

Supraflüssig, magnetisch, topologisch: Exotische Materie und der Physik-Nobelpreis 2016

Uwe-Jens Wiese

Albert Einstein Center for Fundamental Physics
Institut für Theoretische Physik, Universität Bern

u^b

u
UNIVERSITÄT
BERN

AEC
ALBERT EINSTEIN CENTER
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS

Physik am Freitag
Universität Bern, 27. Januar 2017

Supraflüssig, magnetisch, topologisch: Exotische Materie und der Physik-Nobelpreis 2016

Uwe-Jens Wiese

Albert Einstein Center for Fundamental Physics
Institut für Theoretische Physik, Universität Bern

u^b

u
UNIVERSITÄT
BERN

AEC
ALBERT EINSTEIN CENTER
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS

Physik am Freitag
Universität Bern, 27. Januar 2017



Supraflüssig, magnetisch, topologisch: Exotische Materie und der Physik-Nobelpreis 2016

Uwe-Jens Wiese

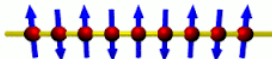
Albert Einstein Center for Fundamental Physics
Institut für Theoretische Physik, Universität Bern

u^b

UNIVERSITÄT
BERN

AEC
ALBERT EINSTEIN CENTER
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS

Physik am Freitag
Universität Bern, 27. Januar 2017



Supraflüssig, magnetisch, topologisch: Exotische Materie und der Physik-Nobelpreis 2016

Uwe-Jens Wiese

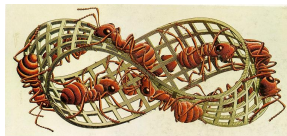
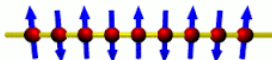
Albert Einstein Center for Fundamental Physics
Institut für Theoretische Physik, Universität Bern

u^b

UNIVERSITÄT
BERN

AEC
ALBERT EINSTEIN CENTER
FOR FUNDAMENTAL PHYSICS

Physik am Freitag
Universität Bern, 27. Januar 2017



Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

Zusammenfassung

Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

Zusammenfassung

Die Physik-Nobelpreisträger 2016



Duncan Haldane



J. Michael Kosterlitz



David J. Thouless

Die Physik-Nobelpreisträger 2016



Duncan Haldane



J. Michael Kosterlitz



David J. Thouless



Die Physik-Nobelpreisträger 2016



Duncan Haldane



J. Michael Kosterlitz



David J. Thouless



Die Physik-Nobelpreisträger 2016



Duncan Haldane



J. Michael Kosterlitz



David J. Thouless



Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

Zusammenfassung

Drei altbekannte Aggregatzustände der Materie (z.B. Wasser),
die sich durch ihre Dichte unterscheiden



fest

Drei altbekannte Aggregatzustände der Materie (z.B. Wasser),
die sich durch ihre Dichte unterscheiden



fest



flüssig

Drei altbekannte Aggregatzustände der Materie (z.B. Wasser),
die sich durch ihre Dichte unterscheiden



fest

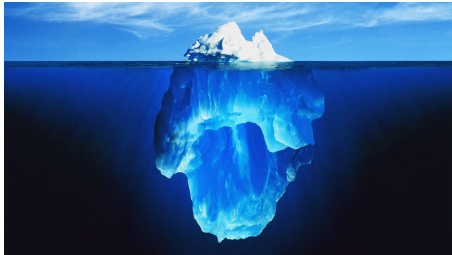


flüssig



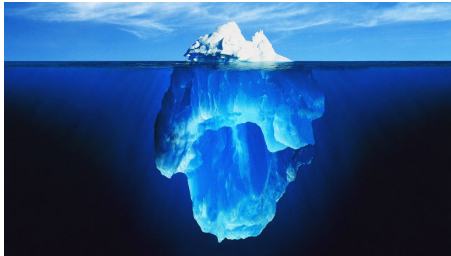
gasförmig

Koexistenz der unterschiedlichen Phasen von Wasser



Eis und flüssiges Wasser koexistieren am Schmelzpunkt (0 C).

Koexistenz der unterschiedlichen Phasen von Wasser

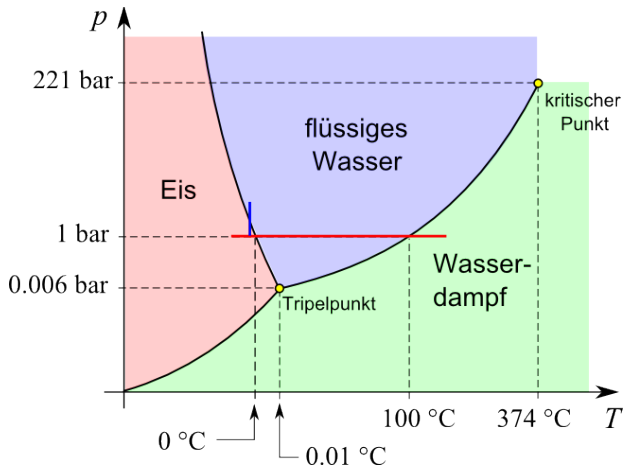


Eis und flüssiges Wasser koexistieren am Schmelzpunkt (0 C).



Wasser und Wasserdampf koexistieren am Siedepunkt (100 C).

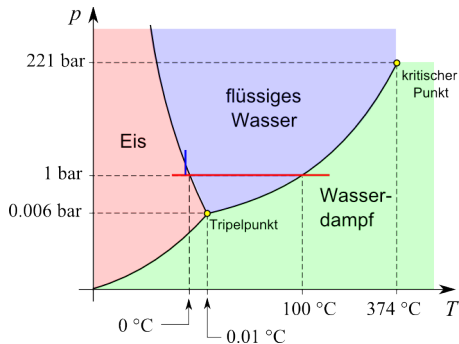
Das Phasendiagramm von Wasser zeigt Schmelz-, Siede- und Sublimationstemperatur T für variierende Werte des Drucks p .



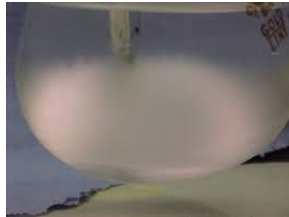
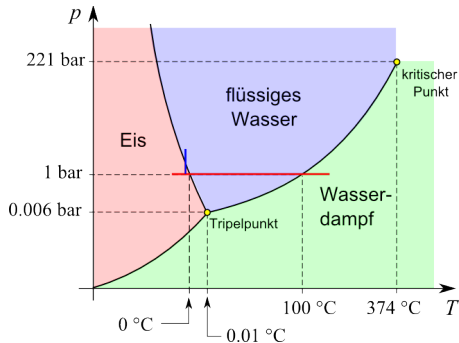
Bei niedrigem Druck (z.B. im Hochgebirge) kocht Wasser schon unterhalb von 100 °C .

Unter hohem Druck (z.B. an der Kufe eines Schlittschuhs) verflüssigt sich Eis.

Die Siedekurve (Phasenübergang erster Ordnung) endet an einem kritischen Punkt (Phasenübergang zweiter Ordnung), an dem Dampf und Flüssigkeit dieselbe Dichte haben.

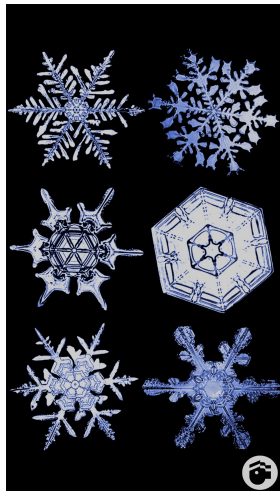
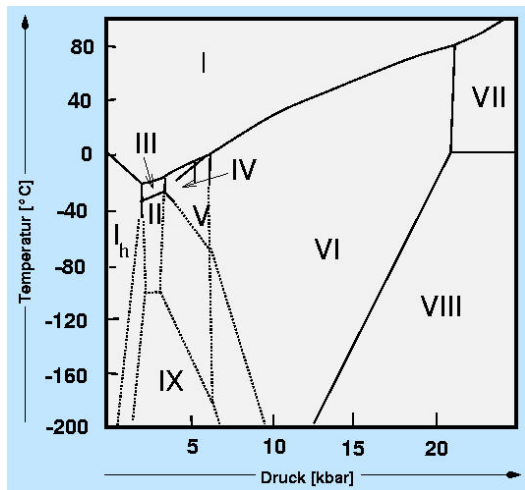


Die Siedekurve (Phasenübergang erster Ordnung) endet an einem kritischen Punkt (Phasenübergang zweiter Ordnung), an dem Dampf und Flüssigkeit dieselbe Dichte haben.



Bei hohem Druck $p_c = 221$ b und hoher Temperatur $T = 274$ C wird aus kochendem Wasser eine “milchige” Suppe (kritische Opaleszenz). Dieses Verhalten ist universell, d.h. es tritt in unterschiedlichen Flüssigkeiten in derselben Art und Weise auf.

Phasendiagramm von Eis bei sehr hohem Druck



Abhängig von Druck und Temperatur gibt es neun verschiedene Phasen von Eis, alle mit unterschiedlicher Kristallstruktur.

Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

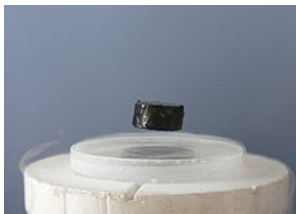
Quantencomputer und Quantensimulatoren

Zusammenfassung

Von der Entdeckung zum Verständnis der Supraleitung (bei $T \approx 1$ K fließt elektrischer Strom ohne Verluste)



H. Kamerling Onnes (1911)

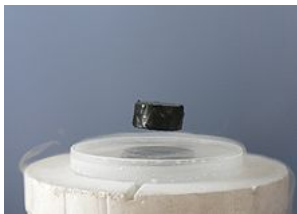


Meissner Effekt

Von der Entdeckung zum Verständnis der Supraleitung (bei $T \approx 1$ K fließt elektrischer Strom ohne Verluste)



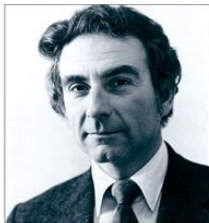
H. Kamerlingh Onnes (1911)



Meissner Effekt



J. Bardeen



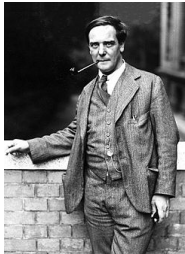
L. Cooper



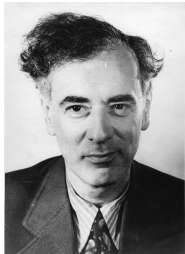
J. R. Schrieffer (1957)

BCS Theorie: Cooper-Paare von Elektronen bilden ein Kondensat.

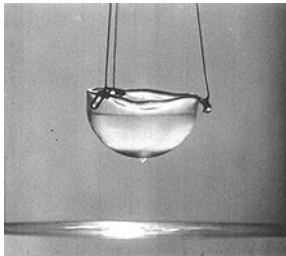
Von der Entdeckung zum Verständnis der Suprafluidität (bei $T \approx 1$ K strömt flüssiges Helium ohne Reibungsverluste)



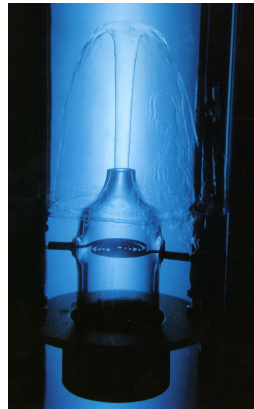
P. Kapitza (1937)



L. D. Landau (1941)

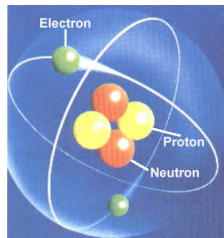
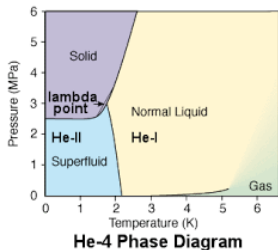


Helium Film

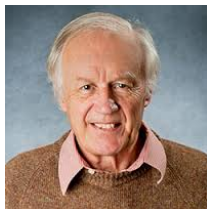
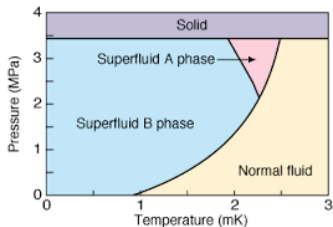
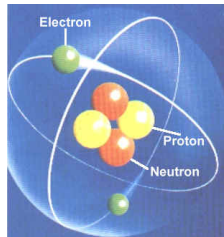
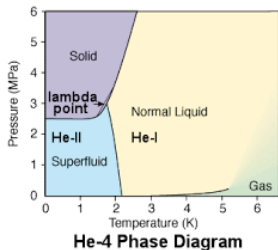


Fontänen Effekt

Die Phasendiagramme von ^4He und ^3He



Die Phasendiagramme von ^4He und ^3He



A. Leggett

Ohne das zweite Neutron muss es noch 1000 mal kälter sein, um Suprafluidität nicht nur in ^4He sondern sogar in ^3He zu erzielen. Dann kondensieren Cooper-Paare, bestehend aus zwei ^3He Atomen.

Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

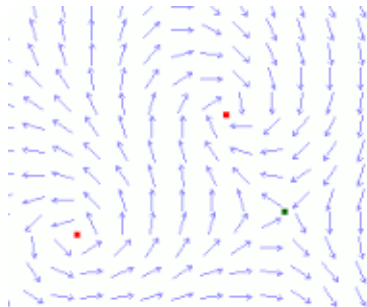
Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

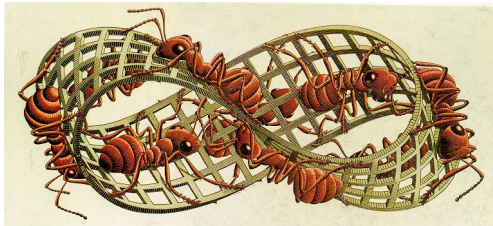
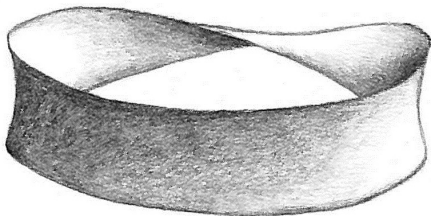
Zusammenfassung

Vortizes (topologische Wirbel) bestimmen die Dynamik und die Phasenstruktur von Supraflüssigkeiten



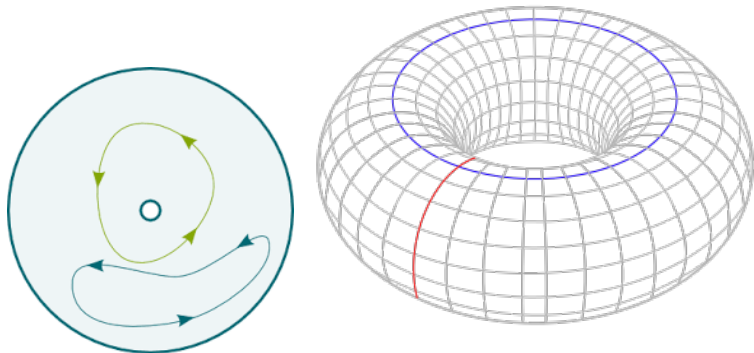
Kosterlitz und Thouless haben die Vortexdynamik im sogenannten XY-Modell für klassische Spins (Vektoren in der X-Y-Ebene) beschrieben. Nach ihnen ist der Kosterlitz-Thouless Phasenübergang benannt. Dieser Phasenübergang ist nicht von erster oder zweiter, sondern von unendlicher Ordnung.

Moebiusband und Topologie (ein Teilgebiet der Mathematik)



Die Topologie beschäftigt sich unter anderem mit kontinuierlichen Deformationen. Dabei sind das Zerschneiden oder Zusammenkleben von Objekten verbotene Operationen.

Homotopie für Kreisring, Torus und Kugel



Je nach Oberfläche lassen sich geschlossene Kurven ineinander deformieren oder nicht.

Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

Zusammenfassung

Heisenbergsche Unschärferelation in 100 Worten:



Unsere Alltagserfahrung sagt uns, dass wir gleichzeitig Position und Geschwindigkeit eines Objekts genau bestimmen können. Im Mikrokosmos der Elektronen hingegen herrscht die Heisenbergsche Unschärferelation. Danach sind Position und Geschwindigkeit eines Elektrons komplementäre Größen, die man nicht gleichzeitig genau kennen kann. Elektronen verhalten sich ähnlich wie Wellen auf einem Teich. Wenn ein geworfener Kieselstein die Wasseroberfläche berührt, können wir die Position der entstehenden Welle genau bestimmen, wissen aber noch nichts über deren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Wenn wir einen Moment später diese Geschwindigkeit messen, hat sich die Welle bereits so weit über den Teich ausgebreitet, dass wir ihr keine genaue Position mehr zuordnen können.

Heisenbergsche Unschärferelation ganz ohne Worte:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Ein Quantenspin kann sich in einer Überlagerung der Zustände $|\uparrow\rangle$ und $|\downarrow\rangle$ befinden:

a)

$|1\rangle$, $|\text{Nord}\rangle$

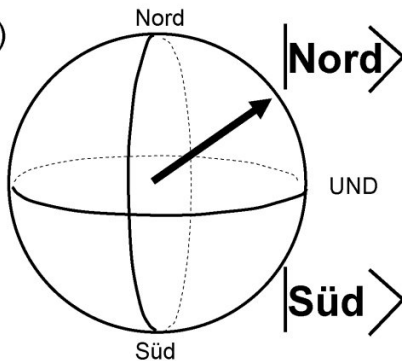
ODER

ODER

$|0\rangle$, $|\text{Süd}\rangle$



b)



Allgemeiner Zustand eines Quantenspins:

$$|\Psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle, \quad a, b \in \mathbb{C}, \quad |a|^2 + |b|^2 = 1$$

Allgemeiner Zustand zweier Quantenspins:

$$|\Psi\rangle = a|\uparrow\uparrow\rangle + b|\uparrow\downarrow\rangle + c|\downarrow\uparrow\rangle + d|\downarrow\downarrow\rangle, \quad |a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2 = 1$$

Verschränkter Spin 0 Zustand zweier Quantenspins:

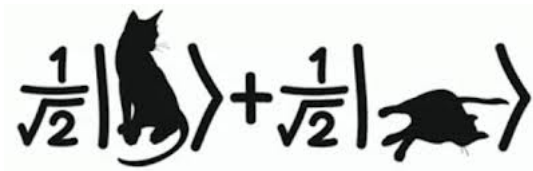
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\downarrow\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\uparrow\rangle$$

Allgemeiner Zustand zweier Quantenspins:

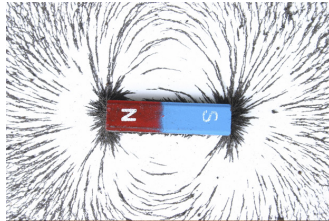
$$|\Psi\rangle = a|\uparrow\uparrow\rangle + b|\uparrow\downarrow\rangle + c|\downarrow\uparrow\rangle + d|\downarrow\downarrow\rangle, \quad |a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2 = 1$$

Verschränkter Spin 0 Zustand zweier Quantenspins:

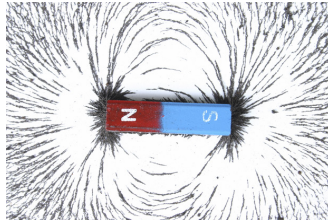
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\downarrow\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\uparrow\rangle$$



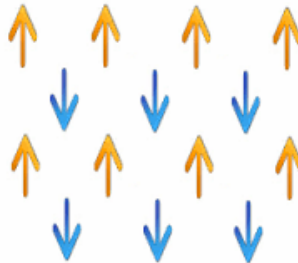
Viele stark korrelierte Quantenspins können zu exotischen Formen des Magnetismus Anlass geben



Viele stark korrelierte Quantenspins können zu exotischen Formen des Magnetismus Anlass geben

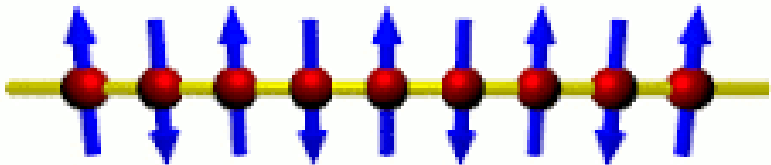


Ferromagnet

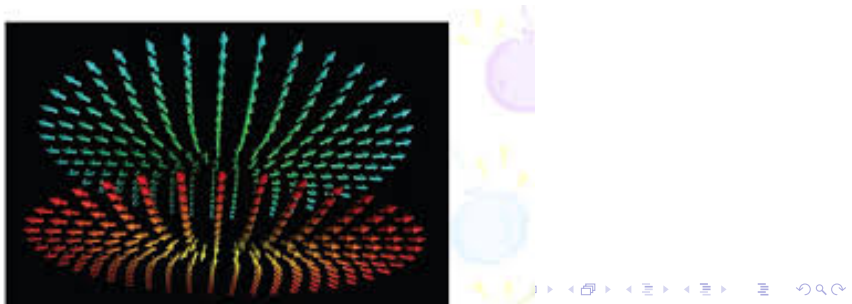


Antiferromagnet

Haldane's Vorhersage: das Verhalten von Quantenspinketten hängt davon ab, ob der Spinwert ganz- oder halbzahlig ist



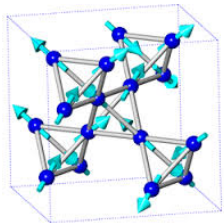
Die relevanten topologischen Anregungen sind Instantonen und Meronen



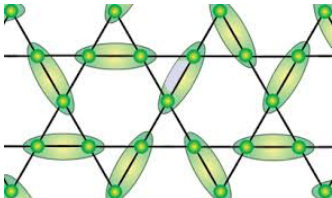
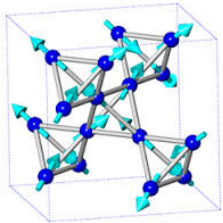
Weitere Exoten: Herbertsmithites, Spin-Eis, Spinflüssigkeiten und Hochtemperatur Supraleiter



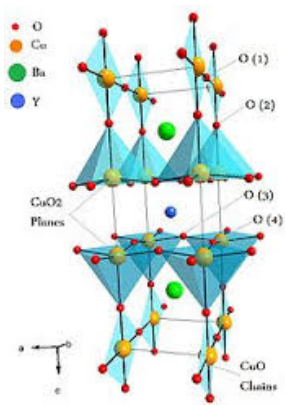
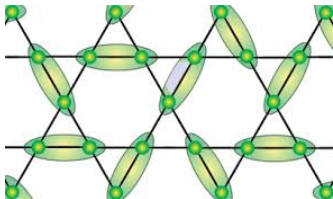
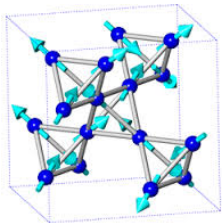
Weitere Exoten: Herbertsmithites, Spin-Eis, Spinflüssigkeiten und Hochtemperatur Supraleiter



Weitere Exoten: Herbertsmithites, Spin-Eis, Spinflüssigkeiten und Hochtemperatur Supraleiter



Weitere Exoten: Herbertsmithites, Spin-Eis, Spinflüssigkeiten und Hochtemperatur Supraleiter



Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

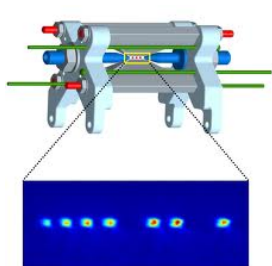
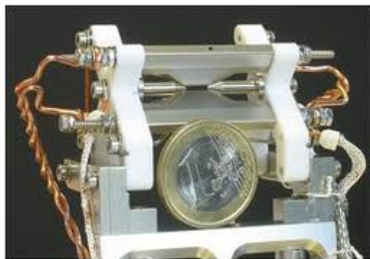
Zusammenfassung

Richard Feynmans Vision von 1982



“I’m not happy with all the analyses that go with just the classical theory, because nature isn’t classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you’d better make it quantum mechanical, and by golly it’s a wonderful problem, because it doesn’t look so easy.”

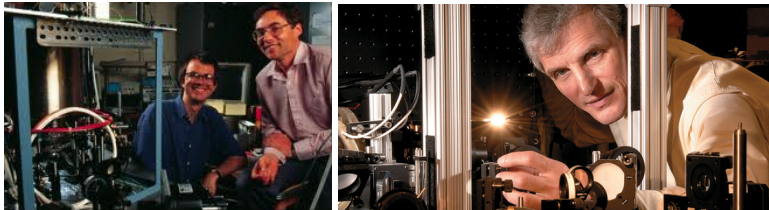
Ionenfalle als Quantencomputer



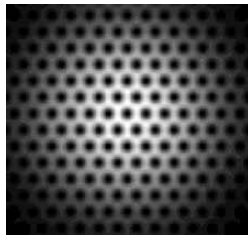
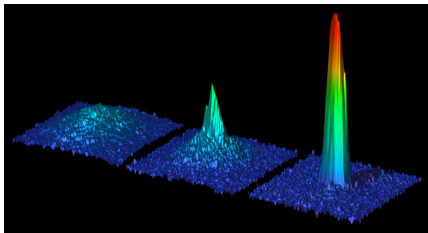
Franklin Medal 2010: I. Cirac, D. Wineland, P. Zoller



Bose-Einstein Kondensation in ultra-kalten atomaren Gasen

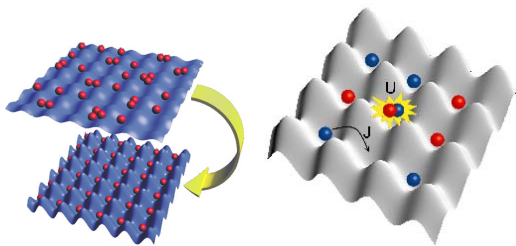
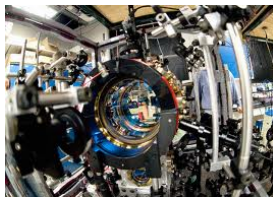


Eric Cornell, Carl Wieman, Wolfgang Ketterle, 1995

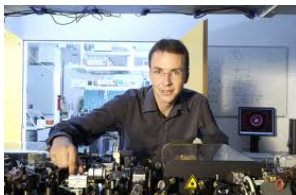
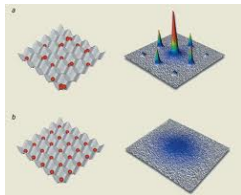


Eine neue Art von "Supraflüssigkeit", wiederum mit Vortizes, allerdings noch eine Milliarde mal kälter als supraflüssiges ^4He .

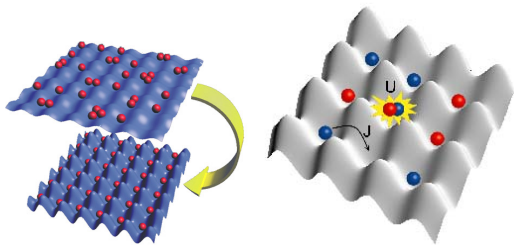
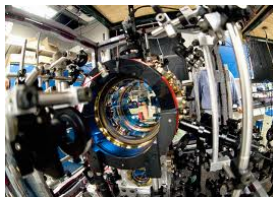
Ultra-kalte Atome im optischen Gitter als Quantensimulator



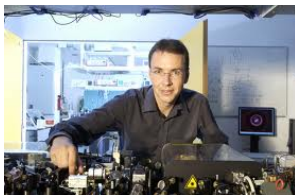
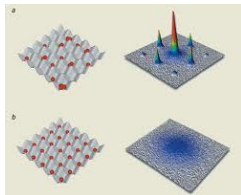
Übergang von einer Supraflüssigkeit zum Mott-Isolator



Ultra-kalte Atome im optischen Gitter als Quantensimulator



Übergang von einer Supraflüssigkeit zum Mott-Isolator

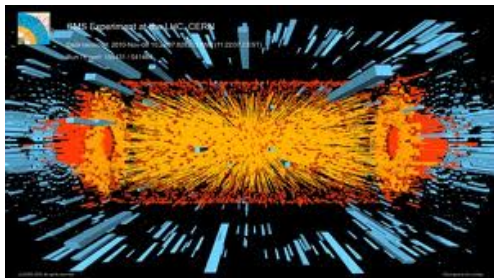
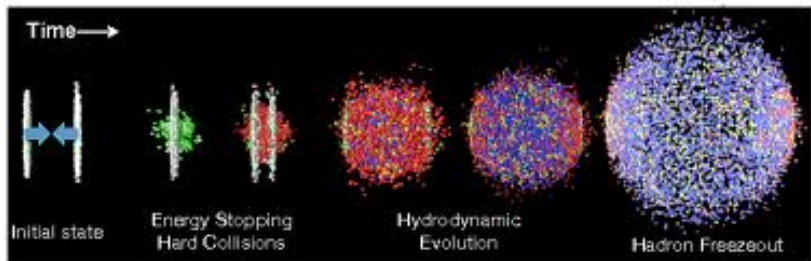


I. Bloch

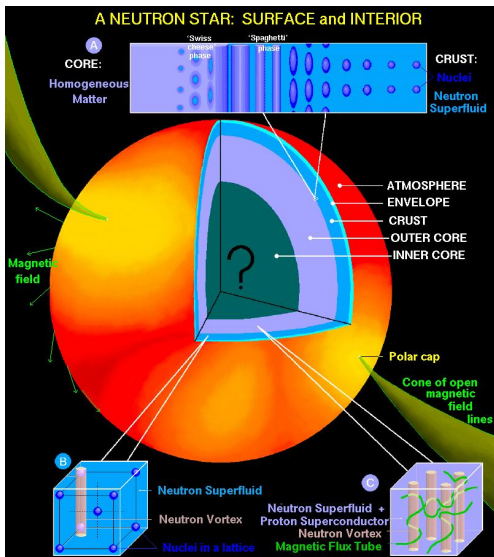
A. Müller und G. Bednorz

Kann man auf diese Weise vielleicht sogar die 1986 entdeckte Hochtemperatur-Supraleitung erklären?

Schwerionenstöße am LHC sind bisher noch unberechenbar.

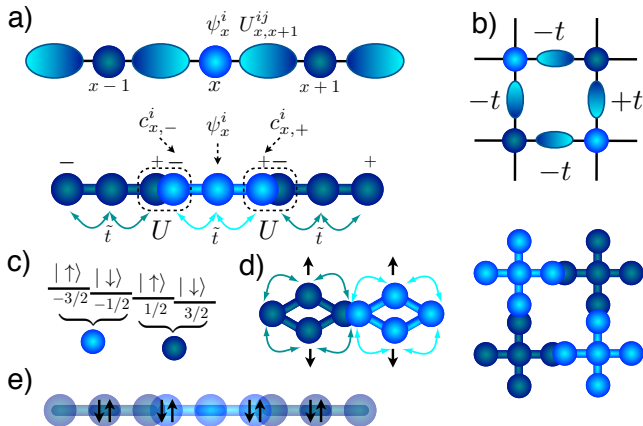


Der innere Kern von Neutronensternen ist noch unberechenbar.



Befindet sich dort wohlmöglich eine Supraflüssigkeit von Cooper-Paaren, bestehend aus zwei Neutronen?

Optisches Gitter ultra-kalter Erdalkali Atome (^{87}Sr oder ^{173}Yb) zur Quantensimulation von Quarks und Gluonen



Bern-Innsbruck Kollaboration von Teilchenphysikern und Atomphysikern:
 Debasish Banerjee, Michael Bögli, Marcello Dalmonte, Enrique Rico,
 Pascal Stebler, Philippe Widmer, UJW, Peter Zoller

Inhaltsübersicht

Die Physik-Nobelpreisträger 2016

Phasenstruktur der “Alltagsmaterie” Wasser

Exotische Flüssigkeiten

Klassische Spins und topologische Vortizes

Quantenspins und exotische Magneten

Quantencomputer und Quantensimulatoren

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Kalte, bzw. ultra-kalte Materie kann in exotischen Aggregatzuständen existieren: **Supraleiter, Supraflüssigkeiten, Bose-Einstein Kondensate, Cooper-Paar Kondensate, Antiferromagneten, Spinflüssigkeiten, etc.**

Zusammenfassung

- Kalte, bzw. ultra-kalte Materie kann in exotischen Aggregatzuständen existieren: **Supraleiter, Supraflüssigkeiten, Bose-Einstein Kondensate, Cooper-Paar Kondensate, Antiferromagneten, Spinflüssigkeiten, etc.**
- Die Dynamik von Supraflüssigkeiten sowie von antiferromagnetischen Spinketten wird durch **topologische Anregungen wie Vortizes, Instantonen oder Meronen** bestimmt.

Zusammenfassung

- Kalte, bzw. ultra-kalte Materie kann in exotischen Aggregatzuständen existieren: **Supraleiter, Supraflüssigkeiten, Bose-Einstein Kondensate, Cooper-Paar Kondensate, Antiferromagneten, Spinflüssigkeiten, etc.**
- Die Dynamik von Supraflüssigkeiten sowie von antiferromagnetischen Spinketten wird durch **topologische Anregungen wie Vortizes, Instantonen oder Meronen** bestimmt.
- Kenntnisse der modernen Mathematik, wie z.B. gewisser **Aspekte der Topologie**, sind unerlässlich, um zu einem tiefen theoretischen Verständnis der Dynamik von exotischer Materie vorzudringen.

Zusammenfassung

- Kalte, bzw. ultra-kalte Materie kann in exotischen Aggregatzuständen existieren: **Supraleiter, Supraflüssigkeiten, Bose-Einstein Kondensate, Cooper-Paar Kondensate, Antiferromagneten, Spinflüssigkeiten, etc.**
- Die Dynamik von Supraflüssigkeiten sowie von antiferromagnetischen Spinketten wird durch **topologische Anregungen wie Vortizes, Instantonen oder Meronen** bestimmt.
- Kenntnisse der modernen Mathematik, wie z.B. gewisser **Aspekte der Topologie**, sind unerlässlich, um zu einem tiefen theoretischen Verständnis der Dynamik von exotischer Materie vorzudringen.
- **Quantensimulatoren** können spezifische, bisher unlösbare wissenschaftliche Probleme lösen, und werden mit Hochdruck weiterentwickelt.

Zusammenfassung

- Kalte, bzw. ultra-kalte Materie kann in exotischen Aggregatzuständen existieren: **Supraleiter, Supraflüssigkeiten, Bose-Einstein Kondensate, Cooper-Paar Kondensate, Antiferromagneten, Spinflüssigkeiten, etc.**
- Die Dynamik von Supraflüssigkeiten sowie von antiferromagnetischen Spinketten wird durch **topologische Anregungen wie Vortizes, Instantonen oder Meronen** bestimmt.
- Kenntnisse der modernen Mathematik, wie z.B. gewisser **Aspekte der Topologie**, sind unerlässlich, um zu einem tiefen theoretischen Verständnis der Dynamik von exotischer Materie vorzudringen.
- **Quantensimulatoren** können spezifische, bisher unlösbare wissenschaftliche Probleme lösen, und werden mit Hochdruck weiterentwickelt.
- Wir alle tragen einen extrem leistungsfähigen **“Computer” im Kopf** mit uns herum. Wir können ihn in vielfältiger Weise kreativ einsetzen, z.B. um zu versuchen, andere exotische Aggregatzustände der Materie, wie die immer noch **unverstandene Hochtemperatur-Supraleitung**, zu erklären.