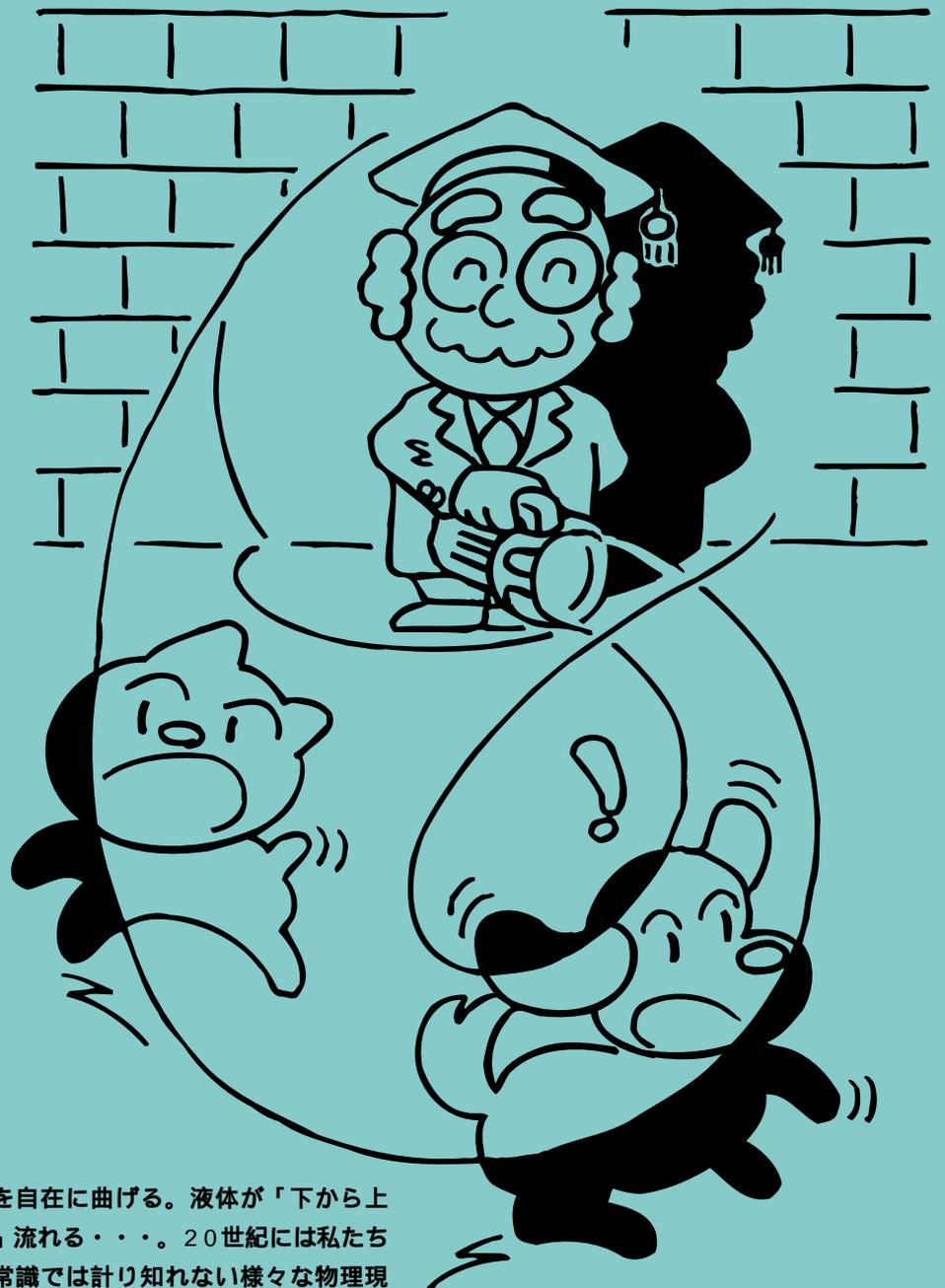


「新しい物理学」

量子力学



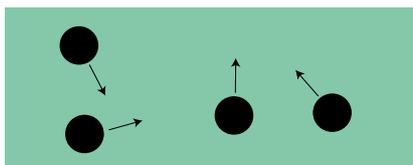
光を自在に曲げる。液体が「下から上へ」流れる……。20世紀には私たちの常識では計り知れない様々な物理現象が発明・発見されました。それは、木から落ちるリンゴを見て万有引力を発見したニュートンによる「古典物理学」とは全く異なる「新しい」物理学なのです。

「量子力学」といわれるこの新しい物理学の研究はまだ始まったばかり。無限の可能性を秘めた分野でもあります。

レーザー冷却原子のボース・アインシュタイン凝縮：巨視的量子現象の本質に迫る

レーザー冷却法を用いて、希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を作り出すことができるようになりました。これを用いて巨視的量子現象が観測でき、量子力学の本質に迫る興味深い研究が展開されています。

ボース・アインシュタイン凝縮とは？



高温：原子はランダムに熱運動をしています。



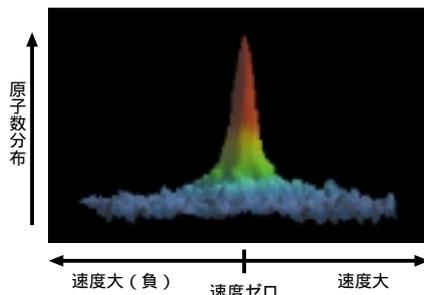
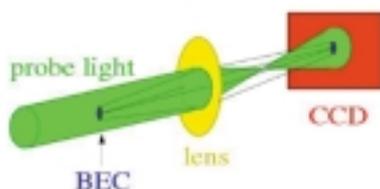
低温：レーザー冷却法により低温になった原子では、波動性が顕著に表れます。



極低温：さらに冷却されるとお互いの波が重なり合い、純粋に量子力学的な相転移が起きます。これがボース・アインシュタイン凝縮(BEC)です。集団となって巨視的な量子現象を起こします。

ボース・アインシュタイン凝縮の検出

ボース凝縮体にレーザー光を照射し、それをCCDカメラを用いて観察することで、凝縮体がどのような空間分布をしているかを測定することができます。



飛行時間法と組み合わせることで凝縮体がどのような速度分布をしているかを知ることができます。上図の中央部分の非常に低速度（低温）の集団がボース凝縮体です。

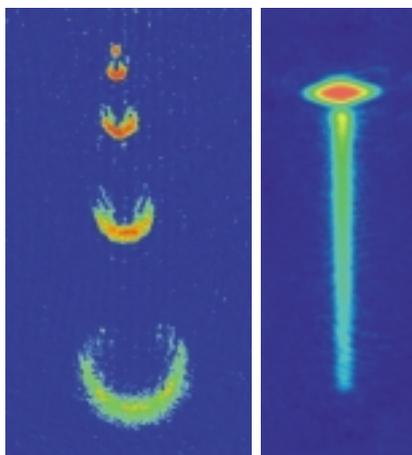
ボース・アインシュタイン凝縮を用いた様々な研究

レーザー冷却原子のボース凝縮体は、レーザー光や磁場を用いて多様に操作することが可能です。例えば、磁場によって閉じ込めていた凝縮体を、自由空間に開放することができます。これは、原子の波がレーザー光のように位相のそろった状態にあり、原子リソグラフィーや原子を用いた干渉計など様々な応用が期待されています。

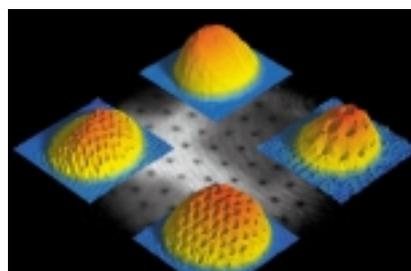
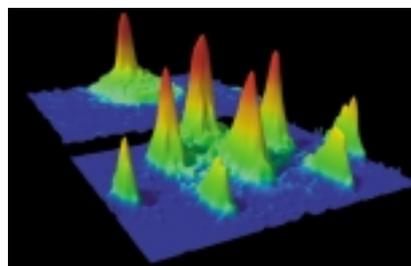
また光との相互作用においては、光の波の増幅と同様に、物質波が増幅される効果が興味深い形で現れます（超放射）。さらに、原子間相互作用を斥力から引力にスイッチし、凝縮体が崩壊する現象（BOSENOVA）や格子状に並んだ多数の量子渦生成など基礎から応用にいたる様々な分野で精力的に研究が進められています。

レーザー冷却原子のボース・アインシュタイン凝縮の成功

中性原子気体をレーザー光を用いて数マイクロケルビン程度の極低温に冷却することが可能になりました。このレーザー冷却法などを用いて、アルカリ原子や準安定状態のヘリウム原子、水素原子のBECが達成されています。日本でも数グループがBECに成功しており、活発に研究が行われています。



上：原子レーザー
右上：超放射
右下：量子渦



フォトニック結晶によって「光子」を操る

光は非常に速く、直進し、制御できないものと思われていることでしょう。

しかし今、光の速度を変え、物質中を思うままに曲げ、自在にあやつることが可能になりつつあります。そしてその先には「量子コンピュータ」という夢の光回路が見えてきました。

フォトニック結晶とは

真空中では光子は光速で伝播し、物質中では屈折率の分だけ光速は遅くなります。通常、物質境界面での屈折現象やプリズムは物質の屈折率の違いによって説明できます。ところがフォトニック結晶と呼ばれる物質中では、光速を車の速度ぐらいに遅くしたり、高効率に光子を閉じ込めたり、自由自在に光子を操れる可能性のあることがわかってきました。

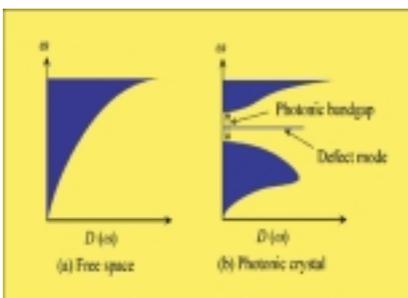
フォトニック結晶は複数の誘電体を光の波長程度の周期で交互に積層した構造物であり、積層の次元により1次元(1D)、2次元(2D)、3次元(3D)

フォトニック結晶(Photonic crystal)と呼ばれます。3Dでは、通常の結晶のように、面心立方格子やダイヤモンド格子等の構造が作成されています。



フォトニック結晶のしくみ

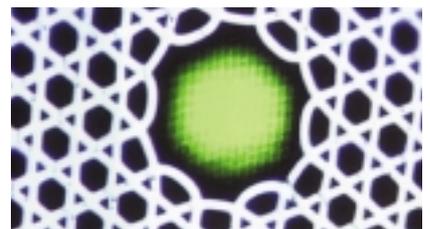
フォトニック結晶の大きな特徴の一つにフォトニックギャップ(Photonic bandgap)の存在があげられます。自由空間(Free space)では、光の固有モードの状態密度 $D(\omega)$ は光の角周波数 ω に関して下図のように ω^2 の依存性がありますが、ある構造のフォトニック結晶中の状態密度は下図のようになり、光の固有モードの存在しない周波数領域が生じることがわかります。これは、原子が規則的に配列した通常の結晶中において、電子のエネルギー準位にバンドギャップが生じる場合があるのと同様に波の回折・干渉現象の現れとして理解されます。



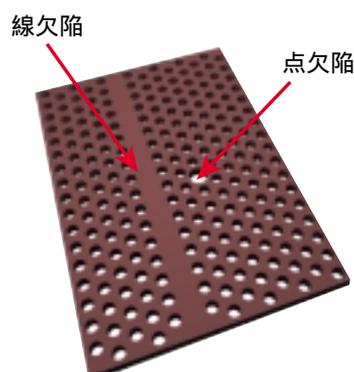
フォトニック結晶の中での不思議な現象

フォトニック結晶中では自由空間や通常の物質中では実現できない、各種の新現象が期待されます。例えば、フォトニックバンドギャップの周波数領域に発光波長を持つような原子をフォトニック結晶中に入れておけば、光の自然放出を制御できる可能性があります。また、光の異常な伝播も期待されることから、異常に遅い光伝播やスーパープリズムなどの新しい光学現象が次々と発見されています。

また、下図のように周期性の乱れ(欠陥)を導入することで、非常に光電場強度が強い領域をつくることが可能になるために、同じ場所を光が巡回しつづける光の局在現象や高効率な非線形光学現象が観測されています。そういった非線形光学現象の応用例とし



て上図にフォトニック結晶と光ファイバーを組み合わせた新しいデバイス(フォトニックファイバー)を示しています。白い部分はガラス、黒い部分は物質が存在していない穴を表しています。真ん中の大きい穴の上下方向に光が伝播しますが、フォトニック結晶の性質から弱い光でも非線形な相互作用が生じて、赤色の振動数の光子がエネルギーのずっと大きい緑や青の光子に変換されて、結果として白色光が観測されています。



フォトニック結晶の展開

フォトニック結晶には、下記のような物理学の基礎分野への応用も考えられています。

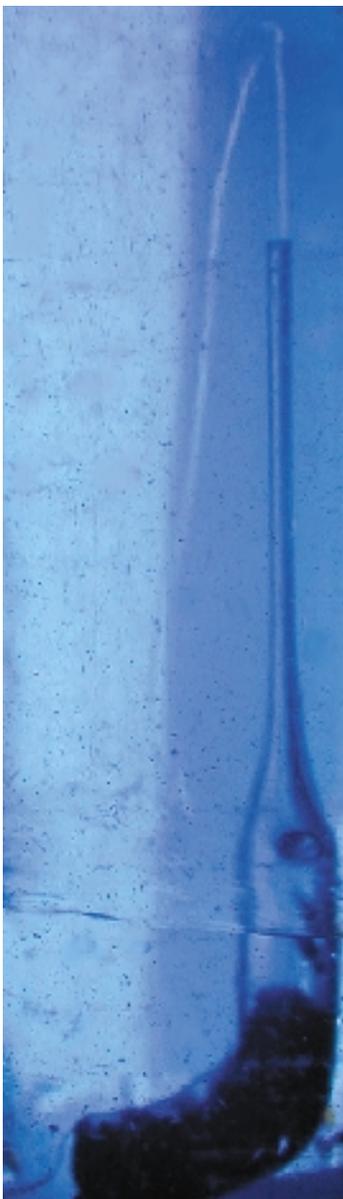
- 異常ラムシフトなどの電磁量子力学
- 高効率非線形光学現象
- 量子コンピュータ
- 超光速の有無の検証実験

超流動

通常の物質は低温で固化しますが、ヘリウムのように軽い原子は低温で量子効果が顕著に現れ、常圧では絶対零度まで固化しません。さらに絶対零度近くでは超伝導に似た「超流動状態」になります。そこは量子力学が支配する世界です。

「上」に流れる不思議な物質

ヘリウム4は2ケルビン程度で超流動状態になります。超流動状態は粘性がなく、どのような狭い隙間も通ります。これは超伝導で電気抵抗がないのと似ています。さらに壁をはい上がるなど、奇妙な性質を示します。これらは全て量子力学で説明されます。

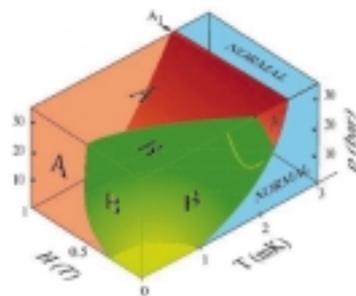


超流動ヘリウム4の噴水効果

超流動ヘリウム3の渦を見る

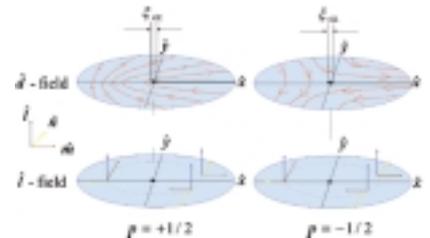
ヘリウム4の同位元素のヘリウム3も1/400ケルビンという超低温度で超流動になります。超流動ヘリウム3の運動も量子力学で支配されます。そこのできる渦は渦の強さ(循環と言います)がとびとびの値しかとれず、量子渦と呼ばれます。量子渦には2個がペアに

なったものなど、いろいろなタイプがあります。この量子渦を研究するには実験装置自体を回転させないといけません。現在、超低温で測定できる装置は東京大学物性研究所にしかありません。そこでは超流動ヘリウム3の量子渦の構造を調べています。

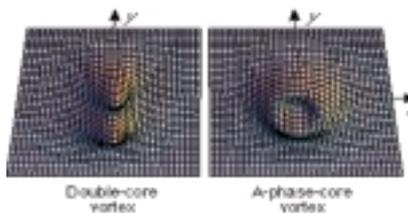


超流動ヘリウム3の相図

超低温で発現する超流動ヘリウム3には複数の相が存在します。相が違るとそこのできる渦の構造も違ってきます。

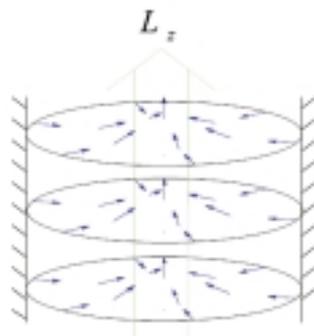


超流動ヘリウム3のA相を狭い平行平板に入れた時にできることが期待されている渦



超流動ヘリウム3にできるとされている渦の計算結果

2つの渦が結合したもの(左)や芯のない渦(右)があります。



超流動ヘリウム3A相にできると期待されている芯のない Mermin-Hoの渦



東京大学物性研究所にある回転クライオスタット

1秒間に1回転することができます。データを測定する機器も同時に回転させます。