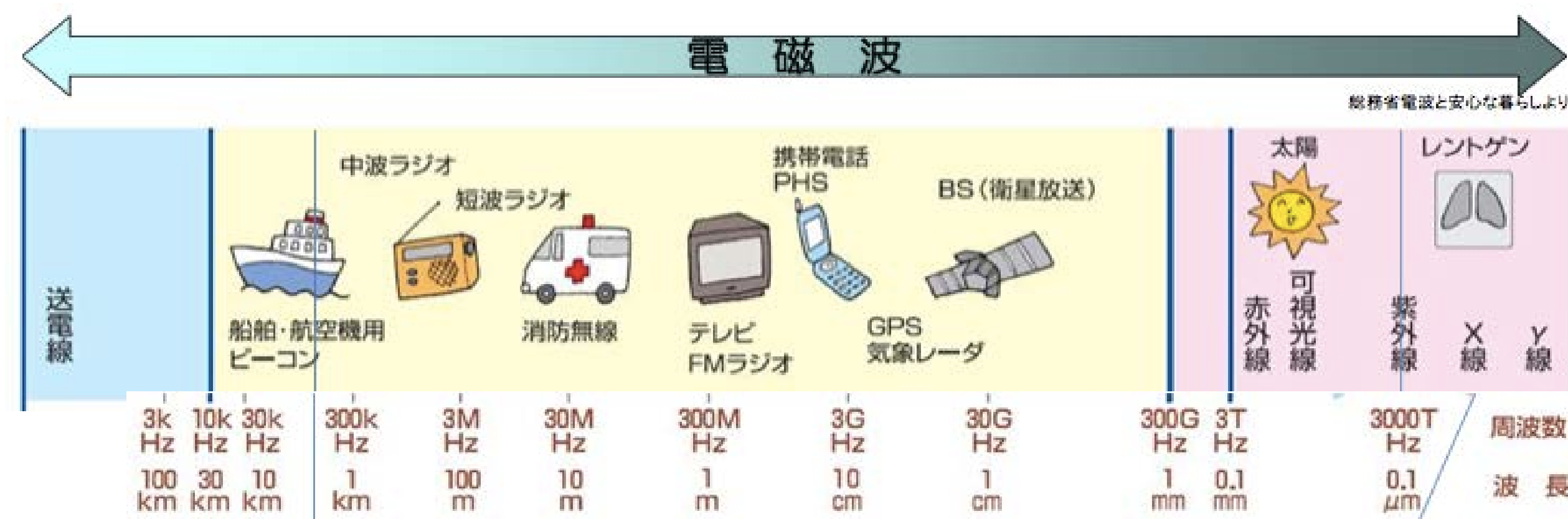


光で量子を操ろう ～原子へのメッセージを光にのせて～

東京農工大学工学部物理システム工学科 畠山研究室

光は電磁波!?

電磁波は携帯電話や電子レンジなどの身近な電化製品などから出ているイメージがあると思いますが、光(日光など)も可視領域の周波数をもつ電磁波です。電磁波は物質と相互作用します。この特性をうまく利用することは重要なことです。



総務省,東海総合通信局HPより

原子とは?

原子とは物質を構成する基本粒子で、原子核と電子から成っています。私たちの研究室では操るのが容易である気体原子を用いて研究を行っています。

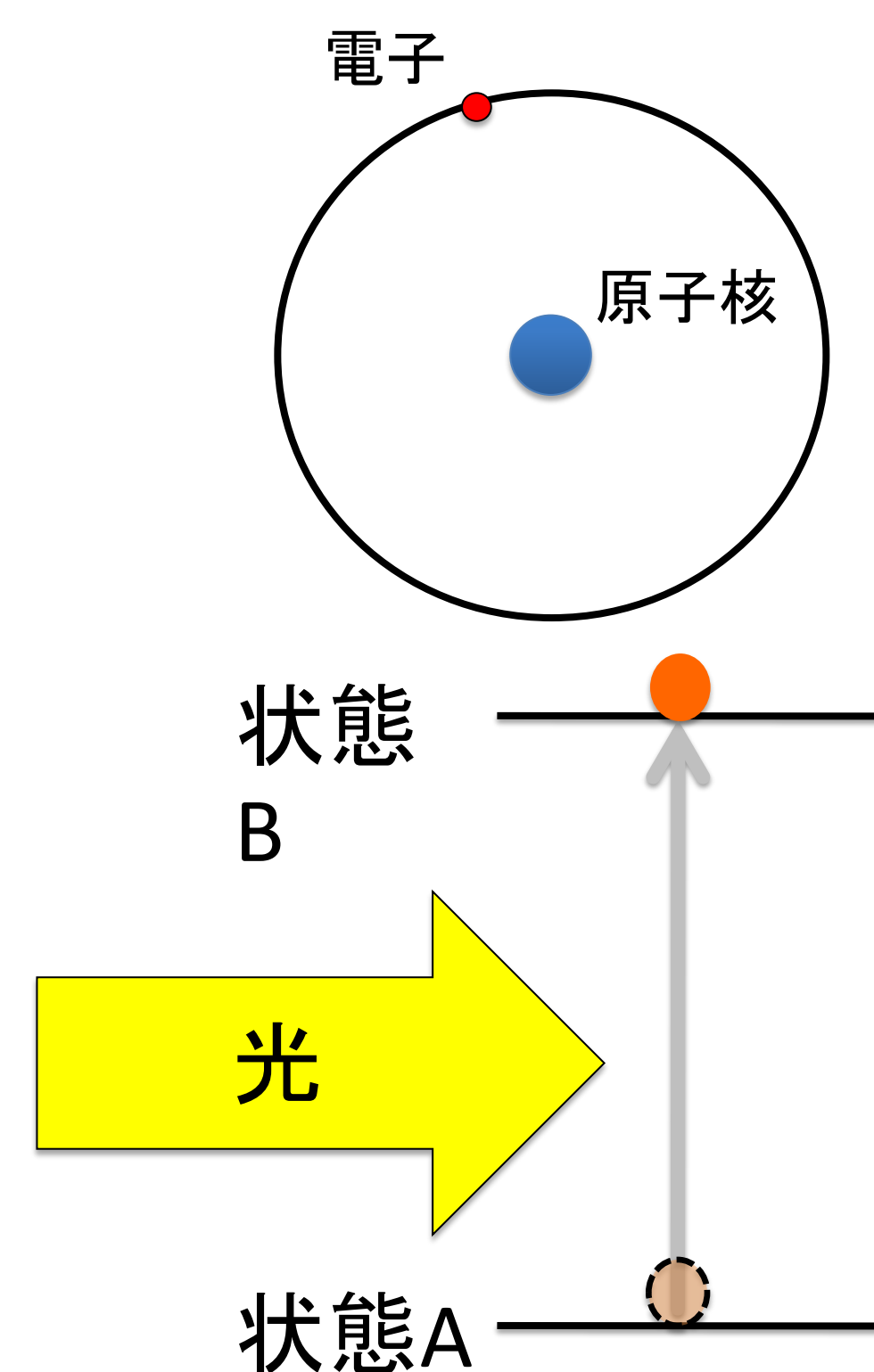
共鳴(光と原子の相互作用)

原子がある特定の周波数の光(電磁波)を吸収・放出する現象。これによって原子の状態(エネルギーや運動量やスピンの状態)を操作することができます。

身近な例: 電子レンジで食品が温まる
これは食品中の水分子が電磁波を吸収し振動することによって起こる現象です。

研究の意義

原子と電磁波の相互作用は長い歴史があり、現在でも盛んに研究されている分野です。それは原子の精密な制御ができれば物質と電磁波の相互作用の原理がよく理解できるだけでなく、様々な分野への応用が考えられるからです。例えば、原子時計や量子コンピューターなどがあります。このようなホットな研究分野において独自の方法を考え出し、他とは違うアプローチで原子の制御について研究を進めています。



原子時計
産総研HPより

キーワードは「表面」

例に挙げたデバイスなどへの応用を考えたとき、原子を閉じ込めておく容器が必要となります。応用上問題となるのが、この容器の「表面」と原子の相互作用です。これによって光で制御した原子の状態が変わってしまいます。一般的にはこの表面で起きる現象をできるだけ避けるようにして研究が行われています。しかし、私たちは表面という問題を利用するような逆転の発想で研究を進めています。これは未開拓の研究領域であり、量子現象の解明や新たな量子デバイスへの展開が期待できます。



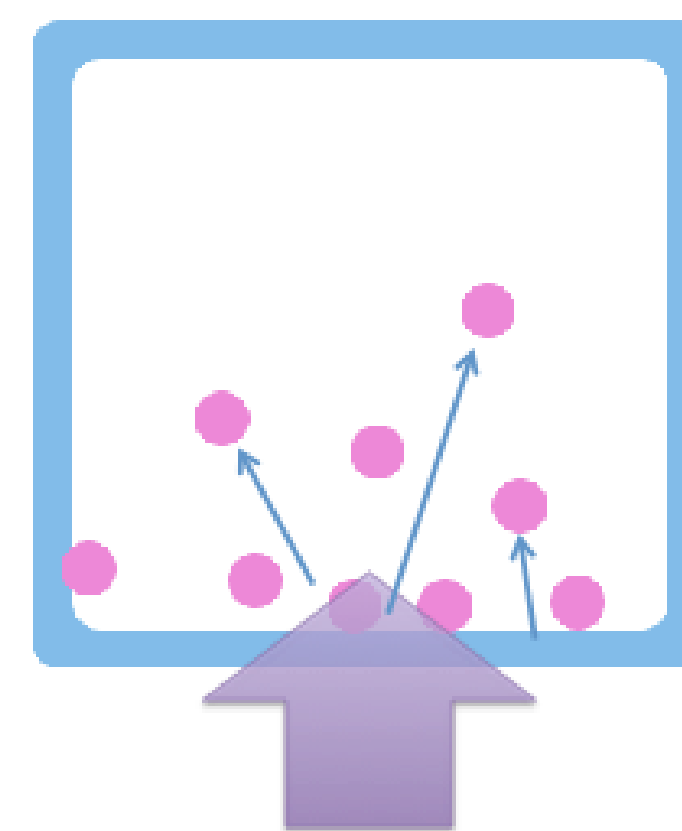
研究内容

「表面」をキーワードに気体原子の「供給」、「操作」、「保存」という3つの研究をしています。これらは完全に独立しているわけではなく、密接なかかわりがあります。

「供給」

容器表面に光を当てることで原子を飛びださせます。たくさん原子が飛び出せばたくさんの原子を扱うことができます。

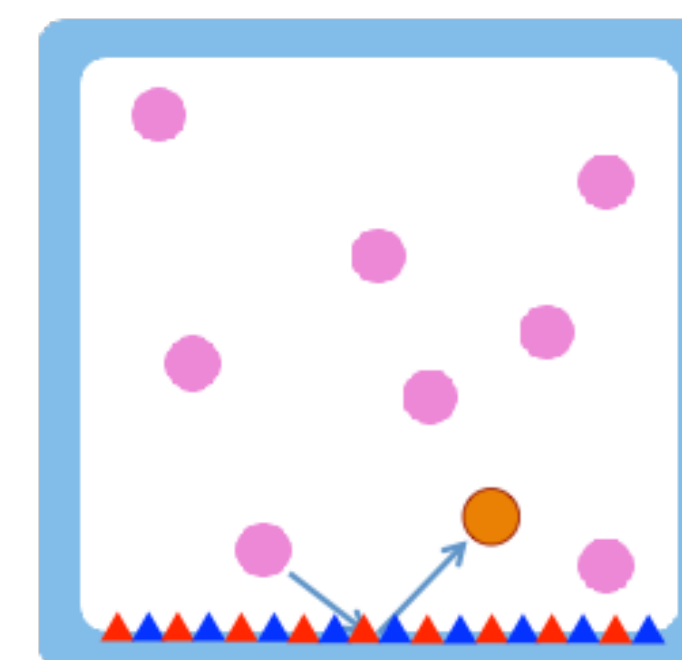
→**光誘起脱離**へ



「操作」

表面を利用して原子を操作したり、逆に原子の微小な状態変化を容器に移して観測します。

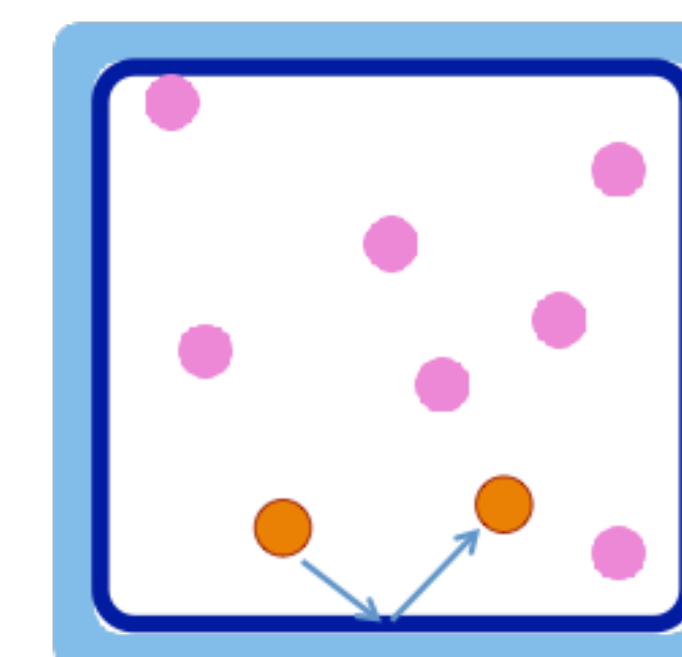
→**運動誘起共鳴、回るセル**へ



「保存」

原子に操作を加えても、その状態が保持されなければもったいない。壁に当たっても原子の状態が変わらないようにします。

→**スピン緩和防止コーティング**へ



スピン角運動量の巨視的物体への移行(セル回し)・運動誘起共鳴

研究の目的

原子や光子はスピンと呼ばれる角運動量(スピン角運動量と呼ぶ)を持っています。これらのスピン状態を操作して巨視的な物体を操作することで、古典論と量子論間の相互関係を導き出すことが目的です。この実験で言えば光子のスピン角運動量を原子に移行した後にセルの回転にどう対応するか、というメカニズムを解明することができます。

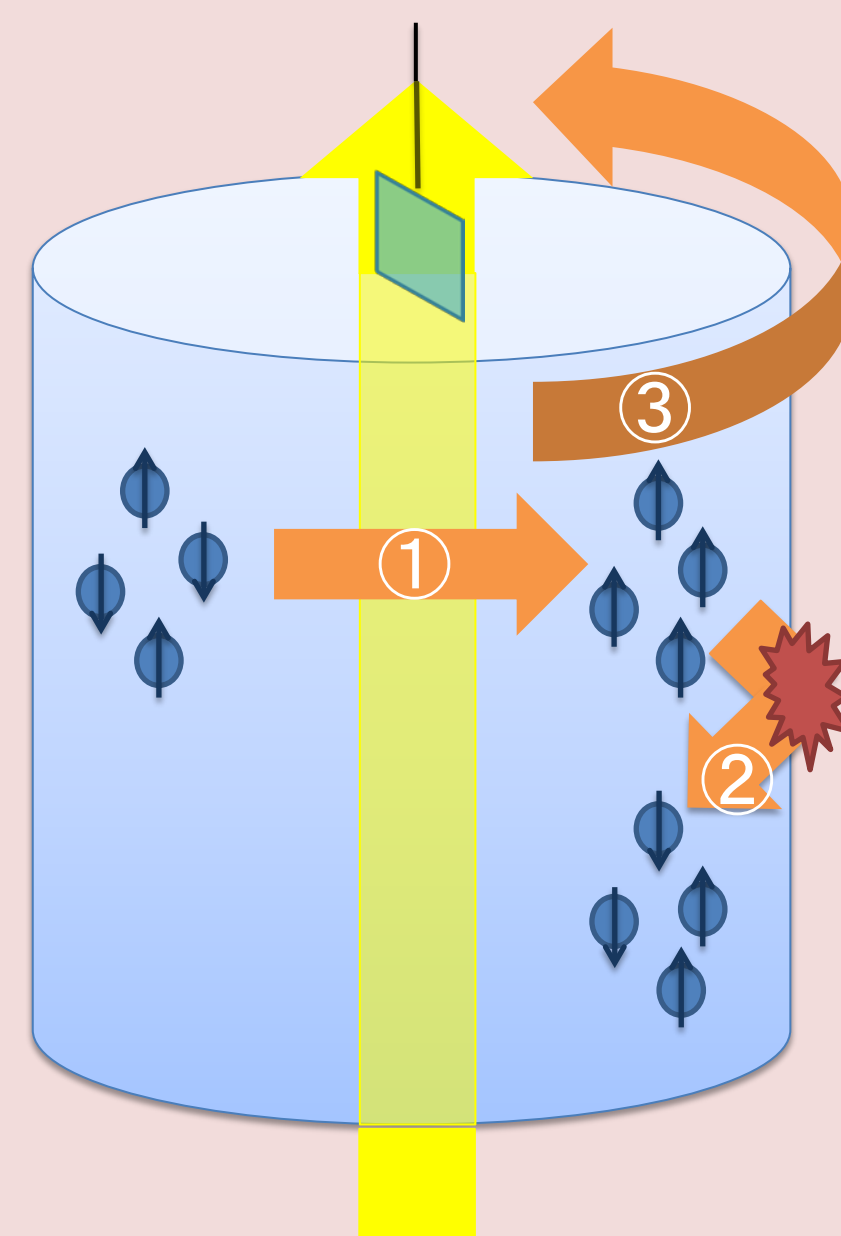
実験原理について

セルに封入された気体原子に、共鳴する周波数を持つ光を照射することで光子の持つスピン角運動量が気体原子に移行します(①)。この際その原子がセルの壁面と衝突する(②)ことで、このスピン角運動量がセル本体に移りセル自体が回ります(③)。この際の回転方向はスピンの状態に依存しています。

実験装置について

右の図が実験装置です。この装置の上には細い煙突のような管が付いており、この中に直径 $6.6\mu\text{m}$ (髪の毛の1/10)の肉眼ではほぼ見ることができない細いワイヤーがあり、これでセルを吊るしています。

右は実際にセルがワイヤーで吊られている状態の図。このセルの上に付いているミラーにレーザー光を入射し、その反射光を観測することで正確に回転角度を測定することができます。



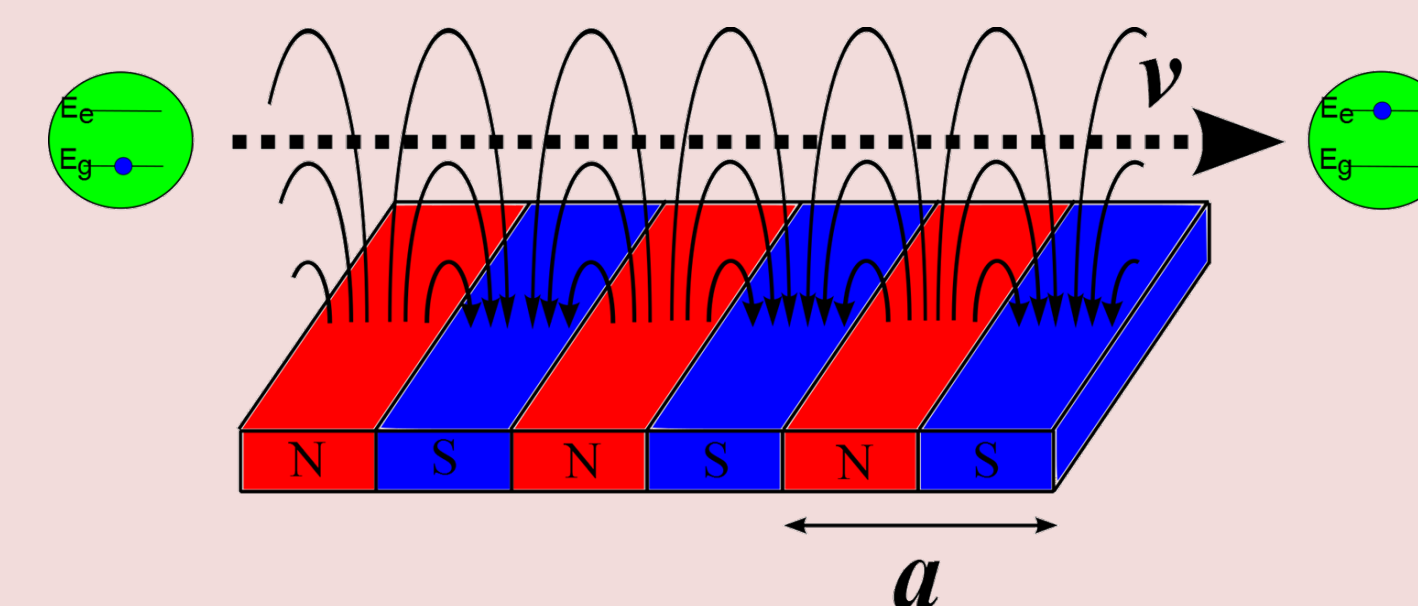
ここにワイヤーがある



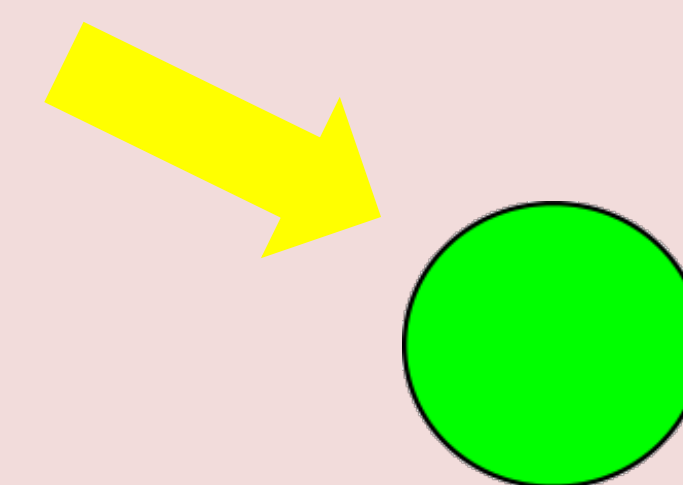
このガラス製の容器がセル

運動誘起共鳴とは

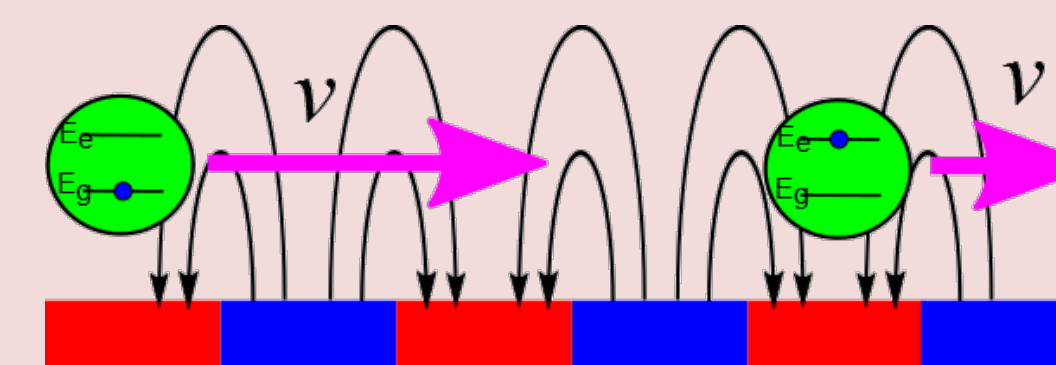
原子は周期 a の周期場を速度 v で運動すると、周波数 $f=v/a$ の場の振動を受け取ります。



振動の周波数 $f=v/a$ が原子の共鳴周波数と一致するとき、原子は光を照射したときと同様の共鳴を起こします。これが運動誘起共鳴です。



光による共鳴では、共鳴遷移に必要なエネルギーを光から受け取る。



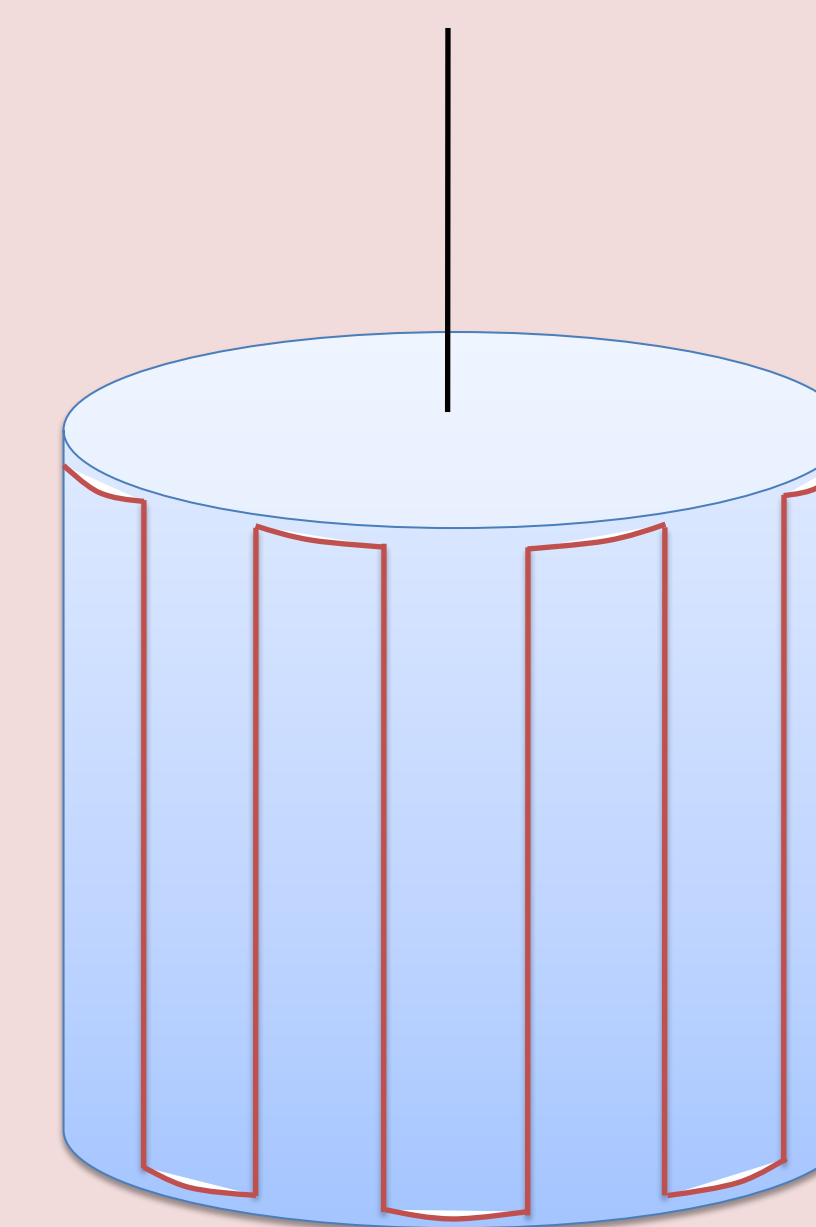
運動誘起共鳴では、共鳴遷移に必要なエネルギーには原子自身の運動エネルギーが使われる。

共鳴の前後で原子の運動量が変わるため、光とはまた違う新たな原子観測・制御への応用が期待されています。

さらに...

この運動誘起共鳴を隣のセルを回す実験に応用することで運動誘起共鳴でセルを回すこともできるでしょう。運動誘起共鳴が起こると原子の運動量は変化します。ここで運動量保存則が成り立っていないければならなりません。では失われた運動量はどこへ？答えは周期場を作っている物体です。

この考えを回るセルに導入すると、運動誘起共鳴を起こすことでセルを回すことができるのではないかと期待されています。



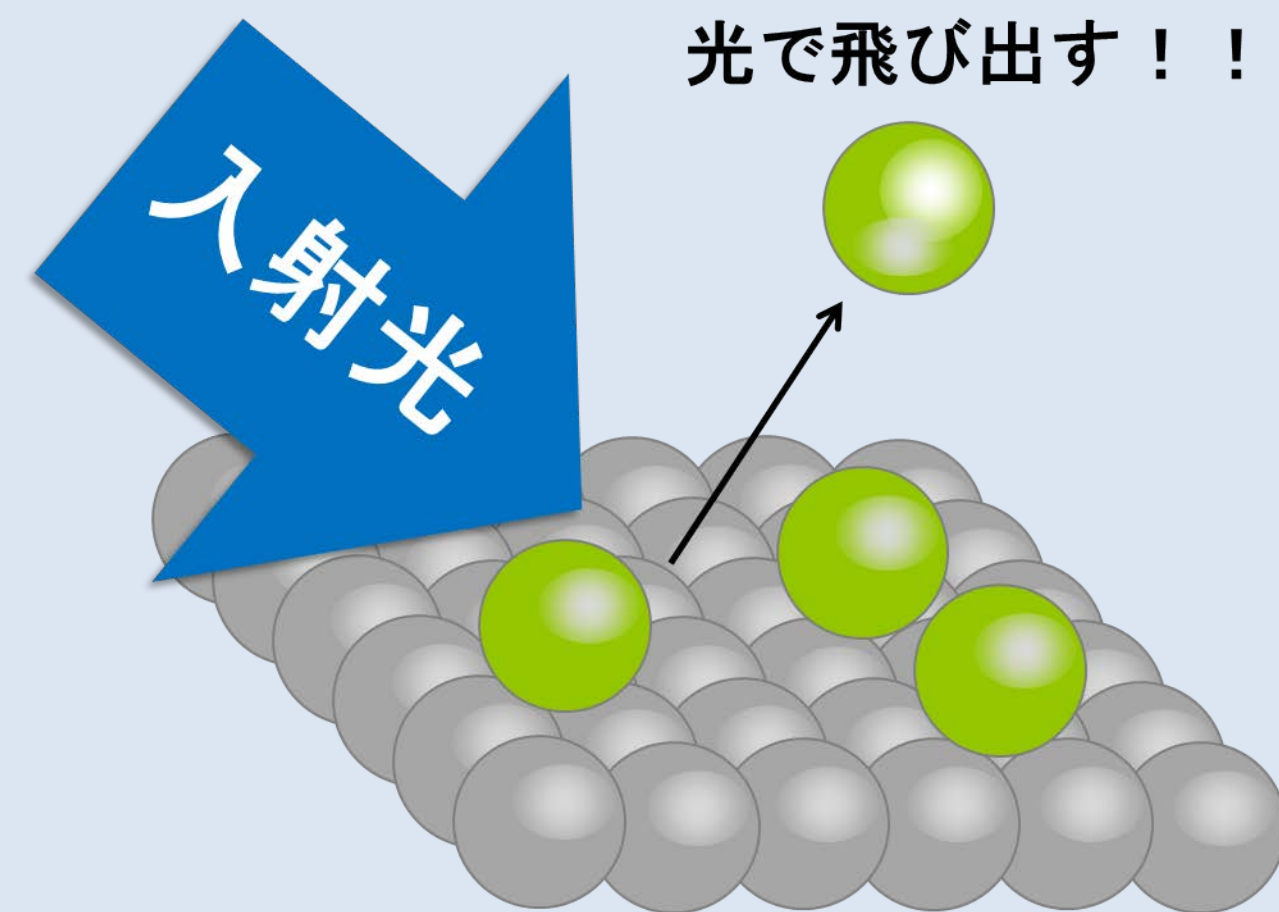
周期導線による周期磁場を発生させるようなセル

光誘起脱離

*アルカリ原子
周期表の左端にあるLi, Na, K, Rb, Cs, Fr のこと

**ボース・アインシュタイン凝縮
名前がかっこいいと思ったら、検索してみよう！

光誘起脱離とは？



- レーザーやLEDなどの光(可視～紫外域)を、アルカリ原子*が吸着した表面に当てると、アルカリ原子が脱離する現象が観測されています。
- 光照射してすぐに現象が観測される(レスポンスが速い)ことや、脱離原子の速度分布が試料温度から予想される値よりはるかに高いことから、単なる熱的な脱離とは図別して扱われます。

研究の目的

さまざまな測定から、光誘起脱離メカニズムを解明することを目指しています。アルカリ原子は表面とどのように結合しているのか？その表面と光の関係は？脱離するものとししないものの違いは？これらは未だ曖昧なままで、はっきりとしたことはほとんどわかっていません。

何の役に立つの？

アルカリ原子供給法として応用

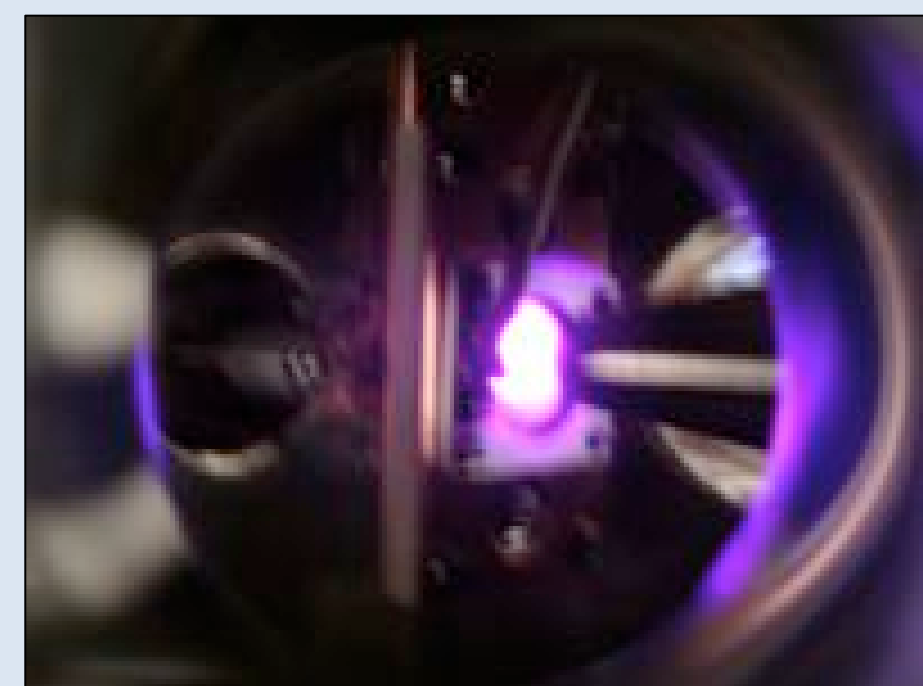
原子物理学の実験はほとんど超高真空中にて行われます。詳しい理論計算ができるくらいシンプルな状況を作るためです。常に真空に引き続ける中、気体原子で実験を行うためにはそれらの原子を一時的に供給してやる必要があり、それに光誘起脱離現象を利用します。具体的にはレーザー冷却実験に応用されます。

レーザー冷却って？

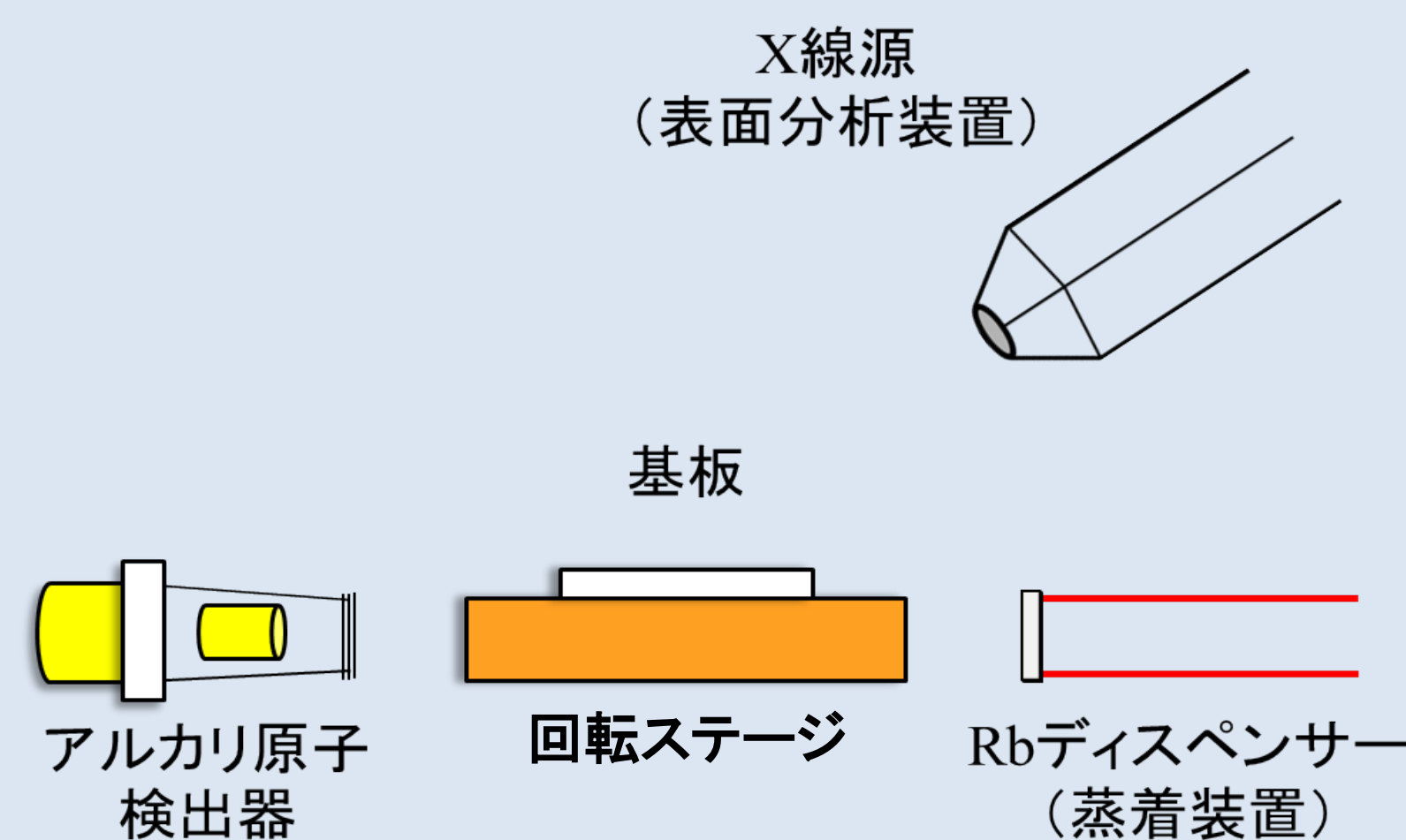
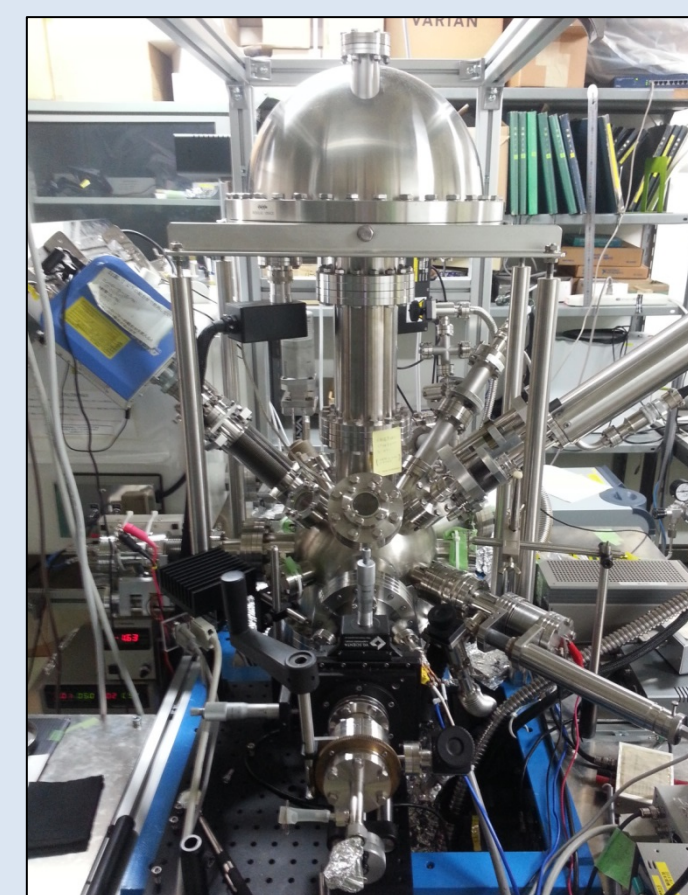
原子気体に共鳴するレーザーを巧みに使うことで、真空中にある対象の原子気体を絶対零度近く($-273.14999\ldots^{\circ}\text{C} \sim \mu\text{K}$)まで冷やすことができます。冷凍光線とは不思議なこともあるものですねえ。実はこれを可能とする装置が私達の研究室にあったりします。すごいでしょ。

この強力な武器と光誘起脱離でよくなされる実験はボース・アインシュタイン凝縮**です。ボース・アインシュタイン凝縮は固体、液体、気体、プラズマに続く極低温($\sim \mu\text{K}$)で発生する第五の状態と呼ばれるもの！量子力学の本質を知る最も重要な手掛かりです！

実験装置について



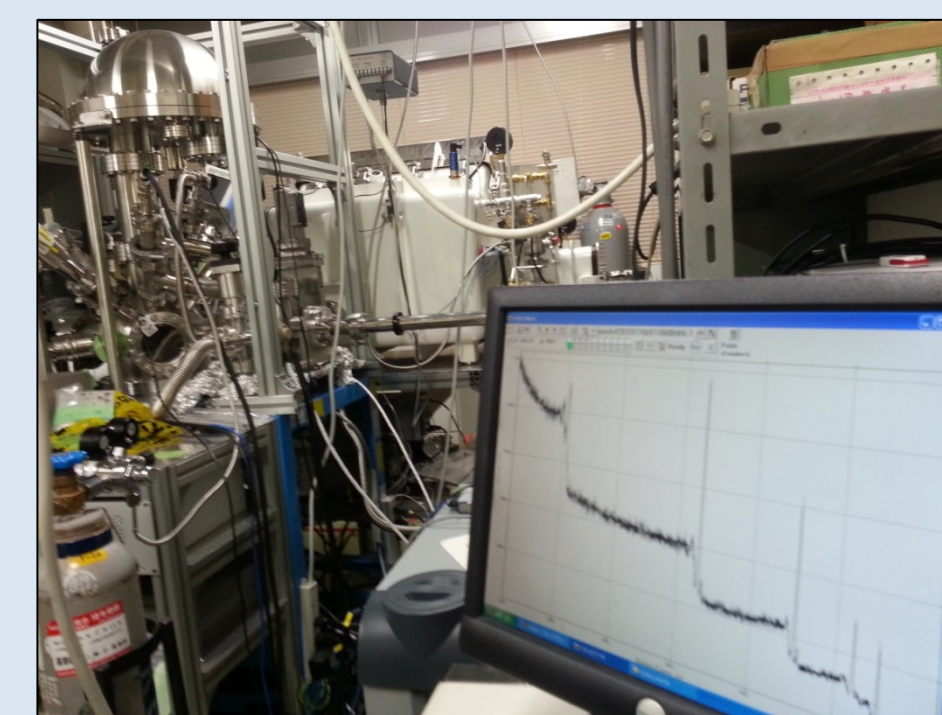
装置の中を窓から覗き見



実験は超高真空(圧力: 1×10^{-7} Pa: 大気圧の1000億分の1!)装置の中で行います。アルカリ原子を塗布した基板に光を当てれば、自家製アルカリ原子検出器より脱離原子個数を測定できます。実験から脱離確率の光波長依存性や表面温度依存性を調べることができます。X線光電子分光法という表面分析装置も装備していて、表面元素の構成や化学結合状態も調べることができます。



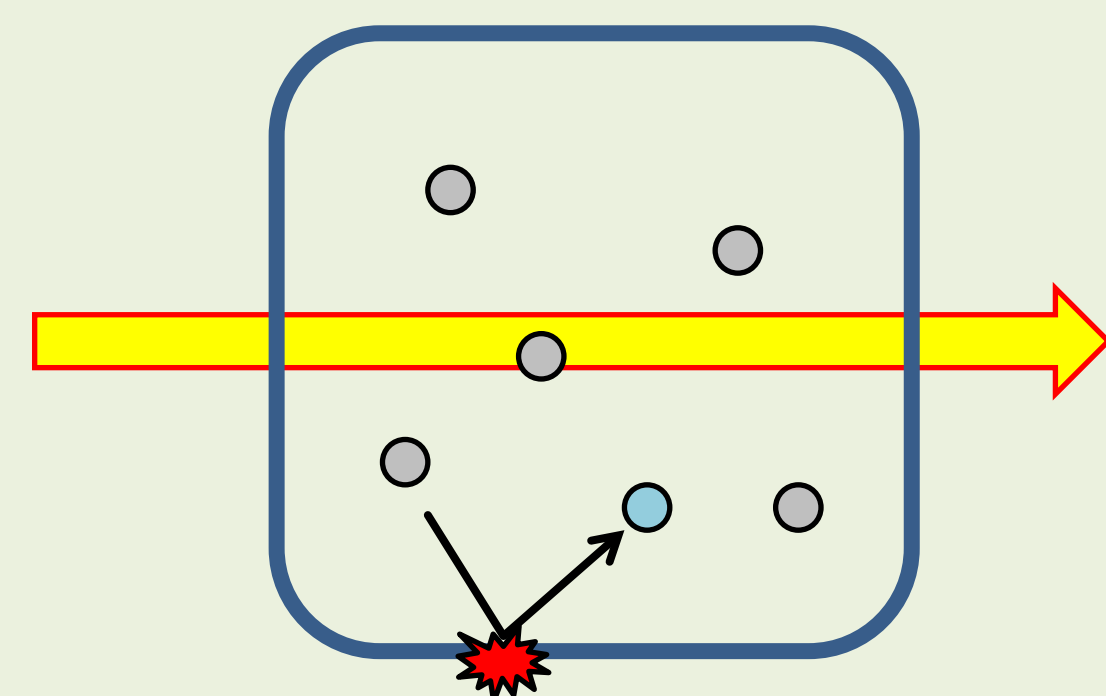
これが自家製の検出器！



PCで表面分析のデータを測定をしています

スピン緩和防止コーティング

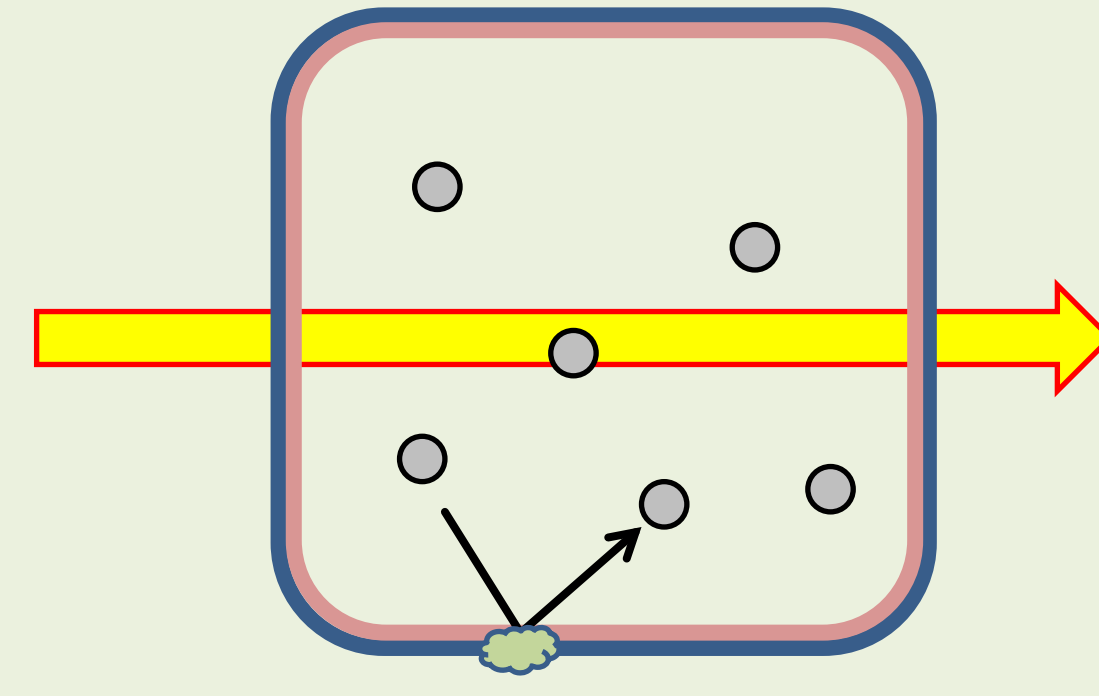
ガラス容器(ガラスセル)に気体原子を閉じ込めレーザーを入射することで原子の内部状態(スピン)を操作することができます。原子時計,原子磁力計,...など原子を用いた精密測定へ利用されます。そのためには原子の内部状態が長く保たれる必要があります。



衝突で緩和してしまう

ところが原子は容器内を自由に動き回るため原子は壁に衝突してしまいます。すると原子と壁との相互作用により、レーザーでそろえた原子の内部状態が緩和してしまいます。

問題



衝突しても緩和しにくくなる！

セルの内壁にコーティングをすることで緩和を抑えることができます。これを「スピン緩和防止コーティング」と呼んでいます。

表面をコーティングすると

研究の目的

ところがなぜこのようなコーティングをすれば緩和を抑えることができるのかははっきりとわかっておらず、その性能を決める要因も不明瞭です。そこでコーティングの作製・評価と共に様々な表面分析手法を組み合わせ緩和防止性能に影響する要因を探り、緩和防止原理の解明を目指しています。

実験装置など

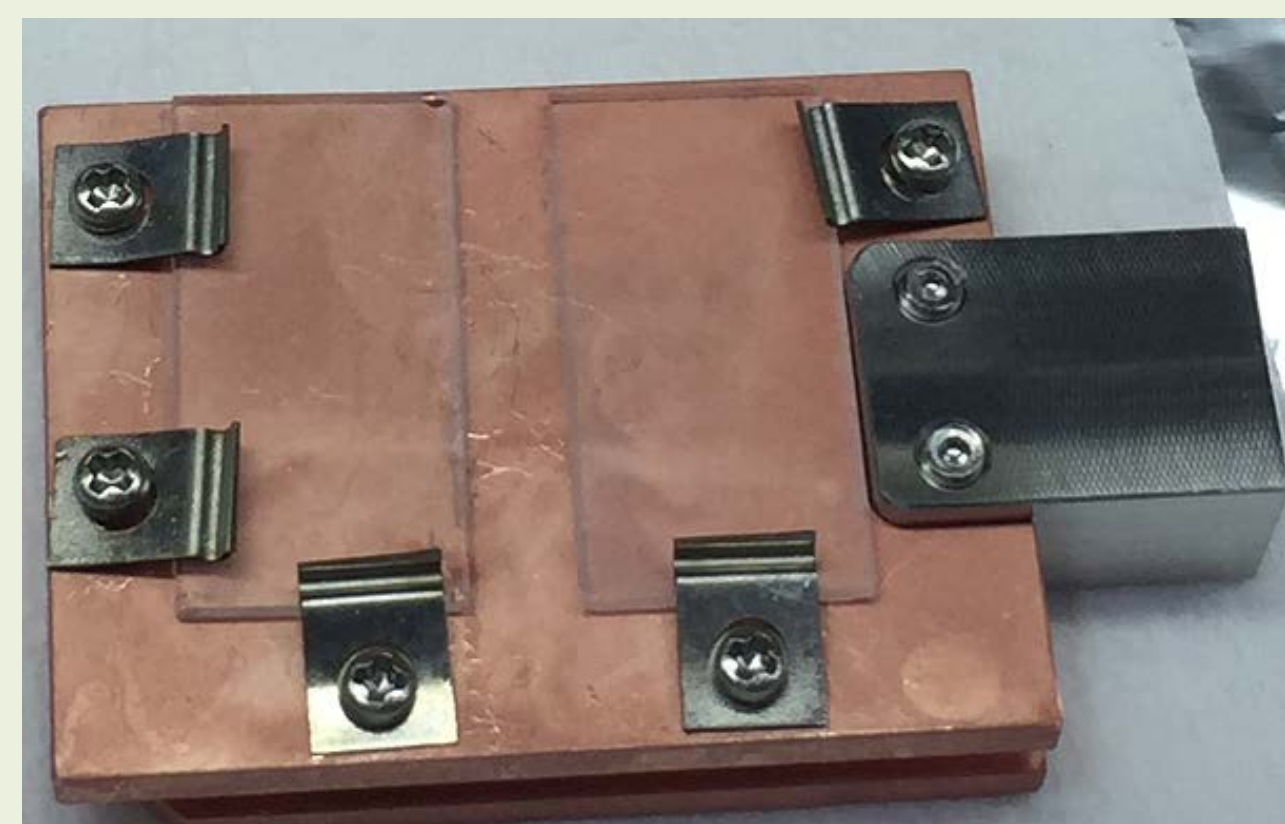
コーティング作製



ガラス管を加工して装置を自作し、
パラフィンをコーティングしています。
内部を $\sim 10^{-4}$ Paまで排気し、約400℃
まで加熱して蒸着させる方法をとって
います。

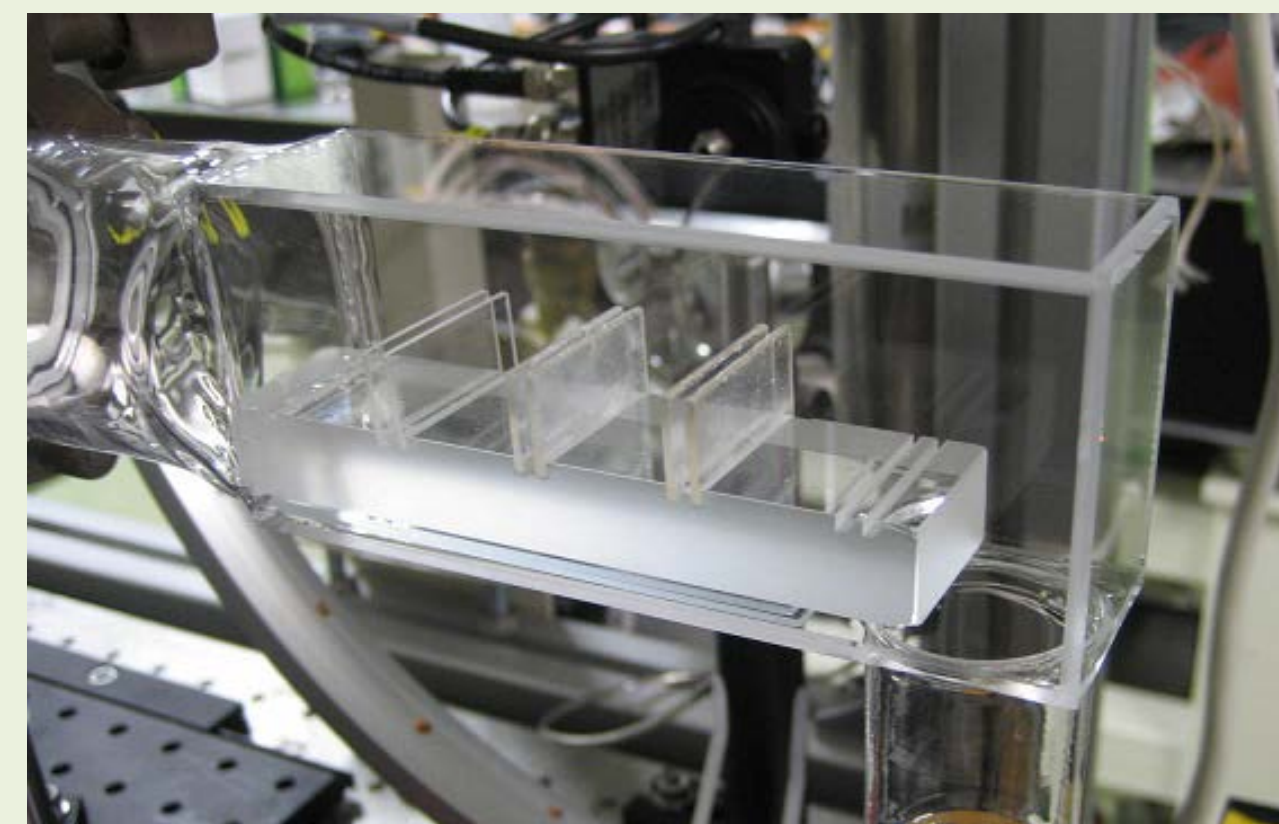
コーティング基板

基板と表面分析装置導入器具



表面分析を行うため閉じたセルではなく基板を使い実験しています。表面分析ではX線光電子分光法(XPS)による表面元素の構成や原子間力顕微鏡(AFM)による表面形状測定などを行っています。

緩和防止性能評価装置



2枚1組で基板を向い合せ、そこにレーザーを通し基板の間にいる原子が衝突し緩和する様子を測定します。原子が基板の間から逃げないように緩衝ガスとしてHeを入れています。

コーティングセル



コーティングを施したセルの作製も行っています。緩和防止性能評価のほか、光誘起脱離や運動誘起共鳴への利用を見据えています。オーダーメイドでの受注生産も可能！
（上記の原子時計などに利用できます。）

コーティング材料

パラフィンという蠟のような材料で、初めて緩和防止効果が確認され、現在最も広く研究されています。これまでに約10000回衝突しても内部状態が保たれた、という報告がされています。またパラフィンの弱点(60℃以下でしか使えないなど)を克服するような他の材料(例:OTS)についての研究もされています。

◎パラフィン



○オクタデシルトリクロロシラン(OTS)

