

Die stärksten Magnetfelder im Universum

Computersimulationen zeigen, dass sich bei der Verschmelzung von Neutronensternen deren Magnetfelder extrem schnell und äußerst effektiv verstärken. Dieser Mechanismus stützt eine der Theorien zur Entstehung von Gammastrahlenausbrüchen.

Zu den leuchtkräftigsten Explosionen im Universum gehören die Gammablitz (englisch: gamma-ray bursts, GRBs). Es sind extreme Ausbrüche von Gammastrahlen, der energiereichsten Form von Licht. Entsprechend ihres zeitlichen Verlaufs unterteilt man sie üblicherweise in zwei Klassen: Während der Ursprung der langen – an die dreißig Sekunden dauernden – einer seltenen Art Supernovaexplosion zugeschrieben wird, ist der genaue Mechanismus der extrem kurzen (wenige Zehntelsekunden währenden) Gammastrahlenausbrüche bis heute rätselhaft.

Kürzlich durchgeführte Beobachtungen, unter anderem mit dem vor zwei Jahren gestarteten NASA-Satelliten SWIFT, favorisieren aufgrund der Variabilität auf äußerst kurzer Zeitskala ein Szenario der Verschmelzung zweier kompakter Objekte, wie etwa zweier Neutronensterne oder eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch.

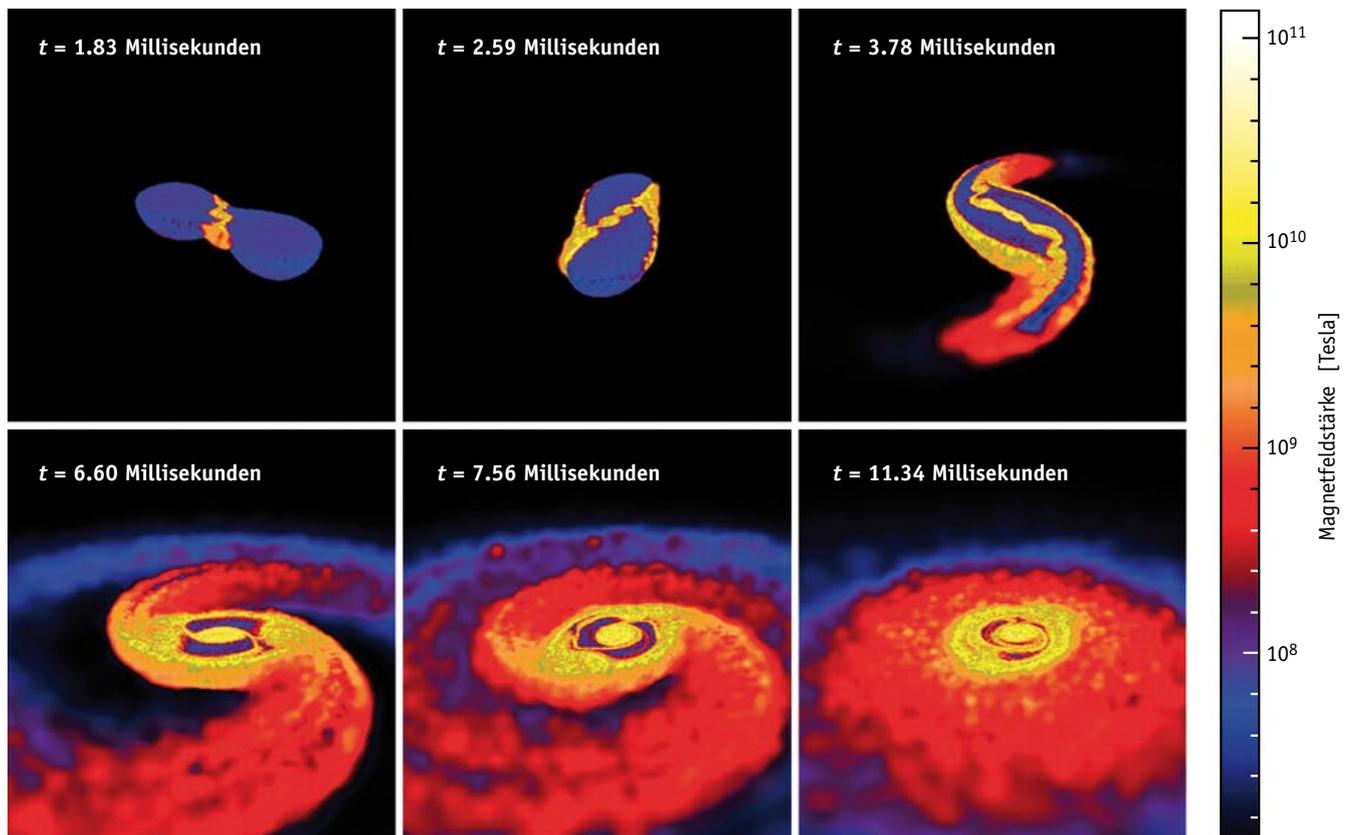
Ein solcher Gammastrahlenausbruch setzt Materie enormen relativistischen Beschleunigungen aus. Dies lässt Astronomen schnell das Vorhandensein extrem starker Magnetfelder vermuten, da diese beispielsweise bei der Beschleunigung von Jets eine zentrale Rolle spielen. Dadurch motiviert, untersuchten Daniel J. Price von der University of Exeter und Stephan Rosswog von der International University Bremen, welche Stärke Magnetfelder bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne annehmen können, und auf welcher Zeitskala dies geschieht (Science 312, 719–722 [2006]).

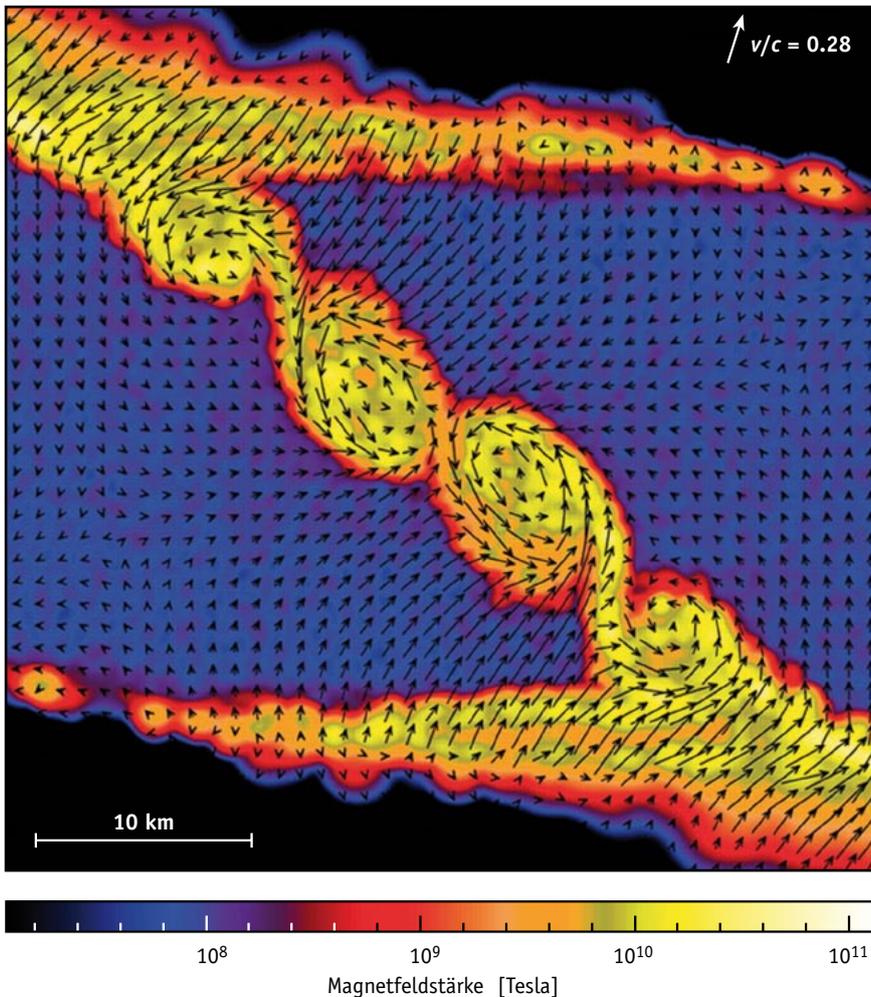
Kompression zu Kernmaterie

Neutronensterne entstehen gängigen Modellen zufolge als Endprodukte der Entwicklung von Sternen, die am Ende ihres Daseins eine Masse zwischen 1,4 und drei Sonnenmassen aufweisen. Sobald die Kernfusionsprozesse im Inneren zum Erliegen kommen, wird der

Stern instabil: Der Gravitationsdruck, der bis zu diesem Zeitpunkt durch den Strahlungsdruck kompensiert wurde, führt zum Kollaps des Sterns. Er stürzt so weit in sich zusammen, bis sich schließlich wieder ein genügend großer Gegendruck aufbaut. Dies ist dann der Fall, wenn die komprimierte Materie die Dichte von Atomkernen erreicht. Somit müssen nun für eine Beschreibung dieser kompakten Himmelskörper viele Prozesse aus der mikroskopischen Welt beachtet werden, wie etwa eine kernphysikalische Zustandsgleichung der Materie oder Effekte durch die schwache Wechselwirkung der Konstituenten, in-

▣ Abb. 1: Was geschieht mit dem Magnetfeld, wenn zwei Neutronensterne verschmelzen? Diese Simulation, in der die Feldstärke farblich kodiert ist, zeigt: Innerhalb von Millisekunden nimmt es um drei Größenordnungen zu. In dieser kurzen Zeit bilden sich Spiralarme, die sich um das Zentralobjekt wickeln und einen heißen Torus bilden. Das Magnetfeld wird in den entstehenden Wirbeln der Kontaktfläche verstärkt, mit dem Material mittransportiert und umfasst schließlich die Oberfläche des Zentralobjekts. Die Breite jedes Teilbildes entspricht etwa 140 Kilometern (Bild: Daniel Price und Stephan Rosswog)





◀ Abb. 2: An der Grenzfläche der beiden verschmelzenden Neutronensterne bilden sich Wirbel aus, die das Magnetfeld verstärken und schließlich zur Oberfläche wandern (gezeigt ist ein Ausschnitt aus der Sequenz in Abb. 1 zur Zeit $t = 2.65$ Millisekunden). Die Farbkodierung stellt wiederum die verschiedenen Magnetfeldstärken dar, und die überlagerten Pfeile geben die Richtung der strömenden Neutronensternmaterie und deren Geschwindigkeit v in Bruchteilen der Vakuumlichtgeschwindigkeit c an.

prozess beginnt (Abb. 1). Sobald sich ihre Oberflächen berühren, tritt ein weiterer physikalischer Effekt auf: Ströme in umgekehrter Richtung, so bilden sich an der Grenzfläche Wirbel aus. Bedingt werden sie durch die immer weiter zunehmende Verstärkung von geringen Störungen. Physiker bezeichnen dies als Kelvin-Helmholtz-Instabilität. Wenn auch nicht unter diesem Namen, so ist das Phänomen doch jedem bekannt. Denn derselbe Effekt führt zur Ausbildung von Wellen, sobald Wind über eine Wasseroberfläche streicht.

Nach ungefähr einer Rotation haben sich diese Wirbel bereits ausgebildet (Abb. 2). In der zeitlichen Sequenz des Verschmelzungsprozesses sieht man deutlich die Verstärkung des Magnetfeldes in den durch die Instabilität gebildeten Strudeln; erkennbar an der Farbänderung von dunklem Blau hin zu hellem Gelb.

Bisher war immer unklar, welche Magnetfeldstärken durch derartige Verschmelzungsszenarien erreicht werden können. Mittels ihrer Simulationen können Price und Rosswog nun eine untere

klusive der Kühlung durch die Emission von Neutrinos.

Um den Verschmelzungsprozess exakt berechnen zu können, wird also nicht nur die Hydrodynamik benötigt, sondern auch der Gleichungsapparat der relativistischen Gravitationstheorie und von Teilen der Kernphysik. Dies macht den Vorgang zu einem schwierigen Simulationsobjekt. Während man in bisherigen Berechnungen bereits mit den erwähnten komplexen Prozessen und der Hydrodynamik an die Grenzen des Möglichen stieß, gelang es Price und Rosswog mittels Magneto-Hydrodynamik-Simulationen, zusätzlich die Entwicklung von Magnetfeldern zu berücksichtigen.

Tausendfache Verstärkung

Den Formeln von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie gemäß strahlen zwei derart kompakte Körper, die einander eng umkreisen, Gravitationswellen ab. Glänzende indirekte Bestätigung fand dies in der Beobachtung der Bahnfrequenz des berühmt gewordenen Doppelsystems aus zwei Pulsaren mit der Bezeichnung PSR 1913+16 (siehe SuW 11/1993, S. 770–777). Ein direkter Nachweis steht noch aus, wird aber von der neuen Generation von Gravitationswellendetektoren – wie dem deutsch-britischen Projekt

GEO600 bei Hannover und dem US-amerikanischen LIGO-Detektor – erwartet.

Die abgestrahlten Gravitationswellen tragen Energie mit sich, die der Bahnbewegung des Doppelsystems entzogen wird. Dadurch bewegen sich die Neutronensterne spiralförmig aufeinander zu. Genau solche Systeme untersuchen Price und Rosswog in ihren Simulationen. Sie starten mit zwei kalten Neutronensternen mit jeweils dem 1.4-fachen der Sonnenmasse, was gerade der von Subrahmanyan Chandrasekhar entdeckten Massengrenze entspricht. Anfänglich bewegen sie sich in einer Entfernung von 48 Kilometern auf Kreisbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems. Da beide sehr schnell aufeinander zustürzen, konnten die Autoren Gezeiteneffekte vernachlässigen und die Neutronensterne als nichtrotierend annehmen.

Naturgemäß besitzen Neutronensterne starke Magnetfelder von einigen 10^8 Tesla – das ist das Billionenfache des irdischen Magnetfelds. Im Laufe der Verschmelzung werden sie jedoch um weitere drei Größenordnungen verstärkt.

Je mehr Energie abgestrahlt wird, umso näher kommen sich die beiden Neutronensterne, bis schließlich nach weniger als einem Umlauf, was etwa zwei Millisekunden entspricht, der Verschmelzungs-

Weitere Literatur

Agnieszka Janiuk et al.: On the origin of the bimodal duration distribution of gamma-ray bursts and the subset model. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **365**, 874–884 [2006]

Robert Irion: A very good year for explosions. *Science* **311**, 30–32 [2006]

Edo Berger et al.: The afterglow and elliptical host galaxy of the short γ -ray burst GRB 050724. *Nature* **438**, 988–990 [2005]

Weblinks zu weiteren Informationen sowie zu Filmen und Bildern zum Download finden Sie unter www.suw-online.de

Grenze für die erreichbaren Magnetfelder angeben. Diese beträgt bei ihren derzeitigen Simulationen 2×10^{11} Tesla, was dem Tausendfachen der anfänglichen Felder entspricht. »Das sind unglaubliche Größenordnungen. Magnetfelder, die wir aus dem Alltag kennen, etwa bei einem Magneten, den man zum Anheften von Notizzetteln nutzt, betragen nur etwa ein hundertstel Tesla«, kommentiert Stephan Rosswog. Und in irdischen Hochfeldlaboren wurden mit großem Aufwand Magnetfelder von knapp hundert Tesla erreicht – weniger als ein Milliardenstel dessen, was Neutronensterne bei ihrer Verschmelzung zu erzeugen vermögen.

Vermutlich kann die Natur noch gewaltigere Magnetfeldstärken durch diesen Prozess hervorrufen. Anhand von analytischen Berechnungen zur Kelvin-Helmholtz-Instabilität lässt sich nämlich zeigen, dass die kleinsten auftretenden Skalen den Verstärkungsfaktor maßgeblich bestimmen. Somit sind die Simulationen stets durch die erreichbare numerische Auflösung beschränkt und damit von der weiteren Entwicklung von Höchstleistungscomputern abhängig. Für die hier gezeigten Simulationen waren ungefähr ein Monat Rechenzeit auf dem im vorigen Jahr in Betrieb genommenen Hochleistungsrechner der International University Bremen notwendig.

Damit präsentieren Price und Rosswog einen extrem schnellen Mechanismus, der Magnetfelder um mehrere Größenordnungen verstärkt. Er wirkt auf einer Zeitskala von weniger als einer Millisekunde. Dies ist deutlich schneller als die 50 bis 100 Millisekunden, die für die Entstehung eines Schwarzen Loches in solch einer Situation vonnöten sind.

Im weiteren Verlauf der Simulation sieht man, wie das Magnetfeld mit der Materie mittransportiert wird und sich schließlich auf die Oberfläche des Zentralobjekts legt (Abb. 1). Parallel dazu bilden sich an den verschmolzenen Neutronensternen Spiralarme aus, die schnell zu einer heißen, ringförmigen Verteilung des Materials ausgeschmiert werden und überschüssigen Drehimpuls nach außen abtransportieren können.

Abschätzungen zufolge verschmelzen pro Galaxie und pro einer Million Jahre zwischen vier und 220 Neutronensterne in einem Doppelsystem miteinander. Diese Zahlen sind um etwa zwei Größenordnungen höher als die Rate, die notwendig ist, um die kurzen Gammablitz zu erklären. Damit bleibt noch genügend Luft, um Effekte, welche die sichtbare Anzahl an GRBs verringern, und solche Doppelsysteme, welche die Bedingungen nicht erfüllen, subtrahieren zu können.

MARC SCHARTMANN

LOFAR: Startschuss für deutsche Stationen

Viele einfache Antennen sowie eine gigantische Datenmenge und Rechnerleistung – das ist, kurz gesagt, das Konzept von LOFAR, dem Low Frequency Array. Während der Kern dieses digitalen Radioteleskops in den Niederlanden aufgebaut wird, sollen zusätzliche Stationen in Deutschland das Auflösungsvermögen der Anlage erhöhen.

Klassische Radioteleskope sammeln Strahlung mit parabolförmigen Reflektoren, und computergesteuerte Motoren führen sie der scheinbaren Bahn einer Radioquelle am Himmel nach. LOFAR (das Low Frequency Array) ist das erste digitale Radioteleskop, das keine beweglichen Teile und Motoren mehr benötigt (SuW 5/2004, S. 24ff. und www.lofar.org).

Ein digitales oder phasengesteuertes Teleskop (englisch: Phased Array) besteht aus einer großen Zahl von Antennen, die fest am Boden montiert und in Stationen (Antennenfeldern) angeordnet sind. Die Blickrichtung und die Größe des Gesichtsfelds werden elektronisch gesteuert. Ein zentraler Supercomputer nimmt die digitalen Signale aller Dipole auf und kombiniert sie zu einem Bild. Dessen Auflösung wird durch den Abstand der äußersten Stationen bestimmt. LOFAR kann im Prinzip den gesamten Himmel

gleichzeitig beobachten, was jedoch wegen der begrenzten Rechenleistung und Kapazität der Datenspeicher heute noch nicht möglich ist. Immerhin kann LOFAR in mehrere Richtungen gleichzeitig beobachten, also mehrere Astronomen-Teams mit Daten versorgen.

Das Prinzip des digitalen Radioteleskops ist seit langem bekannt, aber erst jetzt erlauben integrierte Elektronik, Superrechner, schnelle Datenleitungen und kostengünstige, große Datenspeicher die Realisierung. Das Institut ASTRON bei Dwingeloo in den Niederlanden arbeitet seit einigen Jahren am Projekt LOFAR. Im Jahr 2005 stellten die niederländische Regierung und die Provinzen der Nord-Niederlande 74 Millionen Euro zur Verfügung, sodass die Realisierung beginnen konnte.

LOFAR arbeitet in zwei Frequenzbereichen, für die jeweils ein spezieller An-

Stellenausschreibung

Am Astrophysikalischen Institut und Universitäts-Sternwarte Jena ist zum 1. Oktober 2006 eine Stelle zu besetzen:

Diplom-Ingenieurin (FH)/Diplom-Ingenieur (FH)

Schwerpunktaufgaben sind Betrieb und Weiterentwicklung des 90-cm-Teleskops in Großschwabhausen nahe Jena, Betreuung der beiden Astro-Labore der FSU Jena und Entwicklung neuer astronomischer Instrumente für internationale Großteleskope.

Gesucht wird ein/eine Diplom-Ingenieur/in (FH) bzw. eine Person mit gleichwertigen Qualifikationen. Qualifikationsanforderungen umfassen Vorkenntnisse in Optik, Elektronik und Steuerungstechnik; besondere Kenntnisse in Astronomie, astronomischem Gerätebau und -rekonstruktion sowie Informatik und Software-Entwicklung wären günstig.

Fragen zu Anforderungen und Aufgaben beantwortet Prof. Dr. Ralph Neuhäuser, Astrophysikalisches Institut und Universitäts-Sternwarte Jena, Tel.: 03641-947500, E-Mail: rne@astro.uni-jena.de

Es handelt sich um eine Stelle im Umfang von 75 v. H. einer/s vollbeschäftigten Angestellten. Eine Aufstockung der Stelle durch Drittmittel ist möglich. Die Stelle ist befristet für zwei Jahre. Bei entsprechender Eignung kann sich eine Dauerbeschäftigung daraus ergeben. Die Vergütung erfolgt gemäß BAT-O. Bewerbungen von Frauen sind besonders erwünscht. Schwerbehinderte werden bei gleicher fachlicher Eignung bevorzugt berücksichtigt. Bewerbungsunterlagen reichen Sie bitte bis zum **31. August 2006** an die *Friedrich-Schiller-Universität Jena, Dezernat für Personalangelegenheiten, Fürstengraben 1, D-07743 Jena.*