

大阪教育大学での現代物理学教育－電流の正体 (中2 理科)から量子コンピュータ(高校物理 終章)まで

電子の発見からベルの不等式及びその応用まで

序論

今回は本学（理科教育コース）での、過去現在今後の、現代物理学の教育について報告する。現代物理学の内容は中学校理科・高校物理にあるが、量子物理学、量子力学の内容はない。中学校理科の「電流の正体」で語られる内容の充実度は高い。

中学校や高校での扱いをふまえ、本学の現在のカリキュラムでは、現代物理学は授業として（タイトルを変えて）残しているが、量子物理学、量子力学の内容は、年度を追うごとに授業されないようになってきている。各研究室でのゼミや実験・演習科目（理科教育コースでは物理学実験Ⅱ・Ⅲ）での実験やそれに付随した調べ学習にゆだねてきている。

これまでの理科教育コースでの授業としての現代物理学教育

ゼミや実験・演習での調べ学習を除き、正規の授業として、「現代物理学」（鈴木担当）と「数理物理学」（深澤担当）がそれぞれ1セメスター あったが、カリキュラム縮小で「数理・現代物理学」という名称に合わせて、1セメスターとした。（それぞれ1ターム）その後、理科の全体での カリキュラム改正で、化学・生物・地学とともにそれぞれ〇〇学Ⅲをつくった。「数理・現代物理学」を「物理学Ⅲ」とした。

R7まで1セメスター、R8から1ターム。すなわち現代物理学の部分は4回弱になる。

今後の理科教育コースでの授業としての現代物理学教育

現在「物理学Ⅲ」の中で講義されている。ただし、今現在、R7年度までの5年間くらいは非常勤講師（本学教員OBの先生方）に 物理学Ⅲの講義をお願いしている。しかし、R8年度以降ターム科目になり、内容を改変せねばならない、のとともに、我々が担当していくことになる。それを視野に入れ、過去とターム化以降の教育についてまとめる。我々が5年以上前に担当していたころは、講義内容は、1926年の量子力学の完成前まで。その後「初等量子論（R7廃止）」「量子物理学（R5廃止）」につなげるカリキュラムだった。今後担当復活の折には、量子力学の詳細（すなわち、量子力学の計算手法等）には触れず、EPRパラドクス、ベルの不等式、量子もつれ等の話題も取り入れていく。もちろんここが講義の中心ではないが、2022年度のノーベル物理学賞で「量子もつれ」や「ベルの不等式の破れ」が話題となったため、講義の話題として避けて通れない^{1,2)}。学生にとって、先端物理学については、古典物理学のように学び、演習する科目ではなく、言葉で知っておく時代に。

講義室の環境

講義に際し、特に装置図、人物の顔、人物像を投影したい。ところが、本学では講義室の黒板の真正面にスクリーンが下りる。黒板に式を手書きするのと並行にプロジェクトすることができない。スクリーンもしくはホワイトボードのいずれかを自前で持ちこんで講義している。

物理量の文字の定義

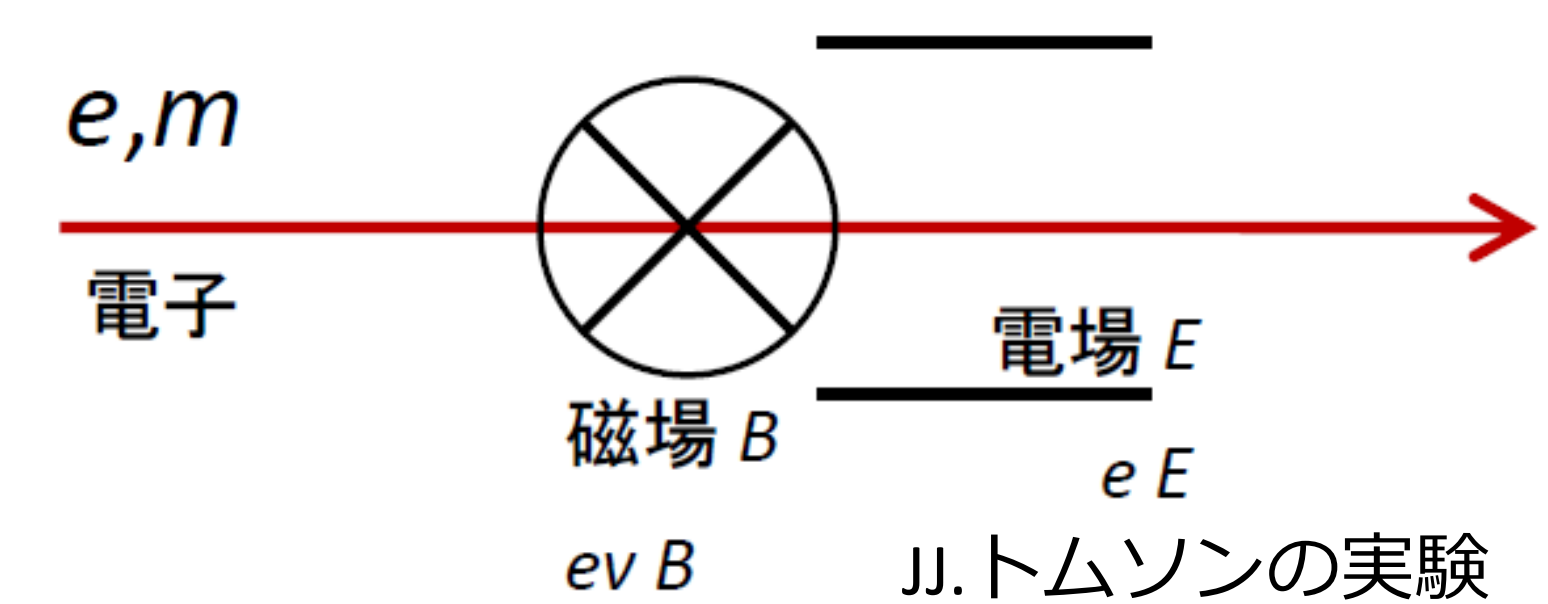
e 電気素量, m 電子の質量, E 光子のエネルギー, h プランク定数, ν 光子の振動数, p 光子の運動量, c 光速, λ 入射光子の波長, λ' 散乱光子の波長, λ_c コンプトン波長, θ 光子の散乱角, λ_p 物質波の波長, Δp_x 運動量の不確定, Δx 位置の不確定, S 適当な物理量の相関（局所実在論が満たすべき相関）

各論指導計画

- A. 電子の発見
ゼーマン、J.J.トムソンによる
比電荷測定

$$e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg} \quad \times$$

※その後の測定による値



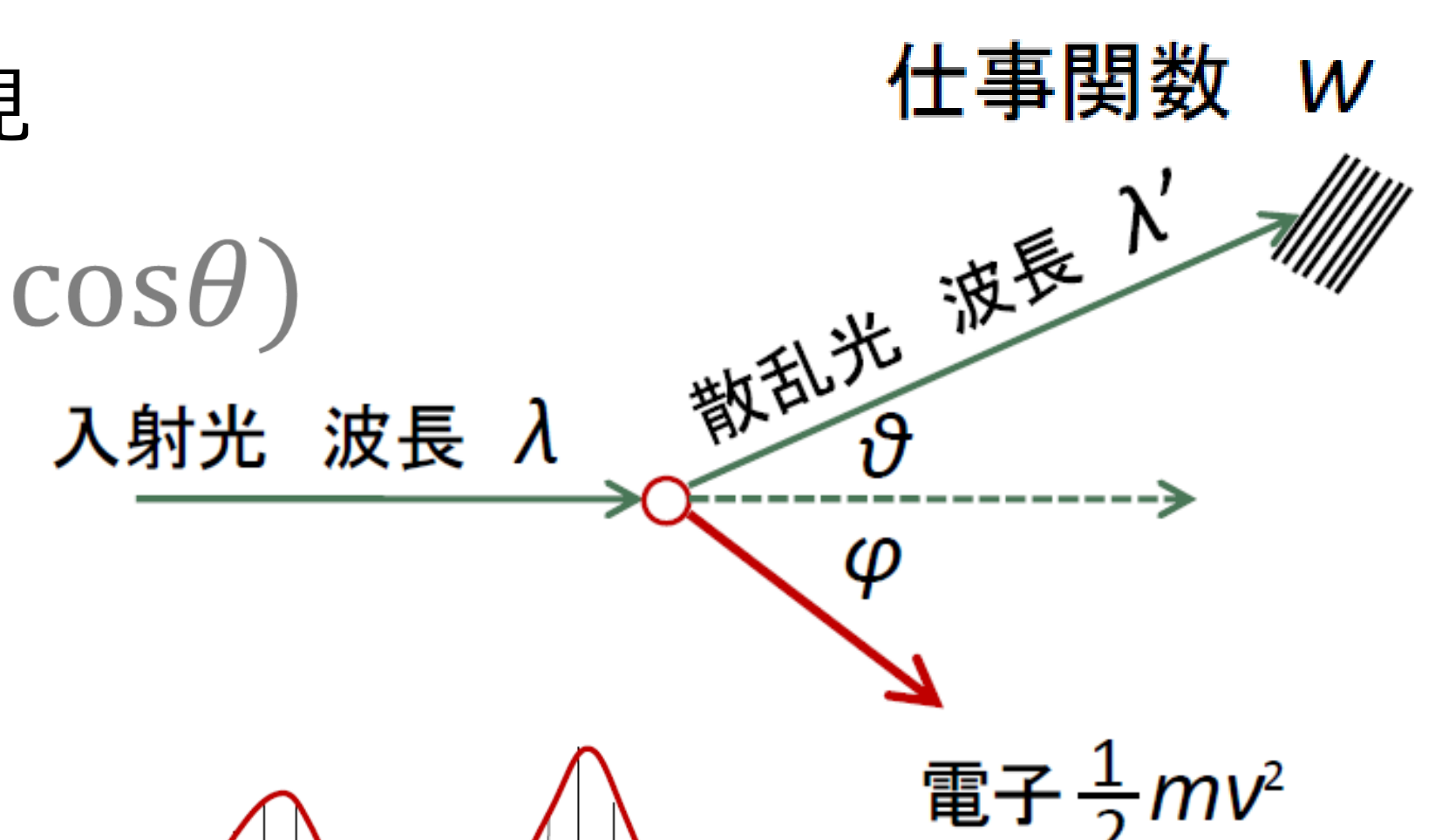
- B. アインシュタインの光量子説 光子 $h\nu$

$$E = h\nu, \quad p = h\nu / c$$

$$\text{電子 } \frac{1}{2}mv^2$$

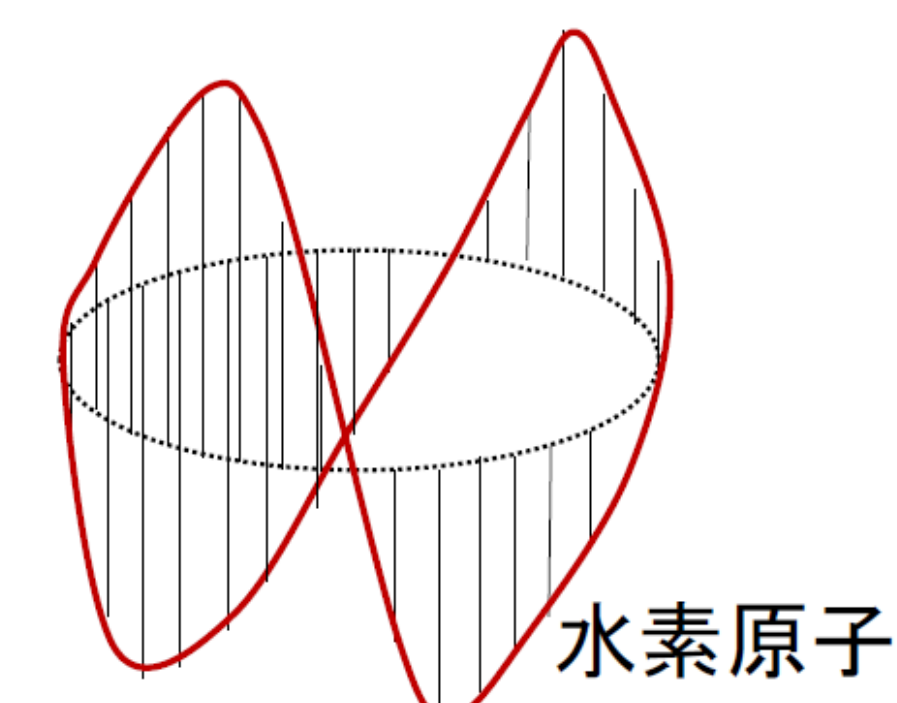
- C. コンプトン散乱の発見

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\theta)$$



- D. ド・ブロイの関係式

$$\lambda p = h / mv$$

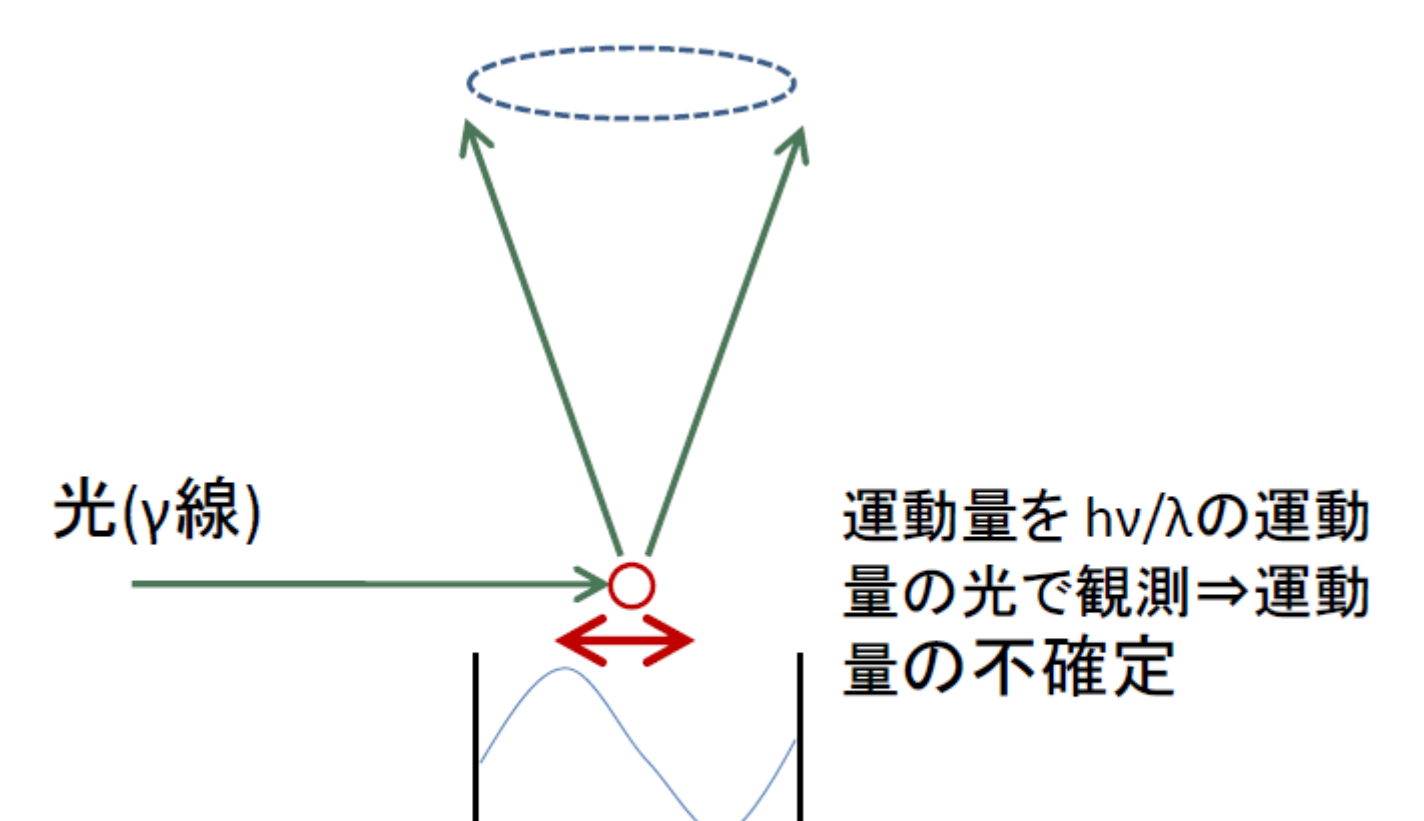


- E. ウィルソン、ゾンマーフェルトの前期量子論

複数の量子数を用いて状態を記述する考え方を提示。根本的に新たな考え方が必要であることが分かる。

- F. ハイゼンベルグの不確定性関係

$$\Delta p_x \Delta x \leq h / 4\pi$$



- G. ボーアの相補原理

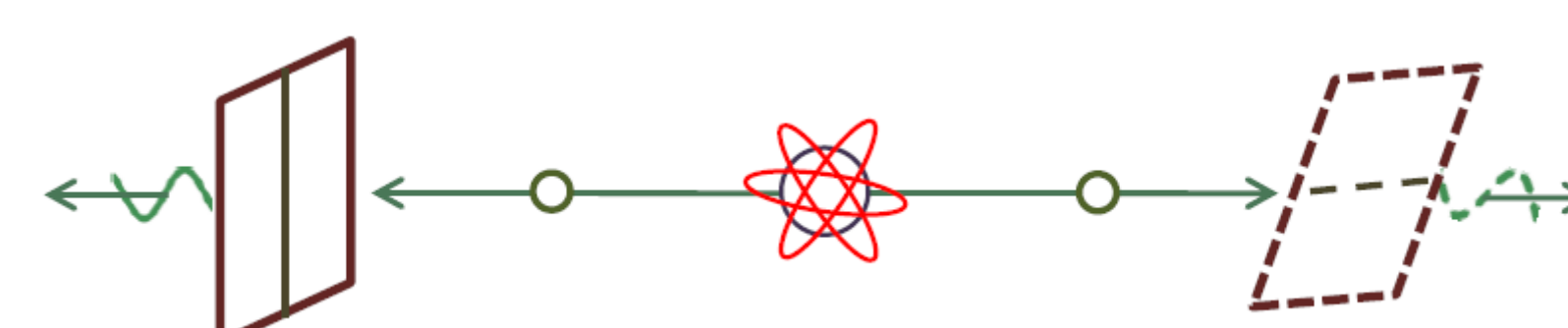
「粒子性」と「波動性」は量子力学において補完的である。どちらか片方では完全な記述ができない

波長 $\lambda \Rightarrow$ 位置の不確定

シュレーディンガー、ハイゼンベルグによる量子力学の完成

- H. EPRパラドクス、ベルの不等式、その破れ

量子力学は不完全 $\Rightarrow$ EPRパラドクス 2番目の粒子の位置と運動量の不確定性関係 $\Rightarrow$ パラドクスへの反論 $\Rightarrow$ 16年間 $\Rightarrow$ 2番目の粒子の spin でパラドクスの再考, $\Rightarrow$ 13年間 $\Rightarrow$ 実証可能な科学（**ベルの不等式**）2値測定なら量子もつれ 光子の**偏光の相関の測定**でもよい。量子力学ではベルの不等式（CHSH不等式） $|S| \leq 2$ は破れ, 最大 $2\sqrt{2}$ となる。いくつかの実験的検証により $|S| = 2.42$ や 2.73 など（光子対の偏光の相関を調べた。）



量子コンピュータの誕生、暗号通信、量子テレポーション、ブラックホールの解明など

参考文献
1) 「ベル不等式：その物理的意義と近年の展開」筒井 泉, 日本物理学会誌 69(2014) 836
2) 「解説追加しました(10/5)」2022年10月4日公開 <https://www.jps.or.jp/information/2022/10/2022novelprize.php>
井元信之, 日本物理学会 (2025.1 参照)