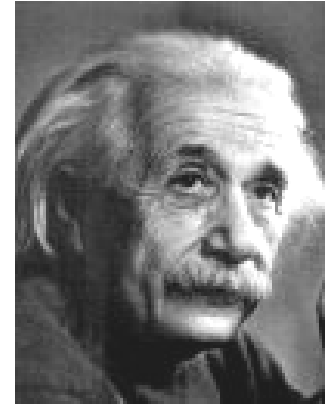


ボースアインシュタイン凝縮とは何か

大阪市立大学 坪田 誠

0. プロローグ

1924年6月、アインシュタインは、無名の若いインド人物理学学者ボースからの手紙を受け取りました[1]。その手紙にはボースの論文が同封されていて、ボースは、この論文を『フィロソフィカル・マガジン』誌に投稿したが掲載を拒否された、この論文についてどう考えるかをアインシュタインにたずねてきたのでした。ボースの論文は、黒体放射のエネルギー分布を記述するプランクの公式の全く新しい導出法を考案したものでした。当時、既に特殊および一般相対性理論を完成させ、光電効果の理論（光量子仮説）で1921年にノーベル賞を受賞して、世界的物理学者として揺るぎない地位を確立していたアインシュタインは、このボースの論文に大いに興味を引かれたのです。そしてそれは、量子統計力学という画期的な分野を切り開くとともに、ボースアインシュタイン凝縮という驚天動地の物理の発見に結びつく契機となったのでした。



1. はじめに

ボースアインシュタイン凝縮（Bose-Einstein Condensation、以下 BEC と略します）は、1925年にアインシュタインが理論的に予言した現象で、**ボース統計に従う粒子の集団において、ある温度以下で突然、全粒子数に匹敵する大量の粒子が、最低エネルギー準位の状態に落ち込む**というものです。**量子力学の本質は、粒子性と波動性の二重性にあります。**低温になると物質波のド・ブロイ波長が伸長し、量子力学的効果が顕著になってきますが、まだそれだけでは個々の物質波はばらばらに存在しているだけです。ところが BEC が起こると、あたかも光の世界でのレーザー光のように、**個々の粒子の物質波がそろってコヒーレントになり、粒子系全体が巨大な波として振る舞う**ようになります。

本解説では、まず、粒子と波動の二重性について説明した後、量子統計力学、BEC とは何か、それにより形成される巨視的な量子力学的波動についてお話しします。1925年にアインシュタインによって提示されたアイデアは、1995年、原子のレーザー冷却に代表される最新の技術を用いて、中性原子気体の BEC 実現という形で実を結びました。BEC

によって出現するマクロな波の振る舞いを、最新のコンピュータシミュレーションをまじえて紹介します。

2. 粒子性と波動性 -物質波-

量子力学誕生前夜の 19 世紀、光は波であると信じられていました。光は干渉・回折といった波特有の現象を示します。マクスウェルが完成した電磁気学では、その基礎方程式であるマクスウェル方程式から電場・磁場の振動が電磁波として光速で伝播することが導出されます。このように光が波であるということに疑問の余地は無いように思われました。しかし、それは真実の半分しか見ていなかったのです。

量子力学は、1900 年、プランクの量子仮説に始まります。プランクは、黒体輻射のエネルギー分布の実験結果を記述するプランクの公式を提案し、その根元には、振動数 ν の電磁波のエネルギーが $h\nu$ の整数倍に限るという量子仮説があることを明らかにしました (h はプランク定数)。アインシュタインは、1905 年、光電効果に関連して光がエネルギー $h\nu$ を単位とした粒子のように振る舞うという光量子仮説を提案し、それにより初めて光電効果の実験結果が理解できることを示しました。このような光の粒子性は、1923 年、コンプトンがコンプトン効果を観測するに及んで決定的となりました。コンプトン効果とは、波長 λ の X 線 (光子) が電子により散乱されるとき、散乱後の X 線にはその波長 λ' が λ より長いものが混じること、および散乱角が大きくなると λ' がより長くなるという現象です。これは X 線を電磁波として考えたのでは説明できませんが、電磁波がエネルギー $h\nu$ 、運動量 $h\nu/c$ (c は光速) の光子からなると考えると見事に説明できます。これらはいずれも光の粒子性を支持しますが、一方で光が干渉・回折といった波動性を示すという事実は厳然とあります。そのため、**光は、波動性と粒子性の両方を合わせ持った存在である**と考えられるようになりました。

一方、波と考えられていた光が粒子性を合わせ持つなら、その逆もあり得ると考えた人がいました。1924 年、ド・ブロイは、**運動量 p をもつ粒子は、波長 $\lambda = h/p$ の波動性をもつ** (ド・ブロイの関係) という大胆な提案を行いました。光の波長は $\lambda = c/\nu$ ですから、このド・ブロイの関係は前の段落で述べた光子の運動量と矛盾しないことに注意して下さい。この波を**物質波**または**ド・ブロイ波**と言います。その後、電子、中性子、いくつかの原子や分子で波動性 (回折) が観測されるに及んで、物質波の概念は確立しました。

さて、一口に波動と粒子の二重性と言いますが、一体どういうときに波動性が現れ、

どういうときに粒子性が現れるのでしょうか？これは、**物質波の波長が粒子集団を特徴付ける長さに比べてどの程度になるか**ということを決まります。例えば、質量 1kg、速度 1m/s で運動する巨視的な粒子を考えましょう。その運動量は $p=1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ であり、 $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ですから、この粒子の物質波の波長は $\lambda=6.63 \times 10^{-34} \text{ m}$ となります。もしヤングの二重スリットの実験でこの物質波の干渉を露わに見るなら、この波長程度の幅のスリットを用意する必要がありますが、原子の大きさが $1 \text{ \AA}=10^{-10} \text{ m}$ 程度、原子核の大きさが 10^{-14} m 程度であることを考えると、それは絶望的です（即ち、事実上、この粒子が波動性を示すことはありません）。

しかし、**原子などのミクロな粒子を低温に冷却することにより、物質波の出現が現実的になる**のです。温度 T のもとで運動する、質量 m の分子からなる気体を考えましょう。高校でも学ぶように、個々の気体分子は異なる速度で運動していますが、速度の二乗の平均は、 $(1/2) m \overline{v^2} = (3/2) k T$ で温度 T に関係します（ k はボルツマン定数）。これより分子の平均運動量は $p=\sqrt{3mkT}$ となり、先ほどのド・ブロイの関係から、分子の平均ド・ブロイ波長は、

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3mkT}} \quad (1)$$

となります。この式は、低温にすると物質波の波長が伸びてくるという、非常に重要な事実を物語っています。例えば、ヘリウムなどの軽い原子の場合、 $T=1\text{K}$ 程度まで冷却すると、その原子のド・ブロイ波長は平均原子間距離と同程度あるいはそれ以上の長さに成長します。低温という環境は、このように物質波の波長を伸ばし、量子力学的効果がより顕著に現れる方向に働きますが、これではまだ個々の分子の物質波はばらばらです。これらがそろうためには統計力学が必要です。

3. 量子統計力学 — ボースアインシュタイン統計 —

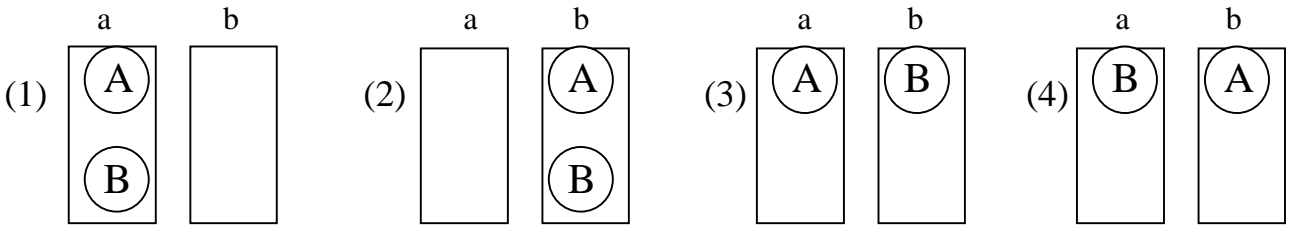
多数の構成粒子からなる系を考える場合、統計力学の助けを借りねばなりません。例えば、1モルの分子からなる気体を考えましょう。その物理的性質はどのように記述されるのでしょうか？1モル= 6.02×10^{23} 個という数はあまりに膨大です。個々の分子に対するニュートンの運動方程式（分子間相互作用を考慮すれば、これは 10^{23} 本もの連立微分方程式になります）を解くことは、原理的には可能ですが、最高性能のコンピュータを用いても、計算時間と必要メモリの両面から事実上不可能ですし、将来それが可能になる見込みもありません。仮に運動方程式が解けたとしても、 10^{23} 個もの分子の運動の軌跡を示すデータを前にして、我々はただ呆然とするだけです。しかし、統計力学を用いれば、このような系の有効な記述が可能になるのです。

気体の分子運動に対する統計力学は、19 世紀後半、マクスウェル、ボルツマンによって発展しました。**統計力学の基本的考え方は、多数の構成粒子からなる系を考える場合、個々の粒子の運動に確率論を適用し、その統計分布を考えることで、種々の物理を導き出そうというものです。**質量 m の分子からなる理想気体を例にとりましょう。気体は、温度 T の熱平衡状態にあるとします。個々の分子はそれぞれ異なった速度で運動していますが、その速度の分布はランダムではなく、温度 T によって決まるある法則に従います。ある分子が、速度 v 、運動エネルギー $\varepsilon = m v^2 / 2$ をもつ確率は、 $\exp(-\varepsilon / kT)$ に比例します。これが運動エネルギー ε をもつ粒子の分布を表し、マクスウェルの速度分布則と言います。高温になれば相対的に高い運動エネルギーをもつ粒子が増え、逆に低温では低い運動エネルギーの粒子が増えることに注意して下さい。そして1分子の平均運動エネルギーは、先に述べたように $3kT / 2$ になります。 $\exp(-\varepsilon / kT)$ の形の統計法則を**マクスウェル - ボルツマン統計**と言います。

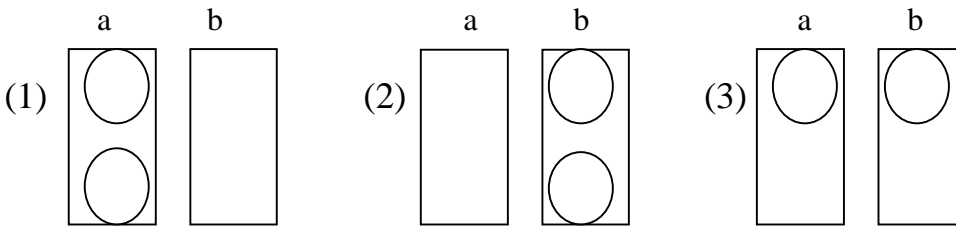
ここまでは、量子力学の誕生以前に、古典統計力学で知られていたことでした。アインシュタインを驚かした 1924 年の論文の中で、ボースは全く新しい統計分布の考え方を提示し、プランクの公式を導くことに成功したのです。ボースのアイデアを簡単に示すために、二つの粒子 A、B を二つの箱 a、b に入れる場合の数を考えましょう[2]。

二つの粒子は、それぞれ同じ確率 $1/2$ で箱 a、b に入れることができるものとしします。図 1 の**マクスウェル - ボルツマン統計**を見て下さい。ここに示されているように、(1) 「A、B 両方が a に入る」、(2) 「A、B 両方が b に入る」、(3) 「A が a に、B が b に入る」、(4) 「A が b に、B が a に入る」の 4 通りの場合の数があり、これらがいずれも同じ確率 $1/4$ で起こるとするのが普通の考え方です。そして**マクスウェル - ボルツマン統計**はこのような場合の数の数え方に基づいています。しかし、ボースが行った数え方は、これとは異なり、はなはだ奇妙なものでした。図 1 の**マクスウェル - ボルツマン統計**と**ボース - アインシュタイン統計**を比較して下さい。両方の粒子が a に入る場合(1)、b に入る場合(2)は同じです。問題は二つの粒子が別々の箱に入る場合で、**マクスウェル - ボルツマン統計**のように(3)と(4)の 2 通りがあるのではなく、ボースは**ボース - アインシュタイン統計**の(3)のような 1 通りしかないと数えました。そして、場合の数は(1)「両方の粒子が a に入る」、(2)「両方の粒子が b に入る」、(3)「一方の粒子が a に入り、他方の粒子が b に入る」の 3 通りしかなく、いずれも同じ確率 $1/3$ で起こるとしたのです。

マクスウェル - ボルツマン統計



ボース - アインシュタイン統計



フェルミ - ディラック統計

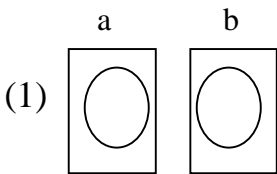


図1 粒子の統計による状態の占有の仕方の違い

ボースが初めて提唱したこのような数え方に基づく統計を**ボース - アインシュタイン統計**と言い、それによってプランクの公式が導かれます。**マクスウェル - ボルツマン統計**からはプランクの公式は得られません。だからボースの考え方に真実があるのは確かなのですが、**マクスウェル - ボルツマン統計**と**ボース - アインシュタイン統計**の違いの本質はどこにあるのでしょうか？**マクスウェル - ボルツマン統計**では2個の粒子が別と考えていて(3)と(4)を区別しているのに対し、**ボース - アインシュタイン統計**では2個の粒子を入れ替えることは別の状態を生み出さず、2粒子を別の箱に振り分ける方法が1通りしかない、すなわち**2個の粒子が同種粒子で区別することができない**と考えています。

温度が十分高いときは、粒子の統計則は**マクスウェル - ボルツマン統計**に従います。

このときは個々の粒子を区別して認識することができます。しかし、低温になり、前節で述べたようにド・ブロイ波長が原子間距離程度まで長くなってくると、事情は変わります。この場合、個々の原子の物質波が重なるようになり、それらを別々の原子とみなすことができなくなるのです。量子力学的に原子が**同種粒子**となって、個々の原子を入れ換えても状態が同じであるということを「状態が原子の入れ換えに対して対称である」と言います。この対称化には二つの方法があり、それに応じて全ての粒子は**ボース - アインシュタイン統計に従うボース粒子**か**フェルミ - ディラック統計に従うフェルミ粒子**のどちらかに分類されます。具体的には、光子、中間子がボース粒子で、電子、陽子、中性子がフェルミ粒子です。また、フェルミ粒子偶数個から成る粒子はボース粒子、フェルミ粒子奇数個から成る粒子はフェルミ粒子です。例えば、後から出てくる ${}^4\text{He}$ 原子は、陽子 2 個、中性子 2 個、電子 2 個の 6 個のフェルミ粒子から成るため、ボース粒子です。

マクスウェル - ボルツマン統計に従う粒子は、図 1 の上段のように場合の数を数えることで、先に述べた $\exp(-\varepsilon/kT)$ の分布則に従うことが示せます。ボース粒子の場合は、図 1 の中段の数え方により、ボース分布関数

$$f_{\text{BE}}(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\{(\varepsilon - \mu)/kT\} - 1} \quad (2)$$

が得られます。ここで μ は化学ポテンシャルと呼ばれる量で、温度と全粒子数によって決まります。図 1 で、2 個の粒子が一つの状態（箱）を占める確率が、**マクスウェル - ボルツマン統計**では $1/4$ であるのに対し、**ボース - アインシュタイン統計**では $1/3$ になります。このように、**ボース - アインシュタイン統計**の方が、より一つの状態に集まりやすくなります。

ここでは詳しく述べませんが、フェルミ粒子の場合は、図 1 に示すように、一つの状態（箱）に入る粒子の数が 0 または 1 個に制限されています（2 個以上は入れません）。そのことから、フェルミ分布関数

$$f_{\text{FD}}(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\{(\varepsilon - \mu)/kT\} + 1} \quad (3)$$

が得られます。

ここで述べた**ボース - アインシュタイン統計**および**フェルミ - ディラック統計**を総称して**量子統計**といます。古典的な**マクスウェル - ボルツマン統計**が量子統計に移行する条件は、第 2 節で述べたように、各粒子の平均ド・ブロイ波長が平均粒子間距離と

同程度になることです。つまり、**高温ではマクスウェル - ボルツマン統計に従っていた粒子集団が、低温になると量子効果が現れ、物質波が重なって、個々の粒子の区別が意味をなさなくなり、量子統計に従うようになるのです。**

4. そして、ボースアインシュタイン凝縮(BEC)

ボースの論文の重要性を見抜いたアインシュタインは、それをドイツ語に訳して自らコメントを加えてドイツの物理学論文誌『ツァイトシュリフト・フェア・フィジク』に投稿しました[1]。こうしてボースの論文は日の目を見たのですが、その時アインシュタインは以下のようにコメントしています。「私の見解では、プランクの公式のボースによる導出法は偉大な進歩です。ここで用いられた方法は、理想気体の量子論にも使えます。それは別のところで、私が詳しく議論する予定です」

その直後の 1925 年、アインシュタインはボース粒子の性質を理論的に調べていて、低温で奇妙なことが起こることを発見しました。3次元の体積 V の箱に閉じ込められた、質量 m 、 N 個のボース粒子からなる理想気体を考えます（理想気体とは、高校物理で習うのと同様、粒子間の相互作用がない気体という意味です）。この3次元理想ボース気体の温度を下げてゆくと、当然ながら、高いエネルギーを持った粒子（速度の速い粒子）の数は減り、エネルギーの低い粒子の数が増えてきます。しかし、低エネルギーの粒子が単調に増えるのではなく、ある温度 T_B 以下になると、雪崩をうったように、全粒子数 N に匹敵する数の粒子が最低エネルギー状態に落ち込んでゆくのです。これは、前節で述べた「ボース粒子は一つの状態に集まりやすい」という性質を反映しています。

その温度 T_B は

$$T_B = \frac{h^2}{2\pi mk} \left(\frac{N}{2.612V} \right)^{2/3} \quad (4)$$

で与えられ、この温度以下での最低エネルギー状態を占める粒子数 $N_0(T)$ は

$$N_0(T) = N \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_B} \right)^{3/2} \right\} \quad (5)$$

となります。温度が T_B 以下になると N_0 が増加しはじめ、全粒子数 N に匹敵する数の粒子が最低状態に落ち込み、絶対零度では全粒子が最低状態を占めるようになります。この T_B 以下で起こる現象を**ボースアインシュタイン凝縮 (BEC)**と言い、エネルギー最低状態に落ち込んだ粒子の集団を**凝縮体**と言います。

凝縮という言葉で皆様は何を連想されるでしょうか？例えば、液滴の凝縮という現象があります。気体の温度を下げてゆくと、気体分子が凝集し液滴を作ります。すなわち、気体として空間全体に分布していた分子が、空間のあちらこちらに集まりはじめるのです。このとき、気体分子間に引力が働いていることが重要です。温度に比例した熱エネルギーをもって飛び回っている粒子を、引力がその熱的ゆらぎに打ち勝って集めるのです。一方、BEC の凝縮とは何を意味するのでしょうか？今述べた液滴の凝縮とはどう違うのでしょうか？第1に、BEC は粒子の位置を表す座標空間での凝縮ではなく、最低エネルギー状態という**一つのエネルギー準位**への凝縮であるということです。第2に、アインシュタインが最初に指摘したように[1]、BEC は“**引力なしの凝縮**”で、まさに量子統計力学（ボース統計）の産物なのです。

5. ここまでのまとめ — 巨視的波動 —

BEC が起こって多数の粒子が一つの状態へ凝縮することにより、系全体が巨視的な波動を構成するようになります。図2を参照しながら、ここまでの話をまとめてみましょう。

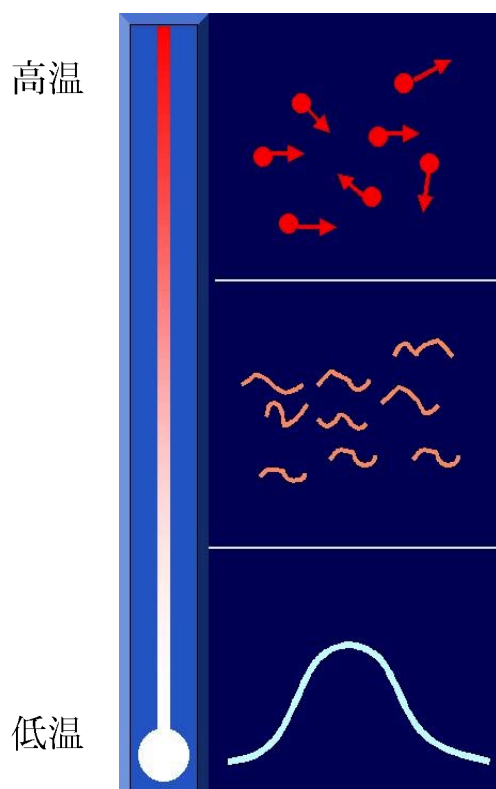


図2 巨視的な波動の形成

図2の上を示すように、温度が十分高いときは、個々の気体分子はニュートン力学に従う“粒子”として振る舞います。第2節で申し上げたように、気体を冷却すると個々の分子のド・ブロイ波長が伸び、個々の分子は波動性を帯びてきて、量子力学的効果が顕著になります（図2の中）。しかしこの段階ではまだ個々の分子のド・ブロイ波長はばらばらで、全体が強く相関を持つという状態ではありません。ところがさらに冷却して BEC が起こると、全分子数に匹敵する数の分子が同一の最低エネルギー準位をとり、ド・ブロイ波長がそろうため、個々の物質波が重なりあって、系全体がマクロな波動を作ります（図2の下）。そしてこのマクロな波動が、凝縮体を表現しています。

この話を聞いて、レーザーを連想された方もおられるかも知れません。レーザー光線は、波長、位相がコヒーレントにそろった光線です。BEC によって出現する巨視的波動とは、このレーザー光のように、個々の物質波がコヒーレントに重なりあった波なのです。

この節で述べたことの意味は重要です。皆様の中には、量子力学は原子や原子核などのミクロな世界を支配する物理法則だと思っておられる方も多いと思います。それは正しいのですが、量子効果の出現はミクロな世界に限ったものではありません。ここで述べたように、

- (1) 低温になると、個々の分子のド・ブロイ波長が伸び量子性が顕著になる（量子統計が重要になる）。
- (2) さらに低温になると BEC が起こり、マクロな系全体が巨大な量子力学的波動になる。という過程を経て、量子力学が現れます。低温環境における物質の性質を調べる物理学を低温物理学と言いますが、**低温物理学の最大の意義は、このような過程により、マクロな量子効果を取り出すことにある**といっても過言ではありません。

ではこのような BEC による巨視的波動が、何を引き起こすのでしょうか？その典型例として、液体ヘリウムの超流動と中性原子気体 BEC を紹介します。

6. 液体ヘリウムの超流動

アインシュタインは BEC を予言したものの、その後しばらく BEC は単なる想像上の現象である（非現実的という意味です）と批判されていました。アインシュタインは、BEC が実現する具体的な系の候補の一つとしてヘリウムをあげていました。そしてそのとおり、**液体ヘリウムは BEC を起こして、超流動という劇的な状態に転じることがわかりました**。なお、ヘリウム原子には安定な同位体として、ボース粒子 ${}^4\text{He}$ とフェルミ粒子 ${}^3\text{He}$ がありますが、ここでの話はボース粒子 ${}^4\text{He}$ に限定します。

そもそも、ヘリウムは特異な物質です。ヘリウムは最も液化しにくい物質で、1気圧のもとで液化する温度は4.2Kです（すなわち、4.2Kまで冷却しても液体にならず気体のままです）。さらにこの液体ヘリウムは絶対零度まで固体になりません（凍りません!）。そして、液体になったヘリウムは2.17K以下の温度で超流動状態になります。**超流動とは、液体の粘性がなくなった状態のことです。**普通の液体は大なり小なり粘性（粘り気）を持っています。その粘性が、2.17K以下の液体ヘリウムではなくなってしまうのです。それによっていくつかの不思議な現象が起こります。例えば、液体ヘリウムの表面に空の試験管を突っ込んだとします。そのとき液体ヘリウムは薄い膜となってすると試験管の表面をよじ登り、試験管の中に入り、試験管内外の液面の高さが等しくなるまでこの侵入は続きます。

このような超流動現象が実験で発見されたのは1938年ですが、同じ年にロンドンは、この超流動こそボース粒子 ${}^4\text{He}$ が引き起こすBECに他ならないと主張しました。ロンドンは式(4)に液体ヘリウムの値を代入して、 $T_b=3.1\text{K}$ を得ました。確かにこれは超流動になる温度2.17Kに近いと言えます。

BECになるとなぜ超流動になるのでしょうか？粘性は、液体中ではたらく摩擦によって生じます。液体の中で速い速度で動く部分と、遅い速度で動く部分があったとします。液体中で両者が接していると、両者がすりあってそこに摩擦が生じます。速い部分は遅い部分に引きずられて遅くなりますし、逆に遅い部分は速い部分に引っ張られて多少速くなるでしょう。このとき、両者のエネルギーの総和は、一定ではなく、摩擦によって減少します。失われたエネルギーは、普通、熱となって逃げてゆきます。こうした過程が液体中のあちらこちらで起こり、これが全体に広がってゆくと、最終的には液体全体は静止してしまいます。摩擦が生じるためには、速い部分と遅い部分が接していることが必要で、両者が同じ速度で運動していたら、すりあい起こらず、摩擦は生じません。**BECが起こるということは、全粒子を同一のエネルギー最低状態に詰め込むことを意味します。**それは、**液体中の粒子の運動状態を均一化**することになるので、上で述べた摩擦、粘性が生じないようにします。前節の表現を借りれば、系全体が巨大な波動として一丸となって振る舞います。これが、BECにより超流動が起こる理由です。

「液体ヘリウムの超流動」というのはまぎれもない観測事実ですが、「液体ヘリウムのBEC」を直接観測することは容易ではありません。超流動の発見後、さまざまな研究から、液体ヘリウムがBECを起こしていることはほぼ確実と考えられていましたが、BECが実験で直接確認されたのは1980年代になってからでした。これは中性子を用いた実験によって明らかにされました。中性子を超流動ヘリウムに入射して、そこから飛び出てくる中性子を測定し、入射および出力中性子のエネルギーの差から、ヘリウムの状態を探ろうと

いうものです。この方法によって見積もられた凝縮体の粒子数 N_0 は、確かに 2.17K 以下で急激に増大するものの、絶対零度での値は全粒子数の 10%程度にとどまります。一方、式(5)によれば、 $T=0K$ で 100%全粒子が凝縮体を構成します。このようなヘリウムは BEC を起こしていると言って良いのでしょうか？また、式(5)と食い違うのはなぜでしょうか？この答えのカギは、ヘリウムが液体であることにあります。第4節の議論が、ボース粒子からなる理想気体に対するものであったことを思い起こして下さい。一方、今考えているヘリウムは、理想気体ではなく、液体です。粒子間にはたらく相互作用を無視することができません。その相互作用のために、凝縮体の粒子数が、理想気体の場合にくらべて減っているのです。しかしそれでも、全粒子の 10%もの(!)粒子がある温度以下でエネルギー最低状態に落ち込む現象は、やはり BEC に他なりません。

このように、超流動液体ヘリウムは、最初の BEC の実例です。しかし、粒子間相互作用が、その BEC を、アインシュタインが見出したオリジナルな BEC よりも複雑にしていることは否めません。より理想的な BEC の系として登場するのが、レーザーによって冷却された中性原子気体です。

7. 中性原子気体のボースアインシュタイン凝縮

1995 年、衝撃のニュースが世界を駆け巡りました。 ^{87}Rb 、 ^{23}Na 、 ^7Li の原子気体の BEC が実現したのです（言うまでもなく、これらは全てボース粒子です）。これは、原子物理学の世界で永年に渡って開発されてきた、レーザー冷却法に代表される最新の実験技術の輝かしい勝利です。1997 年のノーベル物理学賞は「気体原子のレーザー冷却法および捕獲法の開発」に貢献したチュー、コーエン・タンノージ、フィリップスの 3 人に、2001 年のノーベル物理学賞は「原子気体ボースアインシュタイン凝縮(BEC)の実現とその初期の基本的特性解明への貢献」を行った、コーネル、キャタレー、ワイマンの 3 人に授与されました。このような短期間に同分野の研究者に立続けにノーベル賞が授与されることは珍しく、この研究が物理の世界に与えた重要性を物語っています。

レーザー冷却法に代表される、BEC 達成のための実験技術については、ここではごく簡単に触れるにとどめます[3]。皆様はドップラー効果を御存じだと思いますが、レーザー光のドップラー効果を用いて、原子気体を約 100 マイクロ K = 0.0001K の温度まで冷却します。ついで、レーザー光と磁場を効果的に組み合わせた磁気光学トラップと呼ばれるポテンシャルの“容器”の中に、この冷えた原子気体を捕獲します。次に、その原子気体を、磁場だけで作った磁気トラップに閉じ込めます。最後に、蒸発冷却という方法を用いて約 100 ナノ K = 0.0000001K の温度域まで冷却することにより、原子気体は BEC に突入します。蒸発冷却とは、カップに入れたお湯がさめるのと同じ原理で、磁場を制御することで磁気トラップ中の気体原子のうち、エネルギーの高い原子を外に逃がして、気体全

体を冷却する方法です。このようにして生成された BEC は、差し渡し約数十マイクロメートル、約数百万個の原子からなる集団で、磁気トラップに閉じ込められて宙に浮いています。原子気体は高真空のチャンバー内にあり、周囲 6 方向から入射したレーザー光線によってドップラー冷却されます。6 本のレーザー光線の焦点に、冷却された原子集団が生まれます。

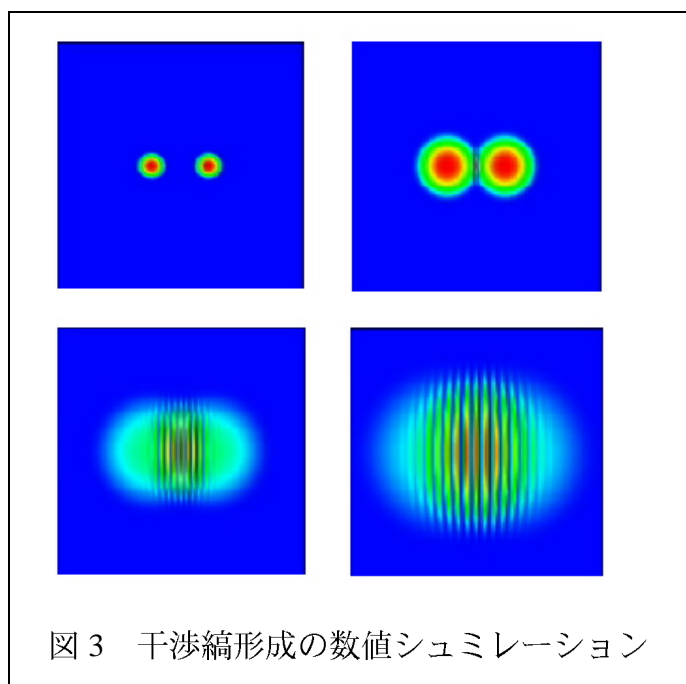
液体ヘリウムの場合は、BEC の観測そのものが困難でした。では中性原子気体の場合は、どうやって BEC が観測されたのでしょうか？これは、Time-Of-Flight 法により観測されました。磁気ポテンシャルに閉じ込められた BEC 気体を得たのち、突然その磁場を切ってポテンシャルを無くします。すると原子集団は、その時持っていた速度分布から出発し、重力の影響で落下しつつ膨張します。十分膨張したのち光学的に原子の位置を測定できますが、それは BEC が起こっている場合とそうでない場合の初期速度分布を反映して、明確な違いが現れます。温度が T_B 以上では、まだ速い速度を持つ原子が多く、原子集団は膨張するのですが、 T_B 以下では原子集団の膨張が著しく減少します。これはまさしく BEC により、最低エネルギー準位の原子の数が激増した事を反映しています。

こうした原子気体 BEC の最も驚くべき成果は、**BEC に伴って形成されるマクロな量子力学的波動を、目の当たりに見せてくれることです**。ここではその代表的例として、(1) 2 個のボース凝縮体の干渉と(2) 回転する BEC における量子渦格子形成 を取り上げます。

(1) 2 個のボース凝縮体の干渉

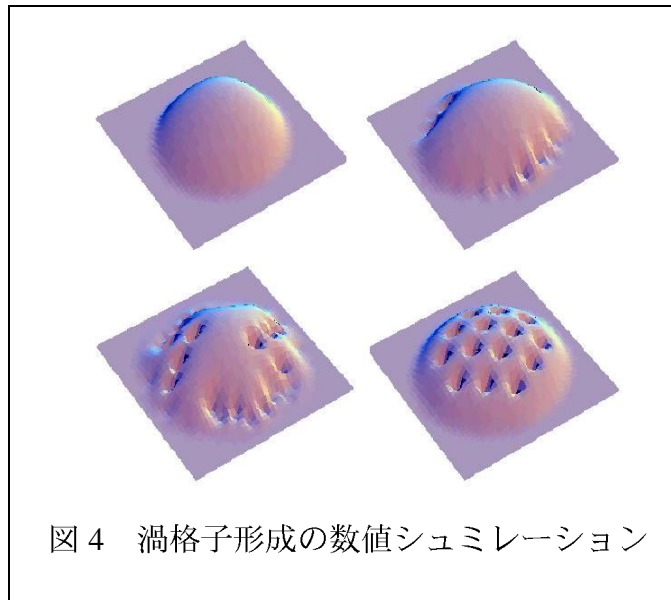
米国 MIT のキャタレー達は、2 個のボース凝縮体を重ねて干渉縞を観測することに成功しました[4]。彼等は 2 個の凝縮体を用意し、磁気トラップを切って、徐々に落下する凝縮体を重ねました。そして両者の重なった領域に、干渉縞が観測されたのです。波動の干渉と言えば、ヤングの二重スリットの実験が連想されます。それと同様の干渉が、2 個の凝縮体の間で起こりました。

図 3 に、笠松健一氏（大阪市大大学院生）が行った、2 つのボース凝縮体の干渉の数値シミュレーション結果を示します。トラップから解放された 2 つの凝縮体が重なり、干渉する様子がわかります。



(2)回転する BEC における量子渦格子形成

BEC の超流動性に深く関与したものに、**量子渦**が挙げられます。量子渦は BEC によりマクロな波動が出現したときに生まれる量子力学的な渦で、その周りには超流動の流れを伴います。量子渦は超流動ヘリウムに対し理論的に予言され観測されたのですが、原子気体 BEC でもその観測が大きなテーマとなっていました。フランスのダリバード達は、トラップ中の BEC を回転させることにより、量子渦の格子を観測しました[5]。回転速度を上げると、渦が多数凝縮体内に生成され、それらが三角格子を組むことがわかりました。私達のグループは、この実験に関連して、回転状態における BEC のマクロな波動の運動の数値計算を行い[6]、実験で観測されたような量子渦格子の形成が起こることを示しました。図4はその結果を示したもので、回転軸に垂直な xy 面内の凝縮体密度 $n(x, y)$ の時間発展を描いています。穴に見えるのが個々の量子渦で、量子渦が凝縮体の表面から侵入し、格子を形成する様子がわかります[7]



8. エピローグ

ボースとアインシュタインの研究に始まる量子統計力学は、その後爆発的に発展し、物性物理学研究の最も重要な基礎となりました。半導体、超伝導、磁性体などは言うに及ばず、ナノテクノロジーなど今日の最先端技術も量子統計力学抜きでは理解する事ができません。

1925年、ボースの論文に端を発したアインシュタインの夢～ボースアインシュタイン凝縮～は、70年後の1995年、最先端技術によって、見事に実現しました。中性原子気体 BEC の最も驚くべき点は、種々の量子力学的効果がマクロに発現し、かつそれらを目で見る事ができることにあります。終生量子力学には懐疑的であったアインシュタインですが、もし彼が今の状況を見たら、量子力学に対する認識を改めたかも知れません。

参考文献

- [1] 「神は老獺にして・・・アインシュタインの人と学問」、アブラハム・パイス著（西島和彦監訳）、産業図書。
- [2] 「量子力学 II」、朝永振一郎著、みすず書房。
- [3] <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/> に動画入の見事な解説が載っています。
- [4] Andrews *et al.*, *Science* **275**, 637 (1997).
- [5] Madison *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 806 (2000).
- [6] Tsubota, Kasamatsu, Ueda, *Phys. Rev. A* **65**, 023603 (2002).
- [7] <http://matter.sci.osaka-cu.ac.jp/bsr/vortexex-e.html>. でアニメーションを公開しています。