

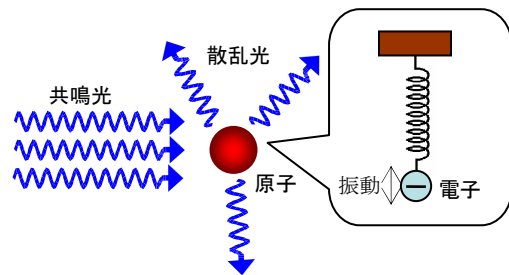
宇宙で最も冷たい物質ーレーザー冷却とボース・アインシュタイン凝縮ー

東京大学大学院総合文化研究科 鳥井寿夫

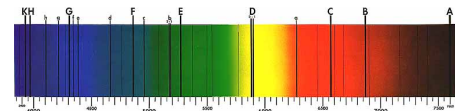
光はエネルギーを持つ。レーザー光を物質に照射すると、レーザー光のエネルギーが熱エネルギーに変換されて物質の温度は上がる、と誰もが考えるだろう。しかし、レーザー光を巧みに利用すると、原子気体を絶対零度近くまで冷却することができる。ここで紹介するレーザー冷却は、現在でも物理学の最先端の研究分野だが（注1）、その基本原理は高校で学んだ物理の知識で十分理解することができる。高校の物理が最先端の研究につながっていることが実感できるだろう。

共鳴する原子

ばねにつながれた物体は、固有振動数（共鳴周波数）を持つことを学んだ。これと同様に、原子内の電子も、原子核とばねでつながれているかのように共鳴周波数を持っている。この共鳴周波数と等しい周波数の光（共鳴光）を原子に照射すると、電子が共鳴的に振動し、光のエネルギーが原子に吸収される。これが太陽光のスペクトルに暗線が生じる原因である。振動する電子は光を放出するが、これが散乱光の起源である。



光を散乱する原子 原子の共鳴周波数に等しい光（共鳴光）を照射すると、原子内の電子が振動し、光は散乱される。

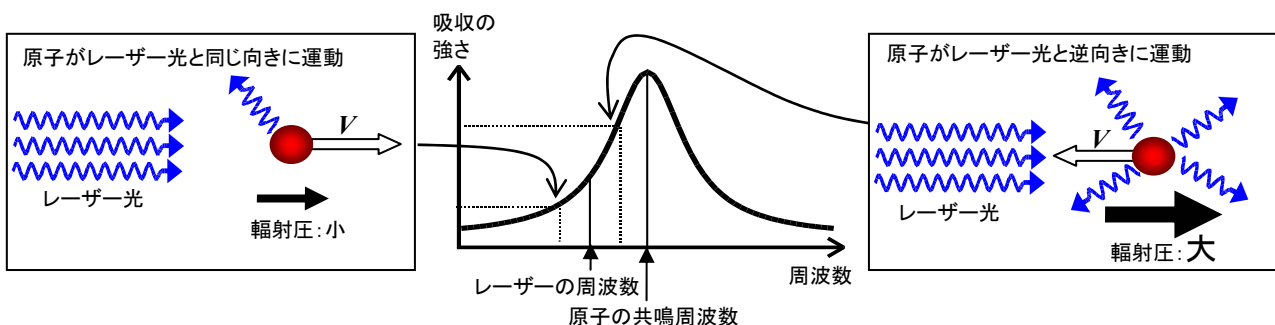


太陽光スペクトルの暗線(Fraunhofer線) 太陽の大気中に存在する様々な原子・分子が、固有の共鳴周波数の光を吸収するため、多数の暗線が生じる。

光の糖蜜ードップラー冷却ー

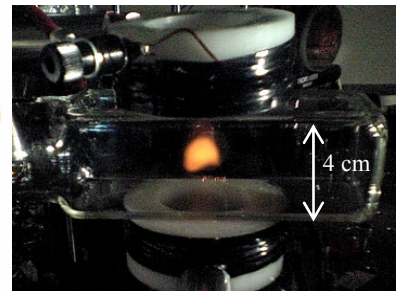
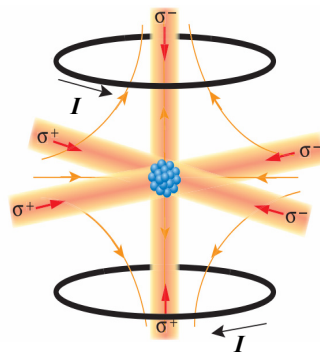
周波数 ν (波長 $\lambda = c/\nu$) の光は、エネルギー $E = h\nu$ と運動量 $p = h/\lambda$ を持つ粒子（光子）のように振舞うことを学んだ。原子は光子を吸収する際に、運動量も同時に受け取るので、 N を単位時間に吸収する光子の数とすると、光を照射された原子には $F = Np$ なる力が働く。これを**輻射圧**という（注2）。

LCR 直列共振回路と同様に、原子の共鳴もまた周波数の幅を持っている。原子の共鳴周波数より少し低い周波数のレーザー光を原子に照射したとしよう。原子がレーザー光と逆の向きに運動している場合、原子から見たレーザー光の周波数は、音のドップラー効果と同様に高くなり（注3）、原子の共鳴周波数に近づく。その結果、レーザー光はより吸収さ



ドップラー冷却の原理 レーザー光の周波数を原子の共鳴周波数より低くしておくと、光のドップラー効果により、原子は自分の運動と対向するレーザー光からの輻射圧をより強く受ける。

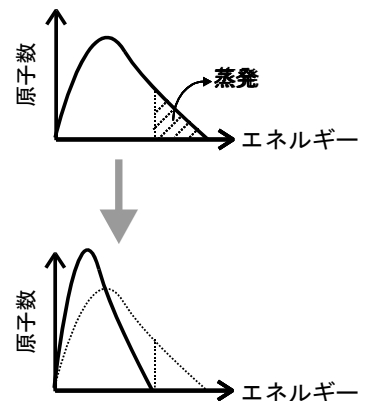
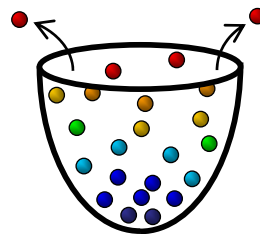
れやすくなるので、大きな輻射圧が原子に加わることになる。これに対して、原子がレーザー光と同じ向きに運動している場合、原子から見たレーザー光の周波数は共鳴周波数から離れ、輻射圧は小さくなる。したがって、周波数を原子の共鳴から少し低くしたレーザー光を右図のように6方向から原子に照射すると、原子はどの方向に運動していても、その運動を妨げる向きの輻射圧を強く受け、減速、つまり冷却されることになる。これを**ドップラー冷却**という。また、このように原子を動きにくくする光の作用を「光の糖蜜 (optical molasses)」と呼ぶ。ドップラー冷却で到達できる温度は、 $100 \mu\text{K}$ 程度である。



レーザー冷却されたガラスセル内のルビジウム原子気体。6方向からレーザー光が照射されている。ガラスセルの上下にあるのは不均一磁場を生成するためのコイルで、輻射圧に位置依存性をもたせ、冷却された原子をレーザー光の交点に集めるのを助けている。

更なる極低温を目指して—蒸発冷却—

アルコールを肌に塗ると、ひんやりするのは、エネルギーの高いアルコール分子が選択的に蒸発し、残った液体のアルコールの温度が下がるためである（「気化熱が奪われる」という言い方をする）。これと全く同じ原理で、レーザー冷却された原子集団を冷却するのが蒸発冷却である。

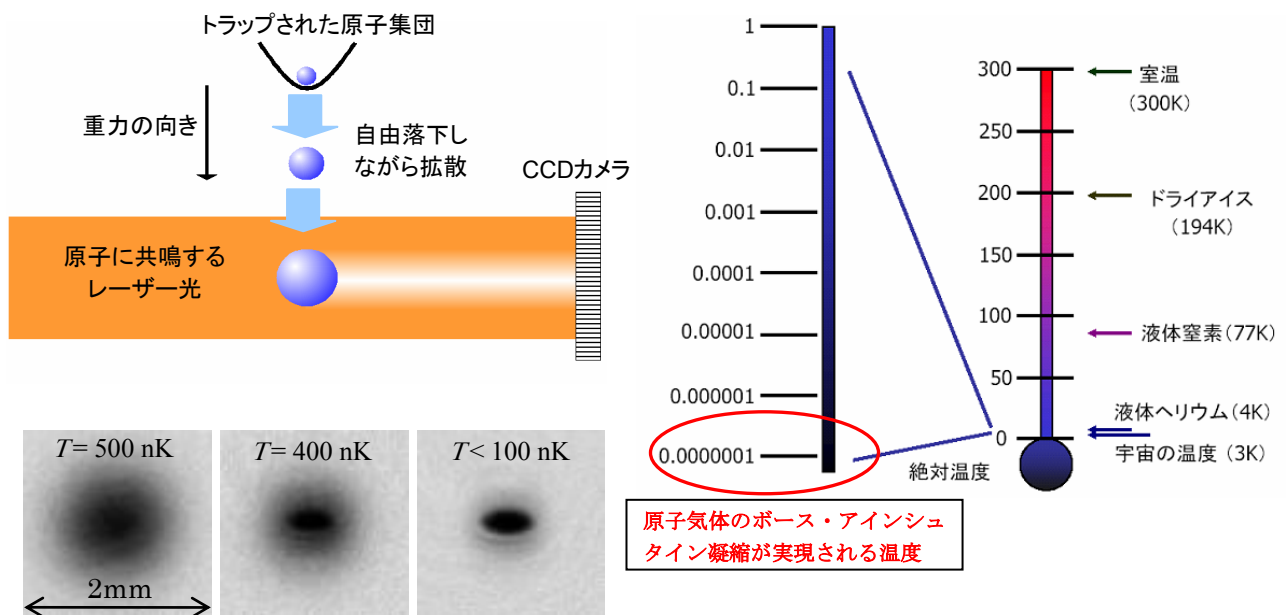


蒸発冷却の原理 エネルギーの高い原子を選択的に容器から蒸発させていくと、残った原子集団の温度は下がっていく。

磁場もしくはレーザー光を用いて、レーザー冷却された原子集団を真空中に閉じ込める容器（トラップ）を作ることができる。そのトラップの深さを徐々に浅くしていくと、トラップ内の原子の数は減っていくが、残った原子集団の温度は下がっていく。この手法により、原子気体を $1 \mu\text{K}$ 以下にまで冷却することができる。

巨大な原子波の出現—原子気体のボース・アインシュタイン凝縮—

冷却された原子集団の温度はどのように測ればよいのだろうか。原子集団は、その温度に応じた速度分布を持っている。トラップから原子集団を解放すると、その速度分布に従って原子集団は落下しながら拡散する。そして適当な時刻に、原子に共鳴するレーザー光を拡散した原子集団に照射し、その影（吸収画像）を CCD カメラで撮影すると、その画像から



(上) 原子集団の温度測定の実験原理 (下) トラップから開放後 50 ms のルビジウム原子集団の吸収画像。左図は温度 500 nK の原子集団 (平均速度約 7 mm/s)。すべての方向に均等に拡がっている。右図はボース・アインシュタイン凝縮を起こした 100 nK 以下の原子集団。楕円形の黒い点は、巨大な原子波の形を表している。

室温からボース・アインシュタイン凝縮まで 蒸発冷却によってボース・アインシュタイン凝縮が実現される温度 (~100 nK = 10^{-7} K) は、室温 (~300K) の約 10 億分の 1 である。

速度分布ならびに温度が測定できる。

蒸発冷却によって、原子集団の温度を下げていくと、速度がほとんどゼロの原子の集まりが突然現れる。これは 1925 年にアインシュタインが予言した**ボース・アインシュタイン凝縮**と呼ばれる現象で、原子気体では 1995 年に初めて観測された (注 4)。ド・ブロイの関係式 $\lambda = h/mv$ (m は原子の質量、 v は原子の速さ) からわかるように、原子の速さがゼロに近づくと、ド・ブロイ波の波長が長くなり、原子の波動性が顕著になってくる。ボース・アインシュタイン凝縮した原子の集まり (ボース凝縮体) は、一つの巨大な原子の波であり、「原子レーザー」と形容されることもある。ボース凝縮体は、原子干渉計による超高感度な重力測定、量子多体系のシミュレーション、量子コンピューターなどへの応用が期待されている。

(注 1) 1997 年のノーベル物理学賞は、レーザー冷却の研究に対して与えられた。また 2001 年のノーベル物理学賞は、レーザー冷却技術を基礎にして実現されたボース・アインシュタイン凝縮とその初期研究に対して与えられた。

(注 2) 散乱光として光子を放出する際にも、原子はその反跳として光子 1 個分の運動量を受け取る。しかし、散乱光はあらゆる方向に放出されるため、平均すると輻射圧への効果は 0 となる。

(注 3) c を光速、 ν_0 をレーザー光の (止まっている原子から見た) 周波数とすると、特殊相対性理論より、速度 V で運動する原子が観測するレーザー光の周波数は、 $\nu = \nu_0 \sqrt{(c-V)/(c+V)}$ と表される (ただし、原子がレーザー光と平行に運動している場合)。この式は、音のドップラー効果を表す式とは異なるが、 $V \ll c$ であるならば $\nu = \nu_0 (1 - V/c)$ と近似でき、これは c を音速とみなせば、観測者が運動している場合の音のドップラー効果の式と一致する。

(注 4) 液体ヘリウムの超流動や、超伝導もボース・アインシュタイン凝縮によって説明される現象である。