

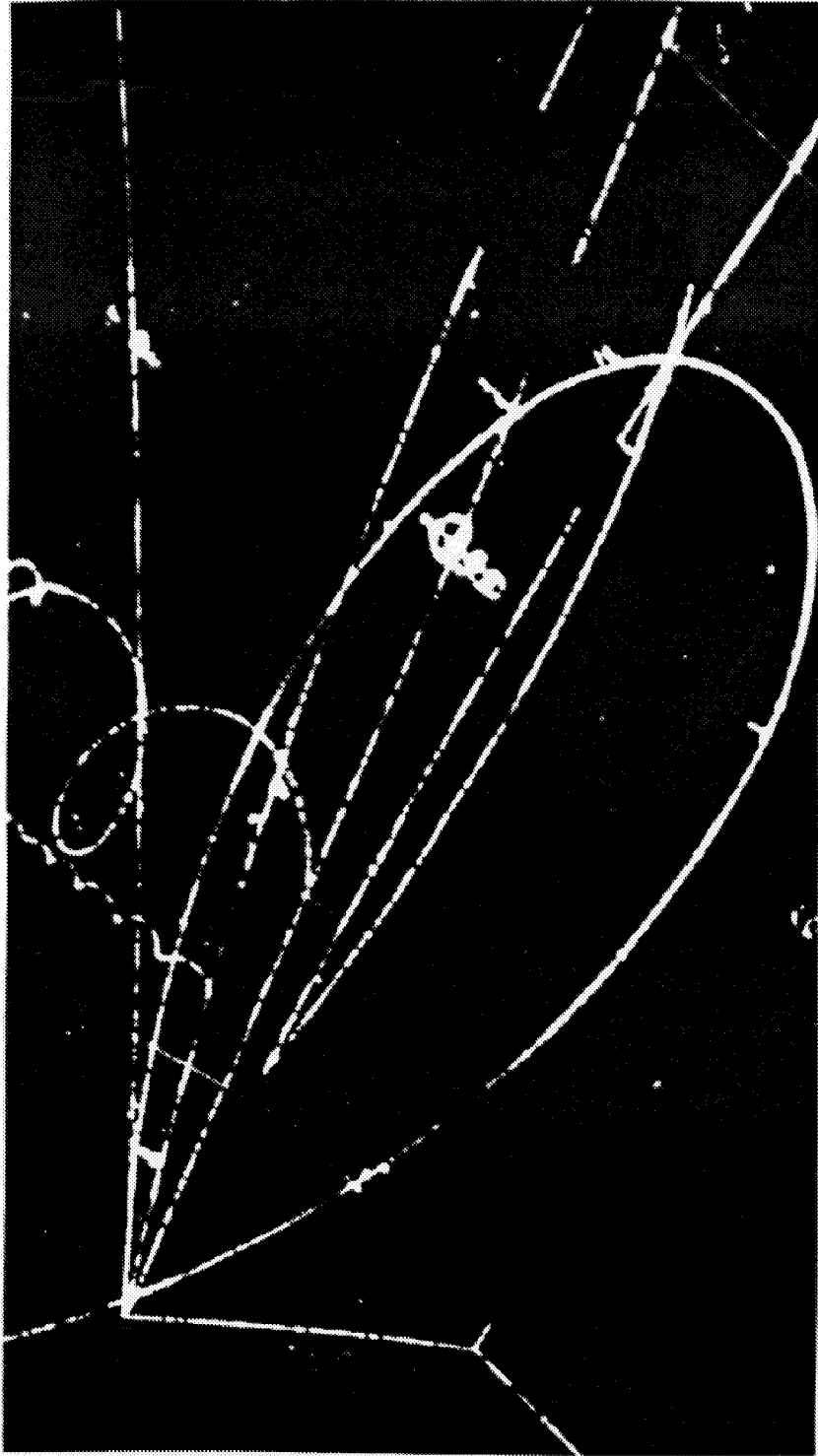
# 素粒子物理学への招待

— 物質の究極構成要素を求めて —

小出義夫

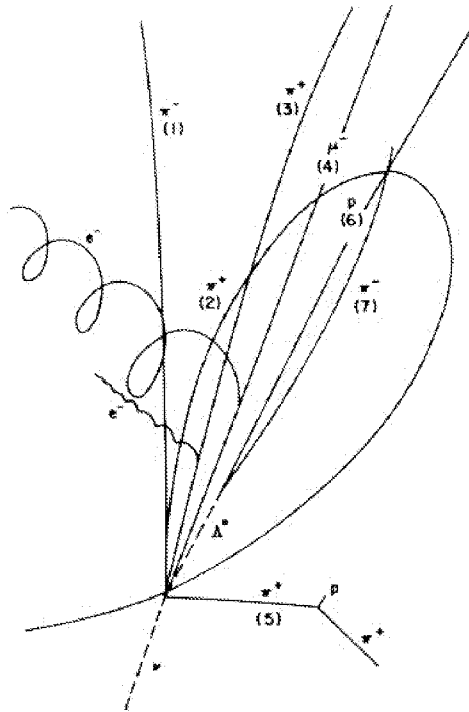
University of Shizuoka





高エネルギー素粒子反応の泡箱写真

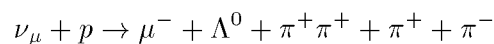
[Physics Today, July 1980, p.38 より 引用]



左ページの素粒子反応写真の解説図． [ E.G.Cazzoli, et al., BNL-20544, NG-320 (1975) より引用]

陽子  $p$  に中性微子  $\nu$  を衝突させる反応を，米国ブルックヘヴン国立研究所 (BNL) の 7 フォット低温泡箱を用いて写真撮映したもの．[ 実験は， E.G.Cazzoli et al., Phys.Rev.Lett. **34**, 1125 (1975) による]

電気的中性粒子の飛跡は泡箱では写らないので，入射粒子である中性微子  $\nu$  はここには写っていない．また，標的粒子である陽子  $p$  は，静止しているのので，これも写っていない．この写真は，反応



の生成粒子の飛跡を写している．生成されたラムダ粒子  $\Lambda^{0}$  は，電気的中性なので，やはり飛跡は写っていない．しかし，この粒子は， $2.6 \times 10^{-10}$  秒で  $\Lambda^{0} \rightarrow p + \pi^{-}$  (陽子  $p$  とパイ中間子  $\pi^{-}$ ) に壊れることが知られており，その V 字型の飛跡図から，逆に  $\Lambda^{0}$  の生成を知ることができる．

この写真は，1975 年初めて第 4 番目のクォーク  $c$  を含むバリオンが発見されたときのもので， $\nu_{\mu} + p \rightarrow \Sigma_c + \mu^{-}$  ;  $\Sigma_c \rightarrow \Lambda_c + \pi^{+}$  ;  $\nu_c \rightarrow \Lambda^{0} + \pi^{+} + \pi^{+} + \pi^{-}$  なる連続する反応と解釈されている．但し， $\Sigma_c$  や  $\Lambda_c$  はあまりにも短命 (それぞれ  $10^{-25}$  秒， $10^{-13}$  秒の寿命) なので，その飛跡は点状にしか写らない．

## まえがき

この講義録は、1985年に、香川大学教育学部での物理学専攻学生を対象とする集中講義「素粒子論」の講義用ノートとして準備された。従って、ある程度物理学を学んできてはいるがしかし必ずしも素粒子物理学の専門家になることを目指しているわけではない学生を対象として、この講義は企画された。かと言って、この講義は決して非専門家向けのあたりさわりのない表面的な「紹介」レベルを意図したわけでもない。どのような意図でこの講義が企画されたかは、当時の「序」に詳しいので、それを以下に再引用する。

この講義録は、いろいろの資料を含み、狭い意味での素粒子物理学の講義以外にもさまざま利用ができ、その後のいろいろのレベルでの講義に広く活用されてきた。大変便利な存在ではあったが、しかし、これまでのものは手書きであったため、書いた本人以外の者にとっては大変読みづらく、そこで今回、本学経営情報学部の学生、呂佩玲さんと本郷京子さんの協力を得て、コンピュータ組版システム TEX を使ったものに、置き換えることとした。(LATEX システムへの入力という大変めんどろな労をとって下さった呂さんと本郷さんに感謝したい。) ついでに、資料の一部は最近のものに置き換え、また、若干の補筆・修正を行った。図もできるだけ、パソコンを使っただけのものに置き換えた。これで、かなり読みやすいものになったと思われる。

1992年5月 静岡県立大学

小出義夫

資料の一部が、特に第 III 章で引用した資料が、古くなりすぎたので、新しいものに置き換えた。また、3.4 節を少し補足した。これに伴って、更にもう少し詳しく物理の内容を知りたい方のために、付録 II を加えた。

今回もまた、LATEX 版を作るために、呂佩玲さんに大変な労をとっていただいた。ここに感謝したい。

1995年1月 静岡県立大学

小出義夫

図のすべてを LaTeX 版に取り込み、また、これまで見つかったすべてのミスプリントを修正した。この作業は、田代京子さんの労による。ここに感謝したい。

1999年12月 静岡県立大学

小出義夫

## 旧版「序」より

### 序

1977年(昭和52年)4月27日、全国の新聞は、いっせいに、物質の基本粒子「クォーク」の実験的発見を報じた。それは、アメリカのスタンフォード大学で $\frac{1}{3}$ 荷電(陽子の荷電を+1として)の検出に成功したとの報道である。

素粒子とは、その名の通り、本来は物質最後の構成基本粒子として、名付けられた。しかし、1964年、ゲルマンとツヴァイクによるクォーク・エース模型の提唱を経て、今日では、素粒子(ハドロン)は、更により基本的な粒子「クォーク」から作られる複合粒子であると考えられている。この基本粒子「クォーク」の最も奇妙な点は、 $\frac{1}{3}$ 荷電を単位とする荷電を持つことである。そこで、多くの実験家達が、長い年月のもとで、この $\frac{1}{3}$ 荷電を持つという奇妙な基本粒子「クォーク」を、探し求めて来たのであった。

この「クォーク」とは、一体どんな性質を持った粒子であろうか？ 素粒子(ハドロン)は、「クォーク」から一体どんなふう構成されているのであろうか？ これらクォーク模型にまつわる諸理論・諸問題を学ぶのが、これからの目的である。

第1章は、そのための予備知識として、素粒子についての一般的知識・専門用語について解説してある。第2章が本論である。第3章は補足として、その基本粒子クォークそのものを更に統一して理解しようとする最近の試みについて、簡単に解説する。

講義では、どうしても時間の制約があり、必要な資料・データーなどを十分提示することができない。復習の便宜も兼ねて、この講義プリントは、講義とは独立に、これ自身完結した著書の形でまとめることとする。

この講義は、次の点に留意して構成された。

(1) とかく理論の話は、理論が初めにあって次に実験データーの紹介が続くことが多いが、なるべくそうはしないで、実験データーの紹介を理論より優先することを心がけた。

(2) 物理学を専門としない学生にも素粒子模型の物理的イメージが描けるよう、あまりに高度に専門的・数学的過ぎる理論内容は割愛し、むしろ、直感的把握を大切にした。

(3) 素粒子模型にまつわる理論的・実験的発見の歴史も、物理を進めるうえでの

重要な教訓となるので、それらの紹介にも力点を置いた。

昭和 60 年 8 月

小出義夫

## 目 次

I. 「素粒子」とは？	
— 増加する素粒子とその分類 —	
1.1 自然構造とスケール	1
1.2 主な素粒子 (1940 年代までの) のプロフィール	4
1.3 増加する素粒子	7
1.4 素粒子の諸性質とその分類	9
1.5 ハドロンとその規則性	20
Chap.I 文献	23
II. 「クォーク」とは？	
— 素粒子 (ハドロン) の複合粒子模型 —	
2.1 クォーク・エース模型	25
2.2 クォーク模型によるハドロンの性質の理解	30
2.3 坂田模型からクォーク模型へ	37
2.4 $SU(n)$ 群とその表現	44
2.5 $SU(6)$ 理論	51
2.6 クォークの 3 色カラー理論	54
2.7 クォークは発見されたか？	59
Chap.II 文献	61
III. クォークとレプトンは物質の究極構成要素か？	
— 増加するクォークとレプトン —	
3.1 チャームクォークの発見とその理論的予想	63
3.2 第 3 世代のクォーク・レプトンと小林・益川理論	73
3.3 クォーク・レプトンの実験的現状	77
3.4 大統一理論 (GUT)	80
3.5 クォーク・レプトンは今後もまた複合粒子か？	93
Chap.III 文献	96

練習問題 解答	98
附録 I : 関連原論文	101
附録 II : ゲージ理論とヒグス機構	112