

# 神様の世界をのぞき見る——みんなの量子論

大阪大学名誉教授 都 福仁

## 1. 自然科学の曙

現在はどここの家にも電気があり、夜は明るく、電気冷蔵庫やテレビがあります。皆さんの周りには多くの電気製品があり、生活が便利になっています。電気の利用が古代の生活と大きく違うところです。電気製品は技術の発達したお蔭です。2000年の古代ローマ時代どころか旧石器時代の終わりごろの2万年前の人たちの思考能力は現代人と変わらないことが知られています。違いは時代時代の工業技術です。石器を使い始めた人間の歴史は100万年以上ありますが、旧石器時代の終わりごろまでは他の動物とそれほど変わらない生活をしていました。当時の人達は自然を敬い、そこには神が住み、高い山や深い森には恐れ多いものとして近づくことはありませんでした。

人間が牛や馬を家畜として飼うようになって農業が始まったのは1万年ぐらい前からです。農作物の保存により、食べることを心配しなくなって生活に余裕ができ、少しずつ技術が進歩してきたのですが、工業技術として急速な進歩が始まったのは300年ぐらい前からです。100万年以上の人類の歴史からみると、最近の科学・技術の進歩は一瞬の出来事です。最近の携帯電話などの進歩をみても解るように、これから工業技術の進歩はますます速くなるのではないのでしょうか。

工業技術が進歩するには科学の進歩が必要であり、科学の進歩には工業技術の進歩が必要です。両者は車の両輪のような関係にあります。新しい科学が発展すると人々の生活が一変するような変化が起こります。その例が新幹線であったり、ジェット飛行機、さらには携帯電話やコンピューターの利用です。これは何をすることもスピードが速くなったということです。スピードの速い新幹線やジェット飛行機、さらに身近な自動車を制御しているのは見えないところに組み込まれた多くのコンピューターの働きです。20数年前まではヨーロッパやアメリカなどの外国に書類を送るのは郵便で10日ほどかかりましたが、今はインターネットの利用で瞬時に送れます。

このような便利な社会になったのは、電気の利用です。世の中が明るくなり神様は広大な宇宙の彼方に旅立たれ、私たちの日々の生活から遠くなったように思います。

科学の世界に目を向けると16世紀から17世紀にかけてヨーロッパで近代的科学の成立の動きが生じ、古代ギリシャ（タレス、紀元前6世紀ごろ）に端を発する自然哲学（自然科学諸分野の包括的な根本原理の考察）から、より専門性を持った自然科学が分離し、19世紀には大学等で科学教育をする専門的な職業的研究者が現れました。しかし、現在でも自然科学の成果に対して哲学的考察（自然哲学）が行われていることは勿論です。

16世紀には天文学だけでなく振り子の法則や物体の落下の法則などを研究したガリレオやそれに続く火星の軌道観測を詳細に調べ火星の軌道運動の三つの法則を発見したケプラー（1571年誕生）の研究がありました。17世紀にはガリレオが亡くなった1642年生まれのニュートンは古代ギリシャの哲学者アリストテレスの言葉をもじって「プラトンもアリ

ストテレスもわが友なれど、真実こそは、より大いなる友なり」と言い自然界の法則を明らかにする自然研究のあるべき姿を述べています。この時代ニュートンはデカルトの影響を受け微分積分の概念も確立しています。ニュートンの前のケプラーの時代は「神様を利用した混沌と調和」の時代から科学が抜け出そうとしていた時代です。ドイツの南部にある小さな村（Weil der Stadt）に住むケプラーの母親は魔女狩りで処刑されていますが（僅か 200 家族中 38 名が 1615 年からの 14 年間に魔女として処刑された）、そんな中、ケプラーは惑星の軌道運動の 3 法則をデンマークの大領主（“ハムレット “の城の近くの城主）であったチコ・ブラーエの正確で継続的な、つまり近代科学的な手法による火星の観測データから導き出しています。一方では、16 世紀に活躍したチコもケプラーも錬金術や占星術にも熱中しており片足を過去の世界に突っ込んだ過去と近代科学の分水嶺の時代に生きた人達です。

## 2. 巨視の世界から量子の世界へ

ニュートン力学の完成（プリンキピア 1687 年出版）の後、1831 年にエディンバラで生まれたマックスウェルによって電磁気学が確立し、19 世紀に近代物理学は完成したかにみえました。

しかし、一方では物質についての科学、特にイギリスのドルトン（1766~1844 年）による化学的な手法により基本的な粒子、すなわち原子についての研究が進展中でした。20 世紀に登場する物質科学の革命的進化の前兆が進んでいたのです。19 世紀イギリスでは原子論が受け入れられたのに対して、ドイツでは観測されていなかった粒子を扱う理論（特に熱統計理論など）に対する抵抗が非常に大きい状況で激しい哲学的論争がありました。

20 世紀になるや否や、そのドイツで、いやドイツ語圏の人達が爆発的な勢いで量子論形成に最も貢献したのは不思議なことですが、第一次世界大戦の敗戦後の混乱期に若者の鬱積した気分の吐け口の一つになったのかもしれない。

ここで電気の正体と電気を広く応用した技術を可能にした科学について考えてみましょう。この科学が、あまり知られていませんが、量子論（量子力学）で、最近 100 年ほどの間に発達した科学です。量子論は半導体や磁石の基礎になる科学というだけでなく、宇宙の物質を支配する法則を研究する科学（素粒子物理学）でもあるのです。

今はどこの家庭にも変圧機から 100 ボルトの電圧の電気が電線を通してきています。冷蔵庫やテレビに電気が流れて冷蔵庫が冷え、テレビに画像が映ります。この時に流れる電気は銅線の中を電子という粒子が沢山流れているのです。電気製品は電子の働きで動いているのです。電子は重さがあり、電気を運ぶマイナスの電荷を持った粒子です。これ以上細かく分けられない粒子を素粒子と言い、電子は素粒子の一つです。電気が電子の流れであると分かったのは意外に新しく 1897 年のことです。イギリスのケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所のトムソン教授による真空放電の実験によって電子が発見されました（この実験が可能になったのは真空ポンプが発達したお蔭です）。原子が電子と陽子を含

む原子核から出来ていることが分かったのはその後で、トムソンの後任の教授になったニュージーランド生まれのラザフォード博士によって1911年に発見されました。更に原子核が陽子と中性子でできていると分かったのは1932年の中性子の発見によってです。このころ量子論が発展段階にあったわけです。ラザフォードの研究により原子は太陽の周りを惑星が回っている太陽系のように原子核の周りを電子が回っているというモデルが確立しました。このモデルは初代阪大の総長（学長）である長岡半太郎博士（土星型モデル）が提唱しました。デンマークのボーア博士が水素原子などで観測される光スペクトルを長岡のモデルが正しいとして考察すると電子が離散的な電子軌道、すなわち軌道半径がとびとびの値しかとりえないことを見出し、軌道運動に対する量子条件を提唱しました（注1）。

しかし、ボーア博士の軌道運動量の量子化は、長岡モデルを正しいと仮定した時に実験事実を説明するための単なる手段であり、長岡モデルの正当性が証明されたわけではありません。電荷を持つ電子が円運動をすると光（電磁波）を出します（現在姫路にある放射光の施設は電子を光速近くまで加速して円運動した時に出る光を利用した施設です）。また、電子が光を出すとエネルギーを放出して運動が遅くなり原子核に引き付けられて衝突するはずですが、現実には原子は安定に存在しています。この不思議な現象を解決したのがドイツのハイゼンベルグやオーストリアのシュレディンガー等による量子論なのですが、ラザフォード博士はアインシュタイン博士同様、粒子として位置を正確に決められない確率論的な量子論を信用しなかったようです。

普通皆さんの周辺にあるもの、例えば水は酸素と水素の原子が結びついて出来ているように、あらゆる物質は分子や原子が集まって出来ています。分子や原子も粒子ですが、さらに細かく分けることができます。これ以上細かく分けられない粒子が素粒子です。粒子には重さがあり普通ニュートンの運動方程式に従います。大きなものでは地球など太陽の周りを回っている惑星の運動はニュートンの運動方程式で表されます。電子は原子核のプラス電気による電氣的な引力で、地球は太陽による引力で中心に引き寄せられ遠心力と釣り合って一定の軌道を回っています。地球ほど大きくなくても私たちの目に見える大きさの物質には波の性質は無いと云えますが、分子や原子の大きさになってくると波の性質が現れてきます。

普通目に見えない小さな物を見るとき光学顕微鏡を使うのを知っているでしょう。これは光の波の性質を使っています。光の正体は電波で、重さが無く波として空気中や真空中を飛んでいきます。電子は粒子ですが波の性質もあります。電子で代表されるように粒子でありながら波の性質を持った物質波としての性質を表した科学（量子論または量子力学と言います）が1900年前半に発達しました。電子の波の性質を利用した装置に電子顕微鏡があります。電子は粒子としてニュートンの運動方程式で表される場合と波としてその運動を表すことが必要な場合の2重性があります。これは原子や電子等の小さな粒子が本質的に持っている性質です。このことは海の波が多くの水分子が集まり、少しずつ位置を変えて作っている私たちが目にする波とは違います。電子が運動しているときは1個の電子

それ自身が波ですから、電子がどこに居るか確率的にしか分かりません。しかし、測定器を使って電子を見ると電子は粒子として見えるのですが、電子の位置を正確には決めることが出来ないのです。それまでの力学では初めに粒子の位置と速度がわかればその後の運動は正確にわかります。これを因果律といいます。電子の運動はこれに反して位置もその運動量も、ある値より高い精度では決められない、すなわち不確定性原理（1927年）が成り立っているのです（注2）。不確定性原理は31歳でノーベル賞を受賞した天才ハイゼンベルグが思考実験で導き出した自然界の基本的な性質であり、神様の秘密でした。

電子は運動しているときは波ですから空間的に広がっており、どこにでもいる可能性があります。居場所を一か所に決められないのです。電子を観測すると粒子としての居場所がわかりますが、波動性は失われます。見ているときとみていない時で性質が違うのは、最初は到底理解できないことでした。

1900年頃の人々は神様が作られた宇宙で曖昧なことは許されないと考えていましたので、粒子がどこに居るか分からないのは神様を冒瀆していると、猛烈に反発しました。物質は神様がお作りになり、神様は正確に全てが分かっていると信じていましたので、物質波の存在についての非常に激しい論争が始まりました。20世紀に発達した量子力学や統計力学という学問（共に確率論を基礎にした科学）が発達する以前はニュートン力学と蒸気機関などから発達した熱力学が物理学の主要な学問でした。エネルギーは当然連続的に変わると考えていました。地球や火星は連続的に太陽の周りを回っています。粒子の運動も当然連続的に変わるのが常識です。相対性理論で有名なアインシュタイン博士もデンマークのボーア博士への手紙で「神はサイコロを振らない」と書き、確率論的な量子論にはなかなか納得しなかったようです。しかし、初期の量子論に対する温かい批判者として尊敬されていました。

### 3. 電子工業の裏方 — 量子力学の成立

量子論は意外なところから始まりました。約100年前は鉄鋼業が急速に発達してアメリカやドイツの産業が飛躍的に発達した時代です。ドイツでは基礎科学を産業の発展に応用したいとの思いで積極的に基礎科学を奨励しました。良質の鉄の生産には溶鉱炉の温度をバラツキの小さい高い精度で管理する必要がありますがありました。そこで溶鉱炉の中の温度を光で精度よく測ることを行いました。光は電氣的な波（テレビ放送などで使われている電波と同じ）ですが、光の波長（注3）と光の強度との関係をいろいろな温度で測定した結果、光のエネルギーが不連続に変わるのでなければ実験結果を説明できないことが解りました（1900年）。この問題を理論的に研究したのはMax Planck（マックス プランク）という人で後にこの研究でノーベル賞を貰っているのですが、初めは本人自身が一番驚き、自分の理論が信用できなかつたくらいです（現在Max Planck研究所はドイツ最大の研究所です）。彼の研究をはじめ、量子論によると光のエネルギーは振動数 $\nu$ に比例した不連続な値をとることが明らかになりました。この比例定数はプランク定数 $h$ と呼ばれ、光は $h\nu$ の

整数倍のエネルギーになります。その後、光の研究は大いに進歩し、金属に光を当てたとき波長が短くなっていくと、ある波長以下の短い波長では電子が飛び出してくることが解りました。この現象を光電効果といい、現在光の増幅器などに使われています。さらに、光（X線）（注4）を物質に照射して散乱してくるX線のエネルギーを調べたコンプトンによる実験（1923年）から光が粒子のように振る舞うことが明らかになりました（コンプトン散乱）。光のエネルギー $h\nu$ を1個の粒子のように考え、光量子と呼び、エネルギーが $h\nu$ の整数倍の値をとる状態を量子化されているといいます。これを光量子仮説（1905年）といい、あのアインシュタイン博士が考えた仮説で、博士は相対性理論（特殊相対論 1905年、一般相対論 1916年）ではなくこの仮説でノーベル賞（1921年）を貰っています。アインシュタイン博士が相対性理論でなく光量子仮説でノーベル賞を貰ったのは皮肉なことですが、固体物理学の分野でも固体の低温比熱を量子論的に解明しており、量子論への貢献も大きかったということでしょう。イギリスのニュートン以来の20世紀を代表する偉大な学者と言えるでしょう。

20世紀になって人類は神様の領域奥深くに足を踏み入れ、神様の物質創造の秘密を暴き始めたのです。粒子を加速し物質波としての運動エネルギーが大きくなると、波としての運動方程式が重要になります。ド・ブローイ（1925年）による物質波の量子論はプランク等によって始まった光の量子論から類推したものです。重さ（質量）のある粒子の波としての波動方程式はシュレディンガー方程式（1926年）として表されます。シュレディンガー方程式は普通の波の方程式とは違い粒子と波動の二重性に矛盾しないようになっています（注5）。量子論では粒子のエネルギーや運動量の変化は光の場合と同様にプランク定数 $h$ を単位として不連続になります。シュレディンガー方程式で表される原子核の周りを回る電子は不連続なエネルギーを持った軌道で表され、電子の波が原子核の周りを一周すると元の波に重なり、その軌道がエネルギー的に安定な状態になっています。この理論により先のラザフォードの疑問が解消され、当時研究されていた原子から出る光の線スペクトルの実験も上手く説明されました。私たちが目にする蛍光灯の光やテレビの映像を作る3原色は、原子核の周りのエネルギー状態の違う軌道の間を電子が移動したときにエネルギーの差が光になって出てくることを利用したものです。蛍光体にはレアアース・メタルといわれる原子を含む物質が使われています。

#### 4. 未来へ向かって

一般に私たちの生活で目にする物質の性質は電子の働きによるものです。物質の性質、つまり物質中の電子の振る舞いを調べる学問に物性物理学（注6）がありますが、この学問は量子力学を基礎にして1908年のヘリウムガスの液化による恩恵を受けて発達した身近な学問です。これにより半導体が発明され（LEDも半導体の利用です）、その技術が日々進歩しています。技術の根本（基礎）にあるのが物理学や化学などの基礎科学です。

これまで光と粒子の性質について説明しましたが、最後に少し補足しますと、光も粒子

もエネルギーというものの現われ方の違いです。光もエネルギー $h\nu$ 、質量ゼロの素粒子と考えることができます。この宇宙が出来て 140 億年ぐらいといわれています。最初は何も無かった無の世界（エネルギーだけは存在した）、空間も時間も無い世界、そこに神様が突然爆発を起こし物質が出来たと考えられています（注 7）。物質が出来ることにより、空間と時間が出来たと思います。現在、宇宙はものすごいスピードで膨張しているとか、銀河系などの星雲の中心にはすごく大きな引力をもったブラックホールがありそこに引き込まれると陽子などの物質も形をとどめることが出来ないと想像されています。今後、宇宙の研究は急速に進んでいくことでしょう。まさに、神様が無から物質を創造した神秘の領域に科学が迫っているようです。

宇宙誕生のときの物質形成過程への研究が素粒子物理学の研究者たちの間で議論されています。今年の 7 月ごろにスイスのセルンの研究所の加速器を使った研究で質量の元になるヒッグス粒子が発見された可能性があるという大きな話題になったことをご存知の方もおられるでしょう。宇宙の起源を研究するには電子とか陽子のような粒子を光速近くまで加速し衝突させて、宇宙誕生直後の非常に高いエネルギー状態を作り、粒子を破壊するときを生ずる寿命の短い素粒子を瞬間的に観測する物質の起源についての研究が計画されているようです（国際リニアコライダー計画）。粒子を直線で加速できれば、円軌道を含んだ加速器より粒子のエネルギーの損失が少なく、よりエネルギーの高い高速に近づけるので、直線で長距離の加速器の建設が望ましいのです。世界の研究者を集めた国際的な加速器の建設を日本に誘致し 2～3 万人の国際的な研究者の都市を建設することはこれからの日本の将来のためにもなるし、実現の暁には、日本の国際貢献とともに日本経済の刺激策の一つともなるとの期待も広がりつつあります。

---

（注 1）一定の速さ  $v$  で動いている物体はその重さ（質量  $m$ ）が大きいほど壁に衝突したときの衝撃は大きくなります。質量が 2 倍になれば 2 倍の力が壁に加わります。  $p = mv$  と表して  $p$  を運動量と言います。つまり、運動量の時間変化が力（この場合は衝撃力）です（ニュートン力学）。

波の場合は波長を  $\lambda$  とすると運動量は  $p = (\pi/\lambda) \cdot h$  となります。ここでいう軌道運動量は運動量を円軌道に沿って一周した時の運動量で、その値はプランク定数  $h$  の整数倍になるとの条件が原子核の周りを運動する電子軌道に対するボーアが提唱した量子条件です。

（注 2）量子論が適用される粒子では運動量と位置は正確に決まらず運動量の不確かさ  $\Delta p$  と位置の不確かさ  $\Delta x$  の積  $\Delta p \cdot \Delta x \sim h$ （プランク定数）と表わされる不確定性原理が成り立っています、ただし、記号  $\sim$  は  $=$  でもよいのですが大体  $h$  ぐらいの大きさという意味です。

ここで不確定性原理の面白い例を紹介しておきます。水素分子や酸素分子は一般に温度

を下げていくと、水素は絶対温度の 20K で酸素は 90K で気体から液体になり、さらに温度を下げると水素は 14K、酸素は 55K で固体になります。しかし、ヘリウムガスは 4K で液体になりますが、絶対温度の 0 度、すなわち 0K でも液体のまま固体にならないのです。この理由は量子論で説明されます。固体としてヘリウム原子を一点に閉じ込めようとする不確定性原理により一点の周りの振動の振幅が大きくなり固体になれないのです。つまり、ヘリウム原子は丸くて小さく、ヘリウム原子間の引力より量子的な振動の運動エネルギーの方が大きくなり、原子が一か所に留まる固体になれないのです。量子論では熱振動と区別して、ゼロ点振動といい不確定性原理の実例でもあります。熱振動は 0K で無くなりますが、ゼロ点振動は温度に関係のない量子振動です。ヘリウムを固体にするには 0K で 25 気圧以上の圧力が必要です。温度の単位を摂氏でなく K と書くのは自然科学で使う温度、絶対温度の単位です。絶対温度の 0K 以下の温度はありません。0K は摂氏  $-273.15\text{C}$  に相当します。

不確定性原理から原子間隔の大きさを  $d$  (原子の大きさ程度)、質量を  $m$ 、プランク定数を  $h$  として 0K で  $(1/m) \cdot (h/d)^2$  の程度の大きさの運動エネルギーで振動します。

(注 3) 波長  $\lambda$  とその振動数  $\nu$  は逆数の関係にあり、 $\lambda \nu = c$  (光速) です。

(注 4) 光、エックス線 (X 線)、ガンマ線 ( $\gamma$  線) はよく耳にする言葉ですが、物理的には全て同じ電磁波でエネルギーの大きさに区別されますが、エネルギーの大きさの区別は正確なものではなく、大体の大きさと思ってください。可視光の波長は赤の  $0.7 \times 10^{-6}\text{m}$  ( $\mu\text{m}$ ) あたりから紫の  $0.4 \times 10^{-6}\text{m}$  ( $\mu\text{m}$ ) ぐらいの範囲にあり、X 線は  $10^{-8}\text{m} \sim 10^{-11}\text{m}$  の程度であり、 $\gamma$  線はおおよそ  $10^{-12}\text{m}$  より短い波長の電磁波です。

(注 5) 粒子の運動を表すニュートンの力学方程式に相当する、物質波を表す量子力学のシュレディンガー方程式は、虚数単位  $i$  ( $i$  は  $-1$  の平方根) を含んでおりその解は複素関数で表されます。シュレディンガー方程式はドブロイの物質波のアイデアに従い粒子性と波動性の両方に矛盾しないように導いた現象論的な側面のある方程式です。水面に現れる巨視的な現実の波の伝搬方程式は虚数単位  $i$  を含みません。巨視的な波の方程式からシュレディンガー方程式への変形過程で物質波のプランクが発見した光のエネルギーと同様にエネルギー  $E = h \nu$ 、運動量  $p = k \hbar$  とし、一方、粒子としての運動エネルギーを質量を  $m$ 、運動量を  $p$  として  $E = p^2 / 2m$  として波の伝搬方程式からエネルギーの波動方程式に変形したトリックを行っています。このために虚数単位の導入が必要になっています。粒子に位置のエネルギーや電磁場等の外力が働いている場合には運動エネルギーに付け加えて、一般的なシュレディンガー方程式にしています。従って、この方程式が正しいか否かは色々な系に適用してみて実験に矛盾しないか調べる必要がありました。現在まで矛盾する現象は無く全ての量子に適用できる正しい量子力学の基本的な方程式になっています。

一定の速さ（運動量  $p$ ）で飛んでいる自由粒子のシュレディンガー方程式の解は複素関数の平面波で表され、この場合は粒子の位置が決まりません。しかし、観測すると不確定性原理の範囲内で粒子の位置は一点に決まります。この不思議な現象について、シュレディンガー方程式の解を物理的には確率波として理解することをドイツのボルン博士が提唱し、現在ではその解釈が認められています（ボルン博士はこのアイデアでノーベル賞を受賞しています）。光の場合と同様に干渉縞が観測され、電子の波は2個のスリットの後側のスクリーンに衝突するときは粒子ですから一個一個衝突した所に点として現れます。点の集合が干渉縞になることが確認されています。従って、飛んでいるときの波から観測点での粒子への変化が現実には起こっていることが解ります。

（注 6）物質の中の電子の運動や磁性などを研究するときには、物質の熱振動による雑音を減らすためにヘリウムの沸点（4K）以下の低温で研究を行います。通常の物性物理学研究で利用される最低温度は  $10^{-5}\text{K}$  程度です。単に温度を下げるだけでしたらヘルシンキ工科大学の  $10^{-10}\text{K}$  のチャンピオンデータがあります。何もないと思われる宇宙空間の温度が 3 K ですから、温度の低さがお分かりになるでしょう。

（注 7）宇宙が出来た時には物質と反物質が出来たと考えられています。現在でも存在する電子の反物質に陽電子があり、両者が衝突すると電子も陽電子も消えてエネルギーが放出されます。

エネルギーと物質の関係は、アインシュタインの相対性理論により重さ（質量） $m$ の物質は光速を  $c$  として  $m c^2$  のエネルギーであることが、実験的にも知られています。