

# 平成 30 年度 物理学実験 (二)

## プランク定数

実験日: 平成 30 年 10 月 2 日

実験者・筆者 1217054 佐久間寛伸

共同実験者

1217057 澤田大地

1217097 古谷優輝

# 目次

1	はじめに	2
2	目的	2
3	原理	2
3.1	プランク定数とエネルギー量子 . . . . .	2
3.2	光電効果 . . . . .	2
4	実験	3
4.1	実験装置 . . . . .	3
4.2	実験手順 . . . . .	7
5	結果・考察	9
5.1	結果 . . . . .	9
5.2	考察 . . . . .	10

# 1 はじめに

本報告書では書籍等からの引用をしている箇所がある。その被引用部で式番号が振られていた場合、本報告書内での式番号と重複・前後しないよう筆者がレポートの章立てに合うように適宜振り直しをした。そのため本報告書と引用元とは式番号が異なることに留意されたい。

## 2 目的

プランク定数測定器により、ハロゲン灯の光を分光し、振動数が知られているいくつかの単色光と Sb-Cs 光電管とを用いて光電効果 (photo-electric effect) の実験を行なう。それらの結果から、光が粒子性を示すことを理解し、さらにプランク定数 (Planck constant)  $h$  を求める。

## 3 原理

### 3.1 プランク定数とエネルギー量子

そもそもプランク定数とは「量子力学的な現象を特徴づける普遍定数。ドイツの物理学者プランクが熱放射の研究のなかで 1900 年に発見した。」 [1] 物理定数である。ここでは『発見した』とあるが、「M. プランクは空洞放射の測定値を十分説明できる関係式 (プランクの放射式) を見出したが、この式を導き出すには、振動数  $\nu$  の振動子のエネルギーの放出・吸収が連続的ではなく、 $h\nu$  を単位とする不連続な量の放出・吸収だけが許される、と仮定せざるをえなかった。ただし、 $h$  はプランク定数である。」 [2] のような、定数を『仮定』したという表現が適切と考える。

また、『 $h\nu$  を単位とする不連続な量』をエネルギー量子 (energy quantum) といい、これについては「 $h\nu$  をエネルギー量子という。エネルギー量子の考えは、エネルギーの連続性を根本的な足場に行っている古典物理学の自然観と正面から対立し、量子論を生み出す第一歩となった。この功績により、1918 年プランクにノーベル物理学賞が授与された。プランクのエネルギー量子という考えは、A. アインシュタインによって光量子という考えに発展した。」 [2] とあるように光電効果、ひいてはそれ以降の量子論に繋がる重要な概念である。

### 3.2 光電効果

光電効果については「金属の表面に光を照射すると電子が飛び出す。この現象を光電効果（特に外部光電効果）といい、飛び出した電子を光電子 (photo-electron) と呼ぶ。アインシュタイン (A. Einstein) は、1905 年にプランク (M. Planck) のエネルギー量子の考え方を発展させ、振動数  $\nu$  の光が伝播することは  $h\nu$  のエネルギーを持つ粒子が空間を飛んでいくことであると考えた。ここで  $h$  はプランク定数である。このような光の粒子を光子または光量子 (photon) と名付けた。光電効果は、光子が金属中の電子と衝突してそれが持っているエネルギーを一度に全部電子に与え、その結果電子が金属の表面から外に飛び出す現象と解釈される。したがって、電子が金属表面を越えて外に出るために要する最小のエネルギーを  $E$  とすると、飛び出した光電子が持つことのできる最

大の運動エネルギー  $E$  は

$$E = h\nu - e\varphi \quad (3.1)$$

である．ここに  $e$  は電子の電荷の符号を変えたもので，素電荷と呼ばれる．また  $\varphi$  は仕事関数 (work function) とよばれ，金属の種類によって決まる．

式 (3.1) で  $E = 0$ ，つまり

$$\nu_0 = \frac{e\varphi}{h} \quad (3.2)$$

を満たす振動数  $\nu_0$  を限界振動数という．限界振動数以下の振動数  $\nu \leq \nu_0$  の光は，それがどんなに強くても，その金属表面から電子を飛び出させることはできない．」[3] とある．

また，光電流については以下のように説明されている．「光電管 (photon-tube) に振動数が  $\nu$  の単色光を入射すると，受光面である陰極から電子が飛び出すので，この陰極 (受光面) と陽極を結ぶ外の回路に電流が流れる．この電流を光電流 (photo-current) と呼ぶ．」[3]

さらに，光電効果を利用してプランク定数を求める方法については以下の通りである．「このとき，陽極側が負になるように電圧をかけ，その電圧を増加して行くと，光電流は減少する．この負電圧と光電流の関係を表す曲線を外挿して光電流がゼロに対応する負電圧をもとめる．このとき，光電子がどんな運動エネルギーを持っていたとしても，全て陰極に押し返されている．したがって，この負電圧を  $-V_0$  とすると， $E = eV_0$  であるから，式 (3.1) は，

$$eV_0 = h\nu - e\varphi \quad (3.3)$$

となる．いくつかの振動数， $\nu$  と  $eV_0$  の関係を求めると，それは直線となり，その勾配からプランク定数  $h$  が得られる．知られている  $h$  の値は  $(6.626176 \pm 0.000036) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  である．

また，この直線を外挿して，用いた光電管の受光面を形成している金属の表面物質の仕事関数  $\varphi$  が得られる．」[3]

なお，仕事関数について「光が  $h\nu$  のエネルギーを持つ粒子であることから，単色光を指定する場合に波長や振動数のほか，光子エネルギー (photon energy) も使用される．単位としては，通常，エレクトロン・ボルト (eV) を用いる．1 エレクトロン・ボルト =  $e \times 1$  ジュールである．」[3] とある．筆者は高校生時代に「仕事関数  $W$  の単位は J である．」と習ったが，「仕事関数は電子ボルトを普通は単位と」する [2] ことを明示的に記しておく．また，

## 4 実験

### 4.1 実験装置

本実験で用いたプランク定数測定器は島津理化製 HA-30A (図 1) であり，製造元によると「島津独自のホログラフィックグレーティングを用いたモノクロメータは，純度の高い単色光を取り出せます．」[6] とあるが，ホログラフィックグレーティング (ホログラフィック回折格子) とは，基板上のフォトリソグラフィ (光に反応し物性を変える) を 2 本のレーザーの光干渉により正弦波状に形成することで作成されるグレーティング (回折格子) である．[4][5]



図1 HA-30A [6]

なお「島津独自の」という部分に関して，島津理化のホログラフィックグレーティングは独自技術によりブレード化が施されておりブレード化されていない回折格子に比べ特定の次数と波長に対して高い回折効率を示すという特長をもっている．ブレード化された，つまり溝の断面形状が鋸歯状である回折格子（ブレード回折格子）は，溝本数  $N$ ，入射光の波長  $\lambda_B$ ，取り出す回折光の次数  $m$  が決まっている場合，入射角を変化させ特定の入射角  $\alpha$  にすることで回折効率を高めることができる．この関係を満たすブレード回折格子の溝の傾きをブレード角  $\theta_B$  と呼び，入射光の波長  $\lambda_B$  をブレード波長と呼ぶ． $\lambda_B$  は以下の式 (2) により求められる．

$$\lambda_B = \frac{2}{Nm} \sin \theta_B \cos (\alpha - \theta_B) \quad (4.1)$$

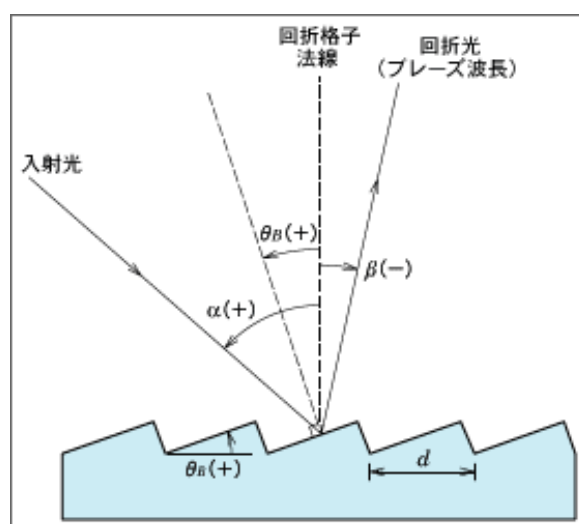


図2 反射型回折格子 [5]

この特性を用いて，本実験ではプランク定数測定器の”角度目盛盤”を操作し入射光に対するグレーティングの角度を変化させ，特定の単色光，つまり特定の波長を効率的に取り出している．

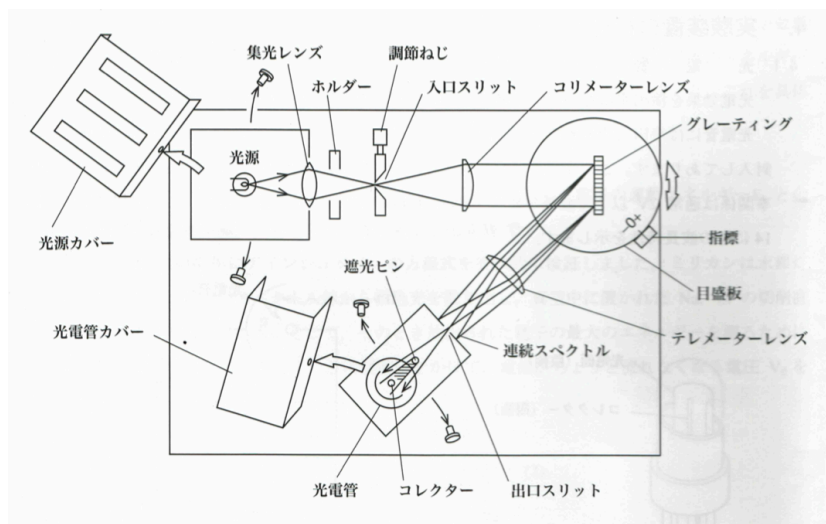


図3 分光器の構成 [7]

光電効果を定量的に計測するためには、短波長側から長波長へシャープに立ち上がる光源が必要である。この装置 (HA-30A) では、ハロゲンランプを分光して得られるスペクトルを、スリットに通すことで連続的に単色光を得るようにしている。

図3は分光器の構成である。光源から出て、入口スリット上に集められた光は、コリメーターレンズで平行光になり、グレーティングで分光される。分光した光はテレメーターレンズで集光し、出口スリット位置に連続した入口スリットの像（すなわちスペクトル）として得られる。

スペクトルのうち、出口スリットを通過した光は単色光として光電管に入射する。

なお、入口スリットは調節ねじで間隔を変えられ、出口スリットは固定式になっている。図5は、角度目盛盤の数値を指標に合わせたとき、出口スリットを通過する中心波長を示す。角度  $0^\circ$  から時計回りは (-), 反時計回りは (+) の符号を付ける。

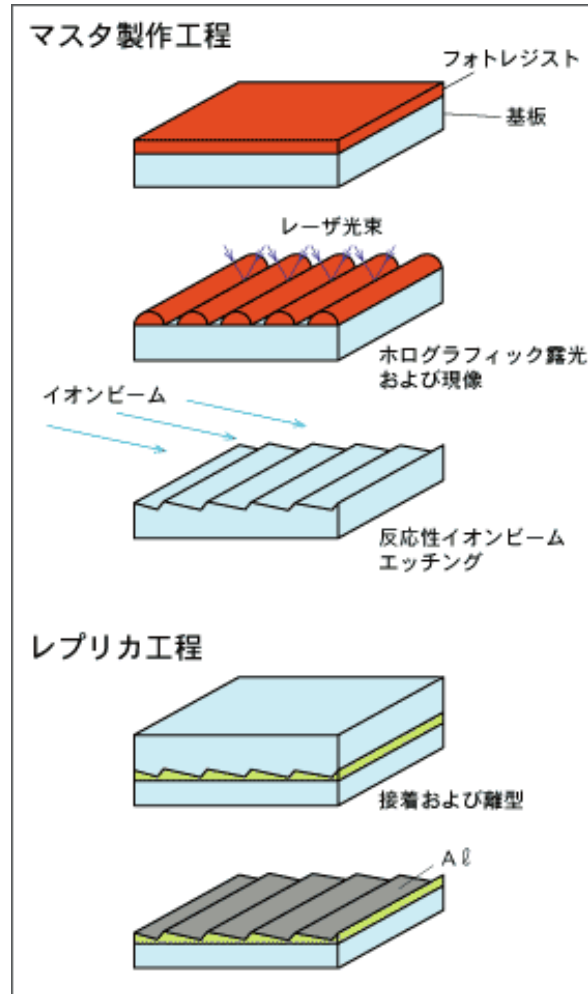


図4 ブレーズド ホログラフィック グレーティの製作工程 [5]

プラス1次光

角度 (deg)	波長 (nm)	振動数 ( $\times 10^{14}$ Hz)
-9	[359]	8.34
-8	386	7.78
-7	411	7.29
-6	437	6.86
-5	463	6.47
-4	489	6.14
-3	514	5.83
-2	539	5.56
-1	564	5.31
0	589	5.09
1	[614]	4.88
2	[639]	4.70

マイナス1次光

角度 (deg)	波長 (nm)	振動数 ( $\times 10^{14}$ Hz)
-36	[359]	8.34
-37	386	7.78
-38	411	7.29
-39	437	6.86
-40	463	6.47
-41	489	6.14
-42	514	5.83
-43	539	5.56
-44	564	5.31
-45	589	5.09
-46	[614]	4.88
-47	[639]	4.70

[ ] は常用はしません。

図5 スペクトルと角度 [7]

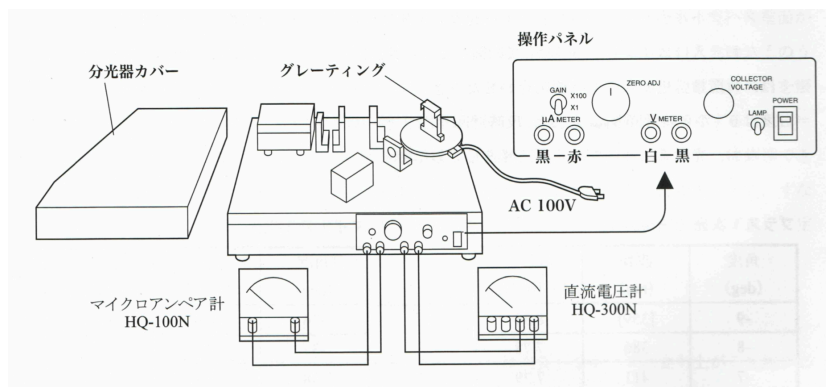


図 6 実験の準備 [7]

## 4.2 実験手順

### 4.2.1 準備

1. 装置を机上にセットする．分光器カバー準備段階で外しておく．
2. スイッチ類初期位置

POWER	(OFF)
LAMP	(OFF)
COLLECTOR VOLTAGE	MIN(反時計いっぱい)
ZERO ADJ	中央
GAIN	× 1

3. メーターを図 6 のように接続する．直流電圧計は白の端子がマイナス，黒の端子がプラスになるように接続する．
4. 電源を接続する．以下，まず分光器の操作から説明する．
5. POWER スイッチは OFF のままで，LAMP スイッチを ON にする．(LAMP スイッチは電気回路の POWER スイッチとは独立している．)
6. 入口スリットは間隔が調節でき，つまみ 1 回転戻すと 0.5mm の割合で広がる．スペクトルを目視する時は全開の状態から半回転ほど戻した状態にする．(図 7)

#### スリット調節つまみの使い方

スリットの開き加減は，スリットの光軸後方に紙片をかざし，点灯して透過光をみるとわかりやすい．

- (a) 調節つまみは上から見て時計回りが「開」方向である．
- (b) つまみがやや重くなると，スリットが開き始める．1 回転で 0.5mm 開く．つまみのマークで開き加減を把握することができる．
- (c) 時計回りで行き止まったところがスリット幅約 1mm である．それ以上は開かない．



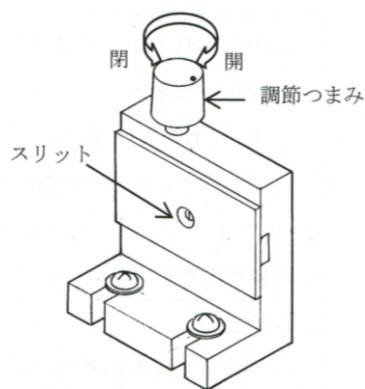


図7 入口スリットと調節つまみ [7]

7. 目盛盤の数値  $0^\circ$  を標線に合わせる。光電管カバーの前面のスリット部分に連続スペクトルが見えることを確認する。標線に合わせる数値を、図5により設定すると、それぞれに対応する単色光が光電管に入射する。0位置では  $589\text{nm}$  なので、スペクトルの黄色の部分になる。
8. 3箇所穴にカバーの突起を一致させて分光器にカバーをかける。なお、外部からの迷光を防ぐために、分光器カバーをかけても装置のまわりはあまり明るくしないよう注意する。
9. いったん LAMP スイッチを OFF にして、POWER を ON にする。回路が安定するまでに約 20 分かかる。
10. COLLECTOR VOLTAGE つまみをまわし、左いっぱいまで直流電圧計の指示値が  $0\text{V}$ 、右いっぱいまでまわした状態で  $3\text{V}$  以上の電圧が出ることを確認する。

逆電圧の可変には、精密級 10 回転ポテンショメータを使用しているので、操作は丁寧に行うよう注意する。

#### 4.2.2 逆電圧/光電流のグラフ作成

1. LAMP スイッチを OFF にする。
2. 図5により、角度盤を  $-8^\circ$  に正しく合わせる。  $386\text{nm}$  (紫外) 光が光電管に入射できる。
3. COLLECTOR VOLTAGE つまみを右に回し、 $3\text{V}$  の逆電圧が光電管にかかった状態にしておく。
4. LAMP スイッチを ON にする、
5. スリットをよく注意してみて、全開状態にする。さらにカバーの入射丸窓を紙片で塞ぐ。
6. GAIN を  $\times 1$  にし、直流増幅機バランス用の ZERO ADJ つまみを回してゼロ調節する。
7. GAIN を  $\times 100$  にしてもう一度ゼロ調節する。その後  $\times 1$  に戻す。
8. COLLECTOR VOLTAGE を左いっぱいまで回し切って、逆電圧を  $0\text{V}$  にする。
9. 紙片をはずし光量を調節する、GAIN を  $\times 1$  にし、入口スリットをゆっくりと開き、逆電圧  $0\text{V}$  においてマイクロアンペア計が、 $100 \mu\text{A}$  を指すようにする。
10. 逆電圧を  $3\text{V}$  に戻す。このとき  $\mu\text{A}$  メーターがほぼ 0 を指すことを確認する。
11. GIAN  $\times 1$  で ZERO ADJ つまみを 0 調節した後、GAIN  $\times 100$  で注意深く 0 調節する。

この調節の善し悪しが測定に大きく影響するので、1 分ほど変化がないか確かめる。

12. 逆電圧を 3V から徐々に小さくして行った時の光電流を  $\mu A$  メーターで読む。測定が終わったならば  $GIAN$  を  $\times 1$  に戻す。

13. 3. から 12. までの操作を 2 回ごと、すなわち -6 回 (437nm), -4 回 (489nm), -2 回 (539nm), 0 回 (589nm) のそれぞれについて繰り返し逆電圧/光電流の値を取る。

14. 光電流が流れ始める逆電圧を阻止電圧とするが、本報告書では  $0.01\mu A$  で読み取る。読み取った阻止電圧を縦軸に、対応する波長の振動数を横軸にプロットする。最小二乗法により回帰曲線を描き、その直線の傾きを求める。

## 5 結果・考察

### 5.1 結果

結果は図 8 の通りである。

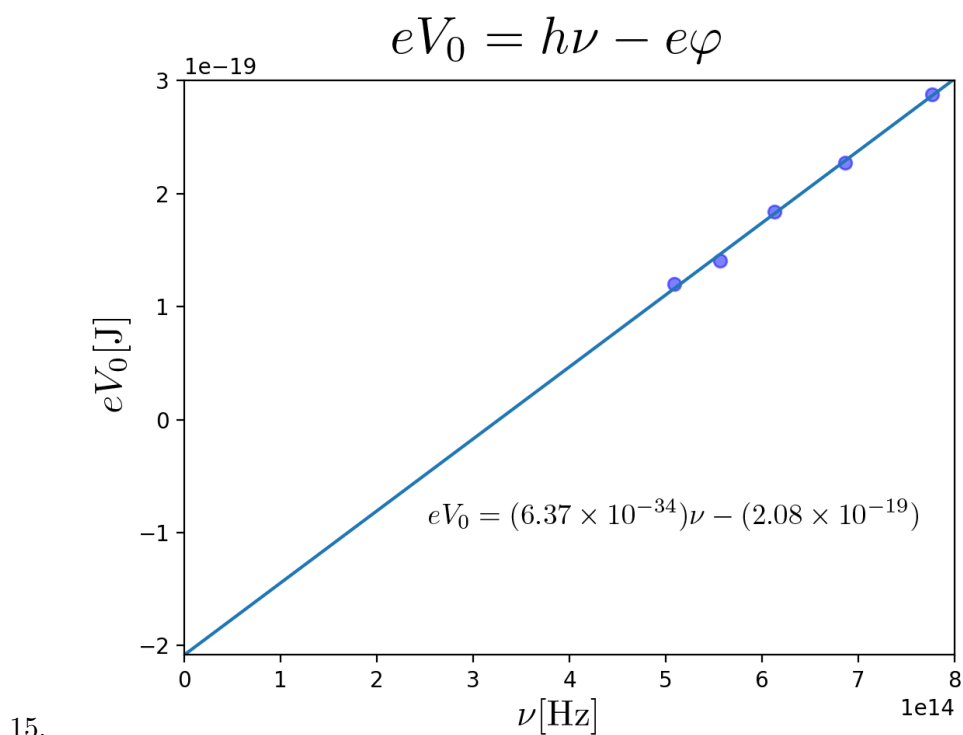


図 8 単色光の周波数と阻止電圧の関係

回帰曲線からプランク定数  $h$  は

$$h = 6.37 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (5.1)$$

であり、回帰曲線の切片  $e\varphi = 2.08 \times 10^{-19}$  であることから仕事関数  $\varphi$  は、

$$\varphi = 1.3 \text{ eV} \quad (5.2)$$

である。

## 5.2 考察

知られているプランク定数は  $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  であるので [3] 実験値との相対誤差は

$$\frac{6.62 - 6.37}{6.62} \times 100 \simeq 3.8\% \quad (5.3)$$

である．そもそも本実験で使用したプランク定数測定器は 10% ほどの精度である [6] であるので，十分良い精度で実験できたと言えるだろう．また，使用した Sb-Cs 光電管について，Sb-Cs の仕事関数  $\varphi$  は文献により様々な値が算出されている．(図 9)

研究者名	仕事関数
佐 方 <sup>3)</sup>	1.8 eV
宮 沢 <sup>4)</sup>	1.9
Wright <sup>5)</sup>	1.8
Eckart <sup>6)</sup>	1.4
Spicer <sup>7)</sup>	2.05
Apker <sup>8)</sup>	2.0
筆 者	2.06

図 9 Sb-Cs の仕事関数 [8]

しかし，図 9 の値のうち，2eV を超えるものなどは可視光の長波長側で光電効果を起こさなくなる閾値に近く，今回の実験の結果と照らし合わせると必ずしも適合するとは言えない．したがって文献値とは乖離が見られるものの実験の失敗ではなく合金自体の違いであると考えられる．

全体的な誤差要因としてはゼロ調整の精度，電流計および電圧計の読み取りの精度，分光の精度などが考えられる．

また，光の粒子性についてだが，本実験では減光の数値的な割合を記録していなかったので定量的な議論はできない．定性的には「50% ほど減光したが阻止電圧はほとんど変わらなかった．光を単に波動であるとするならば波のエネルギーは振幅の 2 乗に比例するので阻止電圧は減光前の 4 分の 1 になるはずであるので，光量子仮説を裏付ける結果が得られたと言える．」と述べることができる．

## 参考文献

- [1] 江沢洋 『日本大百科全書 (ニッポニカ)』 小学館
- [2] 『ブリタニカ国際大百科事典 小項目事典』 ブリタニカ・ジャパン
- [3] 東京理科大学 理学部第一部 物理学教室 『物理学実験 (二)』 (2018)
- [4] Palmer, Christopher, *Diffraction Grating Handbook*, 6th edition, Newport Corporation (2005)

- [5] 島津理化 HP 製品情報 - 回折格子（グレーティング）の解説
- [6] 島津理化 HP 製品情報 - プランク定数測定器 HA-30A
- [7] プランク定数測定器の取扱説明書 (<https://letus.ed.tus.ac.jp/course/view.php?id=81223>)
- [8] 萩野実 高橋正 和田正信『Sb(Mg)-Cs 光 電面について』(1959)