

◇ 2-5. レーザー分光

注意!!

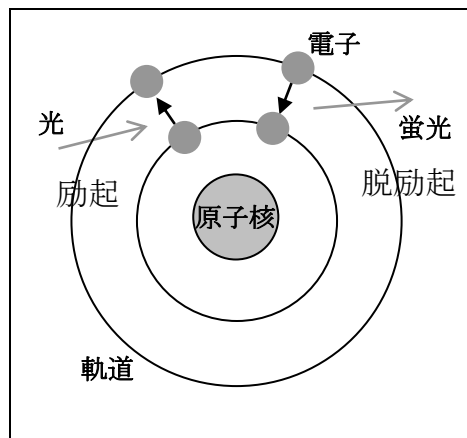
レーザー光を直接目に入れないこと!! また、ミラーの表面などを直接触らないこと(息を吹きかけるのもダメ)!! このテキストは不完全なものである!!!!!!
細かいところ(結構重要だったりする)はおいおい説明する。

■目的

本テーマでは、原子や分子の構造・性質を研究するための有効な手段の一つである、光学的手法による原子の分光実験を行う。具体的には、半導体レーザーを使ってアルカリ原子の一種であるルビジウム(Rb)原子のエネルギー準位構造を調べる。また、実験で用いる各種機器(レーザーや検出器)の構造や特性を理解し、実験を行うための光学系を組上げ、**分光学の基礎**を学ぶ。

■原子のエネルギー準位構造とは...

原子はその中心に原子核(陽子と中性子から成っているのは知っているよね)があり、その周りを電子が回っている。電子と原子核を結び付けている力はもちろんクーロン(Coulomb)力である。もう少し量子力学的に表現すれば、電子は原子核の周りのある領域をある存在確率で占めており、雲のように存在している(電子雲)。そしてこの原子内の電子が存在する場所はある決まった法則に則っており、どこにでも存在できる訳ではない。古典的には、電子を粒子として見たとき、原子核の周りを回っている電子が特定の**軌道**を走る事を意味する。原子内で電子が存在できる場所(軌道)を予言できるのが量子力学である。



原子内には電子が走る軌道は沢山ある。電子が周れる軌道は電子(原子)の状態(電子(原子)が持つエネルギー等)によって決まっている。最もエネルギーが低い場合、電子はエネルギー的に最も低い軌道を回っている。このような状態を”**原子は基底状態にある**”という。他の軌道は、電子のエネルギー(原子の内部エネルギー)で特徴付けられ(厳密には電子スピンや外場(磁場・電場)等によっても変わってくるが)、**エネルギー的に不連続な値**を持つ。これら電子が周る特定の軌道を、原子の**エネルギー準位**という。エネルギー準位は原子内に多く存在するが、そのエネルギー的構造は原子核を構成する核子の数や軌道電子の数で決まる。

■原子分光とは...

原子分光とは、ある原子がどのようなエネルギー準位構造をしているかを探ることである。本テーマでは半導体レーザーを用いて、ルビジウム(Rb)原子の準位構造を光で分解して見るわけである。では、分光を行うにはどうしたらよいであろうか? 一言で言えば、

原子にある特定の周波数の光を当てて、電子の軌道（準位）を変えてやる。

最もエネルギーの低い軌道を回っている電子を他の軌道（エネルギーが高い軌道）に移すには2つの軌道のエネルギー差(ΔE とする)に相当するエネルギーを外から与えてやる必要がある。この方法には幾つかあるが、その一つが光を与えてやる方法である。つまり、 ΔE に相当する周波数の光（エネルギー： $h\nu$ ）を原子に照射することで、電子をエネルギーの高い軌道に移すことができる。これを”原子を励起する”という。エネルギー的に高い軌道に移った電子はその後どう振る舞うであろうか？ 励起された原子は多くの場合、ある時間が経過すると基底状態へと戻る。つまり、エネルギーの高い軌道に移った電子は最もエネルギーの低い軌道に戻る。この時原子は、励起される時吸った光と同じ周波数の光を吐き出す。本テーマでは、原子が励起される時吸われた光の量、及び原子が励起状態から基底状態に戻る（脱励起）ときに発する光（脱励起光）を測ることで、どのような周波数の光が原子を励起するのかを測定する。

■半導体レーザー

世の中には多種多様な形態・構造のレーザーが存在し、非常に多方面で大活躍している。我々が扱うのは比較的安価で取り扱いが容易な半導体レーザーである。もちろん分光実験には必要十分な性能を発揮する。本テーマで使用するのは CD-ROM や CD-R ドライブに使用されている、発振波長が 780 nm 付近の可視-近赤外半導体レーザーである（資料を参照せよ）。Rb 原子の基底準位からある特定の励起準位への遷移を起こさせるためにこれを用いる。

■フォトダイオード

分光実験をするためには、原子からの発光（蛍光）や原子による光の吸収量を測定する必要がある。フォトダイオードは、これら光の量を測る測定器の一つである。本テーマでは Si PIN フォトダイオードを使う。Si（シリコン）は近赤外領域で感度が高く、本テーマで扱う 780 nm 程度の光の検出に適している。”PIN”とは P-N 層の間に I 層を挟み込んだ構造を意味し、端子間容量を小さくし高速応答を可能とする。

■スケジュール（予定）

1 日目 まずは、LASER の原理と半導体について図書館等で調べてきてもらう（LASER は何の頭文字??）。さらに実験で使用する半導体レーザーの構造も調べ理解する（できればフォトダイオードも）。これは、レポートの一部になるのでしっかりやること。

2,3,4 日目 半導体レーザーの特性を調べる。どのような装置を組んだら良いのかとか、装置の取り扱い注意点等はこの時説明します。

I レーザーへ流す電流（注入電流）に対するレーザーの出力特性を調べる。

1. レーザーの温度を 25°C に保ち(サーミスタの抵抗値から LD の温度を知る. 換算表を参照せよ)、注入電流を 0 mA から 140 mA まで徐々に上げていきレーザーパワーを測定する。
2. 温度を 60°C に設定し同様の測定をする。

II. 温度特性

1. レーザー出力を 50 mW とし、温度を 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C と変えていった時のレーザーの波長を波長計で測定する。温度を変えるとレーザーの出力が変わる可能性があるので各温度で 50mW になるように調整すること。

5, 6, 7, 8 日目 いよいよ Rb 原子の分光を行う。

実際に実験を始める前に Rb 原子の準位構造を理解し、実験で使う各種装置、機器、光学部品・素子の扱いを理解しよう。Rb 原子の準位構造を理解した後、外部共振器型半導体レーザーの仕組みや取り扱い方を習得し、実験のための光学系を構築し、Rb の D₂ 線の分光を行う。蛍光及び吸収スペクトルを測定し、⁸⁵Rb と ⁸⁷Rb の天然存在比を大まかに評価する。

■基礎知識

(1) ルビジウム原子のエネルギー準位

1. 微細準位

アルカリ原子(Li, Na, K, Rb, Cs, Fr)は最外殻電子が一つ（よって水素原子に似ており、数多くある元素のなかでも比較的シンプルな構造をしている）であり、電子のスピン角運動量 $S = 1/2$ を持っている。基底準位の軌道角運動量 L は 0 であり、この準位は「 $5S_{1/2}$ 」（‘5’は主量子数、Sは電子の軌道角運動量 L が 0 である事を、下付の $1/2$ は電子の合成角運動量 J ($J = L + S$) の大きさを意味する）という名前で指定される。最低励起準位は軌道角運動量 $L = 1$ を持ち、電子スピンと、電子の軌道回転運動に伴い生じる磁場との相互作用により、2本の微細準位（ $5P_{1/2}$ 準位と $5P_{3/2}$ 準位）に分裂し、それぞれの微細準位の電子の合成角運動量 J は角運動量の合成則により $1/2$ と $3/2$ となる。本実験では、基底準位 $5S_{1/2}$ から励起準位 $5P_{3/2}$ への遷移（D₂線とよばれている。遷移波長は 780.2 nm である。ちなみに D₁ 線 ($5S_{1/2} \leftrightarrow 5P_{1/2}$) の遷移波長は 795 nm ）に関して詳しく調べていく。

2. 超微細準位

実は Rb 原子は、上に述べた微細準位よりさらに複雑な構造をもっている。Rb 原子の中心にある原子核がスピンをもっていることに起因する。原子核の持つ核スピン I の影響を考える。核スピンは同位体（同じ元素でも中性子の数が違う）によって異なり、Rb の 2 つの安定同位体、⁸⁵Rb と ⁸⁷Rb ではそれぞれ $5/2$ 、 $3/2$ である。これにより、電子の合成角運動量 J と核スピン I の相互作用（超微細相互作用）により Rb 原子のエネルギー準位構造は、原子の全角運動量 $F = J + I$ で指定されるさらなるエネルギー準位の分裂が発生する（超微細準位）。そのエネルギーシフトの量は

$$\Delta E(F) = h \left[AK + B \frac{6K^2 + 3K - 2I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)2J(2J-1)} \right] \quad (1)$$

で求めることができる。ただし、

$$K = \frac{F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)}{2} \quad (2)$$

である。式中の A と B は超微細結合定数でその大きさは次ページの表のようにになっている。

^{85}Rb		
	A (MHz)	B (MHz)
$5S_{1/2}$	1011.910	0
$5P_{1/2}$	120.7	0
$5P_{3/2}$	25.009	25.88

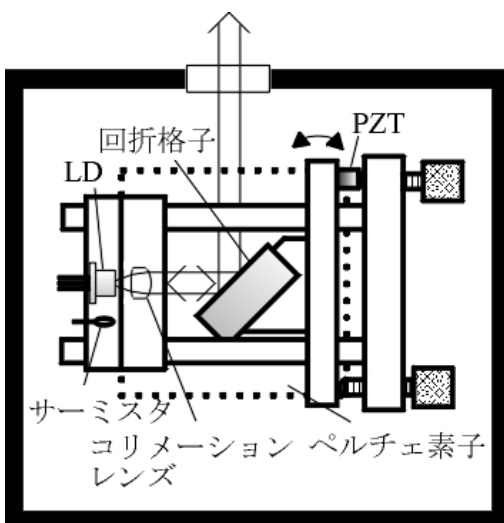
^{87}Rb		
	A (MHz)	B (MHz)
$5S_{1/2}$	3417.341	0
$5P_{1/2}$	406.2	0
$5P_{3/2}$	84.845	12.52

表 1 Rb 原子の超微細結合定数

課題 1: ^{87}Rb の基底準位($5S_{1/2}$)、及び励起準位($5P_{3/2}$)の超微細構造のエネルギー準位図を描き各準位間のエネルギー差を計算して記入せよ。

課題 2: Rb 原子の、主量子数で表される 5 本の各電子軌道($n=1,2,\dots,5$)を回っている電子の数はいくつ? 図に描け。

(2) 光源 (レーザー)



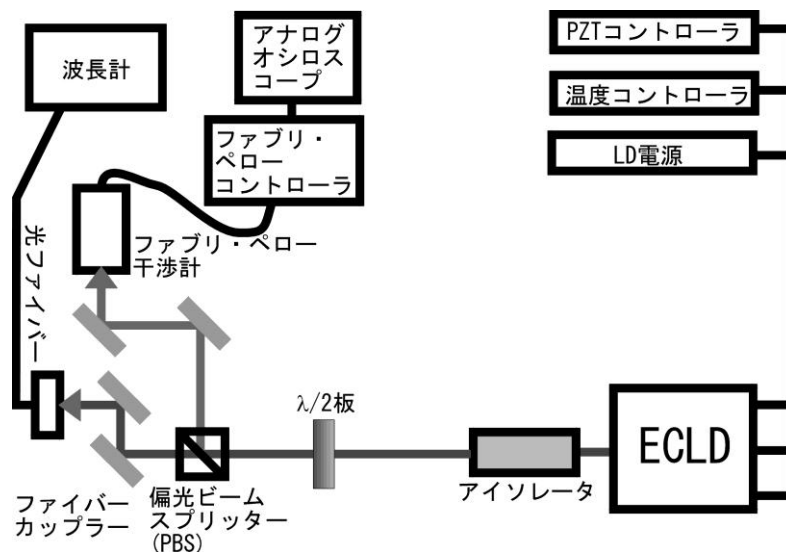
実際の分光実験において最も重要になるのがレーザー光源である。今回の実験では半導体レーザー素子 (LD) の外に回折格子を取り付けた外部共振器型半導体レーザー (External Cavity Laser Diode: ECLD) と呼ばれる光源を使用する (時間的余裕があれば組み立ててもらおう)。左図は ECLD の構成図である。わざわざ外部共振器を組むのは LD 素子だけではレーザー線幅が広すぎてまったく分光ができないからである。つまり、LD と回折格子の間で共振器を構成することで、レーザー線幅を今回の分光実験に十分なくらい「細く」できるのである。

LD 素子から出た光はコリメーションレンズで平行光にされ、1mm あたり 1800 本の溝が切られた反射型回折格子に入射する。このとき 1 次の回折光が LD 素子に戻るようになれば、その間でレーザー共振器が作られる。0 次の回折光 (図中で箱の外に出て行っているレーザー光) を分光に使う。回折格子をマウントしているホルダーの調整ネジやピエゾ素子 (PZT) で回折格子の角度を変えることでレーザーの波長を変えることができる (何故か?)。LD 素子付近にはサーミスタ (温度センサー) とペルチェ素子を取り付けられ、温度コントローラによって温度が安定化できるようになっている。

■外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の発振及びレーザー周波数等の調整

- 次ページの図を参考にしながら光学系を組む。図はあくまで例なので、自分たちで工夫しながら各光学素子を配置してほしい。最終的には分光実験をするので、Rb セルや光検出器が置けるスペースを空けておいたほうがよいであろう (次々ページの図参照)。
- レーザーを発振させる。LD 駆動電源のボリュームが左に回りきっていることを確認し、メインスイッチを入れ OUTPUT ボタンを押す。ボリュームをゆっくり回すと、35~40 mA 程度で LD が光り出す。これを確認したら LD の発振閾値付近まで電流を下げる。

- レーザー光線の回折格子への入射角をマウントの微調整ネジで調整し、1次回折光がLD素子に戻るようにする。1次回折光が適切にLD素子に戻ると、0次回折光（実際に分光に用いるレーザー光）が少し強くなる。この状態で外部共振器がうまく働いており、レーザー線幅が1MHz以下になっているはずである。
- Rb原子のD₂線は780.2nm付近にある。電流、温度などを調整し、ECLDがこの波長で適切に発振するようにせよ。このとき波長計の読みがふらふらするようであればレーザーが多モードで発振している可能性がある。それを確かめるためにファブリ・ペロー干渉計を用いる（ファブリ・ペロー干渉計については各自で調べる）。レーザーの一部を偏光ビームスプリッター(PBS)で分け、ファブリ・ペロー干渉計に入れ、透過スペクトルを見てやる（アナログオシロスコープに出てくる）。高さの異なるピークが何本もあるときは、レーザーへの注入電流などを調整し一本にする。



ECLD を調整する時の実験セットアップ

図中の各種装置・機器・光学素子の説明

ECLD: 外部共振器型半導体レーザー。半導体レーザー素子(LD)と反射型回折格子間で共振器を構成することで、レーザー光の周波数線幅を非常に狭くした原子分光用高分解能レーザー。

LD 電源: レーザーを発振させるための電源。

温度コントローラ: 半導体レーザーは温度をきちんと管理しないと安定して動作しない。ECLD 内に設置してあるペルチェ素子で LD の温度をコントロールするが、ペルチェ素子に流す電流を細かに調整するのがこの温度コントローラである。

PZT コントローラ: ECLD の発振周波数を微妙に変えるために、ピエゾ素子(PZT)で回折格子の角度を微妙に変化させる。ピエゾ素子に印加する電圧(0~150 V)をコントロールするのがこのコントローラである。

アイソレータ: レーザー光を一方向にのみ伝播させる光学素子。半導体レーザーは戻り光(反射光)があると破壊されたり動作が非常に不安定になるので、半導体レーザーを使う場合必要となる。

λ/2 板: 直線偏光のレーザービームの偏光角を変えることができる光学素子。たとえば机に対して水平に直線偏光しているレーザー光をλ/2板に入射させ、λ/2板を適当に回転させてやるとレーザーの偏光を机に対して垂直にすることができる。半導体レーザーのレーザー光は直線偏光である。

偏光ビームスプリッタ(PBS): レーザービームを2本に分ける光学素子。入射レーザーの偏光に依存して、透過光と

反射光の割合が変わる。例えば、机に対して 45° に傾いている直線偏光のレーザービームを入射させると 1:1 の割合でレーザービームが分けられる。上記の $\lambda/2$ 板と合わせて使うことで、分ける割合を自由にコントロールできる。

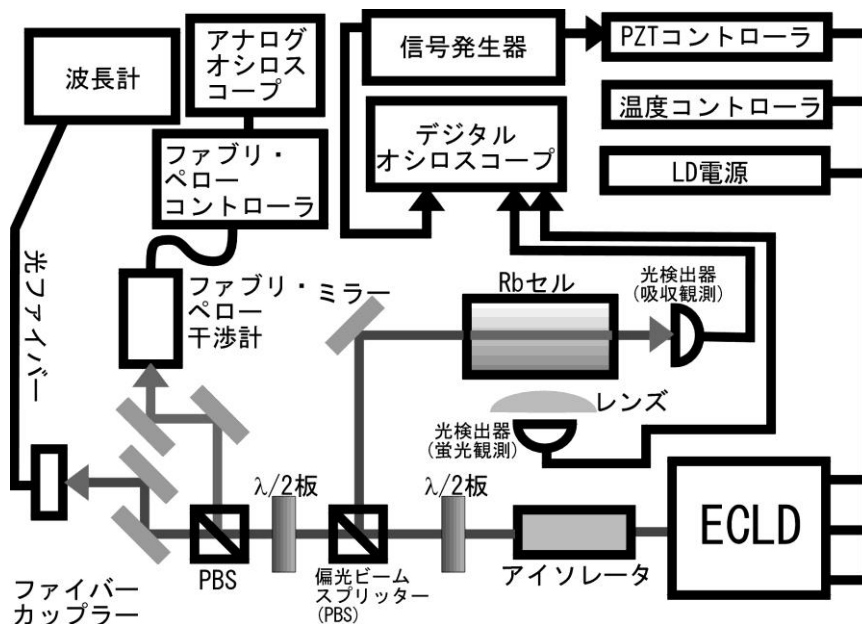
ファイバークップラー: 空中を走っているレーザービームを光ファイバー内に導いてやるもの。後で説明する波長計は、光ファイバーを通してレーザーを導いてやらないといけないのでこれを使用する。レーザー光が弱い場合、カップラーの前にレンズを置いてレーザー光を適度に絞って入射させなければならないが、レーザーが強い場合は結構大丈夫である。

波長計: レーザーの波長を測定して表示してくれるありがたい装置である。

ファブリ・ペロー干渉計: (自分たちで調べよ) 基本構成は 2 枚のミラー(わずかに光が透過する)が対向している共振器である。光が入射するとミラー間で反射を繰り返しながら互いに干渉する。周波数がとびとびの、特定の周波数のレーザー光だけが共振器内で強め合い透過ピークとして観測にかかる。2 枚のミラーのうち 1 枚はピエゾ素子(PZT)にマウントされており、PZT に適当な振幅・周期の交流電圧を印加すると、共振器長を交流電圧の周期で変えることができ、透過スペクトルをモニター用アナログオシロスコープで見ることができる。レーザービームを適度な入射角に入れてやらないときちんと機能しない。アライメント(レーザーの位置や入射角度を調整すること)が重要である。

(3) Rb 原子の吸収分光

●ECLD が目的の波長で発振したら、下図のような実験装置を組む。光検出器に直接強いレーザー光が入射するとフォトダイオードが劣化する恐れがあるので何かで塞いでおく。



図中の各種装置・機器・光学素子の説明 (追加分)

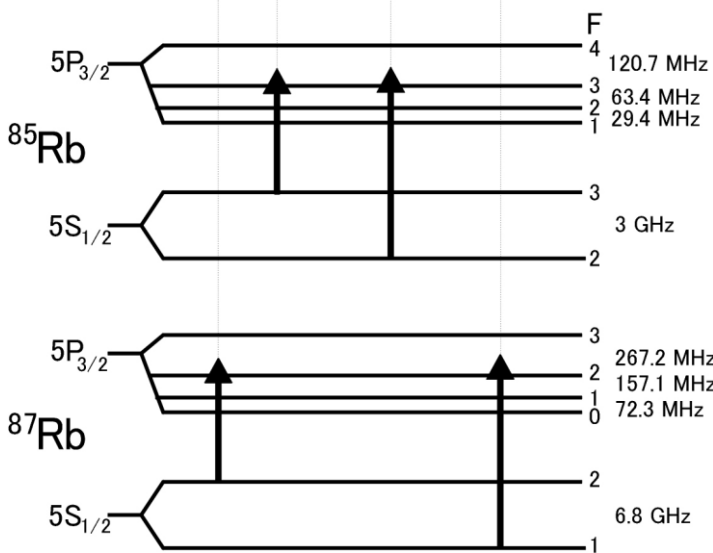
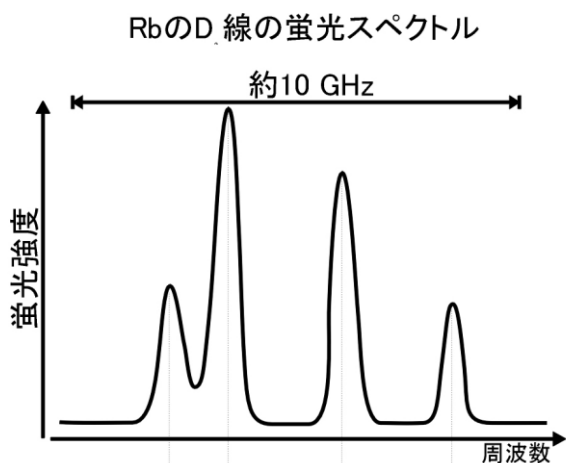
Rb セル: ルビジウム(Rb)原子を少量入れたガラスセル。自然界に安定に存在する ^{85}Rb と ^{87}Rb が天然存在比の割合で入っている。よく見るとキラキラした Rb が確認できるであろう。

光検出器(PD): 君たちがフォトダイオードを使って製作したもの。今回は蛍光と吸収の両スペクトルを測定するので図のように配置する。

デジタルオシロスコープ: アナログ入力信号をデジタル信号に変換して表示したり保存したりできるありがたい装置。画面を直接プリントアウトできるし、メモ리카ードに測定スペクトルを保存することもできる。

信号発生器: 英語では Function Generator。言葉通り、サイン波や矩形波など周期的信号を出力してくれる機器。今回は三角波またはノコギリ波を PZT コントローラの外部入力端子に入れて、自動的にレーザーの周波数がある範囲で掃引(スキャンとも言う)するのに使用する。信号発生器からデジタルオシロへの入力、信号発生器からの出力をトリガー信号として使用し、この信号と吸収・蛍光スペクトルを同期してオシロに表示させるためである。

- まず、レーザー周波数を Rb の共鳴周波数付近にしてピエゾコントローラつまみを回してレーザー周波数を変えてやり、セル内の Rb 原子が発光するのを IR ビューワで確認する。この時 ECLD が多モードで発振していたりすると極めて弱い蛍光しか見えない。ファブリ・ペロー干渉計の信号を見ながら、レーザーがちゃんと単モードで発振していることを確認する。
- ピエゾコントローラつまみを回すと、蛍光が強くなったり弱くなったりするのが確認できたら、吸収及び発光スペクトルを測定する。まず吸収スペクトルを測定しよう。ND



フィルターを数枚 PD の前に配置して、レーザーが Rb 原子にまったく吸収されないような条件下で、PD が飽和しないように入射レーザー光強度を調整する。そしてピエゾコントローラつまみを回すと、PD に入射するレーザー光強度の変化がオシロ上に現れて来るであろう。

吸収分光をすると、D₂ 線には 4 本の吸収スペクトルが現れて来る(左図参照)。残念ながら今回使用する ECLD は、一度にこれら 4 本のスペクトルを測定することはできない。4 本のスペクトルピークは約 10 GHz の周波数範囲にわたっているが、ECLD の周波数掃引可能範囲は数 GHz 程度しかないからである。温度や電流値を微調整して 4 本全てのピークを測定することになる。また、今までは手でピエゾコントローラつまみを回してレーザー周波数を変化させていたがこれでは線形的にレーザー周波数を変化させることは難しい。そこで信号発生器で発生させた三角波またはノコギリ波をピエゾコントローラ

の外部入力端子に入れて自動的にレーザー周波数を掃引できるようにせよ。また、信号発生器の信号を分け、デジタルオシロにも入れてトリガー信号とし、吸収スペクトルに同期させよ。

- 同様な作法で蛍光スペクトルも測定してみよう。原子からの蛍光は四方八方に出てくるので、レンズを使って効率的にその一部を集めてやらないと見えないと思う。レンズで集光した蛍光をうまく PD に入射させてやろう。スペクトルを取る手順・方法は上と同様である。
- 測定した 4 本のスペクトルを使って ^{85}Rb と ^{87}Rb の天然存在比を評価してみよう。文献では ^{85}Rb が 72.165%、 ^{87}Rb が 27.835% である。比を出す方法としてはスペクトルピークをガウス関数でフィットしてその面積を出し、比較するのが最もよいと思われるが各ピークの高さを比較する方法でもなんとかなるかもしれない。
- さらに実験をしたい人に 飽和吸収分光法
ここまでの実験を終わらせてしまった人は、(もし興味があれば、全部終わってなくてもいい) 超微細なエネルギー準位を見てみよう。但し、このままの実験方法では、超微細構造を見ることができない(何かのせいで隠れてしまっている。考えてみよう **ヒント** 気体が熱平衡状態になると持つ分布は??)。なのでどうすれば、この実験系を使って見ることができるだろうか?(例えばレーザーを対向させれば・・・)