

CH_5^+ über einen weiten Bereich der Molekülschwingungen (Wellenzahl $500\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$) aufzuzeichnen [5]. Trotz der niedrigen Temperatur weisen die vier aufgezeichneten Banden mit ca. 200 cm^{-1} eine deutlich stärkere Verbreiterung auf, als die Laserlinienbreite (0,5% der jeweiligen Photonenenergie) erwarten ließ. Entsprechende MD-Simulationen aus der Gruppe von Dominik Marx ergaben bei tiefer Temperatur (50 K) scharfe Vibrationsbanden, bei einer Temperatur von 300 Kelvin aber ein verbreitertes Spektrum, das die experimentellen Details verblüffend genau wiedergibt. Dabei ist die angegebene Temperatur der Simulationen eher als eine qualitative Größe zu verstehen, die einer gewissen mittleren kinetischen Energie entspricht und nicht direkt auf Experimente übertragen werden kann. Hier kann also auch die Simulationsmethode noch weiter entwickelt werden.

Immerhin stimmen das im Experiment und das in der Theorie gewonnene Bild des ungewöhnlichen CH_5^+ -Ions nun erstmals weitgehend überein. Das ist insofern signifikant, als die notwendigerweise unternommenen Annahmen und Näherungen in der theoretischen Modellierung a posteriori eine Rechtfertigung durch die neuen Experimente erfahren und den Modellrechnungen jetzt eine überprüfbare Aussagekraft über die tatsächliche Dynamik zukommt. Meist liegt demnach tatsächlich eine unterscheidbare H_2 -Einheit vor, die über eine nichtklassische Zweielektronen-Dreizentrenbindung an

das CH_5^+ gebunden ist. Bei höheren Temperaturen findet aber eine ständige Isomerisierung statt, die die 2-zu-3-Gruppierung der fünf Protonen durcheinander würfelt, was durch kleine und stetige Positionswechsel bei weitgehend gleichen C-H-Abständen möglich ist. Ausgezeichnete Protonen gibt es im Zeitmittel also nicht. Diese Schlussfolgerungen waren mit den traditionellen, statischen Elektronenstrukturmethoden nicht möglich, wohingegen sich dieses Bild bei einer explizit dynamischen Simulation geradezu aufdrängt. Wer diese äußerst spannende Dynamik einmal mit eigenen Augen beobachten will, dem sei die online-Animation der Bochumer Arbeitsgruppe empfohlen [6]. Es ist eines der schönsten Beispiele, die quantenmechanische Natur der chemischen Bindung zu visualisieren, und dazu vielleicht noch eines der ungewöhnlichsten dazu.

GEREON NIEDNER-SCHATTEBURG

- [1] R. J. Saykally, *Science* **239**, 157 (1988); T. Oka, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **324**, 81 (1988); D. W. Boo, Z. F. Liu, A. G. Suits, J. S. Tse, Y. T. Lee, *Science* **269**, 57 (1995)
- [2] D. Gerlich, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **7**, 1583 (2005).
- [3] P. R. Schreiner, S.-J. Kim, H. F. Schaefer III, P. von Ragué Schleyer, *J. Chem. Phys.* **99**, 3716 (1993).
- [4] D. Marx, M. Parrinello, *Z. Phys. D* **41**, 253 (1997).
- [5] O. Asvany, P. Kumar P, B. Redlich, I. Hegemann, S. Schlemmer, D. Marx, *Science* **309**, 1219 (2005)
- [6] www.theochem.rub.de/go/ch5p.html

Neutrinos aus der Tiefe

Der Neutrinodetektor KamLAND hat erstmals Antineutrinos nachgewiesen, die durch radioaktive Zerfälle im Erdinneren entstehen.

Unser Wissen über das Erdinnere basiert bisher auf indirekten Beobachtungen wie der Aufzeichnung von Erdbeben oder der Untersuchung von Meteoriten aus dem Son-

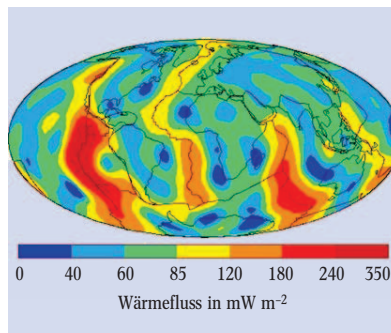


Abb. 1: Die Erdoberfläche strahlt besonders in den plattentektonisch brisanten Regionen (z. B. Hawaii) Wärme ab. Der Einfluss von Sonnenstrahlung und anderen Umwelteinflüssen ist in dieser Karte nicht enthalten. (Quelle: www.geo.lsa.umich.edu/IHFC/heatflow.html)

nensystem, die Rückschlüsse auf die Elementzusammensetzung der Erde erlauben. Ungeklärt sind etwa der Aufbau des Erdkerns, der Antriebsmechanismus des Erdmagnetfeldes und der Ursprung der freiwerdenden Erdwärme. Unsere Erde verliert etwa 40 TW an Wärme, die durch verschiedene Prozesse im Erdinneren erzeugt wird (Abb. 1). Mindestens 50 % dieser Energie stammt aus ra-

dioaktiven Zerfällen, insbesondere dem β -Zerfall von Elementen der Uran-238- und Thorium-232-Kette. Die Herkunft der verbleibenden 20 TW ist unklar, aber es besteht die starke Vermutung, dass die Erde mehr radioaktive Elemente enthält als bisher angenommen. Eine be-

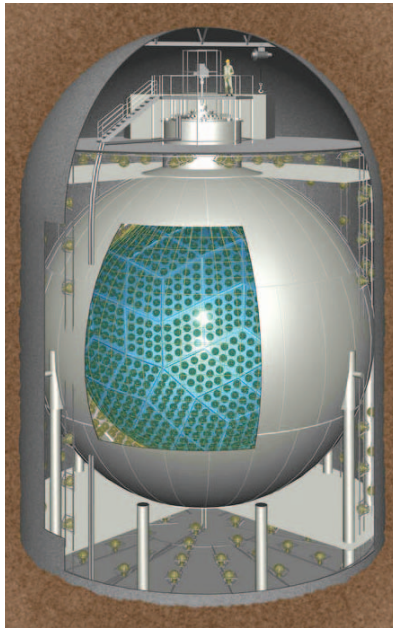


Abb. 2: Schematischer Aufbau des KamLAND Detektors. Der eigentliche Nachweis der Geoneutrinos findet in der inneren Kugel mit Hilfe von Flüssigszintillator statt (Quelle: LBL)

sonders hohe Konzentration von Radionukliden findet sich in der Erdkruste, der äußersten Erdschicht (bis zu einer Tiefe von 70 km). Durch vulkanische Proben lassen sich Rückschlüsse auf den Uran- und Thoriumgehalt des Erdmantels (70–2900 km) ziehen. Man vermutet ein Verhältnis der radioaktiven Konzentration von Kruste zu Mantel von 1000:1. Über die Konzentration von Radionukliden im Kern (2900–6371 km) ist kaum etwas bekannt. Vermutungen reichen von einem „Reaktor“ im Erdzentrum über einen hohen Kalium-40-Gehalt bis hin zum Nicht-Vorhandensein radioaktiver Elemente.

Umso aufregender ist daher der erste Nachweis von Antineutrinos aus dem Erdinneren (Geoneutrinos) im KamLAND-Detektor, der sich in der japanischen Kamioka-Mine befindet. Dieser Nachweis ermöglicht neue Einblicke in das Erdinnere und nährt die Hoffnung, die Geheimnisse der tiefsten Erdschichten, die uns bislang verborgen sind, zu entschlüsseln. Der KamLAND-Detektor wurde primär dafür konzipiert, Oszillationen von Antineutrinos aus Kernreaktoren zu detektieren. Bei diesen Messungen tragen die Geoneutrinos zum Untergrund bei, doch angesichts des Interesses an den Geoneutrinos haben

die Physiker die Not zur Tugend gemacht und diesen Untergrund analysiert. KamLAND besteht aus einer kugelförmigen Stahlkonstruktion, die mit 1000 Tonnen organischem Flüssigszintillator gefüllt ist (Abb. 2). Geoneutrinos lassen sich über den Einfang an Protonen

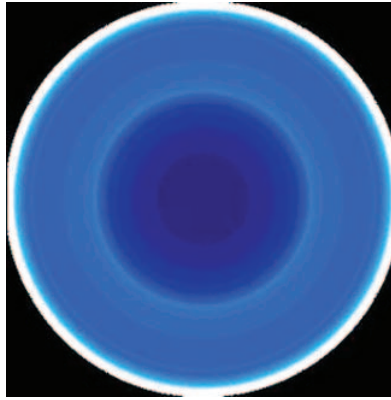


Abb. 3: So würde ein Detektor mit perfekter Winkelauflösung die Erde im „Neutrinolicht“ sehen: Der äußere helle Rand zeigt den relativ starken Neutrinofluss aus der Erdkruste. Gemäß dem Standardmodell des Erdaufbaus kommen aus dem Erdkern (dunkelblau) vermutlich die wenigsten Neutrinos.

($p + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$) nachweisen, wenn ihre Energie größer als 1,8 MeV ist. Durch die Annihilation des Positrons mit einem Elektron entstehen unmittelbar zwei Photonen, die von Photomultipliern nachgewiesen werden. Zur Signatur eines Antineutrinos gehört auch ein weiteres Photon, das nach rund 200 μ s durch die Reaktion $n + p \rightarrow d + \gamma$ entsteht. Die Energie der Geoneutrinos beträgt bis zu 3,2 MeV; sie entstehen auch beim Zerfall des in relativ hoher Konzentration vorkommenden Kalium-40, allerdings mit einer Energie unterhalb der Detektionsschwelle.

Ein Nachweis von Geoneutrinos erlaubt es, die Konzentration von Uran-238 und Thorium-232 im Erdinneren und somit auch die radioaktive Wärmeproduktion der Erde zu bestimmen. Aus der vom KamLAND-Experiment gemessenen Rate von 25_{-18}^{+19} Geoneutrinos pro Jahr im relevanten Energiebereich (1,8 MeV – 3,2 MeV) ergibt sich eine obere Grenze für die Wärmeproduktion von Uran und Thorium von 60 TW [1]. Der Untergrund ist nun dominiert durch Reaktorneutrinos ($80,4 \pm 7,2$ Ereignisse pro Jahr [1]) und diversen nuklearen Zerfällen und Prozessen, die ein Geoneutrino-Ereignis imitieren. Diese Reaktionen rühren von radioaktiven Ver-

unreinigungen des Detektors her.

In einem nächsten Schritt soll das KamLAND-Experiment nun durch Reinigung des Szintillators verbessert werden. Aber auch weitere Experimente sind zur Detektion von Geoneutrinos geeignet. Das Borexino-Experiment in Italien und das SNO+-Experiment in Kanada sollten in relativ naher Zukunft in der Lage sein, Geoneutrinos nachzuweisen. Beide Experimente sind von ihrer Größe etwa vergleichbar zu KamLAND, doch durch ihre unterschiedlichen Standorte könnten spezifische geologische Merkmale des europäischen und amerikanischen Kontinents vermessen werden. Für die fernere Zukunft ist es von großem Interesse, Geoneutrinos mit höherer statistischer Signifikanz zu messen. Von besonderer Bedeutung wäre eine richtungsabhängige Detektion der Neutrinos (Abb. 3), um Rückschlüsse auf die Konzentration in verschiedenen Schichten der Erde und des Kerns ziehen zu können [2]. Dies sollen die geplanten Experimente LENA und EARTH ermöglichen. Der LENA-Detektor, ein zylinderförmiges Experiment mit 50 kt Flüssigszintillator, soll als Langzeit-Teleskop ca. 30 Jahre lang galaktische Neutrinos, z. B. von Supernova-Explosionen, beobachten. Er soll eine Winkelauflösung von 26° erreichen, bei einer erwarteten Rate von etwa 5000 Geoneutrino-Ereignissen im Jahr [3]. Diese Winkelauflösung reicht bereits aus, um verschiedene geophysikalische Modelle, wie etwa einen hohen Anteil an radioaktiven Elementen im Kern oder starke Inhomogenitäten im Mantel, zu unterscheiden.

Das EARTH-Experiment soll sich speziell der richtungsabhängigen Detektion von Geoneutrinos widmen. Zehn Antennen mit einer Gesamtmenge von 50 kt Plastikszintillator sollen bis zu 200 m tief in die Erde gebohrt werden und sich am unteren Ende fächerförmig verzweigen. Zusammen sollen sie eine Winkelauflösung von 3° erreichen, was eine Präzisionsmessung aller Erdschichten erlauben würde [4].

Mit den gegenwärtigen und zukünftigen Experimenten wird es möglich sein, ins Innere der Erde zu blicken. Nach dem Erfolg von Sonnenspektroskopie und Supernovadetektion eröffnet sich im Zuge dieser Entwicklungen für die Neutrinophysik bei niedrigen Energien eine weitere universelle Einsatzmöglichkeit. Mit Hilfe der Geoneu-

Dipl.-Phys. Kathrin Hochmuth, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Weg 6, 80805 München

trinos könnten sich fundamentale Erkenntnisse über Entstehung und Aufbau unserer Erde und anderer Planeten gewinnen lassen.

KATHRIN A. HOCHMUTH

- [1] *T. Araki et al.*, *Nature* **436**, 499 (2005)
- [2] *B. D. Fields und K. A. Hochmuth*, arXiv: hep-ph/0604001
- [3] *K. A. Hochmuth et al.*, arXiv: hep-ph/0509136
- [4] *R. de Meijer et al.*, *Nucl. Phys. News* **14**, no. 2, 20 (2004) und persönliche Mitteilung

Nachweis von Pentaquarks weiterhin ungesichert

Als vor zwei Jahren mehrere Kollaborationen der Teilchenphysik bekannt gaben, Pentaquarks beobachtet zu haben, war die Aufregung groß. Denn mit diesen Teilchen, die aus vier Quarks und einem Antiquark bestehen, wäre eine ganz neue Teilchensorte entdeckt. Doch nachdem inzwischen neue Daten auch von anderen Experimenten vorliegen, ist die Euphorie einer gewissen Ernüchterung gewichen. Die auf den großen Sommerkonferenzen der Hochenergiephysik in Uppsala (Lepton-Photon-Conference) [1] und Lissabon (HEP2005) [2] vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass erhebliche Zweifel am Nachweis der Pentaquarks angebracht sind.

Das große Interesse an Pentaquarks erklärt sich daraus, dass sie neue Einblicke in die Struktur der starken Wechselwirkung und die Wirkung der Bindungskräfte zwischen Quarks und Gluonen erlauben. Ihr Nachweis wäre ein direkter Beweis, dass Mesonen und normale Baryonen nicht die einzige Form hadronischer Materie sind. Die Theorie der starken Wechselwirkung ist die Quantenchromodynamik (QCD). Sie kennt drei Ladungszustände, so genannte Farben, die der SU(3)-Symmetrie gehorchen und deren Feldquanten acht farbgeladene Gluonen sind. Die starke Wechselwirkung wird durch den Austausch von Gluonen zwischen farbgeladenen Quarks vermittelt, von denen es sechs verschiedene Sorten gibt (u, d, s, c, b und t). Alle bisher bekannten stark wechselwirkenden Teilchen bestehen entweder aus einem Quark-Antiquark-Paar entgegengesetzter Farbe (Mesonen) oder aus drei Quarks unterschiedlicher Farben (Baryonen). Dies

sind die einfachsten farbneutralen Quarkkombinationen. Die bekanntesten Baryonen sind das Proton (uud) und das Neutron (ddu).

Die QCD erlaubt es im Prinzip, jedem Meson oder Baryon weitere farbneutrale Quark- und Gluonzustände hinzuzufügen und die Farbladungen intern so zu ordnen, dass das Gesamtobjekt farbneutral bleibt. Fügt man etwa einem Baryon ein Quark-Antiquark-Paar bei, so erhält man Pentaquark-Zustände aus vier Quarks und einem Antiquark. In diesem einfachen Bild sollten die Multiquarkzustände im Allgemeinen eine zu kurze Lebensdauer haben, um sie experimentell nachweisen zu können. Im Jahr 1997 haben Diakonov et al. mit Hilfe eines bewährten Solitonen-Modells der QCD jedoch für das Pentaquark, das aus zwei u-, zwei d- und einem Anti-s-Quark besteht, eine Masse von etwa 1530 MeV und eine sehr kleine Zerfallsbreite von weniger als 15 MeV vorhergesagt, die einer für hadronische Resonanzen vergleichsweise langen Lebensdauer von ca. 10^{-22} s entspricht [3]. Dieses Θ^+ genannte Pentaquark zerfällt in ein Proton und ein neutrales Kaon (pK^0 -Zerfall, $uudd\bar{s} \rightarrow uud + d\bar{s}$) oder in ein Neutron und ein positiv geladenes Kaon (nK^+ -Zerfall, $uudd\bar{s} \rightarrow udd + u\bar{s}$). Da das Antiquark von einer anderen Sorte ist als die Quarks, sind diese Zerfälle exotisch in dem Sinne, dass sie für normale Baryonen nicht möglich sind.

In den Jahren 2003 und 2004 wurde die Beobachtung vieler exotischer Resonanzen berichtet. Besonders interessant ist die Situation beim Θ^+ : Zehn Experimente sehen ein Signal, zehn andere keines. Grundsätzlich eignen sich alle Streuexperimente mit ausreichender Energie für die Suche, allerdings kann der Wirkungsquerschnitt je nach Erzeugungsmechanismus variieren. Da die QCD keine Vorhersagen über den Produktionsquerschnitt und -mechanismus macht, könnte eine vergebliche Suche weder die Existenz von Pentaquarks ausschließen noch als Test für die Gültigkeit der QCD dienen. Die ersten positiven Resultate kamen von den Fixed-Target-Experimenten der Photon-Nukleon- und Kaon-Nukleon-Streuung mit relativ niedriger Energie LEPS (Harima, Japan), DIANA (ITEP, Russland), CLAS (JLab, USA) und SAPHIR (Univ. Bonn). Später folgten Signale von Fixed-Target-Experimenten der Lep-