

Lamb Shift の測定

2013 年 4 月 16 日

京都大学 理学部

石山 優貴 土橋 龍人 林野 竜也 吉田 健人

目次

1	実験の概要	3
1.1	実験の目的	3
1.2	理論	3
1.3	実験の原理	3
2	装置概要	4
3	セットアップ	9
3.1	水素圧	9
3.2	dissociator	9
3.3	電子銃	9
3.4	RF	10
3.5	電子増倍管	10
4	実験の工夫	11
4.1	charge up	11
4.2	陽イオン	11
4.3	dissociator	12
5	結果	13
5.1	加速電圧による変化	13
5.2	RF による変化	14
6	考察	18
6.1	結果に対する考察	18
6.2	今後の注意点	18

1 実験の概要

1.1 実験の目的

今年度も Lamb Shift の測定を目指した。

1.2 理論

Dirac の理論においては水素原子の 2S、2P のエネルギー準位は縮退している。しかし、QED によると摂動の高次の補正により縮退がとける。これによって生じるこのエネルギー準位の差が Lamb Shift である。

1.3 実験の原理

水素分子を熱したタングステンチューブ (dissociator) を通し水素原子にし、加速した電子を当て 2S に励起させる。2S 水素原子を同軸テーパ管に通し、電子増倍管で 2S 水素原子を検出する。

2S 軌道の水素原子は電子増倍管のプレートに衝突すると原子はプレートから 1S 軌道に電子を得て、2S 軌道の電子を出す。この電子が増幅され観測される。特定の周波数の RF を 2S 水素原子に当てると 2P 軌道に遷移する。2P 水素原子の寿命は 1.6 ns なので、遷移したときは増倍管に到達する前に 1S 水素原子に戻る。1S 水素原子は電子増倍管では観測されないため、RF によって水素原子が 2S から 2P に遷移した場合カウントレートを減少する。

したがって、RF の周波数を変え、カウントが減少する周波数を探す。この RF の周波数に対応したエネルギーが 2S と 2P のエネルギー準位差となる。

2 装置概要

ここでは使用した装置について述べる。

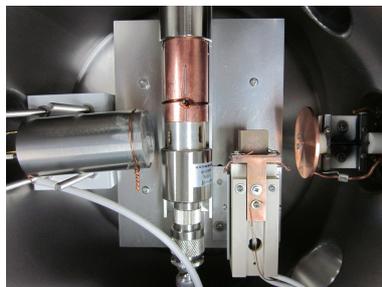


図1 装置内概観

ロータリーポンプ 大気圧から起動し、数 Pa 程度までの真空を引くために使用。

ターボポンプ 10 Pa 以下から起動し、 10^{-3} Pa 程度までの真空を引くために使用。モニターが毎秒700回転を示すまで待つ必要がある。

ピラニー真空計 型番 PT-1DA 大亜真空 (株) 製 1.0×10^5 Pa \sim 1.0×10^{-1} Pa まで測定可能。

コールドカソード真空計 型番 CT-1DA 大亜真空 (株) 製 およそ 1.0×10^{-1} Pa \sim 5.0×10^{-3} Pa の範囲で使用。カソードを焼きぎらないようつけたら直ぐに消す必要がある。



図2 真空計および真空ポンプ

dissociator ニラコ製 製品番号 W-463208 厚さ 0.015 mm タングステン箔を使用。内径 1.77 mmφ
長さ 16.2 mm



図3 dissociator 外観



図4 dissociator 拡大図。真ん中に見えるのがタン
グステンチューブ。温度を上げると青色のコーティ
ングが熱で蒸発する。

電子銃 ニラコ製 0.2 mmφ タングステン線を使用。接触抵抗を少なくするよう、導線をタングステン線
に何重にも巻きつけた。

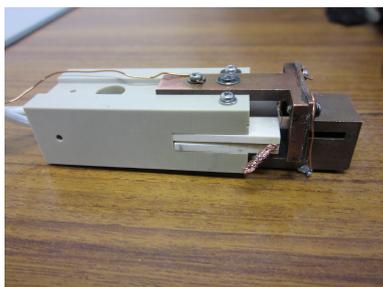


図5 電子銃外観。スリットに巻きつけた導線はグラ
ウンドをとるためである。

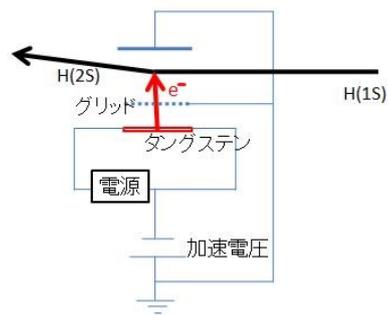


図6 電子銃概念図

同軸テーパ管 形式 TM-20D-NJ 日本高周波株式会社製 周波数領域 10~1000 MHz 断面積 2.5 cm²
全長 87.5 mm インピーダンスマッチングのため、50 Ω のターミネーションを付けて用いた。銅との接触が悪いと、RF が不安定になることがオシロで観測されたので、安定した RF を送るために銅と管の接触をアルミ箔を巻いて良くした。

RF generator 型番 Agilent N5183A 1000 MHz 9.3 dBm 程度で使用。

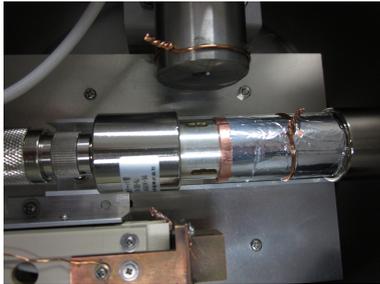


図7 テーパ管



図8 RF generator

グリッド ニラコ製 0.03×100×100 mm 100 mesh タングステン網を使用。正電圧を掛け、dissociator と電子銃から生じる陽イオンを除去する。

電子増倍管 型番 R5150-10 浜松ホトニクス製 最大動作真空度 1.33×10^{-2} Pa 8 mmφ



図9 増倍管とグリッド

電子銃電源 型番 PAD16-10L 2A 1V 程度で使用。電子銃のタングステン線を十分に加熱するために出力の大きな電源を用いた。

dissociator 電源 型番 PAD8-20L

加速電圧源 型番 TM0360-D22 1S 水素原子から 2S 水素原子 (準位差 10.2 eV) にするため、13.5 eV 前後で使用。

グリッド電圧源 型番 PMC35-2A 最大 10 V まで掛けたが、主に 2 V 程度で使用。

高圧電源 増倍管の暗電流が少なく、信号のゲインが大きい 2600 V 程度で使用。なおランタンに含まれるトリウムからの α 線観測の際は 2600 V、最大で 3000 V まで掛けた。

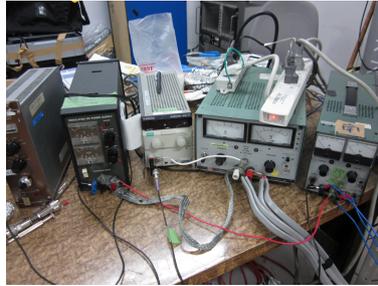


図 10 電源：右から順に、電子銃電源、dissociator 電源、グリッド電圧源、加速電圧源、高圧電源。全て同じグラウンドをとった。

アンプ 信号が小さいので、 10×10 の 2 回アンプを通した。

discriminator threshold 42 mV で主に使用。

Fan in/out discriminator と信号の零点を補正した。

scaler 信号のカウント数の計測。

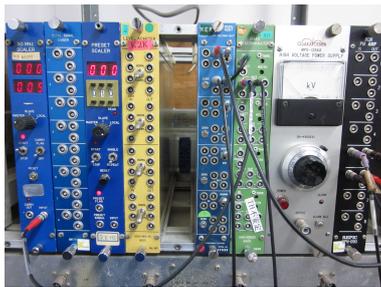


図 11 LEMO が挿入されている装置を使用。右から順に、アンプ、discriminator、Fan in/out、scaler。

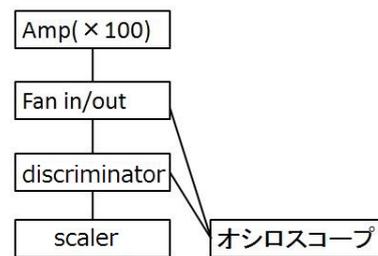


図 12 概念図

オシロスコープ 型番 TDS 3014B Tektronix 製 最初は DPO 2024、Tektronix 製の新しいオシロを使っていたが、本実験ではレンジが足りず古いオシロを使用した。



図 13 オシロ

3 セットアップ

3.1 水素圧

一切気体を入れずにターボポンプで真空を引くと最も低い時で 5×10^{-3} Pa であった。今回は水素を入れた時に 8×10^{-3} Pa 前後になるようにして実験を行った。

3.2 dissociator

色温度から目視で 2500 K となるように設定した。温度が低いと原子に分離せず、温度が高いとすぐに壊れたり、中性粒子が増えてしまう。^{†1}

3.3 電子銃

同様に 2500 K となるように設定した。温度が低いと電子が出ず、温度が高いと中性粒子が増えてしまう。また、13.45V の電圧をかけ加速させた。

また加速された電子が水素原子に当たると軌道が曲がる。Lamb の論文を元に計算すると 13 V で加速させ衝突させたときは約 6° ほど曲がる。これを元に電子増倍管の位置を調節した。^{†2} さらに、ずらした効果によって dissociator、電子銃からくる中性粒子の数が減った。図 14 は 13.45 V の電子を中性粒子に当たった時の中性粒子の角度分布である。中性粒子がほとんど曲がらないことを示している。

中性粒子の真横から電子が衝突するとして計算した。Cu の角度の広がり大きいのが、実際は電子銃から生じると考えられるので、同じ電子銃から生じる電子と衝突する確率は極端に低い。

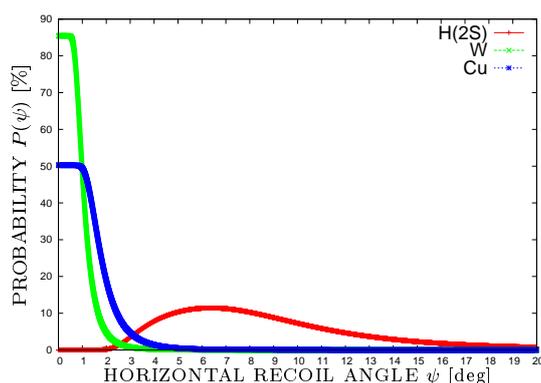


図 14 電子銃から反跳を受けた際の 2S 水素原子と中性粒子の W と Cu の角度分布

^{†1} [2],8 Dissociation of Molecular Hydrogen

^{†2} [2],10 Recoil Due to Bombardment, Appendix

3.4 RF

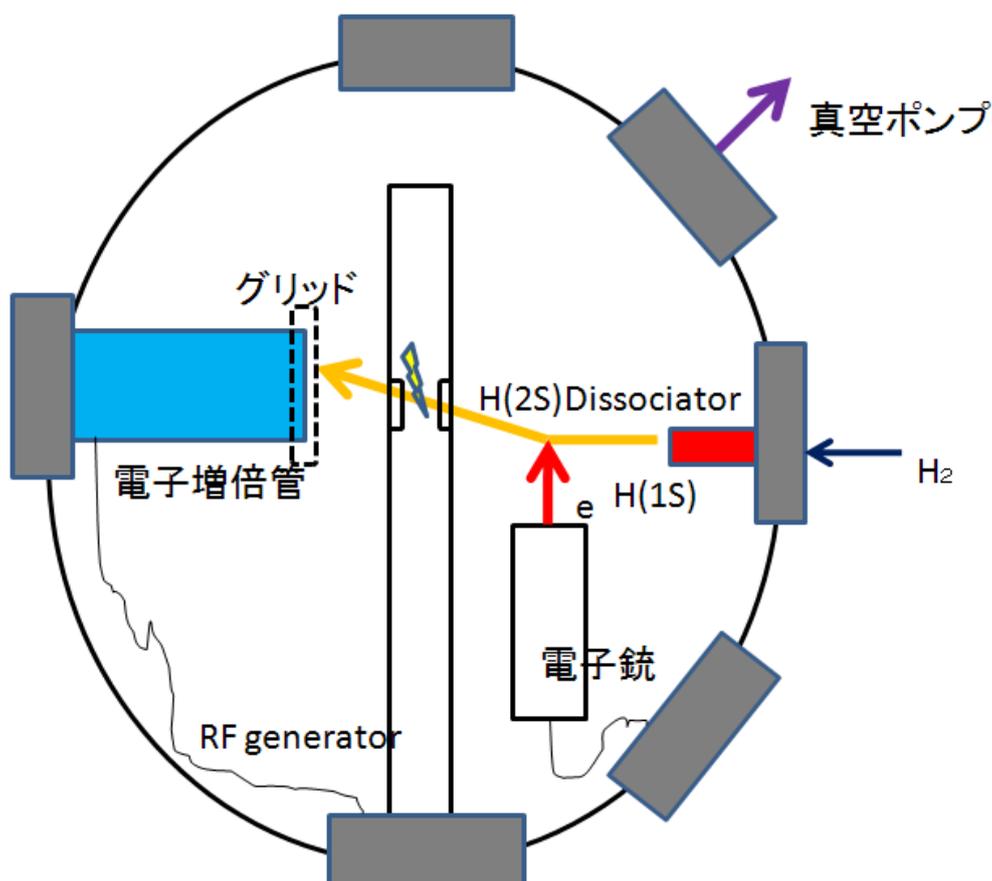
RF は強度を 9.30 dBm に設定して周波数を 1050 MHz 付近で変えて測定した。

$$(9.3 \text{ dBm} \simeq 8.5 \text{ mW} = 3.4 \text{ mW/cm}^2 \dagger^3 \times 2.5 \text{ cm}^2 \dagger^4)$$

3.5 電子増倍管

最終的には 2700 V で実験した。電圧が低いと信号が見えず高いと暗電流とおもわれる信号が増えてしまった。また、暗電流は気圧が高いと増える傾向にあった。8 × 10⁻³ Pa 前後で 2700 V で実験しているとはじめは暗電流は全く見えなかったが、時間が経つと (1 時間程度) 暗電流が発生してしまった。増倍管のプレートの温度が上がるのが原因と考えられる。

電子銃の考察を参考に下図のように設置した。



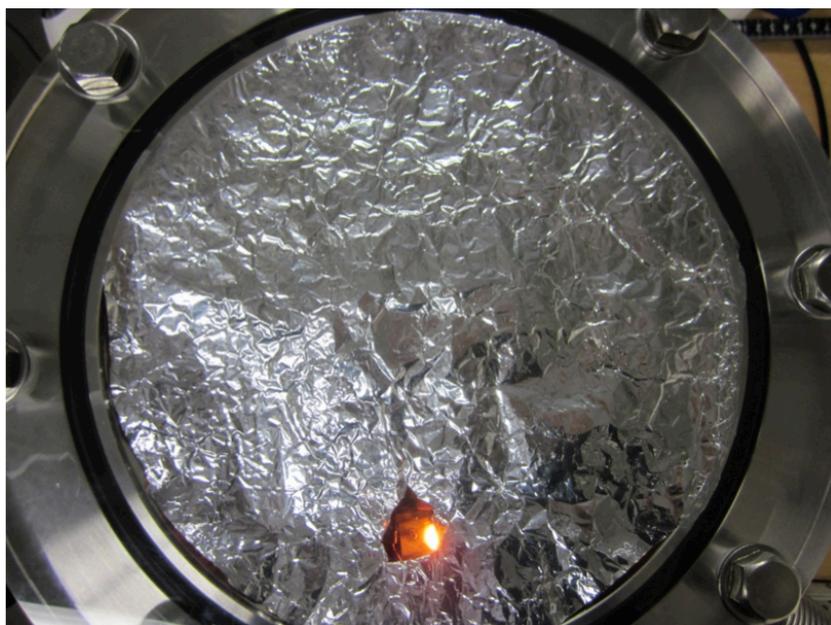
^{†3} [2] 13. Radiofrequency Power Required

^{†4} テーバ管の断面積

4 実験の工夫

4.1 charge up

実験中、chamber に触れるとバチッと静電気が流れるということが起こった。これは天板に用いたアクリル板が絶縁体であることにより charge up していたためと考えられる。チェンバー内の電場を安定化させるために、アルミ箔を挟んで charge up を防いだ。



4.2 陽イオン

今回の実験では電子増倍管にマイナスの high-voltage をかけたので、陽イオンと思われるバックグラウンドが大量にのるという問題が起こった。電子増倍管の前面にグリッドをとりつけ数 V の正の電圧をかけたところ、バックグラウンドの数は急激に減少した。その様子を下の表に示す。

表 グリッドによるカウント数の減少

グリッドの電圧 (V)	カウント数 (/30 s)
0	5139
0.3	147
0.6	26
1.0	6

また、電子銃の加速電圧 (グラウンドに対してマイナス) を上げることによっても信号の数が減るのを確認しており、このことから陽イオンが存在していたと考えられる。

4.3 dissociator

今回の実験で一番苦労したのは dissociator である。dissociator は薄いタングステン箔をくるくる巻いて筒状にして作成したのだが、タングステン箔は巻いている途中で壊れたり、巻くのに時間がかかった。更にはこれが数回の実験で亀裂が入り、壊れてしまうので何回も新たに巻きなおさなければならず、非常に手間と時間がかかった。

また先に述べたように、グリッドにプラスの電圧をかけることによって、陽イオンによるものと思われる信号は除去できたと考えられるが、dissociator の温度を高くするとグリッドの電圧を上げても消えないバックグラウンドが出現した。これは、電子増倍管にマイナスの high-voltage をかけているため陰イオンとも考えにくい。このことからバックグラウンドは中性粒子によるものだと予想した。ここで問題の中性粒子の候補として考えられるタングステン原子および銅原子の電子銃によって散乱される角度は水素原子に比べて小さいため、dissociator から飛び出した中性粒子がほぼ直進したとすると考えた。そこで中性粒子が dissociator から直進したとすると入らない位置に電子増倍管を配置すると信号の数は減少した。

また実験中に信号の数が時間変化するという問題が起こった。この原因は主に、dissociator の状態が安定していないことであると考えられる。実際、電子銃と RF generator を切って dissociator だけを加熱させて信号の数を計測すると時間変化がみられた。

これらのことから、できるだけゆっくりと dissociator を加熱していく、あまり高温にしすぎない、長時間加熱したままにしない等の対策をとったところある程度の改善は得られたが根本的な解決には至らなかった。

5 結果

5.1 加速電圧による変化

まず加速電圧を変化させ 2S 水素原子ができていないかをみた。ちなみに 1S と 2S のエネルギー差は 10.2 eV 程度である。

表 1 加速電圧を変化させたときのカウント数の変化

加速電圧 (V)	カウント数
0	1
5	11
10	27
13.5	41
15	46
20	31
25	28
30	26

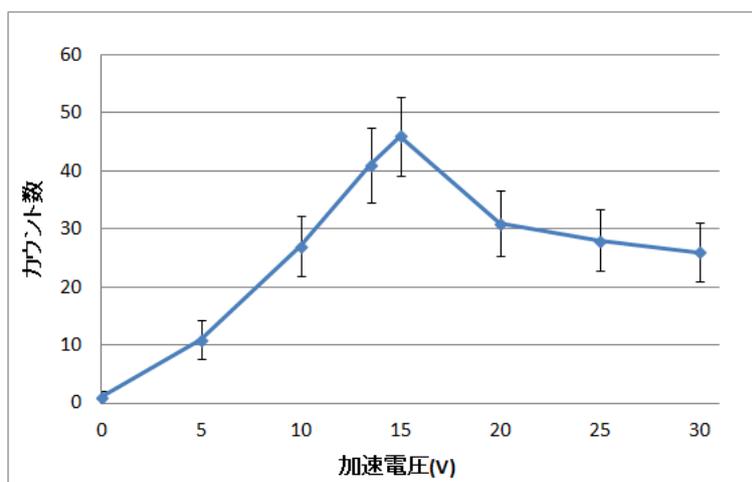


図 15 加速電圧を変化させたときの 10 秒間のカウント数の変化

5.2 RF による変化

次に RF をいれて観測を行った。

表 2 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化

RF frequency (MHz)	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目
1040	15	7	7	3
1045	16	9	5	1
1050	8	11	4	4
1055	13	5	2	3
1060	7	4	0	0
1065	12	7	10	3
1070	8	9	4	4

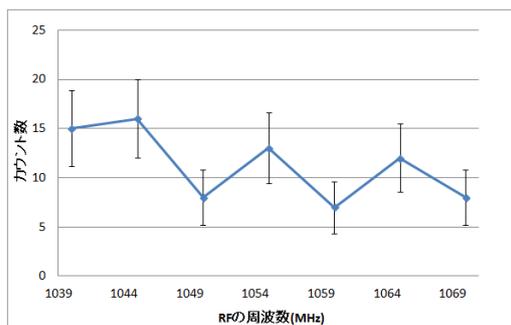


図 16 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (1 回目)

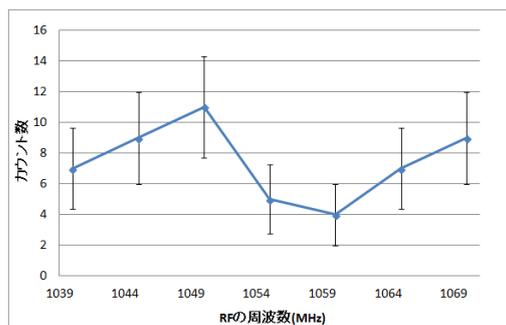


図 17 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (2 回目)

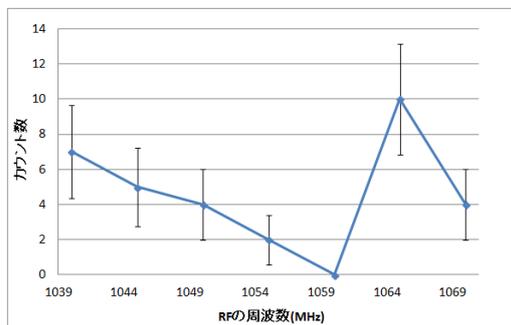


図 18 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (3 回目)

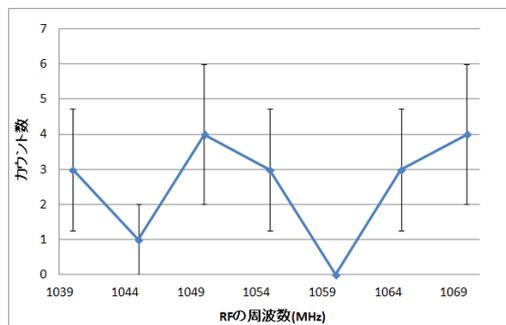


図 19 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (4 回目)

次に 1060 MHz 付近を中心に細かく周波数を刻んで調べた結果を示す。

表 3 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化

RF (MHz)	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目	10 回目
1050	4	3	0	1	3	1	3	8	6
1051	5	2	2	2	3	2	5	4	4
1052	5	1	2	4	1	5	2	7	4
1053	1	4	2	3	1	1	2	6	8
1054	3	0	2	2	3	4	4	6	6
1055	2	0	1	0	3	1	1	8	5
1056	1	3	0	5	3	4	3	4	10
1057	0	3	1	1	1	3	5	0	9
1058	2	4	1	3	3	4	4	5	5
1059	0	3	1	1	9	5	4	7	6
1060	1	2	2	2	1	1	2	2	11
1061	0	2	0	1	4	1	5	3	9
1062	0	1	1	1	2	3	5	2	5
1063	0	0	2	2	3	2	11	2	10
1064	5	2	1	2	2	5	3	5	2
1065	1	1	2	7	4	3	6	2	6

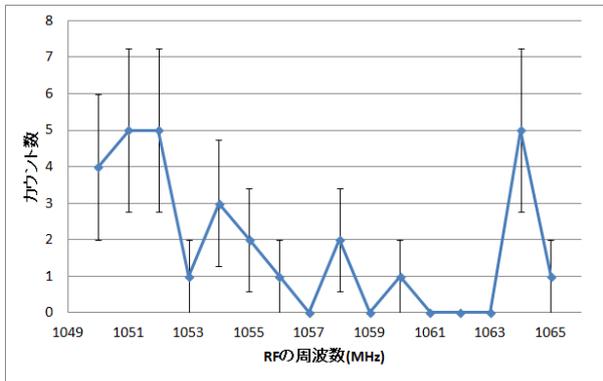


図 20 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (01 回目)

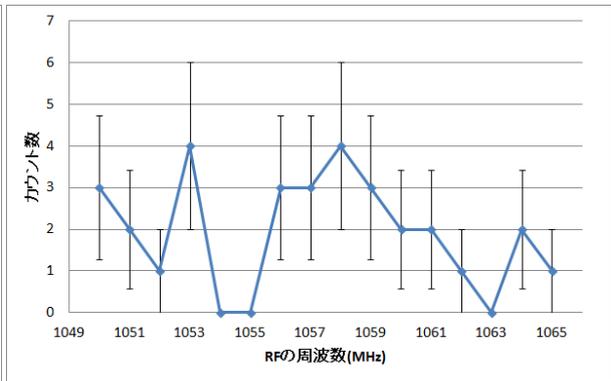


図 21 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (02 回目)

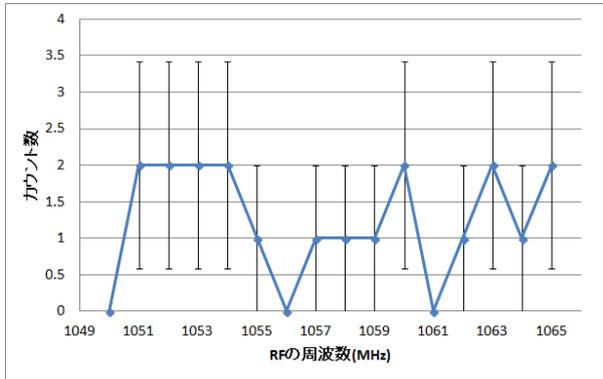


図 22 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (03 回目)

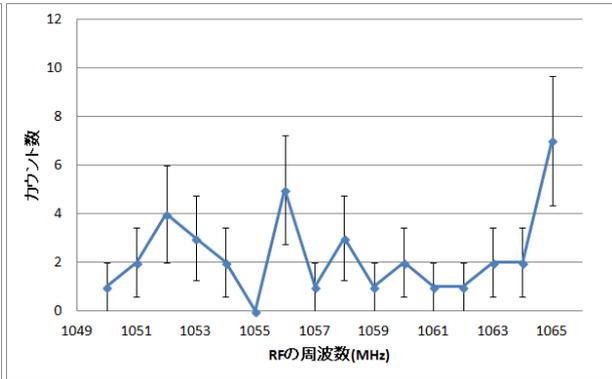


図 23 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (04 回目)

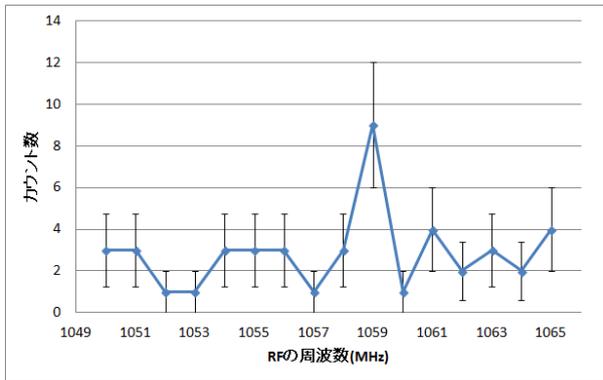


図 24 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (05 回目)

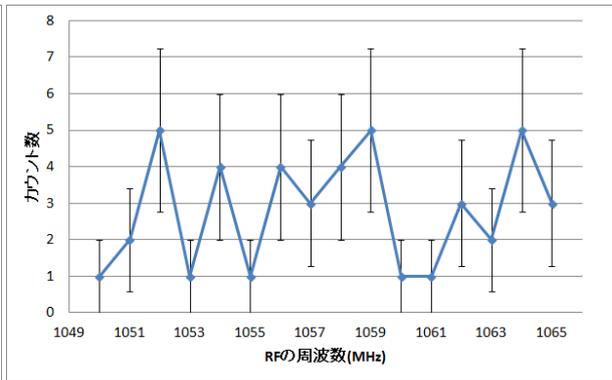


図 25 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (06 回目)

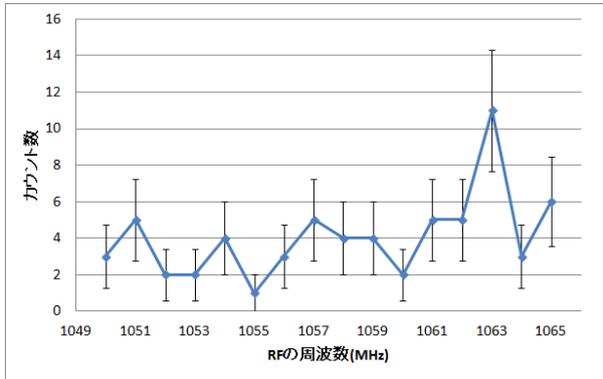


図 26 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (07 回目)

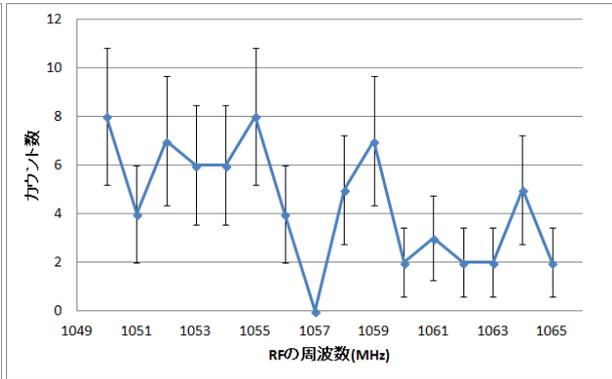


図 27 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (08 回目)

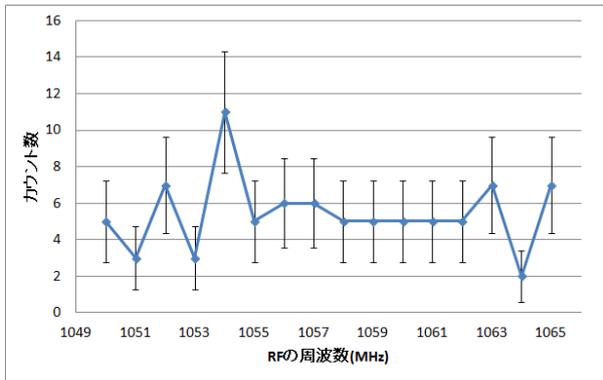


図 28 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (09 回目)

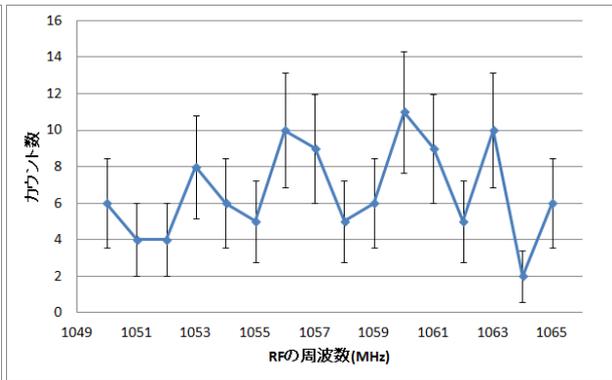


図 29 RF の周波数を変化させたときの一分間のカウント数の変化 (10 回目)

6 考察

6.1 結果に対する考察

まず加速電圧とカウント数のグラフであるが、一見 2S 水素原子ができてるように見える。しかし、再現性が取れなかったため実際は 2S 水素原子かどうかの確認ができていない。

そこで、同軸テーパ管を入れ RF をかけることにより、2S 水素原子の確認と、Lamb Shift の測定を同時に行うことにした。

RF を用いた実験では、測定前に暗電流が出ないことを確認した。しかし実験終了後、暗電流による信号が生じていた (dissociator, 電子銃の電源を落として測定 5 分で 2 3 カウントであった)。後半の実験では暗電流に見たい信号が埋もれてしまった可能性が高い。

5.2 の結果より 1060 MHz 付近が Lamb shift に対応する周波数と推測できるが、誤差が大きいののでさらなる実験により確認が必要。

6.2 今後の注意点

次の実験では以下のような点に注意して実験を進めるのがいいと思われる。

- dissociator について 壊れにくくて、安定なものかつ、温度がわかるようなものがよい。しかし、具体的な改造案はでなかった。
- 電子銃 2S 水素原子ができてるのが少ないと考えられるので、電子銃のタングステン線をより太いものにして電子をより多く出したほうが良い。
- RF の同軸テーパ管が、そもそも定格 1000 MHz までなので、1050 MHz 付近で出力すると周波数やパワーなどが正確に出力できているか疑問である。
- 同軸管における水素原子を通す穴が水素原子を通しにくい方向にずれている。電子を逆方向から当てるとビームを通しやすくなるはずである。
- 電子増倍管 暗電流が温度上昇により増加すると考えられる。2S 水素原子を増やしカウントレートをあげて短時間で測定するか、一回測定した後に電子増倍管を休める時間をとるなどの措置をとればよいのではないだろうか。
- 今回の実験では、discriminator の threshold を 42 mV として観測を行ったが、2S 水素原子が来た場合どの程度の大きさになるか定量的な評価ができていなかった。もし 2S 水素原子の信号がそれよりももっと大きければノイズの影響をもっと減らした観測ができるだろう。

謝辞

指導教員の市川先生、TRAの平木さん、TAの秋山さんに感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] WILLIS E. LAMB, JR. AND ROBERT C. RETHERFORD. 1947 "Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method" *Physical Review* ,72(3),241-243
- [2] WILLIS E. LAMB, JR. AND ROBERT C. RETHERFORD. 1950 "Fine Structure of the Hydrogen Atom. Part I" *The Physical Review* ,79(4),549-572
- [3] WILLIS E. LAMB, JR. AND ROBERT C. RETHERFORD. 1950 "Fine Structure of the Hydrogen Atom. Part II" *The Physical Review* ,88(2),222-232