

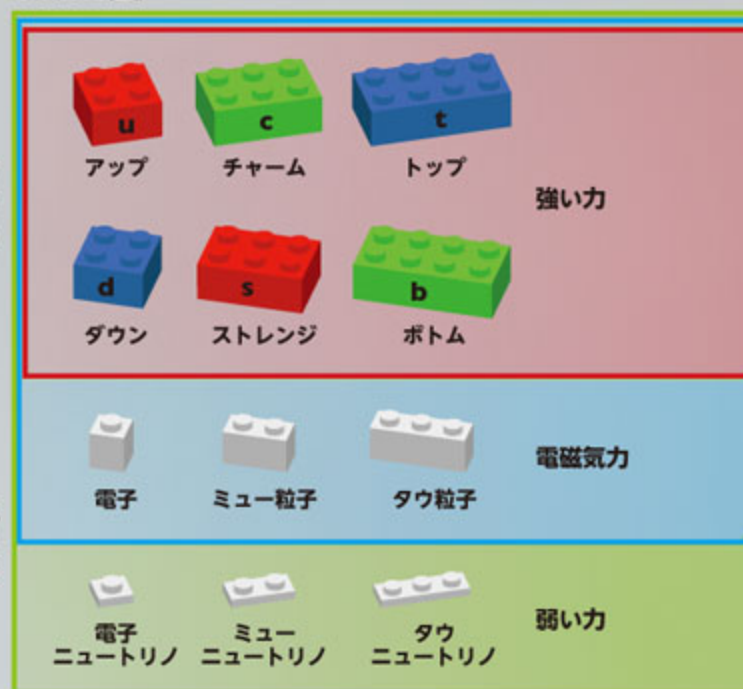
この本について

本書のはじめの方では、まずは各種部品の説明をする(このパートは取扱説明書のようなものだ)。部品とは、私たちの宇宙をつくり上げる最も基本的なブロックのことだ。また、本書を読む上で後々必要になってくる重要な概念についても触れる。そこには新しい言葉や大事な専門用語をたくさん盛り込んだため、読み進みながら必要に応じて見返してほしい。

各種部品を思い出す際には、本書カバーの内側に描かれている図と巻末の用語集を早見表として活用してもらいたい。

それ以降のセクションでは本筋に集中する。まずはスタートを切るのにふさわしい、時間そのものの始まり、つまりビッグバンだ。そしてそこから約140億年におよぶ、クォークや電子から化学元素までの、私たちの周りにあるふつうの物質の誕生について図解していく。ここに関わるのはわずかな種類の粒子で、アップクォーク、ダウンクォーク、電子、電子ニュートリノ、反電子、そして反電子ニュートリノという、質量の小さい第1世代の素粒子だ。さらにこのパートでは、誕生から超新星爆発まで恒星の一生を通じて、初期につくられた種々の原子についても説明する。

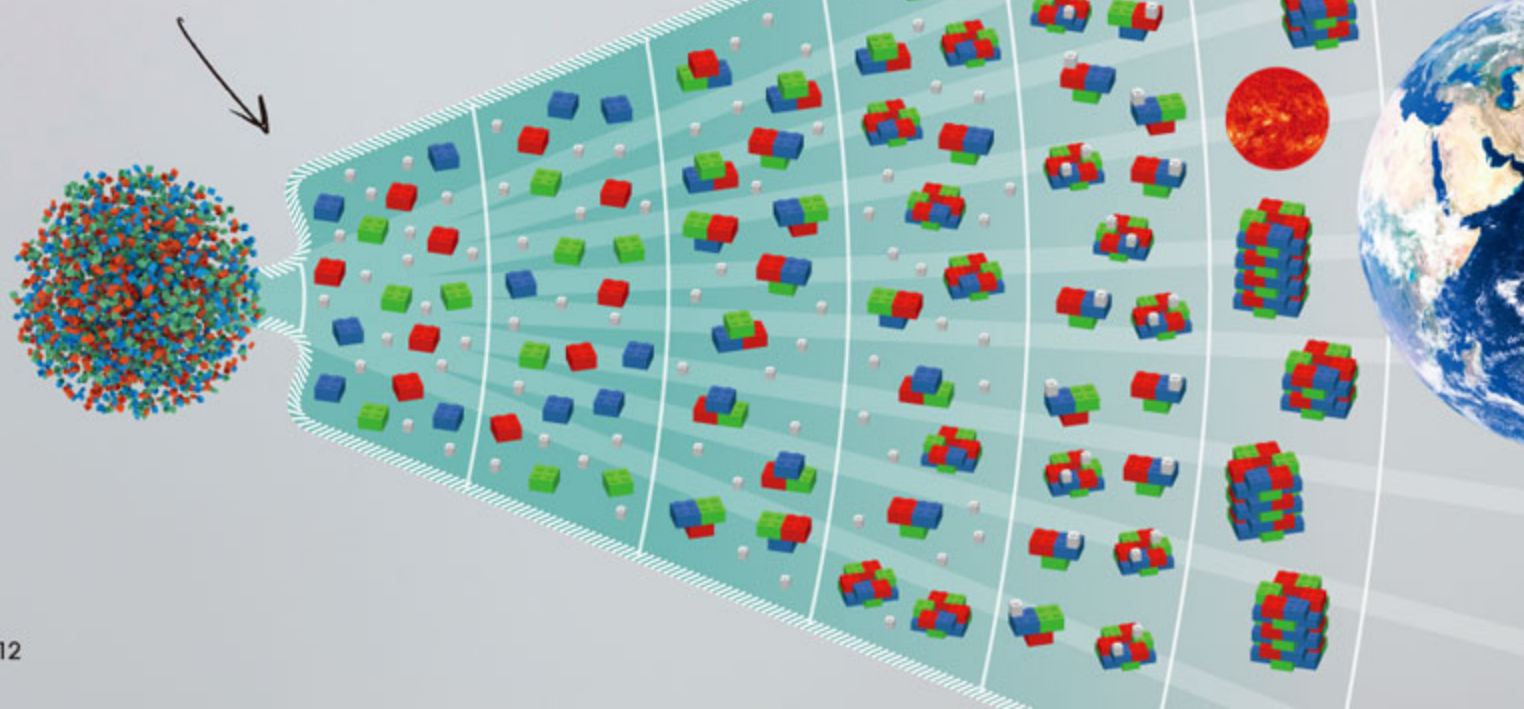
フェルミ粒子



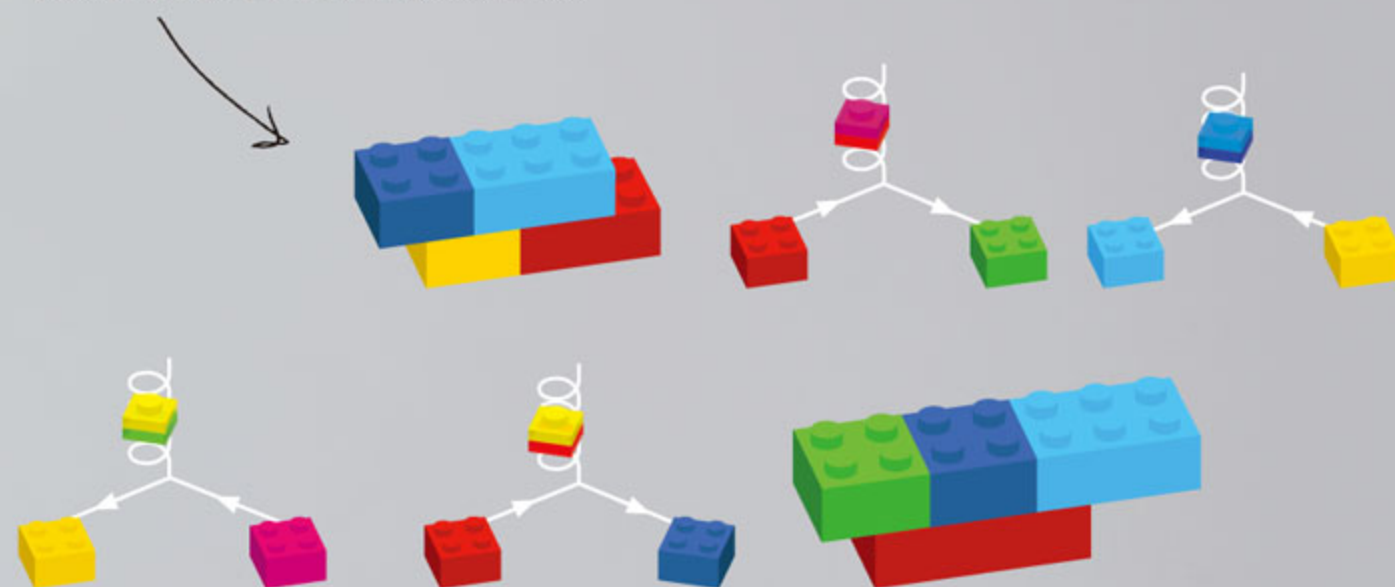
ヒッグスボソン



H



2番目のパートでは、自然界の力を詳しく説明するとともに、素粒子物理学に関する理解を深めてきた人類の歴史を図示していく。ここでは、ビッグバン以降に私たちが経験したことのないような状況にどんどん近づいていく実験をとおして、過去へとさかのぼっていく。この分野の知見を広げるために、何千人もの人々が人生を捧げた。そのすべての人の貢献に触れたいのはやまやまだが、紙幅の都合上、本書では主要な人物にしか光を当てられなかった。本書を通じて力についてより詳しく学んで、粒子を構築するためのさまざまな法則を知り、ブロック遊びのようにあなた自身で物理学者も予測しないような粒子を作ってみてはどうだろうか。



最後のパートでは、素粒子物理学の未来について考える。具体的には、私たちの知識にある欠落と、それを埋めることが期待されるいくつかの理論を検討する。素粒子を組み合わせるルールに加え、新しい粒子が次々に考え出されている。それらは理論上には存在しないかもしれないが、私たちのブロックの宇宙では存在できる。

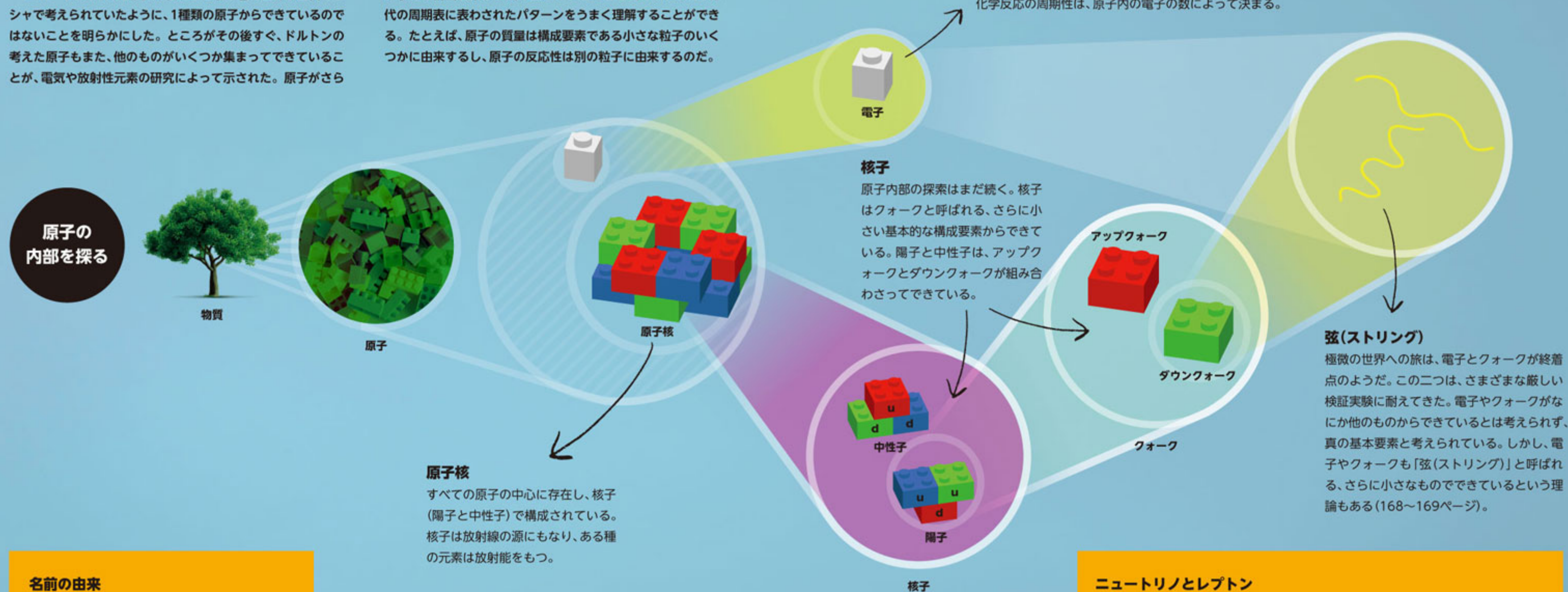


自然界に存在するさまざまな原子は、たった3種類の、原子より小さな物からできている

原子の内部へ

ジョン・ドルトンの研究は、私たちを取り巻く世界が古代ギリシャで考えられていたように、1種類の原子からできているのではないことを明らかにした。ところがその後すぐ、ドルトンの考えた原子もまた、他のものがいくつか集まってできていることが、電気や放射性元素の研究によって示された。原子がさら

に小さな構成要素から成り立っていることを受け入れれば、現代の周期表に表わされたパターンをうまく理解することができる。たとえば、原子の質量は構成要素である小さな粒子のいくつかに由来するし、原子の反応性は別の粒子に由来するのだ。



名前の由来

陽子(プロトン)は「最初の」という意味のギリシャ語から名づけられた。中性子(ニュートロン)は電気的に中性(ニュートラル)であることから、そう呼ばれる。電子(エレクトロン)は、電気(エレクトリシティ)の原子という意味で名づけられた。

ニュートリノとレプトン

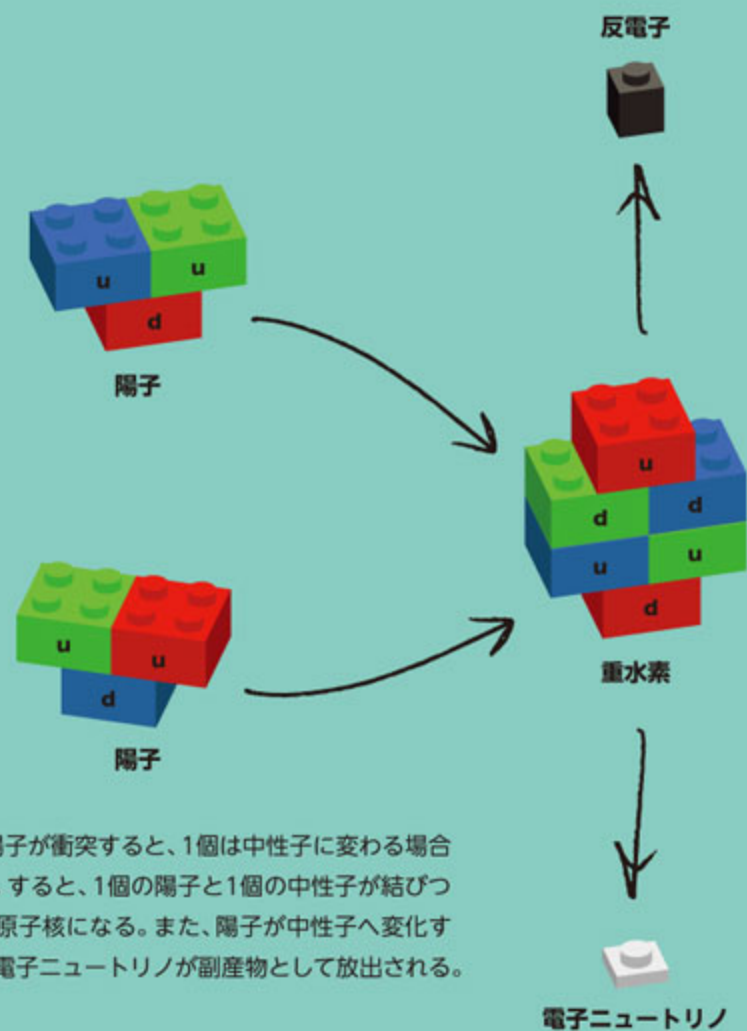
最も基本的な構成要素である素粒子には、クォークや電子のほかにニュートリノがある。ニュートリノは中性子が陽子と電子に変化(ベータ崩壊)する際に生成される。電子とニュートリノは、あわせてレプトンという分類にまとめられている。電子やニュートリノは、命名当時に知られていた陽子や中性子より質量が小さかったことから、「小さい、細い、繊細な」という意味のギリシャ語「レプトス」にちなんで名づけられた。

宇宙誕生から数分後、弱い力は陽子を中性子に変えた。中性子ができると、ヘリウムの原子核も生まれた

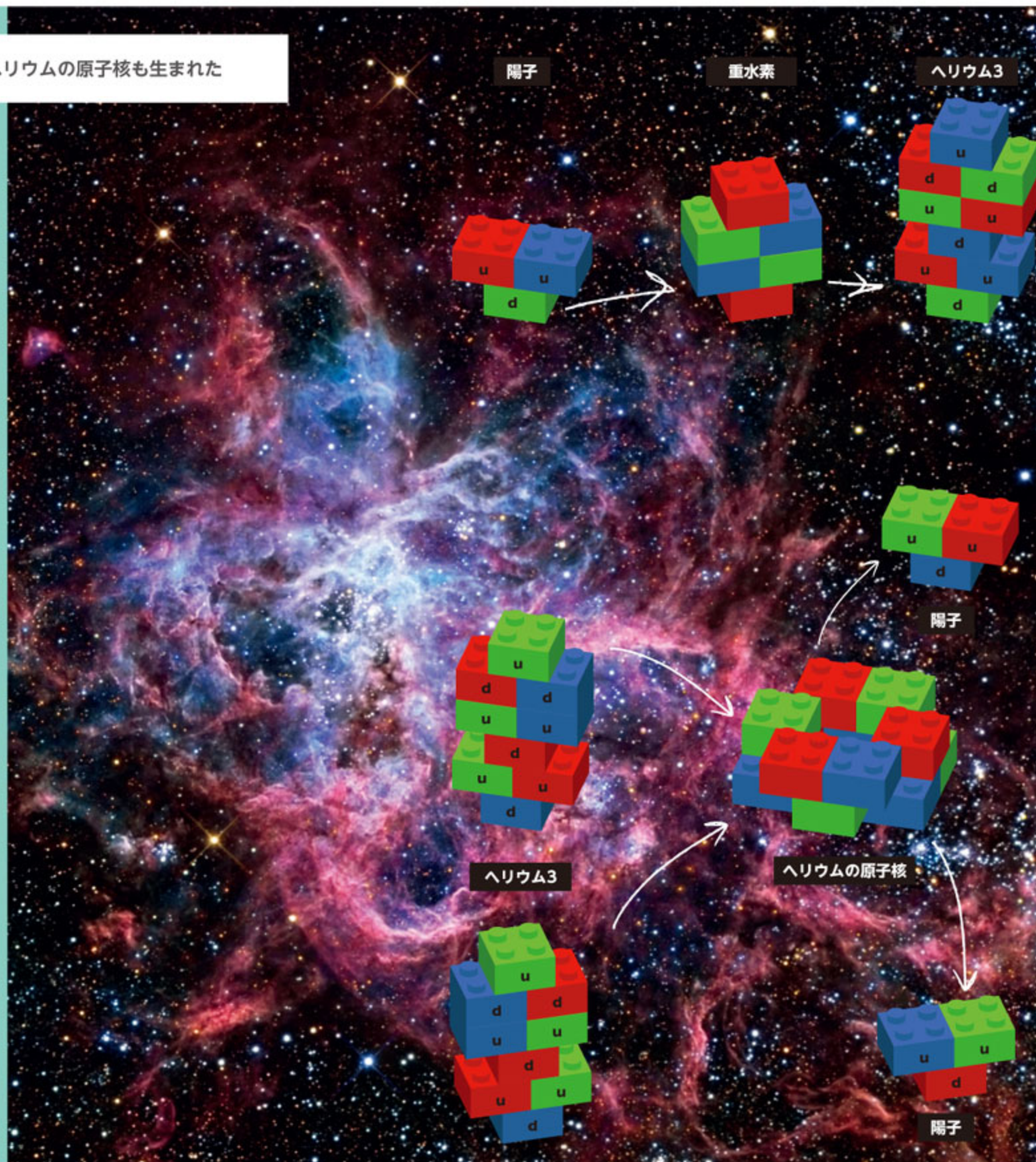
最初の1分

誕生から数十秒後の宇宙の温度はおよそ10億Kだった。これだけ温度と物質密度が高かったということは、十分な数の陽子が互いにぶつかり合い、そのうちのあるものは陽子が感じる強い力によって互いに結びついたということの意味する。

一方、中性子は長い時間、単独では存在することができず、すぐに陽子に変わる。しかし条件がそろえば、陽子も中性子に変化することができる。中性子と陽子との間に起きるこの変換には弱い力が必要であり、宇宙の進化におけるこの段階では、弱い力が必要不可欠だった。



1 2個の陽子が衝突すると、1個は中性子になる場合がある。すると、1個の陽子と1個の中性子が結びついて、重水素の原子核になる。また、陽子が中性子へ変化する際、反電子と電子ニュートリノが副産物として放出される。



2 ほんのわずかな時間に、さらに別の陽子が重水素と衝突し融合すると、ヘリウム3(元素名のあとの数字は、原子核の質量数(陽子と中性子の総数)を示している)ができる。

3 ヘリウム3は寿命が短い。その短い寿命の間に、幸運にも2個のヘリウム3の原子核が互いに衝突することができれば、安定した原子核をもつヘリウム4になる。ヘリウム4が形成されるとき、一方のヘリウム3の原子核に含まれる陽子1個と、もう一方のヘリウム3の原子核に含まれる中性子1個が組み合わせられ、余分になった2個の陽子が放出される。ヘリウム4は、安定な原子核のなかで現在でも2番目に存在量が多い(いちばん多いのは陽子で、つまり水素の原子核だ)。

同位体

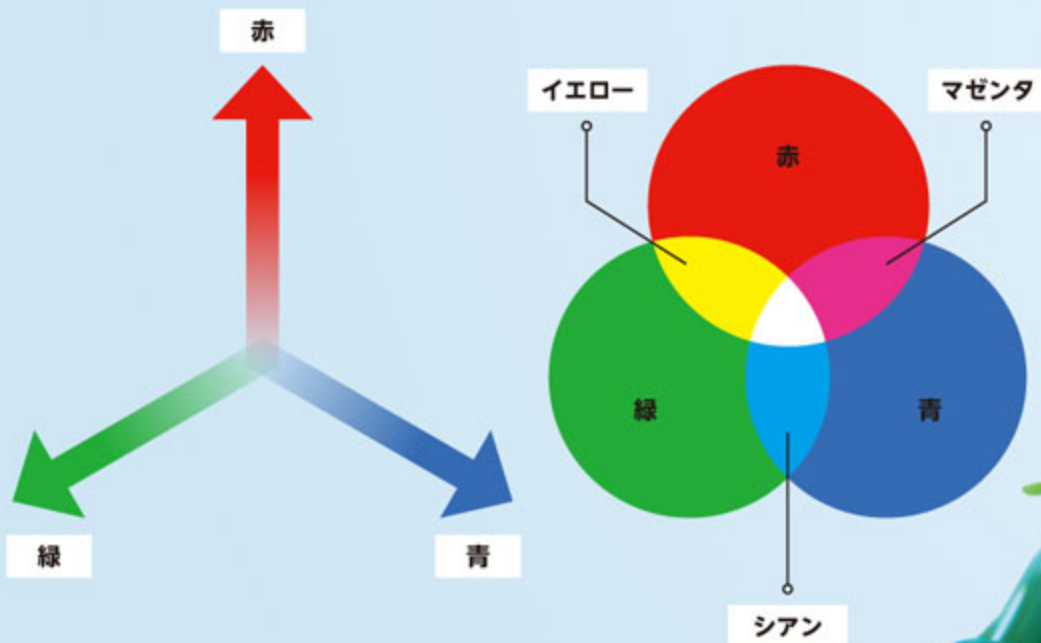
原子核を構成する陽子の数によって、その原子核がどの化学元素になるかが決まる。なかには陽子の数は同じでも中性子の数が異なる原子核があり、それらを同位体と呼ぶ。たとえば、ヘリウム3(陽子2個と中性子1個)とヘリウム4(陽子2個と中性子2個)は、ともにヘリウムの同位体である。

強い力には3種類のチャージがあり、光の三原色のアナロジーでそれを表わす

クォークと色

ここまでに見てきたパターンの発見すべてからは、それらの基礎には一つの対称性が存在することがうかがえた。単に正か負の電荷しかない一次元の対称性から現われてくる電磁気力とは違い、強い力を記述する対称性は三次元で、空間が三次元であるのと同じように、強い力にも関連する3種類の荷が存在するはずだった。すべてのクォークは強い力と相互作用し、したがってこの強い力のチャージを帯びる。

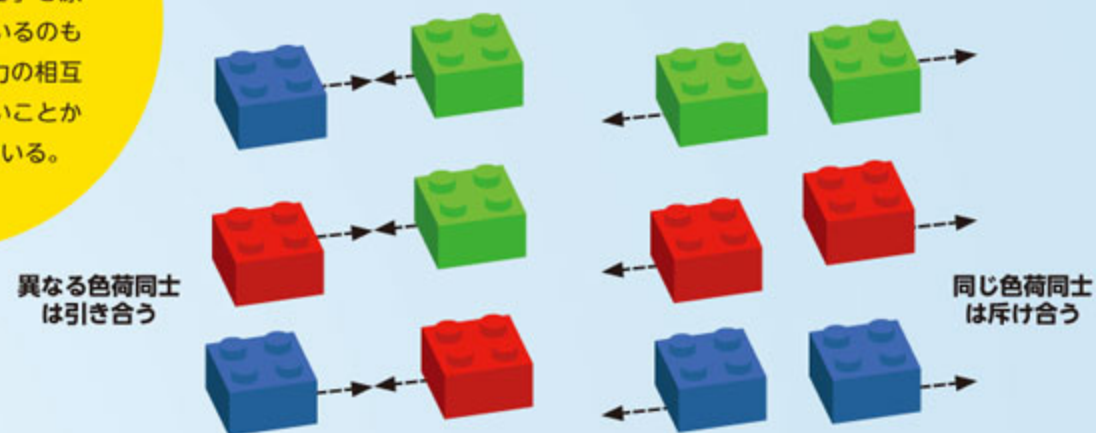
以上のアナロジーとなるものを探しているうちに、物理学者たちは光の三原色の組み合わせに思い至った。そうして、強い力の3種類のチャージに、三原色からそれぞれ赤、緑、青が割り当てられた。この強い力についての色の理論は量子色力学、略してQCDと呼ばれる。



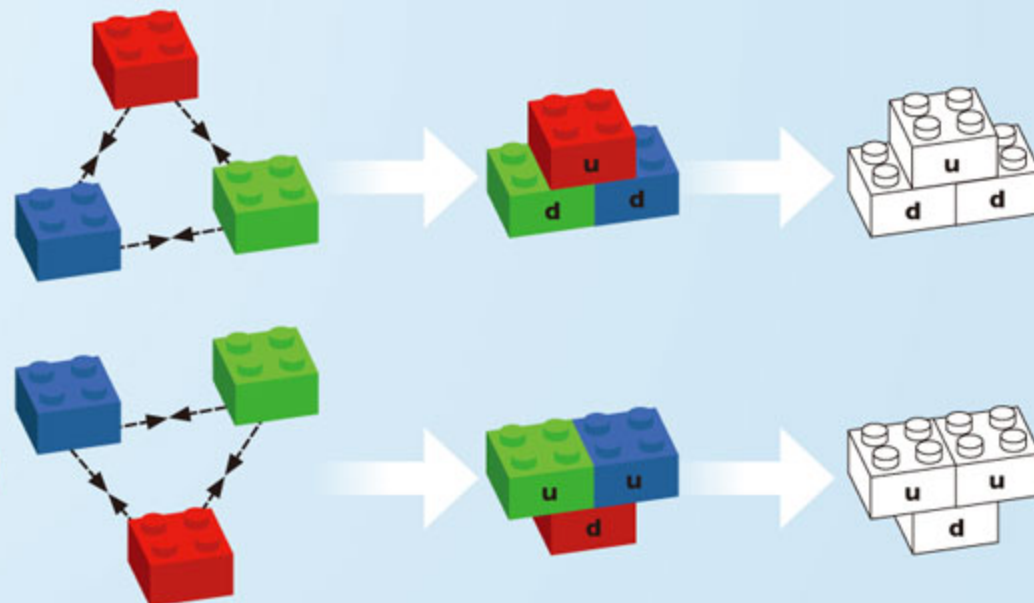
強い力

強い力によって、クォークは互いにまとまりハドロンになる。また、陽子と中性子を原子核内に結びつけているのも強い力だ。あらゆる力の相互作用のなかで最も強いことから、こう名づけられている。

これらのチャージ(色荷)に対しても、電荷と同じルールが適用された。つまり同じチャージ同士であれば斥け合い、違うチャージ同士であれば引き合うのだ。すると、異なる色荷をもつ3種類のクォークができる。



光の三原色を組み合わせれば、色のない白色になる。クォークの場合も、3種類の色荷を組み合わせれば、色荷が中性の粒子になる。電氣的に中性である原子がさらに電子を引きつけないのと同様に、一度中性になったクォークもまた色荷を帯びた粒子をそれ以上、引き寄せることにはない。クォークによって構成されるすべての粒子(ハドロン)の色荷は中性である。

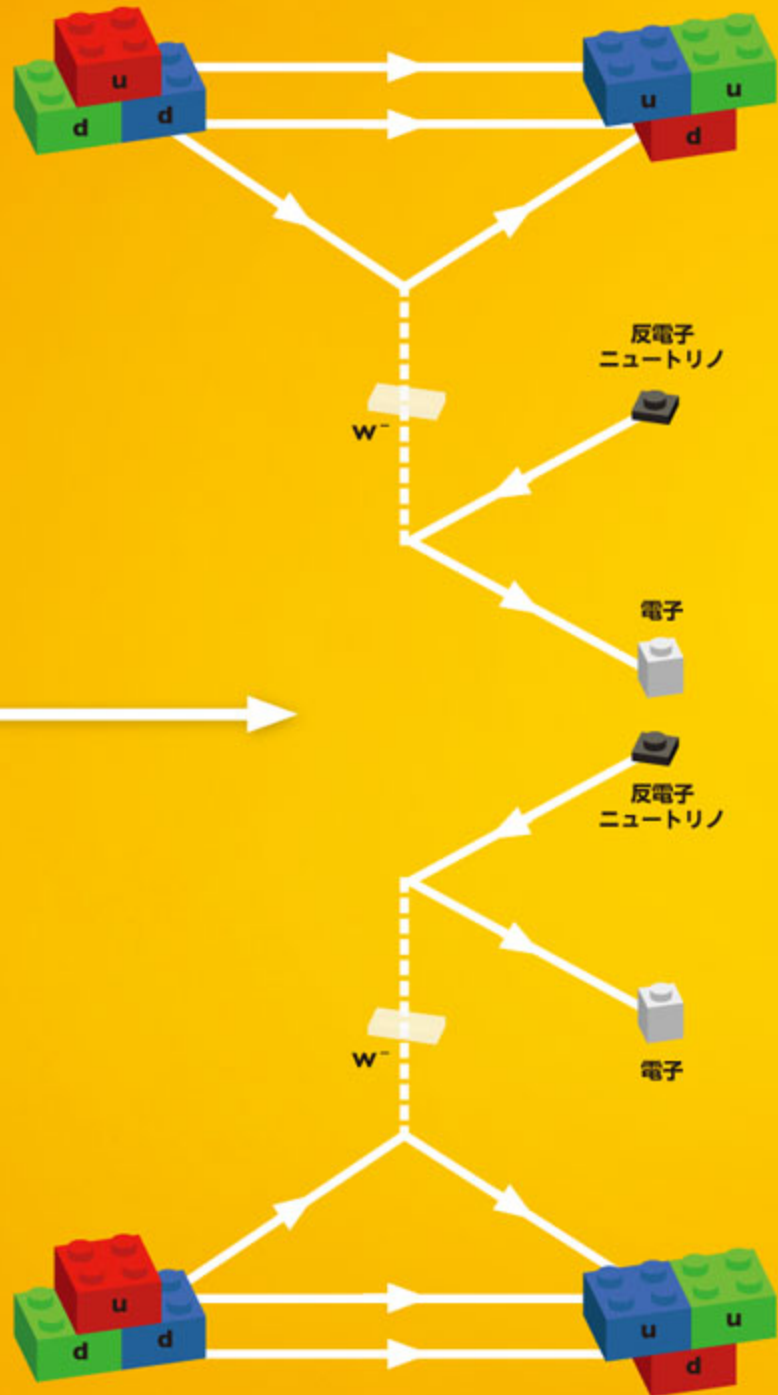


すべてのバリオンがちょうど3個のクォークでできているのにはこうした理由があり、そこには赤、緑、青という強い力の三次元の対称性がそのまま反映されている。

マヨラナニュートリノが存在するのなら、ニュートリノ放射のない放射性崩壊も起こり得る

時間のはじまりを検証する

マヨラナニュートリノが存在するかどうかを検証するためには、ニュートリノがそれ自体の反粒子としてふるまう可能性を調べる必要がある。これは、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊として知られる過程を探ることによって行なわれる。



二重ベータ崩壊とは、原子核内で2個の中性子のベータ崩壊(122~123ページ参照)が同時に起きること、2個の電子と2個の反電子ニュートリノが放射される。一部の放射性同位体で起こることがわかっている。

ベータ崩壊

ベータ崩壊は原子核内の中性子が崩壊する放射性崩壊の一つで、陽子、電子、反電子ニュートリノを生成する。

標準的な二重ベータ崩壊では、解放されたエネルギーの一部がニュートリノで運び去られ、考えられる範囲内のさまざまな量のエネルギーが電子に与えられる。しかし、ニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊では、エネルギーを運び去るニュートリノはなく、そのため放射された電子が考えられる最大量のエネルギーを運び去る。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を探すためには、実験で電子のエネルギーを注意深く計測する必要がある。もし、考えられる最大のエネルギーをもつ電子の数が大幅に超過していれば、その電子は通常二重ベータ崩壊ではなく、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊によって生じたと考えられる。今までのところ思い通りの結果は得られていないが、マヨラナニュートリノの探索は続いている。

マヨラナが提唱した右手系のニュートリノと左手系の反ニュートリノは、観測されたニュートリノの質量を見かけ上の小さな質量に近づけられるほどに、非常に大質量でなければならない。シーソー機構の最も単純なものは重いマヨラナニュートリノの質量を、大型ハドロン衝突型加速器や将来計画されている粒子加速器が到達できるよりもはるかに大きい、およそ 10^{15} GeV/c² にまで引き上げる。それほど大質量の粒子は現在では仮想的にしか存在せず、Wボソンよりもはるかに短い時間に消失する。ということは、マヨラナニュートリノの相互作用、たとえば対消滅などはきわめてまれにしか起こらない。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊が起こる可能性を計測することは、この大質量のニュートリノの寿命を直接計測することでもなる。

重いマヨラナニュートリノは、宇宙が誕生してから1秒に満たない、ほんのわずかな時間しか経っていない高温の頃にだけ、実在の粒子として存在できたと考えられる。その頃の非常に高いエネルギーでは、電磁気力と弱い力が統一されて電弱力となっていただけでなく、強い力を説明する対称性も、この電弱力と結びついてすべてを包含する力になっていた可能性があると考えられる。そのため、ニュートリノがマヨラナ粒子なのか、そうでないのかを理解しようとするのは、最初期の宇宙と力の起源という、さらに壮大な問いかけをすることになるのだ。

ニュートリノを伴わないベータ崩壊とは、もうおわかりと思うが、二つのベータ崩壊が同時に起きて、しかもニュートリノは放出されないというものだ。この反応は、ニュートリノがマヨラナ粒子(それ自体が反粒子)で、互いに対消滅する場合にのみ可能である。

