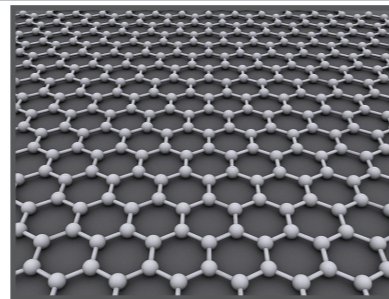


### 班紹介

私たちは普段、3次元空間に住んでいます。物質によってはその中の電子が1次元、もしくは2次元方向に「住んでいる」とみなせる場合があります。そのような低次元系に住んでいる電子たちは3次元に住んでいる電子たちとは異なった振る舞いをみせたり、あるいは全く別の粒子に見えることがあります。

最近では素粒子物理学で出てくるような理論や概念も盛んに用いられています。例えば2010年のノーベル物理学賞の対象は**グラフェン**でした。グラフェンは厳密な2次元の構造をしており、その中の電子は質量がゼロの粒子のように見ることが知られており、そのことから宇宙から降ってくる(同じく質量ゼロと考えられている)ニュートリノと呼ばれる素粒子に例えられることがあります。

このように素粒子や宇宙といった一見われわれの住む世界とは関係ないような世界が、机の上で出来る実験で再現できるなんてとても不思議でワクワクしませんか？



↑グラフェン。炭素が結合してハチの巣のような構造をなしている。これが幾重にも重なったものが鉛筆の芯などの黒鉛である。

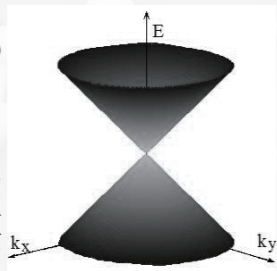
### 実験内容

#### トポロジカル絶縁体

絶縁体とは電気を通さない物質ですが、その中でトポロジカル絶縁体という少し変わった絶縁体が物理学や工学で最近注目を浴びています。トポロジカル絶縁体の表面に「住んでいる」電子は普通の電子とは違った振る舞いを示す『粒子』のように見えます。この『粒子』のことを『ディラック粒子』といいます。トポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体ですが、ディラック粒子が表面を移動できるために、表面には電流が流れるという性質をもちます。ここでトポロジカルという名前の由来について説明します。トポロジーとはもともと対象を粘土のように連続的に変形させても変わらない性質を研究する数学の一分野ですが、ここでは表面に現れる粒子の性質が、内部の状態を多少変化させても安定に存在するという事に由来してトポロジカルと言われています。

いま物理では、広大な宇宙、ミクロな素粒子、さらには、この2つの関係性を調べるのことが一つの大きなテーマです。実はディラック粒子はそれらと深い繋がりがあることが分かっています。我々の住む世界より大きなスケール、もしくは小さなスケールの物理が、たった1mm角程度のトポロジカル絶縁体の中にあるというロマンがあるのです。

僕たちの実験ではこの表面の『ディラック粒子』の存在を確かめるためにARPESと呼ばれる特殊な分光装置を用いて、実験を行いました。これは物質の表面に高いエネルギーの光を当てて、直接固体の状態を調べるものです。↑ディラックコーンの一例。



#### 高温超伝導

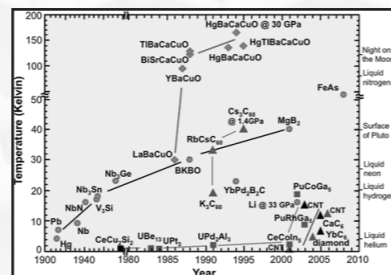
##### 超伝導と高温超伝導について

「超伝導」という言葉を聞いたことがある方は多いと思います。実は、1911年にオランダのKamerlingh Onnesが超伝導を発見してから、今年でちょうど100周年にあたります。そこで私たち低次元物性班も超伝導および高温超伝導をテーマに研究をすることになりました。

さて、超伝導はその言葉通り、電気抵抗がゼロになるという性質をもちます。しかし、超伝導体でおこる不思議な現象はこれだけではありません。超伝導体では、「マイスナー効果」、「ジョセフソン効果」など面白い現象がたくさん見られます。これらの現象については、次の節で説明をします。

面白い現象をたくさん見せてくれる超伝導ですが、一つ大きな欠点があります。それは、超伝導体は極低温でないと得られない、ということです。Onnesが最初に発見した超伝導体は、水銀をなんと-269℃まで冷やしたものでした！

そこで、もっと高い温度での超伝導を作ろう！という流れになりました。たくさんの人々の努力の結果、いまでは-109℃で超伝導を実現できるようになりました。このように、高い温度での超伝導を、高温超伝導といいます。



↑様々な物質が超伝導状態に転移する温度をプロットしたグラフ。横軸が西暦、縦軸が転移温度(単位はK。約273Kが0℃)を表している。(http://www.ccas-web.org/superconductivity/より抜粋。)



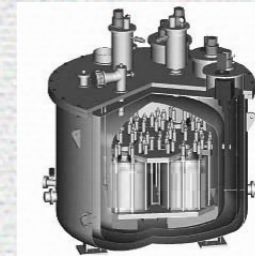
#### 「超伝導体で“電池”を作る？」

超伝導のもつゼロ抵抗の性質を利用した応用技術として、送電線を超伝導体にする事で電気抵抗によるエネルギーロスを無くすというものがよく知られていますが、これは半分間違いです。我々が普段利用している電化製品は直流という種類の電流を用いていますが、一方、発電所で作られるのは交流と呼ばれる周期的に変化する電流です。超伝導体を用いても交流電流によるエネルギーロスは0にできないので、普通の電線に比べれば少しは効率的とはいえ、本質的なメリットにはなりません。

超伝導体が活躍するのは、電力貯蔵の面であり、超伝導体の持つゼロ抵抗のために、一度超伝導体に電流が流れると超伝導状態である限り永久に電流が流れ続

### Column Space

けるという性質を利用して、電力貯蔵が可能となります。このような電力貯蔵装置をSMES(超電導電力貯蔵システム)といい、研究が進められていますが、SMESは既存の電力貯蔵装置に比べ、変換効率がよく、また大電力を瞬時に提供できるというメリットがあります。



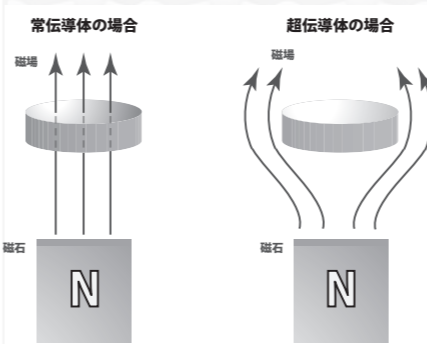
←開発中のSMESの鳥瞰図。抵抗のない超伝導体に電流を流し続けることで電力をロスなく貯蔵できる。↑超伝導コイル。

※画像は中部電力プレスリリース(http://www.chuden.co.jp/corpo/publicity/press2003/0221\_1.html)より引用。

#### ・マイスナー効果

超伝導体を示す性質の一つに、「マイスナー効果」という現象があります。これを一言で説明すると、**超伝導体の内部には磁場が侵入できない**、という性質だといえます。

下の図をご覧ください。左が常伝導体(普通の金属)で、右が超伝導体です。矢印が磁場を表しています。左の普通の金属では磁場が金属の内部を通過しています。右の超伝導体では内部を磁場が通過することができないので、超伝導体避ける



ように磁場が通っています。この効果のおかげで、超伝導体と磁場がしりぞけ合い、超伝導体が浮くという現象がみられます。

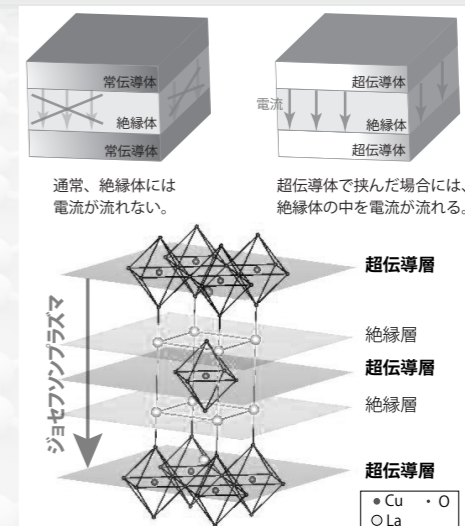
←超伝導体は外部の磁場をしりぞけるため、超伝導体は浮くという現象が起こる。

#### ・ジョセフソンプラズマ

高温超伝導体を示す別の性質に、「ジョセフソンプラズマ」という現象があります。これは少し複雑な現象なので、ステップに分けて説明しましょう。

まずは「ジョセフソン効果」について説明しましょう。これは超伝導体に特有の現象です。右上の図の上2つをみましょう。左側の図は、金属で絶縁体をサンドイッチしたものです。絶縁体は電気を通さないで、二つの金属の間には当然、電流は流れません。では、金属を二つの超伝導体に置き換えたらどうなるのでしょうか。このとき、なんと二つの超伝導体の間に電流が流れます！この現象を、「ジョセフソン効果」といいます。

それでは、「ジョセフソンプラズマ」の説明に移りましょう。先ほどの右上の図の下のものを見て下さい。これは一般的な高温超伝導体の構造です。超伝導体の面と絶縁体の面が交



↑高温超伝導体の一例。右上の図と同様に、超伝導層の間に絶縁体の層があり、ジョセフソンプラズマが発生する。

互にならんでいません。先程の「ジョセフソン効果」により、各超伝導体の間に電流が流れることができます。いま超伝導体がたくさんならんでるので、図の縦方向に電流が流れることができます。この現象を「ジョセフソンプラズマ」といいます。

ジョセフソンプラズマについて、もう少し詳しく見ていきましょう。

先程、縦方向に電流が流れると説明しましたが、実際にはもう少し面白いことがおこっています。電流が流れることは、電荷をもった粒子が一方方向に動いていることと同じです。このように、電荷をもち、電流を流す役割をする粒子のことを「キャリア」といいます。実は超伝導体の内部にはこのキャリアがたくさんあり、群れをなして動いています。繰り返しますが、単に電流が流れているだけの状態はキャリアが一方方向にちょろちょろと流れている状態ですが、超伝導体の内部ではキャリアの集団がまとまって運動しているということが特徴的なのです。この挙動がプラズマと似ているので、ジョセフソンプラズマという名前がついているのです。

今回我々はこのジョセフソンプラズマを実験で観測しました。この現象がおこっている超伝導体では、常伝導体(普通の金属)よりたくさんの光を吸収することがわかっているので、それを観測します。

### DVD収録内容

1. トポロジカル絶縁体と高温超伝導体のジョセフソンプラズマの光学測定の実験の解説動画
2. 上記の実験とそれに関する理論(BCS理論、量子ホール効果など)の詳細な解説文書