

## Rückschlag für die Suche nach kosmischen Hadronenbeschleunigern?

Der beste bisherige Kandidat zeigt ein Spektrum, das nur auf beschleunigte Leptonen hindeutet.

Wie arbeiten kosmische Beschleuniger und was beschleunigen sie? Dies ist eine der elf dringendsten wissenschaftlichen Fragen für das 21. Jahrhundert, so die Studie „Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century“ der U. S. National Academy of Sciences [1]. Eine Antwort kann nur die Gamma-Astronomie (und bei Erreichen der entsprechenden Empfindlichkeit auch die Neutrino-Astronomie) bei Energien oberhalb von 1 GeV liefern. Denn laut Energieerhaltungssatz gehen Strahlungsprodukte wie Photonen mit derartigen Energien auf Primärpartikel mit noch höherer Energie zurück – die Teilchen der kosmischen Strahlung<sup>1)</sup>. Diese bestehen zu 99 Prozent aus Hadronen (hauptsächlich Protonen und Alphastrahlung) und nur zu einem Prozent aus Elektronen und erreichen die Erde nur auf verschlungenen Pfaden. Nur Gammaquellen lassen uns deshalb verlässlich die kosmischen Objekte identifizieren, in denen diese energiereichsten geladenen Teilchen entstehen.

1996 entdeckte der Satellit ROSAT Röntgenstrahlung vom jungen schalenförmigen Supernova-Überrest RX J1713.7-3946 (kurz RX J1713). Mit ihm glaubte man, einen kosmischen Hadronenbeschleuniger gefunden zu haben, insbesondere nach der Detektion

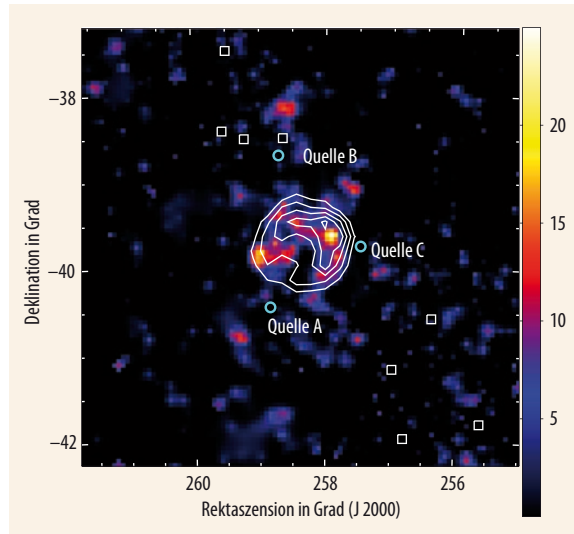


Abb. 1 Die weißen Isophoten geben den TeV-Fluss der H.E.S.S.-Messungen von RX J1713 wieder [4]. Die mit Fermi beobachtete Gamma-Intensität ist durch den Farbverlauf dargestellt [2]. Zuvor wurde die Emission der nahen Punktquellen (A, B, C und kleine Quadrate) subtrahiert.

durch das Luft-Cherenkov-Teleskop H.E.S.S.<sup>2)</sup> bei TeV-Energien ( $10^6$  MeV). Neue Beobachtungen mit dem Fermi-Satelliten<sup>3)</sup> zeigen allerdings, dass er wahrscheinlich doch „nur“ ein kosmischer Elektronenbeschleuniger ist [2].

Supernova-Überreste sind das Ergebnis gigantischer Stern-Explosionen, bei denen die äußere Hülle mit Überschallgeschwindigkeit in das umgebende interstellare Medium ausläuft. Die sich dabei ausbildende Stoßwelle mit hoher gerichteter kinetischer Energie ist eine ideale Struktur, um geladene Teilchen durch elektromagnetische Prozesse zu beschleunigen.

RX J1713 liegt in der galaktischen Ebene und ist etwa  $1 \text{ kpc}^3$  von unserem Sonnensystem entfernt, also

vergleichsweise nah. Seine Schale hat eine Ausdehnung von rund 20 pc. Er war der erste Supernova-Überrest, den H.E.S.S. vor fünf Jahren bei TeV-Energien räumlich auflösen konnte. Dabei zeigte es sich, dass das TeV-Emissionsgebiet eine schalenförmige Struktur hat (Abb. 1) [3, 4].

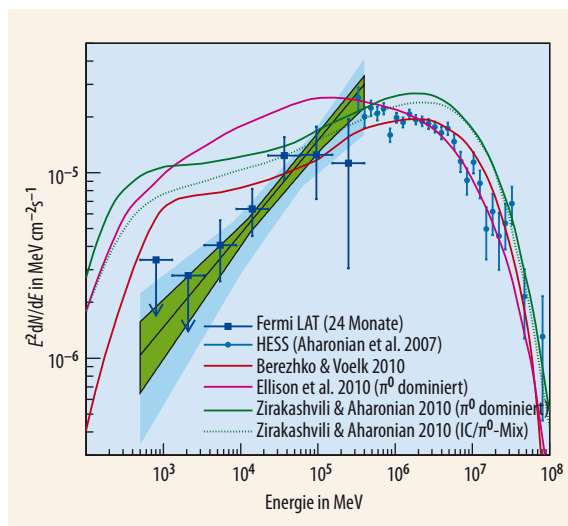
Die Tatsache, dass die Gebiete mit Röntgen- sowie die von Fermi und H.E.S.S. gemessene Gamma-Emission übereinstimmen, legt nahe, dass nichtthermische Strahlungsprozesse relativistischer geladener Teilchen die gesamte Hochfrequenzstrahlung erzeugen. Hierbei beschleunigt die auslaufende Stoßwelle der Supernova zunächst die Partikel der kosmischen Strahlung.

Jetzt stellt sich natürlich die Frage, welche Sorte von geladenen Teilchen hier beschleunigt wird, Hadronen oder Elektronen? Seit 50 Jahren wissen wir durch Radiobeobachtungen von Synchrotronabstrahlung in kosmischen Magnetfeldern, dass in weit entfernten Objekten relativistische Elektronen unterwegs sind. Die wissenschaftliche Motivation für die Entwicklung der Hochenergie-Gamma-Astronomie war immer die Aussicht, dort auch Hadronen nachzuweisen.

Denn prinzipiell erzeugen inelastische Hadron-Hadron- und

- 1) J. Blümer, Physik Journal, Juni 2010, S. 31
- 2) H.E.S.S. (High Energetic Stereoscopic System): C. van Eldik und W. Hofmann, Physik Journal, Januar 2008, S. 33
- 3) J. Greiner, Physik Journal, Dezember 2010, S. 29
- 4) Parsec:  $1 \text{ pc} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ m}$

Abb. 2 Von Fermi und H.E.S.S. gemessenes Energiespektrum von RX J1713 im Vergleich zu verschiedenen hadroneninduzierten Emissionsmodellen. Unterhalb von  $10^5$  MeV ergeben all diese Modelle einen fünffachen Überschuss. Der grüne Bereich zeigt den besten Fit eines Potenzgesetz-Energiespektrums im Fermi-Bereich, wie es Photonen aus IC-Streuung von Elektronen erwarten lassen.



Hadron-Photon-Wechselwirkungen nach Überschreiten der jeweiligen Energieschwellen zu etwa gleichen Teilen geladene und neutrale Pionen als Sekundärteilchen. Die neutralen Pionen zerstrahlen sofort in zwei Gammaquanten mit einem symmetrischen Zerfallsspektrum um 70 MeV ( $=\frac{1}{2} m_{\pi} c^2$ ), während die geladenen Pionen in Neutrinos und Elektronen zerfallen. Aufgrund ihrer geringeren Masse im Vergleich zu den Hadronen erzeugen Elektronen viel effektiver Gammaphotonen durch Synchrotron- und Bremsstrahlung sowie durch inverse Compton-Streuung (IC) niederenergetischer Lichtquanten. Der dafür maßgebende Thomson-Wirkungsquerschnitt ist für Hadronen 10 000-mal kleiner als für Elektronen. Um hadronen- von elektroneninduzierter Gammastrahlung zu unterscheiden, ist eine genaue Modellierung der Emissionsprozesse nötig. Dies ist allerdings kompliziert, da hadroneninduzierte Emission immer auch über die unvermeidliche Sekundärelektronenproduktion leptonische Strahlungsanteile enthält.

Die Fermi-Beobachtung hat auch hier wertvolle Informationen geliefert. Denn die Hadronenmodelle reproduzieren die H.E.S.S.-Beobachtungen oberhalb 100 GeV zwar gut, zeigen aber einen Faktor 5 zuviel Emission im Fermi-Energiebereich (Abb. 2). Im Gegensatz hierzu reproduzieren elektroneninduzierte Emissionsmodelle das Intensitätsspektrum über den gesamten Energiebereich recht treffend. Die Fermi-Kollaboration schließt daraus, dass inverse Compton-Streuung der Mikrowellenhintergrund-Photonen durch relativistische Elektronen, die an der Stoßwelle beschleunigt werden, der dominante Prozess in RX J1713 sein muss. Daher ist das Objekt wahrscheinlich „nur“ ein kosmischer Elektronenbeschleuniger.

Dies lässt sich als Rückschlag für die Suche nach kosmischer Hadronenbeschleunigung werten, aber es ist verfrüht, diesen Mechanismus in RX J1713 schon gänzlich abzuschreiben. Wir sollten die Fermi-Ergebnisse vielmehr zum

Anlass nehmen, die Theorie der kosmischen Teilchenbeschleunigung genauer zu untersuchen, denn es ist durchaus plausibel, dass eine oder mehrere Annahmen der Hadronenmodelle modifiziert werden müssen. Die grundlegende Eingangsgröße bei der Berechnung der Gamma-Intensitäten ist das Impulsspektrum der strahlenden geladenen Teilchen. Hier sind die einfachen Annahmen möglicherweise nicht mehr haltbar. Sowohl die in Abb. 2 zitierten theoretischen Arbeiten als auch die Fermi-Kollaboration gehen davon aus, dass der Beschleunigungsprozess ein Impulsspektrum liefert, das einem Potenzgesetz folgt. Die Anzahldichte  $N(p) \propto p^{-s}$  ist dann lediglich eine Funktion des Teilchenimpulses  $p$  mit  $s \geq 1.5$ . Das Hauptproblem der bisher stark vereinfachten Theorie ist die Beschreibung der Stoßwelle mit idealen magnetohydrodynamischen Gleichungen. Alle kosmischen interstellaren Stoßwellen sind „stoßfrei“ – wegen der geringen Gasdichten in den interstellaren Plasmen treten elastische Coulomb-Stöße gegenüber mikroskopischen Plasmawechselwirkungen in den Hintergrund. Daher gilt einerseits die ideale Magnetohydrodynamik nicht mehr, und andererseits ist eine volle plasmakinetische Beschreibung der Stoßwelle nötig,

etwa mit realistischen Particle-in-Cell-Simulationen [5]. Eine weitere mögliche Modifikation betrifft die räumliche Inhomogenität des Hintergrundmagnetfelds nahe der Stoßwelle. Die daraus resultierende fokussierte Beschleunigung von geladenen Teilchen durch die Spiegelkraft kann Impulsspektren mit deutlich kleinerem Spektralindex  $s=1$  liefern [6, 7]. Ausschließen lässt sich wohl die Hypothese, die strahlenden relativistischen Elektronen in RX J1713 entstünden als Sekundärelektronen von inelastischen Hadronenwechselwirkungen, wobei der Zerfall neutraler Pionen nicht signifikant zum Gammaskpektrum beiträgt. Eine sorgfältige Prüfung ist allerdings notwendig.

Reinhard Schlickeiser

- [1] M. S. Turner et al., Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century, Report to the National Academy of Science (2002)
- [2] A. A. Abdo et al. (Fermi-LAT collaboration), *Astrophys. J.*, im Druck, arXiv:1103.5727
- [3] F. Aharonian et al. (H.E.S.S. collaboration), *Astron. Astrophys.* **449**, 223 (2006)
- [4] F. Aharonian et al. (H.E.S.S. collaboration), *Astron. Astrophys.* **464**, 235 (2007)
- [5] A. Spitkovsky, *Astrophys. J.* **682**, L5 (2008)
- [6] R. Schlickeiser, *Modern Physics Letters A* **24**, 1461 (2009)
- [7] R. Schlickeiser und A. Shalchi, *Astrophys. J.* **686**, 292 (2008)

## KURZGEFASST

### ■ Mehr Verschränkung

Quantenbits miteinander zu verschränken ist unerlässlich für alle Varianten der Quanteninformationsverarbeitung. Die Arbeitsgruppe von Rainer Blatt an der Universität Innsbruck hat mit 14 verschränkten Quantenbits nun einen neuen Rekord aufgestellt. In dem Experiment befinden sich 14 Kalziumatome, deren interne Zustände die Quantenbits bilden, in einer linearen Ionenfalle. Mit Laserpulsen lassen sich die Qubits in einen Greenberger-Horne-Zeilinger-Zustand der Form  $|00 \dots 00\rangle + |11 \dots 11\rangle$  bringen. Die Physiker beobachteten auch den Zerfall dieses Zustands und fanden, dass diese Dekohärenz in Übereinstimmung mit theoretischen Erwartungen quadratisch mit der Zahl der Qubits anwächst.

T. Monz et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 130506 (2011)

### ■ Neutrinos verzweifelt gesucht

Die Ursachen für die sehr intensiven Gammastrahlenausbrüche am Himmel (*Gamma Ray Bursts*, GRBs) sind vermutlich Supernovae und der Kollaps des Sterns zu einem Schwarzen Loch. Bei diesen Prozessen entstehen neben Gammaquanten auch Protonen, die sich als kosmische Strahlung höchster Energie auf der Erde bemerkbar machen. Die Theorie sagt auch voraus, dass im Zuge der GRBs Neutrinos mit TeV-Energie entstehen. Das Team des IceCube-Detektors am Südpol hat nun Daten von einem Jahr Messzeit ausgewertet und darin keine Hinweise auf TeV-Neutrinos gefunden, obwohl in dieser Zeit 117 GRBs beobachtet wurden. Möglicherweise müssen daher die Modelle überdacht werden.

R. Abbasi et al. (IceCube Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **106**, 141101 (2011)

Prof. Dr. Reinhard Schlickeiser, Institut für Theoretische Physik, Lehrstuhl IV: Weltraum- und Astrophysik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum