

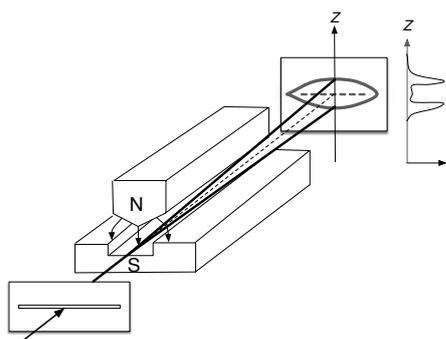
スピン[山本雅博“表面科学ことはじめ 第 14 章 電気二重層理論の黎明” 山本雅博（日本表面科学学会, 2012）より一部改変して掲載]

Otto Stern は 1919 年にフランクフルトで Max Born のアシスタントとなり、いよいよ分子線の研究を始める。分子線の実験はフランスの Dunoyer によって既に始められていたが、マクロな測定装置で原子・分子レベルの物性が測定できるこの測定法の"simplicity and directness"に強くとらわれたようだ。Born も Stern の分子線を使ったこの実験を強く後押しした。まず、Stern は銀の分子線を使ってある温度で熱平衡にある銀原子ガスの速度分布を測定した。銀の分子線は、オーブンを加熱して銀の蒸気を発生させオーブンの小窓から飛び出してくる銀原子をさらにスリットを通過させビームとしたものを用いた。その速度分布はオーブンの温度の関数すなわち Maxwell-Boltzmann 分布に従うことを示した。一般的に当時のドイツの物理化学の"大教授"は、化学の極めて基礎的な問題に取り組むことを好んだが(top-down 型)、Stern は実験の詳細すなわち自作にこだわっており(bottom-up 型)、Stern 自身ガラス細工が得意であった。自作にこだわったのは、誰もが行ってない実験は自作するしかないということと、装置の詳細に実験結果が強く依存することをよく熟知していたからであろう。

次に取り組んだのが、いよいよ Stern-Gerlach の実験である。当時磁場中においた原子の電子レベルが分裂するという Zeeman 効果の測定により、水素原子、アルカリ金属原子、銀原子は、小さい磁石として働くことがわかってきた。その磁石としての原子を磁場の中に入れたときの振る舞いが、量子力学と古典力学では全く異なるのではないかと予測しそれを分子線の実験で確かめようとしたのである。その実験は「意味がない」と師匠の Born は論じたが、Stern は「やってみる価値はある」と説得されたと、Born は後に語っている。

銀は原子番号 47 で、原子の電子配置は $[\text{Kr}]4d^{10}5s^1$ である。内殻 $[\text{Kr}]4d^{10}$ の 46 個の球対称な軌道をもつ電子の磁性は対として打ち消され、一番最外殻の s 電子が磁性に寄与する。Stern と Gerlach は原子核回りの電子の回転（公転：太陽の回りをまわる地球に対応）が量子化される（空間量子化・方位量子化）ことを期待したのだ。

磁石としての原子ビームは、均一な磁場中を通過しても力は受けないが、例えば z 方向に磁場勾配をもつ磁場中では、その勾配の大きさと原子磁石の大きさの z 方向成分に比例して z 方向に力を受ける。Stern-Gerlach らの実験装置を、図に示す。



スリットを通過した銀原子のビームは、磁場をかけない時には、図の点線のように一本の線として観測されたが、 z 方向に磁場勾配をもつ磁場をかけた場合は、驚くことに図の実線で示したように2本の線！に分かれたのである。電子の公転を古典的に扱う場合は、公転する面はランダムに分布するので、銀のビームは連続的に広がるのが期待されるが、それが2本に別れて量子化されたのである。この発見は極めて重要である。ビームが分かれたことにより空間量子化・方位量子化は証明されたが、電子の公転に起因する原子磁石の場合ビームは3本あるいは5本に分かれることが量子力学から予想されていたので、2本に別れたことは当時の量子力学では説明できない現象であった。

2本に分かれるには、磁石が電子の公転の角運動量の半分の $1/2$ スピン（地球の自転に対応）[自転というのは正しくないイメージである。2回回転したら元にもどる spinor で語るのが正しい。直感的な説明は、Feynman も指摘しているように誰も与えてくれてない。（経路積分で1次元の）1次元での特別な場合について Feynman によって与えられている。720° 回して元に戻る系をコーヒーカップを使って Feynman は実演している（R. P. Feynman, *Elementary particles and the laws of physics*: the 1986 Dirac memorial lectures, Cambridge University Press, 1987）。また、メビウスの輪の表面上を歩くと2回回らないと元に戻れない。]をもつということによるという解釈が提案されたのは Stern-Gerlach の実験後になる。Kronig, Uhlenbeck-Goudsmit が電子スピンの概念を提出したのは、Stern-Gerlach の実験から3年後の1925年で、さらに Dirac が特殊相対論と量子力学の自然な結合として導いた Dirac 波動方程式によってスピンの性質を spinor という物理量ですっきりと説明したのは6年後の1928年のことである。

Stern-Gerlach の実験では、銀はガラス板に単原子層レベルしか析出せず、その検出は容易ではなかったはずであるが、Stern は当時タバコをふかしながら実験しており、そのタバコの煙で銀がみえるようになったというエピソードがある。Stern と Gerlach は、彼らの実験でビームが2本にわかれたように、第2次世界大戦によって米国とドイツに別れ別れになっていったのはあまりにも皮肉な話である。