

Kosmische Leichtgewichte: Neutrinos auf der Waagschale von KATRIN



Prof. Dr. Kathrin Valerius, KIT, Institut für Astroteilchenphysik

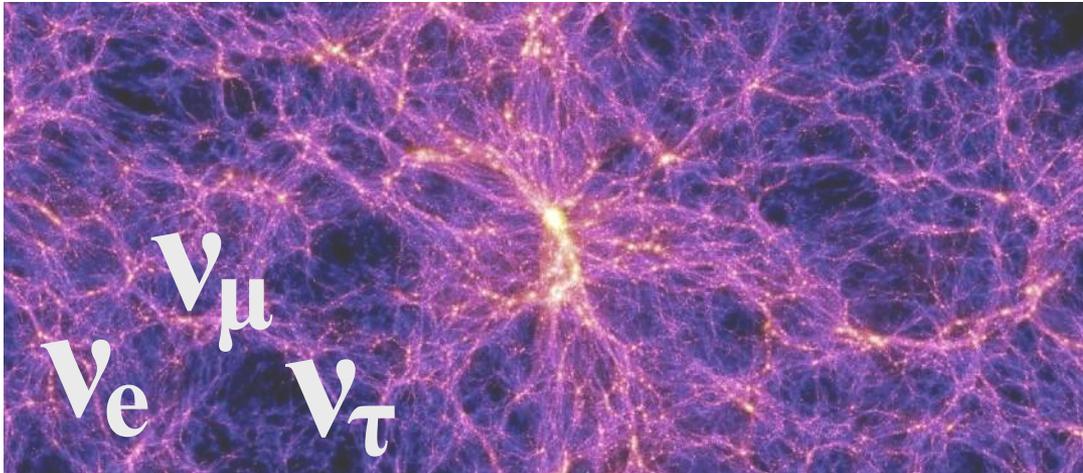


Drei Fragen für diesen Vortrag:

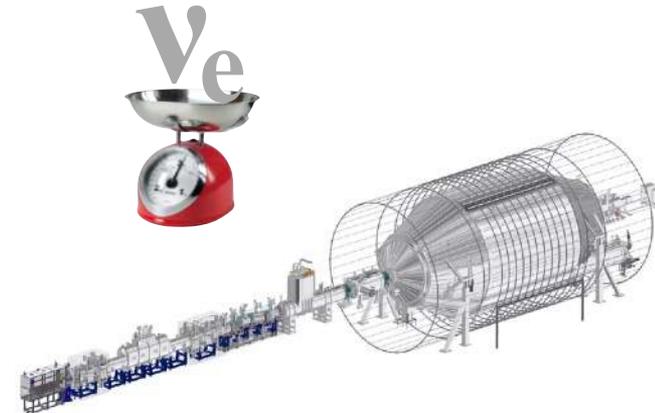
1 Welche Rolle spielen Neutrinos im Kosmos?

2 Welche besondere Bedeutung hat die Neutrinomasse?

3 Wie will KATRIN der Neutrinomasse auf die Spur kommen?



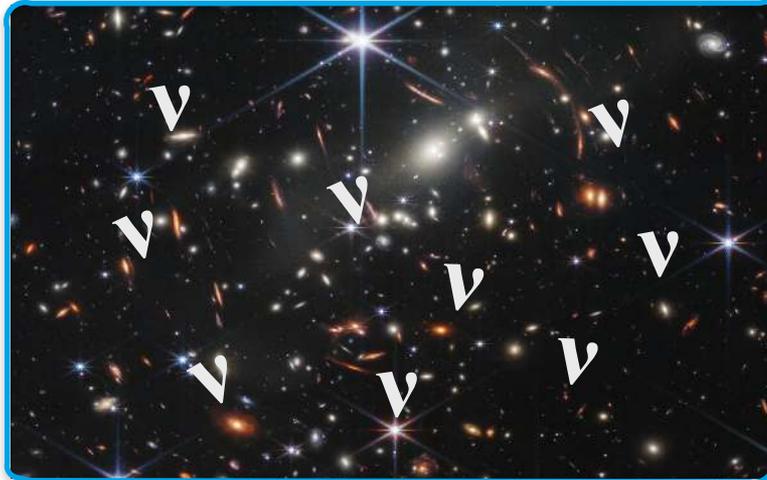
Millennium simulation



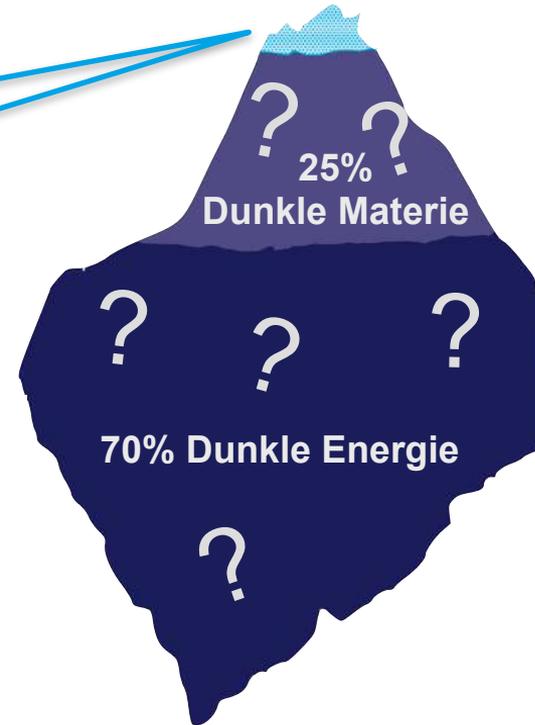
KATRIN collaboration

Das unsichtbare Universum

Juli 2022: Webb's First Deep Field (credit: NASA/ESA/CSA/STScI/NIRCam)

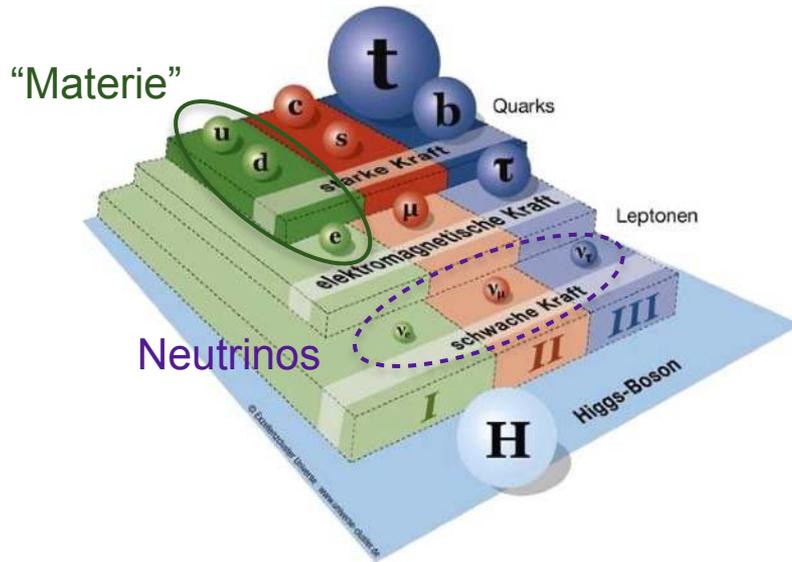


5% sichtbare Materie



In **jedem cm^3** des Universums sind **336 Neutrinos** aus dem Urknall → milliardenfach mehr Neutrinos im Kosmos als Atome

Was wissen wir über Neutrino-Eigenschaften?

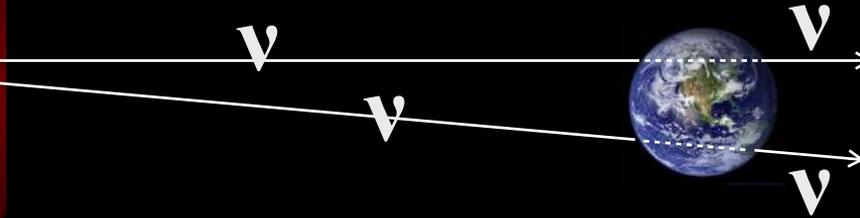
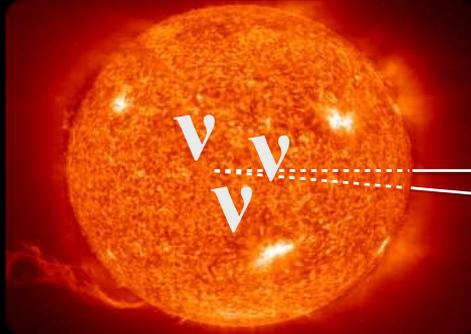


Neutrinos im Standardmodell der Elementarteilchenphysik:

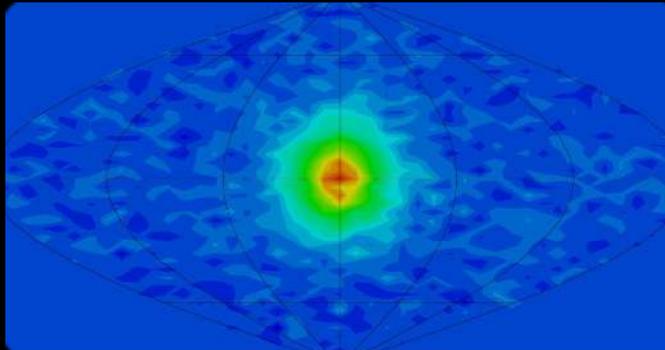
- 3 Neutrinosorten (“Flavors”): ν_e , ν_μ und ν_τ + Antineutrinos
- Keine elektrische Ladung
- Unterliegen nur der schwachen Kraft (z.B. radioaktiver Zerfall)
- Als masselos angenommen

Unfassbare Neutrinos

Neutrinos passieren Materie (fast) ungehindert (freie Weglänge \sim Lichtjahre)!



Von der Sonne
erreichen uns in
jeder Sekunde
65 Milliarden
Neutrinos pro cm^2 !

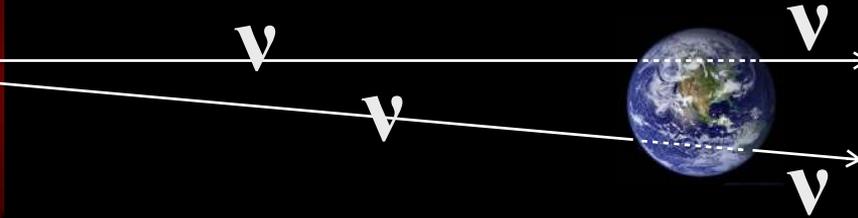
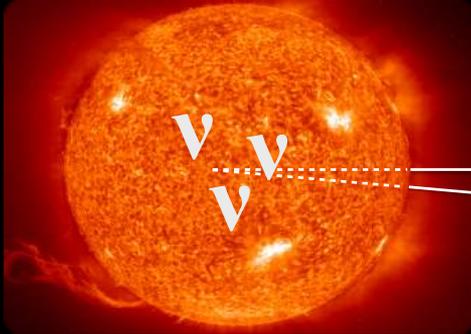


“Neutrinografie” des Sonneninneren
Super-Kamiokande (1500 Tage Daten)

SuperKamiokande collaboration

Unfassbare Neutrinos

Neutrinos passieren Materie (fast) ungehindert (freie Weglänge \sim Lichtjahre)!

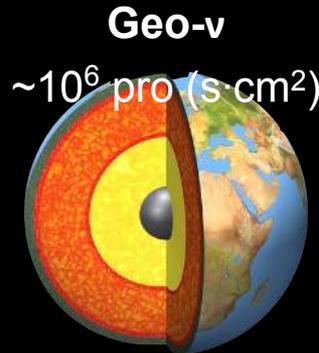


Von der Sonne
erreichen uns in
jeder Sekunde
**65 Milliarden
Neutrinos pro cm^2 !**



Reaktor- ν

bis zu 10^8 pro $(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$
(1 km Abstand)



Geo- ν

$\sim 10^6$ pro $(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$



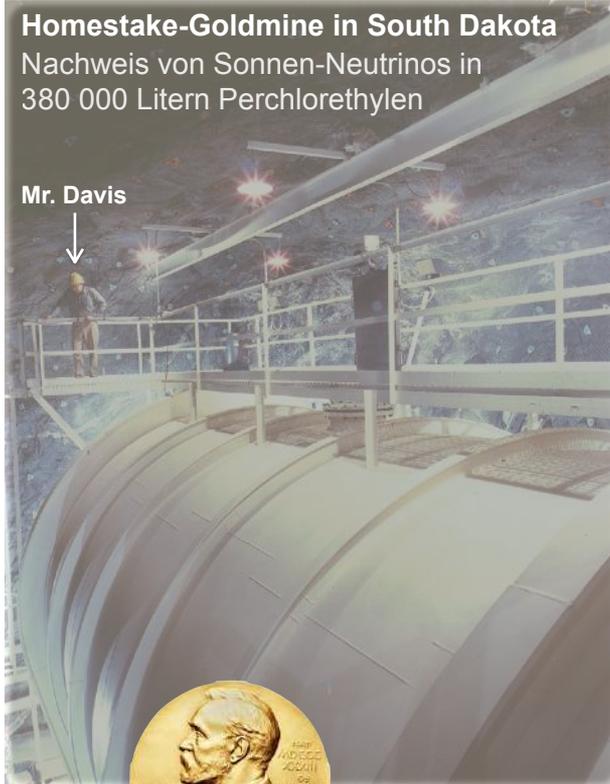
“Bio”- ν

~ 4000 pro
($\text{s} \cdot \text{Person}$)
 ^{40}K -Zerfall im
Körper

Rätselhafte Neutrinos

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

Mr. Davis

Quelle: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/neutrino/date-01.html>



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!

Quellen: SNO collab., SuperK collab.



SNO, Kanada



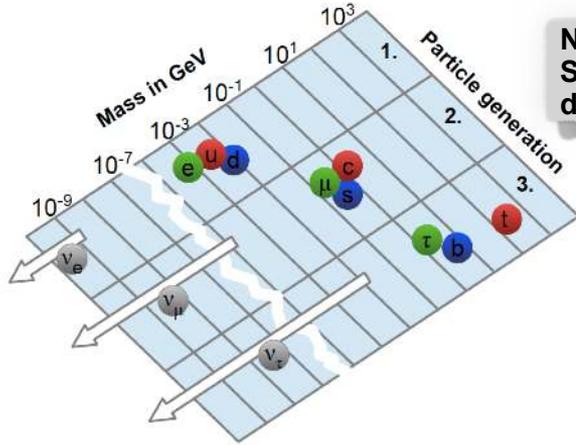
Super-Kamiokande, Japan



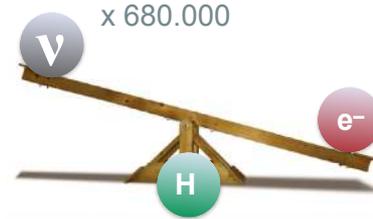
Nobelpreis 2015

Die Rolle der Neutrinomasse

Neutrinos **masselos** im Standardmodell der Elementarteilchen



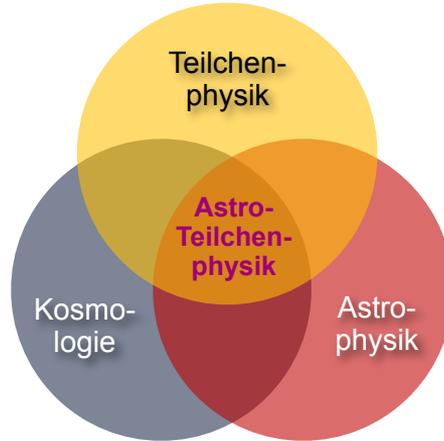
Schlüssel zur Erzeugung von Masse
→ Rolle der Higgs-Teilchen?



Schlüssel zu astro-physikalischen Ereignissen

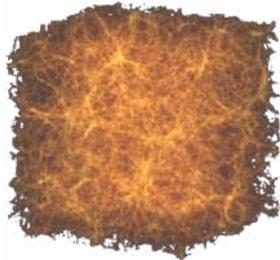


ESA/Hubble, via Wikimedia Commons

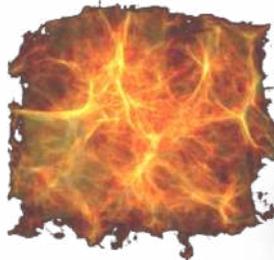


Kosmische Architekten

Simulation: T. Haugboelle, Aarhus



Universum **ohne**

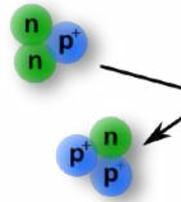


... **mit** Neutrinomasse

Historische Neutrinos

Radioaktiver Betazerfall

Tritium



Helium-3



Elektron
"Beta-Strahl"

~ 20-jährige Kontroverse:

L. Meitner, O. Hahn



C. Ellis



E. Rutherford



N. Bohr



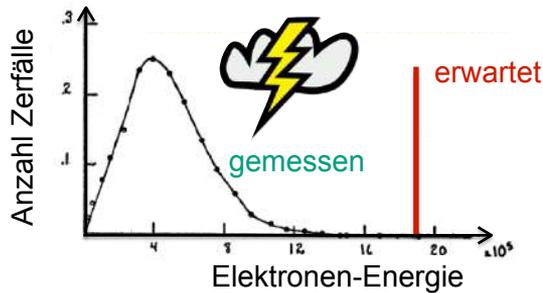
J. Chadwick

1930: des Rätsels Lösung!



Wolfgang Pauli

Problem: Energieerhaltung!



Quellen: wikimedia commons

Lösung als “verzweifelter Ausweg”

Brief aus Zürich an die Gruppe der “Radioaktiven” bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen, vom 4.12.1930



Wolfgang Pauli

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

... es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich **Neutrinos*** nennen will, in den Kernen existieren ...

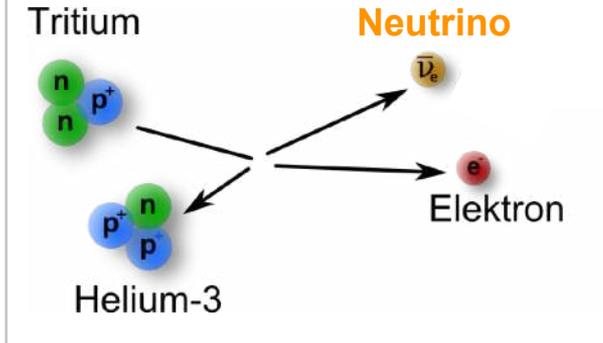
... welche sich von Lichtquanten [...] dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen ...

Das kontinuierliche Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass [...] mit dem Elektron jeweils noch ein **Neutrino** emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutrino und Elektron konstant ist ...

Lösung als “verzweifelter Ausweg”

Brief aus Zürich an die Gruppe der “Radioaktiven” bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen, vom 4.12.1930

1930: die Lösung!



Neutrinos wurden 25 Jahre nach dem Postulat erstmals direkt im Detektor “Project Poltergeist” nachgewiesen!



Nobelpreis 1995

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

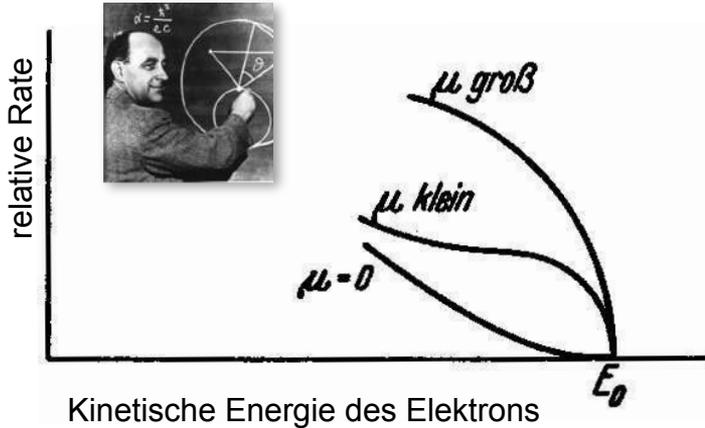
... es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich **Neutrinos*** nennen will, in den Kernen existieren ...

... welche sich von Lichtquanten [...] dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen ...

Das kontinuierliche Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass [...] mit dem Elektron jeweils noch ein **Neutrino** emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutrino und Elektron konstant ist ...

Ein paar Jahre später ...

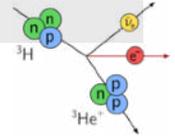
Theorie: kinetische Energie der Beta-Elektronen zeigt Neutrinomasse an



Fermi, Z. Phys., 1934

“Ein Versuch der Theorie der Betastrahlen”

Experiment: Tritium als geeignetster Betastrahler identifiziert



NATURE

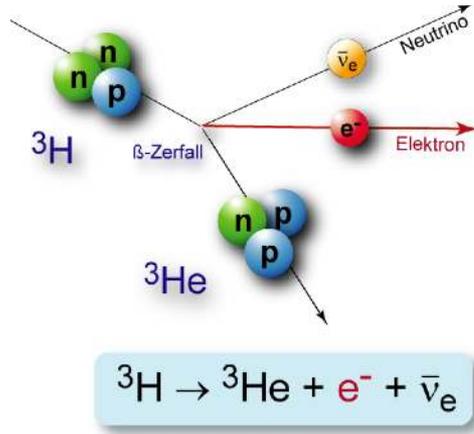
August 21, 1948 Vol. 162

Beta Spectrum of Tritium

THE β -spectrum of tritium (${}^3\text{H}$) is of particular interest because: (1) the relatively simple structure of the ${}^3\text{H}$ nucleus makes it well suited to a test of the Fermi theory of β -decay; (2) the unusually low energy of the β -particles means that the shape of the spectrum near the upper limit is an extremely sensitive function of the rest mass of the neutrino if the Fermi theory is confirmed; (3) a theoretical discrepancy¹ exists between the half-life² and the upper energy limit, as recently measured³; (4) the mass difference (${}^3\text{H} - {}^3\text{He}$) can be accurately determined.

Curran et al., Nature, 1948

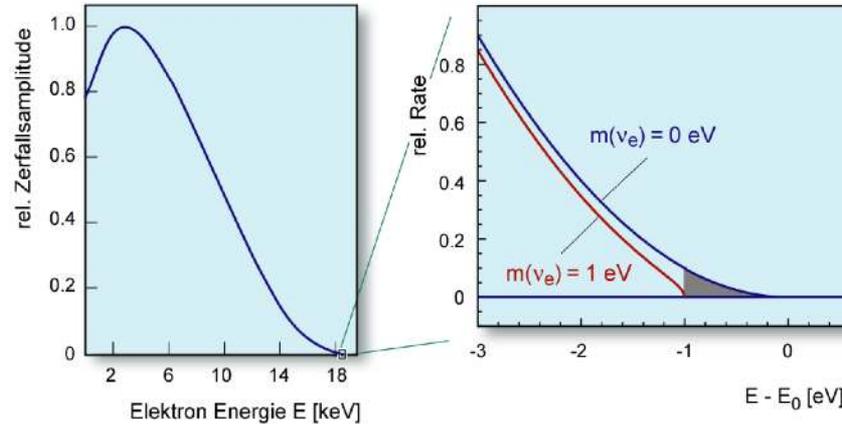
Tritium-Betazerfall und die Neutrinomasse



Halbwertszeit: 12,3 Jahre

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

Ziel des KATRIN-Experiments:
Verbesserung um Faktor 10

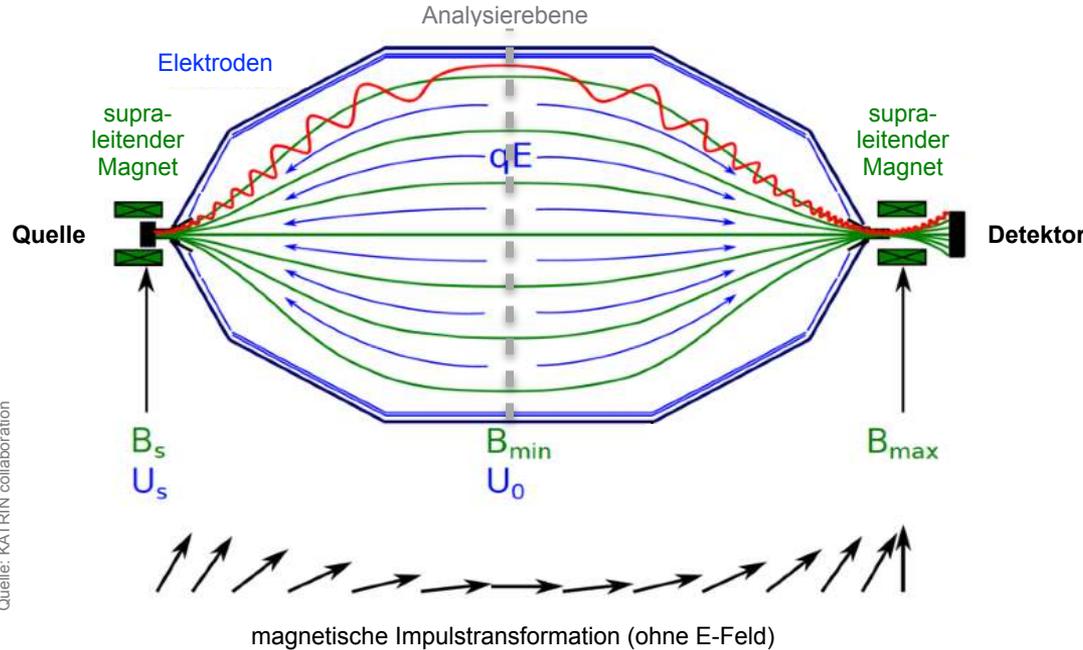


Quelle: KATRIN collaboration

Zerfallsenergie: gesamt 18 600 eV

- Starke β -Quelle
- Hochauflösendes Spektrometer

Lösung: Elektrostatisches Spektrometer mit magnetischer Kollimation

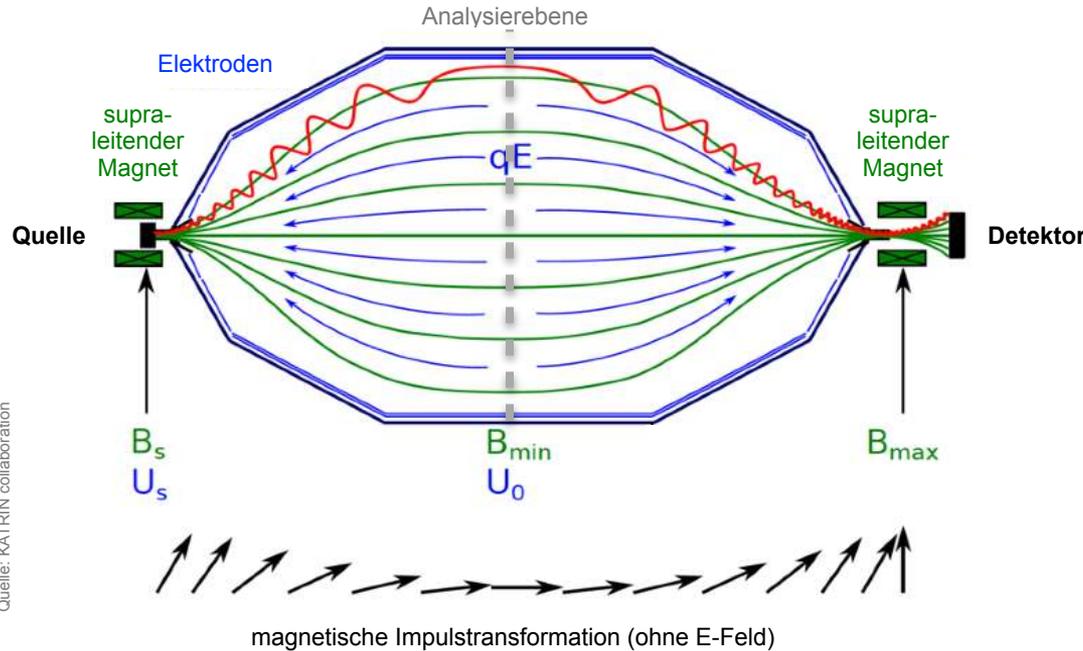


Quelle: KATRIN collaboration

Vier grundlegende "Zutaten":

1. Lorentzkraft
(geladene Teilchen folgen Spiralbahnen im B-Feld)
2. Aufteilung der kinetischen Energie: $E_{kin} = E_{||} + E_{\perp}$
3. Erhaltung des magnetischen Bahnmoments:
 $\mu = E_{\perp} / B = \text{const.}$
4. Erhaltung des magnetischen Flusses
 $\phi = \int B \, dA = \text{const.}$

Lösung: Elektrostatisches Spektrometer mit magnetischer Kollimation



Quelle: KATRIN collaboration

Vorteil: Sehr gute Energieauflösung 🏆

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{min}}{B_{max}} \approx \frac{1}{20000}$$

Nachteil: Größe eines Mehrfamilienhauses 🤔



KATRIN: ein internationales Großforschungsprojekt

Kollaboration 2001 gegründet
Heute: ~150 Mitglieder
aus 20+ Standorten in 8 Nationen





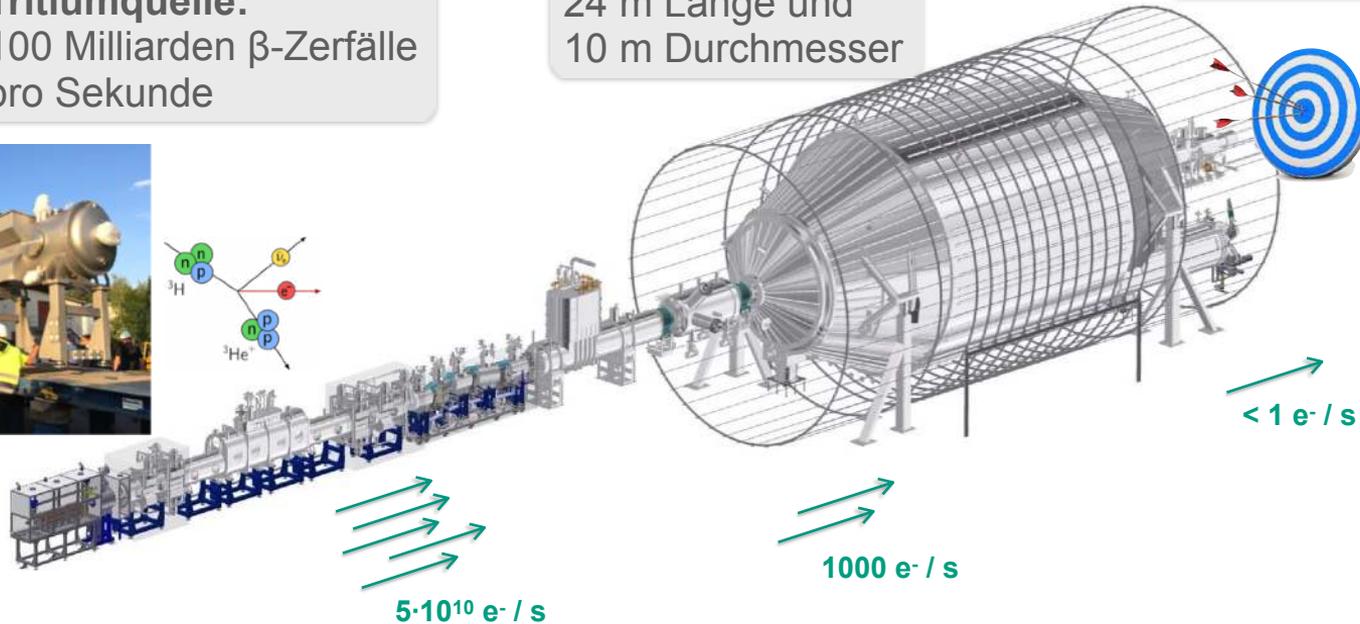
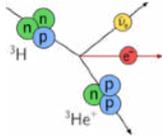
Die genaueste Waage der Welt

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



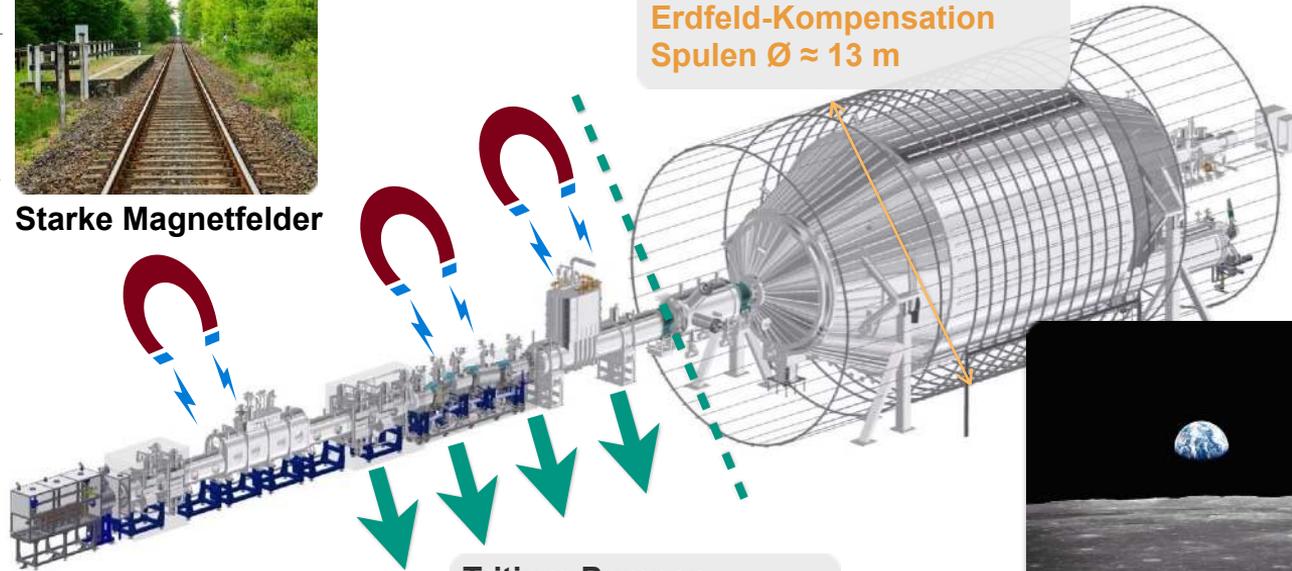
Die genaueste Waage der Welt

Quelle: H. Schröder / pixelio.de



Starke Magnetfelder

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



Tritium-Pumpen
Fluss-Reduktion um 14
Größenordnungen



Ultrahochvakuum

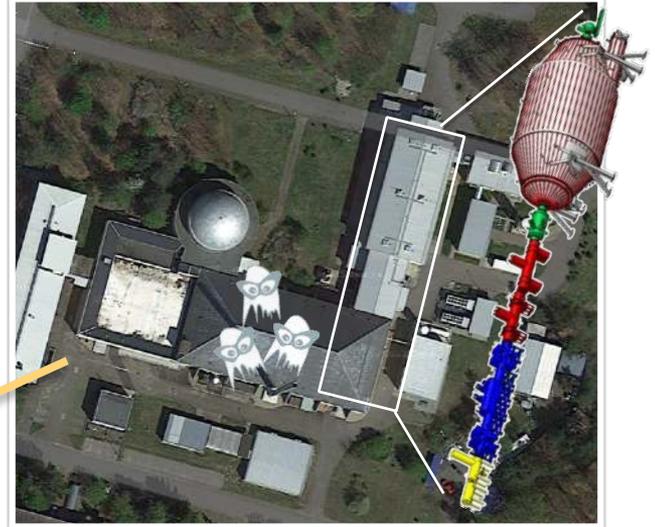
Quelle: NASA / Apollo 8 / Bill Anders

Wie kam KATRIN nach Karlsruhe?



Tritiumlabor Karlsruhe:
europaweit einzigartig!

Quellen: KIT, maps.google.de



Eine unglaubliche Reise

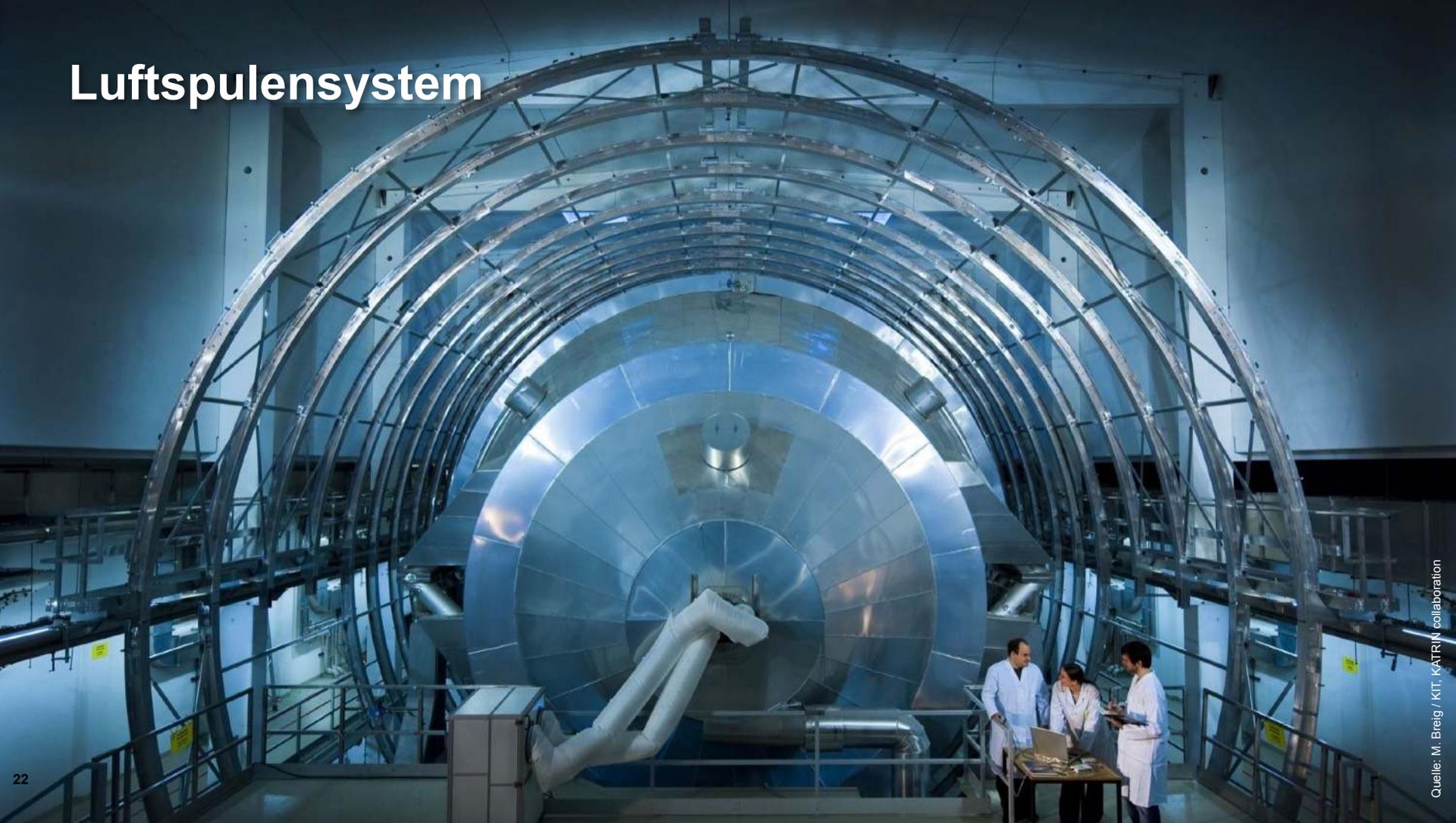


<https://www.katrin.kit.edu/213.php>

Die letzten 7 km
... mit 30 000 Begleitern



Luftpulensystem



Innenleben des Spektrometers



Wissenschaftliche Ergebnisse

2018: Der Startschuss



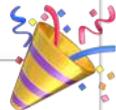
$\bar{\nu}$ MASS (electron based)

Those limits given below are for the square root of $m_{\nu_e}^{2(\text{eff})} \equiv \sum_i |U_{ei}|^2 m_{\nu_i}^2$. Limits that come from the kinematics of ${}^3\text{H}\beta\text{-}\bar{\nu}$ decay are the square roots of the limits for $m_{\nu_e}^{2(\text{eff})}$. Obtained from the measurements reported in the Listings for " $\bar{\nu}$ Mass Squared," below.

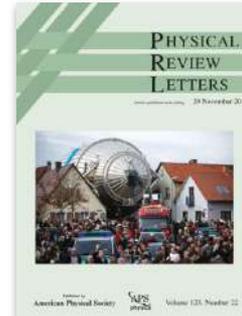
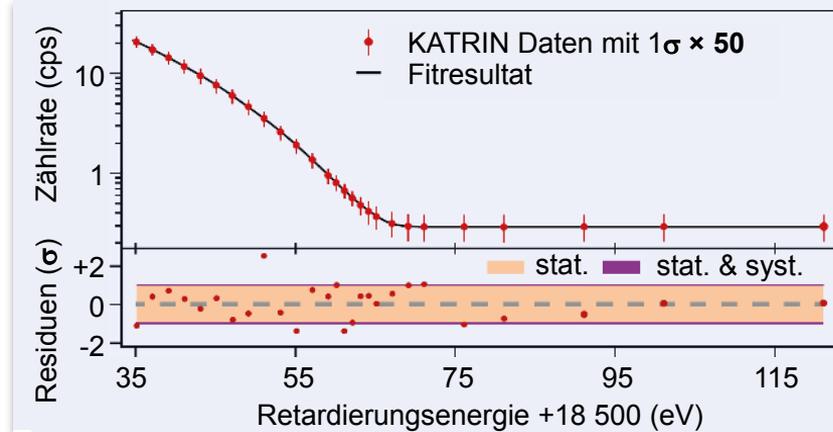
VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
< 1.1	90	¹ AKER	19	SPEC ${}^3\text{H} \beta$ decay
< 2.05	95	² ASEEV	11	SPEC ${}^3\text{H} \beta$ decay
< 5.8	95	³ PAGLIAROLI	10	ASTR SN1987A
< 2.3	95	⁴ KRAUS	05	SPEC ${}^3\text{H} \beta$ decay
< 21.7	90	⁵ ARNABOLDI	03A	BOLO ${}^{187}\text{Re} \beta$ decay
< 5.7	95	⁶ LOREDO	02	ASTR SN1987A
< 2.5	95	⁷ LOBASHEV	99	SPEC ${}^3\text{H} \beta$ decay

••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••

HTTP://PDG.LBL.GOV Page 4 Created: 6/1/2020 08:33



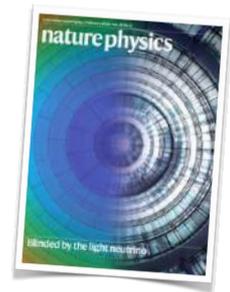
2019: Erster Neutrinomassen-Weltrekord!



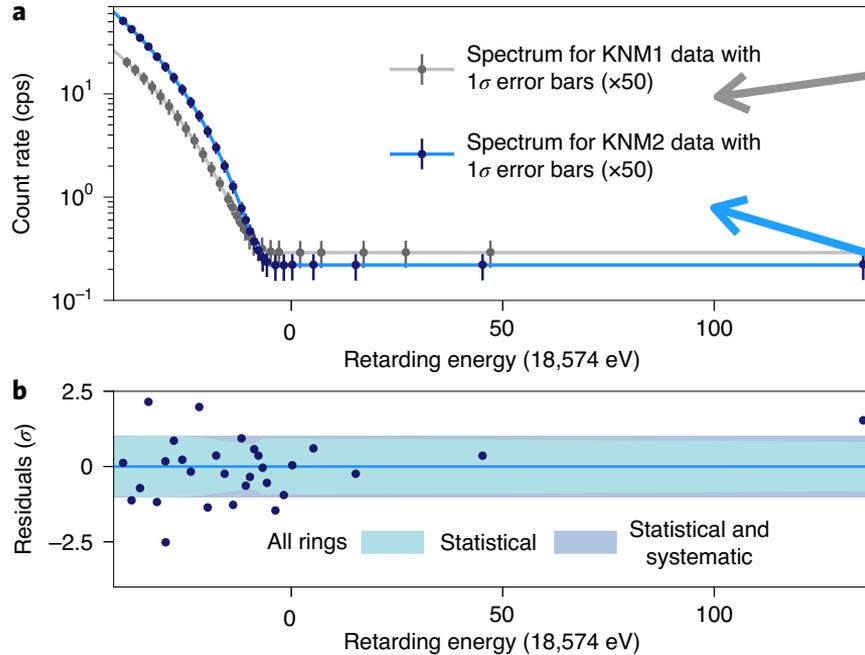
$m_\nu < 1,1 \text{ eV}/c^2$ (90% CL)

Mit nur wenigen Wochen an Daten: **Faktor 2**
Verbesserung zu Vorgänger-Experimenten!

Update: Neue Ergebnisse 2022



Auswertung der beiden ersten Datensätze



Run 1:

- 2 Millionen Ereignisse
- Obergrenze: $m_\nu < 1.1$ eV (90% CL)

Run 2:

- 4.3 Millionen Ereignisse
- Obergrenze: $m_\nu < 0.9$ eV (90% CL)

Kombination Run 1 & 2:

$$(m_\nu)^2 = (0.1 \pm 0.3) \text{ eV}^2 \rightarrow m_\nu < 0.8 \text{ eV (90% CL)}$$

KATRIN in den Medien



Leicht Leichter Neutrinos
Die Suche nach der Neutrinomasse mit der genauesten Waage der Welt

14. Februar 2022
17:00 - 18:30 Uhr

Online



© KIT - Das Forschungsgemeinschaftliche Institut für Hochphysik (Gemeinschaft) www.kit.edu

500 Teilnehmer*innen online,
Aufzeichnung ca. 8.000 Aufrufe

<https://youtu.be/yIE5LN7ooI0>



Erfolg in der Teilchenphysik: KIT-Forscher wiegen das leichteste bekannte Teilchen des Universums

Leicht, aber oho: Vor nicht einmal 100 Jahren erahnten Physiker die Existenz sogenannter Neutrinos. Doch diese Elementarteilchen sind kaum zu erwischen, geschweige denn zu vermessen. Nun sind Forscher des KIT in Karlsruhe zumindest beim Gewicht einen Schritt weiter.



“Breaking Lab”: ca. 80.000 Aufrufe

<https://youtu.be/O7e4ZsQDFVA>



EXPERIMENT KATRIN

Neutrinomasse auf unter ein Elektronvolt bestimmt

Seitdem man weiß, dass das Neutrino nicht nichts wiegt, suchen Fachleute nach seiner exakten Masse. Mit einem Wert von 0,8 Elektronvolt kommen sie ihr nun so nah wie nie zuvor.

von Jan Döniges



Spektrum.de

Wie geht es bei KATRIN weiter?

Volle Empfindlichkeit auf Neutrinomasse: weiter Daten sammeln bis 2025!

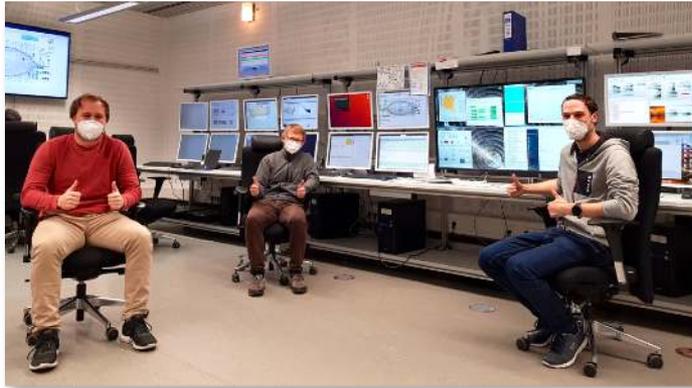


Foto: KATRIN collaboration

- Trotz Pandemie konnte KATRIN weiter messen.
- Die Auswertung der bereits vorliegenden Messdaten läuft!
- Spannende Physikfragen “jenseits des Standardmodells” an die Präzisionsdaten von KATRIN: z.B. Lorentz-Invarianz, Eigenschaften der Kräfte, unbekannte neue Teilchen, ...

Geplantes KATRIN-Upgrade: TRISTAN-Detektor zur Suche nach “super-schweren” Neutrinoarten (Kandidaten für Dunkle Materie) ab 2026



Foto: A. Griesch / MPP

Zum Schluss: ein Fazit

Neutrinos spielen eine Schlüsselrolle an der Schnittstelle zwischen Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie.

Auch knapp 100 Jahre nach ihrer “Erfindung” geben Neutrinos uns zahlreiche Rätsel auf.

Mit dem KATRIN-Experiment am KIT wollen wir die Masse der Neutrinos messen und weitere spannende Physikfragen beantworten!

Millennium simulation

It's not Rocket Science, sondern:

Tritium-Technologie

Teilchen- und Kernphysik

Supraleiter-
technologie

Kryotechnologie

Atom- und Molekülphysik

Detektortechnologie

Präzisions-
Hochspannung

Neutrino-
physik

Quantenphysik

fortgeschrittene numerische
Methoden in Simulation und
Datenanalyse

Oberflächenphysik

Kalibrationsmethoden

Sensortechnologie

Data handling

Ultrahochvaku-
technologie

Laser als Präzisionsinstrumente

Verbindungen zu
Astrophysik und Kosmologie

KATRIN zum Nachlesen - und zum Erfahren:



Artikel: “Den kosmischen Leichtgewichten auf der Spur”

Physik in Unserer Zeit, Mai 2020
→ [Link zum Text \(open access\)](#)

Virtueller 360°-Rundgang am Experiment

*Das Innenleben von KATRIN erkunden,
Wissenschaftler*innen treffen und selbst an der Anlage
virtuell experimentieren (VR-Brille oder Browser App)*

NaWik

Wissenschaft.
Verständlich.

[Hier starten:](#)
vr.nawik.de

