

Abb. 4 Die Übersicht zeigt die Zusammensetzung, Richtung und den Zeitpunkt der erwarteten Auswürfe des Merger. Nach dem Verschmelzen der Neutronensterne (NS) entsteht zunächst ein „hypermassiver“ Neutronenstern (HMNS). Die Richtung ist durch den Jet des Gamma-Blitzes definiert. Der schwarze Pfeil markiert die Sichtachse für GW170817 bzw. GRB170817A.

sternsystem einzugrenzen [20]. Der fehlgeschlagene Nachweis hoch-energetischer Neutrinos lässt sich durch den Winkel zwischen Jet und Sichtachse erklären [21].

Die Beobachtungen rund um das Gravitationswellensignal GW170817 haben eine neue Ära so genannter Multi-Messenger-Ereignisse eingeleitet. In Zukunft sollte die höhere Empfindlichkeit der Gravitationswellendetektoren dazu führen, dass solche Ereignisse mehrmals pro Jahr oder gar wöchentlich zu beobachten sind, falls die Häufigkeit der Merger etwa einem Hundertstel der Supernova-Rate entspricht. Dann lassen sich z. B. Variationen in den Massen von Neutronensternen, in der Ausrichtung der polaren Jets, für den Zeitpunkt der Bildung des Schwarzen Lochs und bei den Verhältnissen der Komponenten in der ausgeworfenen Materie untersuchen. Um damit die Nukleosynthese im *r*-Prozess zu verstehen, bedarf es allgemein-relativistischer Simulationen mit hoher Auflösung sowie ein detailliertes Verständnis der Kern- und Teilchenphysik. Dazu gehört beispielsweise die Kernstruktur fernab der Stabilität, die

unter anderem an der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR untersucht werden soll.

Gabriel Martínez-Pinedo, Brian D. Metzger und Friedrich-Karl Thielemann

[1] F. Özel und P. Freire, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 401 (2016)
 [2] J. M. Weisberg und Y. Huang, *ApJ* **829**, 55 (2016)
 [3] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 141101 (2017)
 [4] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017)
 [5] E. Nakar, *Phys. Rep.* **442**, 166 (2007)
 [6] B. P. Abbott et al., *ApJ* **848**, L12 (2017)
 [7] M. Soares-Santos et al., *ApJ* **848**, L16 (2017)
 [8] B. P. Abbott et al., *ApJ* **848**, L13 (2017)
 [9] D. Haggard et al., *ApJ* **848**, L25 (2017)
 [10] K. D. Alexander et al., *ApJ* **848**, L21 (2017)
 [11] L. Baiotti und L. Rezzolla, *Rep. Prog. Phys.* **80**, 096901 (2017)
 [12] F.-K. Thielemann et al., *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67**, 253 (2017)
 [13] B. D. Metzger et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **406**, 2650 (2010)
 [14] B. P. Abbott et al., *Nature* **551**, 85 (2017)
 [15] B. D. Metzger, arXiv:1710.05931
 [16] D. Martin et al., *ApJ* **813**, 2 (2015)
 [17] B. P. Abbott et al., arXiv:1710.05836
 [18] M.-R. Wu et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463**, 2323 (2016)
 [19] B. P. Abbott et al., arXiv:1710.05837
 [20] B. P. Abbott et al., arXiv:1710.05838
 [21] A. Albert et al., arXiv:1710.05839

Quantenphasen, aber dynamisch

Erstmals ließen sich dynamische Quantenphasenübergänge experimentell beobachten.

Schlägt man ein unmagnetisches Stück Eisen mit einem Hammer an, kann es magnetisiert werden – diesen Versuch hat bestimmt jeder schon (un)freiwillig beim Einschlagen eines Nagels gemacht. Wie verhält sich aber allgemein die Magnetisierung eines Systems bei einer extrem schnellen Änderung äußerer Parameter? An hervorragend kontrollierbaren und nahezu perfekt beobachtbaren Modellsystemen aus Atomen und Ionen ließ sich diese komplexe Frage aus der Festkörperphysik kürzlich nachstellen – eine weitere exemplarische Anwendung von so genannten Quantensimulatoren. Experimente mit ultrakalten Quantengasen und gefangenen Ionen erlaubten bereits in den vergangenen Jahren völlig

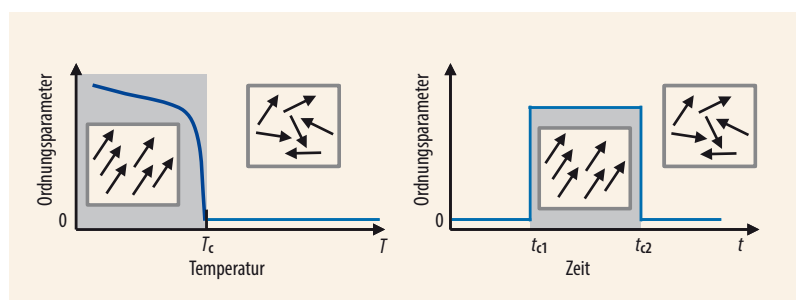


Abb. 1 Bei einem thermodynamischen Phasenübergang verschwindet die Ordnung, wenn ein externer Kontrollparameter wie die Temperatur einen kritischen Wert T_c erreicht (links). Bei

einem dynamischen Phasenübergang hingegen antwortet das System nach einer kritischen Zeit t_{c1} bzw. t_{c2} auf die plötzliche Änderung eines Kontrollparameters (rechts).

neue Einblicke in die Dynamik von Quantenphasenübergängen. Neueste Untersuchungen dringen nun erstmals in den Bereich der „dynamischen“ Quantenphasenübergänge vor und bestätigen dabei Theorien

zur Beschreibung von Nichtgleichgewichtssystemen [1 – 3].

Phasenübergänge charakterisieren das Verhalten von Vielteilchensystemen, wenn sich äußere Parameter ändern. Bekanntestes

Beispiel ist der Übergang zwischen Aggregatzuständen, z. B. von Eis zu flüssigem Wasser und weiter zu Wasserdampf bei entsprechender Temperaturerhöhung. Die Eigenschaften des Systems ändern sich dramatisch. Ähnlich lässt sich in einem Festkörper die Magnetisierung durch äußere Kontrollparameter manipulieren. Diese Vielteilchensysteme und ihre Anwendungsmöglichkeiten sind hochinteressant. Zur Modellbildung und Klassifizierung der Übergänge sucht man nach funktionalen Abhängigkeiten von Ordnungsparametern – beispielsweise den typischen Abständen der Teilchen oder der Magnetisierung. Bisherige experimentelle Studien von Phasenübergängen haben sich vorrangig mit Gleichgewichtssystemen beschäftigt.

Ändert man diesen externen Parameter sehr schnell, laufen Zustandsänderungen nicht mehr im Gleichgewicht mit der Umgebung ab. In der Regel sind Vielteilchensysteme in Festkörpern an ihre Umgebung gekoppelt und damit im Gleichgewicht. Bei künstlich erzeugter Quantenmaterie aus ultrakalten Atomen oder gefangenen Ionen lassen sich jedoch Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt erzeugen und die Kopplung zur Umgebung ist unter voller experimenteller Kontrolle.

Daher helfen moderne Techniken zur Vermessung, Kontrolle und Manipulation von Quantensystemen, Nichtgleichgewichtsdynamik so zu studieren wie theoretisch vorgeschlagen [4]: Die Verteilungsfunktion, die statistische Eigenschaften im thermischen Gleichgewicht charakterisiert, und der quantenmechanische Operator, welcher die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems beschreibt, sind einander mathematisch analog. Das war schon lange bekannt, neu ist der daraus folgende Schluss: Die Zeit übernimmt die Rolle des externen Kontrollparameters. Daher erwartet man, in der zeitlichen Entwicklung eines Quantensystems Phasenübergänge außerhalb des Gleichgewichts zu studieren – ein „dynamischer“ Quantenphasen-

übergang (Abb. 1). In experimentellen Studien an unterschiedlichen Systemen ist es nun erstmals gelungen, solche dynamischen Phasenübergänge zu beobachten und zu charakterisieren.

Klaus Sengstock und sein Team vom Institut für Laserphysik der Universität Hamburg verwendeten ein ultrakaltes Quantengas [1]. Mit ausgefeilten Manipulationstechniken präparierten sie den Anfangszustand neutraler fermionischer ^{40}K -Atome in einem hexagonalen Gitter aus Laserstrahlen. Dann wurden diese optischen Gitter blitzschnell in eine andere Konfiguration geschaltet. Dadurch änderten sich schlagartig die Tunnelamplituden für Atome zwischen benachbarten Gitterplätzen. Die Forscher beobachteten die daraus resultierenden topologischen Eigenschaften des Systems nach dem Sprung – gemessen in der Anzahl von Wirbeln. Sie konnten nachweisen, dass sich erst nach einer kritischen Zeit Vortex-Antivortex-Paare bilden, die nach einer weiteren kritischen Zeit wieder verschwinden.

Die Arbeitsgruppe von Christian Roos und Rainer Blatt vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Innsbruck konnte ebenfalls einen Nichtgleichgewichts-Phasenübergang nachweisen. Für lineare Ketten mit bis zu zehn Ionen stellten die Forscher die Kopplungen der Spins untereinander durch Laserlichtfelder ein. Beim plötzlichen Ausschalten dieser Wechselwirkungen zeigt sich ein spezielles Verhalten in der Wahrscheinlichkeit der Spinflips: Diese folgt einer nichtanalytischen Funktion, ist also nicht lokal durch eine konvergente Potenzreihe gegeben. Dies ist ein vorausgesagtes, sehr charakteristisches Zeichen. Zudem gilt: Je mehr Ionen in der Kette beteiligt sind, desto schärfer fällt die Zustandsänderung beim Durchfahren des Phasenübergangs aus.

Bei einem Quantensimulator mit einer Kette von gefangenen Ionen konnte die Arbeitsgruppe von Christopher Monroe von der University Maryland den dynamischen Phasenübergang für ein Ising-Spinmodell mit transversaler Magneti-

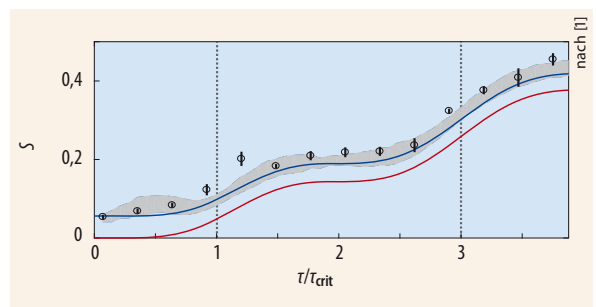


Abb. 2 Der Verschränkungsgrad S in einer Kette von Ionen steigt bei jedem dynamischen Phasenübergang. Die Datenpunkte passen besser zu einer theoretischen Vorhersage, die die geringe Fehler in der Spin-Präparation berücksichtigt (blau), als zum perfekten Zustand (rot).

sierung zeigen [2]. Dabei ließen sich die erwarteten Phänomene am Phasenübergang demonstrieren, wie das Auftreten von kritischen Exponenten oder Domänenstrukturen.

Die besonders interessante Verbindung zwischen dynamischen Quantenphasenübergängen und der quantenmechanischen Verschränkung von Ionen konnte die Gruppe um Christian Roos demonstrieren [3]. Eine tomographische Messung der Spins zeigt einen Anstieg der Verschränkung S genau bei den Zeitpunkten der dynamischen Phasenübergänge (Abb. 2). Eine solche Charakterisierung der Verschränkungsdynamik wechselwirkender Vielteilchensysteme ist nur in Quantensimulatoren mit einzelnen Atomen und Ionen möglich.

Quantensimulatoren aus ultrakalten Atomen bzw. aus Ketten von Ionen haben grundlegende statistische Eigenschaften von Festkörpersystemen in unerreichter Weise ausgeleuchtet. Dabei ließen sich die erwarteten Phänomene am Phasenübergang demonstrieren. Darüber hinaus wurden neuartige Untersuchungen zur Quantenverschränkung am Phasenübergang möglich. Im Zusammenspiel mit theoretischen Vorhersagen eröffnet dies für Quantensimulatoren ein weites Forschungsfeld.

Patrick Windpassinger und
Ferdinand Schmidt-Kaler

[1] N. Fläschner et al., arxiv:1608.05616 (2016)

[2] J. Zhang et al., arxiv:1708.01044 (2017)

[3] P. Jurcevic et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 080501 (2017)

[4] M. Heyl, A. Polkovnikov und S. Kehrein, Phys. Rev. Lett. **110**, 135704 (2013)

Prof. Dr. Patrick
Windpassinger und
Prof. Dr. Ferdinand
Schmidt-Kaler,
QUANTUM,
Universität Mainz,
Staudingerweg 7,
55128 Mainz