

nente recht starken Wechselwirkung der vielen Exziton-Polaritonen im Kondensat her, verursacht durch die Ladungen der konstituierenden Elektronen und Löcher (Coulomb-Wechselwirkung). Da man viele Teilchen mit Elektron-Loch-Charakter in „einen Zustand zwängt“, erhöht sich die Energie des Systems: es tritt eine Blauverschiebung auf, die kleiner ausfällt als die Rabi-Aufspaltung. Dies zeigt wiederum, dass die starke Licht-Materie-Wechselwirkung noch nicht aufgebrochen war und das System durch exzitonisch induzierte Blauverschiebung polaritonisch ist (Licht- und Materie-Komponenten) – im Unterschied zu gewöhnlichen Lasern, die durch den Lichtanteil allein dominiert werden (Kavität).

Wichtige Kriterien für ein Kondensat sind die räumliche [5] und zeitliche Kohärenz [6] des polaritonen

nischen Zustandes. Hier konnten die Forscher in ihrem „organischen Kondensat“ die Ausdehnung der räumlichen Kohärenz sowie das Auftreten von quantisierten Wirbeln feststellen. Diese wurden in konventionellen Atom-Kondensaten oft beobachtet und gelten als charakteristisches Merkmal für Bose-Einstein-Kondensation, wenn auch nicht als eindeutiger Beweis. Zusammen mit kürzlich erzielten Ergebnissen zur elektrischen Injektion von Polariton-Kondensaten [7] rückt somit der Traum von elektrisch angeregten Kondensaten bei Raumtemperatur deutlich in den Bereich des Machbaren.

Ist dies nur schöne Physik oder gegebenenfalls auch anwendungsrelevant? Organische Halbleiter haben durch Geräte der klassischen Elektronik und Optoelektronik wie Mobiltelefone und Fernseh-

bildschirme bereits im großem Maße Eingang in unseren Alltag gefunden. Die richtungsweisenden Arbeiten von Rainer Mahrt und seinen Kollegen zeigen nun einen Weg auf, auf welche Weise sich kollektive Quantenphänomene wie Bose-Einstein-Kondensation zukünftig auch bei Raumtemperatur nutzbar machen lassen könnten.

Christof P. Dietrich und Sven Höfling

- [1] J. D. Plumhof, T. Stöferle, L. Mai, U. Scherf und R. F. Mahrt, *Nature Materials*, DOI: 10.1038/NMAT3825 (2013)
- [2] J. Kasprzak et al., *Nature* **443**, 409 (2006)
- [3] H. Deng, H. Haug und Y. Yamamoto, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1489 (2010)
- [4] S. Kena-Cohen und S. R. Forrest, *Nature Photonics* **4**, 371 (2010)
- [5] G. Roumpos et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.* **109**, 6467 (2012)
- [6] M. Aßmann et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.* **108**, 1804 (2011)
- [7] C. Schneider et al., *Nature* **497**, 348 (2013)

## ■ Elemente der Stern-Explosionen

Erste Beobachtungen von Argon und Phosphor in Supernova-Überresten sind ein Prüfstein für Computermodelle.

Mit der Ausnahme von Wasserstoff und Helium, die in den ersten drei Minuten unseres Universums in der primordialen Nukleosynthese entstanden sind, wurden alle Elemente in Sternen produziert. Hierbei spielen massereiche Sterne mit mehr als neun Sonnenmassen eine besonders wichtige Rolle. Diese Sterne durchlaufen mehrere hydrostatische Brennphasen, bei denen sie leichtere Kerne zu schwereren fusionieren. Diese Energiequelle versiegt, wenn im Sterninneren ein „Core“ aus Eisen mit etwa 1,5 Sonnenmassen entsteht, der unter seinem eigenen Gewicht kollabiert. Dies triggert eine Explosion, bei der der Stern seine äußere Hülle absprengt und nur ein Neutronenstern (oder ein Schwarzes Loch bei besonders massereichen Sternen) übrigbleibt (Abb. 1). Diese Supernova setzt auch die während der hydrostatischen Brennphasen produzierten Elemente in der Umgebung frei (Abb. 2).

Für die Entstehung der Elemente im Universum ist es wichtig, dass



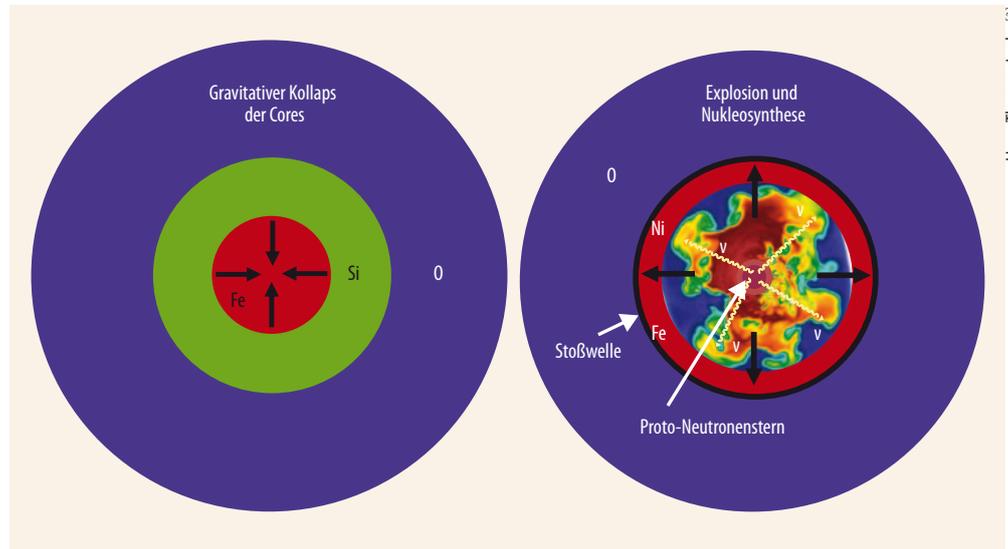
Abb. 1. Dieses Multiwellenlängenbild von Cassiopeia A enthält Beobachtungen der Weltraumteleskope Hubble, Spitzer und Chandra im Sichtbaren (gelb), Infrarot (rot) und Röntgen (grün und blau). Die

Supernova-Explosion ließ einen Neutronenstern zurück (türkis, Bildmitte). Die ausgeworfene Materie konnten Astronomen jetzt genauer auf Zusammensetzung und Kinematik hin untersuchen.

es in Supernovae durch die extrem hohen Temperaturen im Sterninneren kurzzeitig zu einer explosiven Brennphase sehr schneller

Kernreaktionen kommt, die sowohl die Häufigkeiten der während des hydrostatischen Brennens entstandenen Elemente ändern, als

**Abb. 2** Nach dem gravitativen Kollaps des Eisen-Cores im Sterninneren (links) kommt es in der frühen Explosionsphase zu ausgeprägten Turbulenzen außerhalb des Proto-Neutronensterns (rechts). Eine Stoßwelle mit hoher Temperatur durchläuft den Stern, angedeutet durch den schwarzen Kreis. Hinter der Stoßwelle kommt es zu einer explosiven Brennphase (rot).



auch Elemente schwerer als Eisen produzieren können. Eines der Hauptprodukte ist Sauerstoff. Die Supernova-Ejekta sind allerdings auch angereichert mit Elementen bis zur Eisen-Nickel-Gruppe und mit schwereren Kernen [1, 2].

Unser Verständnis von der Entstehung der Elemente im Universum und, damit verbunden, der Entwicklung von Sternen hat in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte gemacht, wir sind somit dem Ziel der nuklearen Astrophysik, eine vollständige und konsistente Beschreibung der chemischen Evolution der Galaxis zu liefern, nahe gekommen. Allerdings gibt es noch einige Unsicherheiten, die zum Beispiel die Sternentstehungsrate betreffen, die Anzahl der Sterne mit einer bestimmten Masse zu einem bestimmten Zeitpunkt

oder die individuellen elementaren Produktionshäufigkeiten von Sternen. Insbesondere gelingt es noch nicht, Supernova-Explosionen realistisch auf dem Computer zu simulieren. Auch hier sind durch verbesserte Beschreibung der physikalischen Prozesse (Kernreaktionen, Zustandsgleichung) sowie durch gewachsene Computerleistung und verbesserte Programme und Numerik enorme Fortschritte erzielt, wobei vor allem die Beschreibung der dynamischen Entwicklung von Neutrinos, die eine Schlüsselrolle bei der Explosion spielen, eine große Herausforderung ist [4]. Wie die Simulationen deutlich machen, sind neben Energietransport durch Neutrinos auch Plasmainstabilitäten und Turbulenzen sowie möglicherweise auch Rotation und Magnetfelder wichtig, was drei-

dimensionale Simulationen von Supernovae unabdingbar macht.

Natürlich sind solche Simulationen erst dann wirklich realistisch, wenn sie mit den Beobachtungen übereinstimmen. Schlüsselrollen kommen hier dem Energieoutput durch Neutrinos, der optischen Strahlungsleistung und der Expansion der Ejekta zu. Aber auch die Beobachtungen der produzierten Elemente und ihrer Häufigkeiten in individuellen Supernovae müssen die Simulationen nachbilden. Hier gelangen mit der erstmalige Beobachtung von Phosphor im Supernovarest Cassiopeia A (Abb. 1) [5] und von Argon im Krebsnebel [6] zwei wichtige Beiträge.

Der Nachweis des Edelgases Argon gelang indirekt durch die Beobachtung von Rotationslinien des Moleküls  $^{36}\text{ArH}^+$  im Infraroten [6],

## KURZGEFASST

### ■ Sonnenzwilling mit Planet

Mit dem HARPS-Planetenjäger der Europäischen Südsternwarte in Chile und weiteren Teleskopen ist es Astronomen gelungen, drei Planeten um Sterne im offenen Sternhaufen Messier 67 aufzuspüren, der rund 2077 Lichtjahre entfernt ist. Obwohl die Existenz von mehr als tausend Planeten außerhalb unseres Sonnensystems bestätigt ist, wurde bislang nur eine Handvoll in Sternhaufen gefunden. Einer dieser neuen Exoplaneten kreist um einen Stern, der zu den seltenen Sonnenzwillingen zählt – Sterne, die in all ihren Eigenschaften fast identisch mit der Sonne sind.

A. Brucalassi et al., *Astron. & Astrophys.* **561**, L9 (2014)

### ■ Bremse für Moleküle

Mit einer Zentrifugen-Kühlung ist es Physikern des MPI für Quantenoptik in Garching gelungen, schnelle polare Moleküle effektiv abzubremsen. Ein elektrischer Quadrupol-Leiter zwingt die Moleküle, sich auf einer schnell drehenden Scheibe in Richtung der Achse zu bewegen. Zunächst verringert sich die Geschwindigkeit der Moleküle, wenn sie vom Laborsystem in das rotierende System übertreten. Anschließend kämpfen die Moleküle gegen die Zentrifugalkraft an und werden dabei kontinuierlich abgebremst, bis sie schließlich fast zum Stillstand kommen.

S. Chervenkov et al., *Phys. Rev. Lett.* **112**, 013001 (2014)

### ■ Magnetischer Cherenkov-Effekt

Forscher aus Shanghai, Jülich und Straßburg haben mit Computersimulationen gezeigt, dass Spinwellen entstehen, wenn ein magnetischer Feldpuls schnell genug an einem magnetischen Material wie Permalloy entlang läuft. Analog zum herkömmlichen Cherenkov-Effekt entstehen dabei kegelförmige Wellenfronten – allerdings sind sie magnetisch und besitzen eine andere Geometrie: Eine Wellenfront läuft dem magnetischen Feldpuls voraus, eine weitere folgt ihm. Die Frequenz der Spinwellen lässt sich durch die Geschwindigkeit des magnetischen Feldpulses einstellen.

M. Yan et al., *Phys. Rev. B* **88**, 220412(R) (2013)

durch das Weltraumteleskop *Herschel*. Leider war es in der Beobachtung nicht möglich, die Häufigkeit von  $^{36}\text{Ar}$  zu bestimmen. Es ist ein Alphakern, was Kerne wie  $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{48}\text{Cr}$  bezeichnet, die in ihrer Protonen- und Neutronenzahl Vielfaches von Alphateilchen sind. Supernovamodelle sagen die Produktion solcher Alphakerne voraus. Gelingt die Bestimmung der  $^{36}\text{Ar}$ -Häufigkeit, so wäre dies ein wichtiger Test, ob es sich beim Krebsnebel, wie vermutet, tatsächlich um die Überreste der Supernova eines recht „leichten“ Vorgängersterns von acht bis zehn Sonnenmassen handelt [7]. In einem solchen Stern kollabiert ein Core aus mittelschweren Kernen (Sauerstoff, Neon, Magnesium), deshalb sollten die Supernova-Ejekta im Vergleich zu massereichen Sternen ärmer an Eisen und Argon sein.

Mit Hilfe des Spektrographen *TripleSpec* am *Hale-Teleskop* auf dem *Mount Palomar* gelang es, spektroskopische und kinetische Eigenschaften von Ejekta des Supernova-Überrests *Cassiopeia A*

zu bestimmen, darunter erstmals für den Kern  $^{31}\text{P}$  [5]. Interessant ist, dass  $^{31}\text{P}$  in Ejekta mit relativ hohen Radialgeschwindigkeiten ( $> 100 \text{ km/s}$ ) zusammen mit Schwefel (vermutlich  $^{32}\text{S}$ ) und Eisen auftritt. Dies entspricht in der Tat den Erwartungen für das explosive Brennen in den Supernovae mit massereichen Vorgängersternen wie bei *Cassiopeia A*. Hier sollte es zu einer erhöhten Produktion von Kernen aus der Eisengruppe und von Alphakernen kommen, wobei  $^{31}\text{P}$  als Nebenprodukt von Reaktionen an Kernen wie  $^{32}\text{S}$  entsteht. Wie die Forscher nachweisen konnten, sollten die beobachteten Ejekta tatsächlich aus dem Bereich des explosiven Brennens der Supernova stammen. Eine interessante Schlussfolgerung aus den Beobachtungen ist, dass das relative Verhältnis von Phosphor zu Eisen in den Ejekta sehr stark variiert – um mehr als einem Faktor 100. Dies deutet auf starke Mischprozesse während der Explosion hin, was sich mit den Erkenntnissen aus multidimensionalen Simulationen

deckt. Selbst wenn die Analyse der Daten noch mit deutlichen Unsicherheiten verknüpft und auch modellabhängig ist, so zeigt sie doch das große Potenzial, was solchen Beobachtungen spektroskopischer und kinetischer Eigenschaften von Supernova-Ejekta als Tests von Computermodellen und natürlich auch als Grundlage neuer Erkenntnisse über den Explosionsmechanismus innewohnt [8].

**Gabriel Martínez-Pinedo  
und Karlheinz Langanke**

- [1] S. E. Woosley, A. Heger und T. A. Weaver, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 1015 (2002)
- [2] G. Martínez-Pinedo, *Physik Journal*, August-September 2008, S. 51
- [3] H.-T. Janka et al., *Progr. Theor. Exp. Phys.* **2012**, (1) 01A309 (2012)
- [4] H.-T. Janka et al., *Phys. Repts.* **442**, 38 (2007)
- [5] B.-C. Koo et al., *Science* **342**, 1346 (2013)
- [6] M. J. Barlow et al., *Science* **342**, 1343 (2013)
- [7] F. S. Kitaura, H.-T. Janka und W. Hillebrandt, *Astron. & Astrophys.* **450** (2006) 345.
- [8] H.-T. Janka, *Ann. Rev. of Nucl. Part. Sci.* **62**, 407 (2012)

**Prof. Dr. Gabriel Martínez Pinedo**, Technische Universität Darmstadt, Institut für Kernphysik (Theoriezentrum), Schlossgartenstr. 2, 64289 Darmstadt, **Prof. Dr. Karlheinz Langanke**, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt

## ■ Verschränkung mit Verlust

**Der gezielte Einsatz von Dissipation erlaubt es, verschränkte Zustände in Ionenfallen und Supraleitern herzustellen.**

**V**erschränkte Quantenzustände robust und präzise zu präparieren, gehört zu den grundlegenden Aufgaben der Quanteninformationsverarbeitung. Trotz bester Isolation sind die zu verschränkten Systeme dabei letztlich aber immer der Wechselwirkung mit einer unkontrollierten Umgebung ausgesetzt, die zu Dekohärenz und Dissipation führt. In den gewöhnlich verwendeten Protokollen der Zustandspräparation stören diese Prozesse und verhindern damit perfekte Verschränkung. Dekohärenz und Dissipation gelten daher gemeinhin als Feinde der Quanteninformationsverarbeitung, die es mittels Isolation und aktiver Fehlerkorrektur zu bekämpfen gilt. Zudem führen Ungenauigkeiten in der Wahl der experimentellen Para-

meter zu weiteren Fehlern, die sich im Verlauf der Zustandspräparation akkumulieren.

Die experimentellen Fortschritte in der kohärenten Kontrolle von Quantensystemen sind mittlerweile beachtlich. Dennoch stellt sich die Frage, ob sich die Dissipation nicht doch nutzbringend einsetzen lassen könnte, etwa so wie man beim Judo die Aktionen des Gegners beim Angriff gegen diesen wenden kann. In der Tat hat dieses Umdenken in der theoretischen Forschung schon vor längerer Zeit begonnen, indem Dekohärenz und Dissipation nicht mehr als Gegner bei der Präparation von verschränkten Zuständen gelten, sondern als Freunde und Helfer, welche die Präparation von verschränkten Quantenzuständen unterstützen [1, 2]. Die experimen-

telle Realisierung dieser Ideen ließ aber auf sich warten und gelang erst kürzlich in der Gruppe um den Nobelpreisträger Dave Wineland am NIST in Boulder (Colorado) mit einer Ionenfalle [3] sowie in der Gruppe um Michel Devoret in Yale mit supraleitenden Quantenbits [4].

Die Experimente in Boulder und Yale verfolgten das Ziel, Dissipation und sorgfältig gewählte kohärenten Wechselwirkungen zwischen zwei Qubits geschickt zu kombinieren, um einen maximal verschränkten Bell-Zustand sowohl zu präparieren als auch für lange Zeiten zu stabilisieren. Die Grundidee ist in beiden Experimenten sehr ähnlich und benötigt zwei wesentliche Zutaten. Zum einen dient die kohärente Wechselwirkung zwischen den Qubits dazu, eine Dynamik