

シリーズ 原子衝突実験の歩み
—独断と偏見で選んだ10大(?)実験—

序 文

市川 行和

yukitikawa@nifty.com

平成17年11月17日原稿受付

研究者の多くは年をとると歴史に興味をもつようになる。筆者もその一人である。ただそれだけではなく、世界物理年などさまざまな理由から最近原子衝突実験の歴史を調べてきた。その一部をさきに研究協会研究会で話したところ複数の人からは是非「しょうとつ」誌に執筆するよう依頼があった。折角なので原稿を書くことにしたが、いきなり妙な記事を読まされても困ると思うので、少し前書きをつけることにする。(これは、最近の家電製品のマニュアルと同じで、後で訴えられる(?)と困るのでつけた言い訳でもある。)

副題にある「独断と偏見」というのは、本稿が、主として「電子衝突」を専門としてきた一理論家の見た歴史であるという意味である。もちろん電子衝突のみでなくできるだけ広く主題を選ぶつもりであるが、どうしても自分の知っていることが話の中心になる。また格好をつけて「大実験」としたが、どのような実験を選ぶかはひとえに筆者の「好み」による。ただ一応次のような基準のどれか(あるいは複数)をみたすよう心がける。

- 新しい時代(分野)の開拓
- 新しい概念の創出
- 新しい効果の発見
- 原理・法則の検証
- 新しい原理(技術・道具)を用いてそれまで困難だった実験を可能にした

もの

- 研究対象の拡大

内容は、実験の詳細ではなく、原理や結果の意義を上記に照らして述べたものとなる予定である。(実験の詳細については、引用する論文を読んでもらう方が間違いがない。)長さや体裁は一律でなく筆者の書きたいように書くつもりである。実験家ではないので、実験手法や得られた結果の解釈について誤ったことを書くかもしれない。その際は、是非専門の方からのご指摘をいただきたい。後日訂正文を掲載することにする。

連続して10回掲載する積もりであるが、筆者の体調その他の都合で途中で打ち切りになるかもしれないことをお断りしておく。

シリーズ 原子衝突実験の歩み
—独断と偏見で選んだ10大(?)実験—

第1回 ラザフォード散乱公式の実験的検証

市川 行和

yukitikawa@nifty.com

平成17年12月7日原稿受付

§1. はじめに

本シリーズの第1回目にとりあげるのは、Geiger と Marsden が行ったラザフォード散乱公式を検証する実験である[1]。アルファ粒子の金属箔による散乱の実験結果を説明するために Rutherford はいわゆるラザフォード散乱公式(すなわち、クーロン散乱に対する微分断面積)を導いた。さらにそれに基づいて、原子内における核の存在を示唆した。これらのことが述べられている Rutherford の論文[2]は大変有名であるが、その公式を実験的に確かめたこの Geiger と Marsden の論文はそれほど知られていない。後で述べるように、この実験は現在のビームを用いた原子衝突実験の先駆けをなすものであり、本シリーズの第1回としてとりあげるのにふさわしいものである。

§2. ラザフォード散乱公式の導出まで

1907年カナダからマンチェスター大学に移った Rutherford は、放射線の研究を精力的に進めていた(彼はその研究で1908年にノーベル化学賞を受賞する)[3]。とくに、当時研究室の助手であった Hans Geiger と学部学生であった Ernest Marsden は放射線を金属箔に当ててその散乱をみる実験を行い、結果を1909年に発表した[4]。

図1に彼らが用いた実験装置を示す。ABは

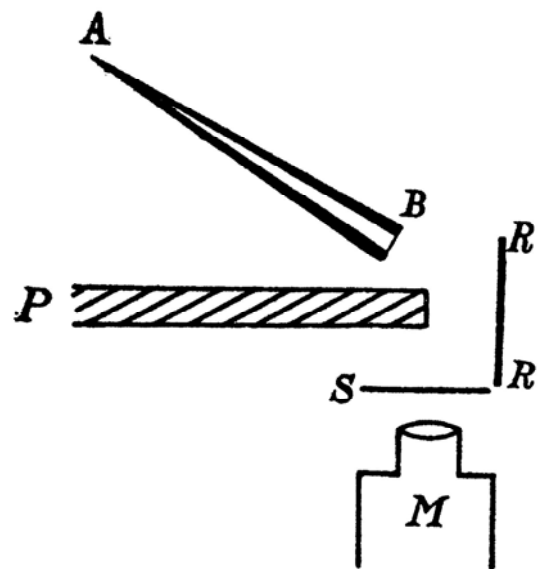


図1 金属箔によるアルファ粒子の散乱を測った実験装置(文献[4]より)。

ガラス管で中にラジウムの崩壊生成物(ラジウムエマナチオン)を封入してある。そこから放射されるアルファ粒子を入射粒子として金属箔(R)に当てる。反射してきたアルファ粒子は硫化亜鉛のスクリーン(S)に当たってシンチレーション光を発する。この光を望遠鏡(M)で観測して散乱粒子の数を数える。Pは線源からのアルファ粒子が直接スクリーンに当たらないようにするための遮蔽板である。いくつかの実験結果を報告しているが、主なものは以下の二点である。

- (1) 確率は小さい(1/8000の程度)が、反射してくる(すなわち散乱角 θ が90度以上になる)ものがある。

(2) 箔の厚さを変えて実験したところ、厚さがあまり大きくないときには反射粒子の数は箔の厚さに比例した。このことから、反射は表面で起こっているのではなく金属箔内の原子によるものであり、しかも1回衝突の結果であることがわかる。

当時、高速の放射線粒子が原子により散乱される際にはそのほとんどは前方散乱であり、散乱角が大きくなるのは多重衝突により小角散乱が重ね合わさった結果であると考えられていた。Rutherford は、しかしそれでは大角散乱の確率が小さくなりすぎること、また実験の結果からも1回散乱でなければならないことに気がついた。彼はこの実験結果の解釈に2年を費やし、到達した結論を1911年に発表した[2]。彼は問題の散乱を、原子内の電荷(点電荷と仮定する)によるアルファ粒子のクーロン散乱とし、その散乱微分断面積を導いた。もちろんまだ量子力学はできていないので、古典論を使った。その結果は

$$q(\theta) = \left(\frac{Zke^2}{2mv^2} \right) \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{-4} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ke はアルファ粒子の電荷、 Ze は散乱標的の電荷、 m はアルファ粒子の質量、 v はその速度である。(Rutherford の論文に与えられている式は微分断面積ではなく、直接実験で観測される散乱粒子の数なのでこの表式とは少し異なる。)

この式によれば、大角散乱の確率は小さいけれども決して無視できるほどではない。ここでとくに重要なことは、大角散乱が起こるときは入射粒子が標的のごく近くまでこなくてはならないことである。たとえば Z と k が同符号、すなわちクーロン斥力の場合、 $\theta = 180^\circ$ のときの最近接距離 (r_0) は次のことから簡単に求められる。すなわちこのときは衝突径数がゼロ

であり、 $r = r_0$ のところでは運動エネルギーはすべて位置のエネルギーに置き換わっている。したがって

$$r_0 = \frac{Zke^2}{\frac{1}{2}mv^2}$$

が得られる。いまアルファ粒子のエネルギーを 5 MeV とし、 $k=2, Z=79$ (金の場合) とすると、 $r_0 = 4.6 \times 10^{-12} \text{ cm}$ となる。すなわち散乱を起こす原子内電荷の大きさはこれ以下でなければならない。実験では $\theta = 180^\circ$ のものは観測されていないが、 $\theta = 90^\circ$ としても r_0 の値はそれほど変わらない。このことから Rutherford は、原子の中には電荷が点状に集中した部分があり(彼は決して「原子核」という言葉は使っていない)、アルファ粒子の散乱はその電荷によるのであろう、と結論した。なお公式(1)は Z の符号によらない。このことから Rutherford は、この実験では中心電荷の符号は決められないと述べている。

Rutherford は彼の解釈について、必ずしも十分に自信があったわけではないらしく、その妥当性をさまざまな角度から検討している。また当時出されていた原子モデルによって説明できるかどうかについても吟味を行っている。長岡半太郎の土星型モデルについても言及している。

§ 3. ラザフォード散乱公式の実験的検証

Geiger と Marsden は散乱公式(1)を実験的に確かめ、その結果を1913年に発表した[1]。その論文が本解説の主題である。この実験では次のことを調べた。

- (i) 散乱角依存性
- (ii) 散乱源である金属箔の厚さ依存性
- (iii) 散乱標的の原子量依存性

- (iv) 入射アルファ粒子の速度依存性
- (v) ある方向に散乱されるアルファ粒子の絶対量（これは散乱中心にある電荷の値を決めるのが目的）

ここでは主として (i) と (iv) の結果を紹介する。

まず散乱角依存性であるが、その測定に用いた装置を図2に示す。散乱角をきちんと決めるためには、入射粒子を細いビームにして衝突させる必要がある。そのために、線源(R)を直径1mmのガラス管に入れ、さらにその前に絞り(D)を置いてビームが箔(F)に直角に当たるようにした。散乱粒子の検出装置（硫化亜鉛のスクリーン(S)と望遠鏡(M)）は回転する台(A)に載せてあり、観測する角度を変えられるようにしてある。散乱公式から分かるように、角度の小さいときと大きいときとでは散乱されてくる粒子の数が大幅に異なる。そこで、角度の小さい領域と大きい領域とを分けて測定した。実際に測定されたシンチレーションのカウンタ数は数個から十数万個の範囲である。これがどれくらいの時間範囲での測定であるかは明らかでないが、1分間に90個以上になるか、5個以下になると測定が困難になると書いてある。角度は5°から150°の範囲で変え、金と

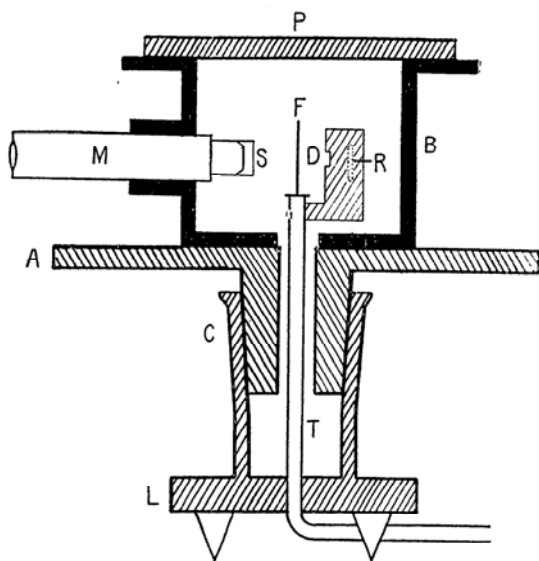


図2 散乱角分布を測定した装置（文献[1]より）。

銀の箔について測定が行われた

結果は表として与えられているが、見やすいようにグラフにしたものを図3に示す。これは標的が銀の場合である。相対的な関係しか意味がないので、グラフにはまず $(\sin \frac{1}{2}\theta)^{-4}$ の線を引き、測定値は大角領域（○印）では60°、小角領域（×印）では15°のところその線にのるように規格化して図示した。実験は散乱公式が示す角度依存性をよく再現している。実測値は5桁もの範囲にわたっている。それだけ広い範囲のデータをこれだけの精度で測定できたということは、見事としか言いようがない。ましてやエレクトロニクスもコンピュータも使わず、まったくの人手による測定であることを考えると、驚くばかりである。

次に、速度依存性の実験をみてみよう。速度依存性を測るためには、まず入射アルファ粒子の速度を変えることができなければならない。次にその速度の（少なくとも相対的な）大きさを定量的に知る必要がある。速度を変えるために、Geiger と Marsden は線源の前にマイカを置き、それによる減速を利用した。マイカの厚さを変えることで、アルファ粒子の速度を変えることができる。ビームの速度を定量的に決めるには、そのビームの飛程（range）を測定した。アルファ粒子の速度 v と 飛程 R の間に

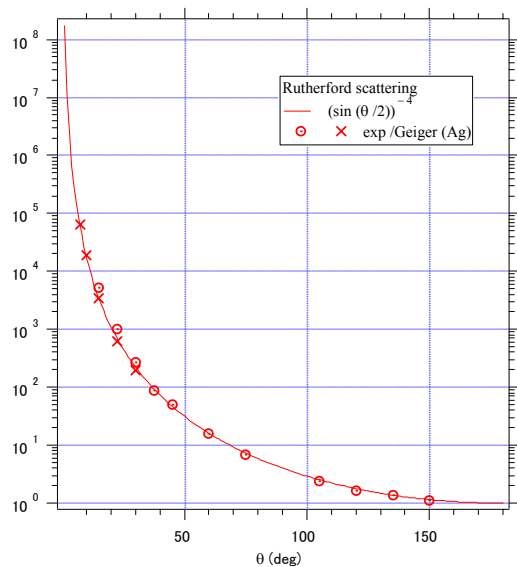


図3 散乱角分布の実測値と公式(1)の比較。

は

$$R = av^3$$

の関係があることがすでに知られていた[5].
そこで速度 v の代わりに $R^{1/3}$ を使う. 実験結果はやはり表で与えられているが, 図にしたものを図 4 に示す. 横軸は $R^{1/3}$ を目盛ったものであるが, これはアルファ粒子の入射速度の相対値を表す. 縦軸には反射粒子によるシンチレーションの数をとる. ここでも相対的な関係のみが意味があるので, まず v^4 の線を引き, 測定された v の最大のところでこの線に合うように, シンチレーションの測定値を規格化して示した. この実験では速度の大きさを高々2倍程度しか変えられなかった. それでも4乗すると一桁くらいの違いになる. その範囲での実験であるが, 実験値の速度依存性は散乱公式のそれと良く一致している.

最後にその他の実験結果について簡単に触れておこう. まず, 金属箔の厚さを変えた実験から, アルファ粒子の反射は1回衝突によることを確かめている. 次に, 散乱標的の電荷がどれだけかを知りたい. ボーアの原子模型はまだないので, 原子の中心にどれだけの電荷があるかは分かっていない. 原子について分かっているのはその質量 (A) のみである. そこで箔の材料を変えて, 散乱粒子の数が A とどのよう

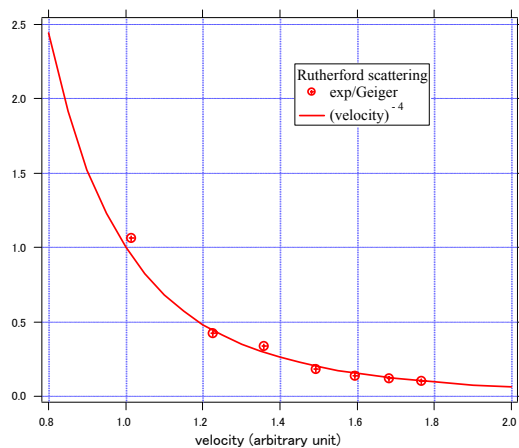


図 4 速度依存性の実測値と公式(1) の比較.

な関係にあるかを調べてみた. その結果, 標的原子 1 個あたりの散乱強度はほぼ A^2 に比例して変わることが分かった. 次に散乱確率の絶対値を求める試みがなされた. これは確率そのものが極めて小さいので困難であったが, Z が現在「質量数」として知られている量のほぼ半分であることをつきとめた. ただし, これはアルミより重い原子について成り立つとしている.

このようにして Rutherford の導いた散乱公式(1) はほぼ完全に実験で証明された. むろん細かいことをいえば, さまざまな問題がある. 測定されたビームの速度範囲は大変狭いものであり, そのビームの質も決して良いものではない. そもそも入射粒子も標的も完全な点電荷ではないので, 厳密にはクーロン散乱の公式には従わずそれからはずれがあるはずである. いずれにしろ, Geiger と Marsden のこの実験はビームを用いる現在の原子衝突実験の原型をなすものといえる. ビーム実験に必須の要素はすべてここにみることができる. その意味で, 原子衝突実験に携わる人は一度はこの論文を読んでみる価値があるのではないだろうか.

参考文献

- [1] H. Geiger and E. Marsden, *Phil. Mag.*, **25**, 604 (1913).
- [2] E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **21**, 669 (1911).
- [3] Rutherford の伝記としては, たとえば, John Campbell, “Rutherford: Scientist Supreme” (AAS Publishers, 1999).
- [4] H. Geiger and E. Marsden, *Proc. Roy. Soc. A*, **82**, 495 (1909).
- [5] H. Geiger, *Proc. Roy. Soc. A*, **83**, 505 (1910).