

毎日がパズルの連続だ!

— 素粒子物理学研究の現場より —

経営情報学部 小出義夫

物理学研究者にとっては、毎日がパズルの連続である。自然界には、分かっていることより、分かっていないことの方がはるかに多い。1つの謎が解けると、そこにまた今まで見えなかった新たな謎が見えてくる。物理学者は、毎日をわくわくしながら、これらの謎に取り組み、そしてしばしば思い切ったギャンブル(仮説の提唱)を行う。物理学研究という仕事は、一度味わってしまうともう止めることのできない快樂の極地である。その楽しみ的一端を皆さんにも味わってもらいたいと考え、「素粒子物理学」研究の中から、過去に謎と言われたトピックス(すでに解かれている)、および、現在も謎と言われているトピックスについて、そのいくつかを紹介しよう。話を聞くだけでなく、一緒に考えてみて欲しい。

目次

I. 素粒子とは(予備知識)	2
II. すでに解かれているパズル	4
2.1 素粒子(ハドロン)の規則性をどう理解するか? — クォーク仮説の登場(1964年) —	4
2.2 なぜ自然界では $(q\bar{q})$ と (qqq) の組み合わせしか存在しないのか? — カラー理論の登場(1964年～1972年) —	8
2.3 写真乾板に3次元立体像を記録するには? — 新粒子(Niu event)の観測(1971年) —	8
III. まだ解かれていないパズル	11
3.1 世代の起源は何か?	11
3.2 質量スペクトルに規則性はあるか?	12
3.3 ニュートリノの謎	13
IV. 解答編	14
4.1 問 2.1 の解答: 複合粒子モデルの裏歴史	14
4.2 問 2.2 の解答: 「量子色力学」の発展	18
4.3 問 2.3 の解答: 日本が世界に誇る実験技術	21
参考文献	24

I. 素粒子とは (予備知識)

物質は「分子」から作られる。その分子は「原子」から作られる。その原子は、図 1.1 に示されるように、中心の「原子核」と呼ばれる部分と、その周りを回る「電子」 e^- から構成される。その原子核は、更に、「陽子」 p と「中性子」 n とから作られている。この陽子と中性子は、約 10^{-15} m (原子の大きさの約 10 万分の 1) という小さな領域に密着して結合しており、この強力な結合力を生み出す媒介粒子として、1935 年に湯川の予言した「パイ中間子」 π の存在が知られている。

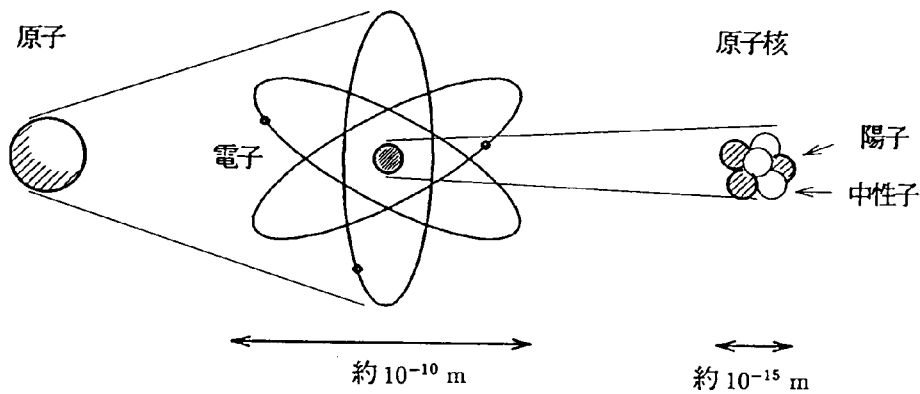


図 1.1 原子の概念図

これらの物質の基本構成粒子、 e^- , p , n , π , \dots を、「素粒子 (elementary particle)」と呼ぶ。特に、 p , n , π , \dots は、互いに強い力を及ぼし合う粒子であり、これらを「ハドロン」と呼ぶ¹。

1948 年、カリフォルニア大学バークレイで、素粒子を人工的に加速して衝突実験を行う装置、シンクロサイクロトロンが完成したことをきっかけに、今まで知られていなかった新顔の素粒子 (ハドロン) が続々と発見されだした。もはや、これら素粒子は到底「素」粒子と考えることはできないくらいの数に増えた。しかも、それらハドロンの性質は、原子における周期律表のような、ある種の規則性が見られた。

1964 年、アメリカのゲルマン (M. Gell-Mann) は、これら素粒子 (ハドロン) は、更に「クォーク (quark)」と呼ばれる 3 種の基本粒子 $q = (u, d, s)$ から構成される複合粒子であるという仮説を提唱した [1]。今日では、このクォーク模型はすでに確立した理論として受け入れられている (ゲルマンはその功績により 1969 年度ノーベル物理学賞を受賞)。こうして、物質の最小基本単位は、素粒子ではなく、「クォーク」と「レプトン」ということになった。

ところが、1974 年に、第 4 のクォーク c の存在を示す実験結果 [2] が報告されたことを皮切りに、1977 年には第 5 番目のクォーク b が、1995 年には第 6 番目のクォーク t が発見

¹ これに対して、電子 e^- や、中性子 n の自然崩壊のときに放出される質量がほとんどゼロで荷電もゼロの粒子、ニュートリノ (中性微子) ν などは、強い相互作用を行わず、「レプトン」と呼ばれる。

され、この基本粒子「クォーク」の数もまたどんどん増え続けている。これらクォークは、本当に究極の物質構成粒子と考えてよいのであろうか？ 一方で、強い相互作用を行わない粒子「レプトン」の種類もまた、クォークの増加に対応して、増え続けている（詳しくは、3.1節を参照）。クォークとレプトンは何か統一的に記述されるべき存在物なのであろうか？

II. すでに解かれているパズル

素粒子物理学の進展の中で、かつては謎とされ、現在ではその答が分かっているものの中から、そのいくつかのパズルについて紹介する。基本的には、組み合わせの問題であり、そんなに難しくはないはずである。「素粒子」の難しい名前なんか気にしないで、単なる記号の組み合わせと思って、楽しんでみて欲しい。なお、解答は、最後の節 (IV) で与えられる。

2.1 素粒子 (ハドロン) の規則性をどう理解するか?

— クォーク仮説の登場 (1964 年) —

[問題]

2次元平面 (I_3, Y) に、図 2.1 (a), (b) のように格子点が配列されている。

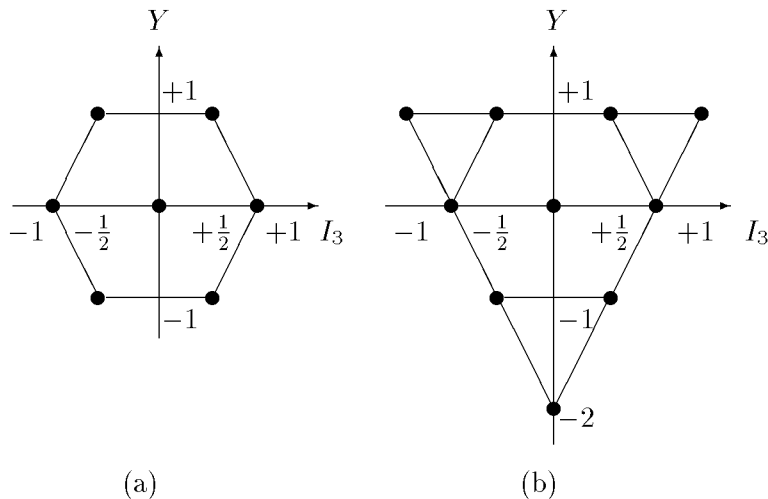


図 2.1 2次元平面 (I_3, Y) におけるある格子点の配列

この格子点の配列を説明するために、より基本的な3つの格子点 (それを今仮に q という記号を使う) と、その各々の (I_3, Y) の値に対して逆符号 (すなわち, $(-I_3, -Y)$) を持つ3つの格子点 (それを仮に \bar{q} と書く) とを考える。この6つ (q と \bar{q}) の組み合わせから図 2.1 を説明するためには、基本格子点はどのような (I_3, Y) の値を持てばよいか?

以下の図 2.2 (a) に、3つの格子点 q の位置を○, □, △の記号で書き込め。また、図 2.2 (b) には、 q とは逆符号の (I_3, Y) を持つ3つの格子点 \bar{q} の位置を●, ■, ▲の記号で書き込め。そして、図 2.1 の格子点 (a), (b) はどのような基本格子点の組み合わせとして説明できるか、図 2.3 にその組み合わせを書き込め。ただし、基本格子点が複数個集まったときの I_3 および Y の値は、それぞれその各々の基本格子点の I_3 および Y の和で与えられる。

[ヒント]

図 2.1 (a) の格子点は基本格子点 q と \bar{q} との組み合わせ ($q\bar{q}$) として作られ、また、図 2.1 (b) は 3 個とも格子点 q からの組み合わせ (qqq) として作られる。

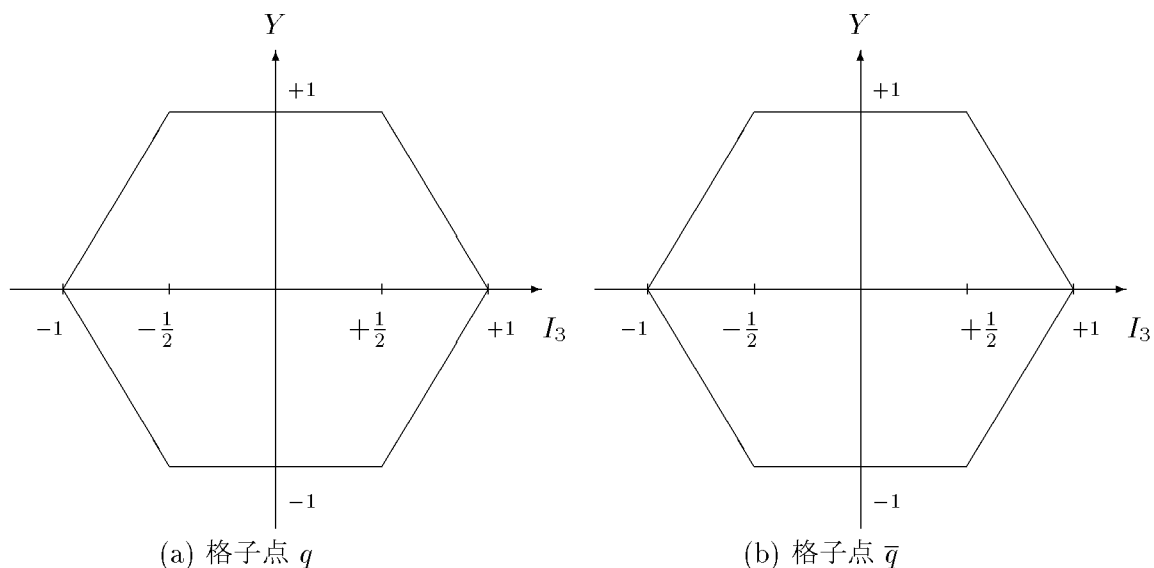


図 2.2 格子点の (I_3, Y) の値

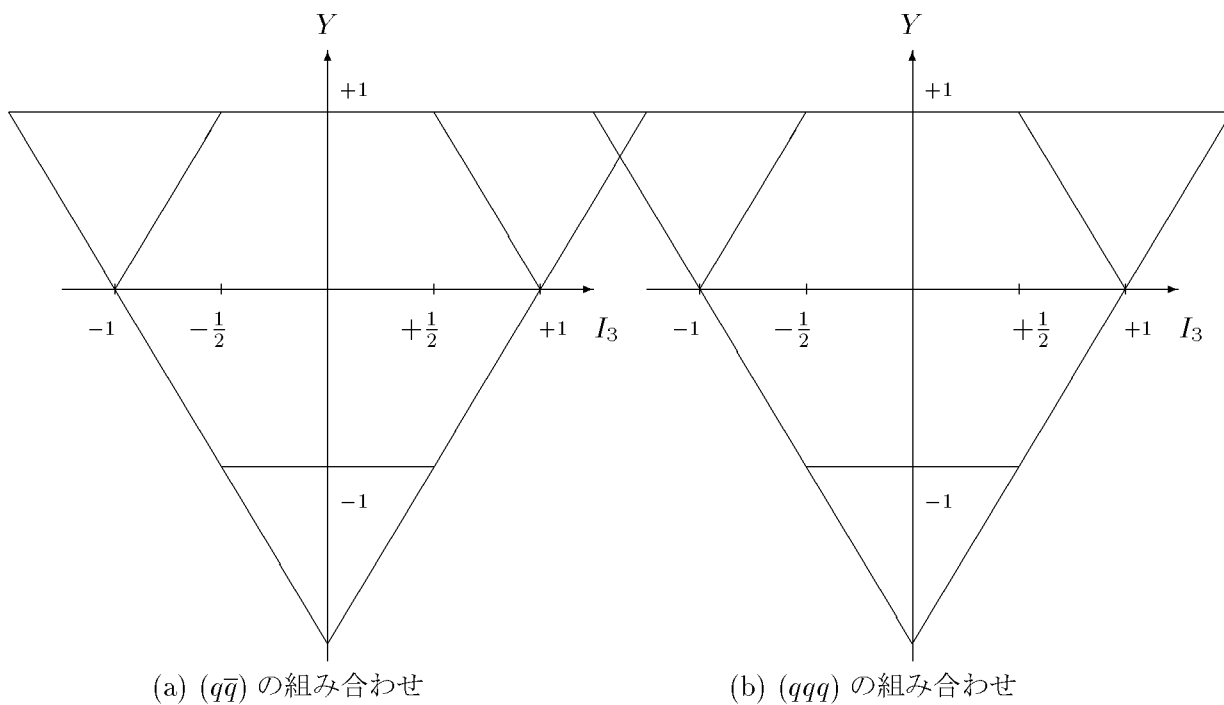


図 2.3 基本格子点の組み合わせによる 図 2.1 の説明

[解説]

1960年代になると続々と新しい素粒子が発見され出す。それら素粒子(ハドロン)を、まず「スピン J 」²、という性質ごとに区分してみる。そしてそのスピン J ごとに、素粒子の性質、「荷電スピン I 」³、と「ハイパーチャージ Y 」⁴がどのような値をとるか調べてみる。すると、奇妙なことにどの J の場合も皆 図 2.4 に例を示したように同じパターンの (I_3, Y) の配列が繰り返されることが分かった。そもそも「素」であるはずの粒子がこんなにも沢山発見されてしまったということも問題であるが、それらの間には J が異なるごとに同じ (I_3, Y) の配列が繰り返されるということをどのように理解したらよいのであろうか？

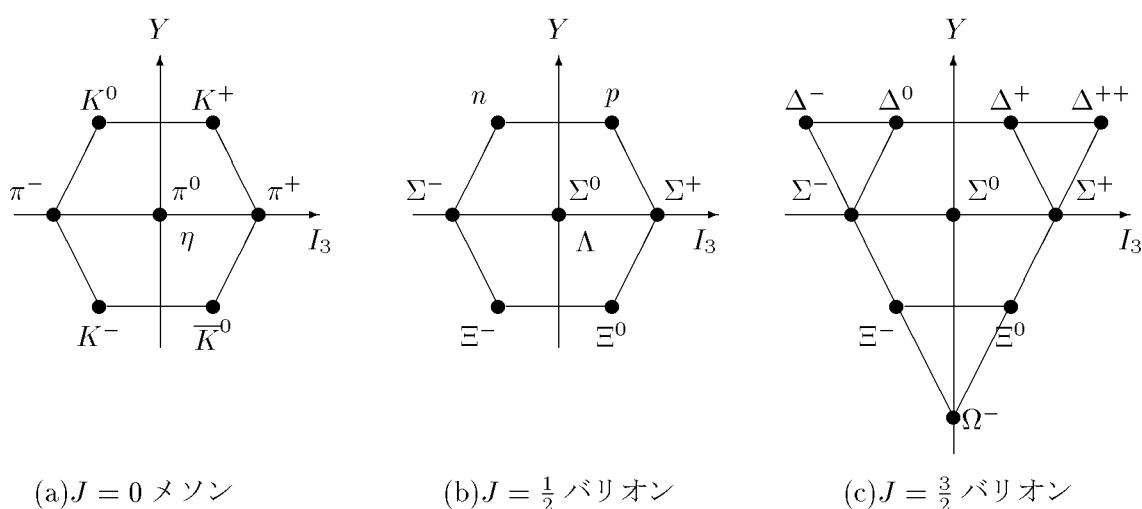


図 2.4 メソンおよびバリオンの (I_3, Y) 配列

そこで、1964年、ゲルマンは、このことを理解するために、素粒子(ハドロン)は「素」粒子ではなく、3つの基本粒子 $q = (u, d, s)$ から構成される複合粒子であるという仮説を提唱した[1]。(彼はこの粒子を「クォーク(quark)」と呼んだ。)

図 2.2 (a) に書き込んでもらった格子点とはこのクォーク q の持つ (I_3, Y) の値のことであり、また、図 2.2 (b) に書き込んでもらった格子点とはこのクォークの反粒子 \bar{q} の持

² スピン J とは、その粒子の内部角運動量の大きさ(自転運動の強さのようなもの)を表し、ハドロンの内で、 $J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ の粒子を「バリオン」、 $J = 0, 1, 2, \dots$ の粒子を「メソン(中間子)」と呼ぶ。陽子 p 、中性子 n などは $J = \frac{1}{2}$ を持ったバリオンであり、パイ中間子 π は $J = 0$ のメソンである。

³ 荷電スピン I とは、質量がほぼ同じで荷電 Q が異なるだけの仲間が何個存在するかに関係した量である。荷電の異なる仲間が $(2I + 1)$ 個存在するのなら、その粒子の荷電スピンは I であると言い、各仲間に $I, I - 1, \dots, -(I - 1), -I$ なる値を割り当てて、その値のことを「荷電スピンの第3成分」 I_3 と呼ぶ。

例えば、パイメソンは3個の仲間(π^+, π^0, π^-)の存在が知られており、それぞれは $I_3 = +1, I_3 = 0, I_3 = -1$ の値を持つ粒子である。また、陽子 p と中性子 n は、ほぼ質量が等しいので、この2つの粒子は仲間と考え、 p は $I_3 = \frac{1}{2}$ 、 n は $I_3 = -\frac{1}{2}$ を持つ粒子であると考え(この2つの粒子を総称して「核子」と呼ぶ)。

⁴ Y と I_3 、および Q の間には

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}Y \quad (2.1)$$

なる関係が成立する(荷電 Q は、陽子の Q を $+1$ と定義)。これら I_3, Y, Q は、衝突反応において新しい粒子が生まれるときでも、反応の前後で、それぞれの総量(合計)は不変に保たれる。

つ (I_3, Y) の値のことである。図 2.3 に基本格子点の組み合わせとして書いてもらったのは、クォークの組み合わせによる素粒子 (ハドロン) の説明である。

[参考] 「クォーク」の語源

ゲルマンのクォーク模型を提案した論文「A Schematic Model of Baryons and Mesons」
[1]には

We then refer to the members $u^{2/3}$, $d^{-1/3}$, and $s^{-1/3}$ of the triplet as “quark”⁶⁾ q and the members of the anti-triplet as anti-quarks \bar{q} .

と書かれていて、文献 6) として、次の文献が引用されている。

6) James Joyce, *Finnegan’s Wake* (Viking Press, New York, 1939) p.383.

これについて、川口正昭は次のような解説を書いている [3].

この「クーク」という言葉は、ジェームズ・ジョイスの有名な小説「フィネガンの徹夜祭」に出てくる。ワグナーの楽劇の主人公トリスタンがマーク大王に嫁ぐイゾルデに随行して船出しようとしたとき、怪鳥が三たび叫んだ鳴声が「クーク」であるという。

しかし、この話には異説もある： 実際には仲間とこのモデルについて議論をしているとき、「クォーク」という名前が何となく語呂がよくて、これにしようということになった。しかし、後で、この単語がジョイスの小説に出てくるということを知って、この小説を引用したのだという。

いずれにせよ、物理学の論文の中で文学書を引用するのは普通あり得ないことで、だからこそ、彼の名付けたこの「クォーク」という名前は、人々の印象に強く残って、人々の間に定着して行くこととなった。全く同じ年に、同じ内容の論文をツヴァイク (Zweig)[4]が書いているが、彼の名付けた「エース」という単語は、今日ではほとんど使われることがない⁵。(1960年代末頃までは、それでも「クォーク・エース模型」などと呼ばれていたのであるが、1969年にゲルマンだけがノーベル賞を取った後は、完全に「エース模型」の存在は忘れられてしまった。)

⁵ ツヴァイクの論文が無視された理由は、この「ネーミング」の問題だけが原因ではない。それについては、解答編で紹介しよう。

2.2 なぜ自然界には $(q\bar{q})$ と (qqq) の組み合わせしか存在しないのか?

— カラー理論の登場 (1964年～1972年) —

[準備]

前問で紹介したように、自然界で実際に観測されるハドロンは、 $q = u, d, s$ の組み合わせの中で、 $(q\bar{q})$ と (qqq) に対応するものしか存在しない。即ち、クォーク q の単独はむしろのこと、 (qq) や $(qq\bar{q})$ などの組み合わせに対応する素粒子 (ハドロン) は観測されていない。

プラス荷電の物体とマイナス荷電の物体間の電気力は引力であるが、プラス荷電の物体同士、あるいはマイナス荷電の物体同士の間での電気力は反発力であることが知られている。クォーク q の反粒子 \bar{q} は、質量値を除いて、互いにその性質が逆符号となるので、電気力との類推から、 q と \bar{q} の間も引力が働くと想像してみよう。しかし、そのとき、 q と q の間は反発力となるであろうから、 (qqq) の結合が起こることが理解できない。

もし、 q と q の間も、 q と \bar{q} の間も、互いに引力となる力が存在すると仮定すると、 $(q\bar{q})$ の結合は理解できるが、しかしそれではなぜ (qq) や $(qq\bar{q})$ の結合が存在できないのかを理解できない。

[問題]

1972年、ゲルマン [5] はこの説明として、「カラー理論」なるものを提唱した⁶。それはどのような理論だと想像するか? 色の三原色との類推を使うとき、どのような条件を課したら、望みの $(q\bar{q})$ と (qqq) の組み合わせのみを選び出せるか? 直感的イメージでよいから考えてみよう。

[ヒント]

(a) 色の三原色 (赤, 緑, 青) を組み合わせるとどうなったかを思い起こしてみよう。例えば、「合計の色が〇〇色となったときのみが自然界に存在できる」などの仮説をたててみよう。

(b) クォーク q の量子数 (I_3, Y) に対して、反クォーク \bar{q} は量子数 $(-I_3, -Y)$ を持つ。「カラー」についても、同様の性質がある。

2.3 写真乾板に 3次元立体像を記録するには?

— 新粒子 (Niu event) の観測 (1971年) —

[準備]

1974年11月、アメリカのスタンフォード大学およびブルックヘブン国立研究所の2箇

⁶ カラー理論の基になるアイデアは、すでに1964年にグリーンベルグ (O.W.Greenberg)、1965年にハン (M.Y.Han) と南部 (Y.Nambu) 達によって提唱されていた [6]。ゲルマンは、その理論に、「カラー」という気の利いたニックネームをつけて再提案したにすぎないとも言える。

所で、従来知られていた粒子よりかなり重いにもかかわらず長寿命な新種の粒子が観測された [2] (普通は重い粒子は短寿命ですぐに他の軽い粒子へと自然崩壊する)。この現象は、実は第 4 のクォーク c の存在を意味し、この発見の功績により実験チームのリーダーであるリヒター (B. Richter) とテイン (C. C. Ting) は、1976 年度ノーベル物理学賞を受ける⁷。

しかしながら、この発見の 3 年も前に、すでに日本でも同様に、質量が大きいのに寿命が長い奇妙な粒子が、名古屋大学の宇宙線観測グループによって確認されていた [8]。その粒子の飛跡を図 2.5 に図示する (それぞれ、 x 方向、 y 方向、 z 方向からの飛跡の様子が図示されている)。これは、原子核写真乾板 (エマルジョンチェンバー) と呼ばれる極めて微細な画像までを記録できる特殊な写真乾板によって記録されたものである。彼等は、このエマルジョンチェンバーを、日航の貨物便の片隅に置かせてもらい、1969 年 8 月から 12 月にかけて、約 400 ~ 600 時間、それを宇宙線にさらすことによって、宇宙線反応の写真を撮った。これを後で現像した結果が、図 2.5 である。

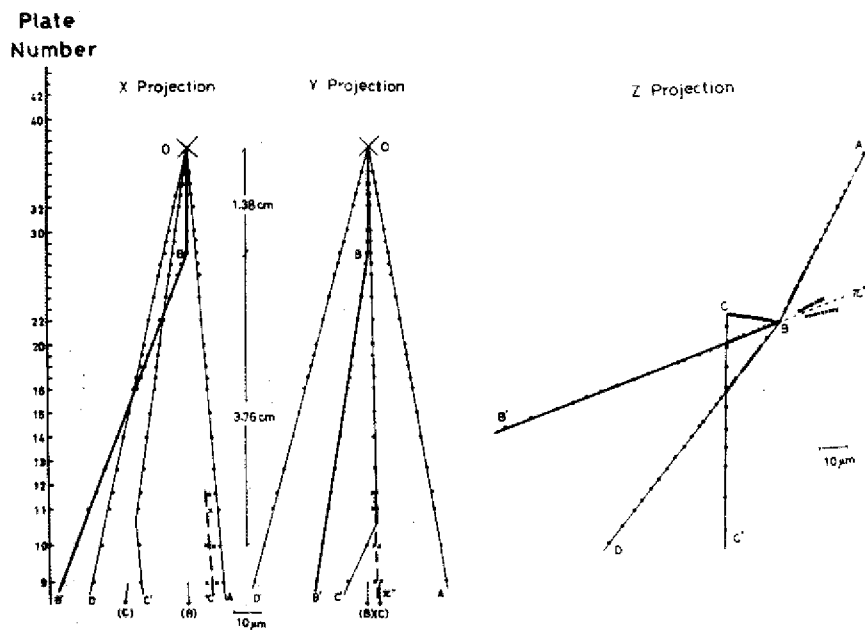


図 2.5 宇宙線の飛跡図 (文献 [8] より転載)。

[問題]

この実験の物理的意義については触れないでおこう。趣向を変えて、今度は理論の問題ではなく、実験手法についてのパズルを考えてみよう。写真乾板は一般には平面のはずなのに、図 2.5 のような立体的な図形がどうして記録できるのであろうか? 考えてみよう。

[ヒント]

飛跡の記録図をもう一度よく見てみよう。あまり難しく考えない方がよい。ホログラ

⁷この実験的発見は当時の物理学の世界に大きな衝撃を与えた。その様子は小沼によって文献 [7] に大変ドラマティックに紹介されている。

フィー (レーザー光線を利用して、3次元像を2次元フィルムに記録する手法) など、あまり高度な理論に思いを馳せない方がよい。物理学で必要なのは、ほんのちょっとした発想の転換や工夫であって、高度な数学テクニックを振りかざすことは、物理学の本道ではない。

III. まだ解かれていないパズル

現在、素粒子物理学において、謎とされている問題は数え上げればきりが無いほど多い。その内のいくつかを紹介しよう。既存の理論が頭に染み込んでいる専門家達より、案外、そのようなものに染まっていないシロウトの方々の方が、新鮮なアイデアにたどり着くことができるかもしれない。ぜひ、トライしてみてください。

3.1 世代の起源は何か？

すでに紹介したように、物質の基本構成単位であるクォークとレプトンは、当初知られていたものから種類も増えて、現在では次のようなクォークとレプトンの存在が知られている。

表 3.1 知られているクォークとレプトン (1999 年現在)

区分	荷電	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代
クォーク	$Q = +\frac{2}{3}$	u (2.33)	c (677)	t (181×10^3)
	$Q = -\frac{1}{3}$	d (4.69)	s (93.4)	b (3.00×10^3)
レプトン	$Q = 0$	ν_e (?)	ν_μ (?)	ν_τ (?)
	$Q = -1$	e^- (0.511)	μ^- (105.7)	τ^- (1777.1)

粒子名の記号の後の () 内の数字は、MeV 単位での質量値を表す。また、クォークの質量値は、「エネルギースケール μ 」に依存するので、ウィークボソンの質量 ($\mu = m_Z = 91.2 \times 10^3$ MeV) での値を掲げた [9]。

これらの基本粒子は、「世代 (generation)」⁸が異なるごとに、質量の違いを別として、第 1 世代の ($u, d; \nu_e, e^-$) に対応して同じ性質を持った基本粒子のセット ($c, s; \nu_\mu, \mu^-$), ($t, b; \nu_\tau, \tau^-$) が登場する。なぜ、このような同じ性質を持った粒子のセットが繰り返し登場するのであろうか？ この「世代 (家族)」の起源は何であろうか？ また、そもそも、この世代数はこれからも増え続けるのであろうか？⁹

クォーク仮説のときのように、クォークとレプトンを更なる基本粒子から作られる複合粒子と考え、世代数に対応した何か構成要素 (粒子) を考えればよいのだろうか？ それともやっぱり、クォークとレプトンは、今度こそ、最後の「素」粒子なのであろうか？

⁸ 「世代」という言葉の代わりに、「家族 (family)」という言葉も使われる。

⁹ この件に関しては、最近の間接的な実験から、このような軽いニュートリノを伴った世代はこれで終わり (即ち 3 世代止まり) であろうといわれている。

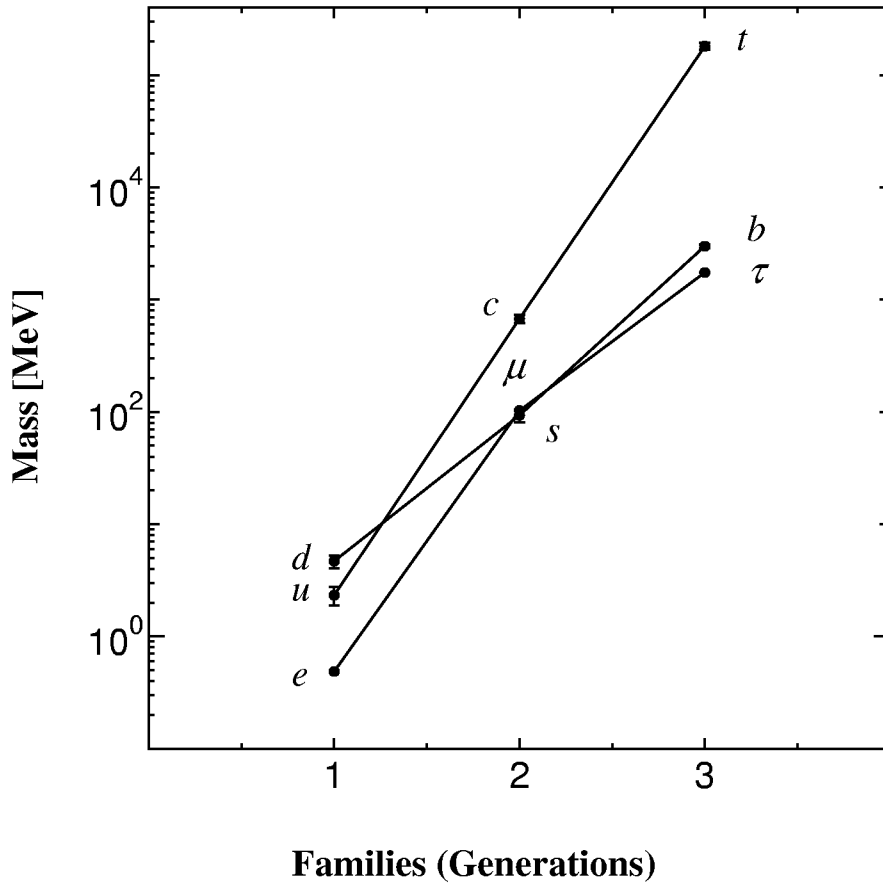


図 3.1 クォークとレプトンの「世代」による質量増加

3.2 質量スペクトルに規則性はあるか？

クォークとレプトンの質量は、表 2.3 に示したような値を持つ。それをグラフにすると、図 3.1 のようになる。世代が変わるごとに質量値は急激に増加する。これはどのような理由からであろうか？

このことを探ることによって、前節で述べた「世代」の意味も明らかになってくるであろう。逆に言えば、これら質量レベルのパターン(スペクトル)の規則性を見つければ、それは世代の起源の探求に大きな手がかりとなるであろう。

例えば、荷電レプトンの質量については次のような経験式 [10] が知られている。

$$m_e + m_\mu + m_\tau = \frac{2}{3}(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^2. \quad (3.1)$$

この式に、実験値 [11] $m_e = 0.51100 \text{ MeV}$, $m_\mu = 105.66 \text{ MeV}$ を代入すると、タウレプトン τ の質量の理論値

$$m_\tau(\text{理論}) = 1776.97 \text{ MeV}, \quad (3.2)$$

を得る。これに対してタウレプトンの質量の実験値 [11] は

$$m_\tau(\text{実験}) = 1777.06^{+0.29}_{-0.26} \text{ MeV}, \quad (3.3)$$

であり、驚くべき一致を示している。しかしながら、この一致は単なる偶然にすぎないのか、それとも (3.1) 式は何か深い意味があるのか、その理論的根拠は現在でもまだよく分かっていない。

3.3 ニュートリノの謎

ニュートリノ (中性微子) は、他の基本粒子と著しく異なって、質量値が現在でも確定できないほどに小さい¹⁰。少なくとも、 10^{-6} MeV 以下であると言われている。なぜ、ニュートリノの質量はそんなにも小さいのであろうか?

その1つの説明として、シーソーメカニズムなるアイデア [12] が提案されているが、これが正しいとしても、各ニュートリノ ν_e, ν_μ, ν_τ の質量パターンをすべて統一的にうまく説明する具体的なモデルの構築には至っていない。

ニュートリノ ν は、他の基本粒子と異なって、弱い相互作用しか行わない粒子なので、物質の中での貫通力は極めて大きい。例えば、北アルプス西側ふもとにある宇宙線神岡観測所では、上空から降り注いでくるニュートリノだけでなく、地球の裏側から突き抜けてくるニュートリノをも観測している。この特徴を生かして、現在、様々な実験・観測計画がなされているので、数年の内にはニュートリノの質量やその他の性質について、もっと分かってくることであろう¹¹。

いずれにせよ、ニュートリノをどう考えるかが、クォークとレプトンの統一モデルの構築の重要な鍵となっていることは間違いない。

¹⁰ 1998年6月の国際会議「ニュートリノ98」で、ニュートリノの質量は少なくともゼロではないということだけは実験的に明らかになった。しかし、その具体的値はどれだけなのかはまだ得られていない。

¹¹ ニュートリノについての最大の関心は、ニュートリノ振動と呼ばれる現象の観測にある。これは、例えば、ミュー・ニュートリノ ν_μ としてやって来たニュートリノが途中で別のニュートリノ ν_τ に変わり、更に走るとまた ν_μ に戻ったりする現象のことである。しかし、これについての解説は、ページの関係から割愛する。

IV. 解答編

第II章で与えたクイズの解答を掲げる. ついでに, 解答を掲げた後でなければ述べられなかった補足的話題をここで述べる.

4.1 問 2.1 の解答 : 複合粒子モデルの裏歴史

[解答]

格子点 q および格子点 \bar{q} の位置を, 図 2.2 へ書き込むと, 図 4.1 のようになる. (図は, 問題に与えられた記号 $\circ, \square, \triangle$ の代わりに, クォークの記号 u, d, s を用いて書かれている.)

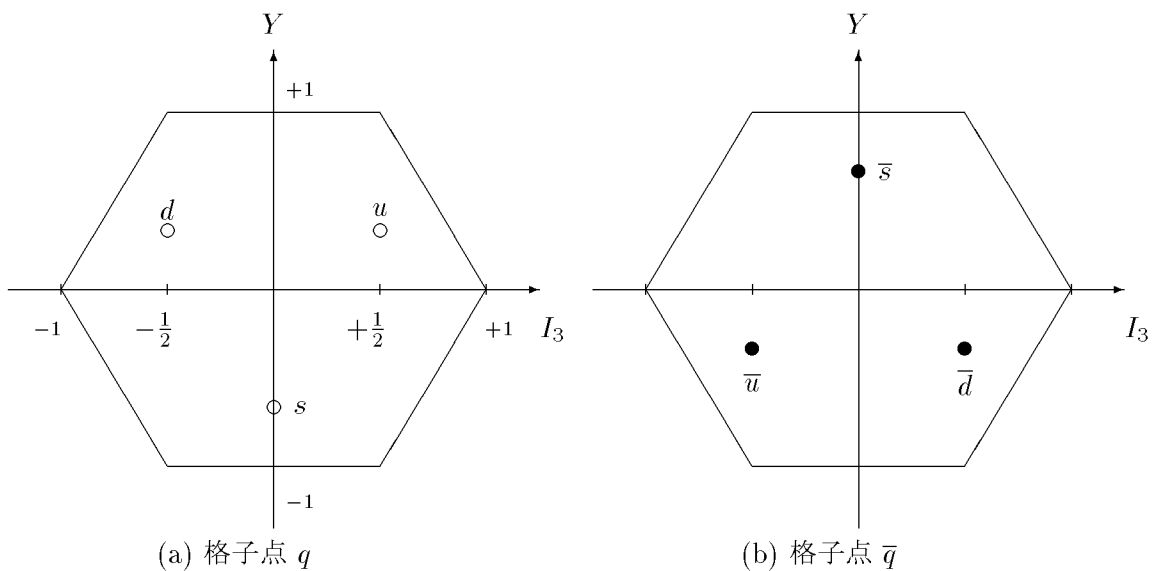


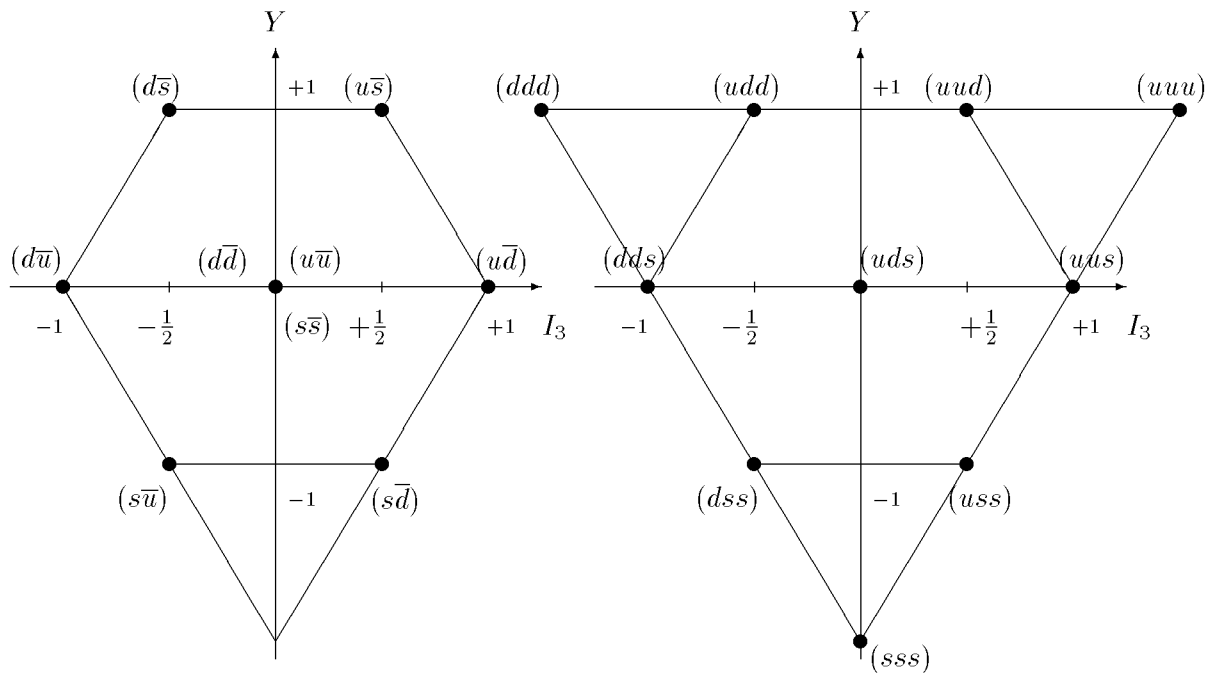
図 4.1 格子点 (クォーク) の (I_3, Y) の値

参考までに, この格子点 (クォーク) が持つ物理量 I_3 および Y の値を表 4.1 に掲げておく. ついでに, これらクォークの荷電の値 Q (陽子の荷電を $+1$ として) も掲げておく (Q の値は (2.1) 式の関係を用いて I_3 と Y の値から計算できる). クォークの荷電は $+2/3$ や $-1/3$ など, 分数で表される荷電の大きさを持つことに注意しよう.

表 4.1 クォーク q の量子数 I_3, Y, Q . 反クォーク \bar{q} の量子数は, それぞれ対応するクォークのそれらと逆符号で与えられる.

記号	ニックネーム	I_3	Y	Q
u	アップクォーク	$+1/2$	$+1/3$	$+2/3$
d	ダウルクォーク	$-1/2$	$+1/3$	$-1/3$
s	ストレンジクォーク	0	$-2/3$	$-1/3$

このような量子数を持ったクォーク（およびその反粒子）から作られる $(q\bar{q})$ および (qqq) の可能なすべての組み合わせは、図 4.2 のようになる。これによって、観測されているすべてのハドロン（ $J = 0, J = 1/2, J = 3/2$ については図 2.4）のいろいろの性質を説明することができた。現在では、「クォーク」は単なる仮説的な粒子ではなく、多くの物理学者はその存在を信じている。



(a) $(q\bar{q})$ の組み合わせ

(b) (qqq) の組み合わせ

図 4.2 基本格子点の組み合わせによるハドロン（図 2.4）の説明

[クォーク模型の元祖は日本?]

「ハドロンは〈素〉粒子ではなく、3個の基本粒子の組み合わせによって作られる〈複合〉粒子である」という考えは、1964年のゲルマンによる「クォーク模型」の提案より8年も早く、1956年に、日本の坂田昌一（当時名古屋大学教授）によって提唱された。

彼は、すべてのハドロンは、陽子 p 、中性子 n 、ラムダ粒子 Λ を基本粒子として、その組み合わせから作られると主張した。基本粒子（サカトン） $S = (p, n, \Lambda)$ とその組み合わせ $(S\bar{S})$ によって作られるメソン状態 ($J = 0, 1, 2, \dots$) を図 4.3 に示す。メソン粒子に関する限り、観測事実をうまく説明ができる。

これに対して、バリオン状態 ($J = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$) については、彼は (SSS) としてではなく、 $(SS\bar{S})$ として説明を試みた。（図は略。なんなら、 $(SS\bar{S})$ の組み合わせにもチャレンジしてみてください。）結果として、図 2.4 (b), (c) の配列を説明できなかった¹²。

¹²1956年当時は、まだバリオンは図 2.4 (b), (c) のすべてが発見されていたわけではなく、坂田模型は実験と特に不一致ということではなかった。

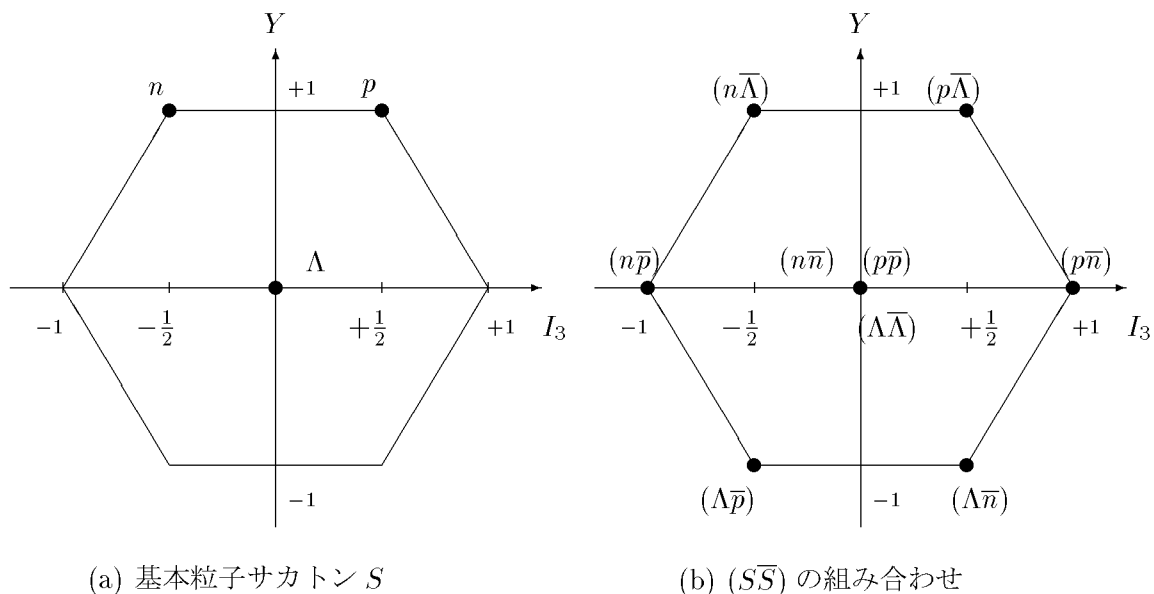


図 4.3 サカトン S の量子数とその組み合わせ $(S\bar{S})$ によるメソン粒子の説明

では、坂田はなぜクォーク模型にたどり着けなかったのか？

すでに、表 4.1 に示したように、クォークは $+2/3$ や $-1/3$ など、中途半端な荷電を持つ。これにたいして、表 4.2 に示すように、サカトンは通常の整数荷電を持つ。

表 4.2 サカトン q の量子数 I_3, Y, Q . 反サカトン \bar{q} の量子数は、それぞれ対応するサカトンのそれらと逆符号で与えられる。

記号	基本粒子名	I_3	Y	Q
p	陽子	$+1/2$	$+1$	$+1$
n	中性子	$-1/2$	$+1$	0
Λ	ラムダ粒子	0	0	0

ゲルマンはこの基本粒子 q は、ひょっとしたらやはりハドロンは「素粒子」であって、ここで考えた q は単なる数学的な便宜上のものに過ぎないかも知れないと考えた [1] のに対し、坂田は、この基本粒子は実際に観測され得る実在の粒子であるべきと考えた。このため、数学的にはゲルマンの q を採用した方が理論はきれいにまとまることは知ってはいたが、そんな半端な荷電を持つ粒子の存在は過去の歴史において検出されたことはなく、従って、そのような粒子の存在を仮定することは不自然と考えた。このため、1960年代に入って次々と発見されたバリオンが、坂田模型の $(SS\bar{S})$ から予言される (I_3, Y) とは違った値が報告されても、坂田グループは、なお 1956 年の模型にしがみつき、それを修正しようとはしなかった。(このあたりの事情は、文献 [13] に詳しく紹介されている。)

[ツヴァイクの悲劇]

1964 年のゲルマンによるクォーク模型の提案（1月日投稿，Physics Letters 誌2月1日号掲載）とほとんど同じ時期に、スイスにあるヨーロッパ共同原子核研究所 (CERN) に滞在していたツヴァイク (G. Zweig) は、クォーク模型と同じ内容のモデル「エース模型」

を提案した（2月21日付けプレプリント¹³，その予備的論文は1月17日付けプレプリント）。しかし，残念なことに，ツヴァイクの論文は，どこの物理学専門論文誌からも掲載を拒否されて，結局，彼の論文は出版されることはなかった¹⁴。それは，当時，欧米では，ハドロンはまさに「素」粒子であり，それが更に何か基本的な構成物から作られているという考えは，とうてい受け入れられない状況であったからである。

では，ゲルマンの論文はなぜ出版できたか？

ツヴァイクの方は当時まだ学生（大学院生）であったのに対して，ゲルマンはすでに素粒子物理学において数々の重要な論文を発表している高名な研究者（カリフォルニア工科大学教授）であった。しかし，ゲルマンとて，この新しいアイデアがすんなりと学会に受け入れられるとは考えなかった。そこで，ゲルマンは，当時一流と言われていた Physical Review 誌（アメリカ物理学会）に投稿することを避け，当時ヨーロッパで創刊したてで，まだ権威のなかった Physics Letters 誌に敢えて投稿した。結果としてゲルマンの論文は活字になって世に残ったが，ツヴァイクの論文は遂に活字となって残ることはできなかった。それだけでなく，ツヴァイクは，当時の理論物理学界の大物から「山師」よばわりをされ，物理学者としての就職をすべて妨害された [14]。その結果，彼は生物学者へと転向せざるを得なかった。一方，ゲルマンは，クォーク模型を含めて素粒子物理学への多大な貢献が評価され，5年後の1969年，ノーベル物理学賞を受賞した。

¹³自然科学分野では，その論文が正式の出版物となる前に，研究者が自前でタイプ原稿のコピーを作り，同じ研究分野の仲間に配布し合うという習慣がある。その配布物は，正式出版物（プリント）に先だって配布されるので，先立つという意味の接頭語（pre-）を付けて，プレプリントと呼ばれる。

¹⁴物理学の原著論文誌は，すべてレフェリー制となっていて，審査を受けて，それをパスしたもののみが掲載される。

4.2 問 2.2 の解答 : 「量子色力学」の発展

[解答]

3種のクォーク $q = (u, d, s)$ の各々に, 更に「赤 (Red)」, 「緑 (Green)」, 「青 (Blue)」の3色の仲間があると仮定しよう :

$$q = \begin{cases} u_R, & u_G, & u_B, \\ d_R, & d_G, & d_B, \\ s_R, & s_G, & s_B, \end{cases} \quad (4.1)$$

(q_R, q_G, q_B はそれぞれ「赤」, 「緑」, 「青」のクォークを表す). そして, **自然界に存在を許される組み合わせは, その「色」の合計が「無色 (白)」となったときのみであるとの仮説を置く.**

クォーク3個の組み合わせでは, 例えば, 陽子 $p = (uud)$ の例では,

$$p = (uud) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_R u_G d_B) + (u_G u_B d_R) + (u_B u_R d_G)], \quad (4.2)$$

となる¹⁵ と考えれば, 光の色の3原色 (加法混合) (図 4.4 参照) からの類推で, その合計は「白」となれる.

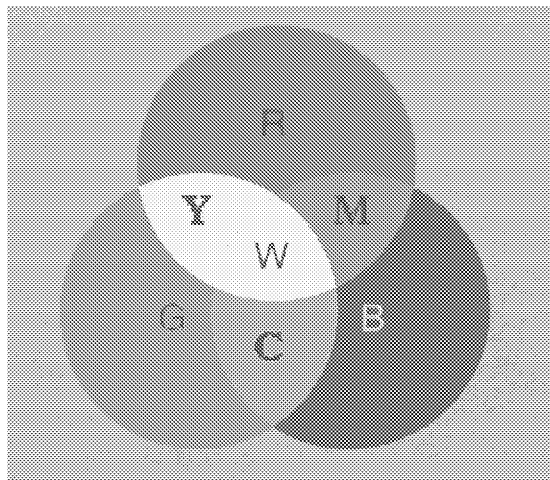


図 4.4 光の色の3原色 : 残念ながら予算の関係から, カラーの印刷はできないので, 文字で色を表わす. 記号 W の部分は「白」を表わす. その他の記号は以下の通り.

R 赤 (Red) \leftrightarrow C シアン (Cyan)
 G 緑 (Green) \leftrightarrow M マゼンタ (Magenta)
 B 青 (Blue) \leftrightarrow Y 黄 (Yellow)

ここで, $A \leftrightarrow B$ で与えられる2つの色 A, B は, 互いに「補色」の関係にある.

また, $q = (q_R, q_G, q_B)$ の反粒子 \bar{q} は, それぞれ図 4.4 より, 「赤」, 「緑」, 「青」の補色, 「シアン」, 「マゼンタ」, 「黄」となる (それを $\bar{q} = (\bar{q}_R, \bar{q}_G, \bar{q}_B)$ と表すことにする). ある

¹⁵実際の陽子の数学的表現はもう少し複雑なものとなる.

色とそれの補色を混合すると「白」となるので、 $(q\bar{q})$ の組み合わせは、例えば、パイプラス中間子 $\pi^+ = (u\bar{d})$ の例では、

$$\pi^+ = (u\bar{d}) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3}} \left[(u_R\bar{d}_R) + (u_G\bar{d}_G) + (u_B\bar{d}_B) \right] \quad (4.3)$$

となり、「白」の状態（組み合わせ）を作ることができる。

これらに対して、例えば、クォーク 2 個の組み合わせは、「赤」、「緑」、「青」の内からどの 2 つを選んで組み合わせても、決して「白」となる組み合わせはできない（図 4.4）。同様に、 $(qq\bar{q})$ の組み合わせも、決して「白」の状態を作り出すことはできない。

このように、3 色のクォーク $q = (q_R, q_G, q_B)$ とその反粒子 $\bar{q} = (\bar{q}_R, \bar{q}_G, \bar{q}_B)$ とから作られる組み合わせで、「白」の状態を作ることができるのは、 (qqq) と $(q\bar{q})$ の場合のみであることが一般に示せる。

以上の、光の 3 原色からの類推による説明は、数学的に言えば、「ユニタリー群」SU(3) において、基本表現 **3** からシングレット **1** を作る問題として定式化することができる。記号の正確な意味の解説は略すが、例えば、

$$\begin{aligned} \mathbf{3} \times \mathbf{3} &= \bar{\mathbf{3}} + \mathbf{6}, \\ \mathbf{3} \times \mathbf{3} \times \mathbf{3} &= \mathbf{1} + \mathbf{8} + \mathbf{8} + \mathbf{10}, \\ \mathbf{3} \times \bar{\mathbf{3}} &= \mathbf{1} + \mathbf{8}, \\ \mathbf{3} \times \mathbf{3} \times \bar{\mathbf{3}} &= \mathbf{3} + \mathbf{3} + \bar{\mathbf{6}} + \mathbf{15}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

なる数学公式が知られている。クォークを **3**、反クォークを $\bar{\mathbf{3}}$ と見れば、「白」状態（シングレット **1**）を作ることのできるのは、 (qqq) と $(q\bar{q})$ のみであることが分かる。この SU(3) 理論に「カラー」という親しみやすいニックネームをつけて広めたのはゲルマンであり、彼のその功績は大きい。

[その後の発展]

このカラー理論は、その後、「量子色力学 (Quantum Chromodynamics)」として、場の量子論の上で定式化され、素粒子物理学の重要な基礎理論として、定着して行くことになる：この理論において、3 色のクォークは、互いにグルューオン (glueon) という媒介粒子（ゲージボゾン）を交換することによって、強い相互作用と呼ばれる力を生み出す。

この力の奇妙な点は、我々が今まで知っていた力とは異なって、互いの距離が近づけば近づくほど、その力の強さが弱くなることである。従って、互いに近接して結合しているクォーク同士ではあたかも自由粒子のように振る舞うことができる（このことを「漸近自由」という）。逆に、互いに離れようとするとその結合力は強大なものとなり、結果的に決して分離することはできない（これをクォークの「完全閉じこめ」という）。

クォーク模型の初期の頃は、クォークの質量は 10 GeV くらいと想像されていた（参考：陽子の質量は約 1 GeV）。質量の大きな値をもつクォークがそれを打ち消すような大きな結合エネルギー（これは負の値を持つ）によって結合し、結果として軽い複合粒子（ハ

ドロン) ができると考えた. そのようなことは理論的には可能であると考えられていた¹⁶. しかし, 例えば, 各々が 10 GeV くらいの質量の u と \bar{d} とが結合して, 結果として 0.14 GeV の質量のパイ中間子 π^+ ができるとは, 直感的には考えにくいことである. この問題は, 量子色力学が誕生するにおよんで, クォークの質量は「エネルギースケール」¹⁷ μ なるものに依存して変化することが分かり, 解決を見た. これは, 前述のカラー力の奇妙な性質によって, 近接して結合しているクォークは実質上軽く振る舞うということに起因する. 例えば, u クォークの質量は, 陽子を構成しているときには, $\mu = 1$ GeV として, $m_u = 0.005$ GeV くらいであるが, もっと接近して結合すると, 例えば, $\mu = 100$ GeV のときは $m_u = 0.002$ GeV くらいとなる [9].

現在は, 量子色力学は素粒子の世界の力学を記述する上で, 重要な基礎理論として, 確立をしている.

¹⁶ ちなみに, 私の博士論文 [15] (1968 年) は, クォークの 2 体結合問題を相対性理論に基づいた方程式で解くというものであった. 私はこの論文で, 質量 m_1 と m_2 とからなる 2 体系の複合粒子の質量は $(m_1 + m_2)/2$ よりは決して軽くなることはできないということを一般的に証明した. このことにより, クォークを支配する力学は, これまでのものとはまったく異なる様相を示すものと考えねばならないことが明らかとなった.

¹⁷ エネルギースケールの逆数が結合粒子間の距離を表わすと考えてよい.

4.3 問 2.3 の解答：日本が世界に誇る実験技術

[解答]

図 2.5 をよく見てみよう. X Projection の図と, Y Projection の図で, 点 (測定点) が横に並んでいるのが分かるであろう. そして, この列と列との間隔は等間隔である.

そう. なんのことはない. 図 4.5 のように, 写真乾板を何枚も重ねて立体を作り, それに粒子の軌跡を記録し, 後でそれを 1 枚 1 枚剥がして現像したものについて粒子像の位置を測定し, 再びそれを立体図にまとめたものが 図 2.5 である. 1 枚の写真乾板に立体像を記録したわけではない.

このように, ものごとは難しく考える必要はない. 何事もアイデアが勝負である. 特に, 日本のように, お金をかけないで自然科学研究をやらねばならないところではなおさらのことである.

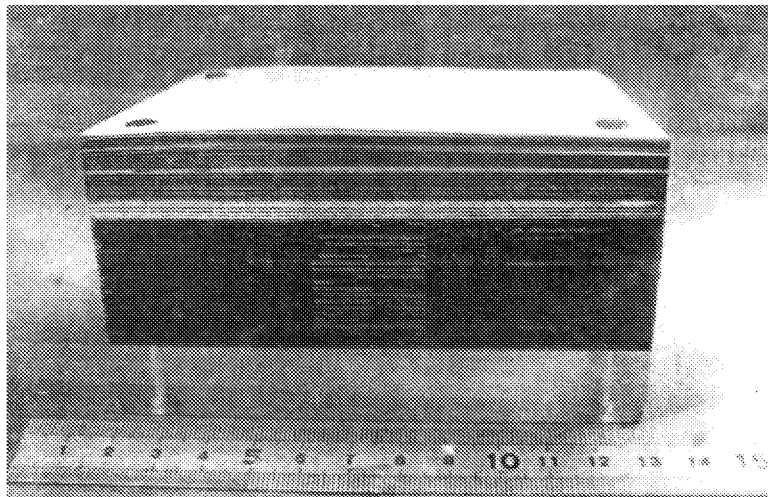


図 4.5 原子核写真乾板を重ねて立体を作った宇宙線記録装置 (「エマルジョンチェンバー」と呼ばれる). (写真提供: 名古屋大学理学部丹生研究室, 1973 年)

[なぜ彼等はノーベル賞をとれなかったのか]

1974 年のティンやリヒター達による発見にはノーベル賞が与えられたが, この丹生グループの研究にはノーベル賞が与えられていない. 普通, 第 4 のクォーク c の発見は 1974 年であると見なされている. 1971 年のこの発見でも, 発見された粒子 (ハドロン) は, 質量が重く, しかるに寿命が長いという, 第 4 のクォークを含んだハドロンの特徴をしっかりと捕らえている. 観測から推定されたそのハドロンの質量や寿命も, 現在正確に判明している値と比べてそう悪くはない. それなのに, なぜ, この実験的発見が第 4 のクォークの発見として世界では認知されないのか?

公的な答は, 「この論文での観測はたった 1 例の観測に過ぎないから」である. 例えば, ティンのグループの実験では, 242 例の「新粒子」の観測を得ている. リヒターのグループでは, 観測例の数は明記されていないが, ティンの実験より, さらに桁違い. 自然科学

の基本は「再現可能」であるから、たった1回きりの観測ではその観測事実は確立されない。丹生グループはその後、数例の同様な振る舞いをする粒子を観測したが、これもまた公的には不十分である。公的に発見が確立するためには、最初の発見とは独立の研究者（グループ）が確認をする必要がある。1974年の発見は、アメリカの別々の2研究所で行われただけでなく、それは直ちにイタリアとドイツの研究所によっても確認をされた。このような芸当ができたのは、1974年の発見は、加速器という人工的な手段で目的の反応を集中的に観測できたからである。これに対して、1971年の日本での観測は、宇宙からたまたま降り注いで来た「宇宙線」の観測であり、まさに「運を天にまかせる」タイプの観測であるからである。

しかし、1971年当時には認知されなくとも、1974年の発見があった後では正当に評価されてもよさそうなものなのに、それほどでもないのはなぜであろうか？

これには、宇宙線実験に対する偏見や不信感があるように思われる。宇宙線を記録した写真乾板を見てみよう（図4.6）。第2.3節で述べたように、この写真乾板は大変長い時間に渡って露出を続けることによって、粒子の飛跡を記録している。つまり、写真乾板には問題の粒子以外にもいろいろの粒子が入り混ざって記録されている。そこから、必要な飛跡のみを見つけるのはかなりの熟練を要する。（顕微鏡を使ってたんねんに1つ1つの点を追って行くので、解析結果が出るまでに1年以上かかる。）そもそも、1枚1枚剥がして現像するのだが、そのとき乾板のサイズが微妙に伸びたりすることもある。また、これらの粒子がどのようなエネルギーを持って走ったかは、写っている点の濃さから推定をする。長年の経験からかなりの精度でそれが可能であると宇宙線実験家は主張するのだが、そのことはエネルギーや運動量を専用の装置を用いて測定する習慣の欧米の研究者から見れば、とうてい信じられない「神技」と見えるようだ。

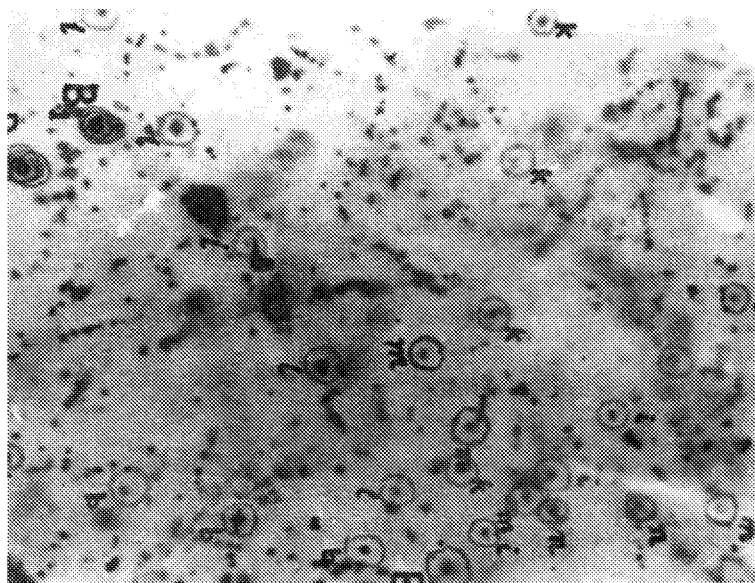


図 4.6 原子核写真乾板に写っている宇宙線の飛跡。(写真提供：名古屋大学理学部丹生研究室，1973年)

ただし、現在では、少しは政府からお金も出るようになり、当時とは比べものにならないほどの機械化がなされている。他の観測・測定装置との併用がなされたり、写真の解析にも自動解析装置が使われたりしている。現在では、この原子核写真乾板方式は、短い飛跡の粒子を記録するのに適しているという特徴のため、宇宙線だけでなく、加速器実験でも、大いに見直されて、有効な観測手段として国際的に重用されている。今や、かつての宇宙線実験家達は、欧米での巨大加速器のもとで、宇宙線観測技術を生かした形で、大活躍である（むろん、本業の宇宙線観測にも大いに近代化されたハイテク技術を用いて活躍中である）。

参考文献

- [1] M. Gell-Mann, Phys. Lett. **8**, 214 (1964).
- [2] J. J. Augstin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **33**, 1404 (1974); J. -E. Augstin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **33**, 1406 (1974).
- [3] 川口正昭, 「素粒子をつくる時代」 中央公論社, (1977), p.17.
- [4] G. Zweig, CERN preprint 8419/TH.412 (1964), (unpublished).
- [5] M. Gell-Mann, Acta. Phys. Austrica Supp. **9**, 733 (1972).
- [6] O. W. Greenberg, Phys. Rev. Lett. **13**, 598 (1964); H.-Y. Han and Y. Nambu, Phys. Rev. **139**, B1006 (1965); Phys. Rev. **D10**, 674 (1974); Y. Miyamoto, Prog. Theor. Phys. Suppl. Extra No., **187** (1965); T. Tati, Prog. Theor. Phys. **35**, 126 (1966); **35**, 937 (1966); S. Hori, Prog. Theor. Phys. **36**, 131 (1966); N. Cabibbo, L. Maiani and G. Preparata, Phys. Lett. **B25**, 132 (1967).
- [7] 小沼通二, 「新粒子発見の衝撃」 自然 (中央公論社), 1975年3月号, p.28.
- [8] K. Niu, E. Mikumo and Y. Maeda, Prog. Theor. Phys. **46**, 1644 (1971).
- [9] H. Fusaoka and Y. Koide, Phys. Rev. **D57**, 3986 (1998).
- [10] Y. Koide, Lett. Nuov. Cimento **34**, 201 (1982); Phys. Rev. **D28**, 252 (1983).
- [11] Particle data group, Eur. Phys. J. **C3**, 1 (1998).
- [12] M. Gell-Mann, P. Rammond and R. Slansky, in *Supergravity*, Proceedings of the Workshop, Stony Brook, New York, 1979, edited by P. van Nieuwenhuizen and D. Z. Freedman (North-Holland, Amsterdam, 1979); T. Yanagida, in *Proc. Workshop of the Unified Theory and Baryon Number in the Universe*, edited by A. Sawada and A. Sugamoto (KEK, Tukuba, 1979); R. Mohapatra and G. Senjanovic, Phys. Rev. Lett. **44**, 912 (1980).
- [13] 小出義夫, 「なぜ坂田学派はクォーク模型にたどりつけなかったのか」 経営と情報 (静岡県立大学経営情報学部紀要) 第8巻第1号 (1995), pp.25-57.
- [14] G. Zweig, “Origin of the quark model”, invited talk, Baryon 1980 Conference, CALT-68-805. (1980), (unpublished).
- [15] Y. Koide, Prog. Theor. Phys. **39**, 817 (1968).