

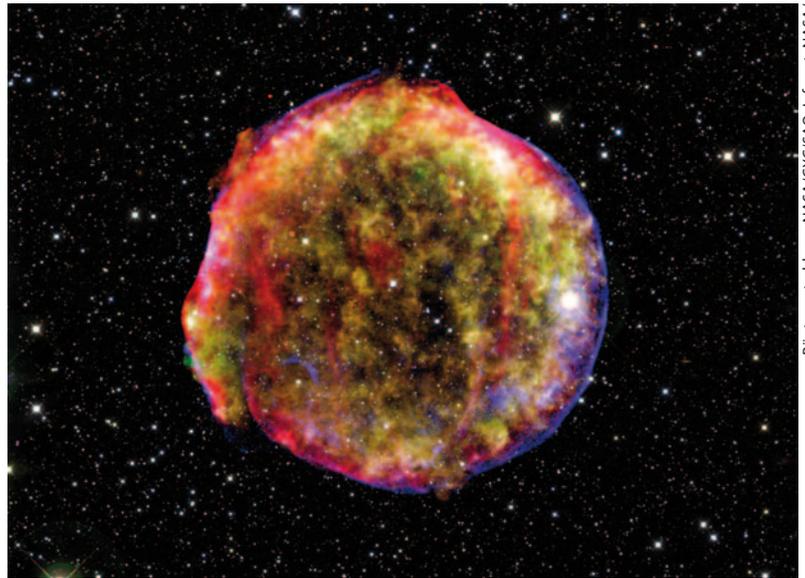
■ An der Quelle der kosmischen Strahlung

Beobachtungen entlarven Stoßwellen von Supernova-Überresten als effiziente Teilchenbeschleuniger.

Mit der Frage, woher die kosmische Strahlung stammt, sind viele Generationen von Physikern und Astrophysikern angewachsen. Enrico Fermi skizzierte 1948 in seinem Notizbuch den ersten Versuch einer Theorie, basierend auf der Idee, dass die Teilchen der kosmischen Strahlung in einem statistischen Prozess durch elastische Streuung an magnetischen Wolken im interstellaren Medium Energie gewinnen. Als die ersten Radioteleskope Quellen von Synchrotronstrahlung fanden, rückte zum ersten Mal eine Lösung der Frage in greifbare Nähe. Denn Synchrotronstrahlung entsteht gerade bei der Bewegung relativistischer Elektronen in Magnetfeldern.

Bei diesen Radioquellen handelte es sich um die schalenförmig ausgedehnten Überreste von Sternexplosionen, die sich einige zehntausend Jahre lang mit Stoßwellen in das interstellare Medium hinein ausbreiten (Abb.). Auch Pulsare mit ihren nebelartigen Winden und ferne Radiogalaxien bevölkern den Radiohimmel. Mit diesem Zoo der Elektronenbeschleuniger lässt sich also zumindest ein Teil der kosmischen Strahlung auf diskrete Quellen zurückführen. Allerdings tragen die Elektronen nur etwa zwei Prozent zur gesamten Energiedichte der kosmischen Strahlung bei.

In der bis heute viel beachteten Monographie „The Origin of Cosmic Rays“ [1] argumentierten



Röntgenstrahlung: NASA/CX/SAO; Infrarot: NASA/JPL-Caltech; Optisch: MPA, Calar Alto, O. Krause et al.

Die Weltraumteleskope Spitzer (Infrarot: rot) und Chandra (Röntgen: gelb, grün und blau) sowie die Calar-Alto-Sternwarte in Spanien (optisch: weiß) trugen zu

diesem Kompositbild bei. Das heiße Plasma der Stoßfront zum interstellaren Medium zeichnet sich deutlich als blaue Umrandung ab.

Ginzburg und Syrovatsky 1961, Supernova-Überreste (Supernova Remnants, SNR) müssten schon allein aus energetischen Gründen auch die Orte der Beschleunigung der Protonen und Ionen sein. Dazu würde jedoch eine Effizienz von etwas mehr als zehn Prozent für die Umwandlung der stellaren Explosionsenergie in relativistische Teilchen benötigt.

Tatsächlich verstärken Stoßwellen die Fermi-Beschleunigung und bewirken ein universelles, von den Details der Streuprozesse unabhängiges Spektrum, das die kosmische Strahlung gut erklärt. Die

chemische Zusammensetzung der Teilchen weist eine Überhäufigkeit schwerer Elemente auf, wie sie für die Umgebung massereicher Sterne charakteristisch ist. Um die Quellen der Protonen und Ionen zu finden, konzentrierten sich die Astronomen schon früh auf satellitengestützte Gammastrahlendetektoren. Denn bei der Beschleunigung der kosmischen Strahlung entstehen Pionen durch Nukleon-Nukleon-Streuung. Der anschließende Zerfall der neutralen Pionen bringt die Gammastrahlung hervor. Jetzt, fünfzig Jahre später, steht mit dem LAT-Siliziumstreifendetektor des Fermi-Satelliten der NASA ein Detektor mit der erforderlichen Empfindlichkeit und ausreichendem Auflösungsvermögen zur Verfügung.¹⁾

Aktuelle Beobachtungen der Überreste von Tycho's Typ-Ia-Supernova [2] sowie der beiden Kernkollaps-Sternexplosionen W44 und IC443 mit dem Fermi-Observatorium [3] geben übereinstimmend mit den Ergebnissen des Satelliten AGILE [4] starke Hinweise darauf, dass ihre Gammastrahlung tatsächlich vom Zerfall neutraler Pionen und somit von der Beschleunigung

1) J. Greiner: Das tobenende Universum, Physik Journal, Dezember 2010, S. 29

KURZGEFASST

■ BEC – völlig losgelöst

Während Bose-Einstein-Kondensate in einem irdischen Labor innerhalb des Bruchteils einer Sekunde zerfallen, sollten sie in der Schwerelosigkeit weit länger als eine Sekunde existieren und über diesen Zeitraum auf einen Millimeter anwachsen können. Am Bremer Fallturm des ZARM gelang jetzt der Nachweis davon: Die Interferenzfähigkeit des BECs zeigte sich über die ganze Freifallzeit von rund einer Sekunde im mitfallenden Atom-Interferometer. H. Müntinga et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 093602 (2013)

■ Topologischer Isolator in freier Natur

Innen ein Isolator – an der Oberfläche leitend, das zeichnet topologische Isolatoren aus. Forscher aus Stuttgart und Lausanne haben jetzt einige Dutzend Nanometer dünne Flocken des natürlich vorkommenden Minerals Kawazulith – $\text{Bi}_2(\text{Te},\text{Se})_2(\text{Se},\text{S})$ – hergestellt und bei ihnen eine Oberflächenladungsträgerbeweglichkeit von $1000 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ gemessen. Sie können daher mit vergleichbaren synthetisch hergestellten topologischen Isolatoren mithalten. P. Gehring et al., Nano Lett., online 26. Februar 2013

kosmischer Strahlung stammt. Für den hadronischen Ursprung der Gammastrahlung spricht, dass das beobachtete Spektrum ohne weitere Annahmen mit dem theoretisch vorhergesagten Impuls-Potenzspektrum der Protonen übereinstimmt [6]. Da die Ortsauflösung von Fermi bei 100 MeV für eine Trennung einzelner Komponenten in Quellen mit komplexer Struktur wie W44 und IC443 – die innerhalb der Stoßwelle noch zusätzliche Röntgennebel aufweisen, – nicht ausreicht, war dieses Ergebnis überraschend deutlich.

Beim Supernova-Überrest RX J1713.7-3946 hatte dagegen eine frühere Untersuchung Gegenteiliges ergeben: Hier verursacht die inverse Compton-Streuung relativistischer Elektronen die Gammastrahlung [5]. Bei Tycho, W44 und IC443 würde aber eine Erklärung der Gammastrahlung durch inverse Compton-Streuung oder Bremsstrahlung klar zu energetischen Problemen führen oder Zusatzannahmen über die Form des Elektrospektrums erforderlich machen.

Die Effizienz der Quellen bei der Beschleunigung der kosmischen Strahlung beträgt nur einige Prozent und ist somit etwas zu niedrig für die Aufrechterhaltung der beobachteten Gesamtintensität. Vielleicht gleichen andere Quellen dies aus. Da sich jedoch die meisten

der mehr als eintausend erwarteten Supernova-Überreste in komplexen Staub- und Molekülwolken befinden und die Methoden der Gammastrahlen-Astronomie sie dort räumlich nicht auflösen können, bleibt ihr kalorimetrischer Beitrag zur kosmischen Strahlung ungewiss [7].

Es stellt sich daher die Frage, ob die Protonen und Ionen auch auf andere Weise in ihren Quellen beobachtet werden können. Im Tycho-Supernovaüberrest zeigen sich energiereiche Protonen durch ihre makroskopischen Larmor-Radien in hochauflösenden Röntgenbeobachtungen des Chandra-Observatoriums [8]. Unerwartete Schützenhilfe kommt auch aus der optischen Astronomie: Die neuartige, revolutionäre Integralfeldspektroskopie²⁾ konnte zeigen, dass schnelle, suprathemische Protonen offenbar eine entscheidende Rolle beim Energietransport an der Stoßwelle des Supernovaüberrests SN 1006 spielen [9]. In Zukunft könnten hochempfindliche MeV-Gammastrahlendetektoren auch nukleare Linien nachweisen und so die kosmische Strahlung im Energiebereich von 10 bis 100 MeV erfassen [10]. Das Tscherenkow-Teleskoparray CTA und die Luftschauerarrays HAWC und HiSCORE sollen Gammaspekten bis in den 100-TeV-Bereich verfolgen, und die

Beobachtung der Milchstraße mit dem Neutrinoobservatorium KM3NeT könnte in einigen Jahren die ersten Hinweise auf Neutrinos aus den Zerfällen geladener Pionen liefern. IceCube, Auger und JEM-EUSO untersuchen den Ursprung der kosmischen Strahlung jenseits der Energien, die Supernova-Überreste erreichen können.

Die neuen Ergebnisse stellen zweifelsohne einen Meilenstein für die Klärung des Ursprungs der kosmischen Strahlung dar. Es bleiben aber noch sehr viele einzelne Aspekte unbeantwortet, für deren Untersuchung die Zusammenarbeit von klassischer Astronomie und Astroteilchenphysik ausschlaggebend sein wird.

Karl Mannheim

- [1] V. L. Ginzburg und S. I. Syrovatsky, Prog. Theor. Phys. Suppl. **20**, 1 (1961)
- [2] F. Giordano et al., Astrophys. J. **744**, L2 (2012).
- [3] M. Ackermann et al. (Fermi-LAT Collab.), Science **339**, 807 (2013)
- [4] A. Giuliani et al. (AGILE Collab.), Astrophys. J. **742**, L30 (2011)
- [5] F. Aharonian et al. (H.E.S.S. Collab.), Nature **432**, 75 (2004)
- [6] P. L. Biermann und R. Strom, Astron. Astrophys. **275**, 659 (1993)
- [7] Y. Butt, Nature **460**, 701 (2009)
- [8] K. Eriksen et al., Astrophys. J. **728**, L28 (2011)
- [9] S. Nikolic et al., ScienceExpress **10.1126/science.1228297** (2013)
- [10] A. Summa, D. Elsässer und K. Mannheim, Astron. Astrophys. **533**, 13 (2011)

²⁾ Die Integralfeldspektroskopie ist ein Beobachtungsmodus des Weitfeld-Multiobjekt-spektrographen VIMOS am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) auf dem Paranal, Chile. Die Verwendung einer Mikrolinsenplatte mit 6400 Fasern ermöglicht niedrig- bis hochauflösende Spektroskopie im Wellenlängenbereich von 360 bis 1000 nm.

Prof. Dr. Karl Mannheim, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, Campus Hubland Nord, Emil-Fischer-Str. 31, 97074 Würzburg

■ Verborgene Ordnung

Löst eine neue Theorie das jahrzehntealte Rätsel um den Phasenübergang im Material URu₂Si₂ ?

Festkörper zeigen ein reichhaltiges Spektrum an Ordnungsphänomenen. Dazu gehören die verschiedenen Formen von Magnetismus und Supraleitung, die Phasen mit spontan gebrochenen Symmetrien entsprechen. Diese Ordnung geht notwendigerweise mit einem thermischen Phasenübergang einher: Da im Grenzfall großer Temperatur alle Symmetrien wiederhergestellt werden, müssen thermische Fluktuationen die Ordnung zerstören. Umgekehrt ist ein kontinuierlicher Phasenübergang

üblicherweise mit spontaner Symmetriebrechung verbunden.¹⁾

Die Festkörperphysik kennt ein Arsenal von Techniken, mit denen sich Phasenübergänge einerseits und Symmetriebrechung andererseits detektieren lassen: Messungen thermodynamischer Eigenschaften wie der Wärmekapazität zeigen Anomalien an einem Phasenübergang, während in Streuexperimenten z. B. zusätzliche Bragg-Reflexe als Folge von gebrochener Translationssymmetrie sichtbar werden. Das volle Verständnis eines Ordnungsphe-

nomens erfordert im Allgemeinen beides, die symmetriebrechende Ordnung beispielsweise durch einen Ordnungsparameter zu charakterisieren und den Phasenübergang zu untersuchen.

Die metallische Verbindung URu₂Si₂ ist diesbezüglich seit langem rätselhaft [1, 2]. Sie zeigt einen kontinuierlichen Phasenübergang bei $T_0 \approx 17$ K, mit ausgeprägten Signaturen in der Wärmekapazität und im elektrischen Widerstand. Jedoch gelang es trotz intensiver Suche bisher nicht, eine symme-

¹⁾ Dies gilt nicht für Phasenübergänge erster Ordnung, wie den Flüssig-Gas-Übergang, und für topologische Phasenübergänge.