

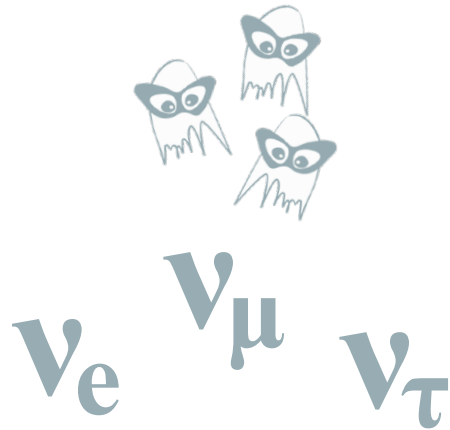
Kosmische Leichtgewichte: Neutrinos auf der Waagschale von KATRIN

Kathrin Valerius, Karlsruher Institut für Technologie



Drei Fragen für diesen Vortrag:

1 Was sind überhaupt Neutrinos?



2 Welche besondere Bedeutung hat die Neutrinomasse?

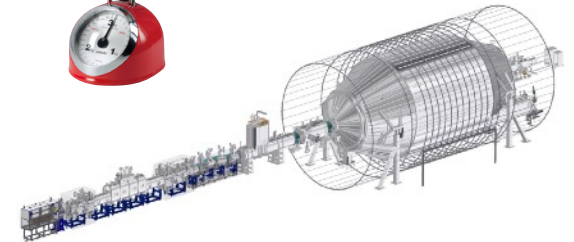


Art McDonald u. Takaaki Kajita

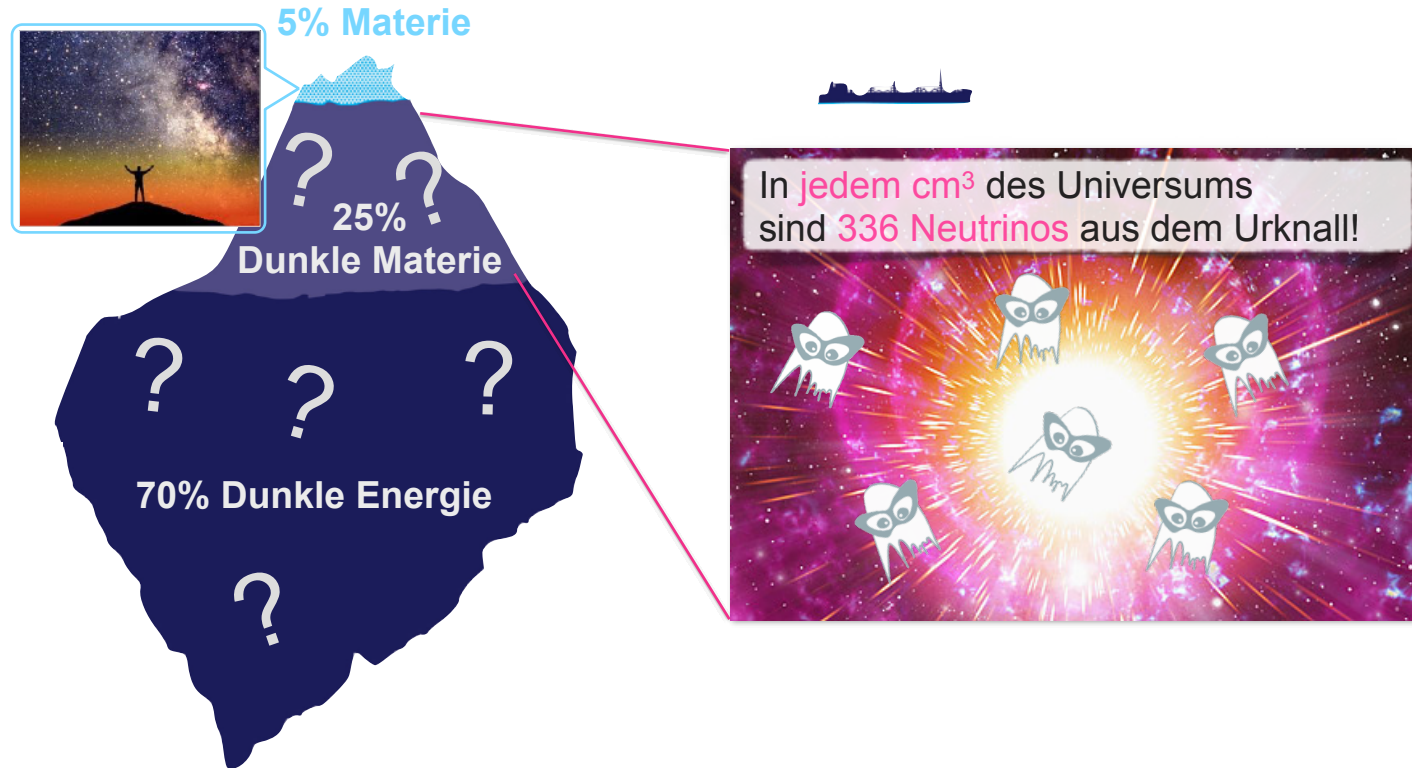
Nobelpreis in Physik 2015

für die Entdeckung,
dass Neutrinos eine
Masse besitzen

3 Wie will KATRIN der Neutrinomasse auf die Spur kommen?

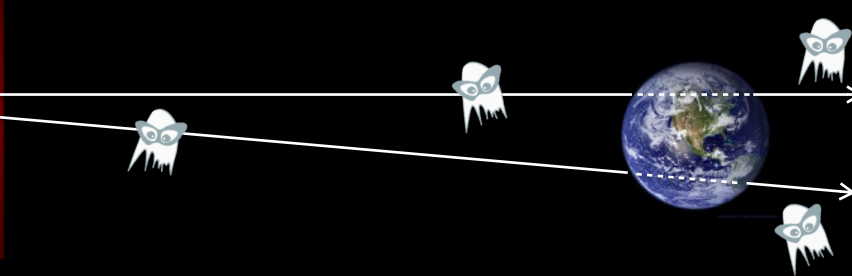
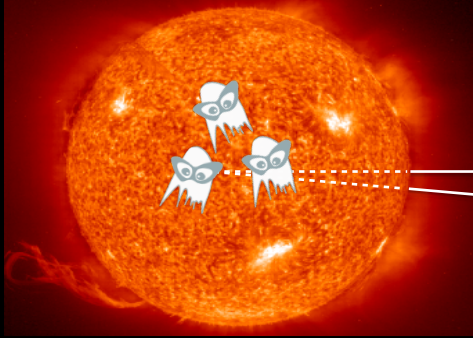


Das unsichtbare Universum



Unfassbare Neutrinos

Neutrinos passieren Materie (fast) ungehindert!

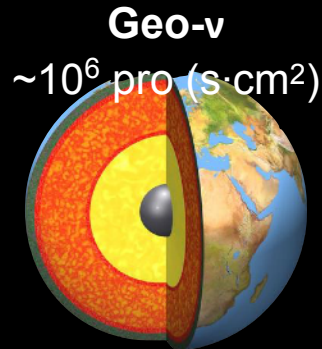


Von der Sonne
erreichen uns in
jeder Sekunde
65 Milliarden
Neutrinos pro cm²!



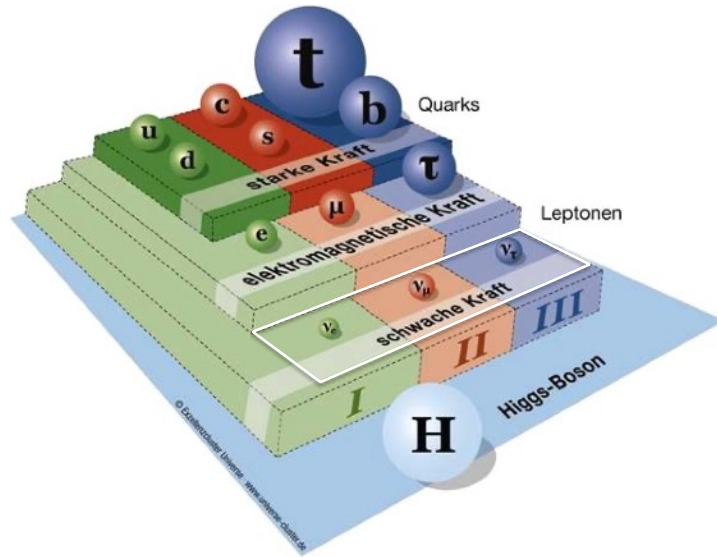
Reaktor-v

bis zu 10^8 pro (s·cm²)
(1 km Abstand)



“Bio”-v
 ~ 4000 pro
(s·Person)
⁴⁰K-Zerfall im
Körper

Was wissen wir über Neutrino-Eigenschaften?

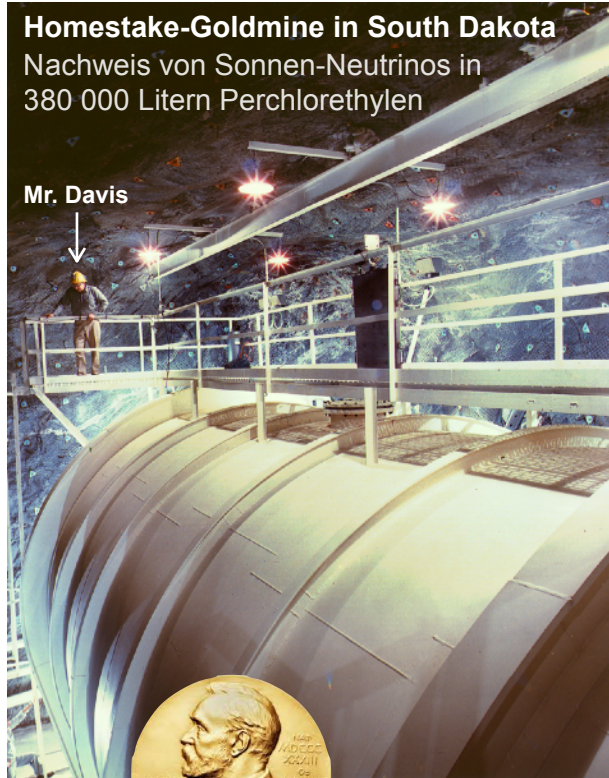


Neutrinos im Standardmodell der Elementarteilchenphysik:

- 3 Neutrinosorten ("Flavors"): ν_e , ν_μ und ν_τ + Antineutrinos
- Keine elektrische Ladung
- Nehmen nur an der schwachen Wechselwirkung teil (z.B. radioaktiver Zerfall)
- Als masselos angenommen

Rätselhafte Neutrinos

Homestake-Goldmine in South Dakota
Nachweis von Sonnen-Neutrinos in
380 000 Litern Perchlorethylen



Nobelpreis 2002

Weniger als 1/3 der erwarteten Neutrinos detektiert!

- Sonnenmodell falsch? Experiment fehlerhaft?
- **Neutrino-Eigenschaften?**

Entdeckung der Neutrino-Oszillation löst nach 30 Jahren das solare Neutrino-Rätsel und bringt den Nachweis, dass Neutrinos eine Masse haben!



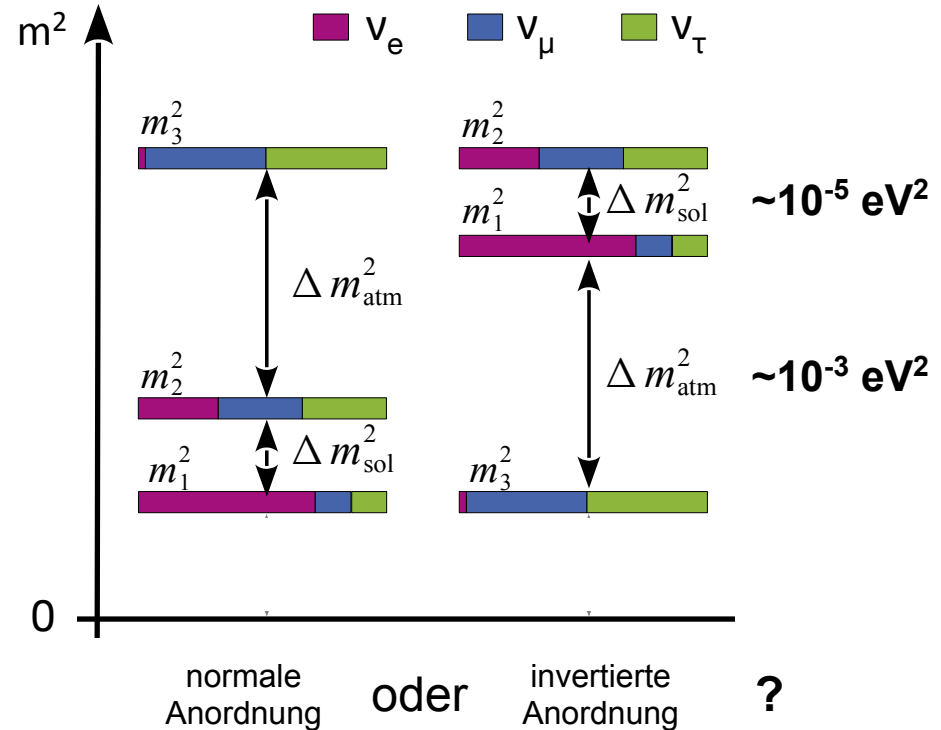
Nobelpreis 2015

K. Valerius | Das KATRIN-Experiment

Gemischte Neutrinos

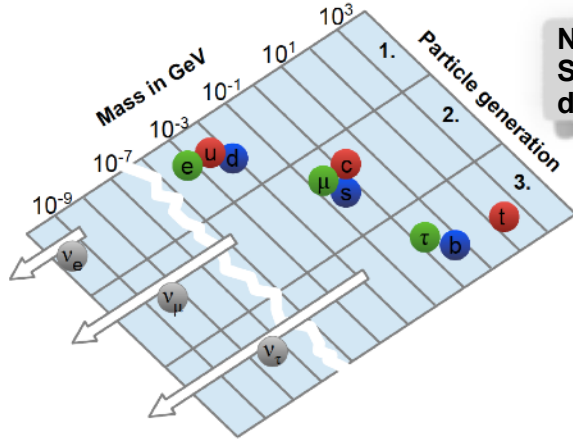
- Neutrino-“Flavors” ν_e , ν_μ , ν_τ werden aus Massenzuständen ν_1 , ν_2 , ν_3 “gemischt” (wie Quarks)
- 2 verschiedene Massenskalen Δm^2
- Absolute Skala = “offset” aus Oszillationen nicht messbar
- Anordnung bestimmt kleinste erlaubte Neutrinomasse

→ Vortrag Michael Kobel

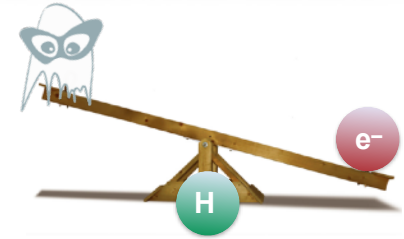


Die Rolle der Neutrinomasse

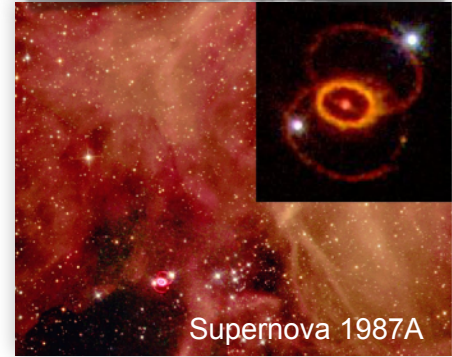
Neutrinos **masselos** im Standardmodell der Elementarteilchen



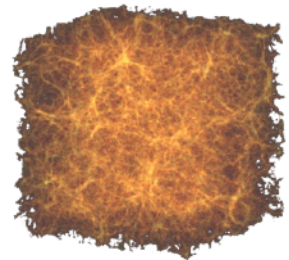
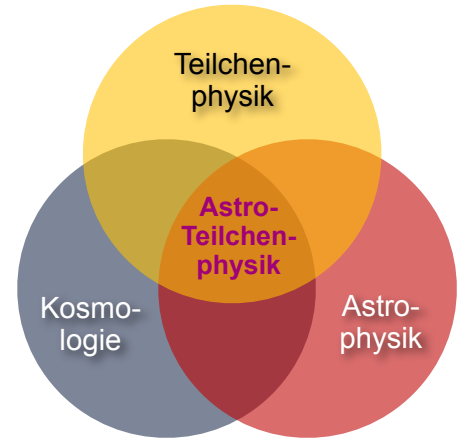
Schlüssel zur Erzeugung von Masse
→ Rolle der Higgs-Teilchen?



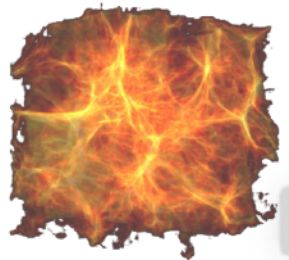
Schlüssel zu astro-physikalischen Ereignissen



Supernova 1987A



Universum **ohne**



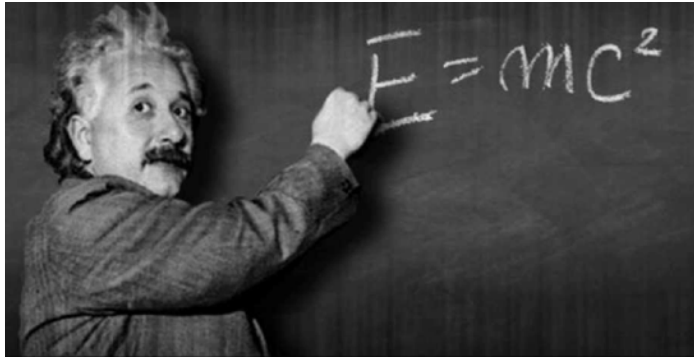
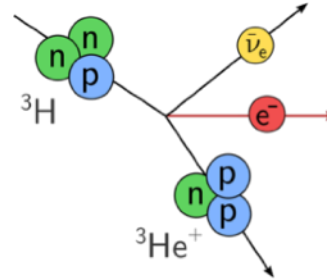
... **mit** Neutrinomasse

Kosmische Architekten

Prinzip der Neutrinomassenmessung

Beta-Zerfall:

Fehlende Energie des **Elektrons**
verrät uns die **Neutrinomasse!**

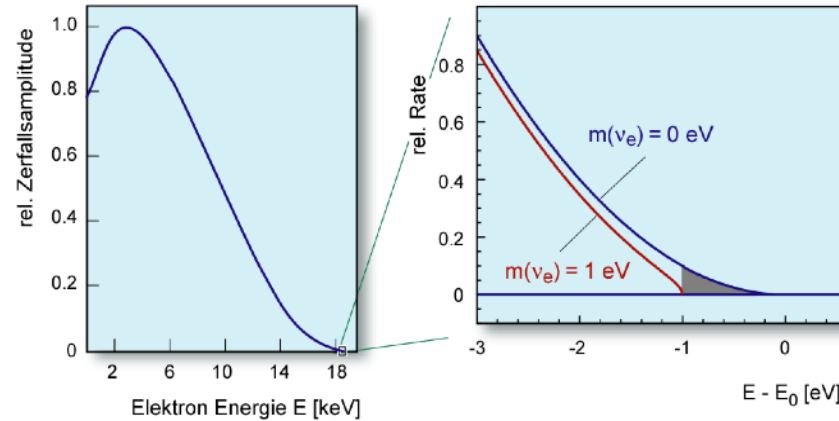
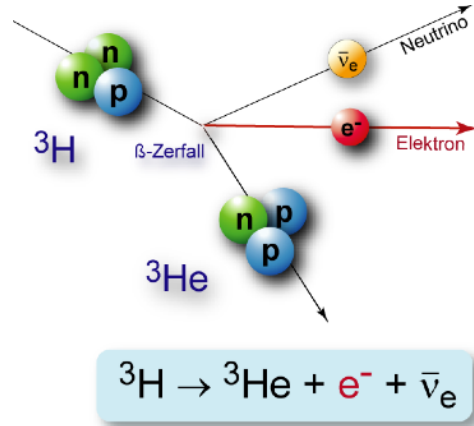


Zerfallsenergie =

- Neutrinomasse
- + Elektronenmasse
- + Bewegungsenergie



Tritium-Betazerfall und die Neutrinomasse



Halbwertszeit: 12,3 Jahre

Zerfallsenergie: gesamt 18 600 eV

Bisher: $m(\nu_e) < 2 \text{ eV}$

Ziel KATRIN-Experiment:
Verbesserung um Faktor 10

- Starke β -Quelle
- Hochauflösendes Spektrometer

KATRIN: ein internationales Großforschungsprojekt

Kollaboration 2001 gegründet
Heute: ~150 Mitglieder
aus 20 Standorten in 6 Nationen



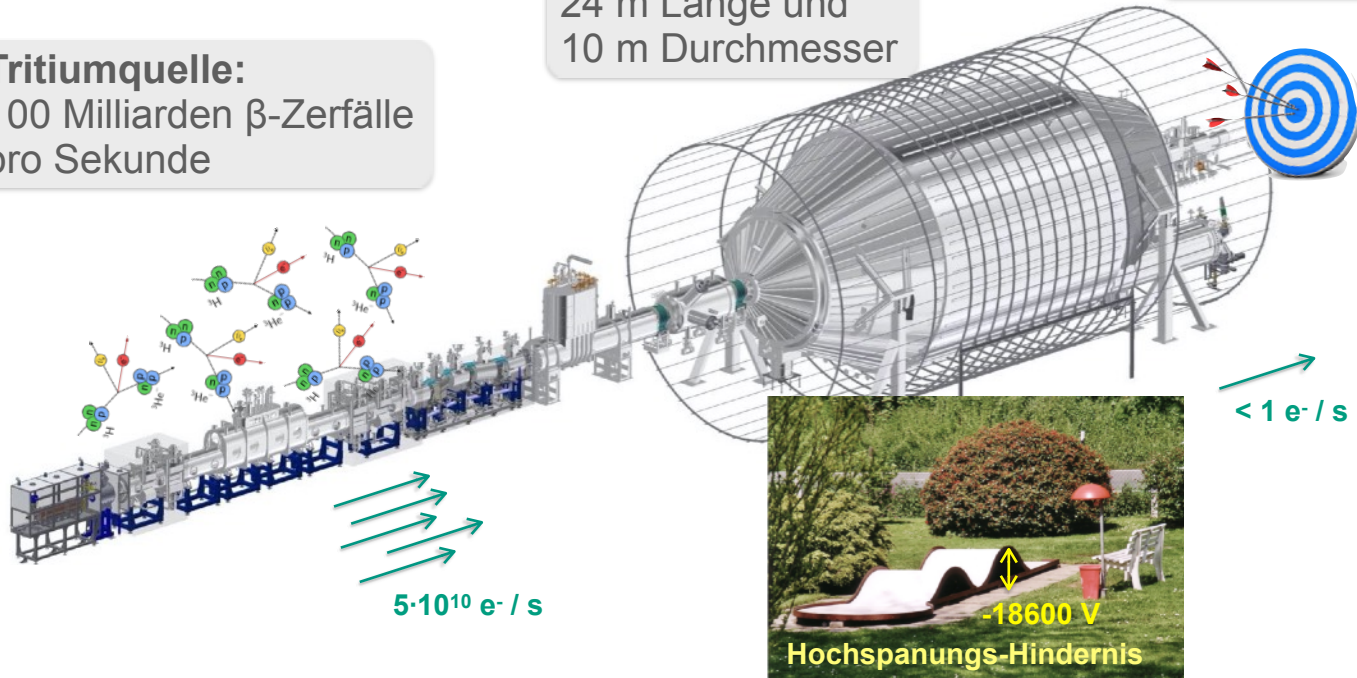
Die genaueste Waage der Welt

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 1 kg

Tritiumquelle:
100 Milliarden β -Zerfälle
pro Sekunde

Spektrometer
24 m Länge und
10 m Durchmesser

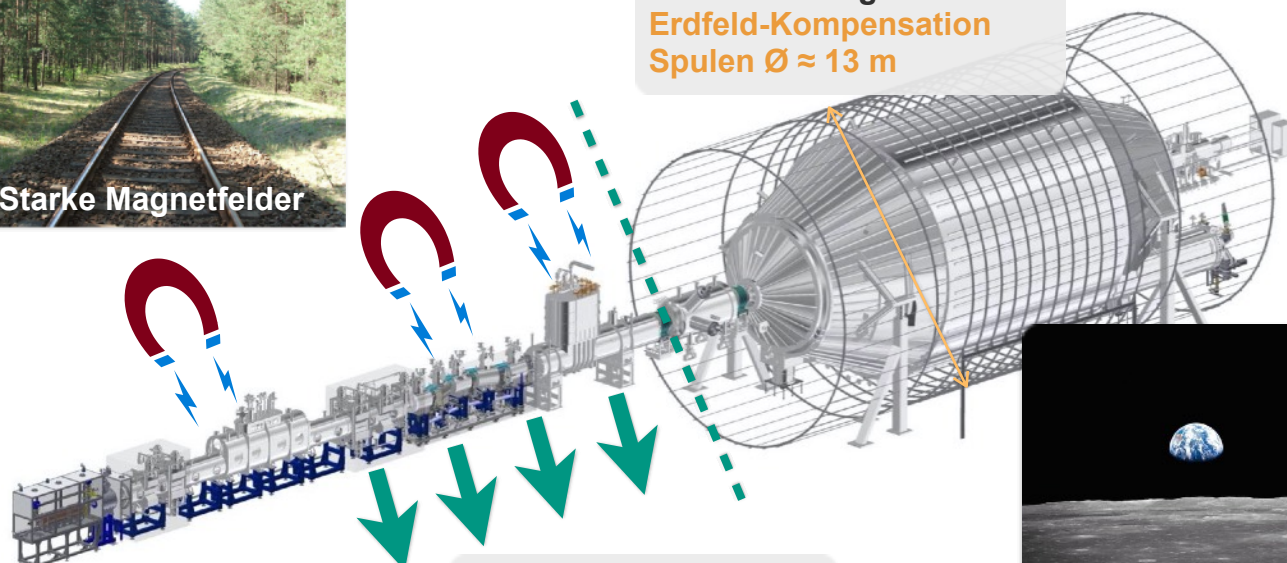
Detektor
zählt Elektronen



Die genaueste Waage der Welt



Schwache Magnetfelder:
Erdfeld-Kompensation
Spulen $\varnothing \approx 13$ m



→ Labortour mit Manuel Klein

Tritium-Pumpen
Fluss-Reduktion um 14
Größenordnungen



Eine unglaubliche Reise



Die letzten 7 km
... mit 30 000 Begleitern



Innenleben des Spektrometers

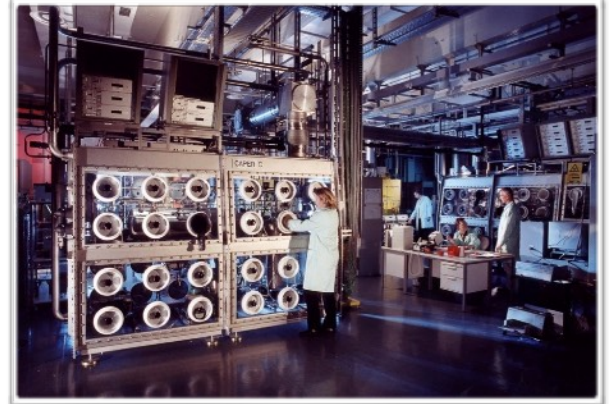
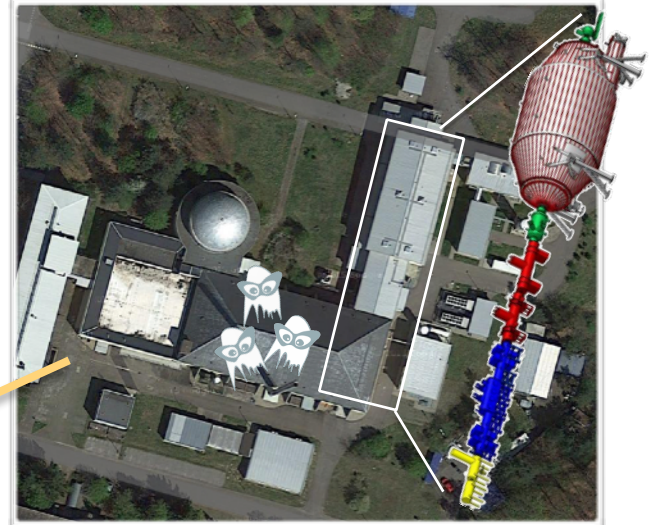


Wie kam KATRIN nach Karlsruhe?



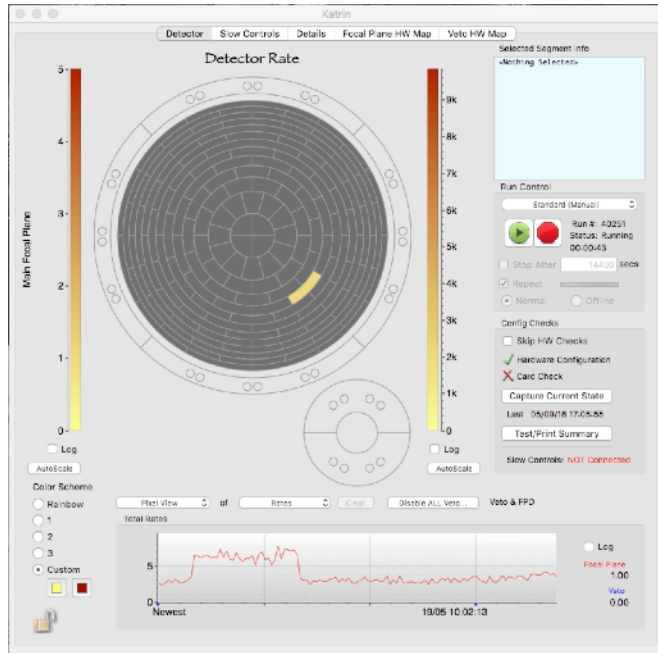
→ *Labortour mit Manuel Klein*

Tritiumlabor Karlsruhe:
europaweit einzigartig!



Erste β -Elektronen auf dem Detektor

Sa, 19. Mai 2018

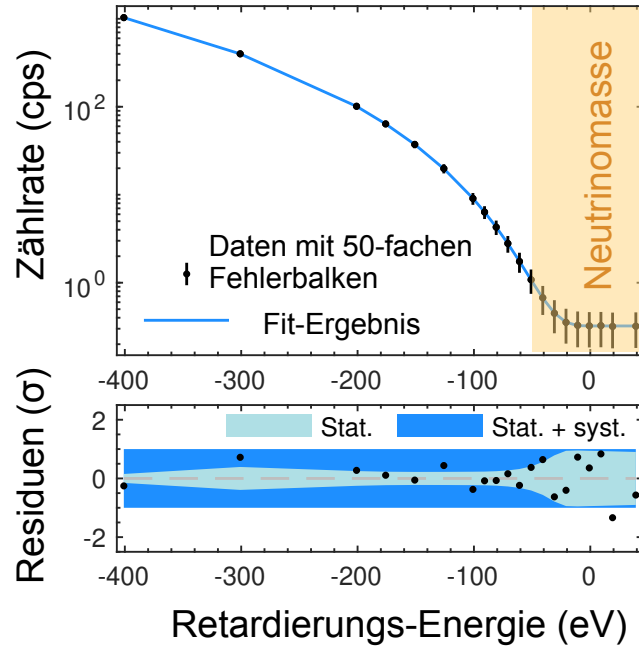


Wissenschaftler und Studierende bei KATRIN



... und erste β -Spektren analysiert:

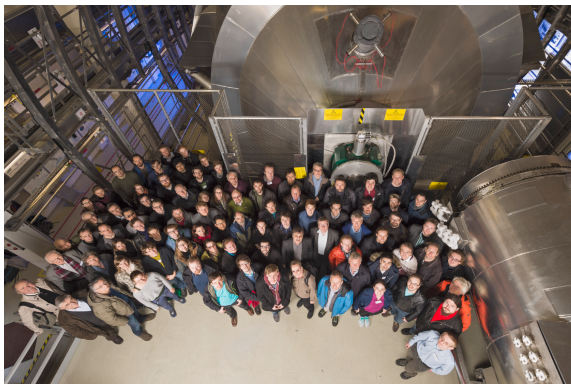
Sehr gute Übereinstimmung in Rate und Form des Spektrums!



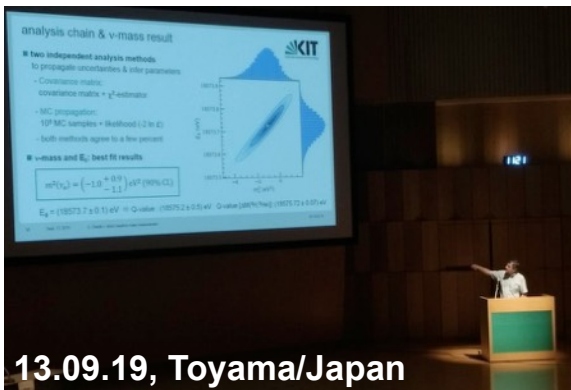
Viel Arbeit für die Analysegruppe ...



Die Jagd nach der Neutrinomasse hat begonnen



- 2015: Beamline komplett (~70 m)
- 2016-2018: Inbetriebnahme
- 2019: Erstes Neutrinomassen-Ergebnis
- Wenige Wochen Daten (von insgesamt 5 Jahren) bringen schon **weltbeste Empfindlichkeit:**
 $m(\nu) < 1.1 \text{ eV} !$
- Nächste Datennahme beginnt am Montag!



Zusammenfassung und Ausblick

Die Torte ist
angeschnitten ...



... aber der Kuchen
noch lange nicht
gegessen!

Ergänzungsmaterial

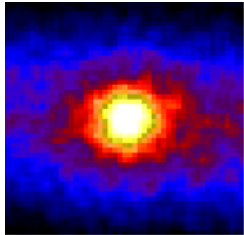


Den kosmischen Leichtgewichten auf der Spur Neutrinomassen-Experiment KATRIN liefert erste Ergebnisse

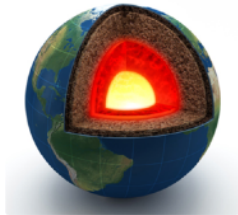
Physik in Unserer Zeit, Mai 2020 → [link](#)

Neutrinos ...

- ... geben uns 90 Jahre nach ihrer „Erfindung“ noch immer Rätsel auf
- ... sind schwer zu fassen — aber sie sind überall!



im Inneren der Sonne ... und der Erde



in Minenschächten



tief im antarktischen Eis

- ... können sich im Flug in andere Neutrino-Arten umwandeln
- ... haben bisher das Geheimnis ihrer Masse nicht preisgegeben!

KATRIN: der Neutrinomasse auf der Spur

Die genaueste Teilchenwaage der Welt hat im Frühjahr 2019 ihren Betrieb aufgenommen:

Ultrahoch-
Vakuum

Kryotechnik

Präzisions-
Hochspannung



Tritium-
Technologie

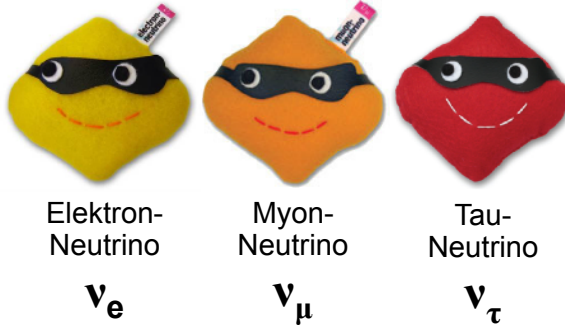
Supraleitende
Magnete

Computer-
simulationen

Schon erste Daten liefern weltbeste Eingrenzung der Neutrinomasse!

Gemischte Neutrinos

3 Neutrino-Sorten

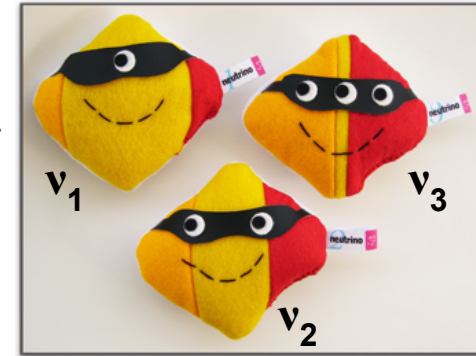


Erzeugung und Detektion von Neutrinos

Neutrinos können “im Fluge” ihre Identität wechseln!

Quantenmechanische Zustands-Mischung

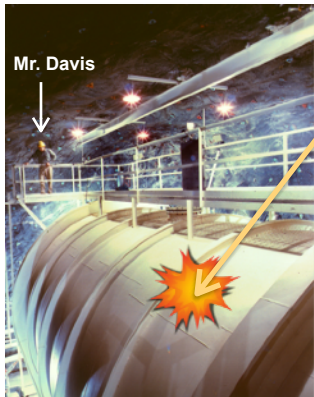
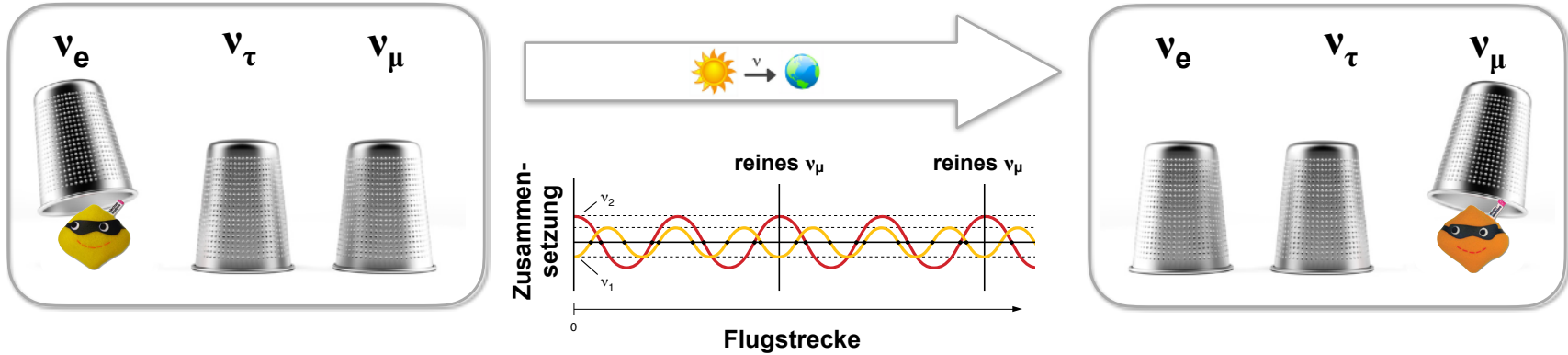
... und 3 Neutrino-Massen:



Propagation von Neutrinos

Massenzustände ν_1, ν_2, ν_3 haben unterschiedliche “Ausbreitungsgeschwindigkeit”

Kosmische Chamäleons



ν_e können im Homestake-Experiment nachgewiesen werden



... ν_μ und ν_τ aber nicht!