中性原子のレーザー冷却法の開発



- **原子数**:10⁷
- 密度: 10¹¹/cm³
- •温度:10µK



3. レーザー冷却・トラップの原理

3-4. レーザー冷却原子の応用

原子光学、ボース・アインシュタイン凝縮、量子光学実験、超精密測定 原子時計 (原子泉方式のCs原子時計)、量子計算、量子情報通信、など

1秒の定義:「セシウム133原子(¹³³Cs)の基底状態の2 つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9192631770 周期の継続時間」

1mの定義:「光が真空中で1/299792458(s)の間に進む距離」 光速c=299,792,458 m/s「憎くなく二人で寄ればいつもハッピー」

それでは、どうやって、遷移の周期を正確にきめる のでしょうか? その答えがレーザー冷却法とラムゼー共鳴法です

ラムゼー共鳴法





3. レーザー冷却・トラップの原理

3-4. レーザー冷却原子の応用 原子光学、ボース・アインシュタイン凝縮、量子光学実験、超精密測定 原子時計 (原子泉方式のCs原子時計)、量子計算、量子情報通信、など



3. レーザー冷却・トラップの原理

3-4. レーザー冷却原子の応用

原子光学、ボース・アインシュタイン凝縮、量子光学実験、超精密測定 原子時計 (原子泉方式のCs原子時計)、量子計算、量子情報通信、など

> 1秒の定義:「セシウム133原子(¹³³Cs)の基底状態の2つの超微細準位間の遷移 に対応する放射の9192631770周期の継続時間」



原子の打ち上げと 自由落下 $\Delta \omega \sim \frac{1}{T}$ T:観測時間 マイクロ波共振器 $filteratorset = 2\frac{v_0}{g}$ レーザー冷却 $v_0 = 5m/s \rightarrow T = 1s, L = \frac{v_0^2}{2g} = 1.3m$ **2千万年に1秒の誤差** (<10⁻¹⁴)



 $\frac{\delta v}{v} = 10^{-18}$ — 1cmの高さの差に対する重力による時間の進み方 V 大陸移動のドップラー効果 物理定数の恒常性の検証







 $\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta f}{f} = 33 \times 10^{-18} \ @ \Delta z = 33cm$

原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の実現

レーザー冷却の技術を駆使して、 1995年に実現したルビジウム金属 の原子のボース・アインシュタイン 凝縮は100 nK という非常に低い 温度で実現しました!

気体を冷却していくと、液体へ、 そして、固体へと変化するはずで すが、、、

この凝縮体の原子の密度は低く、あくまで、気体のままです

気体の過冷却した、寿命の長い特別な状態が原子気体のボース凝縮であると言えます。



原子はランダム に 熱運動をする $l >> \lambda_{dB}$







互いの波が重なり 合い量子力学的 相転移が起きる

 $l \approx \lambda_{dB}$

下の図はRb(ルビジウム)原子の速度分布の変化を示しています。左から右に行くにつれて、 原子の温度は低くなっています。





4. 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)

高温:原子はランダム に 熱運動をする

低温:低温になった原子では、 波動性が顕著に表れる

極低温:互いの波が重なり合い 量子力学的相転移が起きる



2001









位相空間密度: $\rho > 2.612$ $\rho_{PSD} = n\lambda_{dB}^3 = n(h/\sqrt{2\pi m_A k_B T})^3$ $T_C = 100 \text{ nK}, n = 10^{14}/\text{cm}^3$

原子気体の蒸発冷却

200

佐々木先生講義ノートより

2. <u>低温の歴史と技術</u>

2.1 低温開拓の歴史

冷却の基本原理1:蒸発冷却









注射する時に、綿にアルコールを含ませ て腕を拭くと、すっとする。

アルコールが蒸発する時に潜熱(気化熱) を腕から奪っていくので、腕が冷える。 レーザー冷却だけでは、 ボース凝縮を実現できてい ません。それは 1)反跳限界温度までしか 冷却できない。 2)高密度に共鳴に近い光 を入射すると分子を生成 して原子数ロスになる。 といった効果があるから。

レーザー冷却で、低温・高 密度にしたのちに、蒸発冷 却を行い、最終的にボース 凝縮を実現することができ ます。



"高いエネルギーを持った原子をトラップから<u>逃がす</u>" (=蒸発させる)

> "トラップに残った原子集団は<u>低い平均エネルギー</u> <u>を持つ</u>(=温度が低くなる)"



トラップ中の原子は、絶えず、原 子衝突を繰り返しています。トラッ プの高さは有限なので、衝突の結 果、たまたま高いエネルギーに なった原子は、蒸発します。



(佐々木先生講義ノートより)

2.5 ボース・アインシュタイン凝縮と超流動

温度:物質を構成する多数の粒子(原子、分子など)がばらばらに持つ 運動エネルギーの平均値

古典的な(量子力学の影響を受けていない)粒子の世界



子の数が増えていっているのがわかります。



(佐々木先生講義ノートより)

2.5 ボース・アインシュタイン凝縮と超流動

量子力学の世界:離散的な状態(運動量、運動エネルギー)のみがある

量子力学の影響を受けているボース粒子の世界



下の図はRb(ルビジウム)原子の速度分布の変化を示しています。左から右に行くにつれて、 原子の温度は低くなっています。







ボース・アインシュタイン凝縮体の基本的性質
巨視的な数の原子の波動関数:
$$\Psi(r_1, \dots, r_N) = \prod_{i=1}^N \Phi(r_i)$$

 $単 - 粒子波動関数: \Phi(r) 規格化: \int dr |\Phi(r)|^2 = 1$

*→ 凝縮体波動関数: "オーダーパラメーター(秩序変数)"
 $\Psi(r) \equiv N^{1/2} \Phi(r) \qquad \Psi(r) \equiv \sqrt{\rho} \exp(i\phi)$*

"Gross-Pitaevskii 方程式" μ :化学ポテンシャル $\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V(r) + U_0 |\Psi(r)|^2\right)\Psi(r) = \mu\Psi(r)$ $U_0 = \frac{4\pi\hbar^2 a_s}{m}$

a

$$_{s_{s}}:$$
散乱長 $\begin{cases} a_{s} > 0: repulsive(斥力) \longrightarrow gc \\ a_{s} < 0: attractive(引力) \longrightarrow 不安c: N < N_{c} \end{cases}$

2. 超流動

(佐々木先生 講義ノートより)

2.7 量子渦

渦(回転する流れ)があると循環はゼロでなくなる

$$\Gamma = \oint_{C} v \cdot d\ell = \frac{\hbar}{m} \oint_{C} \nabla \phi \cdot d\ell = \frac{\hbar}{m} \Big(\phi_{fin} - \phi_{ini} \Big)$$



古典的な渦:台風

古典的な系では任意の値を取れるが、量子力学の支配を受ける超流動体は 波動関数の一価性を守るために、飛び飛びの値しか取れない

$$\Gamma = \frac{\hbar}{m} \left(\phi_{fin} - \phi_{ini} \right) = \frac{\hbar}{m} \times 2\pi N = \frac{h}{m} \times N \quad (N = 0, \pm 1, \pm 2, ...,)$$
渦の強さ(循環)が量子化された量子渦 !
$$\Gamma = \oint_{C} v \cdot d\ell = v \times 2\pi r$$

$$v = \frac{\hbar}{N} \times \frac{1}{2}$$
流れの速さも飛び飛びの値しか

m

許されない

原子気体の量子渦





原子間相互作用が斥力のとき、BECは安定に存在できます。

その後、急に、引力相互作用に変えたら、???

Bosenova: Supernova of BEC



Atom Laser:コヒーレントな物質波





下の図はRb(ルビジウム)原子の速度分布の変化を示しています。左から右に行くにつれて、 原子の温度は低くなっています。

[M. H. Anderson, et al, Science, 269, 198(1995)]

0.2 mm



量子力学によれば、原子には、 「ボース粒子」と「フェルミ粒子」(電子のなかま) の2種類があります

超低温で

「ボース粒子」はボース・アインシュタイン凝縮を起こしますが、 「フェルミ粒子」はどんな現象が起こるでしょうか?

量子原子気体(ボソン vsフェルミオン)



運動量分布 [E. Cornell et al, (1995)] 空間分布 [R. Hulet et al, (2000)]

固体の超伝導:ペアーになった電子の凝縮 0.15 0.125 H. Kamerlingh Onnes, Hg Akad. Van Wetenschappen 0.10 14, 113 818 (1911) ି **ଅ** 0.075 0.05 0.025 10⁻⁵Ω 0.00 http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meissner_effect_p13 4.20 4.30 4.00 4.10 4.40 90048.jpg#mediaviewer/File:Meissner effect p1390048.jpg **T**[K] Bardeen-Cooper-Schriefer 理論 "格子振動を媒介 とした引力"

http://www.phys.shimaneu.ac.jp/mutou_lab/ zakki/super/pair/pair_const.html

(石田先生講義ノートより)





BEC – BCS クロスオーバー



光が作る周期構造:「光格子」







隣の格子点へ(トンネル)移動

粒子間の相互作用





Hubbard Model:

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle} C_i^+ C_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



スーパークリーンな系

格子欠陥なし、不純物問題なし

高度で精密な制御が可能

光格子の深さ制御、フェッシュバッハ共鳴による相互作用制御

多様な系が対象に

様々な次元・光格子、ボソン・フェルミオン・混合系



三角格子

http://hiroi.issp.u-tokyo.ac.jp/data/crystal_gallery/crystal_gallery-Pages/Image31.html