

原子衝突研究協会誌 2006年第3巻第2号

しよんとつ

Journal of Atomic Collision Research

原子衝突研究協会 2006年3月15日発行
<http://www.atomiccollision.jp/>

しょうとつ

第3巻 第2号

目次

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2回 フランク - ヘルツの実験 (市川行和)	... 3
第2回 原子・分子・光科学 (AMO) 討論会報告 (柳下 明)	... 8
国際会議発表奨励事業に関するお知らせ (庶務)	... 12
2005 年度第4回運営委員会報告	... 13
2005 年度会員異動	... 13
「しょうとつ」原稿募集	... 14
今月のユーザー名とパスワード	... 14

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2回 フランク - ヘルツの実験

市川 行和

yukitikawa@nifty.com

平成18年2月6日原稿受付

§ 1. はじめに

今回とりあげるのは James Franck と Gustav Hertz による、いわゆる「フランク - ヘルツの実験」である [1]. 物理学を学んだことのある人なら、おそらく誰でもこの実験のことは知っているに違いない. 最近のことは知らないが、かつては高等学校の物理の教科書にも載っていたくらいである. Franck と Hertz はこの実験により 1925 年度ノーベル物理学賞を受賞した. その受賞理由は「原子と電子の衝突を支配する法則の発見」となっている. すなわち、文字通り原子衝突の研究でノーベル賞をもらったのであり、本シリーズに欠かすことはできない.

この実験が行われた当時、Franck はベルリン大学の助教授であり、Hertz はその助手であった. Franck はその後ゲッチンゲン大学に移り、理論家の Max Born とともに同大学の物理教室を盛り立て、多くの弟子を育てた. しかしナチスの支配を嫌って米国に渡り、その後長くシカゴ大学で活躍した. 一方、Hertz はベルリン大

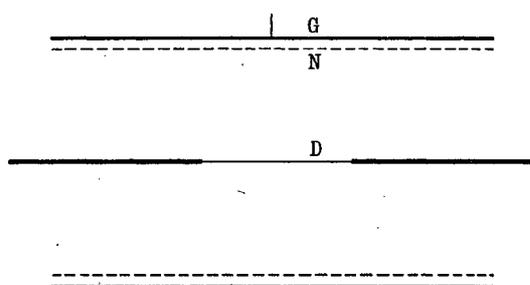


図1 フランク - ヘルツの実験の装置(文献[1]より).

学やいくつかの民間会社の研究所で働いた後、戦後はソ連や東独で活躍した. なお彼は、周波数の単位に名を残す Heinrich Hertz の甥である.

§ 2. フランク - ヘルツの実験とその(世の中に認められている)解釈

図1は論文に描かれている実験装置の図である. Dは白金線でできたフィラメント兼用の陰極である. Nは白金でできたメッシュ状のグリッドで、Gは陽極としての白金箔でガラス管に貼り付けてある. DN間の距離は4 cm, NG間の隙間は1-2 mmである. ガラス管の中に水銀蒸気を満たしてあるが、装置全体をパラフィン浴に浸して温度を制御することにより、水銀の蒸気圧を一定に保つ. 実験は110-115 °Cで行った.

フィラメントから放出された電子は DN 間にかけた電圧 (V) で加速する. 一方、NG 間には逆の電圧をかけて、電子の一部を追い返す. いま追い返し電圧を一定 (0.5 ボルト程度) に保ったまま、V を変えたときに陽極 G に流れる電流 (I) の変化を測定する. その結果が図2である. この結果について広く認められている(教科書などに載っている)解釈は次のようなものである. (後で述べるように論文の中で著者たちが述べている解釈はこれとは異なる.)

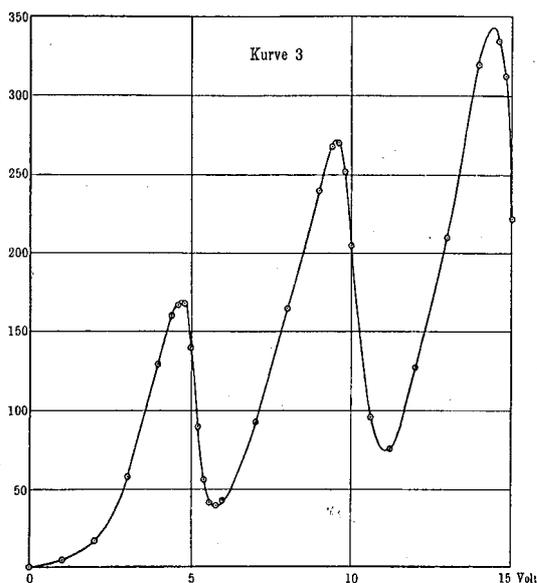


図 2 フランク - ヘルツの実験の水銀についての結果. 横軸は電子の加速電圧, 縦軸は陽極に流れ込む電流 (文献[1]より).

電圧 V とともに電子は加速され, 電流 I は増加する. 電子のエネルギーが水銀原子を励起できる最低の値 (ΔE とする) を超えると, 励起が起こる. すると電子のエネルギーは ΔE だけ減り, 追いつき電圧を超えられなくなって, 陽極には到達できない. さらに V が増加すると, やがて電流は増えるが, $2\Delta E$ のところで再び励起が起こり, また I は減少する. すなわち V の関数としての I は ΔE の間隔で極大を繰り返す. このようなことが起こるのは原子のエネルギー準位がとびとびである (ΔE が離散的な値をもつ) からであり, この実験はボーアの原子模型の証明 (の一つ) となる.

§ 3. フランク - ヘルツ自身による解釈

Franck と Hertz は, ボーアの原子模型を知っていてその検証のためにこの実験を行った, のではない. そもそも彼らの論文のタイトル (原文はドイツ語) は

「電子と水銀蒸気分子の間の衝突, およびその分子のイオン化ポテンシャル」
というものである. (分子 (molecule) という

言葉の意味は「1 個の独立の粒子として行動する原子の結合体」(岩波理化学辞典) であり, かつてはその定義が厳密に守られていた. すなわち, ここでいう「水銀分子」とはいわゆる水銀原子のことである) 当時, 原子分子のイオン化ポテンシャルはそれら原子分子に固有の物理量であり, それを正しく知ることは原子分子の構造の理解にとって大変重要であると考えられていた. (もちろん, 今でもそうである) Franck と Hertz はすでに種々の気体原子についてイオン化ポテンシャルを決める実験を行っており, 同様の手法を金属蒸気原子に応用してみようと考えたのである.

彼らは前節で述べた一般的な解釈と同様な解釈をしたが, 励起ではなく水銀のイオン化が起こる (ΔE はイオン化ポテンシャルに相当する) と考えた. 論文の最後に結論が述べられているが, 「本実験により水銀のイオン化ポテンシャルが 4.9 eV であることがわかった」と明記している. つまり, 今から見れば間違った結論が彼らの論文には書かれているわけである.

(なお現在の知識によれば, 水銀のイオン化ポテンシャルは 10.4 eV である)

ところで, Franck と Hertz はボーアの理論を知らなかったのだろうか. ボーアが彼の原子模型を発表したのは 1913 年であり, フランク - ヘルツの実験が発表されたのはその後 (1914 年) である. 仮に論文は読んでいなくても当時のベルリンは物理学研究の中心であり, 大きな話題になっていたに違いない. しかし Franck は実験当時ボーアの模型のことはまったく知らなかったと, 後で述べているそうである. 彼が言うには, ボーアにより解決された原子のスペクトル線の謎について, 誰もそう簡単に解けるとは思っていなかったもので, 誰かがそれを解決したといっても, 信じる人はいなかった. おそらく Franck と Hertz も話は聞いていたのであろうが, まったく無視していたのであろう. 彼らは後にボーアの論文を読んで, 彼らの実験がイオン化ポテンシャルではなく, 励起エネルギーを決めたことになっているのに気づいた.

(ボーア自身からもそのようなコメントをもらったそうである)そこでそのことを実験的に証明する(たとえば,最初のピークのところでは正イオンが発生しないことを確かめる)ことを企てたが,第1次大戦などの理由で実現しなかった。

いずれにしても,結論の間違った論文を書いてノーベル賞をとったというのは,大変珍しいことではないだろうか。

§ 4. 本当は何が起きているのだろうか

筆者だけの個人的な感想かもしれないが,フランク-ヘルツの実験(以下FH実験と略す)はよく考えると不思議な実験である。原子の励起状態を調べるのに現在用いられる手法として電子のエネルギー損失スペクトルを測る方法がある。それと比べるとFH実験の不思議さがよくわかる。

- (1) エネルギー損失スペクトル法では,エネルギー一定の電子ビームが衝突領域で1回衝突してエネルギーを失い,その後はエネルギーを変えずに測定器に入る。FH実験では,全空間にわたって電場がかかっており電子は連続的に加速または減速される。
- (2) 図2の解釈に従えば,励起を起こす衝突は複数回繰り返される(1回衝突ではない)。
- (3) 衝突としては,励起のほかに弾性衝突があるはずである。特に水銀の場合,低エネルギーでは弾性衝突断面積が極めて大きい(図4参照)。この影響はどうなるのだろうか。
- (4) 以上のことを考慮すると,電子のエネルギーは単色ではなく分布をもっている。しかもそのエネルギー分布は場所によって異なる。
- (5) そもそも水銀の励起状態は一つではない。
- (6) 電子のエネルギーが高くなるとイオン化

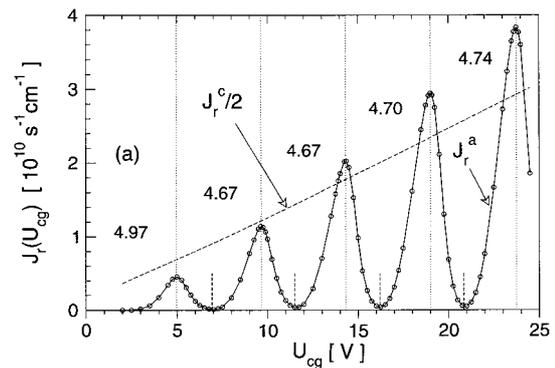


図3 Sigenger らによるモデル計算の結果[3]. 横軸は電子の加速電圧, 縦軸は軸方向単位長さあたりの電子フラックス(動径方向)である。 J_r^a は陽極のところ, J_r^c は陰極を出たところ, のフラックスであり, 前者が陽極に流れ込む電流をあらわす。

も可能になる。なお,イオン化によるエネルギー損失はしきい値の上では連続的である。

これらのことから, FH実験はいわゆるスウォーム実験[2]と同じであることがわかる。陰極から出た電子は,外からかけられた電場による加速を受けながら水銀原子との衝突を繰り返し,定常的な速度(エネルギー)分布をもって流れていく。ただ単純なスウォーム実験と異なるのは,電場が空間的に一様でなくグリッドの左右で向きが反転していることである。もっと正確に言うとも,グリッド周辺に電子にとってのトラップが形成されており,エネルギーの小さい電子は一定の割合でグリッドに吸収される。

スウォーム実験における電子の速度分布を理論的に求める手法は確立されており,それを使えばFH実験の詳細がわかるはずである。そのような試みが最近なされたので,以下その結果を紹介しよう。詳細は省略するが, FH実験に似た装置を考え Sigenger ら[3]はその中で電子の速度分布を,ボルツマン方程式を解くことにより計算した。得られた速度分布は場所の関数であり,陽極の位置における速度分布からそこへ流れ込む電流を求めた。追い返し電圧を1.5ボルトに固定し加速電圧を変えたときの陽極電流の変化を図3に示す。水銀原子の密

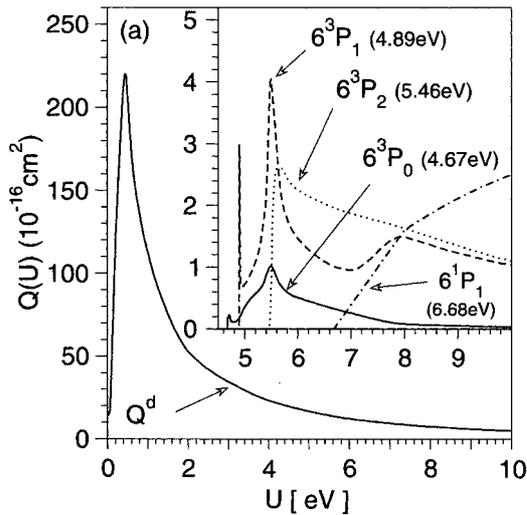


図4 電子と水銀原子の衝突に対する断面積。 Q^d は弾性散乱運動量移行断面積。挿入されている図は、水銀原子の下から4個の電子状態についての励起断面積、括弧の中にそれぞれの励起エネルギーを示す。横軸は電子の衝突エネルギー。(文献[3]より)

度は $1.84 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (180 °C の蒸気圧に相当)とした。水銀密度を変えた計算も行ったが、似たような結果が得られている。なお電子と水銀原子の衝突としては、弾性散乱と励起を考え、イオン化は(しきい値が高いので)無視した。計算で用いられた断面積を図4に示す。計算の結果はFH実験の場合(図2)と同様に、一定の間隔で電流が極大を繰り返す。しかもその間隔は、水銀原子の最低励起エネルギー 4.67 eV に近い。

さてこの計算結果の解釈は実はそう簡単ではない。文献[3]ではさまざまな物理量が同時に計算されているので、それらを参考にして、筆者なりに簡単にまとめると次のようになる。陰極を出た電子は加速され、励起可能なエネルギーに達すると水銀を励起してエネルギーを失う。しかし、やがてまた加速され、励起が可能となる。すなわち、励起が盛んに起こる空間領域とほとんど励起が起こらない領域とが交互に縞模様のように陰極—グリッド間に存在する。加速電圧が小さいと縞は一つしかできないが、電圧があがるにつれて縞の数は増える。いま、励起領域のピークがトラップ領域の陰極

側の端にかかっていると、励起を起こした後の電子の多くがトラップされて陽極まで届かない(すなわち電流は極小になる)。電圧が上がると、励起領域は陰極方向に移動しトラップ領域からはずれ、それとともに陽極電流は増加に転ずる。一方、次の励起領域がグリッド近くに形成されはじめそのピークが最大になったとき(すなわち、グリッド直前で励起が大量に起こり始めたとき)電流はふたたび減少を始める。さらに電圧の増加とともに励起領域は陰極方向に移動するが、トラップの陰極側の端まで来たときまた電流は極小になる。かくして陽極電流は極大・極小を繰り返すことになる。その原因は励起の起こる領域が空間的にとびとびにできることであり、もとをただせば原子の励起状態が離散的であることによる。ただし図3の最も左側のピークの生成機構は単純ではなく、弾性衝突と励起衝突の兼ね合いで形成される。実際、そのピークの位置は2番目以降のピーク間隔とは少し異なる。またその値は水銀の密度に依存することが計算で明らかにされている。密度が高いと、弾性衝突の効果が増して励起の効果が現れにくくなり、加速電圧がかなり大きくなると電流がピークにならない。なお、水銀の励起状態は複数個あり計算でもそれが考慮されているが、電流のピーク間隔からはそれが一つしかないかのごとくに見える。これについては詳しい吟味がなされていないので、その原因はよく分からない。

以下は筆者の推測である。FH実験がうまくいって物理学的に大変意義のある結果をもたらしたのは、ひとえに水銀を標的として使ったからであろう。水銀の励起状態は5-7 eVの辺りに励起の起こりやすい状態が集中しており、一方イオン化ポテンシャルはそれよりはるかに高い10.4 eVである。また低エネルギーでの弾性散乱断面積が非常に大きくそれに対する平均自由行程はきわめて短い、励起に対するそれは装置のサイズとそれほど変わらない。また水銀の蒸気圧は容易に高くすることができ、不純物の影響を相対的に小さくすることが

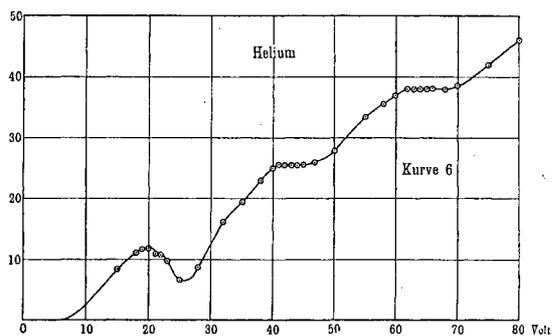


図 5 フランク - ヘルツの実験のヘリウムについての結果. 横軸は電子の加速電圧, 縦軸は陽極に流れ込む電流 (文献[1]より).

できる. これらのことが重なって, 水銀の場合にははっきりした繰り返しピークが出現したのであろう.

このように考えると, すぐに思いつくことは他の原子で実験したらどうなるかということである. 実は Franck と Hertz の論文にはヘリウムについての同様の実験の結果が報告されている. 図 5 にそれを示す. これをみると, 約 20 ボルトおきにピークが見られるが, その繰り返しははっきりしない. Franck と Hertz はその原因として, ヘリウムのイオン化ポテンシャルが高く, それ以下でイオン化してしまう原子 (や分子) がいろいろあり, それらが不純物として混ざった結果であろうとしている. 筆者の推測では, ヘリウムの励起状態はイオン化のしきい値の比較的近くにあり, また弾性散乱の断面積がそれほど大きくはなくて励起断面積とあまり変わらないことなどが, ヘリウムの場合に電流のピークがはっきり見えない原因ではないだろうか.

Franck と Hertz は, 幸いなことにたまたまとりあげた水銀の実験で見事な結果を得た (あるいは, いろいろ試してみて最もきれいな結果が得られた水銀についてのみ論文を書いたのかもしれないが). もしもヘリウムのデータのみだったら, ノーベル賞は難しかったかもしれない.

参考文献

- [1] J. Franck and G. Hertz, Verhand. Deut. Physik. Ges., **16**, 457 (1914).
- [2] R. W. Crompton, Adv. At. Mol. Opt. Phys., **33**, 97 (1994).
- [3] F. Sigenege, R. Winkler, and R. E. Robson, Contrib. Plasma Phys., **43**, 178 (2003).