

授業実践報告：高3物理 原子分野

——実験が困難な分野のアクティブラーニング型授業——

勝 田 仁 之

1. はじめに

本稿は、著者が高3物理の授業で、どのように原子分野の授業を実践したかを報告するものである。なお、主な読者として高校物理の原子分野、あるいは大学で前期量子論に関連する分野の授業を担当している教員を想定している。

著者の物理の授業は、通年でアクティブラーニング型授業の形態を取っている。一方で、原子分野においては、世界的に見てもアクティブラーニング型授業の実践報告や教材開発が他分野に比べてなされてこなかった。その主な理由として、力学や電磁気学をはじめとする古典物理学に比べて実験を主軸とする展開が困難であることが挙げられる。しかしながら生徒への学習効果を考えると、実験が困難な原子分野においてもアクティブラーニング型の形態を取る必要があると考え、実際に授業を実践した。

本章ではまず物理教育研究の理論に基づいて、アクティブラーニング型授業の必要性を確認する。第2節では、生徒の原子分野に関する概念調査の結果を、先行研究を参照しながら解説する。第3節では、前節の結果を踏まえて、どのような方針に基づいて原子分野の授業を著者が実践したのかを解説する。最後に第4節では、本稿全体の構成を俯瞰する。

1.1. 原子分野におけるアクティブラーニング型授業の必要性

本節では、実験を主軸とした展開が困難な原子分野においても、アクティブラーニング型授業の展開が必要であることを確認する。

物理教育研究（Physics Education Research; PER）に認知科学の知識と研究手法が導入されたことにより、物理に関する生徒の知識構造の分析は急速に進み、ここ30年余りの間に数多くの報告がなされた [1-4]。PERに基づく授業への示唆を、著者は次のようにまとめる。

生徒は教師の望むようには学ばない。教師が教えたということは、生徒が学んだということを意味しない。

教員による一方通行の教え込みからは、生徒はほとんど何も学べない。特に、概念獲得に関する学習効果は期待できない。概念獲得には知識の input よりもむしろ output が重要であり、生徒が自分自身の言葉で学習内容を再構築する必要がある。

生徒は物理学の授業で学ぶ知識を、現実世界のものとして受け止めていない。「現実には～だが、物理では…である」と考えている。この学習観を改めさせるには実験が有効であるが、多くの生徒は何のために／どのような実験をしているのか把握できていないまま実験に臨んでいる。演示実験と生徒実験のどちらにおいても、前提となる知識を生徒と共有することに十分な時間をかける必要がある。

人間は新しい知識を学ぶ時、必ず既存の知識と結びつけることで学習する（構造主義）。授業においても、生徒の既存知識を正確に把握し、新しい知識との間に橋渡しをして知識を提示するべきである。

生徒の物理に関する知識は、物理学者とは異なり、一貫して体系だった構造を取っていない。個別の現象や方程式が、あまり互いに結びかないまま保持されている。生徒の既存知識を引き出して、それと対立するような現象を提示して葛藤させることは、生徒の知識構造の体系化に有効である。

上述した PER の示唆を取り入れ、生徒にとって有効な学習環境を人工的に教室内に作り出そうとすれば、いわゆる「アクティブラーニング」型授業に自然とたどり着くと、著者は考える。著者の授業 [5,6] では常に、実験を主軸として PER の成果に基づいた課題や発問を設定し、生徒が教師との／生徒同士での議論の中で葛藤しながら生徒自身の言葉で物理を理解していくような展開を取っている。また、PER の研究者が開発した教材 [7,8] も常に参照している。

一方で、原子分野においては、世界的に見てもアクティブラーニング型授業の実践報告や教材開発が他分野に比べてなされてこなかった。その主な理由として、力学や電磁気学をはじめとする古典物理学に比べて、実験を主軸とする展開が困難であることが挙げられる。その状況について、Knight [2] は次のように指摘している。

There is a strong tendency in quantum physics for instructors who have been pursuing active learning to revert to lecture mode. It's true that there are fewer demonstrations and that the material gets more abstract. However, most students still need opportunities to practice basic reasoning with concepts. In fact, the abstract nature of the concepts makes immediate feedback more important than ever. Instructors are urged to use a blend of focused mini-lectures, small-group exercises, and example problem solving (with student participation).

つまり、実験を主軸とした展開が困難であることとは関係なく、生徒が物理を理解するためにはアクティブラーニング型授業が必要である。他分野に比べて抽象性の高い内容を扱うことは、むしろアクティブラーニング型授業の必要性を強めているのである。このような背景を鑑みて、著者は原子分野においてもアクティブラーニング型の授業を実践し、また他にも実践する仲間が一人でも増えることを願い、本稿を書いている。

1.2. 原子分野に関する概念調査の結果

本節では、生徒の原子分野に関する概念調査の結果を、先行研究を参照しながら解説する。但し、原子分野に関する公式の概念調査結果は、他分野に比べて報告数が極端に少ない。そのため、以下には非公式の調査結果も併せて報告する。

Steinberg ら [9] は光電効果の理解に関する調査を、現代物理学の講義を履修する大学 2 年生を対象として実施している。ほぼ全ての学生が、光電効果の現象自体に概念理解の難しさを感じており、それに加えて、光子モデルを用いた説明を与えることにも相当な困難があることが明らかとなった。この Steinberg らの結果に加えて、大多数の学生が光電効果の実験結果がどのように古典物理学の理論に反していて、光子モデルを用いるとどのように説明されるのかを理解していないということを、Knight [2] は非公式の調査結果として指摘している。

光電効果の理解が困難であることの主な原因が、電気に関する概念理解の欠如にあることを、Knight [2] と Steinberg [9] の両者ともが指摘している。Knight によれば、静電気学及び電気回路に関する講義において、学生のほとんどが概念理解を伴わないまま履修を終えており、そのため光電管装置内部の各点における電位の値を見出せずにいる。Steinberg らの調査においては、現代物理学の期末試験において「光電効果の実験において阻止電圧がゼロのとき、光電流が負、あるいはゼロとならないのはどうしてか説明せよ」という出題をしたところ、過半数の学生が不正解であった。その上、最も多かった解答はオームの法則に基づいて説明されていた。さらに「光電効果の実験において、光電管両極の電位差と光電流についてのグラフを描け」という出題においても、1/3 の学生がオームの法則を示すグラフ（原点を通る直線のグラフ）を描いていた。これらの結果に加えて、有意な数の学生が電極から電子を放出させているのは電池であると考えていることが明らかとなった。これらの学生は、「電流の起源は何か」という出題に対し、電池に言及し、光には触れていなかった。

前段落での調査結果はつまり、学生のほとんどが光電効果の実験装置の構造すらも把握できていないことを意味している。光電効果の理解には、阻止電圧、光の振動数、光の強度など様々な変数の関係を光子モデルに基づいて整理することが求められるが、多くの学生はその入口にも到達していないということである。しかしながら、多くの教科書（少なくとも高校物理に関しては文科省検定済の教科書すべて [例えば：10]）では、このような事実が注目が払われていないと著者には感じられる。

光電効果の他にも、光子の波動性に関する学生の理解についての調査が、ワシントン大学のグループによって行われている [2]。その調査の結果、有意な数の学生が、光子に備わる波動性とは、図 1 のように波状の軌道を描いて移動することであると誤解していると報告された。この結果を支持するように、Knight による追調査 [2] では、「波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ の光が点 A から放出

された。その放出された光の光子が、点 A から $5\mu\text{m}$ 離れた点 B で観測された。点 A から点 B に光子が移動する際の軌跡を描け」という問題に対して AB 間に正弦曲線を 5 周期分描いた学生が半数に上った。

波動性についての誤解は、二重スリットをはじめとする電子の回折・干渉についての学生の理解にも見受けられると、ワシントン大学のグループは報告している。電子は波状の軌道を描いているので、どちらのスリットも通過できるという誤解である。他の研究グループによる非公式調査からは、電子の干渉・回折は、複数の電子同士が衝突あるいは反発して起こるものであるという学生の誤解も報告されている。どちらの研究グループによる報告を見ても、学生にとっての波動性が量子力学的な描像に基づいていないことが明らかである。それどころか、「波状の軌道を描いて運動する粒子」というのは、古典物理の立場においても波動ではない。

前述したのは量子力学的な波動性についての誤解であるが、そもそも古典物理における波動の性質についても多くの学生が誤解をしている。原子分野においても、原子や X 線の分光スペクトルの解析など、古典的な波動の理解が求められる機会が多い。加えて、古典的な波動の理解がなければ量子力学的な波動を理解できるはずがない。ここでは古典的な波動の概念調査の結果も紹介することとしよう。以下では、Ambrose ら [11] が波動光学を学習後の大学生を対象として行なった調査の結果を示す。まず、学生は幾何光学で説明されるべき光学現象と、波動光学で説明されるべき光学現象とを区別できていない。波動光学を学習後の学生であるにも関わらず、幅 1 cm の隙間を通り抜ける光に対してもホイヘンスの原理を適用したり、回折はスリットの端で光が反射して起こる現象だと誤解したりしている。さらに同調査において、「ヤングの二重スリット干渉実験において、二重スリットの片方を塞いでしまったら、干渉パターンはどのように変わるか説明せよ」との問いに対し、正答できたのは半数を下回った。主な誤答は、「明点の位置は変わらないが、暗くなる」と「明点の半分が消えてしまう一塞がれたスリットの側の明点が」というものである。どちらの誤答においても、干渉パターンが 2 つの球面波の重ね合わせによって生じていることが認識されていない。以上の結果に加えて、波動の重ね合わせそれ自体が多くの学生にとって理解困難な現象であると、Wittman ら [12] によって指摘されている。

前段落の記述から、古典物理の範疇においてすら波動の理解には相当な困難があることが伺える。この状況を鑑みると、少なくとも伝統的な一編通りの授業においては、生徒たちが分光スペクトルから原子の内部構造を読み取ったり、電子線の干渉パターンから量子力学的な波動性を実感したりするとは著者にはとても思えない。

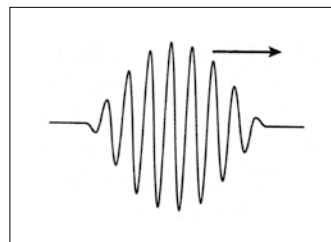


図1 光子の移動する軌道が波状であると、有意な数の学生が誤解している。([2] より引用)

1.3. 授業の方針と戦略

本節では、著者がどのような方針と戦略に基づいて、原子分野の授業を展開したかを説明する。次段落以降で詳しく述べていくが、科学史を追体験しながら原子の内部構造解析に迫っていくような展開をとった。

単元全体にわたり、「我々はなぜ目に見えない原子の構造を知っているのか」をテーマとして掲げた。生徒たちは化学の授業において、既に原子の構造を学んでいる。陽子と中性子からなる原子核の周りを電子が周回運動しているということを、全員が知っている。その一方で、どのようにして原子の構造が明らかとなったのかは理解していない。生徒にとって原子構造は「そういうもの」という天下りの知識なのであり、高校までの化学であればそれ以上の理解は特段必要とされない。しかしながら、物理の理解としては到底不十分である。

人類が原子構造の理解に至る過程には、いくつもの困難を克服してきた歴史がある。新たな実験結果に対して合理的な説明を与えるべく理論の改良を積み重ね、目に見えない世界を解き明かしていくという営みは、まさに科学の本質である。科学するとはどういうことか、原子分野の学習を通して生徒に理解させたいと考えた。さらに、原子構造を解き明かす過程において、人類は古典物理学の限界に直面し、量子力学の幕開けを迎えたという事実もある。著者が原子分野の授業を行っている高3の生徒の大多数が大学の理系学部に進学することを考えると、量子力学の必要性は何としても理解させたい。なぜならば今日、ほぼすべての理系学部・学科において、量子力学の理解が必要とされるからである。しかも大学で量子力学が必要となるのは、多くの場合物理よりも化学的な内容の学習においてであり、物理の授業で量子力学を学ぶ学生は少ない。この事実を踏まえると、高校物理の教員には、生徒に物理としての量子力学の導入を行って大学での学習に滑らかに接続させる責任があると、著者は考える。

前述した考えに基づいて、原子分野の授業を科学史に沿った展開によって行った。Arons[3]やKnight[2]が指摘しているように、生徒が光電効果や物質波をはじめとする現代物理学の理論を理解するためには、教員が実験結果とその解釈をただ提示するだけでは不十分である。確かに原子分野の実験を教室内で実施するには限度がある。しかし、結果と解釈を示すだけではなく「この結果から何がわかるのか」「これまでの理論ではこの現象が説明できないのはどうしてか」ということを、生徒が自らの言葉で表現・議論しながら理解していく必要がある。

そこで、まず授業の冒頭で「水素原子の構造を、図と文を用いて詳細に説明せよ」という課題を与えた。生徒の描いた図に対して著者が発問を重ねていくことで、生徒自身に「原子の構造は知っているけれど、なぜそうなっていると分かるのかは理解していない」という事実気づかせた。その後、単元全体のテーマである「我々はなぜ目に見えない原子の構造を

知っているのか」を生徒へ提示し、歴史に沿った科学的論証の体験を通じた授業を行っていった。この授業戦略は、小沢 [13] による実践を参考にした。

また、科学的論証を行っていく際には、古典物理の正確な理解が常に必要となる。前節に示したように、古典物理の概念理解に生徒たちは相当な困難を抱えており、それが原子分野の誤解にも繋がっている。著者はこの事実を、原子分野の学習を通して生徒に古典物理を復習させる良い動機にできると捉えた。古典物理の既習事項について、その内容を逐一生徒たちに自分の言葉で説明させるような課題を与えた。その上で、古典物理の限界に直面させるような実験結果を提示し、なぜその現象が古典物理の理論で説明できないのかを述べさせるような展開を繰り返した。教員による短い講義と、生徒活動による課題を授業時間内に繰り返すこの授業方法は、Mazur [14] の開発した *Peer Instruction* の手法を参考にしている。

さらに、生徒の学習姿勢を概念理解や自身の言葉による表現に集中させ、意味のない暗記を避けるため、期末試験においては教科書と授業プリントの持ち込みを認めた。このことによって、「著者が生徒に求めているのは、暗記ではなく理解である」というメッセージを生徒は受け取ってくれたようであった。

加えて、著者は古典物理の授業においても、徹底したアクティブラーニング型授業で概念理解を目指した。特に、光学・静電気・電気回路については原子分野の授業への接続もにらんで、生徒自身の言葉で実験結果を議論させる展開を徹底した。本稿でその詳細を紹介する余裕はないが、その事実だけはここに記しておく。詳細に興味のある読者は、著者まで直接連絡をいただきたい。

最後に、科学史に関して著者が参照した文献を紹介する。というのは、著者が歴史に沿った原子分野の授業展開を行おうとした際、教科書 [10] の記述だけでは生徒に提示する情報として不十分であると感じたからである。特に陰極線・電子の発見についてはあまりにも省略されすぎていて、生徒が原子構造を解析するための動機付けとして不十分であると考えた。そこで、既に参照した Knight [2] と Arons [3] の著書に加えて、広重 [15] による物理学史の書籍を参照した。但し、広重の書籍は既に絶版である。

1.4. 本稿の構成

本章のおわりに、本論文の構成を俯瞰しよう。本章では、原子分野の授業におけるアクティブラーニング型授業の必要性和、その授業方針及び戦略について、先行研究による概念調査の結果を踏まえて示した。続く第2章では、実際の授業実践について報告する。全9時間の授業のうち、陰極線の分析と電子の発見に関する2時間の授業について、実験や課題を並べながらどのように原子分野の授業を展開していったかを報告する。残りの7時間については、簡潔に紹介する。最後の第3章は、議論とまとめに充てる。

2. 原子分野の授業実践報告

本章では、原子分野の授業実践報告を行う。すべての授業について詳細な展開や実験・課題を示しながら報告していくことは、紙面の都合からできない。そこで、原子分野のはじめの2時間「陰極線の分析と電子の発見」についてののみ、詳細な実践報告を第1節で行う。残りの7時間は、流れだけを簡単に示す。

授業を行ったクラスの情報は以下の通りである。

中央大学附属高等学校 2016年度 第3学年 理系クラス（物理選択）

I組（中央大学への内部進学コース 男子20名 女子7名）

J組（他大学への受験コース 男子7名 女子4名）

両クラスとも、附属中学校からの内部進学生と、他中学校からの高校入学生が混在している。

物理（5単位）の内、2学期の終わりの計9時間を原子分野に充てた。

毎時の授業においては、PCで作成したスライドシートをプロジェクターで投影しながら板書も併用した。生徒には、スライドシート4枚をB4用紙1枚に縮小印刷し、全スライドを配布（付録参照）した。また、スライドのPDFデータと授業の録画データをWeb上に限定公開し、生徒たちがいつでもアクセスできるようにした。

2.1. 授業実践報告：陰極線の分析と電子の発見

最初の2時間は「誰が原子を見たか」と題し、陰極線の分析と電子の発見を扱った。この2時間の目的は、9時間にわたる原子分野の学習に対して動機付けを行うことである。原子の中に構造があることや電子の存在といった、これまで当然のように扱ってきたことが決して自明ではないことに気づかせた。

課題

水素原子の構造を図と文章で、なるべく詳細に説明せよ。

生徒全員が、原子核の周りを電子が周回しているという図を描き、説明を行うことができた。原子核が正電荷である陽子と電荷を持たない中性子からできていること、電子が負電荷であることも説明できた。

ここで、著者から生徒に「みんなの描いた図は正しいのだけれど、なぜ正しいとわかる？ 原子のような目に見えない世界の構造を、なぜみんなが知っているの？」と問いかける。少

し間において、生徒に原子構造を知ってはいるけれど、どうしてそうなっているのか理解していないことを自覚させた。そして、ここからの授業が原子構造の解析をテーマにすることを告げ、次の事柄を学んで欲しいと提示した。

- ・これまでの物理の理論がどこで破綻して、現代物理学の理論が何故必要になったのか
- ・歴史に沿った科学的論証の体験
- ・なぜ、原子や電子が存在すると言えるのか

さらに、授業の説明として次のことを述べた。

- ・実際に実験室で行える実験が他分野に比べて限りがある
- ・そのため著者が提示する実験結果に対して、生徒ひとりひとりがその解釈を自らの言葉で行う授業スタイルを取る
- ・試験に教科書と授業プリントの持ち込みを認めるので、意味のない暗記は避けて概念理解に努めること
- ・大学進学後、物理学以外の分野でも量子力学の知識が必要になる

本来であれば原子構造を解析していく前に、どのようにして「物質が原子でできている」と考えられるようになったかを提示すべきであろう。しかしながら、生徒たちは既に化学の授業で学習していることと、時間の都合から著者の授業では割愛した。1850年代には既に物質は少ない種類の原子の組み合わせでできていて、どの原子も互いに似ていることが受け容れられていたとだけ述べた。一方で物質の電導性については、固体についての理解は進んでいたが、液体や気体の電導性は謎のままであったと提示し、真空放電の実験へ移った。

実験

減圧した気体に高電圧をかけると電気を通すことは、Faraday らによって研究されていた。真空度によって様子は異なる。実験で実際に確認しよう。真空管内部の電極付近に発光していない領域「Faraday 暗部」が見えるだろうか？真空度は、0.05 ～ 0.004 気圧程度である。

電源には誘導コイルを用いた。生徒全員に Faraday 暗部の存在を認識させた。電極の正負を逆転させることによって、Faraday 暗部が必ず正極付近に生じることも確認した。この実験結果から、原子は自然界の最小単位ではなく、内部にさらに構造を持っておりそれが電気的性質を決めると考えられ始めたことを告げた。

次に、1858年にPlückerによる真空技術の革新が起こり、0.00004気圧までの減圧が可能になったと提示した。

実験

0.00004気圧まで減圧して真空放電を行う。先の真空放電とどのように異なるだろうか？

実際に実験を行い、Faraday暗部が生じないこと、菅全体がほやっと光ることが確認できた。この2つの観察結果をクラス全員で共有したことを確認し、次の実験に移った。

実験

菅の中に十字の物体を立てて、真空放電を行う。

管内には十字の影が生じる。また、電極の正負を入れ替えると、影は消える。この実験結果は中学校でも扱っているはずだが、生徒たちからは驚きの声が上がった。

課題

影ができたことから、何がわかるか説明せよ。

十字に向かって何かが飛んでいるということは全員が気づいたようであったが、「何か」ではなく「電子」が飛んでいるという生徒も現れた。著者が「え？電子って何？」と訊き返すと、授業の方針を理解してくれたようであった。また、負極から正極の方向へ何かが飛んでいるということも認識できていた。まったく正体不明であるが、何か名前がないと議論しにくいので、「陰極線」と名付けることとした。陰極は負極を表しているが、「線」には何も意味がない、というより線ではないことを注意した。

1870年代に入ると、Crookes管の発明によって系統的な実験が可能になった。90 cmにわたる長い管が、真空度を損なわずに作成された。さらに穴を開けた金属板を管内に設置したことで、陰極線を直線上に制御できるようになった。これらの事実を生徒に示し、Crookes管の見取り図を板書しながら説明していった。そして、Crookes管の実験に移った。

実験

Crookes 管内に磁場をかけると、陰極線が曲がる。もしも陰極線が電荷であるとしたら、正電荷か、負電荷か。

この実験結果の解釈には、先の実験で負極から正極に向かって陰極線が飛んでいたことと、フレミングの左手の法則を組み合わせなければならぬため、個人ではうまく解釈できない生徒もいた。その後、周囲の生徒同士で考えを共有することを促し、電荷であるならば負電荷であるとの結論に落ち着いた。

実験

Crookes 管内に直線状のレールに束縛された羽根車を設置する。陰極線が羽根車に力を及ぼして、羽根車が動き出す。電極の正負を逆にすると、逆向きの力を受ける。

この実験は直感的にもわかりやすい。さらに、実際に行うことはできないが、次の2つの実験結果を提示した。

- ・電極にどんな金属を用いても陰極線が生じ、陰極線の性質は金属の種類によらない。
- ・Crookes 管内に薄い金属フィルムを設置すると、発熱して赤くなる。つまり、陰極線は物体にエネルギーを与えることができる。

前段落で紹介した複数の実験結果は、陰極線の正体は波動なのか粒子なのかという大議論を巻き起こした。そこで、生徒たちにどちらだと思うか話し合わせてみた。

課題

Crookes 管の実験結果から、陰極線の正体が波動と粒子のどちらだと考えられるか話し合え。

粒子だと考える生徒が多かったが、波動だと考える生徒も数人いた。粒子だと考える生徒は、磁場によって陰極線が曲がったことと、羽根車に力を及ぼしたことを根拠に挙げた。一方、波動だと考える生徒は金属フィルムが発熱したことを根拠として挙げた。波動説への反論として、「粒子が非弾性衝突すれば熱が生じる」との意見も出た。意見が出なくなった段階で、確かに粒子説が優位そうであるが、波動説を否定する決定的な結果があるわけではないと著者から述べた。粒子だと考えられる実験結果と波動だと考えられる実験結果が同在しており、どちらか断定することはできない。これらの実験結果を統一して説明することが当時の科学

者たちにはできず、たいへん難解な問題として大議論を呼んだことを述べた。

Crookes の立場は「陰極線の正体は負電荷粒子である」というもので、実験結果を次のように解釈した。

- ・ Crookes 管内の残留気体が陰極に接触することで負に帯電
- ・ 負に帯電した気体分子は陰極からの静電気力によって急激な反発を受ける
- ・ その加速された気体分子が衝突することで、羽根車を動かしたり、フィルムに熱を生じさせる

しかしながら、Crookes は陰極線粒子が電荷であることを決定づけるために電場によって曲げようとしたが、うまくいかなかった。加えて、Crookes の説はさらなる反論に合う。

課題

Crookes の説に対する反論とはどのようなものか考えよ。

Crookes が実際にあった反論とは、「Crookes 管内における残留気体の平均自由行程を考えると、単一の分子が管内の端から端まで他分子と衝突せずに運動することはできない」というものであった。もちろん、著者としては生徒がこの反論に自力でたどり着くことは期待していなかったが、1 名だけ正解者が現れた。とはいえ定量的に見積もったわけではないので、天下りの次の課題に取り組ませた。

課題

標準状態において、気体分子 1 つあたりが占める体積を見積もれ。

大雑把な方法ではあるが、平均自由行程をどうしたら高校生に計算させることができるか著者なりに考え、このような方法をとった。なお、アボガドロ数のおおよその値は、1865 年には既に見積もられていた。標準状態において理想気体 1 mol が占める体積は $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ であり、それをアボガドロ数で割れば、分子 1 つあたりの占める体積が $3.72 \times 10^{-26} \text{ m}^3$ と求まる。これを立方体であるとして、3 乗根をとって 1 辺の長さを求めると、 $3.34 \times 10^{-9} \text{ m}$ となる。Crookes 管の中は大気圧の 10^{-6} 倍程度の圧力であることを考慮しても、Crookes 管のスケールである 90 cm とは比較にならない短さである。単一の分子が管内の端から端まで、他分子と衝突せずに運動することは期待できない。

平均自由行程についての反論に加え、さらに粒子説を否定する実験結果が報告された。そ

れは、陰極線は非常に薄い金属箔をすり抜けることができるというものであった。Crookes の粒子説において陰極線の正体は気体分子であるので、同じく原子によって構成されている金属箔をすり抜けるはずがない。Crookes の粒子説は棄却された。

粒子説が棄却されると、Lenard によって「陰極線の正体は電磁波である」という波動説が提唱された。その根拠は次の通り。

- ・ 1891 年に陰極線が薄い金属箔をすり抜けることを利用して、陰極線を Crookes 管外部へ取り出すことに成功した
- ・ 陰極線が原子からできているのなら、いくら薄いとはいえ原子でできた金属箔を曲がりもせずに通過できるはずがない
- ・ 当時の現象理解の理論として、粒子の運動と波動現象は厳格に区別されていた
- ・ 粒子説が棄却された以上、波動であるとは考えられない

しかしながら、Perrin によって報告された実験結果により、Crookes の波動説も棄却される。Perrin は、Crookes 管内に電位計をつないだ金属を設置し、その金属に陰極線が当たるようにした。その結果、金属に陰極線が当たると、その金属はどんどん負に帯電していくことが明らかとなった。電磁波によって金属が帯電していくということはありえない。よって Lenard の波動説は棄却された。しかしながら、Lenard の粒子説も既に棄却されている。陰極線の実験結果に対してどうすれば合理的な説明が与えられるか、当時の科学者たちにとってたいへん難解な問題であった。

Perrin の波動説が棄却されると、陰極線が負に帯電した粒子であるという再度の粒子説が Thompson によって提唱された。Thompson は粒子説の根拠として、次の実験結果を示した。

- ・ Perrin の実験における電位計をつないだ金属の位置を、陰極線の軌道上からずらした
- ・ すると、電位計をつないだ金属は帯電しなかった
- ・ さらに、磁場をかけることで陰極線の軌道を曲げて、電位計をつないだ金属にあたるようにする
- ・ 金属は負に帯電していった

これらの実験結果から、Thompson は陰極線の正体は負電荷であると考えた。では、なぜ Crookes の実験において、陰極線を曲げることができなかったのか。その解明には、次に述べる X 線による気体分子のイオン化の発見が待たれた。

1895年にレントゲンによってX線が発見され、気体分子のイオン化が確認された。気体分子がイオン化して帯電することで、Crookes管内の電場を無効化してしまう。

歴史的な順番とは前後するが、授業の見通しを良くし、また生徒の混乱を避けるため、ここでX線的话题を持ち出すこととした。

課題

X線は気体分子をイオン化させることが発見された。当時、イオン化現象は水溶液中の電離のみが知られており、 O_2 、 N_2 やHe分子のイオン化は原子が内部構造と電荷を持つことの直接的な証拠となった。どうしてか説明せよ。

生徒の説明では、He分子のイオン化に注目したものが多かった。単原子分子であるHeがイオン化したということは、He分子は正電荷と負電荷が合わさって構成されたものだと考えられる。一方で、 O_2 、 N_2 といった単体の気体分子に注目した説明は少なかった。水溶液のイオン化においては、分子が異なる種類のイオンに電離する。例えば、NaClは Na^+ と Cl^- に電離する。これは、静電気の単元で学習した、2種類の中性物質同士を接触させるとそれぞれが正負に帯電する現象と同様である。例えば、毛皮と塩化ビニルパイプを摩擦すると、それぞれが帯電する。しかしながら、単体である O_2 、 N_2 は異なるイオン同士に分かれるはずがないので、やはり分子内部に正電荷と負電荷からなる構造が存在するはずである。 O_2 、 N_2 の帯電については、著者からの発問により、生徒にはかなり誘導的に答えさせることになってしまった。

気体分子がイオン化するという発見は、原子が内部構造を持つことの証拠であると同時に、陰極線が電場によって曲がらなかった理由も説明できる。

課題

陰極線の効果で気体分子がイオン化すると考えると、イオン化した気体分子はCrookes管内で電場を無効化すると考えられる。どうしてか説明せよ。

自力で正解できた生徒も数人現れたが、ほとんどの生徒は著者からの「導体の内部に静電場ができないのはどうしてだったか」という発問で、正解にたどり着いた。陰極線を曲げようと電場をかけても、イオン化した気体分子が移動することで逆電場を生じ、外からの電場を打ち消してしまう。

真空技術がさらなる発展を迎え、Crookes管内の残留ガスが作り出す電場が無視できる程度の真空度に達すると、Thompsonはついに陰極線を電場で曲げることに成功した。この結

果により陰極線は負に帯電した粒子であり、それは原子内部に存在することが明らかになった。この実験の結果、陰極線粒子の比電荷が測定され、それは $e/m \sim 10^{11}$ [C/kg] という値であった。この値は、残留ガスや電極金属の種類によらない。この結果の意味するところを考えるため、さらなる課題に取り組ませた。

課題

陰極線粒子の比電荷が測定され、それは $e/m \sim 10^{11}$ [C/kg] であった。一方で、電気分解の実験を通して測定された水素や酸素分子の比電荷は、 $e/m \sim 10^7$ [C/kg] という値であった。この値の違いが意味していることは何か？

「陰極線粒子は原子に比べて質量が小さい」という考えはすぐに出てきた。生徒は陰極線の正体が電子であることも、電子が原子に比べて非常に軽いことも既に知っているのが当然だと考えられる。一方で、著者からの「なぜ両者の比電荷の差が、電気量でなく質量にあると考えられるのか？」という問いに答えられた生徒は少なかった。この発問を受けてようやく、陰極線粒子の比電荷が残留ガスや電極金属の種類によらないという実験結果の重要性に気づいたようである。質量に注目させたところで、次の課題に移った。

課題

Thompson が電場で陰極線の軌道を曲げた実験において、その軌道には重力の影響がほとんどなかった。これは何を意味するか？

この課題にも、多くの生徒が「陰極線粒子が非常に軽い」「質量が小さい」と答えた。そこで著者は斜方投射を例に、重力が生じさせる加速度は、物体の質量によらないことを指摘した。空気抵抗の影響があると、質量による違いが生じるという考えを示した生徒も現れたが、Crookes 管の内部は陰極線の軌道が電場で曲がるほど真空に引かれている。要は、陰極線粒子が運動している時間内において、重力と静電気力のスケールを比較すべきなのである。

本時の最後に、1910 年に Millikan が陰極線粒子の電荷の測定に成功したと告げた。Millikan は帯電した細かい油滴の落下を電場で制御することで、電荷が $e = -1.6 \times 10^{-19}$ [C] であること、質量が $m = 9.1 \times 10^{-31}$ [kg] であることを突き止めた。歴史的にはこの時点ではまだ、陰極線粒子は「電子」とは呼ばれていない。しかしながら、生徒の学習と授業における利便性を考慮し、以降の授業では陰極線粒子を電子と呼ぶことにした。

なお、Thompson の実験と Millikan の実験の定量的な解析は、生徒の試験勉強に譲ることとした。

2.2. 残りの授業について

本節では前節に示した陰極線に関する授業に続く、残りの7時間の授業の流れを簡単に紹介する。

第3時：光電効果

本時からは本格的に量子力学的な現象を扱いながら、原子構造の解明を目指していく。最終的な目標はもちろん、Bohrによる水素原子模型の導出である。前時までの授業を通して、原子構造の解明への動機付けは十分に行ったと考える。

本時の目的は、光電効果の理解にある。光電効果が古典的な光の理論では説明できない現象であること、また光子モデルを用いるとどのように説明できるのかを理解させたい。Knight [2]も指摘しているように、光電効果は量子力学理解の鍵となる物理現象である。

金属板に紫外線を照射すると、電子が飛び出すことを実際に示したい。実験室においては箔検電器に対して殺菌灯などで紫外線を照射すると、帯電して箔が開くことで示すことができる。しかしながら、著者の勤務校には適切な紫外線光源がなく、実際に示すことができなかった。そこで、YouTube動画 [16] で代用することにした。

その後、図2の装置の見取り図を生徒に説明し、電場の向き、強さ、光電流に関する実験結果（図3）を示した。ひとつひとつの実験結果に対し、それが何を意味しているか生徒自身の言葉で説明させていく。「図3のグラフが、どのようになっていれば、当時の科学者たちにも違和感がなかったか？」という課題に取り組みさせることで、古典物理の範囲では説明できない現象であることを認識させていった。

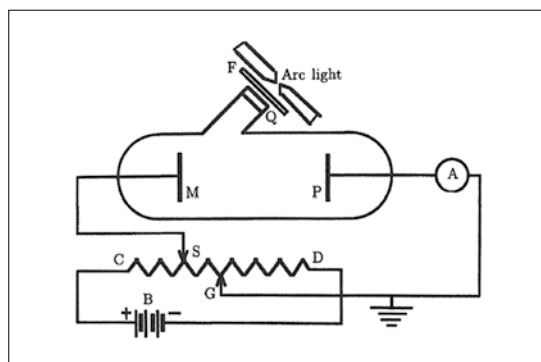


図2 Philipp Lenard による光電効果の実験装置図。フィルターFを通して極板Mに向かって紫外線が照射され、極板M、P間の電場は抵抗への接点Sの位置をずらすことで調整できる。極板Mから飛び出した光電子がPに到達すると、光電流として検出される。([3]より引用)

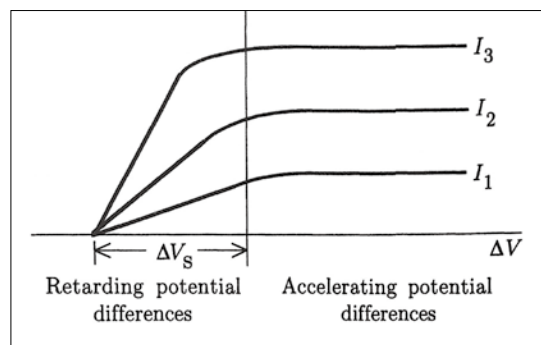


図3 光電効果の実験結果。横軸は極板MP間の電位差を、縦軸は光電流の大きさを示す。また、光の強度を $I_1 \sim I_3$ の3段階に変えている。([3]より引用)

第4時：Einstein の光量子仮説

本時においては Einstein の光量子仮説を導入し、前時の光電効果の実験結果はすべて光子モデルによって説明がつくことを示した。もちろん、最後には生徒自身の言葉で説明させた。

生徒に混乱を与えないように、教科書の記述よりも丁寧な導入を行なった。特に、「光子と電子が必ず1対1で反応する」という点は強調した。過去の著者の授業において、「1つの電子が2つの光子からエネルギーを受け取れば仕事関数を上回って金属の束縛から逃れられるのではないか」という考えを持つ生徒がいたからである。2つの光子からエネルギーを得る確率が低すぎるので無視できるということであり、量子力学的には二次の摂動に対応する。

第5時：原子構造を光で探る

本時の目的は、光のスペクトルを光子モデルに基づいて解析できるようになることである。これができなければ、Bohr の水素原子模型にたどり着くことはできない。一方で前章で紹介したように、古典的な波動の理解 [11,12] にも困難を抱える生徒が多い。そこでまず、「回折格子を用いて光の波長を測定する方法を述べよ」という課題に取り組ませ、復習を行なった。

続いて、回折格子を用いて分光を行なった際、連続スペクトルを示すものと線スペクトルを示すものがあることを指摘する。教科書の写真(図4)を見ながら、線スペクトルが各原子ごとに固有のものであり、解析の手がかりになることを説明していった。

さらに、Na ランプと食塩を用いた吸光実験を行い、原子が固有の光を吸光することを実感させた。食塩水をつけた針金をガスバーナーの炎の中に入れて、Na の炎色反応を観察する。暗室で観察すると、Na の D 線に対応するオレンジ色の炎が観察できる。さらに、Na ランプの単色光をバーナー後方から照らすと、黒い炎が観察される。食塩は Na を主成分とするので、Na ランプからの光を吸光するのである。生徒たちは驚いていた。

しかしながら、この実験結果は「Na が吸光した」と安易に解釈するわけにはいかないことを、著者から生徒へ指摘した。何故ならば、食塩は吸光と発光を同時に行っているからである。Na ランプの光を食塩が吸光している一方で、炎色反応の発光も同時に行われている。それなのに、どうして我々の眼に炎が黒く映るかといえ、もちろん周囲との光度の比率によるものである。もっと直接的な原子の吸光実験を教室で行いたいものであるが、そのよ

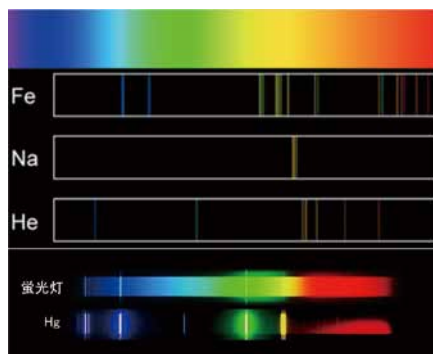


図4 各種の分光スペクトル。一番上のは太陽光の連続スペクトル、次いで Fe, Na, He 原子の線スペクトルを示している。下には、蛍光灯と Hg 原子のスペクトルを比べて、蛍光灯の中に Hg 原子が含まれていることを示した。([10] より引用)

うな実験を著者は知らない。ぜひ、読者から教えていただきたい。

この実験を行なった後に、光量子仮説とスペクトルの関係を示した。「発光：電子がエネルギーを失う際の光子の放出」「吸光：電子がエネルギーを得る際の光子の吸収」というモデルに立つことを明示した。光量子仮説とスペクトル解析を組み合わせれば、原子内部における電子の振る舞いを知る手がかりになることを生徒に認めさせる。その上で、バルマー・リュードベリによる水素原子スペクトルの現象論的公式を提示し、この公式に従うような水素原子模型を構築することが、残りの授業の目標であることを宣言する。

原子の構造解析で必要となる X 線と電子の相互作用、光の運動量、物質の波動性を今後の授業で学び、最後に Bohr の水素原子模型を扱う。この道のりを生徒に明示し、長い道のりではあるが、水素原子模型にたどり着けるように生徒を鼓舞していった。

第6時：粒子と波動の二重性

本時の目的は X 線の解析を通して、光に粒子と波動の二重性があることを認識することである。Bohr による水素原子模型の導出と X 線の解析は歴史的な順番が前後してしまうが、授業の見通しを良くし、また生徒の混乱を避けるためにここで X 線の解析を行うこととした。

まず、「X 線が波動であるという仮定に基づいて、X 線の波長を決定したい。しかしながら、X 線は回折格子を透過してしまい、回折は起こらなかった。なぜか？」という課題に取り組ませた。生徒たちは、回折格子のスリット幅に対し X 線の波長が短すぎるという考えにすぐに落ち着いた。1 学期の光の授業において、幾何光学と波動光学の分かれ目がどこにあるかということを徹底して議論してきた成果に思える。その後は天下りのように、金属結晶格子において原子同士の間隔がちょうど X 線にとっての回折格子に対応するということを述べ、ラウエ斑点を示した。

前段落で述べたのは X 線の波動性である。ここからは X 線の粒子性を示すために、スペクトル解析を行った。図5の X 線スペクトルに、明らかな異常があることを指摘する。このスペクトルに対し、光子モデルに基づいた定量解析を行っていった。

まず、X 線の持つエネルギーを光量子仮説に基づいて説明させる課題に取り組ませた。電子の持つ運動エネルギーが失われた分、光子のエネルギーに変わっていることを生徒間で教え合いながら気づかせた。そして、その定性的な議論から連続 X 線の最短波長を求めさせる定量的な課題へと発展させた。定性的な理解を先に与えておけば、計算は容易である。

特性 X 線の正体については、Bohr の水素原子模型導出への道筋からは外れるが、ここで“カンニング”と言った上で正体を解説した。金属結晶内で金属結合している電子が軌道から叩き出される際のエネルギーが X 線光子になっているのであり、それゆえ各種のターゲット金属に固有のスペクトルを示すのである。

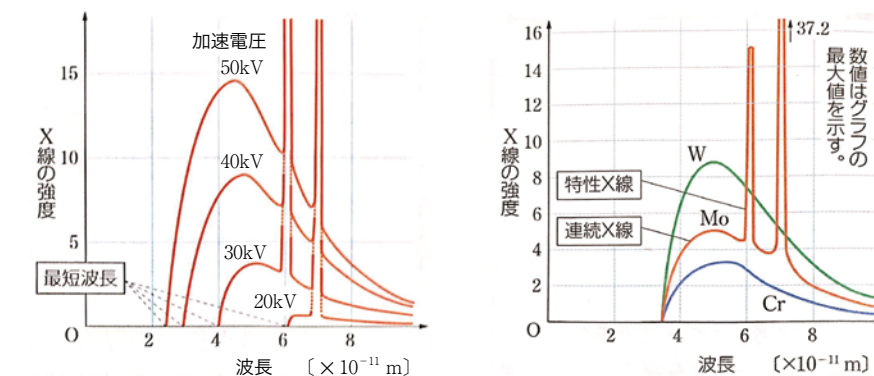


図5 各種の X 線スペクトル。左はターゲット金属を Mo にして、熱電子の加速電圧を変えていった際のスペクトルを示す。右は加速電圧を 35 kV で一定として、ターゲット金属を W, Mo, Cr の 3 種類にした際のスペクトルを示す。([10] より引用)

その後、X 線光子の粒子性を示す決定的な証拠として、Compton 散乱を扱った。Einstein が相対論の研究の中で光子がエネルギーだけでなく運動量も持つ、まさに粒子であると考えたことを紹介する。Einstein の相対論を授業の中で扱うことはしなかったものの、実際に電子はエネルギーだけでなく運動量も失っていること、そしてその運動量を受け継ぐのが光子しかないということは、この授業の文脈において生徒にとって受け容れがたいものではないようであった。

第7時：物質における波動性

本時においては、光子に限らず電子をはじめとする物質的な粒子にも波動性があることを示す。「光が粒子として振舞うのならば、粒子も波動として振舞うのではないか」と考えた科学者がいる。そのように述べて、生徒へ実験結果を提示した。

図6のような実験装置があり、電子が入射されると、スリットで電子の物質波が回折し、スクリーン上で干渉縞のように観測される。これは、生徒にとっては信じられなかったようで、笑い出す生徒もいた。さらに追い討ちをかける。実験装置に仕掛けをして、二重スリットの内のどちらかを電子が通ったのかを分かるようにしたとする。他の部分は一切いじらない。それなのに、干渉縞は消えてしまう。生徒はさらに信じられない、といった様子であった。この議論は、シュテルン・ゲルラッハの実験 [17] を参考にしている。

もちろん著者の意図としては、ここで量子力学的な波動性を完全に理解させたいわけではない。そもそもシュテルン・ゲルラッハの実験は前期量子論では理解できない。しかしながら、確かに波動であるとしか解釈できない性質が電子に備わっていることを示したかったのである。また、量子力学における「波」とは、力学的な波でも電磁波でもない。我々の生活

する実空間よりもさらに抽象的な量子空間があり、我々が見ている世界は「観測」という行為を通して量子空間から情報を取り出したものである。そこでは、「存在自体が波動として」広がっているという言い方をした。

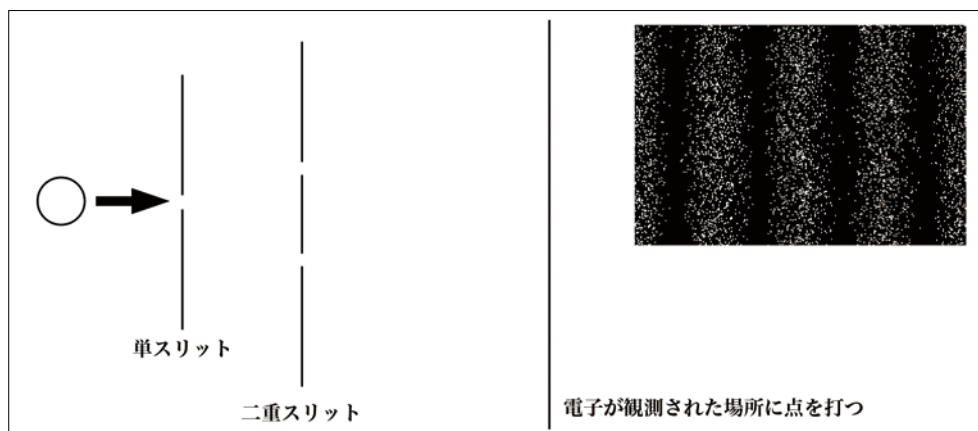


図6 電子の2重スリット干渉実験図(左)とその結果(右)。スリットで電子の物質波が回折し、スクリーン上に干渉縞のように電子が観測される。一方で、電子が二重スリットのどちらを通ったか分かるようにすると、量子力学的な波束は収縮し、干渉縞は観測されない。

その後、ディヴィッドソン・ガーマーの実験結果を紹介し、ド・ブROI波長の導入を行った。ド・ブROI波長は、Compton 散乱で導入した光子の運動量から逆算する形で、次のように導入した。

$$p = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

さらに、次時の Bohr による水素原子模型の導出をにらみ、1次元上に束縛された粒子の物質波を扱った。教科書 [10] では、物質波の定常波を水素原子の軌道中にある電子の運動にいきなり適用する。しかし、定常波を周期境界条件をなす空間にいきなり適用するのは、生徒の思考段階をあまりに無視していると著者は考える。そこで、まず長さ l の直線上を速さ v で運動する粒子について考えることにした。

長さ l の直線上を速さ v で運動する質量 m の粒子が、直線の両端で跳ね返り続けている。「もし、波動が同じような状況にあったら、何が起こるか？」と生徒に考えさせると、定常波ができるという考えが返ってきた。この場合、両端は固定端であり定常波の節となると考えるのが自然であろう。そして、ド・ブROI波長を用いて定常波の解析を行うと、空間の長さ l が半波長の整数倍になるという条件から自然に「許される状態 (モード)」という考え方にたどり着く。量子力学的な波動性が物質に備わっていることさえ認めてしまえば、物理量が

不連続になることは自然に示せるのである。この内容は Bohr 水素原子模型の導出の前に扱うべきであると、著者は考える。物理量が不連続になるというのは、原子構造に限らずもっと大きな量子力学全体の枠組みの中で起こることだからである。速さが不連続になるのであるから、当然この粒子の運動エネルギーも不連続になる。このように、古典物理学における物理量を、量子力学の枠組みに対応させて変更することを「量子化」というと述べた。

終わりに、「我々が普段生活している世界で、速さやエネルギーが不連続な値を持つようには感じられないのはどうしてか」「自分がドアを通過して教室に入ってくる際、回折が起こらないのはどうしてか」という課題に取り組ませた。不連続とはいえ、そのとびとびの間隔は日常のスケールからするとあまりに小さすぎる。また、自分の体重と歩く速度をもとにド・ブロイ波長を計算してみると、 10^{-36} m 程度になる。このような狭いスリットを我々が通り抜けるようなことはない。これは、光が隙間を通過するとき、幾何光学的に直進するのか、波動光学的に回折するのかという議論と同等である。結局、波動性が生じるかどうかは、その波動の波長と議論する空間のスケールによって決定されるのである。

第 8 & 9 時：水素原子模型

本時までに学んだ全ての知識を組み合わせ、最終的な目標である Bohr 水素原子模型の導出を行った。

まず Rutherford による α 線の散乱実験結果について考えさせた。「 α 線を金箔に打ち込むと、全体の 1/20000 の α 粒子が 90 度以上散乱され、残りは透過する」という結果から、Au 原子の構造についてどのようなことが言えるか考えよという課題に取り組ませた。原子の体積のうち、1/20000 以外の部分には何もないという考えが生徒から出てくる。そこで、Bohr の仮説として、「原子核がその原子の質量と放射能を決定し、周囲を運動する電子が化学的性質を決定する」という立場を示した。余談ではあるが、Bohr が水素原子模型を導出した主な目的は、化学的性質を原子構造から説明することにあつたのである [2,3]。

続いて、「運動する電荷は電磁波を発してエネルギーを失ってしまう。ということは、原子中の電子はどうなってしまうか？」という課題を出した。「その場で止まってしまう」という解答をした生徒もいたが、生徒同士の議論によって原子核に墜落してしまうという考えに収束した。その上で、未だだいぶ天下りの的ではあるが、「電子には量子力学的な定常状態があり、その際には電磁波を放出しない」「電子の定常状態とは、電子の物質波が電子軌道上で定常波をなしている状態である」「電子がある定常状態から他の定常状態へ遷移する際、そのエネルギー差分の光子を吸収／放出する」と仮定した。

前時のド・ブロイ波の考え方を、水素原子内の電子軌道へ応用する。基本的な考え方に前時との違いはないが、電子軌道は直線ではなく円状なので、周期境界条件を課す必要がある。

「軌道が円周上になると、前時の直線上の物質波とはどう異なるか？」と生徒に問いかけ、円周 $2\pi r$ の空間に、物質波の波長が半整数倍ではなく整数倍となるという結論を生徒間の議論から引き出した。定性的な理解を共有したのち、実際に定量的に表現させ、軌道半径 r と電子の速さ v が整数 n を含む式で制限されることを確認した。

その後、電子が行う等速円運動の運動方程式と連立させ、電子の軌道半径を求めた。さらに基底状態際の半径、すなわち Bohr 半径を数値的に求めた。原子の直径がおよそ 10^{-10}m のスケールであることを、生徒の自然観に組み込みたかったのである。さらに、電子の運動エネルギーと位置エネルギーを求め、水素原子のイオン化エネルギーも求めた。但し、生徒の概念構築に不要な混乱を避けるため、eV の単位は用いずに、J の単位で統一した。

最後に、第 n 番目から第 n' 番目の量子状態に電子が遷移する際に放出される光子のエネルギーを求め、バルマー・リュードベリ公式と一致することを確認した。但し、バルマー・リュードベリの公式においては $n'=2$ の場合しか表現されていない。それがどうしてか生徒に考えさせ、 $n' \neq 2$ の場合については可視光領域外であることにも気づかせた。最終的に教科書の線スペクトル図（図7）を参照しながら、可視光領域外であるパッシェン系列とライマン系列についても触れ、これらのスペクトルも同様にバルマー・リュードベリ公式に従うことを述べた。ここまで来て、ようやく人類は原子構造の解明に至ったのである。見えない世界を見たのである。

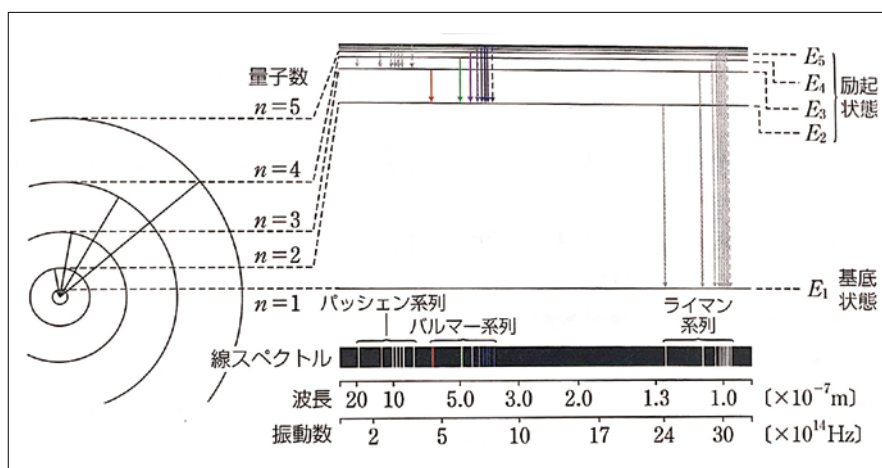


図7 水素原子の線スペクトルと、対応する遷移軌道の関係。第2量子状態以外の遷移においては、スペクトルが可視光領域外となっている。（[10] より引用）

3. 議論とまとめ

本章は議論とまとめに充てる。本稿では、実験を主軸とした展開が困難な高3原子分野についてもアクティブラーニング型授業の形態を取る必要性を述べ、またその実践報告を行った。

原子分野の授業実践において、実験を主軸とした展開は確かに困難である。その一方で、本稿の実践報告を省みると、もう数点は教室内で実際に実験を行うことができたように思われる。例えば、2.2節第3時の光電効果について、演示実験はYouTube動画で示すのではなく実際の実験を行うべきであろう。これについては前章でも述べたように、来年度予算で実験装置を購入できる予定である。また、光電効果の理解を深め、さらに第4時の光量子仮説の世界観を実感するためには、Planck定数の生徒実験も導入すべきであった。これについては授業時間がもう1時間必要であり、来年度の授業計画においてはなんとか追加の1時間を捻出したい。

第5時の原子のスペクトル解析においても、回折格子を通して実際の各種原子ランプの分光を行いたかったが、授業時間の関係で分光スペクトルの写真を提示して終わらせてしまった。せめて水素原子の分光スペクトルだけでも扱いたい。また、前章でも議論したように、Naランプと食塩の吸光実験は発光と吸光が同時に起きてしまっていて解釈が複雑である。もっと直接的な吸光実験の開発をする必要がある。

実験をより多く取り入れる改善のほか、評価方法の確立も大きな課題である。力学や電気回路においては既に国際標準となる評価問題が開発されている[1-3]が、原子分野や量子力学に関する評価方法は未だない。著者の授業においても、評価は定期試験だけである。教科書と授業プリントの持ち込みを認め、論述問題や概念問題を多く取り入れはしたが、Redish[1]が指摘しているように成績に関する評価と授業に関する評価は別個に行わなければならない。国際的な評価ツールの開発を望みつつ、自身でも開発していく必要があるだろう。また、本実践は大学教育への接続をだいたい意識してのものなので、本年度授業を受けた生徒が大学へ進学後、量子力学の学習に関する追跡調査を行っていこう。

本稿では主に授業中の実験や課題を中心に報告したが、各時のワークシートの縮小コピーを、末尾に付録として載せておく。但し、著作権への配慮からいくつかの図は削除してある。PDFあるいはスライドデータ(KeyNoteファイル)を御所望の読者は遠慮なく著者までご連絡いただきたい。併せて本稿についての意見を katsuda.phys.edu@gmail.com に頂ければたいへん幸いである。

謝辞など

本稿の終わりに、授業実践にあたり協力を頂いた方々への謝辞を申し上げたい。同僚である奥村暁教諭には、量子力学についての議論に度々付き合っていたいただいた。著者をはるかに

上回る深い理解に常に助けられただけでなく、著者にとって議論はとても楽しく充実した時間であった。さらに、互いの授業実践について情報交換・議論を行った物理教育研究会(APEJ)とその Physics Suite 研究班、横浜物理サークル (YPC) の会員諸兄にも御礼を申し上げたい。授業で用いた課題について、研究会などでの議論からヒントを得たものがたくさんあった。もしも本稿が何かにとって有益であったとしたらそれは上記の方々のおかげであるが、本稿の問題点はもちろん著者にある。

最後に、ともに物理を学び、常に率直な意見を寄せ、新たな視点や驚きをくれた本校の生徒たちに、心から感謝する。本年度で卒業していく彼らの今後の活躍に期待を寄せながら、筆を置く。

参考文献

- [1] E. F. Redish, 「科学をどう教えるか ―アメリカにおける新しい物理教育の実践―」, 日本物理教育学会 監訳 (丸善, 2012)
- [2] R. D. Knight, “*Five Easy Lessons – Strategies for Successful Physics Teaching*” (Addison Wesley, 2004)
- [3] A. B. Arons, “*Teaching Introductory Physics*” (Wiley & Sons, 1996)
- [4] L. C. McDermott, “*What we teach and what is learned – closing the gap,*” *American Journal of Physics*, **59**, 301 (1991)
- [5] 勝田仁之, 「認知的葛藤による素朴概念克服を目指した「力と運動」の授業実践報告 ―ICT 機器の活用で可能となったアクティブラーニング型授業の展開―」, 教育・研究, 第 28 号 (中央大学附属中学校・高等学校, 2015)
- [6] 勝田仁之, 「物理学として一貫性のある「仕事とエネルギー」の授業展開 ―実験を主軸に生徒とのインタラクティブな授業を目指して―」, 教育・研究, 第 29 号 (中央大学附属中学校・高等学校, 2016)
- [7] L. C. McDermott et al., “*Tutorials in Introductory Physics*” (Princeton Hall, 2002)
- [8] D. R. Sokoloff and R. K. Thornton, “*Interactive Lecture Demonstrations – Active Learning in Introductory Physics*” (Wiley, 2004)
- [9] R. N. Steinberg et al., “*Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect,*” *American Journal of Physics*, **64**, 1370 (1996)
- [10] 三浦登ら, 「物理」(東京書籍, 2012)
- [11] B. S. Ambrose et al., “*An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference,*” *American Journal of Physics*, **67**, 146 (1999)
- [12] M. C. Wittman et al., “*Making sense of how students make sense of mechanical waves,*” *The Physics Teacher*, **37**, 15 (1999)
- [13] 小沢啓, 「『いかに教えるか』から『いかに学ばせるか』への転換」, 物理教育, **67**, 1, 13 (2009)
- [14] E. Mazur, “*Peer Instruction: A User’s Manual*” (Princeton Hall, 1997)
- [15] 広重徹, 物理学史 II (新物理学シリーズ 6) (培風館, 1968)
- [16] YouTube 動画, <https://www.youtube.com/watch?v=6xHKuUyW3Oc> (2017. 01. 20. 取得)
- [17] J. J. サクライ, 「現代の量子力学」第 2 版, 櫻井明夫 訳 (吉岡書店, 2014)

課題

水素原子の構造を図と文章で、なるべく詳細に説明せよ。

2

1850年頃の原子への認識

- ・化学界において1850年には、既に「物質は少ない種類の原子の組み合わせでできていて、どの原子も互いに似ている」ことは受け入れられていた。
- ・しかしながら当時、溶液や気体の電導性は謎のままであり、説明することはできなかった。

4

現代物理学 I

—誰が原子を見たか—

2016. 11. 17

誰が原子を見たか？

君の描いた構造はきつと正しい。
しかしなぜ正しいとわかるのか？

この単元を通して学んでほしいこと

- ・これまでの物理の理論がどこで破綻して、現代物理学の理論がなぜ必要になったか
- ・歴史に沿った科学的論証の体験
- ・なぜ、原子や電子があると言えるのか

3

気体の電導性：真空放電

「減圧した気体は高電圧をかけると電氣を通す」ことは、Faraday らによって研究されていた。真空度によって様子は異なる。

→実験で実際に確認しよう。真空管内部の電極付近に発光していない領域「Faraday 暗部」が見えるか？
(教科書 p322 に写真あり)
0.05 ～ 0.004 気圧程度

原子は自然界の最小単位ではなく、内部にさらに構造を持っていて、それが電氣的性質を決めるのだと考えられ始めた。

5

真空放電の革新(1858)

Plücker (独)

真空技術の発達により、0.00004 気圧まで減圧した状態での放電が可能となった。

→ 実験で確認しよう。先の放電とどう異なるか？

6

謎の影

管の中に十字の物体を立てると、「影」が現れた！

→ 実験で確認しよう。
「影ができた」ことから何がわかるか？

7

Crookes 管の発明

1870年代には Crookes によってより系統的な実験が可能となった。

- ・ 今までより長い(=実験スペースの広い)管を、真空度を損なうことなく実現した：90 cm !
- ・ 穴を開けた金属板を入れて、陰極線を直線上に制御できるようにした。

(見取り図)

8

Crookes の実験結果

- 電極にどんな金属を用いても陰極線が生じ、陰極線の性質は金属の種類によらない。
- 陰極線は磁場によって曲げられる。
→ 負電荷のような振る舞いを見せる。
- 陰極線は物体に力を及ぼすことができる。
→ 羽根車の実験
- 陰極線は物体にエネルギーを与えることができる。
→ 薄い金属フォオルムが発熱して赤く発光する⁹

10

陰極線の正体は波か？粒子か？

これらは、陰極線の正体について大議論を巻き起こした。
課題：Crookes の実験結果から、どちらだと考えられるか話し合え。(負電荷のような振る舞いをして、負電荷であるとは限らないことに注意！)

Crookes の仮説：負電荷粒子

- 管内の気体分子が陰極に接触し、負に帯電(イオン化)
- 陰極からの静電気力によって急激な反発を受ける。
- その加速された陰イオンがぶつかれば、力を及ぼすことも、蛍光面を発光させることも、フォオルムに熱を生じることとも可能である。
- 電場をかけて陰極線を曲げようとしたが、うまくはいかなかった。

11

すぐさま反論にあう

課題：どのような反論にあったのか、考えよ。

12

標準状態における分子の間隔

課題：標準状態において、分子ひとつあたりが占める体積を見積もり、Crookes 管の長さ 90 cm と比較せよ。

注：1865年にアボガドロ数の大体の値は分かっていた。

13

反論の趣旨

- ・分子の間隔 (平均自由行程) と Crookes 管のスケールの矛盾
- ・後に、陰極線が非常に薄い金属箔をすり抜けることが発見される。→ 両方とも原子でできているのに？
- ・「陰極線＝負に帯電した空気分子」の仮説は棄却せざるを得なくなった。

14

粒子説棄却、波動説が有力に！

- ・帯電空気分子説が棄却され、陰極線の正体は電磁波(光)であるとする説が Lenard によって提唱された。
- ・1891年には陰極線が薄い金属箔をすり抜けること、さらにアルミ箔を用いて陰極線をCrookes 管の外へ出すことに成功。
- ・薄いとはいえ、原子からできている金属膜を曲がりもせずに原子が通過(透過)するのは不自然である。
- ・当時、現象理解の理論として、粒子の運動と波動現象は厳格に区別されていたらしい。

15

しかし波動説も否定される

Perrin は陰極線が当たる位置に、電位計をつないだ金属を設置したCrookes 管を設計。

- 陰極線があたるとどんな負に帯電していった！
 - ・これは陰極線が負に帯電した粒子であるということか？
 - ・いやでもそれは否定されたわけだし。
 - ・いやでも、波だったらじゃあなんで負に帯電・・・
- 粒子なのか、波なのか、超難問であった。

16

粒子説の再来

Thomson の実験 I

- Perrin の実験における、電位計をつないだ金属の位置を陰極線の軌道上からずらす。
 - 負電荷は検出されない
- 磁場をかけて、陰極線を金属にあたる軌道に曲げる
 - 負電荷が再び検出される
 - やはり陰極線の正体は負電荷か？

しかし、Crookes の実験では陰極線は電場によって曲がらなかった → なぜ曲がらなかったのか？

17

残留ガスのイオン化

X線をヒントに、陰極線もCrookes 管内の残留ガスをイオン化し、そのせいで電場によって曲がらないと考えられた。

課題：何故残留ガスがイオン化すると電場が無効化されるのか説明せよ。

(見取り図)

19

レントゲンによるX線の発見

1895年、レントゲンによってX線が発見された。X線は気体をイオン化させることが分かり、当時のイオン化は水溶液中の電離のみが知られていたが、 O_2 , N_2 やHeのイオン化は原子が内部構造と電荷を持つことの直接的な証拠となった。

課題：なぜか説明せよ。

18

さらなる真空技術の向上

真空技術はさらなる発展を迎え、残留ガスのイオン化が無視できるほどの真真空度になると、陰極線が電場で曲がった！

ここまできて、ようやく陰極線の負電荷粒子説は証明された。

この実験(教科書 p324)により、陰極線粒子の質量と電荷の比(比電荷)が求められた。 $e/m \sim 10^{11} [C/kg]$

- 電気分解における水素や酸素では、 $e/m \sim 10^7 [C/kg]$
 - 残留ガスや電極の物質によらずに同じ値である。
- (この実験は1000回以上の測定をして決定したらしい)

20

課題

- ・陰極線と水素や酸素の比較から言えることは何か？
- ・Thomson の電場実験において、陰極線粒子への重力の影響はほとんど見られなかった。これは何を意味するか？

21

Millikan の油滴実験(1910)

Millikan は、帯電させた細かい油滴に電場をかけて落下させることで、陰極線粒子の電荷の測定に成功

$$\rightarrow e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}$$

$$\rightarrow m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ [kg]}$$

本当はこの時点ではまだ、「陰極線粒子=電子」と呼ばれていないのだが、まあとりあえず授業では電子と呼ぶことにしようか。

22

現代物理学 II

－光電効果－

2016. 11. 24.

光電効果 (Photoelectric Effect)

金属板に紫外線(波長の短い電磁波)を当てると、電子が飛び出すことが発見された。

→動画：箔検電器の実験(<https://www.youtube.com/watch?v=6xHKuLyW30c>)

この現象の理解が、量子力学理解への鍵となる！！！！

MEMO

24

Philipp Lenardの実験(1902)

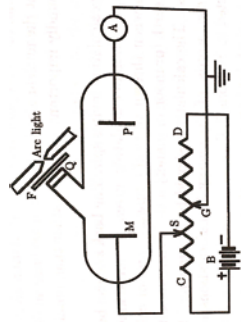


Figure 10.9.1 Schematic diagram of Lenard's apparatus for measuring photoelectric current.

Arons(1997), "TEACHING INTRODUCTORY PHYSICS"より引用

25

極板間の距離調整

- Lenard は極板 M と P の距離をだんだんと近づけていった。
→近づけていくにつれて光電流の値は大きくなり、5 mm 程度まで近づけるとほぼ一定値に収束した。
これは何を意味するか？

以降の実験は、すべて極板間隔 5 mm 以下で行うとせよ。

26

SがGに対して右にあるとき

- 極板 M と P はどちらが高電位か？ また極板間の電場を描け。

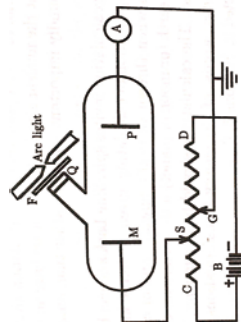


Figure 10.9.1 Schematic diagram of Lenard's apparatus for measuring photoelectric current.

27

実験結果

- 光電流の値は、光の強度に正比例する
→ 強度を 300 万倍(!)変化させても比例関係は保たれた。
- MP間の電位差を大きくしても、光電流の値は変わらない
→ どうしてか？

28

SがGに対して左にあるとき

- 極板 M と P はどちらが高電位か？ また極板間の電場を描け。

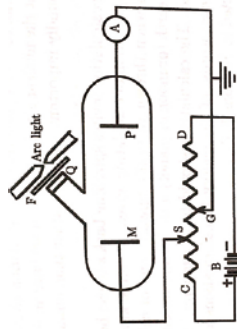


Figure 10.9.1 Schematic diagram of Lenard's apparatus for measuring photoelectric current.

29

さらに実験結果

- 同じ光源からの光であれば、光の強度を変えても阻止電圧の値は変わらなかった。
- 阻止電圧の値を変えるには、光源自体を他のもの（つまり異なる波長の光に）するか、極板の金属を他の金属に取り替えるしかなかった。
- 当時の物理学にとっては理解できない現象であり、大きな驚きを与えた実験結果である。

31

実験結果

- PM 間の電位差を大きくしていくにつれて光電流の値は小さくなり、ある値を超えたところではゼロになる。
- この時の電位差を「阻止電圧 ΔV_s (or V_0)」と呼ぶ。
- この現象に物理的な描像を与えよ。

30

光電効果の実験結果まとめ

ある光源について、PM間の電位差に対する光電流の値をグラフにすると以下ようになる。

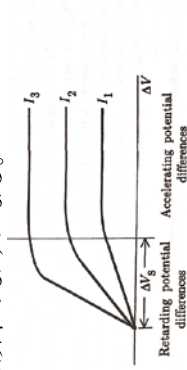


Figure 10.9.2 Idealized curves representing results of Lenard's observations of photoelectric current with apparatus such as that in Fig. 10.9.1. Curves such as those indicated were obtained with three different intensities of the same wavelength of monochromatic light. Values of saturation current (I_1 , I_2 , I_3) are directly proportional to incident light intensity. Stopping potential difference (ΔV_s) is independent of light intensity; it depends only on the wavelength of the incident light and on the material composing plate M.

32

課題

グラフがどのようなようになっていけば、当時の物理学者にも納得がいっただろうか？(何が驚きなのか？)

33

仕事関数 W

金属結晶内の電子は、金属結合によって束縛されているため、その束縛を振り切るだけの仕事(エネルギー)を外部から得ないと飛び出すことはできない。

この仕事の値を、その金属の「仕事関数 W 」と呼ぶ。

でも、光は電磁波なのだから、光の強度をどんどん上げていけば電子は仕事関数を超えるエネルギーを得て飛び出せるはず。

しかし光電効果は光の強度ではなく波長で決まる現象。。。

34

現代物理学 III

-Einsteinの光子仮説-

2016. 11. 24

Einstein の光子「仮説」

Einsteinの論文「光の放出と吸収に関する直感的視点からの考察」
光電効果の実験結果は光を電磁波として捉えては理解できず、
光をエネルギーを持った粒子「光子」と捉えればうまくいく！

振動数 ν [Hz] の光子の持つエネルギー

h : プランク定数 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$$E = h\nu$$

光子 1 つのエネルギー $\leftrightarrow$ 振動数に比例

光の強度 $\leftrightarrow$ 光子の数に比例

36

光子と電子の相互作用

- 光子と電子は必ず 1 対 1 で反応する。
→ 光子 2 つと電子 1 つが反応するようなのは確率が
低すぎて有意ではない (← 無視できる)
- 電子は光子を吸収すると、光子の持っていたエネルギー
を得る。
- 電子は光子を放出することで、その光子の持つ分だけの
エネルギーを失う → 発光する

37

課題

Lenard の実験において、光源の光の振動数 ν [Hz] と阻止電圧 U_V の関係を表せ。(極板 M の仕事関数は W)
また、グラフを描いて光電効果が起こるための振動数の限界値を定めよ。

Einstein の理論は「仮説」であったが、この理解の正当性が 10 年経って確認された。

38

現代物理学 IV

— 原子構造を光で探る —

2016. 11. 24 - 25.

原子について分かっていたこと

- 原子は中性である
(もしも、原子が中性じゃなかったらどうなるか?)
- 陰極線の実験から、原子には負の電荷をもった小さな
電荷(電子)があることが分かった。

問) と、いうことは?

40

様々な原子モデル

J.J. トムソンの原子模型



削除



削除

長岡半太郎モデル

41

手がかりは光のスペクトル

光を、振動数や波長ごとに分解したものをスペクトルという。→実際に回折格子を用いて、蛍光灯のスペクトルを見よう。

問) 回折格子を用いて光の波長を測定する方法を述べよ。

問) 「スペクトル」と英語で書け。

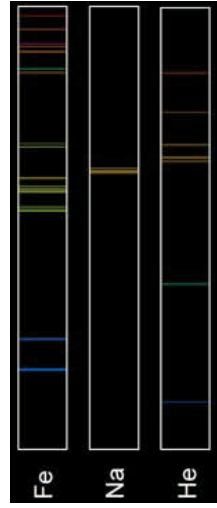
42

様々なスペクトル

・太陽光のスペクトル(連続スペクトル)



・様々な線スペクトル



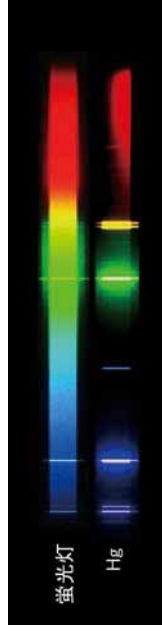
43

線スペクトルに注目

たとえば Na ランプの線スペクトルの色は、食塩の炎色反応と同色である。NaOH や Na_2CO_3 でも同様。

→ Na という原子固有のスペクトルだと考えられる！

・蛍光灯の例



44

吸収スペクトル

原子は特定の波長の光を放出するが、その波長の光を吸収することも分かった。

- ・太陽光のスペクトルをよく見ると：



大気構成原子が吸収した部分が暗くなる

→ 「 Fraunhofer lines 」 という。

45

光子仮説とスペクトル

発光 ↔ 電子がエネルギーを失う際の光子の放出

吸収 ↔ 電子がエネルギーを得る際の光子の吸収

光子仮説と発光・吸収スペクトルの実験結果を組み合わせれば、原子内の電子の振る舞いを知る手がかりになる！

47

吸光の実験

食塩水をつけた針金をガスバーナーの炎の中に入れて、Naの炎色反応を観察しよう。(何色だったっけ?)

- ・暗室で観察した場合
- ・ Na ランプの単色光のみを照らした部屋で観察した場合

46

水素原子の線スペクトル

- ・なぜかは分からないが、スペクトルは次の公式に従うことがバルマーによって発見される。(1884)



$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{for } n = 3, 4, 5, \dots$$

R : リュードベリ定数 $1.10 \times 10^7 / \text{m}$

目標：水素原子構造のモデルを決定し、そのモデルを用いて線スペクトルを計算し、この公式と一致させる！

48

その前に学ばなくてはならないこと

水素原子の構造決定には、古典物理学の知識、量子仮説の他にも、その当時の最新知識を導入した。原子モデルを決定する前に、それらをまず学んでいく。

- ・光の運動量 (コンプトン散乱)
- ・X線と電子の相互作用
- ・物質の波動性

ちよっと道のりは長いですが、最後に原子モデルを決定していく時は、非常にドラマティックなものである。頑張ろう！

49

粒子と波動の二重性

この単元では、光や物質が粒子と波動の両方の性質を持っていることを学ぶ。(二重性という)

実はもう今までの知識で、水素原子のモデルは導出できる。そのモデルに対して、物理的な解釈ができないいくつかの点を解決するために、これから学んでいく事柄が説明されるのであるが、ここだけは歴史と異なる順番で学んでいく。

51

現代物理学 V -粒子と波動の二重性-

2016. 11. 29.

X線の発見

1895年、レントゲンによってX線が発見された。
→ 当時、X線は非常に透過力が強いということだけに分かっていて、謎の現象であった。

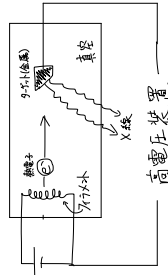


この時代の物理学としては、
X線は粒子ではなく波動である
という考え方が支配的であった。

52

X線の発生装置

下のような仕組みでX線は飛び出してくる。

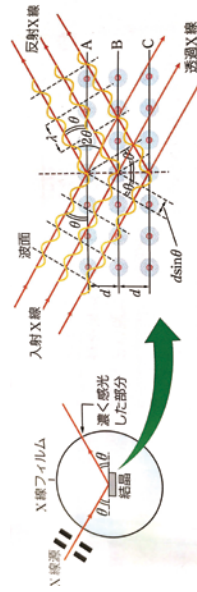


- ① フィラメントに電流を流すと高温になり、高エネルギーの電子(熱電子)が飛び出す。
- ② 高電圧装置によって作られた電場によって熱電子は加速し、ターゲット(金属)に衝突する。

53

X線にとっての回折格子：結晶格子

X線にとって、金属結晶格子は回折格子と同等の役割を果たすことを、ラウエ(1912)が実証した。



X線の波長： $10^{-12} \sim 10^{-10}$ m 程度

55

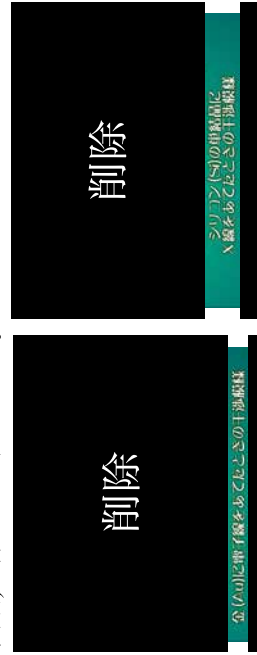
X線の透過

X線が波動であるという仮定に基づき、X線の波長を決定したい。しかしながら、X線は回折格子を透過してしまい、回折は起こらなかった。何故か？

54

X線は構造解析の大きな武器に

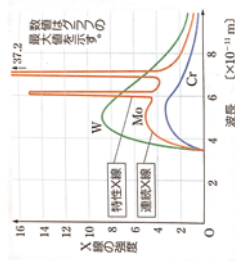
波動性、粒子性の話とは逸れるが、X線の回折パターンを解析することで、物質内部の様子(例えば結晶内の原子の間隔)を探れるようになった。



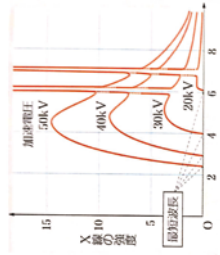
56

一方、X線のスペクトル

一方で、ターゲットから出てくるX線のスペクトルは異常を示した：波動説の限界



▲図12 W(タンガステン)、Mo(モリブデン)、Cr(クロム)のX線スペクトル(電子の加速電圧は35kVで一定)



▲図13 加速電圧を変えたときのMo(モリブデン)のX線スペクトル

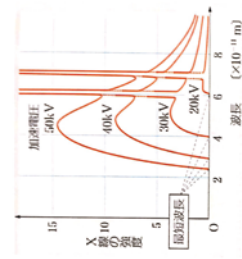
57

X線スペクトルの定量解析：粒子性

光子説を用いれば、スペクトルに対して定量的な説明が可能である：エネルギー保存則の観点から。

問) ターゲットから出てきた

X線の内、最短波長のX線が出てくるのはどのような時か？計算せずに答えよ。

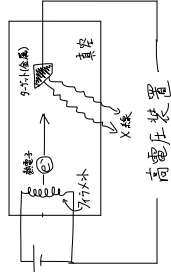


▲図13 加速電圧を変えたときのMo(モリブデン)のX線スペクトル

59

光子説とX線

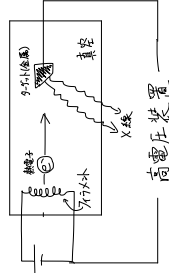
問) この装置から何故 X線が出てくるのか。光子説から説明せよ。



- ① フィラメントに電流を流すと高温になり、高エネルギーの電子(熱電子)が飛び出す。
- ② 高電圧装置によって作られた電場によって熱電子は急激に加速し、ターゲット(金属)に衝突する。

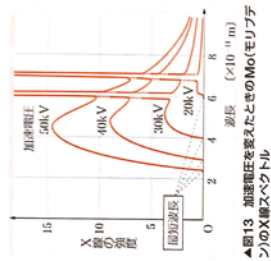
58

最短波長を定量的に求めよう。



60

特性 X 線の正体をカンニング。



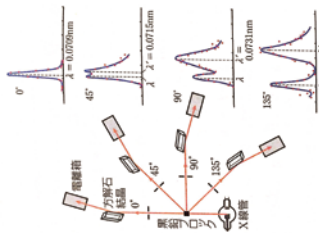
▲図13 加速電圧を変えたときのMo(モリブデン)のX線スペクトル

光子の運動量

Einstein は、相対性理論の研究から、光子はエネルギー $h\nu$ だけでなく、運動量も持つと考えた。

問) Einsteinの理論は現状理解できないが、今持っている知識から光子が何故運動量を持つと考えられるか説明しなさい。

Compton散乱：X線散乱と波長の変化



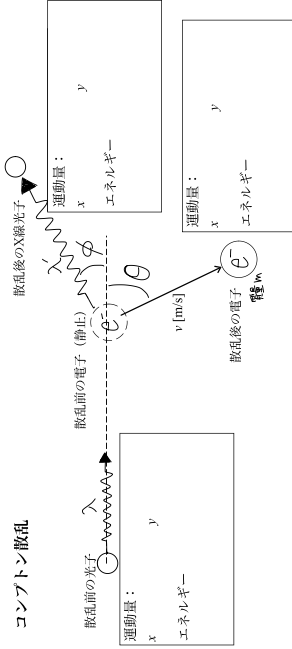
▲図10 コンプトン効果の実験データ コンプトンはMo(モリブデン)の特性X線の1つ(波長0.71nm)を黒鉛(グラファイト)を散乱材として散乱させたX線を測定した。Scanned by CamScanner

X線を黒鉛に衝突させて散乱させると、入射X線と散乱X線で波長(振動数)が変化していることが見出された。これはX線の粒子性を示す決定的な実験である。

光子の持つ運動量(結果のみ)

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Compton 散乱の定量解析



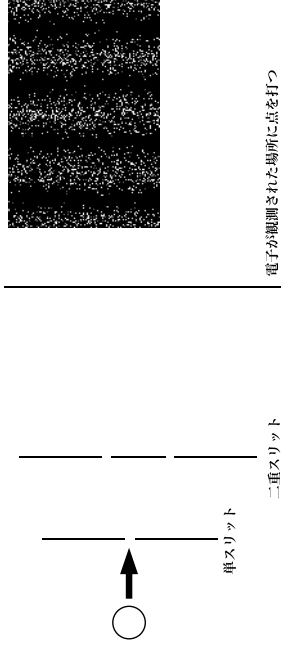
現代物理学 VI

—物質における波動性—

2016. 11. 30.

de Brogile (1923) は考えた

「光が粒子として振舞うのならば、粒子も波として振舞うのでは？」→ 電子の波動性とはどういうことか？

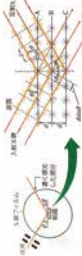


66

電子を用いた Bragg 反射

デイヴィソン・ジャーマーによる Ni 単結晶表面での

電子線回折(1927) → $2d \sin\theta = m\lambda$



削除

電子の回折・干渉
→ 電子顕微鏡の発明

削除

中性子の回折・干渉
→ 中性子顕微鏡は
最先端の研究テーマ

67

ド・ブロイ波長

光子の運動量から逆算して：

$$p = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

量子力学における「抽象的な」波の解釈：

→ 我々が見ている世界は量子空間を「観測」したもの

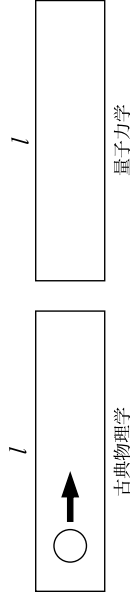
68

1 次元に束縛された粒子の物質波

長さ l の直線上を速さ v で運動する粒子が、直線の両端で跳ね返り続ける

↔ 長さ l の直線上の両端で物質波が固定端反射を続ける

問) どんな波になるか？

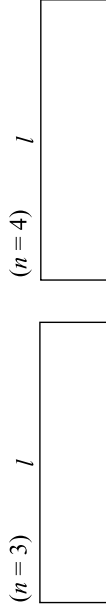
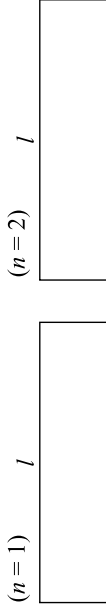


69

”許される”状態 (モード)

定常波が生じる条件：

$$l = n \times \frac{\lambda}{2} = \frac{nh}{2mv}$$



70

速さやエネルギーの量子化：許される値

普段は速さ・エネルギーとも連続量

問) 我々が普段生活している世界で、速さやエネルギーが不連続な値を持つようには感じられない。何故か？

71

72

現代物理学 VII

-水素原子模型-

2016. 12. 01.

原子構造を探る手がり

• Rutherford による α 線散乱実験

→ 次のスライド

• 水素原子の線スペクトル

$$\rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

• 光子仮説

$$\rightarrow E = h\nu$$

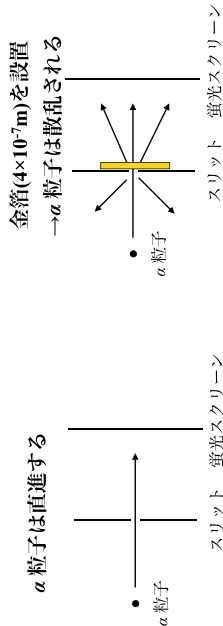
• de Broglie の物質波

$$\rightarrow \lambda = \frac{h}{mv}$$

• 古典物理学

Rutherford の α 線散乱実験

問) α 線とは何か説明せよ。



α 線散乱の解析

問) ほとんどの α 粒子は金箔を通過してスクリーンにたどりつくが、全体の1/20000程度の α 粒子は、90度以上散乱されてスクリーンにたどりつかない。

これは何を意味するか？

Bohr の仮説

原子核の大きさは、原子全体に比べてあまりにも小さい
→ 原子は、2つのパートから成っている。

- ・ 原子核(正)：質量、放射能を決定
- ・ 周囲の電子(負)：化学的性質を決定

問題点：

運動する電荷は電磁波を発してエネルギーを失う

→ 電子はどうなってしまうか？

77

量子化条件

・ 電子には、量子力学的な「定常状態」があり、そのときは電磁波を放出しないと仮定
→ 定常状態は、電子の運動する円軌道上で電子波が定常波をなすときとした。

- ・ 電子がある定常状態から他の定常状態へ移るとき、エネルギー差分を光子として放出・吸収する。

78

電子波の条件

問) 物質波の考え方を応用して、電子が半径 r の円軌道上を速さ v で運動しているとして、 r, v の関係を求めよ。

79

光量子仮説と線スペクトル

水素原子から出てくる光を分光すると、どうして連続ではなく線スペクトルを示すのか？ 光量子仮説から説明せよ。

80

もっとも単純な原子：水素原子

水素原子： $+e$ の電荷をもった原子核と、 $-e$ の電荷をもった電子からなる。

問) 原子核を中心に、半径 r , 速さ v の円運動をしている

電子の運動方程式を書き下し、 r, v の関係を求めよ。

81

電子の軌道半径

前時の量子化条件と連立することで、第 n 番目の量子状態における電子軌道半径 r_n を求めよ。

82

Bohr 半径

水素原子の半径を数値で求めよ。

(通常の水素原子とは、第何番目の量子状態に対応するのかよく考えよう：「基底状態」と呼びます。)

83

電子の持つエネルギー

第 n 量子状態における電子のエネルギー E_n を求めよ。

84

イオン化エネルギー

電子が無限遠まで束縛から逃れるために必要なエネルギーを「イオン化エネルギー」と呼ぶ。数値として求めよ。

85

水素原子のスペクトル

水素原子の電子が第 n 量子状態から第 n' 量子状態へと遷移するとき、放出される光子のエネルギーを求めよ。

86

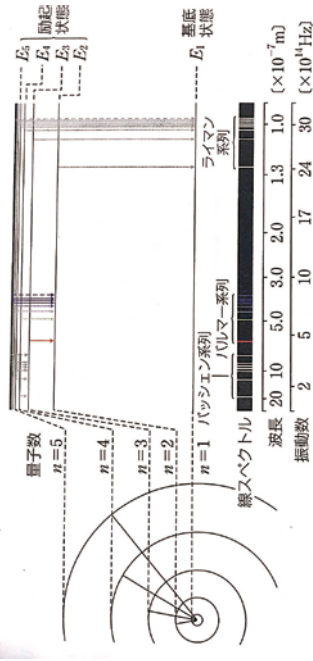
バルマー・リュードベリ公式の導出

先の結果から、光子の波長の逆数の値を求め、リュードベリ定数の値を決定せよ。

87

線スペクトル

各量子状態間の遷移に伴い放出される光子のエネルギーが計算できる。

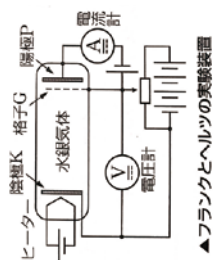


88

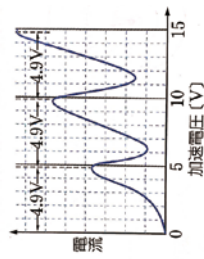
量子状態は本当にとびとびなのか？

Franck と Hertz の実験

- ・ 陰極 K から格子 G (金属の網) G に向かって、電場で熱電子を加速。
- ・ G から P に向けては減速電場をかけ、一定以上の速さの電子のみ P にたどり着ける。
- ・ 中には気体の水銀。
- ・ 加速電圧が 4.9 V の整数倍のとき、P にたどり着く電子が急激に減る。



▲フランクとヘルツの実験装置



89

原子モデルの考え方をを用いて、実験結果に説明を与えよ。

90