

HERTHA-SPONER-PREIS

Aus dem Gleichgewicht gebracht

Dynamik in stark korrelierten Quantengasen

Corinna Kollath

Systeme, die gestört werden, kehren über kurz oder lang wieder ins Gleichgewicht zurück. Doch ist das zwangsläufig so? Wie verhalten sich z. B. Systeme, die nicht im Kontakt mit ihrer Umgebung stehen? Anhand von stark wechselwirkenden Atomgasen zeigt sich, dass isolierte Systeme eine Erinnerung an die Störung behalten können.

Nichtgleichgewichtssituationen lassen sich besonders gut in Quantengasen realisieren. Der Schlüssel dazu sind zwei ihrer Eigenschaften: Ultrakalte Atomgase lassen sich zum einen mit optischen oder magnetischen Feldern im Ultrahochvakuum fangen und sind daher nahezu perfekt von der Umgebung isoliert. Mit externen Magnetfeldern ist es zum anderen möglich, die Wechselwirkung zwischen den Atomen von stark anziehend bis stark abstoßend einzustellen. Damit gelingt es, stark korrelierte Gase zu erzeugen, in denen sowohl die Wechselwirkung als auch die kinetische Energie wichtig sind. Außerdem können laserinduzierte Potentiale atomare Gase auf der Nanometerskala strukturieren. Dazu gehören periodische Potentiale („optische Gitter“) und niedrigdimensionale Strukturen, bei denen der extrem starke Einschluss des optischen Potentials dazu dient, die Atombewegung auf eine oder zwei Dimensionen zu beschränken. Neutrale Atome in einer eindimensionalen Struktur bewegen sich ganz ähnlich wie Elektronen in Quantendrähten, während Atome in einem dreidimensionalen optischen Gitter mit Elektronen im Kristallgitter vergleichbar sind. Dadurch lassen sich in den atomaren Gasen auch Fragen aus der Festkörperphysik untersuchen, z. B. Bloch-Oszillationen in optischen Gittern [1].

Im Zusammenhang mit der Frage nach der Dynamik im Nichtgleichgewicht möchte ich im Folgenden die Reaktion atomarer Gase auf zwei verschiedene Störungen betrachten:

- Wie verhält sich ein einzelnes Atom, wenn man es in einen „See“ von anderen Atomen einbringt? Dabei geht es speziell darum, die Aufspaltung des Teilchens in kollektive Anregungen, die sog. Spin-Ladungstrennung, in eindimensionalen Strukturen zu diskutieren.
- Wie reagiert ein Quantengas auf die plötzliche Änderung seiner Wechselwirkungsstärke? Hier wird sich zeigen, dass für experimentelle Systemgrößen und Zeitskalen die Atome nicht unbedingt ins zugehörige



PhotoDisc, Inc.

Ein Tropfen fällt auf eine Wasseroberfläche und regt eine Welle an. „Fällt“ ein Fermion in eine Luttinger-Flüssigkeit, entstehen zwei Anregungen mit Spin bzw. Ladung.

thermische Gleichgewicht relaxieren, sondern eine Erinnerung an die Störung behalten können.

Allerdings ist es eine große Herausforderung, die Quantendynamik stark korrelierter Systeme theoretisch zu beschreiben. Die Anzahl der zu betrachtenden Freiheitsgrade wächst normalerweise exponentiell mit der Systemgröße und macht eine mikroskopische Beschreibung selbst im Gleichgewicht häufig unmöglich. Um trotzdem eine Einsicht in die Physik dieser Systeme zu erlangen, sind fortgeschrittene numerische Methoden erforderlich. Dazu gehört die Dichte-Matrix-Renormalisierungsgruppen-Methode (DMRG oder Matrixprodukt-Zustands-Methode), bei der nur die wichtigsten Freiheitsgrade ausgewählt werden [2, 3]. Dann beschreibt der approximative Zustand, ein Matrixprodukt-Zustand, den gesuchten Zustand möglichst gut.

KOMPAKT

- Ultrakalte Atomgase erlauben es, das Verhalten von Systemen zu untersuchen, die aus dem Gleichgewicht gebracht wurden.
- Diese Dynamik theoretisch zu beschreiben, gelingt mit der Dichte-Matrix-Renormalisierungsgruppen-Methode.
- Ein Beispiel ist ein Fermion, das in eine Luttinger-Flüssigkeit eingebracht wird. Dabei entstehen zwei kollektive Anregungen mit Spin bzw. Ladung, die sich voneinander trennen.
- Ein weiteres Beispiel sind bosonische Atome in künstlichen Gitterstrukturen (optischen Gittern), deren Stärke plötzlich geändert wird. Die Atome relaxieren dann nicht notwendigerweise ins thermische Gleichgewicht.

Dr. Corinna Kollath, Centre de Physique Théorique, Ecole Polytechnique, CNRS, 91128 Palaiseau, Frankreich – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Hertha-Sponer-Preises auf der 73. Jahrestagung der DPG in Hamburg.

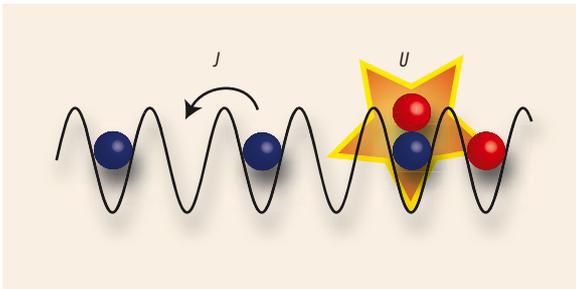


Abb. 1 Im Fermi-Hubbard-Modell können Atome zwischen benachbarten Gitterplätzen hüpfen (mit Amplitude J) und verschiedene Spinzustände (blau und rot) auf einem Gitterplatz mit der Stärke U wechselwirken.

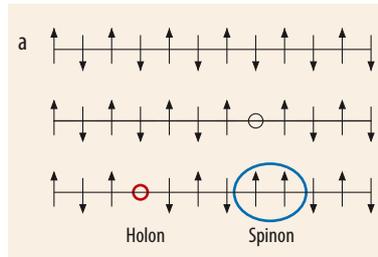
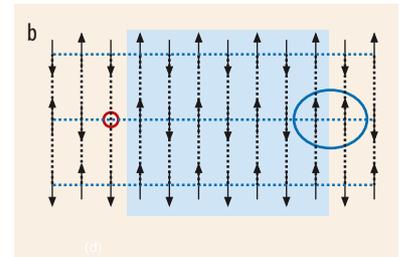


Abb. 2 Bei der Separation einer Einteilchenanregung (Kreis) in kollektive Anregungen entsteht in einem eindimensionalen System ein Holon und ein Spinon (a). In höheren Dimensionen werden das



Holon und das Spinon durch die Wechselwirkung senkrecht zur Bewegungsrichtung zusammengehalten (b, blauer Kasten).

Diese Reduktion der Freiheitsgrade hat sich schon früh bewährt, um eindimensionale Systeme im Gleichgewicht zu beschreiben. Erst in den letzten Jahren gelang es, diese Methode zu verallgemeinern, um auch die Dynamik zu untersuchen. Hierbei werden die reduzierten Freiheitsgrade nicht nur einmal ausgewählt, sondern der reduzierte Unterraum ist während der Zeitentwicklung iterativ anzupassen [4–6]. Die Anpassung der effektiven Unterräume ist entscheidend, da der reduzierte Raum, den man benötigt, um Zustände verschiedener Zeiten zu beschreiben, sonst stark anwachsen würde. Die zeitabhängige DMRG hat bereits zu vielen wichtigen Fortschritten auf unterschiedlichen Gebieten geführt und spielt auch bei den folgenden zwei Beispielen eine entscheidende Rolle.

Wenn Spin und Ladung getrennte Wege gehen

Eindimensionale klassische Systeme haben die Besonderheit, dass die Teilchen sich nicht aneinander vorbeibewegen können. Eindimensionale Quantensysteme zeigen noch ganz andere, außergewöhnliche Phänomene [7]. Hier kann bei niedrigen Temperaturen ein Zustand existieren, die sog. Luttinger-Flüssigkeit, in dem es keine teilchenartigen Anregungen mit der üblichen Dispersion $E(k) \propto k^2$ mehr gibt, sondern nur kollektive Anregungen wie z. B. Dichte- oder Spinwellen mit linearer Dispersion $E(k) \propto k$.

Generell trägt ein fermionisches Teilchen zwei Eigenschaften: seinen Spin und seine Ladung bei geladenen Teilchen bzw. seine Dichte bei neutralen Atomen. (Aus historischen Gründen verwende ich im Folgenden das Wort Ladung auch bei neutralen Atomen.) Wenn ein Fermion aus einem separaten Reservoir zu einer Luttinger-Flüssigkeit hinzugegeben wird (Einteilchenanregung), verliert es seinen Teilchencharakter. Es verschmilzt mit den anderen Fermionen und formt zwei kollektive Anregungen, die nur Spin bzw. nur Ladung tragen. Diese beiden Anregungen bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, sodass sie nach kurzer Zeit voneinander getrennt sind. Dieses Phänomen heißt Spin-Ladungstrennung.

Der beschriebene Effekt steht im Gegensatz zu dem Verhalten in einer Fermi-Flüssigkeit in drei Dimensionen. Darin bewegt sich das hinzugefügte Fermion für

eine gewisse Zeit als Quasiteilchen. Die Anwesenheit der anderen Atome kann dessen Eigenschaften leicht verändern, jedoch trägt das Quasiteilchen wie das ursprüngliche Fermion sowohl Ladung als auch Spin.

Ein vereinfachtes Bild für den Ursprung dieser Besonderheit eindimensionaler Strukturen lässt sich anhand eines Gittersystems mit fermionischen Atomen gewinnen. Betrachten wir das eindimensionale Hubbard-Modell, in dem die Atome von einem Gitterplatz zum nächsten hüpfen können (Hüpfamplitude J) und sich unterschiedliche Spinzustände mit einer Wechselwirkung U abstoßen, wenn sie sich auf demselben Platz befinden (Abb. 1). Ist die Wechselwirkung U stark, herrscht eine effektive Austauschwechselwirkung zwischen benachbarten Gitterplätzen, die eine antiferromagnetische Ordnung (Nachbarn haben unterschiedlichen Spin) begünstigt. Wird nun ein Fermion aus der Kette entfernt, ändern sich die Spindichte sowie die Ladungsdichte an diesem Platz. Das Hüpfen eines Nachbarteilchens auf den leeren Platz erzeugt zwei Anregungen (Abb. 2):

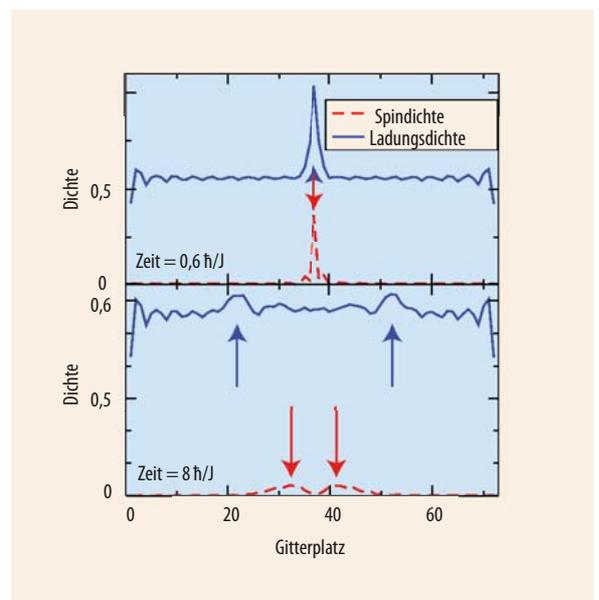


Abb. 3 Spin-Ladungstrennung im Hubbard-Modell: Zum Zeitpunkt $t=0$ wurde eine Einteilchenanregung am Platz 37 erzeugt, die sich in kollektive Spin- und Ladungsanregungen aufteilt (siehe Pfeile). Die Existenz von zwei entgegengesetzt propagierenden Anregungen in Spin- und Ladungsdichte folgt aus der Symmetrie des betrachteten Systems.

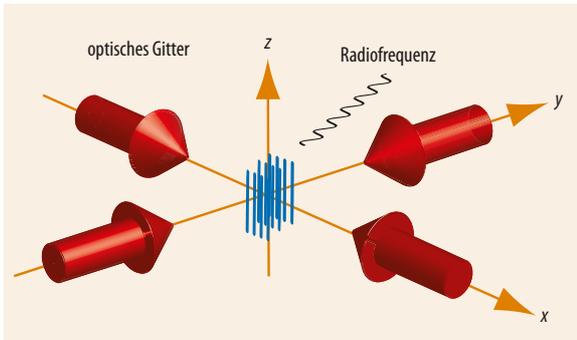


Abb. 4 Im Versuchsaufbau zur Beobachtung der Spin-Ladungstrennung in Quantengasen erzeugt ein zweidimensionales optisches Gitter ein Array von eindimensionalen Strukturen. Radiofrequenzen generieren die Einteilchenanregung.

- ein „Holon“, wo die Ladungsdichte fehlt und die Spinumgebung normal, also rein antiferromagnetisch, ist
- und ein „Spinon“, d. h. zwei benachbarte Plätze, auf denen die Spins ferromagnetisch (also gleich ausgerichtet) sind, aber die Ladungsdichte normal ist.

Diese beiden Anregungen können sich voneinander unabhängig bewegen, ohne dass dies weitere Energie kostet. Daher trennt sich die Einteilchenanregung auf in zwei kollektive Anregungen, die jeweils entweder Spin- oder Ladungsdichte tragen. Im Gegensatz zu diesem Verhalten werden in höheren Dimensionen solche Anregungen durch die Wechselwirkung mit den Nachbarn senkrecht zur Bewegungsrichtung zusammengehalten. Ihre Trennung würde Energie kosten, sodass die Einteilchenanregung eine lange Lebensdauer besitzt.

Die erste theoretische Beschreibung der Spin-Ladungstrennung beruht auf der sog. Luttinger-Flüssigkeitstheorie, einer analytischen Beschreibung für den Bereich niedriger Energien [7]. Damit lässt sich die Spin-Ladungstrennung jedoch nur für asymptotisch lange Zeiten beschreiben. Erst vor einigen Jahren ist es uns gelungen, vom Hubbard-Modell ausgehend die Trennung von Spin und Ladung nach dem Hinzufügen eines fermionischen Teilchens für realistische Systemgrößen (ca. hundert Plätze) zu simulieren [8]. Die numerischen Ergebnisse zeigen eine deutliche Trennung (Abb. 3). Sie geben insbesondere Aufschluss über die Zeitskalen, auf denen diese stattfindet, und verdeutlichen, dass die Spin-Ladungstrennung als charakteristische Eigenschaft eindimensionaler Systeme über den Bereich niedriger Energien hinaus erhalten bleibt.

Auf der experimentellen Seite gelang es mit Tunnelexperimenten, die Dispersion der kollektiven Anregungen zwischen Quantendrähten (Halbleiterstrukturen) energieaufgelöst zu beobachten [9]. Kalte Quantengase sollten diese Aufspaltung sogar zeitaufgelöst zeigen können. Ein möglicher experimenteller Aufbau besteht aus einem Array von eindimensionalen Strukturen mit jeweils rund hundert Atomen (Abb. 4). Darin lassen sich mithilfe eines Radiofrequenzübergangs Anregungen mit wenigen Atomen erzeugen, z. B. wenige Spinflips, und anschließend deren Ausbreitung zeitaufgelöst verfolgen. Eine weitere Motivation für

diese Untersuchungen ist die Möglichkeit, das Verhalten von eindimensionalen und höherdimensionalen Gasen direkt zu kontrastieren.

Bleibende Kohärenz

Hängt man zwei gekoppelte Pendel im Vakuum auf und lenkt eines davon aus, wird man einen wechselnden Impulsübertrag zwischen den beiden Pendeln beobachten. Die möglichen Bewegungen sind durch die Erhaltungsgrößen Impuls und Energie stark eingeschränkt, sodass die Pendel nicht ins thermische Gleichgewicht relaxieren können.

Ein ähnlicher Sachverhalt wurde mit Gasen aus bosonischen Atomen untersucht [10]. Zwei Atomwolken werden in einem eindimensionalen parabolischen Potential ausgelenkt und schwingen gegeneinander (Abb. 5). Selbst nach mehreren tausend Stößen waren die Atomwolken nicht merklich ins erwartete thermische Gleichgewicht gekommen. Das ist sehr erstaunlich, da hier jedes eindimensionale Gas aus mehreren hundert Atomen besteht. Daher würde man naiv erwarten, dass – wenn nur Energie und Impuls erhalten wären – Stöße die Atome ins thermische Gleichgewicht umverteilen müssten. Die andauernde Schwingung ließ sich auf die Integrabilität, d. h. die Existenz unendlich vieler Erhaltungsgrößen, des eindimensionalen Bose-Gases und der damit verbundenen Einschränkung der Bewegung zurückführen.

Was passiert aber, wenn nur wenige Erhaltungsgrößen im thermodynamischen Grenzfall existieren? Wir haben berechnet, dass auch in diesem Fall der durch die Zeitentwicklung erreichte Zustand von dem erwarteten thermischen Zustand abweichen kann. Die betrachtete Situation entspricht einer plötzlichen Änderung des Verhältnisses der Wechselwirkung und

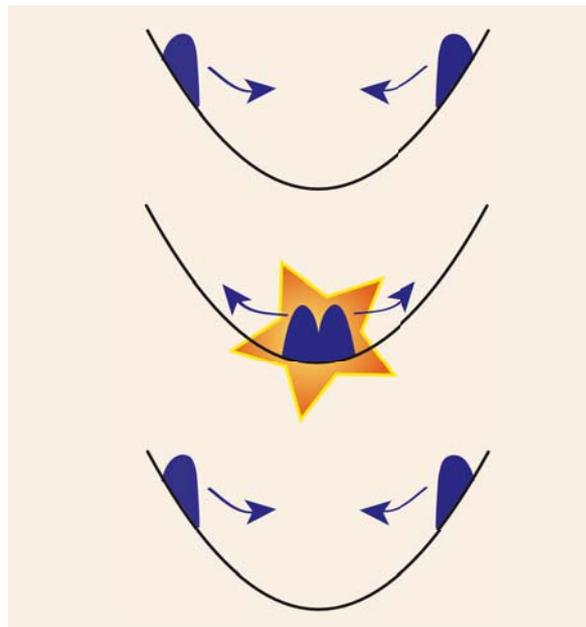


Abb. 5 Zwei Atomwolken schwingen in einem eindimensionalen parabolischen Potential gegeneinander, ohne merklich ins thermische Gleichgewicht zu relaxieren [10].

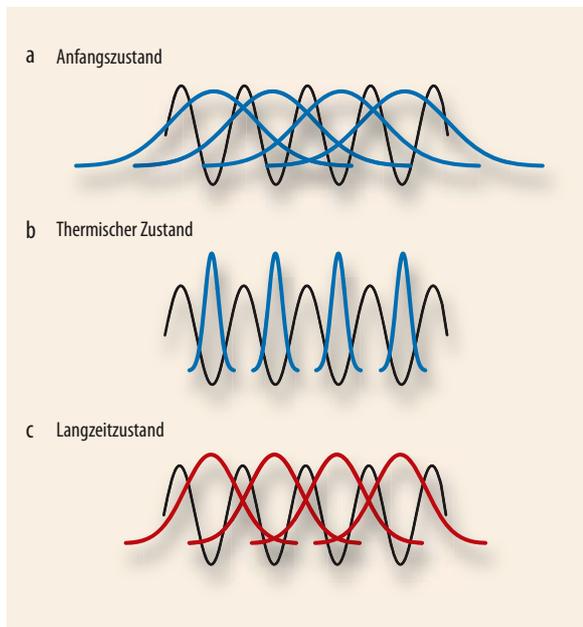


Abb. 6 Der Zustand im Langzeitlimes (c) trägt weniger Kohärenz als der suprafluide Anfangszustand (a), jedoch sehr viel mehr als der thermische Mott-isolierende Zustand (b), der den Endparametern entspricht.

der Hüpfhöhe für bosonische Atome in einem optischen Gitter. Theoretisch lassen sich die Atome in dem optischen Gitter wiederum durch das bosonische Analog des Hubbard-Modells, das Bose-Hubbard-Modell, beschreiben. Hierbei betrachtet man eine Sorte von Bosonen mit Hüpfhöhe J und Wechselwirkungsstärke U . In diesem Modell existiert ein Quantenphasenübergang an einem kritischen Wert der Wechselwirkungsstärke $(U/J)_c$ zwischen einem Superfluid (einem delokalisierten, phasenkohärenten Zustand) für kleine Werte von U/J und einem Mott-Isolator (einem lokalisierten, phasendekohärenten Zustand) für große Werte von U/J .

Eine plötzliche Änderung des Verhältnisses der Wechselwirkungsstärke und der Hüpfhöhe U/J bringt das System aus dem Gleichgewicht. Wird z. B. die Wechselwirkungsstärke erhöht, ändert sich die Phasenkohärenz der Atome. Eine naive Erwartung wäre die Zerstörung der Kohärenz. Jedoch haben wir numerisch auch lange nach der Störung eine stärkere Phasenkohärenz gefunden als die im thermischen Gleichgewicht zu erwartende (Abb. 6) [11].

Diese Beobachtung ist sehr überraschend, da das betrachtete System dafür bekannt ist, nur wenige bewegungseinschränkende Erhaltungsgrößen zu haben. Daher würde man einen Übergang ins thermische Gleichgewicht erwarten. In den numerischen Simulationen tritt dieser jedoch für die betrachteten experimentell relevanten Zeitskalen und Systemgrößen (bis zu hundert Kettenplätze) nicht auf, und das Gas erinnert sich weiterhin an den Ausgangszustand. Offen bleibt, ob dieser Zustand metastabil ist und für sehr lange Zeiten oder in einem unendlichen System lokal in einen thermischen Zustand übergehen kann.

Bisherige Experimente fokussieren auf die Kurzzeitdynamik [12]. Es wäre spannend, die Experimente auf die Langzeitdynamik zu erweitern, um diese Fragen zu adressieren.

Die Quantendynamik von stark korrelierten Vielteilchen-Systemen führt zu überraschenden Effekten. Wir haben zwei davon, die Spin-Ladungstrennung in eindimensionalen Systemen und die Existenz von stabilen Zuständen, die vom thermischen Gleichgewicht verschieden sind, diskutiert. Ultrakalte Quantengase ermöglichen es heutzutage, diese Dynamik in einer sehr kontrollierten Weise zu verfolgen. Viele spannende Fragestellungen wie die Erzeugung exotischer metastabiler Zustände oder der Einfluss einer leichten Kopplung an die Umgebung warten darauf, theoretisch und experimentell untersucht zu werden.

Literatur

- [1] I. Bloch, J. Dalibard und W. Zwerger, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 885 (2008)
- [2] I. Peschel et al. (Hrsg.), *Density Matrix Renormalization*, Springer, New York (1999)
- [3] U. Schollwöck, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 259 (2005)
- [4] G. Vidal, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 040502 (2004)
- [5] A. J. Daley, C. Kollath, U. Schollwöck und G. Vidal, *J. Stat. Mech.: Theor. Exp.*, P04005 (2004)
- [6] S. R. White und A. E. Feiguin, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 076401 (2004)
- [7] T. Giamarchi, *Quantum Physics in One Dimension*, Oxford University Press (2004)
- [8] C. Kollath, U. Schollwöck und W. Zwerger, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 176401 (2005)
- [9] O. M. Auslaender et al., *Science* **308**, 88 (2005)
- [10] T. Kinoshita, T. Wenger und D. S. Weiss, *Nature* **440**, 900 (2006)
- [11] C. Kollath, A. Läuchli und E. Altman, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 180601 (2007)
- [12] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch und I. Bloch, *Nature* **415**, 39 (2002)

DIE AUTORIN

Corinna Kollath (hier mit DPG-Präsident Gerd Litfin bei der Preisverleihung in Hamburg) studierte Physik in Köln und Glasgow. 2005 promovierte sie an der RWTH Aachen bei Ulrich



G. Prager

Schollwöck mit einer Arbeit über die Beschreibung von Nichtgleichgewichtsphysik mit numerischen Methoden, an der sie in München (Lehrstuhl Jan von Delft) und Aachen geforscht hatte. Nach einem zweijährigen Postdoc-Aufenthalt in der Gruppe von Thierry Giamarchi an der Universität von Genf erhielt Corinna Kollath einen Junior Chair an der Ecole Polytechnique (Frankreich) und wurde ein Jahr später „Charge de Recherche“. Schwerpunkt ihrer Arbeit ist die theoretische Beschreibung komplexer Quantengase und Festkörpersysteme im und fern vom Gleichgewicht.