Bose-Einstein Kondensation

Johannes Leitner

Einleitung

Das Ziel dieser Arbeit war eine grundlegende Auseinandersetzung mit der Bose-Einstein-Kondensation, angeregt durch die Exkursion ins Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.

In Kapitel 1 beschäftige ich mich mit der historischen Entwicklung, den Biographien der beiden berühmten Wissenschaftler, und letztendlich auch mit der theoretischen Vorhersage der Bose-Einstein-Kondensation. In Kapitel 2 und 3 gebe ich einen grundlegenden Überblick über die Mechanismen, die der Bose-Einstein-Kondensation zugrundeliegen, ohne jedoch allzu sehr in die Theorie einzudringen. Auch beschäftige ich mich mit der Realisierung der Bose-Einstein-Kondensation und versuche einen groben Überblick über die experimentellen Methoden zu geben. In Kaptitel 4 beschreibe ich kurz den Atomlaser, eine neue Entwicklung, welche als Grundlage das Bose-Einstein-Kondensat verwendet. In Kapitel 5 stelle ich noch kurz die letzte Entdeckung auf dem Gebiet der Bose-Einstein-Kondensationsforschung vor. Die Bosenova, welche im März 2001 erstmals beobachtet worden ist.

1. Albert Einstein und Satyendra Nath Bose - Ein historischer Rückblick

1.1 Kurzbiographie Satyendra Nath Bose

Satyendra Nath Bose wurde am 1. Januar 1894 in Kalkutta, Indien, geboren. Nach dem Besuch der Grundschule trat er mit 15 Jahren in das Presidency College ein, wo er hauptsächlich naturwissenschaftliche Kurse belegte. Er absolvierte sein Examen als Jahrgangsbester im Alter von 19 Jahren. Schon mit 22 Jahren erhielt er eine Anstellung als Dozent am University College, wo er sich unter anderem mit den Arbeiten von Albert Einstein auseinandersetzte.

Mit 27 Jahren verließ Bose Kalkutta um Lektor an der Dacca University zu werden. In dieser Zeit schrieb er seine wohl berühmteste Arbeit, die sogenannte "Photonenstatistik", die später ihm und Einstein zu Ehren in Bose-Einstein Statistik umbenannt wurde. Dirac nannte später die Teilchen, die dieser Statistik genügen, Bosonen.

1921 verbrachte er einige Zeit in Paris und arbeitete in den Laboratorien von Madame Curie. Etwas später machte er in Berlin mit Einstein Bekanntschaft. Mit 32 Jahren kehrte er nach Dacca zurück und trat eine Stelle als Professor der Physik an der Universität an. Diese Position behielt er bis zu seinem 62. Lebensjahr. 1974, im Alter von 80 Jahren, starb er in Kalkutta.

1.2 Kurzbiographie Albert Einstein

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren und übersiedelte in frühen Jahren mit seinen Eltern nach München.

Johannes Leitner studiert an der Universität Wien Physik.

Mit 15 Jahren brach er seine Schullaufbahn ab und verbrachte mit seinen Eltern ein Jahr in Mailand. Da er dennoch studieren wollte, suchte er sich eine Hochschule, die kein Abitur voraussetzte, die Eidgenössische Polytechnische Hochschule in Zürich. Da er aber die Aufnahmeprüfung nicht bestand, besuchte er stattdessen die Kantonschule in Aarau, wo auch der berühmte Mathematiker Minkowski unterrichtete, der seinerzeit Einstein ein eher schlechtes Zeugnis ausstellte.

Im Frühjahr 1900 legte Einstein seine Diplomprüfung ab, und trat eine Stelle als Hilfslehrer an. Danach war er einige Zeit am Patentamt in Bern beschäftigt. 1903 heiratete Einstein seine frühere Studienkollegin Mileva, die er jedoch 1914 wieder verließ. 1919 heiratete er seine Kusine Elsa, die dann die Pflege seiner schwerkranken Mutter übernahm.

1905 publizierte Einstein über die Lichtquantenhypothese, worin er das Licht als ein "Bombardement von Teilchen" betrachtete. Diese Erklärung deckte die Doppelnatur des Lichtes auf und erlaubte Einstein eine Erklärung des Photoeffektes, für die er 16 Jahre später den Nobelpreis erhielt. Ebenfalls 1905 entwickelte er seine spezielle Relativitätstheorie. 1911 wurde Einstein als Professor an die deutsche Universität nach Prag gerufen. Dort hatte er seine ersten Ideen zur allgemeinen Relativitätstheorie, welche er im Jahre 1916 vollendete. Doch der endgültige Durchbruch gelang ihm erst nach Kriegsende 1918, durch Experimente, welche seine allgemeine Relativitätstheorie bestätigten (Nachmessung der Lichtablenkung).

Neben all seinem Ruhm hatte Einstein als Jude in Deutschland auch erhebliche Probleme, weshalb er immer häufiger Reisen ins Ausland unternahm, so 1921 seine erste USA Reise. Mit der Machtergreifung der Faschisten in Deutschland 1933 ging er ins politische Exil an das "Institute for Advanced Science" in Princeton, USA. Dort leistete er unter anderem auch Beiträge, die zur Entwicklung der Atombombe führten. Desweiteren forschte er, allerdings leider erfolglos, an der Vereinigung der vier Wechselwirkungskräfte. Am 18. April 1955 starb Einstein in Princeton, nachdem er seit 1949 mit verschiedenen Krankheiten zu kämpfen hatte. Er erhielt im Laufe seines Lebens viele Auszeichnungen, darunter 25 Ehrendoktorate und den Nobelpreis.

1.3 Einsteins und Boses historische Ansätze

Alles begann mit einem Brief des jungen Bose an Einstein im Juni 1924, über seine Arbeit mit dem Titel *Plancks Gesetz und die Lichtquantenhypothese*, in dessen Rahmen das erste Mal das Planck´sche Strahlungsgesetz mit Methoden der statistischen Mechanik hergeleitet wurde. Bose nahm an, gleichartige Teilchen seien ununterscheidbar, ohne jedoch diese Annahme zu rechtfertigen, und leitete mit ihrer Hilfe direkt das Planck´sche Strahlungsgesetz her, indem er verschiedene Zustände des Photons zuließ. Er fand eine Gleichung für die Zustandsdichte von Photonen in einem Kasten-Potential, indem er die Anzahl der den Photonen in Abhängigkeit von ihrer Energie zugänglichen Quantenzustände abzählte. Statt Teilchen

Mit Docutain erstellt

als voneinander unabhängig zu betrachten, verwendete Bose Teilchen in einer Phasenraumzelle, in welcher die Teilchen dann ununterscheidbar sind. Der Phasenraum eines dynamischen Systems ist ein mathematischer Raum, wo die mikroskopischen Variablen (die den unmittelbaren Zustand des Systems beschreiben) als Koordinaten verwendet werden. Die von ihm benützte Methode lieferte gleichzeitig die quantenmechanische Beschreibung des idealen Gases.

Bose sandte diese Arbeit an Einstein mit der Bitte um Durchsicht und bat ihn auch, gegebenenfalls eine Veröffentlichung in der "Zeitschrift für Physik" zu erwirken. Einstein entsprach dieser Bitte und fügte als Anmerkung sogar noch hinzu, dass er die Arbeit von Bose als einen wichtigen Fortschritt betrachte.

Aber nicht nur Bose, sondern auch Einstein beschäftigte sich mit dem Planck'schen Gesetz und der statistischen Mechanik. Er war es, der zum ersten Mal die klassische Gastheorie, die gleichartige Teilchen als unterscheidbar annimmt, der neu entwickelten quantenmechanischen Gastheorie, in der gleichartige Teilchen als ununterscheidbar gelten, gegenübergestellte. Das Gas betrachtete er, wie Bose, in einem Phasenraum, der in Zellen, deren Größe durch die Unschärferelation bestimmt ist, eingeteilt ist. Er folgerte verschiedene Eigenschaften des idealen Quantengases, darunter auch die Sättigung des Gases und die anschließende Kondensation eines Teils des Gases im quantenmechanischen Grundzustand. Dieses Phänomen ist heute als die Bose-Einstein-Kondensation bekannt.

Somit wurde die Bose-Einstein-Kondensation, welche erst 1995 experimentell bestätigt wurde, schon im Jahre 1924/1925 von den beiden berühmten Physikern vorausgesagt.

2. Die Bose-Einstein-Kondensation

2.1 Die experimentelle Bestätigung

Alles begann mit der International Conference of Laserspectroscopy, einer in der 2. Juniwoche 1995 abgehaltenen Physikertagung auf der Insel Capri. Dort berichtete Eric Cornell vom Joint Institute of Laboratory Astrophysics in Boulder, dass er und seine Forschungsgruppe bei der Abbildung einer kalten Atomwolke unterhalb von bestimmten Temperaturen merkwürdige Erscheinungen beobachtet haben, die alle im Einklang mit den theoretischen Prognosen der Bose-Einstein-Kondensation stehen.

Obwohl damals von den meisten Physikern die Realisierung dieser neuen Materieart angezweifelt wurde, sind heute weltweit viele verschiedene Experimente im Laufen, welche das Bose-Einstein-Kondensat genauestens untersuchen. So sind der Gruppe aus Boulder, einem Forschungsteam von Wolfgang Ketterle am MIT und einigen deutschen Forschungsteams unter der Leitung von Prof. Hänsch am Max Planck Institut für Quantenoptik in Garching bedeutende Experimente gelungen. Beispielsweise wurde in Garching der weltweit erste Laser, der statt einem Lichtstrahl einen kontinuierlichen Materiestrahl aussendet, entwickelt.

2.2 Das Bose-Einstein-Kondensat

Durch die Abkühlung von Atomen (z.B.: Rb) auf beinahe 0 K, also nur knapp über dem absoluten Nullpunkt, erreicht man, dass die Atome kurzzeitig ihre Eigenständigkeit aufgeben und sich wie ein einziges Superatom verhalten. Alle haben dieselben physikalischen Eigenschaften, insbesondere identische Orte und Geschwindigkeiten im Rahmen der Heisenberg'schen Unschärferelation. Dieses Verhalten ist grundsätzlich anders als das von Gasen bei deutlich höheren Temperaturen. Dort zeigen sie ja unterschiedliche Verhaltensweisen, die Atome bewegen sich verschieden schnell, da manche Atome energiereicher als andere sind.

Im Bose-Einstein-Kondensat haben nun alle Atome die gleiche Energie, d. h. sie besetzen gemeinsam das tiefstmögliche Energieniveau. Die Voraussetzung ist allerdings, dass es sich um Bosonen, also Teilchen mit ganzzahligem Spin, handelt. Formal bedeutet dies, dass die Wellenfunktionen der einzelnen Bosonen bei extremer Kühlung zu einer einzigen, der des Superatoms, verschmelzen. Da die Wellenfunktion ja sämtliche physikalischen Eigenschaften wie Ort und Geschwindigkeit beschreibt, werden die einzelnen Atome ununterscheidbar.

Die quantenmechanische Wellenfunktion erstreckt sich über das gesamte Kondensat und erreicht Ausmaße, die 100.000mal größer sind als gewöhnliche Atome, es bildet sozusagen den Mikrokosmos makroskopisch ab.

2.3 Maxwell-Boltzmann-Verteilung/Bose-Einstein-Verteilung

In der statistischen Physik beschreibt man Gase im thermischen Gleichgewicht durch verschiedene Verteilungsfunktionen, die die Wahrscheinlichkeit angeben, ein Teilchen in einem bestimmten Zustand zu finden. Diese Funktionen hängen dabei von Größen, wie zum Beispiel der Temperatur, ab und ermöglichen im Prinzip die Berechnung aller anderen makroskopischen Größen, die das System charakterisieren.

Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung gilt im Gegensatz zur Fermi-Dirac oder zur Bose-Einstein-Verteilung in der Näherung klassischer idealer Gase, d.h. bei wechselwirkungsfreien Gasen, die keine Quanteneffekte zeigen (Modell: "harte, unterscheidbare Kugeln"). Im Fall der Bose-Einstein-Statistik, für die die Zahl der Teilchen, die in einem Einteilchen-Zustand untergebracht werden können, nicht beschränkt ist, erhält man den Zustand niedrigster Energie des gesamten Gases, wenn sich alle Teilchen des Gases im gleichen Zustand niedrigster Energie befinden.

2.4 Kritische Temperatur

Ausgehend von einem idealen Bosegas (keine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilchen) möchte ich nun eine Formel zur Berechnung der kritischen Temperatur angeben. Unterhalb dieser kritischen Temperatur ist der Grundzustand makroskopisch abbildbar, das Gas ist nach Bose-Einstein kondensiert, oberhalb nicht mehr.

Kritische Temperatur $T_c = \frac{h^2}{2\pi m k_B}\left(\frac{N}{2.612}\right)^{2/3}$

Mit $\frac{N_0}{N} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{2/3}$ kann die Anzahl der Teilchen im Grundzustand (also im Kondensat) bestimmt werden, wobei k_B = Boltzmann Konstante, h = Planckscher Wirkungsquantum, N = Gesamtanzahl der Teilchen, N_0 = Anzahl der Teilchen im

Mit Docutain erstellt

Grundzustand und T = Temperatur sind. Oberhalb von T_c liegt diese Anzahl in einer guten Näherung bei Null.

3. Herstellung eines Bose-Einstein-Kondensats

3.1 Bosonen und Fermionen

Da Atome aus Fermionen zusammengesetzt sind, kann sich ein Atom nur dann effektiv wie ein Boson verhalten, wenn es insgesamt eine gerade Anzahl von Elektronen, Protonen und Neutronen enthält. Nur dann addieren sich die halbzahligen Spins zu einem ganzzahligen Gesamtspin auf.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen 2 Arten von Teilchen, den Bosonen und den Fermionen. Zu den Fermionen gehören insbesondere alle Bestandteile von Atomen, also Protonen, Neutronen und Elektronen. Photonen, zum Beispiel, sind dagegen Bosonen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Teilchenklassen offenbart sich dadurch, wenn man versucht unterschiedliche Energiezustände mit ihnen zu besetzen, da Fermionen ja dem Pauli-Verbot unterliegen, was bedeutet, dass zwei Elektronen niemals denselben Quantenzustand einnehmen können.

Die Zugehörigkeit zu einer der beiden Klassen, Fermionen oder Bosonen, ist eine unveränderliche Eigenschaft der Teilchen, die durch den Spin bestimmt ist. Dieser kann in Einheiten des Planck'schen Wirkungsquantums nur halb- oder ganzzahlige Werte annehmen.

Der Bosonencharakter spielt bei der Bose-Einstein-Kondensation, bei der sich fast alle Teilchen in ihrem Zustand der niedrigsten Energie befinden, eine zentrale Rolle.

3.2 Der Phasenübergang

Bei der Bose-Einstein-Kondensation geht unterhalb einer bestimmten Temperatur ein wesentlicher Anteil der Gasatome in eine neue Phase über. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass sich alle Atome im Grundzustand, also dem Zustand niedrigster Energie, befinden und dabei ein kollektives Verhalten zeigen.

Der Phasenübergang findet statt, wenn die thermische deBroglie Wellenlänge größer ist als der mittlere Abstand der Teilchen untereinander. Die thermische deBroglie Wellenlänge ist ein Maß für die räumliche Ausdehnung der jedem einzelnen Teilchen zugeordneten Wellenfunktion, also für die Ortsunschärfe der einzelnen Teilchen. Für höhere Temperaturen dagegen ist die deBroglie Wellenlänge zu klein, und das System verhält sich wie ein klassisches Gas. Aus der Tatsache, dass der Phasenübergang durch das Verhältnis von typischem Teilchenabstand und thermischer deBroglie Wellenlänge bestimmt ist, ergeben sich verschiedene Konsequenzen für die experimentelle Realisierung der Bose-Einstein-Kondensation.

Eine Möglichkeit den Phasenübergang zu erreichen, besteht in der Verwendung kleiner Teilchenabstände oder, besser gesagt, in einer relativ hohen Teilchendichte. Ist die Dichte jedoch zu hoch, so können die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen (Kollisionen) im Allgemeinen nicht vernachlässigt werden, und die Bose-Einstein-Kondensation tritt nicht in ihrer eigentlichen Form auf. Dies ist zum Beispiel bei der Superfluidität von Helium 4 und bei der Supraleitung der Fall.

Dieses Problem lässt sich durch die Wahl einer großen thermischen deBroglie Wellenlänge umgehen. Die Erzeugung der dazu benötigten extrem tiefen Temperaturen stellt aber auch heute noch eine große Herausforderung an die Experimentalphysiker dar.

3.3 Experimentelle Mechanismen

Um ein Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen, ist es notwendig, sehr tiefe Temperaturen (fast am absoluten Nullpunkt) zu erreichen. Dies geschieht durch eine Kombination von verschiedenen Methoden, auf die ich hier nur oberflächlich eingehen will.

Die Entwicklung der Laserkühlung in den 80er Jahren war ein wichtiger Schritt zur Erreichung von Temperaturen knapp über 0 K. Es stehen heute verschiedenste Verfahren der Laserkühlung zur Verfügung, beispielsweise Techniken zum Abbremsen oder Fangen von Atomen.

1985 wurde von Hess vorgeschlagen, die Temperatur des Gases zusätzlich mittels einer Verdampfungskühlung zu verringen, so dass zum Erreichen der Bose-Einstein-Kondensation keine so hohen Dichten mehr nötig sind. Dieses Verfahren ist heutzutage meist der letzte Schritt vor dem Erreichen des Phasenübergangs. Es beruht auf einer selektiven Entfernung der jeweils energiereichsten (heißesten) Teilchen aus der Magnetfalle und verringert somit die durchschnittliche kinetische Gesamtenergie (die Temperatur), bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Phasenraumdichte. Eine Magnetfalle dient dazu, das Gas von seiner Umgebung thermisch zu isolieren, damit es in keinem Kontakt mit der Luft oder den Kammerwänden steht.

Da bei den verwendeten Magnetfallen nur extrem kalte Teilchen gefangen werden können, und da die Verdampfungskühlung mit einem erheblichen Verlust an Teilchen verbunden ist, wird die Laserkühlung benutzt um möglichst günstige Anfangsbedingungen, also tiefe Temperaturen und hohe Dichten, zu schaffen. In den derzeitigen Experimenten führt die Verdampfungskühlung zu einem Verlust von 99% der Teilchen und zu einer Erhöhung der Phasenraumdichte um 6 bis 7 Größenordnungen. Auch bei der Verdampfungskühlung gibt es verschiedenste Verfahren. Namentlich seien hier die Adsorption, das Umpumpen durch Licht und das Hochfrequenzfeld erwähnt.

4. Anwendung - Atomlaser

Die Grundlage für einen Atomlaser bildet das Bose-Einstein-Kondensat. Durch einen Magnetkäfig wird es an einem Ort festgehalten. Nun lässt man aus diesem Käfig eine Welle austreten, die sich dann weiter ausbreitetet und einen Materiewellenstrahl erzeugt. Dazu bohrt man zuerst mit einem Radiofrequenzstrahl ein Loch in den Magnetkäfig, durch die Schwerkraft wird dann die Welle nach unten gezogen und bildet einen kurzen Materiestrahl. Dieser ist vergleichbar mit dem Lichtstrahl eines Lasers, der einzige Unterschied sind die Materiewellen anstatt der Lichtwellen.

Der Atomlaser ist eine völlig neue Entwicklung, sodass es noch nicht genau abschätzbar ist, welche zahlreichen praktischen Möglichkeiten er uns eröffnen wird. So sollte es möglich sein, Atomlaserstrahlen bis an deren Beugungsgrenze von 10^{-9} m hin zu fokussieren. Es ist zu erwarten, dass mit Hilfe

Mit Docutain erstellt

von Atomlasern in Zukunft Messungen von Rotationsbeschleunigungen mit einer Genauigkeit und Empfindlichkeit durchgeführt werden können, die den bisherigen Stand bei weitem übertreffen.

Auch in Bereich der Nanotechnologie wird der Atomlaser große Taten vollbringen, so lassen sich beispielsweise durch direktes Ablegen von Atomen auf Oberflächen feinste Nanostrukturen erzeugen, wie sie zum Beispiel für zukünftige Computerbausteine benötigt werden.

5. Neue Entdeckung - Bosenova

In den letzten Jahren wurde ein neuer kurioser Mechanismus des Bose-Einstein-Kondensats entdeckt. Carl Wieman, ebenfalls von der Universität in Boulder, führte mit seinem Team Experimente bei einer Temperatur von 3 nK durch. Sie untersuchten die Dynamik von Materiewellen, indem sie das Magnetfeld, das die Rb85-Atome auf kleinem Raum festhält, gezielt variierten. Dadurch gelang es ihnen, zwischen anziehender und abstoßender Wechselwirkung beliebig hin und her zu schalten.

War die Wechselwirkung leicht abstoßend, so quoll das Bose-Einstein-Kondensat, wie theoretisch vorhergesagt, auf. Stellten sie jedoch das System an Anziehung, so tat sich etwas Seltsames. Wie erwartet schrumpfte das Kondensat zunächst, jedoch um sich dann zu einem Klumpen zusammenzuziehen und zu explodieren. Es hinterließ ein kaltes kleines Überbleibsel inmitten einer expandierenden Wolke. Die Wissenschaftler stellten auch fest, dass sich von den ursprünglichen Atomen innerhalb des Kondensats die Hälfte aufgelöst hatte.

Da das Phänomen sehr an eine Supernova - im Kleinen gesehen - erinnert, gab man diesen Effekt den Namen Bosenova. Das Interessante an dieser Entdeckung ist, dass die physikalischen Ursachen, die zu dieser Explosion führen, gänzlich unbekannt sind, und die theoretischen Berechnungen ein ganz anderes Verhalten voraussagten. Somit stellt dieser Mechanismus etwas völlig Neuartiges dar und es bedarf noch weiterer Forschung, bis wir den Prozess der Bosenova verstehen.

Literatur

- Spektrum der Wissenschaft - Wissenschaftsnachrichten vom 11.10.1999: *Bose-Einstein-Kondensation*; 14.03.2001: *Spurlos verschwunden - Bosenova*; 16.03.1999: *Laserstrahl aus Materie wird Realität*; 26.01.2000: *Wenn sich Materie als Welle zeigt*; 16.09.1999: *Bose-Einstein-Kondensation für Fortgeschrittene*; 18.03.1998: *Eine neue Falle für Atome*
- Diplomarbeit von Claus Führer, Universität Hannover: *Experimentelle Bose-Einstein-Kondensation*; http://garnix.heh.uni-hannover.de/~fuehner/diplomarbeit
- Spektrum der Wissenschaft 07/2000: *Wenn Materie Quantenwellen schlägt*
- Spektrum der Wissenschaft 02/2001: *Das kälteste Gas im Universum*
- Jahrbuch der Universität Augsburg 1996: *Altes und Neues von der BEC*
- Optik Zentrum der Universität Konstanz, *Jahresbericht 1997*, http://www.uni-konstanz-de/ozk/ozk97
- F. Reif, *Statistische Physik und Theorie der Wärme*
- G. Adam, O. Hittmair, *Wärmetheorie*, Vieweg Verlag
- Haken, Wolf, *Atom- und Quantenphysik*, Springer Verlag
- Max Planck Institut für Laserspektroskopie in Garching, http://www.mpq.mpg.de/~haensch/
- Abraham Pais, *Raffiniert ist der Herrgott*, Spektrum Verlag

Mit Docutain erstellt