

Gluonen und Quarks. Die quantitative Beschreibung dieser Phänomene ist noch eine Herausforderung und benötigt mehr und detailliertere Daten. Man kann aber bereits sagen, dass das Medium, welches die Teilchen abbremst, eine enorme Gluondichte hat: Etwa 1000 sind in einem Zylinder von einem Femtometer Höhe und dem Querschnitt eines Goldkerns enthalten.

Weitere Daten, insbesondere auch zur Produktion von schweren Quarks, werden vermutlich noch viele neue Phänomene zeigen. Im Nachhinein haben die Daten von RHIC die Beobachtungen und die Schlussfolgerung aus den CERN-SPS-Experimenten bestätigt und erlauben es erstmals, das QGP zumindest zum Teil zu charakterisieren, in einfachen Worten als eine nahezu ideale Flüssigkeit. Ein nächster großer Schritt wird mit der Inbetriebnahme vom Large Hadron Collider (LHC) am CERN 2007 erwartet. Dort wird das Schwerionenprogramm mit Blei-Blei-Kollisionen und Energien, die einen Faktor 25 über denen bei RHIC liegen, fortgeführt werden.

JOHANNA STACHEL

- [1] U. Heinz, Physik. Blätter, April 2000, S. 12
- [2] V. Eckardt, N. Schmitz und P. Seyboth, Physik Journal, November 2002, S. 55
- [3] alle vier Arbeiten erscheinen in Nucl. Phys. A; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.03.084> und [.../j.nuclphysa.2005.02.130](http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.130) sowie Preprints nucl-ex/0410003 und 0501009

Newton im Gehirn

Im Cortex des Menschen wurde die neuronale Repräsentation physikalischer Gesetze nachgewiesen.

Wie kann es eigentlich sein, dass Oliver Kahn eine „Bogenlampe“ sicher abwehren oder ein Jongleur bei seinem Spiel die Bälle im Flug auffangen kann? Bedenkt man, dass die mittlere Antwortlatenz zwischen dem Auftreffen eines Photons auf der Netzhaut (Retina) und der elektrischen Erregung von Nervenzellen in der Großhirnrinde (Cortex) etwa 100 ms beträgt und dass die neuronale Ansteuerung von Schulter-, Arm- und Handmuskeln zum Wegfausten des Balles bzw. Fangen des Balles ebenfalls Zeit in Anspruch nimmt, ist es verwunderlich, dass wir solche komplexen Leistungen wie das Interagieren mit ballistisch sich bewegenden Objekten überhaupt und offenbar mühelos im täglichen Leben bewältigen können.

Eine Lösung dieser schwierigen Aufgabe könnte darin bestehen, dass bereits auf neuronaler Ebene physikalische Gesetze – quasi in Hardware – implementiert sind. So könnte das zentrale Nervensystem Arbeitszeit und Arbeitskapazität einsparen und präzise Bewegungen in der Umwelt steuern. Verbergen sich also womöglich hinter der Aktivität von Nervenzellen physikalische Gesetze? Diese Frage bejaht nun im weitesten Sinne die Arbeitsgruppe um Francesco Lacquaniti vom „Center of Space Biomedicine“ der Universität Rom [1].

Seit über 300 Jahren und dank Sir Isaac Newton wissen wir, warum alle Objekte, wenn sie nicht durch andere Kräfte festgehalten werden, zu Boden fallen. Andererseits wissen wir, auch aufgrund alltäglicher Erfahrungen, dass nach oben geworfene Objekte wie beispielsweise ein Ball kontinuierlich verzögert werden, um dann nach Durchschreiten des höchsten Punktes der Flugbahn wieder zu Boden zu fallen. Frühere Untersuchungen haben zeigen, dass das menschliche Sehsystem erstaunlicherweise relativ unempfindlich gegenüber solchen beschleunigten Bewegungen ist [2]. So können Menschen Richtungsunterschiede linearer Bewegungen im Bereich von einem Sehwinkelgrad (1°) detektieren, die Schwelle zum Erkennen einer Beschleunigung ist jedoch vergleichsweise hoch.

Lacquaniti und Mitarbeiter gingen nun der Frage nach, ob die neuronale Verarbeitung der „speziellen“ und ständig wirkenden Fallbeschleunigung ($g=9,81 \text{ ms}^{-2}$) im Laufe der menschlichen Entwicklung Eingang in die corticale Verarbeitung visueller Information gefunden hat. Sie untersuchten dazu Versuchspersonen mittels (nicht-invasiver) funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT oder fMRI). Aufgrund einer wegweisenden Studie, die am Tübinger MPI für Biologische Kybernetik in der Gruppe von Nikos Logothetis durchgeführt wurde, wissen wir seit kurzem, dass das im fMRI gemessene Signal tatsächlich mit neuronaler Aktivität korreliert. Diese elegante

Prof. Dr. Johanna Stachel, Physikalisches Institut der Universität Heidelberg, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg

neurophysikalische Methode erlaubt es also, dem Gehirn bei der Arbeit zuzusehen [3]. Lacquaniti et al. untersuchten nun Probanden im Kernspintomographen, während diese Bewegungen von Objekten beobachteten, die sich einmal physikalisch sinnvoll, also entsprechend der Newtonschen Mechanik, und



Dass wir komplexe Aufgaben mit sich ballistisch bewegenden Körpern wie Jonglieren beherrschen können, deutet darauf hin, dass die Fallgesetze im Gehirn auf neuronaler Ebene implementiert sind. (Foto: www.sparkle4all.nl)

einmal physikalisch unerwartet verhielten. Die Probanden betrachteten ein Display, in dem sich ein Ball in einer natürlichen Umgebung nach oben bewegte, elastisch gegen ein Hindernis stieß und sich anschließend wieder nach unten bewegte. Im physikalisch sinnvollen Fall war der Anfangsbewegung des Balles eine konstante, zum Boden gerichtete Beschleunigung $a=g$ superponiert. Im zweiten Fall war diese Kraft nach oben gerichtet ($a=-g$). Die Versuchsparameter waren so gewählt, dass die Bewegungszeiten in beiden Fällen gleich waren.

Die Gehirnaktivität der Probanden wurde während zweier verschiedener Aufgaben gemessen. In einer sog. *proaktiven* Phase sollten die Probanden durch Tastendruck den Zeitpunkt angeben, an dem der Ball wieder seinen Ausgangspunkt erreicht. Für eine korrekte Beantwortung war also das Vorhersehen des weiteren Geschehens notwendig. Eine solche Prädiktion könnte auf einem internen (physikalischen) Modell der Umwelt basieren. In einer *reaktiven* Phase sollten die Probanden möglichst schnell auf ein Signal reagieren, das in einem zufallsverteilten Zeitraum nach der Bewegung gegeben wurde. Eine solche Antwort war gänzlich unabhängig von einem internen Modell der Umwelt.

Mithilfe der Verhaltensdaten (proaktive Aufgabe) konnten die Autoren testen, ob die Verarbei-

tung visueller Signale in einer natürlichen physikalischen Umwelt ($a=g$) zu einer anderen, womöglich besseren Verhaltensleistung führt als in einer „unphysikalischen“ Umwelt. Andererseits konnten sie die neuronale Aktivität während der Beobachtung einer physikalisch sinnvollen und einer unerwarteten Szene vergleichen.

Die Verhaltensleistungen für physikalische Bewegungen waren tatsächlich besser als diejenigen in einer physikalisch „invertierten“ Umgebung ($a=-g$). Dies entspricht Ergebnissen, die zuvor in einer Studie an Astronauten im SpaceLab gewonnen wurden. Aufgrund der Mikrogravitation gelingt es diesen Astronauten erst nach einigen Tagen im Weltall, bewegte Objekte korrekt zu fangen [4]. Indovina et al. konnten zudem tatsächlich zeigen, dass einzelne Bereiche des Großhirns (Cortex) besonders stark bei Bewegungen, die der Newtonschen Mechanik entsprechen, aktiviert werden. Interessanterweise werden nur zwei dieser Gebiete auch bei Stimulation des Gleichgewichtsorgans (Vestibular-Organ), die unter natürlichen Umständen bei Beschleunigung oder Neigung des Kopfes auftritt, aktiviert. Beide Gebiete liegen im Bereich des sog. Insulären Cortex und bilden beim Menschen ein corticales Zentrum für die Verarbeitung multisensorischer (visueller, vestibulärer, taktiler und womöglich akustischer) Information (vgl. [5]). Die Autoren gehen deshalb davon aus, dass im Cortex eine Repräsen-

tation (einfacher) physikalischer Gesetze existiert. Der Vorteil liegt, wie anfangs erwähnt, sicher darin, dass zielgerichtete Bewegungen z. B. zum Fangen eines Objektes präziser werden, da ein internes Modell der Umgebung existiert – also ein „Newton im Gehirn“.

Dieses Ergebnis ist ein weiteres Beispiel dafür, wie verschiedene grundständige Disziplinen in den Neurowissenschaften verknüpft werden. So werden beispielsweise physikalische Methoden, in diesem Falle die funktionelle Kernspintomographie, angewendet, um biologische Signale zu messen. Methoden der Statistik werden benötigt, um die gewonnenen Daten zu analysieren. In der Neurophysik kommen zusätzlich psychophysikalische Experimente und die Modellierung künstlicher neuronaler Netzwerke zum Einsatz. Die Neurowissenschaften im Allgemeinen und die Neurophysik im besonderen haben so zum Ziel, die Funktionsweise des Gehirns besser zu verstehen und in absehbarer Zukunft beispielsweise neuronale Prothesen und „Brain-Machine-Interfaces“ zu entwickeln.

FRANK BREMMER

- [1] I. Indovina et al., Science 308, 416 (2005)
- [2] P. Werkhoven, H. P. Snippe und A. Toet, Vision Research 32, 2313 (1992)
- [3] N. K. Logothetis et al., Nature 412, 150 (2001)
- [4] J. McIntyre et al., Nat Neurosci. 4, 693 (2001)
- [5] F. Bremmer et al., Neuron 29, 287 (2001)

KURZGEFASST...

■ Doppelt-magisches Nickel mit kurzem Leben

Physikern in Deutschland und den USA ist es erstmals gelungen, die Halbwertszeit von ^{78}Ni zu messen. Dieses Isotop ist doppelt-magisch, d.h. mit 50 Neutronen und 28 Protonen sind sowohl die Neutronen- als auch die Protonenschale abgeschlossen. Die gemessene Zeit von 110 ms liegt um einen Faktor 3 bis 4 unter bisherigen theoretischen Werten. ^{78}Ni spielt eine wichtige Rolle in der Astrophysik, im Zusammenhang mit der Synthese der Elemente jenseits von Eisen. Angesichts der kurzen Halbwertszeit könnten die schweren Elemente wesentlich schneller als bisher gedacht entstanden sein. P. T. Hosmer et al., Phys. Rev. Lett. 94, 112501 (2005)

■ Kernfusion auf dem Labortisch

Mithilfe eines pyroelektrischen LiTaO-Kristalls ist es amerikanischen Physikern gelungen, Deuterium-Kerne (D) zu verschmelzen. Wird der Kristall erwärmt, entsteht eine elektrische Spannung, die Deuterium-

Atome ionisiert und auf ein ErD_2 -Target beschleunigt, in dem die Fusion stattfindet. Dabei entstehen ^3He -Kerne und Neutronen mit einer Energie von 2,45 MeV. Angesichts der negativen Energiebilanz eignet sich das Gerät nicht zur Energieerzeugung, möglicherweise aber als Neutronenquelle. B. Naranjo et al., Nature 434, 1115 (2005)

■ Präzise Masse

Die Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt die Wechselwirkung von Quarks und Gluonen. Aufgrund ihrer Komplexität war es bislang nicht möglich, Eigenschaften wie die Masse von Hadronen zu berechnen, die aus Quarks und Gluonen bestehen. Im Rahmen der Gitter-QCD ist es nun erstmals gelungen, die Masse eines Mesons, des aus einem Anti-b- und einem c-Quark bestehenden B_c , vorherzusagen. Der Wert 6304 ± 20 MeV stimmt hervorragend mit dem kurze Zeit später gemessenen Wert von 6287 ± 5 MeV überein. I. F. Allison, Phys. Rev. Lett. 94, 172001 (2005)

Prof. Dr. Frank Bremmer, AG Neurophysik, Universität Marburg, Renthof 7, 35032 Marburg