

tistischen Signifikanz, dem Zweifel an der Eindeutigkeit und der Möglichkeit einer Fehlinterpretation – diese Ergebnisse bisher noch nicht veröffentlicht.

Die Physiker der ATHENA-Kollaboration nutzten die Gunst die Stunde, freuten sich über eine hohe Ladungsrate und Dichte der Posi-

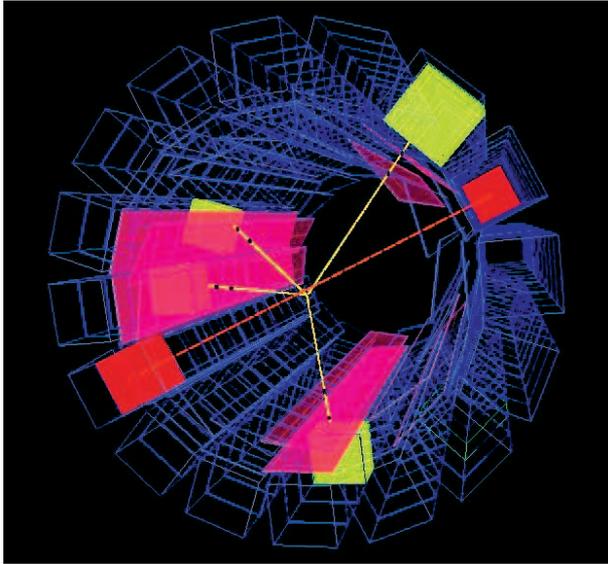


Abb. 2: Eine typische Ereignissignatur, wie sie der Vernichtung eines Antiwasserstoff-Atoms an der Wand der Teilchenfalle zuge-schrieben wird. Das Antiproton annihiliert mit einem Proton zu vier geladenen Pionen (gelbe Spuren), die in Mikrostreifendetektoren (violett) und CsI-Kristallen (gelbe Würfel) nachgewiesen werden. Das Positron annihiliert mit einem Elektron zu zwei entgegengesetzt gerichteten γ -Quanten (rote Spuren), die ebenfalls in CsI-Kristallen detektiert werden (rote Würfel).

tronen sowie über ein Spur-rekonstruierendes Detektionssystem. Die neutralen Antiwasserstoff-Atome driften an den Fallenrand, wo Antiproton und Positron vernichtet werden. Die Beobachtung entsprechender Spuren zu gleicher Zeit ($\Delta t \approx 5 \mu\text{s}$) und am gleichen Ort ($\Delta x \approx 8 \text{ mm}$) liefert den Hinweis auf die Produktion von Antiwasserstoff-Atomen (Abb. 2).

ATHENA hat nun 131 ± 22 solcher Ereignisse überzeugend nachgewiesen. Nach Aussagen der Kollaboration ist in dem durchgeführten Experiment weder der Produktionsmechanismus noch der Quantenzustand des beobachteten Gebildes ($\bar{p} + e^+ = \bar{H}^0$) bekannt. Hier warten noch viele Probleme darauf, von den Kollaborationen am AD gelöst zu werden. Viel Glück ist beiden, der ATHENA- und der ATRAP-Gruppe zu wünschen; denn schlussendlich wartet spannende, fundamentale Physik auf Antworten.

WALTER OELERT

Prof. Dr. Walter Oelert, Institut für Kernphysik I, Forschungszentrum Jülich, und CERN, Genf

- [1] M. Amoretti et al., Nature **419**, 456 (2002)
- [2] G. Baur et al., Phys. Lett **B 368**, 251 (1996)
- [3] G. Blanford et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 3037 (1998)
- [4] R. Bluhm et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 2254 (1999)
- [5] M. Niering et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5496 (2000)
- [6] A. Huber et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 468 (1998)

Wie glaubwürdig sind Klimamodelle?

Eine kürzlich veröffentlichte statistische Analyse hat gezeigt, dass die gängigen Klimamodelle ein spezielles Verhalten der natürlichen Klimavariabilität der Atmosphäre ungenügend wiedergeben. Dennoch kann kein Zweifel daran bestehen, dass sich die Modelle bewährt und zahlreiche Tests bestanden haben.

Das System Erde zeichnet sich durch reichhaltige komplexe Dynamik aus, verursacht durch vielfältige intern rückgekoppelte Prozesse und Kreisläufe sowie externen Antrieb. Die systemare Betrachtungsweise, die Methoden der Nichtlinearen Dynamik entscheidend einbezieht, hat in den letzten Jahren zu wesentlichen neuen Einsichten und vielversprechenden Aussichten in den Erdwissenschaften geführt.

Von besonderem öffentlichen Interesse ist dabei die Klimaforschung, soll sie doch Probleme dezidiert lösen wie etwa die Frage, ob Klimavariationen anthropogen verursacht oder natürlich sind, und klimabedingte Katastrophen möglichst quantitativ vorhersagen – eine gigantische Herausforderung.

Ein wichtiges Werkzeug sind dabei dynamische Klimamodelle, die auf hydrodynamischen Gleichungen basieren und insbesondere Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre¹⁾ und Landoberfläche einbeziehen (Biosphäre und chemische Stoffkreisläufe werden zunehmend berücksichtigt). Die auf den leistungsfähigsten verfügbaren Computern laufenden, aufwändigen Programme sollen die Dynamik der wichtigsten Komponenten des Klimasystems simulieren. Mit ihnen werden beispielsweise Szenarien des künftigen, vom anthropogenen Treibhauseffekt veränderten Erdklimas berechnet.

Voraussetzung für die Glaubwürdigkeit derartiger Simulationen ist,

dass Klimamodelle auch die natürliche Variabilität des Klimas gut wiedergeben. Das führt zu dem äußerst schwierigen Problem, Realitätsnähe bzw. Reichweite und Aussagekraft der Klimamodelle zu testen. Dazu benutzt man moderne Messverfahren (z.B. Radiosondenaufstiege) wie auch historische klimatologische Messreihen als primäre Daten.

Beide Typen von Messreihen sind nicht hinreichend für die Validierung von Klimamodellen: Die aktuellen Daten überspannen nur wenige Dekaden, und die historischen stehen nur lokal auf relativen Zeitskalen von einigen hundert Jahre zur Verfügung wie etwa in Prag seit 1775.

Moderne Messtechnik ermöglicht es, Sedimente, Eisbohrkerne und viele andere Messobjekte detailliert zu untersuchen; sie erschließen sekundäre Informationsquellen für das erdgeschichtliche Klima bis vor etlichen tausend Jahren und darüber hinaus in wachsender zeitlicher Abtaste.

Die historischen klimatologischen Messreihen stellen seit langem eine besondere Herausforderung an die Methoden der Zeitreihenanalyse. Mittels linearer statistischer Verfahren werden seit etwa hundert Jahren „verborgene“ Periodizitäten in den Klimazeitreihen identifiziert. Die Verfahren der nichtlinearen Zeitreihenanalyse ließen neuartige Charakteristika und insbesondere Modellvergleiche erwarten; sie offenbarten aber auch die besonderen Schwierigkeiten mit den Klimadaten. Ein Meilenstein war die Bestimmung fraktaler Dimensionen aus einer Zeitreihe eines Sauerstoffisotops aus einem pazifischen Tiefsee-Bohrkern, aus der C. und G. Nicolis [1] folgerten, dass sich wichtige dynamische Eigenschaften des Klimasystems mit einigen wenigen (maximal sieben) gekoppelten gewöhnlichen Differentialgleichungen beschreiben lassen. Daher sollten Klimamodelle stark zu vereinfachen und mit signifikant geringerem Aufwand simulierbar sein. Es ist P. Grassberger zu verdanken, dass er auf ein Artefakt in den Rechnungen hinwies und somit diese überzogene Hoffnung schnell relativierte [2].

Dennoch wurde schon früh erkannt, dass mit geeigneten nichtlinearen Analysemethoden weitergehende Tests von Klimamodellen möglich sein sollten. Seitdem sind einige vielversprechende nichtlinea-

re Parameter und Methoden zu derartigen Tests vorgeschlagen und auf Klimadaten und -modelle angewandt worden. Darunter ist die trendbeseitigte Fluktuationsanalyse (DFA) zu nennen.

Die DFA hat zum Ziel, die Erhaltungstendenzen (Persistenzen) fluktuierender Messgrößen zu identifizieren. Im Unterschied zu linearen oder exponentiellen Trends, wie etwa die systematische Zunahme der globalen Temperatur, handelt es sich dabei um Korrelationen und die Art ihres Abfalls, also um das „Gedächtnis“ des Systems. Es wird nach Abzug von Trends untersucht, inwieweit das aktuelle Klima im Mittel von dem vor einem Monat, Jahr usw. abhängt. Man findet eine besonders ausgeprägte Persistenz während stabiler Großwetterlagen, wenn etwa einem zu warmen Tag mit großer Wahrscheinlichkeit ein weiterer zu warmer folgt.

Die DFA ist eine ausgeklügelte Methode, solche Persistenzen in Messreihen natürlicher Systeme aufzuspüren und selbst schwach ausgeprägte Langzeitkorrelationen zu identifizieren. Diese Methode ist mit ziemlichen Erfolg auf verschiedenste Messreihen aus Klima, Genetik oder Kardiologie angewendet worden²⁾.

In einer vielbeachteten Arbeit haben Koscielny-Bunde et al. [3] gefunden, dass Temperaturfluktuationen an mehreren Stellen der Erde ein sehr ähnliches Gedächtnis aufweisen; das Korrelationsverhalten fällt über Zeitskalen von Monaten bis zu 30 Jahren nach einem Potenzgesetz ab. Dieses interessante Ergebnis subtiler nichtlinearer Datenanalyse ist folgerichtig kürzlich von einer interdisziplinären Gruppe um A. Bunde (Gießen), S. Havlin (Tel Aviv) und J. Schellnhuber (Potsdam) benutzt worden, um Klimamodelle auf die Wiedergabe dieses Gedächtnisses hin zu testen [4]. Die Autoren stellten Temperaturzeitreihen von sechs Messstationen (Prag, Kasan, Seoul, Luling/Texas, Vancouver und Melbourne) simulierte Zeitreihen gegenüber, die aus sieben repräsentativen Klimamodellen des Typs AOGCM (atmosphere-ocean general circulation model) ermittelt wurden. Mittels DFA zeigten sie, dass diese Klimamodelle das Gedächtnis der atmosphärischen Klimafluktuationen deutlich unterschätzen, wenn sie überhaupt Langzeitkorrelationen aufweisen.

Die Abweichung verringert sich, wenn die Modelle Sulfataerosole besonders berücksichtigen.

Dennoch bleibt die Schlussfolgerung bestehen, dass die natürliche Klimavariabilität der Atmosphäre auf der Zeitskala von Monaten bis zu 30 Jahren in den Klimamodellen ungenügend wiedergegeben wird. Diese bereits im Titel³⁾ der Publikation [4] sehr prägnant formulierte Aussage hat sowohl in der Öffentlichkeit als auch in Fachkreisen ein ziemlich starkes – obgleich durchaus unterschiedliches – Aufsehen erregt. Insbesondere etliche Journalisten sehen sich in ihren generellen Zweifeln an Klimamodellen bestätigt, während der bekannte Klimatologe Peter Cox vom britischen Hadley Centre bezweifelt, dass Klimamodellen die Fähigkeit, langfristige Trends zu reflektieren, durch diese Studie abgesprochen werden könnte.

Ein Kritikpunkt an der Untersuchung [4] ist, dass die Autoren ein wenig leichtfertig Daten mit Modellen verglichen haben. Es ist darauf hinzuweisen, dass die heutigen Supercomputer nur eine Gitterauflösung von etwa 200 km erlauben, wenn man das Klima auf einer Zeitskala von 100 Jahren simulieren möchte. Die Vergleichsdaten wurden in [4] aus den Modellen durch lineare Interpolation der vier zur jeweiligen Messstation benachbarten Gitterpunkte ermittelt. Es ist nun unbedingt noch zu untersuchen, inwieweit diese Prozedur für die sechs Messstationen zu Artefakten im Sinne der DFA führen kann. Dabei ist besonders zu beachten, dass sich zumindest drei der Stationen in der Nähe von Ozeanen befinden, wo andere Skalierungen als über Kontinenten zu erwarten sind. Mittelungen über möglicherweise verschiedene Skalierungen könnten das ohnehin meist schwach ausgeprägte Gedächtnis zumindest abschwächen, wenn nicht völlig verwischen. Dagegen ist besonders positiv hervorzuheben, dass mit der DFA ein empfindliches nichtlineares Werkzeug für die Untersuchung von Klimazeitreihen entwickelt wurde, das kritische Tests von Klimamodellen substanziell bereichern dürfte. Klimamodelle werden bereits von einer großen interdisziplinären Forschergemeinschaft im Rahmen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) anhand verschiedenster Daten getestet.⁴⁾

Wir möchten ausdrücklich betonen, dass Klimamodelle trotz aller Unvollkommenheit die einzige Möglichkeit darstellen, langfristige Vorhersagen des globalen Klimas fundiert bestimmen zu können. Die Modelle haben bereits Validierungstests anhand von Messdaten in mehreren wichtigen Aspekten erfolgreich bestanden.⁴⁾ So lassen sich aus historischen Messreihen ermittelte globale Temperaturen rekonstruieren, und nicht zuletzt kann man mit ihnen die künftige Erderwärmung aufgrund der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen abschätzen. Allerdings beschreiben sie infolge der noch unzureichenden räumlichen Auflösung eher globale Zirkulationsmuster als regionale Dynamik. Die Grenze für die Auflösung kleinräumiger Prozesse wie z.B. hochreichender Gewitterwolken in den Tropen bedeutet, dass die nicht aufgelösten Prozesse parametrisiert werden müssen, obwohl sie eine nicht geringe Rolle für die Variabilität des Klimas spielen.

In der Studie [4] hat sich gezeigt, dass sich die Wiedergabe der natürlichen Variabilität durch Klimamodelle bessert, wenn auch Aerosole berücksichtigt werden. Daher sollten möglicherweise die mit Aerosolen zusammenhängenden Prozesse detaillierter als bisher in die Modelle einbezogen werden. Die Validierung von Klimamodellen bleibt eine entscheidende Aufgabe, so lange diese entwickelt und benutzt werden.

JÜRGEN KURTHS UND SVEN TITZ

- [1] C. Nicolis und G. Nicolis, *Nature* **311**, 529 (1984).
- [2] P. Grassberger, *Nature* **323**, 609, (1986)
- [3] E. Koscielny-Bunde et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 729 (1998).
- [4] R. B. Govindan, D. Vyushin, A. Bunde, S. Brenner, S. Havlin und H.-J. Schellnhuber, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 28501 (2002).

Erratum

Prof. Günter Hasinger und Dr. Stefanie Komossa sind nicht, wie im Artikel „Frühe Eisenzeit im All“ (Septemberheft, S. 20) geschrieben, am Max-Planck-Institut für Astrophysik beschäftigt, sondern am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

1) Mit Kryosphäre werden die gesamten Eis-, Schnee-, und Permafrostmassen der Erde bezeichnet.

2) Ausführlicheres zu Methoden und Anwendungen findet sich in A. Bunde und J. W. Kantelhardt, *Physikalische Blätter*, Mai 2001, S. 49

3) Global Climate Models Violate Scaling of the Observed Atmospheric Variability

4) http://www.grida.no/climate/ipcci_tar/wg1/index.htm

Prof. Dr. Jürgen Kurths, Dr. Sven Titz
Interdisziplinäres Zentrum für Dynamik komplexer Systeme und Institut für Physik, Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, Postfach 601553, 14415 Potsdam