

# Neutrinos auf der Waage von KATRIN

G. Drexlin, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe

## Einleitung

Neutrinos spielen bei der Untersuchung der Struktur der Materie und der Erforschung des Aufbaus des Universums eine spezielle Rolle: Ihre Masse ist viel kleiner als die aller anderen Elementarteilchen, ihre Wechselwirkung mit normaler Materie ist extrem klein, und während der ersten Sekunde nach dem Urknall wurden so viele von ihnen produziert, dass sie neben den Photonen die häufigsten Teilchen im Universum sind. Experimente mit Neutrinos sind extrem schwierig, öffnen aber ein einzigartiges Fenster zur Beantwortung von fundamentalen Fragen wie nach dem Ursprung der Masse von Elementarteilchen oder der Ursache der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum und damit unserer eigenen Existenz.

Im letzten Jahrzehnt konnten bei der Erforschung von Neutrinos wichtige experimentelle Durchbrüche erzielt werden: Durch die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen konnte zweifelsfrei geklärt werden, dass Neutrinos massebehaftete Teilchen sind. Dieser erste Hinweis auf neue Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik ist auch ein erster Schritt zur Klärung des Ursprungs der kosmologischen Dunklen Ma-

terie, die die Dynamik des Universums dominiert. Da bisher nur die Differenzen von Neutrinomassen bestimmt werden können, ist die wichtigste ungeklärte Eigenschaft von Neutrinos die absolute Größe ihrer Ruhemasse. Die Bestimmung dieses Schlüsselparameters ist die zentrale Motivation des Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN) Experimentes, das derzeit im Rahmen einer internationalen Kollaboration von mehr als 100 Wissenschaftlern und Ingenieuren unter Federführung des Forschungszentrums am Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) aufgebaut wird.

## Paulis „Geisterteilchen“ lebt wieder auf

KATRIN nutzt den Effekt, aufgrund dessen der Physiker Wolfgang Pauli das Neutrino 1930 voraussagte: Beim Betazerfall wird ein Neutron in ein Proton sowie ein Elektron und Neutrino umgewandelt, wobei sich das Elektron und das Neutrino die beim  $\beta$ -Zerfall frei werdende Energie teilen. Der ideale  $\beta$ -Emitter ist molekulares Tritium mit seiner sehr kleinen Übergangsenergie von 18,6 keV und seiner kurzen Lebensdauer von 12,3 Jahren und entsprechend hohen Zerfallsaktivität. Da das

Neutrino aus dem  $\beta$ -Zerfall nicht nachgewiesen werden kann, bestimmt KATRIN die Neutrinomasse durch eine extrem präzise Messung der Form der Energieverteilung der  $\beta$ -Zerfallselektronen in der Nähe des kinematischen Endpunkts. Dort manifestiert sich die Masse des Neutrinos entsprechend Einsteins berühmter Masse-Energie-Beziehung  $E = mc^2$  als winzige Änderung der Form des Spektrums. Da es sich hierbei um einen extrem kleinen Effekt in der Größenordnung von  $10^{-11}$  der Gesamtrate handelt, erfordern die KATRIN-Messungen eine hochintensive Tritiumquelle. Der europaweit einzige Ort, an dem eine derart intensive Quelle betrieben werden kann, ist das TLK, das über langjährige Erfahrung in der Tritiumprozesstechnik verfügt. Daher kann das Experiment nur am Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt werden. Weitere zentrale Beiträge für KATRIN werden geleistet durch das IK (Astroteilchenphysik, UHV-Technik), das ITP (Supraleitende Magnete und Kryotechnik) sowie das IPE (Elektronik und Datenaufnahme).

## KATRIN

Abb. 1 zeigt einen Überblick über das insgesamt 75 m lange Expe-

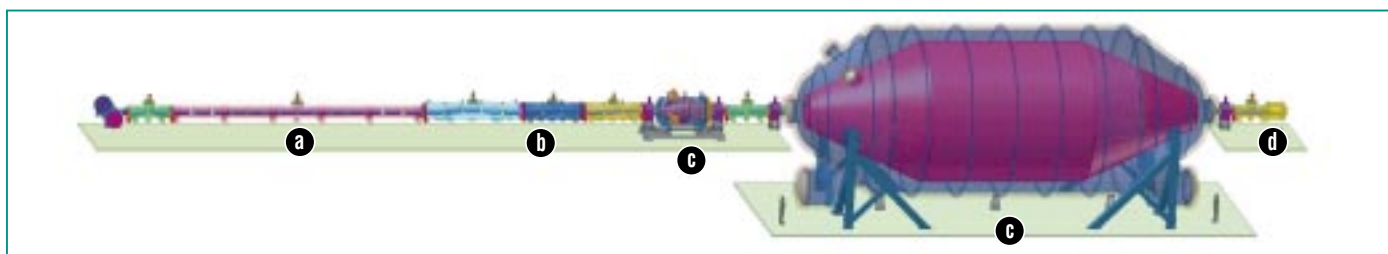


Abb. 1: Das gesamte KATRIN-Experiment erstreckt sich über eine Länge von 75 Metern und besteht aus der hochintensiven Tritiumquelle (a), der Tritiumpumpstrecke (b), den beiden elektrostatischen Spektrometern – Vor- und Hauptspektrometer (c) – sowie dem Elektronendetektor (d).

periment. Die Hauptkomponenten gliedern sich in: a) die fensterlose hochintensive molekulare Tritiumquelle mit  $10^{11}$   $\beta$ -Zerfällen pro Sekunde, b) die Tritiumpumpstrecke aus aktiven und passiven Elementen, in der die  $T_2$ -Moleküle aus der Strahlführung eliminiert werden, c) das System aus zwei elektrostatischen Spektrometern zur Energieanalyse der Elektronen sowie d) den Halbleiterdetektor zum Zählen der transmittierten Elektronen. Auf ihrer gesamten Flugstrecke werden die  $\beta$ -Zerfallselektronen dabei durch ein System aus supraleitenden Solenoiden mit Feldstärken im Bereich von 3–6 T adiabatisch geführt.

### Tritiumquelle

Die fensterlose, gasförmige Tritiumquelle von KATRIN besteht aus einem 10 m langen Edelstahlrohr, in das mittig molekulares Tritium mit einer Rate von 2 Ci/s eingespeist wird. Wesentliche technologische Herausforderungen ergeben sich aus der erforderlichen Temperaturstabilität der Quelle von kleiner als  $\pm 30$  mK bei der Betriebstemperatur  $T = 27$  K, sowie aus der hohen Isotopenreinheit von  $\sim 95\%$   $T_2$ . Der 16 m lange Quellsystem ist derzeit in der Fertigung bei einem industriellen Partner und wird Anfang 2008 am TLK in Betrieb genommen. Die aus der Quelle diffundierenden  $T_2$ -Moleküle werden in einer differenziellen Pumpstrecke durch Turbomolekularpumpen (TMP) abgepumpt und in den geschlossenen KATRIN-Kreislauf zurückgeführt. Dieses Konzept wurde im Rahmen des Testexperimentes TILO erfolgreich erprobt. Eine anschließende kryogene Kaltfallenstrecke

( $T = 5$  K) mit einer inneren Schicht aus Argonfrost garantiert, dass alle im Strahlrohr verbliebenen  $T_2$ -Moleküle über Kryosorptionsprozesse gebunden werden und der nachfolgende Spektrometerbereich tritiumfrei bleibt. Auch hier konnte mit einem Testexperiment (TRAP) das Pumpkonzept erfolgreich verifiziert werden.

### Spektrometer

Die Energieanalyse der  $\beta$ -Zerfallselektronen erfolgt bei KATRIN in zwei Schritten: Zunächst werden in einem kleineren Vorspektrometer alle niederenergetischen Elektronen mit  $E < 18,4$  keV ausgesiebt, da sie keine Information über die Neutrinomasse tragen. Das 3,5 m lange Vorspektrometer (s. Abb. 2) ist seit 2004 in Betrieb und hat die neuartigen vakuumtechnischen und elektromagnetischen Designansätze von KATRIN erfolgreich verifiziert. Durch eine Kombination von TMPs mit

Getterpumpen wurde routinemäßig ein Ultrahochvakuum (UHV)  $< 10^{-11}$  mbar erreicht, womit das UHV Konzept von KATRIN in kleinerem Maßstab demonstriert werden konnte. Im nachfolgenden hochauflösenden Hauptspektrometer ( $\varnothing = 10$  m, Länge = 24 m) wird die Energie der Elektronen nahe am Endpunkt präzise bestimmt. Die Aufrechterhaltung eines UHV von  $< 10^{-11}$  mbar in einem Volumen von  $1250$  m<sup>3</sup> sowie die geforderte Stabilität der Gegenspannung von besser als 1 ppm bei 18,6 keV sind besondere technologische Herausforderungen. Der riesige Spektrometertank wurde bei einem industriellen Partner gefertigt und wird noch 2006 in einer neuen Experimentierhalle am TLK in Betrieb genommen. Die durch das Spektrometersystem transmittierten Elektronen werden schließlich in einem segmentierten, untergrundarmen Silizium-Zähler nachgewiesen.



**Abb. 2:** Das Vorspektrometer sortiert die Elektronen geringer Energie aus, die keine relevanten Informationen tragen.

---

---

## Ausblick

Der Aufbau von KATRIN wird im Jahre 2009 abgeschlossen sein. Nach Inbetriebnahme der Gesamtanlage wird das Experiment mehrere Jahre das Spektrum von Tritium am Endpunkt untersuchen. Mit einer Neutrinomassen-Sensitivität von 0,2 eV hat KATRIN gute

Aussichten die absolute Massenskala von Neutrinos zu bestimmen und damit den Anteil der heißen dunklen Materie im Universum zu fixieren. KATRIN als ein Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik verdeutlicht dabei exemplarisch die Helmholtz-Mission: die Durchführung von technologisch herausfordernden und

international sichtbaren Großexperimenten zur Lösung von fundamentalen Fragestellungen.