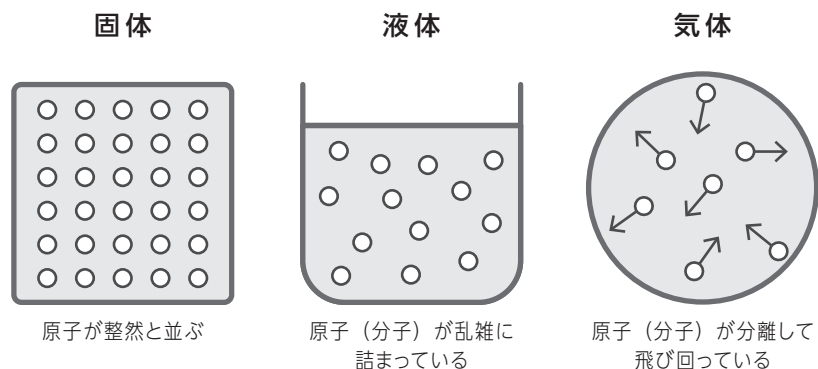


「物質は  
原子から  
できている」

リチャード・ファインマンは20世紀に活躍した偉大な物理学者の1人であり、その魅力的な人格やエッセイでも知られています。彼は、文明の滅亡が避けられなくなり、また蘇るよみがえかもしれない人類に一言だけ遺言を残すとしたら何を選ぶかという質問に対して、「物質は原子からできている」と伝えたいと答えたそうです。

固体、液体、気体といった物質がなぜ存在し、なぜこのような振る舞いをするのかを説明するのも、あるいはなぜ自然界にはさまざまな種類の物質が存在し、さまざまな変化（化学反応）をするのかを説明するのも、物質が原子から構成されているということが出発点となります。

—— 図 1-1 • 固体・液体・気体の違いの直感的説明 ——



原子核と  
電子

物質は原子からできているという発想自体は古代ギリシャからあったようですが、その当時の原子とは、これ以上、分解できないものというイメージでした。原子とはアトム (atom) の訳語ですが、これは、tom (分割) という単語に否定の接頭辞 a を付けたものです。

これに対して、さまざまな紆余曲折の後に20世紀になってやっと登場した正しい原子像によれば、原子とは、中心に原子核があり、その周囲に1個、あるいは複数の、場合によっては数十の電子が動いているという構造をもったものでした。水素原子、炭素原子、酸素原子、鉄原子などさまざまな原子が存在しますが、その違いは周囲で動く電子の数の違いに起因することもわかりました。

それらの原子を電子の数の順番に並べると右のような表になります。電子1個の水素H、2個のヘリウムHeが、この本で最も重要な原子です。

原子の大きさも、古代ギリシャ人には想像もつかなかったものでした。

—— 図 1-2 • 原子の表 ——

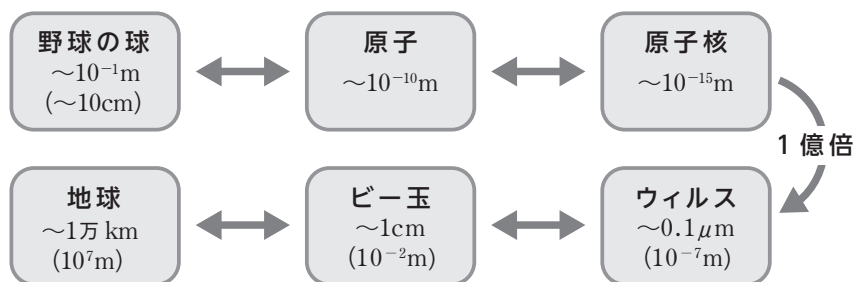
記号	名	電子数	記号	名	電子数
H	水素	1	Na	ナトリウム	11
He	ヘリウム	2	Mg	マグネシウム	12
Li	リチウム	3	Al	アルミニウム	13
Be	ベリリウム	4	Si	ケイ素	14
B	ホウ素	5	⋮		
C	炭素	6	Fe	鉄	26
N	窒素	7	⋮		
O	酸素	8	Au	金	79
F	フッ素	9	⋮		
Ne	ネオン	10	U	ウラン	92

数グラムの物体の中に、10の24乗個（ $10^{24}$ 個）レベルもの原子が存在すると推定されるようになったのは19世紀後半のことでした。これは、原子1個の大きさが、10のマイナス7乗mm（10の7乗分の1mm）であることを意味します。

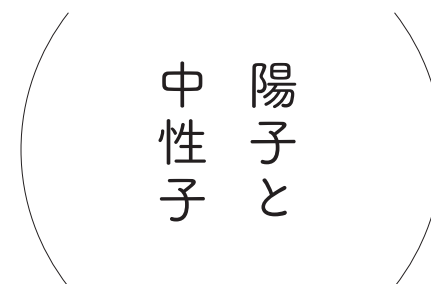
さらに驚くべきこととして、その中心にある原子核の大きさは、原子の大きさの10万分の1程度といったものであることもわかりました。その周囲に存在する電子は現在、大きさのない粒子（大きさが考えられないほど小さな粒子）と考えられているので、原子といっても中はすかすかだということです。原子の大きさが何々だというのは、原子核と電子の間隔が平均としてその程度だという意味なのです。それだけの大きさの、中が詰まった球があるわけではありません。ただし原子核のほうは後で説明するように、中は詰まっています。

たとえ話で大きさのイメージを説明してみましょう。原子と原子核の大きさは5桁違うので、たとえば原子を直径1cmのビー玉にたとえれば、原子核は大きさ0.0001mm（ $0.1\mu\text{m}$ （マイクロメートル））の、ウイルス程度の大きさになります。また、原子と野球のボールの大きさは9桁違うので、原子をビー玉にたとえれば、野球のボールは地球に相当します。

図 1-3 • 原子をビー玉にたとえると



原子はこんな小さな（ミクロな）世界なのですから、我々が日常的に観測されている世界とは、物理法則も基本的に異なっているとしても不思議ではないでしょう。そして実際、その通りでした。量子力学という新しい学問が登場するのですが、それについては第6章で説明します。



原子核の存在がわかってから間もなく、原子核は単独の粒子ではないことがわかりました。原子核は一般に、**陽子**幾つかと**中性子**幾つかが、非常に小さな領域に硬く結合したものであることがわかりました（水素の原子核だけは例外で、陽子が1個だけ）。陽子と中性子は原子核を構成している粒子という意味で、まとめて**核子**と呼ばれます。質量（重さ）も非常に近く性質も似た、同じグループに属する粒子ですが、以下で述べるように、1点だけ重要な違いがあります。

この本ではこれから多数の粒子が登場しますが、それぞれの性質に基づき分類されます。もちろん、それぞれの粒子は異なる性質をもっているから別の粒子と呼ばれるわけですが、似た性質に着目してグループ分けすることも、全体像をつかむ上で非常に重要です。

それはともかく、同じグループに属する陽子と中性子の違いは、電荷です。ここで簡単に、電気力ということを説明（復習）しておきましょう。

静電気（摩擦電気）という現象は誰でも知っているでしょう。電気（正

確には電気量あるいは**電荷**といいます)にはプラスとマイナスがあります。物体を摩擦すると、一方の電荷がプラス、他方の電荷がマイナスになり(電気を帯びる、つまり帯電するといいます)、引き付け合うようになります。またプラスに帯電したもののどうしを近づけると(あるいはマイナスに帯電したもののどうしを近づけると)、反発します。これらの力を総称して**電気力**と呼びます。

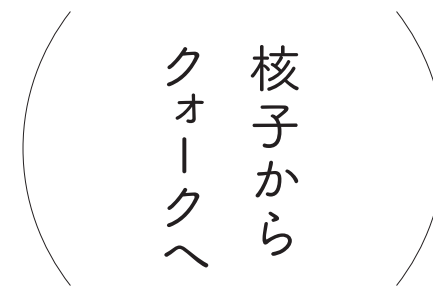
摩擦電気の根本原因は(摩擦によって移動した)電子の電荷です。電子は電荷という性質をもっており、それを数値で表すとマイナスです。電荷とは粒子がもつ諸性質のうちの一つです。具体的な大きさは表し方(単位の選び方)によるので省略しますが、電子の場合、 $-e$ 、あるいは単に $-1$ と書きます( $e$ は電子のもつ電荷の絶対値を表します)。

それに対して、原子核中の陽子はプラスの電荷 $+e$ (あるいは単に $+1$ )をもちます。したがって、陽子から構成されている原子核と、その周囲にある電子は電気力によって引き付け合います。その結果として、原子という1つの集団を構成するわけです(中性子は電荷をもちません)。

原子の種類の違いも電荷によって説明できます。たとえば8個の陽子をもつ原子核があったとしましょう(酸素原子の原子核です)。その原子核は、電気力によって電子を8個まで引き付けます。8個の陽子があるので原子核の電荷は $+8$ 、そして8個の電子を引き付ければその電荷は $-8$ ですから、全体として電荷は0になります。つまりそれ以上は電子を引き付けないので、安定した状態になります(ただし電子が少し余分なもの、あるいは少し欠けているものもあり、イオンと呼ばれます。それらは周囲の状況によっては安定したものになりますが、それは化学の話になり、この本では深入りしません)。

このように、自然界に存在するさまざまな原子の違いが、電子と(原子

核中の)陽子の数の違いとして説明できるようになりました。ただ同時に、疑問も生じることに気付いたでしょうか。原子核内には、陽子とほぼ同数の、電荷をもたない中性子という粒子が存在しますが、それらはなぜ、何のために原子核内にあるのでしょうか。また、プラスの電荷をもつので互いに反発するはずの複数の陽子がなぜ、原子核という、非常に狭い領域の中に集まっていられるのでしょうか。電気力だけでは説明できない何かがあるようです。これらの疑問に答えることが新しい素粒子物理学という学問の出発点になったのですが、その答えは第8章までおあずけとします。



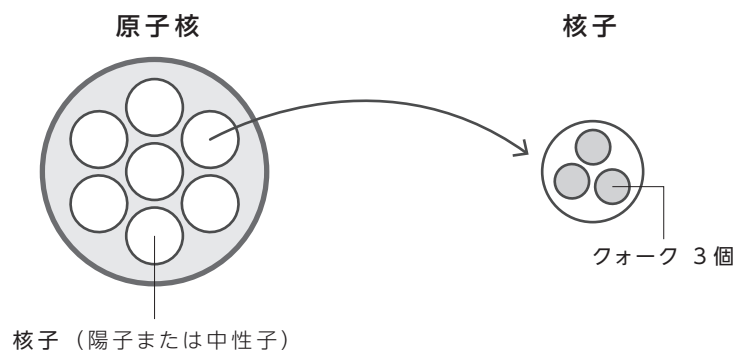
原子核が陽子と中性子から構成されていることは1930年代からわかっていました(中性子の発見は1932年)。では、陽子や中性子は「素粒子」と呼んでいいのでしょうか。

素粒子(elementary particleあるいはfundamental particle)とは、物質を構成する、これ以上分解できない、基本的な構成粒子のことです。その意味では、電子や原子核の存在がわかるまでは原子が素粒子だったわけですが、現在では、電子はともかく原子核は素粒子ではありません。では、原子核を構成する核子(陽子と中性子)は素粒子なのでしょうか。

実際、中性子が発見されてから30年近くは、そうだと思われていたようです。しかしそう考えると理解しづらい現象が幾つか発見されてきました。

そして核子は、さらに基本的な粒子（クォークと名付けられました）が3個集まった、複合粒子であるという提案がなされ、これもさまざまな紆余曲折があった後に、現在では万人が認める説になっています。

図 1-4 • 原子核の中には？



クォーク説が簡単には認められなかった最大の理由は、クォークという粒子が発見できなかったからです。存在するのに発見できない（つまり単独では存在しない）理由を理論的に説明することが難しかったのですが、1970年代に量子色力学という理論の登場によって、問題は（ほぼ）解決しました。これについては第11章で詳しく説明します。いずれにしろ、核子は素粒子ではなく、クォークこそが素粒子であるというのが、現在の素粒子の標準理論です。クォークとはどんなものかという説明は第10章でします。

一方、電子について言えば現在でも、少なくともクォークと同じレベルで、素粒子であると思われています。もちろん学問の発展につれて将来、クォークや電子でさえも、素粒子ではなかったということになるかもしれませんが。

## 素粒子 その他の

### —— ミュー粒子とニュートリノ

電子とクォーク以外にも、現在、素粒子と呼ばれている粒子は、十数種、あるいは（数え方によっては）数十種類もあります。それらは原子内には存在しないものがほとんどですが、自然界には厳然として存在します。ただし、いったん生成されても、他の複数の、より軽い素粒子に変わってしまうもの（崩壊するといいます）も、そうではないものもあります。粒子が生成や崩壊（消滅）するというのも、20世紀になって登場した新しい物質観です。物質とは不変なものなのか、それとも転換しうるものなのかは古代からさまざまな考え方が主張されてきたようですが、「物質は不変ではない」というのが現代の確立した考え方です。といっても、物質の変換（粒子の生成・消滅）には、一定の厳格な規則性があり、それを明らかにすることが素粒子物理学の最大の目標の一つです。そして、そもそも自然界にはどのような素粒子が存在するかということ明らかにするのが、もう一つの目標とっていいでしょう。

それはともかく、電子とクォークのほかにどんな素粒子があるのか、少しだけ紹介しておきましょう。

比較的、早くから発見された粒子として、**ミューオン**（**ミュー粒子**あるいは  **$\mu$ 粒子**）があります。一般に「オン」とは粒子を表す接尾語です。

一言で言うと、ミュー粒子とは電子の重いバージョンです。性質が電子