

エポックⅡ：宇宙の晴れ上がり

～輻射と物質の時代の終わり & 暗黒時代の始まり（前編）

福江 純（大阪教育大学）

1. 無色透明あるいは暗黒の時代——宇宙の晴れ上がり

純白の時代の次には、暗黒の時代が到来する。

それまで光とエネルギーに満ちていた宇宙は暗転し、宇宙開闢時の残光以外、何一つ見えなくなってしまった。暗黒というよりは、宇宙全体が無色透明になってしまったといった方が適切だろう。宇宙開闢時の残光は、相変わらず宇宙全体を 1000K ほどの温度で赤黒く照らしてはいたが、その時代の宇宙で光り輝くモノが見あたらないのである。宇宙が晴れ上がり無色透明になったのは、宇宙開闢から計って約 38 万年（赤方偏移は約 1088）、宇宙のサイズは約 1 億光年（現在の約 100 分の 1）のことである。

さて、エポックⅠで詳しく紹介した、宇宙（時空）の誕生および時空相の変化と平行して起こったのが、物質の誕生および物質相の変化である。今回は、主に物質相の変化に焦点を当てて、宇宙が晴れ上がるまでの、宇宙初期の状況を紹介していきたい。

宇宙初期の物質相の歴史を綴ったのが表 1 である。エポックⅠの表 1（『天文教育』2007 年 5 月号 11 ページ）の短縮版みたいだが、主に、温度の変化——熱史——に注目している。初回とかなり数値が違うところもある。今回の方がいいはずだが…。また、図 1 には温度変化のおおまかなグラフを描いておく（詳しくは、第 5 節 [次号掲載予定] 参照）。

表 1 宇宙の熱史

時間	赤方偏移	温度	主な出来事
0	∞	∞	無からの宇宙（時空）の誕生
【第 0 の相転移】			
プランク時間			時空の量子的ゆらぎの終わり
【第 1 の相転移：重力と強い力の分離】			
10^{-44} 秒	10^{32}	10^{32} K	重力が誕生する
【第 2 の相転移：強い力と弱い力の分離】			
10^{-36} 秒	10^{28}	10^{28} K	強い力が誕生しバリオン数が発生する
【第 3 の相転移：弱い力と電磁力の分離】			
10^{-11} 秒	10^{15}	10^{15} K	電子が誕生する
【第 4 の相転移：クォークがハドロンに】			
10^{-6} 秒	10^{13}	10 兆 K	陽子・反陽子の対消滅
10^{-4} 秒	10^{12}	1 兆 K	中間子が対消滅しクォークがハドロンになる
10^{-2} 秒	10^{11}	1000 億 K	ν_{μ} 分離
3 秒	10^{10}	100 億 K	ν_e 分離
100 秒	10^9	40 億 K	電子・陽電子が対消滅し光（エネルギー）になる
100 秒	10^8	10 億 K	元素合成の開始 (He, D, Li など合成)
【輻射の時代の終わり & 物質の時代の始まり】			
4万7000年	3570	9700K	等密度時
【宇宙の晴れ上がり：再結合時代】			
24 万年	1370	3700K	陽子と電子が再結合
38 万年	1088	3000K	晴れ上がり：最終散乱
【宇宙の再電離】			
2 億年	10	30K	初代天体の形成と宇宙の再電離
10 億年	5	16K	クエーサー形成
30 億年	2	8K	銀河ができる

表 1 (続き)

90 億年	0.3	3.5K	太陽と地球の誕生
137 億年	1	2.7K	現在
190 億年頃	約 50 億年後		太陽の赤色巨星化
1 兆年頃			銀河の老齢化
100 兆年頃			星が燃え尽きる
10 ³² 年頃			陽子の崩壊
10 ¹⁰⁰ 年頃			ブラックホールの蒸発

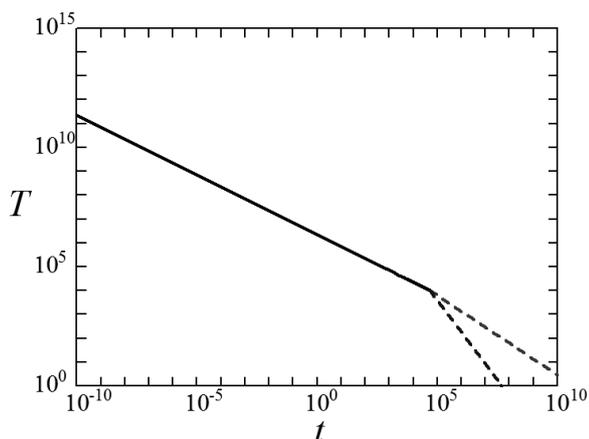


図 1 宇宙開闢時から計った時間 (横軸: 年) の関数として表した物質 (プラズマ) および輻射 (光) の温度 (縦軸: K) のグラフ
宇宙の晴れ上がり (正確には、晴れ上がりより少し前の等密度時) が起こった約 5 万年までは、物質と輻射は熱平衡になっていて温度は等しく、共に時間の $-1/2$ 乗で減少する (実線)。宇宙が晴れ上がって物質と輻射は袂をわかった後は、輻射の温度は時間の $-2/3$ 乗で減少する (上の破線) が、物質の温度は時間の $-4/3$ 乗で減少する (下の破線)。実際には再電離などがあるので、この通りではないが。

以下、次の第 2 節で物質粒子と力の粒子についてまとめた後、第 3 節で宇宙膨張に伴う物質や輻射の温度変化、すなわち宇宙の熱史を計算する。その後、第 4 節で力の分離と物質の誕生を述べ、さらに第 5 節で宇宙初期の元素生成について紹介する。最後に第 6 節で、いわゆる宇宙の晴れ上がりがどのように起こ

ったのかを詳説しよう (第 3 節以降は次号に掲載予定)。

……とまあ書いたが、表 1 まで書いて、いったん筆を置いたのが 3 月 1 日、今日が 7 月 20 日だから、半年近く間が空いてしまった。気長にやることにしたい。

2. 物質粒子と力の粒子

現在の宇宙の基本粒子は、物質を作っている「物質粒子」としては 36 種類のクォークと 12 種類のレプトンが、物質粒子の間に働く力を媒介する「力の粒子」としては 20 種類ほどのゲージ粒子があると考えられている。物質粒子はすべてフェルミ粒子であり、ゲージ粒子はすべてボース粒子である (後述するが、同じ量子状態には一つの粒子しか存在できないという「パウリの排他律」にしたがう粒子がフェルミ粒子で、そうでないものがボース粒子)。

というまとめを書いて、いきなり W ボソンなどの基本粒子の表を出すのも乱暴なので、やや冗長になるかもしれないが、標準的な段取りにしたがって、物質を分解していくことにしよう (図 2)。

2.1 原子と分子

身のまわりの物体は、生物も無生物も、形あるものも形ないものも、すべて原子や分子からできている。日常的なレベルにおいて、水素や炭素のようなものを形作っている最小の構成要素が「原子 (atom)」で、また水やタンパク質など原子がいくつか集まったものが「分子 (molecule)」だ。

古代ギリシャでは物質にはそれ以上は分割できない最小の単位があると思案し、分割できないという意味の“アトモス (atomos)”という名前を与えた (=a[できない]+tomos [分割する])。それが atom の語源であることは比較的よく知られているだろう。また紀

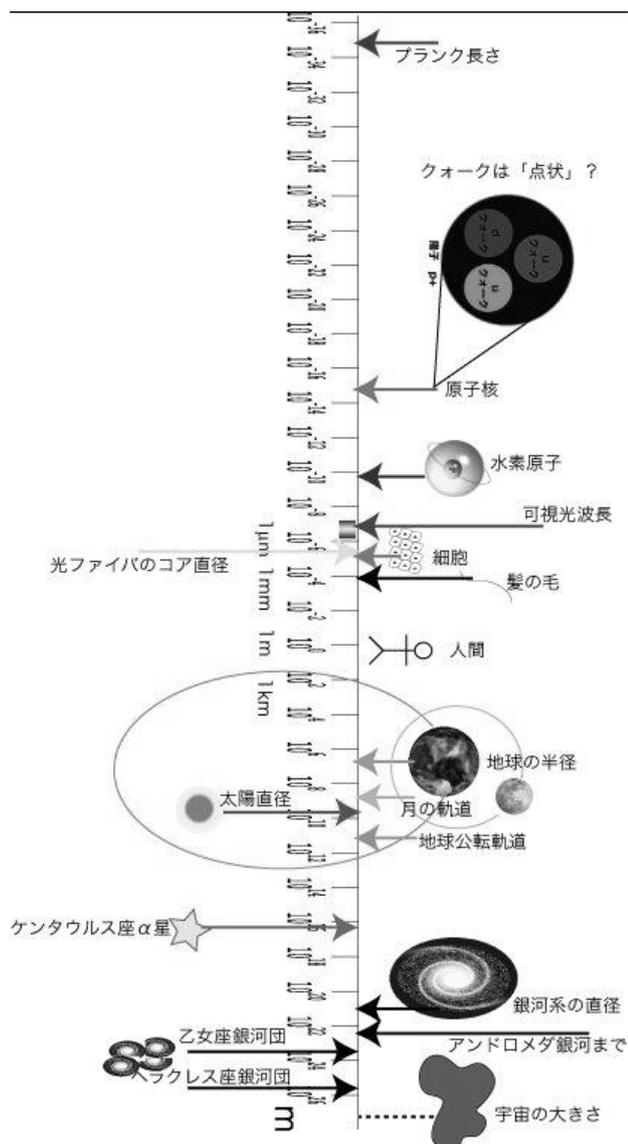


図2 プランクスケールから宇宙まで
(出典 <http://yukimura.hep.osaka-cu.ac.jp/>)

元前5世紀の自然哲学者デモクリトスは「すべての物質は原子と真空からできている」と主張した。現在なら「すべての物質は基本粒子と量子真空からできている」と言うべきだろうが、たんに言葉が置き換わっただけで、本質的な見方はそんなに変わらないかも知れない。

さて、原子の中には、たとえば、水素と重水素と三重水素のように、質量は少し違うものの化学的には似た性質の原子がある—いわゆる「同位体 (isotope)」と呼ばれる (図3)。



図3 水素 (H: 左) と重水素 (D: 中) と三重水素 (T: 右)

水素の原子核は1個の陽子、重水素は1個の陽子と1個の中性子、三重水素は1個の陽子と2個の中性子からできている。

そこで個々の粒子を表す原子に対して、同種の原子を一括りにして「元素 (element)」と称する。そして化学的な性質にしたがって元素を並べたものが、いわゆる元素の周期律表だった。原子の種類は数千種類もあるが、元素にまとめたら約百十種類ほどになる。

また分子で、酸素分子のように2個の原子が結合したものを2原子分子、アルコール分子やC60 (フラーレン) のように複数の原子が結合したものを多原子分子、そしてタンパク質やDNAのように非常に多くの原子が集まったものを高分子という (図4)。逆に、ヘリウムやアルゴンは分子を作らないので、原子1個で分子とみなし、単原子分子と呼ぶ。

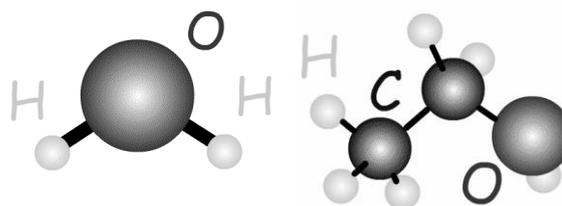


図4 水分子 (左) とアルコール分子 (右)

2.2 陽子と中性子と電子

水素や酸素のような物質として意味をもつ最小の構成単位である原子は、陽子や中性子からなる原子核と電子からできている (図5)。陽子と中性子の質量はほぼ同じで (中性子の方が0.1%ほど重い)、共に電子の質量の約1864倍ほどある。原子核の大きさは原子の

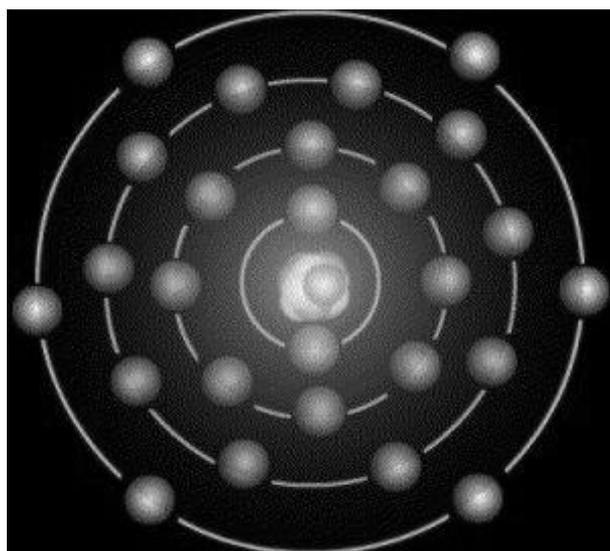


図5 鉄の原子のモデル

通常の鉄原子は26個の陽子と30個の中性子からなる原子核と、そのまわりの26個の電子からできている。

10万分の1程度しかなく、原子の内部はほとんど空虚だといえる。原子核を構成している陽子と中性子を併せて「核子 (nucleon)」と総称する。これらの粒子は宇宙全体で 10^{80} 個ぐらいあると見積もられている（宇宙全体に含まれている通常物質の質量を核子1個の質量で割り算して見積もる）。

原子の化学的性質を決めるのは原子核に含まれる陽子の個数——「原子番号 Z」——で、原子の質量を決めるのは原子核に含まれる陽子と中性子の総数——「質量数 A」——である（電子の質量は陽子の約2000分の1しかないので、通常は無視する）。

原子核を壊すのは大きなエネルギーが必要だが、原子核のまわりの電子は日常的な化学エネルギーで簡単に離れたり結合したりする（オーダーとしては1eV程度で）。というより、多くの場合は電子をやり取りすることによって、日常の化学反応や生体反応は生じているわけだが。

よく知られているように、陽子は正の電荷をもち、電子は負の電荷をもっていて、原子

核と電子を結びつけているのはそれらの間に働く電磁力だ。また同じく、原子同士が電磁気的な力で結びついて分子ができている。ただし、正に帯電した陽子などを原子核に閉じ込めているのは、別の力——強い力——である。

なお、あらゆる粒子にはそれぞれ、電荷などの量子力学的性質がまったく逆の「反粒子」が存在する（図6）。たとえば、陽子と反陽子、中性子と反中性子、そして電子と陽電子などだ。電荷をもたない中性の粒子にも反粒子はあるし、また光子自身の反粒子は光子である。

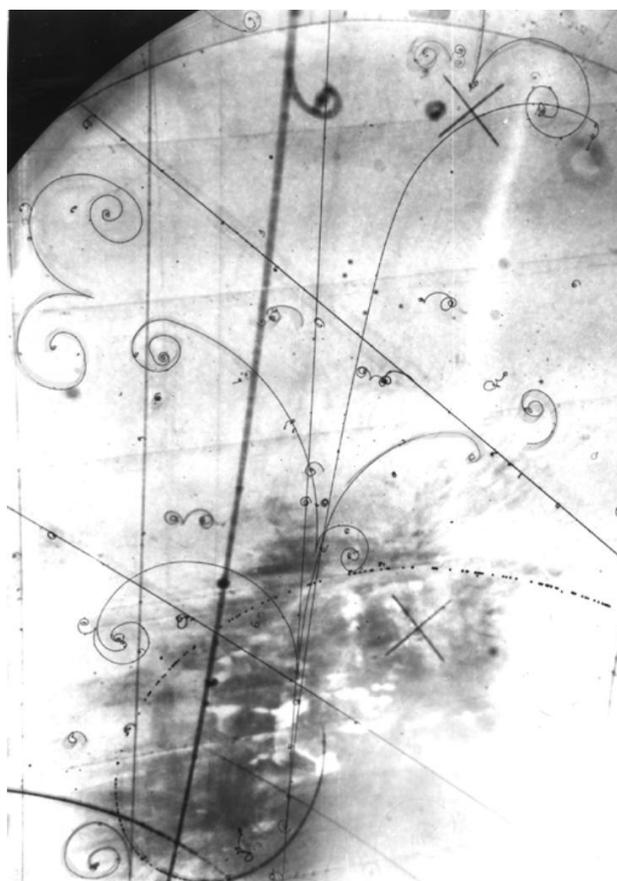


図6 電子陽電子対生成の軌跡

（出典：CERNのホームページ

<http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2002/Bubblech/mbitu/ELECTRON-POSITRON3.jpg>)

粒子と反粒子が出会うと、お互いに消滅してエネルギーに変わる——「対消滅 (pair annihilation)」と呼ぶ。逆に、非常に大きなエネルギーからは粒子と反粒子を対で発生させることもできる——「対生成 (pair creation)」と呼ぶ。たとえば、陽子と電子からなるプラズマの温度をどんどん上げていくと、およそ 60 億 K ぐらいで、熱運動によって飛び回っている電子の運動エネルギーが、電子自身の質量と等価なエネルギーすなわち静止質量エネルギーと同じくらいになる。そのような超高温プラズマの内部では、陽子と電子の衝突、電子と電子の衝突、陽子と光子の衝突、電子と光子の衝突、そして光子と光子の衝突などの際に、余剰の運動エネルギーから電子と陽電子が対生成するようになる。

反粒子の存在は、もともとはイギリスの物理学者ディラックが理論的に予言していたものだ。彼は 1928 年に導いた電子の相対論的方程式 (ディラック方程式) の解として、通常の電子と反対の性質をもつ粒子が許されることに気づき、反粒子の存在を提唱した (図 7、図 8)。そして 1932 年になって、アメリカの物理学者のカール・アンダーソンが、宇宙線の研究中にディラックの予言した正の電荷をもつ電子、すなわち陽電子を発見した。

というわけで、1932 年頃の段階では、既知の物質粒子は、陽子、中性子、電子とそれらの反粒子で、全部で 6 種類しかない、まだまだシンプルな時代だった。ちなみに、ヴォルフガング・パウリがニュートリノを予言した

ディラック方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = (c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2) \psi(\mathbf{r}, t)$$

図 7 ディラック方程式

文様と思って眺めてもらえればいだろう。ぼくも解いたことはない。



図 8 ポール・エイドリアン・モーリス・ディラック (Paul Adrien Maurice Dirac ; 1902~1984)

ディラック方程式によって、1933 年のノーベル物理学賞を受賞。

(出典 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Dirac_4.jpg)

のが 1930 年で、実際に発見されたのが 1950 年代。湯川秀樹が中間子を予言したのが 1935 年で、実際に発見されたのが 1947 年である。

2.3 ハドロンとレプトン

かつては、物質を構成する粒子として知られていたのは、陽子と中性子と電子だけで、それらが素粒子と呼ばれていた。その後、反粒子が見つかったり、ニュートリノが必要になったり、中間子が発見されたり、他にも多くの“素”粒子が発見され、それらの整理が必要になった。その結果、いわゆる素粒子は、強粒子ハドロン、重粒子バリオン、中間子メソンや軽粒子レプトンなどに分類されている。

原子核はプラスの電荷を帯びた陽子と電荷をもたない中性子からできているが、そのままと陽子のプラスの電荷によって原子核はバラバラに壊れてしまう。原子核がバラバラにならないために、核子 (陽子と中性子) 同士を結びつける働きをしているのが、湯川秀樹 (1907~1981) の予言したパイ中間子だ。

電磁氣的な力に反して核子同士をつなぎとめておくためには、この力—「核力 (nuclear force)」と呼ぶ—は非常に強くなければならない。ただし、電磁氣的な力は無限遠まで届くが、核力は原子核の大きさ (約 10^{-15}m) 程度しか届かない (図 9)。これを「強い力 (strong force)」とか「強い相互作用 (strong interaction)」と呼んでいる。

湯川ポテンシャル

$$V = \frac{1}{r} e^{-\kappa r}$$

図 9 湯川ポテンシャル

電磁場や重力場のポテンシャルは $1/r$ の形をしているので、無限遠の距離 r までポテンシャルが広がっているが、核力のポテンシャルは指数項があるために、ある距離で急激に減少する。

核子や中間子のように核力を感じる物質粒子を「強粒子 (ハドロン、hadron)」と総称する。またハドロンは、核子のように比較的質量の大きな「重粒子 (バリオン、baryon)」と、核子よりは軽いが電子よりは重い「中間子 (メソン、meson)」に大別される (表 2)。

さて、中性子は原子核の中にある間は安定だが、核分裂などで原子核の外に出ると、15分ほどで崩壊する。このとき、1個の中性子は、1個の陽子と1個の電子と1個の反ニュートリノに崩壊する。かつて電子のことをその正体が不明だったときにベータ線と呼んでいたので、この崩壊過程は中性子のベータ崩壊と呼んでいる。このベータ崩壊で放出される反ニュートリノはニュートリノの反粒子だが、どちらも電荷をもたず核力も働かない、質量もほとんどゼロの素粒子だ。この中性子の崩壊には核力は関与していないので、中性子の崩壊を引き起こす力を「弱い力 (weak force)」とか「弱い相互作用 (weak interaction)」と呼んでいる。

表 2 “素” 粒子の分類

ハドロン (強粒子)
バリオン (重粒子)
核子 (陽子、中性子)、
Δ 粒子、 Λ 粒子、 Σ 粒子、 Ξ 粒子
メソン (中間子)
パイ中間子、K 中間子、
Ω 中間子、 η 中間子
レプトン (軽粒子)
電子、ミュー粒子、タウ粒子
電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ

電子やニュートリノのように、核力は感じないものの、電磁氣力と弱い力を感じる物質粒子を「軽粒子 (レプトン、lepton)」と総称する (表 2)。

そろそろ混乱の度合いも深まってきた(笑) ころだと思うので、日本語と英語には微妙にずれもあるし、ここで用語について、ちょっとだけエクスキューズしておきたい。

物質の性質を示す基本構成粒子が「原子 (atom)」だった。原子に下位構造があることがわかり、陽子や中性子や電子など、原子を作っているもっと小さな構成粒子を「素粒子 (subatomic particle)」と呼ぶことになった。ここは英語の方がそのまま素直だが、日本語の方が言葉としては綺麗だと思う (なお、素粒子物理学は particle physics)。その後、ニュートリノや中間子や多数の粒子が“素”粒子と呼ばれるようになった。さらに、次に述べるクォークなどが見つかってきて、現時点で一番下位 (?) の構成要素を「基本粒子 (fundamental particle/elementary particle)」と呼んでいる。

2.4 クォークとレプトン：物質粒子

ハドロンにはたくさんの種類が見つかって、すべてが“素”だとは思えなくなってきた。そこで提唱されたのが、ハドロンを構成する

基本粒子「クォーク (quark)」である。重粒子バリオンは三つのクォーク (三つの反クォーク) からできており、中間子メソンは一つのクォークと一つの反クォークからできていると考えると、少ない種類のクォークですべてのハドロンを説明することができるようになった (図 10、図 11)。

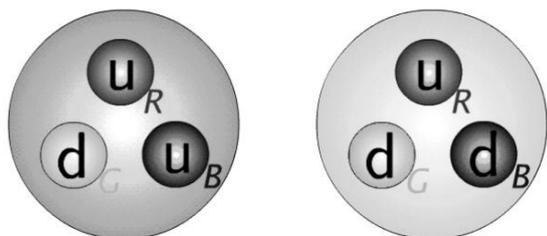


図 10 核子に代表されるバリオンは三つのクォークからできている

クォークには色荷と呼ばれる“電荷”があって、必ず3種類の違った色荷が混ざるようになっている。

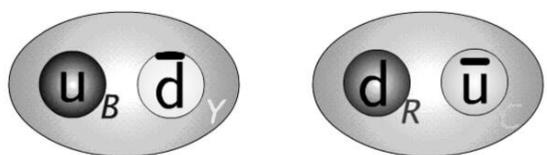


図 11 中間子は二つのクォークからできている

クォークには“世代”があって、「アップ、ダウン」、「チャーム、ストレンジ」、「トップ、ボトム」と名づけられている (表 3)。そしてたとえば、陽子は2個のアップクォークと1個のダウルクォーク、中性子は1個のアップクォークと2個のダウルクォーク、マイナスK中間子はストレンジクォークと反アップクォークからできている、などと考える。またレプトンにも対応する世代があって、「電子、電子ニュートリノ」「ミュー粒子、ミューニュートリノ」「タウ粒子、タウニュートリノ」となる。

表 3 基本粒子と世代

	クォーク	レプトン
第一世代	アップ ダウン	電子 電子ニュートリノ
第二世代	チャーム ストレンジ	ミュー粒子 ミューニュートリノ
第三世代	トップ ボトム	タウ粒子 タウニュートリノ

ただし、クォークはとても奇妙な性質をもっている。まず整数ではなく $2/3$ などのような分数電荷をもっている。またクォークを単体として取り出すことができず、ハドロンの中に閉じ込められている。さらにクォークは、“赤”“緑”“青”の「色荷 (color charge)」と呼ばれる電荷のような量子数を持ち、三つのクォークが結合してバリオンを作るときは、必ず3種の色荷をもったクォークが組み合わさって“白色”になる。そして異なる色のクォーク同士は「グルーオン (膠着子)」と呼ばれる力の粒子を交換して結びついている。



図 12 ゲルマン (Murray Gell-Mann; 1929~) アメリカの物理学者。クォークの命名者でもある。素粒子物理学における業績によって 1969 年のノーベル物理学賞を受賞した。複雑系で有名なサンタフェ研究所の設立者の一人でもある。そういえば、一時期めちゃくちゃ流行った複雑系だが、最近複雑系の研究は進展しているのだろうか？

(出典 <http://www.santafe.edu/~mgm/>)

ちなみに「クォーク」という変わった名前は、クォークの提唱者であるアメリカの物理学者マレー・ゲルマン（図12）が、ジェイムズ・ジョイスの小説『フィネガンズ・ウェイク』（河出書房新社）に出てくる、鳥の鳴き声から付けたものだ。リサ・ランドールの『ワープする宇宙』によると、共通点は、3 という数字と変わっているということだけらしい。

クォークを導入することで、ハドロンとレプトンの代わりに、クォークとレプトンが物質を構成する基本的な素粒子となった。以上をまとめると、結局、現在のところ、6種類（色荷を考えると18種類、反粒子を考えると36種類）のクォークと6種類のレプトンが物質の基本粒子のすべてだ（表4、表5、表6、表7）。また、中間子をやり取りすると考えた核力（強い相互作用）については、実はクォーク同士の相互作用こそが真の意味での強い相互作用だったことがわかる。

表4 基本粒子クォーク

名前	記号	電荷 [e]	スピン	質量 [MeV]
アップ	u	2/3	1/2	5
チャーム	c	2/3	1/2	1000?
トップ	t	2/3	1/2	200000?
ダウン	d	-1/3	1/2	8?
ストレンジ	s	-1/3	1/2	100?
ボトム	b	-1/3	1/2	4000?

表5 複合粒子メソン（中間子）

名前	記号	電荷 [e]	スピン	質量 [MeV]
パイ中間子(ud)	π^\pm	± 1	0	140
	π^0	0	0	135

表6 複合粒子バリオン（重粒子）

名前	記号	電荷 [e]	スピン	質量 [MeV]
陽子(uud)	p	1	1/2	938.3
中性子(udd)	n	0	1/2	939.6

表7 基本粒子レプトン（軽粒子）

名前	記号	電荷 [e]	スピン	質量 [MeV]
電子	e^-	-1	1/2	0.511
ミュー粒子	μ^-	-1	1/2	106
タウ粒子	τ^-	-1	1/2	1777
電子ニュートリノ	ν_e	0	1/2	?
ミューニュートリノ	ν_μ	0	1/2	?
タウニュートリノ	ν_τ	0	1/2	?

2.5 ゲージボソン：力の粒子

現在、自然界における力の場としては、原子核と電子や原子と原子同士を結びつける電磁相互作用、原子核が壊れないように核子同士をつなぎ止めている強い相互作用（強い力）、中性子の自然崩壊を引き起こす弱い相互作用（弱い力）、そして、質量をもった物質・エネルギーの間に働いて宇宙の巨視的な構造を支配する重力が知られている（表8）。

現代の物理学では、これらの力の場も、それぞれの力を介在する粒子——「ゲージ粒子」と呼ばれる——が存在していて、力の粒子の交換で力の場が生じると考える（表8）。たとえば、荷電粒子の間で交換されて電磁力を伝えるのが「光子（フォトン、photon）」だ。また、弱い相互作用を伝えるのが「弱ボース粒子（ウィークボソン、weak boson）」、強い相互作用を伝えるのが「膠着子（グルーオン、gluon）」である。そして重力を伝える質量のない粒子が「重力子（グラビトン、graviton）」になる。ウィークボソンには、電荷をもった

W 粒子 (W は weak の W) と、中性の Z 粒子 (Z は電荷 zero の Z) がある (表 8)。

なお、これらの力を伝えるボース粒子のうち、光子、Z 粒子、膠着子、重力子は、自分自身がその反粒子になっている。

表 8 自然界における四つの力

力を感じる粒子		力を伝える粒子
電磁力	荷電粒子	フォトン (光子) γ
弱い力	クォーク レプトン	ウィークボソン W^{\pm} & Z^0 (弱ボース粒子)
		ヒッグス粒子
強い力	クォーク	グルーオン (膠着子) g
重力	すべての粒子	グラビトン (重力子) G

こうして、現代素粒子物理学では、物質粒子 (物質場) も力の場 (力の粒子) も同じ枠組みで扱うことができるようになった。ただし、最初に触れたように、物質粒子と力の粒子には一つだけ大きな違いがある。それはパウリの排他律にしたがうか否かだ。1925 年に物理学者のヴォルフガング・パウリ (1900~1958) が提唱した、二つ以上の粒子がまったく同一の量子状態をもつことはできない、という仮定が「パウリの排他律」である。このパウリの排他律にしたがう粒子を「フェルミ粒子 (フェルミオン、fermion)」、したがわれない粒子、すなわち同一の量子状態にいくつでも入れる粒子を「ボース粒子 (ボソン、boson)」と呼ぶ。そして、陽子や中性子や電子など物質粒子はすべてフェルミオンなのに対し、光子など力のゲージ粒子はすべてボソンである (表 9)。

以上をまとめると、結局、現在のところ、光子、W 粒子、Z 粒子、8 種類のグルーオン (グルーオンの数だけ少し不安)、重力子の 12 種類 (反粒子を考えると 24 種類) のゲージボソンが力の基本粒子のすべてだ。

表 9 ゲージ粒子 (力の粒子)

名前	記号	電荷 [e]	スピン	質量 [MeV]
光子	γ	0	1	0
ウィークボソン	W^{\pm}	± 1	1	80000?
	Z^0	0	1	91000?
グルーオン	g	0	1	0?
重力子	G	0	2	0

実は、これ以外に、重力を生むスピン 0 のヒッグス粒子というものもあるのだが、あまりにもわからないので、省略した。

また、まだまだこの後に、超対称性粒子 (supersymmetric particle ; SUSY 粒子) とか超ひも理論などがあるのだが、現在の物質宇宙を考えるだけなら、以上までの範囲でいい、かな。

ちなみに、ゲージボソンをイメージできる

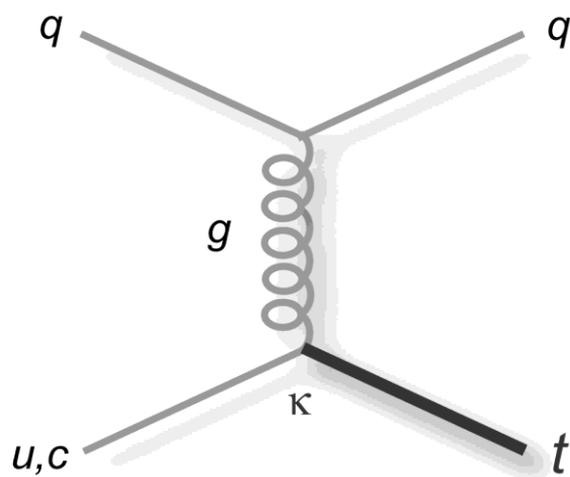


図 13 クォークの相互作用を表すファインマン図

おそらく (笑)、クォーク同士が衝突したとき、グルーオンを介して、アップ (またはチャーム) クォークがトップクォークになる反応だと思う。

(出典 http://www-d0.fnal.gov/Run2Physics/top/top_public_web_pages/top_feynman_diagrams.html)



図 14 スタートレックの光子魚雷

（出典 <http://discovery.scifi-art.com/torpedoes/akiratorp.jpg>）

ような何かいい絵はないかとググってみたが、*photon*/*weak boson*/*gluon*/*graviton* などの用語で画像検索しても、ファインマン図ぐらいしか出てこない（図 13）。さすがにゲージボソンあたりになると、絵にしにくいようだ。図 14 みたいなものもヒットした。

・・・つづく・・・

参考文献

福江 純（2005）『100 歳になった相対性理論 -アインシュタインの宇宙遺産-』、講談社。

ミチオ・カク（2006）『パラレルワールド -11 次元の宇宙から超空間へ-』（斉藤隆央 訳）、NHK 出版。

バーバラ・ライデン（2003）『宇宙論入門』（牧野伸義 訳）、ピアソン・エデュケーション。
Gerhard Borner（1993）“The Early Universe”，Springer-Verlag。

リサ・ランドール（2007）『ワープする宇宙 -5 次元時空の謎を解く-』（塩原通緒 訳）、NHK 出版。

7 月ぐらいだかに、生協に平積みされていて、気になっていたが、かなり分厚いので躊躇していた。そしたら、グッドタイミングで『日経サイエンス』に書評を頼まれたので、棚ぼたで読んだら、これが思いの外、読ませる。宇宙論の本では近年まれにみる好著だった。

福江 純（大阪教育大学）