

課題研究 P1 レポート

2012年4月26日

○ Lamb shift の測定

岡田直緯

上村尚平

森山健太

○ GM 計数管の作製

加茂直之

川名清晴

安原大貴

目次

1	Lamb Shift の測定	2
1.1	目的	2
1.2	原理	2
1.3	装置	3
1.4	実験の問題点	11
1.5	実験結果	14
1.6	考察	20
2	GM 計数管の作製	22
2.1	motivation	22
2.2	理論とセットアップ	22
2.3	実験の経過	26
2.4	結果	29
2.5	反省点	30
3	謝辞	31

1 Lamb Shift の測定

1.1 目的

—昨年、昨年に引き続き、Lamb Shift を観測することを目的とした。

1.2 原理

Lamb Shift とは、Dirac 理論によると縮退しているはずの水素原子の $2s_{1/2}$ 、 $2p_{1/2}$ 軌道の電子のエネルギー準位の差であり、量子電磁力学によって説明される。昨年のレポートでの計算によると、 $2s_{1/2}$ と $2p_{1/2}$ のエネルギー準位差は $4.35152 \times 10^{-5} \text{eV}$ である。これは電磁波 (RF) の周波数では 1052.19MHz に相当する。

まず、水素分子を熱して水素原子に分離し、さらに加速した電子を照射して $2s$ 軌道へ励起させた。次に、 $2s$ 軌道に励起させた水素原子を電子増倍管に入射させ、入射レートを測定した。

励起された水素原子は、電子増倍管のプレート (Cu-BaO) に衝突し、プレート内の電子が水素原子基底状態 ($1s$ 軌道) に入ることによって陰イオンとなるが、これは不安定なため $2s$ 軌道上の電子が水素原子核から放出され中性水素原子に戻る。このとき、放出された電子が増倍され検出される。

$2s$ 水素原子が電子増倍管に入る前に、 $2s$ 水素原子に対して適当な周波数の電磁波を照射することで $2p$ 軌道に遷移させる。 $2p$ 水素原子は不安定 (寿命 $1.6 \times 10^{-9} \text{sec}$) でプレートに衝突する前に基底状態に落ちるのでプレートに衝突しても電子を放出しない。従って、照射する電磁波の周波数を変えながら、単位時間当たりに電子増倍管に入る $2s$ 水素原子の数を測定すれば、 $2s-2p$ 間のエネルギーに相当する周波数の電磁波をかけたときにカウントレートは極小となる。このときの電磁波の周波数から $2s-2p$ 間のエネルギー差が分かる。

1.3 装置

1.3.1 チェンバー（全体の配置）

各装置の配置は以下の通りである。

水素ガスボンベから供給された水素分子は加熱した Dissociator のモリブデンチューブ内を通過することで、水素原子へ解離される。チューブを出た水素原子は電子銃から出る熱電子を当てられて $2s$ 水素原子へ励起される。励起された水素原子は RF Generator を接続した同軸管の中を通過し、電磁波 (RF) にさらされる。そのとき電磁波の周波数が $2s-2p$ に対応したものであれば、 $2s$ 水素原子は $2p$ 軌道へ遷移し、その後 $2p$ 水素原子は不安定なため、基底状態 $1s$ に落ちる。同軸管を通った水素原子を電子増倍管で検出した。

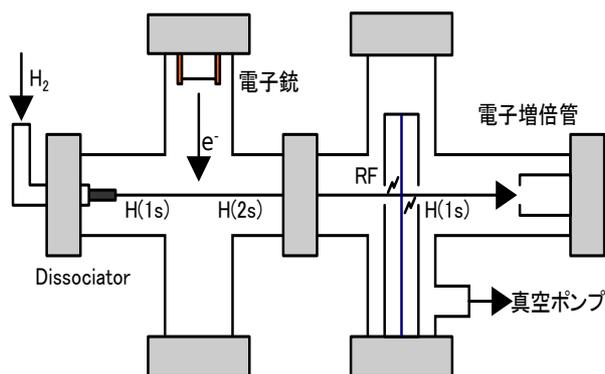


図 1 配置図

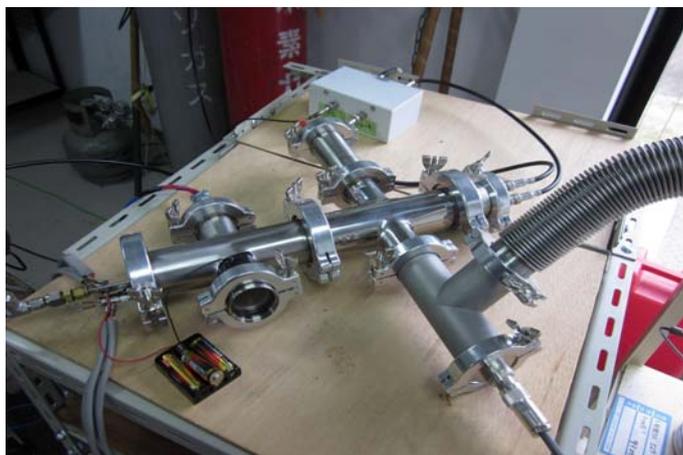


図 2 チェンバー

1.3.2 真空ポンプ

本実験では、水素のみの反応を見るため、また、電子増倍管の動作真空度が 1.33×10^{-2} Pa であるため、ロータリーポンプとターボ分子ポンプを用いて可能な限り真空に近づけた。

約 3 Pa まではロータリーポンプを用いて引き、さらにターボ分子ポンプを用いて $3 \sim 4 \times 10^{-4}$ Pa まで引いた。その後、水素分子を流して $2 \sim 8 \times 10^{-3}$ Pa の範囲で気圧が保たれるように調整した。真空計は 0.1 Pa 以上では冷陰極電離真空計を、0.01 Pa 未満ではピラニ真空計を使用した。

また、実験終了後、そのまま真空を破るとチェンバー内に酸素が流入し、高温になった Dissociator のモリブデンチューブや電子銃のタングステンワイヤーが酸化され、耐用期間が短くなる。それを避けるために実験終了後はチェンバー内に窒素分子を封入し、酸化を防いだ。



図3 真空ポンプ

1.3.3 電源

使用した電源はすべて同じコンセントへ接続した。

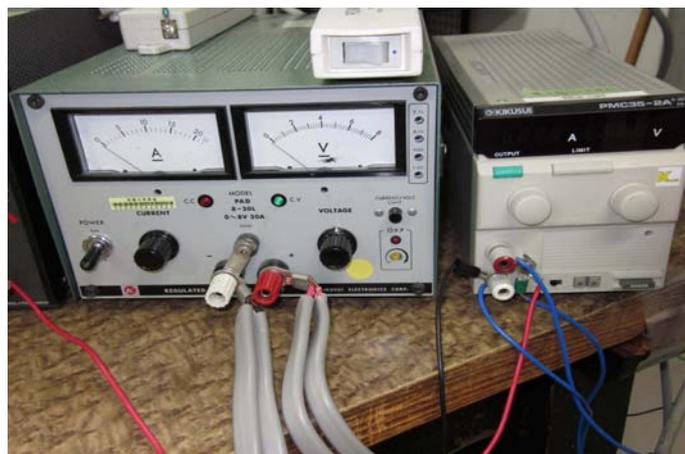


図 4 左：電源 1 Dissociator 加熱用，右：電源 2 電子銃加熱用



図 5 左：電源 4 電子増倍管用，右：電源 3 電子銃加速電圧用

1.3.4 Dissociator

Dissociator とは水素分子を熱によって水素原子に分離する装置である。

モリブデンリボンをねじって螺旋状にしたものをタングステンの板で銅線と繋ぎ、これに電流を流すことでモリブデンチューブを 2500K 程度まで加熱した。このモリブデンチューブの内部に水素分子を通すことで水素原子へ分離させた。

また、Dissociator から放出される電子が検出されることを防ぐために、乾電池 3 本を用いて Dissociator の電位をグラウンドに対して約 4.8V 高くなるように電圧をかけた。さらに、チェンバー内に中央に直径 1cm 程度の穴をあけ、タングステン製の金網を張ったプラスチックシートを置いた。

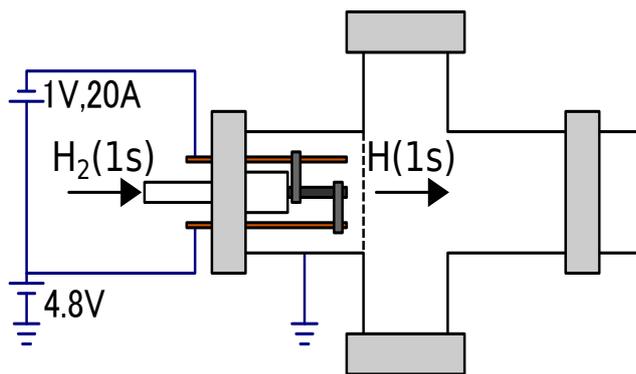


図 6 模式図 : Dissociator



図 7 Dissociator

1.3.5 電子銃

電子銃とは、水素原子を励起させるために加速した電子を照射する装置である。

電子の発生源にはタングステンワイヤー（直径 1mm）を使用した。また、ワイヤーから 1cm 程度はなれた場所にタングステン製の金網（ニラコ、 $\phi 0.03 \times 100 \times 100\text{mm}$, 100mesh）を配置した。

タングステンワイヤーには電源 2 を使用して約 1V, 1A の電流を流した。また、タングステンワイヤーの電位は、金網側に対して低電位にし、電子を加速するために、グラウンドに対して約 -10V になるように電源 3 を使用して電圧をかけた。

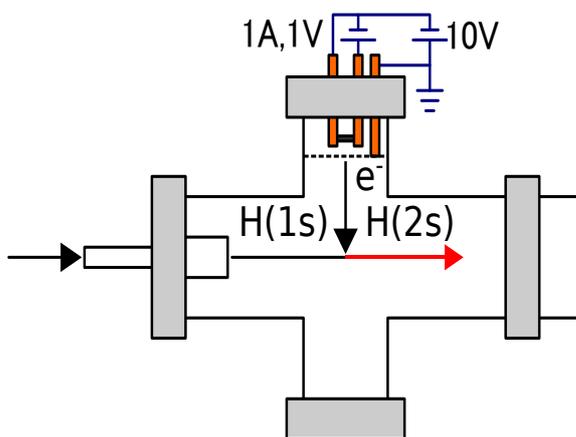


図 8 模式図：電子銃



図 9 電子銃

1.3.6 RF Generator

RF Generator とは，高周波を発生させるための電源である。

水素原子の通り道に穴を開けた同軸テーバ管を 2 つ繋げた同軸管を通し，そこに高周波を流した。同時管の末端には反射を防ぐために 50Ω の Terminator を接続した。

RF Generator で発生させる高周波の強度については，Lamb の原論文での計算から $3.4\text{mw}/\text{cm}^2$ とし，同軸管内の断面積が 2.5cm^2 であるので， $3.4 \times 2.5 \simeq 8.5\text{mw} \simeq 9.3\text{dBm}$ となる。

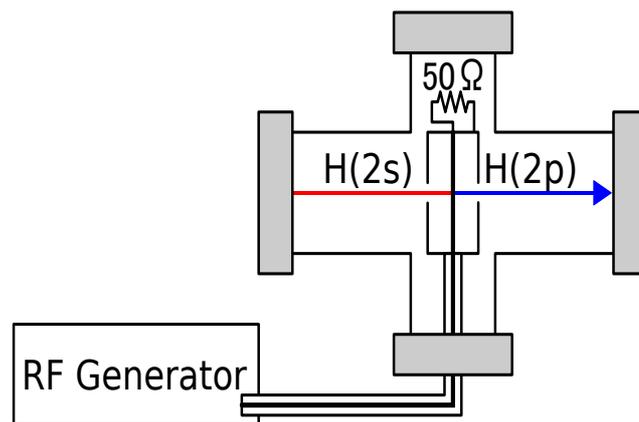


図 10 模式図：RF Generator



図 11 同軸管

1.3.7 検出器

水素原子の検出には電子増倍管を用いた。

励起された水素原子が金属に衝突すると光電効果のように電子が飛び出すことを利用する。ただし、通常は入射側を負の高電圧とするが、水素原子側に電場がかからないようにするため入射側をグラウンドとし、グラウンド側に 2500V の電圧をかけた。

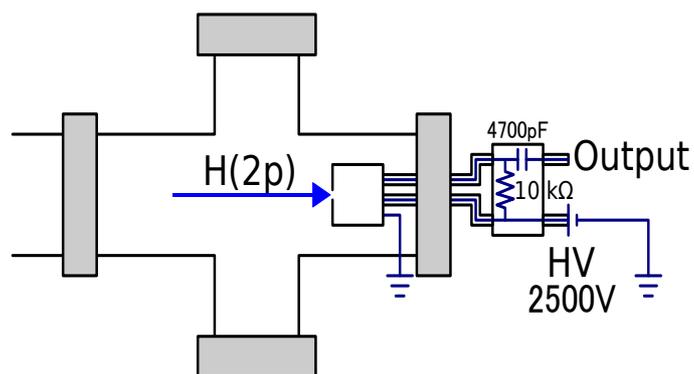


図 12 模式図：電子増倍管



図 13 電子増倍管

1.3.8 信号計測

増倍管からの信号は Amp を 2 回と押して 100 倍に増幅した後, Fan-in/out で零点を補正したものを Discriminator を用いてデジタル信号に変換し, Scaler で信号数を計測した。

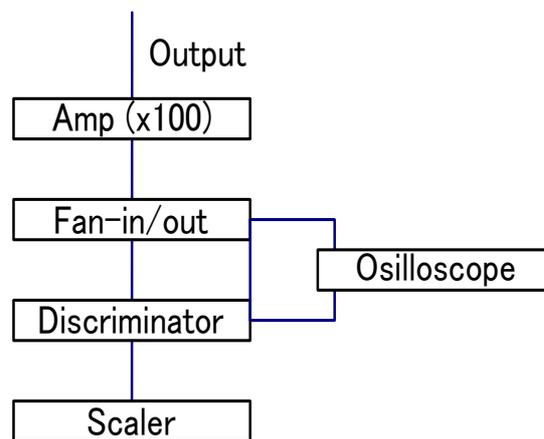


図 14 回路図：信号計測



図 15 NIM Module

1.4 実験の問題点

2011年のP1実験で障害となったものは主に次の二つの事実である。

- 状態が安定しないということ。
- 2S水素以外の信号が大量に引っかかるということ。

以下、この二つの問題について説明する。なおタングステンの融点などについては Wikipedia [6] を参考にした。

1.4.1 装置の不安定性

実験には再現性が絶対に必要であるが、今回の実験ではこの点が欠如していた。例えば、そのことを示すために図 16 を示しておく。

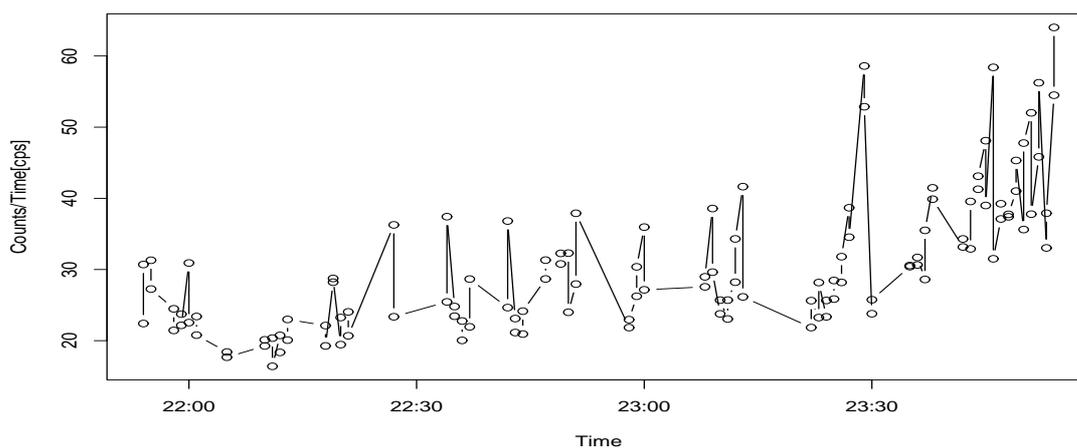


図 16 2時間ほど測定し続けたデータ。数分に一回程度の割合で十秒間の測定を二回ほど行っている。この間の状態の変化は電子銃の電流が 1.10 ~ 1.12[A] Dissociator の電流が 20.4 ~ 20.8[A] チェンバー内の気圧は $2.1\text{E}-3 \sim 2.3\text{E}-3$ [Pa]

このデータを見れば分かるように、カウント数が時間的に大きく変化している。

この問題の原因を私たちは最後まで特定することはできなかったが、いくつかの原因が考えられる。

この実験で一番あらわな問題は、装置の脆弱性。特に電子銃周りの問題であった。電子銃は見れば分かるが銅線にタングステンのワイヤーをまきつけただけ、という代物である。ワイヤー部分にタングステンをういているのはもちろん融点が高い (3695[K]) からである。電子銃から十分な電子を放出するためには少なくとも 2500K 程度の温度にする必要がある [1] が、その高温に銅線は堪えることが出来ない。実際、実験前半期には、銅線が溶けてタングステンのワイヤーがその中に溶接されるという事態が確認されていた。そのため実験後半期には銅線の径を太くした (0.5mm から 1mm) がそれでも少なくとも銅線の耐熱温度よりも高温の物体が巻きついているわけで、その負荷は大きかったと思われる。

それから実際の電子銃のセットアップにも問題があった。銅線に何重にも 0.1mm のタングステンワイヤーを巻き付け、それに P1 の実験室で電子銃様に使っていた Power Supply の限界電流 (2A) を流しても目に見えるほどの明るさにならない。しかしワイヤーを例えば一巻きだけしてから電流を流せば光る。

この事実から私達は、この電子銃はワイヤーの抵抗で光っているのではなくて、接触抵抗で発生する熱で光っているのだと考えられる。そのため何重にも巻いて接触抵抗を小さくすると光らない。

高温になったタングステンが銅を溶かし、その微小な変形が接触抵抗を変化させたのではないかと考えられる。

この問題を解決するためには次の二つの解決策が考えられる。

- より大電流を流して、接触抵抗に関係なく光るようにする。
- タングステンの抵抗を上げる。つまりワイヤーをもっと細くするか、あるいはワイヤーを長くする。

しかし多少電子銃が不安定といえども、図 16 の間に揺れている電流の値はせいぜい数 % 程度であり、そのくらいが問題になるのかと思うかもしれない。しかし実際はこれが問題になりうる。

表 1 は電子銃にどのくらい敏感に信号の数が反応するかを示している。図 17 をみると、ほとんど電流の値に対して指数関数的に上昇しているのが分かる。しかも実験で使う領域はこの上昇し始める領域に近いので、ほんの少しの出力の変化が大きなカウントの変化になりうる。

電子銃の電流 [A]	イベント数 [count/s]
1.40	1.50
1.45	4.32
1.50	17.7
1.55	270
1.60	6816

表 1 チェンバー内の気圧 $2.5E-3$ [Pa] 水素は入れている。Dissociator の電流 21.0 [A] の状態で、電子銃の電流だけを変化させた時のカウント数の変化

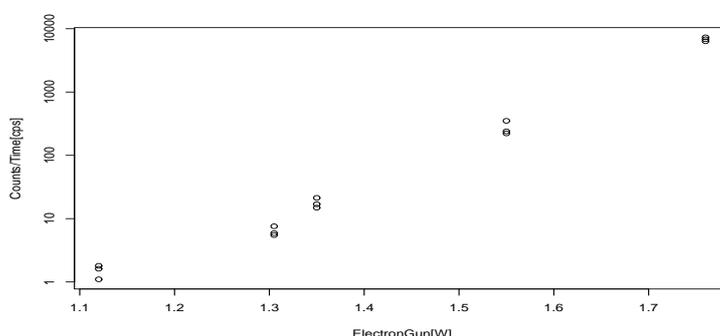


図 17 表 1 をグラフにしたもの。指数関数的に上昇しているのがわかる

以上のように電子銃の改良は本実験を行う上で非常に大きなウェイトを占める部分であると思う。

同じ原理で働いている Dissociator が比較的安定しているのは、糸ではなくてある程度広さのあるリボンでつながっており、接触が安定していること。それから電源の出力も大きい等が効いていると思われる。

1.4.2 ノイズ

今回の実験で見たいものは水素原子の励起状態の数であるが、もちろん特定の原子のスペクトルだけを正確に測定するような都合のよい装置は存在しない。私たちが用いたのは電子増倍管により水素を測定するという間接的なやり方である。電子増倍管はもともと荷電粒子の数を測定するための装置である。そのため本実験のセットアップにはひとつの致命的な問題が常に存在する。つまり、加熱されたタングステン線というきわめて優秀な電子源が内部に二つも（しかもそのうち一方は加速電圧つき）存在するという事実である。実際そこから来る信号がどの程度のものかを表 2 に示しておく。

disociator の電流 [A]	イベント数 [count/s]
0	2.2
19.6	5112.9

表 2 dissociator からくる信号の数。電子銃は切っている。チェンバー内の気圧は $4.3E-4$ [Pa] 水素はほぼ出ていない。つまりこの信号は Dissociator の熱電子である。

これでは水素を入れることで本当に信号が増えているのか減っているのかすらわからない。少なくとも本実験中に、この状態で水素をいれたとたん劇的に信号の数が増える、といったわかりやすい現象はなかった。それどころか水素を入れると信号が減少したことすらあった。

しかしこの問題は解決された。Dissociator の方から出る電子は Dissociator に印可 (4.73V) して、Dissociator の前に真ん中に穴をプラスチックにアルミ箔を張っただけのサブレッサーを置くことで、ほとんどすべてカットすることが出来た。その結果を表 3 に示しておく。

disociator の電流 [A]	イベント数 [count/s]
サブレッサーあり	0.2
サブレッサーなし	5112.9

表 3 サブレッサーをつけた状態での dissociator からくる信号の数と、そうでない場合。信号がほぼカットされていることが見て取れる。

この事実は一つの希望を私達に与えてくれる。電子銃にも同じような改良を施せば、少なくとも電子銃と Dissociator から放出される熱電子のノイズの大部分はカットされるのではないかと思えるからである。そうならば少なくとも、水素の量によってどの程度カウントが変化するのが分かり、本当に水素原子励起状態を見ているのかの判断が下せると思う。

1.5 実験結果

特に注目すべき 3 つの実験の数値結果を述べる。

1.5.1 電子銃の出力を変化させる

電子銃の出力（明るさ）を変化させ、カウント数の変化を調べた。他の値は次のように固定した。

- 電子銃加速電圧 10.16V
- Dissociator 28.0W
- Dissociator 電子減速電圧 4.72V（単三乾電池 3 本）
- RF 電源 OFF

そして、供給する水素を可能な限り減らした状態 ($3.4 \sim 3.1 \times 10^{-4} \text{Pa}$) と、水素をある程度供給した状態 ($6.6 \sim 7.1 \times 10^{-3} \text{Pa}$) に対して、電子銃の出力を変化させてカウント数を調べた。以下がその結果である。

気圧 [10^{-4}Pa]	出力 [W]	count [/秒]	気圧 [10^{-4}Pa]	出力 [W]	count [/秒]
3.4	1.200	19.5	66	1.200	11.7
3.4	1.200	16.5	66	1.200	14.4
3.4	1.200	17.9	66	1.200	16.0
3.3	1.188	10.6	66	1.188	9.7
3.3	1.188	10.3	66	1.188	10.9
3.3	1.188	10.2	66	1.188	10.5
3.3	1.176	5.3	66	1.176	9.9
3.3	1.176	6.4	66	1.176	8.9
3.3	1.176	5.5	66	1.176	9.0
3.3	1.164	3.8	66	1.164	7.5
3.3	1.164	5.3	66	1.164	9.2
3.3	1.164	3.7	66	1.164	8.7
3.1	1.152	2.3	66	1.152	7.9
3.1	1.152	2.8	66	1.152	8.2
3.1	1.152	2.1	66	1.152	8.1
3.1	1.140	0.7	66	1.140	6.3
3.1	1.140	1.1	66	1.140	6.4
3.1	1.140	1.2	66	1.140	5.1
3.1	1.128	0.6	66	1.128	4.7
3.1	1.128	0.4	66	1.128	5.1
3.1	1.128	0.6	66	1.128	5.6
			66	1.116	3.0
			66	1.116	4.9

気圧 [10^{-4} Pa]	出力 [W]	count [/秒]	気圧 [10^{-4} Pa]	出力 [W]	count [/秒]
			66	1.116	3.7
			71	1.080	2.0
			71	1.080	3.6
			71	1.080	1.0

これをグラフにしたものが図 18 である。

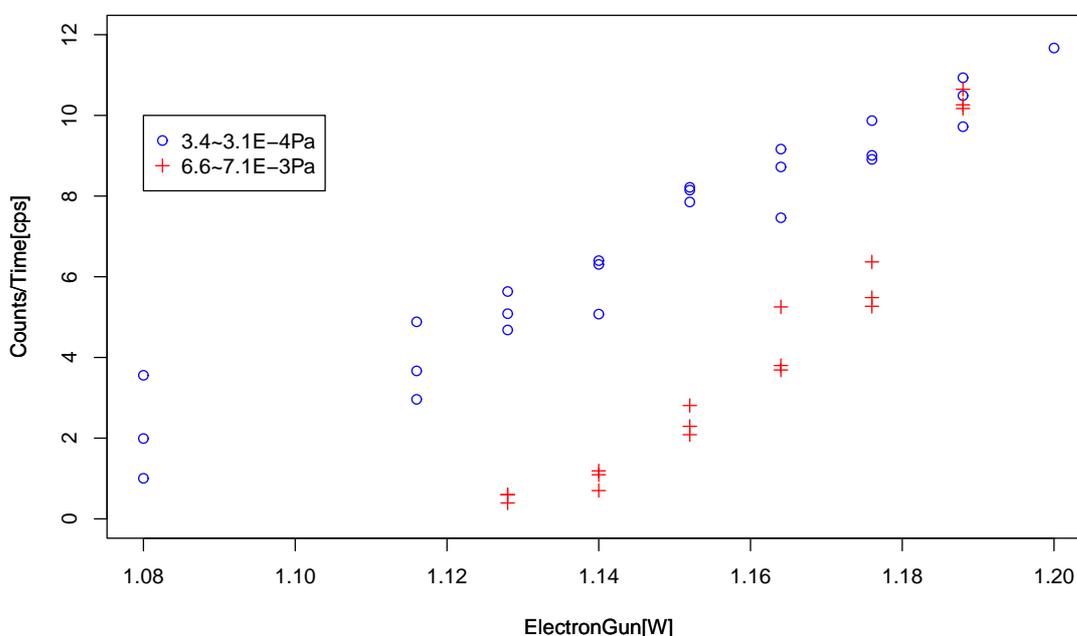


図 18 電子銃の出力を変化させた結果（横軸は出力 [W]、縦軸は count[/秒]）

1.5.2 電子銃の加速電圧を変化させる

電子銃の加速電圧を変化させ、カウント数の変化を調べた。他の値は次のように固定した。

- 電子銃出力 1.188W
- Dissociator 28.0W
- Dissociator 電子減速電圧 4.72V
- RF 電源 OFF

同じく、水素を可能な限り減らした状態 ($5.3 \sim 3.4 \times 10^{-4}$ Pa) と、水素をある程度供給した状態 ($7.8 \sim 7.9 \times 10^{-3}$ Pa) に対して、電子銃の出力を変化させてカウント数を調べた。以下がその結果である。

気圧 [10^{-4} Pa]	電圧 [V]	count [/秒]	気圧 [10^{-4} Pa]	電圧 [V]	count [/秒]
5.3	-0.48	0.3	78	-0.48	2.6
5.3	-0.48	0.5	78	-0.48	2.0
5.3	-0.48	0.9	78	-0.48	2.8
4.6	2.72	8.6	79	2.95	10.1
4.6	2.72	8.1	79	2.95	9.8
4.6	2.72	6.0	79	2.95	7.7
4.5	5.94	12.2	79	5.53	19.4
4.5	5.94	13.7	79	5.53	18.5
4.5	5.94	12.0	79	5.53	17.0
4.2	7.80	11.6	79	7.82	19.4
4.2	7.80	9.6	79	7.82	20.6
4.2	7.80	10.0	78	7.82	20.2
4.1	10.11	8.0	79	10.12	14.6
4.1	10.11	7.5	79	10.12	12.6
4.1	10.11	6.8	78	10.12	14.8
3.9	14.77	13.0	79	15.18	19.1
3.9	14.77	13.1	79	15.18	17.7
3.9	14.77	11.9	78	15.18	16.4
3.8	20.60	16.3	79	20.70	22.4
3.8	20.60	16.4	79	20.70	23.7
3.8	20.60	12.9	79	20.70	21.5
3.8	24.80	14.7	79	25.30	26.8
3.8	24.80	14.2	79	25.30	25.8
3.8	24.80	15.2	79	25.30	25.5
3.7	30.30	19.2	79	30.40	26.5
3.7	30.30	20.3	79	30.40	27.5
3.7	30.30	20.9	79	30.40	27.7
3.7	34.90	18.9	79	35.00	32.8
3.7	34.90	20.9	79	35.00	29.5
3.7	34.90	21.7	79	35.00	31.3
3.5	39.50	22.0	79	40.00	30.3
3.5	39.50	23.2	79	40.00	33.6
3.5	39.50	23.1	79	40.00	32.8
3.4	45.10	27.3	78	45.10	36.8
3.4	45.10	28.1	78	45.10	37.7
3.4	45.10	27.6	78	45.10	38.1
3.4	50.10	25.7	79	49.80	38.5

気圧 [10^{-4} Pa]	電圧 [V]	count [/秒]	気圧 [10^{-4} Pa]	電圧 [V]	count [/秒]
3.4	50.10	28.9	79	49.80	36.3
3.4	50.10	25.9	79	49.80	38.7

これをグラフにしたものが図 19 である。

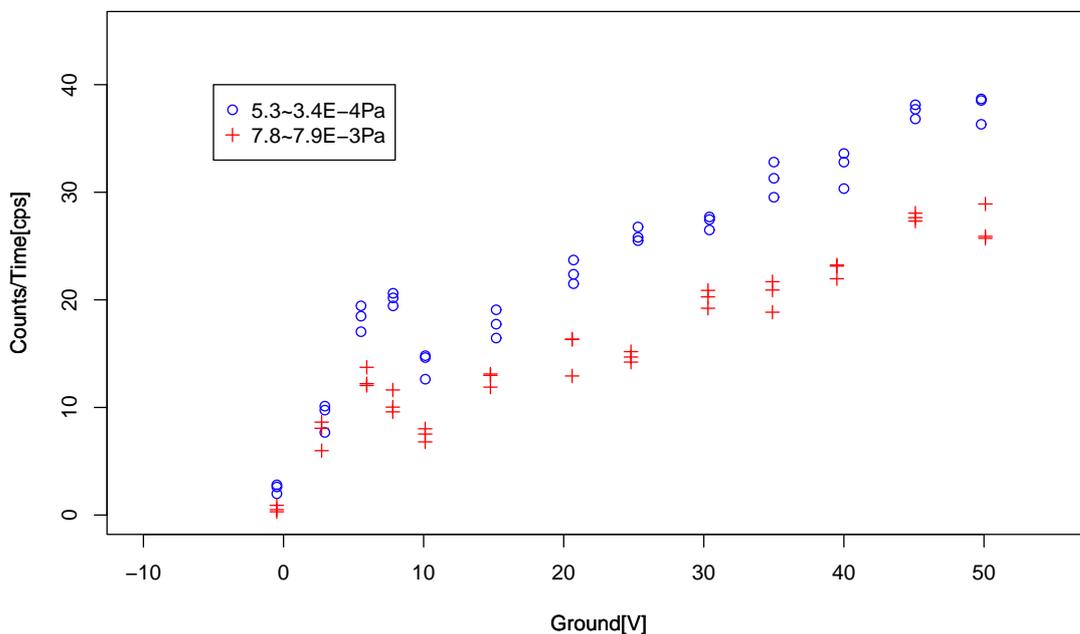


図 19 電子銃の加速電圧を変化させた結果（横軸は電圧 [V]、縦軸は count[/秒]）

1.5.3 周波数を変化させる

RF の入力の周波数を変えることによる変化を調べた。固定した値は次の通り。

- 電子銃 1.44W
- 電子銃加速電圧 10V
- Dissociator 27.1 ~ 29.1W（この日は安定が悪かったが、減速電圧があるので影響は少ないと思われる）
- Dissociator 電子減速電圧 4.73V
- 水素圧 $2.2 \sim 2.1 \times 10^{-3}$ Pa
- RF 出力 9.31dBm

後述するように、周波数の変化がカウント数に与える影響はほとんど見受けられず、単に時間経過に従ってカウント数が増加するように思われたので、データには周波数ごとのカウント数に加えて、測定した時刻をそれ

それ記す。

周波数 [MHz]	測定時刻	count [/秒]	周波数 [MHz]	測定時刻	count [/秒]	周波数 [MHz]	測定時刻	count [/秒]
OFF	20:01	75.0	1046	20:19	125.3	1064	20:37	182.5
OFF	20:01	77.7	1047	20:20	136.5	1065	20:38	179.3
OFF	20:01	80.3	1047	20:20	116.2	1065	20:38	169.1
1030	20:02	79.9	1047	20:20	105.5	1065	20:38	162.3
1030	20:02	79.1	1048	20:21	103.8	1066	20:39	152.1
1030	20:02	78.7	1048	20:21	95.8	1066	20:39	150.0
1031	20:04	83.6	1048	20:21	101.1	1066	20:39	152.1
1031	20:04	78.1	1049	20:22	102.5	1067	20:40	158.3
1031	20:04	83.9	1049	20:22	114.2	1067	20:40	170.9
1032	20:05	96.2	1049	20:22	130.6	1067	20:40	168.7
1032	20:05	96.0	1050	20:23	113.5	1068	20:41	175.2
1032	20:05	86.0	1050	20:23	106.4	1068	20:41	174.5
1033	20:07	86.4	1050	20:23	107.2	1068	20:41	181.6
1033	20:07	82.4	1051	20:24	106.7	1069	20:42	188.4
1033	20:07	91.4	1051	20:24	104.3	1069	20:42	187.0
1034	20:08	87.0	1051	20:24	105.7	1069	20:42	190.4
1034	20:08	91.4	1052	20:25	101.2	1070	20:43	195.5
1034	20:08	132.5	1052	20:25	110.2	1070	20:43	201.4
1035	20:09	113.4	1052	20:25	104.4	1070	20:43	199.6
1035	20:09	85.8	1053	20:26	104.0	1071	20:44	229.2
1035	20:09	78.7	1053	20:26	110.8	1071	20:44	251.7
1036	20:10	88.3	1053	20:26	104.5	1071	20:44	248.6
1036	20:10	82.8	1054	20:27	119.4	1072	20:45	246.4
1036	20:10	85.0	1054	20:27	129.9	1072	20:45	242.2
1037	20:11	90.4	1054	20:27	118.7	1072	20:45	241.9
1037	20:11	91.9	1055	20:28	116.8	1073	20:46	245.0
1037	20:11	93.9	1055	20:28	118.0	1073	20:46	247.1
1038	20:12	93.3	1056	20:29	115.7	1073	20:46	238.2
1038	20:12	89.6	1056	20:29	120.6	1074	20:47	245.7
1038	20:12	89.9	1056	20:29	118.2	1074	20:47	249.2
1039	20:13	94.7	1057	20:30	120.6	1074	20:47	241.4
1039	20:13	89.9	1057	20:30	120.1	1075	20:48	259.1
1039	20:13	99.2	1057	20:30	125.1	1075	20:48	243.2
1040	20:14	93.6	1058	20:31	126.5	1075	20:48	247.4
1040	20:14	94.8	1058	20:31	125.6	1076	20:49	248.9

周波数 [MHz]	測定時刻	count [/秒]	周波数 [MHz]	測定時刻	count [/秒]	周波数 [MHz]	測定時刻	count [/秒]
1040	20:14	86.7	1058	20:31	131.7	1076	20:49	254.8
1041	20:15	91.6	1059	20:32	125.4	1076	20:49	251.1
1041	20:15	96.1	1059	20:32	152.8	1077	20:50	267.3
1041	20:15	97.1	1059	20:32	173.5	1077	20:50	268.2
1042	20:16	92.0	1060	20:33	160.1	1077	20:50	283.9
1042	20:16	90.6	1060	20:33	148.6	1078	20:51	280.0
1042	20:16	94.0	1060	20:33	139.2	1078	20:51	287.0
1043	20:17	95.4	1061	20:34	132.9	1078	20:51	292.3
1043	20:17	93.5	1061	20:34	136.2	1079	20:52	293.0
1043	20:17	92.0	1061	20:34	135.1	1079	20:52	299.4
1044	20:18	103.9	1062	20:35	134.1	1079	20:52	319.6
1044	20:18	97.5	1062	20:35	131.5	1080	20:53	321.6
1044	20:18	98.0	1062	20:35	135.6	1080	20:53	335.5
1045	20:18	95.0	1063	20:36	134.6	1080	20:53	342.7
1045	20:18	105.2	1063	20:36	157.2	OFF	20:54	346.5
1045	20:18	99.6	1063	20:36	136.2	OFF	20:54	363.5
1046	20:19	96.8	1064	20:37	137.4	OFF	20:54	364.1
1046	20:19	108.3	1064	20:37	153.1			

これをグラフにしたものが図 20 である。図では周波数は表示されていない。縦に並んだ3つの点（同時刻）は、それぞれ同じ周波数である。まず最も左にあるものが RF を OFF にした計測であり、次のものは 1030MHz での値を表している。以降はその次が 1031MHz と 1MHz ずつ増えていき、右から二番目のものが 1080MHz での値、そして一番右にあるものは、再び RF を OFF にして計った値である。

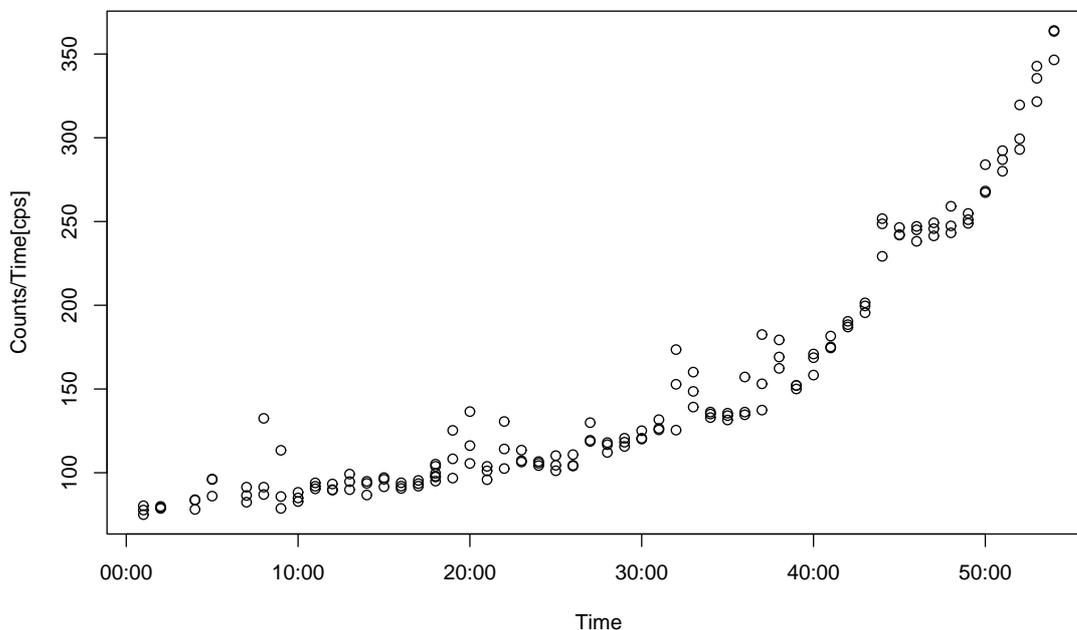


図 20 RF の周波数時間を追って変化させた結果 (横軸は時刻、縦軸は count[/秒])

1.6 考察

まず、電子銃の強さを変化させて得られた結果では、水素を可能な限り断って行った計測でも、ある程度のカウント数が得られた。この結果から、実際に見たい水素の信号以外に、電子銃からの電子がまだ雑音として入っているのではないかと疑われる。さらに、電子銃の出力が大きい領域では、水素が少ない状態より多い状態のほうがカウントが少なくなっている。このことから、むしろこの領域では、電子の信号のほうが主立って見えており、水素の励起に用いられて電子が減少した分、信号の数が減ったのではないかとと思われる。ところが、そうすると水素の信号が増えて埋め合わせても良いはずだが、そうはなっていない。このことは、次に述べる2つの結果と合わせて、電子の雑音が入ってしまうばかりか、肝心の励起した水素は信号としてほとんど観測されていない、という本末転倒な状態を示唆している。

次に、電子銃の加速電圧を変化させた実験では、いずれの場合も 10V ほどのところで一度カウント数が減少している。10V というのは水素の励起に必要な電圧なので、これも上と同様に、電子の信号ばかりが見えていて、水素は見えておらず、励起のために電子がうまく使われたので、10V のところで信号が減った、ということを示している。しかし、2S 状態の水素を作ることはできているという強い証拠なので、喜ばしい点であるとも言える。

最後に、RF を変化させた場合では、初めと終わりがいずれも RF を OFF にしたカウント数なので、全体が少しずつ増加していることは RF には関わりがなく、ほかの機器の具合である。しかし、それでも、水素がきちんと RF 内の狙った起動を通過しているのなら、Lamb シフトの 1060Mhz (22:30 あたり) で信号の数が

減ってもよさそうなものだが、この結果からそれは判別できなかった。

以上のことから、本実験で Lamb シフトを観測することは、電子銃からの電子の雑音が大きすぎること、また励起した水素が RF を通って望みどおりの経路を進んでくれなかったと思われること、という理由から失敗に終わっていると考えられる。

2 GM 計数管の作製

2.1 motivation

昨年度末の原発事故以来、放射線について聞く機会が増えた。そこで今年は比較的簡単な構造の放射線量計測器である Geiger-Muller 計数管 (以下 GM 計数管) を自作してみることにした。製作開始当初はすぐに完成させて Lumb Shift の実験に取り掛かる算段だったが、放電が起こらない、ノイズが大きすぎて信号を読み取れないといった問題が多く立ち上がり、思いのほか手間取ったため、本実験と並行して GM 計数管の完成を目指し、一年にわたって製作を続けることになった。

2.2 理論とセットアップ

2.2.1 GM 計数管の構造

GM 計数管本体は、電離しやすいガスを詰めた導体の筒の中心に高電圧をかけられた芯線を通しただけの簡単な構造をしている。

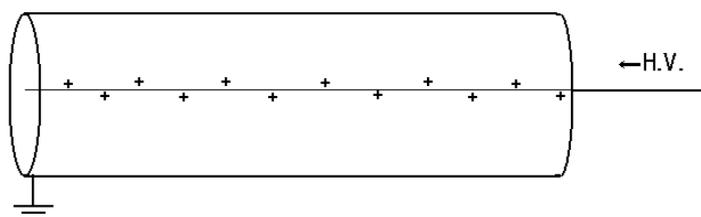


図 21 GM 計数管本体の構造

GM 計数管に放射線が入射すると、中の分子が電離され、生じた電子が筒の中の電場により加速されて芯線に向かって移動する。加速された電子は芯線に到達するまでに他の分子を電離し、そこで生じた電子も電場による加速を受ける。これが繰り返されて次々に電離が起こり、電子雪崩が生じる。電子とイオンの再結合の際に生じる光子 (紫外線) によっても電離は生じる。光子は自由行程が長いので、電子雪崩は管内全体で起こる。

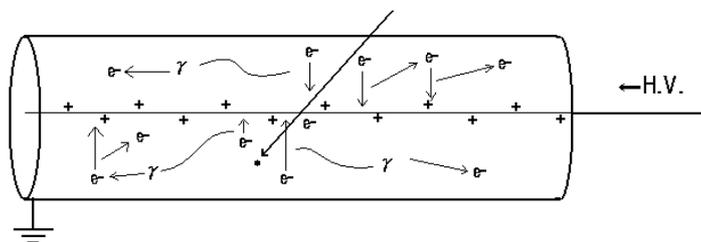


図 22 計数管内で起こる放電の模式図

電子なだれによって生じた大量の自由電子は短時間の内に芯線に流れ込み、短いパルス(数~数十 μ s程度)として放出される。放射線の入射一回につき一つのパルスが生じるため、パルスを数えて放射線量を測る。

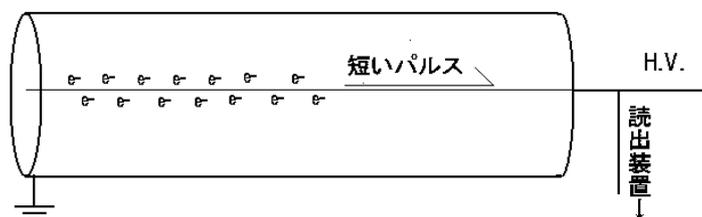


図 23 短いパルスとして放出される電子

GM 計数管は荷電粒子によって起こる放電を利用しており、主に α 線を計測する。 β 線が透過出来るような薄い窓を取り付ければ β 線も計測される。中性であるが γ 線も計測される。 γ 線がガス分子に衝突して直接電離を起こすことはめったにないが、光電効果により生じた電子が計数管内で放電を起こす。また、計数管内壁にホウ素を塗布することで中性子線の線量も計測できる。その際には中性子線とホウ素の原子核が反応して生じた α 粒子が放電を起こす。

補足：GM 計数管と比例計数管 放射線が起こす放電を利用する計数管には、GM 計数管の他に比例計数管というものがある。構造は両者とも同じだが、比例計数管は GM 計数管より印加電圧が小さく、電場による電子の加速が GM 計数管より緩やかであるため、放電は計数管内全体ではなく放射線の飛跡周辺でのみ起こり、パルスも GM 計数管から放出されるものに比べて小さい(\sim mV)。放射線の線量計測には GM 計数管が用いられる。その代わりに比例計数管内の電子なだれに寄与する自由電子の個数は、放射線と分子の衝突で生じた最初の自由電子の個数に比例し、即ちパルスの波高が入射する放射線の持つエネルギーに比例する。この特徴のために、放射線のエネルギーを測定するのに比例計数管が用いられる。今回の実験中、一度だけ比較的小さな電圧下(1500V程度)で非常に小さなパルスを観測したことがあった。おそらく比例係数管として働いていたものと考えられる。

2.2.2 セットアップ

製作開始時に作った GM 計数管本体 計数管本体は、実験開始時にはスチール缶やプラスチックケースの内側にアルミを敷いた筒に直径 0.3mm ほどの導線を張ったものを用いていた。電離ガスとしては、空気に含まれる窒素分子でよいだろうと考えていた。電離しやすい分子ばかりを計数管内に詰めていると連続放電が頻繁に起こってしまうので、電子と結び付きやすい有機ガスやハロゲンガスを少量混ぜる必要がある。このクエンチ用ガス(quenching gas)としては市販のライターからブタンガスを取り出して用いた。



図 24 実験の初期段階で作った計数管

Cockcroft-Walton 型昇圧回路 GM 計数管は、中心に張られた芯線に高電圧をかける必要がある。この高電圧を得るためにコッククロフト・ウォルトン回路を使用することにした。以下CW回路とする。CW回路は、コンデンサーとダイオードを使った単純な昇圧回路であり、コッククロフトとウォルトンはこの回路を利用することで、当時としては驚異的な 70 万ボルトの直流電圧を発生させ、これによる粒子加速器の実験の成果によって二人はノーベル物理学賞を得た。

原理的にはコンデンサーの数を増やせば、入力電圧を何倍にでも昇圧することができる。また、それぞれのコンデンサーにかかる電圧は最大でも、入力電圧の二倍であり、耐圧の高い特殊な回路素子を使う必要はない。

CW回路は以下のような回路である。出力電圧は、交流電源の電圧×コンデンサーの数であ。ダイオードを

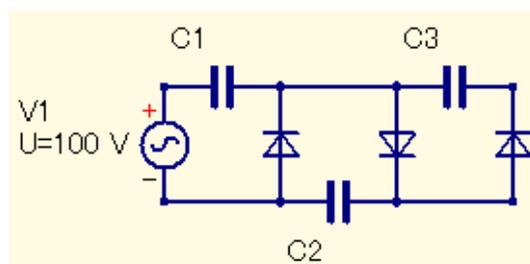


図 25 三倍電圧の CW 回路

向きを変えれば、降圧回路としても使うことができる。また交流電圧を直流電圧として出力するので、AC-DC コンバータの役割も果たす。

この回路によって、昇圧される仕組みを簡単に説明する。交流電源の電圧が正と負で入れ替わるたびに、電流の流れる向きが変化するので、電圧が正になった時、負になった時で順番に、コンデンサーにどのように電荷がたまっていくかを考えればよい。時定数が十分に短いと考えれば、交流電源の正負が入れ替わるまでに、コンデンサーの電荷量は平衡状態に達するはずなので、単純に一定周期で正と負が入れ替える直流電源をつないでいるものとして考えていい。このような仮定をおけば、あとは簡単な計算で、各位相での電荷のたまり方が求まる。具体的な計算は省略するが、例として交流 100V でコンデンサーを三個つなげた場合の各コンデンサーの電圧の時間変化をグラフで表す。横軸の 1 目盛りは交流の周期の半分の時間を示す。

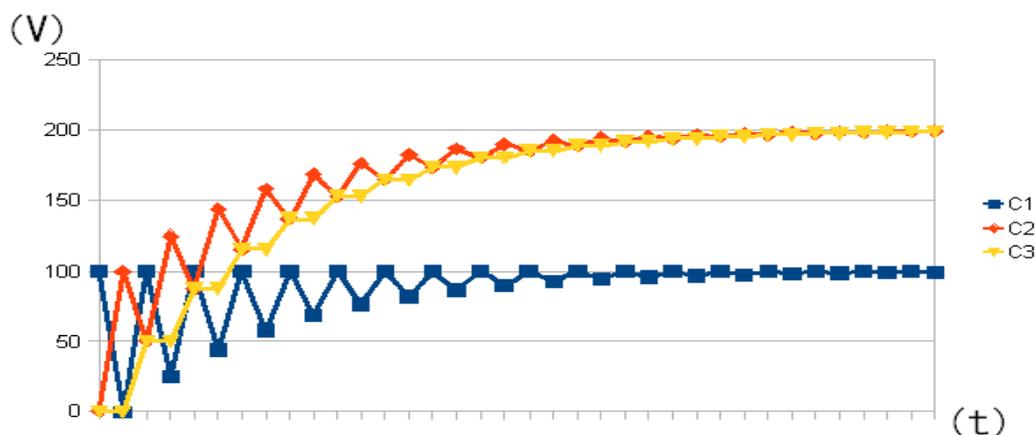


図 26 CW 回路の時間と各コンデンサーの電圧の関係

おおよそ横軸 30 程度で収束してるため、関西の交流電源の周波数 60Hz の場合、0.25 秒程度で最大電圧に達する。また、一番左端のコンデンサーには電源電圧の一倍、それ以外のコンデンサーには二倍の電圧が最大でかかるため、コンデンサーの耐圧は電源電圧の二倍あれば十分である。

以下の画像が実際に作成した回路である。コンデンサーの数は 18 個で、交流電源の 18 倍の電圧を出力できる。

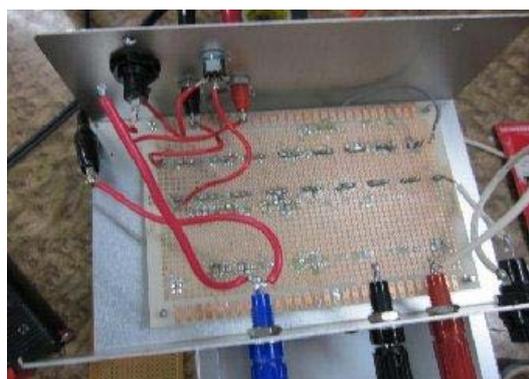


図 27 製作した CW 回路の写真

交流電源として、家庭用の AC 電源を用いた。これにより約 2000 V の電圧を出力することに成功した。

計数装置 実験開始時には計数管から届くパルス数を数えて計数パネルに放射線の入射回数を表示することを目指しており、実際に薄型電卓を改造して短い時間電流が流れるたびにカウントが一つずつ増える表示板も作っていた。計数管からのパルスが確認された暁にはこれを昇圧回路とつないで線量を数えるつもりであったが結局使われず、実際の実験においてはパルス読み出しにはオシロスコープを使って放電により生じた波形をそのまま見ていた。読み出し用の装置にいきなり大きな電流が流れ込んで機器を故障させるのを防ぐために、以下のように抵抗とコンデンサを挟んだ。抵抗値とキャパシタンスは回路の時定数がパルスを読み取るのに最適となるよう選んだ(後述)。

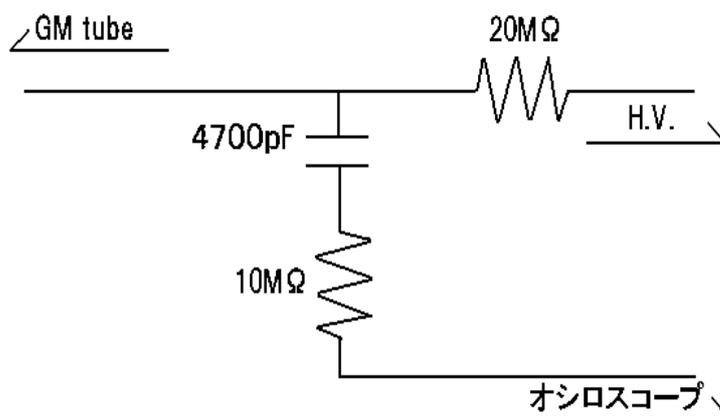


図 28 機器を大電流から守るための抵抗とコンデンサ

2.3 実験の経過

以上の部品を接続して放射線量の計測を試みた。初めに得られた電流の波形はパルスと呼べるようなものではなく、連続して不規則な信号がくることもあった。かなり雑音混じっているようであり、これが計数管内で起こった放電による信号なのかどうかとも怪しかった。

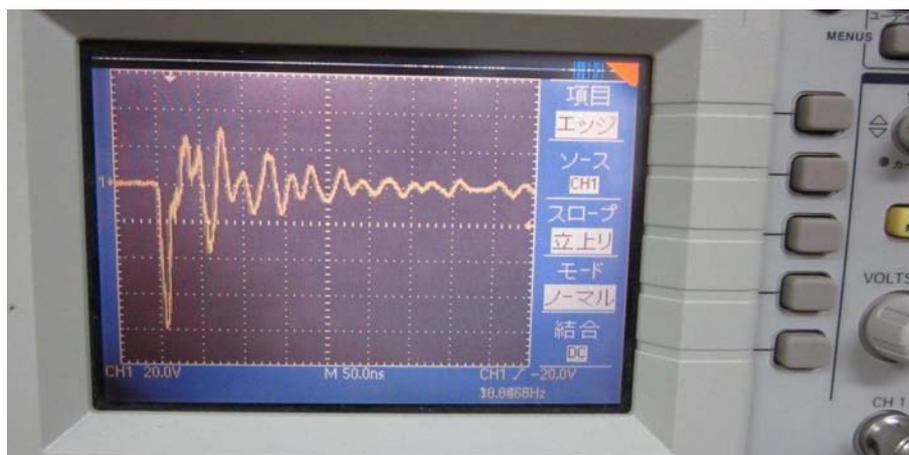


図 29 ノイズの波形

回路を弄っているうちに、装置の一部をアルミホイルやシャーシで覆うとノイズが少しおさまるということが分かった。どうやら回路の突出した部分がアンテナになり、実験室内を漂う電磁波を受信してしまっているらしい。そこで雑音を遮蔽するために機器同士をつなぐリード線をすべて出来るだけ短い同軸ケーブルに換え、回路の一部をシャーシの中に収めるなどして対策を図り、再度オシロスコープで信号を読み取ろうとしてみた。しかしそのように新しく回路を作りなおしたところこれまで見えていた大きな電流は読み取れなくなった。非常に小さな信号 ($\sim \text{mV}$) は来ているが明らかに放射線による放電によって生じるものではない。

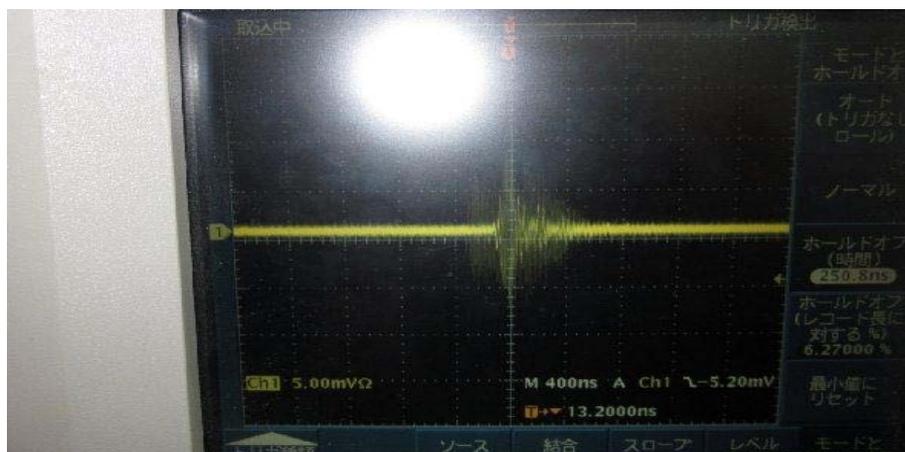


図 30 ケーブル付け替えの後に残った非常に小さなノイズ

実験室に High Voltage Power Supply というモジュールがあったので高電圧をそこから得ることにして実験してみるとノイズが消えたことから、Cockcroft-Walton 型昇圧回路の不調が疑われ、これ以降 High Voltage Power Supply を高電圧源として用いた。さらに、計数管内で放電が起こっていないこともはっきりしたため、放電用のガスもとりかえることにした。

2.3.1 ガスの種類および、気圧について

当初の実験においては、計数管に用いるガスは空気としていたが、大気圧の空気では GM 計数管を作るには高い電圧が必要なことがわかった。

まず気圧と放電のおこりやすさの関係について、説明していく。定性的に説明をすれば、気圧が高すぎると、電子の自由行程が短くなるため十分にエネルギーを得られなくなるため、電離が起こりにくくなる。逆に気圧が低すぎると、電子と気体分子の衝突回数が少なくなって、結果、電離が起きなくなる。

そのため、電離のおきやすいピーク気圧が存在するので、その気圧に調整すれば、低い電圧でも放電を起こすことができる。

タウンゼントの第一係数 このような事情は理論的にもタウンゼントの第一係数（衝突電離係数）から判断できる。これは電子一個が単位距離進む間に、おこす電離の回数を表す式である。タウンゼントの第一係数は以下のように実験的に求まっている。

$$\alpha = A p \exp\left(\frac{-Bp}{E}\right) \quad (1)$$

A, B は定数、p は気圧、E は電場である。この式は実験的な式なので、厳密ではないが理論的に導出できる。第 2 因子を見ると、気圧が高くなると exp 関数で減少をしている。これは分子密度が上がることで、電子の自由行程が減少し、結果として電場によって加速される距離が短くなることに起因している。具体的に上の表式を求めるには、自由行程の計算が必要であるが、その導出は本筋と逸脱するので、ここでは結果だけ述べる。自由行程の分布は以下の式で与えられる。

$$l = (n\rho)^{-1} \quad (2)$$

電子が気体分子を電離させるためには、ある一定以上の距離、電場で加速される必要がある。その距離を l として、上の式を l から $+$ で積分すれば、第二因子が得られる。ただし、電子が気体分子と単位長さあたりに衝突する回数は気体密度に比例し、必要な距離 l は電場の強さに反比例することに注意する。これによって、電子が気体分子に衝突したときに電離をおこす確率が求まったことになる。単位長さあたりに電子が衝突する回数は気体密度に比例し、気体密度は圧力に比例するので、第二因子に第一因子をかけることで表式が求まる。

この圧力の関数としてこの式を見るとピークがあることがわかる。この圧力に近づけることで、放電をおこしやすくすることができる。

各種定数は気体の種類に依存し、我々が実験で使用した気体では以下のようにになっている。

	$A([cm]^{-1}[torr]^{-1})$	$B([V][cm]^{-1}[torr]^{-1})$
空気	14.6	365
Ar	13.6	235
He	2.8	34

表 7

電子付着 気体に依存する効果はタウンゼントの第一係数の各定数のみではない。一旦電子が電離されても、電子が気体分子に付着することがある。この効果は気体の電子親和力が大きいほど起きやすいので、酸素のように電子親和力の大きい気体よりも、希ガスの方が、放電をおこしやすくなる。

以上のような理由から、計数管内部に封入する気体を空気ではなく希ガスに換え、また、計数管を真空管にし、気圧を変化させることができるようにした。以下がその写真である。



図 31 最終的に実験に使用した装置

2.3.2 リーク

最初、真空引きを行ったとき、すぐに大気圧に戻ってしまったため、各箇所のリークチェックを行った。しかし、実際の実験では、たびたび芯線を付け直し、また、計数管本体に穴をあけた（後述）ためそのたびに、リークチェックを行う必要があった。これが結果的に最終実験結果に影響を与えることになってしまった。



図 32 リークをすることが多かった箇所

これによって、オシロスコープで信号が観測されたが、いつまでもたっても放電がやまず、単なる連続放電なのか、放射線による信号か区別が困難であった。

2.3.3 時定数の調整

そこで、クエンチングの必要性を感じ、回路の時定数を調整することにした。計数管で何らかの理由で放電がなされたとき、電荷を放出するため、電圧が一旦下がる。再び元の電圧に戻るには、一定時間必要だが、この時間があまりに短いと、すぐさま元の電圧に戻るため、放電が持続してしまう。そのため、各種時定数を調整することにした。放射線ハンドブックを参照し、電圧復帰の時定数 100 m s と、読み出し時定数を $10^2 \sim 10^3 \mu\text{s}$ に設定した。これにより、放電がいつまでも続くという現象はおさまった。最終的に使用した回路は以下のようになった。

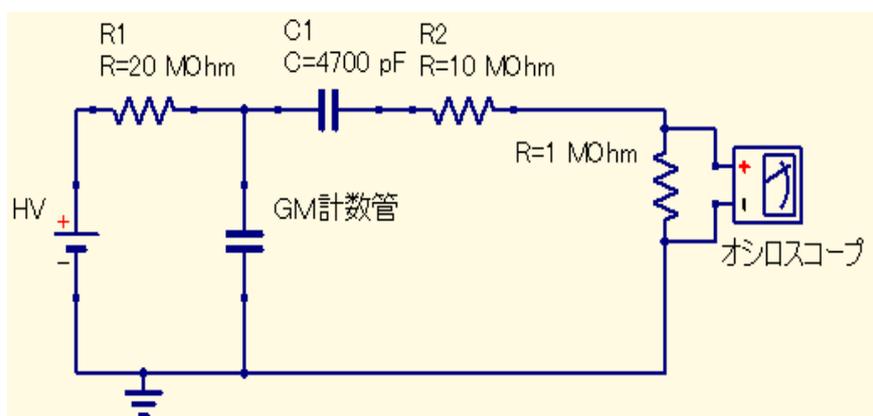


図 33 GM 計数管全体の回路

2.4 結果

まず、上記読み出し回路において以下のような信号が実際に見えた。ただし、条件としては $\text{Ar} + \text{N}_2$ ガス 0.66 気圧 電圧 1650v である。



図 34 見えた信号

すなわち、ほぼ理論通り最初に幅約 100 μ s の、それに続いて幅約 30ms 程度の長い信号である。一応信号を見ることができたので、我々は次にこの信号の rate が印加電圧と GM 管中の気圧にどのように依存するかを計測しようとした。しかし、これをやる前に芯線が切れてしまいこれを付け直したところなぜか 0.4 気圧以上では全く信号が見えなくなってしまった。しかし、0.3 気圧以下では見ることができたのでその結果を示す。

	1500v	1600v	1700v	1800v	1900v	2000v	2100v	2200v	2300v	2400v	2500v
0.1atm	○個/分	2	2	3	4	5	10	21	放電		
0.2atm	0	0	0	0	1	1	2	4	21	57	放電
0.3atm	0	0	0	0	0	1	6	5	5	9	放電

表 8

これを見ると確かに電圧を上げるごとに count 数は増えているが、これが本当に宇宙線や外部からの放射線を見ているのかどうか分からなかったので、次にシンチレータとの coincidence をとることにした。方法は簡単で、単にシンチレータを GM 管の上のセトリガーを GM 管のほうにかけることでオシロスコープでその信号を見た。するとその結果、ほとんど coincidence がとれていないことが分かった。また、線源 (No.3 の Cs137 や No.1 の Co60 など) をあてても信号の数はまったく変化しなかった。ただ、一度だけ線源に対して明らかに信号の数が増えるという反応を示したことがあった。(Ar+He ガス 0.1 気圧:電圧 1300v) しかし、その反応というのもそれ一回きりでまったく再現性がなく、またパルスの高さも 1mv 程度という非常に小さなものだったので、これが本来期待されているようなプラトー領域以上でのパルスとは考えにくい。(先ほど見えていたパルスの高さは 150mv 程度あった) もしかしら、比例計数領域での信号だったのかもしれない。

その後、線がなるべく入りやすくなるように GM 管本体に穴をあけ、それを密度の小さいファイルケース (水に浮いたので 1g/cm³ 以下) などでふさいだ後再度実験してみたのだが、結果は同じで、coincidence もとれないし線源にもまったく反応しなかった。

正直今回の GM 管の製作で我々が到達できたのはここまでである。この後も実験は続けていたのだが、その途中でなぜか真空を保てなくなってしまい、我々はポンプでひきつつガスを入れて気圧を安定させる、という方法に変えた。しかし、その結果 GM 管は以下のような挙動を示すようになってしまった。

- () 電圧をゆっくりと (100v/s の割合で 3000v まで) あげていくと、信号がまったく見えない
- () 気圧を下げたりすると放電が起こるが、それも 3 分程度で消えてしまう

この二つの原因を考察してみたのだが、やはり GM 管内の気密性をしっかりと保てなかったのが一番の原因であろうと考えられる。すなわち、() はゆっくりと変化させているうちに空気が十分に入ってきてしまい、() も時間とともに空気が入ってきてしまったため、酸素のクエンチ効果で信号が見えなくなってしまったということである。これらのことから言えるのは「安定した信号を得るためには、GM 管の気密性をしっかりと保たねばならない」ということである。

2.5 反省点

全体を通して無計画に製作を行ってしまっていた。例えば、GM 管の動作原理もよく分からないうちに本体を「これで大丈夫だろう」と購入してしまったりしたことである。その結果、気密性を保つことに苦労したし、本体の中を見るたびに芯線を切らなくてはならないという状況になってしまった。これからの研究生活でこのようなことがないように、深く反省したい。

3 謝辞

我々の実験を指導してくださり、辛抱強く最後まで付き合っていたいただいた指導教員の市川先生、TA の鈴木さん、長崎さんに深く感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] W. E. Lamb and R. C. Retherford, Phys. Rev 79, 549 (1950)
- [2] W. E. Lamb and R. C. Retherford, Phys. Rev 81, 222 (1950)
- [3] P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, (みすず書房, 1963)
- [4] M. E. Peskin and D. V. Schroeder, An Introduction To Quantum Field Theory, (Westview Press, 1995)
- [5] S. Weinberg, 場の量子論 2 巻, (吉岡書店 1997)
- [6] Wikipedia <http://ja.wikipedia.org/>
- [7] 放射線計測ハンドブック