

KATRIN – ein Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik

G. Drexlin, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe;
C. Weinheimer, Institut für Kernphysik, Universität Münster

Einleitung

Die Zielsetzung des Karlsruhe Tritium Neutrino (KATRIN) Experimentes ist die modellunabhängige Messung der Neutrinomasse mit einer Sensitivität von 200 meV. Die Motivation für KATRIN ergibt sich aus der Schlüsselrolle von Neutrinos in der Astroteilchenphysik: zum einen spielen massebehaftete Neutrinos eine spezifische Rolle als heiße Dunkle Materie bei der Evolution von großräumigen Strukturen im Universum, zum anderen kommt der Neutrinomasse eine Schlüsselrolle beim offenen Problem der Entstehung von Masse zu. Das experimentelle Prinzip von KATRIN basiert auf der präzisen Vermessung des Spektrums von Elektronen nahe am kinematischen Endpunkt des β -Zerfalls von molekularem Tritium. Hierzu werden Elektronen aus einer fensterlosen gasförmigen Tritiumquelle höchster Intensität durch starke Magnetfelder von supraleitenden Magneten adiabatisch durch die 70 m lange Experimentiereinrichtung geführt. Ein System aus zwei elektrostatischen Retardierungsspektrometern erlaubt eine präzise Bestimmung der Elektronenergien mit $\Delta E = 0,93$ eV. Die durch dieses System transmittierten Elektronen werden in einem Fokalebene-detektor nachgewiesen.

Die erfolgreiche Durchführung von KATRIN stellt höchste Anforderungen an die Prozesstechnik, insbesondere bei der Tritiumhandhabung, Ultrahochvakuum- und Kryotechnik sowie der Hochspannungsstabilisierung. Eine weltweite Kollaboration aus mehr als 125 Wissenschaftlern und Ingenieuren unter Federführung des

Forschungszentrums ist dabei, dieses Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik am Tritiumlabor Karlsruhe aufzubauen. Die ersten Messungen mit dem Gesamtexperiment sind für 2010 geplant. Dieser Artikel gibt einen einführenden Überblick über das Gesamtexperiment und seine astroteilchenphysikalische Motivation.

Motivation

Neutrinos sind faszinierende Elementarteilchen: sie spielen sowohl bei der Untersuchung der inneren Struktur der Materie wie auch bei der Erforschung des großräumigen Aufbaus des Universums eine spezielle Rolle. Ihre Masse ist um viele Größenordnungen kleiner als die aller anderen Elementarteilchen und ihre Wechselwirkung mit normaler Materie ist extrem klein, da sie nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Während der ersten Sekunde nach dem Urknall wurden so viele von ihnen produziert, dass sie neben den Photonen die häufigsten Teilchen im Universum sind: jeder cm^3 des Kosmos enthält heute 336 Neutrinos. Darüber hinaus dienen uns Neutrinos als Sonden für sonst unzugängliche Regionen wie das Innere unserer Erde oder einer Supernova. Experimente mit Neutrinos sind außerordentlich schwierig, eröffnen aber einzigartige Fenster zur Beantwortung fundamentaler Fragen der Astroteilchenphysik [1]:

- was ist der Ursprung der Masse von Elementarteilchen, insbesondere von Neutrinos?
- welche Rolle hat die heiße dunkle Materie bei der Evolution von großräumigen Strukturen im Universum gespielt?

Kosmologie

Seit ihrer Entkopplung von der normalen Materie beeinflussen die primordialen Neutrinos die Evolution von großräumigen Strukturen im Universum. Da sie sich im frühen Universum aufgrund ihrer kleinen Ruhemasse im sub-eV-Bereich ($1 \text{ eV} = 1,8 \times 10^{-36} \text{ kg}$) mit relativistischen Geschwindigkeiten ($v \sim c$) bewegen, bezeichnet man sie als heiße Dunkle Materie (HDM). Neutrinos sind die Gegenspieler aller anderen Materieformen auf der Bühne der kosmischen Evolution. Während diese zu einer gravitativen Selbstkontraktion von Materiekumpen führen, verhindert die heiße dunkle Materie durch Diffusion die Bildung von Protogalaxien. Ein genaues Verständnis dieser gegenläufigen Prozesse ist von fundamentaler Bedeutung, entsprechend groß ist das Interesse an der Absolutskala der ν -Masse. Dabei gilt: je größer die ν -Ruhemasse $m(\nu)$, desto stärker ist der Einfluss von Neutrinos auf die Strukturentstehung. In einem Universum mit ν -Massen $m(\nu) \sim 10$ eV wäre die Anzahl von Galaxien deutlich kleiner als in unserem Universum.

Abb. 1 gibt einen Überblick über die derzeit erlaubten Parameterbereiche von $m(\nu)$ und Ω_ν , dem Anteil von Neutrinos an der gesamten Energie- und Materiedichte Ω_{tot} im Universum. Die heutige Obergrenze $m(\nu) < 2,3$ eV entspricht einem maximalen Anteil $\Omega_\nu \sim 15$ %, die untere Grenze $\Omega_\nu > 0,1$ % mit $m(\nu) > 50$ meV folgt aus Resultaten von ν -Oszillationsexperimenten. Mit KATRIN können noch ν -Massen von 200 meV nachgewiesen werden, dies entspricht $\Omega_\nu \sim 1$ %. Kleinere Neutri-

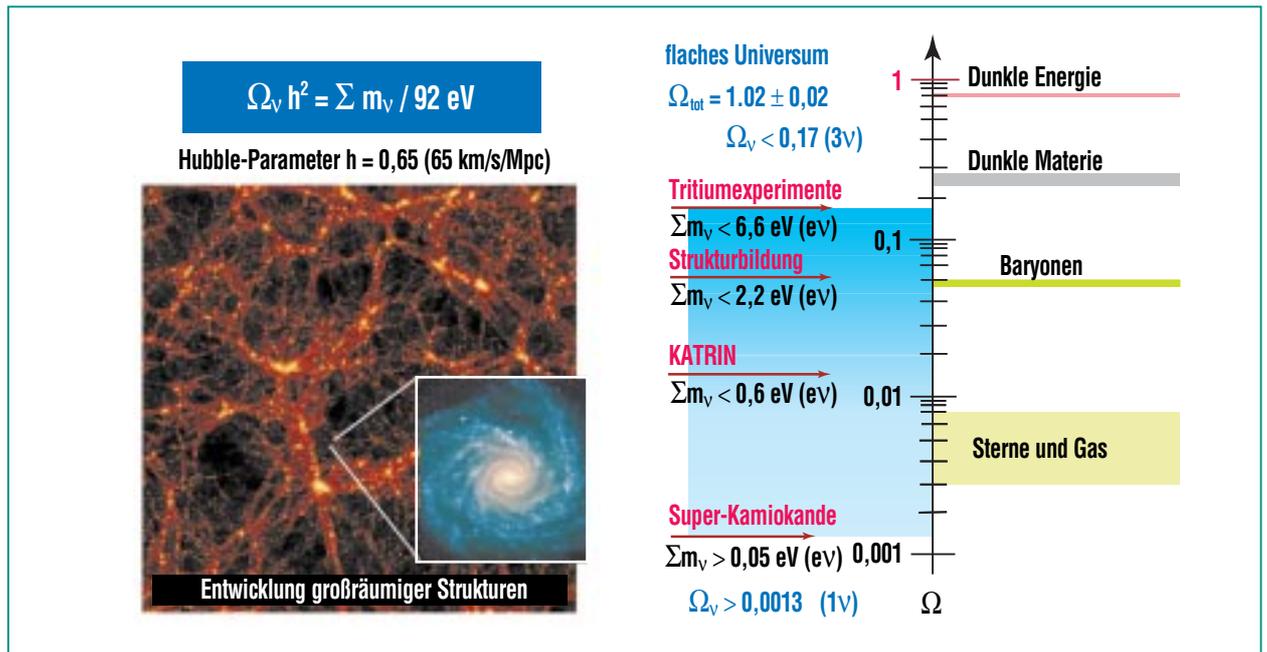


Abb. 1: Erlaubter Parameterbereich des Anteils Ω_ν der heißen dunklen Materie am Energie- und Materiegehalt des Universums. Mit KATRIN kann eine Neutrinomasse von 0,2 eV nachgewiesen werden, dies entspricht einem ν -Massenanteil von $\Omega_\nu \sim 1\%$.

nomassen im Bereich $\Omega_\nu < 1\%$ sind kosmologisch uninteressant, da in diesem Bereich der Einfluss von Neutrinos auf die Strukturevolution vernachlässigbar ist.

Teilchenphysik

Im Mikrokosmos der Teilchenphysik spielen Neutrinos eine ebenso große Rolle. Aufgrund der Kleinheit der ν -Masse (Neutrinos sind mehr als 10^5 -mal leichter als alle anderen Elementarteilchen) eröffnet eine Messung von $m(\nu)$ über den See-saw-Mechanismus möglicherweise einen Zugang zur Physik in einem Energiebereich nahe an der GUT-Skala bei $\sim 10^{16}$ GeV. Andere Modelle zur Generierung kleiner Neutrinomassen verknüpfen diese mit verborgenen Strukturen der Raumzeit (extra Dimensionen). Alle theoretischen Modelle lassen sich jedoch in zwei ge-

nerische Klassen zusammenfassen: in hierarchische Szenarios, bei denen die drei ν -Massenzustände der Relation $m_1 \ll m_2 \ll m_3$ genügen, bzw. in quasi-degenerierte Massenszenarios mit $m_1 \approx m_2 \approx m_3$. KATRIN mit seiner Sensitivität von 200 meV überdeckt den Bereich quasi-degenerierter Massenszenarios. Eine experimentelle Verifikation dieses Schemas hätte fundamentale Auswirkungen auf unser theoretisches Verständnis der Generierung von Teilchenmassen.

Methoden und Resultate

Neutrinomassen lassen sich durch drei Methoden bestimmen: die Untersuchung großräumiger Strukturen im Kosmos, die Suche nach dem neutrinolosen Doppelbetaerfall ($0\nu\beta\beta$) sowie durch die Analyse der Kinematik von Betazer-

fällen. Kosmologische Strukturuntersuchungen kombinieren die Daten von Galaxiendurchmusterungen (2dFGRS, SDSS) mit den Ergebnissen von Experimenten zur Hintergrundstrahlung (WMAP) auf der theoretischen Basis des kosmologischen Konkordanzmodells (λ CDM). Die hierbei erzielten Resultate mit Sensitivitäten im sub-eV-Bereich sind aber stark modellabhängig und nicht geeignet, eine endliche Neutrinomasse zweifelsfrei nachzuweisen. In den nächsten Jahren sind durch neue Satellitenmissionen (Planck) und Großteleskope (LSST) mit neuen Methoden genauere Messungen zu erwarten. Mit der Suche nach $0\nu\beta\beta$ -Ereignissen lassen sich die inneren Symmetrie-Eigenschaften der Neutrinos untersuchen sowie die Majoranamasse von Neutrinos bestimmen. Vor wenigen Jahren wurde eine erste Evidenz für der-

artige Ereignisse publiziert, die Interpretation dieses Ergebnisses als Hinweis für $m(\nu) \sim 0,4 \text{ eV}$ ist allerdings stark umstritten. Neue experimentelle Anstrengungen (GERDA, EXO, CUORE) sollen hier eine Klärung herbeiführen. Die Extraktion einer präzisen ν -Masse über die Suche nach $0\nu\beta\beta$ -Ereignissen wird durch die erheblichen Unsicherheiten bei Kernmatrixelementen weiter erschwert.

Tritium- β -Zerfall und ν -Masse

Die einzige modellunabhängige Methode zur Bestimmung der ν -Ruhemasse basiert auf der genauen Messung des Energiespektrums von Elektronen aus β -Zerfällen von Kernen. Bei einem β -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, dabei wird entsprechend Pauli's Postulat ein Elektron zusammen mit einem Elektron-Antineutrino emittiert. Da sich die beiden emittierten Teilchen die verfügbare Energie E_0 teilen, beobachtet man ein kontinuierliches Spektrum von Elektronen bis zur Maximalenergie. Der β -Emitter mit den besten Eigenschaften zur Messung der ν -Masse ist Tritium mit seiner kleinen Übergangsenergie $E_0=18,6 \text{ keV}$ und seiner kurzen Halbwertszeit $T_{1/2}=12,3 \text{ Jahren}$, die eine hohe Zerfallsaktivität garantiert. Das mit der Fermi-Theorie berechnete Energiespektrum des Tritium- β -Zerfalles ist in Abb. 2a dargestellt. Eine Information über die Masse des Elektronantineutrinos tragen nur diejenigen Zerfallsprozesse, bei denen ein nichtrelativistisches Neutrino emittiert wird. Dies bedeutet, dass nur die Elektronen nahe am kinematischen Endpunkt bei E_0

von Interesse für die β -Spektroskopie sind. Nur in diesem wenige eV schmalen Bereich nahe an E_0 wird das Spektrum für massebehaftete Neutrinos signifikant von einem Referenzspektrum ohne Neutrinomasse abweichen (s. Abb. 2b). Der Anteil dieser Ereignisse am Gesamtspektrum ist extrem klein: so liegt bei Tritium in einem 1 eV breiten Intervall unterhalb von E_0 nur ein Anteil von 2×10^{-13} des Gesamtspektrums.

Messprinzip

In den letzten 25 Jahren wurde weltweit in einer Reihe von Tritiumzerfallsexperimenten nach der Signatur einer Neutrinomasse gesucht. Nachdem anfänglich magnetische Spektrometer zur Energieanalyse der Elektronen eingesetzt wurden, konnte Anfang der neunziger Jahre durch den Einsatz der MAC-E-Filtertechnik (magnetische adiabatische Kollimation mit Energiefilter) ein deutlicher Sensitivitätssprung erreicht wer-

den. Dabei werden die Elektronen aus einer Tritiumquelle durch starke Magnetfelder adiabatisch zu einem Spektrometer geleitet, das durch Anlegen einer negativen Gegenspannung als integrales Energiefilter arbeitet. Die durch dieses System transmittierten Elektronen werden in einem Detektor gezählt. Mit dieser Messmethode konnten die vor wenigen Jahren beendeten Experimente in Mainz und Troitsk die bisher beste Obergrenze $m(\nu) < 2,3 \text{ eV}$ erzielen.

Eine weitere Steigerung der Sensitivität erfordert zum einen eine Tritiumquelle höchster Luminosität zum Erreichen einer ausreichenden Messstatistik am Endpunkt [2]. Zum anderen wird ein hochauflösendes Spektrometer zur präzisen Spektroskopie der höchstenergetischen β -Zerfallselektronen benötigt. Diese experimentellen Anforderungen werden durch das Referenzdesign des KATRIN-Experimentes [3] erfüllt.

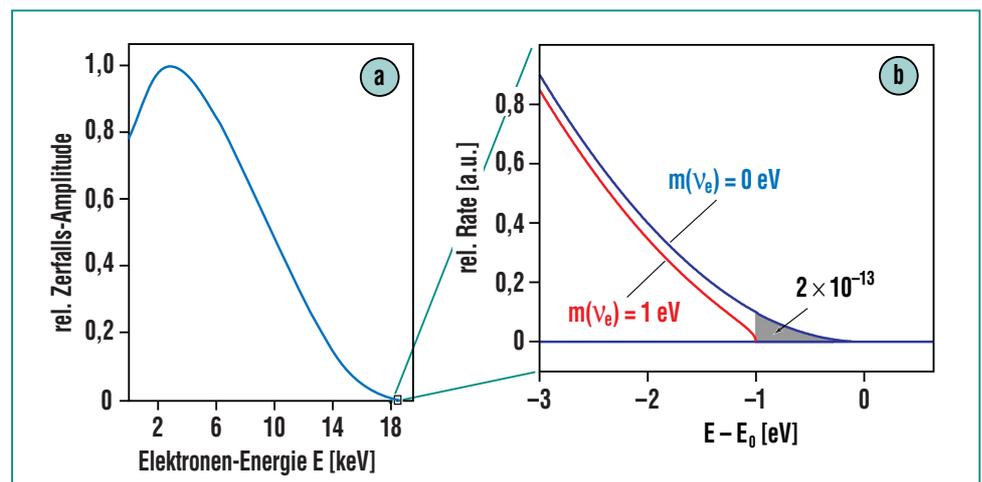


Abb. 2: Beim β -Zerfall von Tritium in das Isotop Helium-3 werden ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino emittiert, die sich die beim Zerfall freigesetzte Energie von 18,6 keV teilen. a) Kontinuierliches Energiespektrum der Elektronen. b) Nahe am Endpunkt wird das β -Energiespektrum durch eine endliche Neutrinomasse (hier dargestellt für $m(\nu) = 1 \text{ eV}$) modifiziert.

Das KATRIN-Experiment

Das KATRIN-Experiment vereint mit über 110 Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern aus fünf Ländern (Deutschland, USA, Russ. Föderation, England und Tschechische Republik) und 16 Institutionen die Weltexpertise der direkten Neutrinomassen-community. KATRIN ist als ultimatives Tritiumzerfallsexperiment konzipiert, das die MAC-E-Filtertechnik an das technologische Limit heranhöhrt. Von ausschlaggebender Bedeutung bei der Standortwahl von KATRIN war die Tatsache, dass das Forschungszentrum mit dem Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) über das europaweit einzige Labor mit langjähriger Erfahrung in der Tritiumprozesstechnik verfügt, an dem

eine derart intensive Quelle betrieben werden. Aus diesem Grund kann das Experiment nur am Forschungszentrum durchgeführt werden.

Abb. 3 zeigt einen Überblick über das insgesamt 70 m lange Experiment mit seinen Hauptkomponenten a) der fensterlosen hochintensiven molekularen Tritiumquelle, die 10^{11} β -Zerfälle pro Sekunde liefert, b) der Tritiumpumpstrecke bestehend aus aktiven und passiven Elementen, in der die T_2 -Moleküle aus der Strahlführung eliminiert werden, c) das Tandemsystem aus zwei elektrostatischen Spektrometern zur Energieanalyse sowie d) dem Halbleiterdetektor zum Zählen der transmittierten Elektronen. Auf ihrem Weg von der Tritiumquelle zum Detektor wer-

den die β -Zerfallselektronen durch ein System aus mehr als 20 supraleitenden Solenoiden [6] mit Feldstärken im Bereich von 3-6 T adiabatisch geführt.

Tritiumquelle

Die fensterlose gasförmige Tritiumquelle (WGTS, windowless gaseous tritium source) von KATRIN [3,4] besteht aus einem 16 m langen Edelstahlrohr, in das mittig molekulares Tritium mit einer Rate von 2 Ci/s eingespeist wird (s. Abb. 4). Wesentliche technologische Herausforderungen ergeben sich aus der erforderlichen Temperaturstabilität der Quelle von kleiner als ± 30 mK bei der Betriebstemperatur $T = 27$ K. Dies wird erreicht durch ein neuartiges Kühlkonzept auf der Basis von 2-Phasen-Neon, bei dem druckstabilisiertes siedendes Neon unter Normaldruck entlang des WGTS-Strahlrohres geführt wird. Ebenfalls wird eine hohe Isotopenreinheit ($\sim 95\%$ T_2) des Tritium benötigt, die durch die aufwändige Tritiuminfrastruktur des TLK sichergestellt wird. Die Isotopenzusammensetzung wird dabei permanent über Laser-Ramanspektroskopie gemessen. Der Quellkryostat ist derzeit in der Fertigung bei einem industriellen Partner und wird Ende 2008 am TLK in Betrieb genommen. Die aus der Quelle diffundierenden Tritiummoleküle werden zunächst in einer differenziellen Pumpstrecke DPS aktiv durch Turbomolekularpumpen abgepumpt und in den geschlossenen KATRIN-Kreislauf zurückgeführt. Im Rahmen des Testexperimentes TILO konnten bereits wichtige Erfahrungen für die Optimierung dieses Kreislaufs gewonnen werden.

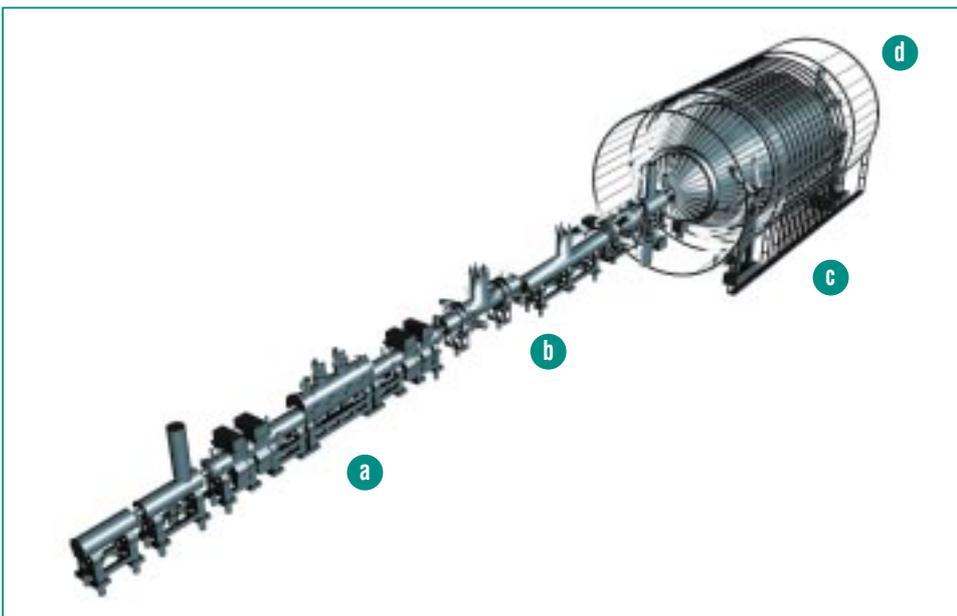


Abb. 3: Im KATRIN-Experiment werden Elektronen durch ein System von mehr als 20 supraleitenden Solenoiden über eine 70 m lange Strecke adiabatisch geführt. Die bei β -Zerfällen in einer hochintensiven molekularen Tritiumquelle (a) entstehenden Elektronen werden über eine Tritiumpumpstrecke mit aktiven und passiven Elementen (b) zu einem System (c) aus zwei elektrostatischen Spektrometern (Vor- und Hauptspektrometer) geführt. Die durch das System transmittierten Elektronen werden in einem Halbleiterdetektor (d) nachgewiesen.



Abb. 4: Die fensterlose gasförmige Tritiumquelle WGTS ist eine der beiden Schlüsselkomponenten von KATRIN und liefert 100 Milliarden β -Zerfälle pro Sekunde. Die technologischen Anforderungen an den 16 m langen Kryostat sind herausfordernd. Entsprechend komplex ist sein innerer Aufbau mit insgesamt sechs verschiedenen kryogenen Fluiden (Helium, Neon, Stickstoff, Argon, Tritium, Krypton), 12 Kryokreisläufen und mehr als 500 Sensoren.

Eine anschließende kryogene Kaltfallenstrecke CPS ($T = 3\text{ K}$) mit einer inneren Schicht aus Argonfrost garantiert, dass die im Strahlrohr verbliebenen T_2 -Moleküle zuverlässig über Kryosorptionsprozesse gebunden werden. Auch hier konnte mit einem Testexperiment (TRAP) das Pumpkonzept erfolgreich verifiziert werden. Durch die Kombination der aktiven und passiven Pumpstrecke wird der Tritiumfluss um mehr als 14 Größenordnungen reduziert, sodass der nachfolgende Spektrometerbereich tritiumfrei bleibt.

Spektrometer und Detektor

Die Energieanalyse der β -Zerfallselektronen erfolgt bei KATRIN in zwei Schritten: zunächst werden in einem kleineren Vorspektrometer alle niederenergetischen Elektronen mit $E < 18,4\text{ keV}$ ausselekt-

tiert, da sie keine Information über die Neutrinomasse tragen. Das Vorspektrometer ist seit 2004 in Betrieb und hat die neuartigen Ansätze beim Messprinzip von KATRIN erfolgreich verifiziert. Im Rahmen von vakuumtechnischen Untersuchungen konnte durch eine Kombination von Turbomolekularpumpen mit Getterpumpen routinemäßig ein Ultrahochvakuum (UHV) von besser als 10^{-11} mbar erreicht werden und damit das UHV-Konzept von KATRIN erfolgreich verifiziert werden [5]. In einem großen hochauflösenden Hauptspektrometer mit einem Durchmesser von 10 m und einer Länge von 23,3 m wird die Energie der Elektronen nahe am Endpunkt präzise bestimmt (Abb. 5). Besonders herausfordernd ist auch hier die Aufrechterhaltung eines Ultrahochvakuums von besser als 10^{-11} mbar in einem Volumen von

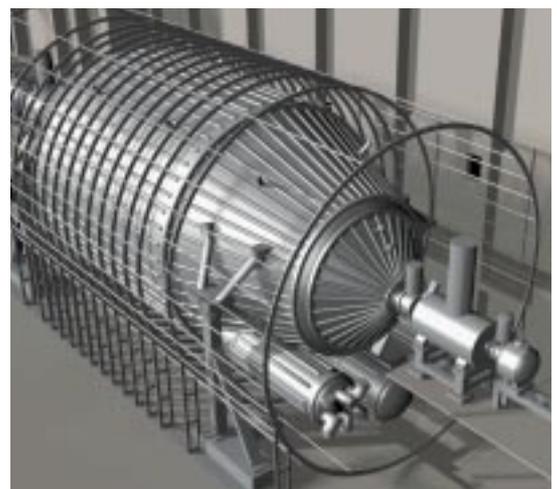


Abb. 5: Die zweite Schlüsselkomponente von KATRIN ist das elektrostatische Hauptspektrometer mit seinem Durchmesser von 10 m und seiner Länge von 23,3 m, das eine präzise Bestimmung der Energie der β -Zerfallselektronen ermöglicht. Ein System von Helmholtz-Spulen optimiert hierbei die Strahlführung. Das am Ende der Strahlführungstrecke gelegene Siliziumdetektorarray zählt die transmittierten Elektronen.

1250 m³ sowie die geforderte Stabilität der Gegenspannung von besser als 1 ppm bei 18,6 keV.

Das Hauptspektrometer hat nach Abschluss der Fertigung bei einem industriellen Partner im August 2006 seinen ersten integralen Vakuumtest mit einem Endvakuum von 6×10^{-9} mbar hervorragend bestanden. Anschließend wurde das Spektrometer in einer 8800 km langen Seereise von Deggendorf ans Forschungszentrum gebracht. Die letzten 7 km des Transports per Schwerlastler Ende November 2006 gestalteten sich besonders spektakulär. Seit dem Einhub in die KATRIN-Experimentierhallen wird das Spektrometer für den UHV-Betrieb vorbereitet.

Nach Abschluss dieser Arbeiten wird ein großflächiges inneres Elek-

trodensystem in das Spektrometer eingebaut. Erste Prototypen dieses für die Spannungsstabilisation und Untergrundunterdrückung essentiellen Systems werden derzeit an der Universität Münster gefertigt.

Die durch das Spektrometersystem transmittierten Elektronen werden schließlich in einem segmentierten untergrundarmen Si-Zähler nachgewiesen [5]. Dieses Detektorsystem befindet sich derzeit in der Designphase.

Ausblick

Der Beginn der mehrjährigen Messungen mit dem KATRIN-Experiment ist für 2010 geplant. Nach Inbetriebnahme der Gesamtanlage wird das Experiment mehrere Jah-

re das Spektrum von Tritium am Endpunkt untersuchen um mit einer Designsensitivität von 0,2 eV die absolute Massenskala von Neutrinos zu bestimmen und damit den Anteil der heißen dunklen Materie im Universum modellunabhängig bestimmen. KATRIN als Schlüsselexperiment der Astroteilchenphysik verdeutlicht exemplarisch die heutige Mission der HGF-Zentren: die Durchführung von technisch herausfordernden und international sichtbaren Großexperimenten zur Aufdeckung von fundamentalen Fragestellungen.

Literatur

- [1] R.G.H. Robertson et al., *The Neutrino Matrix, APS Neutrino Studie*
- [2] G. Drexlin, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 145 (2005) 263*
- [3] J. Angrik et al., (KATRIN Kollab.), *KATRIN Design Report, Forschungszentrum Karlsruhe, Wiss. Berichte, FZKA 7090*
- [4] B. Bornschein et al., *Die KATRIN Tritiumquelle im TLK, Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe*
- [5] J. Bonn et al., *Elektrostatistische Spektrometer und Detektoren für KATRIN, Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe*
- [6] R. Gehring et al., *Magnet- und Kryotechnologie für KATRIN, Forschungszentrum Karlsruhe – Nachrichten, diese Ausgabe*