



Physics Lab. 2011

液体/粉体/宇宙/低次元物性/メタマテリアル

Physics Lab. 2011 付録冊子

代表挨拶

本日は私共の企画 Physics Lab. 2011 にお越しいただきありがとうございます。この企画は東京大学理学部物理学科の有志 100 名程度が『あるよ、意外な発見。』というテーマの下、『物理』のおもしろさを皆様にお伝えしよう！ということを目指して活動をしてきた一年間の集大成です。液体・粉体・宇宙・低次元物性・メタマテリアルという 5 つの研究テーマで展示を行います。一見、名前から連想するに小難しそうで、身近とはとても言い難そうに見えるこれらテーマも、実はとてもシンプルで身近な現象や問題を根本にして成り立っています。そういった身近に溢れる一見単純な問題でも、真剣に『物理する』ことで現れる『物理』のおもしろさ、奥深さ、そういったものを感じていただき、なにか「意外な発見」をこの企画を通して見つけていただければこの上ない幸せに存じます。

Physics Lab. 2011 代表

田屋 英俊

冊子の概要

理学部物理学科五月祭企画 Physics Lab. 2011 では、研究テーマごとに 5 つの班に分かれて研究活動をしました。本冊子は各班の研究内容（研究テーマ・原理・実験内容など）について簡単な解説をしています。

より詳細な解説をお求めの場合は、当日の展示パネルや実験、同時配布の DVD または下記 URL の公式 HP 内の動画・解説文書などをご覧ください。

URL : <http://event.phys.s.u-tokyo.ac.jp/physlab2011/>



3 液体班

「" 中間 " の困難さに挑む」

5 粉体班

「"ちり" も積もれば摩訶不思議」

7 宇宙班

「本当に大切なものは目に見えないんだよ」

9 低次元物性班

「ハイレベルな低次元の物理」

11 メタマテリアル班

「物質を超えた "物質" を探る」

13 物理学科特別インタビュー

京都大学次世代研究者育成センター特定助教 沙川貴大さん

Physics Lab. 2011 付録冊子

2011 年 5 月 20 日発行

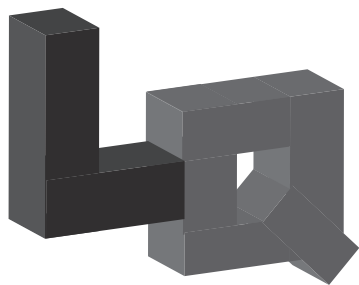
発行者=東京大学理学部物理学科五月祭実行委員会

表紙デザイン=田屋 英俊

冊子編集=高橋 学

印刷所=株式会社プレティップグリーン

あるよ、意外な発見。



Liquid

液体班

「" 中間 " の困難さに挑む」

班紹介

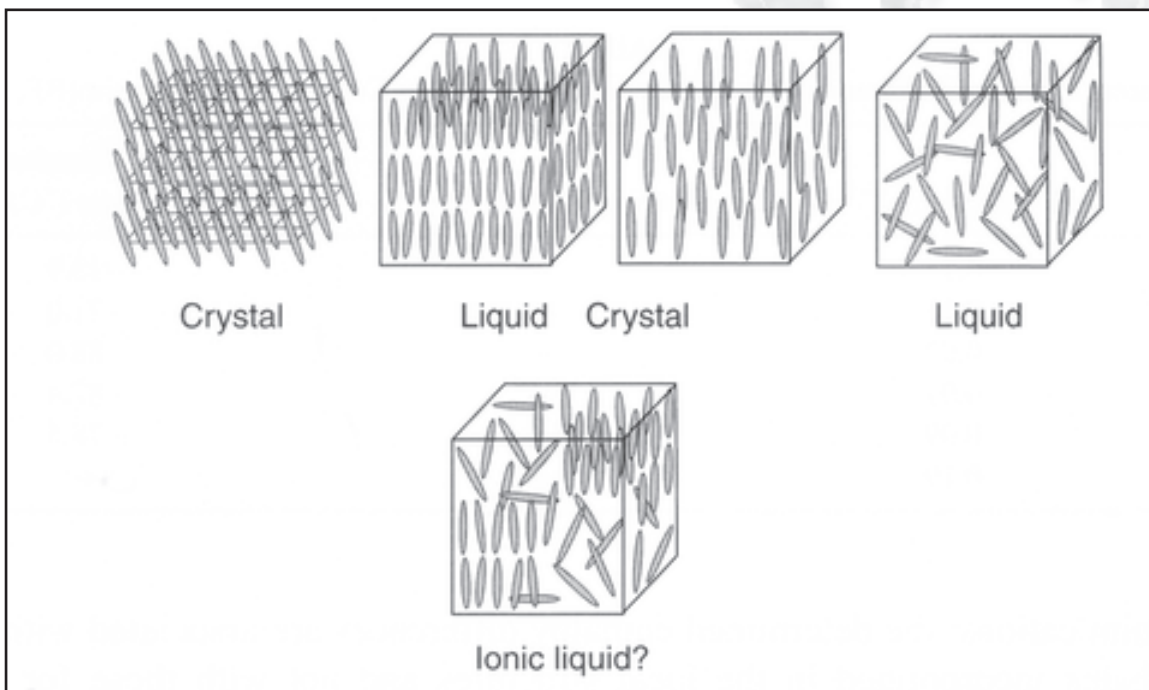
現在、物理学の大きなジャンルとして、半導体や磁石などのマクロな物質の性質を物理学の視点から研究する物性物理学が存在しますが、現状での主な研究は原子の並びが規則的な構造を持つ固体に関するものが多く、粒子の並びが不規則かつ時々刻々変化していく液体に関する研究は比較的遅れている状況です。そこで、この五月祭という機会を利用して、液体の性質に対する理解を少しでも深める事を目標として立てられたのがこの液体班です。

実験内容

➤ イオン液体の分光測定

イオン液体とはイオン性物質でありながら常温付近で液体になるという、非常に珍しい性質を持った物質であり、その奇妙な性質を持つ理由を解明するために行われた多くの研究がなされて来ました。それらの研究から、どうやら右の図のように小規模ではあるものの、分子がある程度規則的に並んでいる局所構造を持つのではないかと推測されています。

そこで、今回はイミタゾリウム塩という代表的なイオン液体の一種について、これらの局所構造の中で揃っていると考えられている回転異性体の比率をラマン分光という方法（詳しくはコラム参照）によって調べ、その温度変化を観察しました。どういふことかと言いますと、室温付近では本来不安定な方の回転異性体が他の物質に比べ比較的安定になっているという実験結果があるため、局所構造が不安定な方の回転異性体を安定化させているのではないかと考えられています。そのため、温度を上げれば局所構造らしき物が壊れて、回転異性体の安定性が本来の物に戻っていく様子が見えるかもしれないと考えた上で計画したのがこの実験であるということです。



↑左上から順番に結晶 (Crystal)、液晶 (Liquid Crystal)、液体 (Liquid)、そしてイオン液体 (Ionic liquid)。イオン液体の局所構造は、結晶や液晶のように延々と続くわけではないが、普通の液体の局所構造に比べれば大きいと考えられている。(H.Hamaguchi and R.Ozawa, Adv.Chem.Phys 131, 85(2005) から引用)

➤ ケイ効果

気象予測や航空機的设计等に用いられる普通の流体力学は、扱う対象である流体（気体や液体のように流動する物体）が

- ✔ 粘り気が流れの激しさに関わらず一定の値をとる。
(ただし、温度などによって変化するのは構わない。)
- ✔ 「固さ」を持たない。

という二つの性質を満たす事を仮定して計算しています。



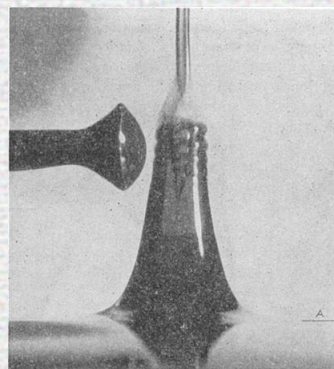
「ラマン分光法とは」

単色光を物質にあてた際に元の光とはわずかに違う色の光が散乱されてくることがあります。この現象をラマン散乱と言うのですが、ラマン散乱によって現れる光と元の光の色のずれ具合は、物質の分子構造によって変わってきます。そのため、この現象を用いて試料内に含まれる物質の化学種や、固体試料であれば結晶構造などを知ることが出来ます。この実験方法をラマン分光法と言います。

「家庭で見られる現象：ロープコイル効果」

蜂蜜などの粘り気のある液体を垂直に垂らすと、図のようにらせんを描くことが知られています。これをロー

プコイル効果と呼びます。ケイ効果は液体が固さを持っていたり、粘り気が流れの激しさによって変化したりする液体でのみ観察されていますが、この現象が発生するにはそういった複雑な条件は要らないようで、ケイ効果を起こすのに失敗した時などによく見られました。一般家庭で見ると、蜂蜜をスプーンですくって、適当なところに垂らすだけで大丈夫です。



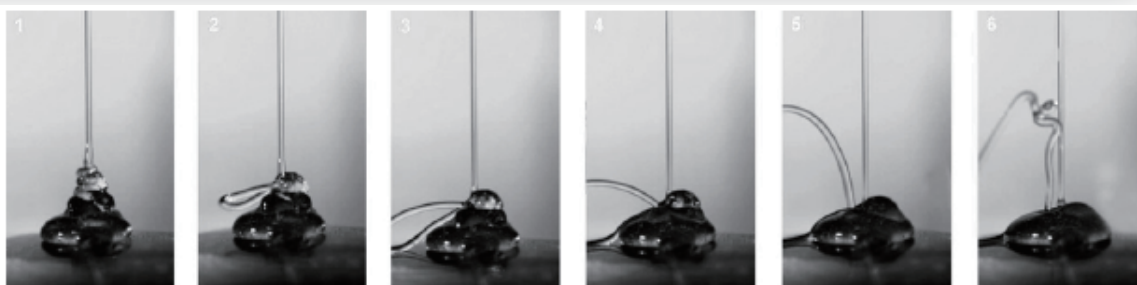
↑ロープコイル効果。G.Barnes & J.Mackenzie, American Journal of Physics(1959) から引用。

水や空気を普通の時間、空間スケールで見ると分にはこれらの仮定は何故か良く成り立っているようです。

しかし、高分子溶液やマグマなど、これらの仮定が成立しない液体は沢山存在し、通常の流体力学に従う流体では成立しないような現象も確認されています。

今回はそのような現象の一つとして、ケイ効果と呼ばれる、シャンプーを垂らした際に写真のように跳ね上がる現象を調べます。

この現象が発生する原因としては、「Shear thinning」と呼ばれる、激しい流れの下で粘り気を減らす性質を液体が持っている事が本質的に重要であるという意見と、「Shear



↑シャンプーを上から垂らす実験で観測されたケイ効果。シャンプーを垂らす速さは一定だが、シャンプーが着地した周辺からシャンプーが(左から2番目の図のように)飛び出し、だんだんと飛び出す角度が変化して、一番右の図のように落下方向とは逆の方向、つまり下から上にシャンプーが飛び出す、というケイ効果が観測されている。

(写真は J.M.Binder and A.J.Landig, Eur. J. Phys. 30 (2009) S115-S132 から引用)

thinning」だけでなく液体が固さを持つ事も大事であるという意見があります。

そのため、液体の粘り気や固さを測った上で、ケイ効果が発生するか否かとの関係性を調べる実験を行い、固さが大事なのか、それとも「Shear thinning」だけでケイ効果を語れるのかの解明を図ります。

キ ャ ッ チ コ ピ ー に つ い て

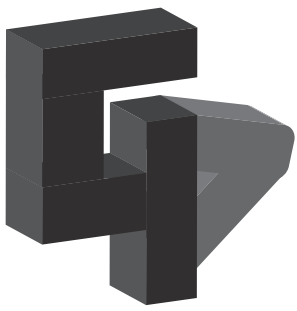
一般的に自然現象は様々な要因が引き金となって起こっていますので、それらの全てを考慮して研究をするというのは非常に困難を伴います。極端な条件や特殊な状況の下であれば、それらのうち一部を考慮して、他の要因を無視する、或いは後から小さいずれとして計算すると言った事が出来ますが、そういった状況でない"中間"の状態の考察は大変難しいという訳です。

イオン液体が持つとされる局所構造は結晶のような大規模な物でもなく、一つのイオンと隣り合うイオンだけ考え

ればいいような小規模な物でもありません。また、ケイ効果を調べる際には、液体の性質として考えられる事が多い粘り気と、固体の性質として考えられる事が多い固さの両方を考察する事になります。また、そもそも液体自体、気体のように個々の粒子がバラバラに動くという訳でもなく、固体のように規則正しく並んでいる訳でもない、ある意味"中途半端"な状態です。「"中間"の困難さに挑む」というキャッチコピーはこういった困難に挑むという意志を込めて付けました。

DVD 収録内容

1. 実験動画
2. 実験・理論の解説文書



班紹介

粉体とは、例えば米やゴマなどのように、粒をたくさん集めたものを言います。このように身近な存在である粉体ですが、実はその振る舞いは理論的によく分かっておらず、予想もしなかったような多彩な振る舞いを見せてくれます。それを探求するのが粉体物理学、そして私たち粉体班の目的です。いずれのテーマも実験とシミュレーションを並行して行い、コンピュータ上で現象を再現することも成功しています。

実験内容

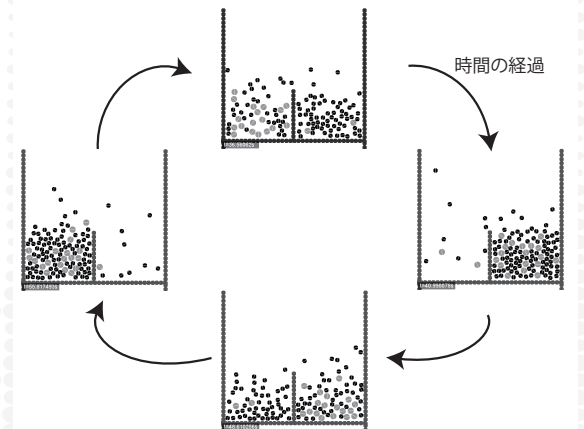
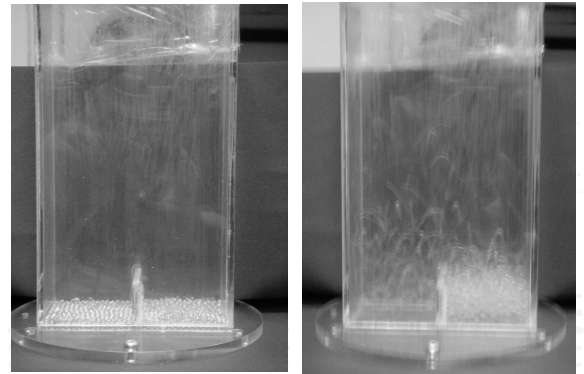
➤ 粉体のマクスウェルの悪魔

いくつかの部屋に仕切られた容器に均一にガラスビーズを数百～数千粒入れておき、容器を上下に振動させます。すると、はじめはどの部屋にも均一にあった粒子が、どこかの部屋へと自発的に集まります。これが「粉体のマクスウェルの悪魔」と呼ばれる現象です。(本来の「マクスウェルの悪魔」についてはp.13～14のインタビュー記事をご覧ください。)また、集まる部屋が周期的に変わる現象「粉体時計」や、集まる部屋がランダムに変わる現象もあります。

私たちは、振動の強さや粒子数を変えることにより、どのくらいの量が集まるか、どのくらい集まる部屋が変わるか、を調べました。まず2部屋の単純な容器で実験し、既存の理論と照らし合わせたうえで、より複雑な容器(複数の部屋をもつリング型の容器など)で興味深い現象が見られないか実験しました。

右上の写真は、ガラスビーズを入れた容器を振動させる実験の様子です。はじめは左の写真のようにビーズが2部屋に均等に入っていますが、振動させると右の写真のように、片方の部屋にビーズが集まってしまうのです。

右下の図は「粉体時計」のシミュレーション結果です。大きい粒子と小さい粒子を入れておくと、粒子の集まっている部屋が周期的に変わります。まず小さい粒子が別の部屋に移り、その後大きい粒子が移っていきます。



↑(上図)「粉体のマクスウェルの悪魔」の実験の様子。(下図)「粉体時計」のシミュレーション結果。粉体時計のシミュレーションでは大きさの違う二つの粉体が入っている。

➤ ブラジルナッツ効果

「ブラジルナッツ効果」とは、粉体の中により大きな物体(例えば直径数cmなど)が埋まっているときに粉体を振動させると、中に埋もれていた物が表面に上がってくる現象です。たとえ大きな鉄球がガラスビーズの中に埋もれていたとしても、ある強度・ある振動数の振動により鉄球が上がってきます。これは液体中における浮力とは異なり、ガラスビーズよりも密度の高い鉄球であっても上がってきます。さらに、振動の条件を変えると逆に沈み込む「リバース・ブラジルナッツ効果」も見られます。未だにそのメカニズムがよく分かっていないため、我々は振動の条件や壁との摩擦の大きさを変えるなど様々な条件下で測定を重ね、ガラスビーズ中の鉄球がどのような振る舞いをするかを実験しました。



↑ブラジルナッツ効果の実験の様子。左の写真のように小さい粉体(麦チョコ)の中に大きい物体(飴)を入れておき、振動させると右の写真のように飴が浮上する。(写真提供: 東京大学佐野研究室)



Column Space

「高速道路に潜む悪魔…?」

休日のドライブでの悩みといえば、やはり“渋滞”ですね。その渋滞、実は粉体物理学との関わりが指摘されています。本文中で解説している「粉体のマクスウェルの悪魔」は粉体が自発的に集まって身動きが取れなくなってしまう現象で、渋滞も車が多くなることで身動きが取れなくなるといふ点で似ています。粉体は2つの粒子が衝突するとエネルギーが失われ速度が遅くなりますが、これは車の場合は後続車が先行車に近づきすぎると減速するという事に相当します。このように交通流と粉体の挙動には類似点があり、「粉体のマクスウェルの悪魔」を説明する Flux Model という理論と同様の理論で高速道路の渋滞を記述しようとす

る研究もあります。高速道路の渋滞も悪魔に引き起こされているといえるのではないのでしょうか。

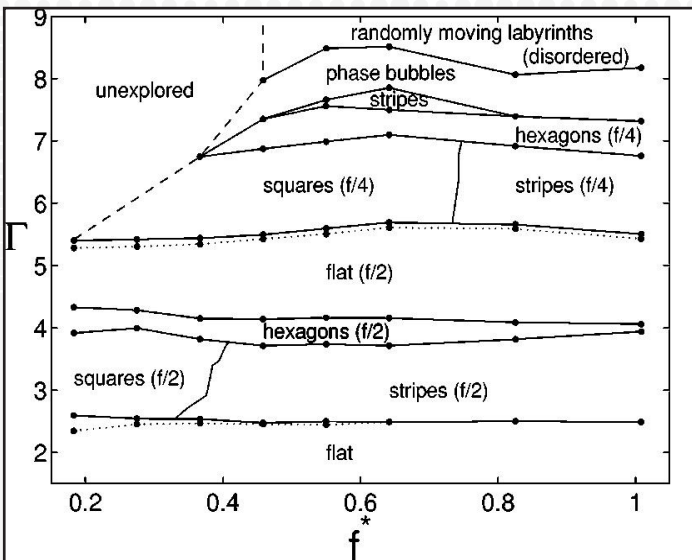
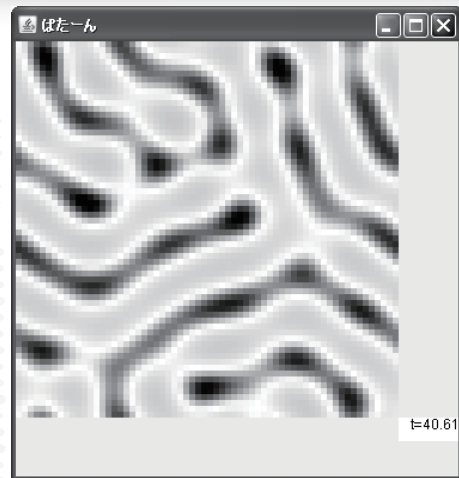


▶ パターン形成

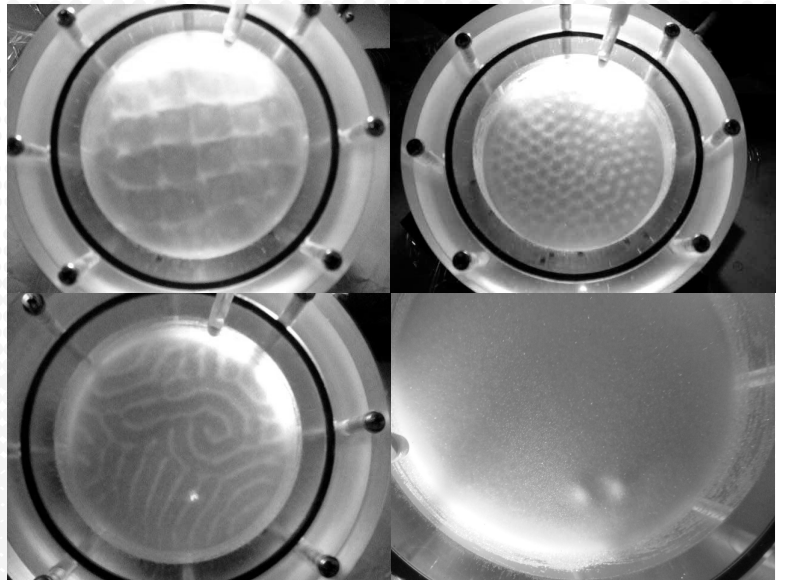
容器に細かい粉体を厚さ 5mm 程しきつめて上下振動を加え続けると、粉表面に様々なパターン（模様）が現れます。右下の写真のようにしま模様や四角形の格子模様、六角形のハチの巣模様などの観察に成功しました。似たような模様は液体でも見られ、粉体と液体に何らかの類似があることを示唆しています。

また、「オシロン」と呼ばれる、孤立した動かない波も見ることが出来ました。オシロンは粉体の分野で初めて見つかった現象で、二次元で孤立した波が見られた初めての例です。

これらを理論的に解析しようと数多くの理論、シミュレーションが考えだされました。それを踏まえ、シミュレーションも行いました。



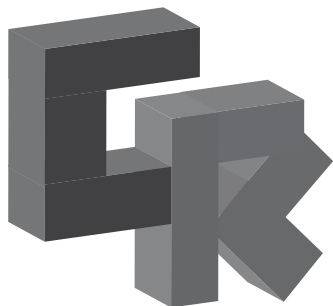
↑パターン形成の相図。線で仕切られた各領域が、それぞれ異なるパターンを表している。横軸は振動の周波数を、縦軸は振動の強さを表す値をとっている。MOON S.J., et.al., Phys. Rev. E, 65, (2002) 011301. より引用。



↑パターン形成の実験結果。それぞれ四角形 (square, 左上)、六角形 (hexagon, 右上)、しま模様 (stripe, 左下)、孤立波「オシロン」(右下)である。

DVD 収録内容

1. 実験動画
2. 実験やシミュレーションの理論的解説
3. シミュレーションプログラム



「本当に大切なものは
目に見えないんだよ」

班紹介

前々回の五月祭から引き続き、宇宙班では宇宙線として降ってくる「ミュオン」という物質について研究してきました。宇宙線には実に面白い現象が詰まっているのですが、それをなかなか身近に感じることは少ないです。なぜなら宇宙線は「目に見えないから」。ということで、昨年まではミュオンを目に見えない形でしか研究できませんでしたが、今年の宇宙班は宇宙線を直に目で見えるようにする装置「スパークチェンバー」を作製し、よりダイレクトに研究していきます。

実験内容

▶ スパークチェンバーの作製

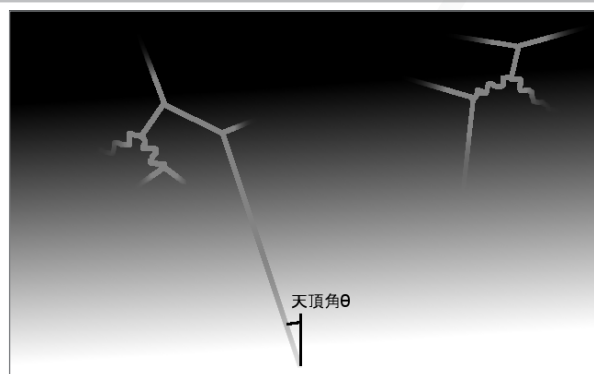
宇宙班では、宇宙線を目で見えるようにする装置「スパークチェンバー」を作製します。この装置は、何層にも積み重ねたアルミ板からできており、宇宙線が通過した瞬間にアルミ板に高電圧をかけて放電を起こす装置です。宇宙線の多くは「電気」を持っています。そのため宇宙線が空気中を通るとその周囲に空気中の「電気」が引き寄せられてきます（冬場に私たちが苦しめる静電気と同じような現象です）。そのため、宇宙線が通過した瞬間にアルミ板に高電圧をかけると、宇宙線に引き寄せられて集まってきた電気に沿って放電を起こします。こうして、宇宙線の通った跡を放電線として目に見えるようにするのがスパーク



↑実際のスパークチェンバー。
(http://ksc.kek.jp/1st_2007/gaiyou/SC/ より引用。)

▶ ミューオンの天頂角分布

スパークチェンバーを用いて、宇宙線がどれくらい斜めから来やすいか、つまり真上からどれくらいの角度をつけて来るか（この角度を**天頂角**と言います）を調べます。宇宙線のなかで地上まで届く物質はほとんどが「ミュオン」という物質だということが知られています。普通、宇宙線は真上から来る量が一番多いのですが、このミュオンは結構斜めからも来ます。この「結構」というのを具体的に数で調べていき、ミュオンという物質の性質を探ることが目的です。



←大気とぶつかりながら降り注ぐ宇宙線。天頂角は真上からの角度。

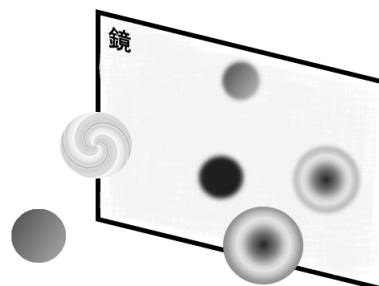
▶ パリティ対称性の破れ

何度か「ミュオン」という言葉が出てきましたが、このミュオンは「素粒子」という非常に小さい物質のひとつです。素粒子の世界は、通常考えられないようなとても不可解な現象に満ち溢れています。

そのうちの一つは「**パリティ対称性の破れ**」。パリティ対称性とは「上下前後左右すべて反転させても起こる現象は変わらない」というものです。現実の世界で起こっていることが、鏡の中に映しこんでもちゃんと起こっているという至極当たり前に思える事実です。

ところが素粒子の世界では、これが必ずしも成り立たないことが 20 世紀半ば頃からわかってきました。例えば、ミュオンを電子とニュートリノと反ニュートリノという物質に変換させる反応です（反ニュートリノはニュートリノの反物質と呼ばれるものです）。この反応は素粒子の世界で現れる**弱い相互作用**と呼ばれる力による反応の一種です。

宇宙班では厚いアルミ板で飛来したミュオンを止め、この反応をスパークチェンバーで観察し、パリティの破れを観察します。



↑現実の世界と鏡の中の世界は微妙に違う？



「ミュオンは要らない子？」

今回私たちが測定したミュオンという粒子、発見されたのは 1937 年のことでした。当時は 1935 年に湯川秀樹先生によって予言された、原子核を固くつなぎとめる核力を担う「 π 中間子」を実験で発見できないかと世界中が躍起になっていたころでした。そんな中、発見されたミュオンは重さが予言された π 中間子のそれととても近かったのですが、詳しく解析してみると π 中間子とは違う粒子とわかり、それを聞いたラビという、後にノーベル物理学賞を受賞する大先生は大変失望し、“Who ordered that?” (そんなもの誰が注文したんだ?) と言ったという逸話が残っているほどで

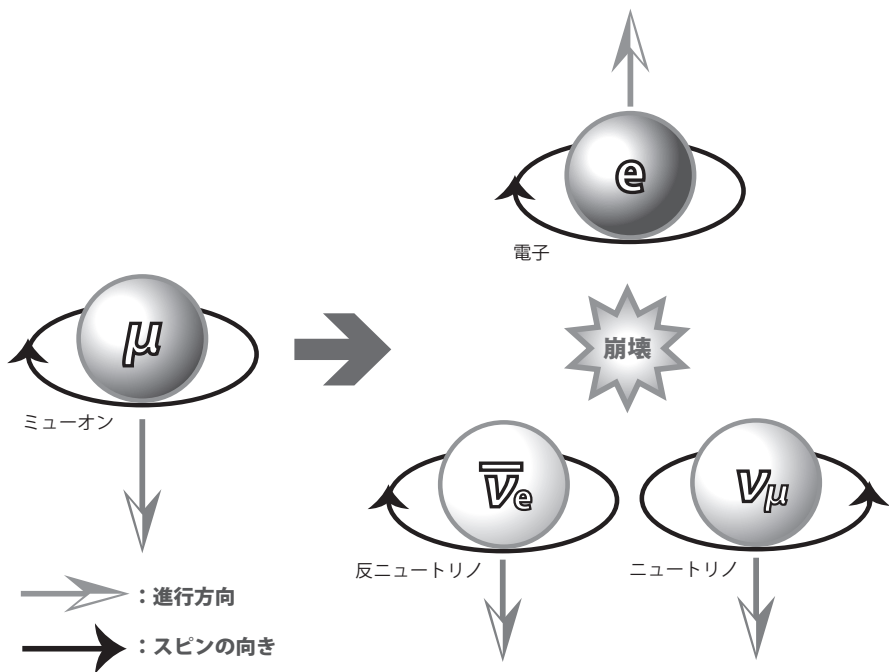
す (ちなみにその時ラビ氏は中華料理店で食事をしていたような)。

このように、その発見を誰にも望まれなかったミュオンですが、決して意味のない粒子ではありません。素粒子の理論の発展や宇宙の観測に役立ったことは言うまでもありませんが、世界中どこでも常に宇宙から降り注いでいること、そして「物を通り抜ける力が強いが、検出しようと思えば検出できる」という非常に便利な性質から、たとえば火山やピラミッドの内部構造を調べる手段としても使われています。最近ではアメリカが輸送品の中に危険物が入られていないかの検査に応用しようと研究しているそうです。

要らないと思っけていても実は役に立つものが私たちの周りにも眠っているかもしれませんね。

理論解説

ここではパリティの破れについて、少し詳しく説明します。ミュオンのような素粒子は実はそれ自身、地球のように「自転」しているものが多いということが知られています。進行方向に対して時計回りだったり反時計回りだったり。これら「自転」は鏡に映せばもちろん逆回転しているように映ります。ポイントは先程出てきた弱い相互作用が「反時計回りの物質しか生み出さない」という変な性質を持っていることです (これがパリティの破れ)。ちなみに反物質ならば時計回りだけ。つまりミュオンが変換して出てくる電子とニュートリノはそれぞれ反時計回り、反ニュートリノは時計回りであることが確定しているのです。現実でこの反応が起こっている様子を鏡に映そうとしても、鏡の世界では「自転」が逆転していて反応が起こり得ないため全く映らないのです! (逆に鏡の世界で起っている時は現実では起こりません。) これを実験で観測する際にキーとなってくるもう一つの法則が「角運動量の保存則」。これは変換前と後でトータルの回転量は変わらないという法則です。これと先程のパリティの破れを組み合わせると、たとえば飛んできたミュオンが時計回りだったとすると、上の図のように 3 つに分かれることになります。重要なのは電子が上に出ること。ミュオンが反時計回りの場合は電子は下に出

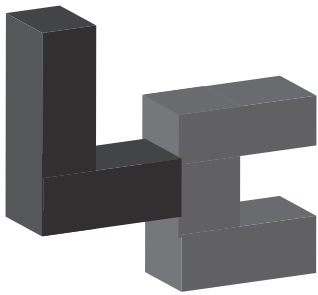


↑ミュオンから電子、ニュートリノ、反ニュートリノへの変換

ますが、飛んでくるミュオンはこれまたパリティの破れのために時計回りの方が多いことがわかっています。電子は「電気」を持っているためスパークチェンバーで観測することができ、これで実際に上に出る電子が多ければパリティの破れを観測したことになります。

DVD 収録内容

1. 実験動画 (スパークチェンバーの仕組みの解説、パリティ実験のセットアップ)
2. 実験・理論の解説文書

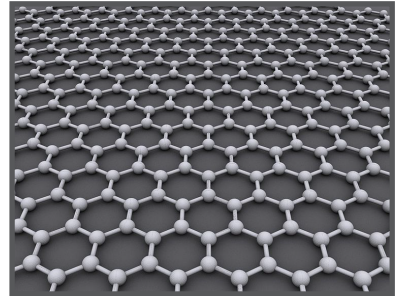


班 紹介

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え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。

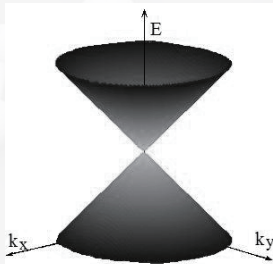
実 験 内 容

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こ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』の存在を確認するために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

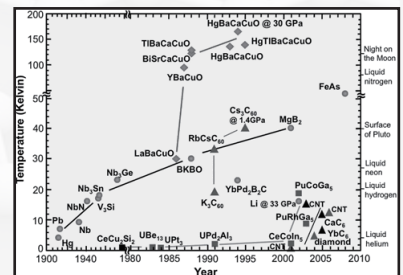
超伝導と高温超伝導について

「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が超伝導体を発見してから、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、超伝導体はその言葉通り、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体を作ろう！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。)



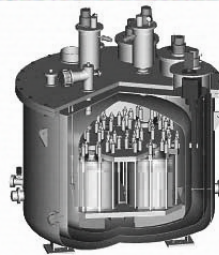
Column Space

「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

けるとい性質を利用して、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、超伝導体を避けるように磁場が通過しています。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。



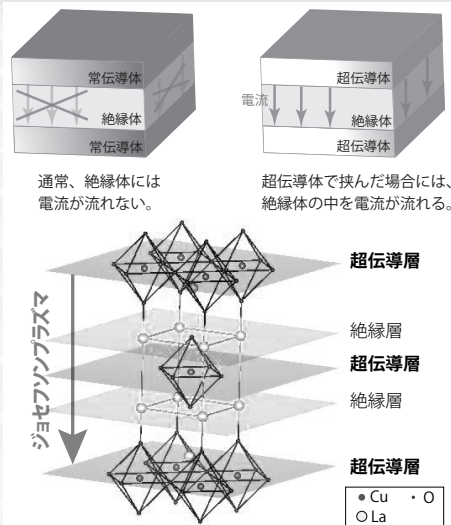
←超伝導体は外部の磁場をしりぞけるため、超伝導体が浮くという現象が起こる。

・ 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。絶縁体は電流を通さないで、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。

互にならんでいきます。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。

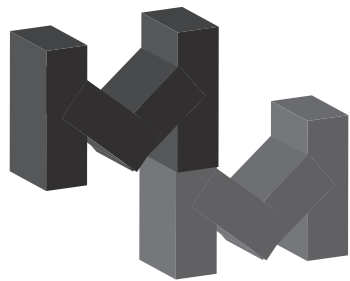
ジョセフソンプラズマについて、もう少し詳しく見ていきましょう。

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



Meta-Material

メタマテリアル班

「物質を超えた“物質”を探る」

班紹介

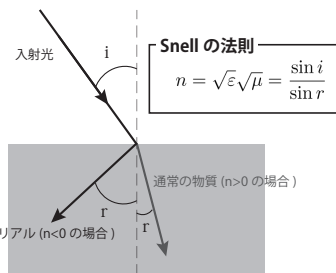
・メタマテリアルって何？

何をメタマテリアルと呼ぶかに関しては (wikipedia などでも) 諸説ありますが、私たちが考える「メタマテリアル」とは光を含む電磁波や、音波などの波に対して自然界の物質には無い応答を示す人工物質のことを指すものとします。

さて、その中で最も有名で、長いこと (といっても 2000 年以降の話ですが) 研究されているのは、電磁波に対して「負の屈折率」を持つ物質です。電磁波に対する物質の応答を示す変数である誘電率 ϵ と透磁率 μ を操作することで、これまではありえないとされてきた負の屈折率を実現することが可能になりました。これによって、工学的にもこれまで不可能と思われていた「スーパーレンズ」や「透明マント」といった面白い応用例がいくつも発表され、注目を浴びています。

ここまでは、電磁波の領域に限って話をしてきましたが、私たちの定義から言えば、この「メタマテリアル」とは電磁波の領域に限ったものではありません。音波や水面波な

どの種々の波動に対しても同様に物質の微細な配置を変化させることにより、電磁波のように「負の屈折率」を実現させたり、通常の物質ではありえない応答を示させたりすることが可能です。



・活動概要

今回私たちの班では、電磁波の代わりに、電流 (電圧) と音波という二つの“波”を考えてそれぞれでどのように物質がこの“波”に対して反応するのかを解析しました。したがって、この結果はより広く、電磁波やその他の波動現象一般 (水面波など) に対して適用できるものと考えられます。どのように電流や音波を制御し解析するか、ということに関してはそれぞれの実験内容の欄で書くことにします。

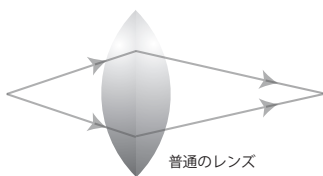
実験内容

➤ 音響メタマテリアル

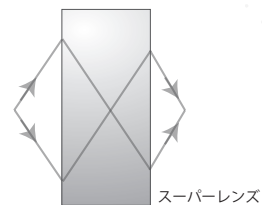
「音響メタマテリアル」とはその名の通り、音波に対して、自然界の物質にはないような応答を示す物質のことを指します。今回、私たちの班では、電磁波の領域で言う「スーパーレンズ」というメタマテリアルを作成して解析を行いました。

・スーパーレンズ

通常のレンズは右上の図のように光を集光しています。ある一定の (波に特有の) 波長と呼ばれる大きさより小さい物体はレンズを用いて拡大し、見ることができないことが知られています。これに対して、スーパーレンズ (または完全レンズ、パーフェクトレンズ) は、右下の図のような光路により集光します。スーパーレンズを用いると任意の大きさの物体 (の放つ光) を集光して見ることが出来ます。このため、このような負の屈折率を用いたレンズは「スーパー



屈折率 $n = -1$ のメタマテリアルに入射した光の光路



↑上が普通のレンズ、下がスーパーレンズ。

レンズ」と呼ばれます。

しかし、実際に電磁波でこのような「スーパーレンズ」を作成することには多くの困難を伴います。例えば、先ほどの図では、実際はレンズ内部では電磁波は減衰していきます。結果、焦点での集光度が悪くなり、レンズとしての性能も低下します (そして、あらゆる物体の放つ光を集光することはできなくなります)。

そこでこの実験では、より理想的な「スーパーレンズ」として、音波に対するメタマテリアルを考えることにします。音波の領域でも右図のような特定の構造をもった物質を考えることで、波長以下の大きさの音波を集光させることが可能になります。

私たちの班では右上の左側の図を簡略化したモデルとしてその右側の図のような 1 次元の構造をもった物体を考え、それに空間に局在した音波を入れることでその特性を解析しました。実際にこれが「スーパーレンズ」として機能しているなら、波長以下の解像度の映像 (ここでは音波の強度として得られますが) が音波の侵入してきたのと反対側から取り出せるはずで



Column Space

「メタマテリアルの発想」

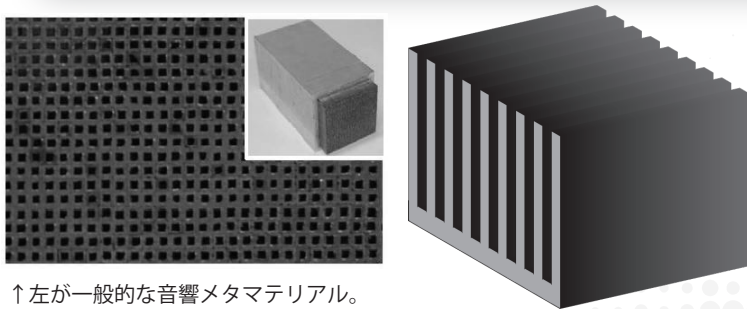
現在知られているメタマテリアルのような物質が存在しても良いのではないかと初めに提唱したのはベセラゴでした。彼は1967年に、物質の電磁波（光）に対する応答を決める定数である誘電率 ϵ と透磁率 μ がともに負の値をとる場合を考え、その末に“屈折率 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ が負の値をとり、真空中から入射した電磁波は境界面で「くの字」型に屈折するに違いない。”という結論を得ました。

しかし、実際にそのような数年間の探索にもかかわらず、そのような物質は自然界に存在しませんでした。その理由は透磁率 μ が自然界のほとんどの物質で真空の透磁率に近い値をとっていたために n が負の値をとることなどできなかったからです。

その後の長い間、このアイデアは忘れ去られていましたが、2000年にブレークスルーがおきます。ある特定の構造をもった金属を周期的に配置することで、透磁率、誘電率を負にできるという理論がPendryによって発表されたのです。

メタマテリアルの特性を利用すれば、「透明マント」や「スーパーレンズ」といった、工学的な応用も可能などが示され、大きな反響を呼びました。

そして、現在に至るまでマンガや映画の世界で出てくるような夢の領域（可視光領域）での屈折率制御を目指して世界中の科学者がメタマテリアルの研究を行っているというわけです。

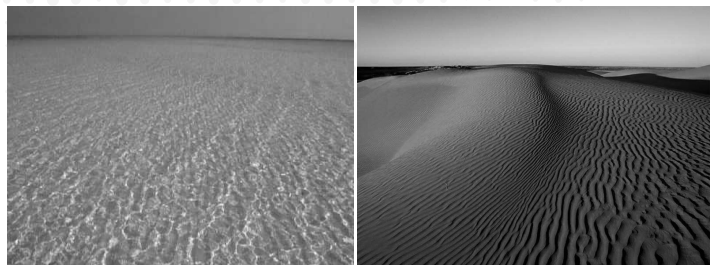


↑左が一般的な音響メタマテリアル。
→右が一次元化したより簡単なモデル。

(コラムで述べていますが)透磁率 μ などは自然界に存在するほとんどの物質で真空での値1とほぼ同じ値をとり、簡単には変えることができません。これに対して、コンデンサーのキャパシタンス C やコイルのインダクタンス L は様々な値を選ぶことができます(μ と L がおおよそ対応関係にあります)が、 μ が1前後の値しか取れなかったのに対して、 L は1 nH~100 mHの間の自由な値[n は10億分の1の意味]をとることができます。

第二の理由として、電磁波は波として実感することが難しいということがあります。下の図のように水面波や砂漠にできる波面は実際に目で見て波が伝わっていることが確認できますが、電磁波(光)や音波でこれを実感できることはほとんどありません。これは言うまでもなく、波の伝わる速度(伝搬速度) v が大きいためですが(電磁波なら $v = 3.00 \times 10^8$ m/s、空気中の音波なら $v = 343$ m/s程度です)実際に見えないのは面白くない!ということで電気回路によるシミュレーションを考えました。これを用いれば $v \div 0.2$ m/s程度まで伝搬速度を下げるのが可能です。この程度の値なら人間の目でも十分に「波が伝搬している」様子が見えることになります。

実際にどのような回路を用いれば、物質中の電磁波の伝搬を再現できるのかといった詳しいことは付録のDVDに掲載することにしますのでそちらをご覧ください。



↑左は水を伝える波。右は吹き付ける風によってできる砂漠の風紋。これらは伝搬速度が小さいので波の様子が目に見えてわかる。

➤ 電気回路シミュレーション

先ほども説明したように、「メタマテリアル」という考え方は波動ととらえられるようなものになり、広く一般に適用できます。この実験では、下の表に示したような対応関係から、光や音波の代わりに電流を波としてとらえ、その「波」が入射する物質の代わりに、電気回路を用意することで物質内部での波動の様子を考察します。

・なぜ電気回路？

さて、ここで伝搬する波として電磁波(光)ではなく、電流を選び、波が入射する物質(媒質)としてわざわざ電気回路を利用する理由を説明しておきましょう。

第一に、電磁波に対して特異な応答を示す物質を作るよりも電気回路を用いる方がより簡単に伝搬を決定する物理定数(下記の表参照)の値を簡単に変えることができるからです。

	電磁波(光)	音波	電気回路
入射(伝搬)する波動	電場・磁場	空気や水などの振動	電流・電圧
伝搬の様子を決める物理定数	誘電率 ϵ 透磁率 μ	物質の粘性係数 や空間配置	回路の抵抗・ コンデンサー・ コイルの値

各々の波動において伝搬するものと、その伝搬速度などを決める物理定数

DVD収録内容

1. 実験動画
2. 実験とそれに関する理論の解説



「マクスウェルの悪魔」

京都大学次世代研究者育成センター特定助教

沙川貴大さん

まえがき

マクスウェルの悪魔を実験的に実現し、情報をエネルギーに変換することに世界ではじめて成功した京都大学助教(当時東京大学物理学専攻博士課程3年)の沙川貴大さんにお話を伺いました。

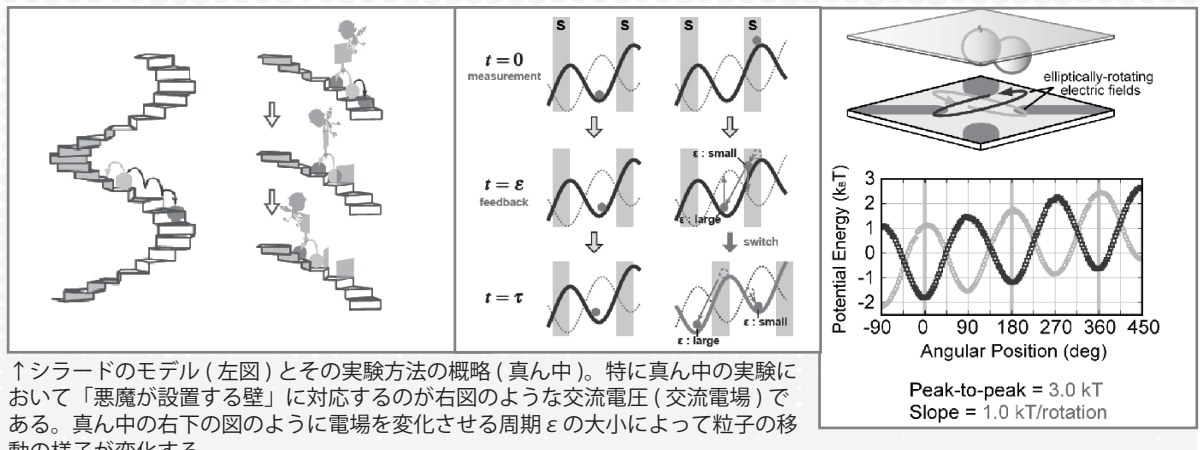
マクスウェルの悪魔とは、150年以上前に物理学者マクスウェルによって提唱された架空の存在です。開閉できる小窓がついた壁で仕切られた二つの部屋を考え、部屋の中の空気分子の状態を全て正確に知っている架空の存在(悪魔)がいるとします。悪魔が片方の部屋(部屋1)からもう片方の部屋(部屋2)へ速い分子が通るとき小窓を開け、部屋2から部屋1へ遅い分子が通るとき小窓を開けるとすると、部屋1には遅い分子が集められ、部屋2には速い分子が集められることとなります。その結果、分子の運動の緩い部屋1は温度が低く、逆に激しい部屋2は温度が高くなり、最初に二つの部屋の温度が同じであっても温度に差ができてしまうことが分かります。エネルギーを使ってもいないのに温度勾配ができるのはおかしいと論争になりましたが、後にマクスウェルの悪魔は情報を扱うのにエネルギーを使い、その情報をエネルギーとして、温度勾配を作っているということがわかりました。

1粒子の場合に情報とエネルギーを結び付ける思考実験は、80年程前にシラードによって考えられています。ここではシラードのモデルと同等な簡単なモデルについて考えます。粒子が螺旋階段上において上下にブラウン運動(揺らぎによるランダムな運動)をしているとします。このとき粒子の運動を観察し、粒子が上に登った時に粒子の直下に壁を入れるということを繰り返すと粒子を上昇させ、エネルギーを与えることができます。この思考実験はマクスウェルの悪魔の実現方法を示唆するものです。

インタビュー

学生A マクスウェルの悪魔の実験の概要を教えてください。

沙川さん 室温の水中に300nmぐらいのポリスチレンの粒子を2個浸けます。カバーガラスに1個の粒子を接着し、2個目を1個目につけると、2個目が1個目を中心にランダムに運動します。そこに4つの電極で交流電場をかけてやると実効的に、2種類の螺旋階段上のポテンシャルを作



↑シラードのモデル(左図)とその実験方法の概略(真ん中)。特に真ん中の実験において「悪魔が設置する壁」に対応するのが右図のような交流電圧(交流電場)である。真ん中の右下の図のように電場を変化させる周期 ϵ の大小によって粒子の移動の様子が変化する。

ることができます。ポイントは波型になっていることと坂になっていることです。粒子が谷の底にあるときには何もしないのですが、谷から上がって山の左に来た時にポテンシャルをスイッチします。そうすると、山の上だった所が谷の底になるので若干粒子が右へ移動することになります。これがシラードの思考実験の壁を入れることに対応していて、これを繰り返していくことで登っていくだろうと考えられます。結果、観測した瞬間から実際にポテンシャルが切り替わる時間が短いほど上へあがっていくということが確かめられました。逆に長いと自然に落ちていきます。ポテンシャルを切り替える時に粒子に与えたエネルギーを差し引いても粒子がエネルギーを得ているということがわかりました。情報を自由エネルギーに変えられたわけです。変換効率は理論的な上限の30%程でした。

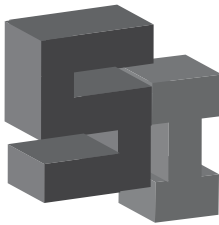
階段の例のような当たり前に思えることを、熱揺らぎしている系で実際に示したことは実は非常に難しく、物理として意味のあることなのです。また、情報という一見物理と関係のないものが、実は物理と対等に扱えることを示したという基礎的な物理としての意義もあります。もう一つ専門的に重要な点はジャルジンスキー等式という非平衡統計力学の重要な等式の一つを実験的に検証したということです。

学生B 実験に至るまでの経緯を教えてください。

沙川さん 生命情報セミナーというセミナーをきっかけに非平衡物理学の実験をやっている佐野研の人たちと仲良くなり、共同研究をしようという話になりました。佐野研で博士を取り、現中央大所属の鳥谷部さんという方が今回のような実験のエキスパートなので鳥谷部さんが実験をやることに、僕が理論をすることになりました。理論は主に僕が考えながら上田先生と議論する感じで、実験については鳥谷部さん、佐野先生、宗行先生、上田先生と僕で議論して、実際に実験するのはほとんど鳥谷部さんでした。

学生B マクスウェルの悪魔というテーマを選ばれたのはなぜでしょうか。

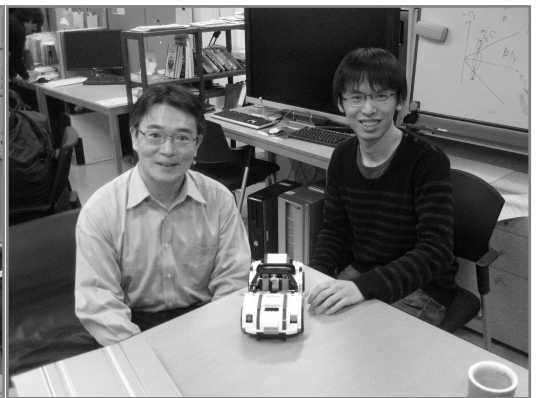
沙川さん 京都大学の学部生だったころに非平衡統計力学と量子情報に興味がありました。そこで何となく両方できそう



な東工大の上田研に進学したのですが、修士1年のときに研究テーマを決めずふらふらしていたら上田先生に「マクスウェルの悪魔について考えてみるのはどうでしょう?」と聞かれてそれをきっかけに研究をはじめました。情報を自由エネルギーに変えることに関しては80年以上前に提案されていたのですが、それについての一般的な理論はなく、それを作ることがモチベーションでした。それが最近までできなかった理由は、熱力学的な非平衡の話と量子情報の



↑インタビューの様子。左が沙川さん。



↑師である上田先生(左)と沙川さん

話を組み合わせる必要があったからです。非平衡統計力学は15年ぐらい前から大きな進歩があった分野、量子情報理論はここ30年ぐらいで発達した分野で、これらを組み合わせることで初めて一般的な理論が作れました。一般的というのは具体的に言うと、情報を最大限どこまで自由エネルギーに変えられるのかという原理的な変換効率の上限を証明したわけです。それと、熱力学第2法則を深く表現するジャルジンスキー等式を情報がある場合に一般化しました。そして今回の実験で情報を自由エネルギーに変換することにはじめて成功し、ジャルジンスキー等式を検証しました。

学生A アイディアを試すと失敗するという試行錯誤があったと思うのですがその期間はどれぐらいありましたか?

沙川さん 結構すんなりとできました。最初は実現したのとは全然違うやり方でやっていて、それがうまくいかなかったのですが、鳥谷部さんがアイディアを思いついてからは大きな障害はなく実現しました。最初は世界的に標準的に使われているレーザーピンセットという方法を使って系を制御しようとしていました。粒子にレーザーを当てるとレーザーの中心に向かって力が働くので、それを使って系を制御しようというのは、非平衡や生物物理の実験で非常によく使われています。例えば、鳥谷部さんのいらっしゃる宗行研では生体内のたんぱく質の動きを制御・測定するのに使われています。今回、何が問題だったのかというとレーザーが存在すると調和振動子の(谷型の)ポテンシャルができるわけなのですが、もっと複雑な波のようなポテンシャルを作らなければいけなかったのです。レーザーを高速でスキャンすると粒子はその動きについていけないので実効的に波型のポテンシャルが実現できるのですが、実際にやってみると高価な装置を使ってもガタガタになり綺麗な波型をなかなか作れません。熱揺らぎの10~100分の1の大きさのエネルギーが問題になる今回の実験では使えない。そこで、鳥谷部さんは電極を四隅に配置して交流電場をかけると回転ブラウン運動している粒子に実効的に色々なポテンシャルを実現できるということを考えました。これはもともと分子モーターという回転する生体分子を実験的に解析するために作ったものなのですが、それを応用するとマクスウェルの悪魔の実験もできるのではと。

学生A 幅広い実験の知識が全く別の分野で役立つわけですね。

学生B 沙川さん自身も非平衡物理と量子情報の二つの分野が生きたわけですが、それらに興味を持ったのはなぜでしょうか。そもそも物理に興味を持ったのはなぜでしょうか?

沙川さん 学部的时候に早川さんという非平衡統計力学の先生がいて彼の授業を受けていたのは大きいと思います。量子情報は友達と輪講をやっていたことと、卒業研究で高橋研という量子光学の研究室に所属し、量子測定の実験をしたのがきっかけです。物理自体には高2ぐらいから興味を持っていました。当時の物理の先生が面白くて、先生と4、5人で相対性理論のゼミをやっていました。それが大きかったと思います。ま、それに入ったのは物理に興味があったからなわけですがそこをなぜと聞かれると困りますが。小学生のとき、家に小さな望遠鏡があって土星の輪を見て面白かったのがきっかけで、雑誌のNewtonで宇宙の写真を眺めたりしていました。

学生B 今後研究をどのように発展させていくつもりなのでしょうか。

沙川さん ひとつには揺らぎというものを使ってしい歳系というものを制御する原理を探求していきたいと思っています。揺らぎというのは普通ノイズであり、ないほうが良いというイメージですが、生物の分子モーターなどは揺らぎがないと動きません。生物が揺らぎを利用しているのは非常に効率が良いからのはずで、揺らぎを活用するとナノマシンを制御できるかもしれません。マクスウェルの悪魔というのは情報を使って制御するというかなり繊細な制御の仕方をしています。情報を使わなければ上手く制御できないものを、情報を使ってやることで綺麗に制御できるかもしれないのです。

学生A ナノスケールの物の制御の幅が広がるということですね。

学生B 本日はありがとうございました。

あった？意外な発見。

$$E = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + j_{\mu} A^{\mu}$$

$$(g_{\mu\nu} - m)\psi = 0$$

$$F = ma$$

$$P(A \uparrow, B \uparrow) + P(B \uparrow, C \uparrow)$$
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \Delta \mathbf{v} - \nabla p + \mathbf{F}$$

$$E = mc^2$$

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$$Z = \sum e^{-E/kT}$$