

Sterne mit großer Anziehung

Sie gehören zu den exotischsten Objekten im All: Neutronensterne. Unvorstellbar dicht und nur 20 Kilometer groß, rotieren sie rasend schnell um ihre Achsen, wobei sie Strahlungskegel in den Raum senden. Manche dieser kosmischen Leuchttürme haben besonders starke Magnetfelder.

Michael Gabler vom **Max-Planck-Institut für Astrophysik** in Garching studiert diese Magnetare – und lernt so einiges über deren Beschaffenheit.

TEXT **HELMUT HORNING**

Am fünften Tag der Reise kam ein gewaltiger Sturm auf, der das Boot immer weiter vom Kurs abtrieb – direkt auf den Magnetberg zu. Da halfen auch keine Gebete: „Die Kraft des Berges begann, das Schiff an sich zu ziehen, dass es in Stücke ging.“ Die Ritter im Volksbuch *Herzog Ernst* aus dem späten 12. Jahrhundert müssen mit einer der Gefahren kämpfen, die neben furchtbaren Schlangen und anderen Monstern auf die Seefahrer früherer Epochen in den Untiefen des Ozeans lauerten. Irdische Magnetberge gehören allerdings ins Reich der Fabel. Magnetische Sterne aber gibt es tatsächlich.

Magnetfelder sind im Universum allgegenwärtig. Sie existieren um Planeten, durchziehen unsere Milchstraße und stecken nicht nur im galaktischen Gas, sondern finden sich auch in den daraus geformten Sonnen. Die meisten Sterne besitzen allerdings nur sehr schwache globale Magnetfelder. In den 1950er-Jahren entdeckten die Astronomen aber sogenannte Ap-Sterne. In deren Hüllen fanden sich große Mengen an Metallen wie Mangan oder

Chrom. Diese Himmelskörper haben die zwei- bis zehnfache Masse unserer Sonne – und ein tausendfach stärkeres Magnetfeld. Der Stern Alioth in der Deichsel des Großen Wagens beispielsweise zählt zu dieser Familie. Auch unter den Weißen Zwergen, den ausgebrannten Kernen gewöhnlicher Sterne, fanden die Forscher manch magnetisches Exemplar.

EINE POTENZIELLE GEFAHR FÜR INTERSTELLARE RAUMSCHIFFE

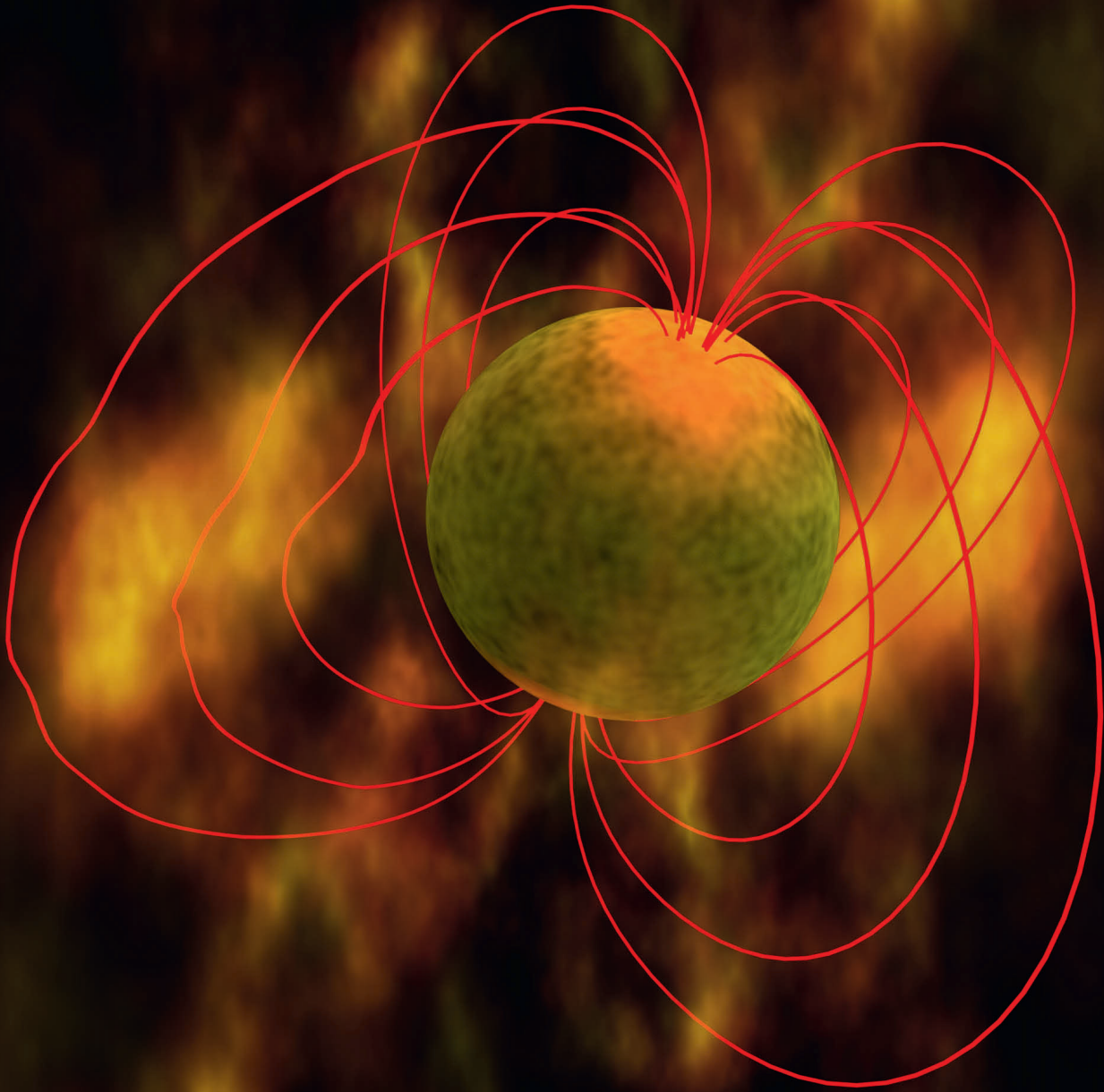
Doch die Magnetare schlagen alles. Die extrem dicht gepackten, etwa 20 Kilometer großen Überbleibsel von Supernovae drehen sich schnell um ihre Achsen. Während der Geburt eines solchen Neutronensterns wird nicht nur die Materie gewaltig zusammengequetscht, sondern auch das Magnetfeld stark komprimiert, das ein Dynamoeffekt kurz nach dem Kollaps noch weiter verstärken kann.

So erreichen diese Sternleichen Feldstärken, die denen von 100 Milliarden handelsüblichen Stabmagneten entsprechen. „Ein Magnetar in Mondent-

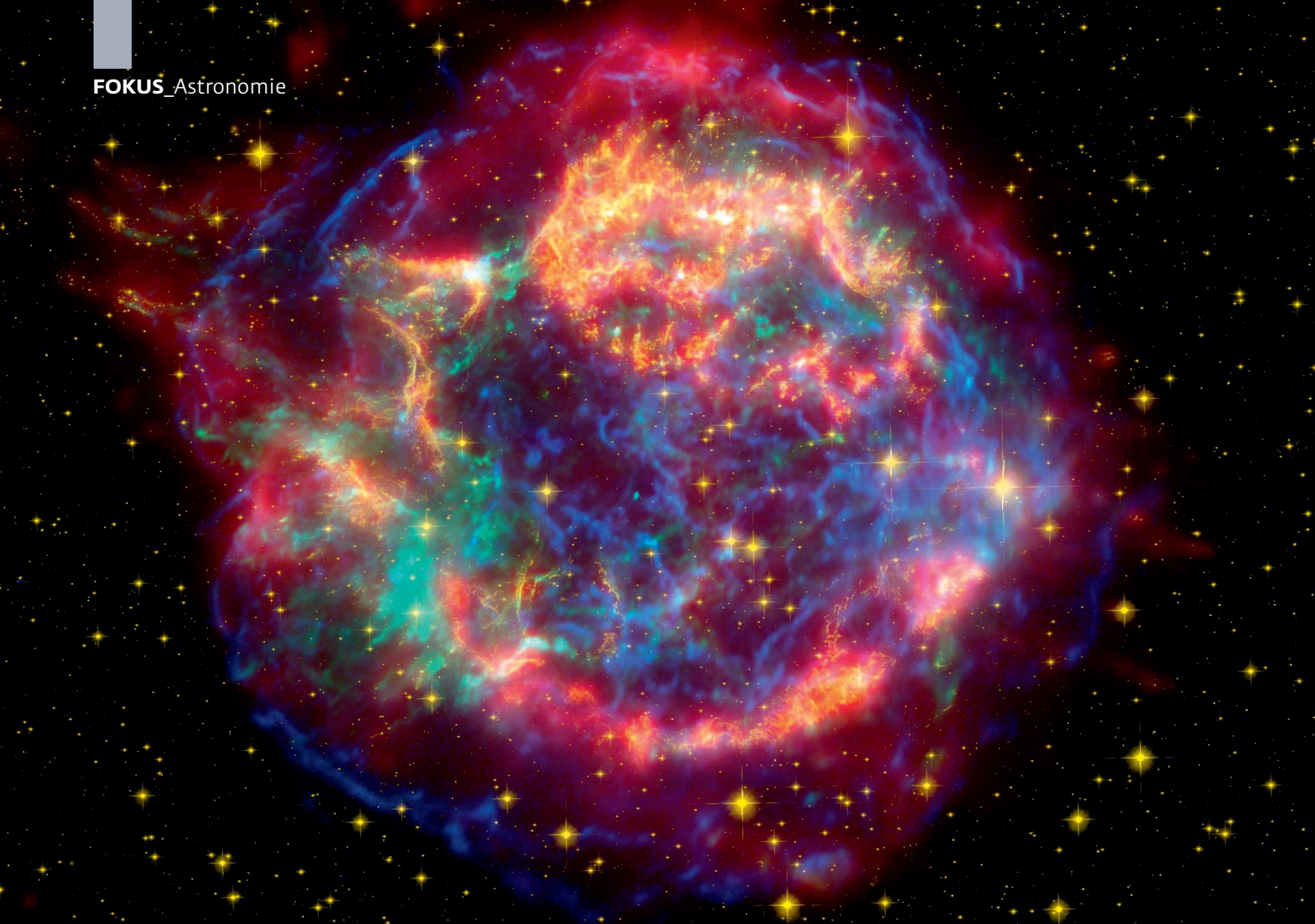
fernung würde Ihnen alle Daten von Ihrer Kreditkarte in der Hosentasche löschen“, sagt Michael Gabler. Für interstellare Raumschiffe könnten diese Sterne also eine echte Gefahr bedeuten. Aber der Forscher am Max-Planck-Institut für Astrophysik interessiert sich weniger für Fiktion. Denn die Magnetare sind auch für die Wissenschaft spannend genug.

Die Gebilde haben eine bewegte Geschichte. Sie entstehen beim spektakulären Tod einer Sonne, einer Supernova. Dabei ist ein Stern zwischen acht und 20 Sonnenmassen in die Energiekrise geraten. Der Brennstoff, der die Kernfusion über Jahrtausende speiste, ist aufgebraucht. Der nukleare Ofen erlischt. Die Kugel besteht jetzt wie eine Zwiebel aus Schalen aller möglichen chemischen Elemente, die während der Fusion erzeugt wurden. Schließlich bildet sich im Zentrum ein Eisenkern. Dichte und Temperatur nehmen weiter zu, bis die Eisenatome förmlich verdampfen.

Die Gravitation übt einen stetig wachsenden Druck aus, dem der etwa erdmondgroße Kern irgendwann nicht mehr standhält: Er kollabiert in Bruch-



Kosmische Kugel: Magnetare sind extrem dicht gepackte, rotierende Neutronensterne und besitzen außergewöhnlich starke Magnetfelder.



teilen von Sekunden. Die Materie stürzt auf das Zentrum zu, das gleichzeitig weiter komprimiert – so lange, bis sie zurückprallt. Ähnlich wie bei einer Feder, die man erst zusammendrückt und dann loslässt, entweicht die Energie schlagartig nach außen und reißt die Materie ins freie All mit. Im Überrest der zentralen Kugel von 1,4 Sonnenmassen herrscht eine Dichte wie im Innern eines Atomkerns. Das ist die Geburtsstunde des Neutronensterns. (Wobei das Wort *Geburtsstunde* reichlich übertrieben ist, denn all das passiert innerhalb von Millisekunden.) Der Neutronenstern heizt sich auf Temperaturen bis zu 500 Milliarden Grad auf und produziert eine Unmenge an Neutrinos.

Diese Neutrinos – elektrisch neutrale Teilchen mit extrem wenig Masse, die kaum mit Materie wechselwirken – sind für den Explosionsprozess von essenzieller Bedeutung. Denn die nach außen rasende Stoßwelle, die den Stern zerfetzen sollte, läuft sich nach wenigen Hundert Kilometern tot. Die Neutrinos hingegen transportieren so viel Energie

vom Kern zur Stoßwelle, dass die Sternhülle schließlich doch weggeschleudert wird. Eine Supernova leuchtet auf.

EINE SUPERNOVA EXPLODIERT IN DREI DIMENSIONEN

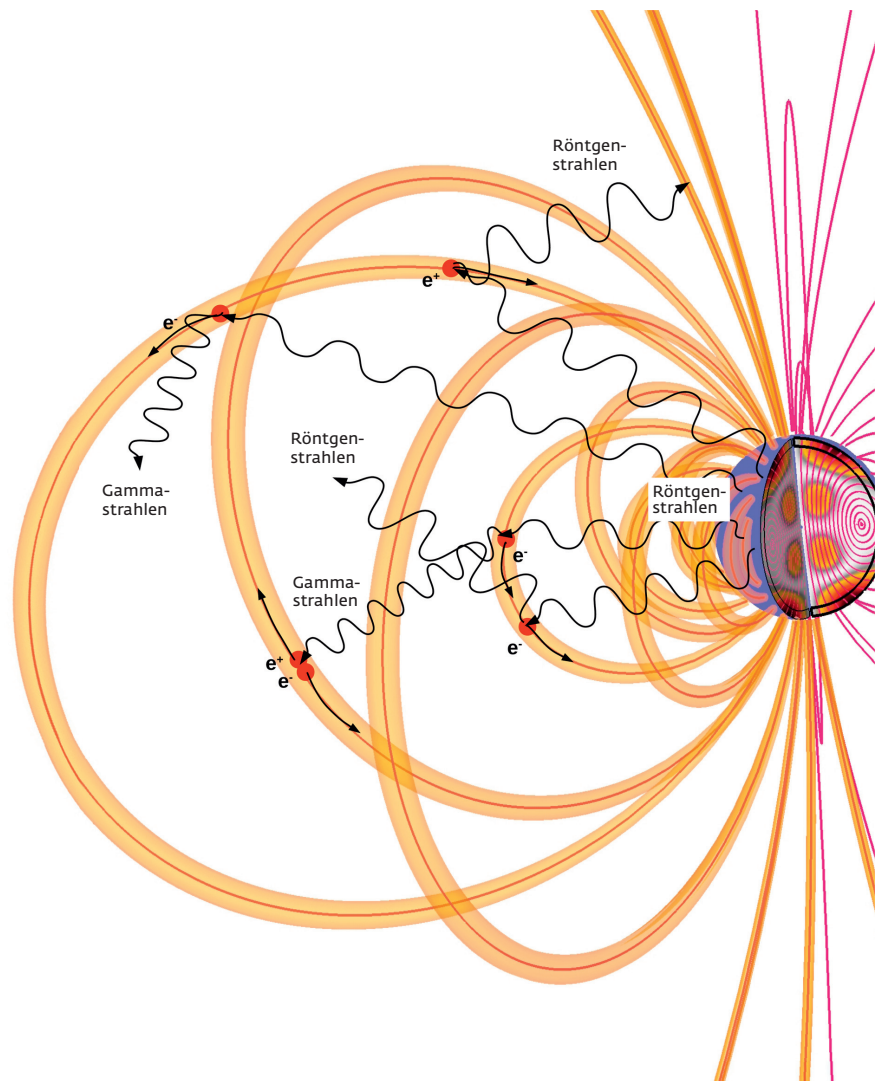
Das exakte Szenario einer solchen kosmischen Katastrophe mit Neutrinoheizung ist weitaus komplizierter und Gegenstand intensiver Forschungen, auch am Garching Max-Planck-Institut für Astrophysik. Mit Supercomputern versuchen die Wissenschaftler dort, Sternexplosionen im Modell nachzustellen. Im Jahr 2014 gelang einer Gruppe um Thomas Janka zum ersten Mal die Simulation einer Supernova in drei Dimensionen mit sämtlichen physikalisch wichtigen Effekten.

Michael Gabler widmet sich dem, was nach dem flammenden Inferno übrig bleibt: den Neutronensternen. „Deren Eigenschaften lassen sich im irdischen Labor nicht nachvollziehen“, sagt er. Allein die Dichte übersteigt jene eines Atomkerns. Und ein würfelzucker-

großes Stück Sternmaterie würde auf der Erde nicht weniger als eine Milliarde Tonnen wiegen.

Wie ist ein Neutronenstern vom Durchmesser einer Stadt wie München beschaffen? Welche Wechselwirkungen haben die kleinsten Bestandteile der Sternmaterie, also Neutronen, Protonen und Elektronen, aber auch so exotische Partikel wie Pionen, Kaonen und Quarks? „Um Antworten auf solche Fragen zu gewinnen, müssen wir den Aufbau eines Neutronensterns verstehen“, sagt Gabler. Und dabei helfen Magnetare.

Diese Gebilde sind die stärksten Magneten im Universum. An ihren Oberflächen erreichen die Magnetfelder Werte bis zu einigen Billionen Gauß. Zum Vergleich: Das irdische Magnetfeld bringt es gerade mal auf ein Gauß, im Labor lassen sich Magnetfelder von maximal zehn Millionen Gauß erzeugen. Allerdings gibt es doch eine Ähnlichkeit zwischen Erde und Magnetaren: Beide besitzen ein starkes magnetisches Dipolfeld. Und der Entstehung der beiden Felder liegt der Dynamoeffekt zugrunde,



Linke Seite: GAU im All: Wenn einem masse-reichen Stern der Brennstoff ausgeht, kollabiert er und wird bei der folgenden Explosion förmlich in Fetzen gerissen. Den Überrest einer solchen Supernova zeigt diese kombinierte Falschfarbenaufnahme aus Bildern im Röntgen- und Infrarotbereich sowie im Optischen. Das Licht des Cassiopeia A genannten Objekts erreichte die Erde um das Jahr 1680.

Diese Seite: Neutronensterne – insbesondere Magnetare – sind von starken Magnetfeldern umgeben. Entlang der Feldlinien (magenta) fließen elektrische Ströme (gelb), die hauptsächlich aus Elektronen (e^-) und Positronen (e^+) bestehen. Die Röntgenstrahlung der Sternoberfläche wird an diesen Ladungsträgern gestreut. Die gelegentlich daraus resultierende hochenergetische Gammastrahlung kann weitere Elektron-Positron-Paare erzeugen.

der jeweils auf der Bewegung von leitfähiger Materie beruht. Im Fall der Erde ist es im Wesentlichen das flüssige Eisen im Kern, beim Neutronenstern die ultradichte Materie. „Die Sterne sind sehr heiß, Neutrinos führen die Energie ab. Dadurch existiert eine hohe innere Dynamik“, sagt Gabler.

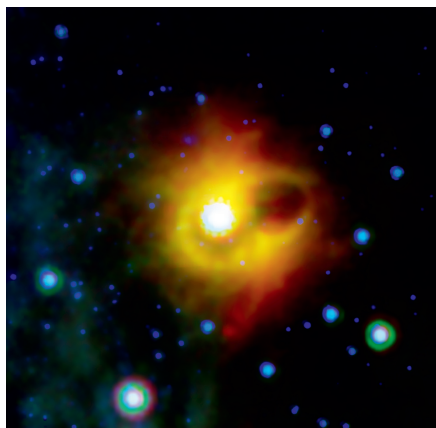
Dazu kommt, dass der Vorläuferstern ja ebenfalls über ein mehr oder weniger starkes Magnetfeld verfügte,

das beim Kollaps komprimiert und in den Neutronenstern gleichsam eingebackten wurde. Eine wichtige Rolle spielt nicht zuletzt die Rotation. Denn der stellare Dipol sendet Energie aus, die er aus der Umdrehung gewinnt. Und dadurch lässt sich ein Neutronenstern überhaupt erst beobachten. Andernfalls wäre ein 20 Kilometer großes, einige Hundert oder Tausend Lichtjahre entferntes Objekt selbst mit den besten Teleskopen gar nicht zu sehen.

Entlang der Magnetfeldachse sendet der rotierende Neutronenstern einen eng gebündelten Strahlungskegel aus. Ähnlich einem Leuchtturm, streift dieser Kegel durch den Raum. Überstreicht er dabei die Blickrichtung zur Erde, sehen die Astronomen ein rhythmisches Blinken, dessen Frequenz der Rotationsperiode des Sterns entspricht. Im Jahr 1967 spürte Jocelyn Bell in England durch Zufall das erste derartige Objekt auf.

Mehr als 2200 dieser Pulsare kennen die Forscher heute. Ihre Strahlung deckt das gesamte elektromagnetische Spektrum ab und reicht von den Radiowellen bis hin zum Gammalicht (MAX-PLANCKFORSCHUNG 3/2013, Seite 48 ff.). Etwa zehn Prozent aller beobachteten Neutronensterne gehören zur Familie der Magnetare. Diese treten allerdings nur als sehr schwache Pulsare auf. Die Ursache dafür liegt in ihrer Drehgeschwindigkeit: „Aus der Pulsfrequenz können wir ableiten, dass Magnetare im Gegensatz zu vielen anderen Neutronensternen in der Regel sehr langsam rotieren“, erklärt Michael Gabler. Die Werte rangieren zwischen zwei und zehn Sekunden pro Umdrehung.

Wie bereits erwähnt, strahlt der Dipol auf Kosten der Rotation elektromagnetische Energie ab. Kurz: Die Rotationsgeschwindigkeit nimmt stetig ab. Tatsächlich beobachten die Astronomen eine solche Verlangsamung, die sich in den Pulsen bemerkbar macht; bei Magnetaren beträgt sie typischerweise rund drei Millisekunden pro Jahr. >



Überbleibsel: Ein Ring aus Materie, die bei einer Supernova ausgestoßen wurde, umgibt den Neutronenstern SGR 1900+14.



Experte für Außerirdisches: Am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching studiert Michael Gabler die Eigenschaften einer speziellen Sorte von Neutronensternen, Magnetare genannt.

Die Verlangsamung lässt sich in Abhängigkeit von der Zeit auftragen. Aus einem derartigen „Perioden-Periodenveränderungsdiagramm“ berechnen die Experten direkt die Stärke des Magnetfelds. Dabei gilt: Je größer die Abnahme der Pulsfrequenz, desto stärker das Magnetfeld. Auf diese Weise finden die Forscher rasch heraus, ob ein beobachteter Pulsar zu den Magnetaren gehört. Gabler und seine Kollegen nutzen vor allem die Daten des Gammastrahlensatelliten *Swift* und des Röntgensatelliten *Rossi*.

FELDLINIEN VERDRILLEN SICH WIE GUMMIBÄNDER

Aus den Beobachtungen lassen sich auch Masse und Radius des Neutronensterns ableiten. Erstere liegt bei maximal zwei Sonnenmassen und kann aus einfachen Gesetzen der Himmelsmechanik bestimmt werden, falls der Stern Partner in einem Binärsystem ist. Der Radius entzieht sich der direkten Messung, die Astrophysiker müssen seinen Wert über Umwege – etwa die variierende Lichtintensität – erschließen.

Haben die Wissenschaftler einen Magnetar erst einmal im Fokus, dann sind weitere Messungen über einen längeren Zeitraum hinweg lohnenswert. So zeigen beispielsweise manche dieser Himmelskörper gelegentlich gigantische Explosionen, meist im Gamma- und Röntgenbereich. Diese deuten auf den katastrophalen Zusammenbruch und die anschließende Reorganisation des äußeren Magnetfelds hin. Denn der Neutronenstern besitzt noch ein zweites, inneres Magnetfeld. Dieses zwingt dem Feld außerhalb im Lauf der Zeit

» Tief im Herzen eines Neutronensterns liegt die Dichte beim Dreifachen jener eines Atomkerns, die Temperatur bei rund einer Milliarde Grad.

seine Konfiguration auf, weshalb sich die äußeren Feldlinien mehr und mehr wie Gummibänder verdrillen.

„Irgendwann ist die Spannung zu groß, die Linien brechen abrupt auf und ordnen sich neu. Diese Rekonnektion liefert die gemessene Strahlung“, sagt Gabler. Dabei entsteht eine Art Feuerball aus heißem Plasma, der im Magnetfeld festgehalten wird. Während der wenigen Zehntelsekunden, die ein derartiger Ausbruch dauert, setzt der Stern so viel Energie frei wie unsere Sonne in 1000 Jahren.

Den Ausbrüchen folgen bei einigen Objekten nach Stunden oder Jahren weitere, weniger starke. Auch im Fall eines solchen *Soft Gamma-Ray Repeater* spielt das starke Magnetfeld eine Rolle. Offenbar wirkt es auf die Kruste des Neutronensterns ein, die dadurch in Bewegung gerät, vielleicht sogar an der einen oder anderen Stelle bricht.

Woher weiß man das? Jede Explosion verändert das Licht des Objekts, das heißt, die Astronomen registrieren in seinem Röntgenspektrum eine Anzahl bestimmter Frequenzen. Der Theorie zufolge stammen sie von Schwingungen des Neutronensterns. Analog der Seismologie, die Erdbebenwellen untersucht, oder der Helioseismologie, die Schwingungen auf der Sonne studiert, sollte sich mittels der Asteroseismologie der Aufbau eines Neutronensterns analysieren lassen. Tatsächlich besteht die Aufgabe nun darin, am Rechner einen Neutronenstern zu bauen, der die registrierten Frequenzen liefert. „In ihren Größenordnungen passen die Frequenzen sehr gut zu elastischen Scherschwingungen der Sternkruste“, sagt Gabler.

Darüber hinaus beobachten die Astrophysiker einen weiteren Typ, Alfvén-schwingungen genannt. Diese Art magnetischer Wellen kommt auch auf der Sonne vor, wo sie offenbar mithelfen, die äußere Atmosphäre (Korona) aufzu-

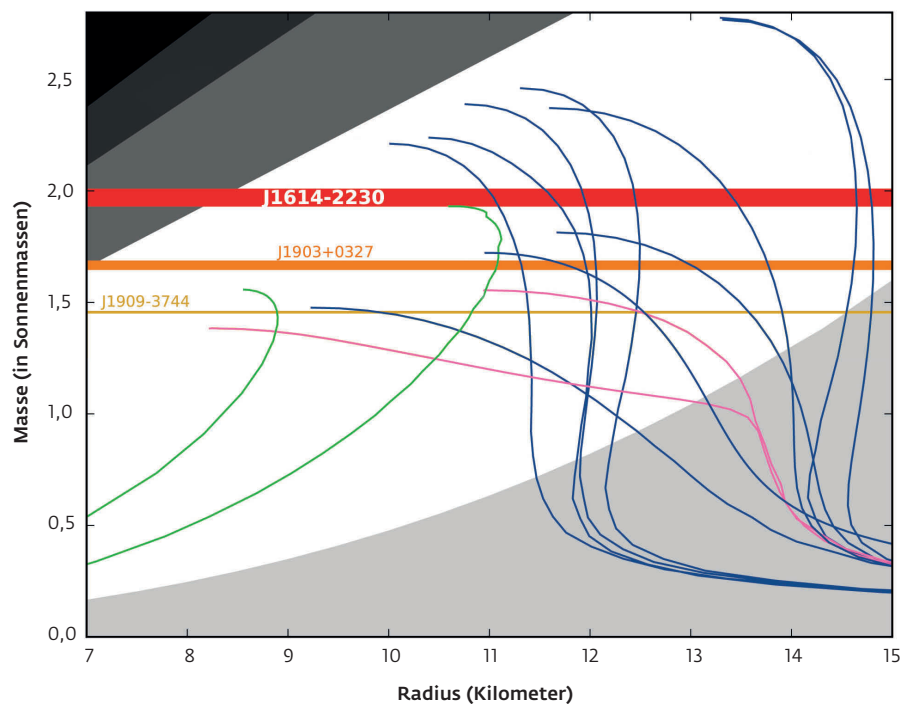
heizen. Im Fall der Neutronensterne beschränken sich die Alfvén-schwingungen nicht auf die Kruste, sondern liefern auch Informationen über den flüssigen Kern. Dazu später mehr.

DIE SCHWINGUNGEN KÜNDEN OFFENBAR VON STERNBEBEN

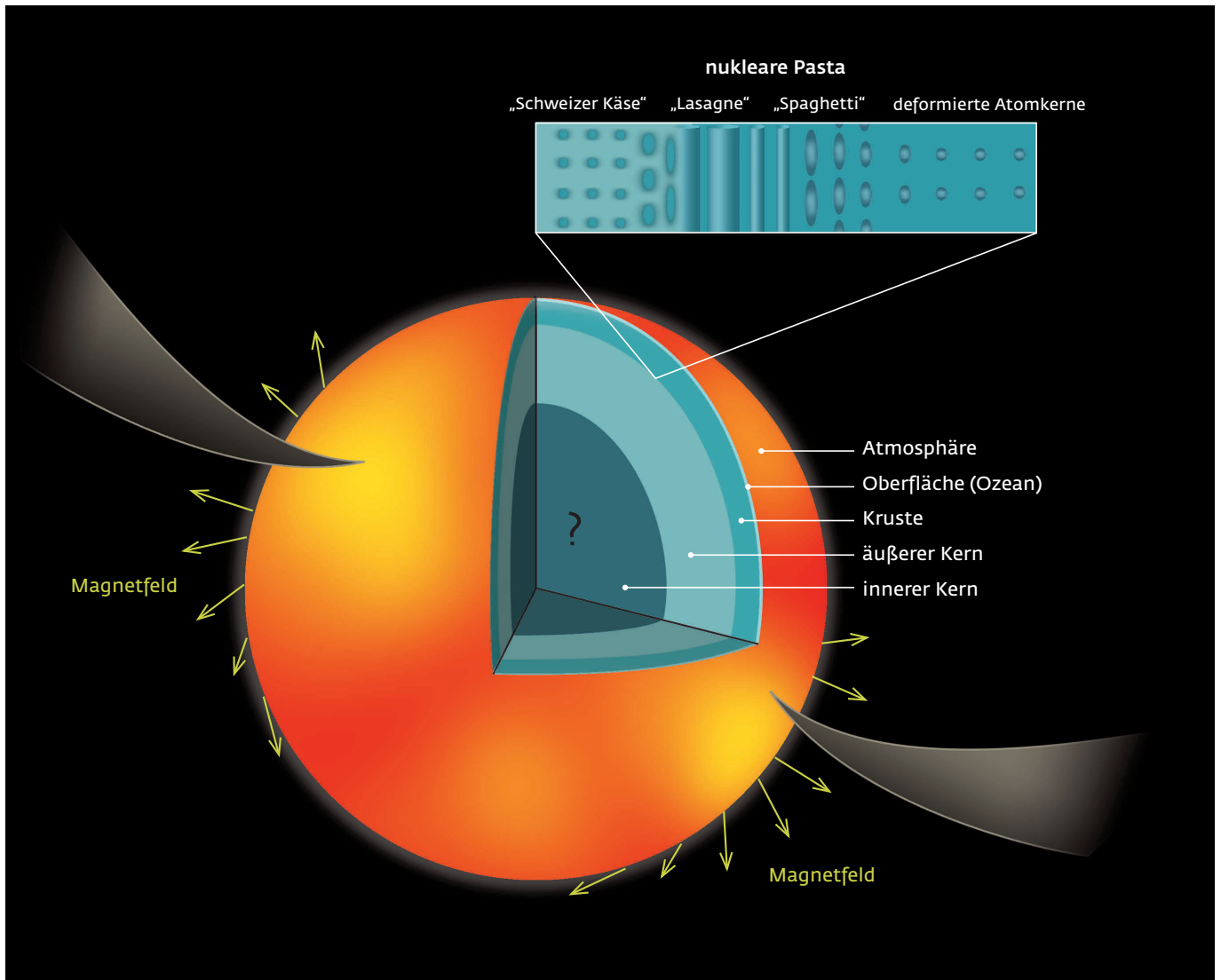
Michael Gabler und Kollegen aus anderen Instituten haben ein Modell entwickelt, in welchem sie die beiden genannten Schwingungsarten miteinander koppeln. Computersimulationen

zeigen, dass die Schwingungen sehr gut zu der Annahme von Sternbeben passen. Außerdem hängt die Stärke der Kopplung vom Magnetfeld ab: Für schwache Magnetfelder dominieren die Scherschwingungen in der Kruste, für starke Felder die Alfvénwellen im Kern.

Kern, Kruste, Magnetfelder – wie sieht das Innere eines Neutronensterns denn nun aus? Tief im Herzen, so das von den meisten Forschern akzeptierte Modell, liegt die Dichte beim Dreifachen jener eines Atomkerns, die Tem-



Das Diagramm zeigt jeweils das Verhältnis von Masse und Radius der Neutronensterne J1640-2230, J1903+0327 und J1909-3744. Die Kurven geben unterschiedliche Zustandsgleichungen wieder, die bei bestimmten Radien entsprechende Massen liefern. Nur wenn eine Kurve den Balken des jeweiligen Neutronensterns kreuzt – also seine Masse erreicht oder übersteigt –, kann die zugehörige Zustandsgleichung den Stern richtig beschreiben. Die Farben der Kurven bedeuten, dass in den Zustandsgleichungen verschiedene Materieformen angenommen wurden: Blau steht für Nukleonen (Protonen und Neutronen), Magenta für Nukleonen plus exotische Materie und Grün für seltsame Quarkmaterie.



In Schalenform: Der Aufbau von Neutronensternen gleicht den Schichten einer Zwiebel. Tief im Innern lässt sich die Materie allenfalls mit den Gesetzen der Quantenmechanik beschreiben, möglicherweise ist sie ein Gemisch aus freien Quarks und Gluonen. Der äußere Kern besteht zu 95 Prozent aus Neutronen, den Rest machen Protonen und Elektronen aus. Daran schließt sich eine „nukleare Pasta“ an, in der die Atomkerne zu Spaghettiform auseinandergezogen sind; diese Spaghetti gleichen weiter innen den Scheiben einer Lasagne, und noch weiter Richtung Kern ähnelt die Struktur einem Schweizer Käse. Die Kruste des Neutronensterns besteht aus einem geordneten Kristallgitter, wie man es in irdischen Festkörpern findet. Die Oberfläche ist vermutlich von einem wenige Zentimeter dünnen Ozean aus flüssiger Materie bedeckt, an den sich zum Weltall hin eine noch dünnere Atmosphäre aus heißem Plasma anschließt.

peratur bei rund einer Milliarde Grad. Unter diesen Bedingungen lässt sich die Materie allenfalls mit den Gesetzen der Quantenmechanik beschreiben, Zustand und Zusammensetzung sind weitgehend unbekannt. Möglicherweise besteht dieser innerste Kern aus einem Gemisch aus freien Quarks und Gluonen, den Grundbausteinen der Materie. Eine andere Idee setzt ins Zentrum so exotische Teilchen wie Pionen oder Kaonen; bei beiden handelt es sich

um Mesonen, instabile Partikel, die jeweils aus einem Quark-Antiquark-Paar aufgebaut sind.

Im äußeren Kern wird es ein wenig übersichtlicher: „Dort existieren Neutronen und Protonen direkt nebeneinander“, erklärt Michael Gabler. Die Neutronen stellen mit einem Anteil von etwa 95 Prozent das Gros der Materie, Protonen und Elektronen machen den Rest aus. Die Protonen sind supraleitend, also ohne elektrischen Widerstand.

Für die Neutronen liefert Gablers magneto-elastisches Modell ebenfalls einen außergewöhnlichen Zustand: Sie scheinen supraflüssig zu sein. Demnach besitzen sie keine innere Reibung (keine Viskosität) und weisen eine unendlich hohe Wärmeleitfähigkeit auf. Im irdischen Labor kann man die Suprafluidität nur bei extrem niedrigen Temperaturen und wenigen Elementen beobachten; bei Helium etwa tritt sie bei minus 270 Grad Celsius auf.

» Das Magnetfeld ist an den Magnetar gebunden und rotiert mit ihm. In einigen Tausend Kilometern Abstand von der Oberfläche erreicht es praktisch Lichtgeschwindigkeit.

Was sich an den Kern nach außen anschließt, nennen die Experten „nukleare Pasta“. Im äußeren Bereich dieser Zone sind die Atomkerne zu Spaghettiform auseinandergezogen. Weiter innen bilden diese Spaghetti so etwas wie Scheiben, die in ihrem Aufbau einer Lasagne gleichen. Noch weiter in Richtung Kern werden die Spaghetti unter zunehmendem Druck zu einer gleichförmigen Teigmasse zusammengepresst, in der nur noch wenige Freiräume bleiben. „Das Ganze ähnelt hier einem Schweizer Käse“, sagt Gabler.

DER OZEAN AN DER OBERFLÄCHE SCHWAPPT HIN UND HER

Die gesamte Kruste ist etwa einen Kilometer dick und besteht aus einem geordneten Kristallgitter, wie man es in irdischen Festkörpern findet. Die Eisenatomkerne dort sind jedoch sehr neutronenreich, auf 50 Protonen kommen gut zehnmals so viele Neutronen. Diese werden in tieferen Schichten wegen des starken Drucks aus den Atomkernen gepresst und können sich im Kristallgitter frei bewegen. In der gesamten Kruste schwirren außerdem Elektronen umher.

Zum freien Weltraum hin bildet vermutlich eine wenige Mikrometer dünne Atmosphäre aus heißem Plasma die äußerste Schicht. Darunter vermuten die Fachleute einen lediglich ein paar Zentimeter dünnen Ozean aus flüssiger Materie. Diese besteht aus Wasserstoff oder aus allen möglichen Elementen, die der Neutronenstern von einem eventuellen Begleitstern ansaugt und die sich auf der Oberfläche sammeln. Allein die starke Gravitationskraft hält Atmosphäre und Ozean fest. Im Licht von Neutronensternen haben die Astronomen winzige Oszillationen beobachtet, die darauf hindeuten, dass der Ozean womöglich hin- und herschwappt. Die Experten sind

sich jedoch nicht sicher, ob Magnetare überhaupt einen Ozean haben.

Hingegen verfügt jeder Neutronenstern über ein Magnetfeld, in dem sich Partikel wie Elektronen und ihre positiv geladenen Antiteilchen, die Positronen, bewegen. Das Magnetfeld ist an den Stern gebunden und rotiert mit ihm – je größer der Abstand, desto schneller. In einigen Tausend Kilometern Distanz erreicht das Magnetfeld praktisch Lichtgeschwindigkeit. Jenseits dieses sogenannten Lichtradius öffnen sich die Magnetfeldlinien, Elektronen und Positronen können entweichen.

„Das externe Magnetfeld dreht sich aber nicht nur mit dem Stern. Eines unserer Modelle beschreibt, wie es an das Magnetfeld im Sterninnern gekoppelt

ist“, sagt Michael Gabler. Sein Fazit: „Bei Sternbeben schwingt auch das externe Magnetfeld, wodurch in der Magnetosphäre sehr starke elektrische Ströme auftreten.“ An den Ladungsträgern dieser Ströme – Elektronen und Positronen – werden die bei einem Gammaausbruch freigesetzten Photonen gestreut. „Diese Streuung kann die beobachteten Frequenzen in der harten Röntgenstrahlung erklären“, sagt der Max-Planck-Wissenschaftler.

Gerade dieses Beispiel zeigt, dass die Theorie über Aufbau und Struktur von Neutronensternen so falsch nicht sein kann. Dennoch bleiben etliche Fragen ungeklärt. Magnetare werden Forscher wie Michael Gabler auch in Zukunft anziehen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Neutronensterne sind die unvorstellbar dichten Überreste von Supernovae. Nur etwa 20 Kilometer im Durchmesser, rotieren sie schnell um ihre Achsen, senden dabei Strahlungskegel ins All und werden dadurch als Pulsare sichtbar.
- Etwa zehn Prozent aller Neutronensterne besitzen starke Magnetfelder; diese Sterne heißen daher Magnetare.
- Magnetare zeigen gelegentlich heftige Strahlungsausbrüche, die auf den katastrophalen Zusammenbruch und die Neuorganisation des äußeren Magnetfelds zurückgehen.
- Bei den Explosionen schwingen die Neutronensterne. Diese Schwingungen lassen sich indirekt beobachten und geben letztlich Aufschluss über Aufbau und Zusammensetzung des Sterns.

GLOSSAR

Binärsystem: Vermutlich mehr als die Hälfte aller Sterne innerhalb der Milchstraße kommt in Doppel- oder Mehrfachsystemen vor. In einem Doppelsternsystem etwa umkreisen zwei Sterne einen gemeinsamen Schwerpunkt. Aus den Bahndaten lassen sich die Massen der beiden Partner bestimmen.

Dipol: Zwei räumlich getrennt auftretende Pole mit jeweils unterschiedlichem Vorzeichen (+, -). Das können elektrische Ladungen oder magnetische Pole gleicher Größe sein. Ein einfaches Beispiel für einen Dipol und sein Feld ist ein Stabmagnet.

Dynamoэффект: Die Erzeugung eines Magnetfelds im Innern eines Himmelskörpers (Planet oder Stern) durch elektromagnetische Induktion. Diese entsteht aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Bewegung eines Stoffes (Konvektion) in elektrisch leitender Materie und rascher Rotation.