

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：12401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22500800  
 研究課題名（和文） 高校や大学で利用できる新しい原子物理学分野の教材開発に関する研究  
 研究課題名（英文） Development of teaching materials in the field of atomic physics for high schools and universities  
 研究代表者  
 大向 隆三（OHMUKAI RYUZO）  
 埼玉大学・教育学部・准教授  
 研究者番号：40359089

### 研究成果の概要（和文）：

高校や大学における原子物理学に関する教材として半導体レーザーを光源としてルビジウム原子の遷移周波数に対するレーザー誘起蛍光を観察することができ、高信頼度と可搬性を兼ね備えたレーザー分光実験機器を開発した。また、ホロカソードランプを用いて遮光を必要とせず高感度に光電効果を検出する技術を開発するとともにセシウムの仕事関数を求め、実験教材としての精度や性能向上に向けた検討を行った。

### 研究成果の概要（英文）：

In order to achieve a teaching materials in the field of atomic physics in senior high schools or universities, we developed an experimental instrument for observing the laser-induced fluorescence of rubidium atoms using a laser diode. Furthermore, we developed a teaching material for the photoelectric effect using a hollow-cathode lamp, which enables the detection of the photoelectric signal without any shading. We measured the work function of cesium atoms and investigated the possibility of the improvements in its performances.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・科学工学、科学教育

キーワード：ホロカソードランプ、レーザー誘起蛍光、仕事関数、光電効果

### 1. 研究開始当初の背景

情報通信、エレクトロニクスなど、現代の我々の生活には物理学の成果が様々な場面で応用されている。その成果の多くは量子力学をはじめとした現代物理学の成果であり、実際あらゆる科学の分野の中でもミクロの世界を支配するこの現代物理学は今日まで

の100年の間にもっとも飛躍的な進歩を遂げた分野である。従って、このような現代物理学に関する内容を、将来科学を専門に学ぶとする高校生や科学を教える立場に立つとする教員養成系大学の学生に深く正しく学ぶ場を提供することは、難解とされ大学で新たに学ぶ量子力学へ学生をスムーズに導

入できるだけでなく、物理嫌いや理科離れを解消するうえで極めて重要な役割を果たす。筆者は大学で現代物理学を講義するなかで、効果的にテキストの内容を演示でき、テキストの内容を納得して示してくれるような教材が不足していることを痛切に感じるに至った。例えば、高校の「物理Ⅱ」における「原子と原子核」では、この単元で学生が取り組むことのできる実験に関する記載が他の単元（いわゆる古典物理学の内容）に比べて圧倒的に少ない。さらに市販の実験教材カタログを見ても、この内容に関する教材はラインナップされているものの、一見してその動作原理を知るには困難なほど自動化・ブラックボックス化されており、実験者が容易に機器を操作できないよう意図的に使用の制限をしている教材が多い。このような教材では、学生がテキストの記述を納得して理解できるかどうか不安であると言わざるを得ない。

## 2. 研究の目的

本研究では、現代物理学の基礎となる原子物理の分野で新しい教材を開発することを目的とする。「光」は初期の量子論において、新しい物理的概念をうみだすきっかけとなり、様々な物理現象の主役となる。今回の開発教材の特長として、①装置を一見してその動作原理を理解できる、②物理的内容と教材の動作原理の間の対応が容易につく、③特殊な設備（暗室、真空、大容量電源）を必要とせず一般的な教室や実験室で動作できる、の3点をキー・ポイントとして、これらを全て満たすことができる教材の実現に向けて、それに必要な新たな技術の研究開発を実施した。

現代物理学の広い範囲の中で、本研究で取り扱う教材の内容は、「エネルギーの粒（量子）としての光」と「光電効果」に焦点を絞り、これらに関連した物理実験教材の開発を行った。これらの現象は、量子力学の中でもっとも基礎的かつ重要な光の粒子性に関する現象である。本研究で開発する教材によってエネルギーがとびとびの値を持つという量子力学特有の現象を理解することで、学生がスムーズに古典物理学と現代物理学の考え方の違いを理解できるようにすることを狙う。

## 3. 研究の方法

### (1) レーザー分光実験装置の試作

「エネルギーの粒（量子）としての光」では、ルビジウム (Rb) 原子による光の吸収・放出を直接観察できるような実験装置を開発し、それを講義や出前授業で演示できるよ

うなコンパクトで一体型の装置に仕上げることを目指した。本研究では1枚の小型光学定盤上に実験装置を配置し、複雑な光学調整なしに再現性良く実演できる教材を開発した。さらに Rb 原子が光を吸収・放出する様子を画像として視覚的にわかりやすく示すことができるように工夫した。最新の光技術を最大限に駆使し、光源の低消費電力化・装置の省スペース化をはかった。本項目では、まず波長可変レーザー光源の整備、次にセットアップの小型化とメンテナンス・フリー化へと進み、最後にカメラなど効果的な映示方法の工夫に取組んだ。

Rb 原子のエネルギー構造を図1に、筆者らの使用した実験配置を図2に示す。

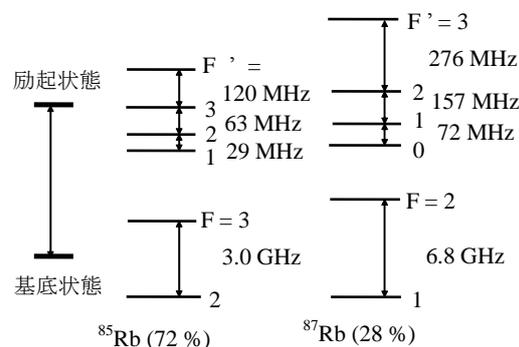


図1 ルビジウム原子のエネルギー構造

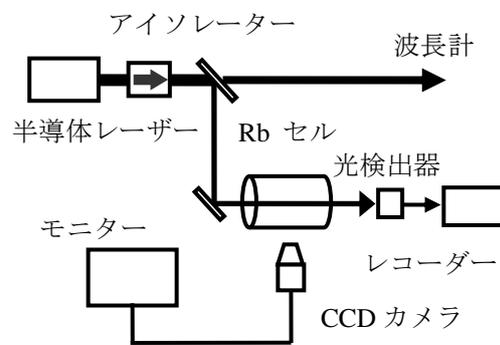


図2 原子の光吸収・放出観測実験配置

### (2) ホロカソードランプによる光電効果実験

「光電効果」では、新しい光電効果の実験教材を開発した。今回開発した実験教材は、新しくホロカソードランプを利用した教材であり、一般の教室や実験室の設備でも眼前で光電効果を観測できる装置である。ここでは、当該内容について高校教科書や量子力学の初級テキストに記述されている内容に即した装置構成とし、波長可変の単色光を光電

面に当てて光電流を観測できる構成とした。光電効果が生じ始める入射光波長から仕事関数の測定を行う実験方法を開発した。実験者自身が単色光を発生させ、それを光電面に照射する光学配置を組み、出力データと物理現象の対応をつけながら物理的内容を理解できる教材の開発を目指した。

本課題で使用した実験の配置を図3に示す。

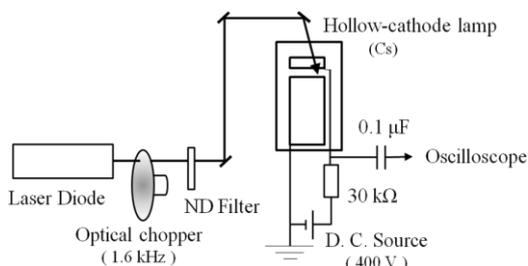


図3 光電効果実験配置

#### 4. 研究成果

##### (1) レーザー分光実験装置の試作

レーザー光の強度は  $1.0 \text{ mW/cm}^2$  に調整して、その波長を  $780 \text{ nm}$  近辺で調整しながら Rb セルの様子を CCD カメラで観測した。図4の上の写真は入射レーザー光の波長が  $780.250 \text{ nm}$  のとき、下の写真は  $780.245 \text{ nm}$  のときの観測結果である。入射光の波長が違うだけで、図4の上の写真に比べて下の写真では画像中央部横向きに白い光の線が観測できた。この線の位置はセル中のレーザー光経路に一致しているので、これは Rb 原子によるレーザー誘起蛍光が観測された結果であるとわかった。入射光強度は  $1.0 \text{ mW/cm}^2$  と

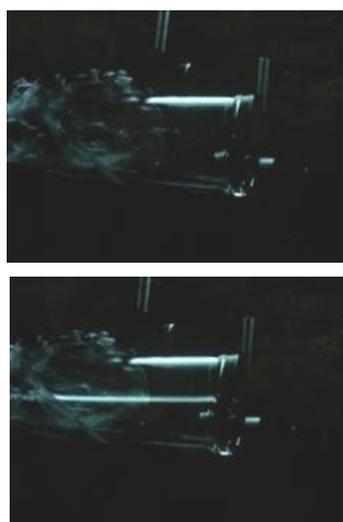


図4 RbセルのCCD画像  
(上) 入射光波長  $780.250 \text{ nm}$   
(下) 入射光波長  $780.245 \text{ nm}$

弱く、CCD カメラも信号増幅機能はついていないが、モニター画面上でレーザー誘起蛍光を明確に区別して確認するのに十分であった。

レーザーの波長を  $780.250 \text{ nm}$  から  $780.230 \text{ nm}$  まで連続的に掃引させながら Rb セルの様子を観察すると、 $780.247 \text{ nm}$ 、 $780.245 \text{ nm}$ 、 $780.239 \text{ nm}$ 、 $780.235 \text{ nm}$  の4つの波長に近づいたときだけレーザー誘起蛍光が観測されはじめ、徐々に強度が増してもっとも明るくなり、その後ゆっくり消えてゆく様子が観察できた。その他の波長では原子からの蛍光は観測されなかった。この観測と同時に測定した Rb セルの透過スペクトルを図5に示す。上記の4つの波長では透過率が大きく減少し、入射光が Rb 原子に吸収されていた。これらより、Rb 原子はレーザー光の吸収によって蛍光を発していること、Rb 原子は特定の波長の光しか吸収しないので原子が不連続なエネルギー準位を持つこと、を明示できる。図4の結果は小型 (15 インチ) のブラウン管型テレビモニターに写した結果であるが、CCD カメラのビデオ出力端子を大型のモニターに接続すればそこに映し出すこともできるので、大人数の教室で教員が上記の内容を演示実験で示すことも可能である。この実験装置は前述の通り取手付きブレッドボード上に組んであり、ブレッドボードごと移動させることができる。必要に応じて場所を変えて同じ実験を行うことが可能である。レーザー (半導体レーザー) からの出力光軸は安定していて、光学部品とそのマウント類はブレッドボード上にネジで固定しているので実験の再現性は非常によく、実験装置を移動させても光路調整を行う必要なく実験結果を再現できた。

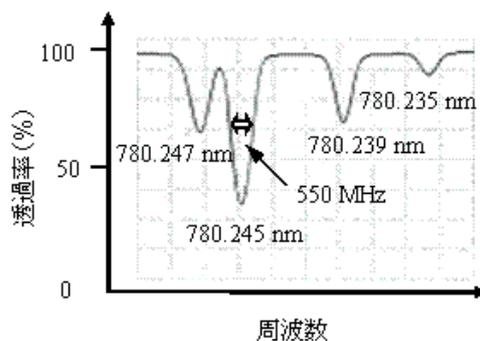


図5 Rbセルの透過スペクトル

##### (2) ホロカソードランプによる光電効果実験

本研究では、ホロカソードランプの陰極物質として、もっとも仕事関数の値が小さいセシウム (Cs) を選んだ。ホロカソードランプを用いて光電効果を観測できるかどうか確

認するために、まず GaN 半導体レーザー（波長 400 nm）を光源として光電効果信号の検出実験を行った。

Cs の仕事関数（限界波長）は 640 nm であることが知られており、波長 400 nm のレーザー光照射で光電効果が生じるはずである。レーザー光はチョッパーを通して強度変調（1.6 kHz）をかけたあと、ランプの陰極に照射した。放電プラズマのインピーダンス変化を抵抗（30 kΩ）とコンデンサ（0.1 μF）を経由して交流成分だけ取り出し、出力信号をオシロスコープで直接観察した。実験結果を図 6 に示す。図 6 の横軸は時間、縦軸は検出された電圧を示す。チョッパーによる光の on-off に合わせて、約 0.6 ms の周期で規則的に変化する信号が得られた。このことから、この信号が光電効果により生じた信号であることが確認できた。光電効果信号の強度は、変動する信号の段差に相当する電圧値と考えられる。

次に、照射光の波長を変えた時に光電効果の信号強度がどのように変化するかを調べた。実験では、今までの半導体レーザーの代わりに出力 100 W のハロゲンランプを光源として使い、バンドパスフィルターで波長を制限した単色光を照射した。バンドパスフィルターを通した光を用いるので、光電効果信号の低下が予想されたため、今回はロックインアンプを使用した。バンドパスフィルターは透過率 50 % となる半値全幅が波長にして 10 nm のものを使用した。バンドパスフィルターの中心波長を 620 nm から 690 nm まで、およそ 10 nm ごとに変化させたときに得られた光電効果信号強度を図 7 に示す。先述の通り Cs の常温での限界波長はおよそ 640 nm であるので、我々は当初その値を境にステップ的に信号強度が変化するものと予想したが、実際はそうならなかった。入射光波長を長くしていくと光電効果信号はゆっくりと減少していき、650 nm でほぼ信号強度がゼロとなった。限界波長である 640 nm でもピーク時の約半分の強度の信号が得られた。つまり、光電効果信号の大きさは、単に入射光波長が限界波長よりも長いかわりに短いだけで決まる訳ではないことがわかった。そこで我々は量子効率を考慮して再度光電効果信号強度の入射光波長依存性を考察した。

仕事関数付近での量子効率（ $Y$ ）は、プランク定数を  $h$ 、入射光周波数を  $\nu$ 、仕事関数を  $\Phi$ 、素電荷を  $e$  として以下の式で表されることが知られている。

$$\sqrt{Y} \propto h\nu - e\Phi$$

これを用いて光電効果信号強度（ $I$ ）を式で表すと、

$$I \propto \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^2$$

となる。ここで  $\lambda_0$  は金属の限界波長である。この式を用いて図 7 の実験データとのフィッティングを行い、限界波長を求めた。その結果、限界波長の値を 671 nm としたとき、うまく図 7 の実験データを再現できた。このときの相関係数は 0.98 であった。このことから、我々が今回測定した条件下での Cs の限界波長は 671 nm、従って仕事関数の値は 1.85 eV であると求められた。

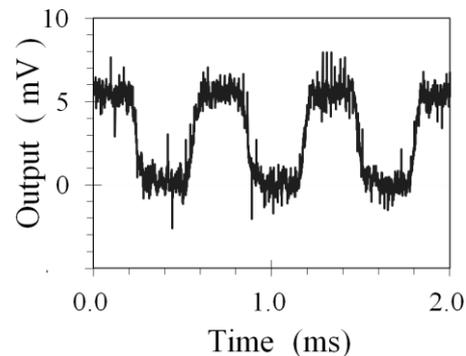


図 6 光電効果信号検出結果

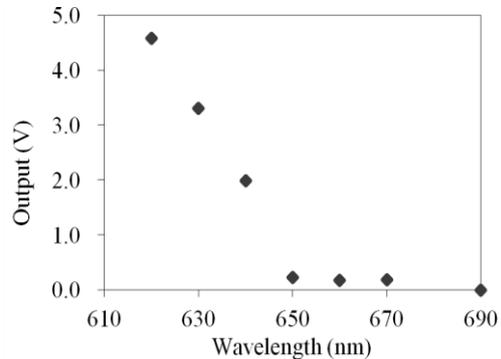


図 7 入射光波長による光電効果信号の変化

今回得られた Cs の限界波長の値（671 nm）は常温における値（640 nm）に比べて大きな値が得られた。この差は、今回の測定がランプ内で放電させた状態の陰極で生じる光電効果を観測したために生じたと考えられる。放電中は高電圧をランプ内の電極間に印加しているため、非常に強い電場が生じている。従って陰極内の電子が力を受けて、金属表面から飛び出しやすくなっているため、限界波長が見かけ上大きな値（仕事関数の値としては小さい値）として観測されたと考えられる。

今後は、ロックイン増幅器の代わりに Q 値の大きなバンドパスフィルターを用いて光

電効果信号の検出を容易にすること、放電電圧とそのときに求められる仕事関数の値との関係を明らかにすること、Cs以外の金属においても今回の測定方法が有効であることなどを検証し、研究を進めていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ①上敷領静香、大向隆三、兵頭政春、近藤一史、交差共鳴を用いたレーザーの発振周波数制御、埼玉大学紀要(教育学部)、査読無、第62巻(1)、2013、241-248
- ②近藤一史、大柿千絵、奥山雄三、三俣那津子、桐原昌秀、大向隆三、ガウスの加速器を用いた出張講義「興味を持たせ、関心を高め、理解を深める理科教材の開発」、埼玉大学教育学部附属教育実践総合センター紀要、査読無、第10巻、2011、67-74
- ③大澤由美子、近藤一史、大向隆三、科学的な思考力を高める実験方法や指導法「中学校理科「電流」の単元における教材・教具、実験方法・指導法の工夫」、埼玉大学紀要(教育学部)(査読無)第59巻(2)、2010、237-251

[学会発表] (計8件)

- ①大向隆三、工藤弘晃、佐藤賀一、兵頭政春、近藤一史、ホロカソードランプを用いた光電効果実験(Ⅳ)、第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月28日、神奈川工科大学
- ②大向隆三、佐藤賀一、上敷領静香、兵頭政春、近藤一史、ホロカソードランプを用いた光電効果実験(Ⅲ)、第59回応用物理学関係連合講演会、2012年3月16日、早稲田大学
- ③桐原昌秀、近藤一史、大柿千絵、奥山雄三、大向隆三、ガウス加速器における鉄球と磁石の運動に関する研究、第59回応用物理学関係連合講演会、2012年3月16日、早稲田大学
- ④大向隆三、佐藤賀一、上敷領静香、兵頭政春、近藤一史、ホロカソードランプを用いた光電効果実験(Ⅱ)、第72回応用物理学会学術講演会、2011年8月30日、山形大学
- ⑤大向隆三、佐藤賀一、上敷領静香、兵頭政春、中空陰極ランプを用いた光電効果の実験、第28回物理教育研究大会、2011年8月9-10日、広島県情報プラザ

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

[その他]

なし

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

大向 隆三(OHMUKAI RYUZO)

埼玉大学・教育学部・准教授

研究者番号:40359089

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし