

Borexino im italienischen Gran Sasso Labor, das ab 2003 erstmals selektiv die Neutrinos aus dem ${}^7\text{Be}$ -Zweig nachweisen kann.

Die experimentelle Neutrino-Physik befindet sich in einem „goldenen Zeitalter“: Nachdem 1998 die Oszillation von atmosphärischen Neutrinos $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ durch das japanisch-amerikanische Super-Kamiokande-Experiment beobachtet wurde, stehen wir dicht vor der Aufklärung der Oszillationseffekte bei den Neutrinos. Dass die Umwandlungen der solaren und atmosphärischen Neutrinos groß bzw. sogar maximal sind, ist eine der großen Überraschungen der bisherigen Experimente, die die Theorie herausfordern. Eine weitere Überraschung könnte die für die Theorie ebenso wichtige absolute Massenskala von Neutrinos liefern. Diese fundamentale Größe bleibt auch nach den SNO-Resultaten weiterhin unbekannt, da Oszillationsexperimente wie SNO nur Massendifferenzen messen können. Hier kommt zukünftigen Experimenten zum Doppelbetazerfall und Tritiumbetazerfall wie KATRIN eine Schlüsselrolle zu.

Rückblickend verdeutlicht die Historie der Sonnenneutrinos mit über drei Jahrzehnten großer experimenteller Anstrengungen und dem nun gelösten Rätsel der fehlenden Sonnenneutrinos einmal mehr, dass die Grundlagenforschung langfristig angelegt sein muss.

GUIDO DREXLIN

- [1] Q. R. Ahmad et al., nucl-ex/0204008 und nucl-ex/0204009
- [2] Vortragskopien der Konferenz unter <http://neutrino2002.ph.tum.de/>
- [3] Q. R. Ahmad et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 071301

Spuren im Sand

Wer am Strand mit bloßen Füßen spaziert, wird rasch spüren, dass der Sandboden meist eine gerippte Oberfläche aufweist. Die mehrere Zentimeter großen streifenförmigen Rippeln entstehen durch das periodische Auf- und Abströmen der Brandungswelle. Ähnliche Naturphänomene kennt man – auf viel größerer Skala – von den riesigen Sandmeeren in den Wüsten der Erde. Bis heute ist nicht im Detail verstanden, wie sich die Sandmassen unter dem Einfluss von Wind- oder Wasserströmungen verformen

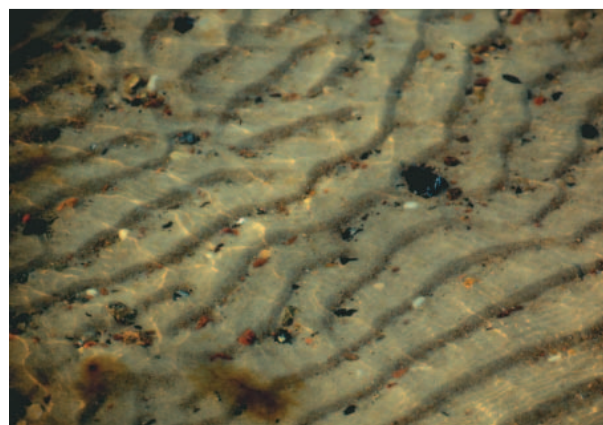
und bewegen, eine wichtige Thematik für die Wüstenländer oder für die küstennahe Schifffahrt. Gilt es doch, die „Versandung“ von Wasserstraßen (z. B. in der Scheldemündung) vorherzusagen und mit geeigneten Maßnahmen eventuell entschärfen zu können. So könnte der Stadt Antwerpen ein ähnliches Schicksal erspart bleiben wie Brügge, das durch die seit dem 14. Jahrhundert begonnene Versandung des Zwin seine Funktion als Seehafen verloren hat. Neben den Wasserbauingenieuren und den Geowissenschaftlern haben diese grundlegenden Phänomene der Dünenentstehung in den vergangenen Jahren starkes Interesse auch bei den Physikern geweckt. Sie bilden ein Kernproblem der neuen Disziplin „Physik der granularer Materie“.

Einer dänisch-deutschen Forschergruppe ist es kürzlich gelungen, einen wichtigen Beitrag zur bisher ungeklärten Frage „Wie entwickeln sich Sandrippeln, wenn sie einer oszillatorischen Wasserströmung ausgesetzt sind?“ zu leisten [1]. Andersen et al. gelang es mit Hilfe von modernen Datenanalysemethoden und unter Einbeziehung von experimentellen Resultaten, ein quantitativ und nicht nur qualitativ befriedigendes Modell für die zeitliche Evolution der Rippelmuster zu entwickeln. Das Modell [2] betrachtet den Massentransport (Austausch von Sandkörnern) zwischen benachbarten Rippeln, die durch turbulente Strömungswirbel zwischen den Rippelkämmen verursacht werden. Diese so genannten „Vortex-Rippeln“ wurden schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Ayrton und später intensiv von Bagnold in Laborexperimenten untersucht [3].

Im Kopenhagener Experiment wird das periodische Auf- und Abfließen einer Brandungsströmung in einem ringförmigen, mit Wasser gefüllten Kanal simuliert, dessen Boden mit einer Sandschicht bedeckt ist. Der Kanal ist auf eine bewegliche Scheibe montiert, die über eine Pleuelstange mit einem Motor verbunden ist, und kann somit um die Ringachse hin- und herbewegt werden. Rippeln entstehen, wenn der Kanal zu periodischen Drehschwingungen um die Ringachse angeregt wird. Ähnliche Schwingapparate existieren schon seit Ende der 1990er Jahre auch in Austin/Texas und Paris [4]. Zu Beginn des Experiments werden durch Oszillationen

mit kleiner Amplitude etwa 50 kleine Rippeln (mittlere Größe ca. 3 cm) auf der Sandoberfläche erzeugt. Anschließend wird die Schwingungsamplitude auf 6 cm erhöht. In den folgenden 20 Minuten lässt sich beobachten, wie die kleinen Rippeln wachsen, teilweise miteinander verschmelzen und sich schließlich ein stabiles gleichförmiges Muster aus ca. 20 größeren Rippeln bildet.

Um die Dynamik zu simulieren, betrachten die Autoren, welche Sandmenge ein Rippel während einer Schwingung mit seinen beiden Nachbarn austauscht. Dadurch ändert sich die (Wellen)länge λ_j , d.h. der Abstand zwischen Rippelkamm j und seinem Nachbarn $j+1$, gemäß der Massenbilanzgleichung $d\lambda_j/dt = -f(\lambda_{j-1}) + 2f(\lambda_j) - f(\lambda_{j+1})$. Das Modell setzt voraus, dass die Wechselwirkungsfunktion f , die den (dimensionlos gemachten) Massenverlust bzw. -gewinn des j -ten Rippels pro Zeiteinheit angibt, allein von der Rippelgröße λ abhängt. Nun kommt



es darauf an, diese Funktion $f(\lambda)$ zu finden. Dafür wurden in der Vorgängerarbeit [2] einfache, konvexe Testfunktionen verwendet, die lediglich die Bedingungen erfüllen, dass sie bei einer charakteristischen Länge λ_c ein Maximum besitzen und für $\lambda \rightarrow 0$ und $\lambda \rightarrow \lambda_{\max}$ verschwinden. Auf diesen „cartoonartigen“ Modellfunktionen basierende Simulationen lieferten ein qualitativ ähnliches Szenario (Selektion einer stabilen Rippellänge) wie die jetzt vorgestellten Experimente.

In der aktuellen Veröffentlichung gehen die Autoren einen Schritt weiter. Die Wechselwirkungsfunktion wird direkt aus den experimentellen Daten gewonnen. Hierfür wird eine neue Analyseverfahren verwendet, die man als „nichtlineare, nichtparametrische Regression“ bezeichnen kann. Sie wurde 1985 von L. Breiman und J. H. Friedman

Jeder kennt die Rippeln im Sand, die durch das Auf- und Abströmen des Wassers am Strand entstehen. Warum sie entstehen, ist aber noch nicht vollständig verstanden (Foto: C. Krülle)

[5] vorgestellt und ist unter dem Kürzel ACE-Algorithmus („alternating correlation estimation“) bekannt. Das Programm variiert die Wechselwirkungsfunktion $f(\lambda)$ im Raum aller messbaren Funktionen, bis ein absolutes Minimum für den Fehler χ^2 gefunden ist. Dieser Fehler beschreibt die Abweichungen von den Messdaten.

Mit der gewonnenen Funktion lässt sich die Massenbilanzgleichung numerisch integrieren und sich die zeitliche Entwicklung einer anfänglich gegebenen Rippellandschaft simulieren. Die Übereinstimmung mit der experimentell gemessenen Dynamik ist gut, was nicht verwundert, weil die Wechselwirkungsfunktion so genau wie möglich aus den experimentellen Daten ermittelt wurde. Die kleinen Anfangsrippeln sterben jedoch im Modell langsamer aus als im Experiment. Dort gibt es sechs Rippelpaare von nächsten Nachbarn, die gemeinsam überleben, in der Simulation kein einziges solches Paar. Die komplexe Dynamik der Rippeln wird auf die universelle Wechselwirkungsfunktion reduziert. Das ist eine phänomenologische Beschreibung der experimentellen Resultate. Die Gestalt von $f(\lambda)$ wird nicht aus mikroskopischen Betrachtungen hergeleitet. Das Modell ist außerdem nicht in der Lage, die Entstehung von neuen Rippeln zu beschreiben. Die Autoren sind im Moment dabei, das Modell zu erweitern, um die Abhängigkeit der Wechselwirkungsfunktion von der Größe der Strömungswirbel zu berücksichtigen. Sie erhoffen sich dadurch genauere Erkenntnisse über das komplexe Wechselspiel zwischen Wasserströmung und Sandtransport. Die beteiligten Forscher lassen sich hierfür auch gerne durch die Natur inspirieren – z. B. bei gemeinsamen Strandspaziergängen.

CHRISTOF KRÜLLE

- [1] K. H. Andersen et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 234302 (2002)
- [2] K. H. Andersen et al., Phys. Rev. E **63**, 066308 (2001)
- [3] H. Ayrton, Proc. R. Soc. London, Ser. A **84**, 285 (1910); R. A. Bagnold, Proc. R. Soc. London, Ser. A **187**, 1 (1946)
- [4] M. A. Scherer et al., Phys. Fluids **11**, 58 (1999); A. Stegner und J. E. Wesfreid, Phys. Rev. E **60**, R3487 (1999)
- [5] L. Breiman und J. H. Friedman, J. Am. Stat. Assoc. **80**, 580 (1985)

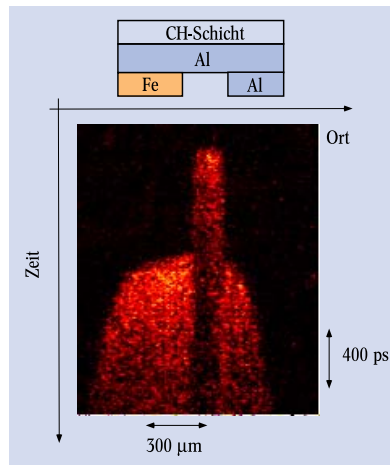
Dr. Christof Krülle,
Experimentalphysik
V, Universität
Bayreuth,
95449 Bayreuth

Prof. Dr. Ronald
Redmer, Fachbe-
reich Physik der
Universität Rostock,
18051 Rostock

Eisen unter hohem Druck

Schockwellenexperimente mit Lasern messen die Zustandsgleichung von Eisen bis 40 Mbar

Die Zustandsgleichung von Eisen unter hohem Druck ist für die Geophysik von großem Interesse. Der Erdkern besteht im Wesentlichen aus Eisen, wobei im Zentrum Drücke bis zu 3,7 Megabar erreicht werden. Speziell der Übergangsbereich vom festen inneren zum flüssigen äußeren Kernbereich ist für realistische Erdmodelle wichtig. Noch höhere Drücke könnten im Zentrum von noch zu entdeckenden, erdähnlichen extrasolaren Planeten auftreten, deren Masse größer als die der Erde ist. Falls das Erde-Mond-System durch die Kollision der frühen Erde mit einem anderen Objekt entstanden ist, sind bei diesem Einschlag ebenfalls Drücke bis zu einigen 10 Megabar erzeugt worden. Gerne würde man wissen, wie unter solchen Extrembedingungen Druck und Temperatur vom Volumen abhängen.



Um die Zustandsgleichung von Eisen bei hohen Drücken zu messen, wird eine Probe verwendet, die neben dem Eisen als Referenzmaterial Aluminium enthält (oben). Diese Probe wird von oben mit einem starken Laser beschossen; eine Streak-Kamera misst hinter der Probe zeit- und orts aufgelöst die Emission.

Im Bereich oberhalb von 10 Megabar lagen bisher nur neun Werte für die Zustandsgleichung von Eisen vor, die in Schockwellenexperimenten mit ballistischen Kompressoren (*Gas Guns*) und mit chemischen bzw. unterirdischen Kernwaffenexplosionen gemessen wurden. Einem internationalem Forscherteam aus Italien, Frankreich, Großbritannien und den USA [1] ist es jetzt gelungen, mit dem

Hochleistungs-Laser Phebus in Limeil-Valenton in Frankreich neun weitere Punkte im Bereich zwischen 10 und 45 Megabar zu bestimmen und somit den experimentellen Datensatz auf einen Schlag zu verdoppeln. Der Phebus-Laser liefert Pulse von 4 ns Dauer, die entsprechend fokussiert eine Energiedichte von 10^{15} – 10^{14} W/cm² auf dem Target erzeugen. Das Target besteht aus mehreren Schichten, durch die die Laser-generierte Schockwelle propagiert. Das untersuchte Material Eisen und ein Referenzmaterial, üblicherweise Aluminium, werden nebeneinander auf der Rückseite des Targets aufgebracht; beide Proben sind etwa 20 Mikrometer dick.

Eine Streak-Kamera misst hinter der Probe das Emissionsspektrum, sodass orts- und zeitaufgelöst der Ausbruch der Schockwelle aus dem aufgeheizten Material festgestellt werden kann. Die Geschwindigkeit der Schockwellen in beiden Materialien wird mit der VISAR-Technik bestimmt (*Velocity Interferometer System for Any Reflector*): Ein Probelaser mit 10 ns Pulsen und 1 mJ Energie misst in Kombination mit einer weiteren Streak-Kamera von hinten wieder orts- und zeitaufgelöst das Reflexionsvermögen der Probe. Durch Vergleich mit der bekannten Zustandsgleichung des Referenzmaterials Aluminium lässt sich dann unter Zuhilfenahme der so genannten Hugoniot-Gleichungen aus der Schockwellenphysik die Zustandsgleichung von Eisen bestimmen.

Die neuen Ergebnisse deuten darauf hin, dass Eisen in diesem Bereich weniger kompressibel ist als bisher angenommen. Die Abweichungen von den oft als Standard betrachteten Werten der Datensammlung Sesame [2] sind deutlich und betragen etwa 10 Prozent. Sesame gibt für etwa 150 Materialien die Zustandsgleichung in einem großen Bereich von Dichte und Temperatur an und basiert auf theoretischen Modellen, die im Los Alamos National Laboratory entwickelt wurden. Die Übereinstimmung der neuen Ergebnisse mit den anderen Experimenten und anderen Modellrechnungen ist dagegen viel besser.

Die neue Schockwellentechnik mittels Laser hat auch für das Verständnis von Wasserstoff unter hohem Druck eine große Bedeutung. US-Forscher hatten 1996 in ähnlichen Experimenten mit dem Nova-Laser in Livermore im Bereich um