

Die Neutrino-Waage kalibrieren

Eine maßgeschneiderte Photoelektronenquelle für das Hauptspektrometer des KATRIN Experiments zur Messung der Neutrinomasse.

Michael Zacher und Christian Hahn

1) Manfred Lindner und Christian Weinheimer, Physik Journal, Juli 2011, S. 31

2) www.katrin.kit.edu

Das internationale KATRIN Experiment (Karlsruher Tritium Neutrino Experiment) am Karlsruher Institut für Technologie will die Masse des leichtesten bekannten Teilchens des Universums, des Neutrinos, bestimmen. Um das riesige Hauptspektrometer des Experiments für die präzisen Messungen zu kalibrieren, braucht man eine winkelselektive Quelle hoher Energieauflösung für Photoelektronen, angetrieben von einem speziellen UV-Laser der InnoLas Laser GmbH.

Die Geisterteilchen machen es Forschern nicht leicht: Die nur schwach wechselwirkenden Neutrinos sind nur sehr aufwändig nachzuweisen.¹⁾ So sind auch einige ihrer Eigenschaften, insbesondere ihre Masse, noch nicht bekannt. Gesichert ist jedoch, dass Neutrinos durchaus eine Masse besitzen: Oszillationsexperimente haben gezeigt, dass sich Neutrinos aus verschiedenen Familien (ν_e , ν_μ , ν_τ) ineinander umwandeln können, was nur möglich ist, wenn mindestens einer der zugehörigen Neutrinomasseneigenzustände ungleich null ist. Leider sind auf diese Art nur Massendifferenzen messbar – die für die Teilchen sowie die Astrophysik wichtige absolute Massenskala der Neutrinos bleibt dabei unbekannt. Neben (modellabhängigen) Aussagen über die Neutrinomassen aus der Astrophysik und Kosmologie gibt es auch einen direkten, kinematischen Weg der Massebestimmung, den das internationale KATRIN-Experiment²⁾ nutzt, um die Masse des Anti-Elektronneutrinos mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ bei einer Vertrauensgrenze (Confidence Limit) von 90 Prozent zu bestimmen. Anstatt das Neutrino selbst direkt zu messen, wird der nukleare β^- -Zerfall



Michael Zacher

Ein riesiges Experiment zum Nachweis kleinster Teilchen: Blick in das 23 Meter lange Hauptspektrometer von KATRIN.

untersucht, also die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton. Neben dem Neutrino entsteht hierbei auch ein Elektron, und die Energie des Zerfalls verteilt sich auf beide Teilchen. Die Masse der Neutrinos ist im Endpunktsbereich des β -Spektrums (etwa $18,6 \text{ keV}$ für das bei KATRIN verwendete Tritium) als „fehlende“ kinetische Energie der Elektronen sichtbar. Um die nötige Präzision zu erreichen, ist ein riesiger Experimentaufbau nötig: KATRIN hat eine Gesamtlänge mehr als 70 Meter.

In der 10 Meter langen Quelle befindet sich radioaktives Tritium-Gas; starke Magnetfelder leiten die Elektronen aus rund 10^{11} Zerfällen pro Sekunde adiabatisch in Richtung der Spektrometer. Da Zerfälle dort zu Messfehlern führen würden, darf das Tritium selbst das Spektrometer nicht erreichen. Es wird auf dem Weg zum Spektrometer in zwei Pumpstrecken um einen Faktor 10^{14} reduziert. Dazu macht der magnetische Flussschlauch mit den Elektronen mehrere Biegungen, denen das träge Tritium nicht folgen kann und

durch Turbomolekularpumpen und Kryoflächen entfernt wird. Nachdem der für die Massenmessung uninteressante niederenergetische Teil des Elektronenspektrums im Vorspektrometer herausgefiltert worden ist, bleiben etwa tausend Elektronen pro Sekunde, die ins riesige 23 Meter lange Hauptspektrometer mit einem Durchmesser von 10 Meter gelangen (Abb. 1). In diesem MAC-E-Filter, einem elektro- und magnetostatischen Hochpassfilter, findet bei extrem hoher Auflösung von $0,93 \text{ eV}$ die eigentliche Filterung der Elektronen-Energien statt. Ein Detektor weist dann die Elektronen nach. So lässt sich durch Ändern der Spektrometer-Energieschwelle ein integriertes β -Spektrum aufnehmen.

Das Hauptspektrometer selbst ist ein sehr komplexes System mit einer inneren Drahtelektrode, die entscheidend zur Untergrundreduktion beiträgt sowie eine große Flexibilität und Homogenität bei der Gestaltung der elektrischen Potentiale im Inneren des Spektrometers erlaubt. Elektronen bewegen sich auf Zyklotronbahnen entlang

Dipl.-Phys. Michael Zacher, Institut für Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Christian Hahn, MSc., InnoLas Laser GmbH

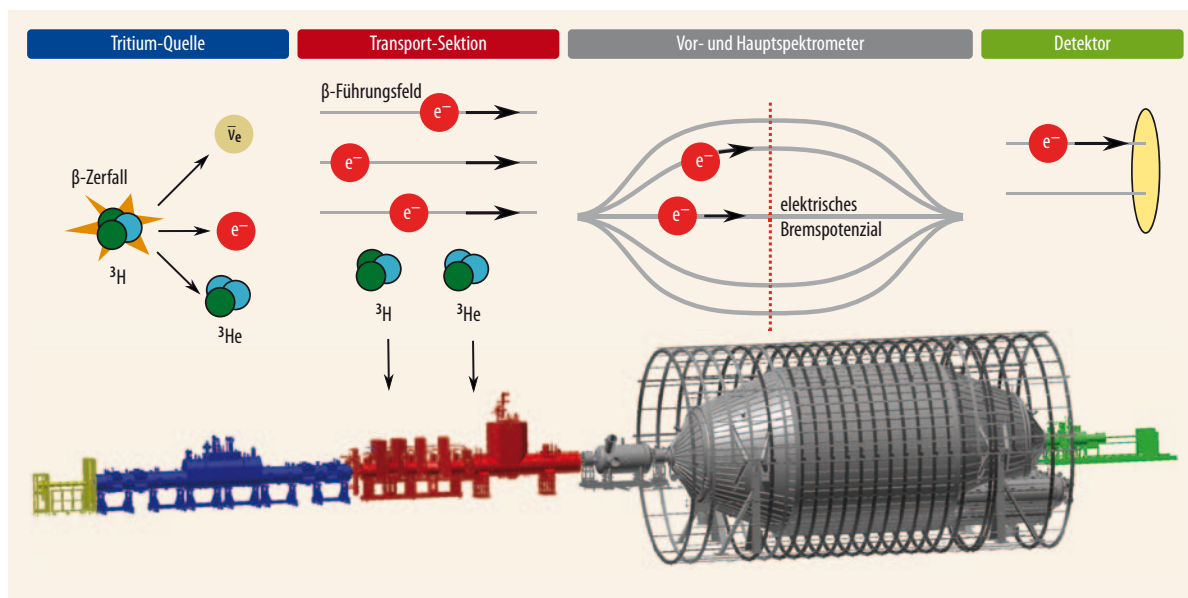


Abb. 1 Im KATRIN-Experiment entstehen in der Tritium-Quelle Elektronen, die durch starke Magnetfelder in Richtung der Spektrometer geführt werden, wäh-

rend das Tritium in der Transportsektion entfernt wird. Nach der Energiefilterung durch ein elektrostatisches Retardierungspotential im Hauptspektrometer

lässt sich am Detektor ein integriertes Spektrum aufnehmen.

der magnetischen Feldlinien durch das Spektrometer, ihre kinetische Energie lässt sich zerlegen in einen Anteil longitudinal zum Magnetfeld, $E_{\parallel} = E \cdot \cos^2(\theta)$, und einen Anteil transversal dazu, $E_{\perp} = E \cdot \sin^2(\theta)$. Dabei beschreibt θ den Winkel zwischen Elektronenimpuls und Magnetfeld. Die Spektrometerröhre und die Drahtelektroden erzeugen ein elektrisches Retardierungspotential U , das in der Spektrometermitte, der sog. Analysierebene, am stärksten ist. Nur Elektronen mit Longitudinalenergie $E_{\parallel} > eU$ können die Analysierebene

passieren. Wegen der adiabatischen Bewegung der Elektronen bleibt ihr magnetisches Moment $\mu = E_{\perp}/B$ erhalten. Supraleitende Spulen mit mehreren Tesla Feldstärke am Ein- und Ausgang des Spektrometers sowie ein System aus Luftspulen erzeugen das Magnetfeld, das vom Eingang bis zur Analysierebene um einen Faktor 20 000 abfällt. Da μ konstant ist, wird auch die transversale Energie eines einfallenden Elektrons, die eben nicht mit analysiert wird, auf dem Weg zur Spektrometermitte um diesen Faktor verringert und in Longitudinalenergie umgewandelt, was die hohe Auflösung des MAC-E-Filters auch für isotrope Quellen ermöglicht.

Zwar ist somit die Auflösung des Spektrometers mit 0,93 eV für eine isotrope Quelle sehr hoch, innerhalb dieser Breite bestimmt dennoch der Winkel θ des Elektrons, ob es transmittiert wird oder nicht. Für eine exakte Charakterisierung mit einer Sensitivität unterhalb dieser Breite ist es also nötig, eine Test-Elektronenquelle zu nutzen, die nicht nur eine hohe Energieauflösung, sondern auch eine möglichst scharfe Winkelselektivität bietet (**Abb. 2**). Weiterhin liefert die Flugzeit der Elektronen durch das Spektrometer Informationen über das elektrische Potential nicht nur in der Analysierebene, sondern

entlang des kompletten Weges der Elektronen durch das Spektrometer. Dafür ist eine Elektronenquelle mit kurzen, intensiven Pulsen nötig. All diese Anforderungen erfüllt die an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster entwickelte winkelselektive Elektronenquelle im Zusammenspiel mit dem von der InnoLas Laser GmbH entwickelten UV-Laser. Das Kraillinger Unternehmen ist mit ihrem Produktportfolio an Lasern für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen auf kundenspezifische Sonderentwicklungen spezialisiert und somit der perfekte Partner für komplexe Entwicklungsprojekte wie KATRIN.

Winkelselektiv hoch aufgelöst

Die Elektronenquelle funktioniert nach dem Prinzip des photoelektrischen Effekts: UV-Licht trifft auf eine Metallschicht und löst dort Elektronen aus, deren Energie in erster Näherung durch das elektrische Potential der Metallschicht definiert ist. Ein plattenkondensatorartiger Aufbau erzeugt ein starkes, homogenes elektrisches Feld von einigen hundert kV/m, das die Elektronen beschleunigt. Dieser Prozess findet in einem Magnetfeld von etwa 30 mT statt,

Michael Zacher

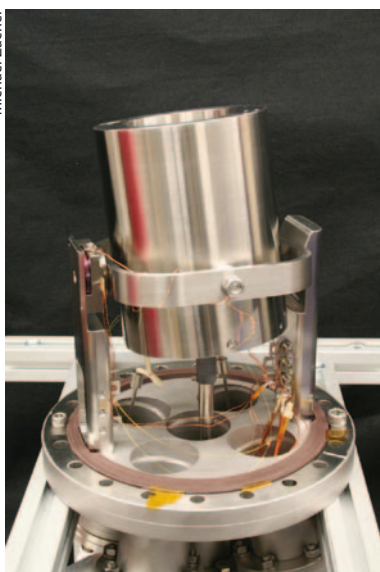


Abb. 2 Die Elektronenquelle besitzt nicht nur eine hohe Energieauflösung, sondern auch eine scharfe Winkelselektivität.

Best of

Michael Zacher

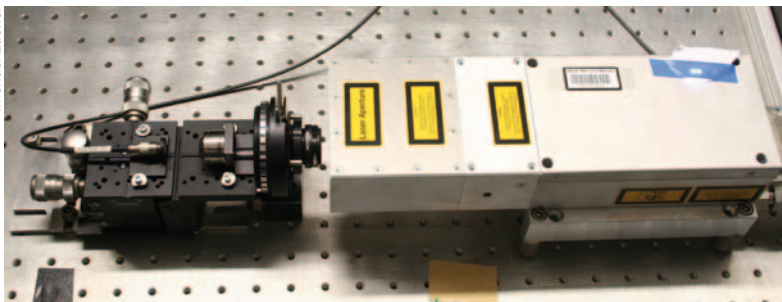


Abb. 3 Mithilfe des speziellen InnoLas mosquito Lasers (hier in einem Versuchsaufbau mit Fasereinkopplung)

sodass das elektrische Feld in einem nicht-adiabatischen Prozess die ersten Mikrometer der Beschleunigung dominiert. Durch Kippen der Elektrodenplatten gegen das Magnetfeld lässt sich nun der Winkel θ der Elektronen einstellen – die Elektronen werden quasi in ihre Zyklotronbahn eingeschossen. Die Winkel- und Energieschärfe dieser Elektronenquelle wird wesentlich bestimmt durch die initiale Winkel- und Energieverteilung der Elektronen beim Austritt aus der Metallschicht. Diese wiederum hängt von einem komplexen Zu-

erreicht die Elektronenquelle die benötigte Winkel- und Energieschärfe.

sammenspiel aus Austrittsarbeit und Oberflächenbeschaffenheit des Materials sowie der Wellenlänge und Energieschärfe des UV-Lichts ab: Die Wellenlänge des Lasers ist speziell an die Austrittsarbeit der Elektronen aus der Metallschicht angepasst. Die Basis für die verwendete Strahlquelle bildet dabei ein Laser der Serie mosquito, der für den harten Einsatz im Rund-um-die-Uhr-Betrieb der Industrie ausgelegt ist und somit die Zuverlässigkeit eines Industrielasers mit den individuellen Kriterien an einen Lasers für die Wissenschaft vereinigt.

Ausgehend von einem mosquito 532-2-V hat InnoLas einen UV-Laser mit 266 nm entwickelt, der den höchsten Anforderungen an Strahlqualität, Leistungs- und Puls-zu-Puls-Stabilität sowie Flexibilität gerecht wird (Abb. 3). So erlaubt z. B. ein integrierter variabler Abschwächer präzise Leistungseinstellungen bis hinab in den unteren μW -Bereich bei konstanter Pulsbreite, ohne dabei an Strahlqualität und Stabilität zu verlieren. In der kurzen Umsetzungszeit des Projekts konnte InnoLas einmal mehr die Vorzüge von Industrielasern in wissenschaftlichen Anwendungen unter Beweis stellen. Die Elektronenquelle ist zur Zeit erfolgreich bei den Messungen zur Inbetriebnahme des KATRIN-Hauptspektrometer- und Detektorsystems im Einsatz.

*

Die Entwicklung der winkelselektiven Elektronenquelle der Münsteraner Arbeitsgruppe wird gefördert durch die Verbundforschung des BMBF.

Zusammenarbeit von Azur Light Systems und von Gegerfelt Photonics

Der französische Hersteller Azur Light Systems (ALS) von „State of the Art“ Faserlasern für anspruchsvolle Anwendungen hat die Firma von Gegerfelt Photonics in Bensheim zum exklusiven Repräsentanten für Deutschland, Österreich und die Schweiz sowie für die nordischen und baltischen Länder ernannt.

Im Vergleich zu herkömmlichen Faserlasern sind die Produkte von ALS durch ihre einzigartigen Wellenlängen in Kombination mit schmaler spektraler Linienbreite (<1 MHz), sehr niedrigem Intensitätsrauschen ($<0,02$ % rms) und hoher Leistung (bis zu 2 W bei 488 nm und bis zu 10 W bei 515 oder 532 nm) gekennzeichnet. Das TEM₀₀-Licht kommt direkt aus der Faser oder über eine kleine Box mit integriertem Kollimator, der keine Kühlung benötigt, wobei die Strahlstabilität extrem gut ist (<1 $\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$). Dies ermöglicht eine Reihe von neuen und verbesserten Anwendungen, u. a. bei sog. Optischen Pinzetten, in der Interferometrie, Laser Doppler Velocimetrie oder einfach als universeller Ersatz für große Argon-Ionen-Laser.

Von Gegerfelt Photonics vertritt bereits die Laserfirmen Cobolt AB aus Schweden und Omicron Laserage GmbH aus Deutschland.

■ von Gegerfelt Photonics
Hermann-Löns-Straße 4
64625 Bensheim
Tel.: +49 (0)6251 8609920
Fax: +49 (0)6251 8609917
E-Mail: info@vgphotonics.eu
Website: www.vgphotonics.eu

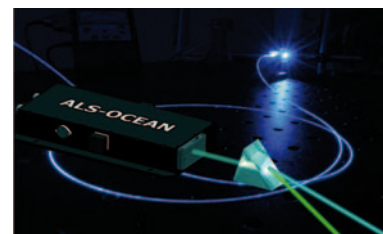
Leistungsstarker Faserlaser als Ersatz für Argonionenlaser

Hersteller: Azur Light Systems (ALS).

Vertrieb: von Gegerfelt Photonics.

Angebot: Faserlasersystem „ALS-OCEAN“ mit einer Kombination von zwei bis drei Wellenlängen (488, 514,5 und/oder 532 nm), je mit mehreren Watt Ausgangsleistung, im selben Strahl oder nach Wunsch auch in parallelen Strahlen. Das System ist eine äußerst rauscharme, hochstabile und unterhaltsfreie Alternative zu Argon-Lasern mit Leistungen im Multiwatt-Bereich.

Merkmale: Das System auf Basis patentierter Technologie emittiert beugungsbegrenztes, sehr rauscharmes Licht ($<0,02$ % rms von 10 Hz bis 10 MHz) mit bis zu 2 W Ausgangsleistung bei 488 nm und 10 W bei 514,5 und 532 nm bei schmaler spektraler Linienbreite (Einmodig/Single Frequency) <1 MHz. Der Laserkopf braucht keine Kühlung, nicht einmal einen Heatsink (Kühlkörper) und weist so eine exzellente Strahlstabilität auf (<1 $\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$). Diese Eigenschaften ermöglichen eine Reihe von neuen und verbesserten Anwendungen, u. a. in der Super-Resolution-Fluoreszenzmikroskopie, der Holografie und der Interferometrie, in Laser-Doppler-Anwendungen, für Laser-Pumpen (fs-Laser, OPOs), bei sog. Optischen Pinzetten. Durch ihre kurze Anlaufzeit, den viel geringeren Energie-



bedarf und den leisen, vibrationsfreien Betrieb können die Faserlasersysteme als universeller Ersatz für große Argonionenlaser eingesetzt werden; außerdem besteht kein Bedarf an Wasserkühlung und Lüfter, die optischen Spezifikationen sind durchaus besser und die (wartungsfreie) Lebensdauer viel länger als für Argonlaser.

Weitere Produkte von ALS sind z. B. Single-Frequency-Laser mit bis zu 2 W bei 488 nm und bis zu 10 W bei 514,5 oder 532 nm. Im Infraroten wird der Bereich von 976 bis 1080 nm abgedeckt, mit bis zu 50 W Ausgangsleistung z. B. bei 1064 nm.

■ von Gegerfelt Photonics
Hermann-Löns-Straße 4
64625 Bensheim
Tel.: +49 (0)6251 8609920
Fax: +49 (0)6251 8609917
E-Mail: info@vgphotonics.eu
Website: www.vgphotonics.eu