

半導体の歴史

— その3 20世紀前半
量子力学の確立と半導体への応用へ —

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

■ 量子力学の完成

前稿で記載した前期量子論によって、20世紀初頭に漸く原子像が現実のものとして認識され、原子は原子核とその周りを、規則性を持って周回する電子によって構成されていることが解明された。前期量子論は1900年のプランクによる「量子」の発見から1924年のド・ブロイの「物質波」、または1925年のパウリの「排他律」の発表までの凡そ26年間である。この26年間は19世紀の科学の発展が原動力となり、世界的な経済のグローバル化が進んだ時期でもある。それによって、各国間の利害関係も複雑になり、国と国、または多国間の戦争が激しくなり、そして、遂には世界大戦へと向かってゆく時期でもある。

アジアでは1900年の義和団事件をきっかけに、中国が日本を含めた各国の植民地政策にはめ込まれて行く。また、1900年は日本の明治33年になる。2年後の1902年になるとロシアの南下政策が激しくなり、当時、日本の統治下にあった朝鮮半島にも触手を伸ばし、緊迫した状況となり、利害を共通とするイギリスとロシアを仮想敵国として日英同盟を結んでいる。更に2年後の明治34年に日露戦争が勃発する。戦局が激しくなった翌年には、バルチック艦隊が日本列島を目指してアフリカの希望岬、インド洋を経て北上して来る。バルチック艦隊を最初に発見した信濃丸が「敵艦見ゆ」の無線電信を発進したのが、日本で戦争に使用した初めての無線通信になる。先に述べたマルコーニが無線通信で太平洋横断した5年後であり、日本の明治維新以降の急速な近代化がこの辺にも窺える。この年に日本軍がバルチック艦隊を破り、旅順要塞を陥落、奉天会戦で勝利し、日露戦争に勝利する。明治維新から35年、1853年にペリーが浦賀沖に来航してから52年後の事である。この勝利によっ

て、日本は世界の列強国と肩を並べることになる。このような時代に量子力学が産声をあげたのである。そして、この年、1905年にアインシュタインが光量子仮説、特殊相対性理論を発表し、デビューする。

これ以降も各国は帝国主義路線を突き進む。19世紀まで強国であったトルコが、産業革命で力を付けた欧州各国に比べて相対的に弱小国になった事が露呈すると列強国に標的とされる。まずはトルコ領であったバルカン半島がロシアなどから干渉を受け小国に分割される。セルビアなどの分割によって生まれた小国同士が連合、または敵対し、1912年の第一次バルカン戦争、1913年の第二次バルカン戦争に至る。バルカン半島が世界の火薬庫となったのである。ドイツやオーストラリアなどがこのトルコ領を目指し、遂には1914年にセルビア成年のオーストリア皇太子暗殺をきっかけとして第一次世界大戦が勃発する。1919年までの5年間、欧州は戦争の渦の中となったのである。ボーアの原子模型が発表されたのは、この前年の1913年のことであり、ゾンマーフェルトがこれに修正を加え、ゾンマーフェルト模型を発表したのは戦争中の1915年のことである。1917年にこの戦争にアメリカが参戦する。1917年4月にウイルソン大統領は対ドイツに宣戦布告し大量の兵員と物資を送り、ここで連合側側の優位が決定する。また、この年の11月に20世紀半ばに巨大な力を持つことになるソビエト連邦社会主義共和国（ソ連）が成立している。戦前、世界一の債務国であったアメリカは、この戦争を境に最大の債権国になり、戦後、世界の指導者として決定的な足がかりをつくる。戦後のアメリカでは車などの大量生産方式が確立され、大量消費社会へと変貌してゆく。日本では第二次世界大戦後の1950年代以降に漸く、一般家庭に車や冷蔵庫、洗濯機などが普及するが、アメリカでは第一次世界大戦後の1920年代にこれらの自動車や電化製品などが普及している。量子力学などの科学の発展が次第にヨーロッパからアメリカに舞台を移してゆく背景がここにある。豊かな国で科学や芸術などの文化が開いて行くのである。本格的にアメリカが科学発展の中心になるのは1940年前後からである。第一次、第二次と、二度の世界大戦の主戦場がヨーロッパであり、アメリカが無傷であったことや、ヨーロッパで起きたユダヤ人への迫害が拍車をかけ、アインシュタイン

らの優秀な科学者がアメリカに渡ったことも影響している。

前期量子論に戻ると、ボーア・ゾンマーフェルト理論は1918年ころまで内容がはっきりし、原子の問題について相当な成功を収める。実験から得られる分光学のデータに基づいてエネルギー準位を量子数で整理してゆき、クロスワード・パズルを解くようにして種々の規則性を見つけ出してゆくには有効であった。1890年にロシア人ディミトリ・メンデレーフが発明した元素の周期表を説明するのに有効であり、1921年にボーアは周期表を原子核まわりの電子の配列で説明し、ボーアの周期表を報告している。ボーアが原子の研究を始めたのは、この周期表に関心があったためであった。この周期表は今でも使用されており、物理学の理論が化学の理解の基礎となった一例である。

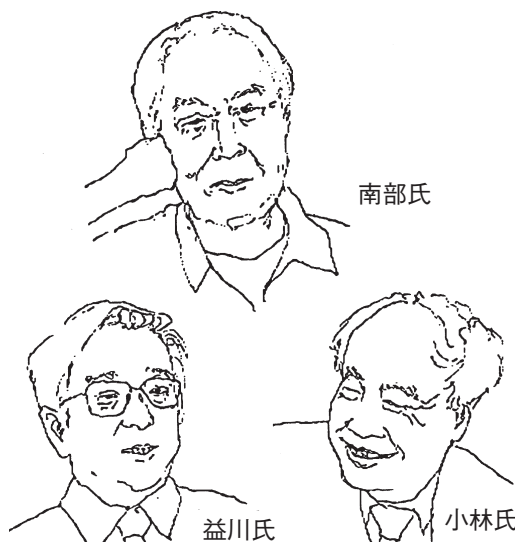
しかしながら、この理論は厳密なものではなく、量子条件から正確にエネルギー準位を求めることに限界があることや、電子間のクーロン力が考慮されていないことからヘリウムやもっと複雑な原子の場合のように、電子が2個以上ある場合には、定常状態をきめるのに量子条件をどのように適用すればよいのかわからないなどの欠点があった。また、とびとびの定常状態の存在とその間の遷移は一般性をもつものであったが、これだけでは定常状態そのものを理論的に定め得ないので、この点を補うために古典的な軌道運動の描像に基づいた量子条件を授用せざるをえず、角運動などの古典力学と量子条件をミックスした、いわば古典論というゴシック建築の土台の上に立ったバロック風の塔のようなもの(物理学者マックス・ボルンのことば)であった。

この様な事情から、1920年代になると実際の原子の中で電子が軌道運動している描像が正しいかが問われたのである。この描像の解体のきっかけとなったのが光の散乱である。この理論は原子における光の放出、吸収を主たる対象として進められてきた。しかしながら、光と電子の相互作用の過程としては、その他に光の散乱がある。量子論がこれをうまくあつかうことができるか否かは試金石的な問題となる。この散乱の問題のあつかいが、原子内電子についてのボーア流の軌道運動描像を解体にみちびく契機となるのである。外部から原子に光を照射した時、光の周波数が小さい時は最外殻の電子への衝突し、光は散乱する。周波数を大きくしてゆくと散乱が増大してゆき、ある周波数で散乱が最大になる。いわゆる共鳴である。この共鳴に至る周波数が軌道運動している定常状態の周波数ではなく、ある定常状態から別の定常状態への遷移状態の周波数に一致したのである。もし、ボーアモデルの定常状態、遷移状態という考え方が正しい描像であれば、共鳴する周波数は定常状態の周波数と一致すべきなのである。これらの点からボーア流軌道運動、つまり、原子の周りを電子が量子化された軌道を回転しているモデルが崩壊しつつあった。この

状況を打破したのは3人の若者であった。これから記載する量子力学の仕上げの舞台は1925年、1926年のヨーロッパである。

1920年にミュンヘン大学でゾンマーフェルト教授の学生となり、登山とピアノ演奏が好きなドイツ人ウエルナー・ハイゼンベルク(1925年で24才)、社交的で名うてのプレイボーイのスイス人エルヴィン・シュレーディンガー(同年37才)、冷静で常に単独で研究する修道士の様なイギリス人ポール・ディラック(同年23才)らの3人の天才物理化学者が主役となる。1925年6月から1926年6月までの12ヶ月間に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、ディラックの量子代数が報告されることで、量子論が原子からの発光スペクトルを説明するための現象論から「量子力学」へと昇華してゆく。

.....



2008年度ノーベル物理学賞受賞の三氏

.....

本年の10月7日、スウェーデン王立科学アカデミーはノーベル物理学賞に南部陽一郎氏、小林誠氏、益川敏英氏の3人を選出したことを発表した。受賞理由は、南部陽一郎氏が「自発的対称性の破れ」などの理論的解明に対してであり、小林氏と益川氏は「CP (charge and parity) 対称性の破れ」を理論的に解明した「小林-益川理論」に対してで、いずれも素粒子物理学の基礎理論である。ハイゼンベルク、シュレーディンガー、ディラックらが確立した量子力学が、この素粒子物理学を生み出してゆくことになる。特に、3氏が受賞した「対称性のやぶれ」理論の元になる「対称性」を理論的に発見したのがディラックである。ディラックが相対性理論と量子力学の統一理論を形成することで「粒子」に対する「反粒子」、具体的には負の電荷を持つ電子に対し

て正の電荷を持つ陽電子の存在を予測し、世界が物質と半物質（質量とスピンは同じであるが、電荷が正反対になっている物質）との対称性からなることを1930年に提唱したのである。陽電子が1932年にカリフォルニア工科大のカール・アンダーソンが発見し、その1年後にディラックはシュレーディンガーとともに量子力学に関する研究でノーベル賞を受賞している。

3氏の理論はこのディラックの対称性が自然界では破れていることを示したものである。約140億年前におきた宇宙の始まりのビッグバン（大爆発）で対称性が破れていることを示している。もし、対象性が破れていない場合、粒子と反粒子の数が同数となり、お互いが衝突し合って消滅し、星や生命も存在しえない。現実的には100億個に1個の割合で反粒子より粒子が多く存在したことで宇宙が存在する。

南部氏は1961年に超伝導の理論にヒントを得て対称性の自発的破れを提唱した。超伝導のBCS理論では、上向きスピンをもつ電子と下向きスピンをもつ電子がペアを作って金属中を埋めつくす。ペアとしての運動では電気抵抗をゼロにするほどスムーズに動けるが、個別の電子は実効的に大きな質量をもつ。南部氏はこの理論を宇宙に応用することを考え、光速で飛び交う質量0の粒子と反粒子の対が宇宙全体を埋めつくす（宇宙の超伝導状態）が自発的に対称性が破れ、個々の粒子が実効的に大きな質量を得ることを提唱した。スムーズに動けるペアとしての運動は比較的軽いパイ中間子として解釈される。ビッグバン直後を考えると、粒子と反粒子は質量がゼロで、光速で飛び交いながら対称性を保っていたが、宇宙が冷えてくると粒子にブレーキがかかる力が生じ、個々の粒子に動きにくさの違いが発生し、この動きやすさの違いで起こった自発的対称性の破れが質量を生み出したと考えられる。ちなみに、南部氏が応用した超伝導のBCS理論提唱者の1人は点接触トランジスターを発明した一人のバーディーンである。バーディーンはこの理論でトランジスター発明に続き2個目のノーベル物理学賞を受賞している。南部氏の提唱した理論を元に、イギリスのヒッグス氏がヒッグス粒子の存在を予測し、質量の要因は南部理論が98%、残りの2%がヒッグス粒子とされている。

小林、益川両氏の理論は物質を構成する最も基本的な粒子はクォークであるが、理論以前は3種類存在が確認され、もう1種類あることが予測されていたのに対して、クォークはその倍の6種類あり、それらを複雑に組み合わせることで対称性が破れることを1973年に提唱したものである。理論の正しさは、その後クォークが6種類とも確認されたことで実証されている。今回の受賞で日本におけるノーベル物理学賞受賞者は8名になる。最初に受賞したのは1949年、湯川秀樹氏であり、1934年、中間子理論構想を発表、1935年、「素粒子の相互作用について」を発表し、中間子の存在

を予言し、この研究が評価されたものである。この種の研究にはペンと紙があれば、幾らでも発想ができるために、第二次世界大戦前後の貧しい日本でも活躍ができたのであろうが、つい半世紀前までは鎖国の中にあつた中から、これだけのノーベル物理学賞の受賞者が輩出する研究がなされたことは驚くに値することである。江戸時代までの教育や日本と言う島国で育まれた国民気質にも原因があるのではないだろうか。時代をさかのぼってみると、室町時代から安土桃山時代間の戦国時代に種子島に伝わった火縄銃が、時を得ずして、自分たちの手づくり始めてしまったような、新しいものに対する探究心と技を持ち合わせていた国民なのである。明治維新前後の急激な文明化や第二次世界大戦後の驚異的な復活もこのような国民気質が成せた技かも知れない。

III ニールス・ボーアは人を育てる

1913年に発表され、1918年までに形成されたボーア・ゾンマーフェルトの原子模型の理論に出会い、大きな感動を得た若者2人がハイゼンベルクとディラックである。彼らはそれぞれ、1920年から1922年頃の20才前後で、ハイゼンベルクはミュンヘン大学、ディラックはケンブリッジ大学の学生の時にこの論文に出会ったのである。

まずはハイゼンベルクである。この項は青木薫訳、W. ハイゼンベルク他著「物理学に生きて」のハイゼンベルクの講和を出来る限り忠実に引用させて頂くことで、ニールス・ボーアの人間性を掴んで戴ければと思う。1922年ハイゼンベルクは若干21才の時に初めてボーアに会う。ボーアが37才でドイツのゲッティンゲンにて自分の理論を講義した時である。その頃ちょうど、ハイゼンベルクはボーアの元素の周期表に関する論文を勉強し、論文の中で10個、20個あるいは30個もの電子がそれぞれ別の軌道を回っていると言う非常に複雑な構造をボーアが示しているが、どの様に計算して出したものか理解できずにいた。ハイゼンベルクはゾンマーヘルトに勧められてこの講義に出席し、講義の後に、ボーアが黒板に書いた計算式は、はたして厳密なのかと批判めいた質問をする。ボーアはとても好意的で、まだ年若いハイゼンベルクをゲッティンゲン郊外のハインベルクを歩きながらそれについて議論しないかと誘う。ハイゼンベルクにとってボーアとのその日の午後の3時間かけた散歩の会話が科学者としての生涯に深い影響力を持つようになる。ハイゼンベルクは後年、この時のボーアとの語りから科学者人生が始まったと述べている。ハイゼンベルクはそれまでは、ゾンマーヘルトの研究室では、全ての現象は、とにかく計算をして結果を出すべきであり、厳密な計算をすることによってのみ良い結果が得られるのは当たり前と考えられており、それを信じていた。ところがボーアは複雑な元素周期律の論文の中で何ひとつ計算を行なっ

ていなかったのである。ボーアは化学の実験状況に通じているとともにさまざまな元素の原子価を知っており、彼自身のアイデアである「原子の安定性は、量子化に関係する現象によって説明されるはずだ」と言う考え方によって、ともかくも化学の実験がうまく説明できることを知っていた。形式的なことより、むしろ関係性を直感的に見抜くことができたのである。それらの知識に立脚して元素の周期律を考えていたのである。ハイゼンベルクはボーアに「古典力学にもとづく計算をすれば、本当にこれらの結果を導くことができるとお考えなのでしょうか」と訊ねる。これに対して、ボーアは「私が原子像を描き出すために使った古典的描像は、古典的描像としては悪くないと思いますよ」と答え、その説明として「私たちは今、物理学の新しい領域にいますが、そこでは古い概念は使えそうもないことが判っています。さもなければ原子は安定でいられないからです。しかしその一方で、原子を語るためには言葉が必要ですが、その言葉は古い概念から、古い用語体系から借りてくるしかありません。そのため私たちは絶望的なジレンマに陥っており、ちょうど遠い国を訪れた船乗りのようなものです。船乗りはその国のことを知らず、人々の使う言葉は聞いたこともなく、どうやって意思疎通を図ったものかわかりません。そんなわけですから、古典的な概念が使える限りにおいては、つまり電子の運動の速度やエネルギーなどについて語りうる限りにおいては、私の描像は正しいと思いますし、少なくとも正しくあって欲しいと私は願っています。しかし、そんな言葉がどこまで通用するかは誰にもわからないのです」。これらの会話の中で、ハイゼンベルクは量子論の発見者のひとりであるボーアが量子論の難点について深く悩んでいることに気づくとともに、それまで計算至上主義であったハイゼンベルクにとって、とても新鮮な考え方に見え、物理学に対するそれまでの考え方を変えてしまう。

一方、散歩から帰ったボーアは友人にこう話した。「ハイゼンベルクはすべてを理解している。今や答えは彼の手中にある。必ずや量子論の困難を解決する道を探し出すに違いない」。明らかにボーアはハイゼンベルクが希有な才能をもった物理学者であることに気づいていた。そして、才能を持っていることを見抜きながら、量子論の発展をめざして、才能を伸ばし育てようとしたのである。このようなニールス・ボーアの薫陶を受けた若い物理学者は、ハイゼンベルクの他、パウリを始め数多くいる。

年はボーアより2才しか若くないシュレーディンガーもその一人である。シュレーディンガーについては、ハイゼンベルクの行列力学と同年に波動力学を発表した物理学者である。彼は波動力学を提案したものの、彼自身がその式が示す本質の意味を理解できない時期があった。かれの波動方程式はド・ブロイが提案した波動方程式に工夫をかさねてできあがったものであるが、シュレーディンガー自

身が「量子」そのものを理解できなかったのである。しかしながら、彼の波動方程式そのものは物理学そのものを変えるほどの重要な式であったのである。1926年の夏にゾンマーヘルトに依頼されシュレーディンガーが講演を行った時、その講演を聴いていたハイゼンベルクは質疑応答に参加して「そんな解釈をしていたのでは、プランクの法則すら理解できないと思います」と意見を述べる。その場にヴィルヘルム・ヴィーンと言う実験物理学者が「なるほど、お若い方、君は量子力学やら量子飛躍やらが、いまやすっかり忘れ去られる運命になったのが残念なのだと言う訳だね。しかし見ていたまえ、シュレーディンガーがじきにすべての問題を解決してくれるだろうから」。当時、一般的には、プランクやボーアの理論は良い理論だとは見なされず、多くの物理学者が嫌っていたのである。ハイゼンベルクは自分ではヴィーンやシュレーディンガーを説得するには若すぎ、ボーアにこの事を話す。ボーアはその年の9月にシュレーディンガーをコペンハーゲンの自宅に招き、シュレーディンガーに終始付きっきりで、「だがねシュレーディンガー、君はぜひとも理解しなくてはならないよ。そう、理解しなければね」と言い続ける。さすがに二日目にはシュレーディンガーは具合が悪くなり、床につき、ボーア婦人がケーキやお茶を運んでくるのだが、ベッドの傍らにはいつもボーアが腰を下ろして「しかしシュレーディンガー、君は理解しなくてはならないよ」と言い続けたのである。この事があってからシュレーディンガーも、量子力学の解釈問題が、思っていたほど容易ではないということだけは理解したようである。この様にボーアは思い込んだら歯止めが利かなくなることもあったが、どこから見ても親切で温厚な、非常に立派な人であり、多くの物理学者に懇切丁寧に接し、気長に接しながら教育してゆくことで、量子論を議論できる場を形成していった。

III 行列力学

ハイゼンベルクは1922年のボーアとの散歩での会話から、あらゆる古典的概念から手を引くべきであり、ボーアが作り上げてきた電子の軌道と言うものを語ってはならないと言う印象を受ける。彼は、物理の理論は観測される量に密接に関係している量にだけ集中すべきであり、観測できることはボーアの軌道と間接にしか関係していないため、電子軌道は重要でないと考えたのである。また、1920年から、先に述べた光の分散（散乱）解析が活発におこなわれるようになっていた。1921年には物理学者ラーデンプルグが、1924年にはさらにオランダ人物理学者のクラマースが改良した光の分散（散乱）公式を提案し、それらの中では電子の軌道を扱うことは完全に取り除かれ、原子を調和振動子の束のようにみるボーア以前の原子描像が用いられるようになる。1925年1月にはクラマースとハイゼンベルクが分



ウエルナー・ハイゼンベルク
(晩年)

散公式をさらに進化させ、この年にハイゼンベルクが発表する量子力学的な公式へと近づいてゆく。そこではすでに電子軌道はすてられており、遷移振幅の集まりを問題にしており、行列の掛け算に相当するものが登場してくる。

1925年春、ハイゼンベルクはコペンハーゲンを後にして、マックス・ボルンが若干24才のために私講師を用意してくれたゲティンゲンへの戻ってゆく。ドイツでの

ハインベルクは花粉症と電子軌道に悩まされる。花粉症の症状がひどく悪化したハイゼンベルクは花粉のない所を求めて北海のヘルゴラント島に行く。ここで行列力学の基礎を築くことになる。ハイゼンベルクは1日を量子力学を考える時間、ロッククライミングする時間、そしてゲーテの詩を朗読する時間の3つに分けて過ごす。実験によって求められた光スペクトルの周波数と強度(明るさ)を原子中の量子数とエネルギー状態に結びつけるための暗号を探したのである。ハイゼンベルクは1つのボーア軌道を捨て、2つの軌道を取り扱う。2つの軌道間を遷移する電子の状態を種々の物理変数、例えば電子の座標、速度、運動量などを扱ったのである。2つの軌道間の、これらの量の組み合わせを取り扱う場合、量の組み合わせを図1のような行と列の組み合わせで扱うのが自然である。このような組み合わせを行列という。ハイゼンベルクは観測される量だけで理論を建設すべきであり、観測される量はこれらの行列要素であって、各々の要素が2つの軌道に関係すると考えたのである。

行列を取り扱うときには行列の足し算、掛け算の計算規則があり、その際、重要な新しい特徴が出てくる。aにb

を掛けてabをつくると、大抵はbにaを掛けた結果であるbaとは異なってくるのである。行列の掛け算には逃れがたい規則があり、その結果としてabとbaが異なってくる。力学変数を行列で表すとすると、abとbaとが異なる計算規則を満たすことになる。ab=baが成り立つことを可換(交換が可能)と呼び、ab=baが成り立たないことを非可換(交換できない)と言う。

最初に自分の行列が可換な掛け算を満足しないと気づいた時、理論がその為にだめになると思い、非常に動揺する。ハイゼンベルクが動揺したのはもっともなことであり、古来、ab=baが成り立たない力学変数があるとは考えられなかったのである。ところが、この非可換性がハイゼンベルクの理論の最も重要なポイントとなる。ハイゼンベルクは力学変数として運動量(p)と平衡点からの変位量(x)の組み合わせで非可換性を考え、最終的にはボーアと同様に量子化説を持ち込むことになる。px-xpはゼロではなく、iħ(ここでħはh/2πで、iは虚数で-1の平方根)であることを発見したのである。

ハイゼンベルクは6月19日にゲティンゲンに戻り、親友であり貴重な批評家でもあるパウリにこの結果を送った。パウリの反応は好意的なものであることを確認すると、マックス・ボルンに論文を見せる。マックス・ボルンはこの論文を見て夢中になり、昼夜を問わず奇妙な掛け算の法則について考え、7月10日の朝、ハイゼンベルクの奇妙な掛け算は行列計算以外の何者でもないことに気づく。行列要素の専門家だった才能ある学生のパスカル・ヨルダンと研究しながら系統立った行列の言葉に翻訳していったことで行列力学が完成していった。これによって、発光スペクトルの周波数は図2(a)に示すような無限の行列になる。ハイゼンベルクの考えでは運動量p(t)と変位量x(t)をもつ個々の振動子がそれぞれの周波数で振動するため、図2(b)(c)のように無限行列となる。この新しい理論は計算するのも難しければ、電子状態を視覚化できるわけでもないが、エネルギー準位などを正確に計算できるのである。

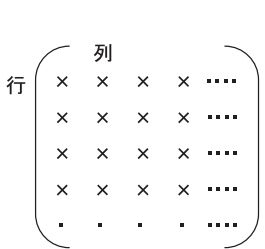


図1 行列式

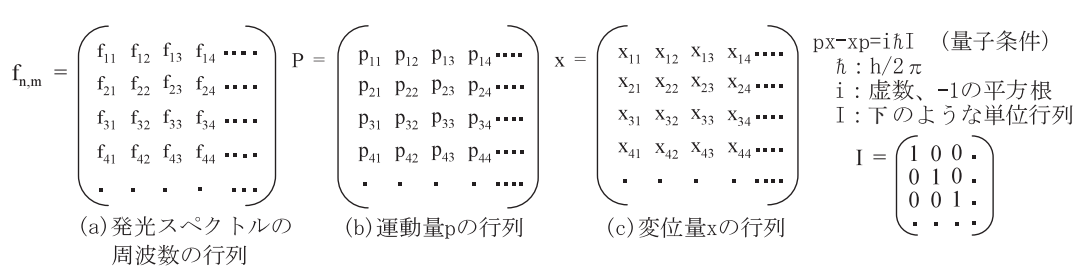


図2 無限行列と量子条件

波動力学



エルヴィン・シュレーディンガー

一方、シュレーディンガーの波動力学は、ハイゼンベルクとは独立に研究し、彼自身の、別の形の量子力学をつくったものである。この理論はド・ブロイの研究に基づいている。ド・ブロイは、先に述べたように「物質波」と言う概念を導入し粒子と波の二重性を示したが、その関数は、普通、 ψ （プサイと呼ぶ）で表され、1個の粒子の場合、 ψ は粒子の3個の座標（ x_1, x_2, x_3 ）と時間 t との関数 $\psi(x_1, x_2, x_3, t)$ になる。ド・ブロイは ψ で表される波に適用される方程式をつくる。この波動方程式は、仮に一定の方向に一定の振動数で進行する平面波をとると、その平面波が一定の運動量とエネルギーを持つ粒子に対応する、と言うようなものである。

このド・ブロイの理論は力の働かない粒子にしか適用されないが、シュレーディンガーはそれを一般化して、電磁場の中で電磁的な力を受けて運動する電子に適用することができるようにする。それが1925年12月に示した図3に示すシュレーディンガーの波動方程式である。シュレーディンガーは名うてのプレイボーイで、物理学の研究に対しても、当面の恋愛の興味から刺激を受けることが多く、この理論も1925年のクリスマス休暇中にスイスのアローザにあるお気に入りのロマンティックなホテルで情熱的な密会中に考えついたものであった。この密会の中で彼は波について考え、生涯最も重要な発見をしたのである。この理論は、最初ハイゼンベルクの行列力学とは全く異なるものと思われていたが、発表された2~3ヵ月後には、形は違えど全く等価な理論であることがシュレーディンガーによって示される。 ψ 自体は当初のハイゼンベルクの理論には出てこなかったが、シュレーディンガーの研究で量子力学に導入された。波動関数は、ある1つの状態、おそらくボーアの定常状態に対応する。1つの波動関数から別の波動関数に

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

位置xについての2階微分
エネルギー
位置エネルギー
位置
シュレーディンガーの波動関数

図3 シュレーディンガーの波動方程式

変換（遷移）するとき、2つの状態を結びつけるのが演算子であり、シュレーディンガーの理論では ψ に作用する次のような演算子がある。すなわち、その演算子は運動量演算子 p であり、 x についての偏微分の $(-i\hbar)$ 倍で、 $-i\hbar \partial / \partial x = p$ 、にて表される。この演算子の関係が、ハイゼンベルク理論の $xp - px = i\hbar$ と等価であることが判り、シュレーディンガーの理論とハイゼンベルクの理論の等価性が確認される。

ψ は何を表すのであろうか。どのように解釈すべきかが議論になり、受け入れやすい解釈を提案したのが1926年夏、マックス・ボルンである。その方法とは、波動関数 ψ は状態 n にあった電子が方向 m へと散乱される確率振幅を表し、ある意味で電子自身の強度の波である。そして、 ψ の絶対値の2乗、すなわち、 $|\psi|^2$ は粒子の存在の確率を表すということである。ここで確率という言葉が持ち込まれたことは、量子力学の一般的な解釈が確率とからむことを意味している。この一般的解釈により、電子が一定の時間に一定の場所に存在する確率を計算できるようになるとともに、どの出来事が起こるかを正確に計算できるようになったのである。反対に言えば、新しい力学、量子力学では確率は計算できるが、ニュートン力学のように、ある時間、ある場所に確実に電子が存在すると言った決定性は計算できない。あくまでも確率なのである。そこに存在することは有るけれど無いこともあり、ある確率は何%と言うことを表すのが量子力学である。

ボルンは波動関数を用いて水素原子の電子状態を計算し、図4のように表した。ボーアの電子軌道に比べて、電子の存在確率が原子核の周りに電子雲のように示され、原子模型が大きく進化していることが判る。

量子代数

1925年の夏、ハイゼンベルクはケンブリッジのカピタクラブで行なった講演の後、招待してくれたラルフ・ファウラーに出版前の原稿のコピーを渡す。マックス・ボルンに渡したのもと同じ、新しい先駆的な理論について書いた論文であった。ファウラーは、そのコピーに「これについて君の意見を聞かせてくれ」とコメントをつけて、若い大学院生ポール・ディラックにことづけた。ディラックはその指示に忠実に従った。

44年にわたる物理学者としての生涯の中、ディラックはいつもたった1人で研究をした。この時もハイゼンベルクの論文が重要な新たな出発点となることを1人で見出すことになる。ボルンがヨルダン

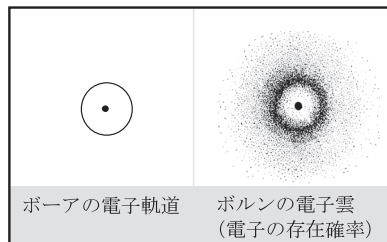


図4 水素原子の基底状態



ポール・ディラック

と研究しながら系統立った行列の言葉に翻訳していったことで行列力学が完成していったことは前に述べた。これと同じ課題を与えられたのである。ディラックは、この問題はニュートンの方程式を変更し、 ab が ba と異なるような計算規則と合致させることと捕らえる。そして、当時から遡り、約100年前の天才数学者ハミルトンの数学手法を用いる。

ハミルトンはニュートン方程式を研究し、それまであったラグランジュの方式とは別の、ハミルトン独自の形式の方程式を立てていた。この方程式が重要なのは、非可換性を持ち込むように方程式を一般化するのが非常にやさしいことである。ハミルトンの形式の方程式は、ある種の括弧（ポアソン括弧）によって書き換えることができる。ポアソン括弧は普通、 $[a, b]$ のように書かれる（括弧の中の式の定義は省略する）。ディラックは日曜日にポアソン括弧を思いつくが、ポアソン括弧の定義が思いだせず、月曜日に図書館が開くのを、今か今かと待ちきれない思いで待つ。そして、このポアソン括弧が次の量に対応する（括弧の中の式の定義の形に非常に似ている）ことが判ったのである。それは $(ab - ba)/(i\hbar)$ であり、 $ab - ba$ を $i\hbar$ で割った量である。ハミルトンの形式の方程式中のポアソン括弧を $[a, b] \rightarrow (ab - ba)/(i\hbar)$ に従って交換関係 $ab - ba$ に置き換えることによって、直ちに古典力学のすべての方式から（ハミルトンの形式で書いた後）掛け算が非可換であるような新しい方程式に移ることができるようになる。その方程式がハイゼンベルクの形式の量子力学に適用される方程式であり、ディラックはボルンらとは全く違う新しい方法（代数）で問題を解くことにより、量子力学を導くことに成功したのである。ディラックはこの変換理論を用いて、ハイゼンベルク、シュレーディンガーのそれぞれの量子力学が自分の理論も含め等価であることを1926年9月に発表する。

ディラックはその後、新たに量子電磁気学を完成させてゆくとともに、シュレーディンガーの波動方式に特殊相対性理論を繰り込むことに成功する。量子電磁気学では量子力学をマックスウェルの電磁理論と整合性を持たせることで場の量子論の知識体系を始めてつくり上げる。それによって光を粒子として取り扱うときは粒子の振る舞いを与え、波として取り扱うときは波の振る舞いを与える、よくできた枠組みを完成させる。また、波動方程式への相対性理論を取り込みにより、ディラック方程式を1928年に完成させるが、この結果、1930年に反物質を予測し、電子の反物質として陽電子の存在を提唱する。この陽電子は、先にも述

べたが1932年に発見されたことで理論が正しかったことが実証され、その後の素粒子論などの礎となる。

神はサイコロを振る？



コペンハーゲン解釈について議論するボーアとアインシュタイン

1927年ハイゼンベルクは行列力学と同じくらい重要な2度目の発見をする。不確定性原理であり、運動量 (p) と位置 (x) の2つを同時に観察する場合、双方の変化量（不確定さ： Δp 、 Δx ）の積はプランク常数 h に等しい、ある一定の値よりもつねに大きい ($\Delta p \cdot \Delta x \geq h$) と言う原理である。同年、ボーアが、波動と粒子の振る舞いは互いに排他的であるが、対象の性質を正確に把握するためには両方が必要となり、この状況を相補性と呼ぶことを提案する。対象が粒子として振る舞うか、波として振る舞うかはそれを見る装置によって決まると言う考え方である。これらは、ボルンの確率解釈と合わせて、量子力学での決定性の放棄である。これらの解釈はボーアを中心としたコペンハーゲンが中心となっていたため、コペンハーゲン解釈と呼ばれた。これらの考え方を嫌ったのがアインシュタインである。彼は、理論は物事それ自身を記述すべきであり、物事を生じる確率を記載すべきではないと考えていた。アインシュタインは「善良なる神はサイコロを振らない」と信じていたのである。観測者が何を見るかで決まると言うことは、秋の夜空を見上げて綺麗な満月が目の前にあったものが、まぶたを閉じて、再び開いた時には、目の前から無くなっていることがあるような理論であり、嫌いだったのである。1927年10月のソルベイ会議で、この問題について戦う事になる。アインシュタインはボーアに「私は確率論が嫌いだし、ボルンとハイゼンベルク、そして君自身がやってきたことは、いわゆる発見的価値しかない一部の間に合わせに過ぎない」と言う。アインシュタインは、その基礎となっている不確定性原理を攻撃することで、コペンハーゲン解釈をつぶしてしまおうとした。卓越した思考実験を駆使し、ハイゼンベルクの原理の矛盾を暴こうとした。しかし、ボーアはそのつどアインシュタインの考えの中に弱点を見いだ

し、逆に論破してしまった。しかし、アインシュタインは諦めたわけではなかった。この論争はアインシュタインが生きている間続いたのである。後年、ディラックは「最終的に正しいのはアインシュタインではないか」と言っており、「現段階でコペンハーゲン解釈が正しいと受け入れられるのは、未だ、量子力学が未完成であるためであり、未来のいつか、量子力学が改善され、アインシュタインの見地が正当化されるだろう。その時は、現在重要だと信じている何らかの理論をすてることになるだろう。」と言っている。

量子力学の半導体への応用

1926年までに、決定性は持たないものの、量子力学は原子の中の電子状態を記述できる学問として完成する。原子の周りでの電子の存在確率やエネルギー準位を算出できる学問としての基礎ができあがったのである。この量子力学を半導体などに応用してゆくことが、1927年以降、始まる。1926年までの量子力学は単原子に対するものである。実際の半導体を工業的に応用するためにはシリコンなどの結晶中の多原子内での電子の挙動を掴む必要がある。結晶内部での電子のエネルギー準位や存在確率分布、結晶中での動き易さなどを把握する必要がある。また、半導体デバイスは単なる半導体から構成されているものではなく、半導体の他、一個一個の半導体素子を分離する絶縁体、素子間を電気的に接続する導体(金属)の3つから構成されている。絶縁体、半導体、導体の性質や半導体内部の電子、正孔の挙動などを求めることは、すでに量子力学を手にした1930年代には容易なものとなり、半導体物理学として体系化されてくる。

1928年にアメリカのフェリックス・ブロッホがエネルギーバンドと金属の電気伝導の理論を出したのをきっかけに、1930年にドイツのバイエルス、フランスのブリルアンらもバンド理論を発表、そして1931年にイギリスのハロルド・A・ウイソンが量子力学による半導体のウイソン模型、ドイツのワグナーが半導体の電気伝導理論(ワグナーの拡散理論)、同じくドイツのウォルター・ショットキーがショットキー効果理論の半導体金属接触への拡張、1932年にはソビエト連邦のタムが表面準位の存在を指摘、そして再び、ウイソンが整流器の整流作用のトンネル効果による説明、1934年にはイギリスのツェナーが内部高電界放出効果(ツェナー効果)の提唱、1938年には再度ショットキーがショットキーバリア(空乏層)の概念の発表、同年にソビエト連邦のダビドフがPN接合理論の原型となるCu₂O整流器のダビドフのpn整流モデル、そして、1939年にはトランジスター発明の立役者の1人であるショックレーが表面準位の理論的考察、同年イギリスのモットと先のショットキーがそれぞれ拡散整流理論の提唱などと量子力学を基

にした半導体物理が1939年に勃発する第二次世界大戦に入る前に形成されて行くのである。そして、これらの理論に後押しされるように鉱石検波器などを中心に、特に1930年代後半から半導体デバイスの研究開発、工業化が進められてゆく。特に鉱石検波器のための半導体が活発に研究されてゆくが、これは前稿で記載したように戦争に用いるレーダーの受信機の性能を向上させることを目的としていたことが一因となっている。また、戦後になってくると研究の舞台が次第にヨーロッパからアメリカに移る。特に、後にトランジスターを発明するベル研究所のグループが主役となってくる。1946年のトランジスター発明の1人であるアメリカのブラッテンがp型結晶-n型結晶の接触による整流現象の実験の報告をしたのをはじめに、メイヤーホッフが接触電位差と仕事関数差の不一致を実証し表面の重要性を強調、ベンツァーが半導体表面における表面層概念の提唱、1947年にもう1人のトランジスター発明者であるバーディーンが金属~半導体整流理論に表面準位の仮説を提唱、ブラッテン、ショックレーが表面準位の検証と密度の推定とアメリカからの報告が続き、同年にポーランドのソスノウスキーがPbSの実験結果の証明にpn接合の概念を導入した理論発表し、再びアメリカのベンツァーがGeのpn接合を用いてソスノウスキーの予言を確認、1948年にショックレーとピアソンが表面準位の実験的検証とFETの先駆的実験と続き、そして遂にブラッテンとバーディーンによる点接触型トランジスター作用の発見、ショックレーの接合型トランジスターの特許出願へとつながってゆく。量子力学が完成してから22年後、量子力学による半導体のウイソン模型が提唱されてから17年目に半導体産業の主役となるトランジスターが生み出されている。

今回は1930年代における半導体物理の成り立ちなどを中心にトランジスター発明までを「半導体デバイスの夜明け」と題して話題を進めてゆきたい。

参考資料

1. 高林武彦著「量子論の発展史」
2. 治部眞里史訳、J.P. マッケボイ、オスカー・サラータ著「量子論入門」
3. 青木薫訳、W. ハイゼンベルク他著「物理学に生きて」
4. 岡村浩訳、P.A.M. ディラック著「ディラック現代物理学講義」
5. 城坂俊吉著『エレクトロニクスを中心とした年代別科学技術史—第2版—』

次回

第5回 半導体の歴史 —その4 半導体デバイスの夜明け