

12 「量子力学」

コンピュータ、携帯電話、カーナビなど数え挙げればいくらでもあるが、今やわれわれの生活に欠くことのできない最新テクノロジーは、20世紀初頭に発達した、量子力学と相対性理論によってもたらされたといつてよい。ここで量子力学について触れてみたい。

これまで量子力学については全く知らなかったのだが、学んでみるとその素晴らしさにすっかり虜になった。

多くの物理現象は古典力学（ニュートン力学）で説明できる。しかし、天体運動のような巨大スケール、あるいはミクロ世界の現象を説明しようとするとうまく合わない。巨大スケールは相対性理論、ミクロ世界は量子力学によって解き明かされる。

原子や分子世界の現象を理解するには、2大原理のもとに成立する量子力学が必要になってくる。

2大原理とは「パウリの排他律」と「ハイゼンベルクの不確定性原理」である。

あらゆる物質は原子が集まって分子となり、分子が結合して個体となっているからである。

「パウリの排他律」とは何か？

量子力学で扱う微細な粒子（素粒子）には、原子、電子や中性子などいろいろある。それらは性質の違いにより2つに分けられる。

1つは“ボーズ粒子”で、光子、重力子、中間子、粒子（ヘリウムの原子核）など群れる性質のある粒子。ボーズ粒子は、電磁力を媒介する光子、重力を媒介する重力子など相互作用の源になっている。

素粒子は中心軸に対して回転するスピン量子数を持っているが、ボーズ粒子は整数スピンを持つ。

もう1つは“フェルミ粒子”で、電子、陽子、中性子など他の粒子を排除する性質を持つものである。“フェルミ粒子”は、物質を構成する粒子である電子、クォーク、ニュートリノなどこれ以上分解できない極微の粒子が含まれる。フェルミ粒子のスピン量子数は $1/2$ 、 $2/3$ など半整数を持ち、「2つの粒子が同じ状態となることはない」という「パウリの排他律」に従う。

すべての物質は『原子核』と、その周りを取り巻く『電子』によってできている。そして原子の性質は、最も外側にある電子の数によって決まってしまう。外側の電子が最も活発に動くからである。

従って、フェルミ粒子である電子の状態を決定付けるパウリの排他律が、物質の性質を決定しているといつてよい。電子は2個が同じ状態をとることができないという事実が、ほとんどすべての物質の特性を決定しているのである。

これによって元素の周期律表が導かれ、元素の持つ性質の違いが解明される。

「ハイゼンベルクの不確定性原理」とは何か？

電子の位置をはっきり知ろうとすると、電子がどんな速度で動いているか知ることができない。

電子の動く速度を知ろうと思えば、電子の位置を知ることができない。

この位置の解らなさを x （の範囲でしかわからない）で表し、速度の解らなさを、運動エネルギーに置き換えて p （の範囲でしかわからない）で表すと、 $x \cdot p = h$ （ h はプランク定数、後述）であることをハイゼンベルクが証明した。

量子力学では、電子の状態は確率的にしか決めることができず、その位置と運動量は同時に求まらない。このことから「不確定性原理」といっている。

量子力学は、次のような場合に威力を発揮する。

（1） 低温の世界

(2) 高エネルギーの世界

(3) ナノの世界

(4) 物性の世界 (物の性質を詳しく追求する)

光は電磁波ということは良く知られているが、同時に粒子の性質も持っている。

回折や干渉は光の波動としての性質で、金属に光を照射したとき電子が飛び出す現象(光電効果)は、光の粒子としての性質を示している。これは光が波動性と粒子性の両方の性質を兼ね備えていると考えなければ説明できない。

量子力学ではミクロの世界である粒子(量子という)の振る舞いを表すのに波動関数で表す。波動関数を求めそれを解くことにより粒子の振る舞いを解き明かすことになる。

量子力学の世界では「現象は連続でなく離散的」である。粒子の波動性に着目し、数学の手法を用いて物質の中の電子の振る舞いの理解を深めることができる。

あらゆる波長に対する熱の放射・吸収を理想化した物体(黒体)から、熱エネルギーが電磁波として放出される現象を黒体放射と呼ぶ。この放射エネルギーは、その電磁波の波長と物体の温度によって決まる。

マックス・プランクは放射エネルギーの式を求める過程で、理論的根拠とした熱力学、分子運動、電磁気学などの理論だけでは説明できないことに気付く。

これまでエネルギーは連続的な量と考えられていた。しかし、物質がそれ以上分割不可能な原子で構成されていると同じように、エネルギーもそれ以上分割できない最小基本量があり、エネルギーの値も飛び飛びの値を取ると考えないと論理的・一貫性が保てないとし、そのエネルギー最小基本量を $E = h$ (h : プランク定数、 ν : 電磁波の振動数) と表した。

古典力学では問題なかったが、原子や電子の振る舞いを考える場合、小さな物理定数であるプランク定数 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ (ジュール・秒) が無視できない。

比熱などの熱的性質、電気抵抗や磁性などの電氣的・磁氣的性質、屈折率などの光学的性質、物質にそれぞれ違った性質を与えているのは突き詰めれば原子と電子である。

すべての物質は原子と電子の集合体であり、物質の中の原子と電子がどのような状態なのかを知ることによって、多くの物理現象が説明される。

超伝導は極低温で電気抵抗がゼロになる現象で、超伝導コイルによるリニアモーターの磁気浮上、電力貯蔵、核融合炉、MRI など多くの用途に利用される。

この超伝導現象の量子力学による説明は惚れ惚れしてしまう。

電流は金属体内で束縛を受けない自由電子の流れ、電気抵抗は金属体を構成する金属原子の格子状結晶に、自由電子が衝突することにより動きが妨げられるものである。

格子の振動は温度に比例し、温度が高くなれば電子が格子に衝突する確率が高まるので抵抗が増し、逆に低くなれば抵抗が下がり絶対零度で限りなくゼロになる。ゼロにならない理由は、不確定性原理により金属原子の振動がゼロにならず、完全に静止状態となることはないと解釈されるためである。

絶対零度では格子振動はゼロとなるが、マイナス電荷を持つ電子がプラス電荷を持つ金属原子に近づくことにより格子が歪み、格子振動が起きると考える。

その格子振動のエネルギーによって生じるフォノン(音子と名付ける素粒子)による電子間の引力が電子間に働くクーロン力(電荷相互間に働く力)の反発力に打ち勝って、2つの電子の対(クーパー対

という)が形成される。

フェルミ粒子である電子のスピン量子数は $1/2$ であり、この2個の電子の1つは上向き ($1/2$) もう1つは下向き ($-1/2$) の対となることにより、スピン量子数0のボーズ粒子となると考える。

このようにクーパー対の状態で電子が集団となって移動することにより、1個の電子が格子に奪われたエネルギーをもう1個の電子が格子から奪い返すことで、電子単体で移動する場合に比べ、エネルギーの損失がなくなり格子振動の影響を受けずに移動することができるのである。

電子が対になることにより超伝導現象が生まれると説明できる。(発見者の頭文字を取ってBCS理論と呼ばれる)

フォノンによる電子の結合は絶対30度までが限界であるが、フォノン以外の機構で電子の対が形成できれば、新たな超伝導が可能になる。これが高温超伝導である。高温といっても、絶対零度に対して数10度高いということなので、極低温であることに変わりはない。

絶縁体は金属に比べ電子が格子に強く束縛されており、電子が動いたときに格子に与える振動は大きく、より高い温度で超伝導となる可能性がある。

この絶縁体の中に動くことのできる電子が存在すればよい。そこで半導体と同じように電子を注入・添加することにより、高温超伝導物質を作ることが可能となる。

量子力学の世界では、例えば超伝導現象についてそのメカニズムを、これまでの知識を総動員して説明しようとする。“クーパー対”はこの現象を説明するためのブレークスルーなのだが、「電子が2個の対になったとき特別な性質が生まれる」という考え方が、現実に高温超伝導物質の発見につながっていくのだから驚くほかはない。

新しい現象を解明するためには、素粒子に対する深い知識と柔軟で大胆な発想、そして高度な数学的知識が必要となる。量子力学は、本当にミクロの世界の大理論といえる。(2011.04.18)