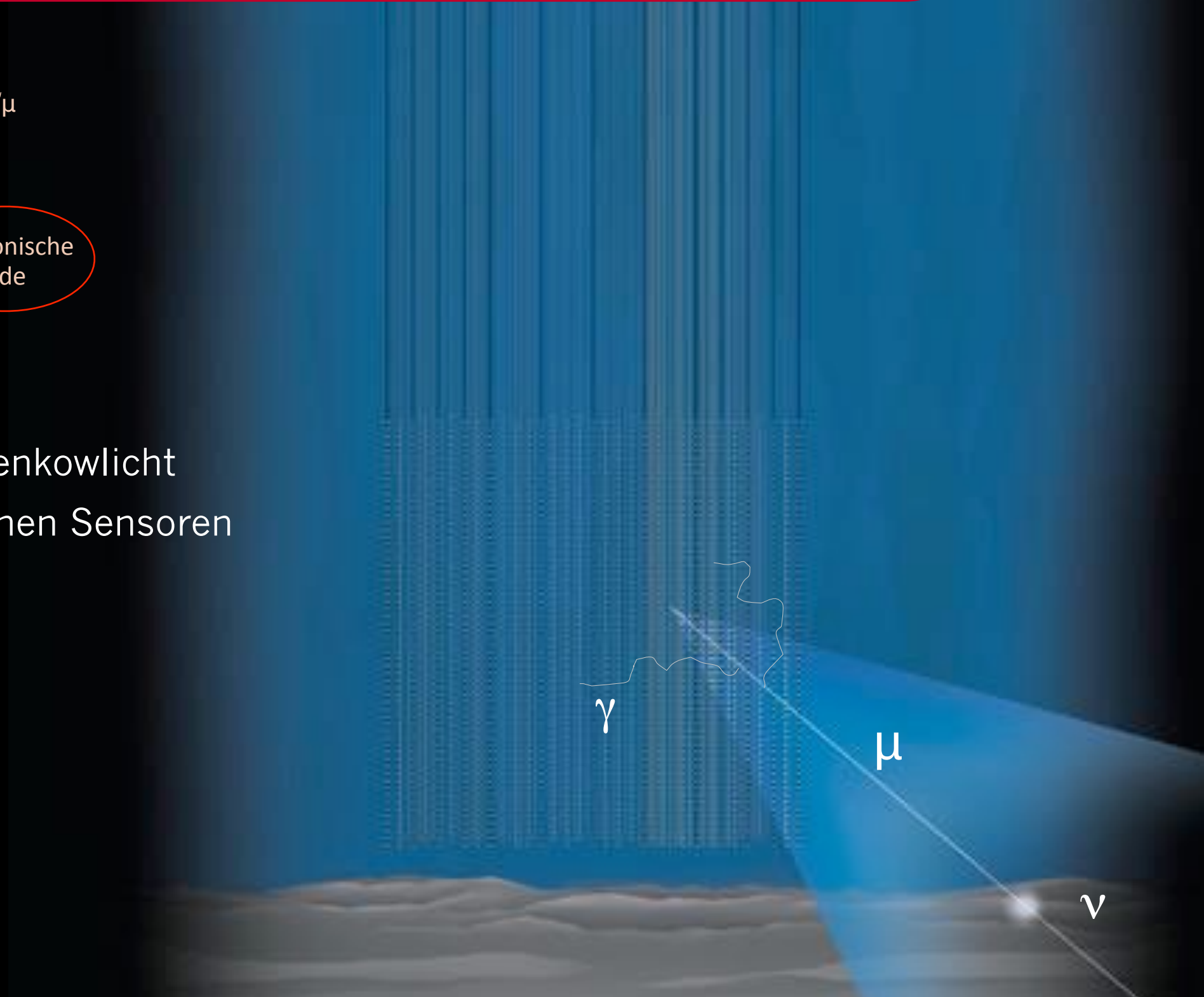
Neutrinos überall...



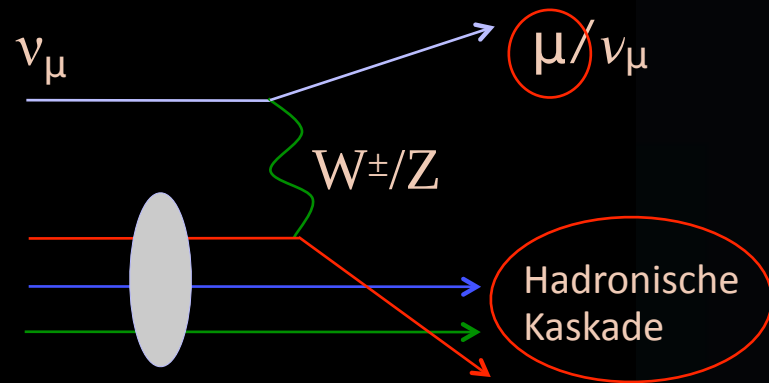
Prinzip des Neutrinooteleskops



- Geladene Teilchen emittieren Tscherenkowlicht
 - ▶ Gitter aus optischen Sensoren



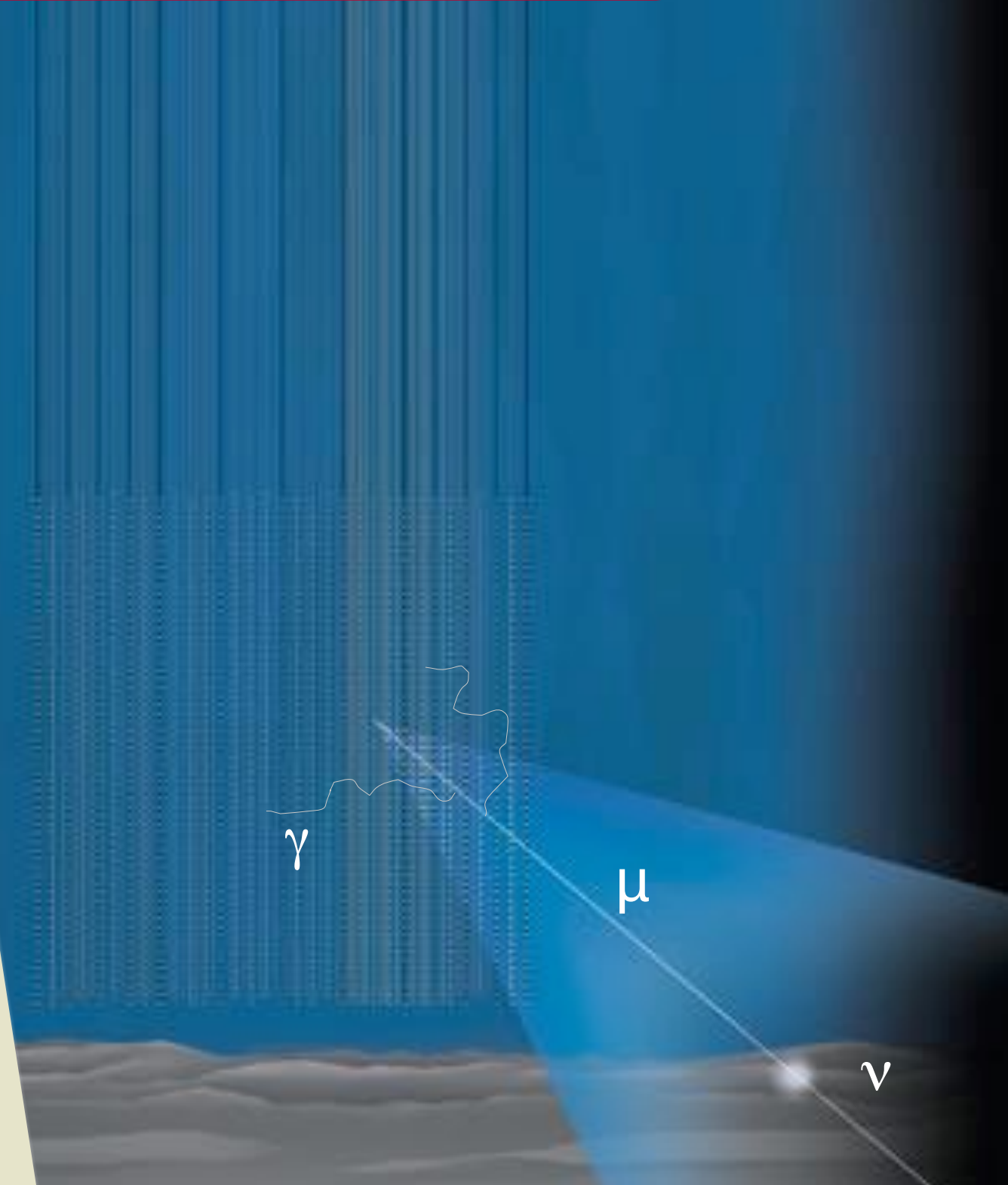
Prinzip des Neutrinooteleskops



- Geladene Teilchen emittieren Tscherenkowlicht
 - ▶ Gitter aus optischen Sensoren

Einkaufsliste

- ✓ 1km³ Medium (transparent!!!)
- ✓ $\phi(10^3)$ optische Sensoren (stabil!!!)





The IceCube Observatory

South Pole Station

Geographic South Pole

IceCube footprint

Skiway —







Geographic South Pole

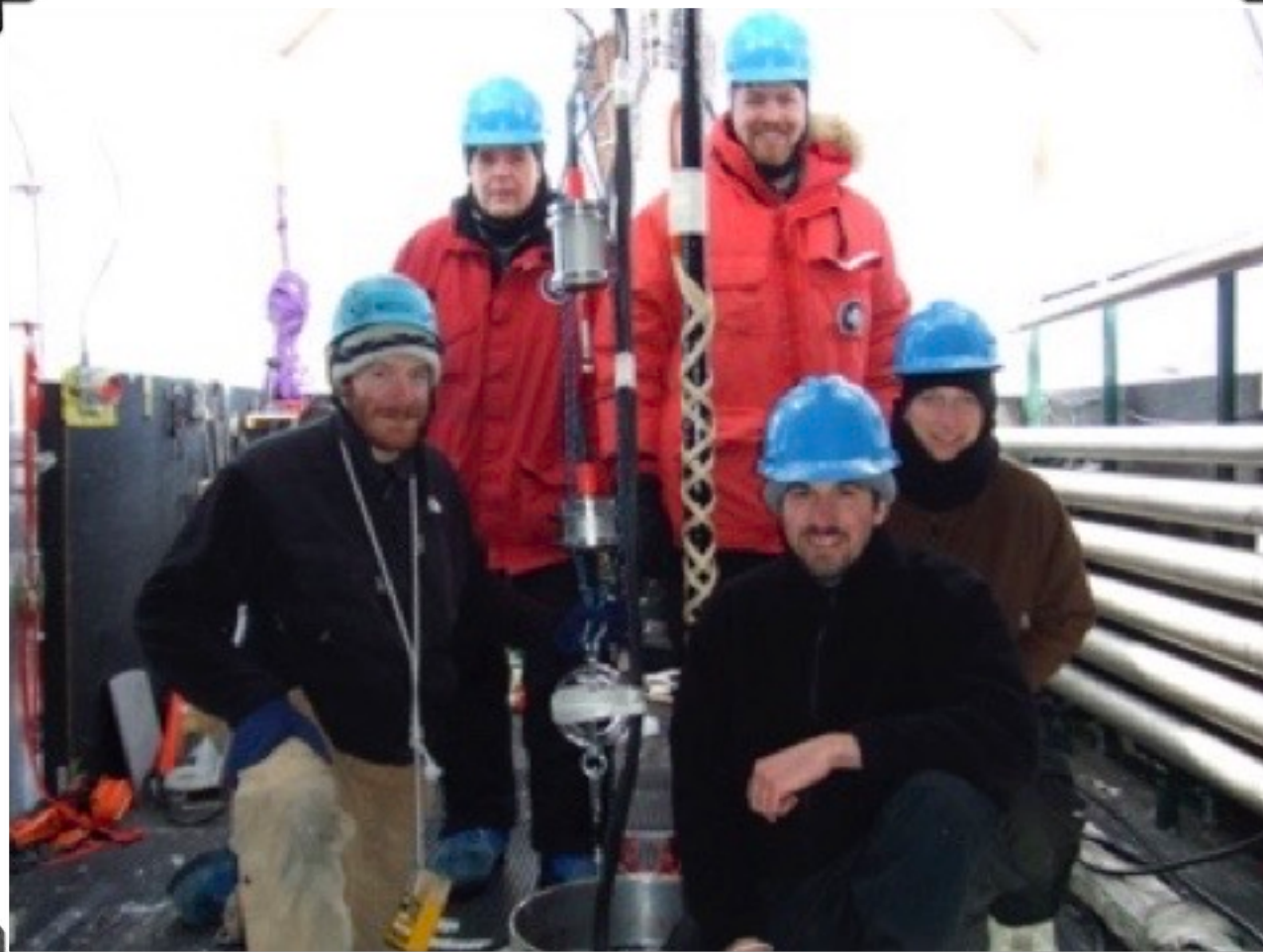
Roald Amundsen
December 14, 1911
"So we arrived and
were able to plant our
flag at the geographical
South Pole."



elevation 9,301 feet

Robert F. Scott
January 17, 1912
"The Pole was reached
under very difficult
circumstances, the
temperature being
below zero."





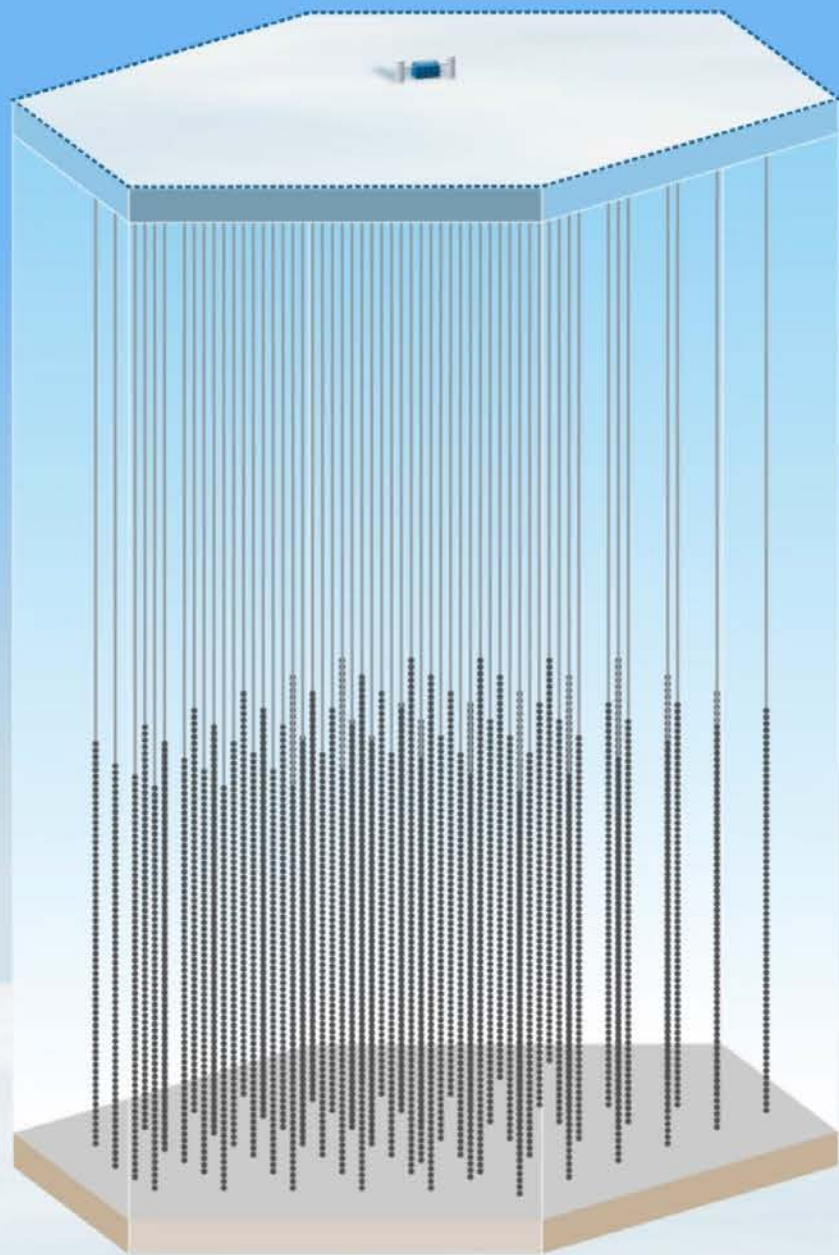
Das IceCube Observatorium



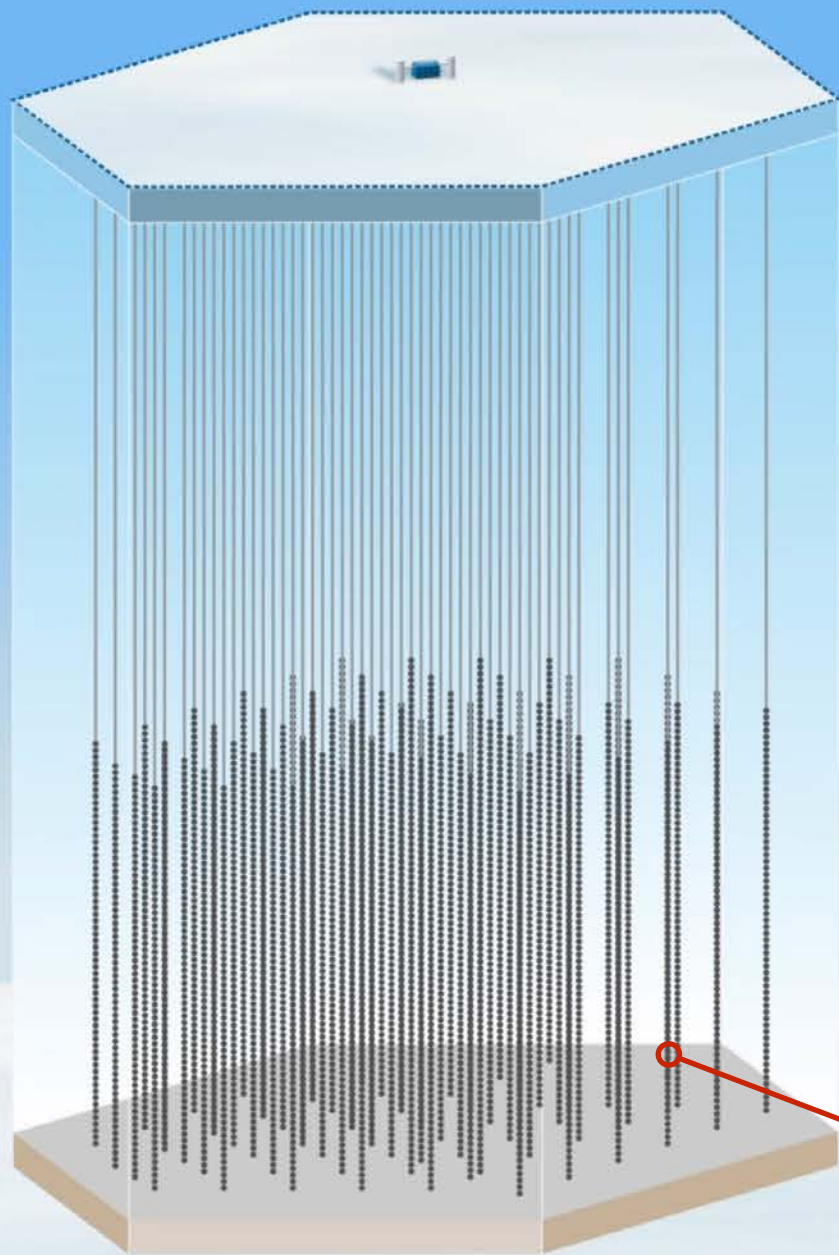
Das IceCube Observatorium



Das IceCube Observatorium



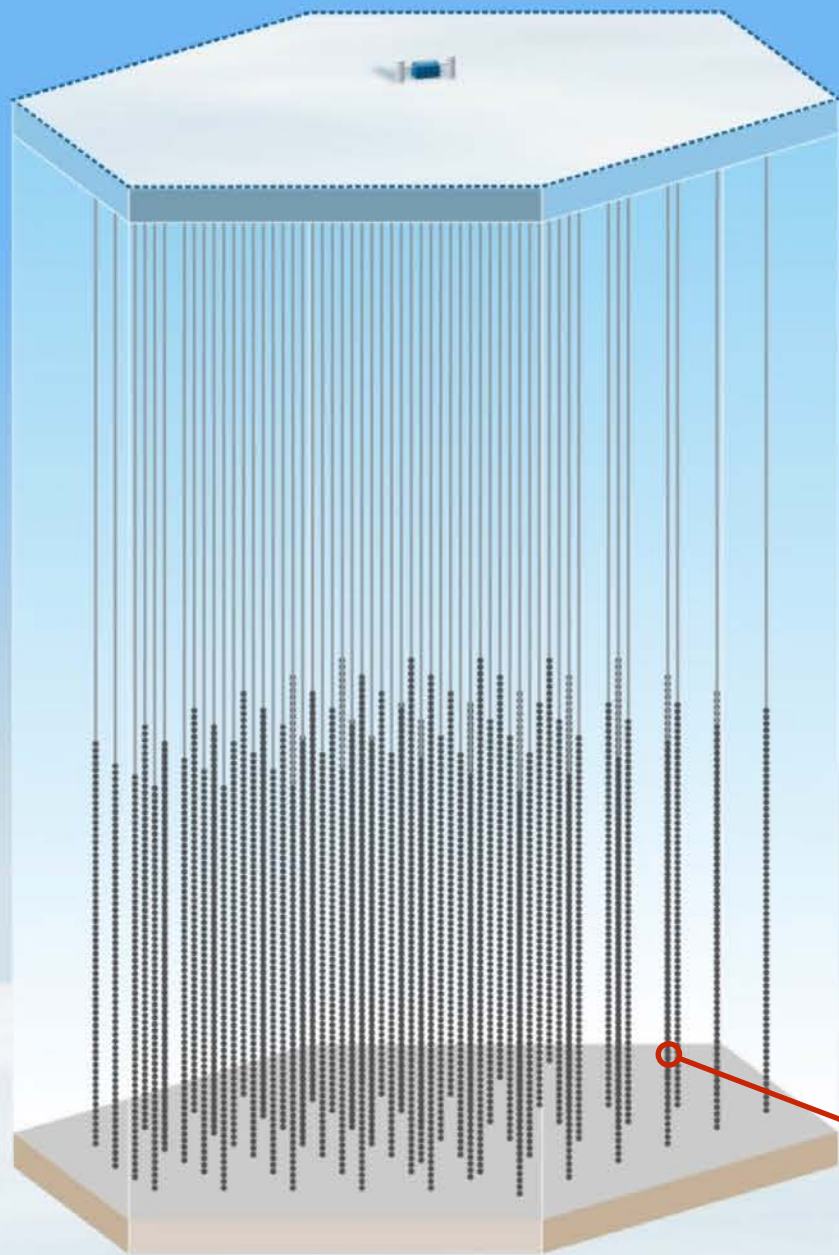
Das IceCube Observatorium



Digitale Optische Module

- 5160 Stück
- ▶ Einzelphotonennachweis

Das IceCube Observatorium



IceCube

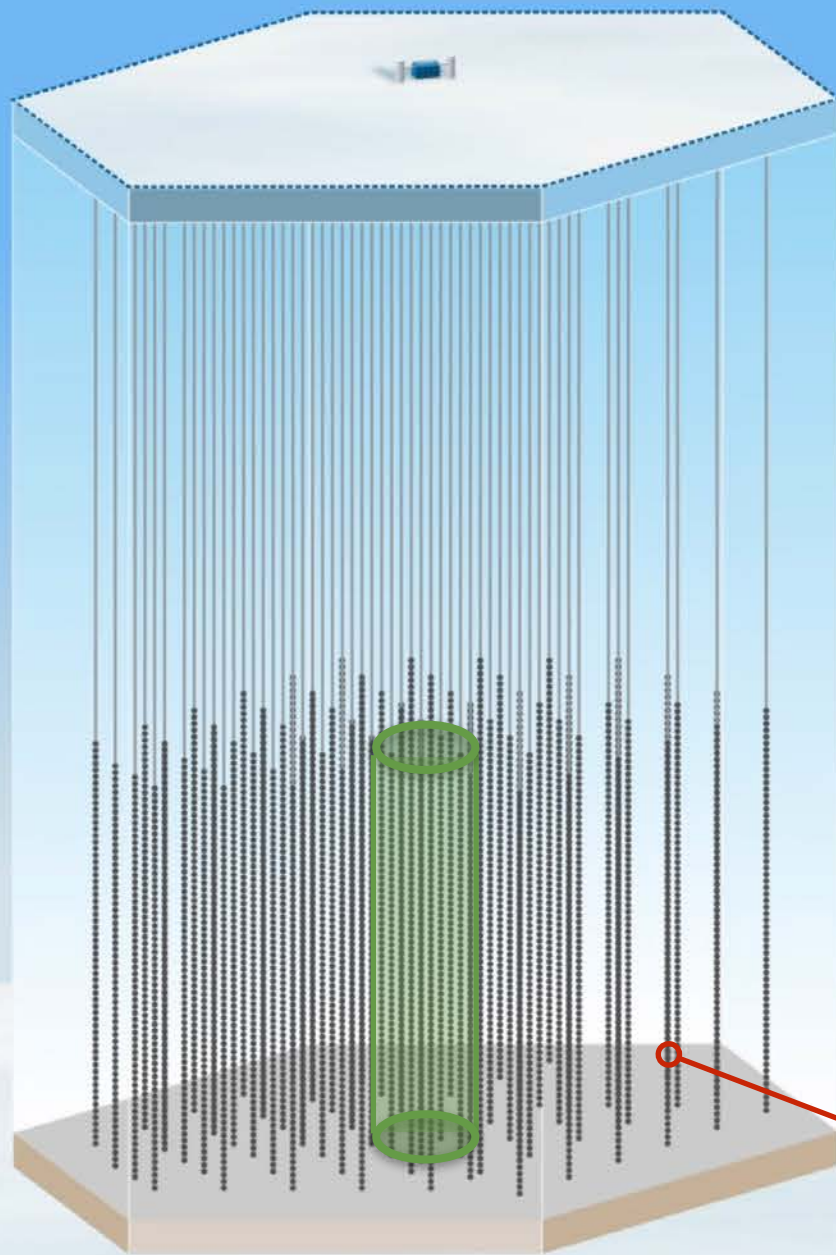
- Abstand $\updownarrow 17\text{m} : \leftrightarrow 125\text{m}$
- Energieschwelle $\sim 100\text{ GeV}$



Digitale Optische Module

- 5160 Stück
- Einzelphotonennachweis

Das IceCube Observatorium



IceCube

- Abstand $\uparrow 17\text{m} : \leftrightarrow 125\text{m}$
- ▶ Energieschwelle $\sim 100\text{ GeV}$

IceCube DeepCore

- Abstand: $\uparrow 6\text{m} : \leftrightarrow 25\text{-}40\text{m}$
- ▶ Energieschwelle $\sim 10\text{ GeV}$



Digitale Optische Module

- 5160 Stück
- ▶ Einzelphotonennachweis

Das IceCube Observatorium



IceCube

- Abstand $\uparrow 17\text{m} : \leftrightarrow 125\text{m}$
- ▶ Energieschwelle $\sim 100\text{ GeV}$

IceCube DeepCore

- Abstand: $\uparrow 6\text{m} : \leftrightarrow 25\text{-}40\text{m}$
- ▶ Energieschwelle $\sim 10\text{GeV}$

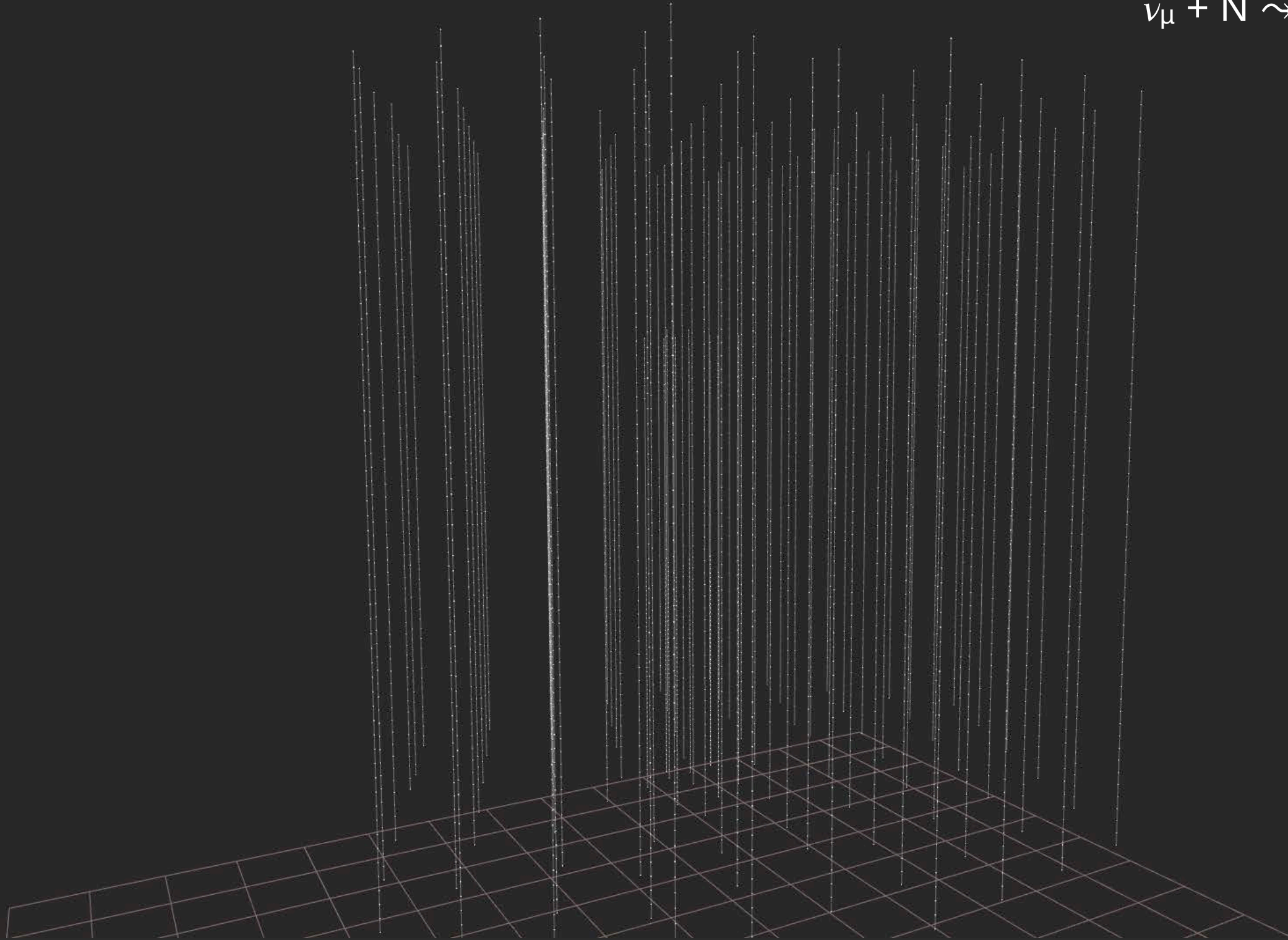


Digitale Optische Module

- 5160 Stück
- ▶ Einzelphotonennachweis

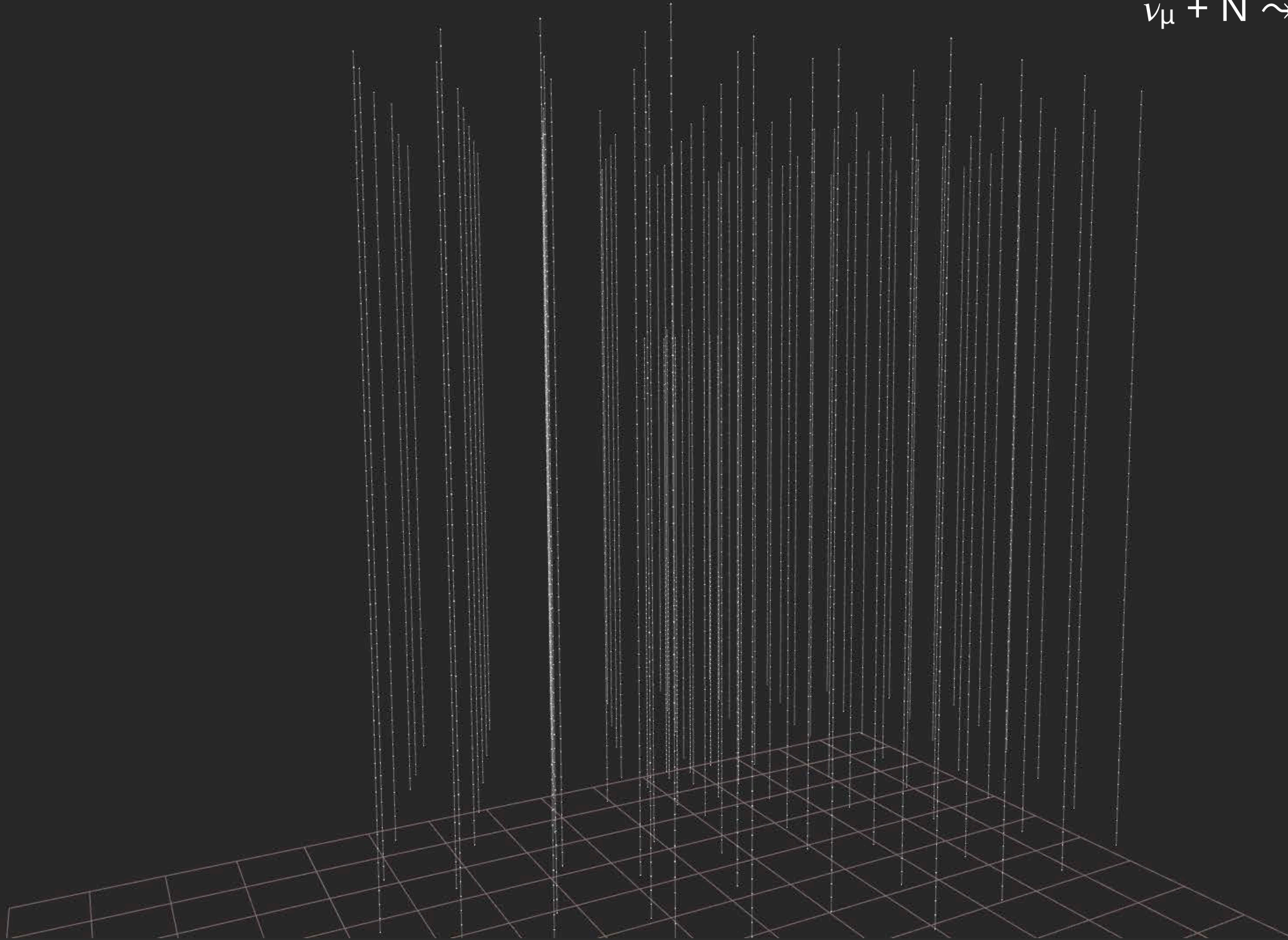
Lichtausbreitung

$$\nu_\mu + N \leadsto \mu \text{ (100 TeV)}$$

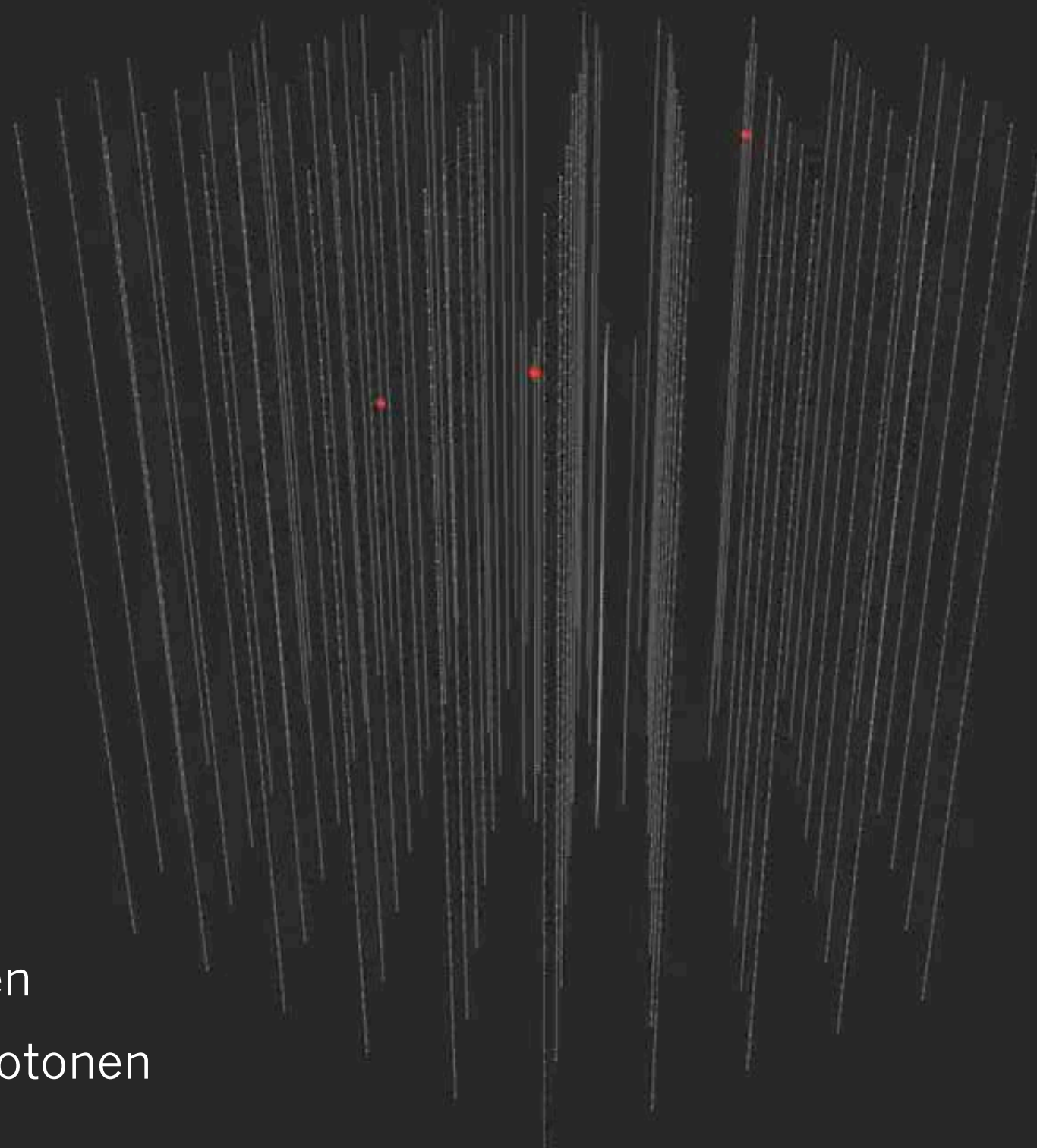


Lichtausbreitung

$$\nu_\mu + N \leadsto \mu \text{ (100 TeV)}$$



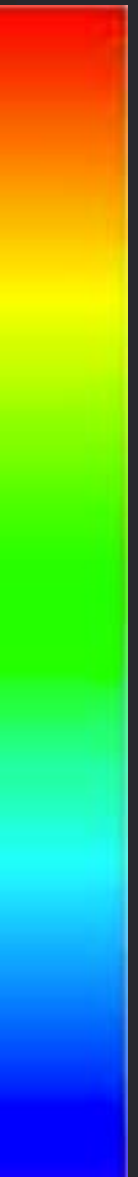
Gemessenes Signal



früh

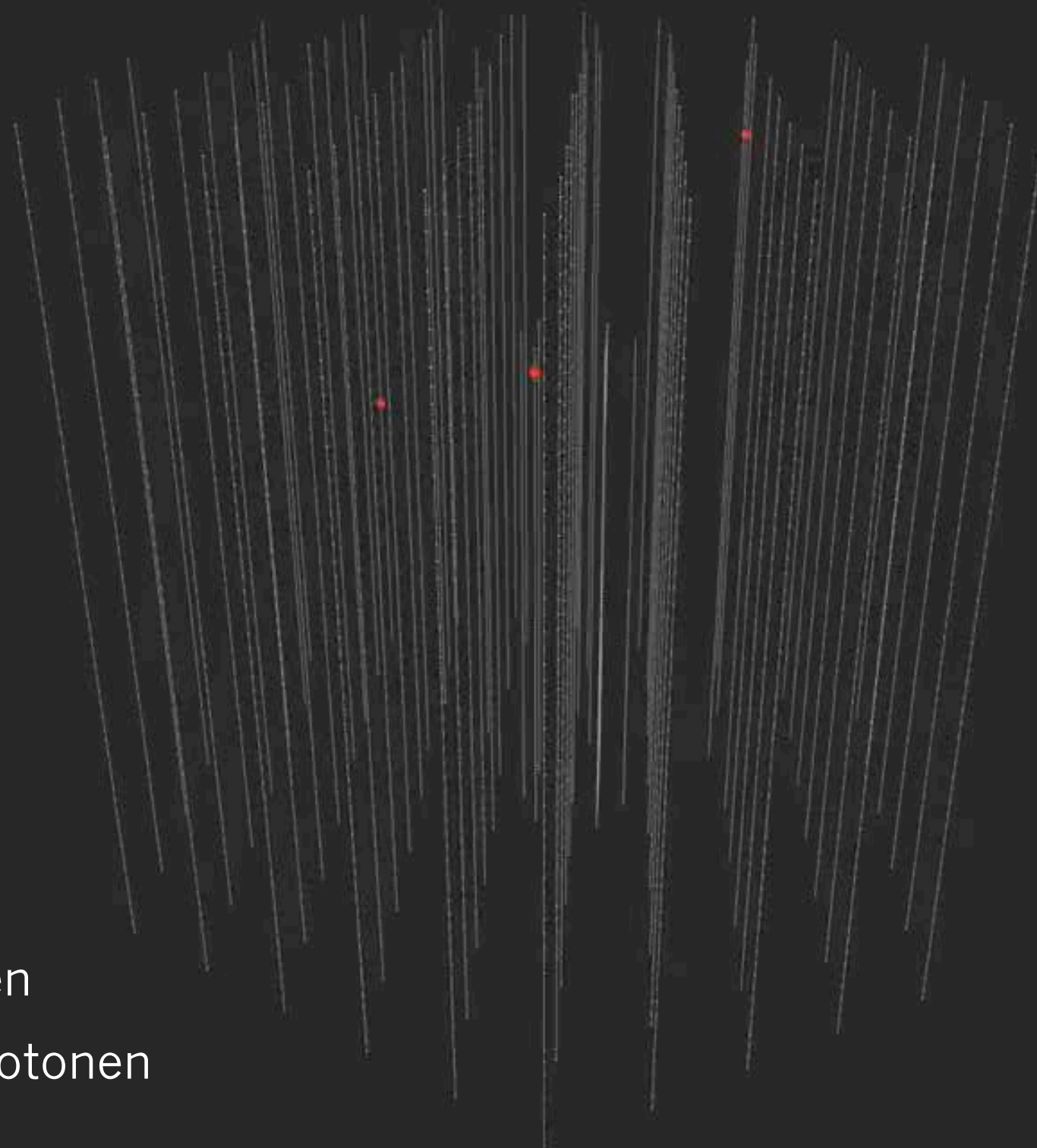


spät



- ein Photon
- mehrere Photonen

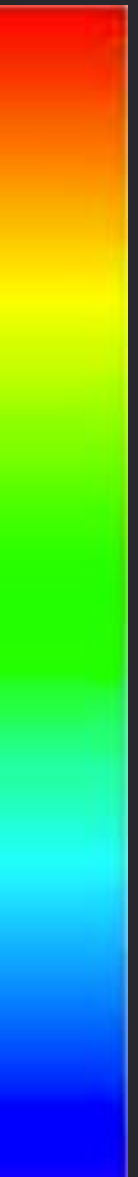
Gemessenes Signal



früh



spät



- ein Photon
- mehrere Photonen

Kosmische Strahlung, Neutrinos und Gammas

Propagation

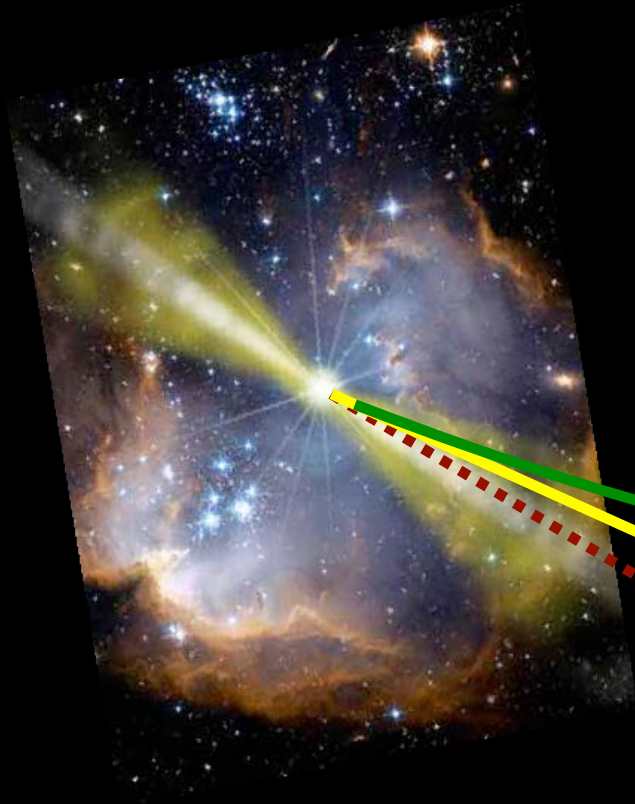
- geladene kosmische Strahlung
→ abgelenkt durch Magnetfelder
- Photonen / Neutrinos
→ zeigen zurück zur Quelle

Kosmische Quellen:

- Elektronen
→ Photonen
- Kosmische Strahlung
→ Neutrinos und Photons

Neutrino nachweis

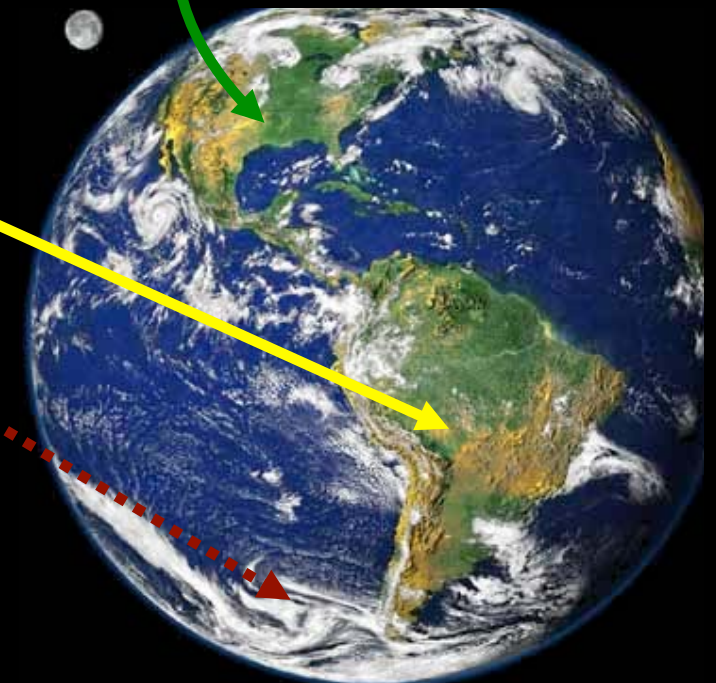
→ “smoking gun” für Quellen kosmischer Strahlung



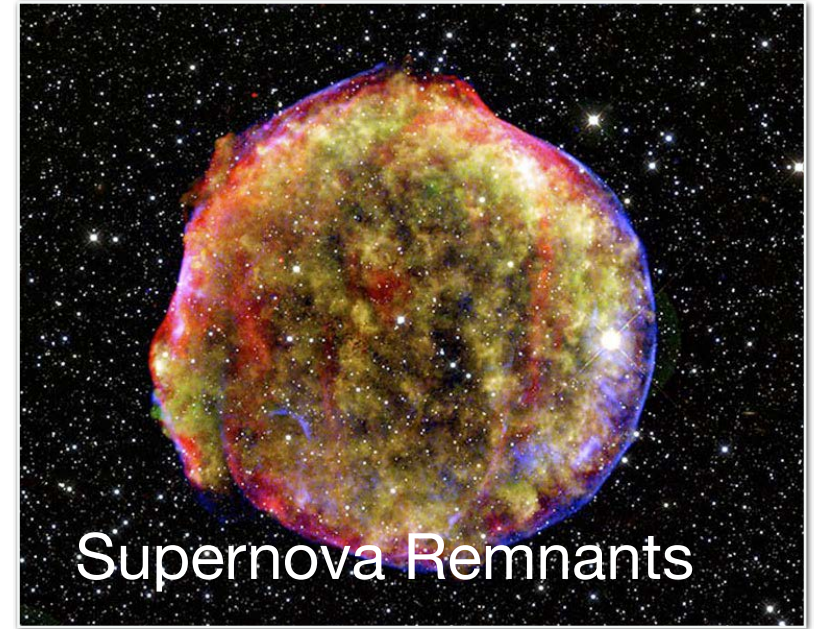
p^+

γ

ν



Kosmische Neutrino Quellen



Abgestrahlte Energie: bis zu 10^{45} Joule

Fermi Beschleunigung: Protonen mit Energien bis zu 10^{19} eV

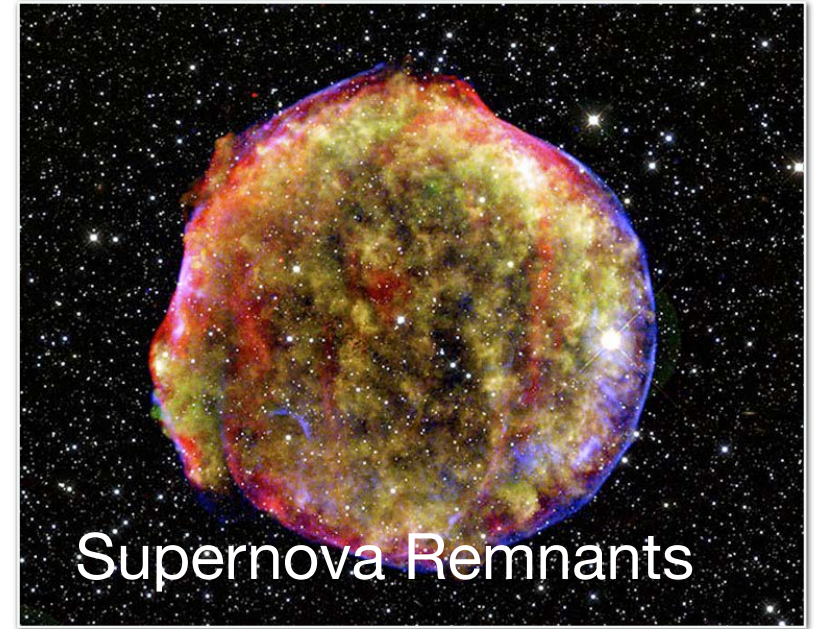
Wechselwirkung von Teilchen: in kosmischen Quellen

$$p + p \rightarrow \pi, K, \dots$$

$$\text{L} \rightarrow \pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$$

$$\hookrightarrow \mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$$

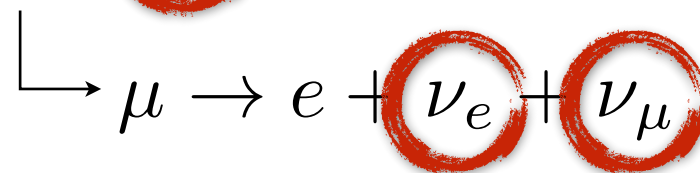
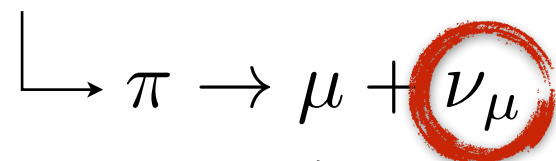
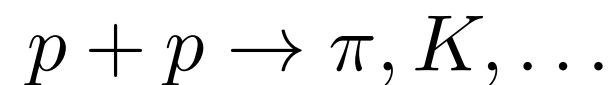
Kosmische Neutrino Quellen



Abgestrahlte Energie: bis zu 10^{45} Joule

Fermi Beschleunigung: Protonen mit Energien bis zu 10^{19} eV

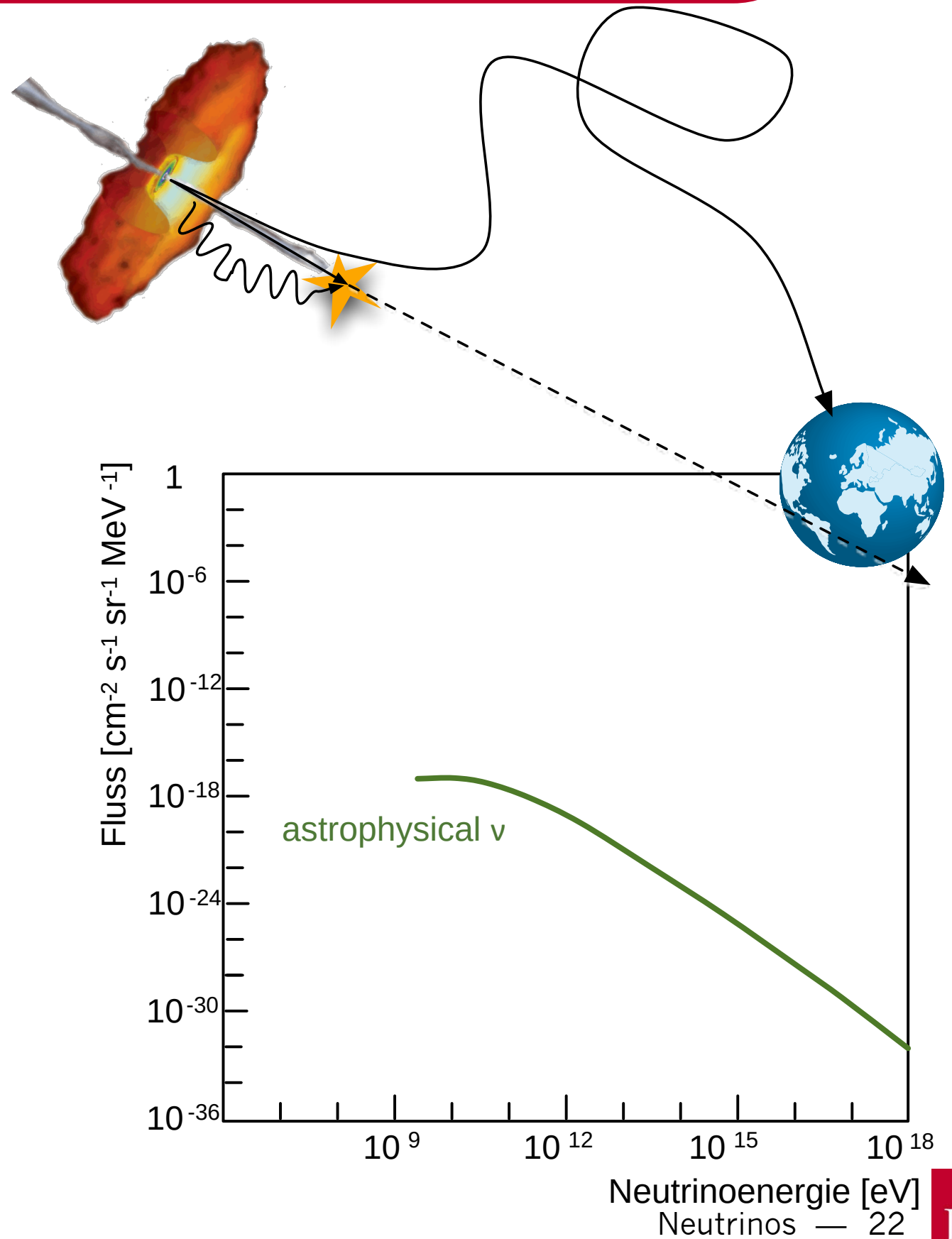
Wechselwirkung von Teilchen: in kosmischen Quellen



Teilchen in IceCube

Astrophysikalische Neutrinos

- aus den Quellen der kosmischen Strahlung



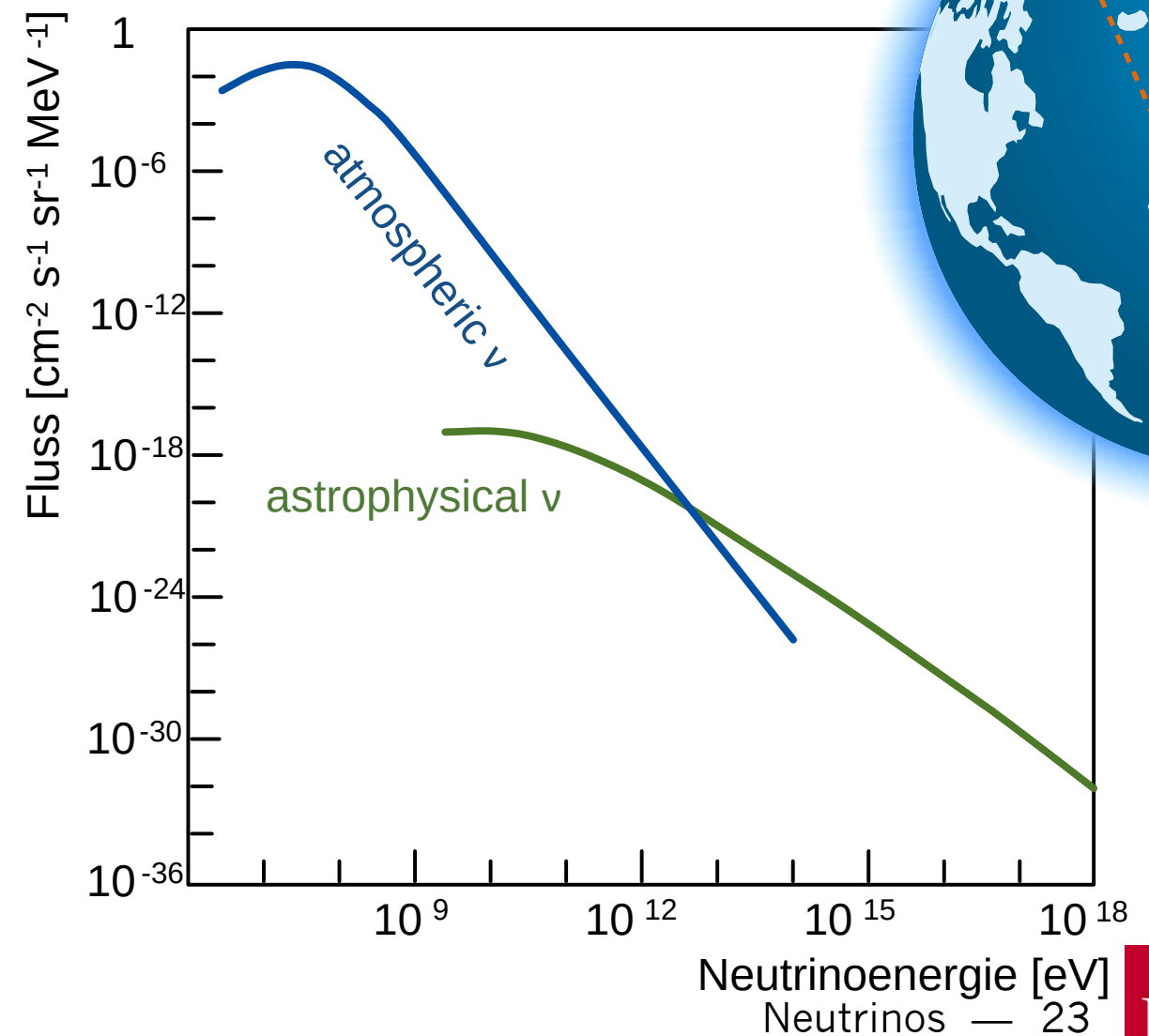
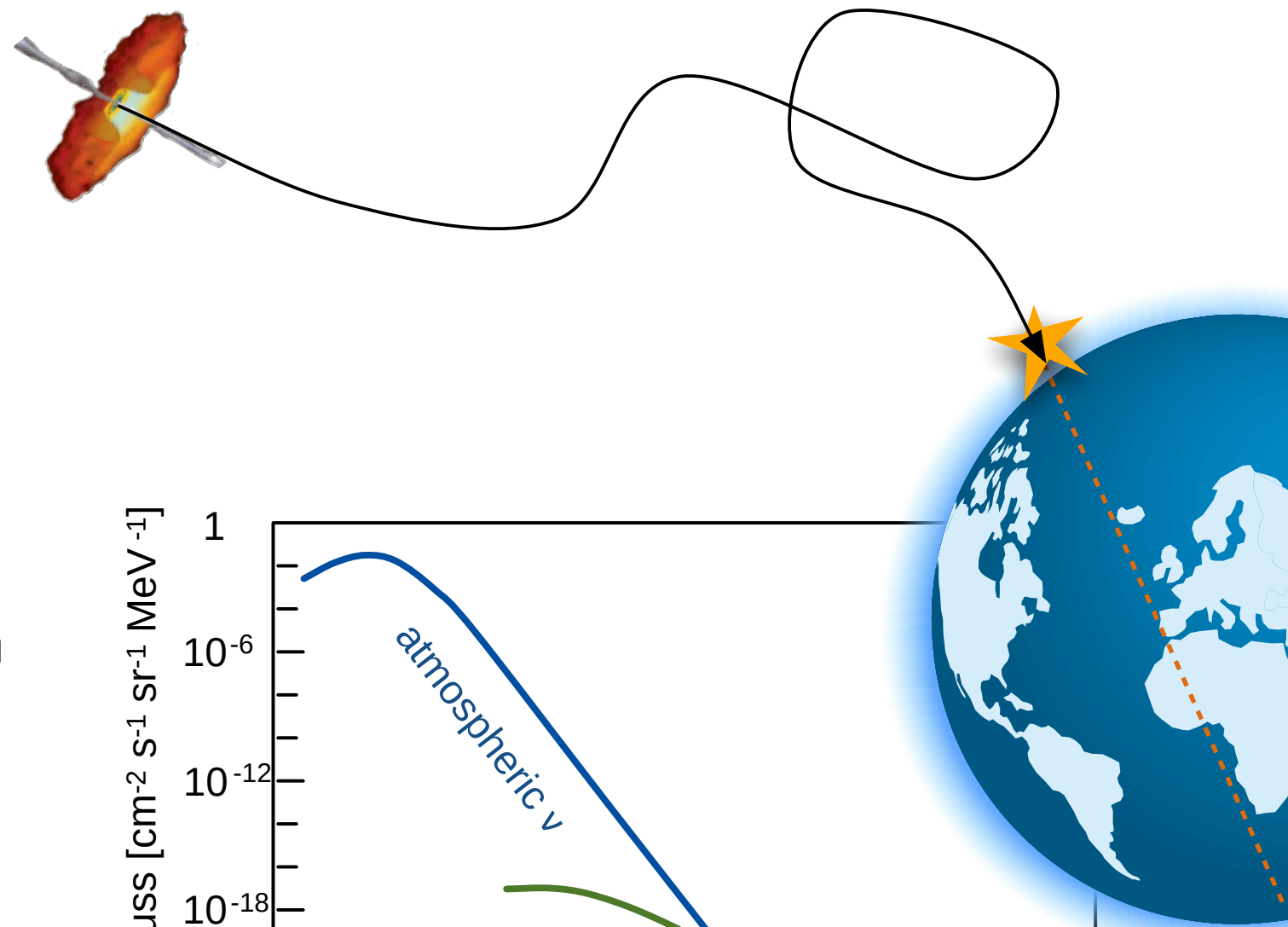
Teilchen in IceCube

Astrophysikalische Neutrinos

- aus den Quellen der kosmischen Strahlung

Atmosphärische Neutrinos

- Wechselwirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre
- ▶ geringere Energie



Teilchen in IceCube

Astrophysikalische Neutrinos

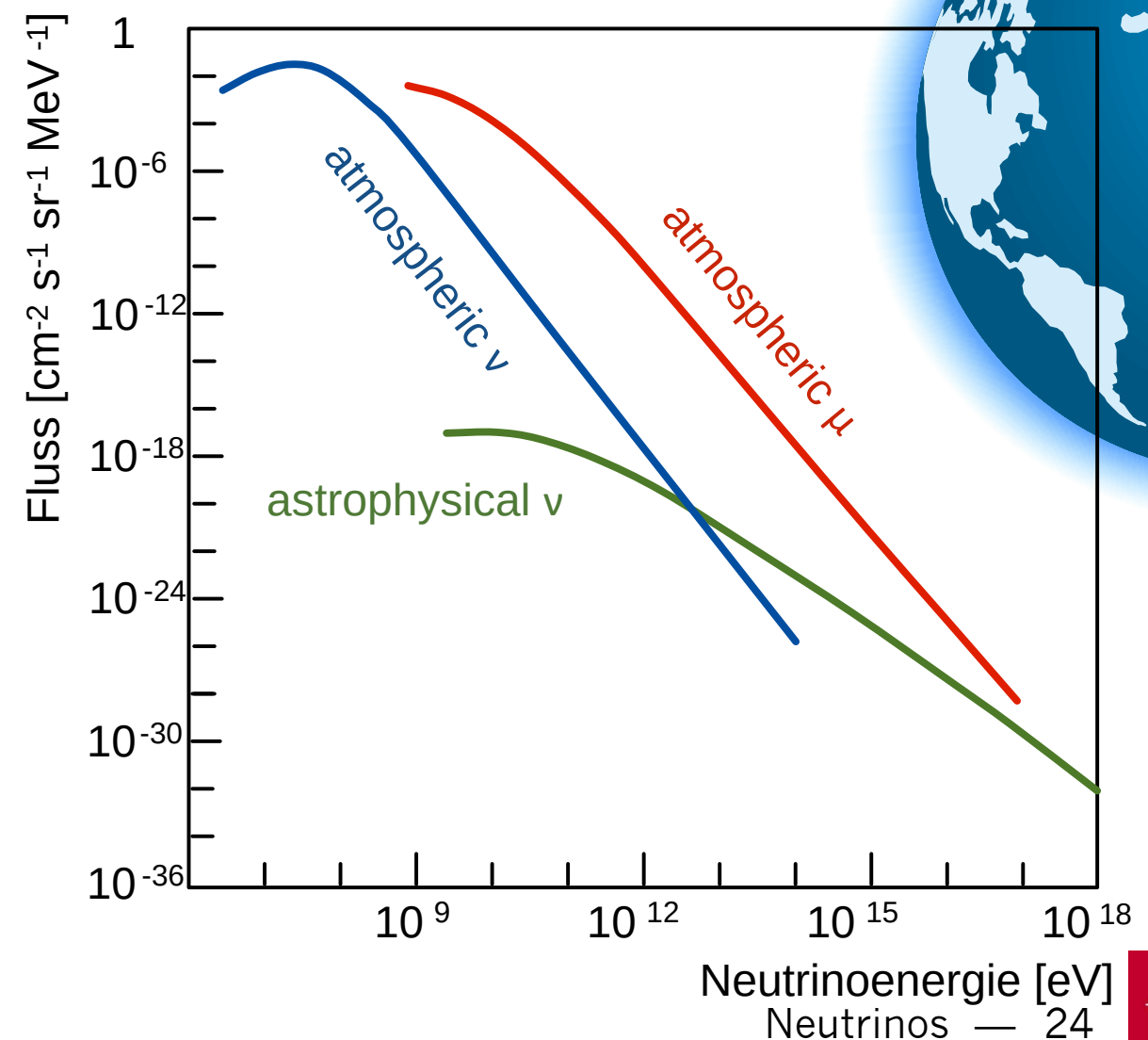
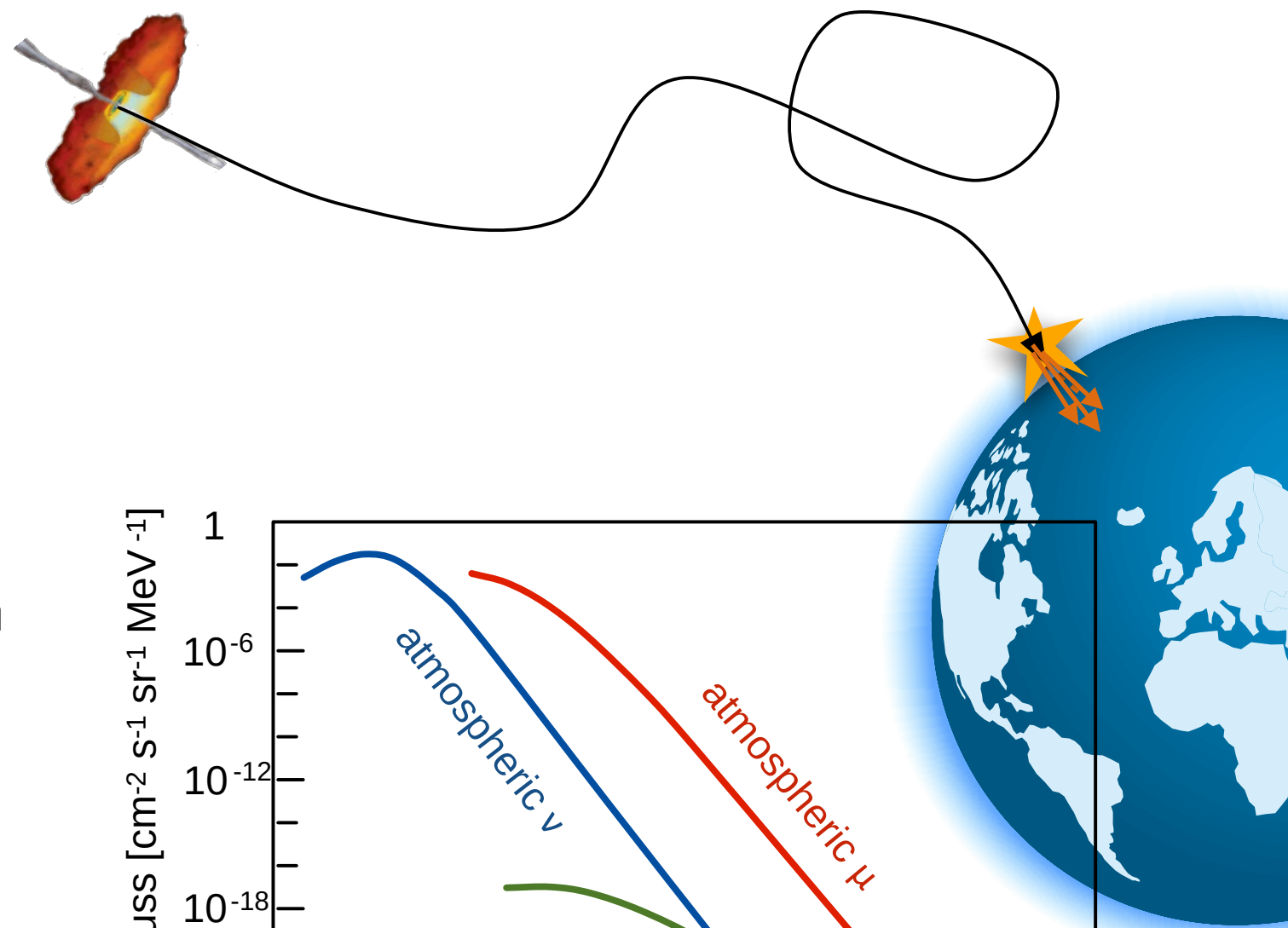
- aus den Quellen der kosmischen Strahlung
 - ▶ ca. 10 pro Jahr

Atmosphärische Neutrinos

- Wechselwirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre
 - ▶ geringere Energie
 - ca. 150 pro Tag

Atmosphärische Myonen

- Wechselwirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre



Teilchen in IceCube

Astrophysikalische Neutrinos

- aus den Quellen der kosmischen Strahlung
 - ▶ ca. 10 pro Jahr

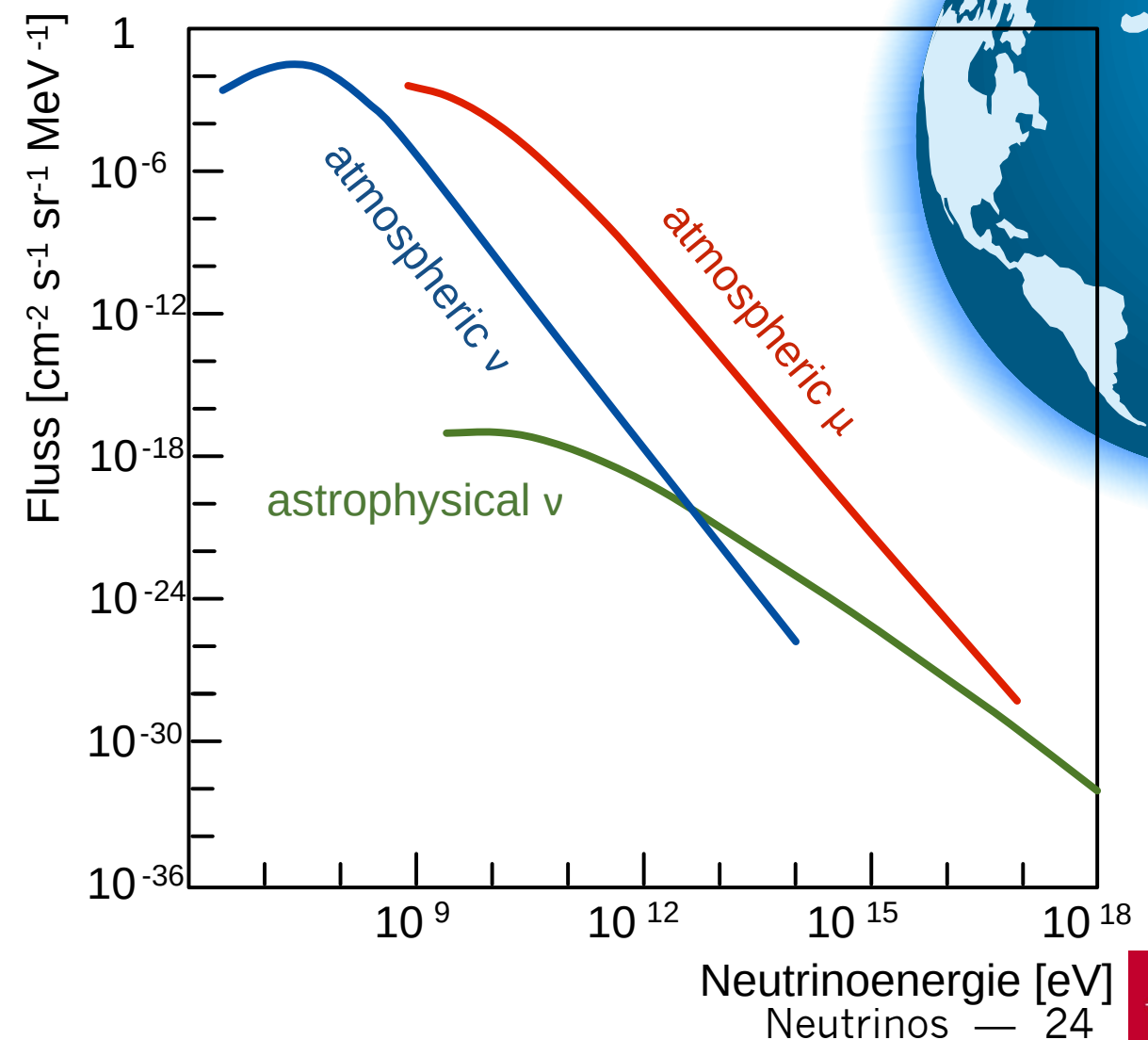
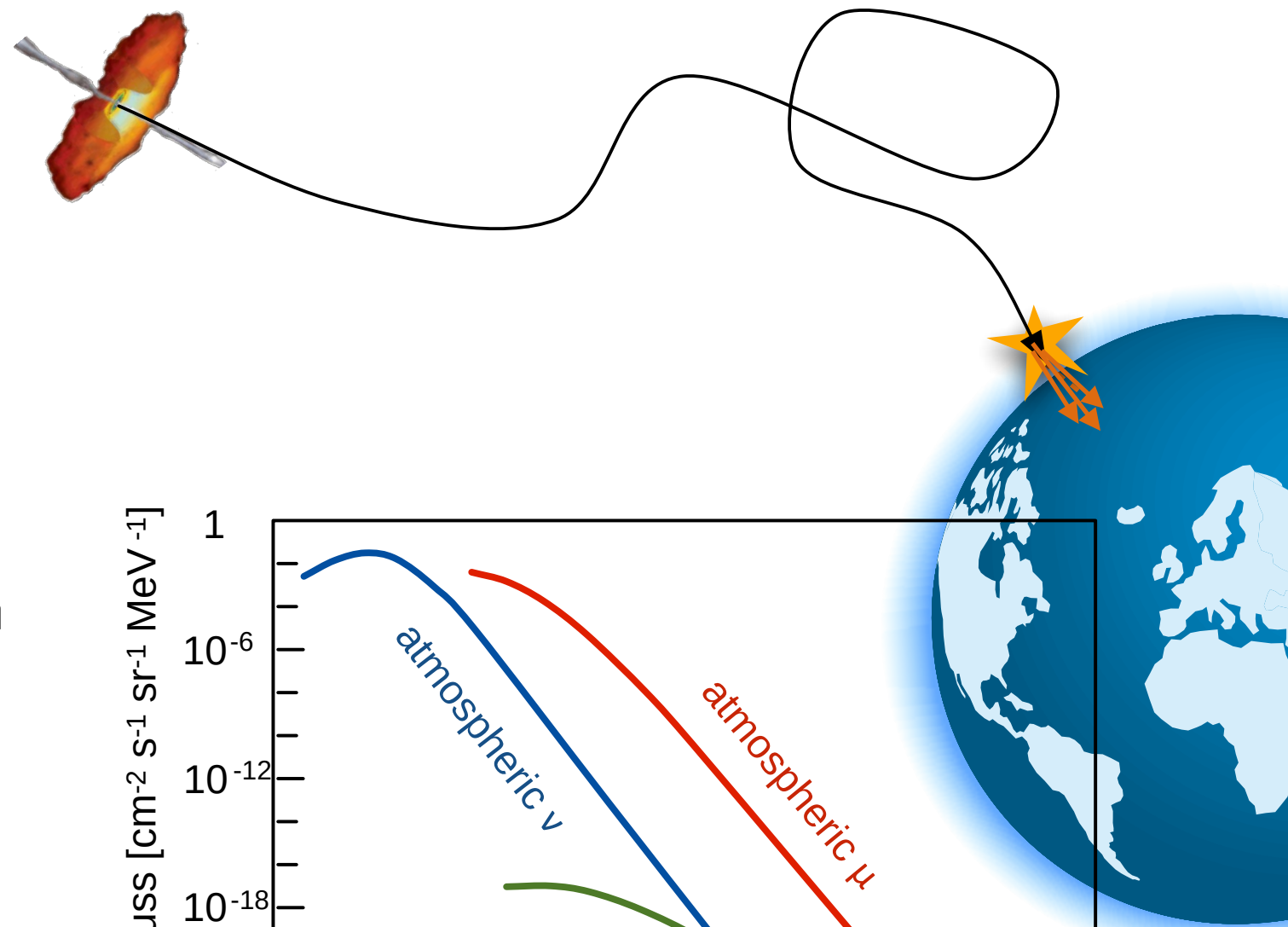
Atmosphärische Neutrinos

- Wechselwirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre
 - ▶ geringere Energie
 - ca. 150 pro Tag

Atmosphärische Myonen

- Wechselwirkung

Spuren die die Erde durchqueren
oder im Detektor starten!



Teilchen in IceCube

Astrophysikalische Neutrinos

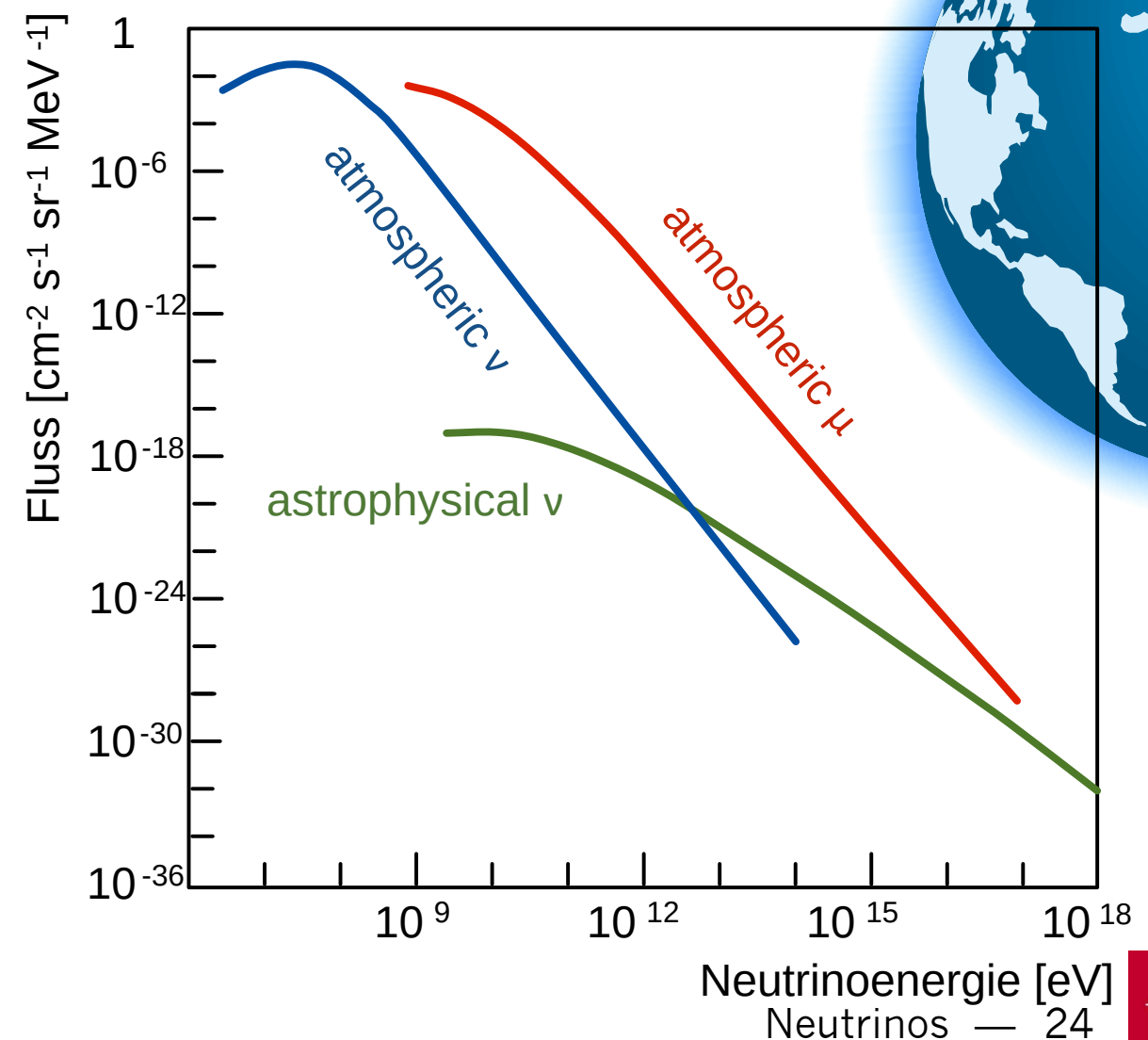
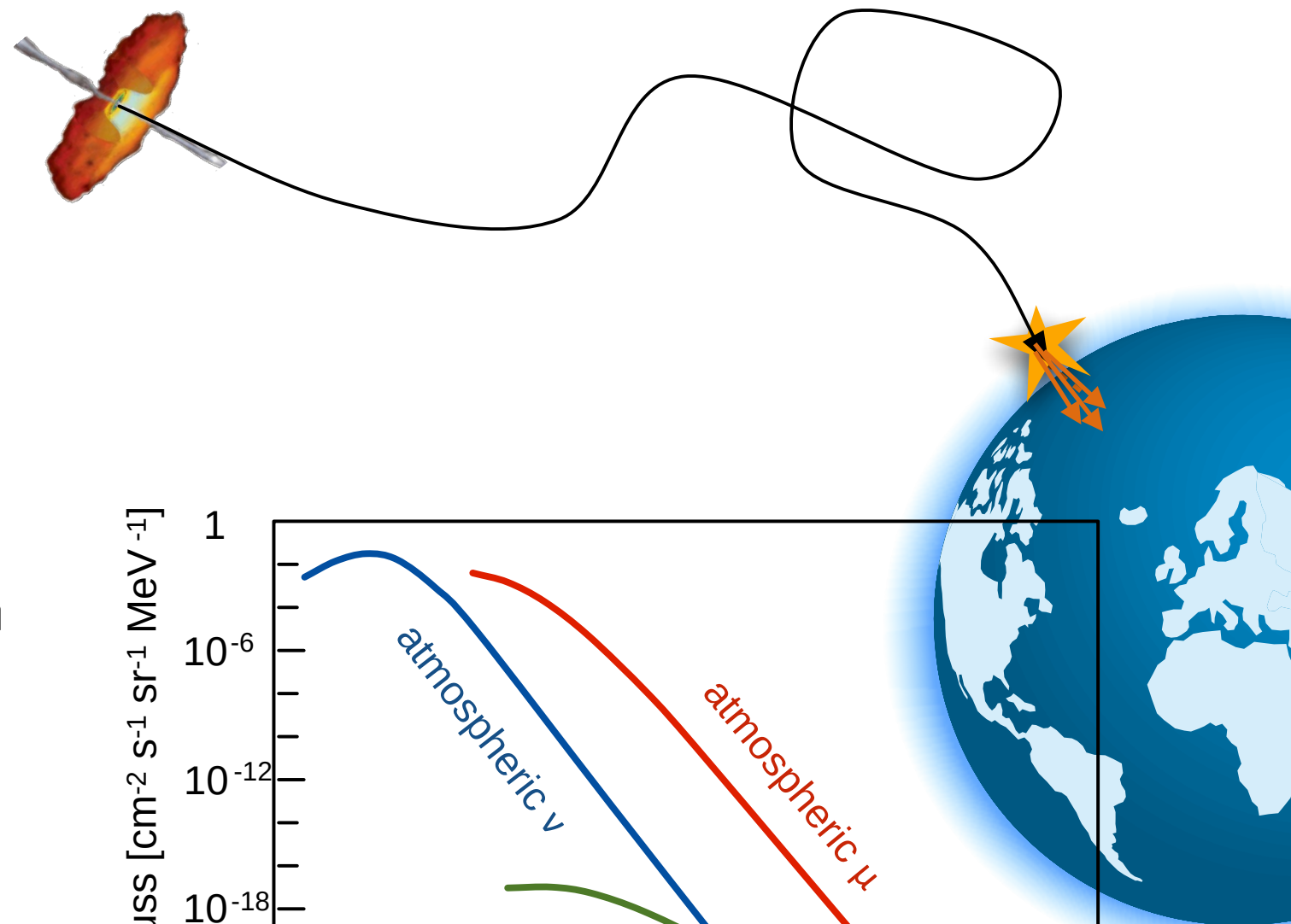
- aus den Quellen der kosmischen Strahlung
- ▶ ca. 10 pro Jahr

Atmosphärische Neutrinos

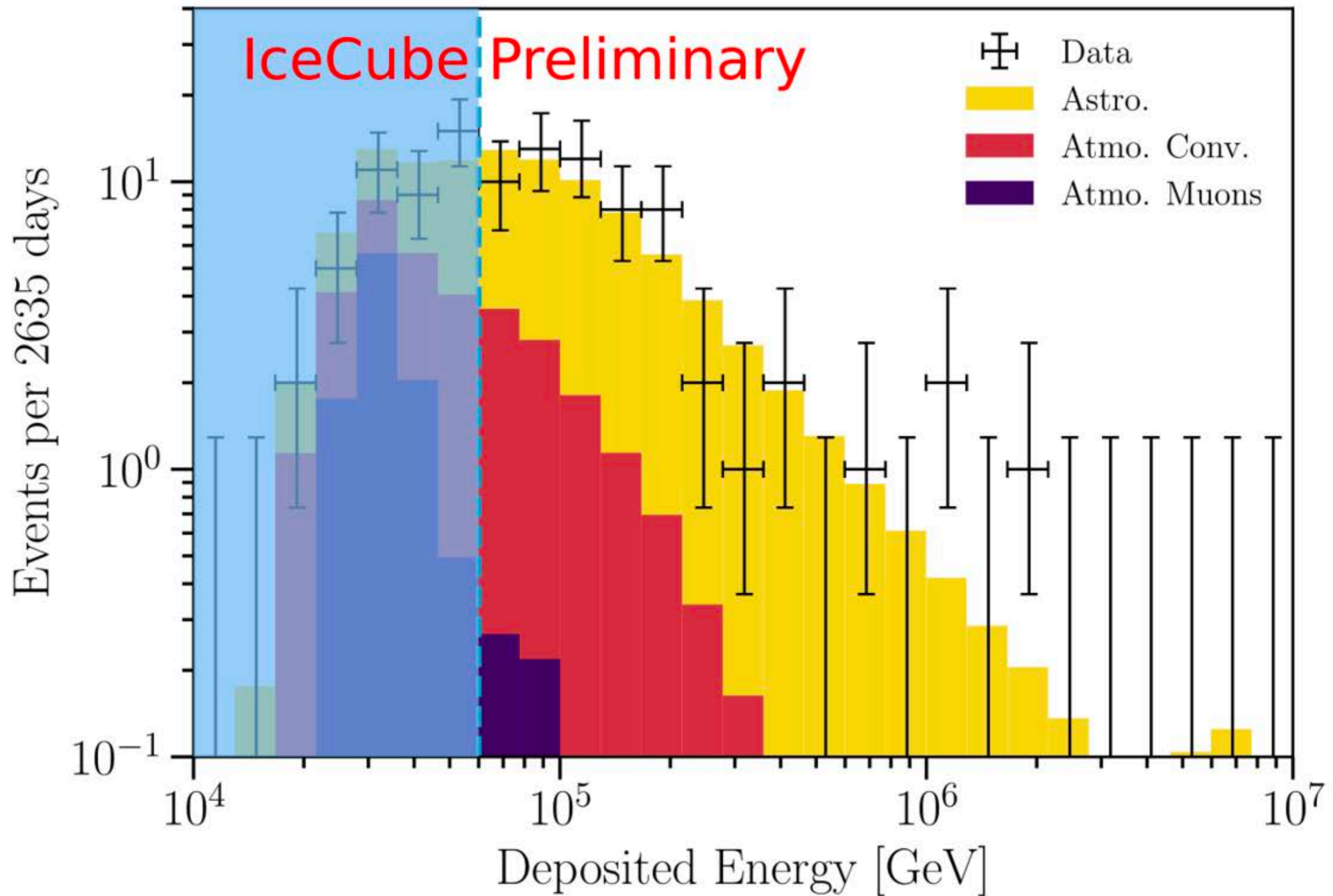
- Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre
- Ereignisse mit höchsten Energien!
- ca. 150 pro Tag

Atmosphärische Myonen

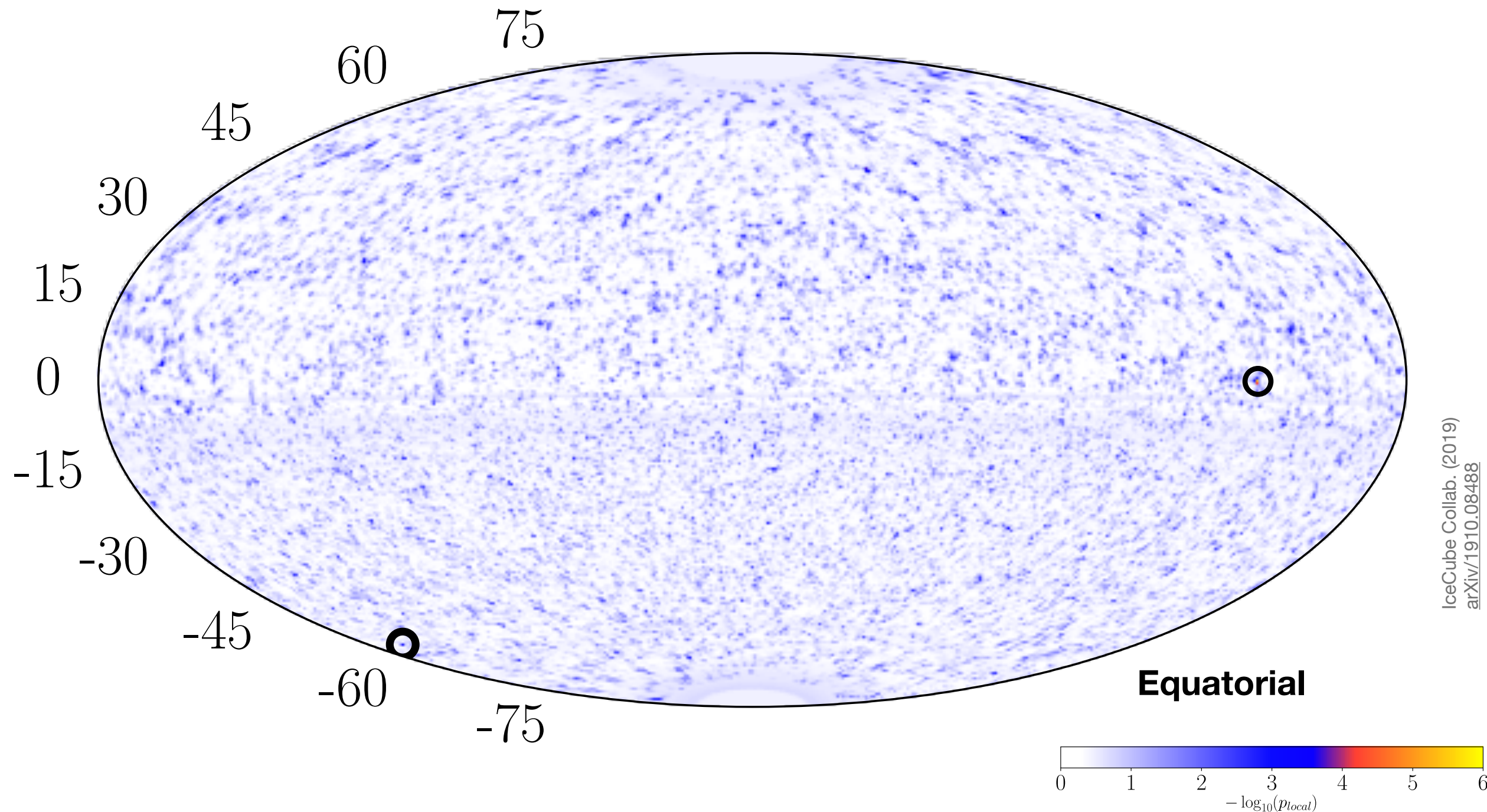
- Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre
- Spuren die die Erde durchqueren oder im Detektor starten!



Neutrinoastronomie!



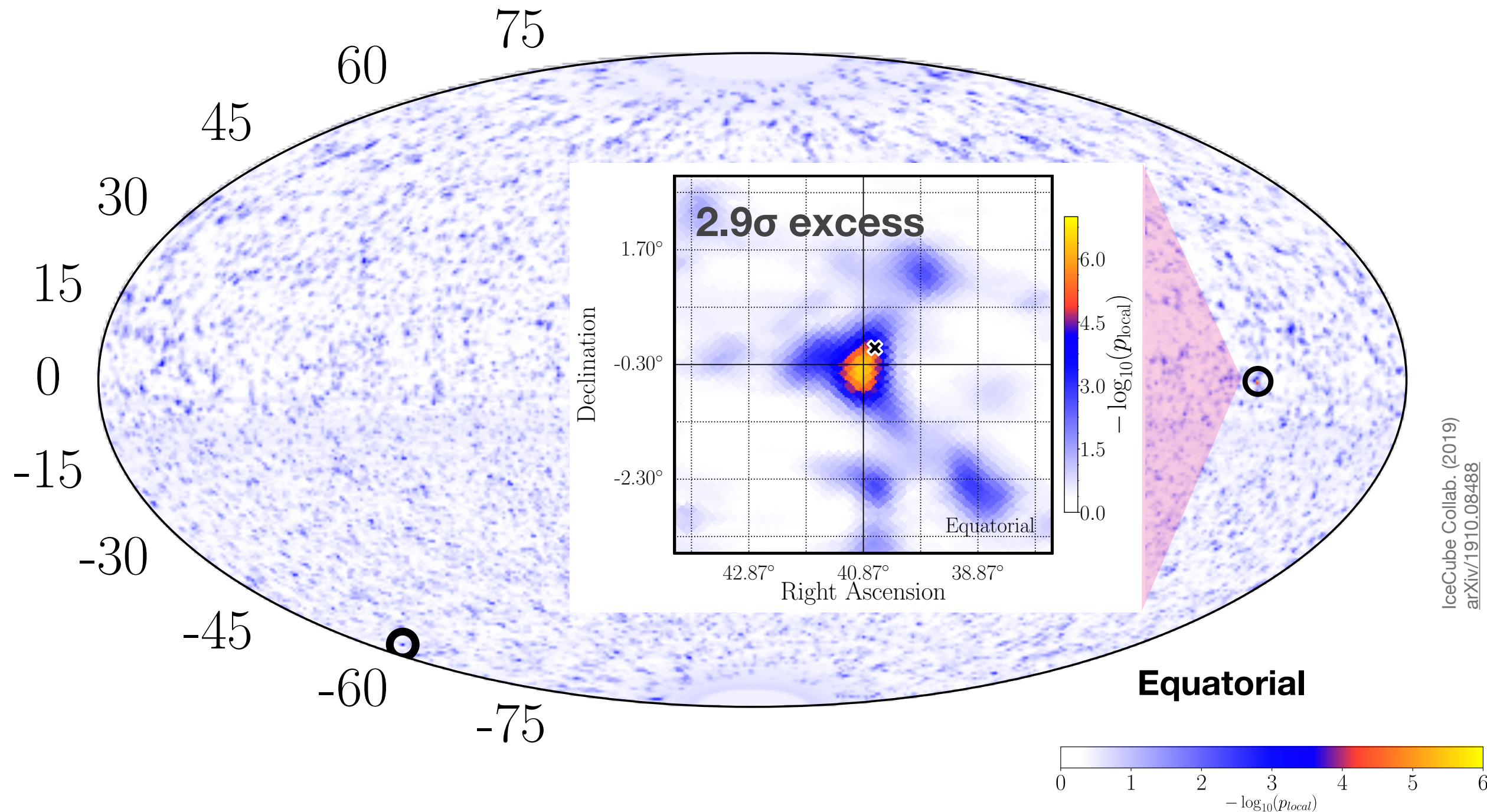
Suche nach Punktquellen



Heißeste Quelle am Himmel hat Neutrinoüberschuss von **2.9σ**

► nahe an der *Entdeckeckungsschwelle*

Suche nach Punktquellen

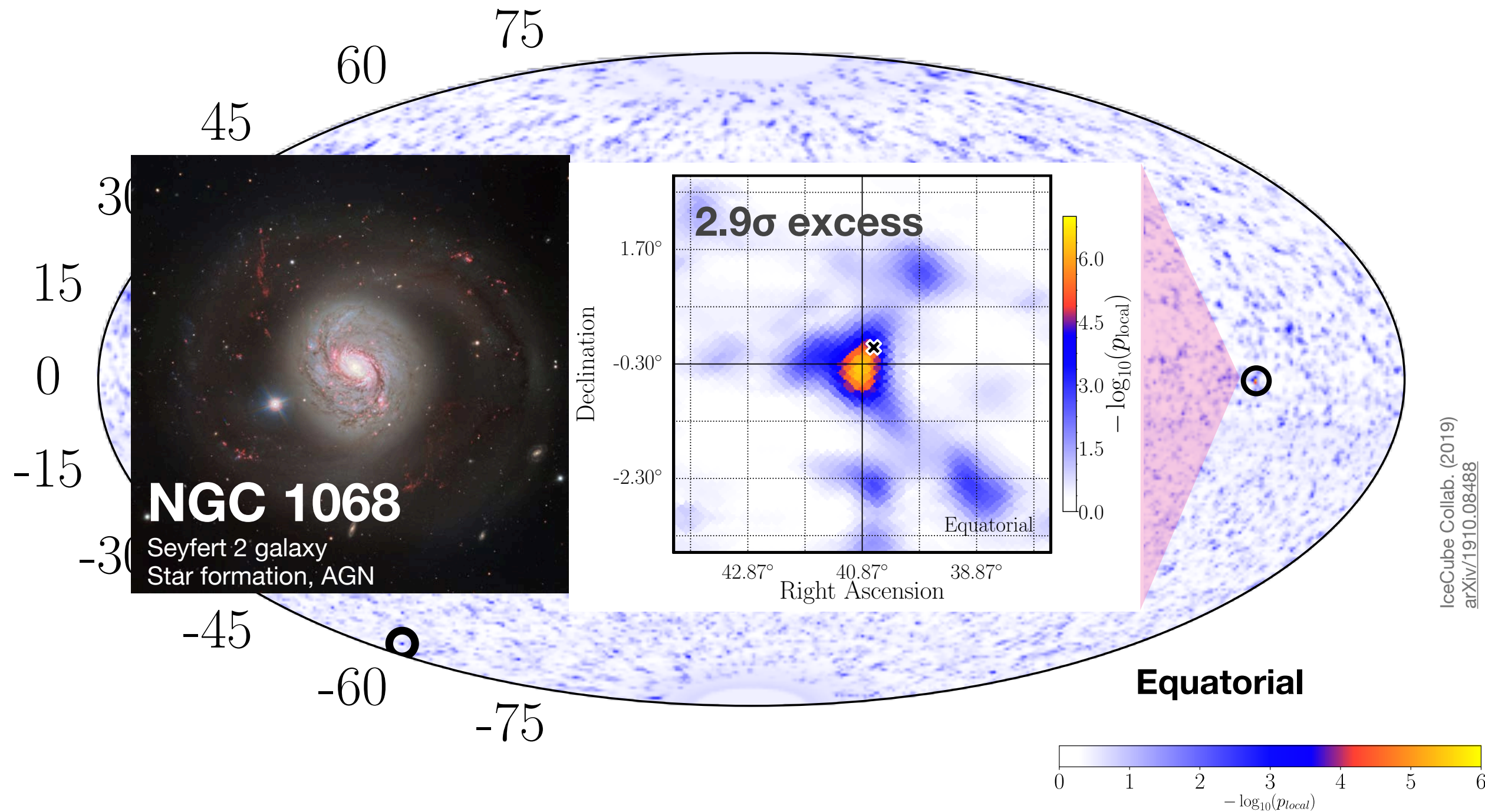


IceCube Collab. (2019)
arXiv/1910.08488

Heißeste Quelle am Himmel hat Neutrinoüberschuss von **2.9 σ**

► nahe an der *Entdeckeckungsschwelle*

Suche nach Punktquellen

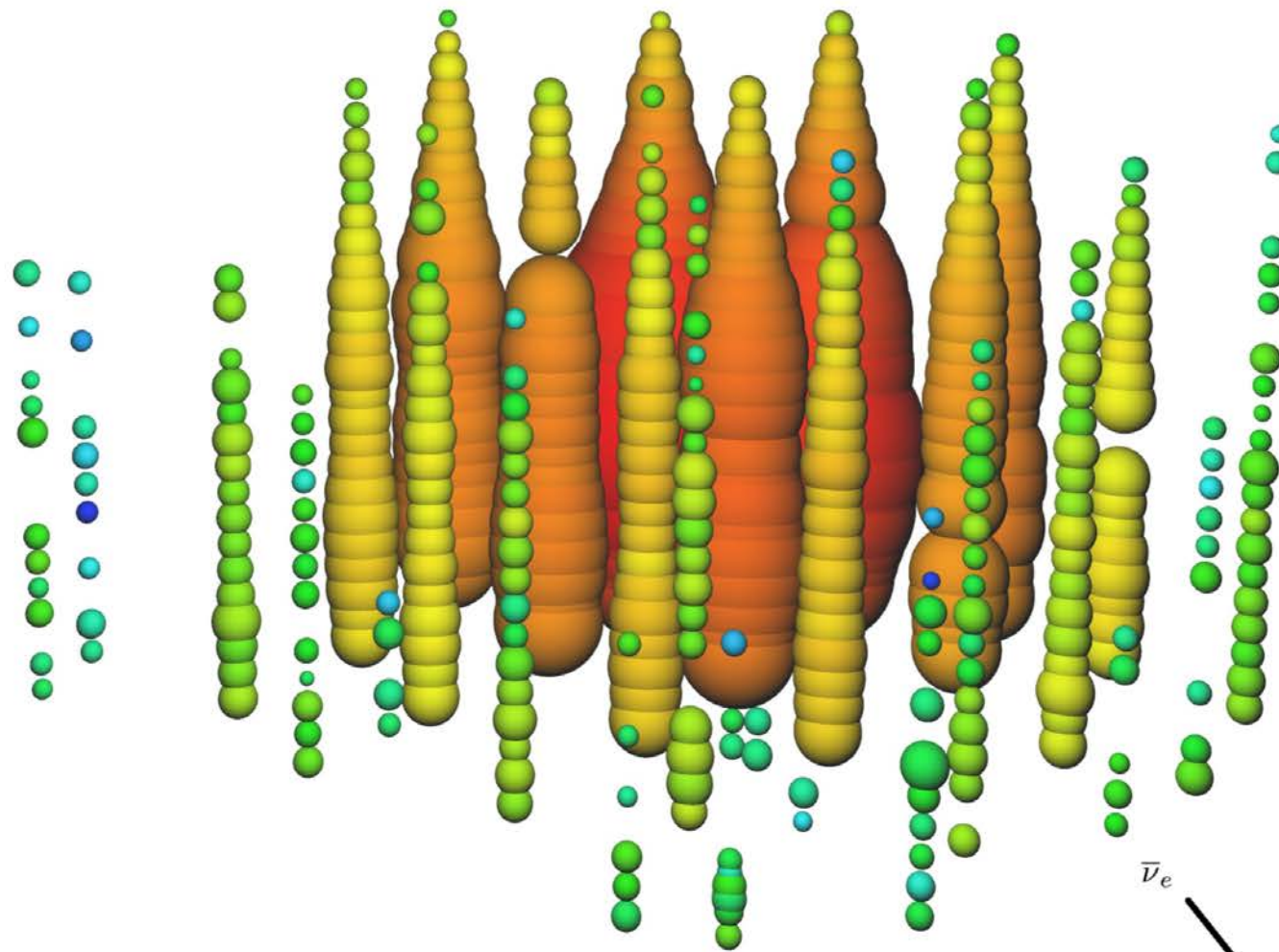


IceCube Collab. (2019)
arXiv/1910.08488

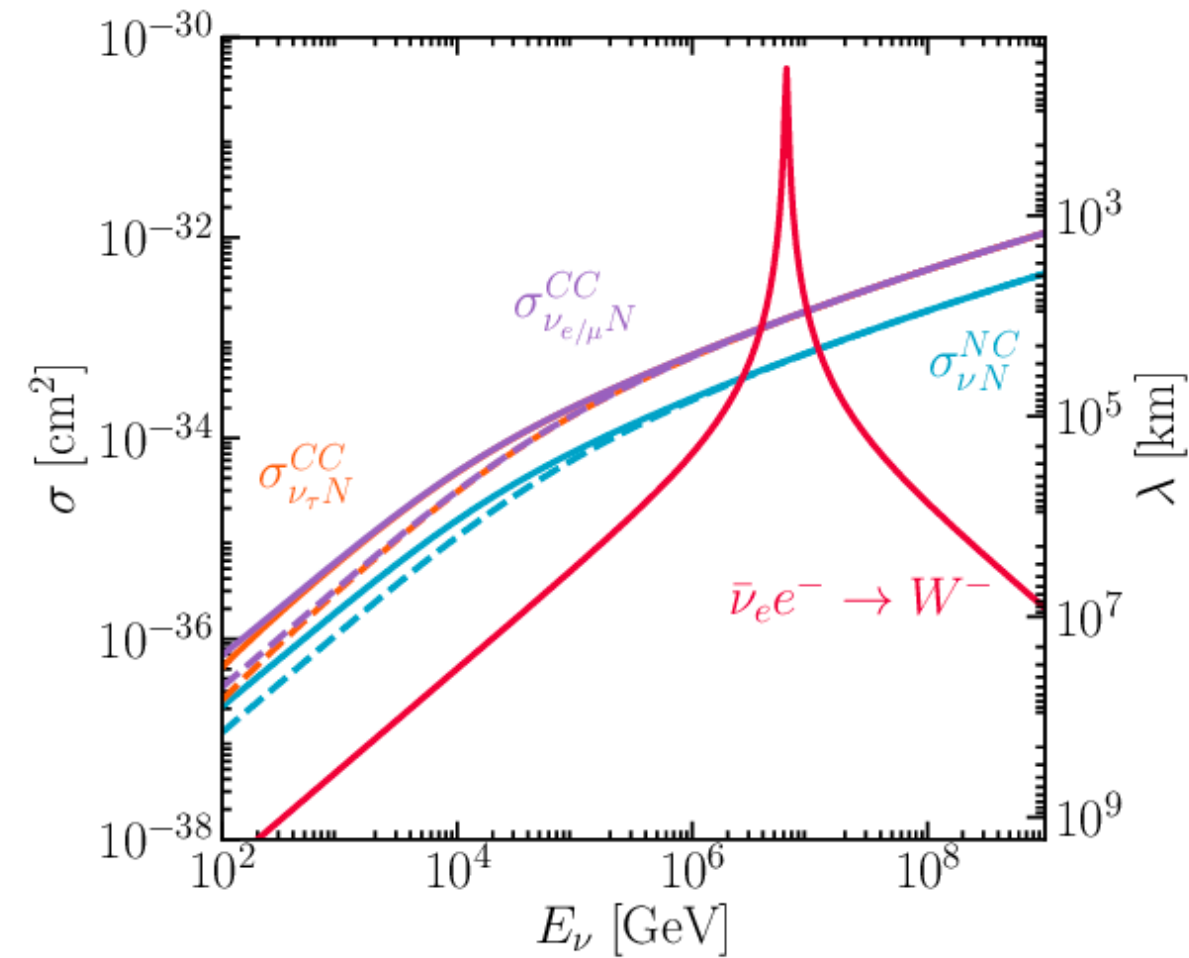
Heißeste Quelle am Himmel hat Neutrinoüberschuss von **2.9σ**

► nahe an der *Entdeckeckungsschwelle*

Teilchenphysik bei höchsten Energien

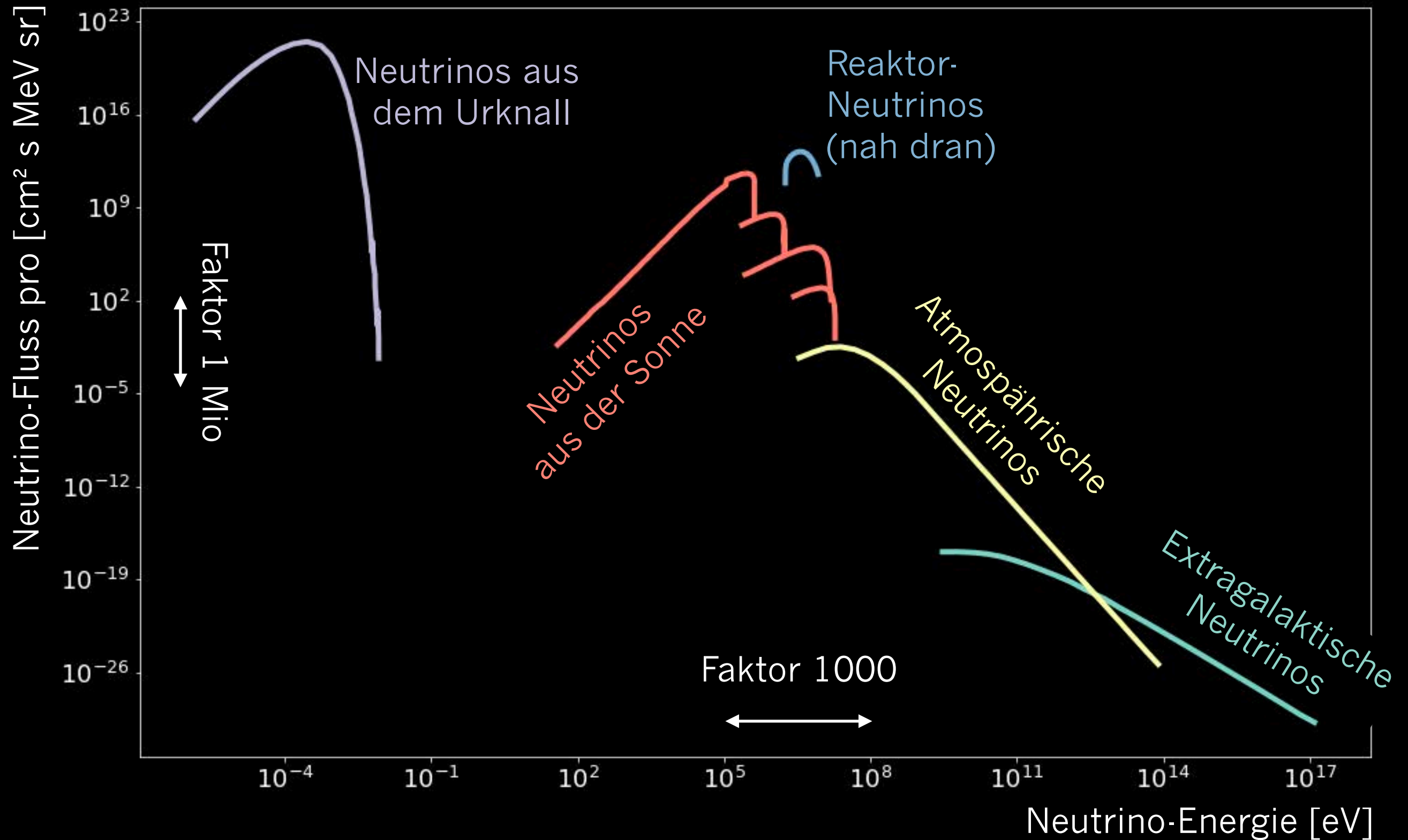


W boson resonance , nuebar 6.3 PeV
IceCube, 2021

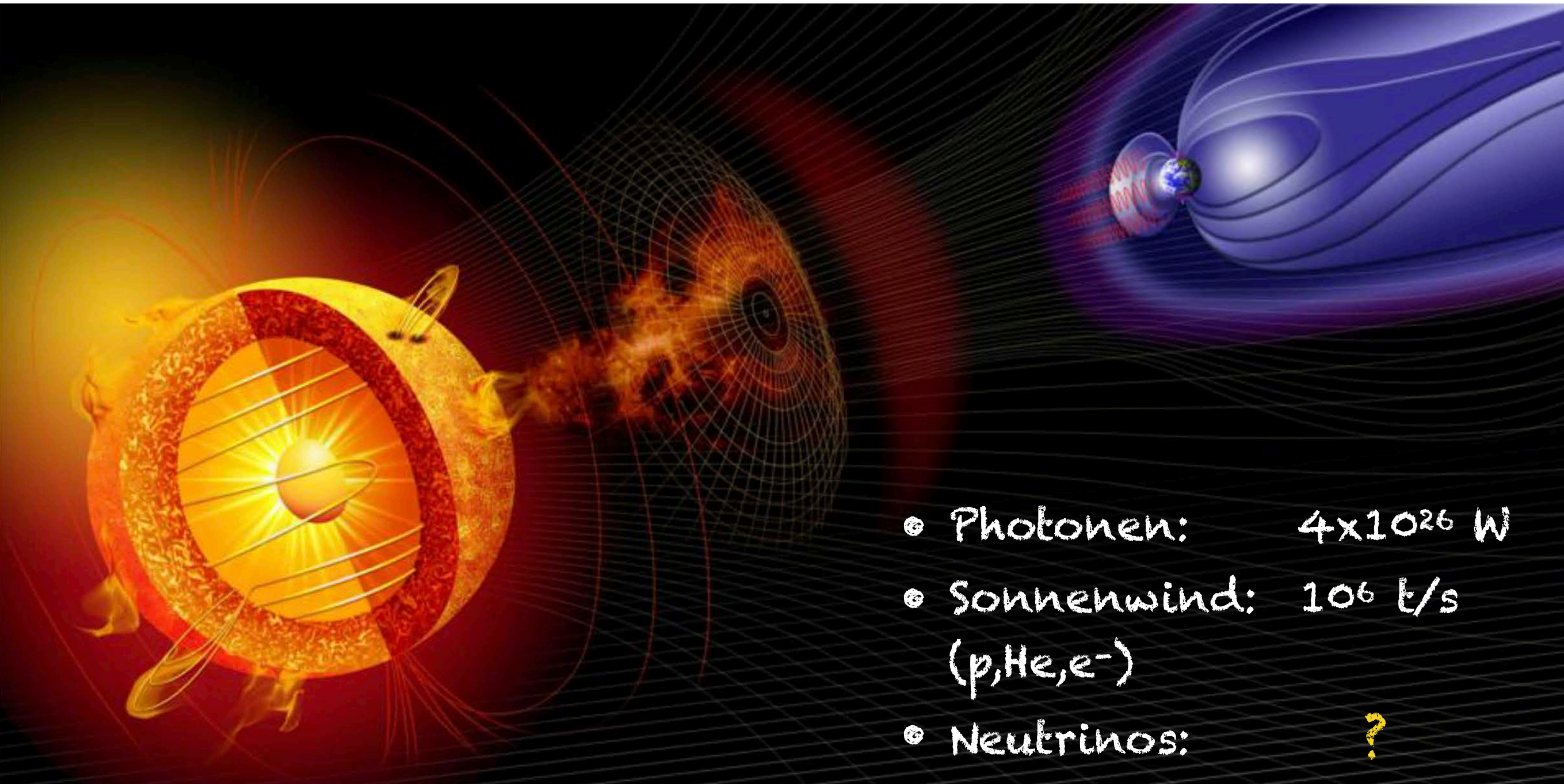


Resonante Erzeugung eines W-Bosons bei $6,3 \cdot 10^{15}$ eV!

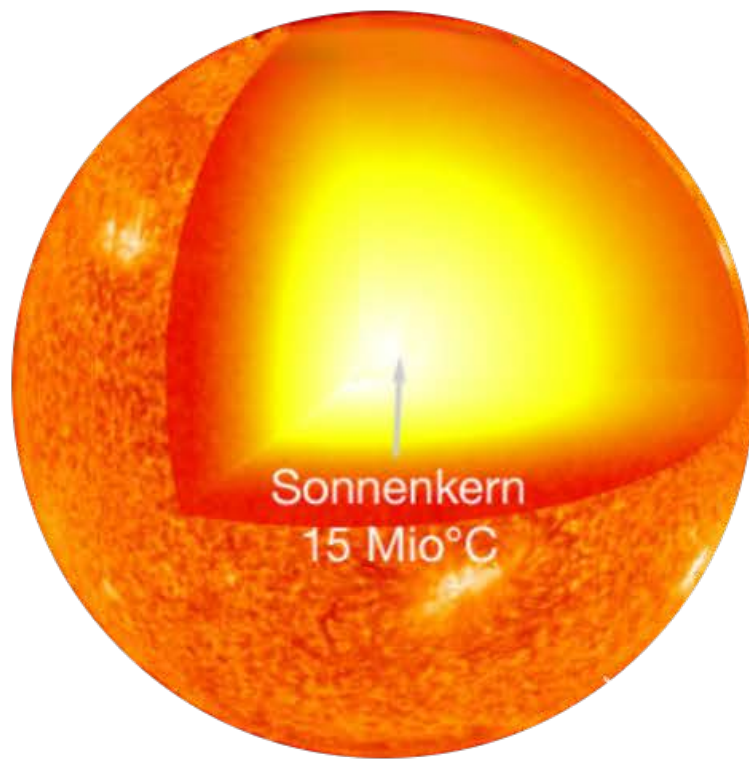
Neutrinos überall...



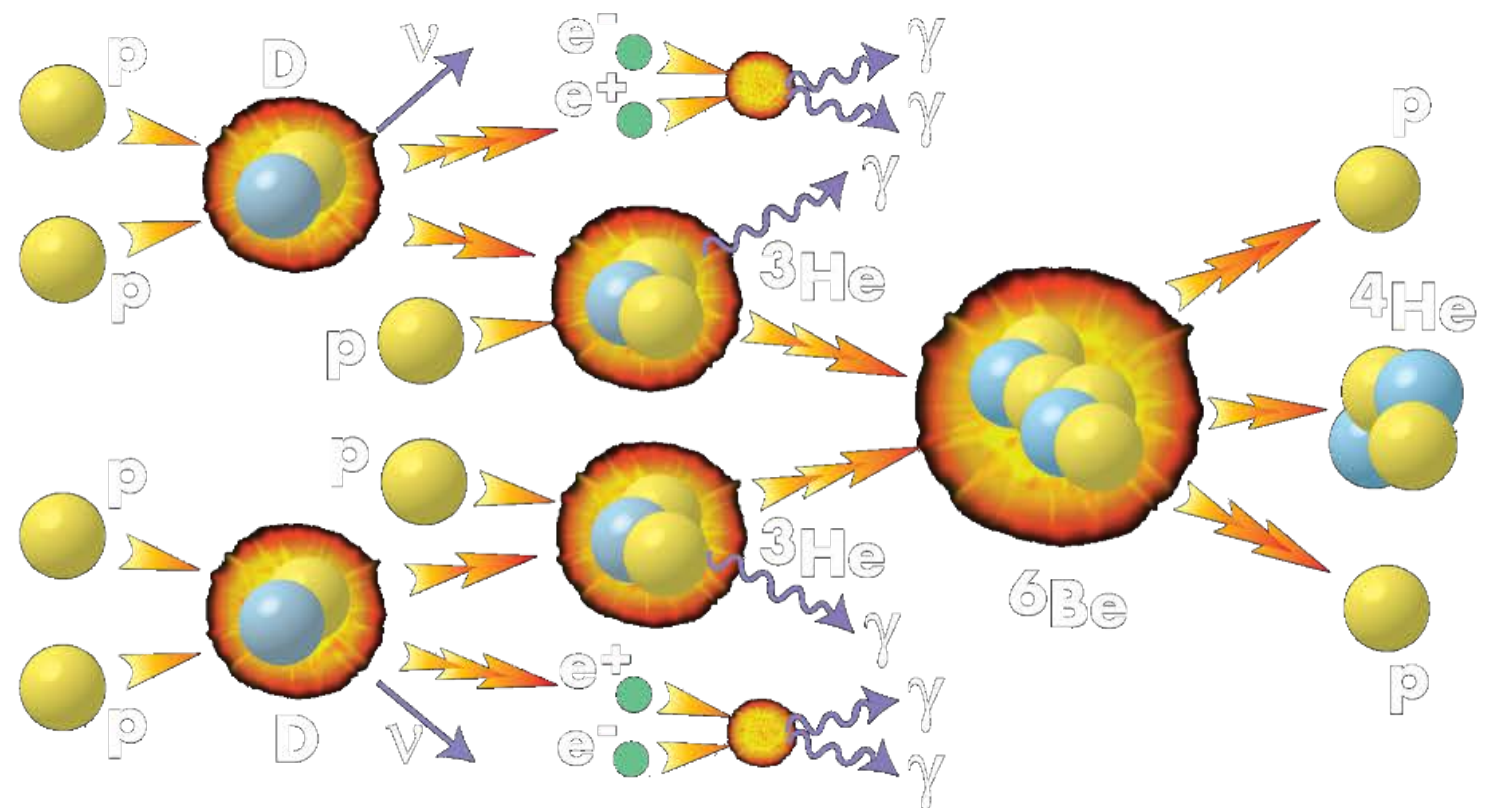
Solare Exportpartikel



Fusion im Sonneninneren



p	Proton (^1H)
D	Deuteron (^2H)
He	Helium (^3He , ^4He)
e^-	Elektron
e^+	Positron
γ	Gamma-Quant
ν	Neutrino



Netto-Reaktion: $4p \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 26.7 \text{ MeV}$

→ 2ν's pro gebildeten ^4He -Kern

Wie viele sind viele?

e.m. Strahlung

$$L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$$



γ

Neutrino-Strahlungsleistung

$$L_{\nu} \approx 2\% L_{\odot}$$



ν

Solare Konstante

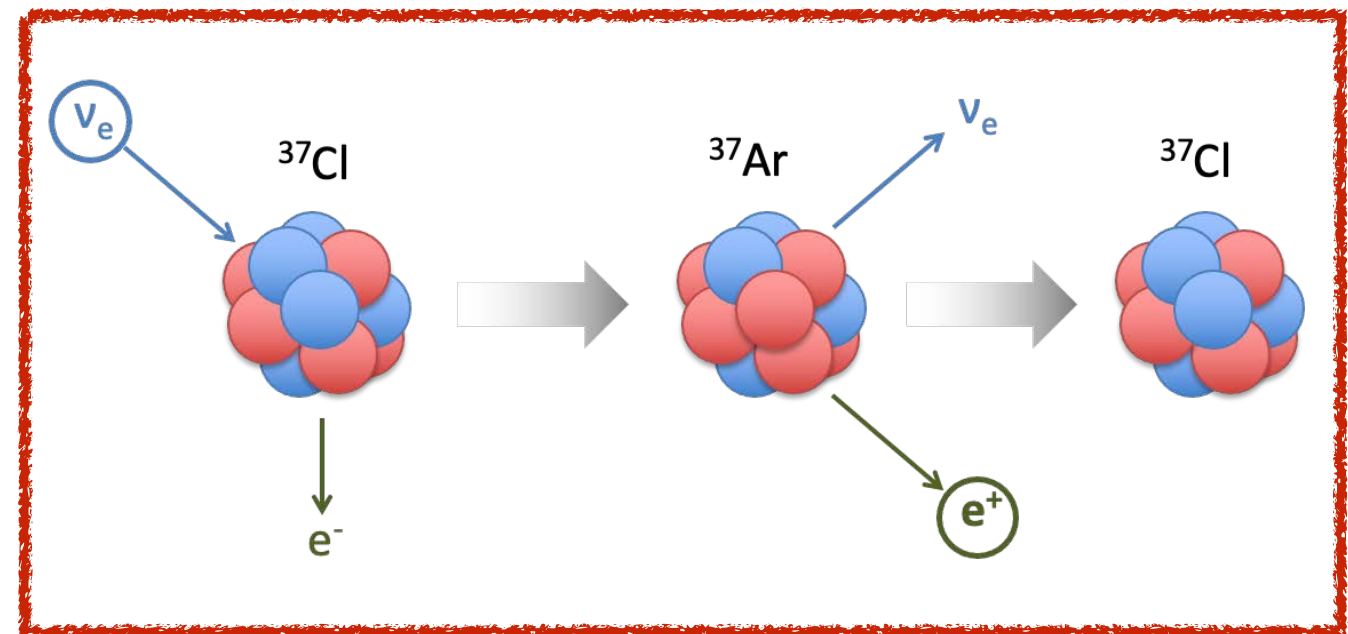
$$S = 1360 \text{ W/m}^2$$



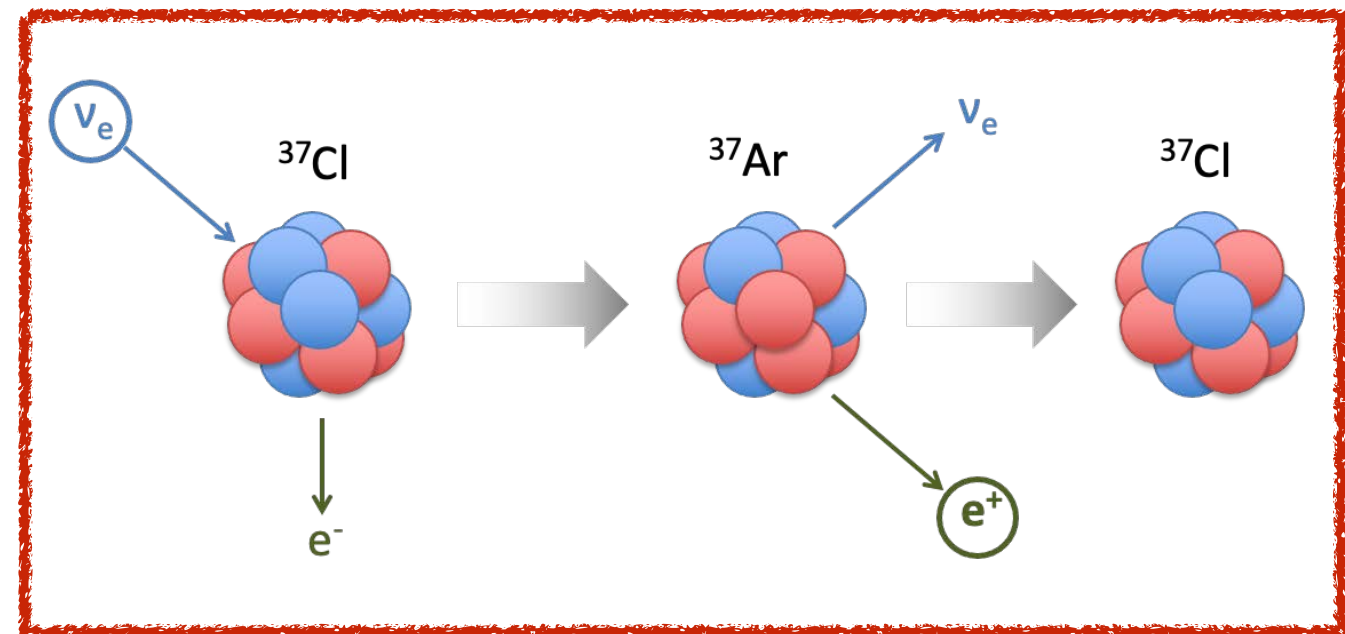
Neutrinofluss auf der Erde:

60 Mrd. pro cm^2 und sec

Erster Nachweis: Homestake-Experiment (1969)

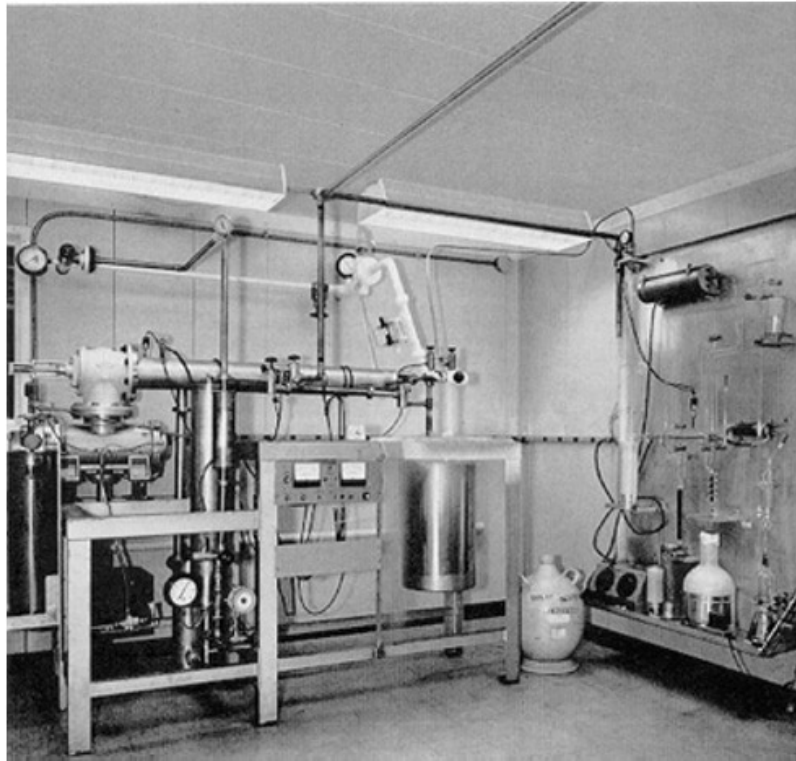


Erster Nachweis: Homestake-Experiment (1969)



circa 15 Neutrinos pro Monat!

Radiochemischer Nachweis von Sonnenneutrinos



Extraktion des Argons

- Ausspülen der ^{37}Ar -Atome mit He (erwartete Produktionsrate: 1 Atom/Tag)
- Ausfrieren der Ar-Atome auf Aktivkohlefilter
- Einfüllen in Proportionalzählrohr
- Messung des Rückzerfalls zu Chlor

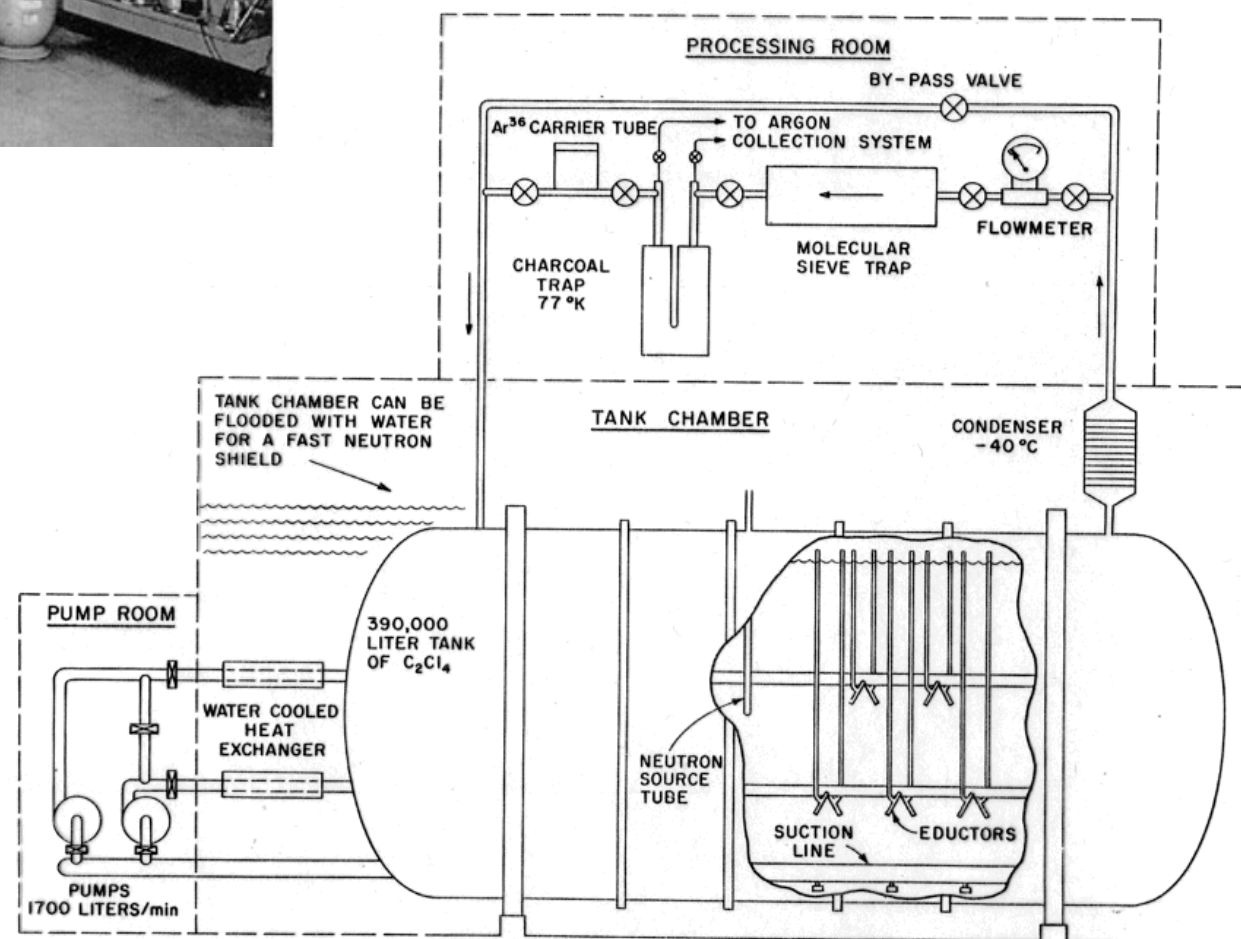


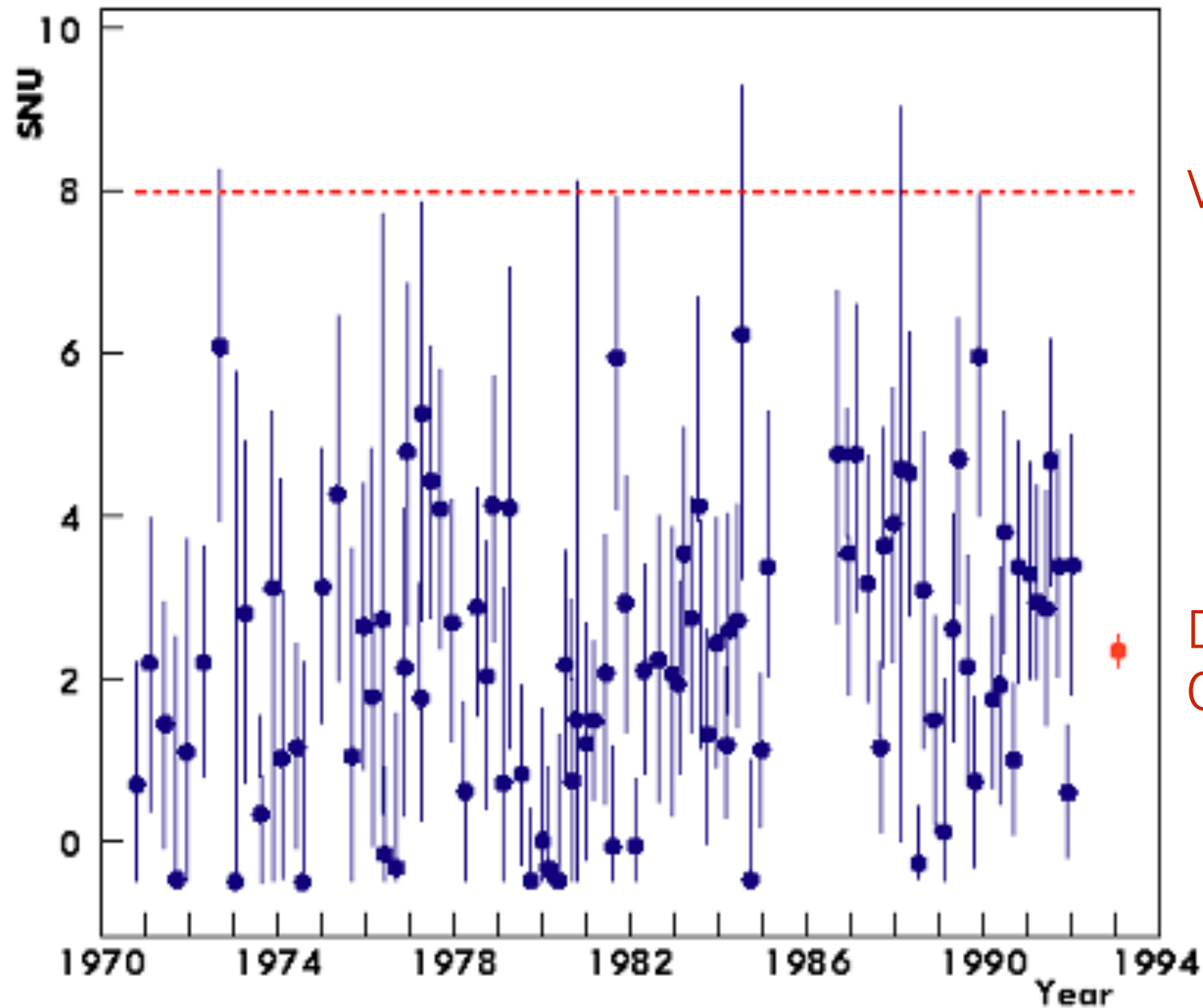
Figure 2.3. Schematic drawing of the argon recovery system. The pump-eductor system forces helium gas through the tetrachloroethylene liquid and provides the helium gas flow through the argon collection system.



Ray Davis

Erste Messung von solaren Neutrinos!

Gemessene Ereignisrate



SNU = solar neutrino unit
1 reaction per 10^{36} target atoms and second

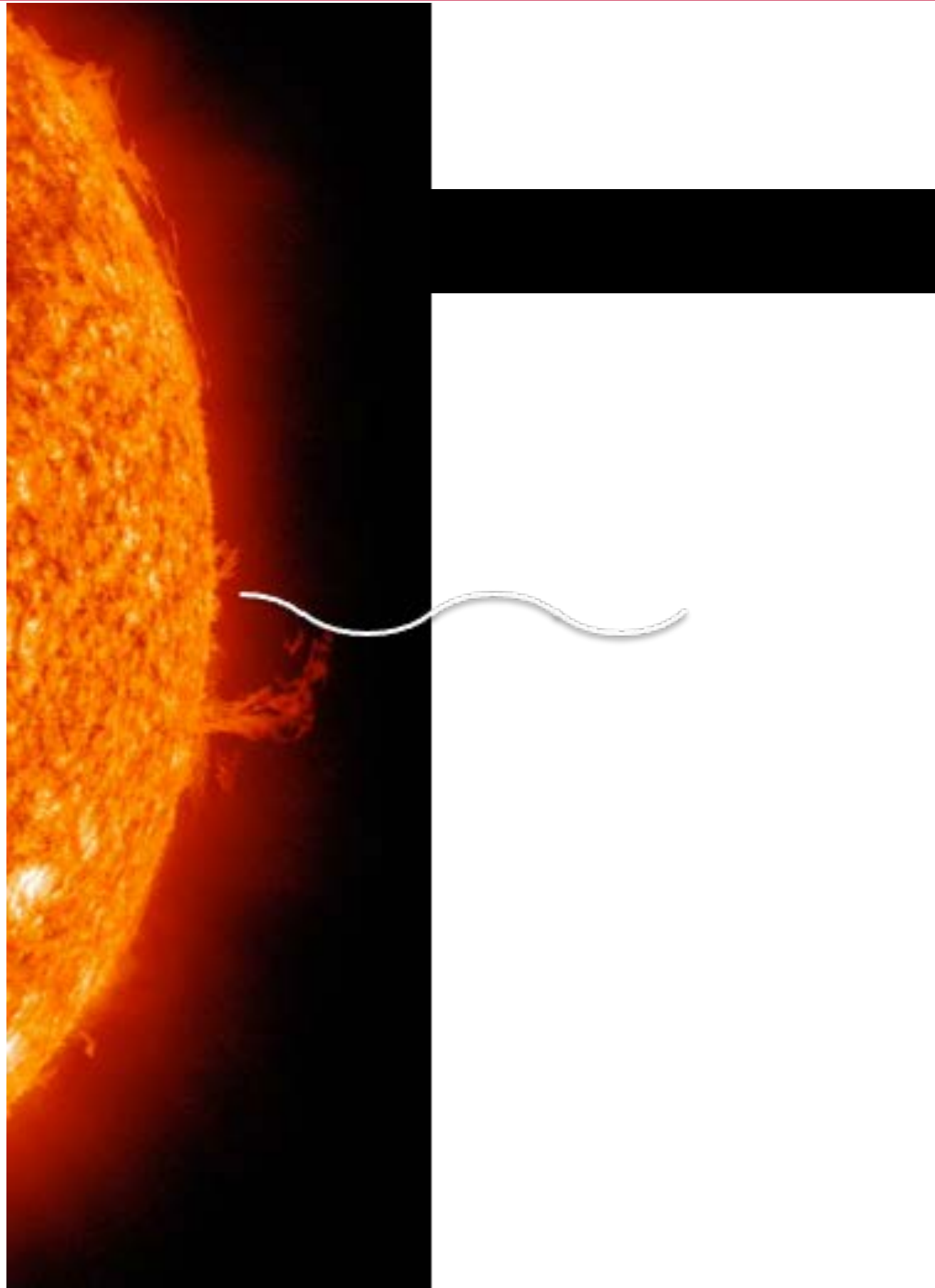
Vorhersage Sonnenmodell

Durchschnitt der
Chlor-Messungen



Ray Davis

Ursprung des solaren Neutrinorätsels



?

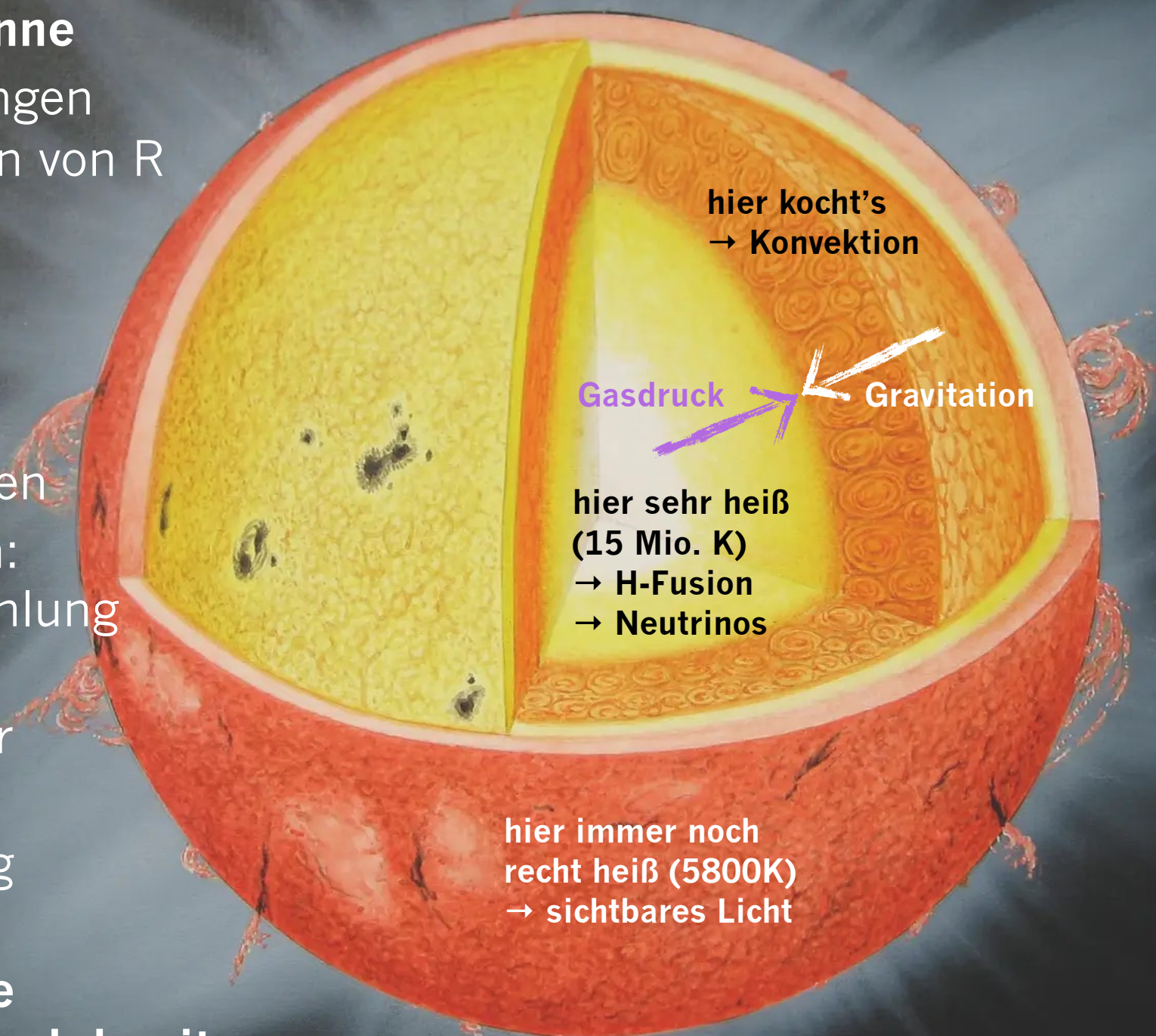
$$\Phi_{\text{obs}} \approx 1/3 \Phi_{\text{SSM}}$$



Standardsonnenmodell (SSM)

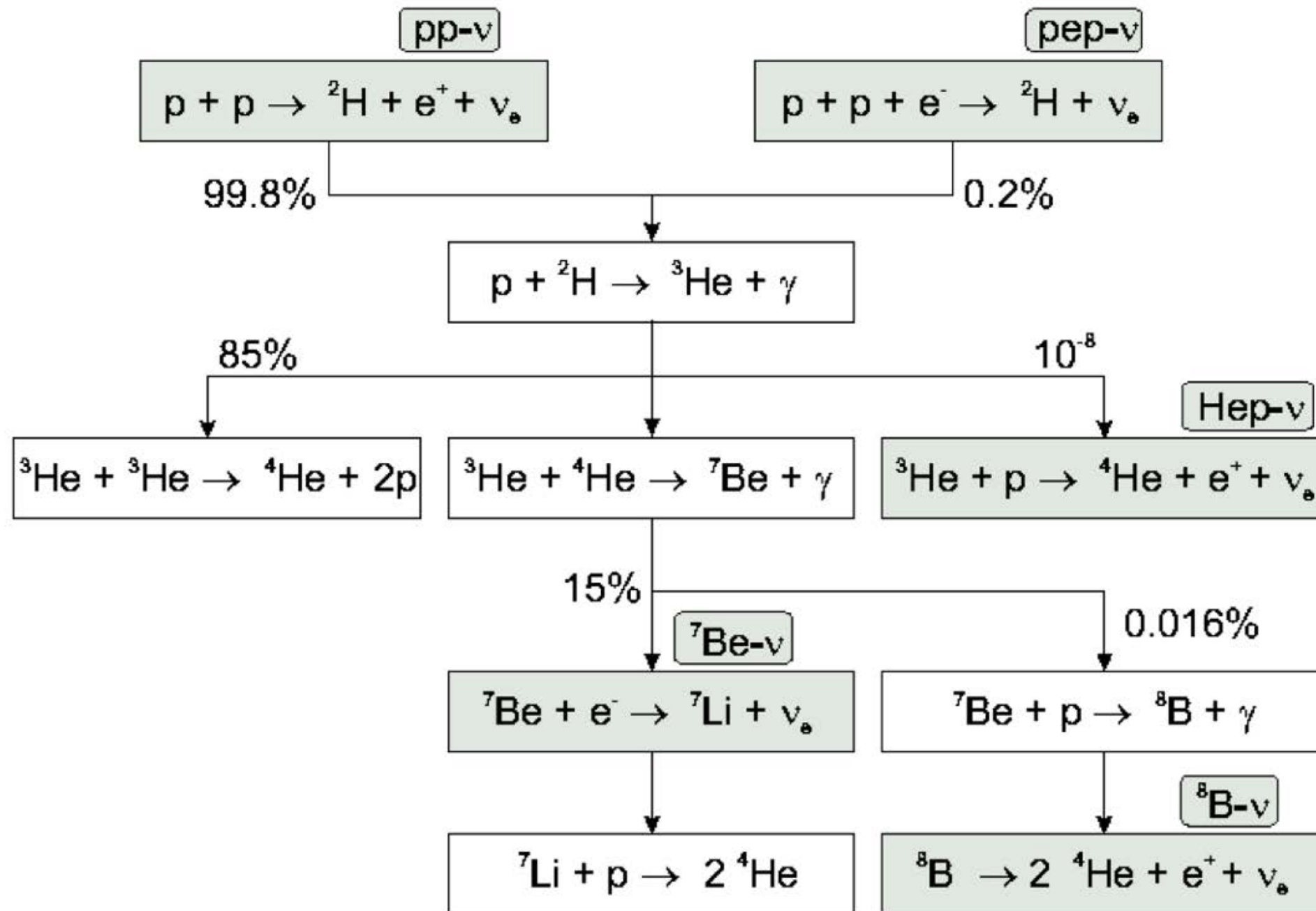
Beschreibung der Sonne

- Sternaufbaugleichungen
→ P , T , ρ als Funktion von R
 - Thermodynamik:
Zustandsgleichung
des Sonnenplasmas
 - Kernphysik:
WQ Fusionsreaktionen
 - Elementhäufigkeiten:
Absorption von Strahlung
 - Beobachtungen
der Oberfläche, Alter
- numerische Lösung
- **präzise Vorhersage
von Fusionsraten und damit
Neutrino-Produktionsraten**



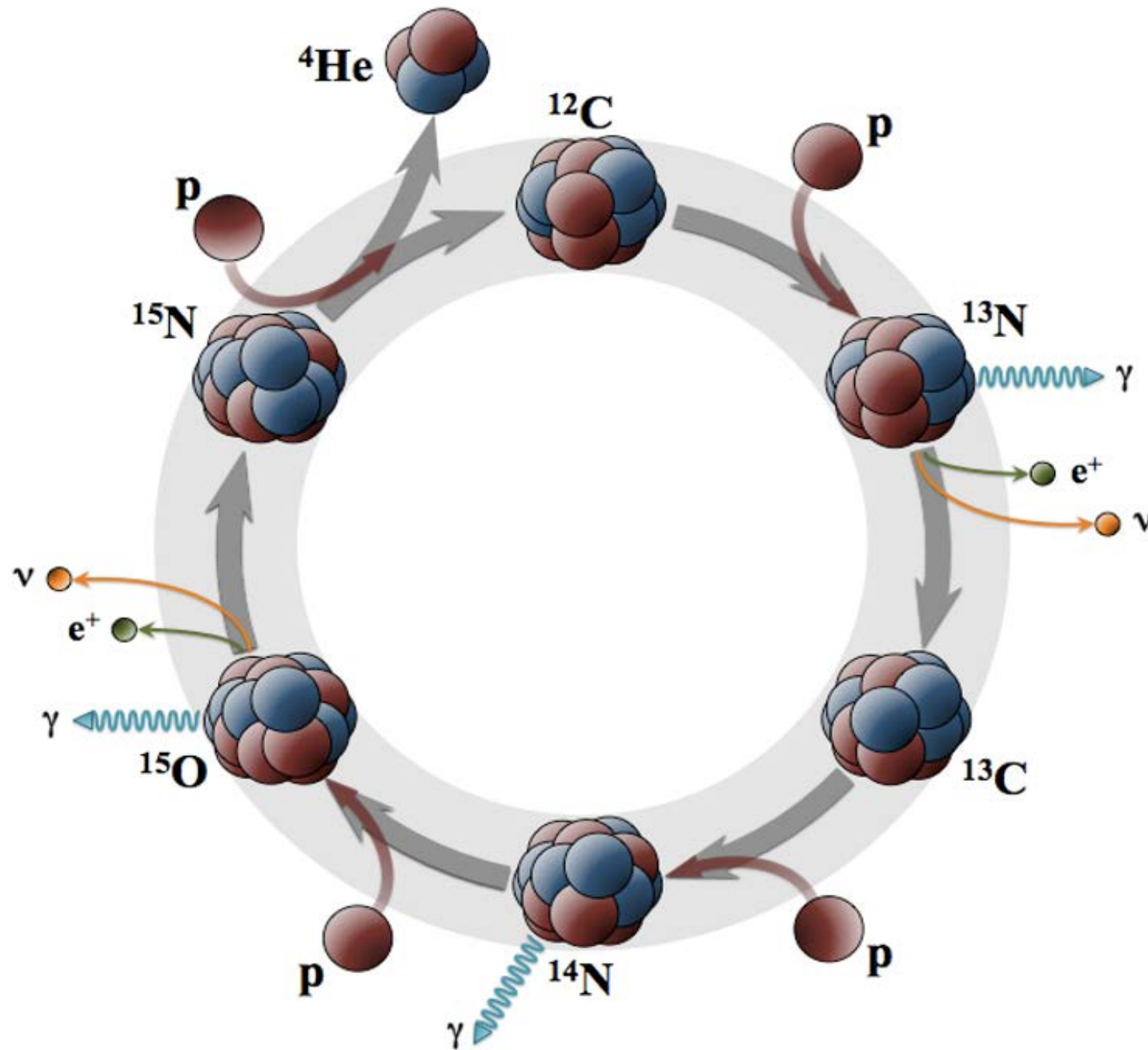
Netzwerke von Fusionsreaktionen: pp-Kette

Nettoreaktion: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 26.7 \text{ MeV}$

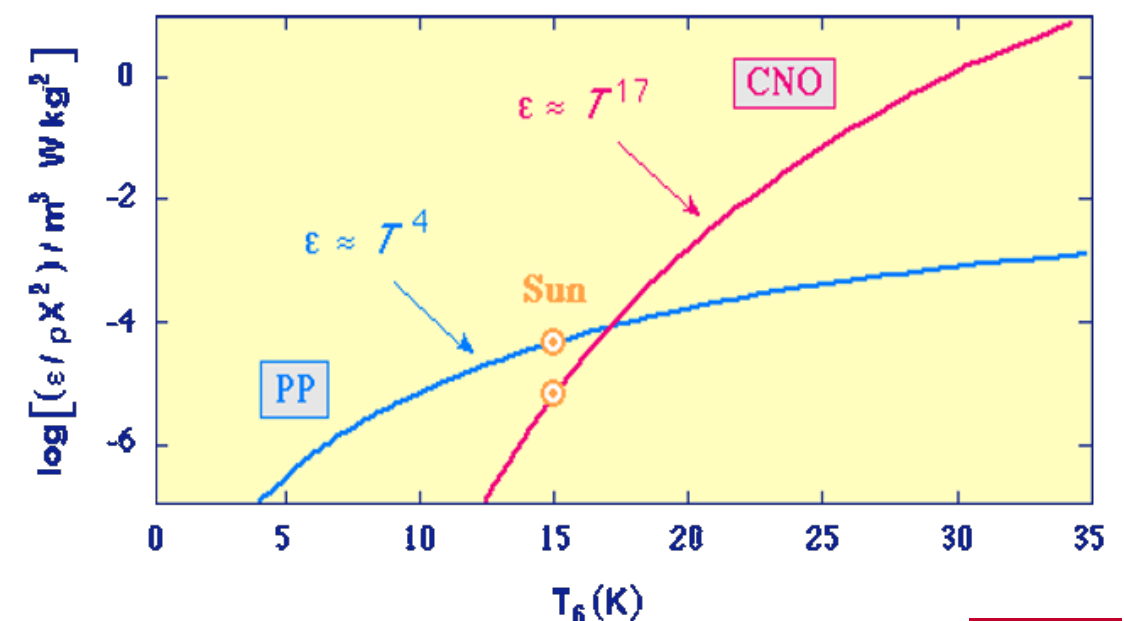


Netzwerke von Fusionsreaktionen: CNO-Zyklus

Nettoreaktion: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 26.7 \text{ MeV}$



- kleiner Beitrag zum H-Brennen in der Sonne ($\sim 1\%$)
- dominant in schwereren und weiter entwickelten Sternen
- relativ große Unsicherheit in Wirkungsquerschnitten



Neutrinos im Standard-Sonnen-Modell (SSM)



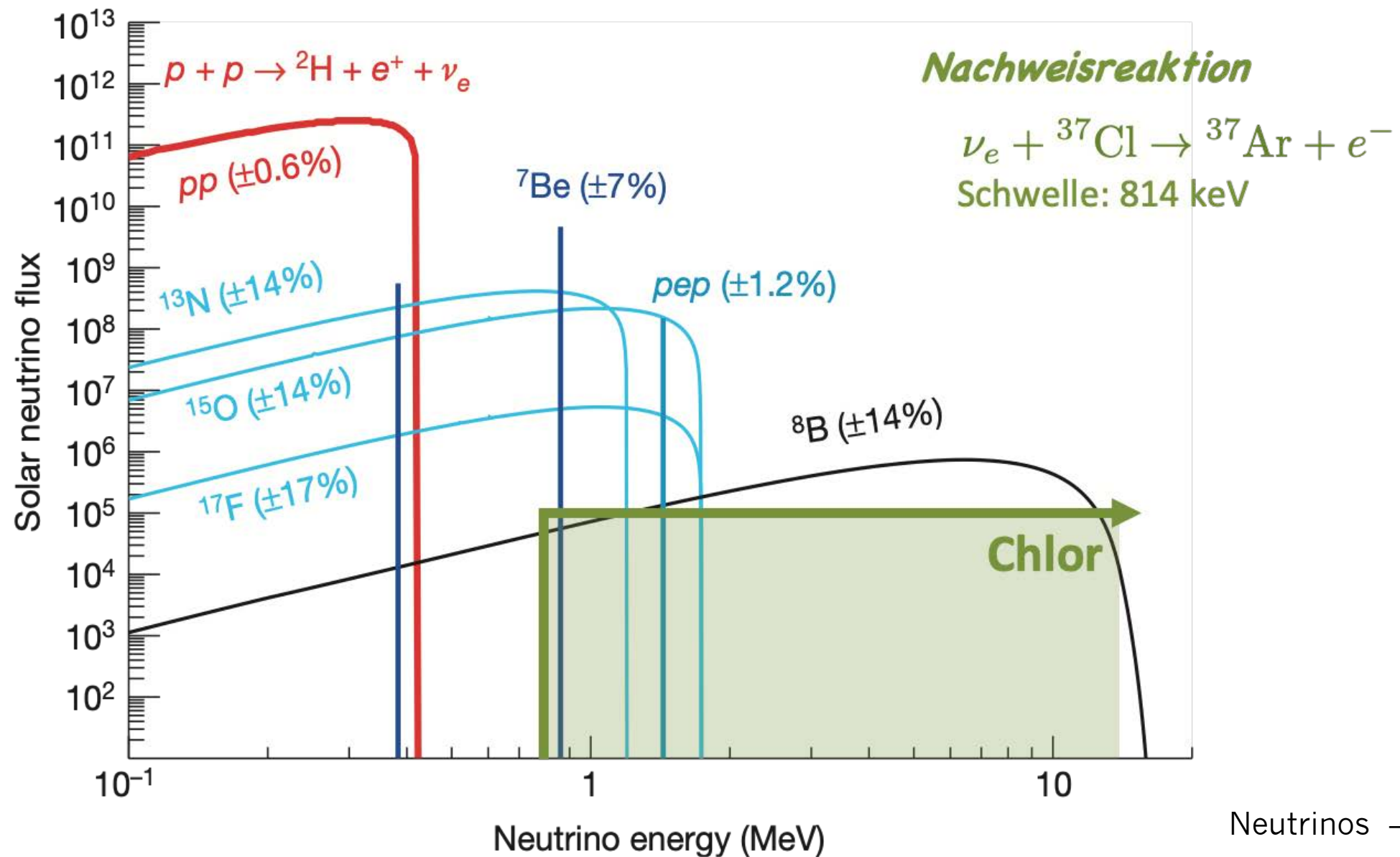
- ## Erwartetes Neutrinospektrum



Weitere Entwicklung der Experimente



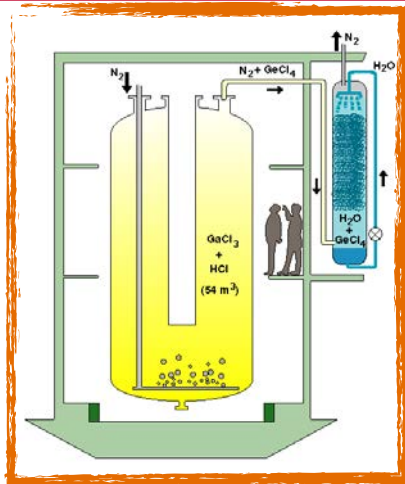
Homestake



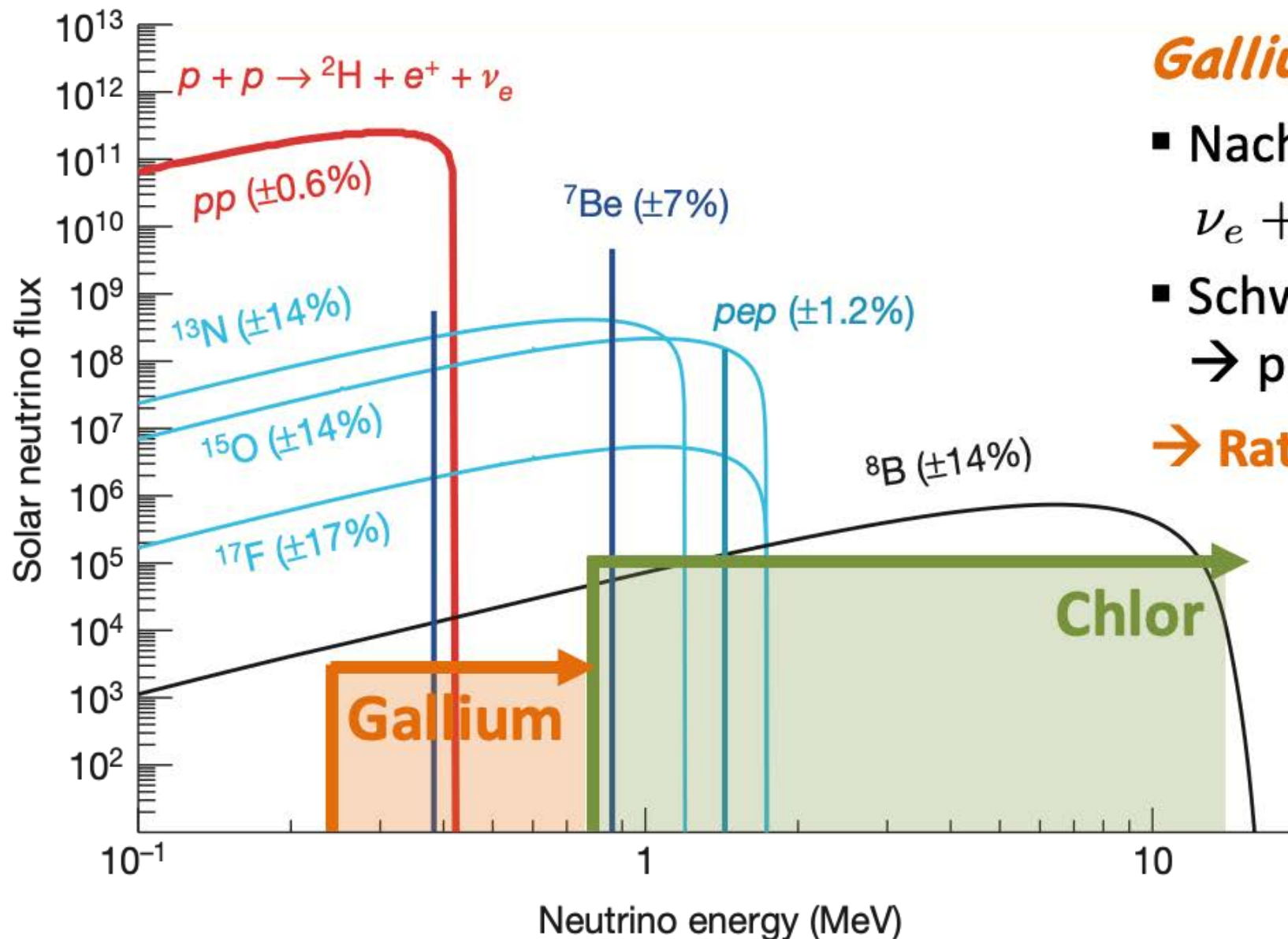
Weitere Entwicklung der Experimente



Homestake



Gallex/SAGE



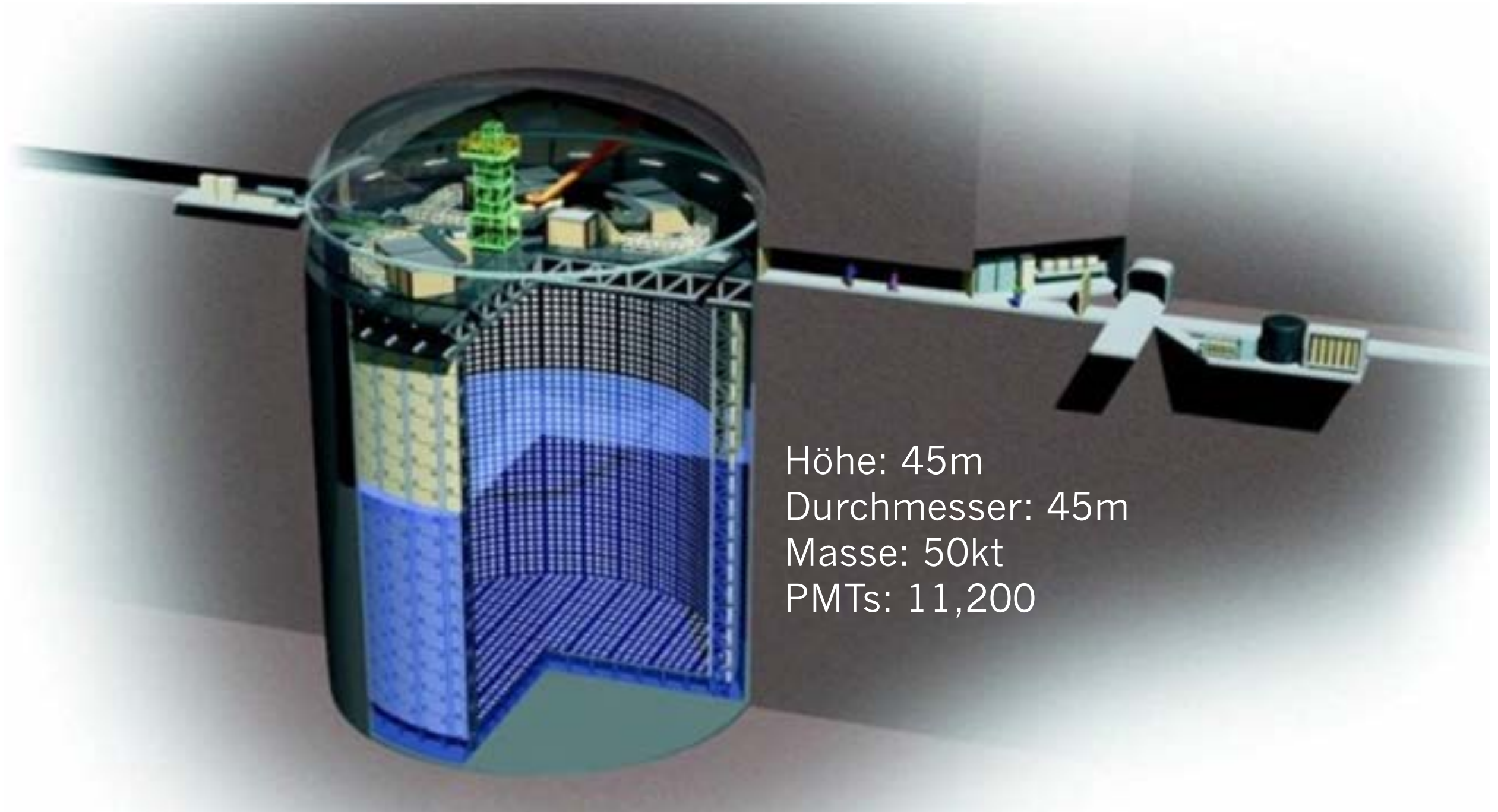
Gallium-Experimente

- Nachweisreaktion:

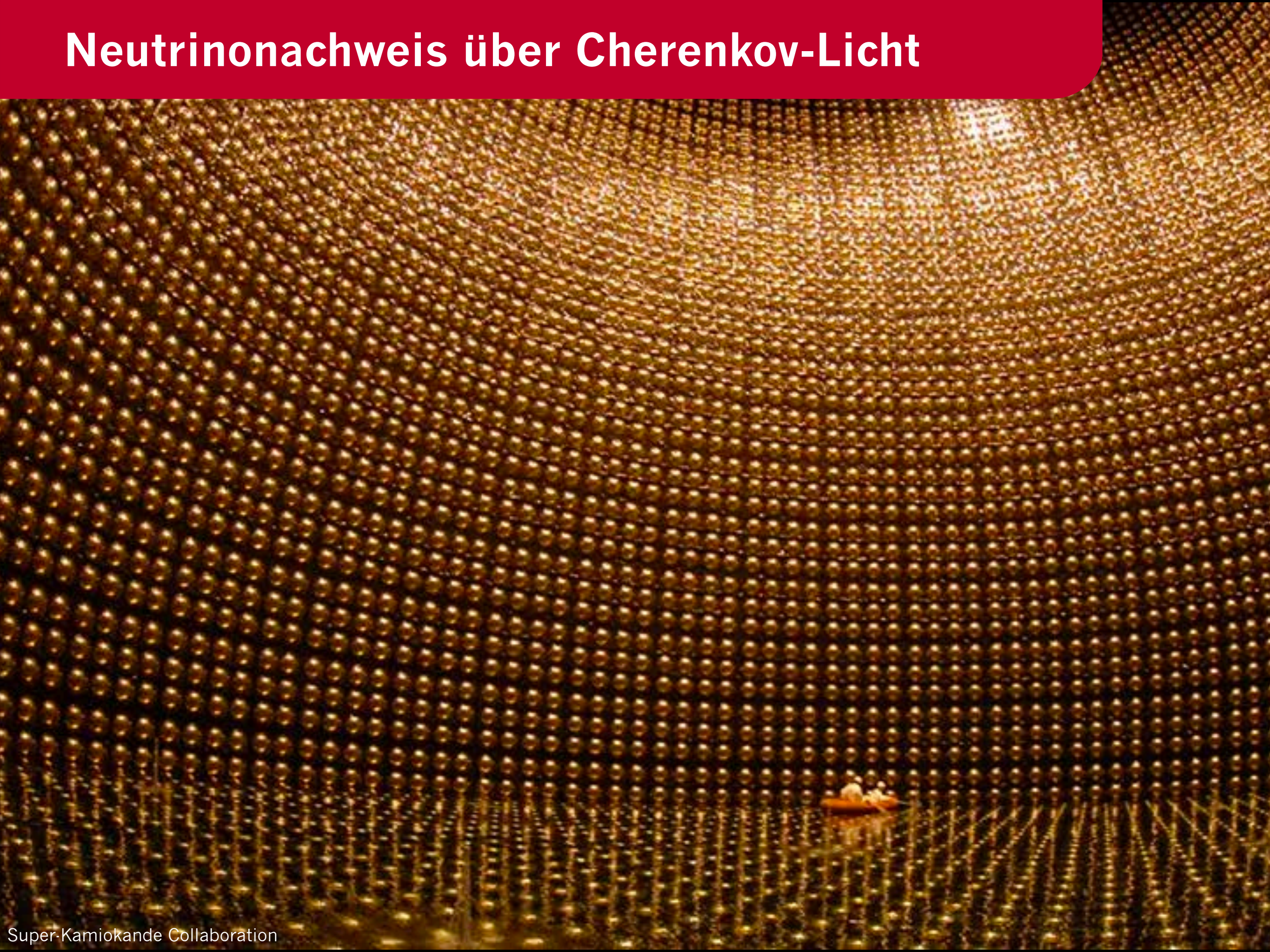
$$\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$$
- Schwelle: 233 keV
 → pp-Neutrinos
 → Ratendefizit: 50 %

Große Wasser-Cherenkov-Detektoren

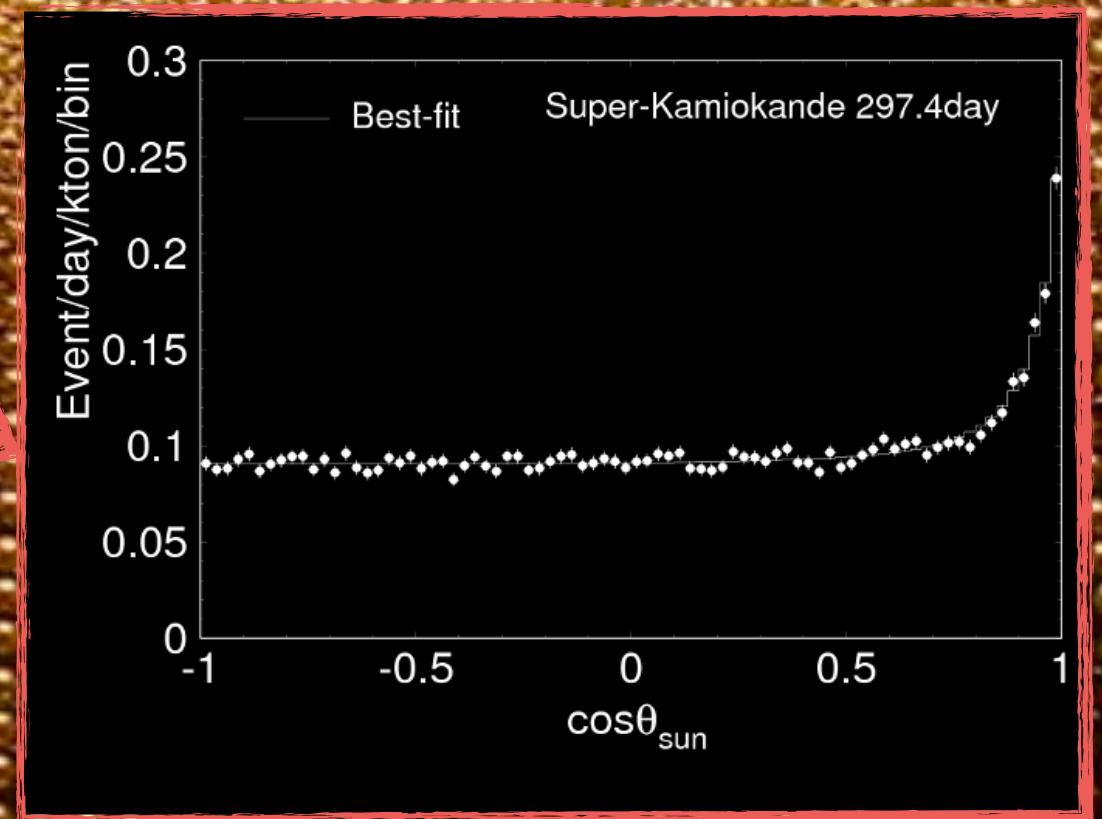
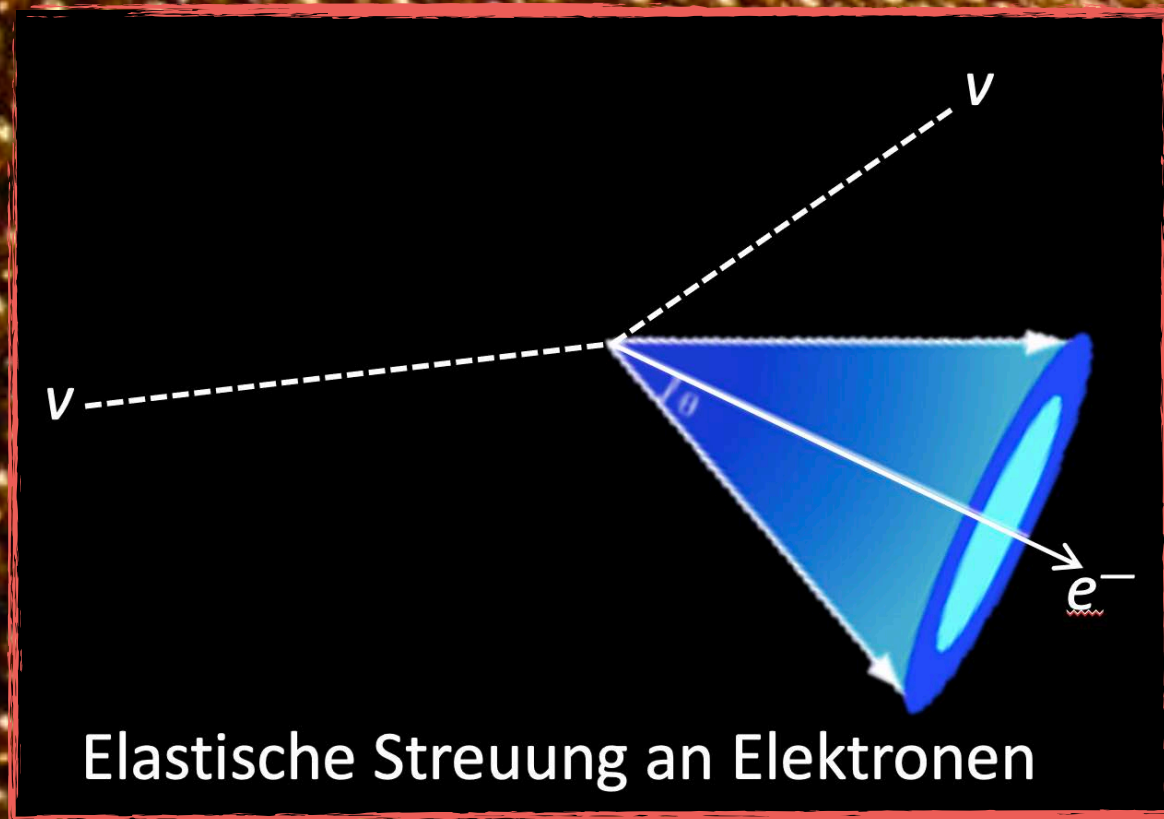
Super-Kamiokande Detektor



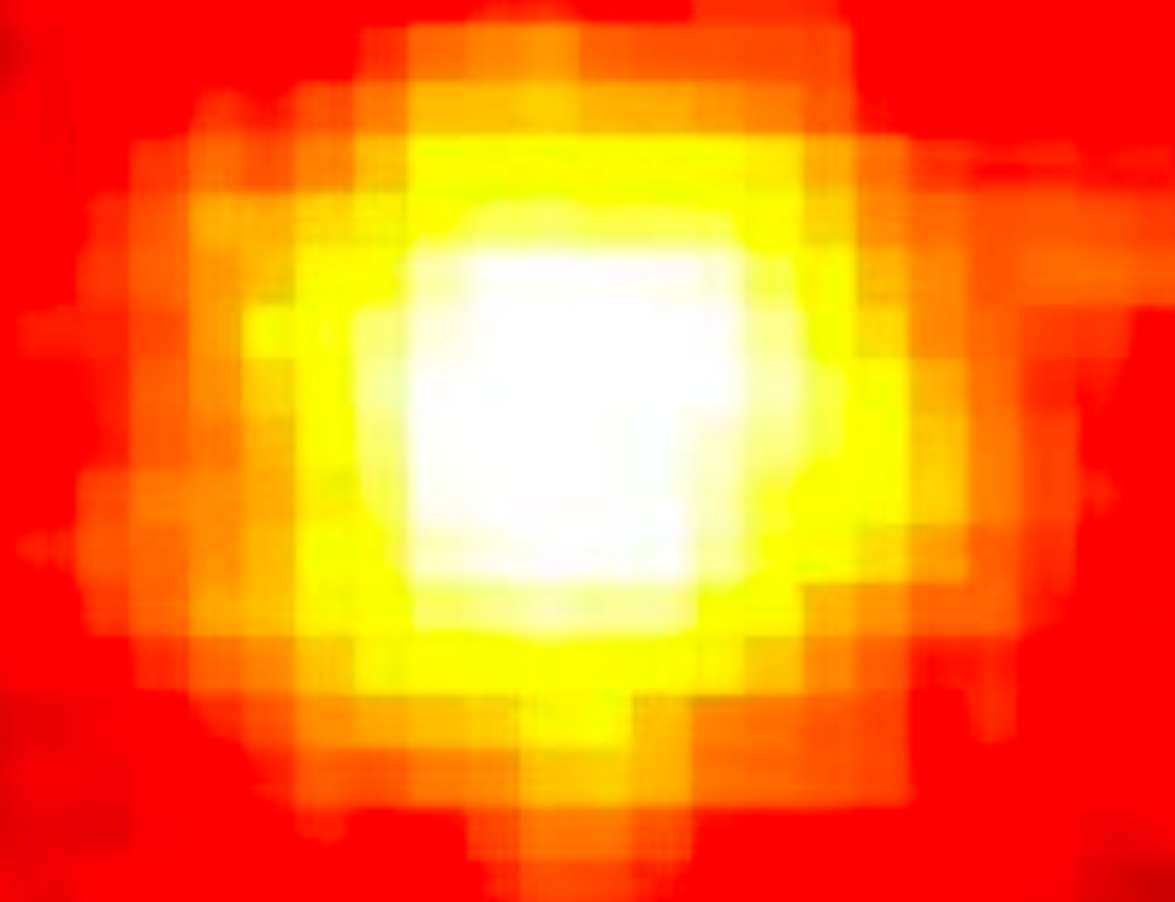
Neutrिनonachweis über Cherenkov-Licht



Neutrino nachweis über Cherenkov-Licht



Sonne im “Licht” der Neutrinos



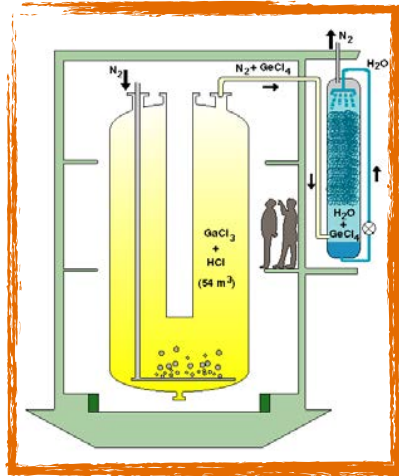
Sonne im “Licht” der Neutrinos



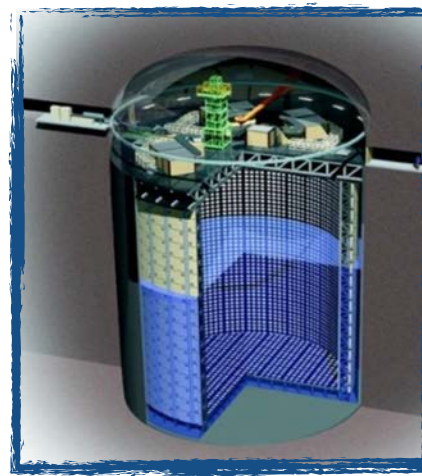
Weitere Entwicklung der Experimente



Homestake

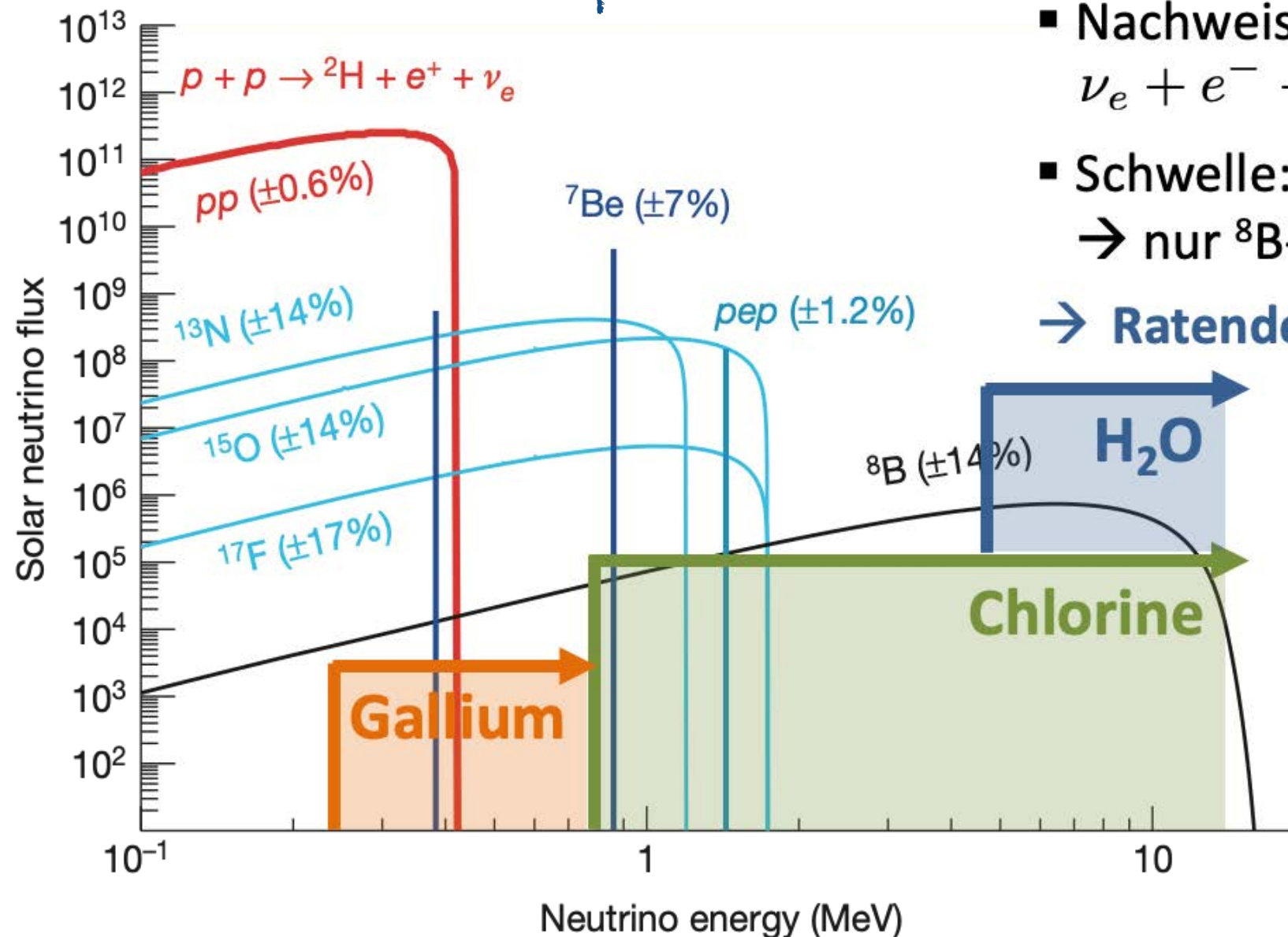


Gallex/SAGE



Super-K

→ SSM und Experimente konsistent:
zu wenig Neutrinos kommen an!



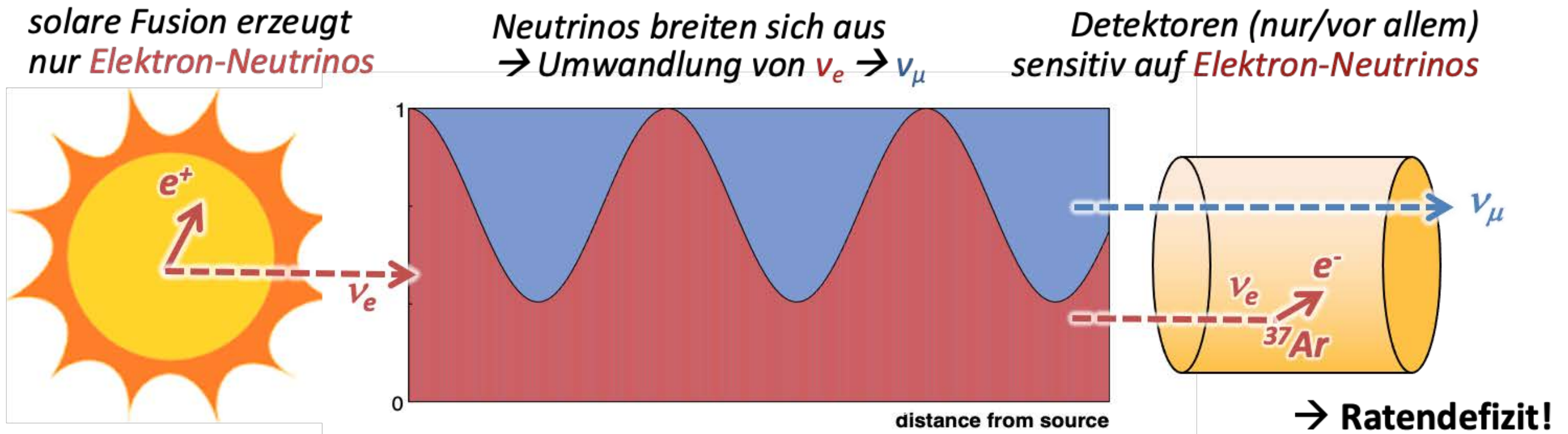
■ Nachweisreaktion:
 $\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$

■ Schwelle: ~5 MeV
→ nur ${}^8\text{B}$ -Neutrinos

→ Ratendefizit: 70 %

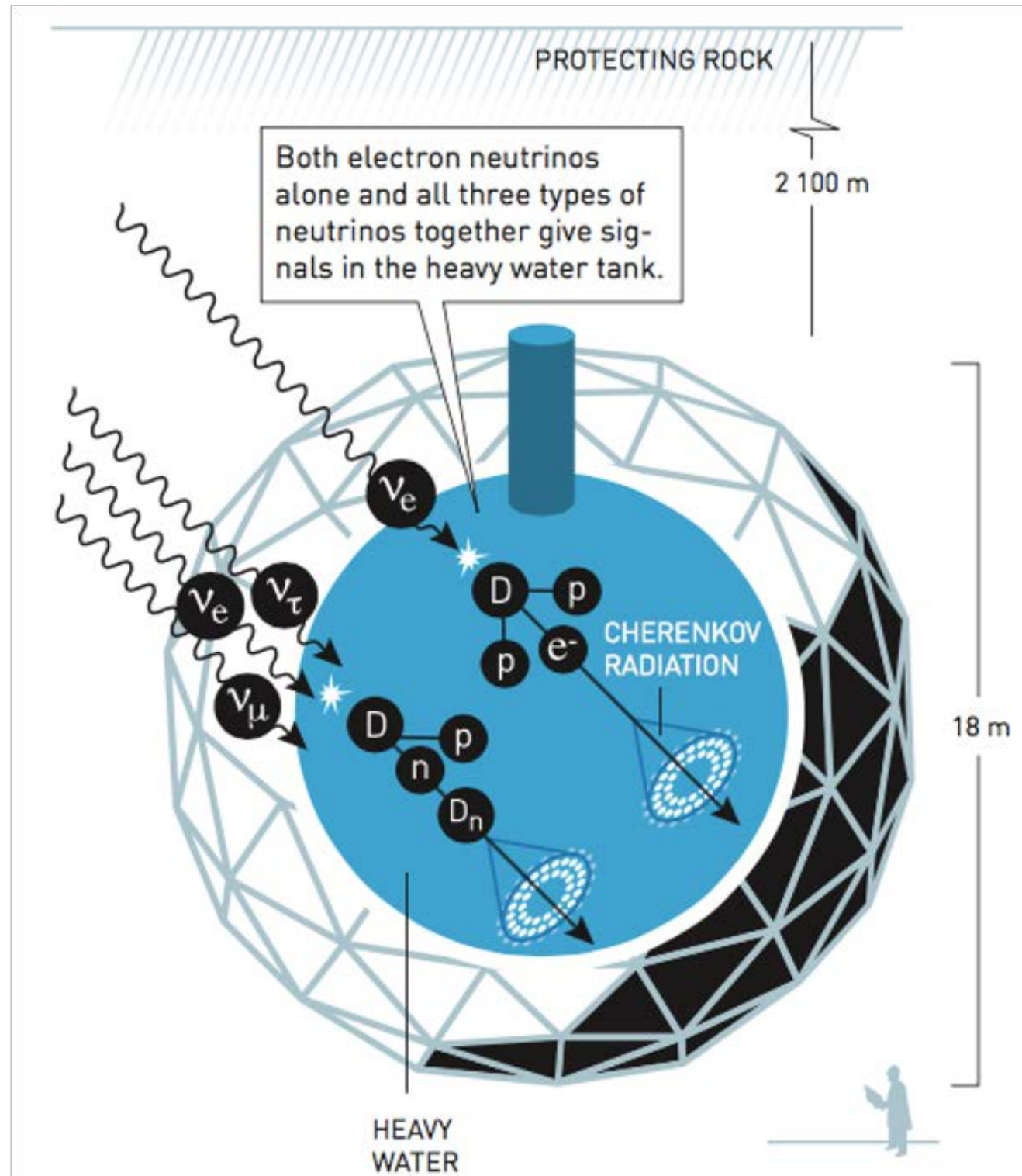
Lösung: Umwandlung des Neutrino-Flavors

schon in den 1960ern vorgeschlagen: **Neutrino-Oszillationen**



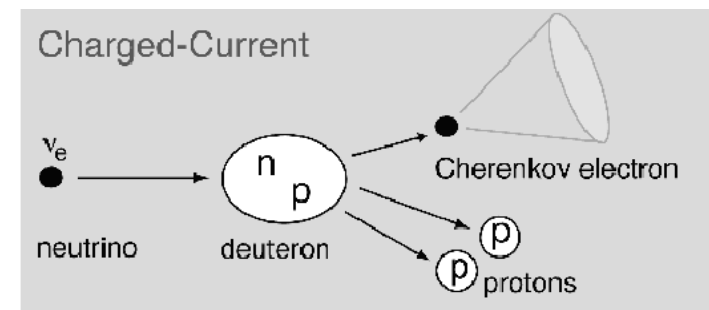
- Prozess jenseits des Standard-Modells: erfordert Neutrinomasse
- wie sucht man danach?
 - Nachweis der umgewandelten $\nu_{\mu,\tau}$
 - Energieabhängigkeit der Oszillation

SNO: Schweres Wasser für $\nu_{\mu,\tau}$

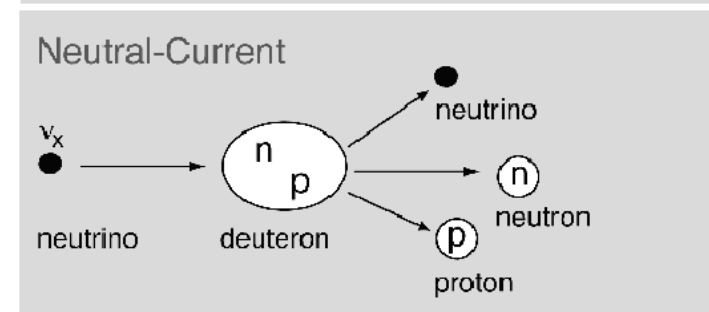


- Experiment in Sudbury-Mine (Kanada, 2km tief)
- Schweres Wasser D_2O
- Neutrinoachweis

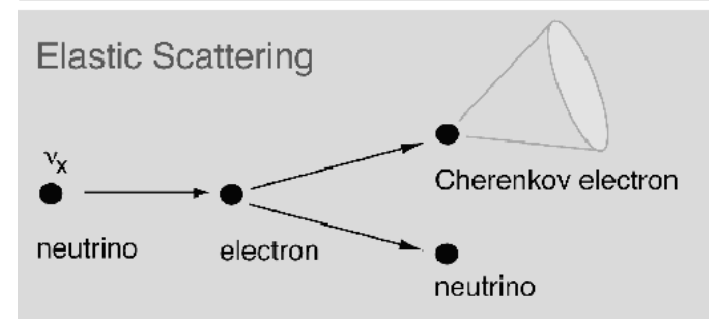
Rate
exp/SSM



~30%



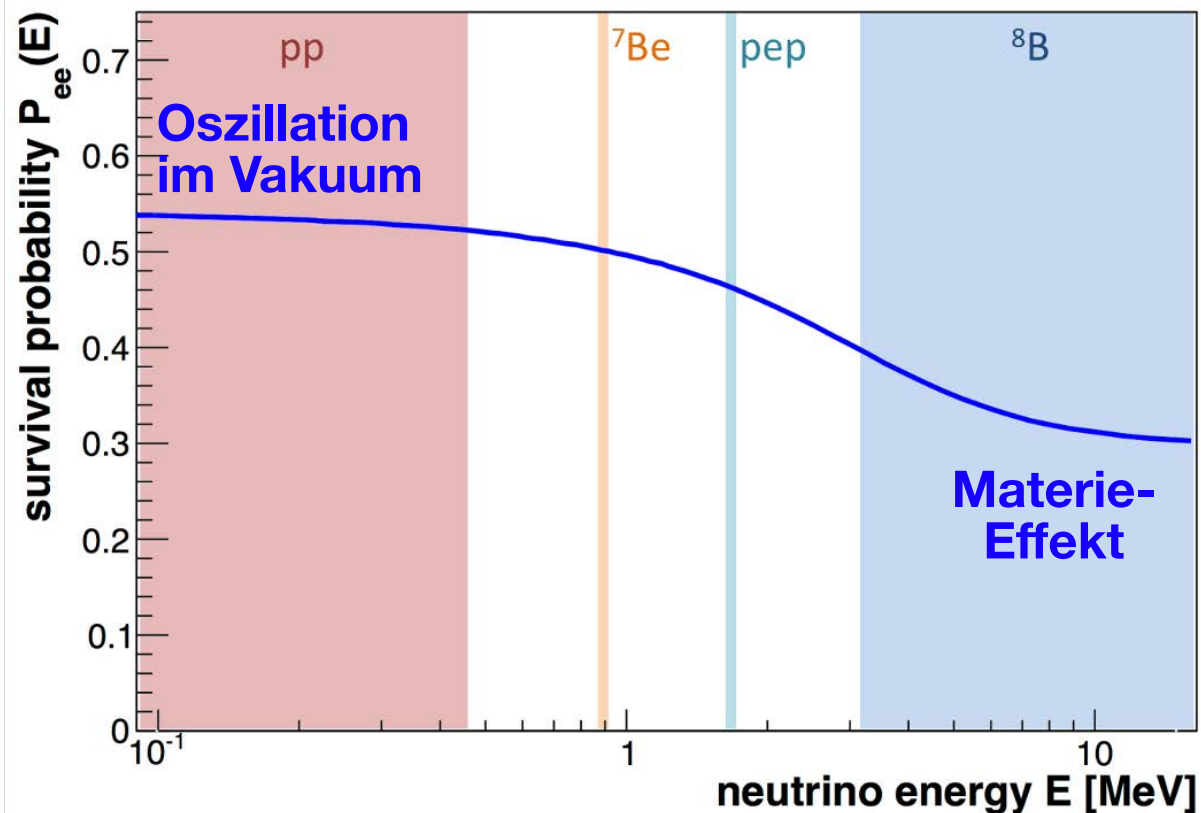
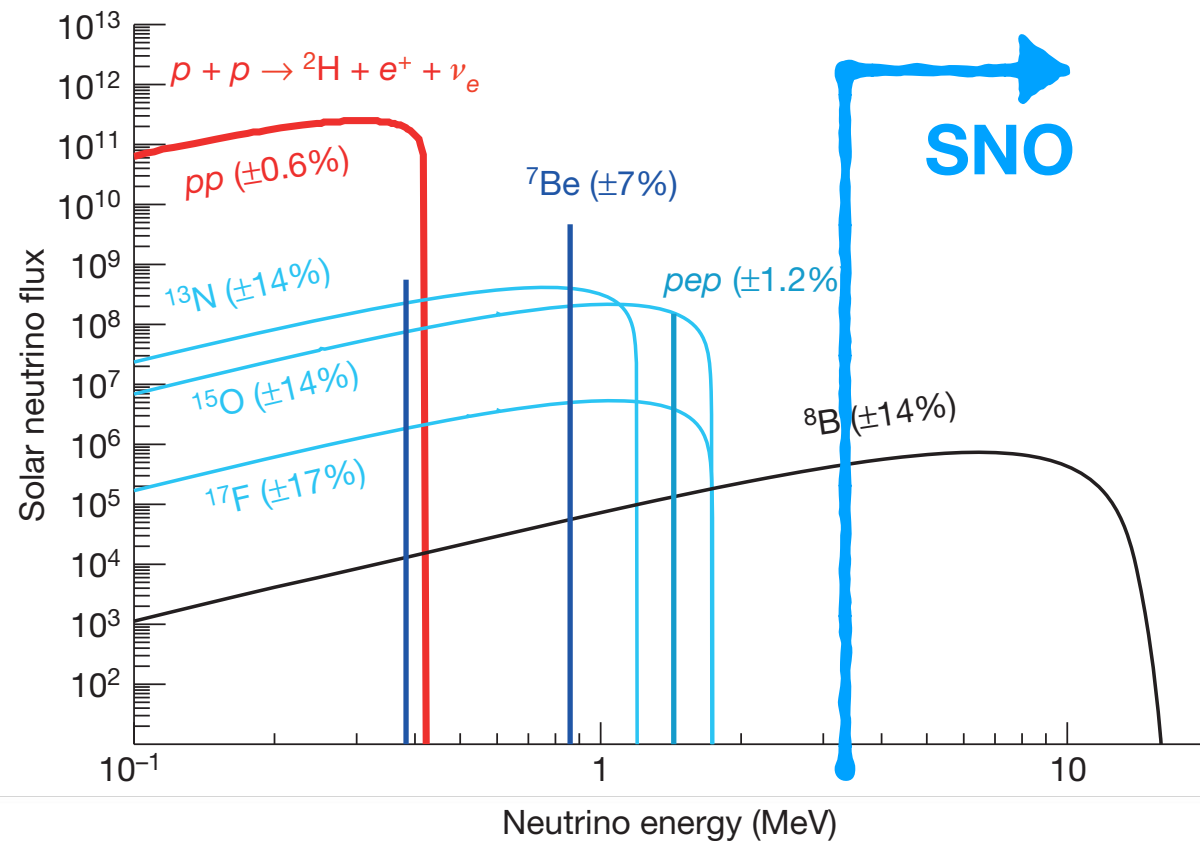
~100%



~35%

→ Nachweis für Flavor-Umwandlung

Offene Fragen nach SNO



- SNO-Messung nur bei Energien oberhalb von 3.5 MeV
→ ausschließlich ${}^8\text{B}$ Neutrinos

→ Neutrino-Astronomie

- Spektroskopie bei niedrigen Energien für pp-Reaktionsraten
→ Präzisionstest des SSM
- erster Nachweis des Auftretens des CNO Zyklus in Sternen?

→ Neutrino-Teilchenphysik

- Messung der Energieabhängigkeit der Oszillationswahrscheinlichkeit
→ Einfluß der Sonnenmaterie

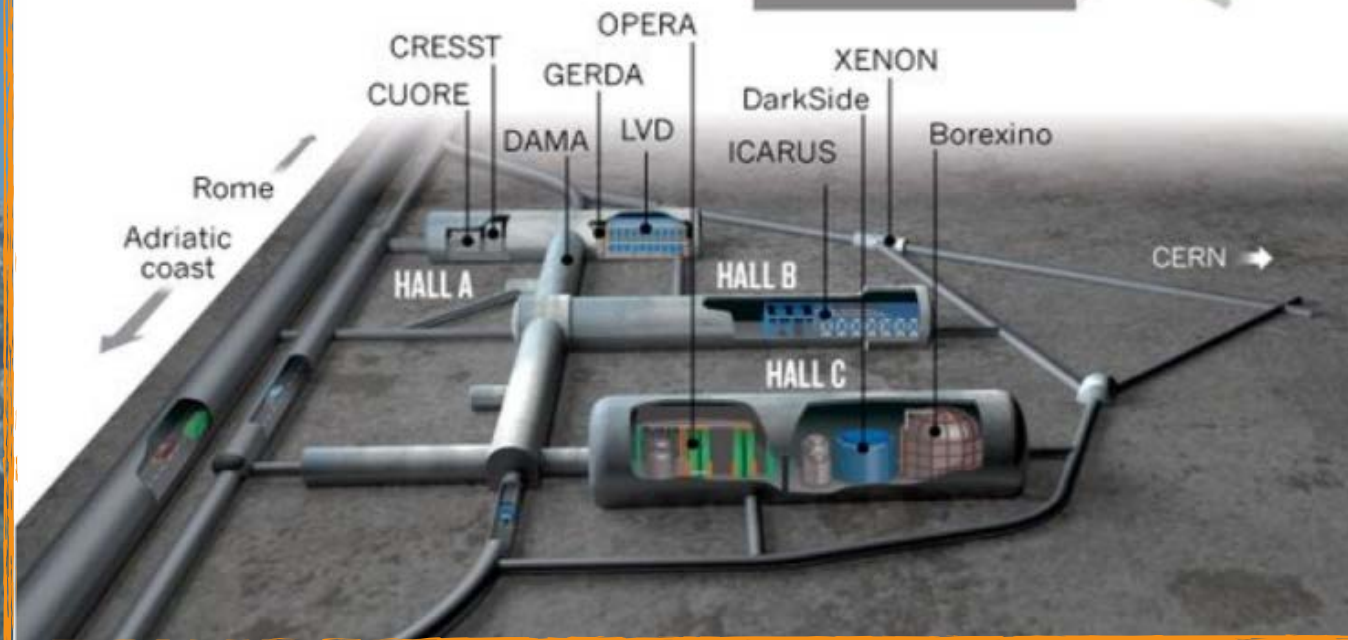
Borexino am Gran Sasso Labor



Borexino am Gran Sasso Labor

THE A, B AND C OF GRAN SASSO

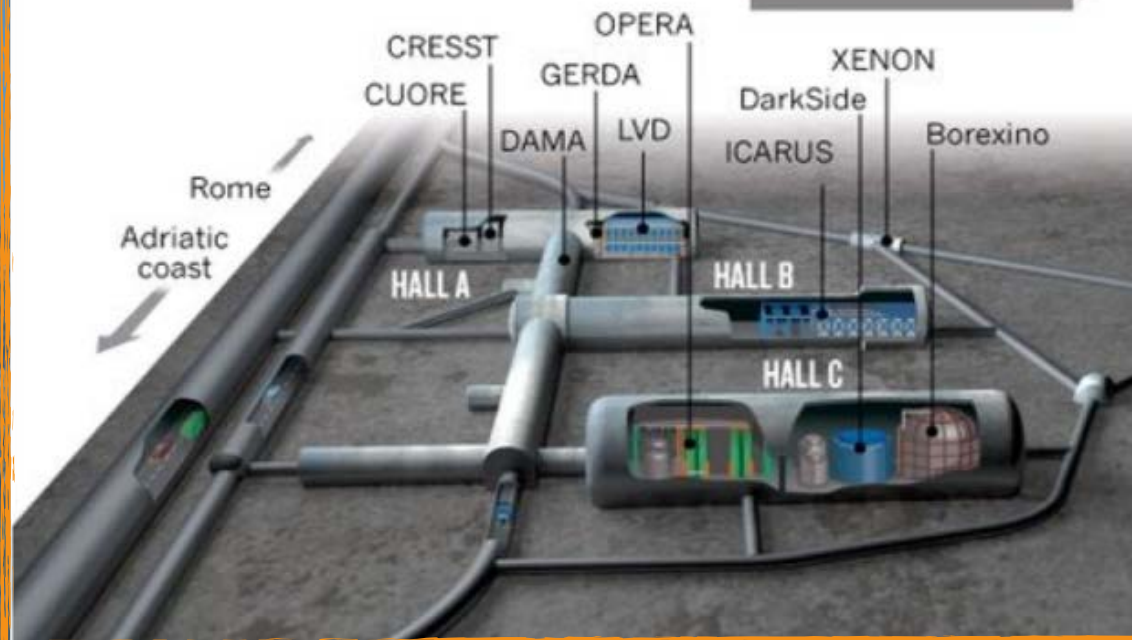
Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.



Borexino am Gran Sasso Labor

THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.



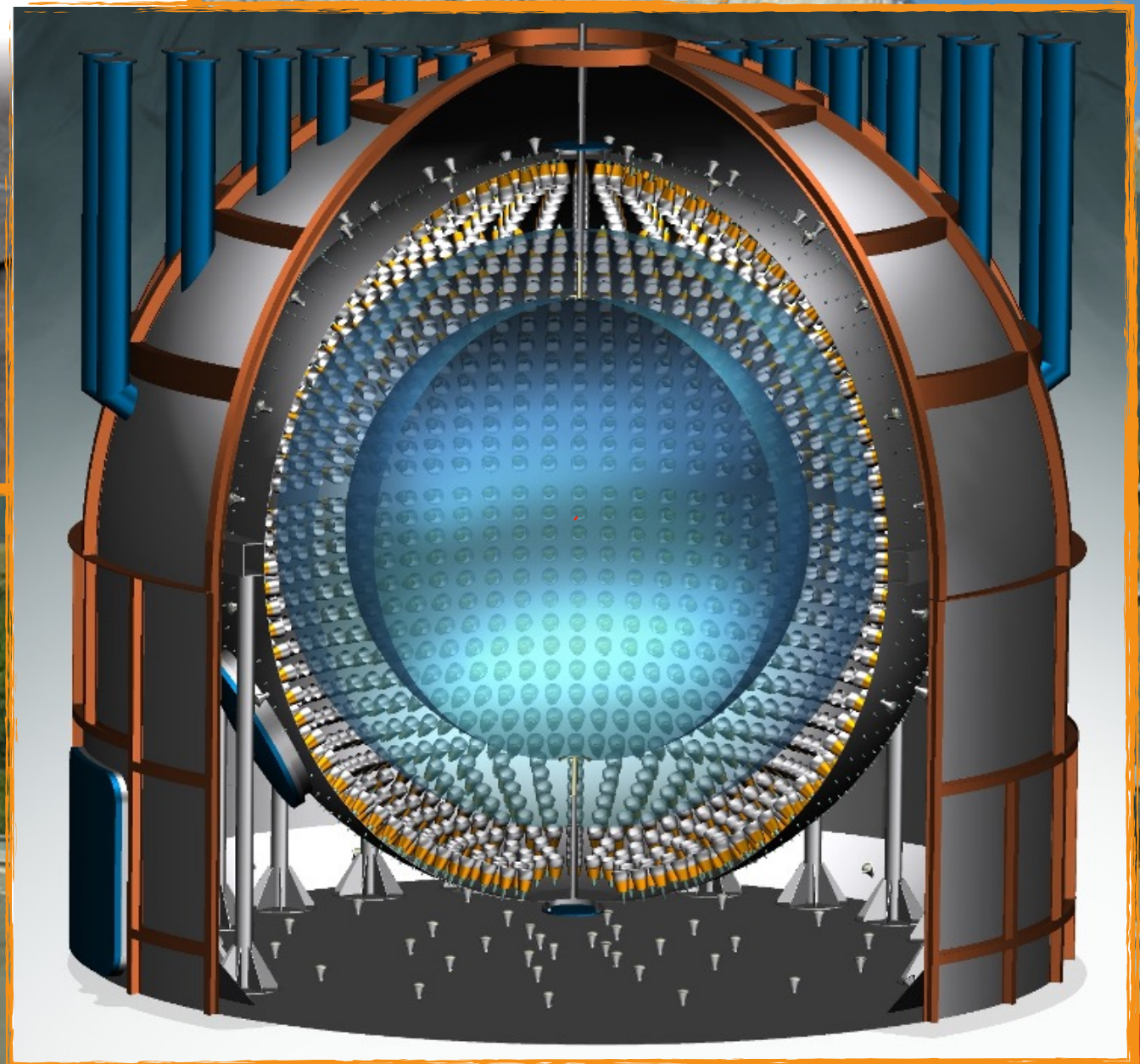
Steckbrief Borexino

Höhe/Durchmesser: 18m

Target: Szintillator

Targetmasse: 270t

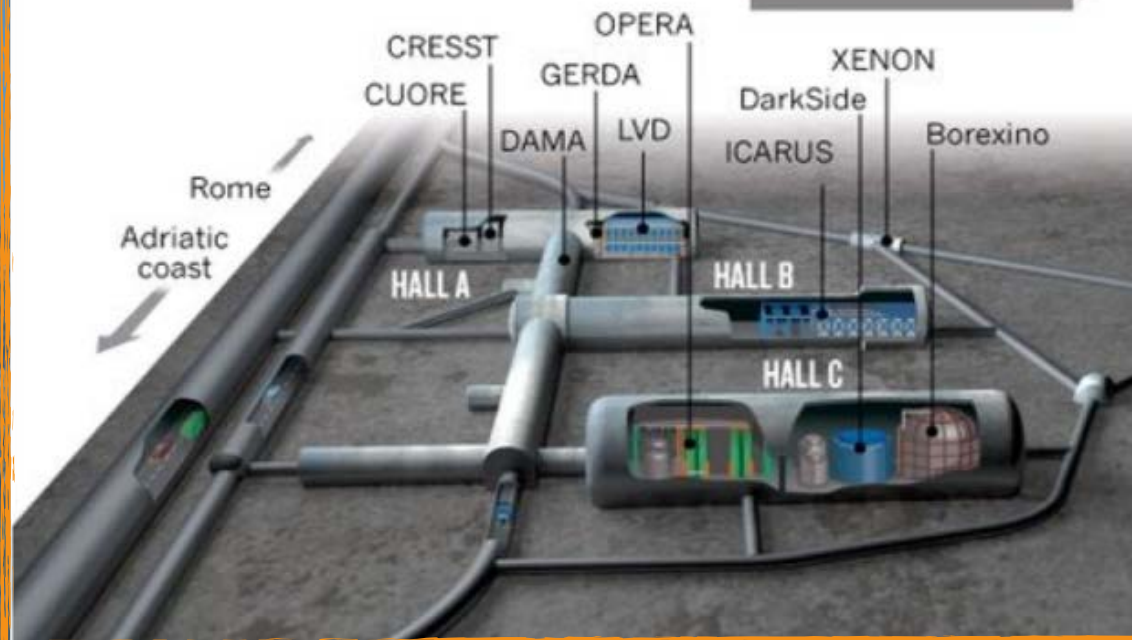
Lichtsensoren/PMTs: 2200



Borexino am Gran Sasso Labor

THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.



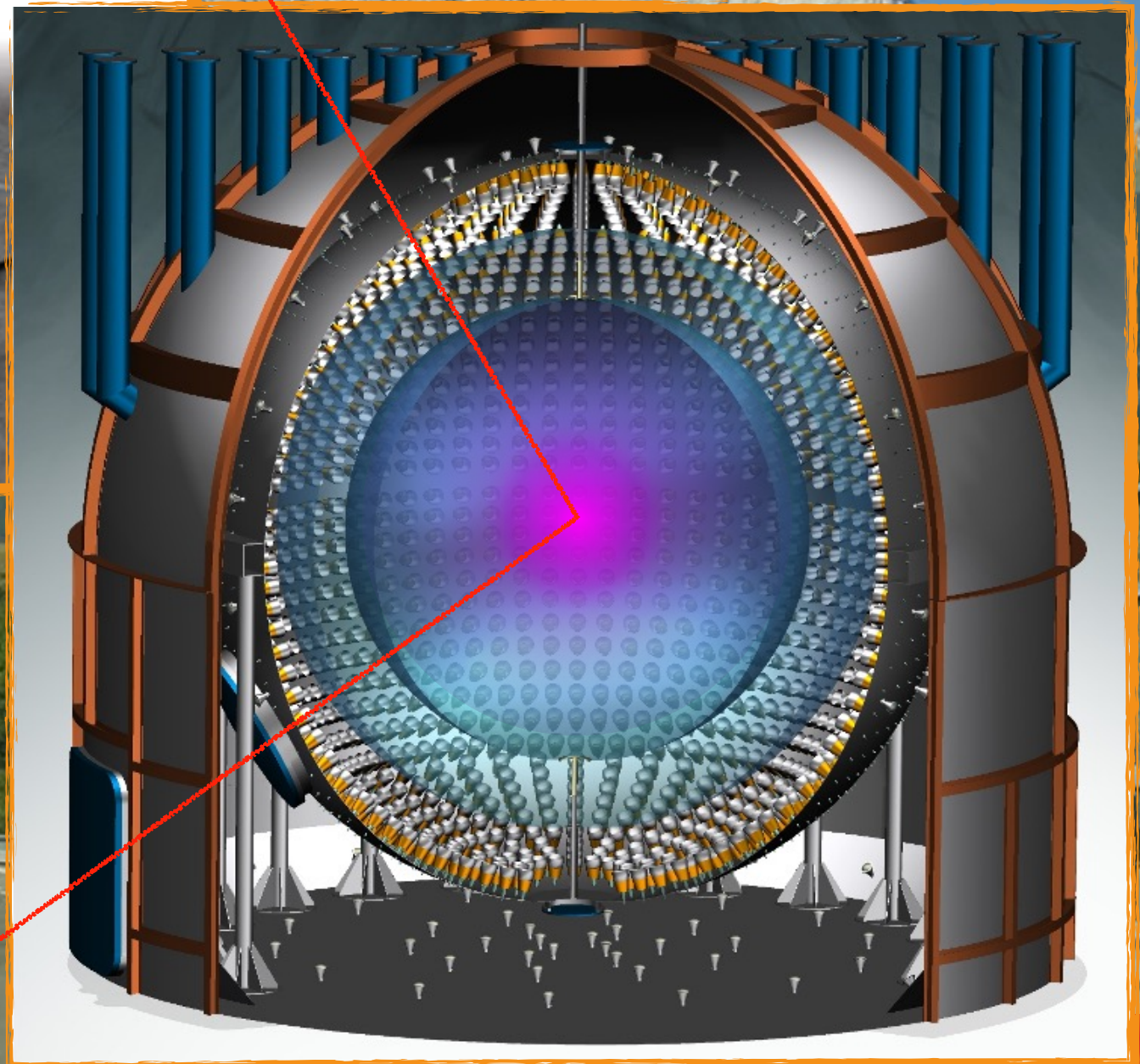
Steckbrief Borexino

Höhe/Durchmesser: 18m

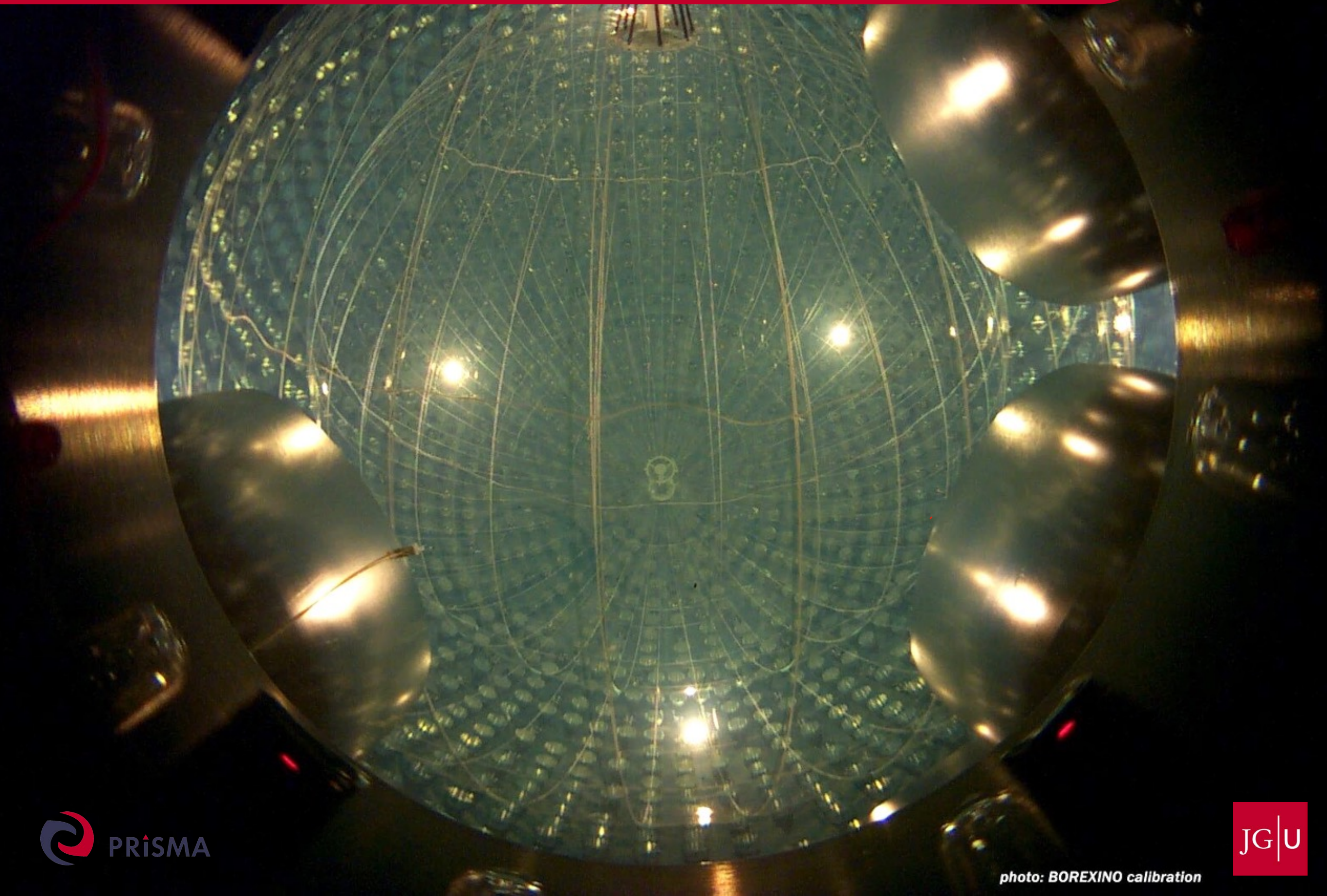
Target: Szintillator

Targetmasse: 270t

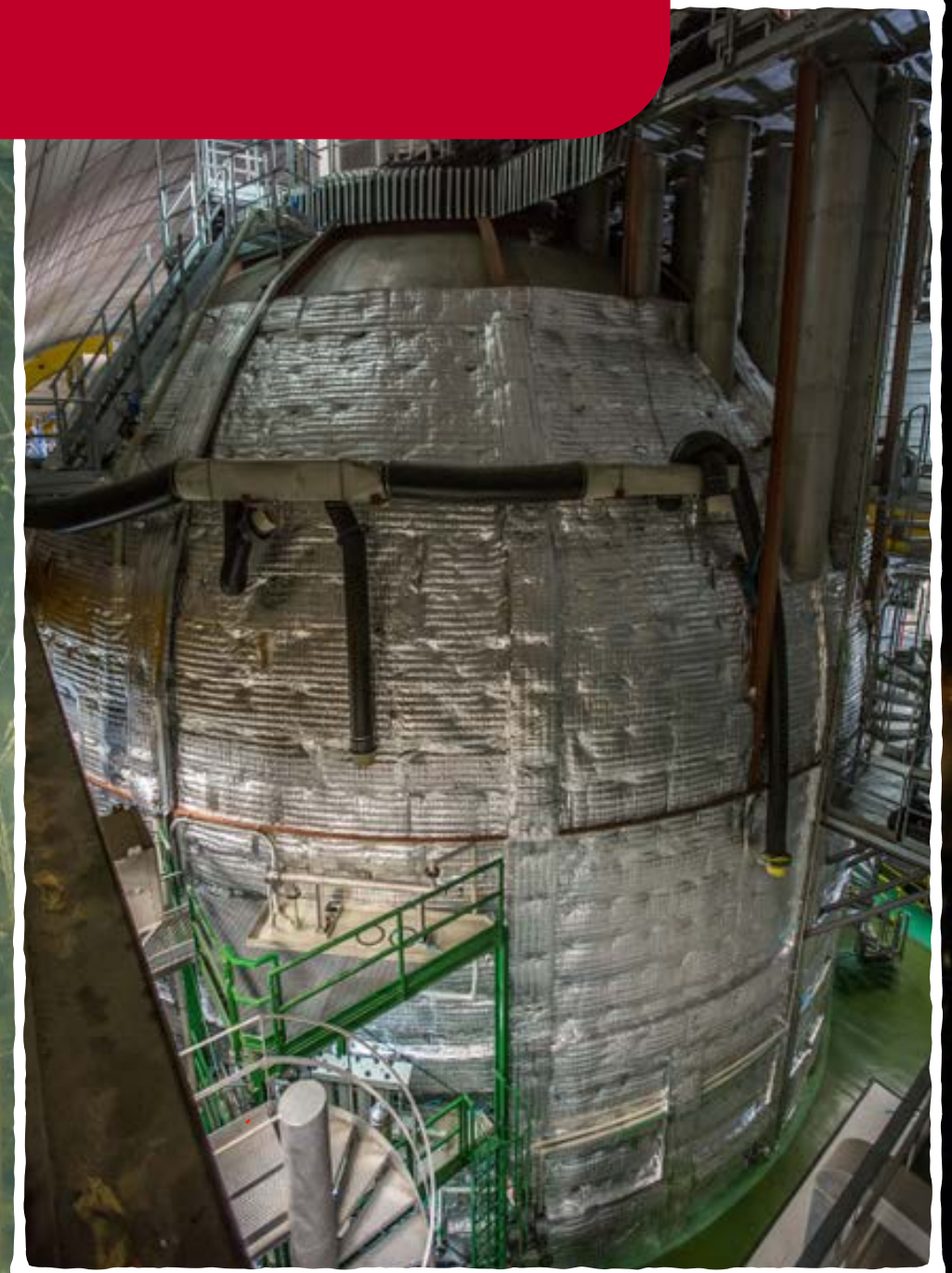
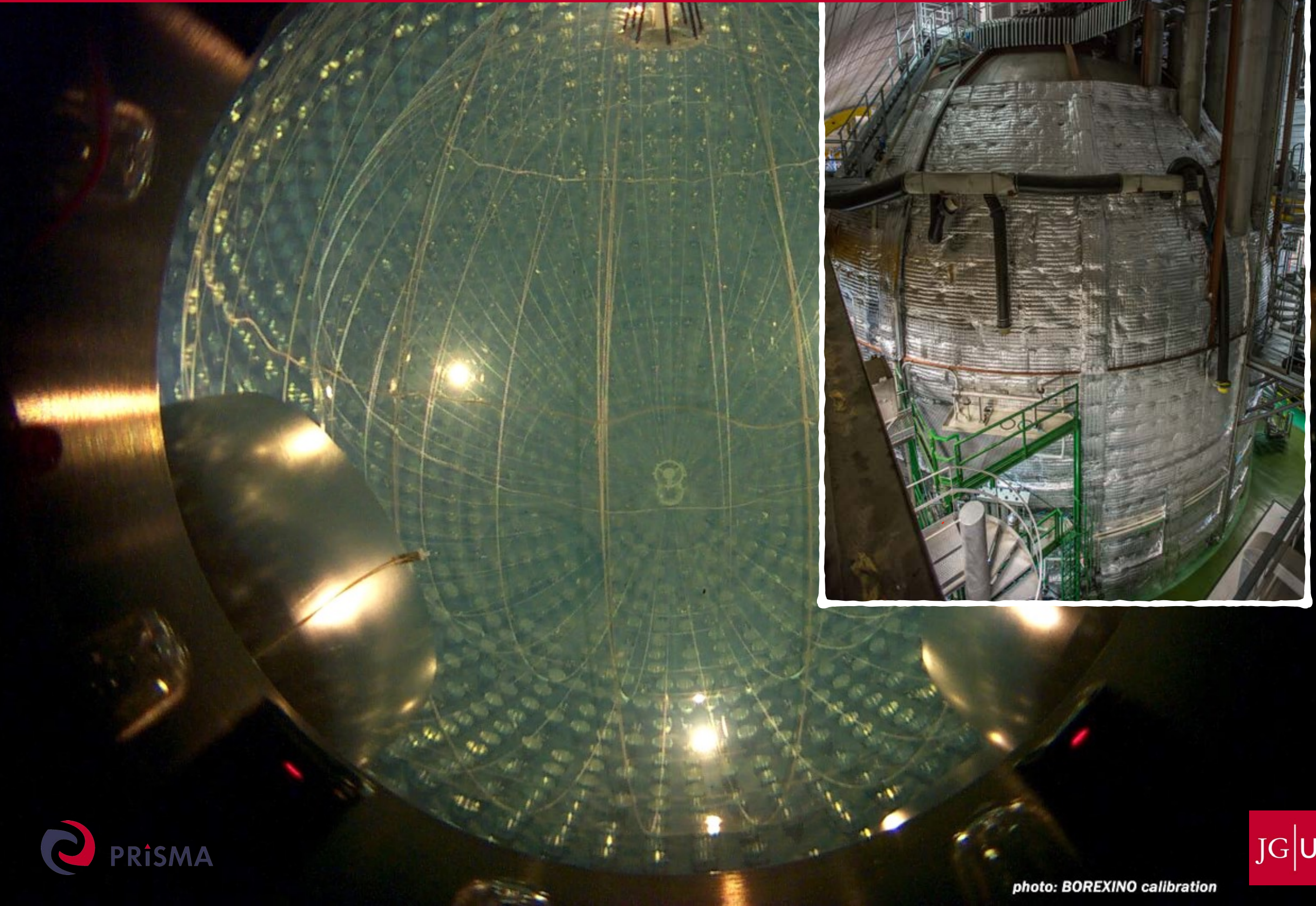
Lichtsensoren/PMTs: 2200



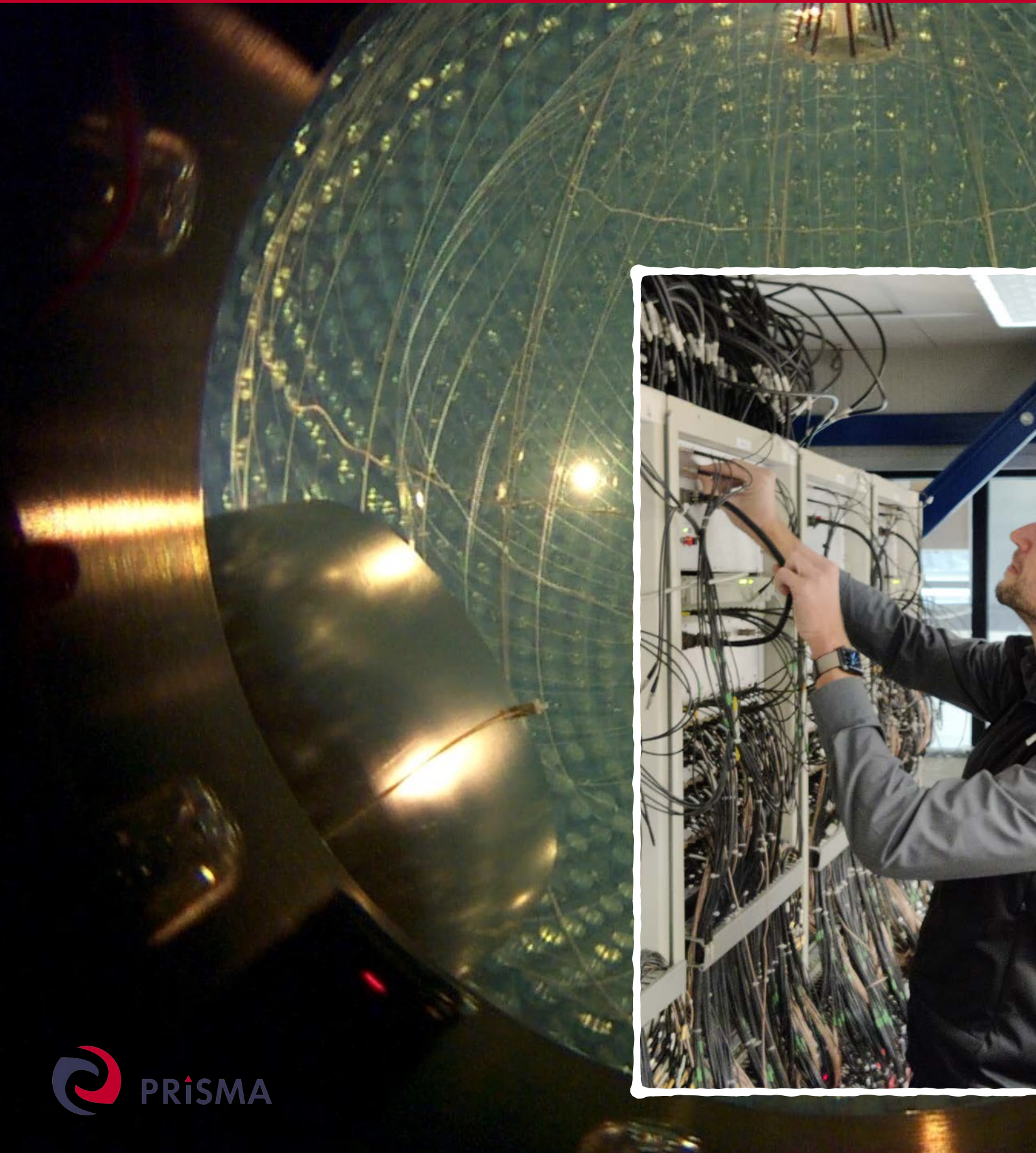
Borexino am Gran Sasso Labor



Borexino am Gran Sasso Labor



Borexino am Gran Sasso Labor

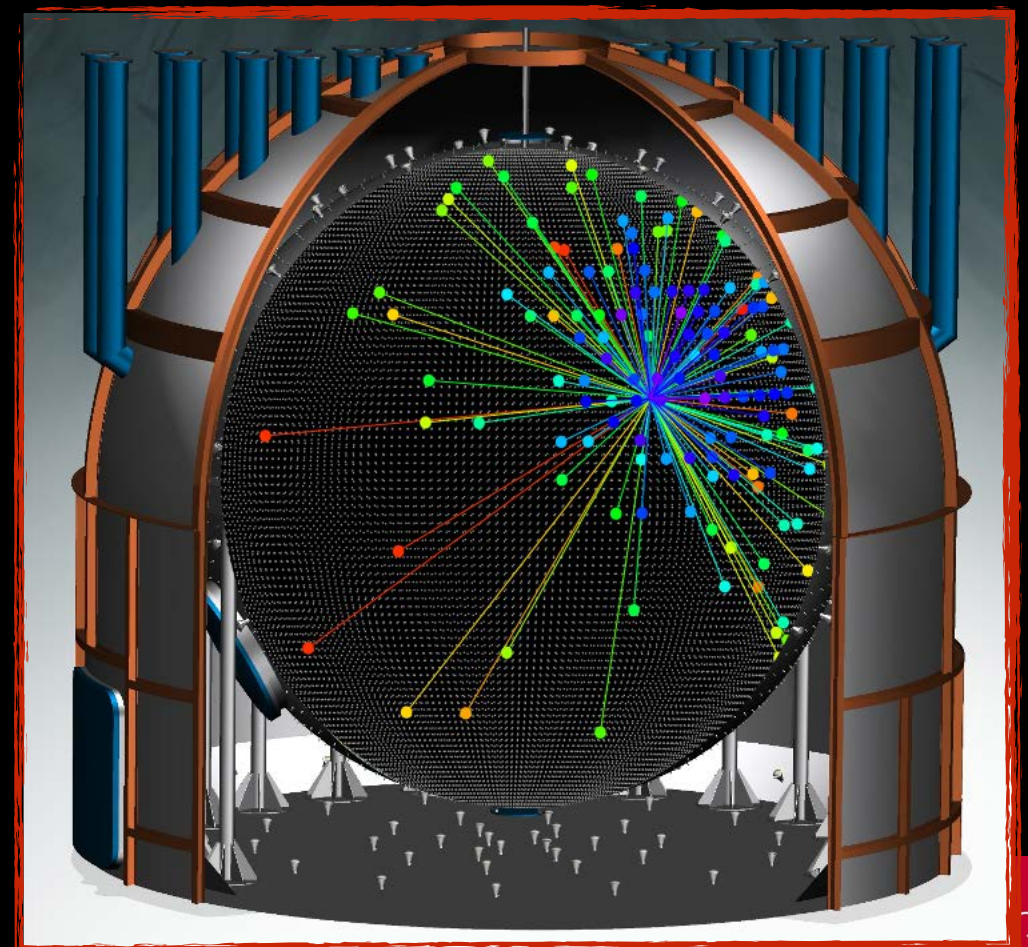


Neutrino nachweis mit Flüssigszintillator



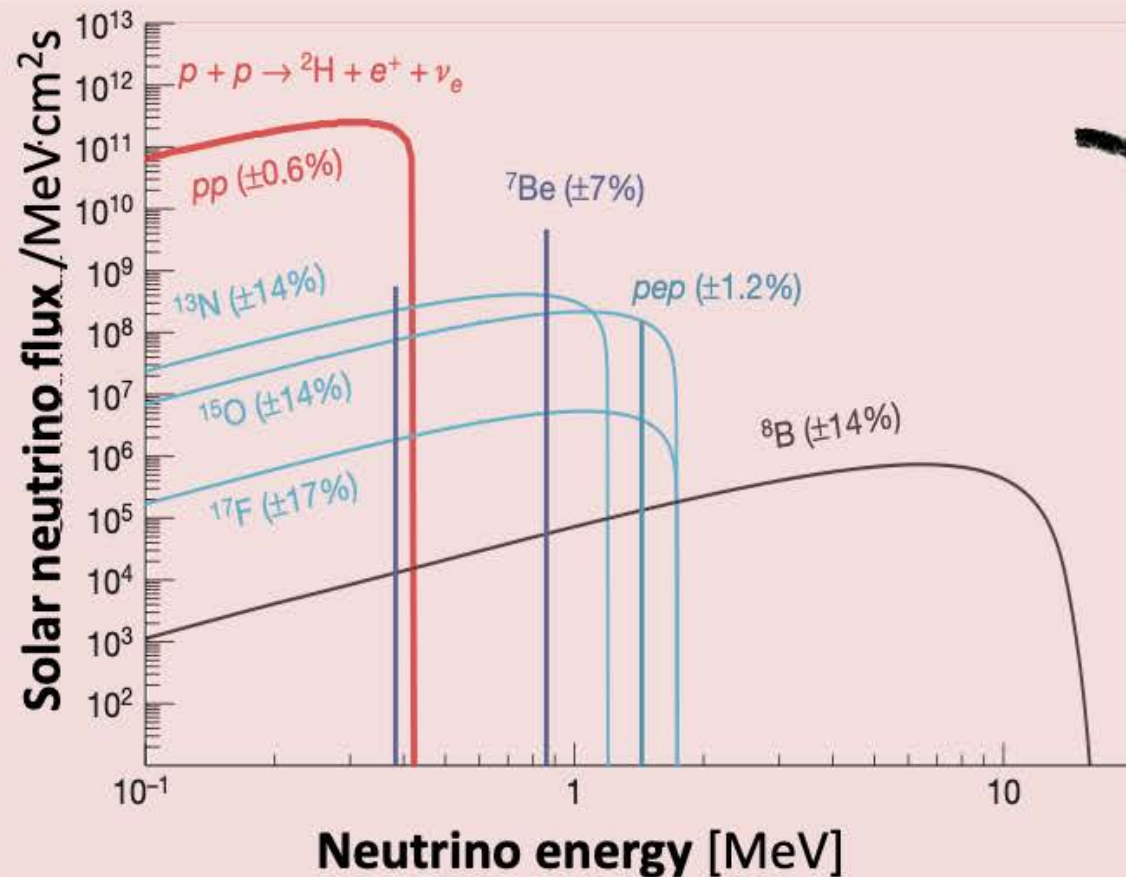
- deutlich mehr Licht als Cherenkov-Effekt (x50)
→ bessere Energieauflösung
- Methoden für effiziente Reinigung von radioaktiven Verunreinigungen: 10^{-18} g/g Uran/Thorium im Szintillator
→ niedrige Energieschwelle (pp-Neutrinos!)
- transparent und günstig → große Detektoren

- Energieauflösung über Anzahl nachgewiesener Photonen ($\sim 10^4/\text{MeV}$)
- Ortsauflösung über Analyse der Flugzeitunterschiede zu den PMTs
- aber: keine Richtungsauflösung, da isotrope Lichtemission

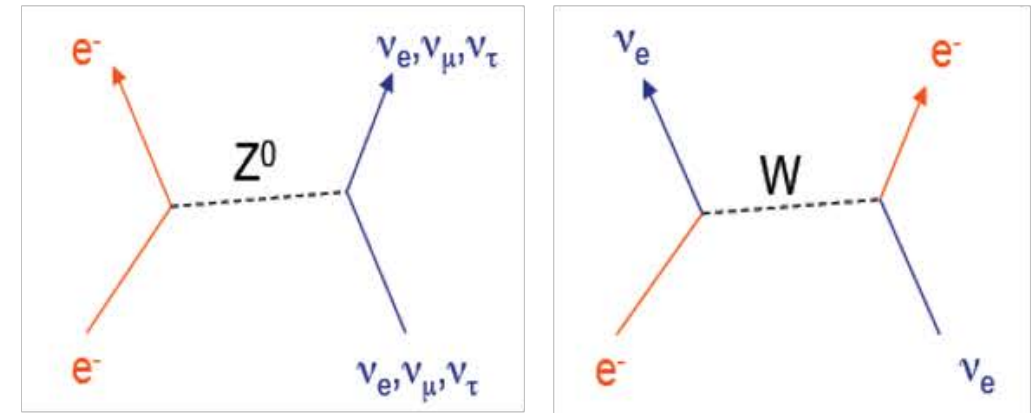


Neutrinosignal in Borexino

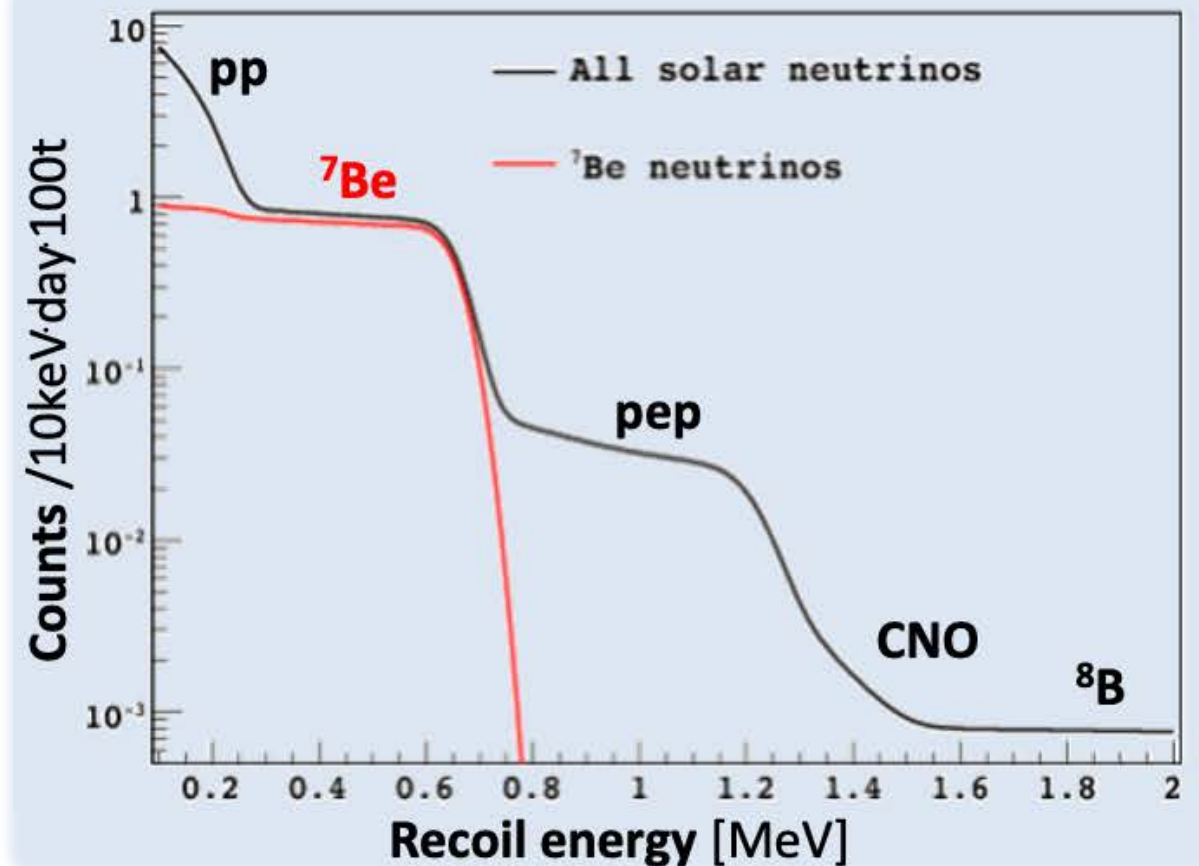
Solares Neutrinospektrum



elastische Neutrino-Elektron-Streuung

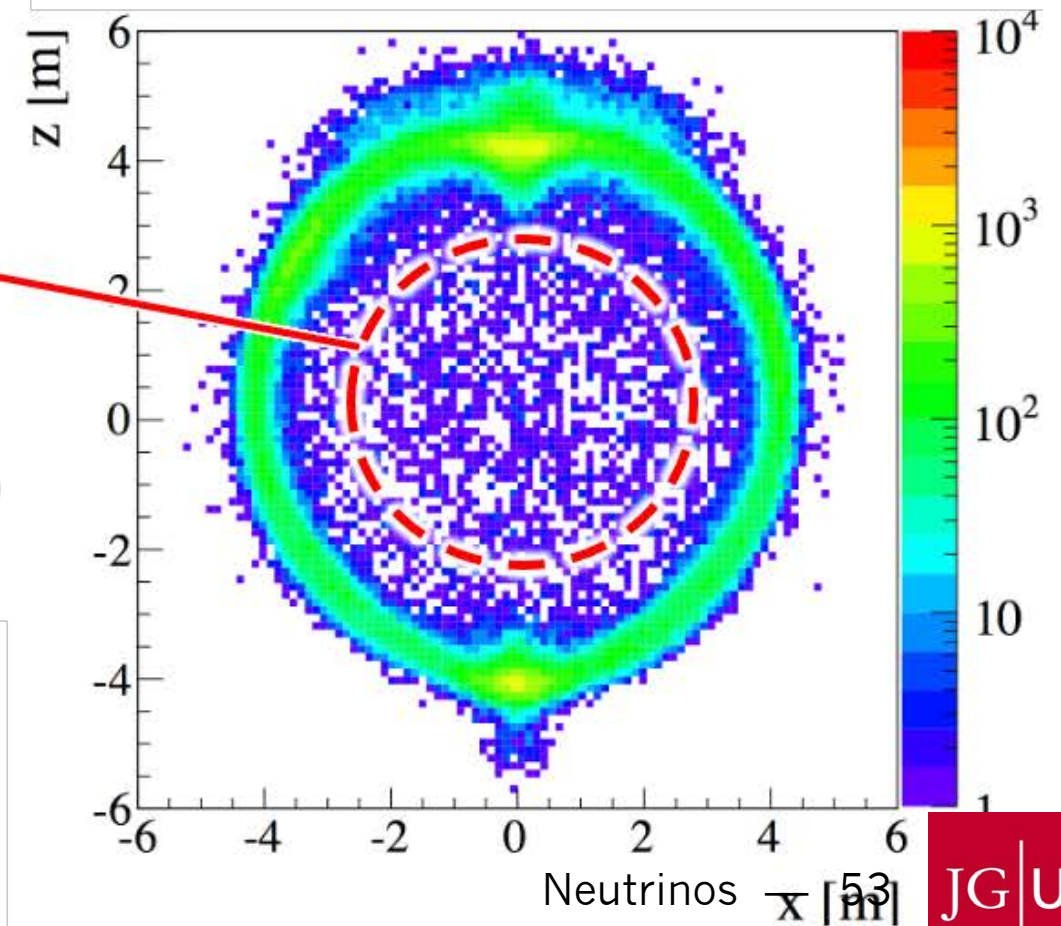
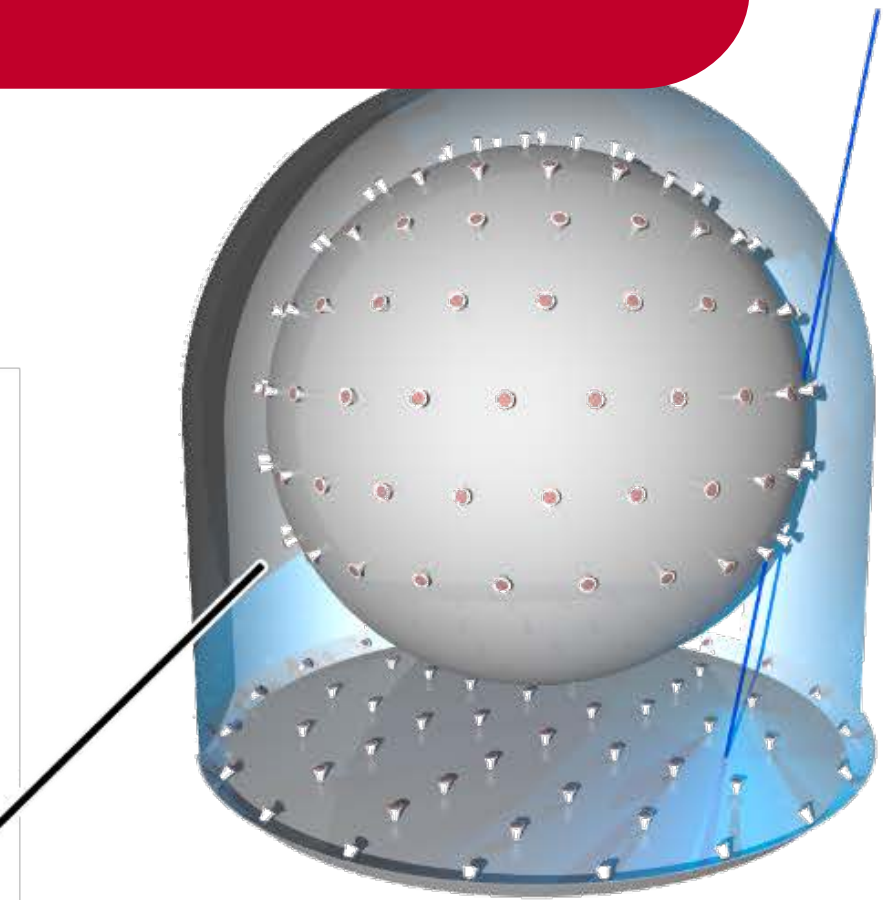
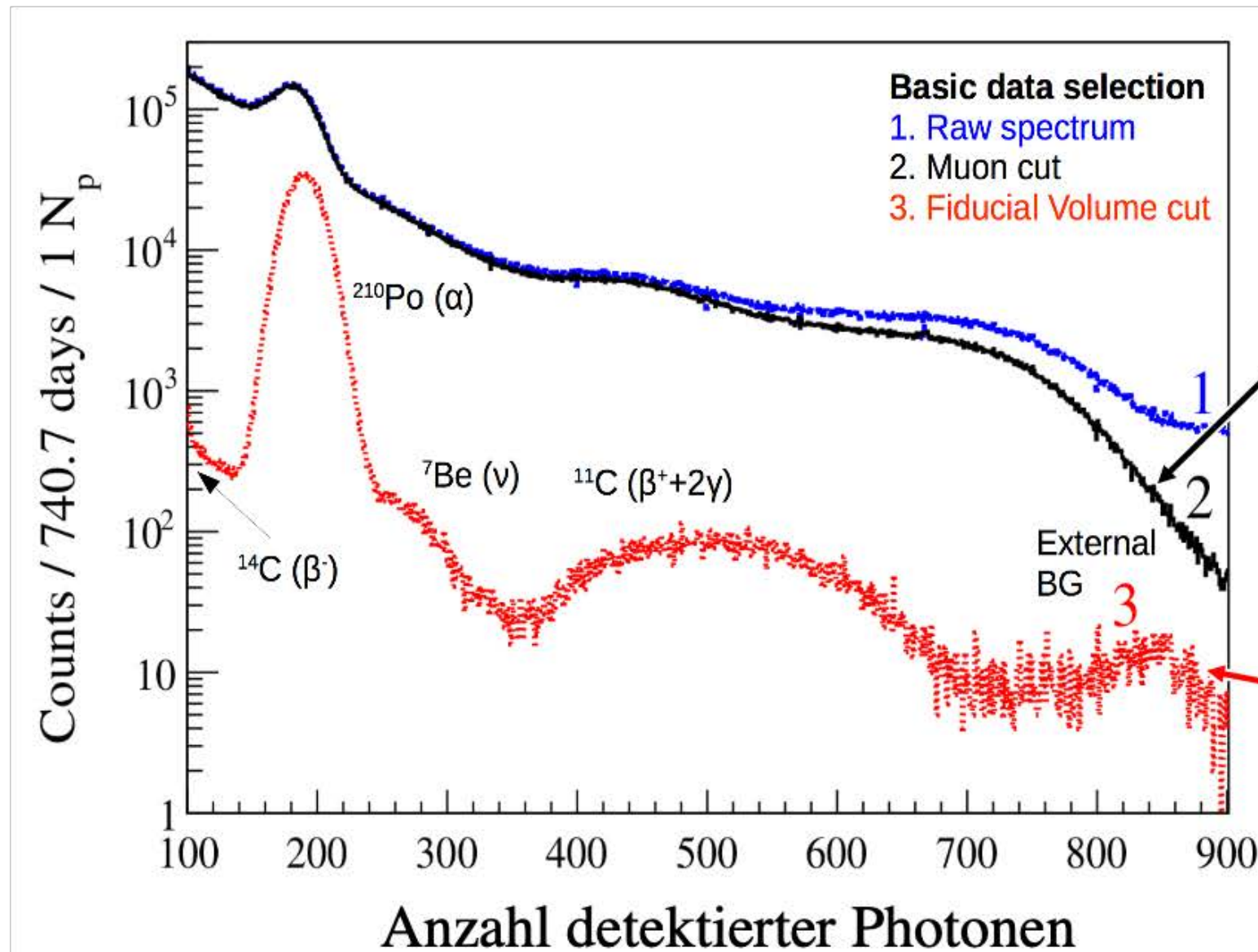


Elektronrückstoßspektrum in Borexino



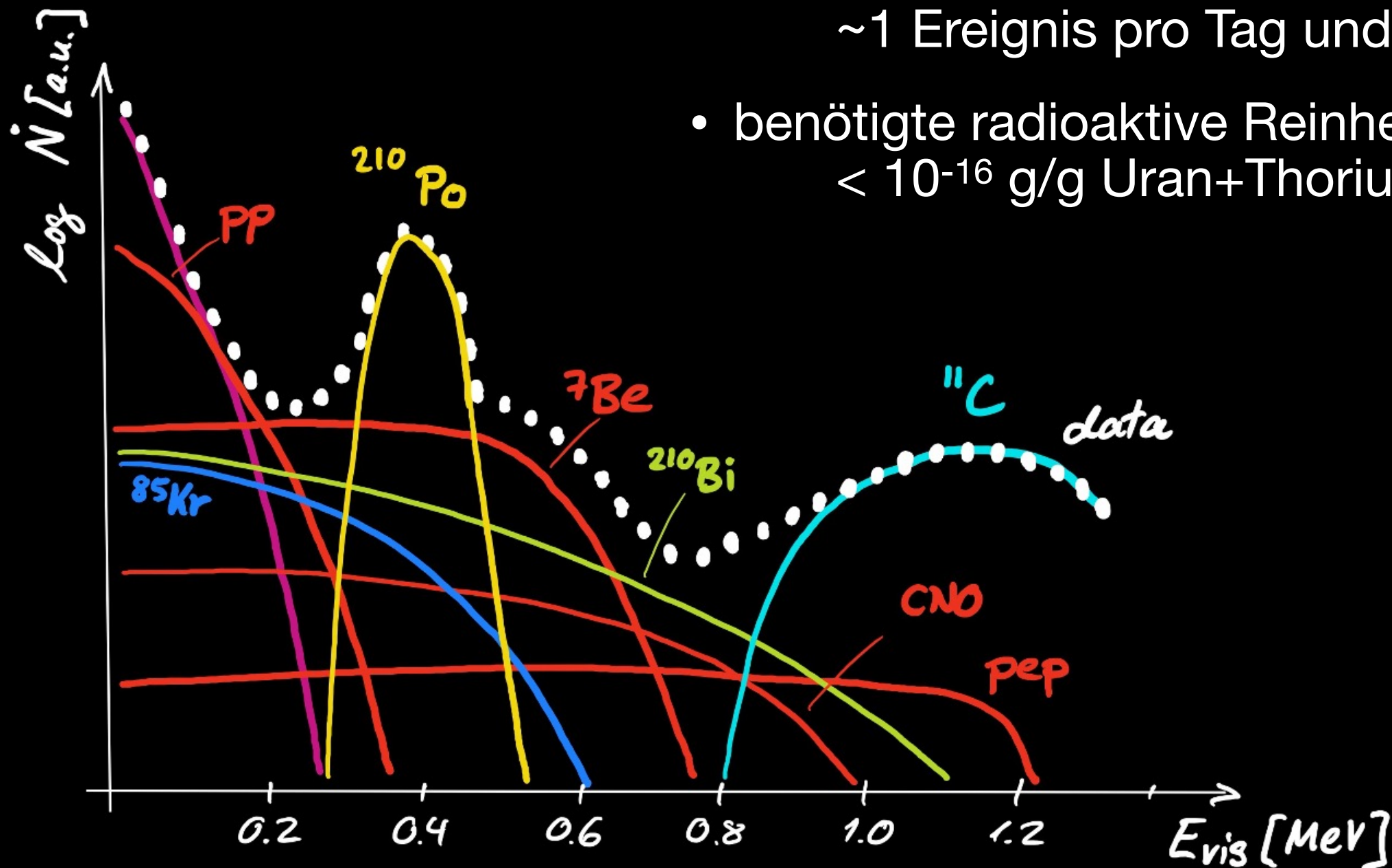
Untergrundreduktion

Energiespektrum in den Rohdaten

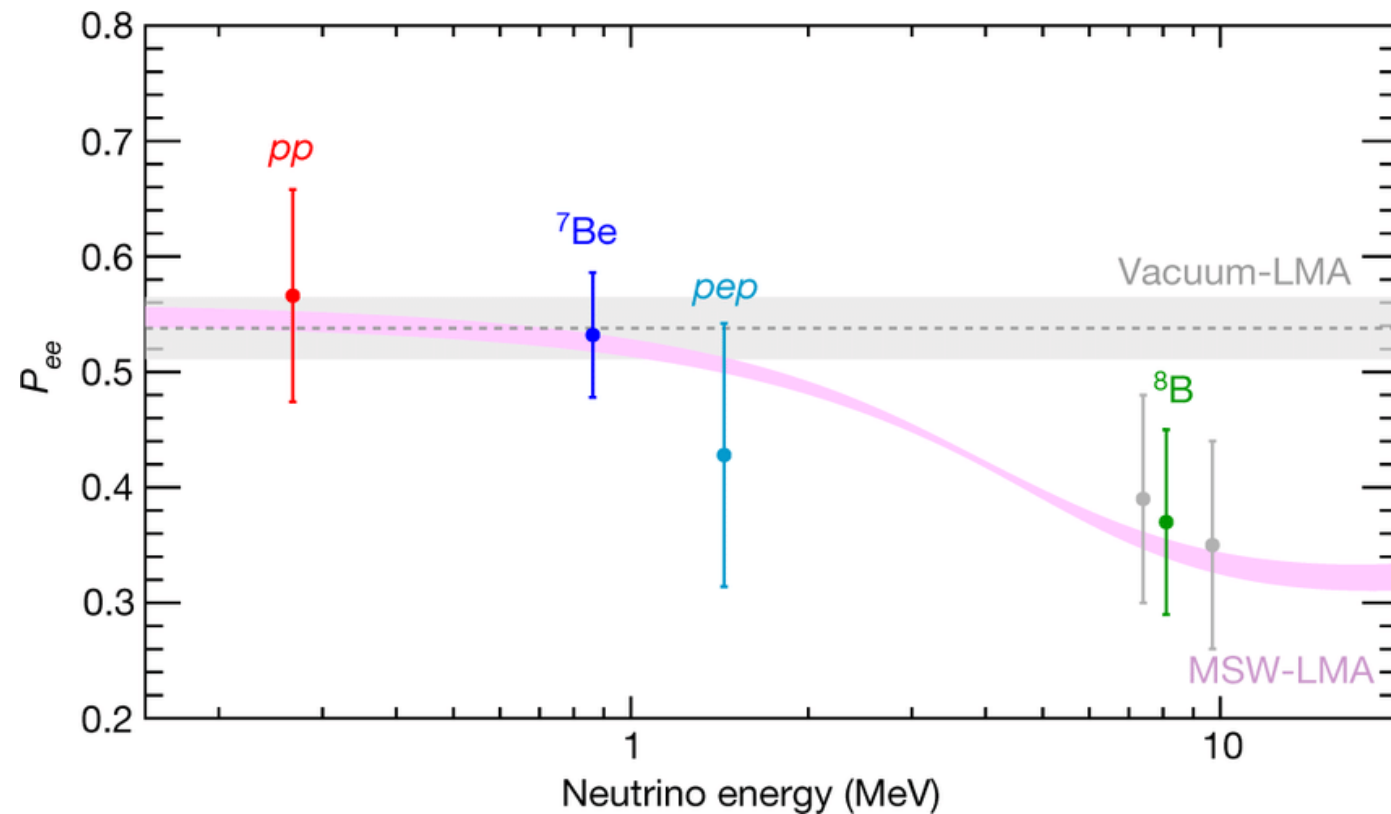


Fit ans verbleibende Energiespektrum

- Fit von bekannten Energiespektren von **Neutrinosignal** und **radioaktiven Zerfällen** ans aufgenommene Datenspektrum
- erwartete Neutrinorate:
~1 Ereignis pro Tag und Tonne
- benötigte radioaktive Reinheit:
< 10^{-16} g/g Uran+Thorium

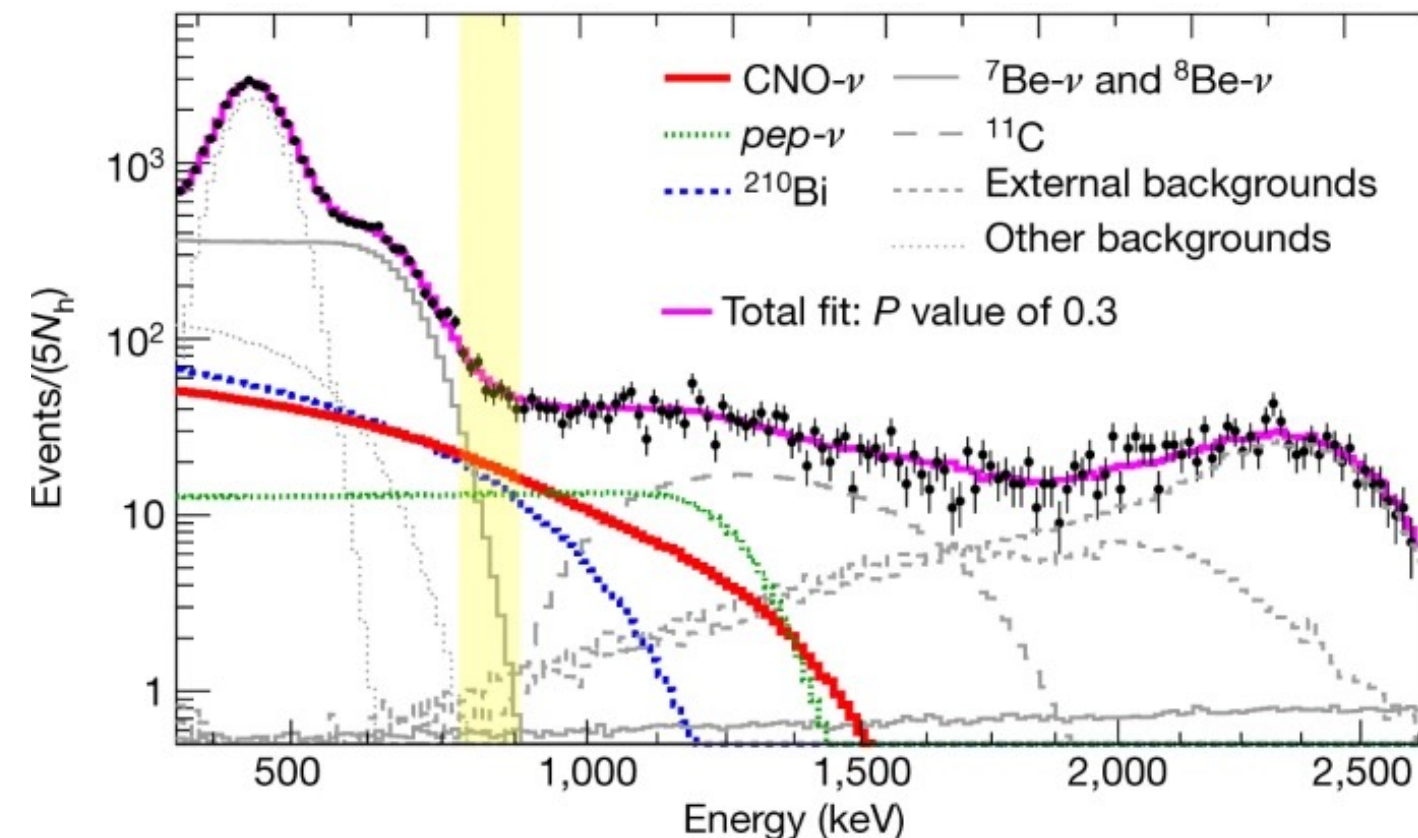


Borexino: Ergebnisse zu solaren Neutrinos



- 2007-2014: Ratenbestimmung der Neutrinos von (fast) allen Reaktionen in der **pp-Kette**

→ Bestätigung des SSM und von Materie/Vakuum-Oszillationen

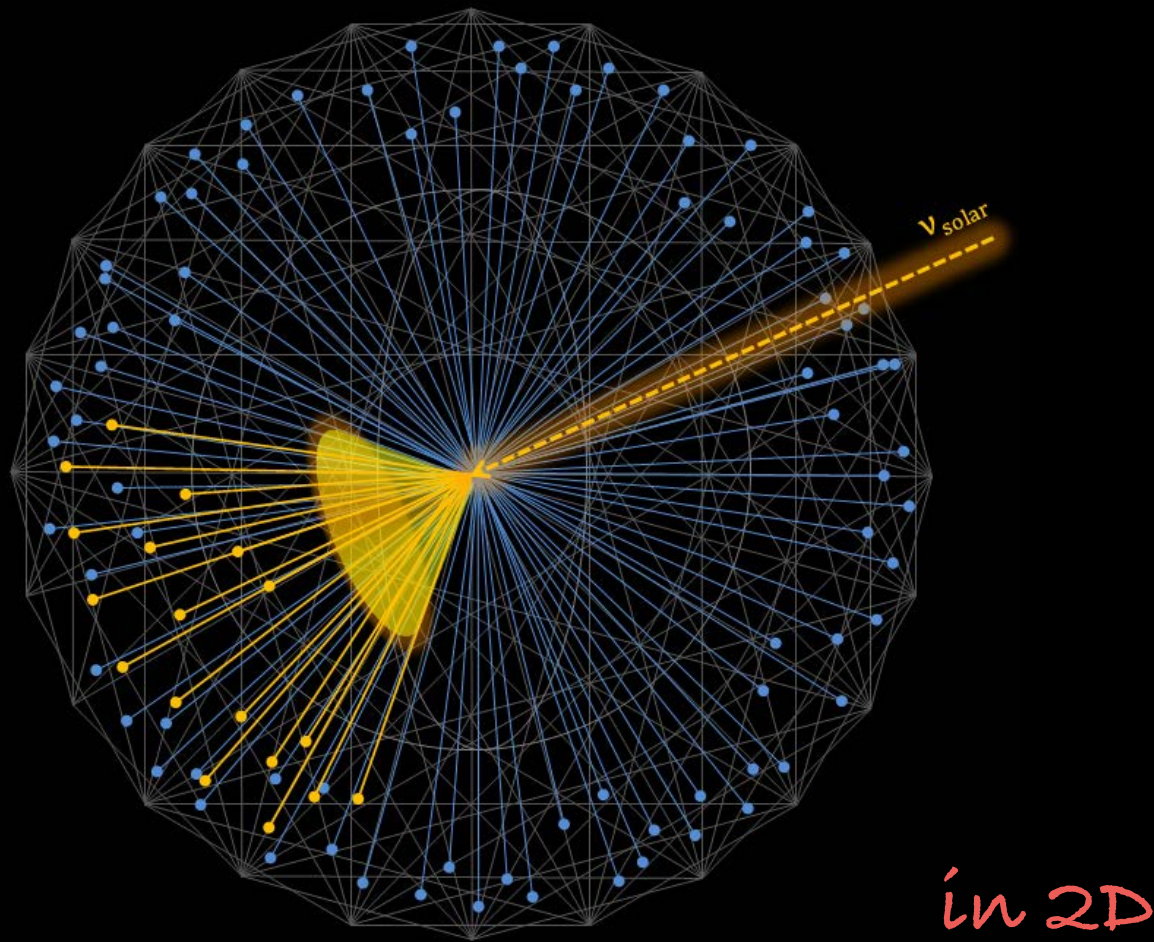


- 2020: Erste Messung von Neutrinos aus dem **CNO Zyklus**

→ Rate passt zum SSM

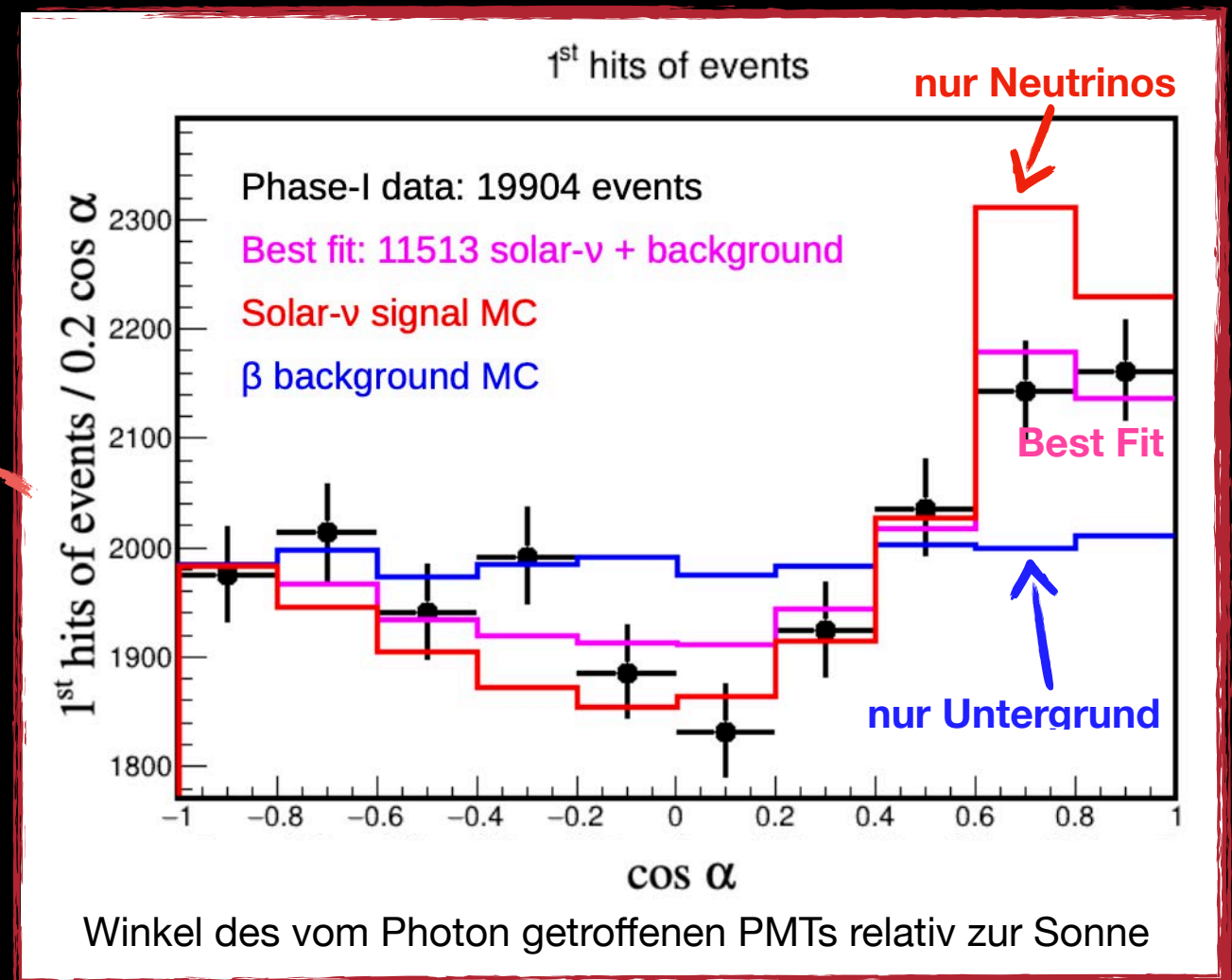
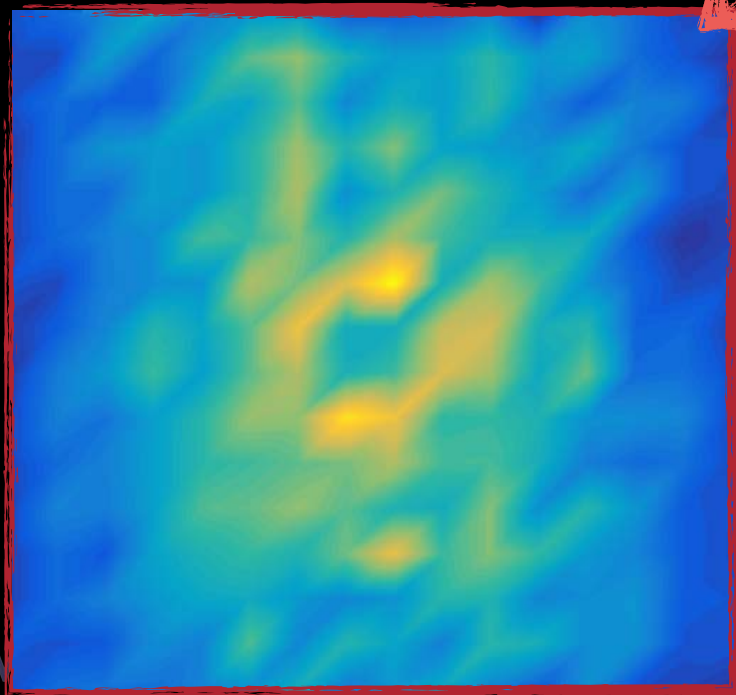
→ erste Hinweise zum “Metallgehalt” (C, N, O) des Sonneninneren

Hier in Mainz: Cherenkov-Signal in Borexino

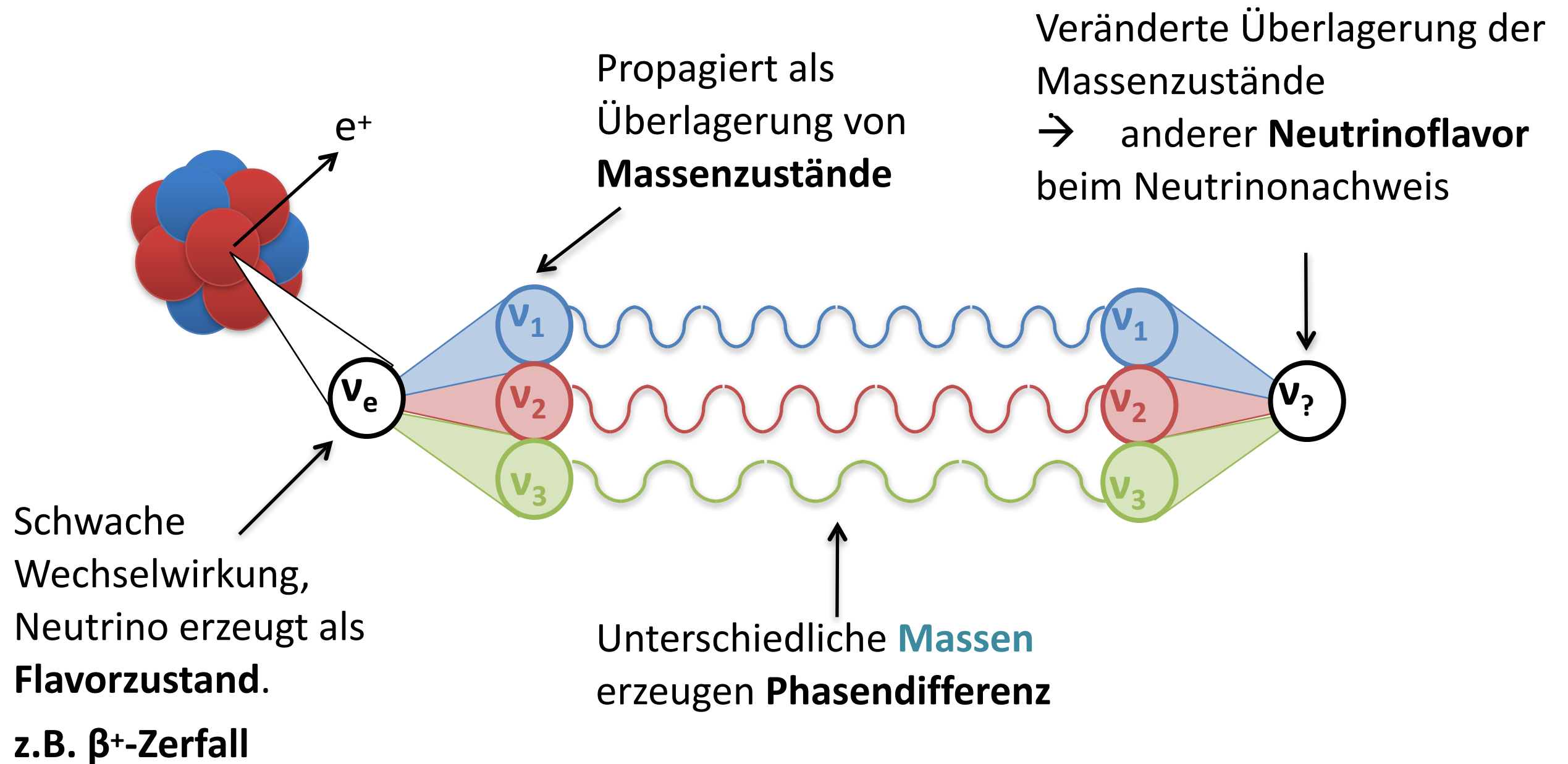


- Cherenkov- und Szintillationssignal sind im Detektor nur überlagert → Richtungsinformation
- kombiniert man die Winkelverteilung der frühen PMT-Hits aus vielen Ereignissen, wird Überschuss in Richtung “weg von der Sonne” sichtbar

in 2D



Neutrinooszillationen

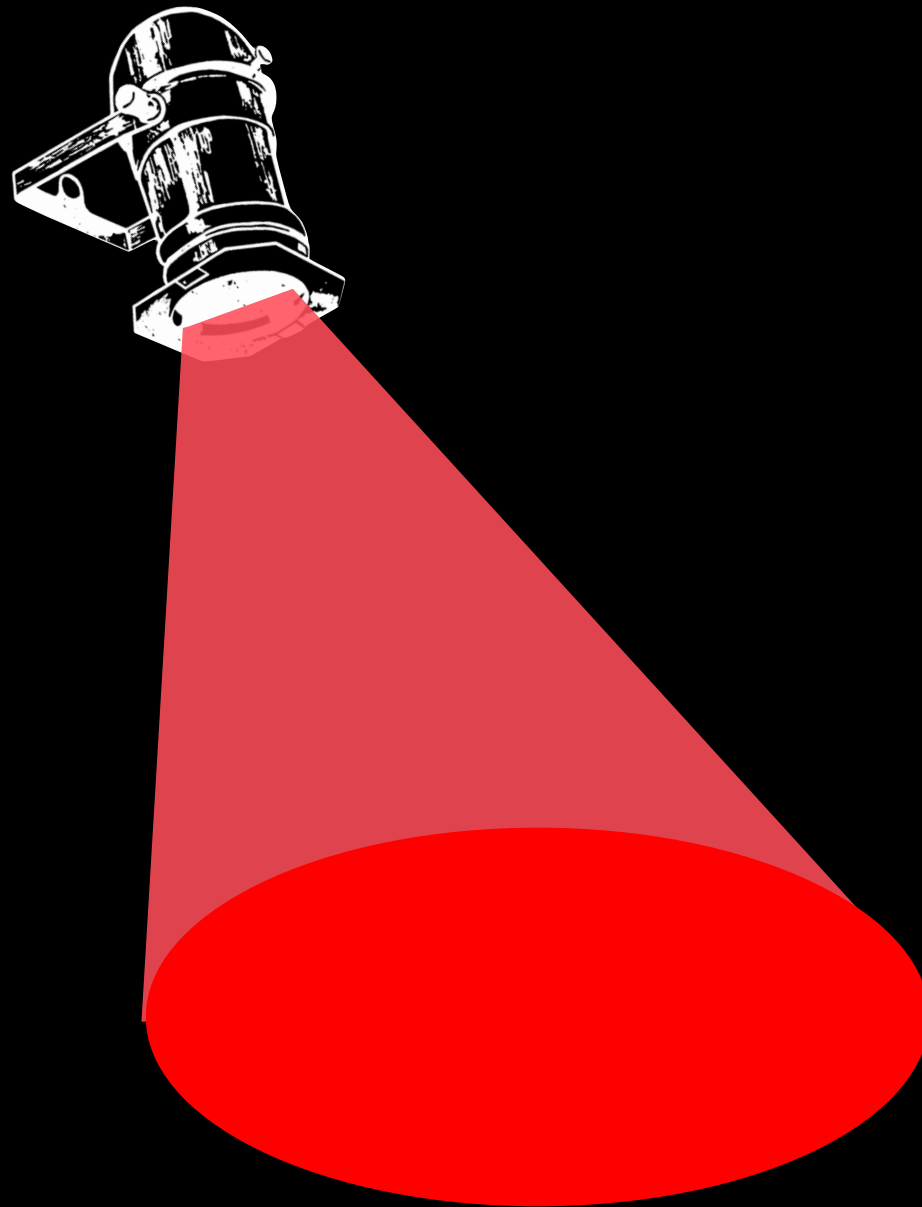


ν Erzeugung

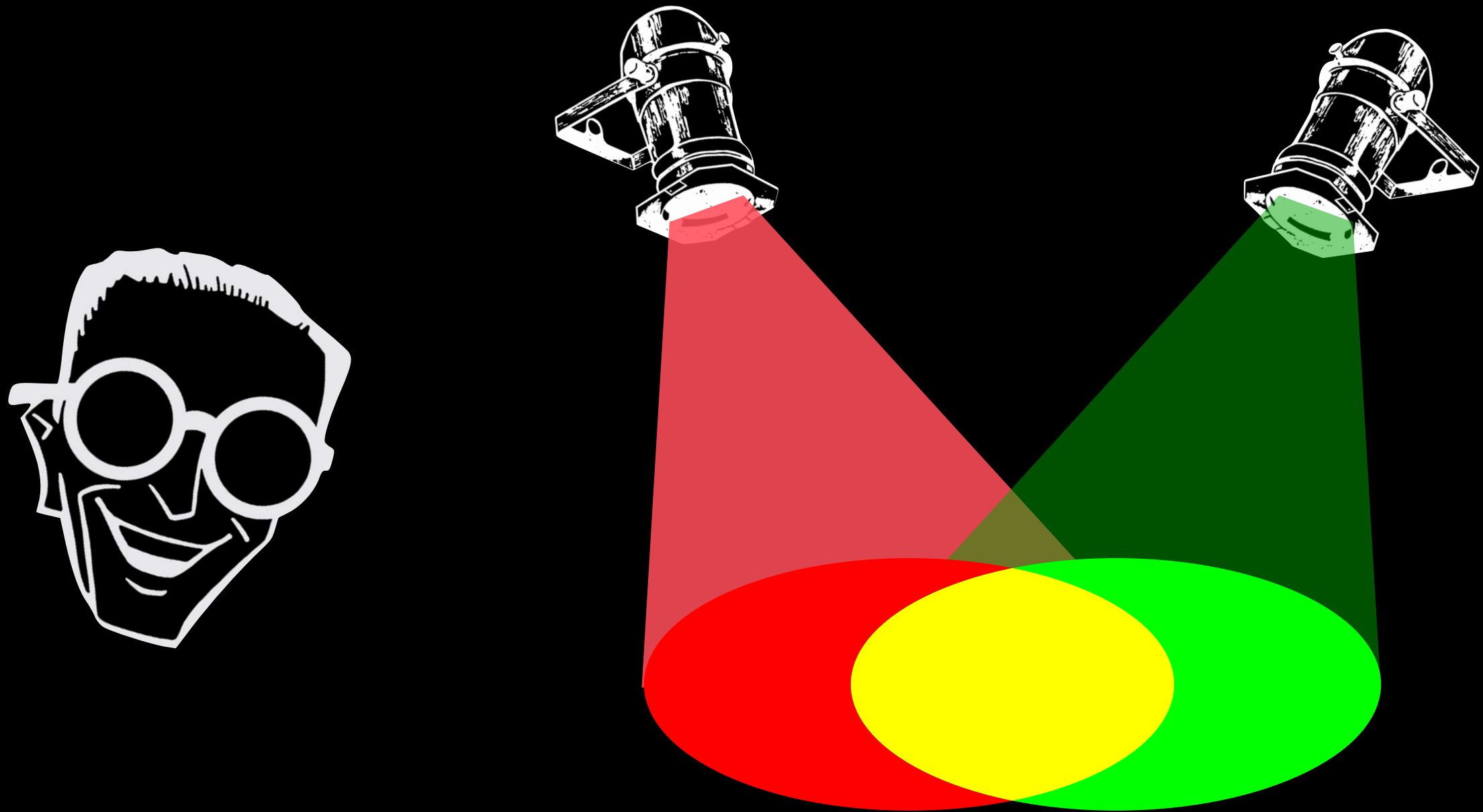
ν Propagation

ν Nachweis

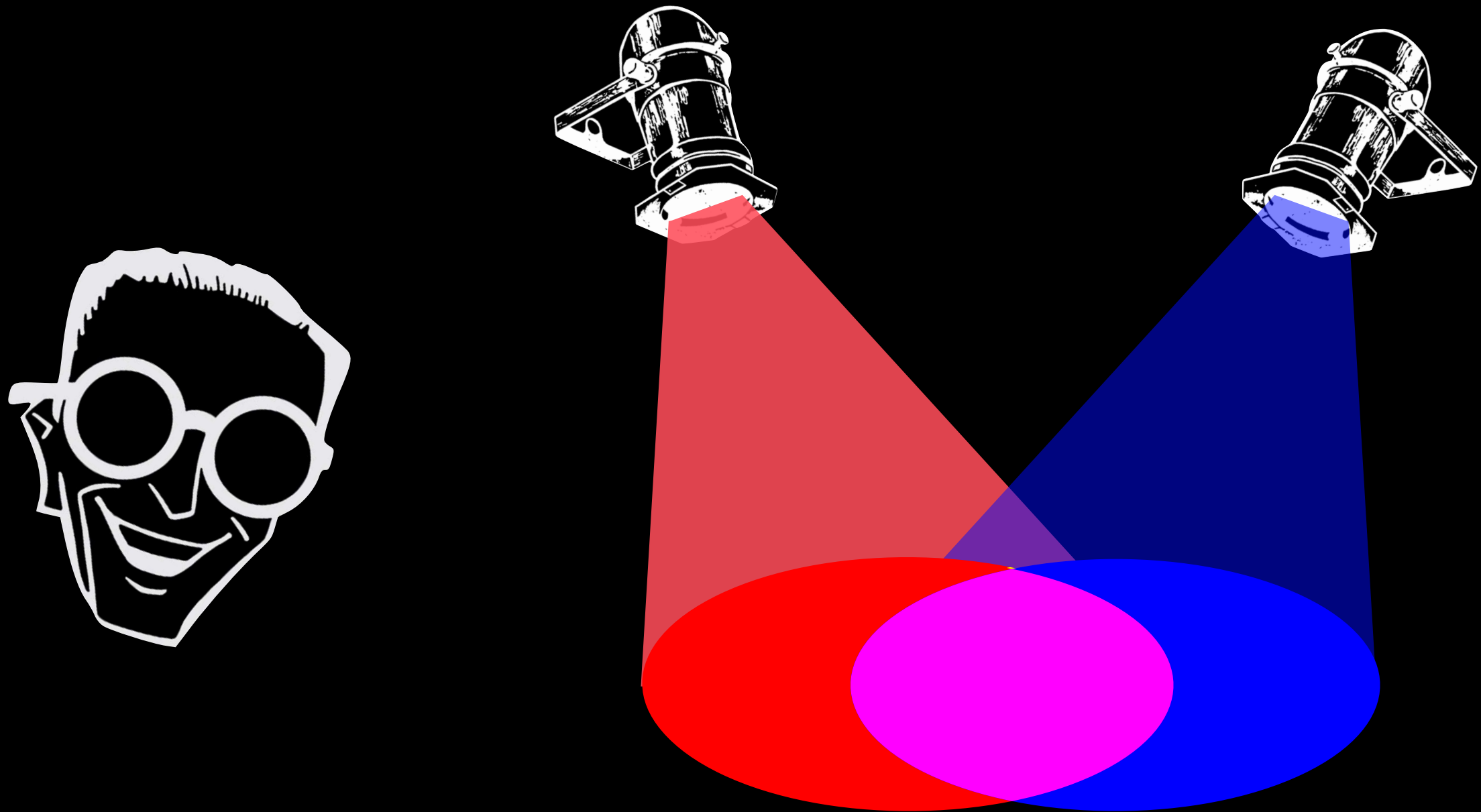
Superpositionsprinzip



Superpositionsprinzip



Superpositionsprinzip

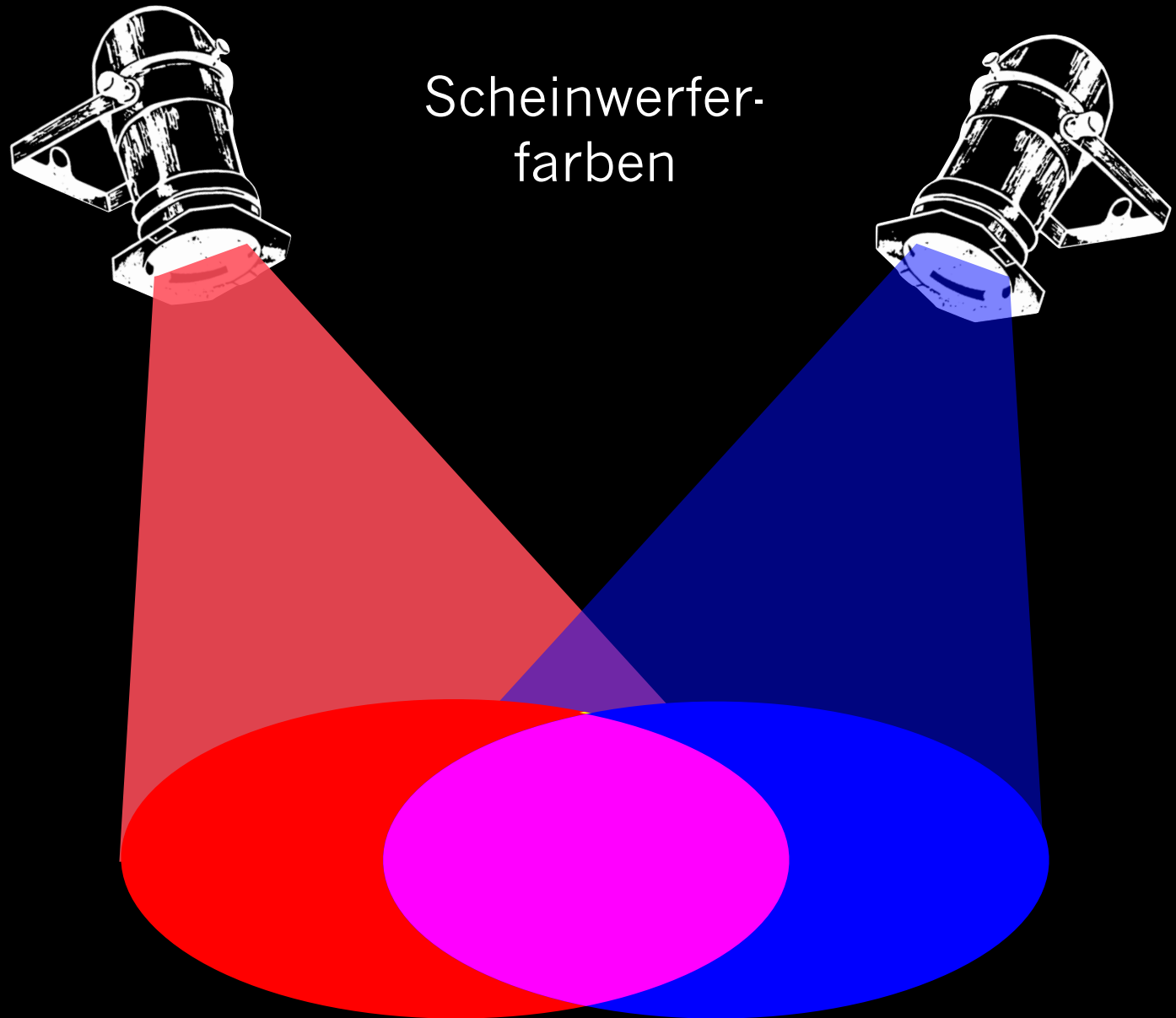


Superpositionsprinzip

Beobachtungs-
farben



Scheinwerfer-
farben

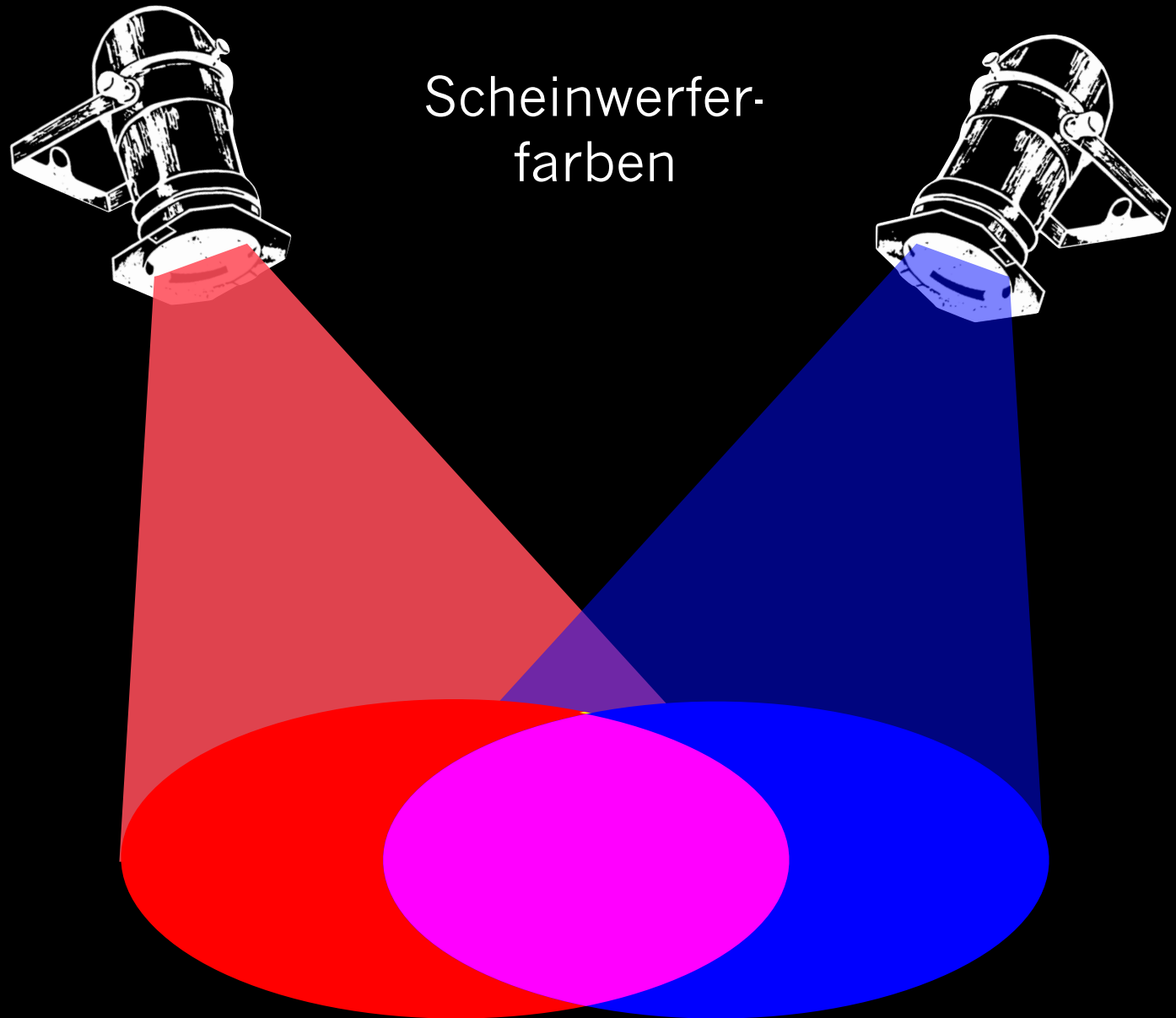


Superpositionsprinzip

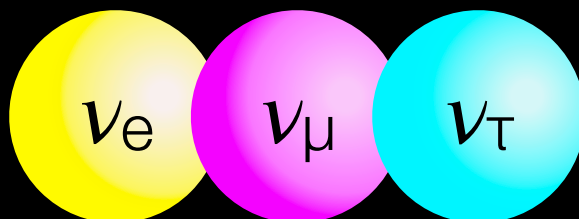
Beobachtungs-
farben



Scheinwerfer-
farben



Flavour-
Eigenzustände

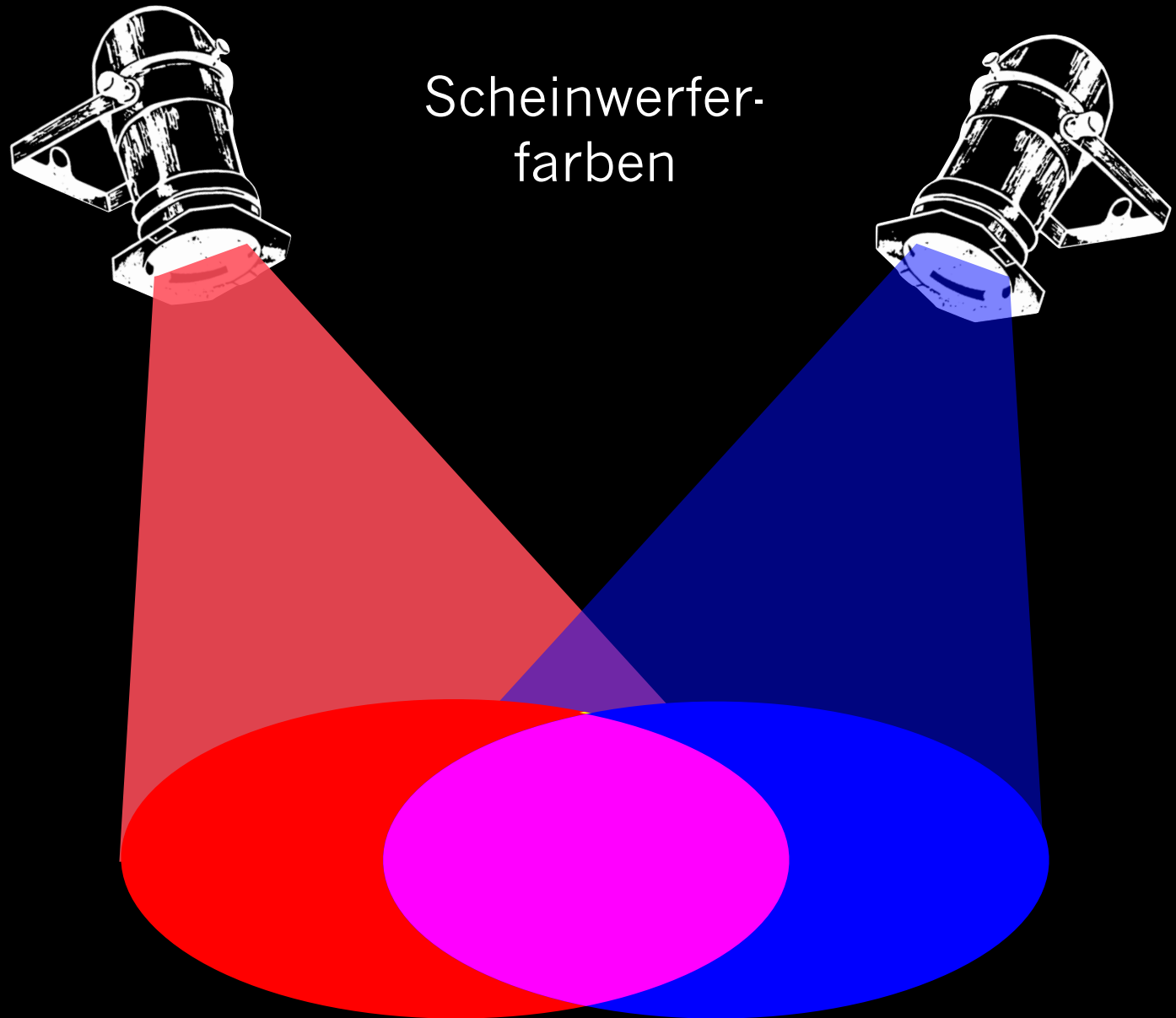


Superpositionsprinzip

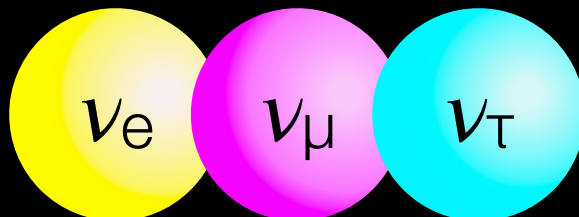
Beobachtungs-
farben



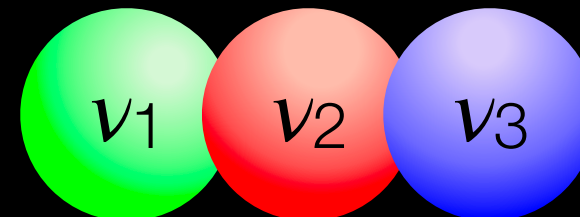
Scheinwerfer-
farben



Flavour-
Eigenzustände



Massen-
Eigenzustände

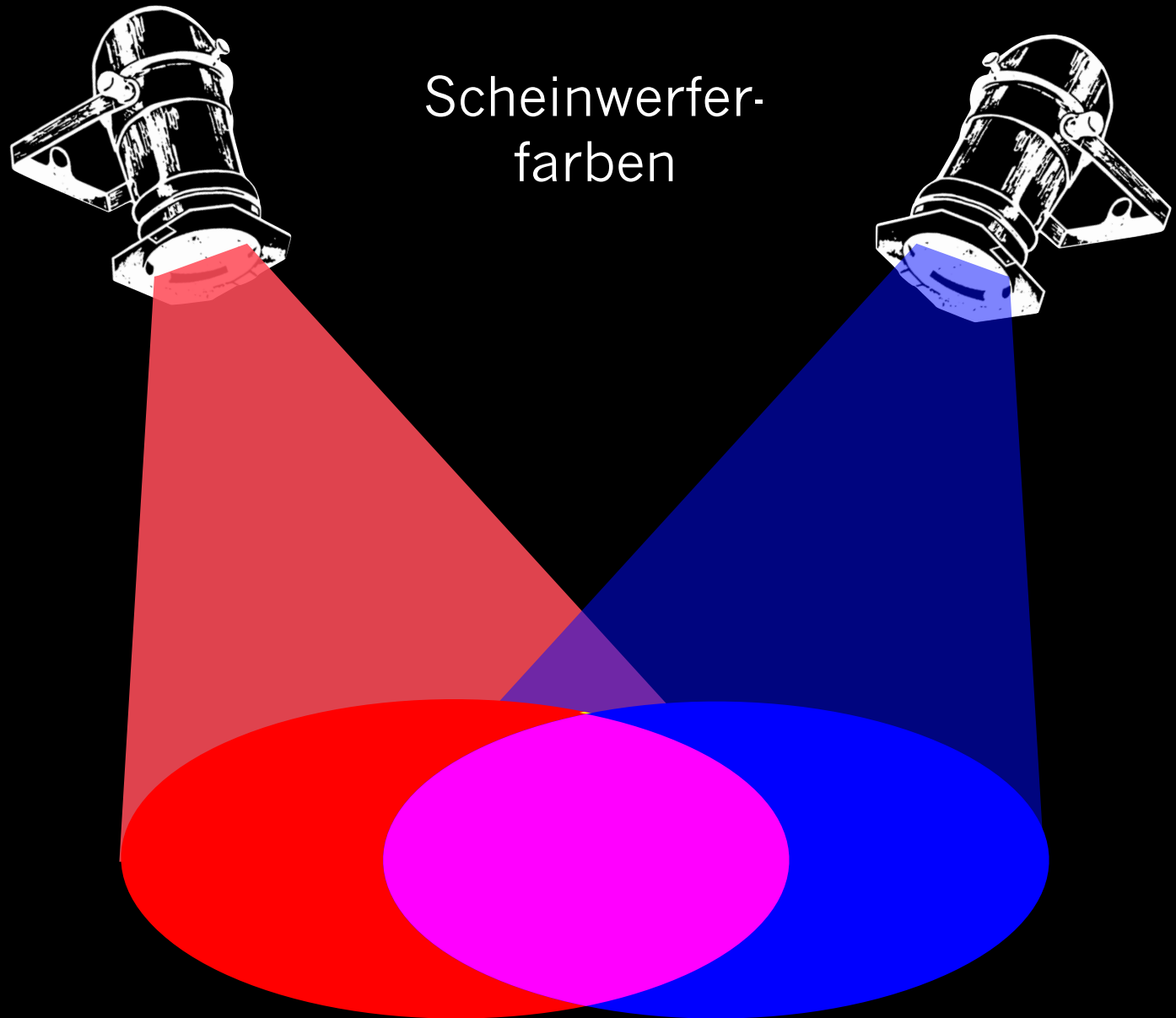


Superpositionsprinzip

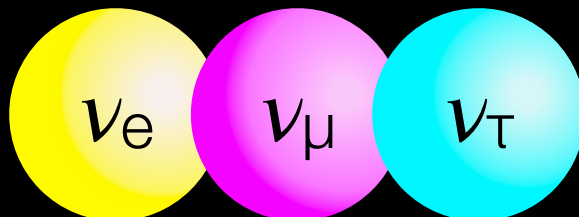
Beobachtungs-
farben



Scheinwerfer-
farben



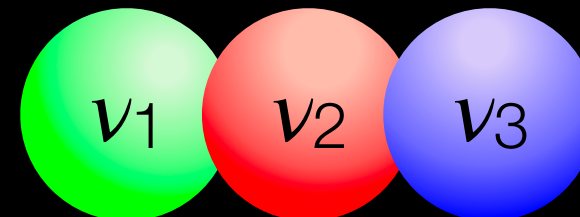
Flavour-
Eigenzustände



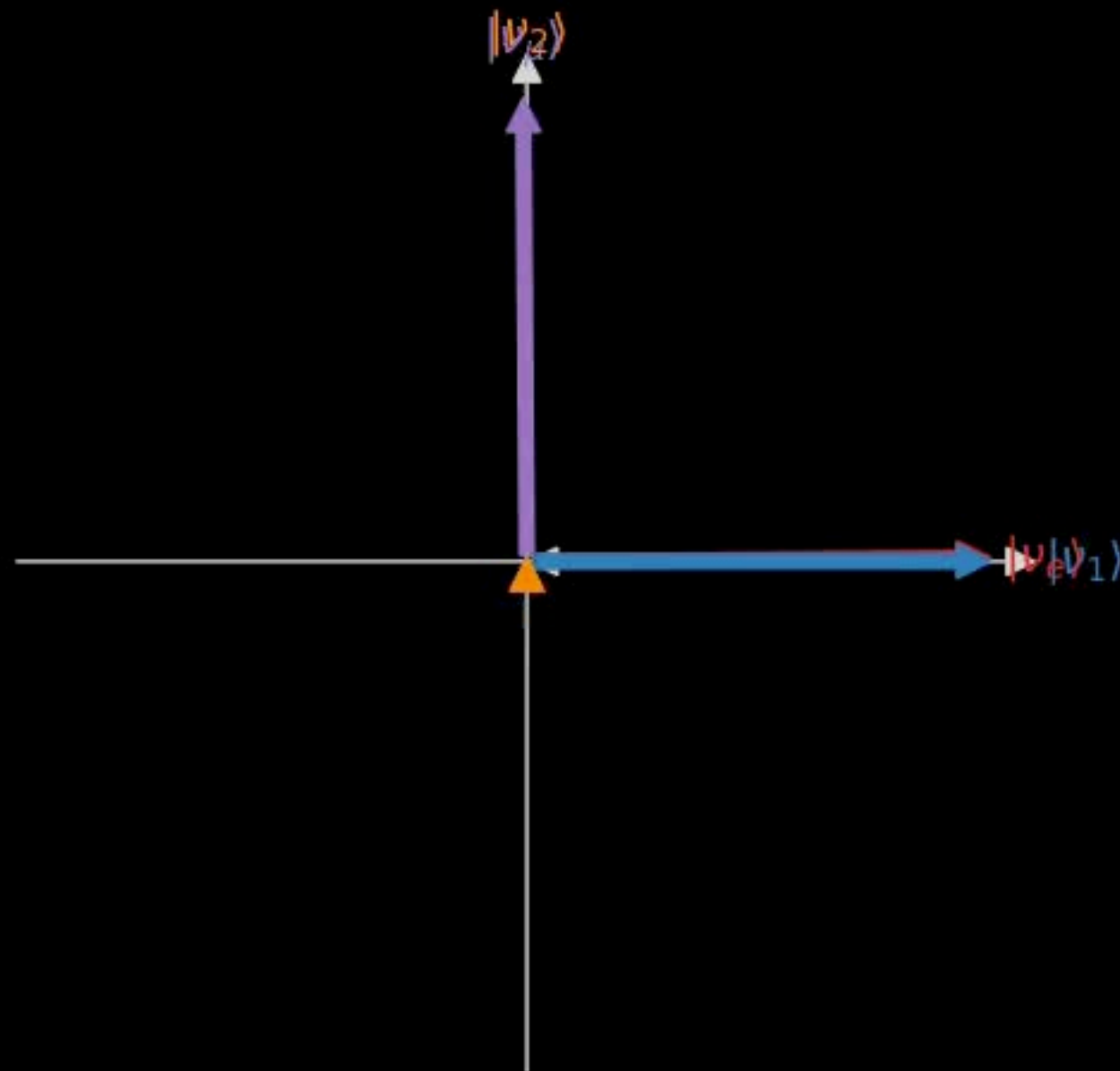
Mischung



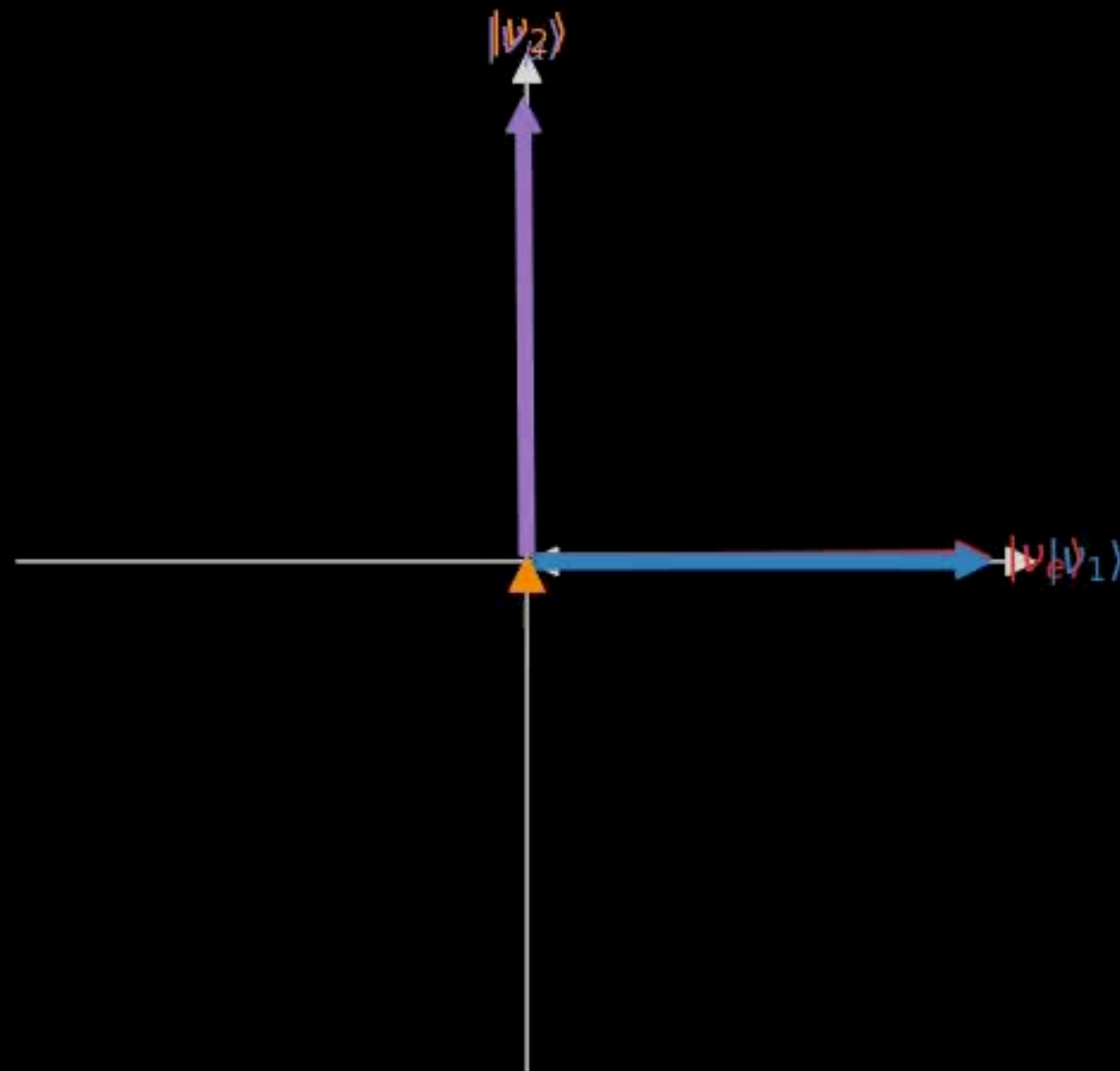
Massen-
Eigenzustände



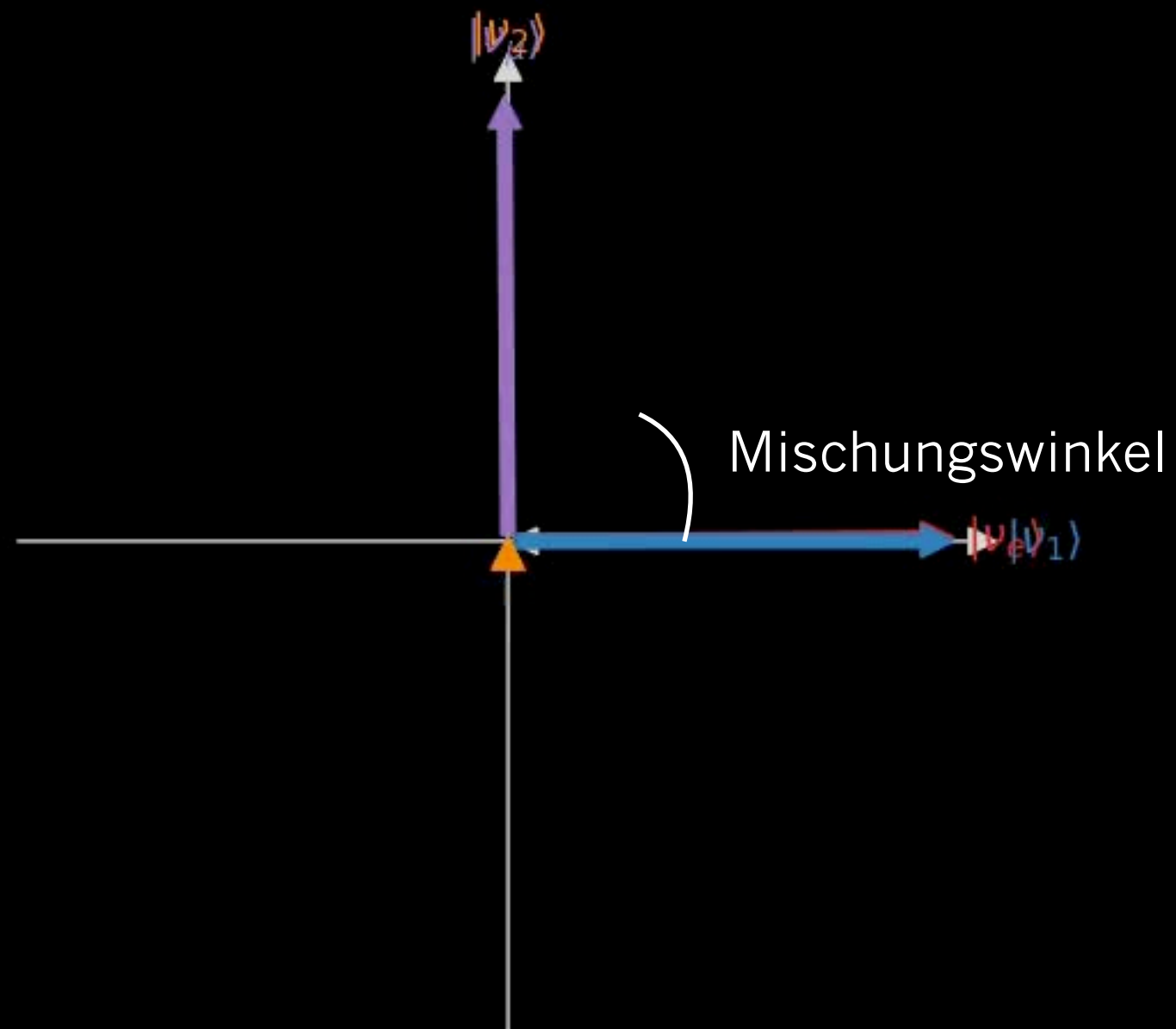
Neutrinoschwingungen



Neutrinoschwingungen

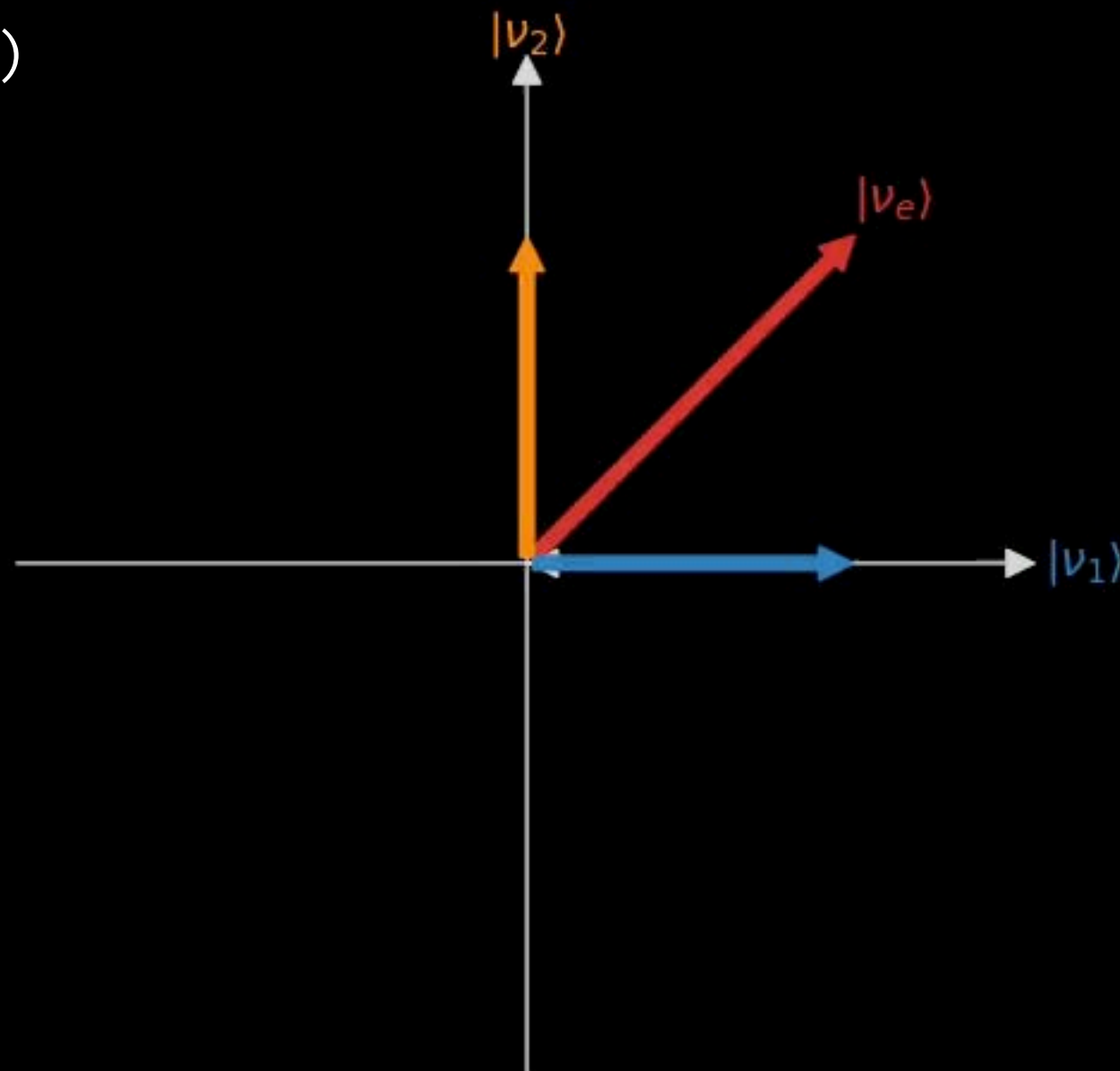


Neutrinoschwingungen



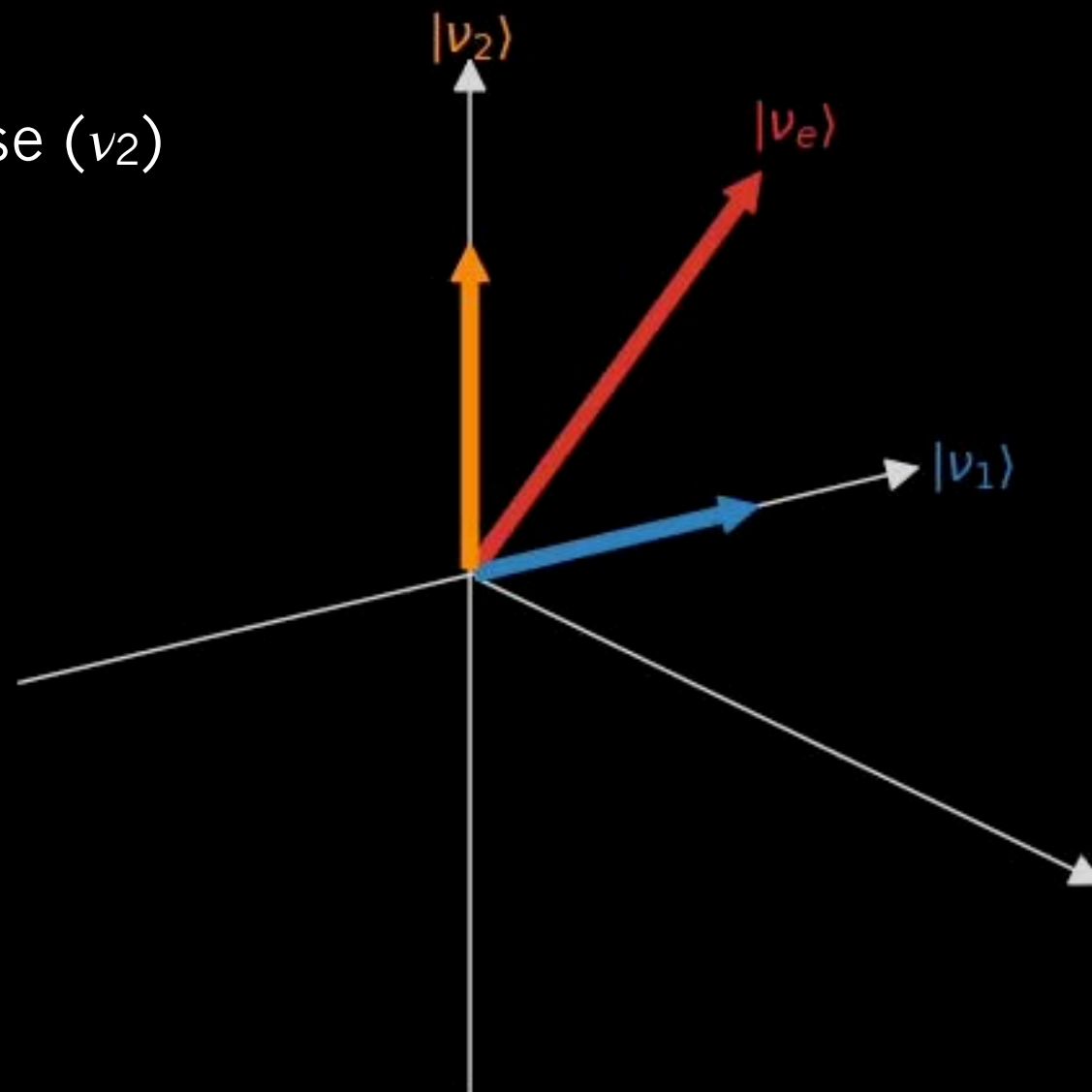
Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) = Masse (ν_2)



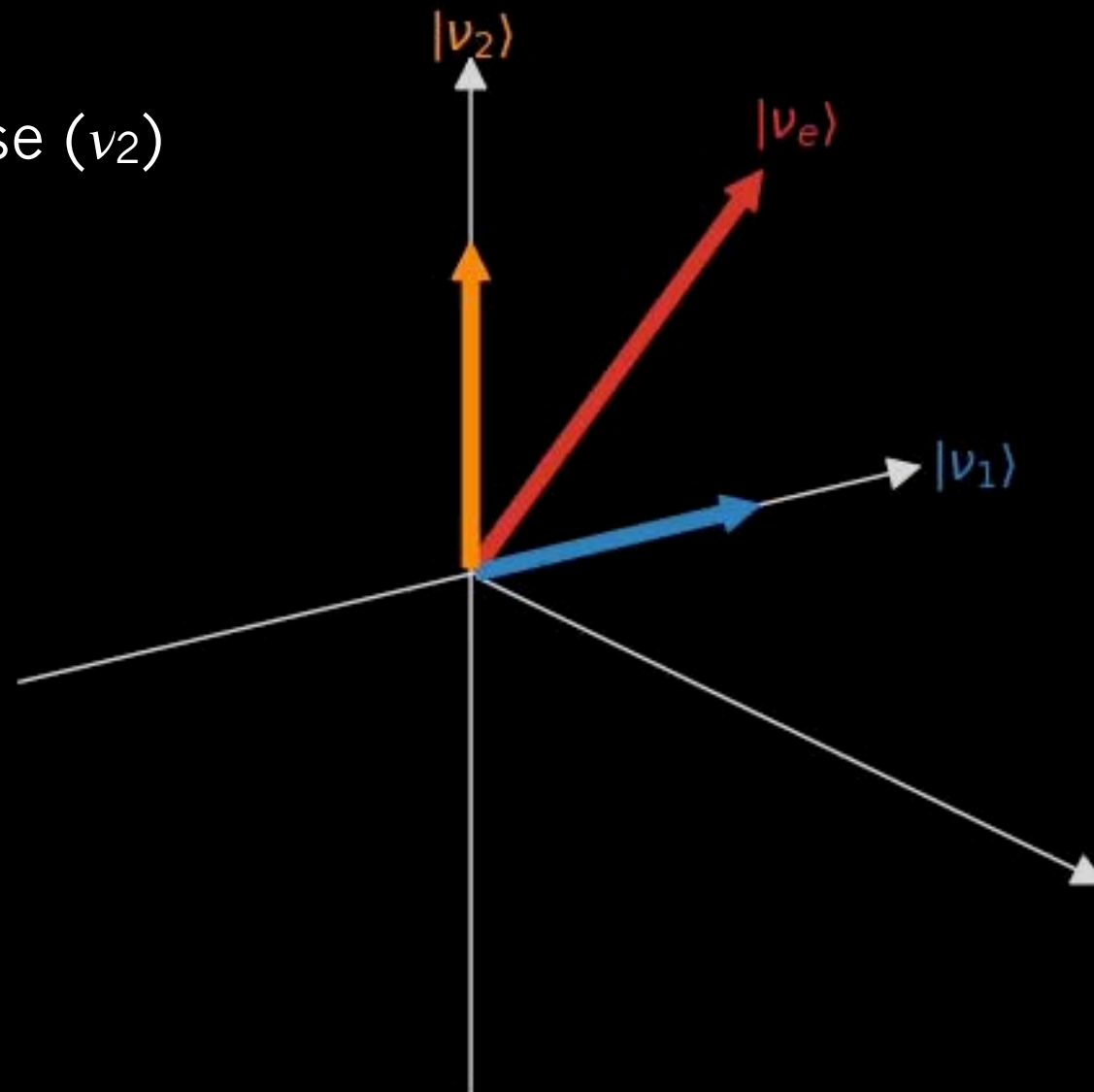
Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) > Masse (ν_2)



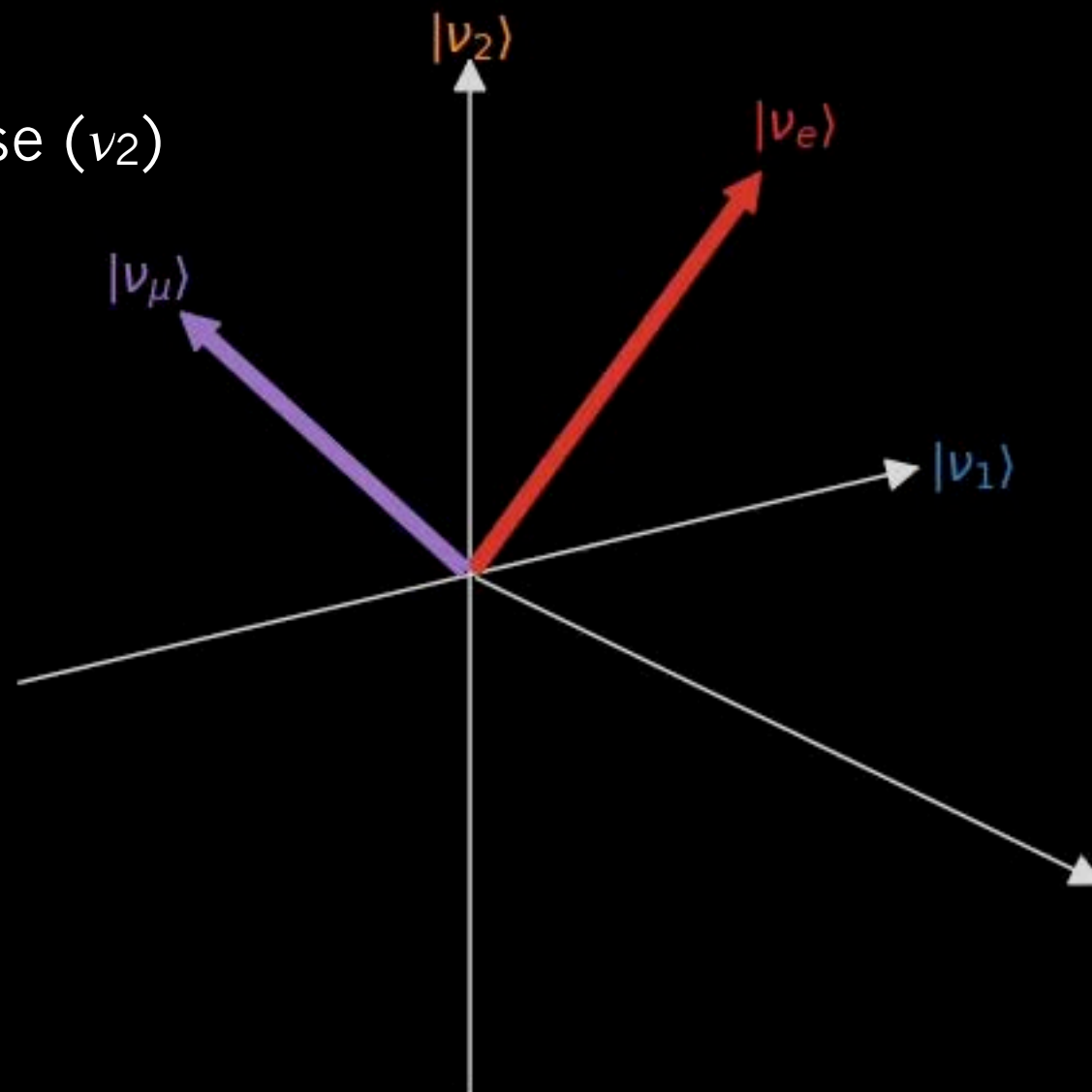
Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) > Masse (ν_2)



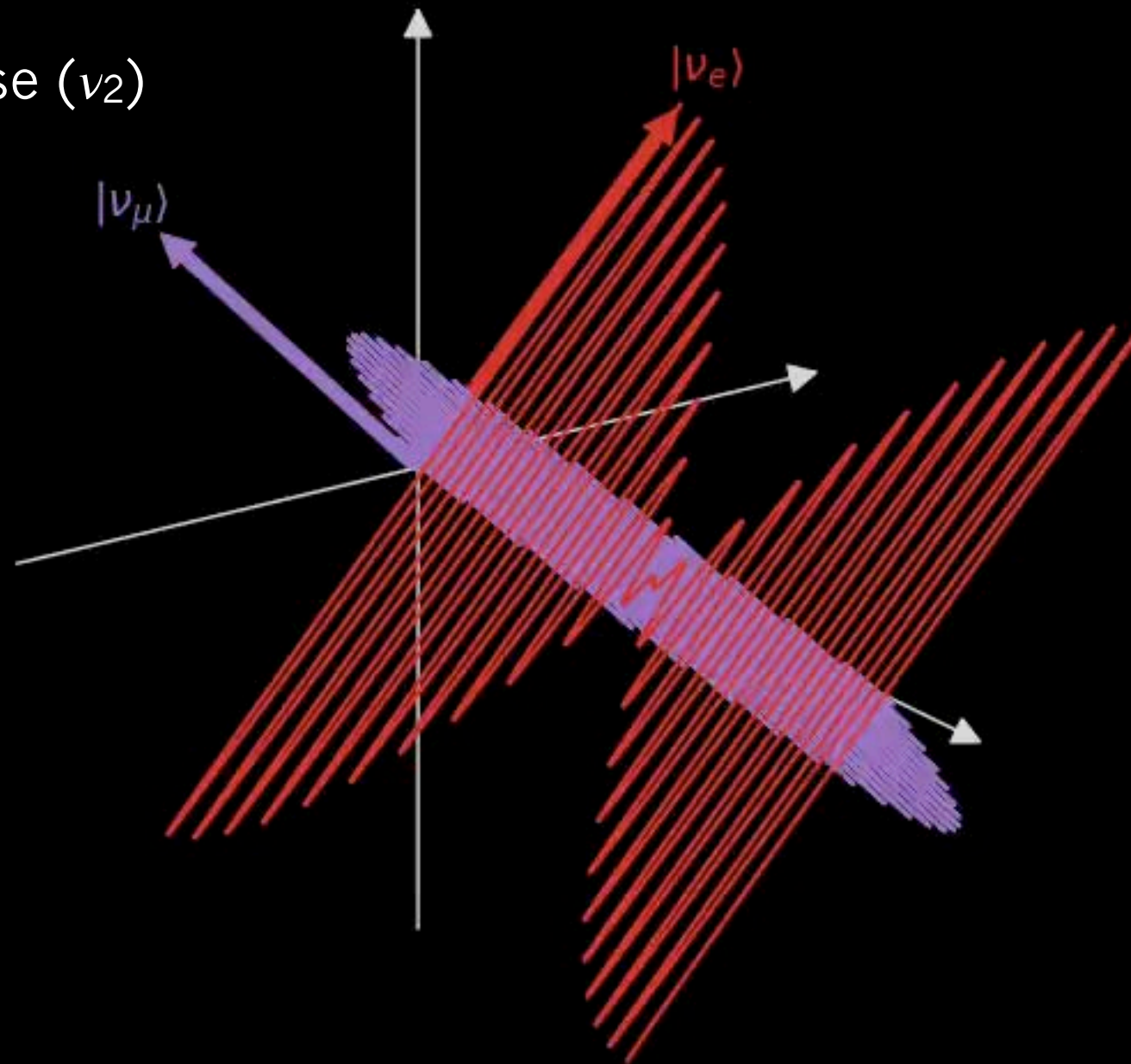
Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) > Masse (ν_2)



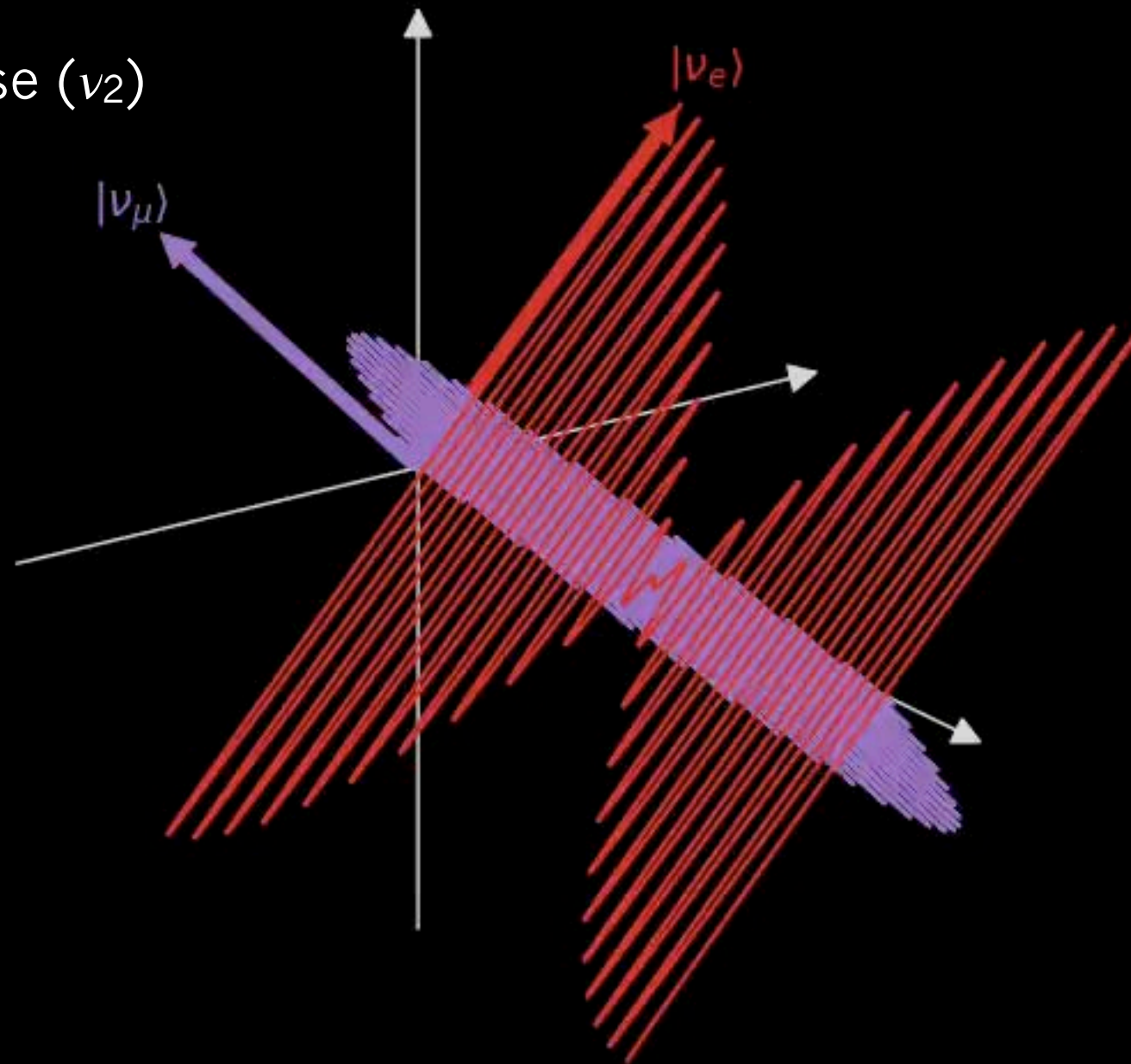
Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) > Masse (ν_2)



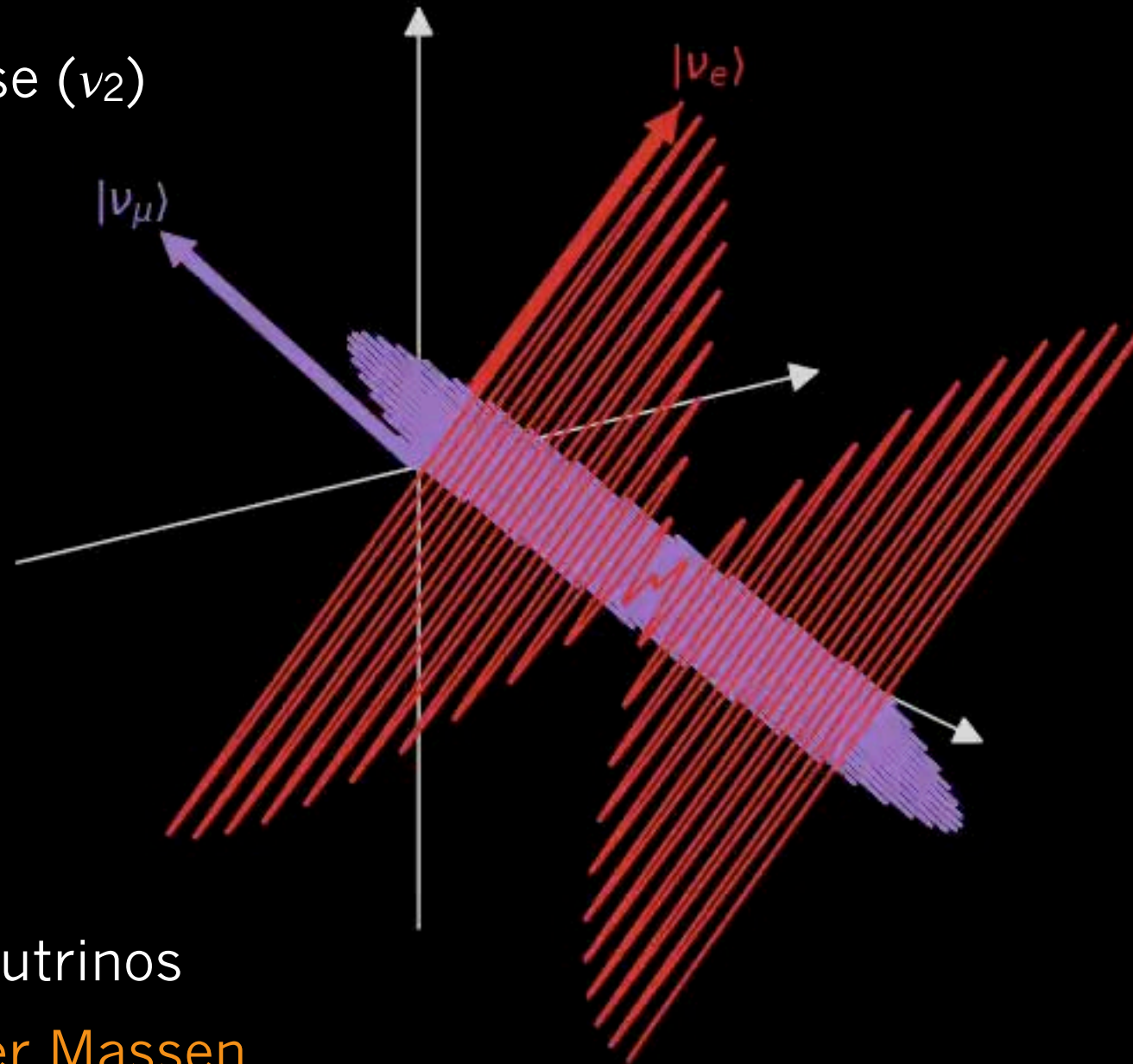
Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) > Masse (ν_2)



Neutrinoschwingungen

Masse(ν_1) > Masse (ν_2)



Abhängig von

- Flugstrecke
- Energie der Neutrinos
- Unterschied der Massen
- Stärke der Mischung (Mischungswinkel)

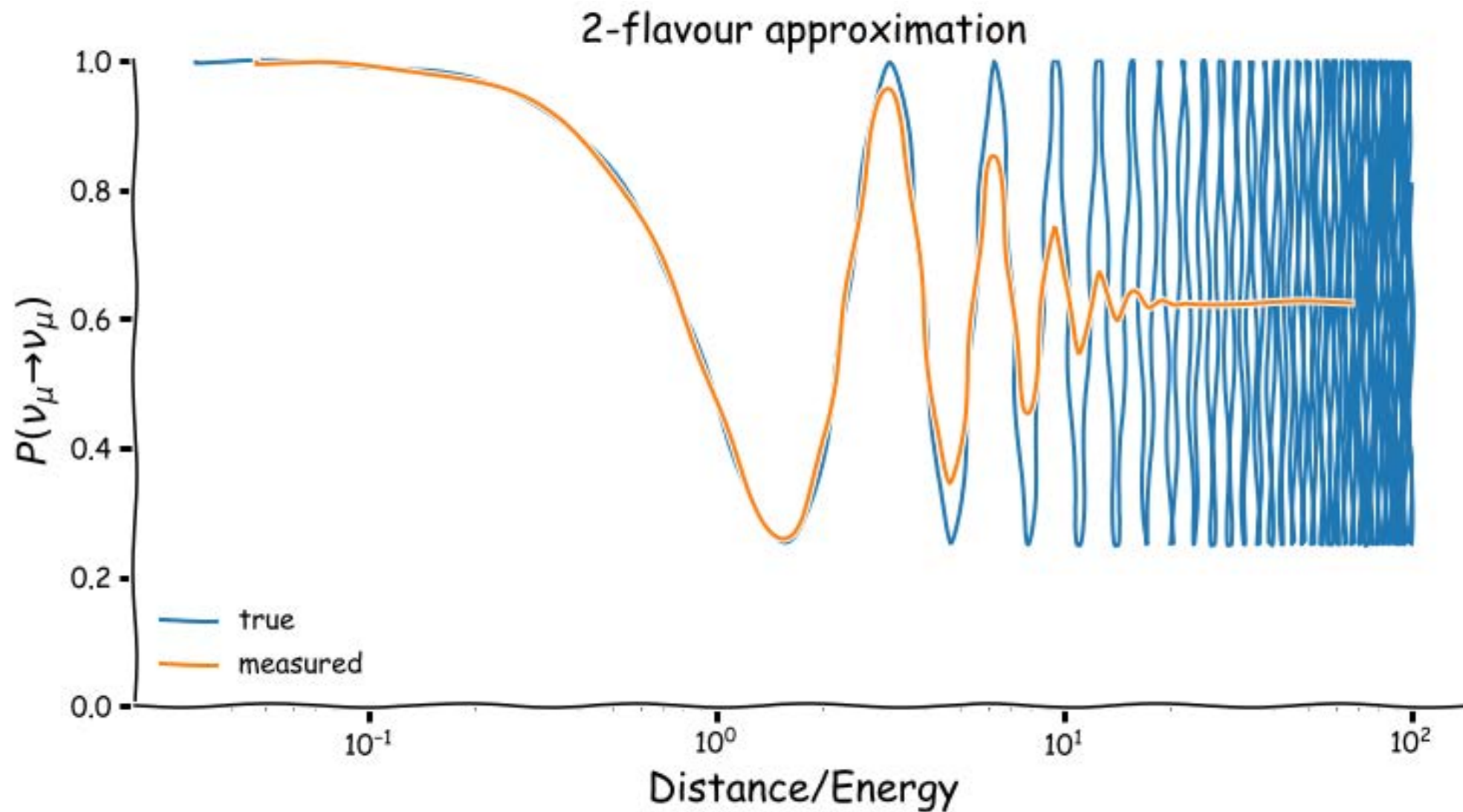
Neutrino Oszillationen

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

natural units!

Neutrino Oszillationen

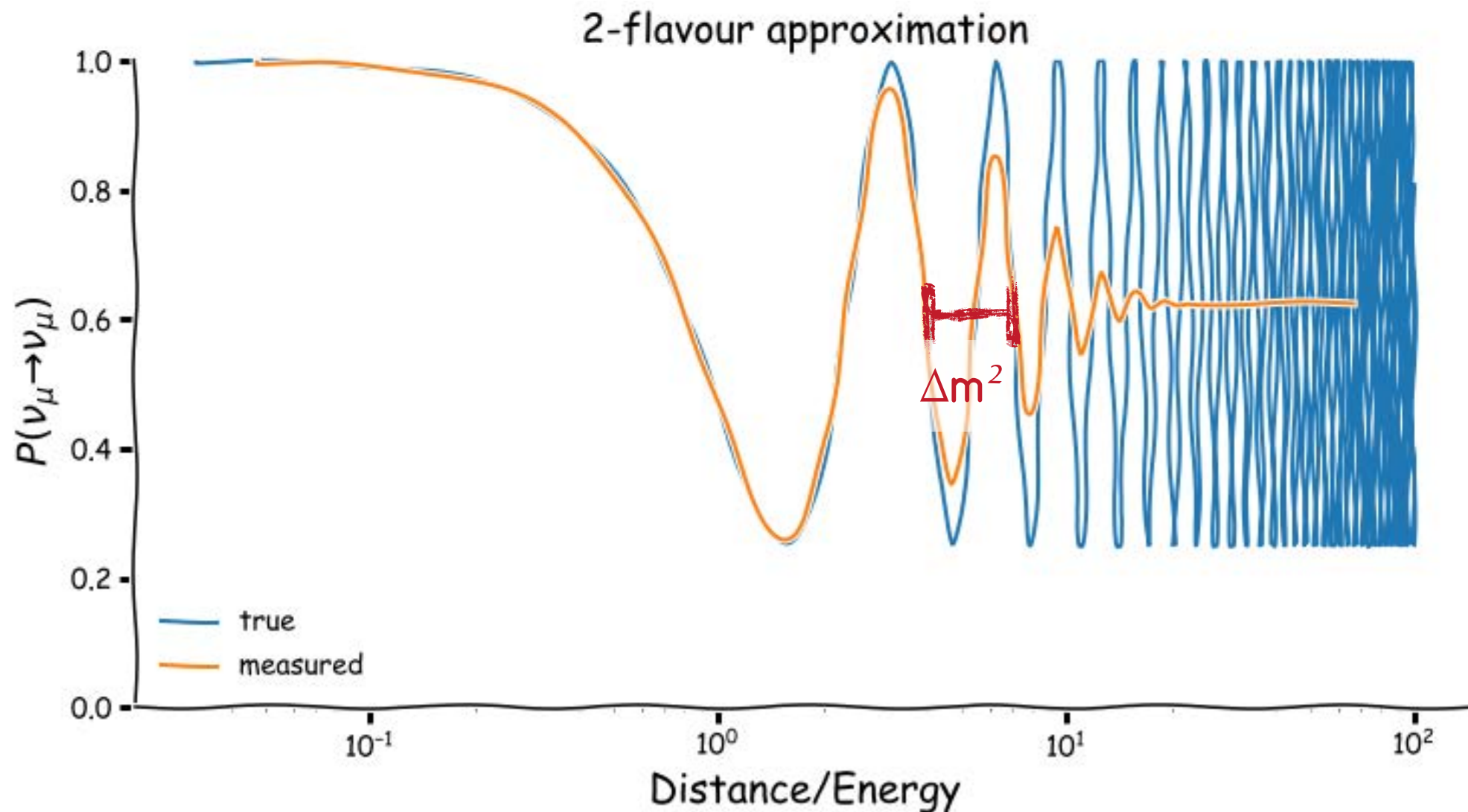
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$



Neutrino Oszillationen

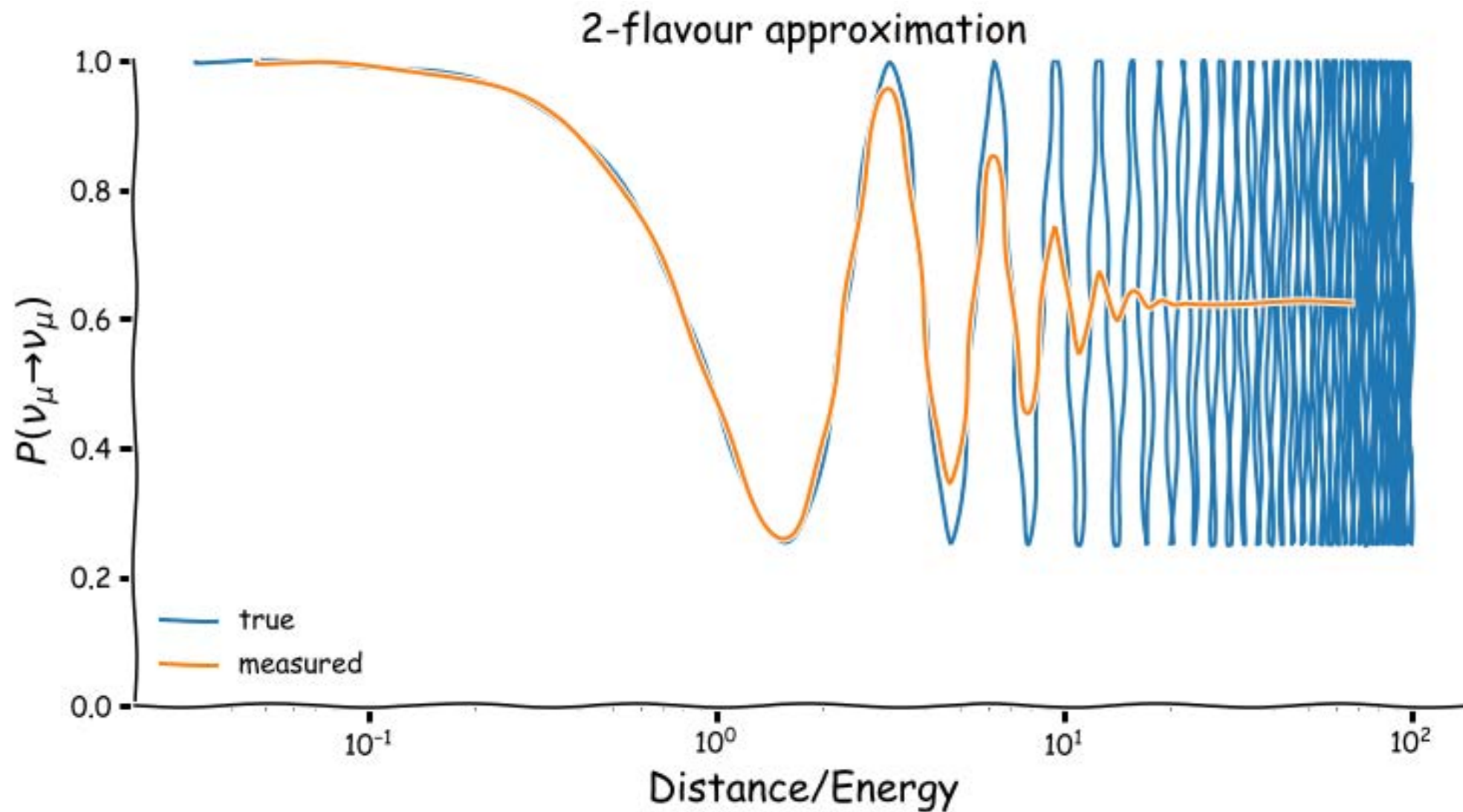
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$



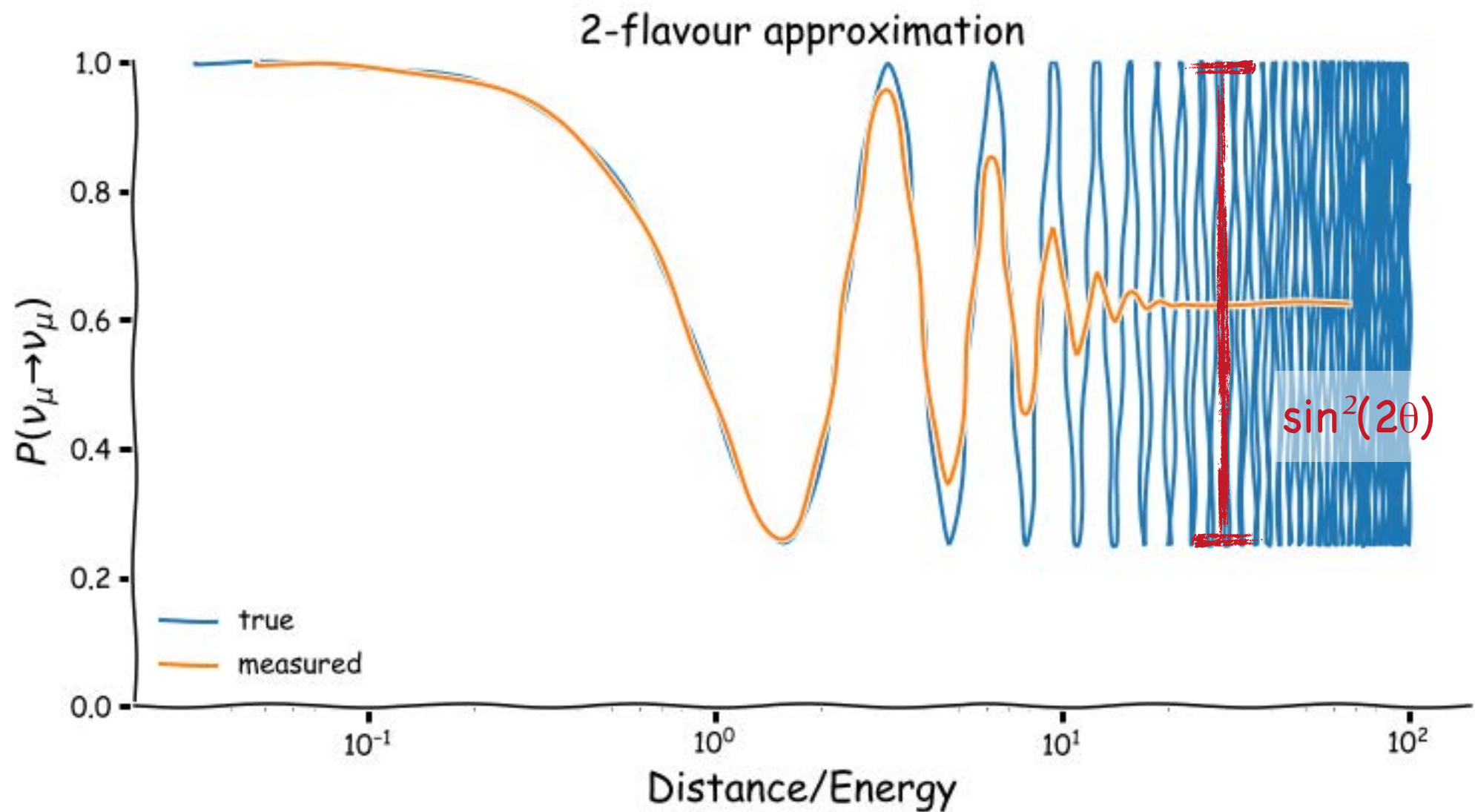
Neutrino Oszillationen

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$



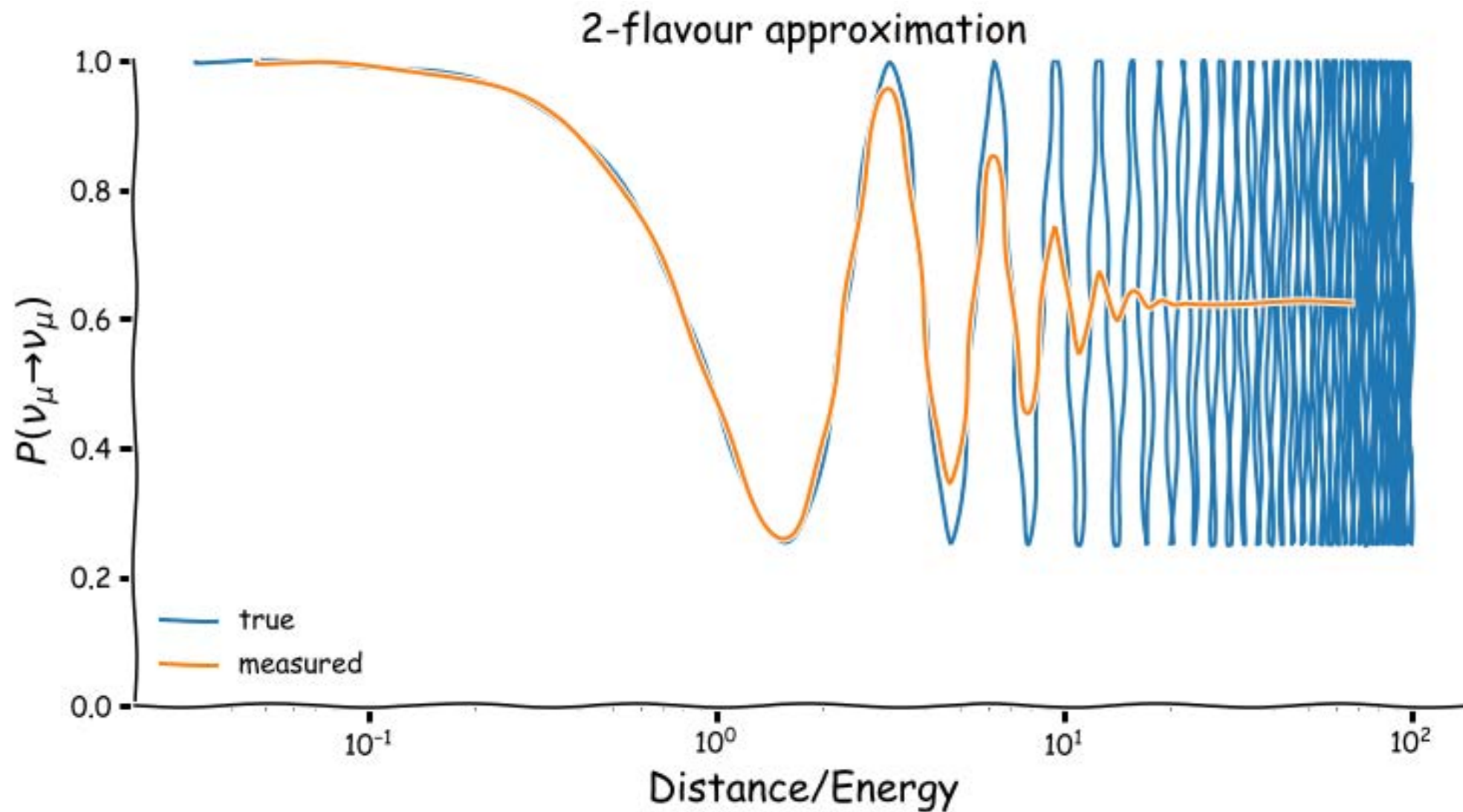
Neutrino Oszillationen

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$



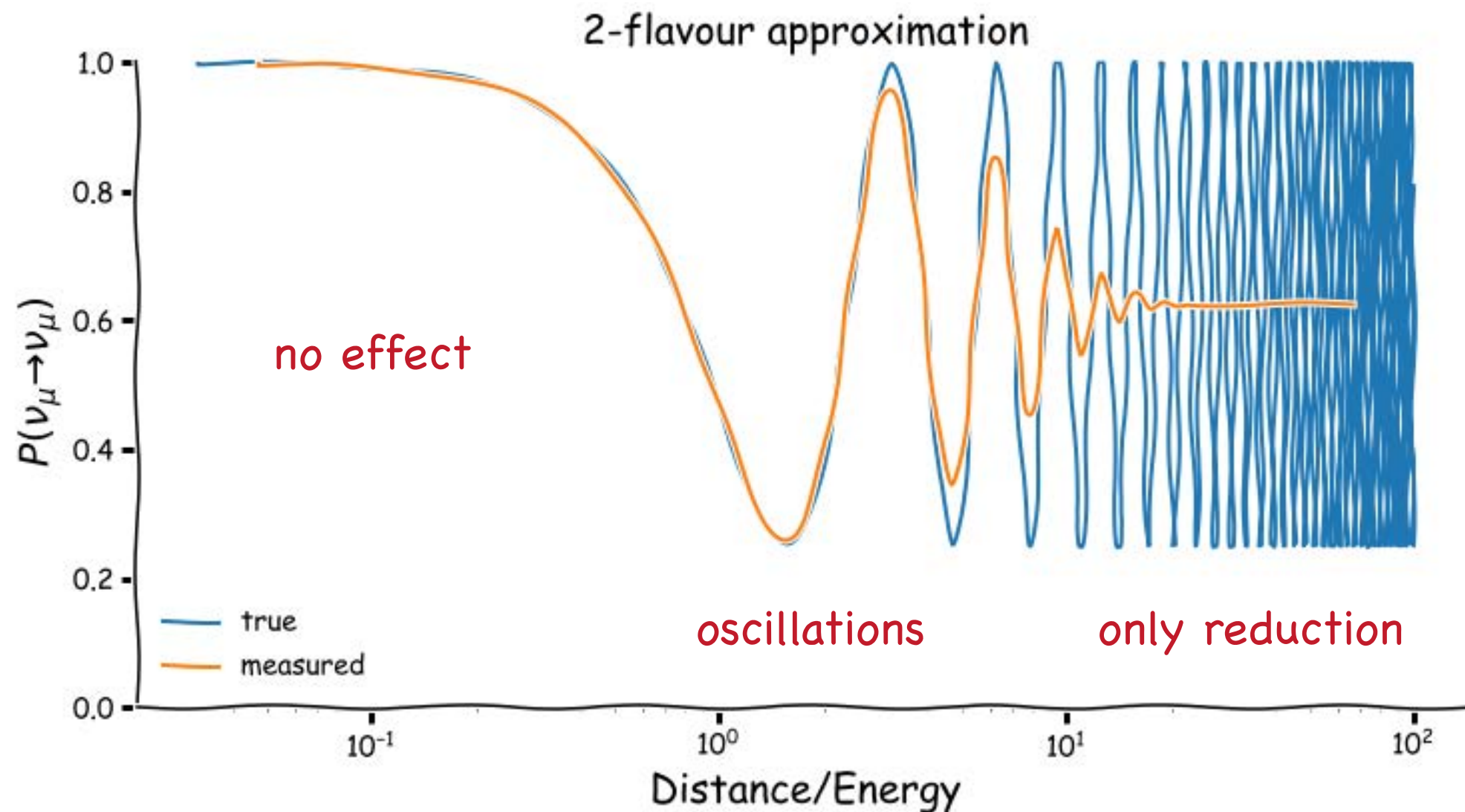
Neutrino Oszillationen

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

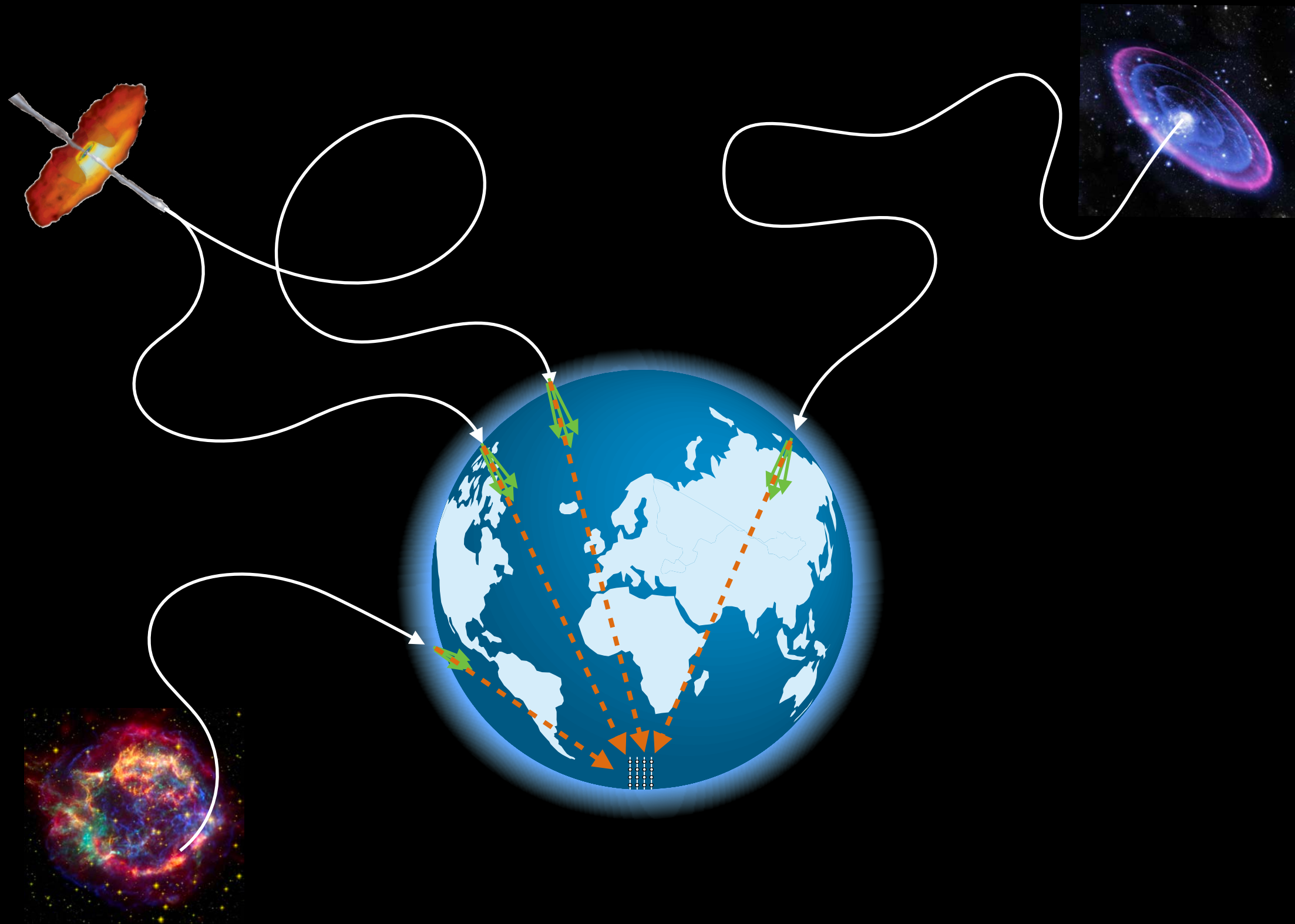


Neutrino Oszillationen

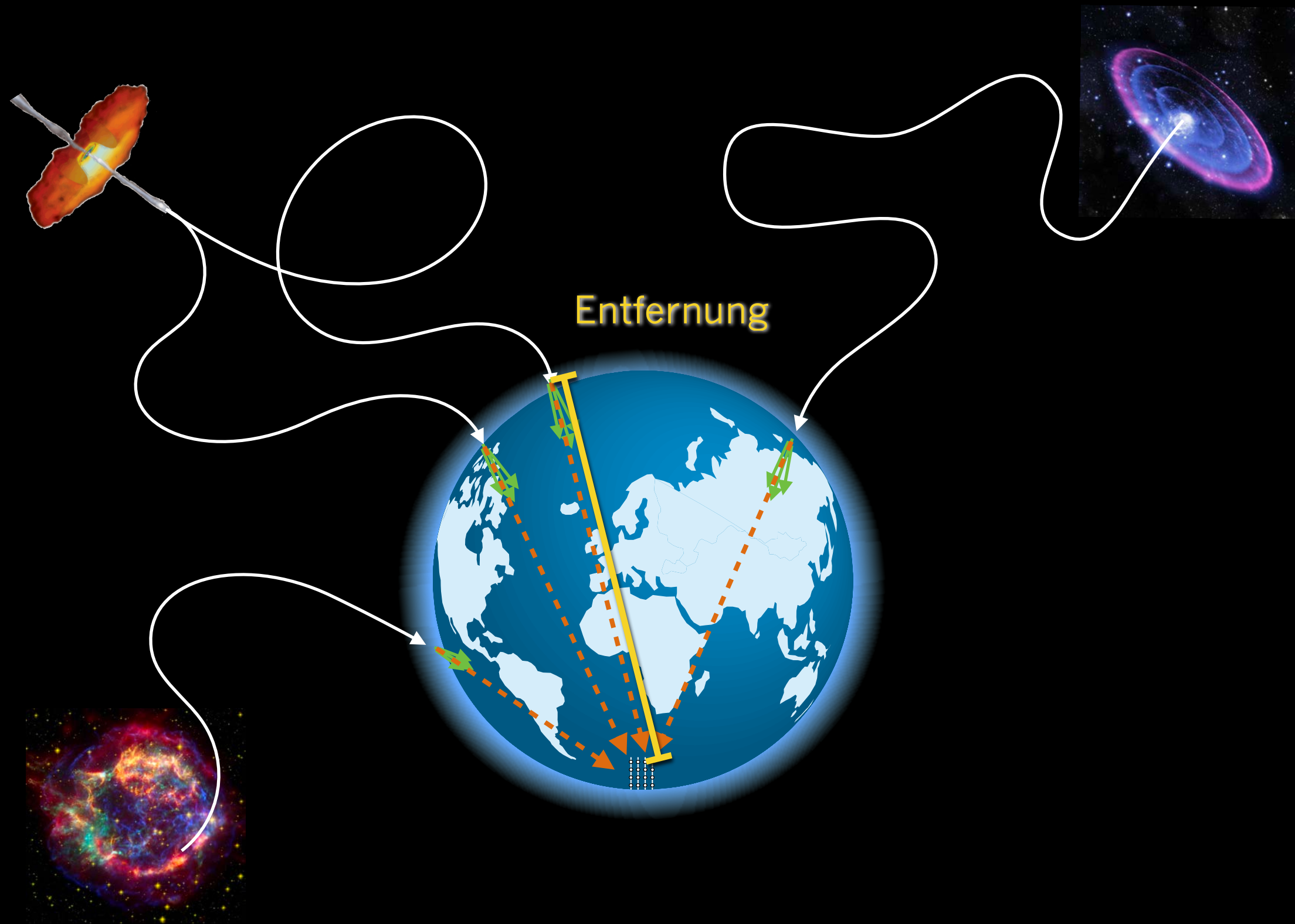
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$



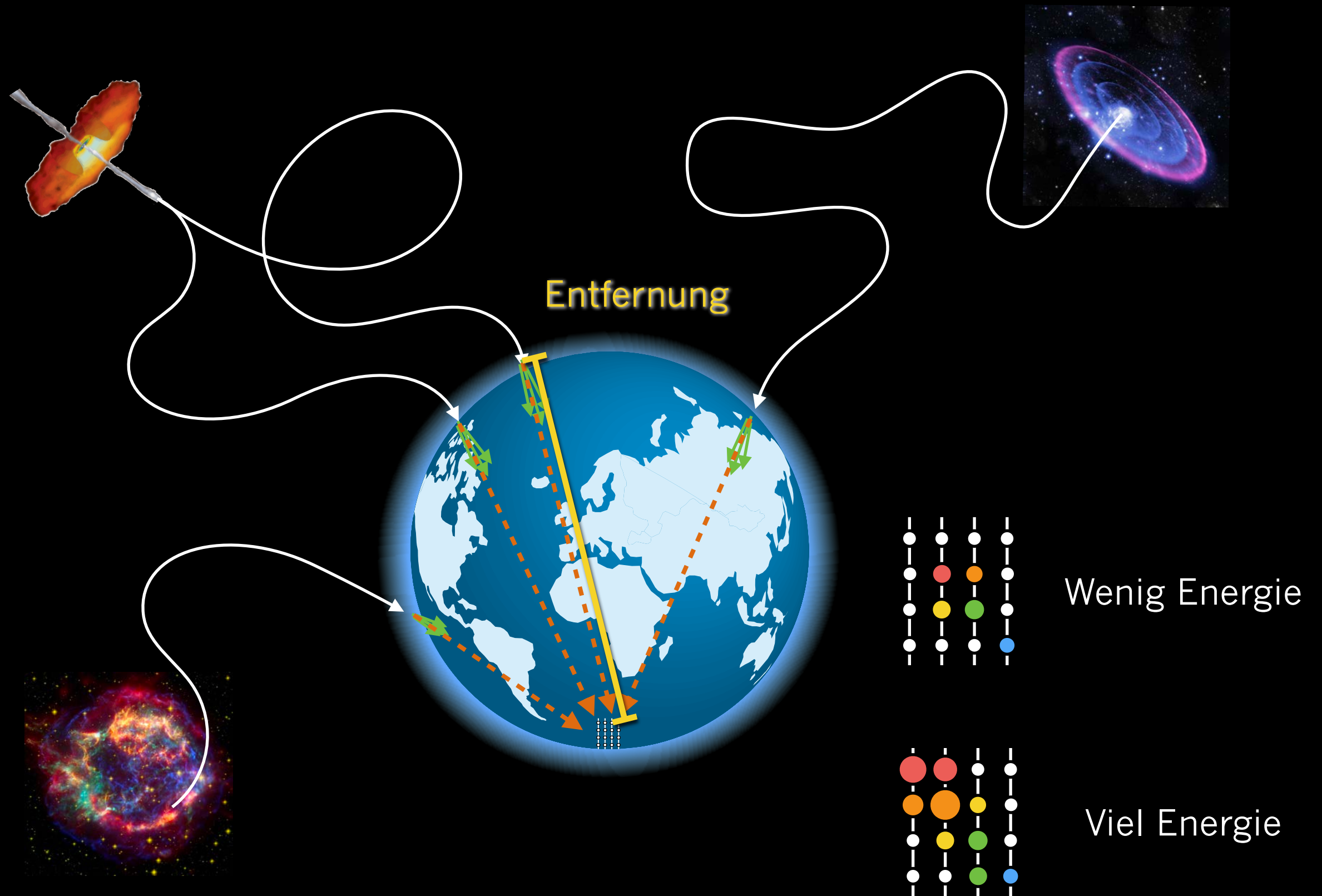
Messprinzip



Messprinzip



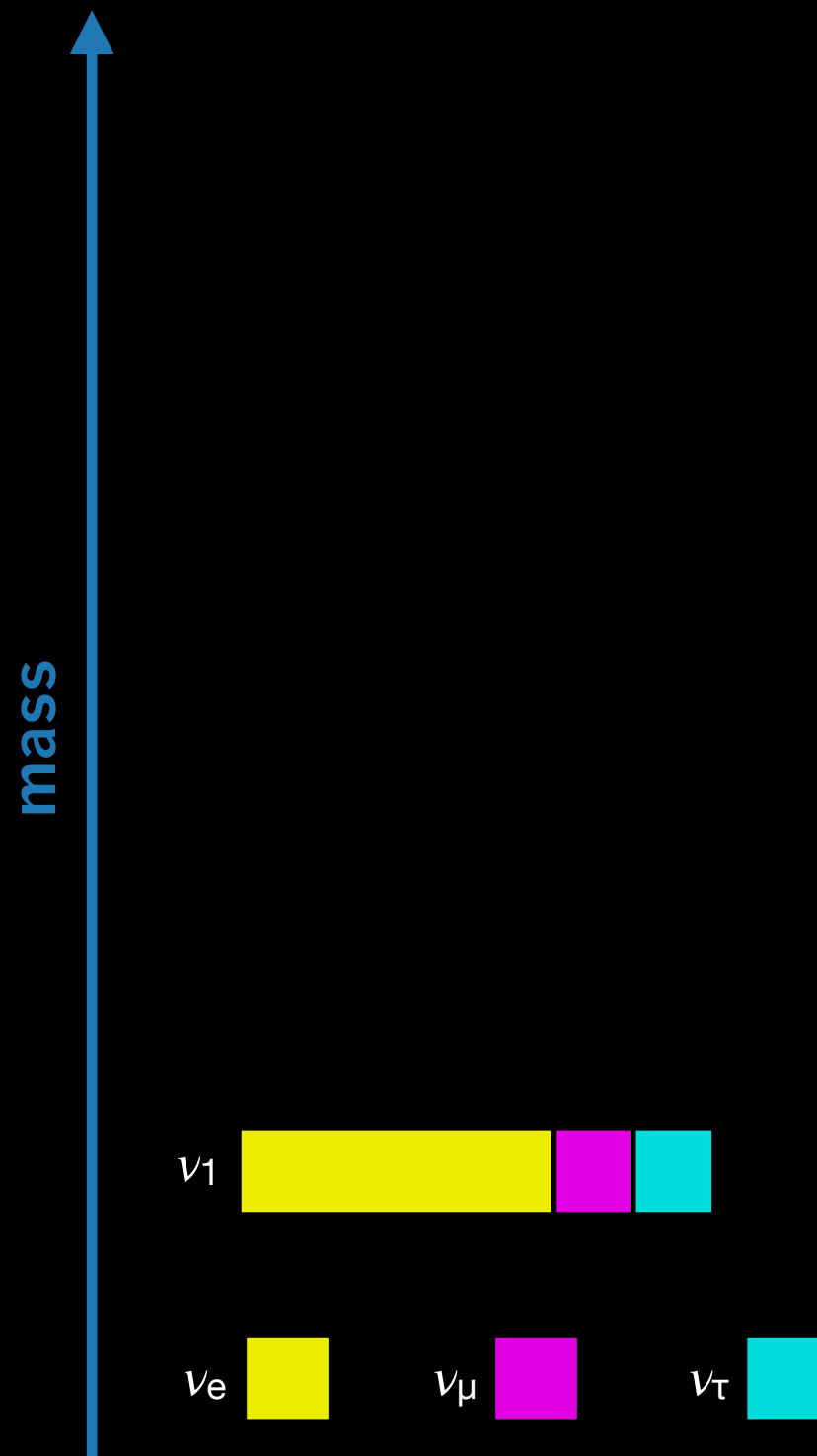
Messprinzip



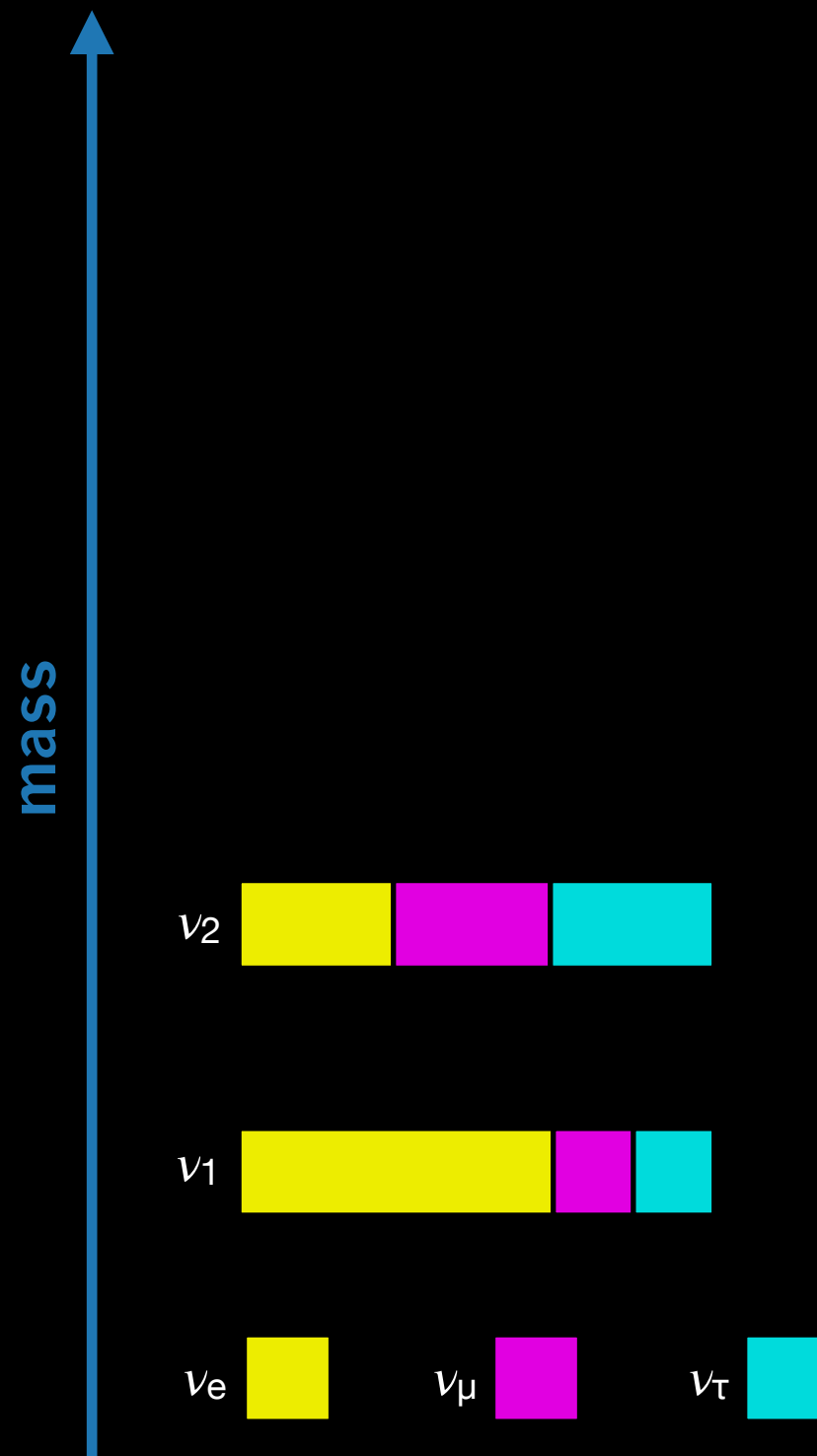
Ergebnisse



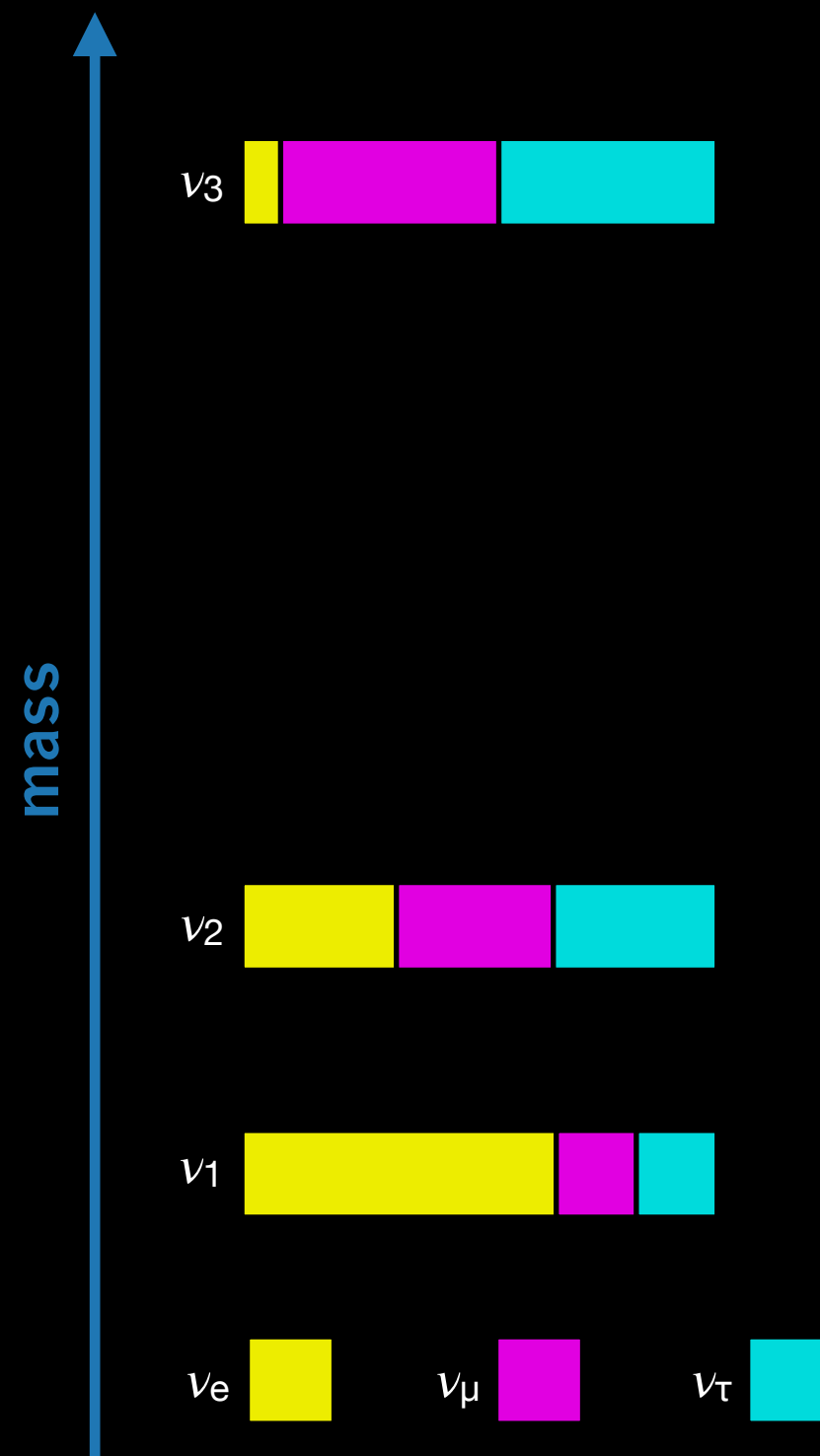
Ergebnisse



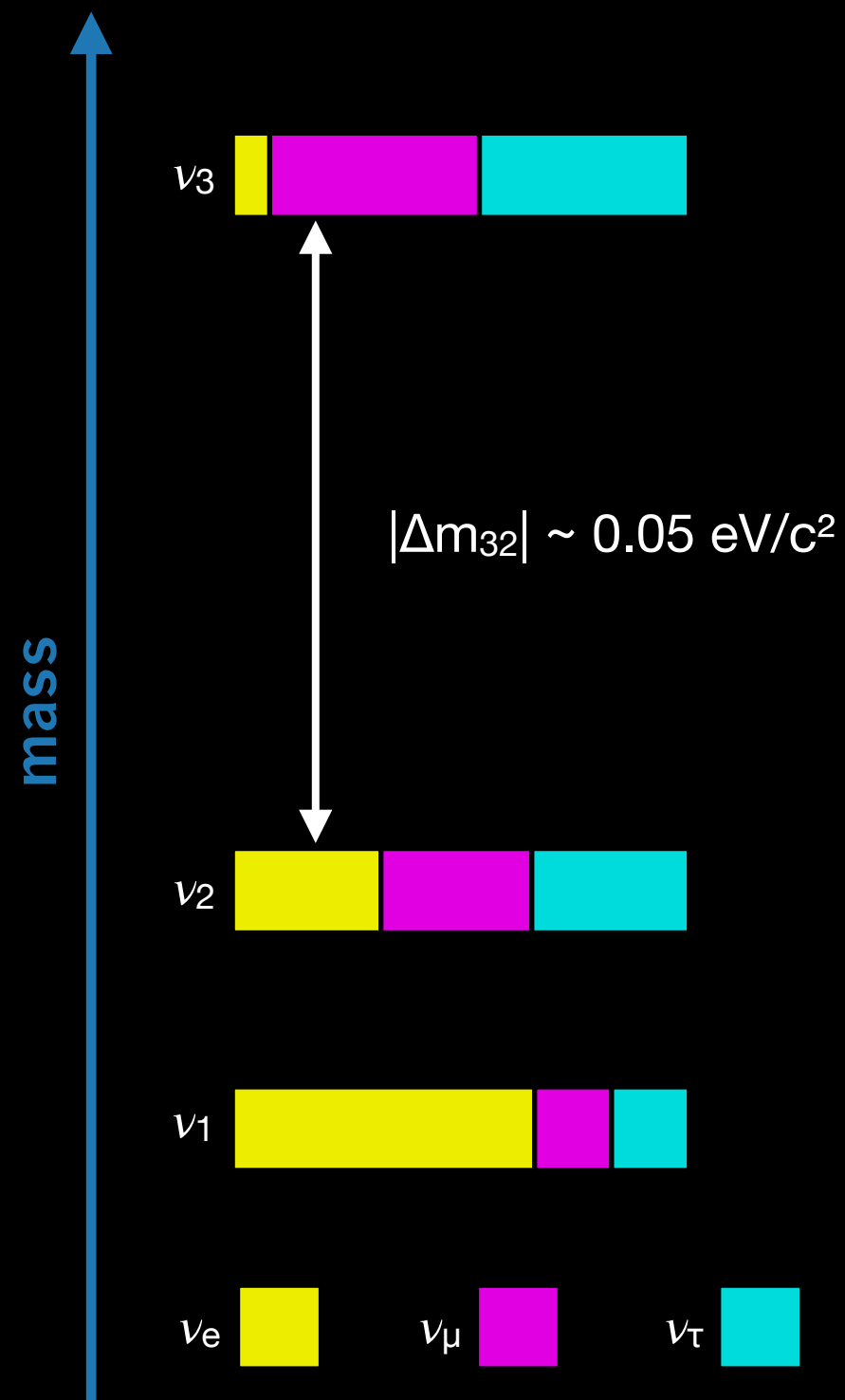
Ergebnisse



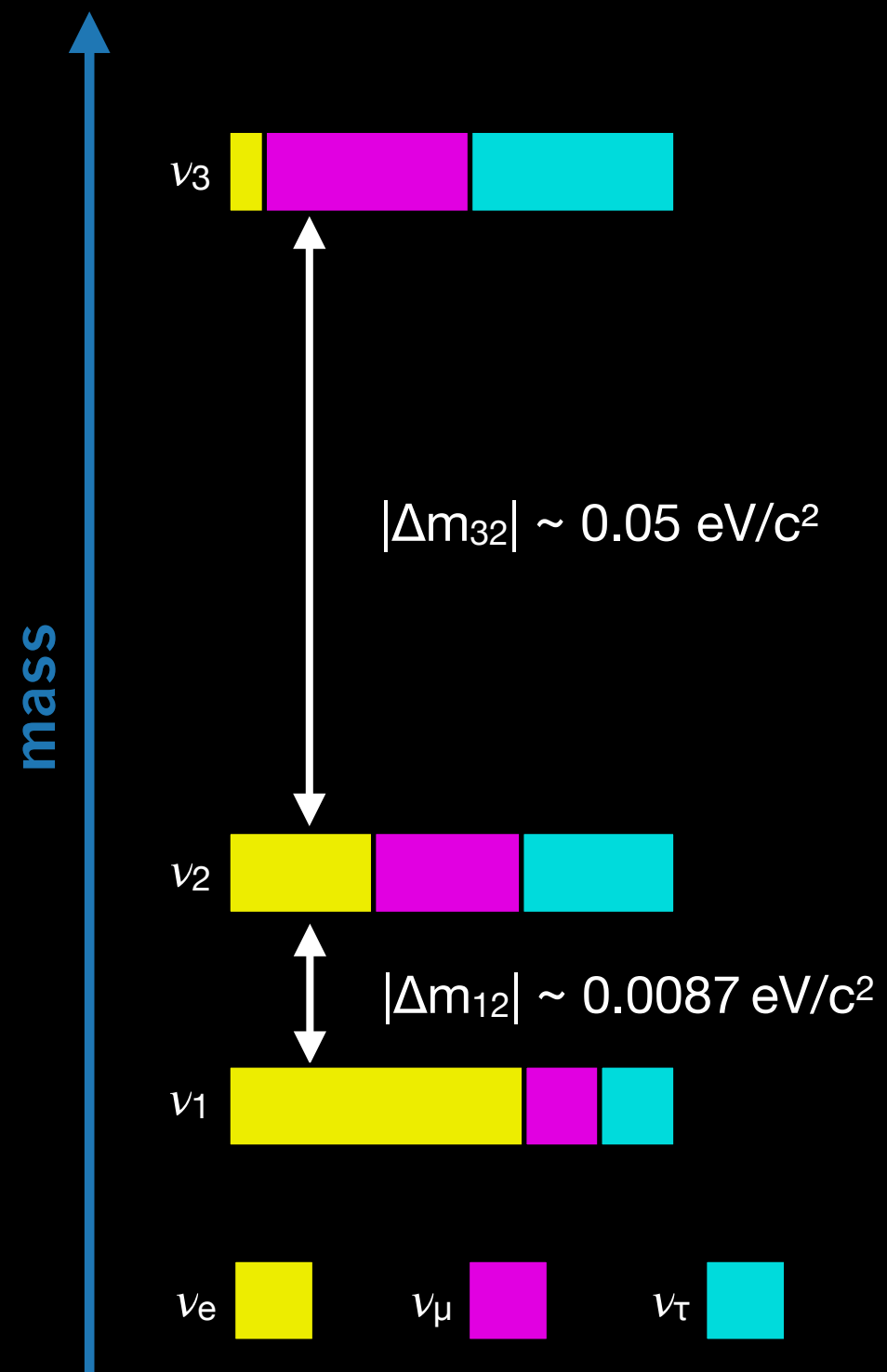
Ergebnisse



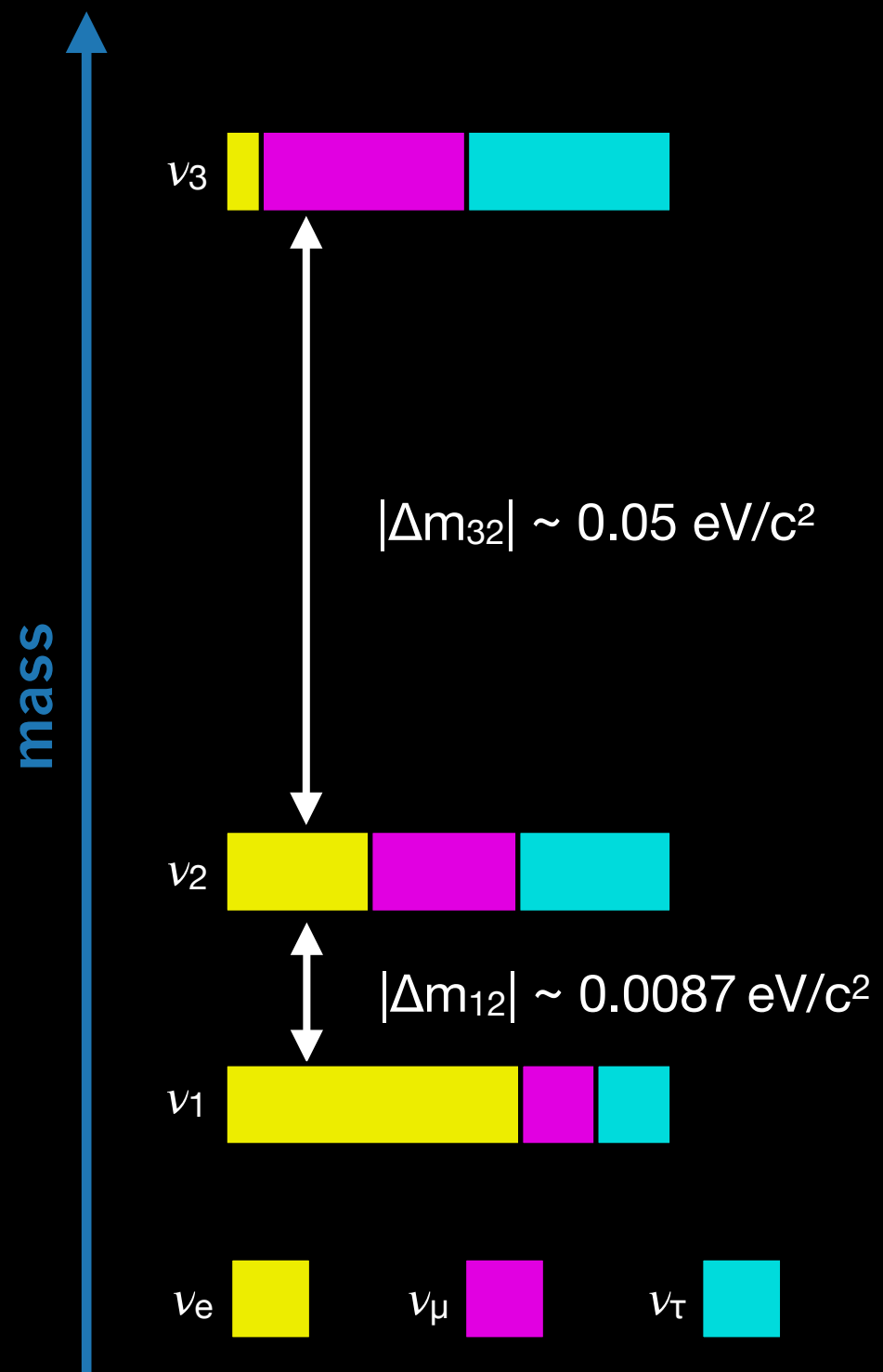
Ergebnisse



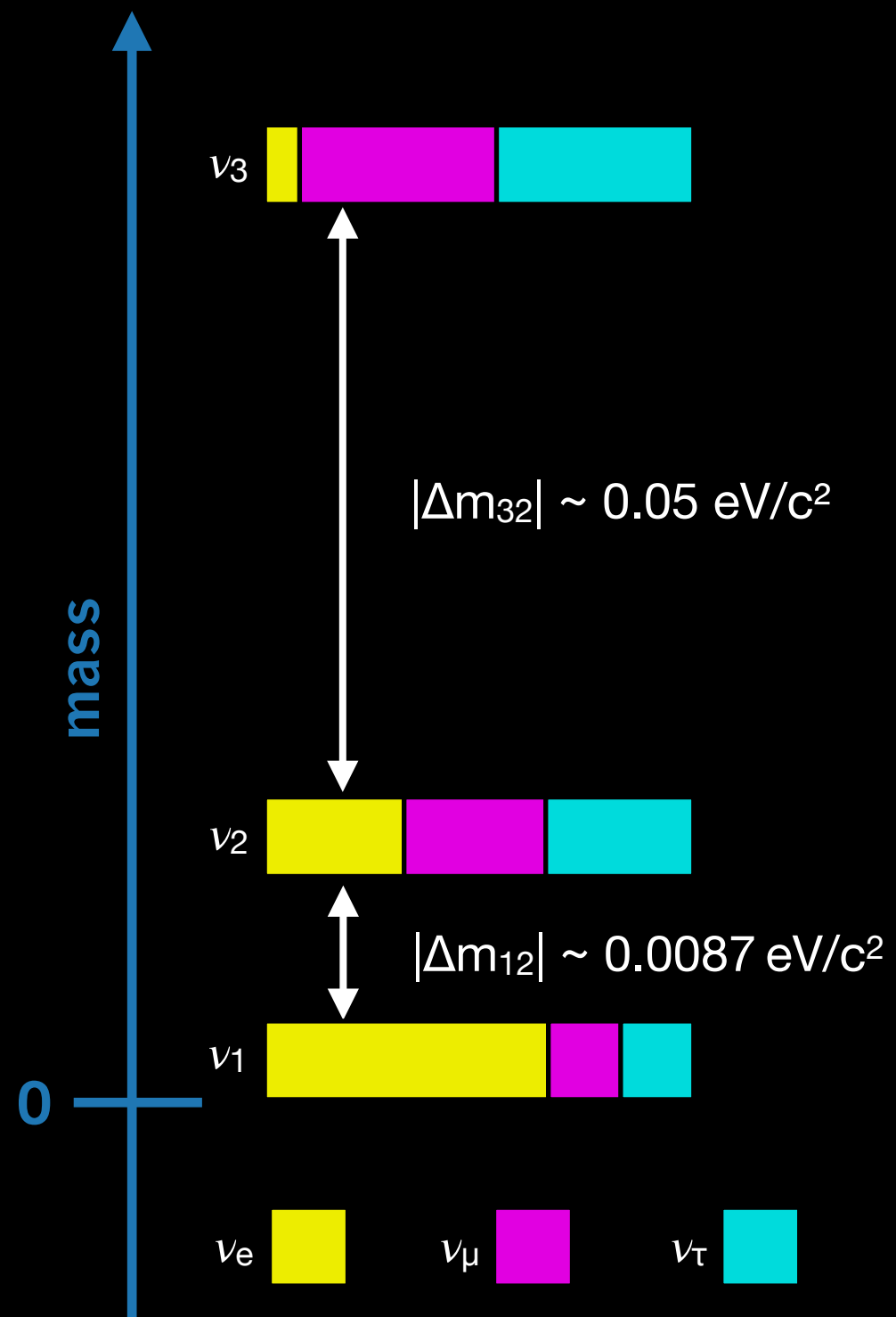
Ergebnisse



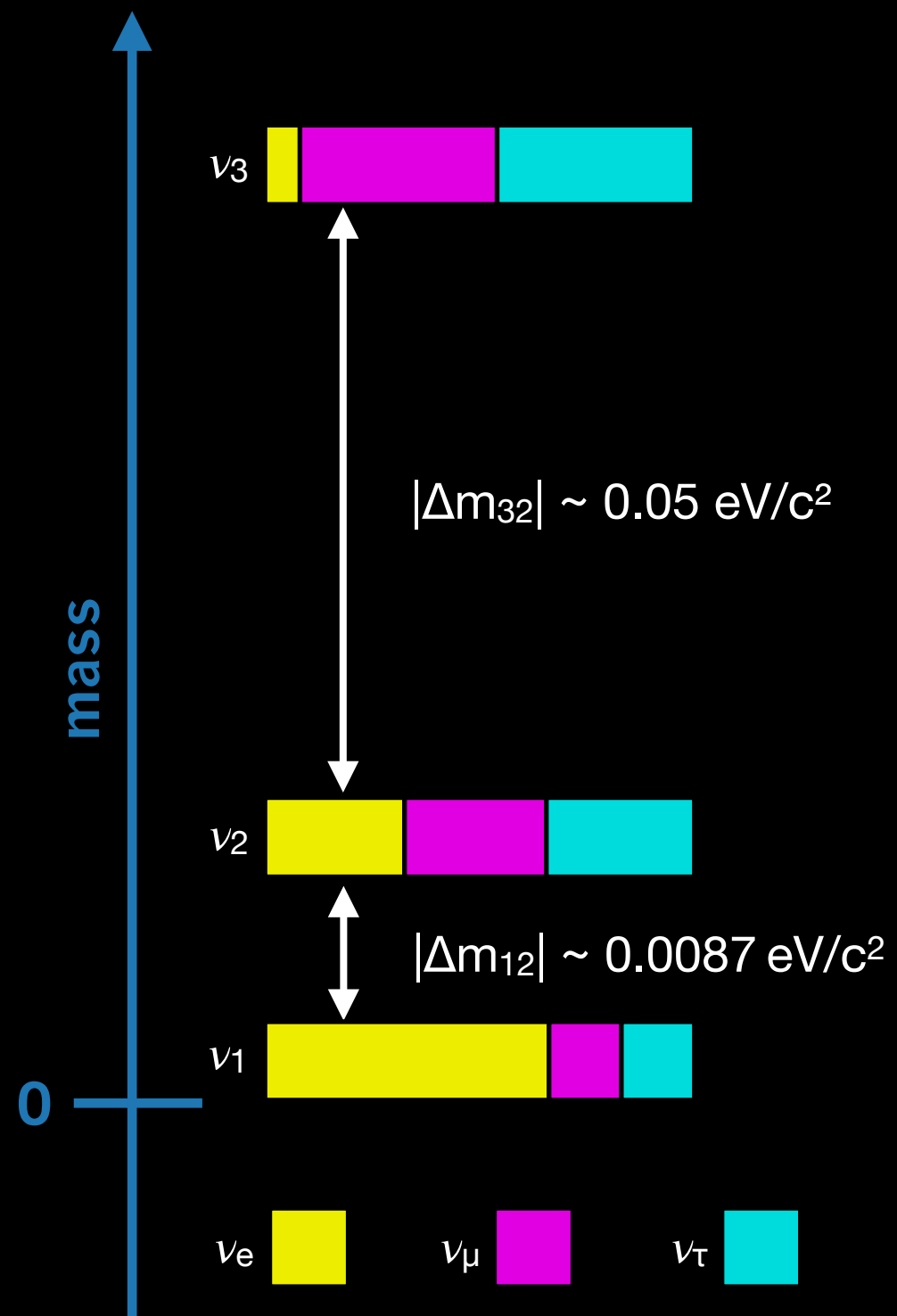
Absolute Werte?



Absolute Werte?

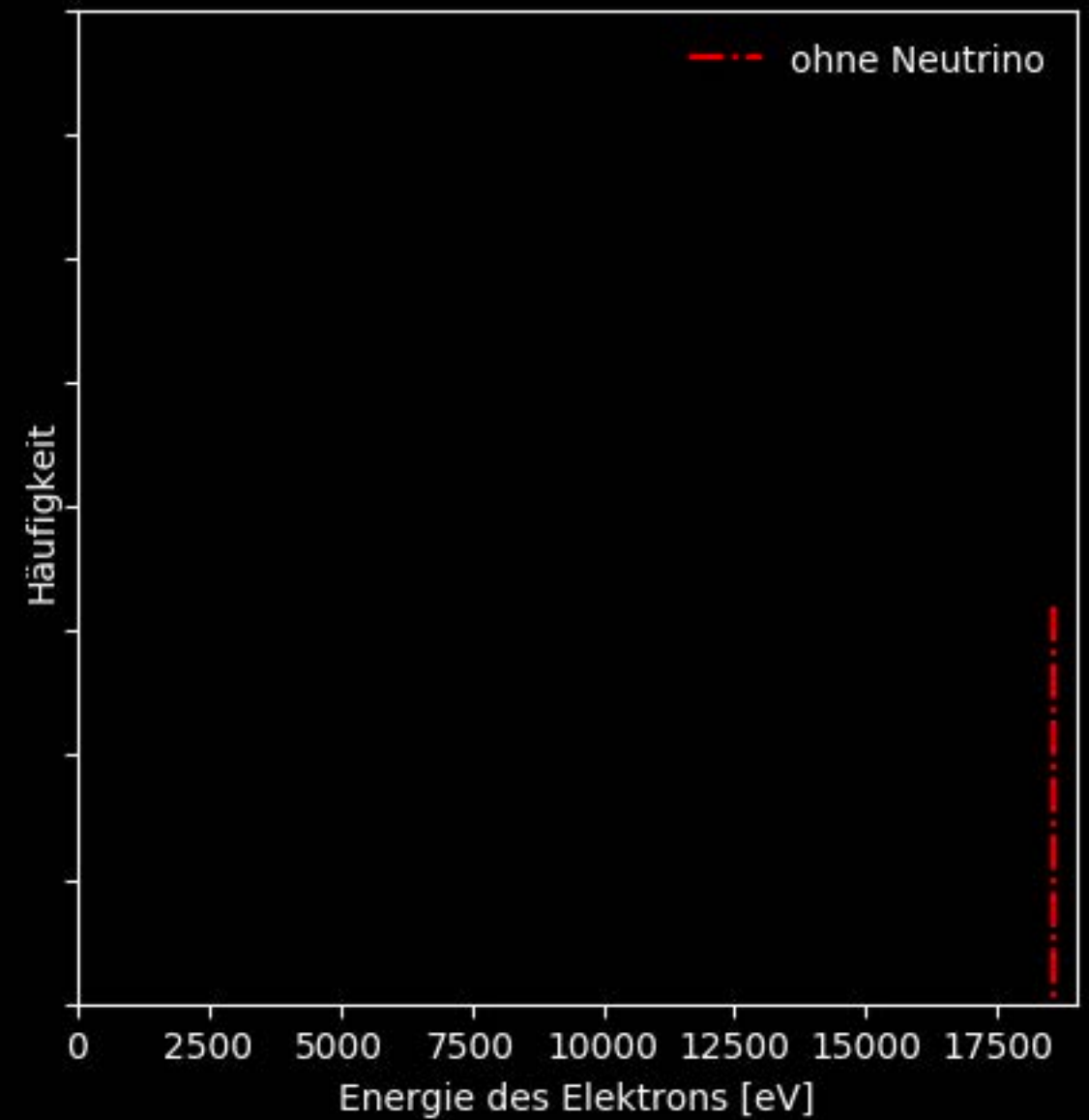
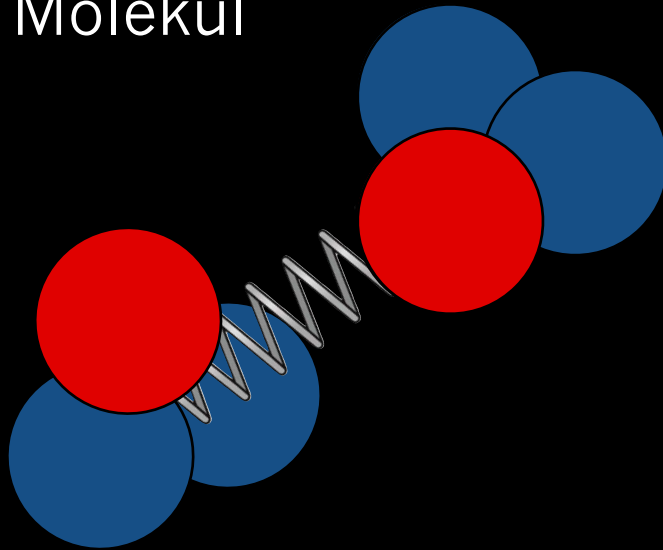


Absolute Werte?



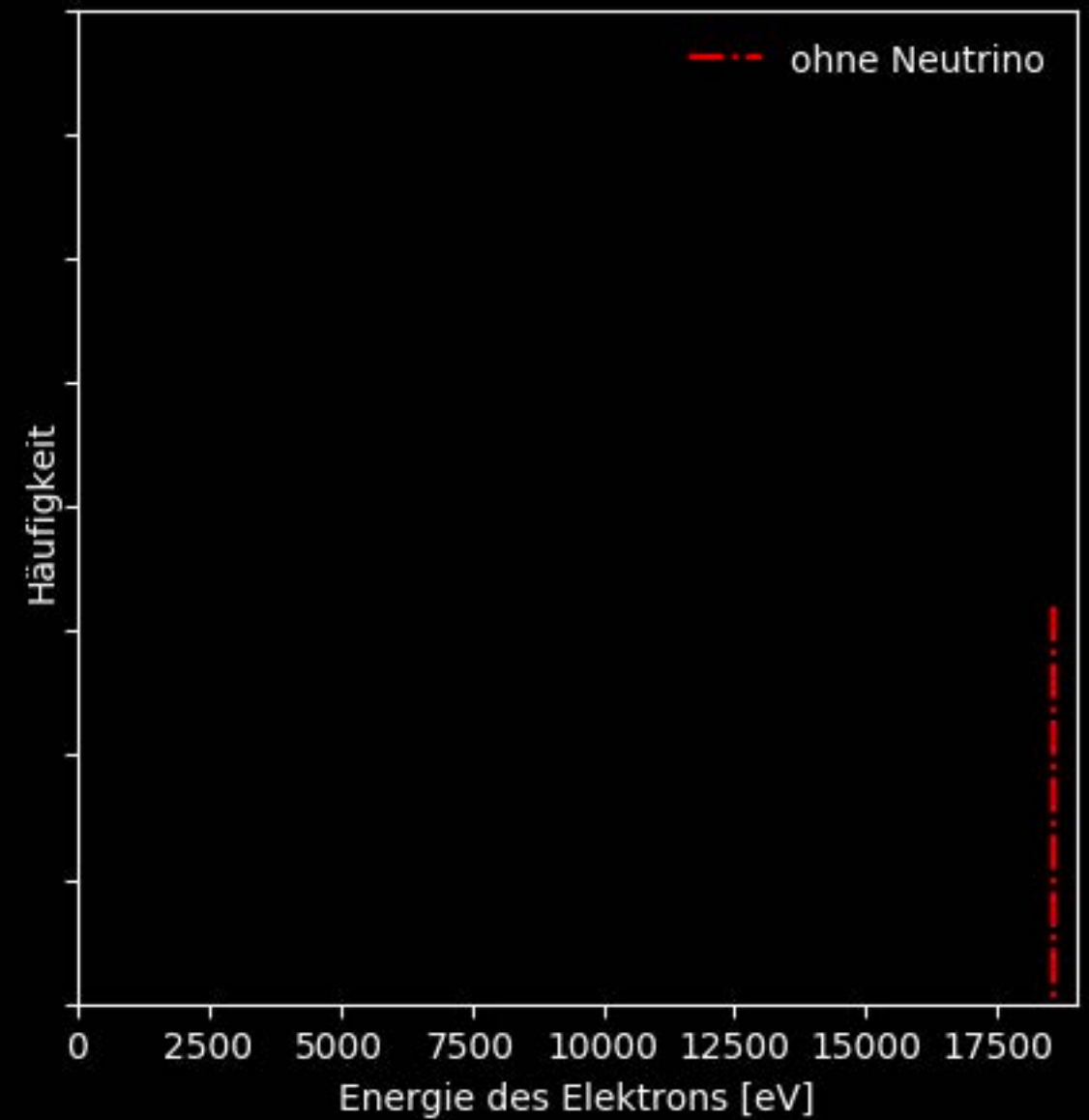
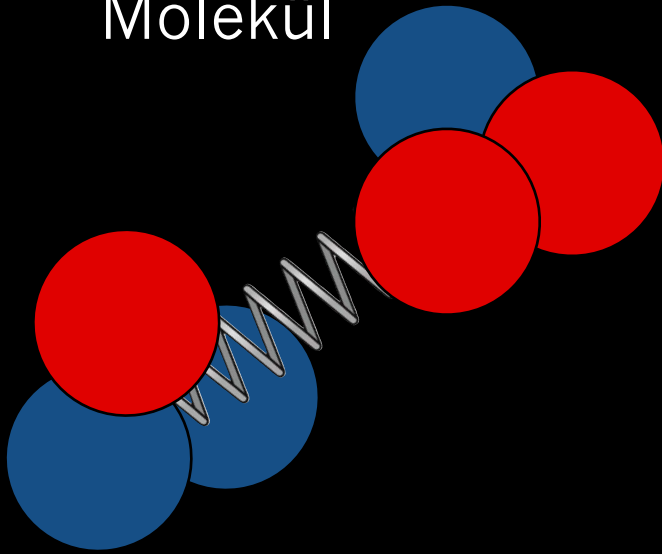
Energieerhaltung

Tritium-
Molekül



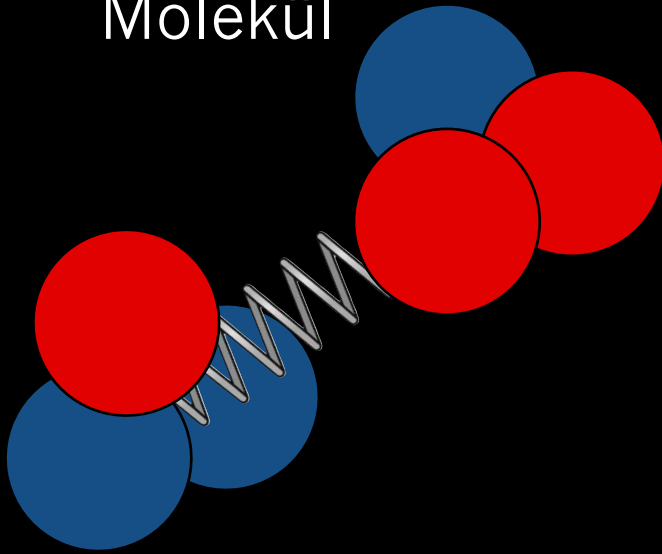
Energieerhaltung

Tritium-
Molekül



Energieerhaltung

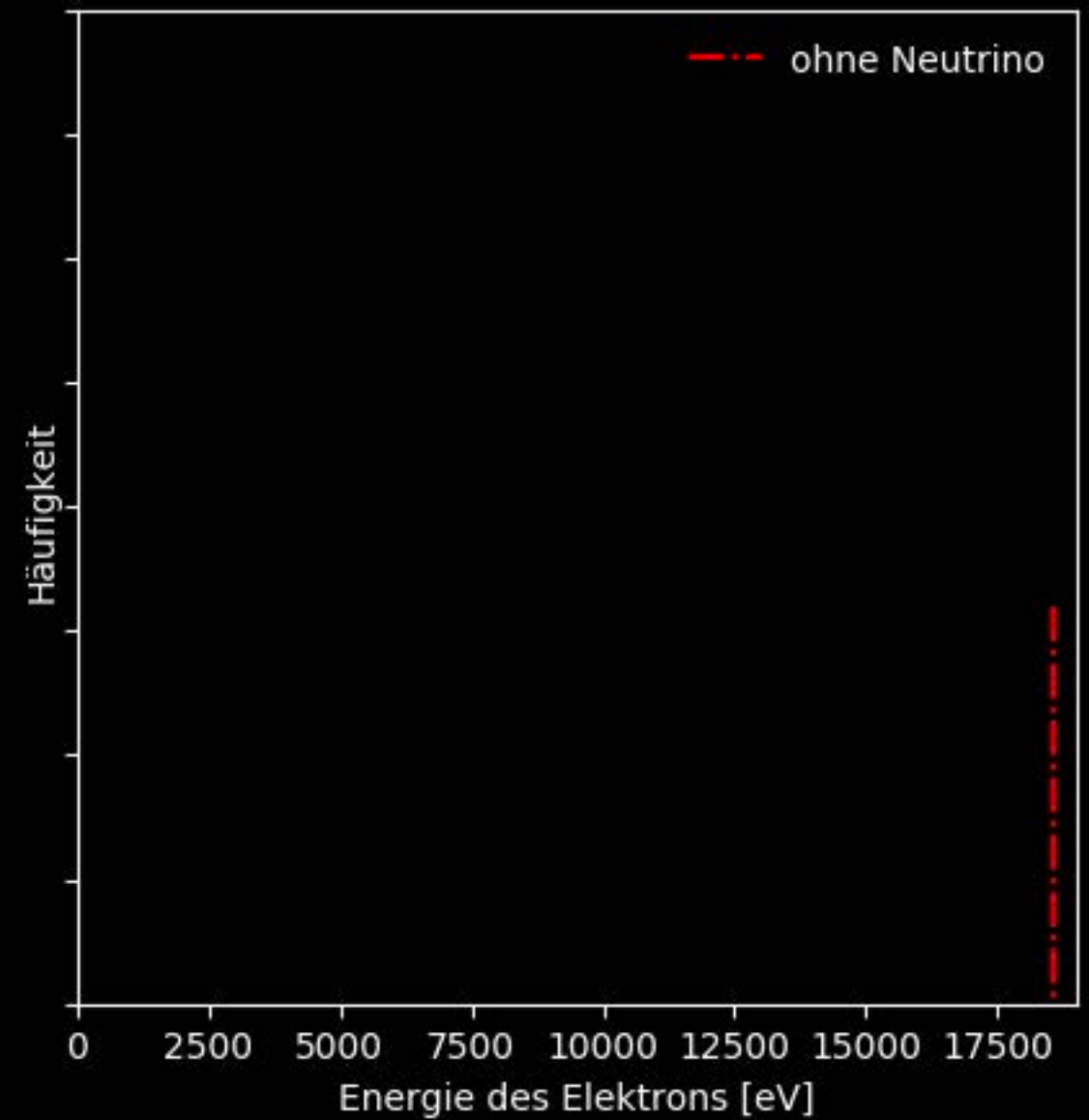
Tritium-
Molekül



Freigesetzte
Energie

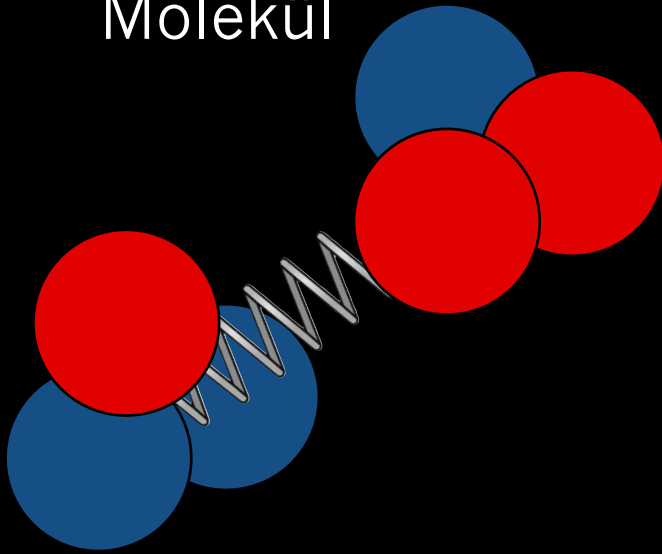
=

Energie des
Elektrons

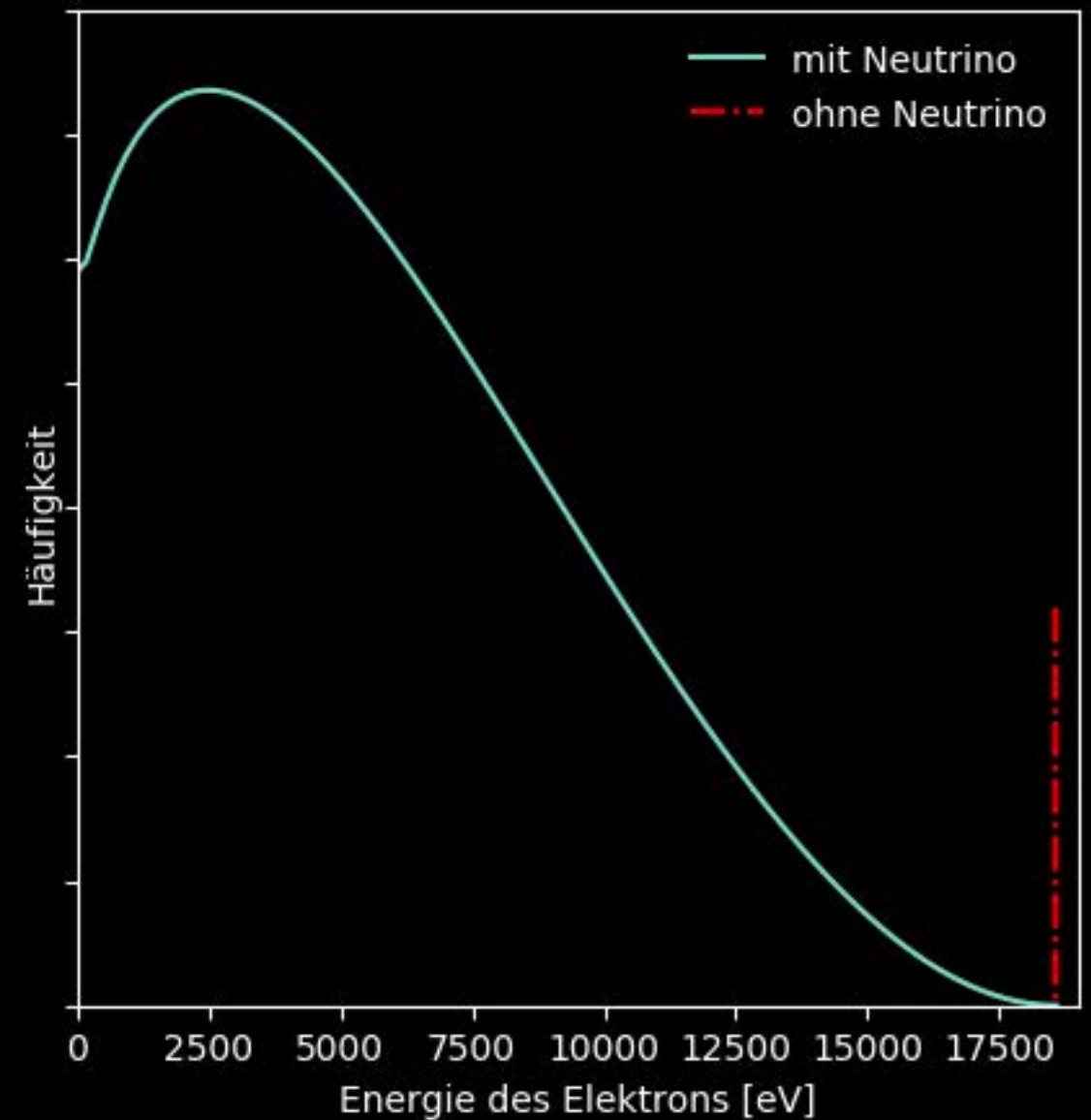


Energieerhaltung

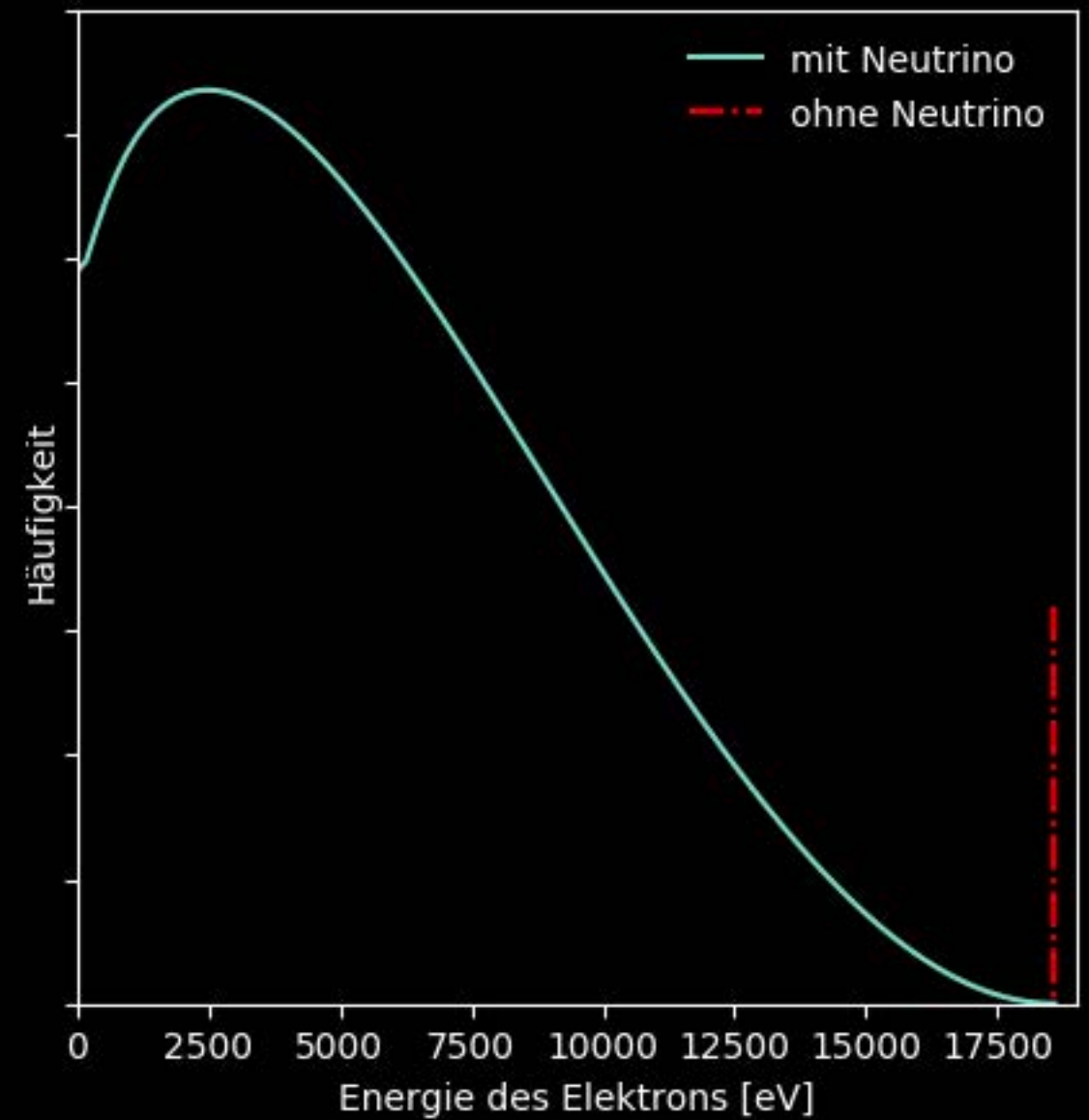
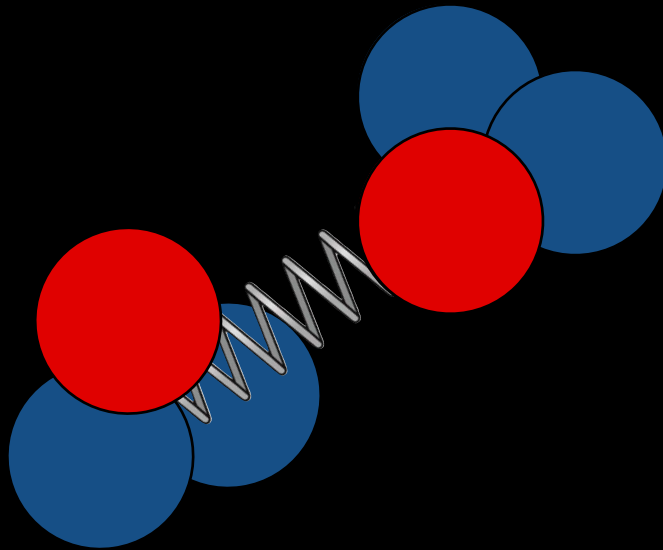
Tritium-
Molekül



Freigesetzte
Energie = Energie des
Elektrons

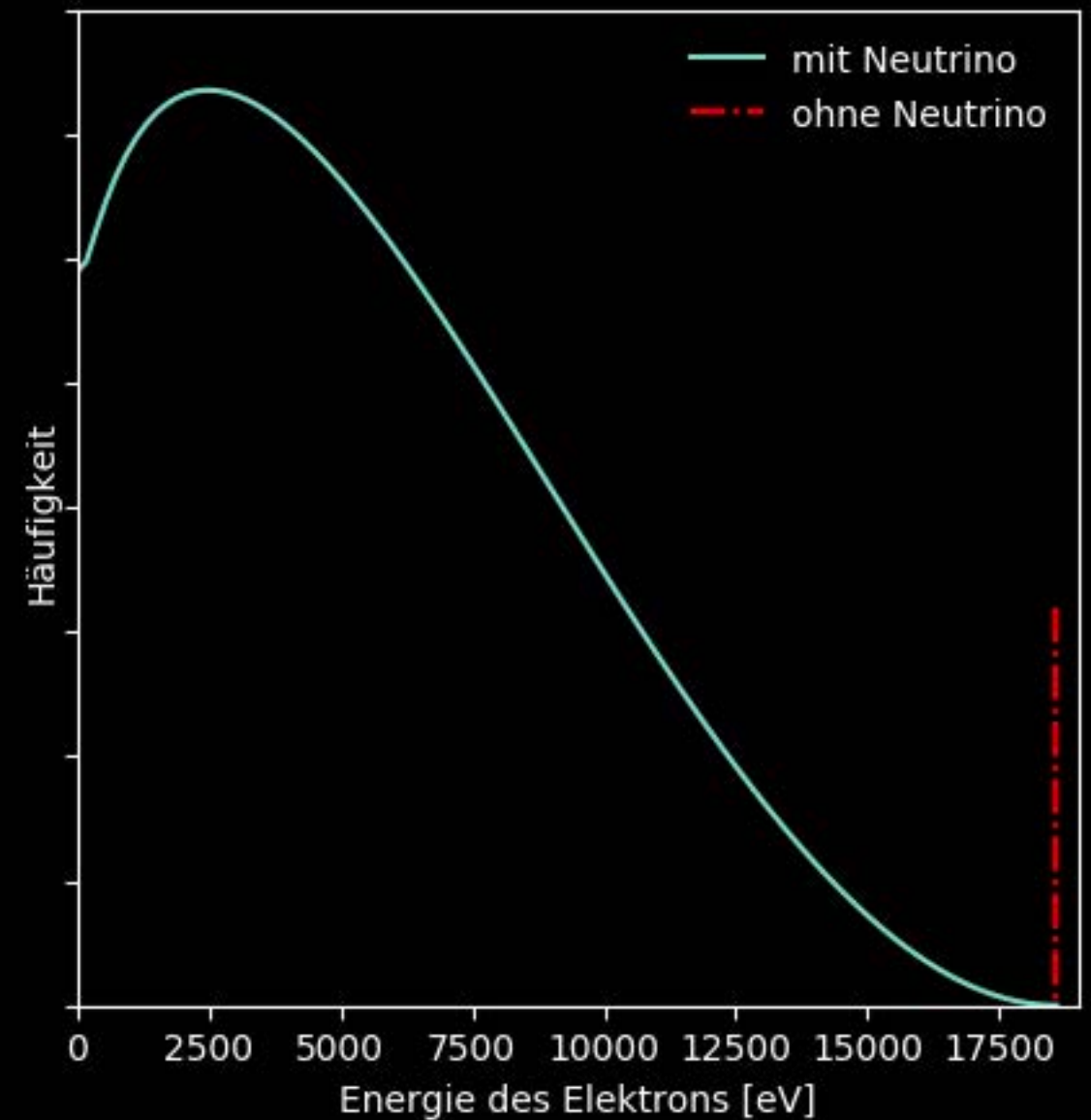
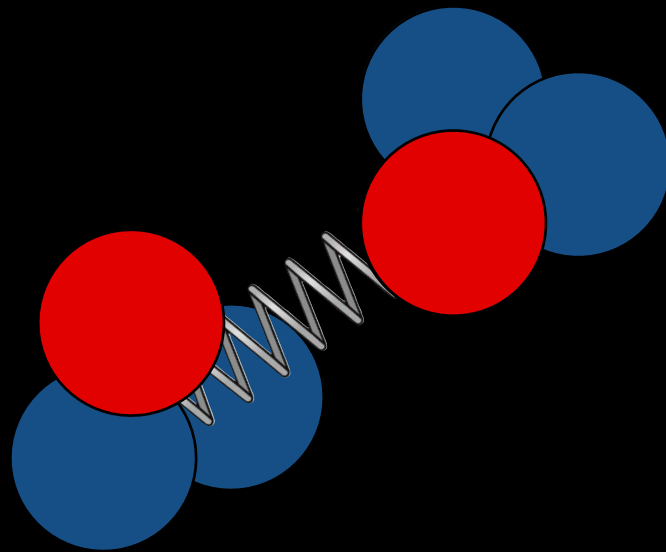


Energieerhaltung



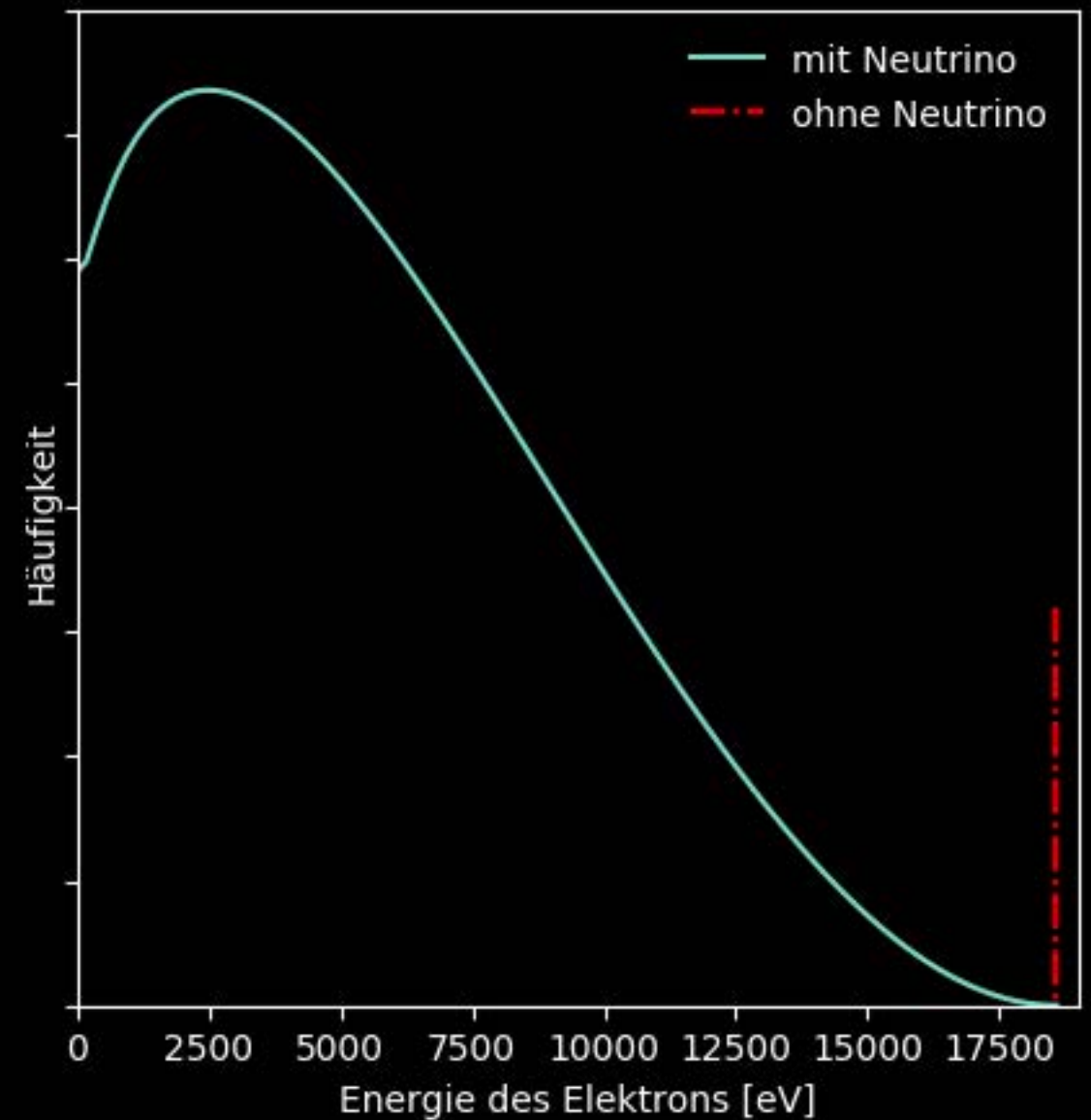
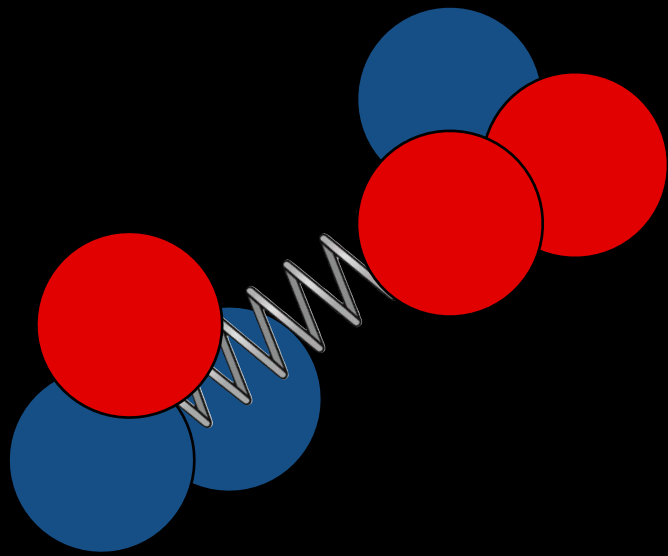
Freigesetzte Energie = Energie des Elektrons

Energieerhaltung



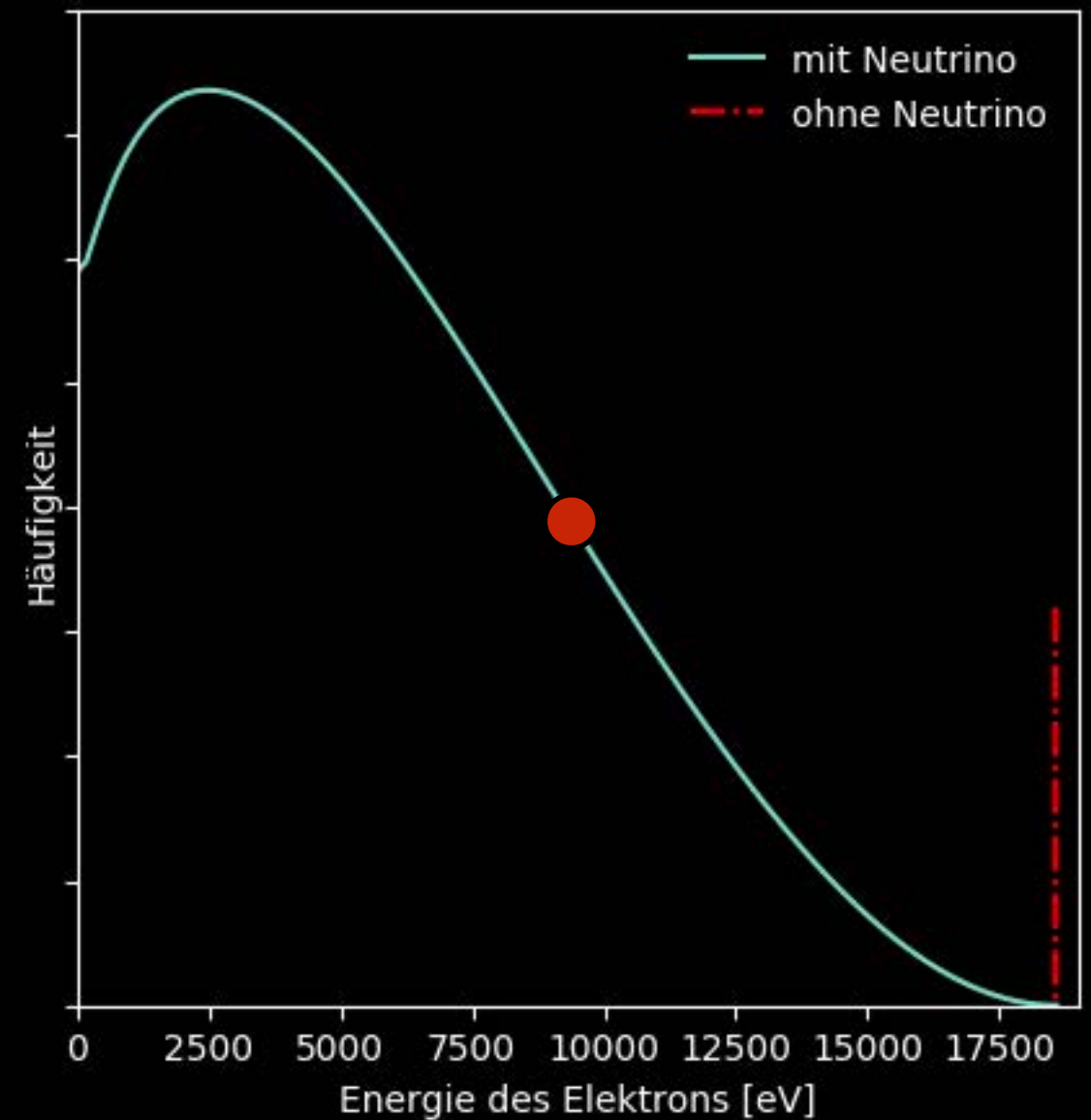
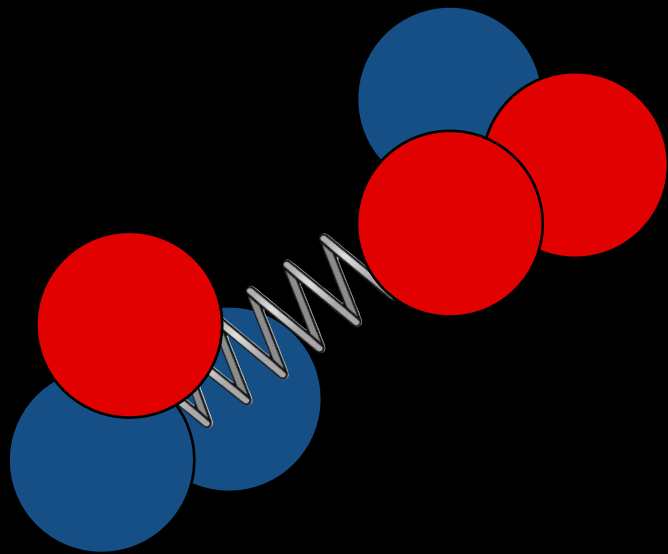
Freigesetzte Energie = Energie des Elektrons + Energie des Neutrinos

Energieerhaltung



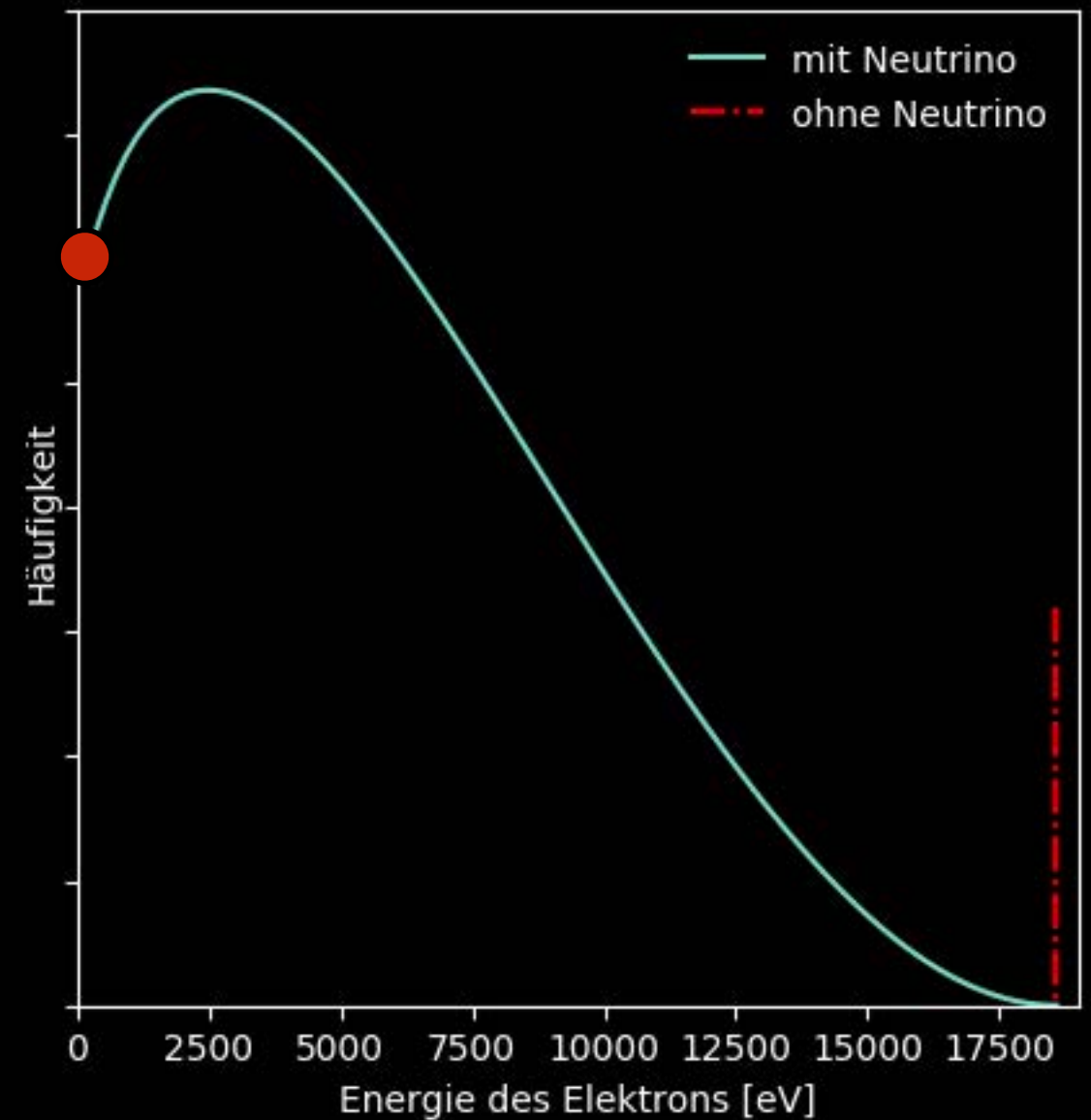
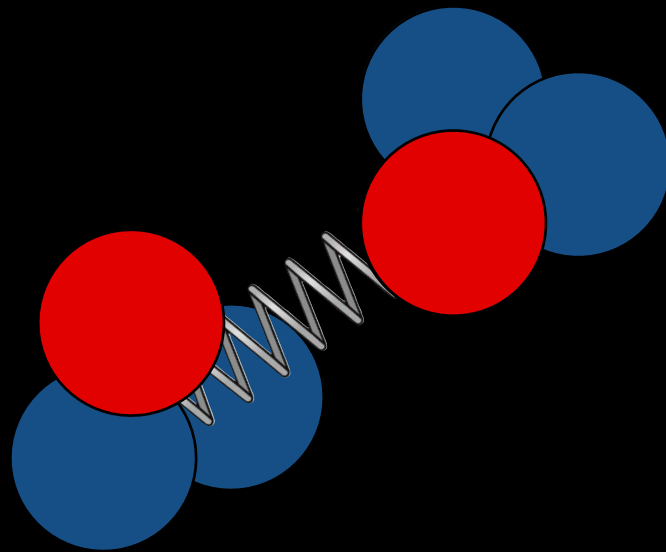
$$\text{Freigesetzte Energie} = \text{Energie des Elektrons} + \text{Energie des Neutrinos}$$

Energieerhaltung



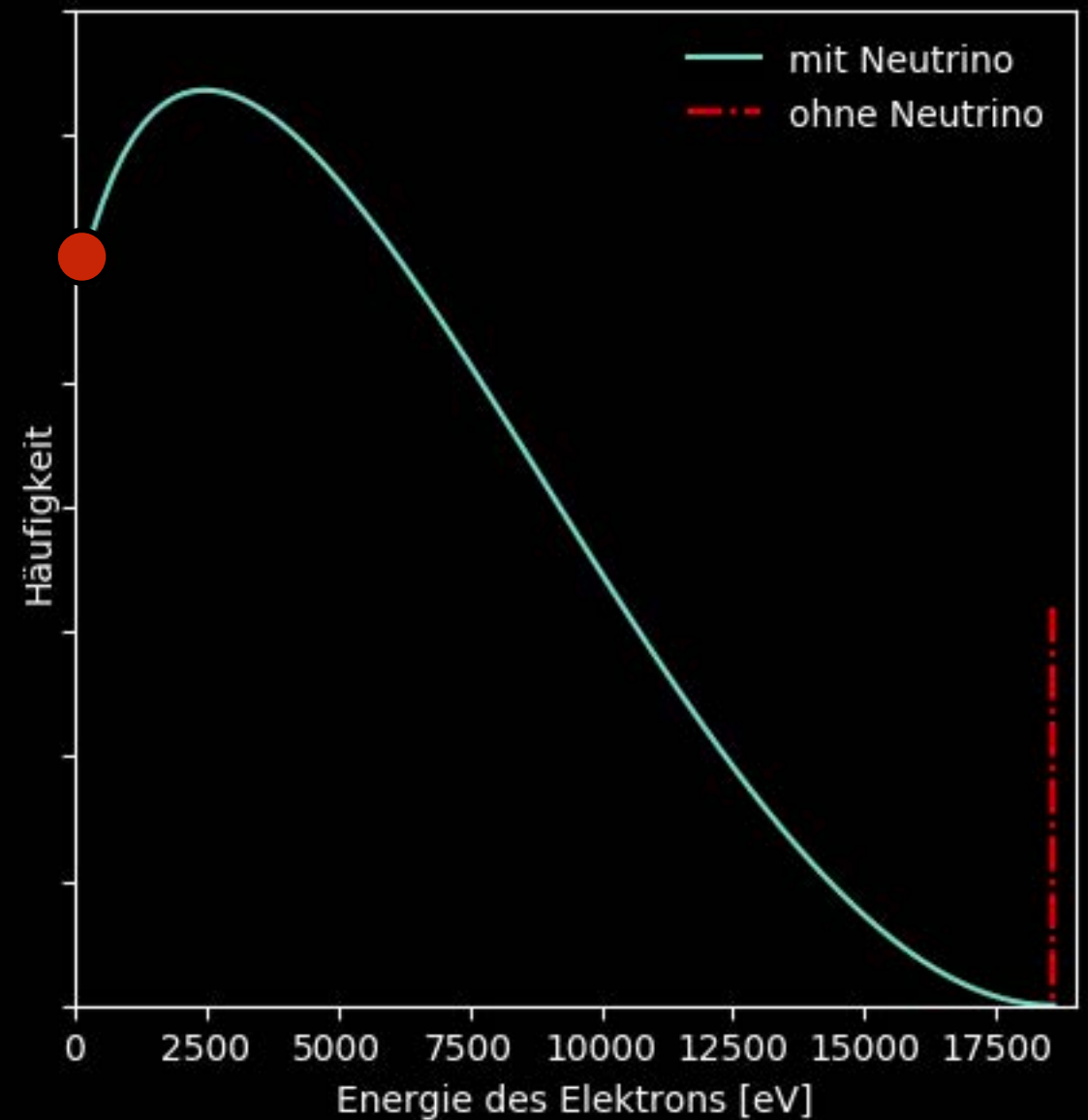
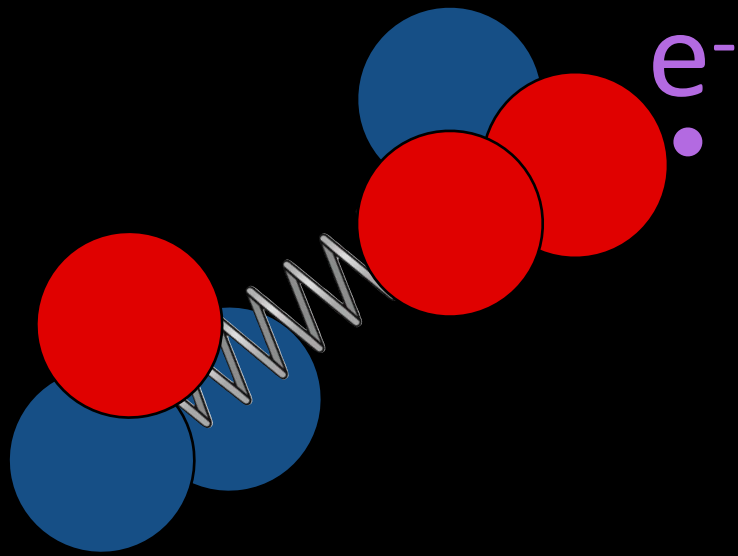
Freigesetzte Energie = Energie des Elektrons + Energie des Neutrinos

Energieerhaltung



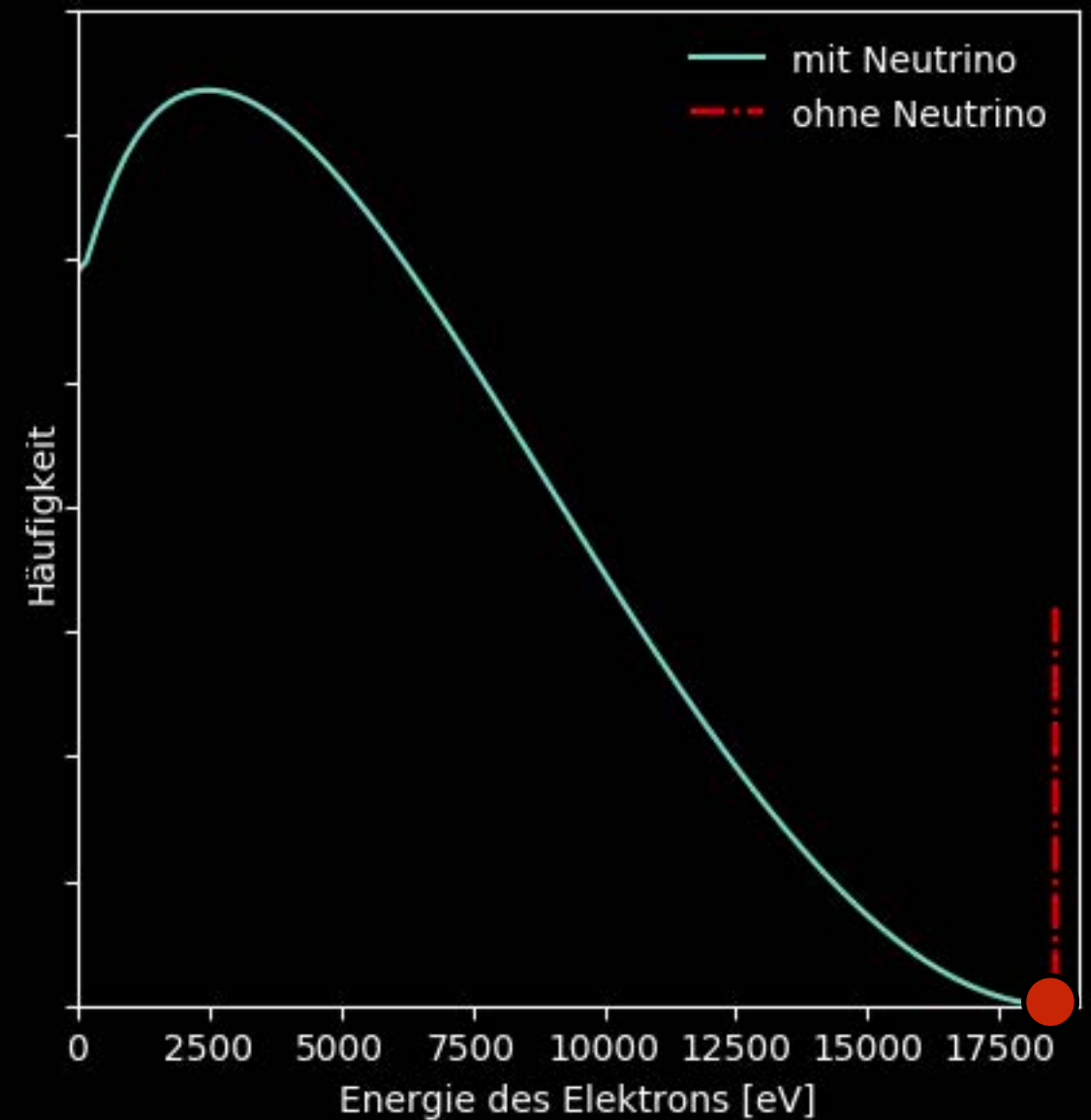
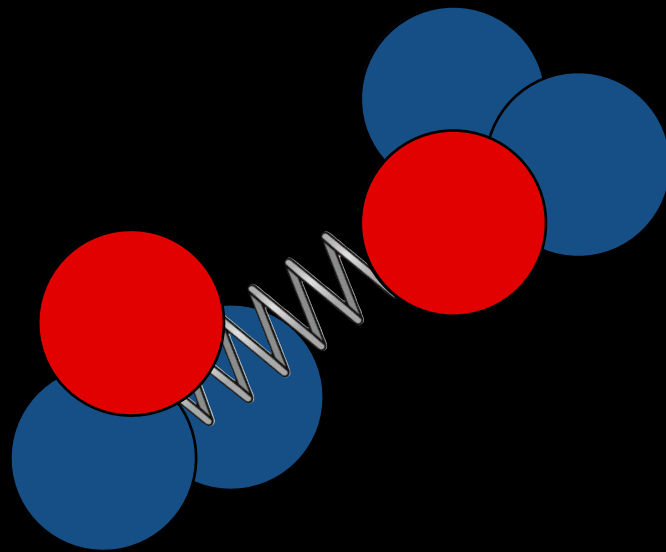
Freigesetzte Energie = Energie des Elektrons + Energie des Neutrinos

Energieerhaltung



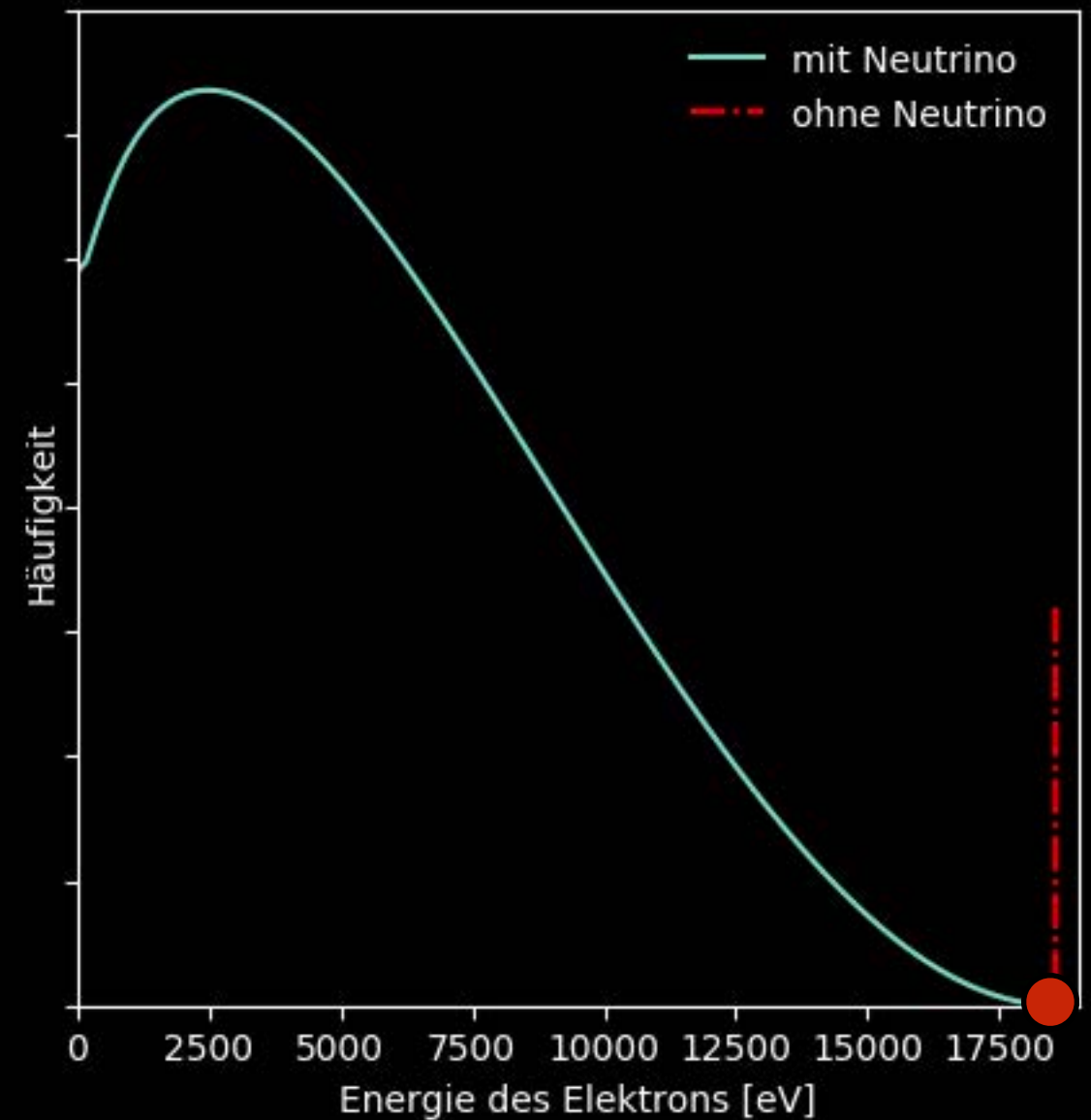
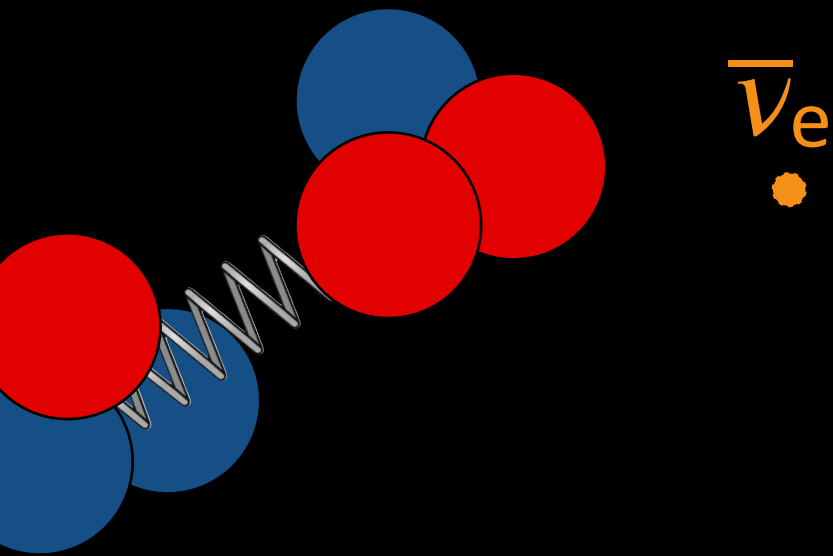
Freigesetzte Energie = Energie des Elektrons + Energie des Neutrinos

Energieerhaltung



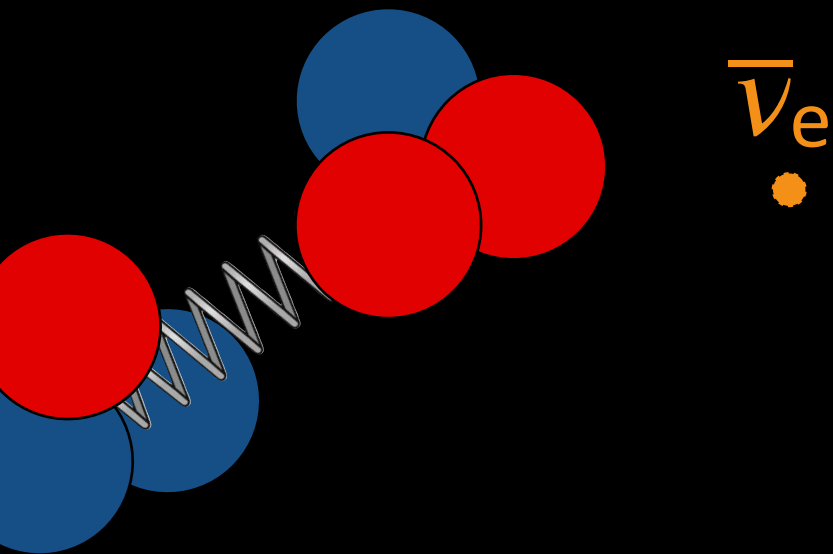
$$\text{Freigesetzte Energie} = \text{Energie des Elektrons} + \text{Energie des Neutrinos}$$

Energieerhaltung

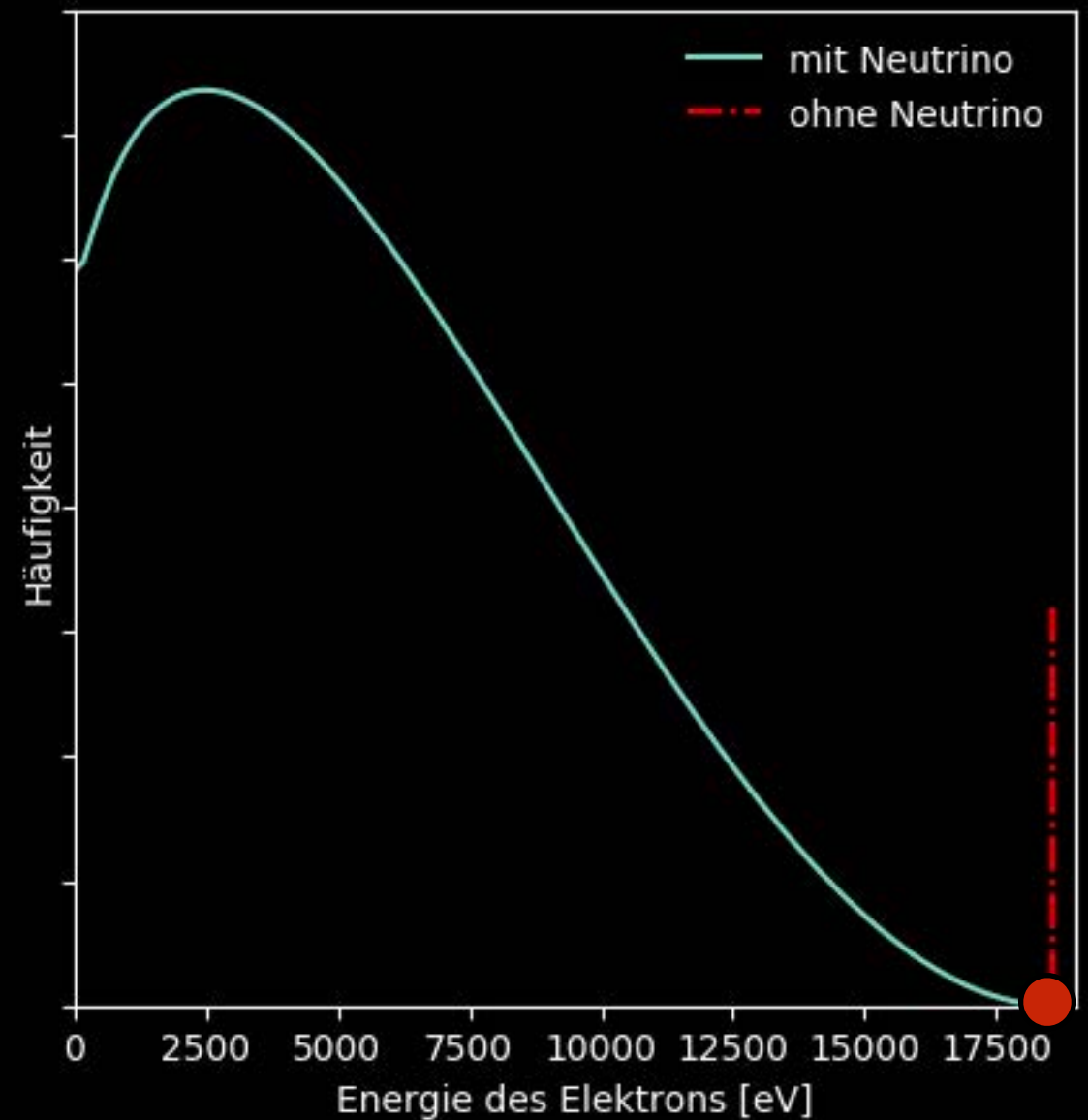


Freigesetzte Energie = Energie des Elektrons + Energie des Neutrinos

Energieerhaltung

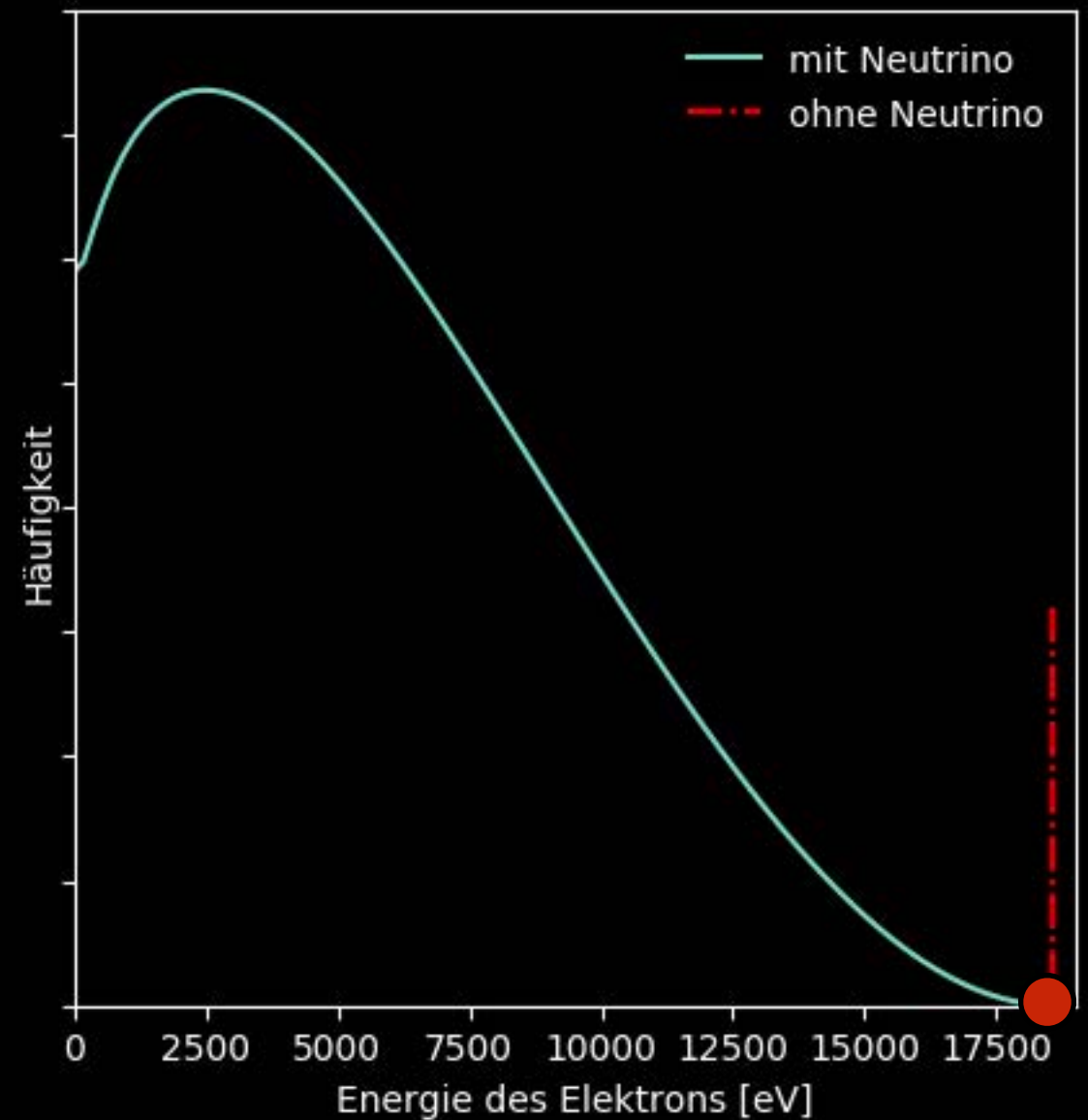
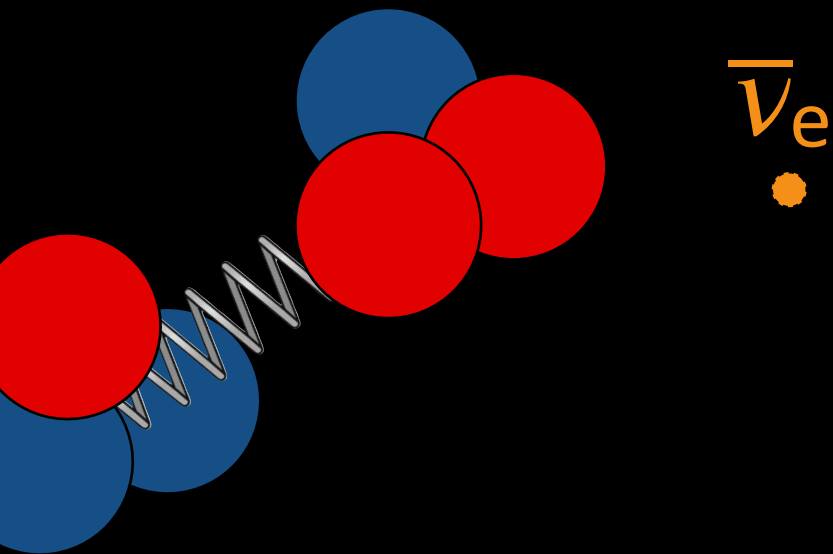


$\bar{\nu}_e$



$$\text{Freigesetzte Energie} = \text{Energie des Elektrons} + \left(\text{Ruhe-Energie des Neutrinos} + \text{Bewegungs-Energie des Neutrinos} \right)$$

Energieerhaltung



Freigesetzte
Energie

=

Energie des
Elektrons

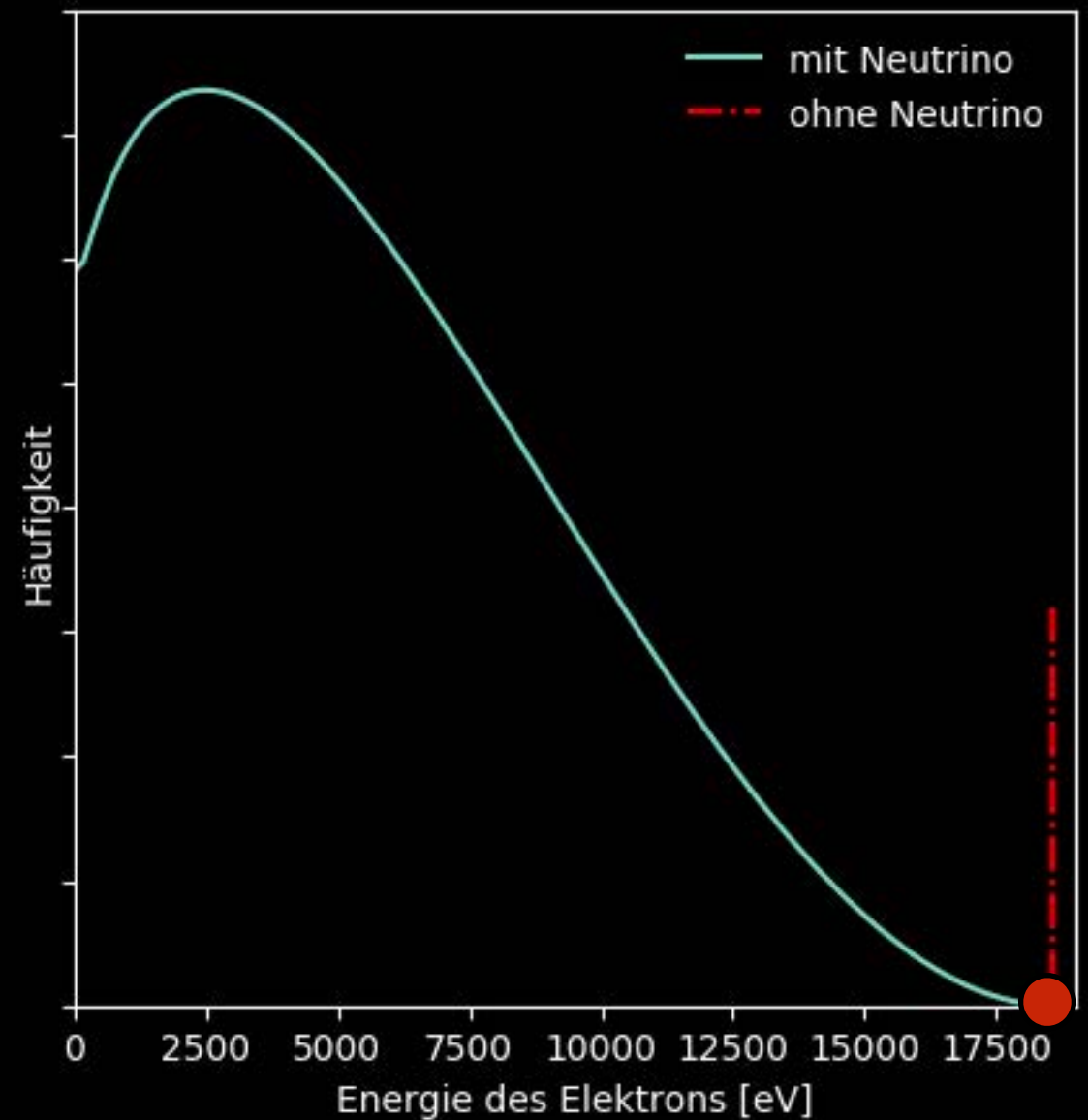
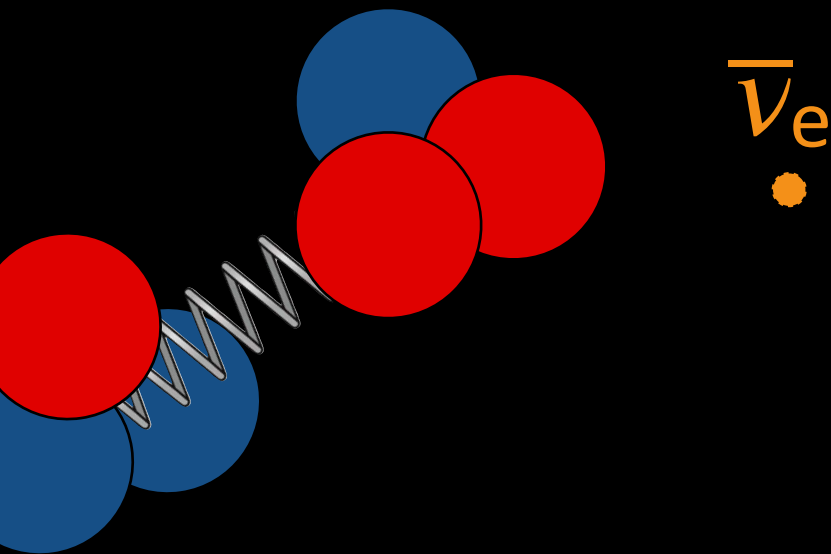
+

(Ruhe-Energie
des Neutrinos

+

~~Bewegungs-Energie
des Neutrinos~~)

Energieerhaltung



Freigesetzte
Energie

=

Energie des
Elektrons

+

(Ruhe-Energie
des Neutrinos

+

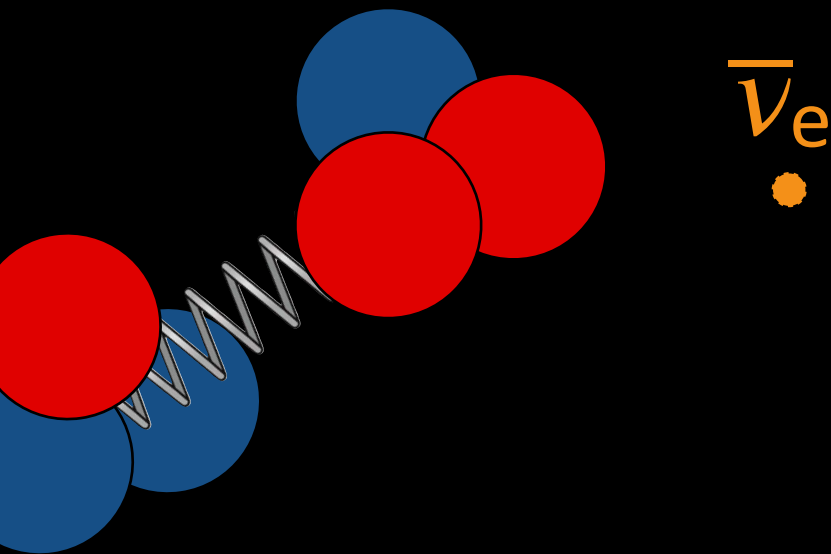
~~Bewegungs-Energie
des Neutrinos~~)

Bekannt

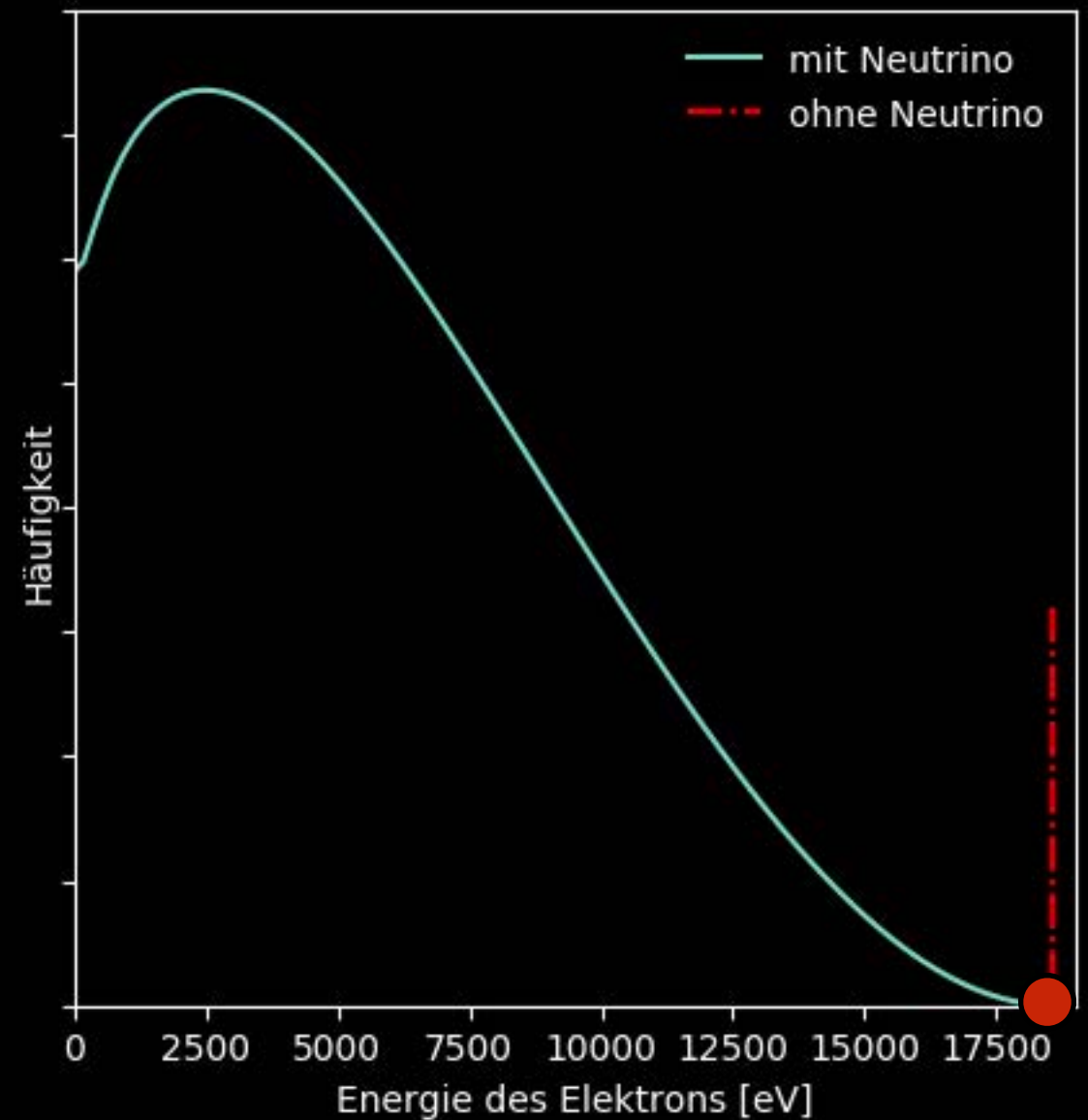
Messen!

Gesucht

Energieerhaltung



$\bar{\nu}_e$



Freigesetzte
Energie

=

Energie des
Elektrons

+

(Ruhe-Energie
des Neutrinos

+

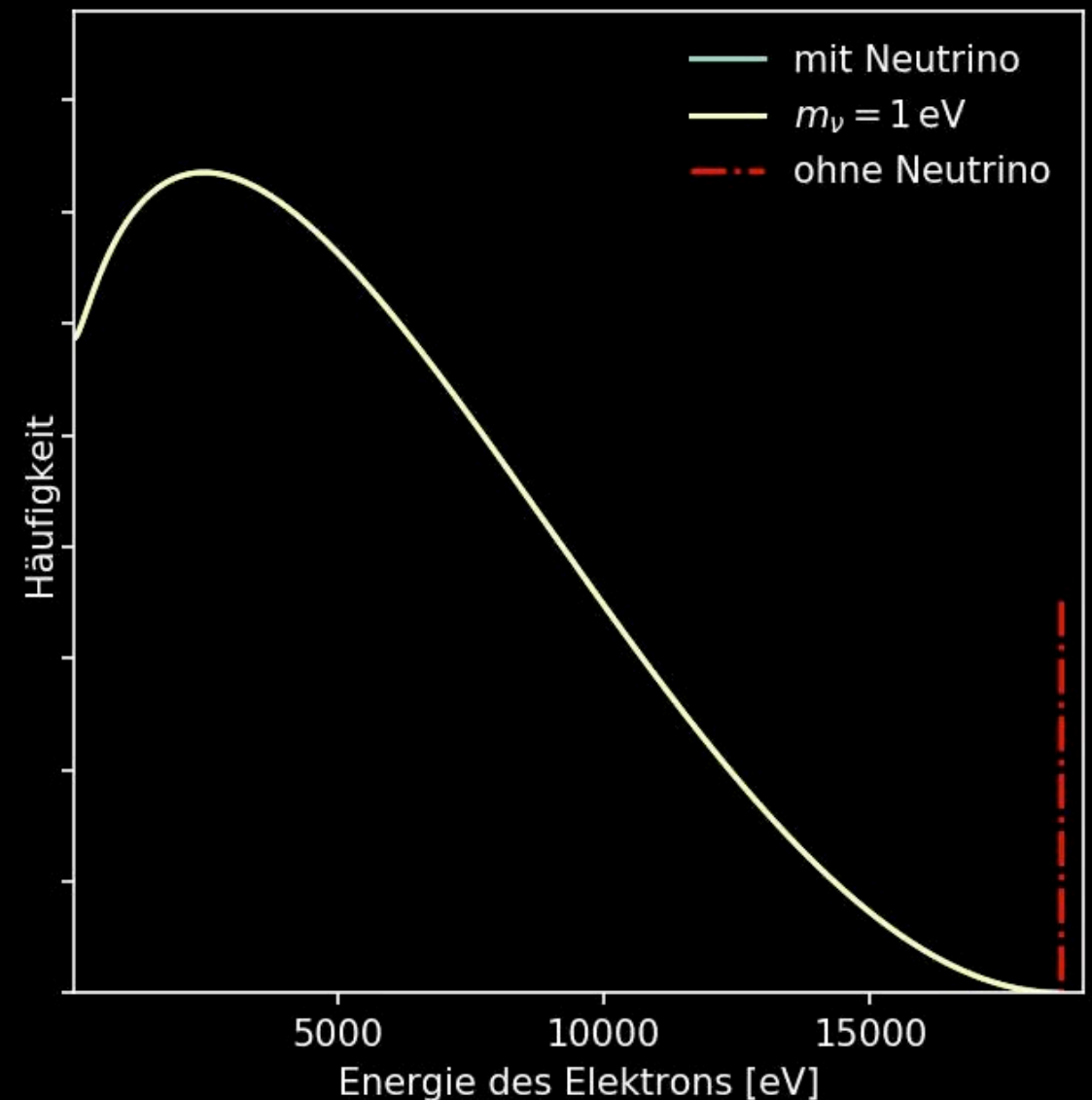
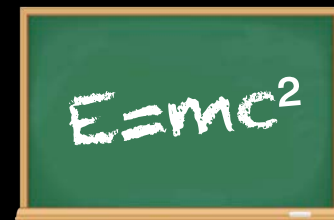
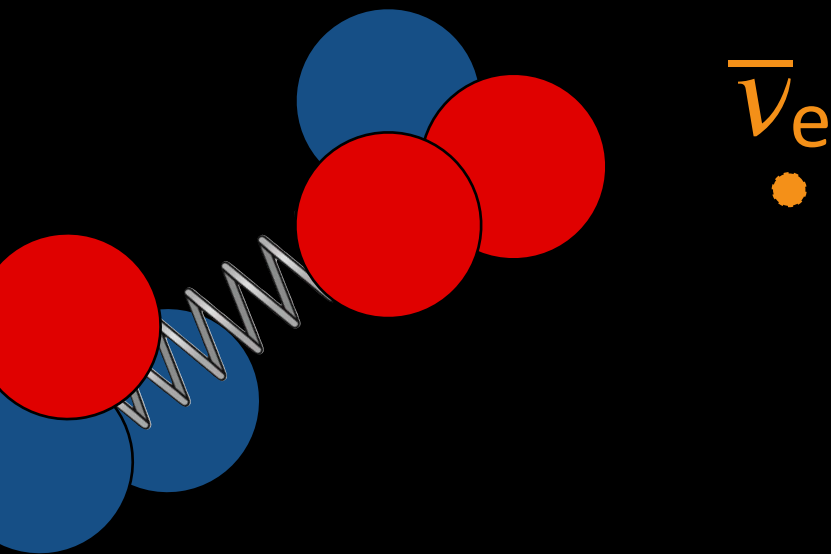
~~Bewegungs-Energie
des Neutrinos~~)

Bekannt

Messen!

Gesucht

Energieerhaltung



Freigesetzte
Energie

=

Energie des
Elektrons

+

(Ruhe-Energie
des Neutrinos

+

~~Bewegungs-Energie
des Neutrinos~~)

Bekannt

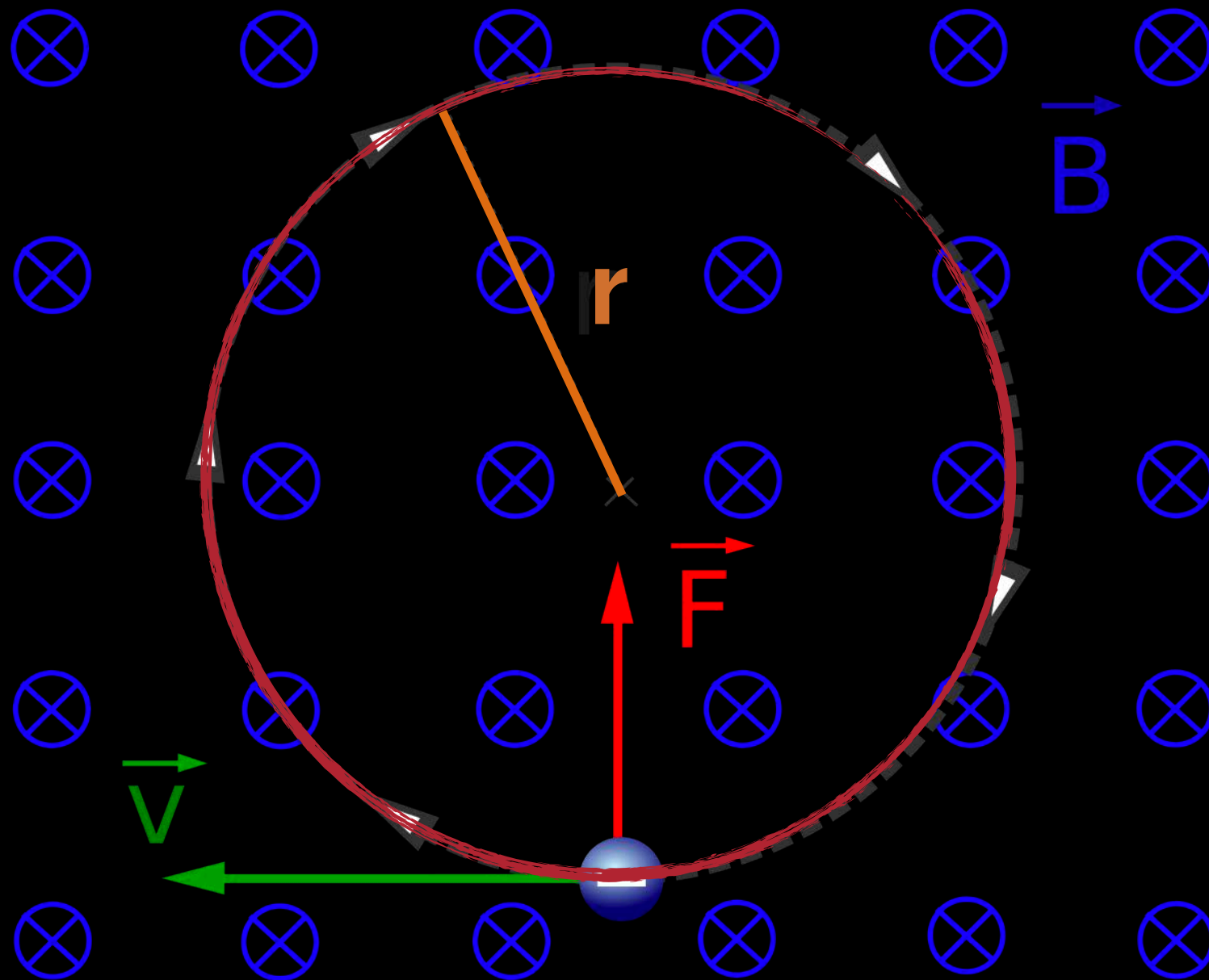
Messen!

Gesucht

KATRIN Neutrinomassen-Experiment



Zyklotronstrahlung



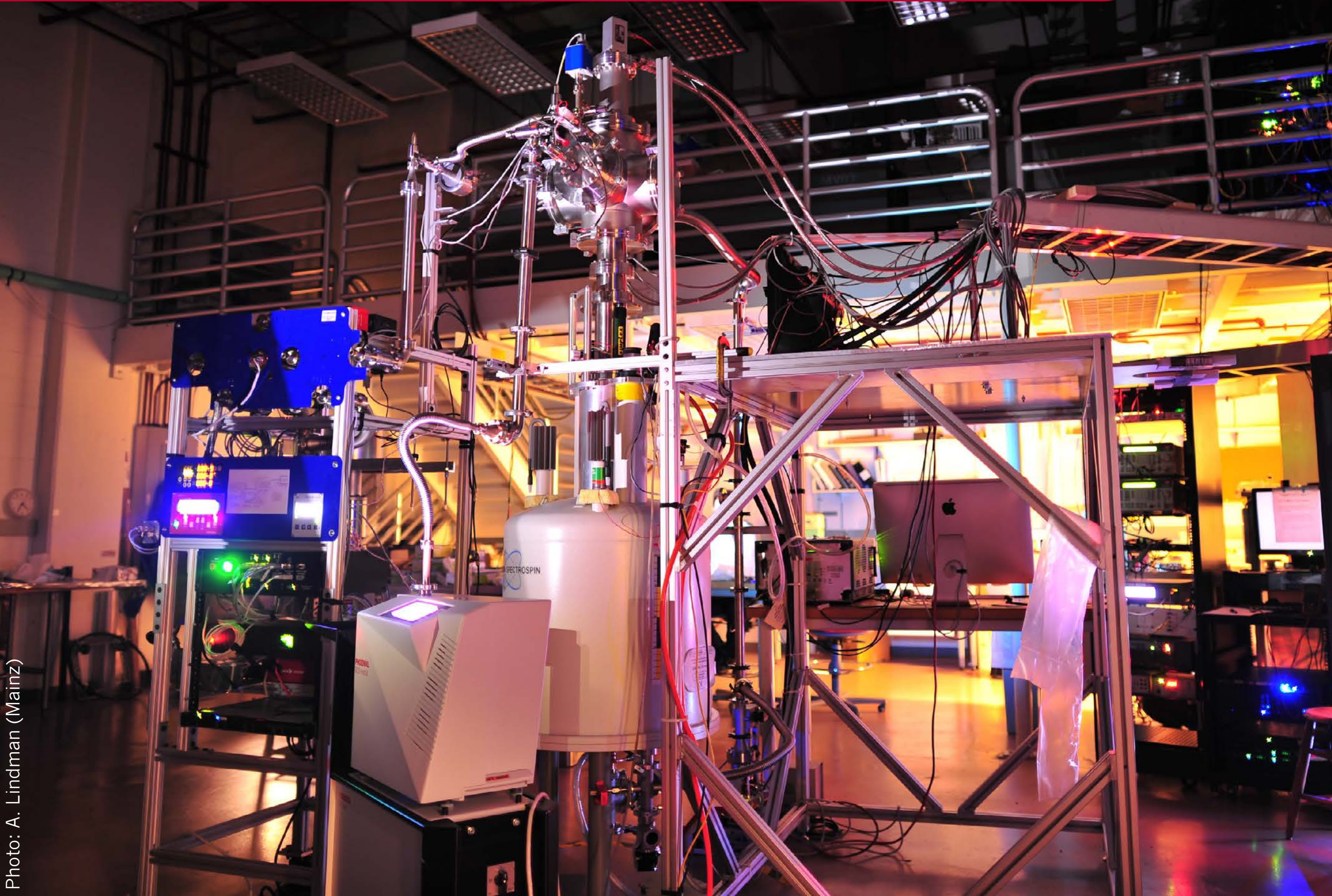
Zyklotronstrahlung



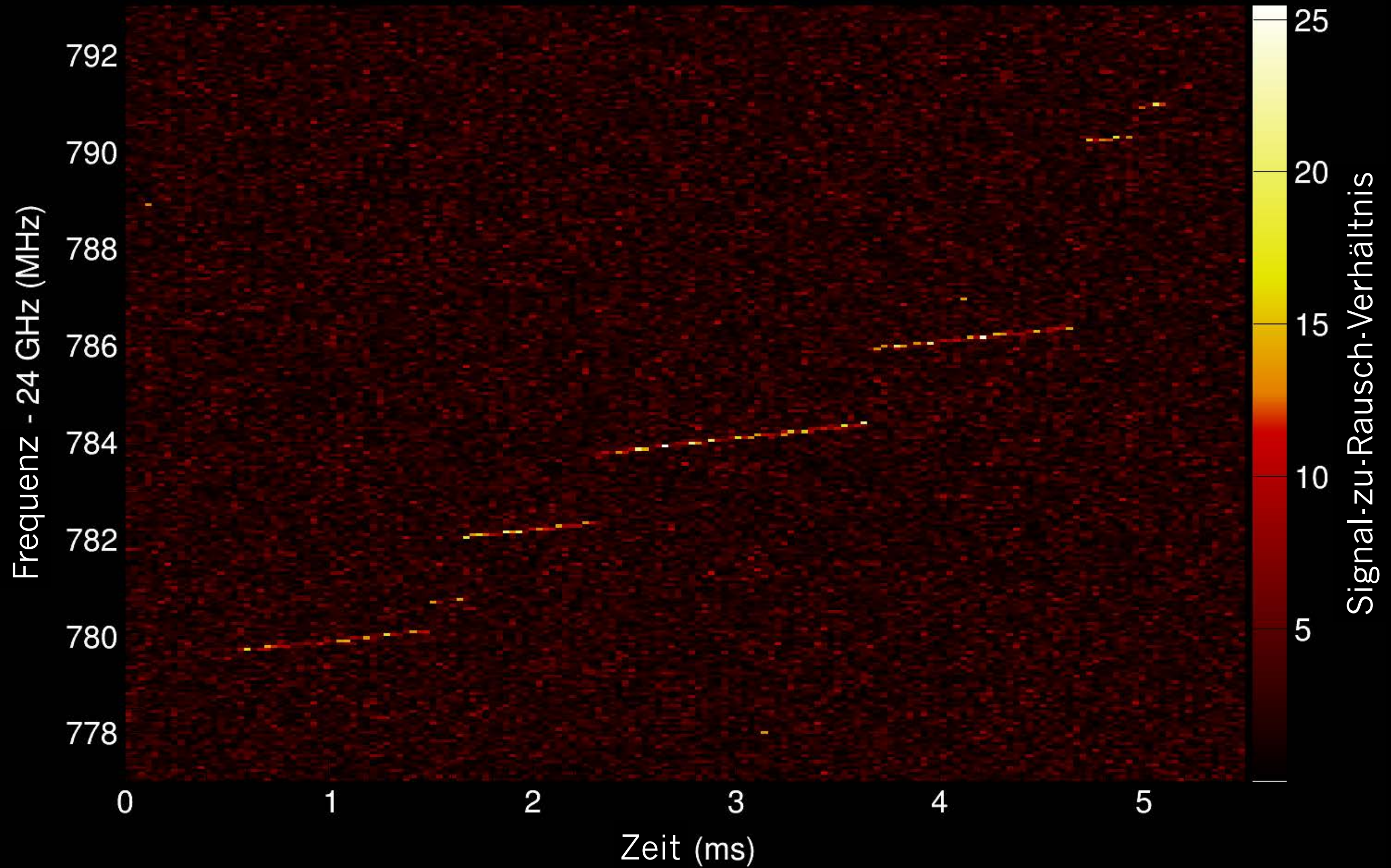
Frequenz

$$f = \frac{eB}{m_e + E_{\text{kin}}}$$

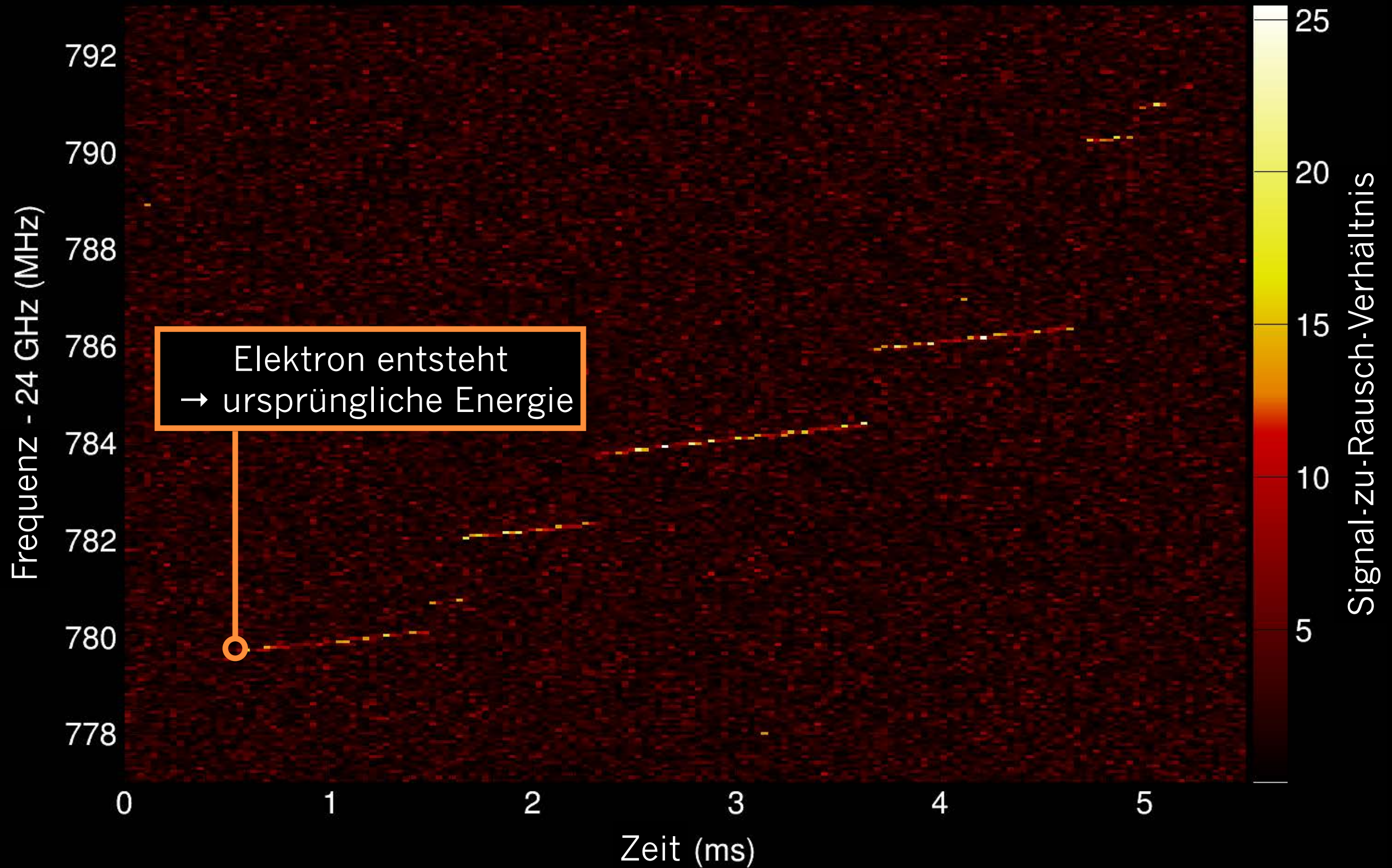
Project 8



Erstes Ereignis

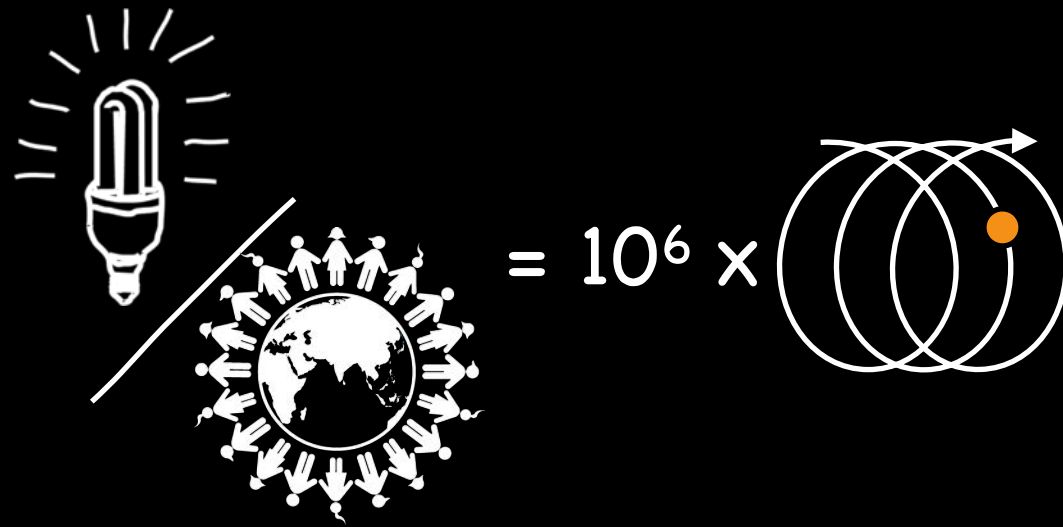


Erstes Ereignis



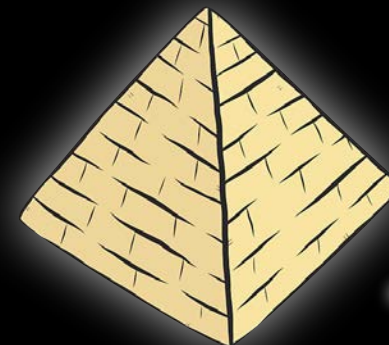
Herausforderungen

1. Geringe vom Elektron abgestrahlte Leistung



2. Sehr große Anzahl an Tritium-Zerfällen

Pyramide von Gizeh

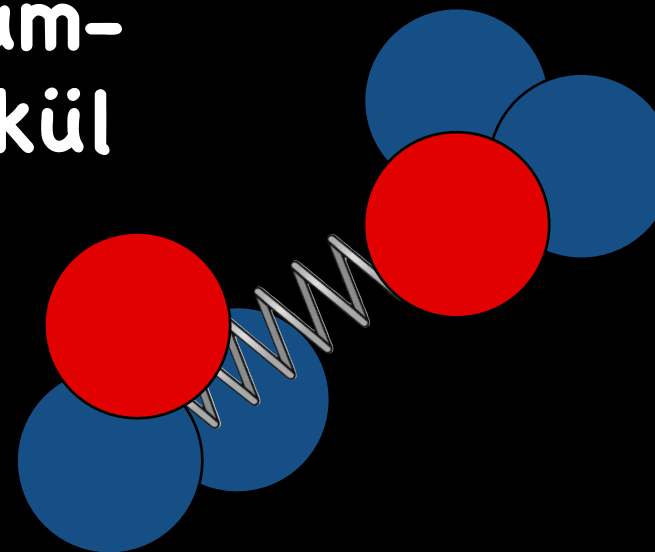


Sandkorn



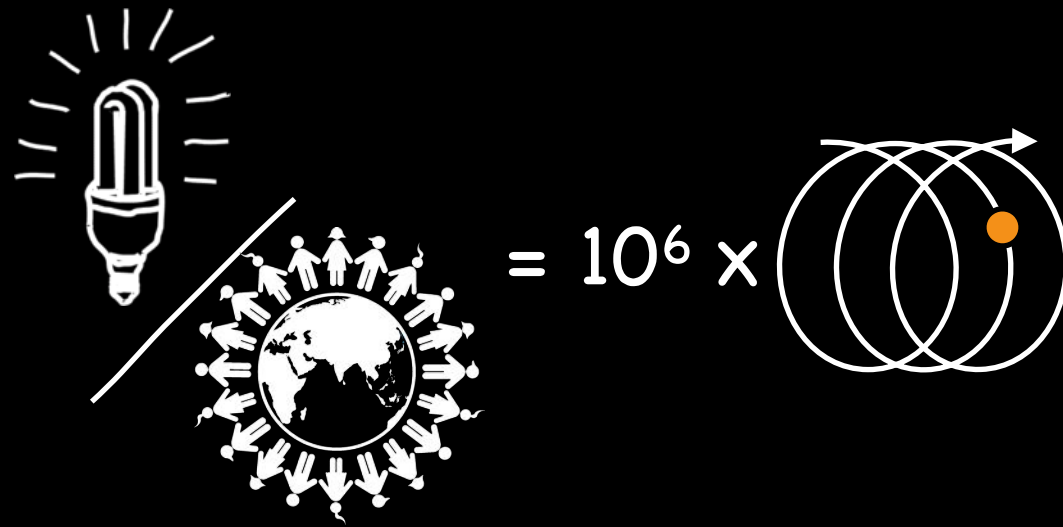
3. Ausgezeichnete Energieauflösung

Tritium-Molekül



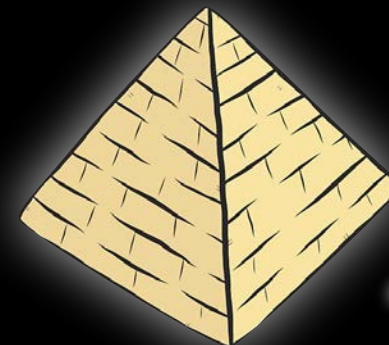
Herausforderungen

1. Geringe vom Elektron abgestrahlte Leistung



2. Sehr große Anzahl an Tritium-Zerfällen

Pyramide von Gizeh

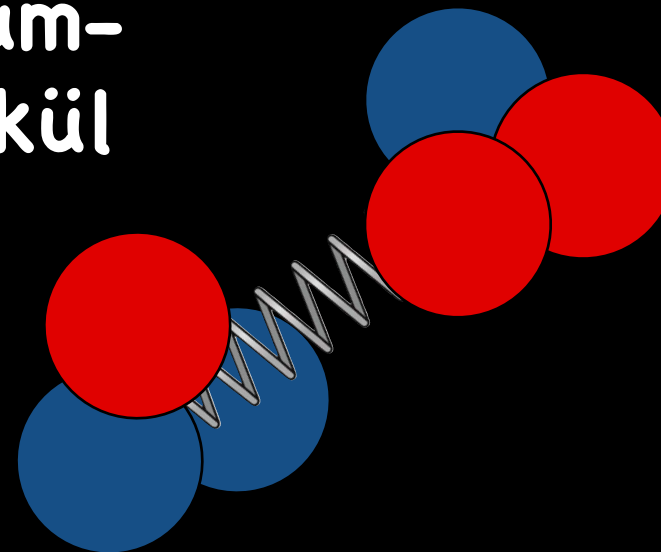


Sandkorn



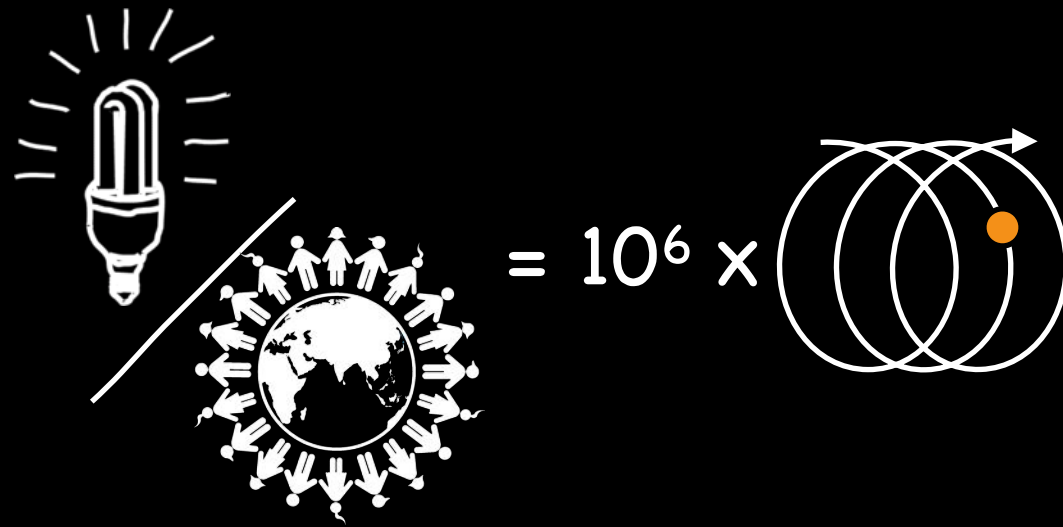
3. Ausgezeichnete Energieauflösung

Tritium-Molekül



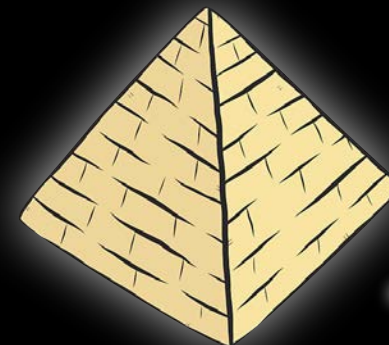
Herausforderungen

1. Geringe vom Elektron abgestrahlte Leistung



2. Sehr große Anzahl an Tritium-Zerfällen

Pyramide von Gizeh

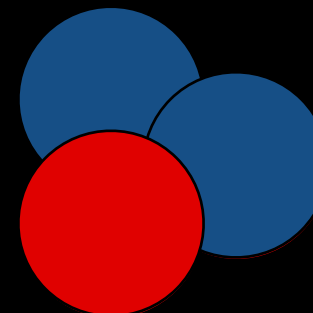


Sandkorn



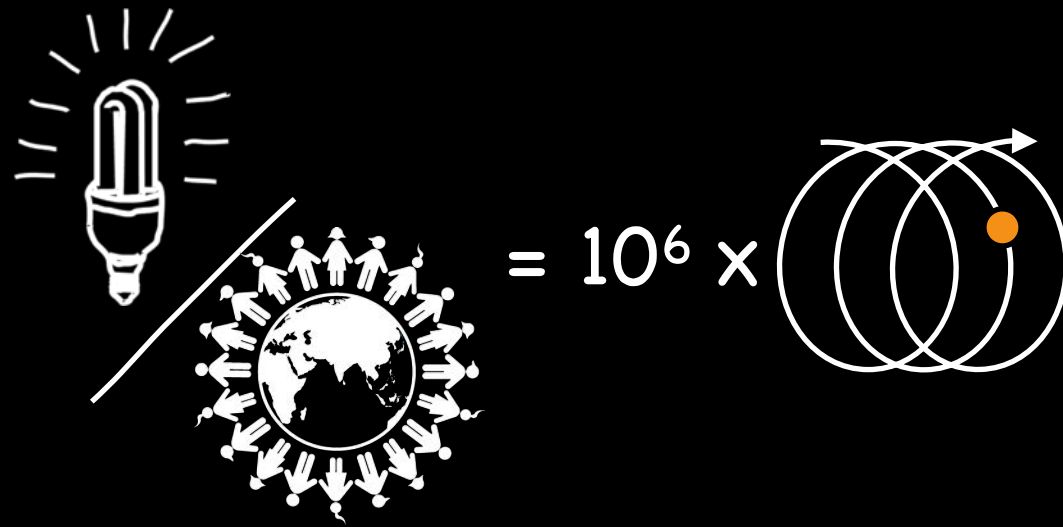
3. Ausgezeichnete Energieauflösung

Tritium-Atom



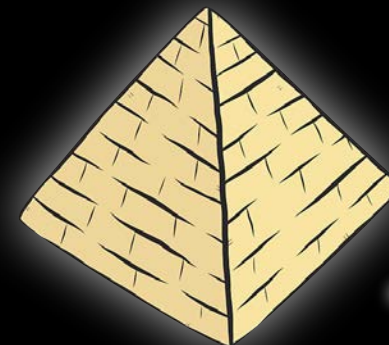
Herausforderungen

1. Geringe vom Elektron abgestrahlte Leistung



2. Sehr große Anzahl an Tritium-Zerfällen

Pyramide von Gizeh

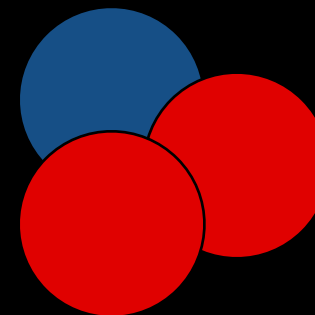


Sandkorn

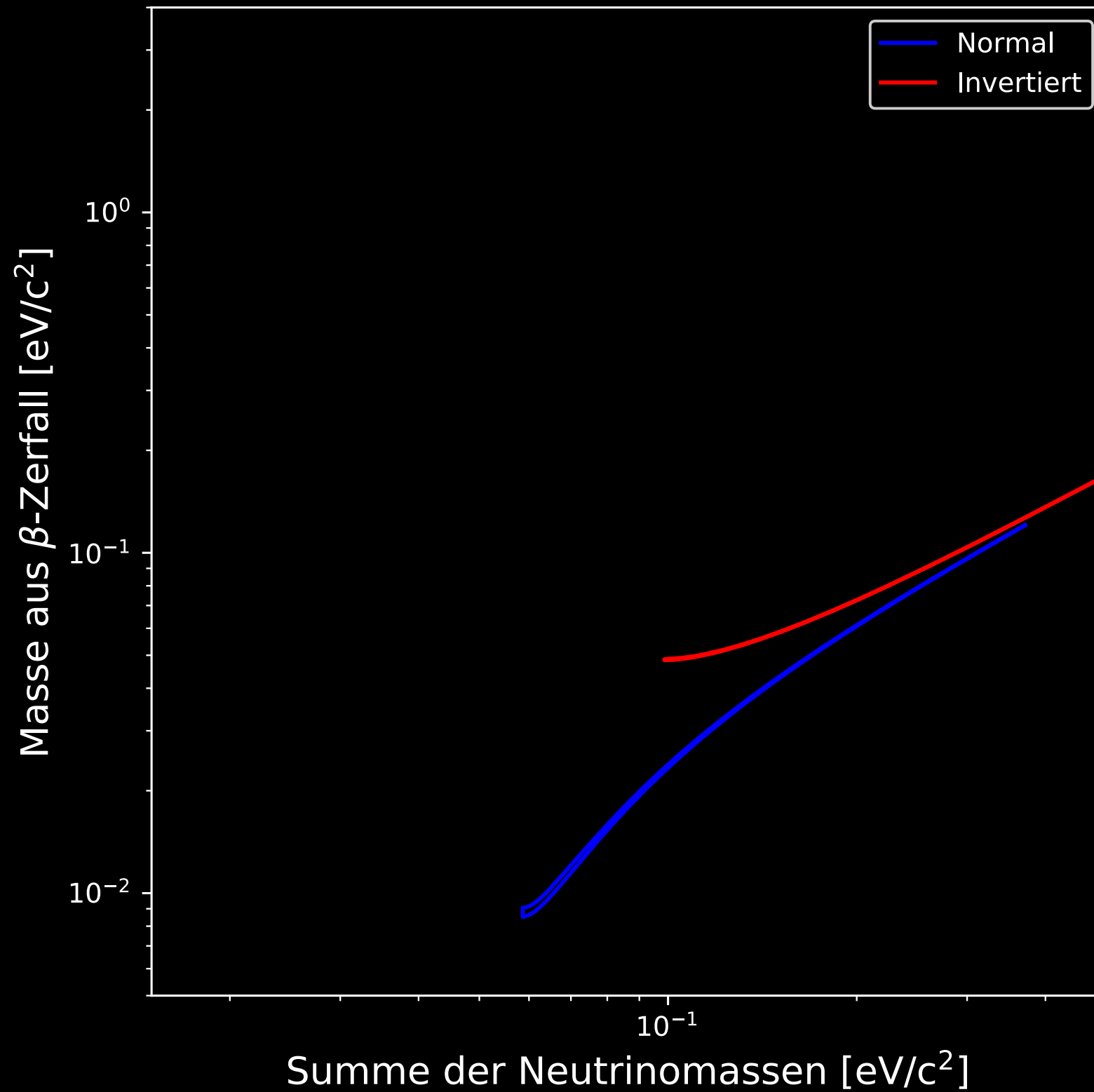


3. Ausgezeichnete Energieauflösung

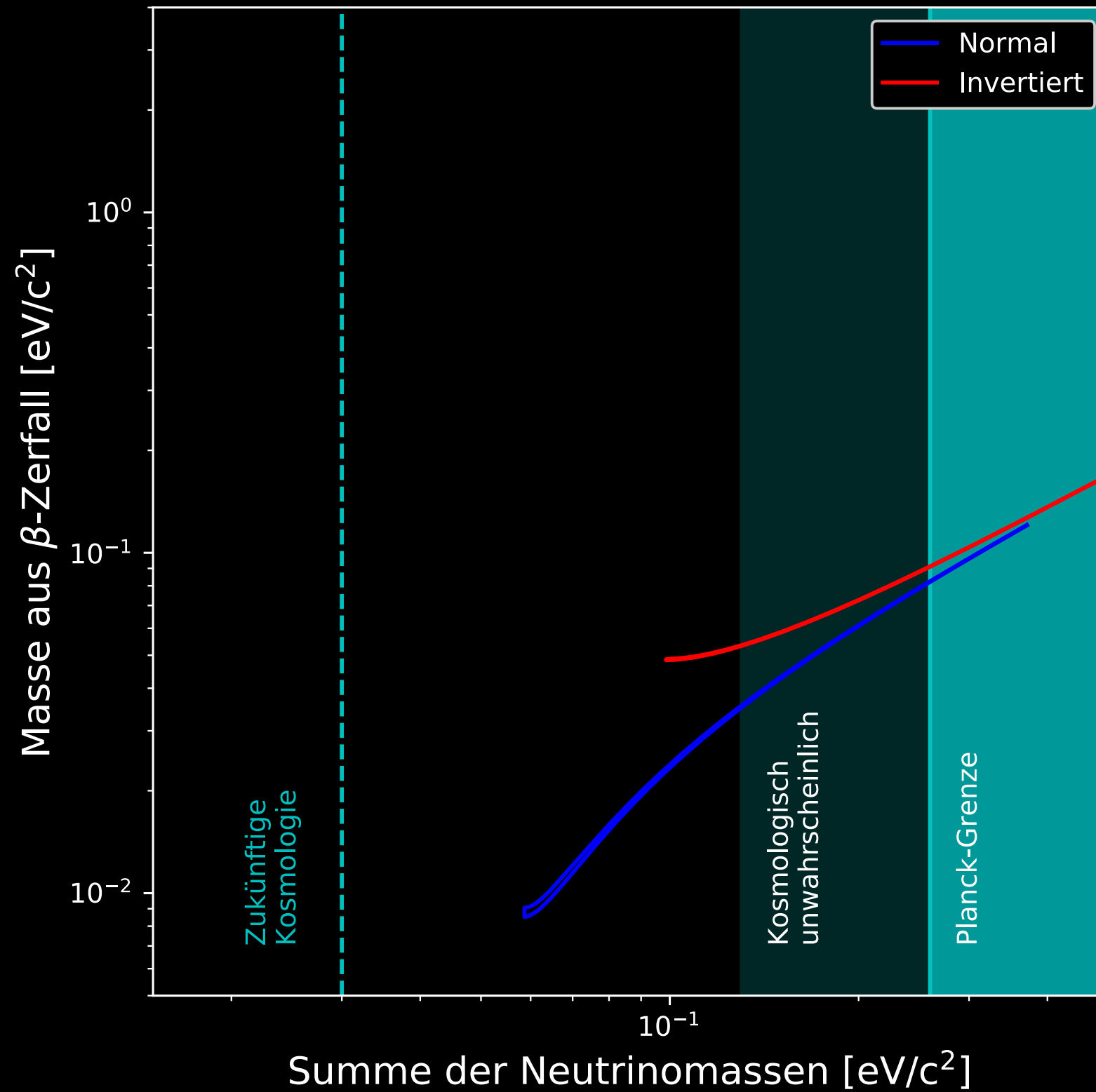
Tritium-Atom



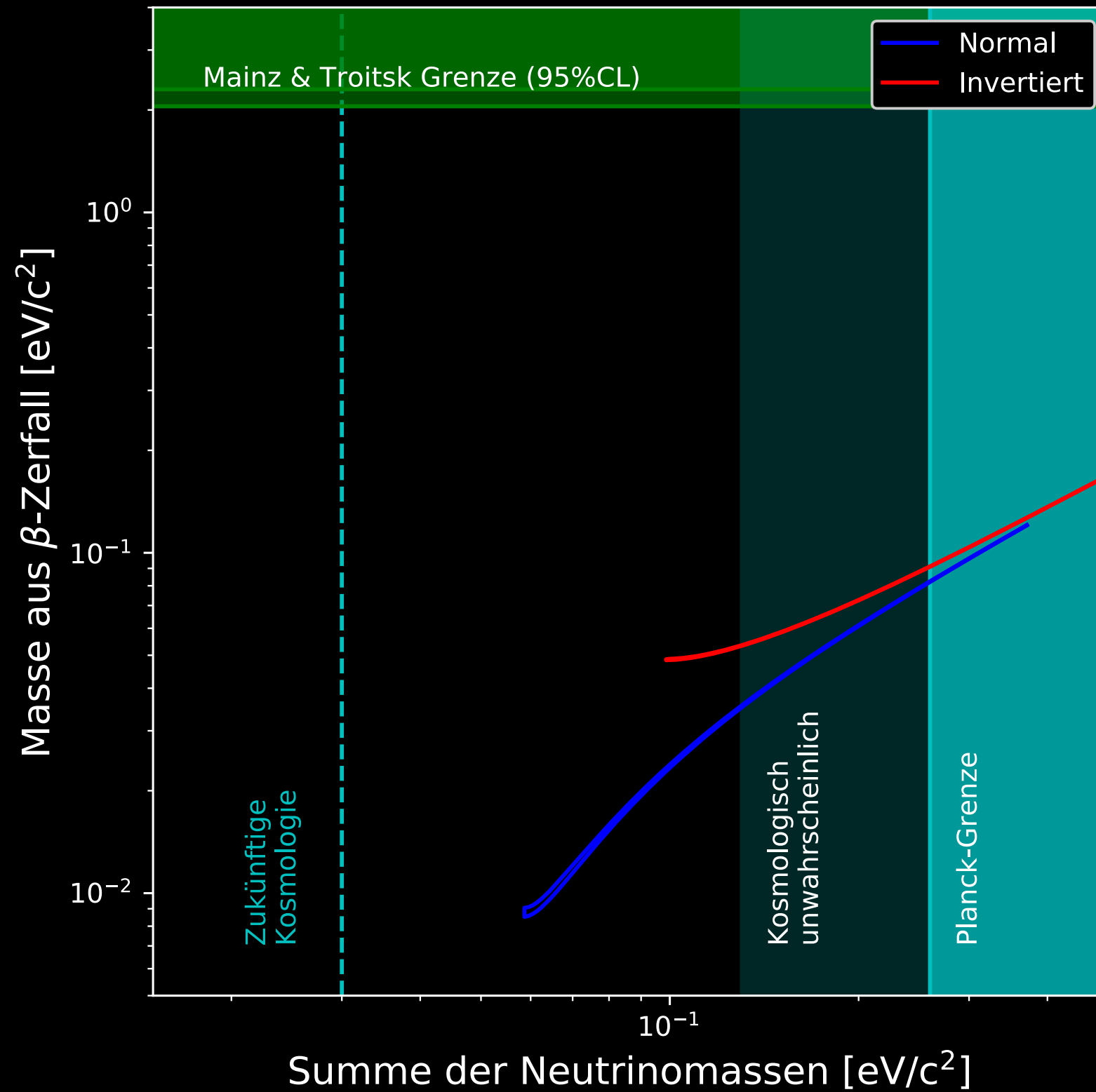
Status und Zukunft Neutrinomassen



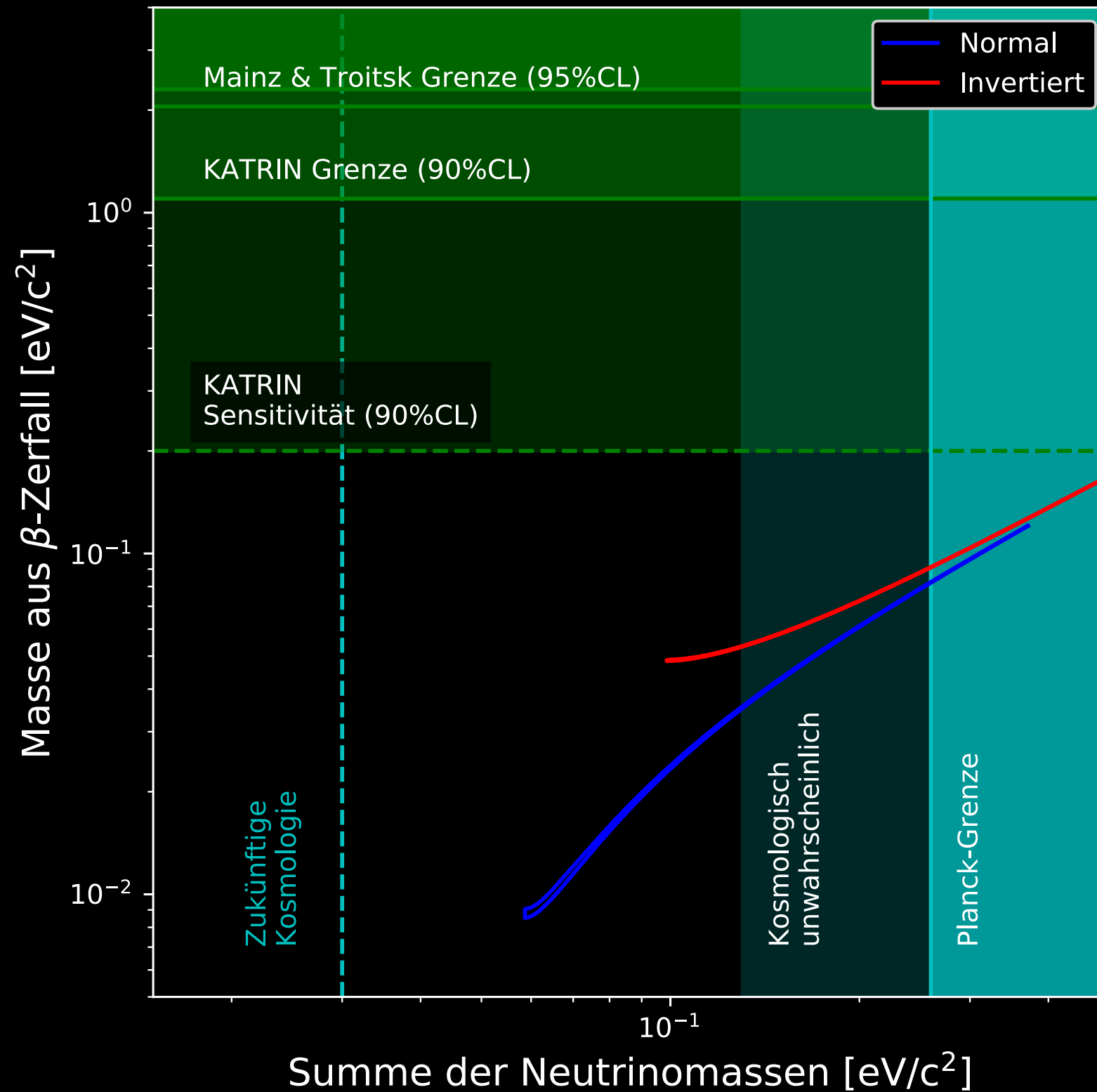
Status und Zukunft Neutrinomassen



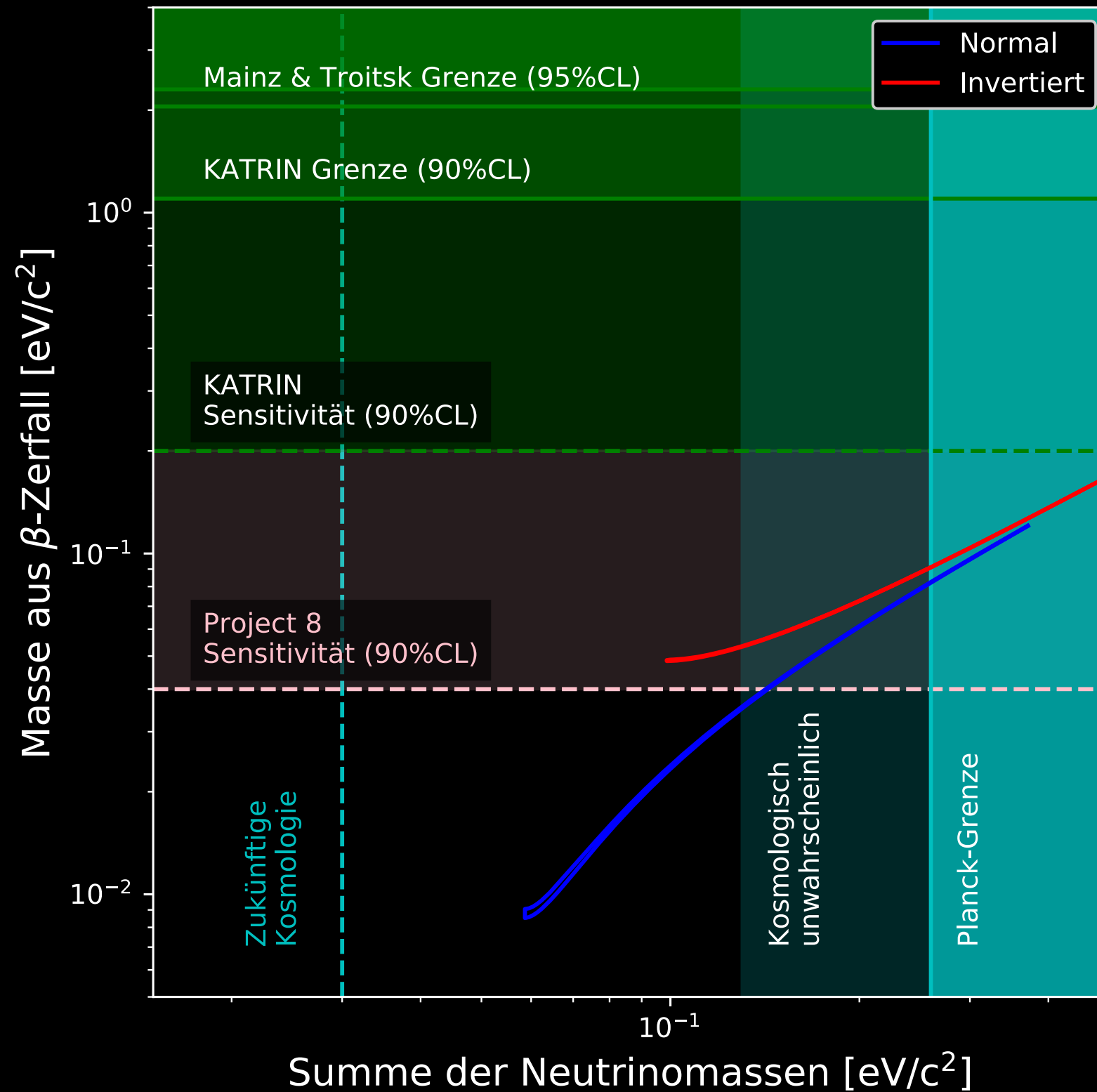
Status und Zukunft Neutrinomassen



Status und Zukunft Neutrinomassen



Status und Zukunft Neutrinomassen



Offene Fragen der Neutrinophysik

Massen

- **Absolute** Neutrino-Massen unbekannt
 - ▶ Reihenfolge der Massen ebenso (**Massenhierarchie**)
- Wie erhalten Neutrinos ihre Masse
 - ▶ ... und warum diese so klein ist

Weitere Eigenschaften

- Bislang nur linkshändige Neutrinos nachgewiesen
 - ▶ gibt es rechtshändige (**sterile**) **Neutrinos**?
- Sind Neutrinos verantwortlich für das Fehlen von **Antimaterie** in der Natur?



Dirac



Majorana

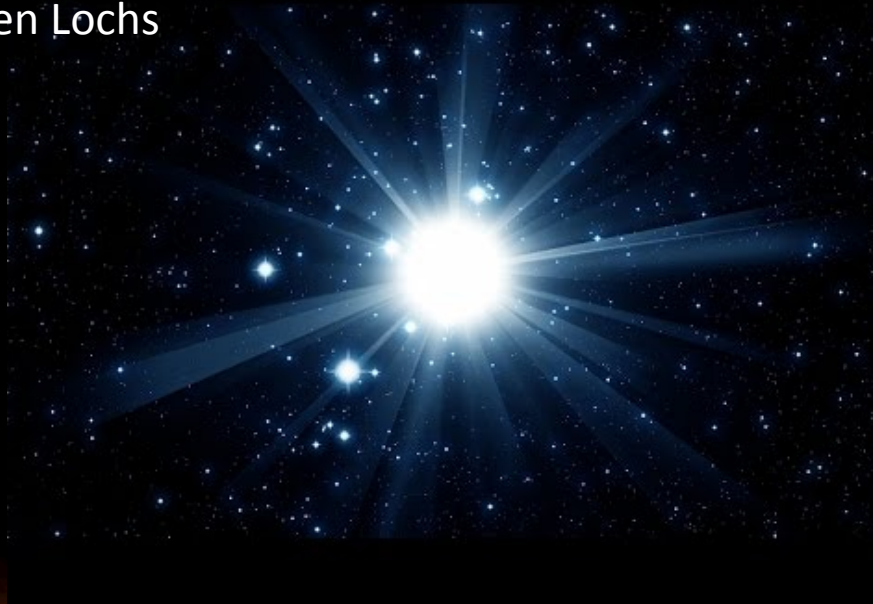


CP violation

Offene Fragen der Neutrinoastrophysik

Supernova-Neutrinos

Ablauf des Kernkollaps
Bildung eines Neutronsterns
oder Schwarzen Lochs



Diffuse Supernova-Neutrinos

erster Nachweis
Zeitabhängigkeit Supernova Rate
mittleres SN-Neutrino-Spektrum



Kosmische Neutrinos

Quellen der UHE
kosmischen Strahlung



Solare Neutrinos

Metallizität im Sonnenkern
(Kohlenstoff, Stickstoff etc.)

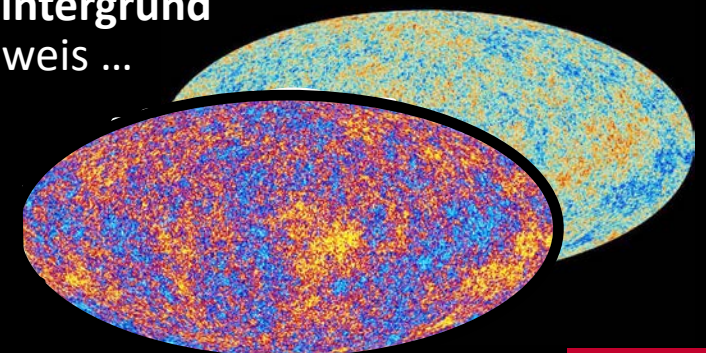


Geoneutrinos

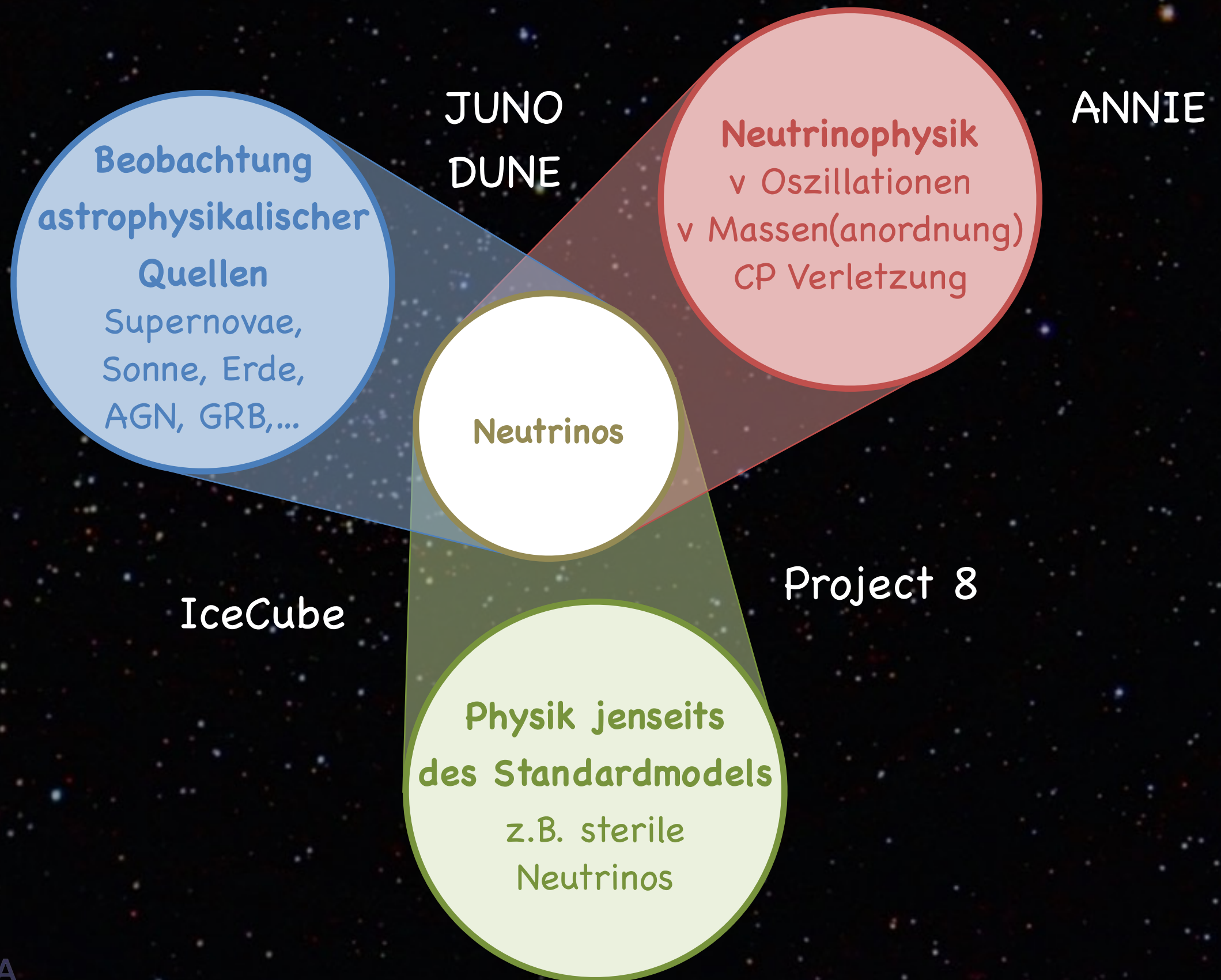
Beitrag des Erdmantels
Uran-Thorium-Verhältnis

Kosmische Neutrino-Hintergrund

erster Nachweis ...



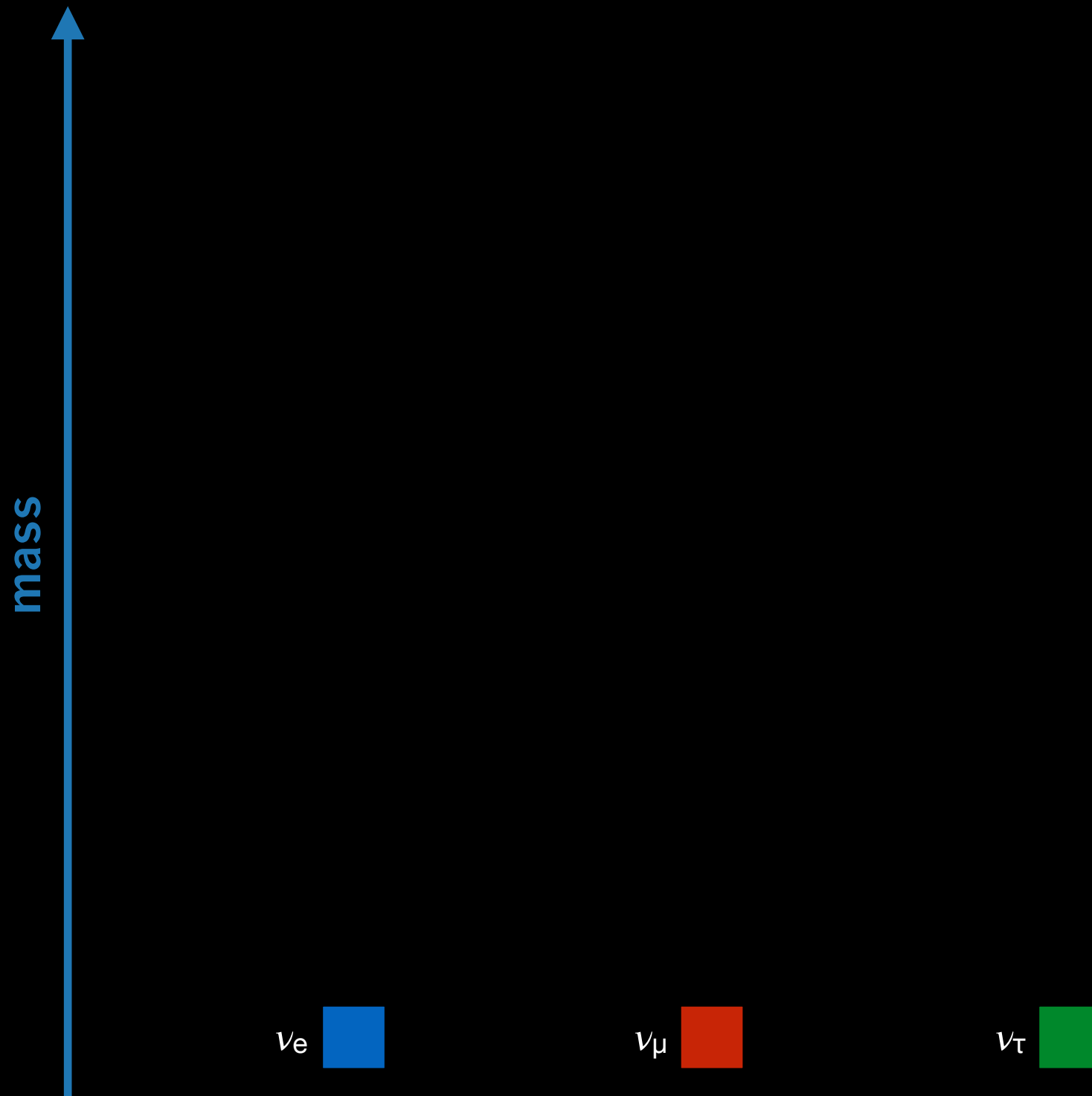
Neutrino-physik in Mainz



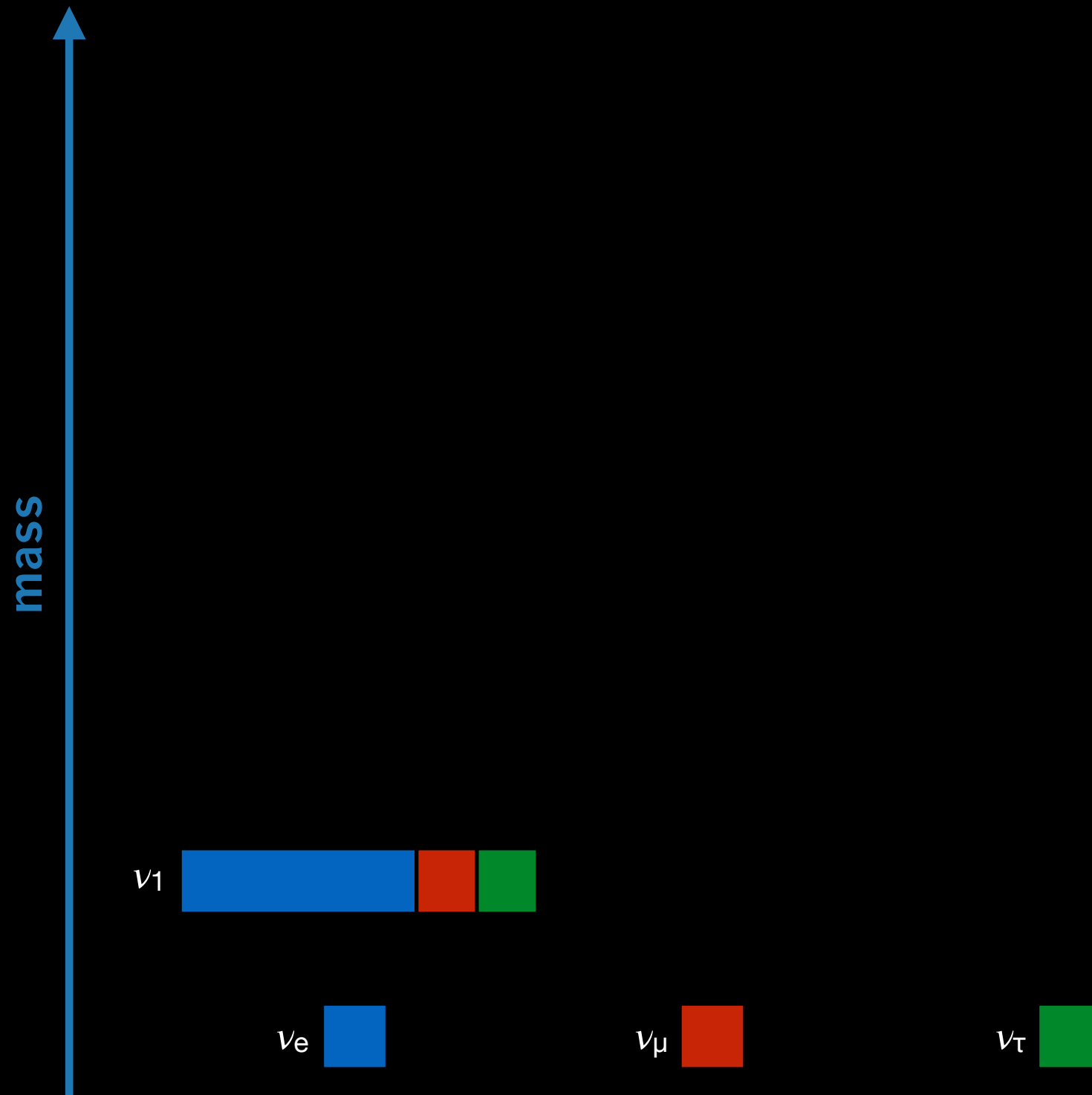
Vielen Dank!



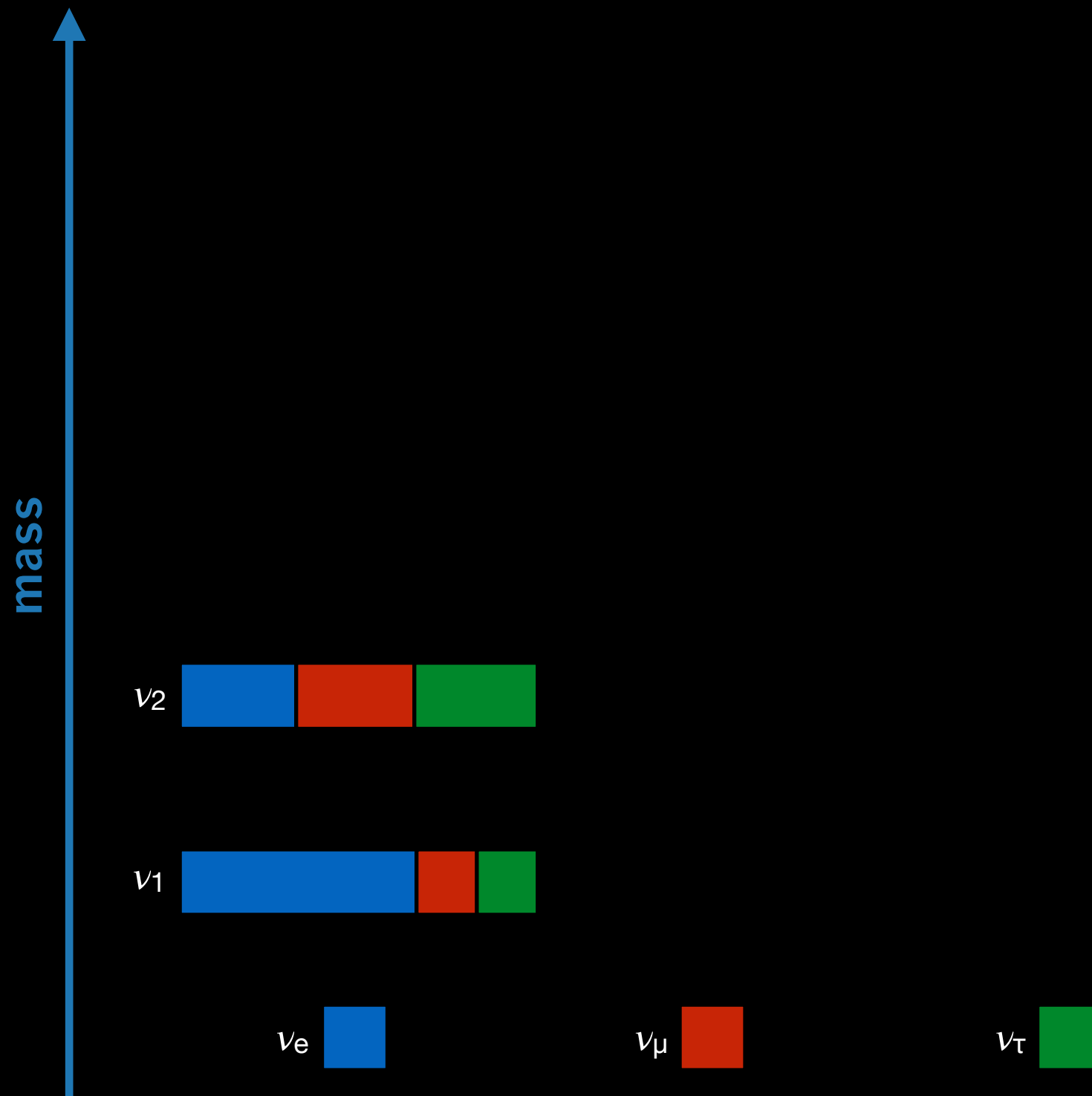
Ergebnisse



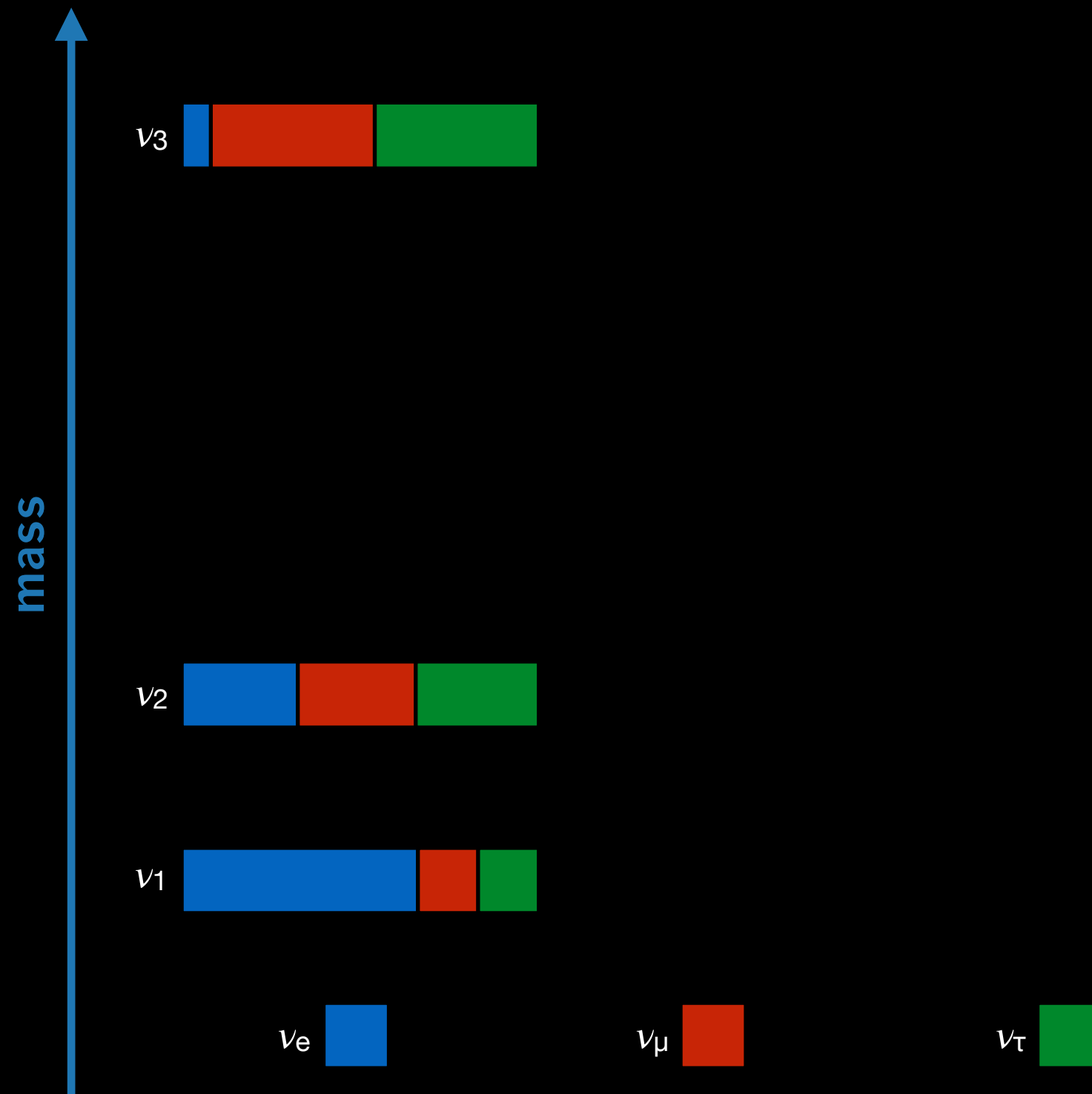
Ergebnisse



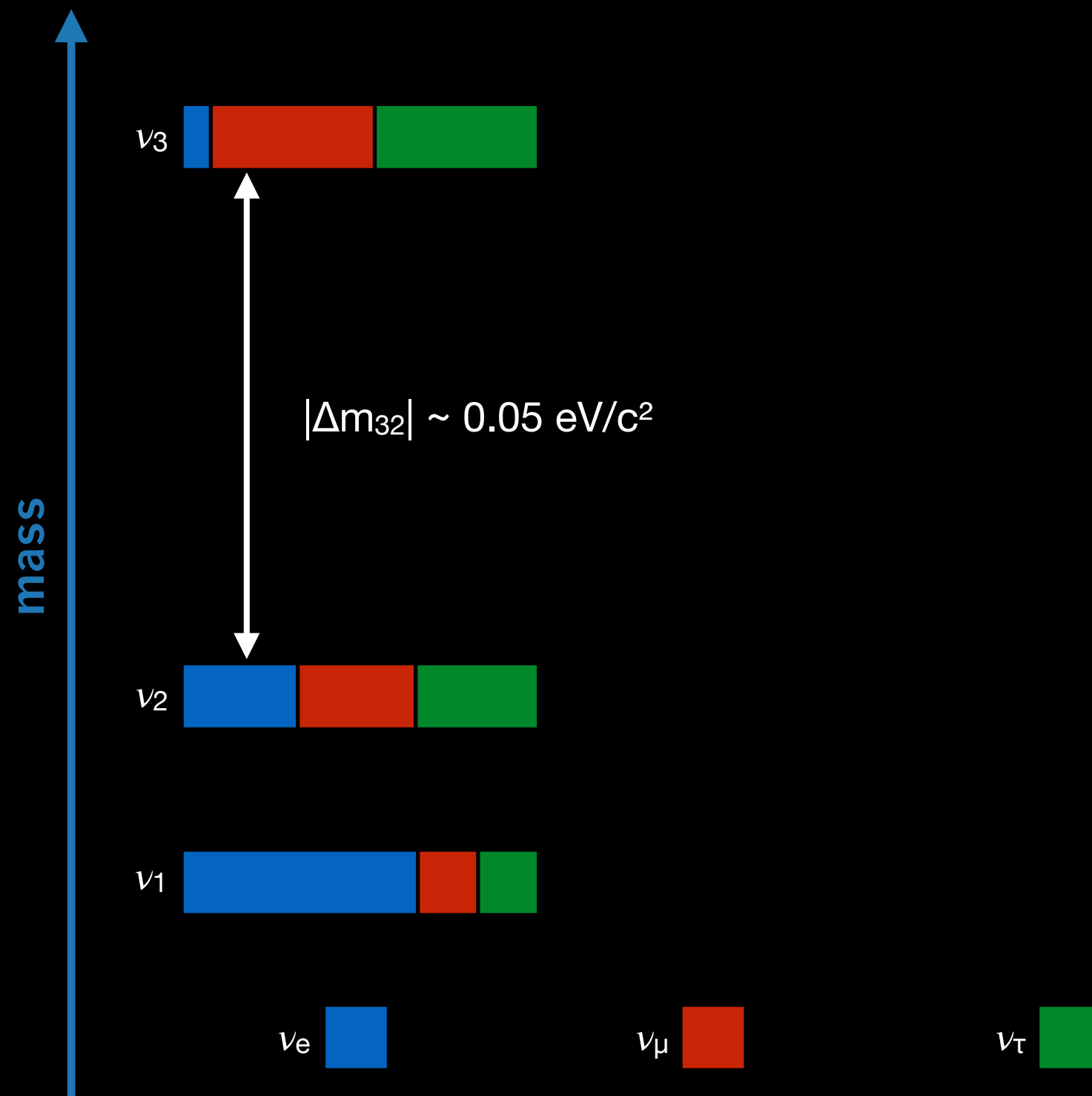
Ergebnisse



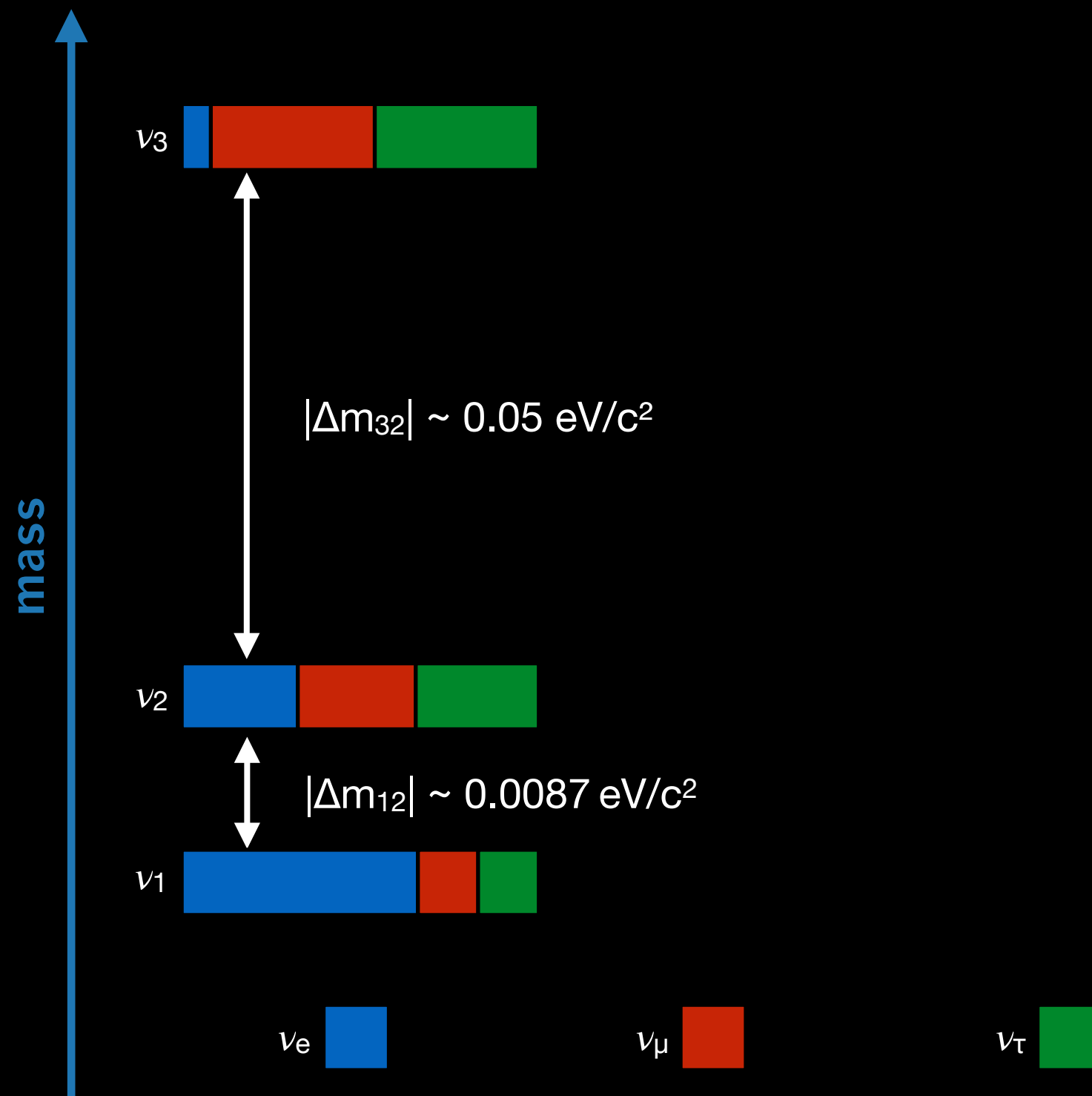
Ergebnisse



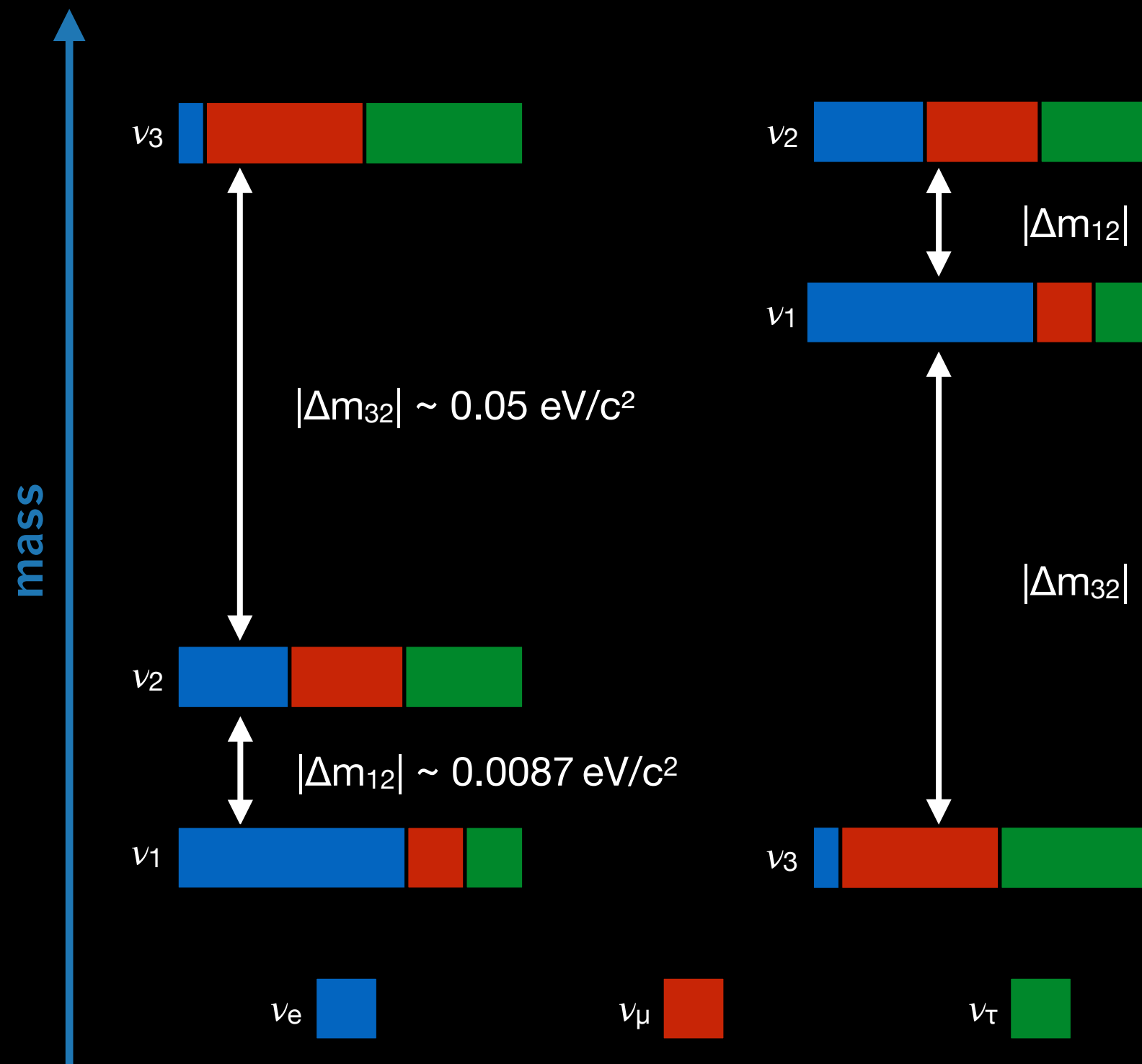
Ergebnisse



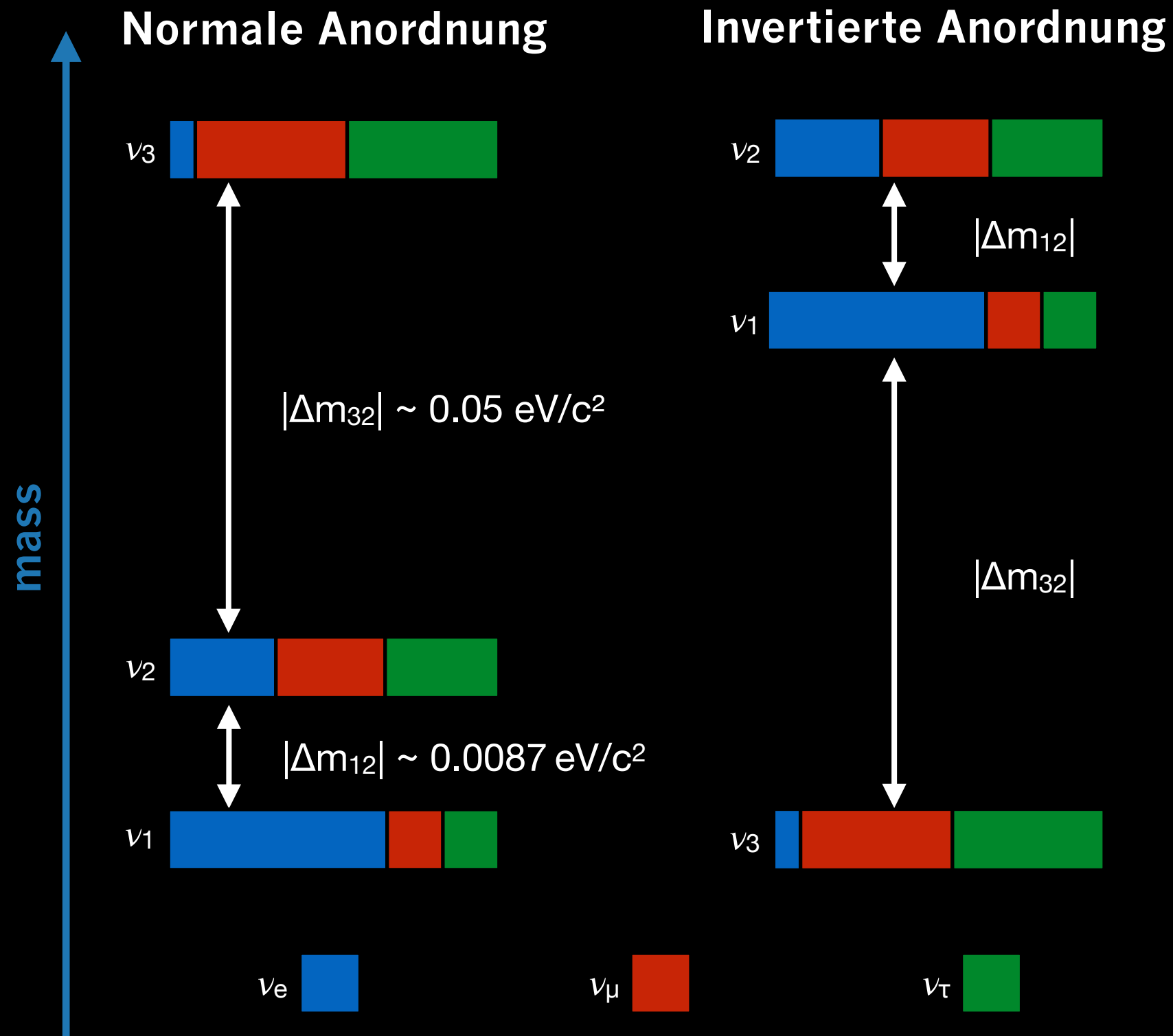
Ergebnisse



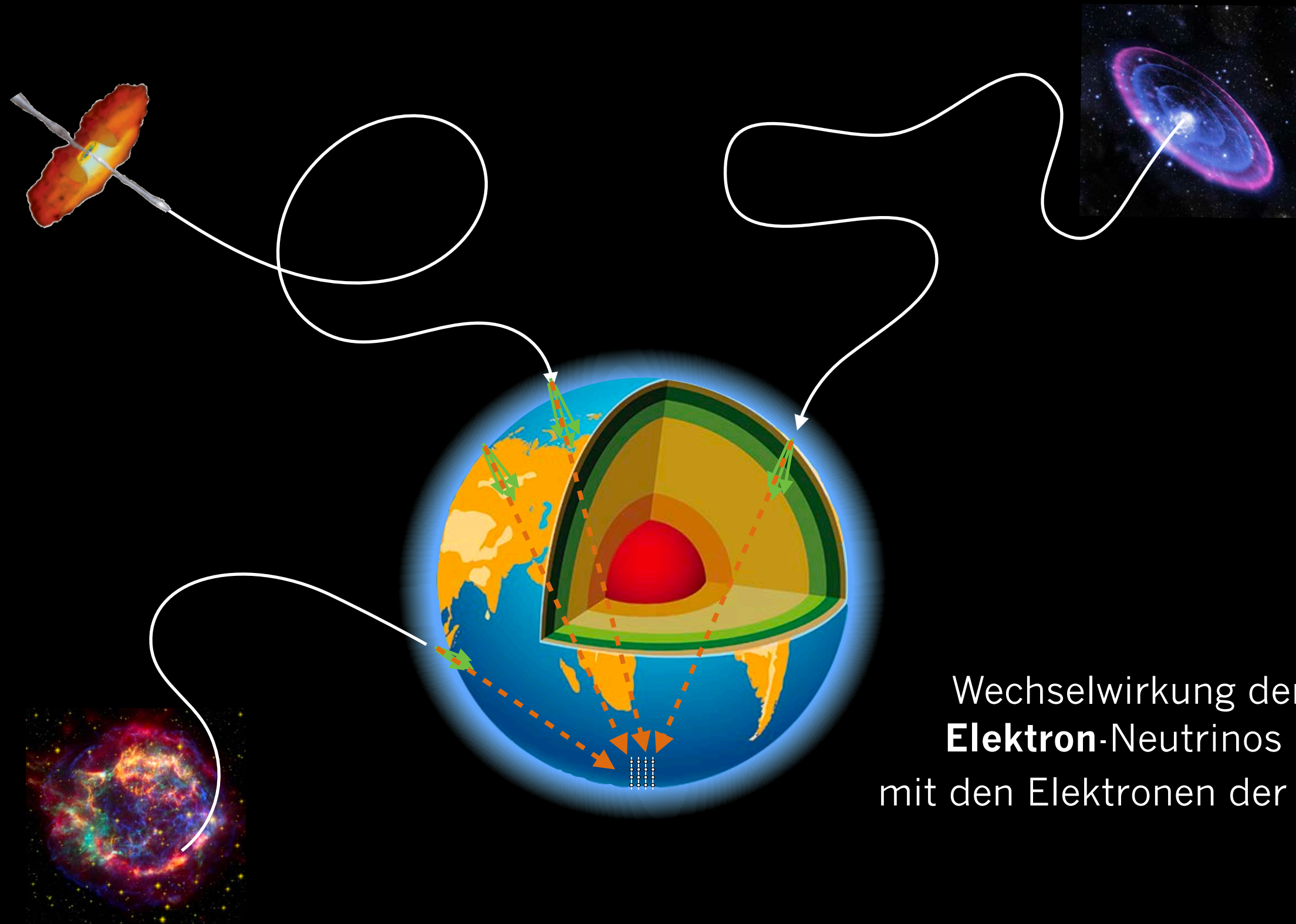
Ergebnisse



Ergebnisse



Materieeffekte



Wechselwirkung der
Elektron-Neutrinos ν_e
mit den Elektronen der Erde

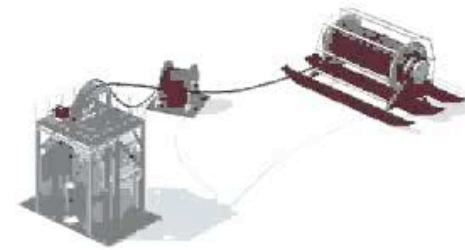
Wie kommen die Löcher ins Eis?



Wie kommen die Löcher ins Eis?

3km Schlauch

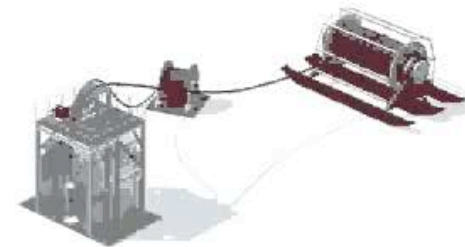
Heißwa



Wie kommen die Löcher ins Eis?

3km Schlauch

Heißwa



Woher kommt das heiße Wasser?



3km Schlauch

Heißwasser
anlage

Bohrturm

= 5000 x



Leistung:
5 Megawatt

Digitales Optisches Modul (DOM)



Digitales Optisches Modul (DOM)

