

Altersbestimmung mit einzelnen Isotopen

Wann hatte das Wasser unter der Sahara zum letzten Mal Kontakt mit der Außenwelt? Und wie effektiv sind verschiedene Behandlungen der Osteoporose? Der Nachweis einzelner Isotope in magneto-optischen Atomfallen ist eine neue, aussichtsreiche Technik zur Beantwortung solcher Fragen.

Die heutige Standardmethode zur Altersbestimmung von Holz oder Knochen, die Radiocarbon- oder C-14-Methode, beruht darauf, dass der relative Anteil des radioaktiven Isotops ^{14}C im Laufe der Zeit abnimmt, wenn er nicht mehr über den Stoffwechsel im Organismus auf einem konstanten Wert gehalten wird. Aufgrund der Halbwertszeit von ^{14}C von 5730 Jahren lässt sich mit dieser Methode ein Zeitraum bis ca. 50000 Jahre abdecken. Eine Forschergruppe um Zheng-Tian Lu am Argonne National Laboratory hat nun gezeigt, wie sich mithilfe des gleichen Prinzips, aber unter Verwendung des radioaktiven Isotops ^{81}Kr mit einer Halbwertszeit von 229000 Jahren, die für die Geologie zentrale Frage nach dem Alter von Grundwasser beantworten lässt [1]. Solange Wasser und damit das spurenweise darin enthaltene Kryp-

ton mit der Außenwelt in Kontakt steht und der kosmischen Strahlung ausgesetzt ist, kommt auf 10^{12} Kr-Atome nur eines des Isotops ^{81}Kr . Unter der Sahara aber, abgeschirmt von der kosmischen Strahlung,

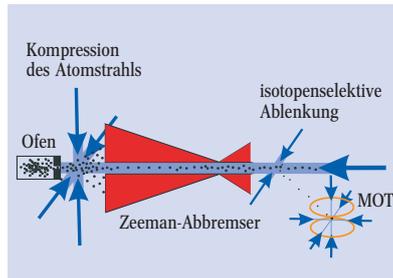


Abb. 1: Die ATTA-Methode zum empfindlichen Nachweis einzelner Isotope beruht darauf, langsame Isotope isotopenselektiv in einer magneto-optischen Falle einzufangen und über die Resonanzfluoreszenz nachzuweisen. Der skizzierte Aufbau zeigt die in Groningen für den ^{41}Ca -Nachweis benutzte Apparatur, die der von Lu et al. in großen Zügen ähnelt.

sinkt dieser geringe Anteil alle 229000 Jahre um einen Faktor zwei. Die von Lu et al. untersuchten Wasserproben sind demnach zwischen einigen hunderttausend und einer Million Jahren alt.

Doch wie lassen sich die extrem geringen Anteile von ^{81}Kr im Wasser (unter Normalbedingungen ca. 2000 Atome pro Liter) quantifizieren? Direkt beobachten lassen sich die radioaktiven Zerfälle nicht,

denn bei einer so langen Halbwertszeit sind sie viel zu selten. Auch die heutige Standardtechnik in der Radiocarbonmethode, die Beschleuniger-Massenspektroskopie, kommt für ^{81}Kr nicht infrage: die Diskrimi-

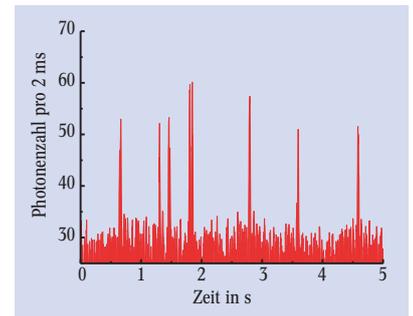


Abb. 2: Das zeitabhängige Fluoreszenzsignal aus der Falle zeigt den einzelnen Nachweis von sieben Atomen über einen Zeitraum von fünf Sekunden. Die Ca-Atome bleiben nur ca. 20 ms in der Falle, weil die angeregten Atome mit einem Verzweigungsverhältnis von 10^{-5} in einen metastabilen Zustand zerfallen, in dem sie für den Laser „unsichtbar“ sind.

nierung gegen z. B. ^{81}Rb wäre dabei praktisch unmöglich. Mit der durch Lu et al. entwickelten Methode ATTA (Atomic Trap Trace Analysis) aber ist es gelungen, Isotopenverhältnisse bis hinunter zu 10^{-15} zu messen. Der Isotopennachweis beruht dabei auf der Laserspektroskopie und mehreren isotopenselektiven Schritten. Dazu wird das Kr zunächst aus dem Wasser isoliert (durch ein Vakuum-Stripping-Verfahren). Anschließend werden die Atome durch Laser-Kühlung in einem sog. Zeeman-Abbremsler auf niedrige Geschwindigkeiten abgebremst, in einer magneto-optischen Atomfalle (MOT) eingefangen und schließlich über Resonanzfluoreszenz in der Falle beobachtet (Abb. 1). Hierbei lassen sich ohne Schwierigkeiten einzelne Atome in der Falle nachweisen! Im Gegensatz zu Atomen mit der ursprünglichen Geschwindigkeitsverteilung ist bei den kalten Atomen in der Falle die Isotopieverschiebung der relevanten Laserübergänge wesentlich größer als die Doppler-Verbreiterung des Absorptionsprofils. Durch Variation der Laserwellenlänge lassen sich daher die verschiedenen Kr-Isotope einfangen und ihre Häufigkeit in der Probe lässt sich extrem empfindlich bestimmen. Für den Kr-Nachweis wird Laserlicht bei 811 nm verwendet, um wiederholt einen zyklischen Übergang aus einem metastabilen Kr-Zustand

KURZGEFASST...

■ Dotierter Supraleiter bricht Rekord

Die kritische Magnetfeldstärke, bei der ein Supraleiter wieder normalleitend wird, ist von großer Bedeutung für Anwendungen. Amerikanische Physiker haben nun herausgefunden, dass dotiertes Magnesiumdiborid (MgB_2) (Sprungtemperatur 39 K), bei dem 3,8 % der Bor-Atome durch Kohlenstoff ersetzt wurden, ein kritisches Magnetfeld von 32 Tesla besitzt. Das ist doppelt so hoch wie bei undotiertem MgB_2 und übertrifft auch die kritische Feldstärke anderer „intermetallischer“ Supraleiter wie des technologisch wichtigen Nb_3Sn .
R. H. T. Wilke et al., Phys. Rev. Lett., im Druck

■ Paritätsverletzung in Elektron-Elektron-Streuung

Am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) ist es gelungen, die Paritätsverletzung in der Streuung zwischen Elektronen nachzuweisen. Wenn Elektronen auch primär über die paritätserhaltende elektromagnetische Wechselwirkung durch den Austausch von Photonen wechselwirken, so können sie auch Z^0 -Bosonen austauschen, und dieser Prozess der schwachen Wechselwirkung verletzt die Paritätssymmetrie. Der am SLAC gemessene

Wirkungsquerschnitt für die Streuung von spinpolarisierten Elektronen an den Elektronen eines flüssigen Wasserstofftargets hängt daher von der Polarisationsrichtung ab. Die gemessene Asymmetrie (Differenz durch Summe der beiden Wirkungsquerschnitte) betrug 175 Milliardstel, bei einem statistischen Fehler von 30 Milliardstel. Der daraus resultierende Wert für die „schwache Ladung“ des Elektrons stimmt mit den Erwartungen des Standardmodells überein.
P. L. Anthony et al., Phys. Rev. Lett. 92, 181602 (2004)

■ Sparsamer Geodynamo

Um die elektrischen Ströme im flüssigen Erdinneren anzutreiben, die das Erdmagnetfeld erzeugen, braucht es weniger Energie als bisher gedacht. Die Geophysiker Ulrich Christensen (MPI für Aeronomie) und Andreas Tilgner (U Göttingen) haben nun anhand von Computersimulationen und Laborexperimenten gezeigt, dass der Geodynamo „nur“ eine Energie von 0,2 bis 0,5 TWatt benötigt, das entspricht etwa der Energie, die hundert große Kraftwerke erzeugen. Bisherige Schätzungen gingen davon aus, dass eine Energie von über 1 TWatt nötig ist, um den Geodynamo anzutreiben.
U. R. Christensen, A. Tilgner, Nature 429, 169 (2004)

zu induzieren, in den die Atome zu Beginn der ganzen Prozedur über eine Gasentladung angeregt werden müssen. Das Alter des Probenwassers ergibt sich schließlich aus dem Vergleich der Verhältnisse ($^{81}\text{Kr}/\text{Kr}_{\text{rot}}$) in der Probe und in „frischem“ Wasser. Die Empfindlichkeit der Methode zeigt sich darin, dass Lu et al. ihre einige hundert identifizierten ^{81}Kr -Atome aus mehreren Tonnen Sahara-Grundwasser isoliert haben.

Doch damit nicht genug: Für Anwendungen in der Medizin haben Physiker am Argonne National Laboratory und an der Universität Mainz kürzlich gezeigt, dass es die ATTA-Methode auch ermöglicht, das radioaktive Isotop ^{41}Ca in einer Konzentration von weniger als 10^{-8} quantitativ nachzuweisen [2]. Im Gegensatz zu Kr lässt sich Ca im Grundzustand mit handelsüblichen Lasern bei einer Wellenlänge von 423 nm anregen. Da ^{41}Ca in der Natur nur mit einer Konzentration von ca. 10^{-14} vorkommt, eignet sich dieses Isotop hervorragend zur Markierung des Ca-Stoffwechsels bei der Osteoporose-Forschung. Ist z. B. auf medikamentöse Weise die ^{41}Ca -Konzentration im menschlichen Knochengewebe künstlich erhöht, so lässt sich durch den quantitativen Nachweis von ^{41}Ca im Urin direkt kontrollieren, ob eine zu prüfende Osteoporose-Behandlung in der Tat zu einem verminderten Ca-Abbau führt. Da ^{41}Ca eine Halbwertszeit von 103000 Jahren hat, ist seine Radioaktivität auch bei relativ hoher Konzentration unbedenklich. Zum Nachweis von ^{41}Ca kommt zwar auch die Beschleuniger-Massenpektroskopie infrage, doch ist ATTA aus rein wirtschaftlicher Sicht (table-top Apparatur!) deutlich überlegen.

Auch unter dem Datierungs-Aspekt ist ^{41}Ca äußerst interessant, um Knochenfunde aus dem Pleistozän, d. h. aus der Zeit der Menschwerdung, oder Millionen Jahre alte Kalksedimente am Ozeanboden zu datieren. Dazu muss die Empfindlichkeit der Methode allerdings noch um einige Größenordnungen verbessert werden. Während die bisherigen Messungen mit angereicherter ^{41}Ca (Verhältnis $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ von 10^{-8}) durchgeführt wurden, erfordert die Datierung einen quantitativen Nachweis von einem Verhältnis von weniger als 10^{-14} ! Neben der Gruppe von Lu in Chicago ist auch unsere Arbeitsgruppe am KVI in

Groningen dabei, sich diesem Ziel deutlich zu nähern. Um das vom ^{40}Ca verursachte Untergrundsignal weiter zu reduzieren, lenken wir in unserer Apparatur die gewünschten Isotope nach dem Zeeman-Abbremsen um 30° ab (Abb. 1), sodass nur diese in die Atomfalle gelangen. Zudem wird der Atomstrahl vor der Abbremsung mit Hilfe von Laserstrahlung komprimiert. Wie Abb. 2 zeigt, ist auch bei uns der Nachweis einzelner Atome in der Falle gelungen [3]. Angesichts der viel versprechenden Anwendungsmöglichkeiten ist zu erwarten, dass in Zukunft weitere Gruppen auf diesem Gebiet tätig werden, um die Methode zu optimieren und auf neuen Gebieten einzusetzen.

REINHARD MORGENSTERN,
RONNIE HOEKSTRA UND
STEVEN HOEKSTRA

- [1] N. C. Sturchio et al., Geophysical Res. Lett., **31**, L05503 (2004)
- [2] I. D. Moore et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 153002 (2004)
- [3] S. Hoekstra et al., in FOM Jahrbuch 2003, H. Eggen (Hrsg.), Utrecht (2004), S. 87

Wie geschmiert: Reibung in der Nanowelt

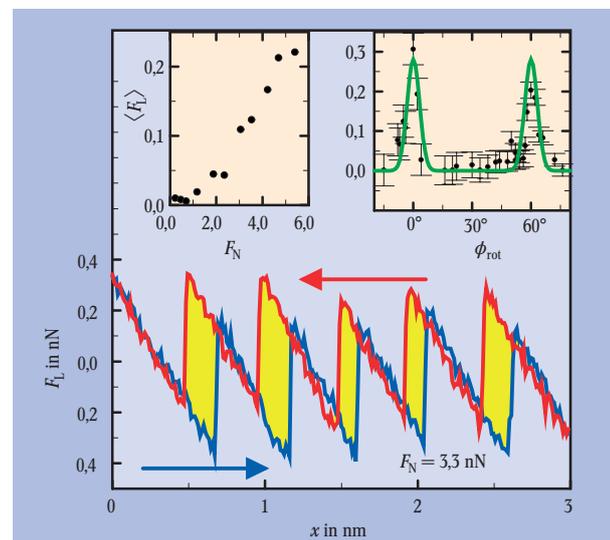
Im Allgemeinen erwartet man große Reibung in der Nanowelt, weil das Verhältnis zwischen Kontaktfläche und Volumen relativ groß ist. Zwei Forschergruppen in den Niederlanden und der Schweiz haben nun gezeigt, dass genau das Gegenteil möglich ist: Reibung zwischen ungeschmierten Festkörpern kann unmessbar klein werden.

Wenn zwei makroskopische Festkörper gegeneinander reiben, hängt die Reibungskraft, die zwischen ihnen wirkt, gemäß dem Coulombschen Reibungsgesetz erstaunlich wenig von der Relativgeschwindigkeit der beiden Festkörper ab. Prandtl lieferte dazu bereits im Jahr 1928 eine überzeugende Erklärung [1]: Sie basiert im Wesentlichen darauf, dass Energieverluste durch unkontrollierte Sprünge (bzw. Instabilitäten) einzelner oder mehrerer Atome nahezu immer unvermeidbar sind. Die Prandtlsche Analyse impliziert aber auch, dass die Gleitreibung extrem klein würde, wenn die Sprünge vermieden werden könnten. Eine mögliche Realisierung dieses Szenarios bestünde darin,

zwei schwach deformierbare Festkörper direkt – also ohne Schmiermittel – gegeneinander zu reiben. Es bliebe höchstens ein Stokesscher Reibungsmechanismus übrig, sodass die Reibung im Limes kleiner Geschwindigkeiten linear verschwände und damit um viele Größenordnungen kleiner wäre als üblich.

Die Forschungsgruppe um Ernst Meyer an der Universität Basel hat sich die Frage gestellt, ob es möglich ist, diese Hypothesen mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie im Ultrahochvakuum (UHV) nachzuweisen [2]. Sie ging dabei (implizit) von modernen Theorien über Reibung aus, die besagen, dass (elastische) Instabilitäten auf mikroskopischer Skala im UHV zwischen chemisch inaktiven Festkörpern bei kleinen Drücken nicht zu erwarten sind [3]. Das heißt, unkontrollierte Sprünge und einhergehende Ener-

Prof. Dr. Reinhard Morgenstern, Prof. Dr. Ir. Ronnie Hoekstra, M. Sc. Steven Hoekstra, Kernfysisch Versnellend Instituut, Rijksuniversiteit Groningen, Zernikelaan 25, 9747 AA Groningen, Niederlande



Beim „Rückgleiten“ der Spitze eines Rasterkraftmikroskops über ein Substrat tritt eine Hysterese zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegung auf. Die gelbe eingeschlossene Fläche entspricht dem Energieverlust [2]. Reduziert man die Normalkraft F_N , so verschwindet die Gleitreibung $\langle F_L \rangle$ unter einem gewissen Schwellenwert (linkes Inset). Das rechte Inset veranschaulicht die Abnahme der Reibung mit zunehmender Verdrehung ϕ_{rot} zwischen Grafitflocke und Substrat [5].

gie-dissipation wären nur noch dann möglich, wenn die Spitze des Rasterkraftmikroskops (RKM) quasi als Gesamtheit instabil würde, sprich wenn die RKM-Spitze durch „Rückgleiten“ in periodischen Abständen in Energieminima einrasten würde. Auf das RKM-Experiment bezogen hieße die von Prandtl aufgestellte Bedingung für die Abwesenheit Coulombscher Reibung: Die maximale (laterale) Krümmung des Potentials zwischen Spitze und Substrat muss kleiner sein als die (effektive) Federkonstante der RKM-Spitze oder des Kantilevers, denn dann