

## 素粒子は三代

折戸周治（物理学教室）

当理学部の素粒子物理国際センターは物理学教室と協力して、CERN（欧州原子核研究機構）のLEP  $e^+e^-$  衝突装置を用いた国際協同実験OPALを行っている。この実験はこの夏に開始されたが、3週間で5,000例の $e^+e^- \rightarrow Z^0$ の反応を観測する事に成功した。このデータを解析し、 $Z^0$ の崩壊寿命を測定した結果、この世に存在する軽いニュートリノは3種類であること、従って物質の基本構成粒子（クォーク・レプトン）の世代数は3で止まっている事が確認された。

ニュートリノの世代数は宇宙初期の宇宙進化、特に元素合成に大きな影響を与える重要な数である。また基本構成粒子がなぜ世代構成をしているのか、しかもなぜ3つ限りの世代なのであるのか。この素粒子物理の基本的な謎はますます深まったといえよう。

物質を構成している基本粒子はクォークとレプトンであると考えられている。例えば原子核中の陽子や中性子は  $u, d$  というクォークから構成されている（陽子は  $uud$ 、中性子は  $udd$ ）。また原子核を取り巻いて原子を構成している電子（ $e^-$ ）はレプトンであり、その他に電荷を帯びず検出の困難な電子ニュートリノ（ $\nu_e$ ）が、例えば原子核のベータ崩壊等で放出される事が分かっている。これらの粒子は  $(u, d)$ （ $\nu_e, e$ ）という2つの二重項構成をしていて、我々の身の回りに比較的

ありふれた第一世代のクォーク・レプトンである。

さて世の中に存在する粒子がこれでおしまいなら話は比較的すっきりしているのだろうが、過去20年の素粒子実験の進展の過程で次々と新種のクォークやレプトンが発見されてきた。これらの粒子群は表に示したようなきれいな三代構造に分類できるが、実は第二、第三世代は第一世代と全く同じ構造をし、またその相互作用も全く同じで、ただ質量のみが重いだけのコピーあるいはクローンのように見える。

今までの素粒子物理の歴史によれば、こういう場合にはこれらのクォークやレプトンは実は素粒子ではなく何らかの複合粒子の励起状態であると推察する事も可能である。その場合には世代数は3で止まる必然性は無く、4世代あるいは無限に多くの世代があっても特に不思議はない。各世代のクォークやレプトンの相互作用がどうやら統一ゲージ理論できれいに記述できそうなのに反して、この世代構成の問題は現在の理論で説明のつくものではなく、いったい素粒子に何世代あるかは実験で決着をつけるしかない。

このためには世の中に存在し得るニュートリノの数を数えるのが一番手取り早そうである。なぜならこれまでの世代構成を見ると、クォークや荷電レプトンは世代が上がると共に急激に重くなり、第4世代ともなればとても現在の加速器では

作れそうもない。しかし第三世代までのニュートリノはすべて質量がゼロかあるいは非常に軽い事が分かっているので、もっと上の世代のニュートリノもそんなに重いとは考えられない。従ってその生成は少なくともエネルギー的には可能であろう。

だが厄介な事にはニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用しかしないので滅多に作り出す事はできない。しかし世界最高のエネルギーを持つLEP衝突装置を用いれば  $e^+e^-$  のビームエネルギーを、弱い相互作用の媒介粒子である  $Z^0$  粒子の質量 (約91 GeV) まで上げる事によって、多量の  $Z^0$  粒子を発生させる事が可能になった。 $Z^0$  粒子は  $e^+$  と  $e^-$  の衝突対消滅を経て作られ、弱い相互作用でクォーク・反クォーク、 $e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$  等のみならずニュートリノ・反ニュートリノにも崩壊する。ニュートリノは通常の検出が困難であるが、 $Z^0$  粒子の性質、例えば崩壊の寿命を精度よく調べる事によって、 $Z^0$  が何種類のニュートリノ対に崩壊しているかが決定できる。

実際には例えば  $e^+$  と  $e^-$  のビームエネルギーを共に変えて、 $e^+e^- \rightarrow Z^0$  の反応の断面積 (反応確率) をエネルギーの関数として測定する。この結果が図に示してある。 $Z^0$  の質量 (91 GeV) 付近で反応確率は鋭く立上がり、通常の約 1,000 倍に達する。この共鳴の幅は  $Z^0$  粒子の崩壊寿命に反比例している。図に書き入れてある3つの曲線は、ニュートリノの世代数 ( $N_\nu$ ) が 2, 3, 4 の場合の標準統一理論からの予想値である。この理論が必要な精度で正しい事は  $Z^0$  粒子が、直接観測が可能な  $e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$ 、クォーク・反クォークに崩壊する事象から確認してある。ニュートリノの世代数が増えると共に寿命は短く、幅は広くなりピークの反応確率は低くなる。データは明らかに  $N_\nu = 3$  に一番良く合い  $N_\nu = 4$  は否定される。従ってニュートリノの世代数は3であり、従ってクォーク・レプトン群の世代数も3である事が確定した。LEPで作動中の他の2つの実験もOPAL実験に比べて統計数は少ないが、同様な

結論をほぼ同時に出し、この結果の信頼性は高いものと思われる。

このようにして素粒子の世代がなぜか3つで止まっている事が確定的になった。全く同じ構成の世代がなぜ重複してしかも3世代に限られているのだろうか。この謎は多分非常に深い根を持つものであって、あるいは重力すら統一される様な超短距離、超高エネルギーでの物理によって説明されるべきものかもしれない。

LEPはその後も順調に作動し、OPAL実験は11月10日現在約2万例のデータを収集した。1990年中には数十万例が期待される。このデータを用いて  $Z^0$  の性質を精密に測定し、標準統一理論の破れを探すと共に統一理論に必要なヒグズ粒子あるいは超対称性粒子の探索等、現在の素粒子物理の抱える根源的問題を実験的に解明してゆく予定です。

終わりにこの実験の実施の為にご尽力いただいた理学部、学内、文部省の皆様、特に事務官の皆様に感謝すると共にこの一文をもって最初のご報告とさせていただきます。

クォーク・レプトンの世代構成

	電 荷	世 代			
		1	2	3	4
クォーク	+2/3	u	c	(t)*	?
	-1/3	d	s	b	
レプトン	0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	
	-1	e	$\mu$	$\tau$	

\* 未確認

