

絵でわかる量子力学 1990年 日本実業出版

小暮 陽三 (こぐれ ようぞう)
東京文理大学(現 筑波大学)卒、理学博士
埼玉大学教育学部 教授

量子力学の初步の解説書である。内容は、10章から成り、

- 1章 量子ってどんなもの
- 2章 量子は製鋼法から生まれた
- 3章 光は波か粒子か
- 4章 原子の構造を調べてみる
- 5章 不確定原理の世界
- 6章 量子化学の世界へようこそ
- 7章 固体の中をのぞいてみる
- 8章 原子核の中をさぐる
- 9章 知られざる粒子を探って
- 10章 宇宙の姿を求めて

歴史的に順を追って平易に説明してある。

不確定性原理とは、

ボーアの弟子、ハイゼンベルクは、思考実験を行なって、次の不確定性原理を確立しました。当時、23歳の若さでした。

彼は、「位置の不確定性(Δx)と運動量の不確定性 ΔP_x の積は、プランク定数に等しい」として、

$$(\Delta x) \times (\Delta P_x) = h$$

という式を導きました。

われわれの古典物理学の世界では、例えばビリヤードの玉に光が当たっても、玉が変質したりその位置が変わったりすることはありません。

しかし、量子の世界では、白玉がナインボールを押し出すように、光が電子をはじき飛ばしてしまうのです。

そうなると、電子の位置やスピードがすべて変わってしまうことになるのです。

量子の世界での“観測”というのは、このように、必ず不確定性をもった値しか得られない。

古典物理では観測に関係なく、自然法則が客観的に成り立つ、としてきました。これとは大変な違いです。

不確定性というと、位置も運動量も正確に測れない……と誤解する傾向があります。

しかし、位置も運動量もお互いの知識を犠牲にすれば、いくらでも正確に決定できるのです。不確定性とは、両方を同時に正確には決められないことを意味しています。

このように、互いに不確定な関係にある物理量のことを共役な物理量といいます。ですから、どの時刻に電子がどこにいたかは決められます。しかし、そのときの運動量、速度は決められないことになります。

電子の、位置か運動量かどちらか一方を決めれば、もう一方が決まらない。しかし、その確率的な値は決められる——これが不確定性の考え方でした。

このように、1920年代前半に確立した量子力学に対して、1935年、アインシュタインは猛烈に反対しました。

彼は同じ電子について相手を変えずに、位置も測れるし、運動量も測れることを示して、それぞれの量に関係した「ある」という要素が確かめられた以上、その二つの同時存在を許さない量子力学は間違っている、と反論しました。

ボーアとの激しい論争の末「神様はサイコロ遊びを好まない」といって、量子力学から遠ざかり、一般相対性理論の研究へと移っていました。

ボーアは不確定性原理が、位置と運動量だけでなく、エネルギーと時間についても成り立つことを証明しました。それは、時間の不確定性さ Δt とエネルギーの不確定さ ΔE との積がプランク定数に等しいということです。

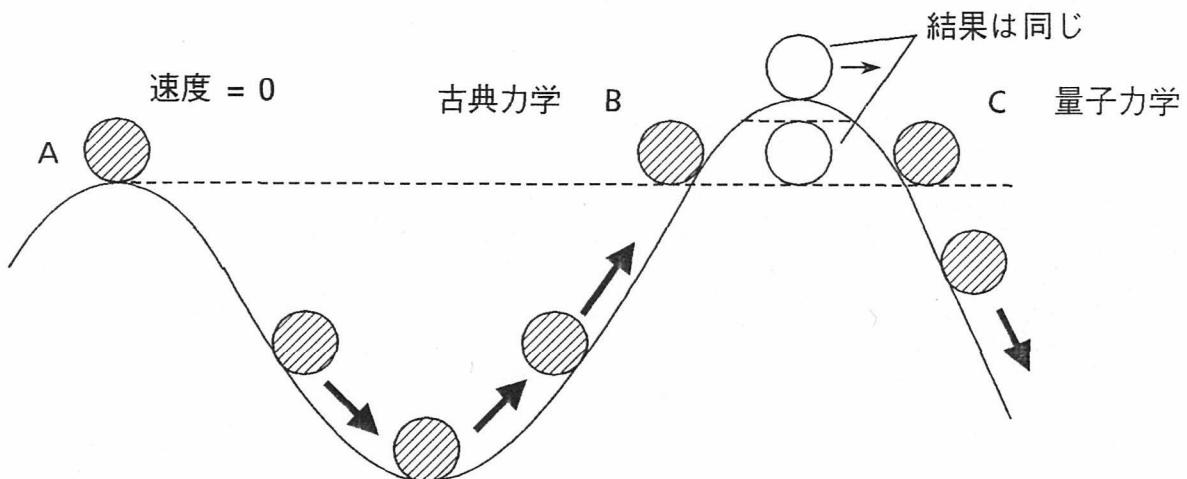
言い換えば、エネルギーを正確に測ろうとしても、時間が不確定になり、時間を正確に測ろうとしてもエネルギーが不確定になるということです。

つまり、非常に短い期間なら、エネルギーに幅があってもよいということは、エネルギーをどこからか借りてこられるということです。古典力学の世界では、Aから出発した物体は、同じ高さのBまでしか登れません。

しかし、量子の世界では、物体は、Bまで来たあと、あたかもトンネルを通ったかのように、突然Cに姿を現わします。

別に実際にトンネルを掘ったわけではなく、一瞬、どこからかエネルギーを借りてきて、山を越えてしまったのです。

この現象をトンネル効果といいます。



相対性理論

アインシュタインは、生涯を通じて、不確定性原理を認めようとはしませんでした。しかし、彼の特殊相対性理論は原子核についての研究が進むにつれて偉力を發揮するようになりました。

特殊相対性理論の結論のうちで、原子核にいちばん関係が深いのは、質量とエネルギーが同等であることです。それは、

$$(エネルギー) = (\text{質量}) \times (\text{光速の} 2\text{乗})$$

の関係で結ばれています。

原子核の質量は、当然のことながら陽子と中性子の質量を合わせたものになるはずです。

しかし、実際には、陽子と中性子の合計よりも原子核の質量のほうが軽くなってしまいます。

陽子は電気的にプラスですが、中性子は電荷をもちません。

両者を結びつけるためには、エネルギーが必要なはずです。

このエネルギーのことを結合エネルギーと呼びます。

実は、失われた質量は、相対性理論の $E = mc^2$ の式によって、この結合エネルギーに変わったのです。

質量数を横軸に質量の減少を縦軸にとってグラフを書くと、軽い原子核から重くなるにつれて、質量の減少する率は低下し、鉄の付近で最低になります。

それから、再び質量の減少は少なくなっています。

このことは、鉄の中性子や陽子がもっとも強く引っぱりあう力が働き、結合エネルギーが大きく安定であることを意味しています。

質量数の多い右の端のほうのラジウムやウラニウムなどは、結合エネルギーが小さい——つまり、中性子や陽子が互いに引きあう平均の力が弱くなって、放射線をもつようになります。

クォーク理論

陽子や中性子は直径1兆分の1cmぐらいの重い粒子です。この粒子の仲間をハドロン(強粒子)と呼びます。

加速器の発達でハドロンは数十種類も現われました。しかしこれらのすべてが究極の粒子とは考えられません。

ゲルマンとツヴァイクは1964年、クォーク・モデルを提唱して、この状況を打解する突破口をひらきました。

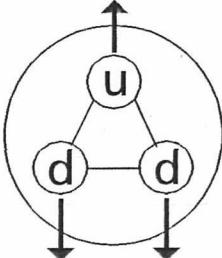
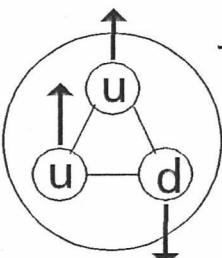
当時は三種類のクォーク——アップ(u)、ダウン(d)、ストレンジ(s)が仮定されました。もちろん、それぞれの反粒子も同様に仮定することになります。

ゲルマンのクォークと反クォークの表を図にあげておきます。電子の電荷eの $\frac{1}{3}$ や $\frac{2}{3}$ の電気量をもっている点が奇妙だと思いませんか。

電気素量eは電気量の最小単位で、e以下の電気量はゼロ、という今までの常識を破った大胆な説で、巧妙にハドロンを説明することができます。

さらに、質量がハドロンより軽いメソン(中間子)も同じように説明できます。

クォーク	電荷	クォーク	電荷
アップクォーク(u)	$+\frac{2}{3}e$	反アップクォーク(\bar{u})	$-\frac{2}{3}e$
ダウンクォーク(d)	$-\frac{1}{3}e$	反ダウンクォーク(\bar{d})	$+\frac{1}{3}e$
ストレンジクォーク(s)	$-\frac{1}{3}e$	反ストレンジクォーク(\bar{s})	$+\frac{1}{3}e$

中性子		$\frac{2}{3}e + (-\frac{1}{3}e) + (-\frac{1}{3}e) = 0$
陽子		$\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e + (-\frac{1}{3}e) = e$