ニュートリノの跡を追う

－素粒子物理学概論－

日大生産工　○三角　尚治

1　まえがき

素粒子物理学は，まだ完成されていない学問である。新しい理論が生まれ，実験で検証され，新しい実験結果が出てきて，そしてそれをもとに新しい理論が生まれる。素粒子物理学はここ100年で大きな進歩を遂げたが，わかった事と言えば，新しい知識を得れば新しい疑問が生まれるということである。

本研究室では主に2つの柱で研究を行なっている。ひとつは，素粒子の1種類であるニュートリノの性質を探ること，特にニュートリノ振動についての研究。もうひとつは，検出器の応用，特に固体飛跡検出器CR-39の医学的な応用である。今回の講演では前者についての現状を報告する。後者についてはこの秋，神戸にて開催されたITMNR-6で報告を行なったので今回は割愛する。

2　ニュートリノ

世界は何からできているか？ 現代の素粒子像を以下に示す。あらゆる物質は分子からなり，分子は原子からなり，原子は原子核と電子からなり，原子核は陽子と中性子からなる。そして陽子と中性子は，半端な電荷をもち単独では取り出せないクォークという粒子からなる。つまり，ニュートリノ(ν) や電子などのレプトンと，陽子などの構成要素であるクォークという2種類の粒子群によりこの世界の物質は構成されている。これらは，力を媒介する粒子群と合わせて現代の素粒子像として認知されている。

	クォーク			レプトン		
電荷				電荷		
$\frac{2}{3}$	u	c	t	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
$-\frac{1}{3}$	d	s	b	-1	e^-	μ^-	τ^-
	第1世代	第2世代	第3世代		第1世代	第2世代	第3世代

（※電荷は電子を－1とした）

ニュートリノは宇宙に数多く存在しており光子の数よりやや少ない程度である。それにも関わらず，その振る舞いにはいまだに謎が多い粒子である。

現代物理学では，自然界に少なくとも4つの力が存在していることが判明している。ニュートリノは電荷をもたない中性粒子のために電磁気力が一切働かない。またニュートリノはクォークのようにカラー荷をもたないので強い相互作用も働かない。したがって，素粒子スケールでは無視できる極めて小さな重力を除けば，ニュートリノに働く力は弱い相互作用だけである。他の物質との関係の薄さ＝相互作用の弱さにより検出するのには大変な工夫が必要である。導入当初のニュートリノは，質量ゼロの粒子として扱われた。その後その質量を直接測定する努力が多くの人々によってなされたが，質量の上限値だけが制限として付け加えられ続け，質量があったとしても他の素粒子にくらべて極めて軽いということしかわからなかった。そのため，質量をもつのか，もたないのかが長く議論されてきた。ニュートリノはこれまでに質量不明のまま(ν_e, ν_μ, ν_τ)という3種類の存在が実験で確かめられている。

そして，1998年にスーパーカミオカンデ実験で，大気から降り注ぐニュートリノを観測したところその数は期待値より 40%も少なく，この結果はニュートリノ振動が起きている可能性を示唆していた。ニュートリノ振動とは，例えば，ある時刻ではμニュートリノ（ν_μ）であったものが，その同じ粒子が別のある時刻ではτニュートリノ（ν_τ）として観測されるというものである。このような振動現象（$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$）は少なくとも，ニュートリノに質量がなくては起きない現象であり，この現象が存在することを明確に言えれば，他の素粒子と同様に，ニュートリノも質量をもつことが判明する。

Search for τ neutrino interaction events

－ Elementary particle physics－

Shoji MIKADO

３ OPERA実験

本講演会報告者は国際共同実験OPERA（**O**scillation **P**roject with **E**mulsion-t**R**acking **A**pparatus）に参加している。OPERA実験は，13ヶ国36機関約200名の物理屋が参加しているかなり大きな実験組織である。参加するだけでもそれなりに研究費がかかるが，報告者は東邦大学の訪問研究員として参加が許された。

実験に使用するニュートリノビームは、スイスとフランスの国境をまたぐCERN(欧州原子核研究機構: Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire）から射出され，地殻を通って約730 km離れたイタリアの Gran Sasso研究所の地下施設で検出される。

CERNで精製されたν_μビームはイタリアまでの旅程の中でν_τへと振動したのち標的にあたり，その産物としてτ粒子（レプトンの第3世代）が生成されEmulsion（原子核乾板）中に飛跡を残す。その下流に設置した荷電粒子検出器により電荷をもつ二次生成粒子の情報をとらえる。その情報をもとにτ粒子の生成ポイントを確定する。τ粒子生成をとらえることにより$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$振動をとらえ，$\nu_\mu$が単に消えただけではなく，また未知のニュートリノに変化したのではなく，確実にν_τに変化した証拠をとらえることになる。更に，ν_μとν_τの質量差を決定，または極めて重要な情報を提供することになる。

ここでτ粒子の生成ポイントをとらえるのに重要な役割を果たすのは，極めて高い空間分解能をもつEmulsionである。これは日本企業の富士写真フィルムがOPERA実験のために名古屋大学と共同開発したものであり，乳剤塗布が均一に行なわれた品質の良いものであり，またリフレッシュ処理とよぶバックグランド（不必要な飛跡）を消去する処理を可能とした。

Emulsionに蓄積された素粒子の飛跡群は顕微鏡により解析される。実験目的達成のためには大量のEmulsionを解析する必要があり，名古屋大学が中心に開発したEmulsion自動解析装置をフル活用する。現在の顕微鏡は自動焦点で高速にスキャンし人間を介さずに飛跡情報をコンピュータに取り込める優れた装置となっている。

４　実験の進捗状況

CERNの事情もありニュートリノビームは常に我々の実験装置に供給されるわけではない。2008年のRUNでは，同年6月18日よりデータの取得が開始された。CERNのLHC (Large Hadron Collider)は，同年9月10日より稼動したものの，その後ヘリウムが漏洩したために現在修理中であり，次の稼動は来年春を目指している。その影響が危惧されたが，幸運なことに，ニュートリノビームはその前段階のSPSリングから取り出されるために本実験にはあまり影響がない。現在も順調に実験データの蓄積が行われている。

Emulsionの解析作業は日本と欧州で分担して行なっている。日本では岐阜県の東濃鉱山にある施設で解析を開始し，eventに付随する飛跡情報の再構築もでき，現在のところ順調に進んでいる。

報告者は2008年3月から，1ヶ月間にわたりGran Sasso研究所の地下施設にてEmulsion検出器の組立作業を行なってきた。本講演では，イタリアでの雰囲気も織り交ぜながらOPERA実験の全体的な紹介と実験の現状報告を行なう。

５ まとめ

素粒子に関する枠組みはだいぶわかってきているものの，それでも尚，不明な点も多く残されている。特にニュートリノに関してはその質量さえもはっきりとしていない。

ニュートリノ振動という現象を通してニュートリノの不思議な振る舞いを探るため，報告者は国際共同実験OPERAに参加した。ニュートリノビームの照射は現在進行形で行なわれており，またτ粒子検出の重要な役割を担うEmulsionの解析装置も順調に稼動している。

この中で生産工学部として，どれだけ貢献できるかが試されるところであるが，予算上前途多難な状況である。OPERA実験全体としては，1年以内に物理学的な結果が出せるものと期待されている。

「参考文献」

日本語で読める本稿に関連した本

素粒子物理学の一般向けの本として：

1）M.ヴェルトマン，「素粒子世界における事実と謎」培風館

2）川崎雅裕「謎の粒子ーニュートリノ」丸善株式会社

素粒子物理学の教科書的な本として：

3）原康夫，「素粒子」朝倉書店

4）F.ハルツェン，A.D.マーチン，「クォークとレプトン」培風館