

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03137

研究課題名(和文)放電ランプを使った新しい光電効果実験教材の開発とその実用化に向けた研究

研究課題名(英文)Development of Novel Teaching Aid for Photoelectric Effect Using Discharged Lamp

研究代表者

大向 隆三 (Ohmukai, Ryuzo)

埼玉大学・教育学部・教授

研究者番号：40359089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子吸光分析用光源であるホロカソードランプを用いて、複数の金属の仕事関数を測定できた。バッファガスの封入されていないランプでカリウムとユウロピウムの、バッファガスの封入されたランプでセシウムとユウロピウムの仕事関数を測定することに初めて成功した。

データ記録および解析方法についても検討と改善を加え、光電効果信号とノイズ信号を物理的に区別する基準を考察し明確にするとともに、データロガーを用いて簡単に大量の測定データを記録・保存し、PCで解析しやすくする方法を開発できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ホロカソードランプを光電管として用い仕事関数を測定する技術は我々独自の方法であり、今回の研究成果により、それが広い汎用性を持つことが実験的に示された。この研究の目的である物理実験教材開発へ向けて、我々の方法が大きなメリットを有すると証明された点で画期的である。また、我々の方法が新規の仕事関数測定法と位置付けられる点も興味深い。

物理実験教材としての使用における便利さも、データロガーで改良できることが明らかとなり、いよいよ教育実践での活用も視野に入る段階まで研究が進展したと言える。

研究成果の概要(英文)：Using a hollow-cathode lamp we were able to measure the work functions of multiple metals. We succeeded in measuring the work functions of potassium and europium in a lamp without buffer gas, and of cesium and europium in a lamp with buffer gas with this technique for the first time.

We also studied and improved the data recording and analysis methods, considered and clarified the criteria for physically distinguishing the photoelectric effect signal and the noise signal, and recorded and saved a large amount of measurement data easily using a data logger, which enables us to develop a method to facilitate analysis on a PC.

研究分野：レーザー分光学

キーワード：仕事関数 ホロカソードランプ

1. 研究開始当初の背景

20 世紀以降に進展した量子物理を学び始める段階で「量子」の考えに始めて直面する機会は「光電効果」である。従って、この光電効果と密接に関連する物理量である「仕事関数」を測定できる効果的な実験教材が存在すれば、将来に科学を専門に学ぼうとする高校生や理科系(特に物理系、電気・電子系)の大学生を、難解という印象の強い量子物理の世界へスムーズに導くことができ、彼らが興味と関心をもって量子物理を学習し始める好機となるはずである。ところが実際には、量子物理を始めとした現代物理学の内容を高校や大学で授業する際に効果的かつ適切にその学習内容をデモンストレーションできる実験教材が不足しているのが現状である。実際、市販の光電効果実験教材は限られていて、そのうえ、当該教材は全体に遮光カバーがかけられるなど装置全体がブラックボックス化しており、実験者が操作できる機能も限定されているので物理的な原理や装置の仕組みを実験の中で理解するのは困難である。また、市販の教材では多くの高校物理の教科書の記述にあるように金属表面へ照射する光の波長(周波数)を変えながら光電効果が生じるかどうかを確かめるような実験を行うことはできない。市販の教材で使用されている仕事関数の検出原理は「阻止電圧法」と呼ばれる方法で、放出された光電子の運動エネルギーに応じて信号が検出されなくなる電圧値を求める方法だからである。これだと実験者が学習内容を納得して理解するには不十分だと言わざるを得ない。仕事関数の一般的な精密測定法には光電子分光法や熱電子放出法などが存在するが、大規模・高価な機器が必要なのでこれらを教材化するのには現実的ではない。そこで、光電効果を観測する新しい実験原理の提案と、その原理に基づき高校や大学の授業で活用できる規模・装置構成での信号検出技術の開発を行い、教育的に有効な金属の仕事関数測定教材を実現させることが強く要請されている。さらにはそれを実際に教材として使用した授業を実施し、教材の教育的効果を検証しなければならない。

2. 研究の目的

上記のような背景を受け、本研究の目的は、放電管の一種であるホロカソードランプ(HCL)を光電管として使い、ランプ電極間のインピーダンス変化から光電効果信号を検出するというまったく新しい発想によって仕事関数を求める実験教材を完成させることとした。HCL は原子吸光分析用光源として用いられる放電管であり、その陰極がある特定の元素を主成分として作られている。多くの元素の陰極でHCLが市販されている。HCL をこのように光電管として使用する方法は我々が発案した独自のアイデアであり、類似の研究例はない。光電効果信号検出の原理は次の通りである。HCL 電極間に電圧を印加して HCL の陰極に単色光を当てる。光電効果で陰極から光電子が発生すれば陽極へと運動し、電極間のインピーダンスが変化するため、その変化量を検出して光電効果信号を得る。単色光波長を変えながら光電効果信号強度を測定し、その特性から陰極元素の仕事関数を求めることができる。単純には、光電効果信号を得られなくなる照射光波長が、HCL 陰極元素の仕事関数(限界波長)である。我々の、この新しい原理に基づいて開発する光電効果実験教材のメリットは以下の通りである。

- ① 光電効果信号を簡単な回路を使って検出できる。
- ② 遮光が不要でコンセントからの電源供給で動作する機器構成である。
- ③ テーブルトップサイズでコンパクトな装置にできる。
- ④ HCL の交換だけで、様々な異なる元素の仕事関数を測定できる。
- ⑤ 電氣的・光学的な実験技術を駆使し、精密な仕事関数の測定を可能にできる。

これらのメリットをすべて併せ持つ光電効果実験教材は存在しない。我々のユニークなアプローチを突破口に、現在残された課題を一気に解決し、オリジナルな光電効果実験教材を完成させることを狙った。

3. 研究の方法

本研究で用いた実験の配置を図 1 に示す。光源はハロゲンランプ(白色光源)を使用し、その出力光をバンドパスフィルター(透過域の半値全幅 10 nm)に通し、単色化した。その単色光をチョッパーに通し強度変調(400 Hz)した。その光をレンズまたはミラーを使い、効果的に HCL 陰極へ照射した。HCL 電極間には直流安定化電源で電圧を印加した。光電効果によって生じた信号は、ロックイン増幅器で位相敏感検波を行い検出した。ロックイン増幅器から出力される電圧値をモニターし、光電効果信号強度とした。バンドパスフィルターの種類を変えて照射波長を変化させ

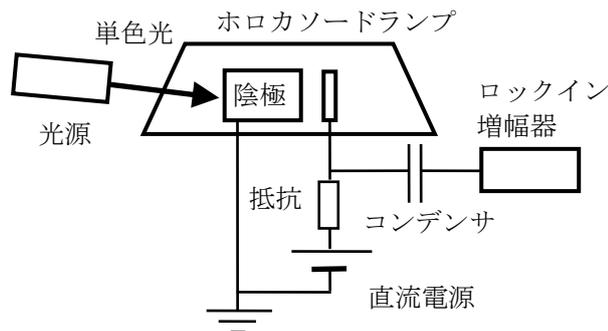


図1 実験配置

から光電効果信号強度の変化を測定した。この変化の様子から、量子効率を勘案した理論式と実験データをフィッティングさせ、陰極元素の仕事関数（限界波長）を決定した。本研究課題開始時点で明らかになっていた知見は、この原理を用いて光電効果信号を検出できること、陰極 Cs の HCL（ただし、バッファガスが封入されておらず放電しないランプ）を用いて仕事関数を決定できることであった。

本研究では以下の通りの内容で研究を進めた。

（１）カリウムの仕事関数測定とデータ解析方法の検討

本測定法の汎用性を確かめるため、カリウム（K）陰極の HCL を使用してその仕事関数（限界波長）を測定することを試みた。測定原理実証が目的であるため、バッファガスの封入されていない（放電しない）HCL を使用した。実験配置は図 1 に示したのと同じである。ランプの印加電圧は Cs と同じように 100 V から 600 V まで、100 V ごとに変化させた。

また、この仕事関数測定方法の測定精度が、限界波長近辺での光電効果信号の有無の判断基準にあると考え、光電効果信号とノイズ信号の区別をつける基準について検討した。具体的には、ノイズ信号と判断する基準を、

- ① 光電効果信号の平均値が負の値になるとき
 - ② 光電効果信号の平均値の誤差範囲が負の値を含むとき
 - ③ 光電効果信号の平均値がノイズの誤差範囲に含まれるとき
 - ④ 光電効果信号の平均値の誤差範囲とノイズ信号のそれとの間に重複する範囲があるとき
 - ⑤ 光電効果信号の平均値の誤差範囲がノイズ信号の最大値と最小値の間の範囲に重なるとき
- として設定した。K の光電効果信号を用いて、これらの基準に従いデータ解析を実施し、量子効率を考慮した近似式とのフィッティング結果を比較した。

（２）ユウロピウムの仕事関数測定

本測定法の汎用性をさらに確かめるため、初めて HCL を用いて希土類元素のユウロピウム（Eu）について仕事関数測定を試みた。Cs、K と同様の手法で、光電効果信号強度の入射光波長依存性から、その限界波長を決定した。ここでも、ランプはバッファガスの封入していないものを使用した。従来はアルカリ金属でのみしか測定を行っていなかったため、異なる族の元素に対して初めてこの方法を試み、どのような結果が得られるのかを確かめた。

（３）市販のホロカソードランプを用いた仕事関数測定

ここまでは HCL を光電管として使用する光電効果信号検出と陰極元素の仕事関数測定の原理実証のため、なるべく光電効果信号に影響を与える要素が少ない環境での計測を優先させた。具体的には、バッファガスが封入されていない HCL を特注でメーカーに製造してもらい、それを使用して光電効果信号を検出してきた。本研究ではこの測定方法の実験教材への活用を目指しているため、なるべく入手しやすい製品を使用し、仕事関数の測定ができることを実証したい。そこで、市販の HCL を使用して光電効果信号を検出し、元素の仕事関数を決定する研究を実施した。市販の HCL は管内にネオン（Ne）が封入されていて、電極間におよそ 100 V 以上の電圧を加えることにより放電する。放電により、原子及び荷電粒子の発光・イオン化・衝突などが生じるので、これらの現象が光電効果信号にどのような影響を与えるか、正しく仕事関数（限界波長）を決定できるのかを明らかにすることとした。

また、信号の記録に関して、改善も行った。従来は光電効果信号強度としてロックイン増幅器から出力される電圧値をデジタルマルチメータで表示させ、それを目視で読み取っていたが、これを、デジタルオシロスコープで記録する方法に改めた。これにより、実験データを確実に保存し、エクセルなどのソフトを用いて平均値、誤差の計算を容易に行えるようにした。

4. 研究成果

研究方法で述べた（１）～（３）の内容に関して、以下の通りの成果が得られた。

（１）入射波長を変えたときの K の光電効果信号測定結果の一例を図 2 に示す。これは電極間印加電圧が 600 V のときの結果である。Cs の実験結果と同様に、入射光波長が長くなるにつれ、光電効果信号は単調に減少し、入射光波長が 550 nm よりも長くなると信号強度はほぼ 0 になった。量子効率を勘案した近似式にこのデータをフィッティングさせたところ、近似式にうまく乗るデータであることがわかり（相関係数 $R^2 = 0.94$ ）、そこで得られた係数を使って K の限界波長は 585 ± 39 nm であることがわかった。この値を仕事関数の値に換算すると 2.12 ± 0.14 eV である。この結果は既に報告されている光電子分光法から得られた仕事関数（ 2.29 eV）¹⁾ と一致した。すべての印加電圧で同様の仕事関数（限界波長）が得られたので、我々の新しい測定法で正しく K の仕事関数も求められると確認できた。

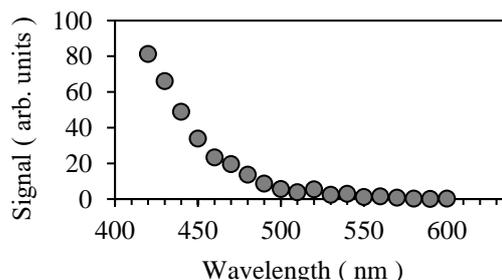


図 2 カリウムの光電効果信号

また、上述の光電効果信号とノイズ信号の区別をつける基準①～⑤に従って、K（印加電圧 200 V）の仕事関数を算出した結果を表 1 に示す。相関係数は実験データと量子効率を勘案した近似式の間の相関係数である。

表 1 ノイズ信号の区別の方法による相関係数の違い

基準	仕事関数 (eV)	相関係数 (R^2)
①	2.14 ± 0.16	0.93
②	2.14 ± 0.16	0.93
③	2.13 ± 0.17	0.93
④	2.20 ± 0.16	0.96
⑤	2.31 ± 0.14	0.98

この結果から、⑤の基準を用いることが量子効率の近似式にもっともフィットした実験結果を得られることがわかった。これ以降の基準としては、この ⑤ を使用してデータ解析に用いることとした。

(2) バッファガスが封入されていない Eu の HCL を用いて光電効果信号の検出を行った。図 2 のような、入射光波長が長くなるにつれて光電効果信号が減少する結果が得られたが、Eu の仕事関数は K のそれよりも小さいことが知られており、実際、入射光波長が 450 nm よりも長くなると光電効果信号は検出されなくなった。量子効率を勘案した近似式と実験データをフィッティングさせ、その結果得られた Eu の限界波長と仕事関数の結果を表 2 に示す。相関係数は実験データと量子効率を勘案した近似式の間の相関係数である。

表 2 ユウロピウムの仕事関数測定結果（バッファガスのないホロカソードランプ使用）

印加電圧 (V)	仕事関数 (eV)	相関係数 (R^2)
100	2.47 ± 0.19	0.98
200	2.45 ± 0.25	0.96
300	2.49 ± 0.14	0.99
400	2.50 ± 0.18	0.99
500	2.48 ± 0.18	0.98
600	2.53 ± 0.17	0.98

光電子分光法を用いて既に報告されている Eu の仕事関数は 2.5 eV であり¹⁾、本研究から得られた Eu の仕事関数はすべてこの値と誤差の範囲で一致した。相関係数もすべて 0.96 以上であり、実際の実験データが量子効率を勘案した近似式をよく再現していると言える。以上の結果から、バッファガスの封入されていない HCL を用いて Eu の仕事関数を測定できたと結論付けた。

(3) 市販のバッファガスの封入された HCL を使って陰極元素の仕事関数を測定した結果は表 3 の通りとなった。陰極元素は Cs と Eu の 2 種類の HCL を使用し、族の異なる元素で測定を試みた。これらはバッファガスの封入されていないランプでの測定を既に終えた元素であり、その結果との比較も行った。ここでも、相関係数は実験データと量子効率を勘案した近似式の間の相関係数を示す。

表 3 市販のホロカソードランプを用いた仕事関数測定結果

セシウム			ユウロピウム		
印加電圧 (V)	仕事関数 (eV)	相関係数 (R^2)	印加電圧 (V)	仕事関数 (eV)	相関係数 (R^2)
120	2.11 ± 0.07	0.99	150	2.50 ± 0.10	0.99
200	1.92 ± 0.18	0.95	200	2.50 ± 0.13	0.98
300	2.04 ± 0.28	0.93	300	2.55 ± 0.22	0.94
400	2.04 ± 0.12	0.98	400	2.50 ± 0.08	0.99
500	2.00 ± 0.12	0.98	500	2.48 ± 0.11	0.99
600	2.00 ± 0.18	0.99			

すべての結果で相関係数が 0.93 以上であり、多くが 0.98 よりも大きな値となった。この事実は市販の HCL を用いても、量子効率の近似式が有効に成り立っていることを示している。さらに、Cs の仕事関数を光電子分光で測定した値は 1.95 eV と報告されている¹⁾が、本実験結果とは印加電圧 120 V のときを除いて誤差の範囲で一致した。印加電圧 120 V のときも、最確値の相対誤差は 8.2 % であり、近い値を得ることができた。バッファガスの封入されていない HCL で測定した Cs の仕事関数は 1.90 ± 0.07 eV であり、この値ともほぼ一致している。次に Eu の仕事関数測定結果であるが、ここで得た値は既に報告されている仕事関数 (2.5 eV)

1) と誤差の範囲で一致しているし、上記のバッファガスが封入されていない HCL を用いて計測した値とも一致した。これらのことから、放電した環境下でも HCL 陰極に主成分として含まれる元素の仕事関数を、我々の提案する方法で測定できることを実証できた。これは、この新しい仕事関数測定法が汎用的に使用できる技術であることを示している。Cs と Eu の両方の場合で、印加電圧が 200 V 以上の時には波長 550 nm ~ 650 nm の領域にバッファガスの封入されていない HCL を使ったときには観測されなかった信号のピークが複数観測されたが、これらはバッファガスであるネオン (Ne) の光吸収により生じた電極間のインピーダンス変化であると考えられる。従って、市販の HCL を使用する際には、これらのピークを除外してデータ解析することが重要である。信号の記録もデジタルオシロを使用することで便利になり、大量のデータをオシロスコープから PC へ移し数値計算することが容易になるなど、使用上の便利さも向上させることができた。

<参考文献>

- 1) CRC Handbook on Chemistry and Physics 92nd Edition 2011-2012 CRC Press p. 12-124.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 古矢善人、島田直純、大向隆三	4. 巻 71
2. 論文標題 冷却法による比熱測定方法の改善	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 埼玉大学紀要（教育学部）	6. 最初と最後の頁 305-313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 2. Ililika Ghosh, Kimie Atsuzawa, Aoi Arai, Ryuzo Ohmukai, Yasuko Kaneko	4. 巻 none
2. 論文標題 TEM observation of compacted DNA of Synechococcus elongatus PCC 7942 using DRAQ5 labeling with DAB photooxidation and osmium black	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/jmicro/dfaa058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 齋藤彩、並木俊樹、近藤一史、大向隆三	4. 巻 69-2
2. 論文標題 小学校教材で製作したサイクロイド振り子の周期精密測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 埼玉大学紀要（教育学部）	6. 最初と最後の頁 483-491
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 新井葵、亀山壮吾、大向隆三	4. 巻 69-2
2. 論文標題 周波数マーカによる安定化レーザーのチューナビリティ評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 埼玉大学紀要（教育学部）	6. 最初と最後の頁 493-502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大向隆三、武山尚豊、新井葵、近藤一史
2. 発表標題 中空陰極ランプ中カリウム原子の仕事関数測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ilika Ghosh, Kimie Atsuzawa, Aoi Arai, Ryuzo Ohmukai, Yasuko Kaneko
2. 発表標題 Visualization of Compacted DNA of <i>Synechococcus elongatus</i> PCC7942 by DRAQ5 labelling with DAB photooxidation
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第62回シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤一史、蝦名俊祐、岩澤司季、大向隆三
2. 発表標題 定常波の状態を可聴化する教材の開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大向隆三、武山尚豊、窪田陽、杉山侑厘奈
2. 発表標題 放電ランプ陰極中ユウロピウム原子の仕事関数測定
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大向隆三、上敷領静香
2. 発表標題 ICT機器を活用した『電気の利用』における理科指導
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大向隆三、中砂友希
2. 発表標題 放電中ランプ陰極元素の仕事関数測定
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	近藤 一史 (Kondo Hitoshi) (40178421)	埼玉大学・教育学部・教授 (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------