

半導体の歴史

— その2 20世紀前半 量子力学の誕生
〈前期量子論〉 —

株式会社ルネサステクノロジ
生産本部技術開発統括部
MCU デバイス開発部 主管技師
おくやま こうすけ
奥山 幸祐

現代物理の始まり

前稿において今回の予告を「トランジスタの誕生」としたが、その前に半導体物理の元になる量子力学について触れてみたい。以下、高林武彦著「量子論の発展史」、治部眞里史訳、J.P. マッケボイ、オスカー・サラティ著「量子論入門」、その他の資料を参考に20世紀前半での物理学のあゆみを辿ってみる。

20世紀前半、科学分野において最も大きな進歩は量子力学、相対性理論（特殊、一般性）の2つからなる現代物理が確立されたことと思われる。20世紀以前に確立されたニュートンの万有引力説やマクスウェルの電磁気学があまりにも出来が良いことから、20世紀の初頭まで殆どの科学者は世の中の全ての物理現象を示すものはこれらの理論以外にはあり得ないと確信していた。ところが、19世紀後半になって来ると、これらの理論で表しきれない現象が幾つか出てきたのである。特に、光と電子が関わる現象がそれである。例えば、物質を熱した時に発生する光の強度分布（強度と周波数の相関）や物質に光を当てた時に飛び出して来る電子（光電効果）の挙動などである。当時は原子像も確立しておらず、摩訶不思議な現象であった。

1890年代から熱力学を取り扱う物理学者達はこれらの現象を解き明かすことに努力を傾け、20世紀初頭に熱した物質から飛び出して来る光の現象解析から「量子」と言う考え方が提唱され、その後、多くの科学者によって量子力学が確立される。この量子力学により、原子周りの電子の状態が解き明かされてゆくと言うよりも、解き明かされる仮定で量子力学が形成されたと言っても過言でないかも知れない。特に1900年から1924年まで、マクス・プランクが「量子」を提唱してからルイ・ド・ブロイが「物質波」を提唱

するまでの25年を「前期量子論」と呼び、量子力学の基礎が構築されて行く期間である。その後、1925年6月から1926年6月の一年間で完成された3つの量子力学が現れる。ハイゼンベルクの行列力学、シュレーディンガーの波動力学、デラックの量子力学である。この3つは数学的には異なる方法で定式化されたものであるが、互いに等価であることが判る。これらによって、電子の振る舞いや存在確率などを計算で表す事が出来るようになったのである。この進歩を受け、1930年代に半導体物理が確立されてゆき、半導体素子内部の電子や正孔の挙動も掴める様になり、科学的に半導体デバイスの設計ができるようになったのである。

半導体産業が量子力学を用いた最初の産業であり、量子力学なしには成り立たなかったとも言える。また、特殊相対性理論では、この世の中で唯一普遍なものは光の速度だけであり、物体の質量や長さ、同時性といった概念は、観測者のいる慣性系によって異なる相対的なものであると言う概念が確立される。これに加速度運動と重力を取り組むことにより、重力場の存在する所でも適用できる一般相対性理論として完成し、重力場での時空の歪みの概念などが取り込まれる。相対性理論の確立によってブラックホールや宇宙の膨張、収縮などと言った宇宙の諸現象までもが解明される土台が出来上がったのである。

この2つの学説の確立で、人類は原子や電子などのマイクロ世界から宇宙のマクロ世界までの現象を取り扱うことが可能になったのである。これらの学説は1900年から約30年間で確立される。相対性理論は天才科学者アインシュタイン一人によって築き上げられたものであるが、量子力学はマクス・プランクから始まり、アインシュタインも含む、おおよそ10人程度の科学者達が成し得たものである。当時、それまでのニュートンを頂点とした古典力学に対してこれらの新しい考え方を打ち出すことで大きな批判を受けることを恐れ、悩み続けた科学者や、若干20才台で堂々と考え方を発表して行く天才的な科学者たち、普遍的な方程式を編み出しながらも、その真実が何なのかを考え苦しむ科学者などなど、十人十色の個性あふれた顔ぶれに驚きを通り越し、面白みすら感じざるを得ない情景である。勿論、これらの科学進歩が30年内のみで零から始まったものではない。前項まで述べた19世紀の科学発展が土台となっている

のである。ニュートンの万有引力説やファラデーやマクスウェルらによって作り上げられた電磁気学、ルードビッヒ・ボルツマンが始めた統計力学、その他の多くの現象論、数学などが土台となり、それらでは説明しきれない点を考察してゆく過程で形成された科学理論体系である。特に統計力学はボルツマンが創始者となるが、量子力学の発展においては欠かせないものとなる。ボルツマン自身は、当時、未だ認められていない原子論を認める立場をとり、ニュートンやマクスウェルらの説から抜け出せない頑固な古典物理学者らからの激しい攻撃のまとなり、ついにはうつ病に至り、1906年に自殺することになる。

量子力学が始まった20世紀初頭は物理学者の殆どが古典物理学の信奉者であり、新学説が定着するまでに30年程度の時間を要したのである。1911年から量子力学に関する国際会議が開催され、量子仮説が不可避であることが国際的な承認を得たにも関わらずである。また、1900年初頭に量子力学が生まれ発達した原因を工学的な面から見ると1800年台後半から技術が進歩した分光技術による光のスペクトル解析、更には1920年台までに進歩した真空技術に裏づけされた電子の精密な散乱実験技術などの発達によると考えられる。後者は透過型も含めた電子顕微鏡へと発展してゆく。理論が構築されてゆく過程では対象事象が目に見えることが真実に近づく早道なのである。以下、半導体物理の基礎となる量子力学について触れる。

量子力学の始まり(前期量子学)

古来、陶芸家は窯の温度に細心の気を使ってきた。窯の温度によって陶磁器の仕上がりが大きく左右される為である。しかしながら、当時は温度計もなく、陶芸家の目だけが頼りだったのである。窯の中が加熱されて発光する光の色を見て温度の目安を付けていたのである。窯を加熱し温度を上げてゆくと比較的低い温度では赤く、温度を上げてゆくに従いオレンジ、黄色、緑、青から白っぽい色へと明るい色に輝いてゆく。1792年に陶芸家のジョサイア・ウェッジウッドによって、全ての物体が同一温度で赤色になることが記録されている。

この光の色の違いは光の波長の違いから来るものである。温度が低い時の赤っぽい色は長い波長(小さい周波数)であることを示しており、それ以下の温度になると、波長は更に長くなり、目には見えない赤外線レベルの波長になる。これとは逆に高温側では次第に白っぽい色になり、短い波長(大きな周波数)の光が発生していることを示している。19世紀末になると、この光の現象解析が活発になり、それぞれの温度で発光する光の強度と周波数の相関が解析されてゆく。

表1 陶芸家のための温度の目安

窯の温度	窯の中の発光色の目安
550°C	暗い赤色
750°C	明るい赤色
900°C	オレンジ色
1000°C	黄色
1200°C	白色

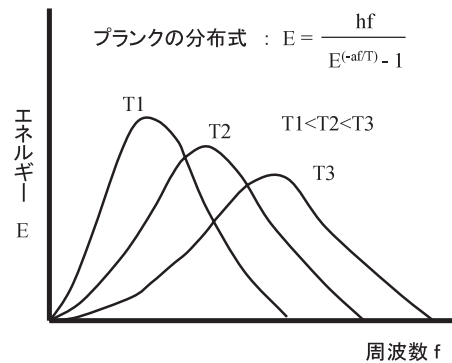


図1 各周波数における光の強度

密閉された空洞の壁を熱することで光が発生し、空洞に開けた小さな穴から出てくる光の測定が行なわれたのである。外部から入射する熱放射など(光・電磁波による)をあらゆる波長に渡って完全に吸収し、また放出できる物体のことを黒体と言い、黒体からの光の放射を黒体放射と言う。ここでの空洞放射は理想的な黒体放射を再現するものである。図1に示すように空洞放射による光の周波数分布には1つの最大値を持つ突型の形を示し、最も強度の大きい光の周波数は物質の温度が高くなると大きくなる。この強度分布の理由探しが1890年代終わり頃、理論物理学者の中心課題のひとつであった。

この問題に解答をだしたのはベルリンの中年の大学教授マクス・プランクである。プランク自身はアインシュタインが生まれた歳に学位論文を取り、それから20年経っていた。彼は古典物理学を信奉する非常に保守的な科学者であり、先に述べたボルツマンの統計力

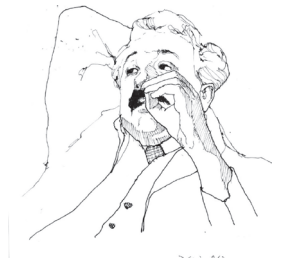


マクス・プランク

学から確率を求める手法を嫌い、他の手法を手探りで探しながら研究を5年程続けていた。この当時、事象を確率で話し合うこと等は異端児扱いされたのである。プランクは空洞の壁の物質が熱せられる事で振動し、エネルギーを得て光を放射するという考え方から出発する。空洞から放射された光の周波数 f は空洞の壁の物質の周波数（振動数）と等しいと仮定し、光の周波数から壁の物質の周波数を推定した。あくまでも空洞の壁のエネルギーに注目したのである。5年間の研究を得て、彼の友人であるウィーンの表式を参考にすることで1900年10月に空洞放射の特性を完全に表せる表式（プランクの分布式、図1参照）を完成させる。しかしながら、この時点で表式が示す意味、特に表式中の係数の意味が掴めなかった。科学者としては、どうにもやるせない気持ちであったのである。これを解くために、プランクは、それまで封印していたボルツマンの統計力学の考え方、解き方を利用することを決断する。世の中の大多数を占める古典物理学者からの批判を受ける覚悟をした訳ではなかったが、使わざるをえなかったのである。その結果として得られた公式が $E = nhf$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) という非常にシンプルな形の式である。この式を2ヵ月後の12月に発表している。ここで、 E はエネルギー、 n は整数、 h は定数、 f は壁の振動子の周波数である。この式はシンプルであるが、物理学の歴史を大きく変える重要な意味を含んでいたのである。周波数 f である壁の振動子のエネルギーは、 $1 hf, 2 hf, 3 hf \dots$ のように整数倍に変化し、 $0.4hf$ や $1.33hf$ などの半端な値はとれない。エネルギーは、必ず、整数倍の、とびとびの値を取り、連続的ではなくて、非連続的に変化するのである。古典物理学では、すべての量は切れ目なく連続的に変化すると考えられており、とびとびの値を取ることは全く新しい概念である。このように非連続的で、とびとびの値しかとらない量について、その単位量を「量子」と呼ぶ。振動子のエネルギーは、 hf が量子である。そして、振動子のエネルギーは、 hf を単位量とする考え方を「エネルギー量子仮説」という。比例定数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ は、以後、プランク定数と呼ばれ物理学の基本定数となった。プランクが「量子力学」のとびらを開けたのである。ただしプランク自身は古典物理学の信奉者であり「エネルギーがとびとびの値しか許さない」などという考え方には必ずしも納得していなかったようである。この奇跡的な論文発表後、プランクは自ら「量子化」について述べることは殆ど無かったようである。これから数年間はプランクの理論に含まれる新奇な性質にあまり注意が払われることなく、「量子」は数年間、休眠状態となる。この数年はアインシュタインが成年に達するのを待つ猶予期間のようなものであった。

一度開いた扉を更に大きくこじ開けたのは著名な大学教

授ではなく、当時、若干26才のスイス特許庁3級技術専門職（審査官）アルベルト・アインシュタインである。プランクが奇跡的な発表した年から5年後の1905年に光量子仮説を発表したのである。プランクの量子はあくまでも空洞の壁の振動子のエネルギーを量子化したものであったが、アインシュタインの光量子仮説では周波数 f の光は電磁波（波動）であると同時に $E = nhf$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) というエネルギーを持つ粒子として振舞うことを提唱している。光は光速で動き、質量0の粒子なのである。この考え方は放射場（壁の振動子）のエネルギー変化を不連続としたプランク概念を他の系に拡張するものであり、プランクの理論に味方するものであるにも拘わらずプランク自身は難色を示した。光の波の性質は既に十分に確認されており、光が粒子であると言う概念が信じられなかったのである。光の波と粒子の二重性が確認されるのは1923年にコンプトン効果が発見されてからになる。



アルベルト・アインシュタイン

アインシュタインはこの年に光量子仮説、ブラウン運動理論（ゆらぎ）、特殊相対性理論に関する5つの重要な論文を発表し、この年は「奇跡の年」と言われている。ちなみに、この2年後の1907年に有名な公式 $E = mc^2$ を発表し、更に1916年に一般相対性理論を発表している。これらの発表はアインシュタインが26才から37才までの11年間に行なわれている。

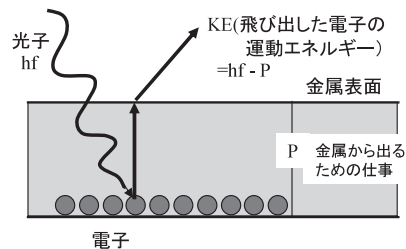


図2 外部光電効果のモデル

アインシュタインの光量子仮説は物質に光を当てた時に電子が飛び出して来る外部光電効果の現象を説明するために発表された仮説である（図2）。入射光が hf の大きさのエネルギー量子（光子）からできていると仮定する。光子は金属表面を通り抜け、1個の光子がその全エネルギー hf

を1個の電子に与え、その電子はもらったエネルギーの一部を消費して金属表面にまで到達する。自由空間に電子が飛び出すためには、電子は金属に、ある大きさの仕事 (P) をしなければならない。運動エネルギー E は hf (入射光子エネルギー) から P (金属からでるための仕事) を引いたもの、 $E=hf-P$ になる。

以上がアインシュタインの光電効果のモデルであるが、アインシュタインは阻止電圧 V_0 を印加することで飛び出してくる電子を止めることができることも示している。この関係式は $qV_0=hf-P$ の簡単な一次関数となる (ここで q は電子の電荷である)。幾つかの異なった周波数の光について阻止電圧 V_0 を測定し、この一次関数に実験値が乗ることが確認されれば、アインシュタインの光子の概念に対する決定的な証拠となる。

頭の固い典型的な古典物理学者であるシカゴ大学のロバート・ミリカンはアインシュタインの仮説を否定したいが為に1912年から17年かけて、この実験を繰り返す。しかしながら、ほぼ完全に一次関数が表す直線上に乗る正確なデータを得たミリカンは、アインシュタインの説明の正しさを強固なものにしてしまう。アインシュタインは、これによってノーベル賞を受賞する。

アインシュタインの光量子仮説により、プランクがエネルギー量子化を報告してから5年間休止状態であった「量子」が解き放たれ、単に壁の振動子の量子化が光の振動子の量子化へと広がる。また、世の中に量子を衝撃的に印象付けたのもアインシュタインであった。1907年に固体論を発表し、その中でプランクの量子の考えを、そのまま現実の固体に対する粗いモデルとして転用して、固体の比熱の式を出した。この中で温度が0になると固体の抵抗が0になる事を示す。

このモデルの実証が物理化学者ネルンストによって実証されることで、低温での超伝導を予測したことが認められ、固体論がだされてから2~3年後に脚光を浴びることになる。

その後、多くの科学者が現象に量子を取り込む挑戦を始めだし、1911年「輻射と量子」を主題としてブリュッセルで第一回ソルヴェー会議が開催される。ここでの討論を契機として量子仮説が不可避であることが国際的な承認を得ることになったのである。

原子模型の提案と進化

プランクとアインシュタインが提唱した壁の振動子や光のエネルギーの量子化をベルギー人のボーアが電子の角運動量に転用することで原子核周りの電子状態が解き明かされてゆく。

20世紀初頭までは原子そのものが存在することを殆どの

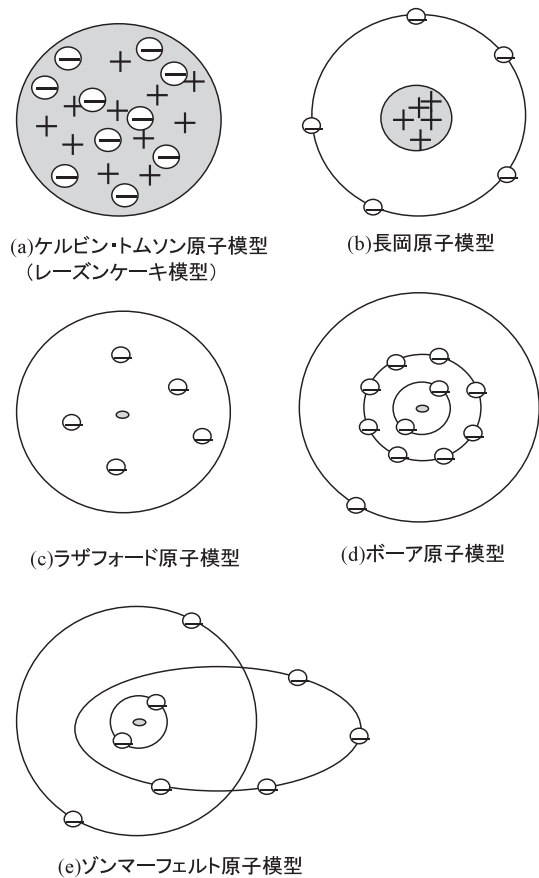


図3 原子模型の変遷

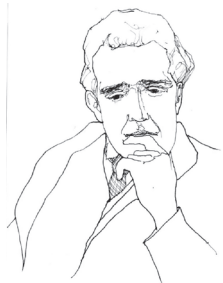
科学者は信じていなかった。最初に原子模型を現したのは1902年にロード・ケルビンである。図3 (a) に示すように非粒子的な陽電気がおよそ 1 \AA 程度の球状に様に広がり、この内部に陽電荷を打ち消すだけの何個かの電子が運動している。先に述べた電子が粒子であることを発見した J.J. トムソンが1904年にこのモデルを取り入れたことからケルビン・トムソンモデルと言われている。あたかも、干しぶどうのつぶ (電子) が埋め込まれている丸いケーキに似ていることとクリスマスの時期であったことからレーズンケーキモデルとも言われた。

図3 (b) に示す惑星型の原子模型を始めて示したのは1903年に日本人の長岡半太郎である。長岡は中心に正電荷をもった塊があり、その周りを電子が回っている構造を提案した。1個の円周上に多数の電子が等間隔に並んでいる構造で説明している。

その後、ケンブリッジ大学時代に J.J. トムソンの学生であったアーネスト・ラザフォードがマンチェスター大学の物理学教授を務めていた1909年頃に原子の中心部の原子核

を見つける。ラザフォードはケルビン・トムソンモデルと長岡モデルのどちらが正しいのかを調べるために学生のガイガーとマーズデンに、原子に向けて α 粒子を衝突させ、はねかえって散乱する α 粒子の軌跡を調べる散乱実験を行わせていた。この実験結果から原子の中は殆ど空で、中心部に全体の10億分の1の大きさの小さな原子核があることを突き止めた。ラザフォードはこの結果から、1911年に図3(c)に示すラザフォード模型を考案する。原子核の周りを電子が回っている、原子の太陽系モデルである。しかしながら、電子が何故回り続けるのか、何故、加速度があるのに電子は放射光を連続的に出し続けられないのかなどの疑問が埋まらず、新しい仮説を必要とした。

この仮説を立てるのに挑戦したのが、1912年にマンチェスターのラザフォードの下で学生となったデンマーク人のニールス・ボーアである。ボーアはそれまでJ.J.トムソンの下で研究を始めていたのであるが、レーズンケーキモデルに失望し、ラザフォードの下に移ってきたのである。ボーアはこれからの50年の生涯をこの仕事に掛けることになる。同年の夏にはボーアはラザフォードの疑問である原子の安定性の問題について取



ニールス・ボーア

り組み始め、「原子と分子の構造」と題する草稿を書き出す。ボーアがこの問題を解く鍵として目をつけたのが、プランクとアインシュタインの量子化である。電子が原子の周りを安定に周回する特別な軌道があり、光子のエネルギーと周波数の量子論的關係 $E = nhf$ に何らかの関わりがあると考えたのである。翌年の1913年に、ボーアはバルマーの公式を見つけることで大きな突破口を開く。

ヨハン・ヤコブ・バルマーはスイスの数学教師であり、28年前の1885年に元素の中で最も単純な原子である水素を熱した時に発生するスペクトル（可視光域から紫外域にある光を分光器で分解して波長の順に並べたもの）の周波数 f を何ヶ月も計算し、その規則性を導く公式を発見していた。この式は $f = R(1/n_f^2 - 1/n_i^2)$ と簡単な式であり、この式の R （リュードベリ定数）を 3.29163×10^{15} とし、 n_f を2とした時、 n_i を3、4、5、6と変えると、水素の4つのスペクトル線の周波数を表せることにバルマーは成功していた。

一方、ボーアがこのバルマーの公式に目をつける一年前の1912年、ボーアがケンブリッジで知っていたJ.W.ニコルソンが、または、1913年にエーレンフェストが、それぞれ電子が原子核の回りを回る角運動量（図4）を量子化し、水素での正確な角運動量の値 $L = mvr = n(h/2\pi)$ を計算し

発表する。プランクやアインシュタインが振動運動を量子化していたのが、回転運動の量子化へと広がり始めたのである。この頃になると回転運動の他、並進運動などへと量子の一般化が進んでくる。

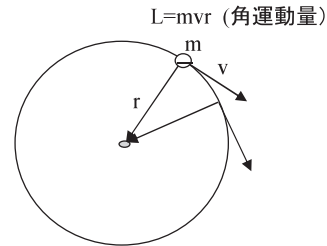


図4 原子核を周回する電子の角運動量

1913年の4月、ボーア27歳の時に歴史的な論文を発表する。なるべく簡単な場合として水素を取り上げ、しかも円運動に限ることによって上記の回転運動を量子化する手法を取り入れ、原子核を回る電子軌道を考案する。ボーア模型の提案である（図3(d)）。量子条件は $|E| = nhf/2(n-1, 2, \dots)$ であり、 f は軌道運動の振動数（周波数）であるが、振動子の場合と違い変数である。更に定常状態と遷移と言う概念を取り込む。定常状態では電子は原子核との間にクーロン力が働き、光を放出することなしにエネルギーは一定に保たれており、決められた軌道を周回する。定常状態での電子は太陽の周りを周回する惑星と同じである。

惑星の運動については古典力学でアイザック・ニュートンが生まれるよりも前の1619年にケプラーが惑星の運動法則を見つけている。この発見でコペルニクスが提唱した地動説が天動説に比べて真に優位性を持つようになる。また、ニュートンの万有引力説はこの法則を元にしたものである。このケプラーの第3法則と量子条件の関係から n 番目軌道の電子のエネルギーは $E_n = -mq^4/(2h^2n^2)$ で表される。ここで、 $n=1$ の電子軌道の半径 r は $r = (h^2/(4\pi^2q^2))n^2$ から 0.528 \AA であり、この時のエネルギーが最低な状態（基底状態）であり、水素の原子半径と一致し、ボーア半径と呼ばれている。また、ボーアは軌道間を電子が遷移し、ある軌道から別の軌道に遷移する際に電子が光を放出、吸収するモデルを付け加える。この時の光のエネルギーは $E = hf = E_n - E_{n'}$ で現される。 f は光の周波数であり、 $E_n, E_{n'}$ は遷移前後の電子のエネルギーである。電子の遷移善後のエネルギー変化を光の放出、吸収に置き換えることでエネルギーの保存が保たれるのである。アインシュタインの光電効果をも示唆するモデルである。そして、バルマーの公式 $f = R(1/n_f^2 - 1/n_i^2)$ のリュードベリ係数 R を $2\pi mq^4/h^3$ に

置き換え $f = (2\pi m q^4 / h^3) (1/n_f^2 - 1/n_i^2)$ とすることで古典物理学と量子力学を融合する。バルマーの公式の R が $R = 2\pi m q^4 / h^3$ で求めたものと、バルマーらが実測値から求めた値とが一致することで、このモデルの正しさを証明することができる。1914年当時の q 、 m 、 h の値を使用し、実測値とわずかの数パーセントの違いで一致したことでボーアのモデルの正しさが認められたのである。ボーアの原子模型で水素原子スペクトルの周期性が実証されたのである。

このボーアの原子模型はミュンヘンの理論物理学の教授であったアーノルド・ゾンマーフェルトによって修正されて成長してゆく。単純な水素でさえも、新たなスペクトル線が見つかり、ボーアのモデルに限界が見え出して来たのである。そもそも、惑星運動を考えたケプラーも円軌道は稀であり、楕円軌道が一般的であると述べているが、電子の軌道も1つの量子数 n だけがゆるす単純な円軌道では対応できなかったのである。ゾンマーフェルトは楕円軌道などに対応するため、特定の軌道の形に対応する第2の量子数 k を、 n と同様の $h/2\pi$ を単位として導入する。さらに、ゾンマーフェルトは軌道が向いている方向を示す第3の量子数 m を磁気量子数として取り入れる。原子を磁気の中に入れると電子の軌道の方向が変化し、新たなスペクトル線を発生するゼーマン効果に対応したものであった。これによって、ゾンマーフェルトの原子模型は図3 (e) に示すような電子軌道のものとなる。1916年2月にアインシュタインはゾンマーフェルトに手紙の中で、この結果は「天の啓示」だと書き、1ヶ月後、ボーアは「あなたの美しい研究ほど楽しみながら呼んだものはありません」と付け加えたのである。

しかしながら、その後、磁場によって、更にもう1つのスペクトル線が見つかって来る。これは異常ゼーマン効果と呼ばれた。1924年になってくると物理学者達はこのスペクトル線の謎解きに目が向いてくる。この謎を解いたのはミュンヘン大学でゾンマーフェルト教授の学生であったスイスの理論物理学者ウォルフガング・パウリである。パウリは実験が苦手な物理学者であり、実験室に入ると、必ずと言ってよいほど実験装置が壊れた。周囲の実験者たちは、この事をパウリ効果と言ひ、パウリを実験室から締め出した程であった。

パウリは電子の自転が異常ゼーマン効果の原因となる余分の角運動量を生み出すと言う仮説を立てる。2つの値を取る第4の量子数 s を導入し、異常ゼーマン効果を説明することを提案する。また、彼は、もう1つ重要な提案を行なう。“排他律”と呼ぶべき非常に簡単明瞭な法則を見つけたのである。原子において個々の電子の状態が4個の量子数によって指定され、その1つに同時に2個以上の電子が入ることは許されないとすることである。この事は後に電

子の分布を求める上でも重要な法則となってくる。先の提案の2つの値を取る第4の量子数について、パウリは当初、この様に提案することで異常ゼーマン効果を説明はできるものの物理的なイメージを掴めないでいた。そのころ、アメリカから来た若いオランダ人のクローニッヒが、パウリに電子の自転が2値性を決めているのではと話すが、パウリにとって古典物理の領域の幼稚な考えに見えて却下する。

その後1925年10月になって、やはりオランダ人のハウシュミットとウーレンベルクがクローニッヒと同じ考えを発表したことで電子の自転説が認められることになる。電子の自転は時計周り（スピン上向き）と反時計周り（スピン下向き）の2つしかなく、パウリの提案した2つの値を持つ量子数にピッタリであった。このスピンは、この一年後に開かれる新しい量子力学に重要な役割を果たすことになる。

以上で、ラザフォードが原子核を見つけ、それを元にしたボーアによる軌道模型はゾンマーフェルト、パウリの手を得て、当初の電子軌道の大きさ n に、軌道の形 k 、軌道が向いている方向 m 、電子のスピン s を加え、4つの量子数にすることとパウリの排他律を得ることで完成を見る。これにより、水素原子のスペクトルをはじめ、原子の中のエネルギー状態や元素の周期律の説明までもが可能になる。

III ド・ブロイの物質波（波と粒子の二重性）

プランクの量子仮説と合わせて、ド・ブロイの物質波説が量子力学の原点となる本質的に新しいアイデアで、この2つのアイデアが量子力学の出発点となる。

.....



ルイ・ド・ブロイ

.....

アインシュタインは1905年に光電効果で光が粒子（光粒子）であることを示した。しかしながらボーアらは光が粒子であることを信じられず、触れるのを避ける。

当時、分光技術が発達しており、実験的に綺麗に波の性格を捕らえることができたが、電子の精密な散乱実験は真空などに関する実験技術が分光技術に比べて遅れていたためである。漸く1920年代に入ってくるとこの技術が追従してくる。1923年にコンプトンが電子によるX線の散乱においてコンプトン効果を発見し、この光量子説は有力な証拠を得る。コンプトン効果とはX線（光）と電子との衝突により、X線のエネルギーの一部を電子に与えて、X線の波長が変化する現象である。電子と衝突し、エネルギーのやり取りをする現象そのものが、光が粒子である証拠とすることである。古典力学で示されていた波の性質と合わせ、光の波

と粒子の二重の性格をもつことが証明された。

これに対して電子は J.J. トンプソンが1897年に粒子であることが確認されたことを前稿で述べたが波の性質があるか否かに関して考える学者は1920年代以前にはいなかった。アインシュタインの光電子効果の影響を受けて、電子も波と粒子の二重性をもつのではないかと考えたのがフランスの公爵ルイ・ド・ブロイである。1923年パリのソルボンヌ大の大学院生であったド・ブロイは粒子が波のように振舞うと言う考えを唱え、1924年に博士論文として纏め上げる。この中でド・ブロイはアインシュタインの式 $E=mc^2$ を $E=(mc)(c)=(P)(f\lambda)$ と変形する。Pは運動量、 λ は波長 ($c=f\lambda$) である。更に、プランクとアインシュタインが現した $E=hf$ と上記式から $hf=(p)(f\lambda)$ が得られ、整理すると $\lambda=h/P$ の式を得る。この式は波の波長 (λ) は粒子の運動量 (P) に反比例することを示しており、物質は全てプランク定数を介して、波と粒子の二重性を持つことを示している。「物質 (粒子) にも波動としての性質が伴う」として、物質粒子の波長としての性質を示したのである。波としての性質が実施に観測されるのは、電子のような極めて微視的な状況下であり、通常の日常生活 (巨視的な状況) でこれが問題となるのは、ごく例外的な状況 (例えば超流動) を除いて無い。実際に電子が波の性質を持つことを金属表面の電子線の回折実験で実証したのは後の1927年に J.J. トムソンの一人息子の G.P. トムソンと C.J. デビッソンの2人である。2人はイギリスとアメリカで別々の方法でほぼ同時

に発見している。トムソン親子は父親が電子の粒子性を発見し、その子供が30年後に波の性質を発見したことになる。

ド・ブロイは電子の波をパイロット波と呼ぶが、後にド・ブロイ波、または物質波と呼ばれることになる。また、電子が原子核の周りを周回している時は、電子の粒子に付随した波は定在波であり、波長 λ の n 倍が電子軌道の円周 $2\pi r$ と等しくなる特定の波だけが適合していることを提唱する。原子の周囲に沿って電子の波をちょうど1周するようにし、余ったり、足りたりしないようにしたのである。結局、 $n\lambda=2\pi r$ の定在波であり、ド・ブロイの式 $\lambda=h/P=h/(mv)$ から $n(h/mv)=2\pi r$ が得られ、これを变形し、 $n(h/2\pi)=mvr$ となり、この式はボーアの量子条件と一致する。ボーアの量子条件は電子の波 (定在波) が円周を1周する条件だったのである。これによって、ボーアの量子条件は仮説ではなく、真実となる。

以上が「前期量子論」である。次回は「量子力学の完成と半導体への応用」について触れる。

次回

第4回 半導体の歴史 量子力学の完成と半導体への応用