

# 毎日がパズルの連続だ!

— 素粒子物理学研究の現場より —

小出 義夫

経営情報学部 教授



こいで よしお

1942年石川県金沢市生まれ。広島大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。米国メリーランド大学物理・天文学部客員教授，静岡県立大学国際関係学部教授を経て，現職。

担当科目：自然システムⅠ（高エネルギー物理学），自然システムⅡ（エネルギー形態基礎），エネルギー形態Ⅰ，Ⅱ，物理環境システム特論（大学院），エネルギー形態基礎特論（大学院）

主な著書：“Asymptotic Symmetry and its Implication in Elementary Particle Physics”，World Scientific Pub.，1991.

主な論文：“On the two-body bound state problem of Dirac particles”，Progress of Theoretical Physics（日本物理学会），1968；“New formula of the Cabibbo angle and composite quarks”，Physical Review Letters（アメリカ物理学会），1981；“New view of quarks and lepton mass hierarchy”，Physical Review D（アメリカ物理学会），1983；“Top-quark-mass enhancement on a seesaw-type quark mass matrix”，Zeit Schrift für Physik（Springer-Verlag，独），1996；“Universal seesaw mass matrix model with three light pseudo Dirac neutrinos”，Physical Review D（アメリカ物理学会），1999；他多数。

## はじめに

素粒子物理学の現状と課題を紹介する目的で，以下のような書き出しで始まる講義ノートを配布し，クイズ形式での講義を試みた。

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、分かっている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楽の極地である。その楽しみの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

この要旨集では、ページの都合から、予備知識の紹介である「I. 素粒子とは(予備知識)」と、話題の1つである「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?」のみを採録する。<sup>1</sup>

## 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」 $\pi$  の存在が知られている。

<sup>1</sup>他の話題についても興味のある方は、講義ノートの全文が「静岡県立大学物理学研究室ホームページ」<http://phys.u-shizuoka-ken.ac.jp/us-hep/lecturenote.html> にありますので、それをご覧下さい。ただし、このノートは Latex と呼ばれるフォーマットで書かれていますので、TEX 環境を持たないパソコンを使用される方は、読みとりが困難と思います。その場合は直接著者宛にプリントアウトしたものを送るようご請求下さい。

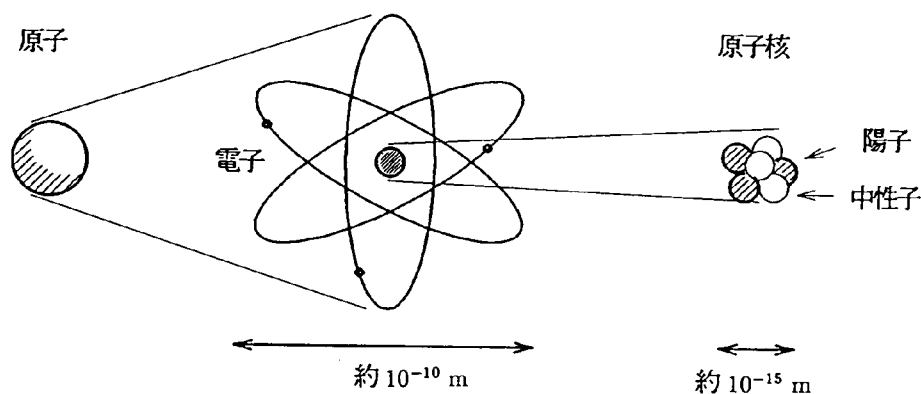


図 1.1 原子の概念図

これらの物質の基本構成粒子,  $e^-$ ,  $p$ ,  $n$ ,  $\pi$ ,  $\dots$  を, 「素粒子 (elementary particle)」と呼ぶ. 特に,  $p$ ,  $n$ ,  $\pi$ ,  $\dots$  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<sup>2</sup>.

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 [?]. 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 [?] 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.

### 2.2 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]

<sup>2</sup> 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)  $\nu$  などは, 強い相互作用を行わず, 「レプトン」と呼ばれる.

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には引力の電気力が働く。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[?]はこの説明として、「カラー理論」なるものを提唱した<sup>3</sup>。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。

## IV. 解答編 (略)

残念ながら、ここでページオーバーとなりました。あとは、ホームページの方をごらんください。

## 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] M. Gell-Mann, Acta. Phys. Austrica Supp. **9**, 733 (1972).
- [4] 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).

<sup>3</sup> 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[?]。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。