

## ■ Heiß wie die Sonne

Ein neues Experiment zum Schmelzen von Eisen bei hohem Druck ergibt erstmals ein konsistentes Bild der Temperatur im Erdkern.

Der Abstand von der Erde zur Sonne beträgt rund 150 Millionen Kilometer, zum Zentrum der Erde sind es nur 6371 km. Dennoch wissen wir weitaus besser, wie heiß die Photosphäre der Sonne ist (5777 K). Dies überrascht nicht, da wir die Sonne direkt beobachten können, die Eigenschaften des Kerns jedoch hauptsächlich aus der Seismologie kennen, d. h. indirekt über elastische Wellen. Solche Messungen zeigen, dass der Erdkern aus einem flüssigen äußeren und einem festen inneren Kern besteht, der im Laufe der Erdgeschichte aus der Kernflüssigkeit kristallisierte. Die Schmelztemperatur des Kernmaterials eignet sich also als Geothermometer, da es an der Grenze des inneren Kerns bei einer Tiefe von 5150 km in flüssiger und fester Form koexistiert und sich dort seine Schmelzkurve und das Temperaturprofil durch den Erdkern schneiden (Abb. 1). In dieser Tiefe herrscht ein Druck von 330 GPa und die Temperatur beträgt mehrere 1000 K – Bedingungen, die im Labor schwierig, falls überhaupt, zu verwirklichen sind. Eine weitere Unsicherheit besteht hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung

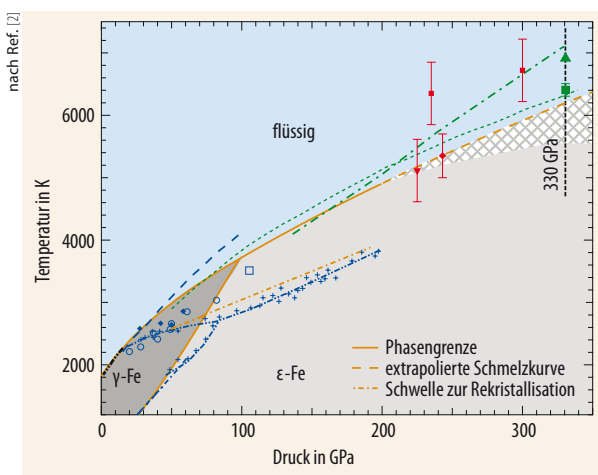


Abb. 2 Verschiedene Experimente mit Diamantstempelzellen (blaue Symbole und Linien) weisen auf eine deutlich niedrigere Schmelztemperatur von Eisen an der Grenze des inneren Erdkerns (bei 330 GPa) hin als Schockwellenexperimente (rote Symbole) oder Simulationen (grüne Symbole und Linien). Die neuen Ergebnisse (orange) wurden ab einem Druck von 205 GPa extrapoliert und ergeben ein konsistentes Bild.

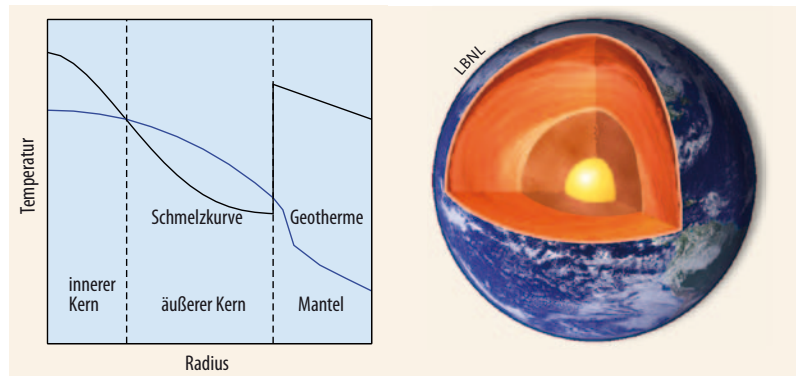


Abb. 1 Die Schmelzkurve von Eisen bei hohem Druck und der Temperaturverlauf durch den Erdkern – die Geotherme – schneiden sich an der Grenze des inne-

ren Erdkerns: Im flüssigen äußeren Erdkern verläuft die Geotherme oberhalb der Schmelzkurve, im festen inneren Erdkern unterhalb.

des Kerns: Geochemische und geophysikalische Argumente weisen jedoch stark darauf hin, dass der Kern zu 90 Prozent aus Eisen besteht [1]. Zur Phasengrenze von Eisen bei hohen Temperaturen und Drücken gab es bislang verschiedene experimentelle und theoretische Ergebnisse, die jedoch nicht miteinander konsistent waren. Ein neues Experiment hat kürzlich diese Widersprüche beseitigt und die Temperatur des Erdkerns deutlich nach oben korrigiert [2].

Im Labor lassen sich Drücke von mehr als 100 GPa erzeugen, indem man eine Probe zwischen zwei Diamanten zusammendrückt und durch die Diamanten hindurch mit Hilfe eines Lasers erhitzt. Dabei den Schmelzpunkt der Probe zu bestimmen, ist nicht einfach, da es kein einheitliches Kriterium dafür gibt. Auch lässt sich die Temperatur in der Zelle nur ungenau bestimmen, mit Pyrometrie über einen beschränkten Frequenzbereich. Schließlich führt die hohe Wärmeleitfähigkeit des Diamanten leicht zu thermischen Gradienten, und bei hohen Temperaturen können durch chemische Reaktionen Eisenkarbide entstehen [3], die einen sehr hohen Schmelzpunkt haben.

Ein hoher Druck lässt sich auch dynamisch erzeugen, durch Beschuss einer Probe mit einem Projektil. Dabei entsteht eine

Schockwelle, deren Geschwindigkeit gemessen wird. Mit der Projektilgeschwindigkeit steigen Druck und Temperatur gleichzeitig an, sodass nur bestimmte Punkte entlang der materialspezifischen Hugoniot-Kurve für Experimente zugänglich sind. Der Schmelzpunkt lässt sich relativ einfach bestimmen, da in der berechneten Schallwellengeschwindigkeit eine Diskontinuität auftritt [4, 5].

In der Vergangenheit wurden mit beiden Verfahren Messungen durchgeführt. Setzt man jedoch die Ergebnisse der Diamantstempelzelle zu den Bedingungen der Schockwellenexperimente fort, so unterscheiden sich Extrapolation und Messergebnisse um rund 1000 K (Abb. 2). Molekulardynamiksimulationen mit Hilfe der Dichtefunktionaltheorie (DFT) haben im Verlauf des letzten Jahrzehnts eher die Ergebnisse der Schockwellenexperimente bestätigt [6], wobei sich jedoch auch hier deutliche Unterschiede ergeben [6–8].

Eine französische Forschergruppe hat kürzlich an der ESRF in Grenoble Schmelzexperimente für Eisen in der Diamantstempelzelle durchgeführt und dabei zwei Kriterien genutzt, die mit zeitaufgelösten Röntgenbeugungsaufnahmen zugänglich sind: das Erscheinen eines diffusen Brechungsringes, der

vom flüssigen Eisen stammt, sowie eine verschwindende thermische Expansion der festen Phase [2]. Beim Erreichen des Schmelzpunkts entsteht an der Oberfläche der Probe eine geschmolzene Schicht, im darunterliegenden festen Teil hört zum gleichen Zeitpunkt trotz weiter ansteigender Laserleistung die Ausdehnung des Festkörpers auf. Eine genaue Bestimmung der Temperatur und der Gitterkonstanten ist nur durch die hohe Zeitauflösung (im Sekundenbereich) möglich.

Dieses Schmelzkriterium ist ein Fortschritt gegenüber anderen Versuchen in der Diamantstempelzelle, da es Diffraktionsexperimente [9] mit der Beendigung der thermischen Expansion verknüpft. Dies geht einher mit einer konstanten Temperatur der Probe trotz erhöhter Laserleistung, was zusammen mit optischen Beobachtungen von Bewegung an der Oberfläche der Probe bereits in der Vergangenheit als Schmelzkrite-

rium benutzt wurde [10]. In letzter Zeit ist die Bestimmung des Lamb-Mössbauer-Faktors in nuklearer Resonanz-Streuung (Synchrotron-Mössbauer) dazugekommen [11], dessen Abnahme ein Verschwinden des elastischen Resonanzsignals des Kristalls, und damit seiner Festigkeit, aufzeigt.

Mit ihrer Analyse erhalten Azellini et al. [2] eine Schmelzkurve, die in etwa den DFT-Molekulardynamik-Simulationen von Alfe et al. [6] folgt (Abb. 2) und deren Extrapolation durch die Werte der Schockwellenexperimente führt [4, 5]. Die neu bestimmten Werte liegen damit deutlich höher als bisherige Messungen in der Diamantstempelzelle [9–11]. Die Autoren erklären die niedrigeren Werte, die auf optischen Beobachtungen basieren [10], mit einer thermisch aktivierten Rekristallisation von Eisen zu größeren Kristallen, was Beugungsmuster von Einkristallen dokumentieren.

Die Extrapolation der gemessenen Schmelzkurve ergibt eine Temperatur beim Druck des inneren Erdkerns von  $6230 \pm 500$  K [2]; die tatsächliche Temperatur des Erdkerns wird durch die leichten Elemente im Erdkern allerdings etwas niedriger sein [1], vergleichbar mit der Photosphäre der Sonne.

Gerd Steinle-Neumann

- [1] G. Steinle-Neumann, Physik Journal November 2008, S. 27
- [2] S. Anzellini et al., Science **340**, 464 (2013)
- [3] O. Narygina et al., PCM **38**, 203 (2011)
- [4] J. M. Brown und R. G. McQueen, J. Geophys. Res. **91**, 7485 (1986)
- [5] J. H. Nguyen und N. C. Holmes, Nature **427**, 339 (2004)
- [6] D. Alfe et al., Phys. Rev. B **65**, 165118 (2002)
- [7] A. Laio et al., Science **287**, 1027 (2000)
- [8] A. B. Belonoshko et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 3638 (2000)
- [9] G. Y. Shen et al., Geophys. Res. Lett. **25**, 373 (1998)
- [10] R. Boehler, Nature **363**, 534 (1993)
- [11] J. M. Jackson et al., Earth Planet. Sci. Lett. **362**, 143 (2013)

## ■ Präzision am Antiproton

Ein Fallenexperiment am CERN bestätigt mit bislang unerreichter Genauigkeit, dass die magnetischen Momente von Proton und Antiproton übereinstimmen.

Paul Dirac stellte 1928 auf der Suche nach einer relativistischen Formulierung der Quantenmechanik seine Theorie des Elektrons auf [1]. Daraus ergaben sich zwei weitreichende Folgerungen: die Existenz des Antiteilchens des Elektrons (Positron) und das magnetische Spinnmoment des Elektrons. Im heutigen Verständnis beschreibt eine relativistische Quantenfeldtheorie die fundamentalen Wechselwirkungen, basierend auf dem Standardmodell der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung. In den relativistischen Quantenfeldtheorien kommt die Symmetrie zwischen einem Teilchen und seinem Antiteilchen im CPT-Theorem zum Ausdruck, nach dem die physikalischen Gesetze unverändert bleiben, wenn man zugleich Teilchen durch Antiteilchen ersetzt (C: Ladungskonjugation), rechtshändig durch linkshändig

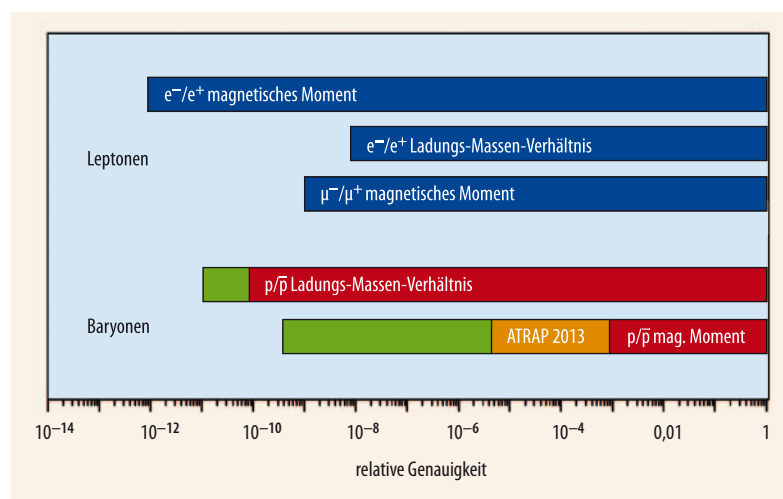


Abb. 1 Bisher erreichte Genauigkeiten beim Vergleich der Eigenschaften von Elektronen und Positronen, Myonen und Antimyonen (blau) bzw. Protonen und

Antiprotonen (rot) sowie das Ergebnis von ATRAP (orange). Geplante Experimente zielen nochmal eine deutlich höhere Genauigkeit an (grün).

Koordinaten vertauscht (P: Raumspiegelung) und die Zeitvariable rückwärts laufen lässt (T: Zeitumkehr). Bleibt die CPT-Symmetrie erhalten, so sind die trägen Massen,

die Lebensdauern, die elektrischen Ladungen und die magnetischen Momente (letztere bis auf das Vorzeichen) von Teilchen und Antiteilchen exakt gleich. Bis zum