

2s 水素原子の作成
～Lamb shiftに向けて～

2009年度 P1

浅野 侑磨

池田 達彦

高橋 翼

浜 直史

村瀬 健太

平成22年3月18日

第1章 概要

Lamb shift の測定に向けて, 水素分子を熱して水素原子を作成, さらに電子ビームを照射して 2s 軌道に励起させた. ここまでの実験方法は Lamb の原論文にしたがった. さらに 2s 励起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ところ, 十分な精度は得られなかったが 2s 励起水素原子の発生が確認された.

第2章 実験目的・原理

Dirac 理論では水素原子のエネルギー準位は主量子数と電子の全角運動量のみで決まるが実際の水素原子では $2S_{1/2}$ と $2P_{1/2}$ のエネルギーが異なる。この Dirac 理論からのずれを最初に測定したのが Lamb であり、これは後に量子電磁気学によって説明された。

水素分子から熱により解離した水素原子に、約 10eV の電子を衝突させることで、2s 軌道へと励起させる。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) 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 軌道上の電子は水素原子核から放出され、中性水素原子に戻る。その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 軌道の水素は不安定 (寿命 1.6×10^{-9} 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、単位時間あたりに電子増倍管に入る 2s 水素原子の数を電磁波の周波数を変えながら測定すれば、2s-2p 間のエネルギーに相当する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わかる。

本実験はそこに向けての予備実験として、2s 水素原子を作成・検出した。

第3章 実験方法

3.1 測定の流れ

まずは2s軌道水素原子が発生できる環境を整える。チェンバー内の気圧をロータリーポンプとターボ分子ポンプで高真空にし、オシロスコープ、ディスクリミネータ、スケーラーの電源を入れた。十分な気圧になった後、検出器用の高電圧(約2000V)をかけた。

水素ガスポンベの栓を開けて水素分子を流し、タングステンチューブに電流を流す電源のスイッチを入れて熱した。電子銃用の電源を入れ、8Vから13V程度の間で印加電圧を設定した。得られた検出器のシグナルはスケーラーでカウントした。

この際、タングステンチューブを加熱した場合とそうでない場合に分けたり、チェンバー内の気圧を調整して水素分子流の量を変化させるなど、様々な環境でのカウント数を電子銃への印加電圧を変えながら測定した。

3.2 タングステンチューブの加熱

当初はタングステンチューブ(外径0.7mmφ, 内径0.5mmφ, 長さ3cm)に+500Vの電圧をかけ、その電場で別のタングステンフィラメントからの熱電子を加速・衝突させて熱する方法をとった。しかしチューブ加熱に十分な量の熱電子を得るためには、表面積の大きなフィラメントに大電流を流して非常に高温にする必要がある。だが、そのような大電流はスライダックをもってしても耐えられず、本実験で可能な規模を超える。そのため、タングステンチューブに直接電流を流して加熱する方法に舵を取り直した。

3.3 熱による水素原子への解離

1Pa程度の気圧で電流を流して加熱し、赤熱したタングステンチューブ(外径0.7mmφ, 内径0.5mmφ, 長さ3cm)に水素分子を流した。熱により水素分子が解離して水素原子が発生したことは、チェンバー内に備え付けた酸化モリブデン(VI)(MoO_3)粉末の色が黄から青に変色したことにより確認した。この際の化学反応式は、 $\text{MoO}_3 + 6\text{H} \rightarrow \text{Mo} + 3\text{H}_2\text{O}$ である。

3.4 電子銃の作成

電子の発生源は、市販の豆電球 (Panasonic, MB25G5) のフィラメントを取り出して作成した。これらを 3 個並列に接続したものを電子発生源と呼ぶ。電子発生源と、 8.1Ω の抵抗を直列に繋いだ回路を $0V$, $-11.6V$ の直流電源で駆動した。なお高電位 ($0V$) 側は抵抗に接続され、電子発生源の電圧降下は $1.7V$ 、電子発生源の中心の電位は $-10.8V$ となる。なお、直流電源の電圧 ($-11.6V$) を変更すると、電子発生源の電圧効果とその中心の電位は変化する。

フィラメントの上方、数 mm の場所に、フィラメントと平行になるよう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。モリブデンの板 (ニラコ, $50 \times 25 \times 0.1\text{mm}$) を正方形の面が出来るように折り、傘状にしたものを金網の上に固定した。(折り目とフィラメントの並びが平行となる配置) なお、金網と板はともに $0V$ の電位に保った。

このセットアップにより、フィラメントの表面に出た熱電子が、より高電位 ($0V$) の金網に向かって加速される。金網の目は粗いため、電子はそれを通過し、モリブデンの傘の内部の等電位空間を走る。これが我々の作成した電子銃である。

3.5 電子ビームの照射による $2s$ への励起と検出

水素原子に電子銃で電子を照射した。電子銃のエネルギーは水素原子が $1s$ から $2s$ へ励起されるように約 $10V$ に設定されているので、ここで多くの水素原子は $2s$ へ励起される。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 ($1s$) に落ちることによって $2s$ 軌道上の電子は水素原子から放出される。その放出された電子が増倍され検出される。その数をカウントした。

3.6 検出器

検出器として電子増倍管を用いた。通常は入射側を負の高電圧とするが、電子銃の電場を乱すのを避けるため、入射側を接地し $+2050V$ の電圧で動作させた。

信号はアンプで増倍され、オシロスコープとディスクリミネータ (閾値 $V_{Th}=20\text{mV}$) に分割される。ディスクリミネータから、スケーラーにつなぎ、単位時間あたりのカウント数を計測した。

3.7 真空

真空は約 3Pa までロータリーポンプで引き、さらに $2\sim 3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ までターボポンプで引いた。その後、水素分子を流して 1.0Pa に保った。そうすることで水素以外

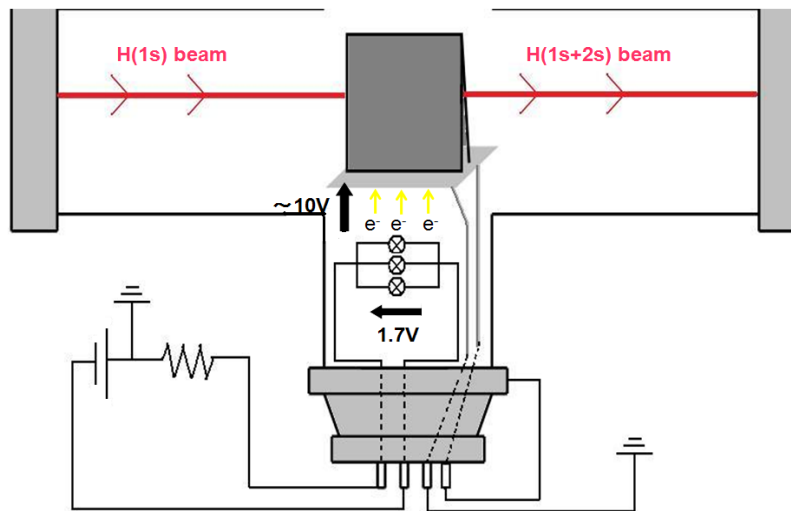


図 3.1: 電子銃の回路図

の気体はほとんどない状況にでき, 水素が 1.0Pa あるとみなせる.

第4章 実験装置

我々が到達した最終的な実験装置の略図が図4である。

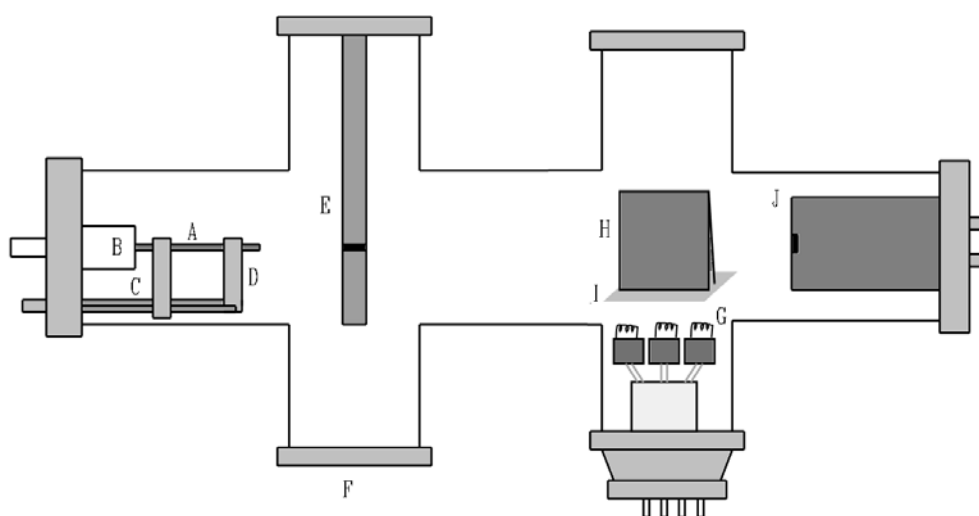


図 4.1: 全体図 A はタングステンチューブ, B はセラミックチューブ受け, C はチューブ電流供給用銅線, D は接続用モリブデンリボン, E は銅シールド, F はビューポート, G は電子銃のフィラメント, H は曲げたモリブデン板, I はタングステンの網, J は電子増倍管.

実験装置の構成は図4のとおり. 水素ガスボンベから供給された水素分子は, 加熱した A のチューブ内を通ることで, 一部が水素原子になる. ここで, 高温になったチューブ A と銅線 C を直接つないでしまうと熱により銅線 C は溶けてしまう. それを防ぐため, モリブデンリボン D で両者を接続した.

チューブを出た水素原子ビームは銅シールド E で絞られる. 銅シールドは, チューブ A から出る熱電子が直接検出器に入ることを防ぐ効果も持つ. チェンバー内の状況確認, 特にチューブ A の色温度の確認は F のビューポートでなされる.

銅シールドを通過した水素原子ビームは 1s 状態であるが, フィラメント G から出る熱電子を当てられて 2s 水素原子ビームにされる. その際水素原子ビームはモリブデン板 H とタングステン網 I の間を通る. モリブデン板 H は曲げられて”傘”状になっていて, フィラメント G からの熱電子を受け止めるために設置されている.

それとタングステン網Iにより安定した電子ビームが供給される. 電子銃により 2s 水素原子になったものをJの電子増倍管で検出した.

第5章 実験結果

5.1 水素原子の検出実験

2s 水素原子を作成する前の段階として、まずは 1s 水素原子を作れるかを確認した。約 2000K まで加熱されたタングステンチューブの中に水素分子を通し、水素原子に解離させた。水素原子に解離したことの確認には、酸化モリブデン (VI) (MoO_3) 粉末の黄色から青への変色を利用した。実験時のセットアップは、0.5Pa の空気が満ちたチェンバー内で、タングステンチューブに 15A の電流を流して赤熱したのち、チェンバー内の圧力が 2.0Pa になるよう水素分子を流した。

図 5.1 は実験前の酸化モリブデン (VI) の様子である。明らかに黄色である。図 5.1 は実験後の様子である。モリブデンブルーと呼ばれる青色に変色していることがわかる。

さらなる比較のために、酸化モリブデン (VI) の半分をテープを貼ることで水素と触れないようにし、上と同様の実験を行ったところ、テープを貼られなかった方は先と同じく青に変色し、テープを貼った方は黄色のままであった。これにより、明らかに変色がチェンバー内の水素によるものだと分かり、またテープを貼ることで水素との反応は十分に防げることが分かった。

次に水素原子が作成できたことをより確かなものにするために、酸化モリブデン (VI) が高密度の水素分子で変色反応をしないか確認した。実験は、酸化モリブデン (VI) の半分をテープで覆いチェンバー内に設置し、1.0Pa の水素分子でチェンバーを満たし、今回はタングステンチューブを加熱しないようにすることで行った。結果はテープを貼って水素分子と触れないようにした方も、貼らずに水素分子と触れられるようにした方も黄色で、色の違いは視覚では確認できなかった。



図 5.1: 実験前の酸化モリブデン



図 5.2: 実験後の様子

5.2 2s 水素原子の検出実験

水素分子を 1.0 Pa で流し, タングステンチューブを加熱しない場合と加熱した場合の二つに関して, 電子銃の印加電圧を変えて, 30 秒あたりの検出器の信号をカウントした. なお, 電子増倍管のシグナルは 10 倍の Amp で増倍し, ディスクリミネータの閾値は 20mV に設定した. さらに水素原子のフラックスを確保するために銅のシールドを取り外した.

表の各列の値については左から, 電子銃の回路にかけた電圧 (V), その回路に流れた電流 (A), 電子発生源の中心の電位の絶対値 (V), カウントの測定結果である.

電子銃電圧	電子銃電流	中心電位	count1	count2
8.6	0.93	8.07	26	26
9.1	0.97	8.48	119	131
9.6	1.01	8.89	168	168
10.1	1.06	9.34	148	160
10.6	1.10	9.76	166	140
11.1	1.15	10.21	181	179
11.6	1.19	10.62	235	197
12.1	1.24	11.07	266	278
12.6	1.28	11.48	287	330

表 5.1: チューブを加熱していない状態のカウントレート

電子銃電圧	電子銃電流	中心電位	count1	count2	
8.6	0.93	8.07	42	49	
9.1	0.97	8.48	120	116	
9.6	1.01	8.89	175	257	200
10.1	1.06	9.34	293	186	162
10.6	1.10	9.76	292	238	223
11.1	1.15	10.21	443	300	387
11.6	1.19	10.62	667	674	525
12.1	1.24	11.07	1006	900	

表 5.2: チューブが加熱され水素原子が出ている状態のカウントレート

これらをグラフにしたものが以下である.

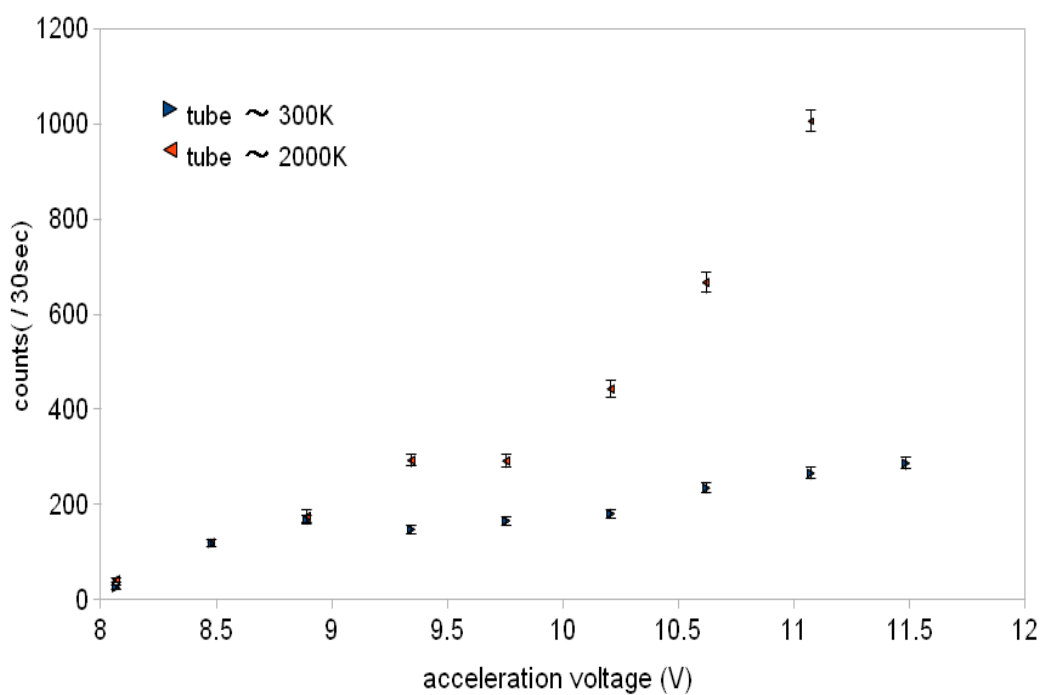


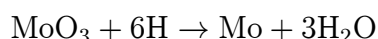
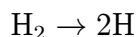
図 5.3: 1.0Pa で 30 秒間のカウント数. 左向きの三角はチューブが加熱され水素原子が出ている状態. 右向きの三角はチューブを加熱していない状態を表す.

第6章 考察と今後の課題

6.1 実験結果の考察

6.1.1 水素原子の検出に対する考察

酸化モリブデン (VI) の反応により水素原子が検出されたと結論付けたが, この反応が熱水素分子によりなされたものだという疑いもある. 実際化学反応式を見ると,



の二つの反応により, 十分高い温度だと水素分子によって酸化モリブデン (VI) が還元される可能性があるだろう. しかし水素ビームの温度が 2000K だったことを考えると, 熱平衡により約 60% が水素原子になっていると考えられる. 従って, 部分的に水素分子のままでありつつも水素原子は発生したと結論できる.

6.1.2 2s 水素原子の検出に対する考察

水素原子の 1s-2s 間のエネルギー差は 10.2eV なので, 電子銃の印加電圧が 10.2V を超えると水素原子は 2s に励起され, 検出器で信号として観測される. 実際, 電子銃への印加電圧 10V 以上からカウントレートに有意な差が生じている. これをもって 2s 水素原子が作成できたと期待される.

ただし, 電子銃の印加電圧が約 12V 以上のデータはノイズが大きくあまり信用できる値でない. 設定閾値を越えるようなノイズも一緒にカウントされてしまうので, その分の誤差がある. 結果で示されているデータにはこの分の誤差が十分には考慮されていない. また, 印加電圧をさらに上げていくと発生 2s 水素原子は少なくなっていくはずである. このことによるカウントのピークはノイズにより観測できなかったので, 2s 水素原子が発生したという強い支持は得られていない. さらに付け加えると, 様々な環境での十分なデータ量が得られなかったことによる, 2s 水素原子になったかどうかの根拠不足も否めない.

6.2 水素原子源の安定化

我々は水素分子を流すタングステンチューブが変形するという問題に直面した。電流を流すためにチューブの両端に圧着されているモリブデンリボンは、チューブにわずかに力を及ぼしている。そのため加熱され柔らかくなった際に、チューブが変形してしまうのである。これによって水素ビームがまっすぐな軌道に乗らない事態が起きた。

解決策としては、チューブに力が働かないように2つのモリブデンリボンを上手に設計する、または、チューブが変形してもビーム軌道に影響を与えないような配置にする(たとえばチューブを縦に配置し、側面に穴を開け、そこから出てきた水素を用いる)などの工夫が必要である。

また一方で、今回我々が挫折した、別のフィラメントから出る熱電子を照射することでタングステンチューブを熱する方法を用いる策がある。この方法ならば、チューブに力がかからないため、変形を回避することが可能である。ただし、この場合も加熱後に自重で曲がることを防ぐ必要はある。

6.3 ノイズ問題

電子銃への印加電圧が約12V以上になってから、オシロスコープでの波形に乱れやノイズが非常に大きくなる。これはチューブに電流を流しているかどうかにかかわらず、電子銃への印加電圧のみに依存している。

6.3.1 電子銃からの電子

チューブを加熱していない場合でも、電子銃への印加電圧の増加とともにカウントレートは増大している。これは電子銃から出た熱電子が観測されているものと思われる。この熱電子が観測にかからないようにするためには、電子増倍管の入射側を電子銃よりも低い電位にしておくことなどが考えられる。

6.3.2 電子銃の電流

電子銃はチェンバーと共通接地しており、電子銃から出た電子はチェンバーを流れる。さらにこのチェンバーは電子増倍管とも共通接地しているので、電子増倍管のノイズとなっている可能性がある。電子銃の設置方法を工夫して、より電子増倍管に影響を与えないようにするのが望ましい。

6.3.3 電子増倍管の動作気圧

我々が使用した電子増倍管の仕様は、動作気圧が $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 以下であったが、実験では水素原子のフラックスを確保するため、約 1Pa で使用した。これがノイズの原因になった可能性も考えられる。解決策としては、電子増倍管用に、新たにチェンバーを用意して接続し、正しい動作気圧で増倍管を作動させる。または、そもそも電子増倍管の使用をやめて、金属板に置き換えそれから出てくる電子を電気回路とアンプを用いて信号にする方法も考えられる。なおこの場合には、電流は pA 程度となるため、特殊な検流計を使用する必要がある。

6.3.4 ノイズによる誤差の評価

ノイズ問題を解消する手立てを打ったとしてもなお多少の誤差は発生するはずである。実際にノイズと見たいシグナルを分け、数値として誤差評価をする方法として、ADCなどを用いてシグナルの高さ(電圧)とエネルギーを測定することによってノイズの割合を計算するといった方法が考えられる。

6.4 水素原子発生の判定

我々の実験において、水素分子が熱解離して水素原子となったことの判定は酸化モリブデン MoO_3 粉末の化学反応に基づいている。しかしこの判定法では、どれだけの水素原子が出ているかという定量的な判定は不可能であるため、本実験でのカウント数を裏付ける計算などが出来ない。よりよい方法として、半導体の結晶が水素原子を化学吸着することを利用した水素原子検出が考えられる。

6.5 rf

$2s-2p$ 間のエネルギー差 ΔE に相当する電磁波をかけたときに、遷移は最大となり、カウントレートは極小となるはずである。この計測には電磁波の周波数を 1000MHz 付近で連続的に変化させることが出来る rf が必要とされる。ただしこのような rf は設計・入手が困難である。一方で、マグネットによる Zeeman 効果を利用した測定方法があり、実際 Lamb はこの方法で行っている。この場合の rf は 1000MHz かそれ以上の周波数帯で、いくつかの周波数を発生できるものであればよい。

6.5.1 Zeeman 効果を利用した測定法

Lamb の実験では、電磁波の周波数を固定し、磁場による Zeeman 効果によって ΔE を変え、カウントレートが極小となる磁場の大きさを測定する。この測定をい

くつかの周波数の電磁波に対して行い, その結果を外挿して外部磁場が無いときの ΔE を求めることが出来る. これは Lamb shift に他ならない.

6.5.2 可変磁場によるスプリットの変化

かけるべき磁場は, 一様で大きさが高々数千 Gauss の範囲で可変のものであればよい. 実際はそのような要請を満たすように電磁石を設計することになると思われる.

第7章 謝辞

本実験にあたり気長に付き合ってくださいました市川 温子准教授, 院生の中島 康博氏, 栗本 佳典氏, また予算を捻出してくださいました研究室の皆様に厚く御礼を申し上げます.

そして Willis Eugene Lamb に敬意を捧ぐ.

参考文献

- [1] W. E. Lamb, Jr. and R. C. Retherford, *Phys. Rev.* 79, 549 (1950).
- [2] W. E. Lamb, Jr. and R. C. Retherford, *Phys. Rev.* 81, 222 (1951).
- [3] Simple source of atomic hydrogen for ultrahigh vacuum applications U. Bischler and E. Bertel, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11, 458 (1993), DOI:10.1116/1.578754