

COFFEE BREAK

分子線回折と Otto Stern のこと

戸 谷 富 之

北海道大学触媒研究所 〒 060 札幌市北区11条西10丁目  
(1980年11月15日 受理)

Molecular Beam Diffraction and Otto Stern

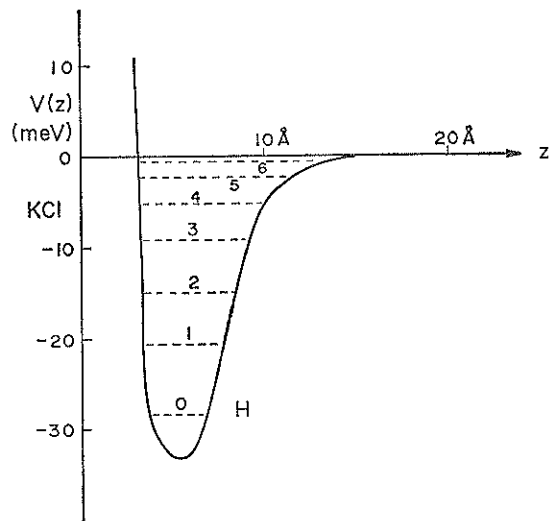
Tomiyuki Toya

Research Institute for Catalysis, Hokkaido University  
Kita-ku 11, Nishi 10, Sapporo, 060  
(Received November 15, 1980)

この10年間ばかりの間での分子線回折による固体表面の研究の進歩は、目ざましいものがあり、他の方法では不可能な、新しい研究結果が豊富に得られている。分子線回折は O. Stern を中心に K. Knauer, I. Estermann, F. Frisch らによってはじめられた。その目的は He や H<sub>2</sub> などの軽い原子分子のビームをつかって、de Broglie が1924年に理論的に推論した物質の波動性を実験的に確かめることにあった。Davison と Germer が電子線回折により、電子の波動性を証明したのは1927年であったが、Stern らも Davison の論文の発表される以前から手がけていて、固体表面で散乱された分子線の強度測定のための検出器を試作しており、1929~1933年に数編の論文 (Ref.(1)~(6)) を発表した。30年の論文では LiF による He, H<sub>2</sub> の見事な Bragg 反射を観測して、de Broglie の関係式  $\lambda = h/p$  ( $\lambda$  は物質波の波長、 $h$  はプランク定数、 $p$  は分子の運動量) がよく成り立つことを実証している。

Ref. (5)と(6)の論文は LiF の (001) 面による He 分子線の異常散乱についてのもので、のちに

Lennard-Jones と Devonshire により理論的に解明された。一般に固体と分子との間には分散力による引力と、表面近傍での反撥力よりなりたっていて、Morse 関数で比較的良好に近似し得るポテンシャル  $V(z)$  が存在する。図は KCl による H の



$V(z)$  を示し、準位  $\epsilon_n$  は破線で示してある。 $\lambda$  射線

の波数ベクトル  $k = K + k_z \hat{z}$ ,  $K$  は固体表面 ( $xy$  面) に平行な成分,  $k_z$  は  $Z$  成分の大きさで,  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$  等は,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の単位ベクトルとする。表面の正方格子の格子定数を  $a$  とすると, 表面の逆格子ベクトル  $G_{m,n}$  は

$$G_{m,n} = (2\pi/a)(m \cdot \hat{x} + n\hat{y}) \quad (1)$$

であたえられる。異常散乱のおこる条件は

$$(\hbar^2/2M)(K + G_{m,n})^2 = \epsilon - \epsilon_k, \quad k=0, 1, \dots \quad (2)$$

になる。即ち  $\epsilon$  のエネルギーをもつ入射粒子は, 運動エネルギーの  $Z$  成分を

$$(\hbar^2/2M)k_z - \epsilon_k = (\hbar^2/2M)k_z^2 + |\epsilon_k| \quad (3)$$

だけ失い  $\epsilon_k$  準位に入り, その失ったエネルギー分だけ,  $x$ ,  $y$  成分の運動エネルギーが増加して,  $(\hbar^2/2M)(K + G_{m,n})^2$  になることができるのが, 異常散乱の原因で, Ref. (6) の Frisch が He/LiF (001) についての実験結果をまとめて得た式は, (2)式で  $G_{m,n}$  が  $G_{0,1}$  で  $\epsilon_0 = -5.6$  および  $\epsilon_1 = -2.1 \text{ meV}$  になる。このように固体表面による分子線の異常散乱から  $\epsilon_k$  が得られ, この  $\epsilon_k$  を与えるような  $V(z)$  を実体的に求めることができるわけである。最近の Meyero と Frankl (Surface Science 51 (1975) 61) の実験では  $\epsilon_0 = -5.8$ ,  $\epsilon_1 = -2.2$ ,  $\epsilon_2 = -0.6$ ,  $\epsilon_3 = -0.1 \text{ meV}$  が得られた。この結果は  $V(z)$  として Lennard-Jones の 12-6 ポテンシャルから Tsuchida (Surface Science 46 (1974) 611) が求めたものとよく一致する。Stern と Frisch の実験では,  $\epsilon_2$  や  $\epsilon_3$  は観測されなかったが,  $\epsilon_0$  と  $\epsilon_1$  の値は正しく, 40 年以上前の実験の精度が非常に高かったことを示している。図の H/KCl (001) の結果は Frank, Hoinkes, Wilsch (Surface Science 63 (1977) 121) のものである。

京都で1974年第二回固体表面国際会議 (ICSS) が開かれた折 Genova (Italy) の分子線のグループ (Garibaldi, Levi, Spadacini, Tommei) は Stern らの分子線回折の実験が1933年の ref. (5)(6) の論文を最後にストップしたのは, ユダヤ人教授の追放のためであろうと述べている。(Japanese Journal of Applied Physics, Supplement 2 Part 2 (1974) 549)。1933 年は, ナチスが政権を掠奪した年である。ヒンデンプルグ大統領の息子の不正をつかんだナチスは, その息子を通して工作し

たらしく, 33年1月にヒットラーが首相に任命され, 3月には有名な国会議事堂放火事件の謀略を契機に「全権委任法」を制定して議会制度を有名無実のものにし, 僅か首相になってから半年後にはナチスの独裁を確立してヒットラー自らが大統領を兼ねて総統になった。大学や学界に対しても, ナチ学生をつかってユダヤ系の教授の講義を妨害させたりシュタルク効果の Stark 等の急先鋒の反ユダヤ主義物理学者は, アインシュタインの相対論をはじめ「ユダヤ物理学」に猛然と非難をあげさせた。

極低温の物理学者である Mendelssohn の著書「Nernst の世界一ドイツ科学の興亡」(藤井かよ, 藤井昭彦訳, 岩波書店) にユダヤ系教授追放のことが, 生々しく書かれている。例えば, ベルリン大学の物理学研究所教授だった Nernst は, 1933 年の早春, 同僚の分光学者で著名な Pringshein 教授が Wehnelt 所長からユダヤ人である理由で実験室への立入りを禁ぜられたことを知った。驚いた Nernst は, ベルリン郊外にある物理化学研究所 (現在の Fritz Haber 研究所) の Haber 所長の所に急いで相談に行ったが, そこで Nernst が見たのは Haber 自身が亡命のため研究室を整理しているところだったという。Haber はイギリスで2ヶ月半後に客死した。Haber はアムモニア合成に成功し, 世界的に逼迫していた, 窒素肥料問題を解決し, またチリ硝石に頼っていた硝酸系火薬も無尽蔵につくれるということでは, ドイツに大きな寄与をした学者である。もっとも, この成功はドイツが第一次大戦を決意した原因にもなったが……。

ベルリンでのユダヤ人追放の波は, ハンブルグ大学物理学研究所長をしていた Stern の身边にもひしひしと打寄せはじめていたのであろう。Ref. の (5), (6), (7), (8) の論文受理日を見ると (5) が4月, (7) が5月, そして (6), (8) が6月になっている。(5) と (6) は分子線回折で (7), (8) は陽子の磁気モーメント, を測定したものである。これら四編の論文がドイツ語で, ドイツの学会に発表された最後のものである。

Stern-Gerlach の実験 (1922 年) は「方位量子化」あるいは空間量子化の発見で, 古典量子論か

ら量子力学への重要な橋渡しになった。また側定された磁気モーメントは電子軌道によるものでなく、スピンによる電子自身のモーメントだったわけである。1927年に堀健夫北大名誉教授は Bohr の研究所に留学中水素分子の far ultra-violet bands の実験を完成した。この実験結果に対する Dennison の理論から陽子もスピン  $1/2$  で、 $H_2$  分子の二つの陽子のスピンの向きが、平行か反平行かで、ortho- 水素と para- 水素の二種類存在することも分った。陽子のスピンの  $1/2$  であることから、陽子は Dirac の相対論的波動方程式に従い、磁気モーメントは  $\mu_N = eh/2Mc$  ( $M$  は陽子の質量) で電子の1850分の1と確信されていた。Pauli などは実験などしてみるまでもないと云っていたと伝えられている。しかし Stern は実際に側定してみずにはおられなかったのであろう。ことに1932年に Urey が重い水素を発見したことや、ユダヤ人迫害が、ひどくなりつつあることから手元にある精度の高い分子線回折装置を使って、いそいで実験が行はれたことが上記の論文の発表の日付から察せられる。

周知のように測定結果は予想された値よりずっと大きい  $2.46\mu_N$  で、この異常さを説明するには中間子理論をまたねばならなかった。重い水素の測定も、ハンブルグで一応終ったのであるが発表は、翌年の1934年4月のアメリカでの物理学会でなされた。Ref. (9) は、そのアブストラクトである。Stern, Estermann は、カーネギー工業大学に迎えられ、ref. (10) の HD,  $D_1$  の分子線を用いての実験は、1937年に発表されている。実験装置を新しく組立するのに、二、三年を必要としたためであろう。このあと数編の論文があるが省略する。1943年には「分子線の方法の開発への貢献と陽子の磁気モーメントの発見」にたいして、ノー

ベル賞をうけた。

略歴は、1888年2月ドイツに生れ Breslau 大学で1912年 Ph. D. をうけ、同年 Prague 大学で Einstein の最初の弟子となり、Einstein とともに Zürich 大学に移った。翌年、スイス連邦工科大学の講師、1914-21年 Frankfurt 1921-22年 Rostock, 1923-33年 Hamburg 大学物理研究所長、1933-45年 Carnegie 工業大学、1945年同大学名誉教授、はじめのうちは理論物理を専攻していた。45年に温暖な California に引退した。終身独身で葉巻を口から離さず、人格は柔和で晩年に映画に夢中になり1日に2回も映画館に現われたそうで、1969年8月映画館にて死去した。

(ノーベル賞講演物理学第6巻、講談社、および前掲の「ネルンストの世界」を参照した。)

#### 文 献

- (1) F. Knauer und O. Stern, Z. Physik 53 (1929) 766; ibid. 53 (1929) 779.
- (2) O. Stern, Naturwissensch. 17 (1929) 391.
- (3) I. Estermann und O. Stern, Z. Physik 61 (1930) 95.
- (4) I. Estermann, R. Frisch und O. Stern, Z. Physik 73 (1931) 348.
- (5) R. Frisch und O. Stern, Z. Physik 84 (1933) 430.
- (6) R. Frisch, Z. Physik 84 (1933) 443.
- (7) R. Frisch und O. Stern, Z. Physik 85 (1933) 4.
- (8) I. Estermann und O. Stern, Z. Physik 85 (1933) 17.
- (9) I. Estermann und O. Stern, Phys. Rev. 45 (1934) 761.
- (10) I. Estermann, O. C. Simpson und O. Stern, Phys. Rev. 52 (1937) 535.