

Kein Halten am Wartepunkt

Hochpräzise Massenmessungen erklären die Kernreaktionen bei Ausbrüchen von Röntgenstrahlung.

Zwar können Sie nicht die Uhr nach ihnen stellen, Röntgenausbrüche sind aber ein häufiges und überraschend regelmäßig auftretendes astrophysikalisches Phänomen. Sie gehen auf Prozesse an der Oberfläche von Neutronensternen zurück, die Teil eines engen Binärsystems sind [1]. Durch einen Materiefluss vom ausgedehnten Begleitstern hin zu einem mit knapp zwei Dutzend Kilometer Durchmesser enorm dichten Neutronenstern bildet sich auf diesem eine dünne Schicht von Wasserstoff und Helium. Sie explodiert etwa einmal am Tag und erzeugt einen leicht beobachtbaren Ausbruch von Röntgenstrahlung, der zwischen einigen Sekunden und Minuten dauert.

Während der Explosion – der Energiequelle für die Ausbrüche – wandelt sich die Schicht komplett in etwa 10^{16} Tonnen schwere exotische Kerne um (Abb. 1).^{*)} Da die frisch erzeugten Nuklide das extrem starke Gravitationspotential des Neutronensterns nicht verlassen können, leistet dies jedoch keinen Beitrag zur Elementsynthese im Universum.^{#)} Das Ganze wiederholt sich dann wegen des fortgesetzten Nachschubs vom Begleitstern.

So weit, so klar. Zum genauen Verlauf der Reaktionskette gibt es aber noch einige offene Fragen. An einem neuen Speicherring in



Abb. 1 Strömt Materie von einem Roten Riesen zu einem Neutronenstern (Bildmitte), sammelt sie sich zunächst in ei-

ner Akkretionsscheibe. Hat sich genug auf der Oberfläche angehäuft, kommt es zu einer Kettenreaktion.

China ist es nun gelungen, eine der bedeutendsten kernphysikalischen Unsicherheiten im Verständnis der Röntgenausbrüche auszuräumen.

In der Schicht aus Wasserstoff und Helium steigt die Dichte sukzessive auf bis zu 10^6 g/cm³, das Gas entartet. Setzt schließlich Fusion ein, kann das Gas nicht durch Expansion abkühlen und es kommt zu einem „thermonuklearen Run-away“ mit Temperaturen von etwas mehr als einer Milliarde Kelvin. In der protonenreichen Umgebung verbrennt über eine Folge von (α ,p)- und (p, γ)-Reaktionen

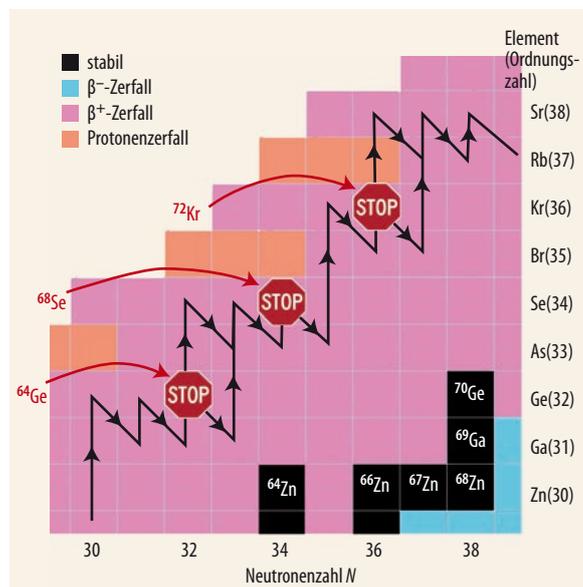
die Asche des CNO-Zyklus zu mittelschweren Kernen wie Argon und Kalzium. Dem schließt sich eine Sequenz von schnellen Protoneneinfängen und β -Zerfällen (rapid proton capture process oder rp-Prozess) an. Der rp-Prozess durchläuft dabei Kerne entlang der „Proton-Dripline“ – jenseits derer die Nuklide Protonen ausstoßen –, bis der Materiefluss in der Nähe des doppelmagischen Kerns ¹⁰⁰Sn in eine Endlosschleife von (p, γ)- und (p, α)-Reaktionen mündet.

Die Zeitskala und Energieausbeute der Reaktionskette – und damit auch der Röntgenausbrüche – hängen von so genannten Wartepunkten ab. Sie liegen bei Kernen, an denen der weitere Materiefluss zu schwereren Kernen stockt, da sie vergleichsweise lange Lebensdauern gegen β -Zerfall und Protoneneinfang haben (Abb. 2). Im Allgemeinen sind dies vor allem Kerne, die Vielfache von Alphateilchen sind (z.B. ⁵⁶Ni, ⁶⁰Zn, ⁶⁴Ge ...) und somit gegenüber ihren Nachbarn etwas zusätzliche Bindungsenergie gewinnen, was sie gegenüber β -Zerfall recht stabil macht. Außerdem ist ein zusätzliches Proton nur schwach oder gar nicht gebunden, was einen Protoneneinfang sehr stark behindert.

*) vgl. W. Hillebrandt und K. Langanke, Physik Journal, Juni 2002, S. 43

#) vgl. A. Koch, Physik Journal, Februar 2011, S. 27

Abb. 2 Protonenreiche Kerne können nicht beliebig weitere Protonen einfangen und dann schnell genug einen β^+ -Zerfall ausführen. Bei Kernen größerer Halbwertszeit wie ⁶⁴Ge, ⁶⁸Se oder ⁷²Kr (Stoppsschilder) kommt es zu Wartepunkten in der Reaktionskette, die die Synthese schwererer Isotope stocken lässt.



Bislang galt der Kern ^{64}Ge als bedeutender Wartepunkt in der Spätphase der Röntgenausbrüche [1]. Dies wurde zum einen mit der langen β -Halbwertszeit von 64 Sekunden begründet und zum anderen mit der Tatsache, dass ^{65}As das zusätzliche Proton nicht binden kann und nur eine Resonanz mit ungenau bekannter Protonenseparationsenergie ist. Das führt dazu, dass bei den hohen Temperaturen in Röntgenausbrüchen ein eingefangenes Proton sofort wieder entfernt wird, bevor ^{65}As ein weiteres Proton einfangen kann, um den Prozess fortzusetzen. Eine hochpräzise Massenmessung von ^{65}As hat diese Annahme nun widerlegt [2]. Das Nuklid erwies sich zwar als „leicht ungebunden“, die ermittelte Protonenseparationsenergie von $-90(85)$ keV erlaubt dem Kern aber selbst bei den hohen Temperaturen in Röntgenausbrüchen noch eine ausreichend lange Lebensdauer, so dass er ein weiteres Proton einfangen kann. ^{64}Ge ist also kein unüberwindbares Hindernis für den Materiefluss im rp-Prozess. Simulationen von Röntgenausbrüchen mit ^{64}Ge -Protoneneinfangraten ergeben die beobachteten Röntgen-Emissionskurven [2]. Dies zeigt, dass der vermeintliche ^{64}Ge -Wartepunkt effizient durch Protoneneinfang mit anschließenden weiteren Protoneneinfängen und β -Zerfällen überwunden wird.

Die Messkampagne unter Beteiligung von Wissenschaftlern des Heidelberger MPI für Kernphysik und der GSI Darmstadt, die neben ^{65}As auch die Massen anderer protonenreicher Kerne mit hoher Präzision bestimmt hat, war das erste derartige Experiment am neuen Speicherring der Schwerionenforschungsanlage in Lanzhou, China. Der Versuchsaufbau bestand aus einem ^{78}Kr -Projektilstrahl mit hoher Intensität und einem Berylliumtarget, ein hocheffizienter Separator filterte die für die Messung relevanten Nuklide aus den vielen entstandenen Fragmenten im Flug heraus und injizierte sie in den Experimentier-Speicherring CSRe. Für die Massenmessung lässt sich ausnutzen, dass die Umlaufzeit der

dort gespeicherten Ionen proportional zum Masse-Ladung-Verhältnis m/q ist. Um die kleinen Differenzen in der Umlaufgeschwindigkeit der Fragmente auszugleichen, laufen die Messungen im so genannten isochronen Ionen-optischen Modus. In diesem kreisen schnellere Ionen auf entsprechend längeren Bahnen. Damit gelang es, die Massen, wie in diesem Experiment der Kerne ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se und ^{71}Kr , trotz der kurzen Halbwertszeit mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-6} zu messen.

Die Anlage in Lanzhou hat eine sehr große Ähnlichkeit mit derjenigen der GSI in Darmstadt, wo die Massenmessungen von exotischen Kernen an Speicherringen zuerst entwickelt worden sind [3, 4]. In der Tat haben GSI-Wissenschaftler über viele Jahre aktiv am Aufbau der Forschungsstätten in Lanzhou mitgewirkt. Der CSRe ist jedoch keinesfalls nur eine Blaupause des Experimentier-Speicherrings ESR in Darmstadt, sondern die chinesischen Kollegen haben sich im Design und in der Datenanalyse einige Verbesserungen einfallen lassen. So haben sie die Flugzeitdetektoren weiterentwickelt, diese erreichen eine sehr gute Zeitauflösung und Beobachtungseffizienz und können sehr hohe Ereignisraten aufzeichnen. Die Datenaufnahme erfolgt zeitkorreliert, um mögliche Änderungen der experimentellen Bedingungen korrigieren zu können.

Da die Isochronie in einem Speicherring nur über einen begrenzten Geschwindigkeitsbereich gilt, ist für Präzisionsmessungen eine zusätzliche Geschwindigkeitsbestimmung nötig [5]. Deshalb ist geplant, in der geraden Sektion des CSRe zwei Flugzeitdetektoren für eine In-Ring-Geschwindigkeitsmessung zu installieren. Die Erfahrungen damit sollen schließlich in das Massenmessungs-Experiment ILIMA an der künftigen FAIR-Anlage in Darmstadt einfließen.

Auch hier arbeiten Chinesen und Deutsche mit vielen internationalen Kollegen eng zusammen, um nach der Fertigstellung erstmals die Massen extrem neutronenreicher Kerne präzise zu bestimmen. Diese sind für das Verständnis des r-Prozesses nötig – der astrophysikalischen Nukleosynthese von Elementen wie Gold und Uran. Damit lassen sich dann auch die Vorgänge in Supernova-Explosionen präziser berechnen.

Gabriel Martínez-Pinedo und
Karlheinz Langanke

- [1] H. Schatz et al., Phys. Rep. **294**, 167 (1998)
- [2] X. L. Tu et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 112501 (2011)
- [3] B. Franzke, H. Geissel und G. Münzenberg, Mass Spectrometry Reviews **27**, 428 (2008)
- [4] K. Blaum und H. Schatz, Physik Journal, Februar 2006, S. 35
- [5] H. Geissel, R. Knöbel, Yu. A. Litvinov et al., Hyperfine Interactions **173**, 49 (2006)

Dr. Gabriel Martínez-Pinedo, Prof. Dr. Karlheinz Langanke, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt

KURZGEFASST

■ Schwere Antimaterie

Durch Kollisionen von relativistischen Ionen lassen sich in Teilchenbeschleunigern Temperaturen und Dichten erzielen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten. Hier wie dort entstehen dabei neben Teilchen auch Antiteilchen. Am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) ist es der STAR-Kollaboration nun erstmals gelungen, Anti-Helium-4 zu erzeugen. Diese schwersten bislang nachgewiesenen Antikerne bestehen aus zwei Antiprotonen und zwei Antineutronen. In den Reaktionsprodukten von einer Milliarde Gold-Gold-Kollisionen konnten die beteiligten Physiker gerade einmal 18 Antikerne nachweisen. *STAR Collaboration*, Nature **473**, 353 (2011)

■ Das kleinste Oder

Aus nur drei Eisen-Atomen besteht das Herz eines Oder-Gatters, das Physiker an der Universität Hamburg auf einer Kupferoberfläche gebaut haben. Angesteuert wird das Gatter über zwei Kobaltinseln, deren magnetisches Moment sich entsprechend der Zustände 0 und 1 ausrichten lässt. Von jeder Insel aus führt eine Kette aus Eisenatomen zur anderen hin. Wo sich die Ketten treffen, sitzt ein zusätzliches Eisenatom, dessen magnetisches Moment sich mit der spinsensitiven Nadel eines Rastertunnelmikroskops auslesen lässt. Da die einzelnen Spins antiferromagnetisch koppeln, führt nur eine 0 an beiden Co-Inseln zu einer 0 am Ausgang. A. A. Khajetoorians et al., Science DOI: 10.1126/science.1201725 (2011)