

原子衝突研究協会誌 2006年第3巻第3号

しよとつ

Journal of Atomic Collision Research

原子衝突研究協会 2006年5月15日発行

<http://www.atomiccollision.jp/>

しょうとつ

第3巻 第3号

目次

30年を迎える原子衝突研究協会：会長に就任して（山崎泰規）	... 3
シリーズ；原子衝突実験の歩み ー独断と偏見で選んだ10大(?)実験ー	
第3回 ラムザウアー効果（市川行和）	... 4
若手の会第26回秋の学校 活動報告（宮城晴英）	... 8
第13回原子衝突セミナー報告（行事委員会）	... 9
第13回原子衝突セミナーに参加して（藤田慎也）	... 10
第13回原子衝突セミナーに参加して（田中隆宏）	... 11
国際会議発表奨励事業に関するお知らせ（庶務）	... 11
「2005年度会員異動」お詫びと訂正（庶務）	... 12
2006年度運営体制について（庶務）	... 12
「しょうとつ」原稿募集（編集委員会）	... 13

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3回 ラムザウアー効果

市川 行和

yukitikawa@nifty.com

平成 18 年 5 月 5 日原稿受付

§ 1. はじめに

量子力学が出来上がる前に、粒子が波動性をもつと仮定しないと理解できない結果が原子衝突の実験で得られていた。いわゆる「ラムザウアー効果」を発見した Carl Ramsauer の実験がそれで、今回はこの実験を取り上げる [1]。Ramsauer はドイツのオルデンプルクで生まれ、キール大学で学位をとった後、ハイデルベルク大学放射線研究所の Philipp Lenard の下で電子衝突の研究を開始した。やがて、AEG (ドイツの総合電気メーカー) の研究所設立に加わり、物理部門のリーダーとなった。第二次大戦中は AEG を通じて軍事研究に従事し、1941年にはドイツ物理学会の会長に就任した。戦後は物理教育と科学史の研究で過ごしたそうである。

§ 2. ラムザウアーの実験

衝突断面積を求める方法にビーム透過法を用いて全散乱断面積を測るものがある。図1にあるように標的気体を詰めた箱にエネルギー一定の粒子ビームを入射し、その気体を透過することによるビーム強度の減衰を測る。気体透過前後のビーム強度をそれぞれ、 I_0 、 I_1 とするとその比は

$$\frac{I_1}{I_0} = \exp(-nQL) \quad (1)$$

で与えられる。ここで n は気体の密度、 L は箱

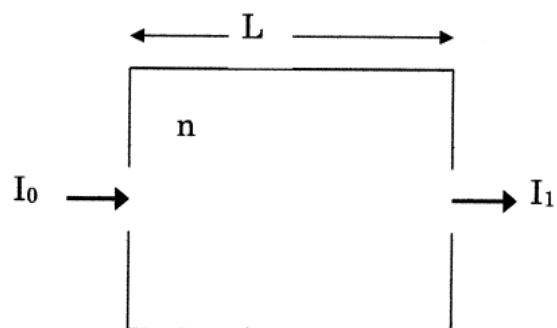


図 1. ビーム透過法のご概念図.

の長さ、 Q は全散乱断面積 (すなわち、あらゆる散乱過程の断面積の和) である。(1)式を用いれば I_0 、 I_1 の測定から断面積 Q が求まる。この方法は簡単なので、衝突断面積を実験的に求める (しかも絶対値が得られる) 方法として、古くから

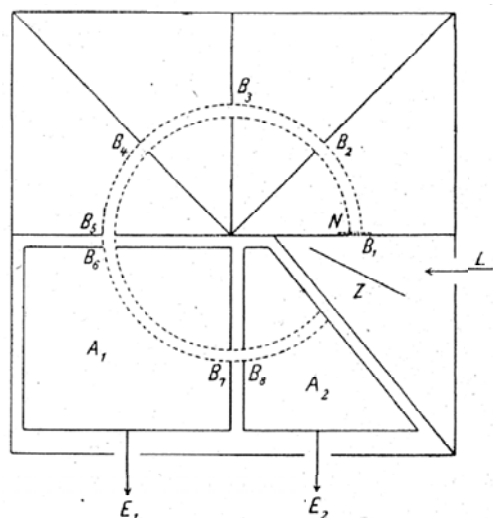


図 2. Ramsauer がビーム透過法で断面積を求めた装置 [1].

使われてきた。

Ramsauer はいくつかの希ガス気体と電子の衝突についてこの方法を適用した [1]。彼の用いた装置を図2に示す。この装置には紙面に垂直に磁場がかかっている。亜鉛板 Z に光を当てて発生させた電子を、スリット B₁ のところにあるメッシュ電極 N と Z の間に電圧をかけて加速する。電子は円軌道を描くが、磁場の強さによって決まるあるエネルギーをもつものだけが次々とスリットを通り抜けて、衝突箱 A₁ に入る。衝突せずに残った電子は A₂ に入るが、A₁ A₂ に流れ込む電流をそれぞれ E₁ E₂ とすると、E₁ + E₂ および E₂ が (1) 式の I₀ I₁ に相当する。電子の中には衝突後もビームから外れずに外に出てくるものがある (前方散乱の寄与)。Ramsauer の装置はエネルギー分析器も兼ねているので、非弾性衝突による前方散乱は除くことができる。弾性衝突による前方散乱はこの場合にはあまり大きな寄与をしない。

実験の結果を図3に示す。図の縦軸は Q であるが、「衝突確率 P_c。」というもので表してあり、両者は $Q = P_c \times 0.2828 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ の関係にある [2]。また横軸には電子の速度を目盛っている。この図から、Ar の場合には電子エネルギーの減少とともに断面積が減少し、測定された最小のエネルギー (約 1 eV) のところで最小値をとることが分かる。

実は当時すでにビーム透過法による断面積の

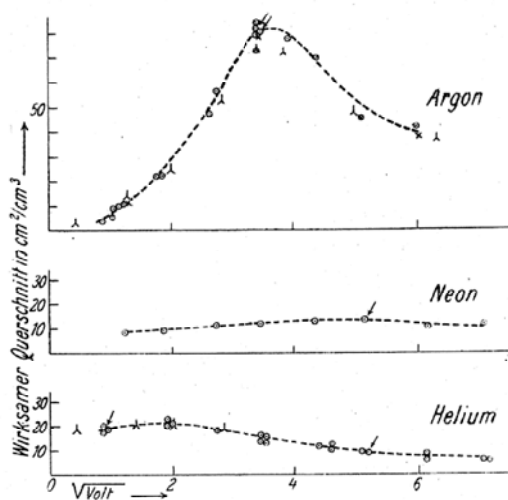


図3. Ramsauer の実験. He, Ne, Ar の結果 [1]

測定がいくつか報告されていた。それによると、電子エネルギーを 100 eV の辺りから下げていくと断面積は次第に大きくなり、エネルギーゼロの極限で一定値に近づくと言われていた。ただ実験によっては、断面積がピークをもち、エネルギーを下げて断面積が小さくなるものもあると報告していた。Ramsauer はこれらのことをよりいい実験で確かめようとしたのである。その結果、少なくとも Ar ではエネルギー低下とともに断面積が減少し、1 eV 付近ではきわめて小さい値をもつことが確定した。

§3. 実験の反響と解釈

断面積が小さいということは、電子があたかも衝突がないかのごとく気体中をすり抜けることを意味する。古典的な衝突概念しかなかった当時の人はこれを聞いて大変びっくりした。たとえば、ドイツ物理学会の会場で Ramsauer の講演を聴いた James Franck (フランク-ヘルツの実験のフランク) はそのおどろきを Niels Bohr に次のように書いている [3]

In Jena I was particularly interested in a paper of Ramsauer that I am not able to believe, though I cannot show any mistake in the experiment. Ramsauer obtained the result that in argon the free path lengths are tremendously large at very low velocity of electrons...If this result is right, it seems to me fundamental.

この手紙を読んだ Bohr はさすがに何かあると直感し、大変興味があるのでさらに何か分かたらずに教えてほしいと書いている。一方、Franck の同僚の理論家 Max Born は、こんな馬鹿げた話はない、何かの間違いだろうから実験で確かめた方が良く、と言ったという。しかしやがて Gustav Hertz (フランク-ヘルツの実験のヘルツ) が再実験をして、Ramsauer の結果は間違いのないことを確かめてしまった。また Ramsauer らはさらに実験を行い、Ar だけでなく Kr や Xe でも同じことが起こること、電子エネルギーを低くするとあるところで断面積が極小になること、などを発

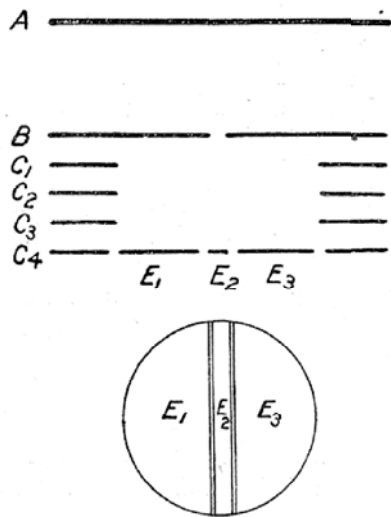


図4. Townsend のスウォーム実験の装置 (文献 [7] より)

見した. 現在では, この「ラムザウアー効果」は粒子の波動性によるとして理解されている [4]. そのことを理論的に初めて証明したのはノルウェーの理論家 Holtsmark [5] で, 彼は部分波展開の方法を使って断面積を計算し, 電子が原子の近くに来たときに原子を分極する効果を考慮すると Ramsauer 効果が Ar の場合に現れることを示した. ちなみに, de Broglie が粒子の波動性を提唱したのは1924年である.

§4. タウンゼントの実験

Ramsauer の実験が行われていたのとまったく同じ頃に, イギリスはオックスフォード大学の John S. Townsend らは以下に述べるようなスウォーム実験を行っていた [6]. 彼らの実験装置を図4に示す [7]. 金属板 A に紫外線を当てて電子を放出させる. B に開けたスリットを通してその電子を電極 E へ向けて流す. BE 間には一様な電場がかかっている. 電極 E は3分割してあり, それぞれに流れ込む量を測る. 電子は気体原子と衝突しながら全体としては電場方向に流れていく (ドリフト) が, 同時に電場と垂直な方向に広がる (拡散). そこで, 電子のドリフト速度や拡散係数を測れば, それらから電子・原子衝突に関する情報が得られるはずである. これがスウォーム実験の

原理である [8]. 実際には電子の速度分布を決めなければならないなど複雑な手続きが必要なので, 断面積を求めることはそれほど簡単ではない (現在ではある程度ルーチン化されている). Townsend らは, 近似理論を使ってドリフト速度や拡散係数を平均自由行程 λ で表す式を導き, 断面積ではなく λ (実際には電子の速度分布で平均したもの) を求めた. 彼らのアルゴン, 窒素, 水素についての実験結果を次表に示す.

$\langle E \rangle$ (eV)	λp (10^{-2} cm Torr)		
	Ar	N ₂	H ₂
5.57	10.8	2.85	4.35
4.09	16.8	2.86	3.32
2.84	26.9	2.71	2.52
2.05	36.3	2.68	2.25

ここで $\langle E \rangle$ は電子の平均エネルギーであり, また λ は圧力 p に逆比例するので, λ に p を掛けたものを示してある. この結果によると, Ar の場合には電子のエネルギーが下がると平均自由行程が大きくなる. すなわち, 電子は衝突しなくなる. これは Ramsauer が得た結果と同じことである. ただしこの表にはないが, もっとエネルギーを下げると, 窒素でも水素でも平均自由行程が伸びると論文には書いてある. Townsend らの論文には, すでに彼らは Ramsauer の実験を知っており, Ar については同じ結果が得られたが, 他の気体でも同様な結果が得られたのでその点で異なる, と明記している.

このように, 多少問題はあるものの Townsend らも Ramsauer と同じ効果を見つけていたわけである. したがって, 正しくは「ラムザウアー・タウンゼント効果」と呼ぶべきだと云う人もいる. 特に英国系の人には必ずそのように呼んでいる. しかし, 文献 [3] の著者によれば, 同じようなことを見つけた人は他にも居り, それをいうなら Åkesson - Ramsauer - Mayer - Townsend effect とするべきだそうである.

§ 5. おわりに

AEG に移った Ramsauer はその後も精力的に原子衝突の実験を続けた. さまざまな原子分子について全散乱断面積の測定を行い, その多くについて「ラムザウアー効果」を見出した. さらには弾性散乱の微分断面積の測定も行った [9]. これはおそらく世界ではじめて微分断面積そのものを測った実験であろう. 図5にその測定装置を示す. 実際の装置はこの図を $x-x$ を軸として回転した形になっている. 左から加速されて入ってきた電子は S で気体原子と衝突し, 散乱されたものを 11 分割した電極で測定する. すなわち 11 の散乱角における微分断面積を同時に測ることができる. 1-10 eV 程度の電子を用いて, He, Ne, Ar, H₂, CO, CO₂ についての微分断面積を求めた. そのうち, Ar の結果の一部を図6に示す. ここでは最近の交差ビーム法を使った実験結果 [10]と比較してある. Ramsauer らの実験は相対測定なので, 図では 90 度のところで規格化したものを示してある. 前方および後方の散乱を除けば, 一致はそれほど悪くない. 散乱角の小さいところおよび大きいところでは衝突領域の評価にあいまいさがつきまとうので, 誤差が大きくなるのであろう.

1930年代前半は Ramsauer のほかにもいろいろなグループが実験を行い, 原子衝突研究のひとつの頂点を迎えた感がある(ちなみに Mott & Massey の有名な衝突理論の教科書の初版が発行されたのは1933年であった). その後, 戦争の影響や, 物理学者の目が新たな研究対象となっ

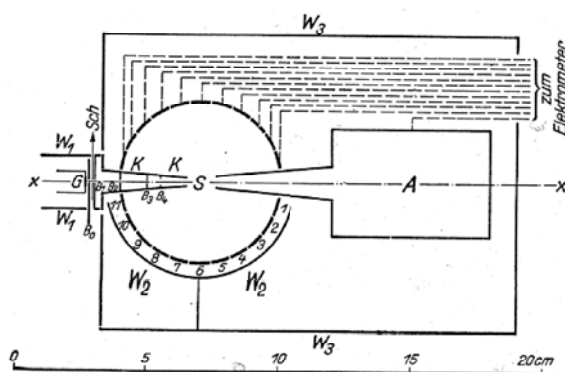


図 5. Ramsauer が微分断面積の測定に用いた装置 [9]

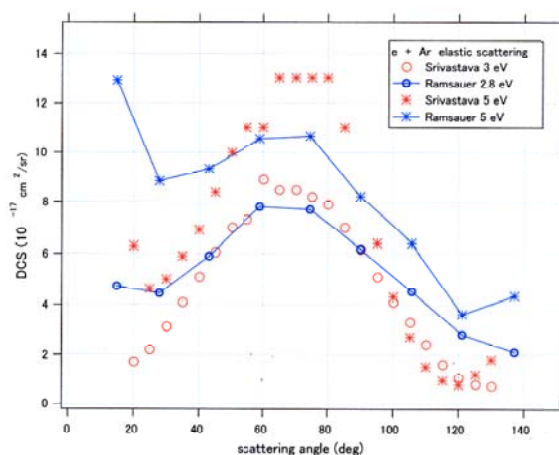


図 6. Ramsauer が求めた Ar の弾性散乱微分断面積 [9]. Srivastava ら [10] の交差ビーム法による結果と比較してある.

た原子核に向けたため, 原子衝突の研究はやや下火になる. それが再び盛んになるのは Schulz が共鳴現象を原子衝突にも見つけた1960年代初めである. これについては, 本シリーズでもいずれ取り上げることになる.

参考文献

- [1] C. Ramsauer, Ann. d. Phys. 66, 546 (1921).
- [2] 高柳和夫, 電子・原子・分子の衝突 [改訂版] (培風館 1996) p. 4.
- [3] G.S. Im, Hist. Stud. Phys. Biol. Sci. 25, 269 (1995).
- この論文は, ラムザウアー効果が発見され確かめられていく過程を詳しく調べ, その科学的意義を論じたものである. 本稿の執筆に当たって大変参考になった.
- [4] 文献 [2] p. 42.
- [5] J. Holtsmark, Z. f. Phys. 55, 437 (1929).
- [6] J.S. Townsend and V.A. Bailey, Phil. Mag. 43, 593 (1922).
- [7] J.S. Townsend and V.A. Bailey, Phil. Mag. 42, 873 (1921).
- [8] R. W. Crompton, Adv. At. Mol. Opt. Phys. 33, 97 (1994).
- [9] C. Ramsauer and R. Kollath, Ann. d. Phys. 12, 529 (1932).
- [10] S.K. Srivastava, H. Tanaka, A. Chutjian, and S. Trajmar, Phys. Rev. A 23, 2156 (1981).