

# エマルシヨンスペクトロメーター

渋谷 寛\*

## Emulsion Spectrometer

Hiroshi SHIBUYA\*

### 1. はじめに

原子核乾板は優れた空間分解能をもつ放射線飛跡検出器として素粒子・原子核研究に古くから用いられてきた<sup>[1]</sup>。近年では、種々の検出器を組み合わせたハイブリッド実験装置<sup>[2]</sup>のなかで、素粒子・原子核反応点近傍のバーテックス検出器として使用されることが多い。そうした実験装置では、荷電粒子の運動量測定と電荷符号識別を担うスペクトロメーターは通常、バーテックス検出器とは離れた下流に設置されている。原子核乾板を素粒子飛跡の精密な位置検出器として使い、磁場を印加して運動量測定と電荷符号識別を行うことができれば、実験装置全体をコンパクトにすることができ、実験設計上、有利なことは多い。こうした原子核乾板の使い方をエマルシヨンスペクトロメーター<sup>[3]</sup>、あるいは磁場印加型エマルション検出器と呼んでいる。その利点は、原子核乾板の飛跡位置測定精度が極めて高いため、短距離でも磁場による粒子軌跡の曲がりを検出できることである。また、電源不要で狭い空間に配置できることも利点として挙げられる。本稿では、そうした原子核乾板の使用例と将来の実験における使用を目指したテスト実験を紹介する。

### 2. CHORUS 実験の大面積エマルシヨントラッカー

CERN-WA95/CHORUS 実験は、CERN SPS Wide-Band Neutrino Beam を用いて、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動を出現モードで探索する短基線ニュートリノ振動実験で、1994 から 1997 年にかけてデータ収集が行われた<sup>[4]</sup>。ニュートリノ源から検出器までの距離は400~800 mで、ミューニュートリノの平均エネルギーは26.9 GeVである。探索できるニュートリノ振動のパラメーター領域は、大きな質量差 $\Delta m^2$ に対して $\sin^2 2\theta$ の値で  $4.4 \times 10^{-4}$  <sup>[5]</sup>にまで達し、既存の実験<sup>[6]</sup>の約 10 倍の感度を持っていた。当時、ニュートリノ振動は未発見で、その存在はニュートリノに質量と混合があることを意味し、さらに当時はタウニュートリノが暗黒物質の有力な候補のひとつと考えられていたので、素粒子物理学だけでなく宇宙物理学的にも注目された実験であった<sup>[7]</sup>。CHORUS 実験装置全体を図1<sup>[4]</sup>に示す。標的兼検出器は、ニュートリノ反応の観察がしやすいように乳剤層の厚い原子核乾板(サイズは $(0.71 \times 0.36)$  m<sup>2</sup>, 厚さ 90  $\mu$ m

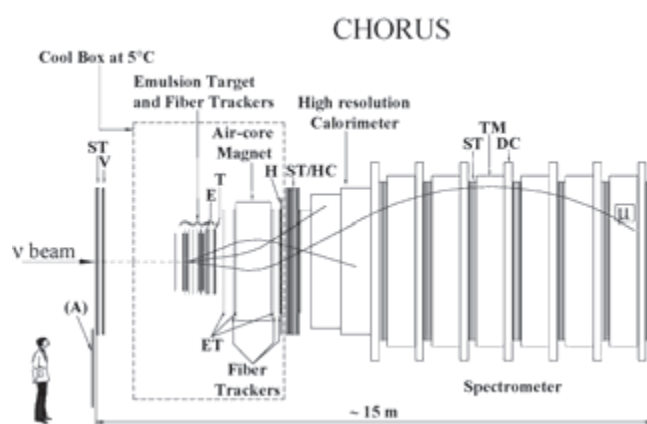


図 1 CHORUS 実験装置

の TAC ベース両面に厚さ 350  $\mu$ m の原子核乳剤を塗布したもの)で、質量770 kgの標的を構成した<sup>[4,8]</sup>。ニュートリノ振動によって出現したタウニュートリノの荷電カレント反応  $\nu_\tau N \rightarrow \tau^- X$  は、原子核乾板標的内部で起こるタウレプトンの崩壊を直接観測することによって、検出される。その崩壊の娘粒子がミューオン( $\mu^-$ )のとき、下流に設置したミューオンスペクトロメーターで電荷符号と運動量が測定され、あらかじめ設定した条件を満たせば、シグナルとなる。特にチャーム粒子のバックグラウンドを除くために、ミューオンが負電荷であることが重要で、これが CHORUS 実験のニュートリノ振動検出の基本戦略である。一方、このタウレプトンのミューオンへの崩壊分岐比は約18%であるのに対し、ハドロンへの崩壊分岐比は約65%である<sup>[9]</sup>。したがって、ハドロンに対しても電荷符号を決定し、運動量を測定できれば、ハドロンへの崩壊も解析対象に入れることにより、タウレプトンの検出効率は大きく向上する可能性がある。CHORUS 実験では、原子核乾板標的とミューオンスペクトロメーターの間に、空芯六辺形電磁石とダイヤモンド型シンチレーティングファイバートラッカー-DT(Diamond shaped Tracker) からなるハドロンスペクトロメーターを設置して、10 GeV/c までの負電荷ハドロンを捉える計画であった。そこで筆者らはさらに娘ハドロンの測定可能運動量領域を向上させることを目指し、そのハドロンスペクトロメーターの領域に原子核乾板からなる大型の飛跡検出器 ET(Emulsion Tracker) を挿入することを提案した。この提案はすぐ

\*教授 物理学教室  
Professor, Institute of Physics

に承認され、実行に移すことになった。

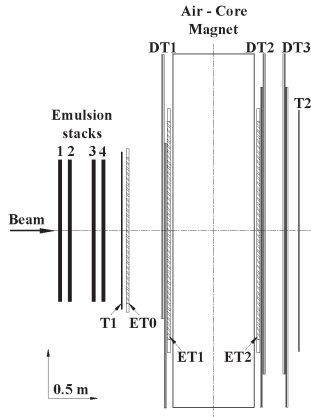


図2 原子核乾板標的と電磁石, DT, ET からなるハドロン  
スペクトロメーター

図2<sup>[4,10]</sup>には3層のET（上流からET0, ET1, ET2）の挿入場所が示されている。使用した原子核乾板のサイズは $(0.74 \times 0.37) \text{ m}^2$ で厚さ $800 \mu\text{m}$ の亚克力ベース両面に厚さ $100 \mu\text{m}$ の原子核乳剤を塗布したものである<sup>[10]</sup>。これをラミネート紙で包み、真空パックする。そして厚さ $20 \text{ mm}$ のハニカム支持板に貼り付け、真空ポンプで吸着させる。ET0は8枚の乾板をハニカム板表面に貼り付けて構成した。一方、ET1とET2はそれぞれ18枚の乾板からなる。原子核乾板を展開し全体の面積は、ET0の場合で $(1.480 \times 1.480) \text{ m}^2$ 、ET1とET2の場合には、 $(2.220 \times 2.220) \text{ m}^2$ である。ハニカム支持板と各原子核乾板との位置関係は、ハニカム板に埋め込んだX線照射装置で対応をとった。直径約 $1 \text{ mm}$ の黒い円形スポットとして乾板表面に観測できる。このETシステムの弱点は、乾板を貫通する（無関係な）荷電粒子のバックグラウンドで、測定すべき粒子飛跡と区別ができないと、電荷符号や運動量がひとつに決まらず、ETシステムは機能しない。このバックグラウンドをできるだけ抑えるために、各年のデータ収集（6か月間）の中間時に（すなわち、3か月ごとに）乾板を新しい乾板に交換した。また、原子核乾板は長期間保存すると潜像退行により、飛跡の認識効率が低下する。これを避けるために、標的システム全体は $5.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ のクールボックスに入っている。交換のたびに、そのクールボックスの天井を開けるわけにはいかないので、設置や交換は、実験装置の中にハニカム支持板は設置しておき、折りたたんだ乾板を挿入して、展開、設置してから真空ポンプで吸着する方法が採られた。このような挿入設置ができるのも原子核乾板の利点のひとつである。ETシステムは1996年春CHORUS実験装置に導入され、1996年と1997年のニュートリノビーム照射によるデータ収集が行われた<sup>[10,11]</sup>。したがって、ETの照射は全部で4つの期間となる。その4期間に対し、それぞれごく短時間電磁石の電源を切り、磁場ゼロの特別照射を行った。その時間帯にはビームに付随したミュオンがET乾板を含め、実験装置全体を貫通する。これを利用し、検出器全体のアラインメントを行った。取り出した原子核乾板に対し、現像後、ファイバートラッカーによる予測位置をスキャンし、対象となる荷電粒子飛跡の位置と傾きを精密に測定する。全ETシステム（3層の原子核乾板）で当該荷電粒子飛跡が測

定されると、原子核乾板同士のアラインメントの後、ETシステム内で飛跡の再構成を行うことができる。

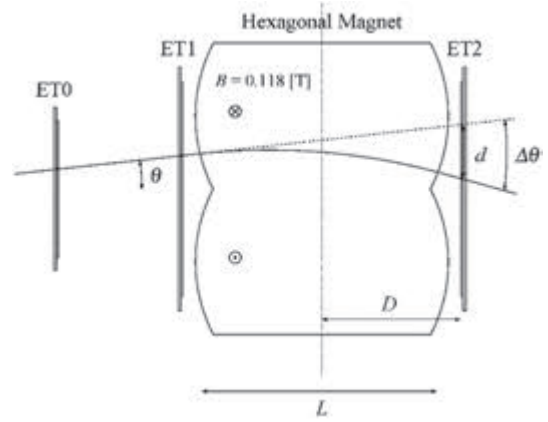


図3 磁場による飛跡の曲がりの再構成

その原理を図3<sup>[10]</sup>に示す。小さな曲がり角の近似で、磁場中の飛跡の曲がりによる位置の変位 $d(\text{m})$ は、磁場に垂直な面において、次のように表される。

$$\begin{aligned} d &= \Delta\theta D(1 + \tan^2 \theta) \\ &= 0.3 \frac{LB}{p} D(1 + \tan^2 \theta)^{3/2} \end{aligned}$$

ここで $D(\text{m})$ は電磁石中心からET2までの距離、 $L(\text{m})$ は電磁石の長さ、 $B(\text{T})$ は磁束密度の大きさ、 $\Delta\theta$ は曲がりの角度、 $\theta$ は飛跡のx軸（水平軸）に対する角度で、 $p(\text{GeV}/c)$ は磁場に垂直な面における運動量の成分である。具体的な数値として、

$$D = 0.48 \text{ m}, L = 0.75 \text{ m}, B = 0.118 \text{ T},$$

を代入し、

$$p = 10 \text{ GeV}/c, \tan \theta = 0$$

の場合を考えると、変位 $d(\text{m})$ は

$$d = 0.00127 \text{ m}$$

となる。この変位 $d$ と運動量 $p$ は反比例の関係にあるので、変位 $d$ を実測することにより、運動量 $p$ を求めることができる。

まず、電磁石オフ（磁場ゼロ）時の貫通ミュオンを用いて、変位 $d$ を求めると、結果は $\sigma \sim 100 \mu\text{m}$ のガウス分布となった。この値は各ETでの飛跡位置測定誤差とアラインメント誤差を反映しており、各ETでの飛跡位置測定誤差 $\sigma \sim 25 \mu\text{m}$ に対応する<sup>[10]</sup>。

ETシステムの運動量測定精度は、電磁石オン時の貫通ミュオンに対してETシステムで測定した運動量とミュオンスペクトロメーターで測定した値を比較することによって見積もることができる。これを図4<sup>[10]</sup>に示す。

結論として、ETシステムの運動量分解能は

$$\frac{\Delta p}{p} = \sqrt{(0.22)^2 + (0.010p[\text{GeV}/c])^2}$$

と求めることができた<sup>[10]</sup>。右辺第1項はハドロンスペクトロメーター部の物質による多重電磁散乱によるものである。第2項が位置測定誤差によるもので、DTのみの場合 $(0.035p[\text{GeV}/c])$ <sup>[4]</sup>と比べ、大きな改善が認められた<sup>[11]</sup>。

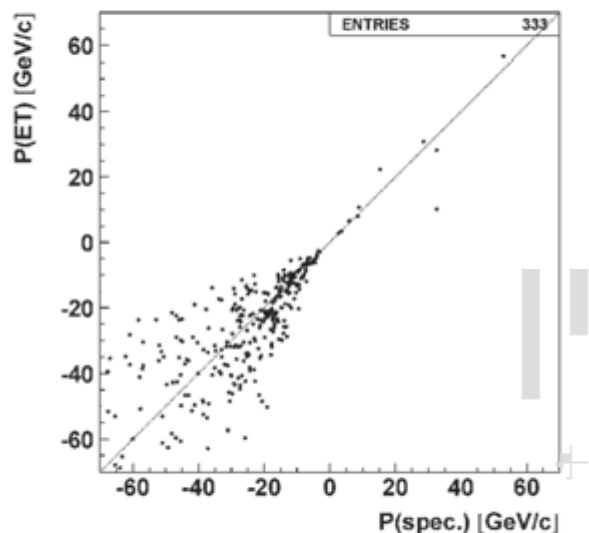


図4 貫通ミューオンに対して、ETで測定された運動量  $P(ET)$  vs. ミューオンスペクトロメーターで測定された運動量  $P(spec)$

### 3. 永久磁石を用いた小型エマルシヨンスペクトロメーター

タウニュートリノの存在は、Fermilab E872 実験 (DONUT 実験) により、2001 年に初めて実験的に確認された<sup>[12]</sup>。その標的兼検出器は ECC(Emulsion Cloud Chamber)で、金属板と原子核乾板を交互に積層した構造である<sup>[13]</sup>。これはタウニュートリノの発見であると同時に、ECC がタウニュートリノ反応の検出に有効であることの証明である。そのすぐ下流に磁場を印加したエマルシヨ検出器を配置できれば、全 6 種類のニュートリノを識別できるコンパクトで理想的なニュートリノ検出器を構成できる。そのコンパクト・エマルシヨ・スペクトロメーターCES (Compact Emulsion Spectrometer) の基本原理を実証するため、小型の永久磁石(1 テスラ)を用いて、筆者

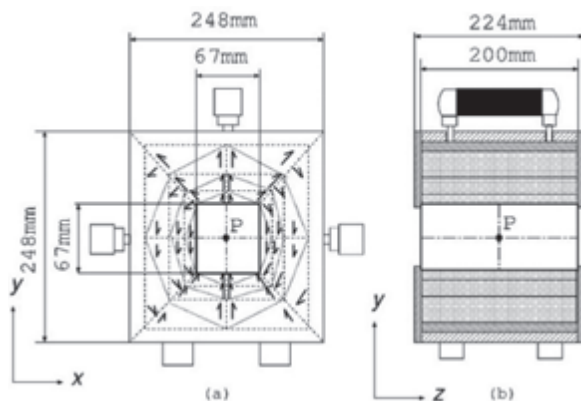


図5 ハルバツハ型磁気回路

らは KEK-PS においてビーム照射実験を行った<sup>[14,15]</sup>。図 5<sup>[14]</sup>は使用した永久磁石で、ネオジム・鉄・ボロン系焼結磁石(NEOMAX)を用いたハルバツハ型磁気回路である。全体のサイズは  $248\text{ mm} \times 248\text{ mm} \times 244\text{ mm}$ 、検出器本体を挿入できる内部のサイズは

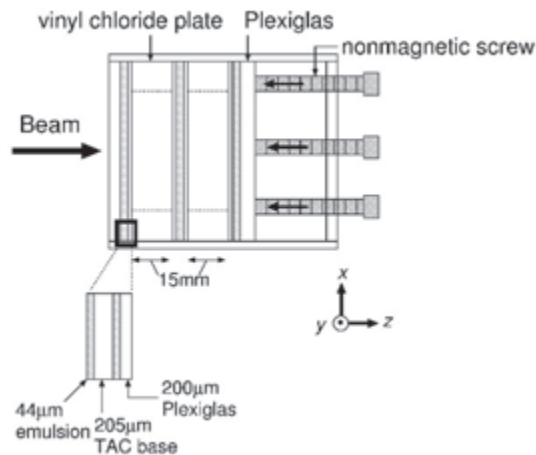


図6 エマルシヨンスタック

$67\text{ mm} \times 67\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、中心部の磁束密度は、 $1.06\text{ T}$  でほぼ一様である。原子核乾板 3 枚からなる図 6<sup>[14]</sup>のようなスタック (検出器本体) をその中に挿入した。使用した原子核乾板は標準の OPERA film<sup>[16]</sup>で、 $205\text{ }\mu\text{m}$  厚の TAC ベースの両側に  $44\text{ }\mu\text{m}$  の乳剤層が機械塗布されているものである。中心部分  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  に穴の空いた塩化ビニル板を、原子核乾板の間に挿入して間隔を  $15\text{ mm}$  に保ち、ラミネート紙でパックした。この磁気回路と小型検出器 (エマルシヨンスタック) からなるエマルシヨンスペクトロメーターを、KEK-PS T1 ビームラインに持ち込み、運動量  $0.5\text{ GeV}/c$ 、 $1.0\text{ GeV}/c$ 、 $2.0\text{ GeV}/c$  の正電荷および負電荷のハドロンビームを照射した<sup>[14,15]</sup>。負電荷のハドロンは主に  $\pi$  中間子だが、正電荷のハドロンは主に  $\pi$  中間子と陽子からなる。乾板の現像後、自動飛跡読み取り装置 UTS により、中心部の面積  $4\text{ cm}^2$  内の粒子飛跡を読みとり、アラインメントを経て、ハドロンビームの粒子飛跡を 3 次元再構成した。測定の最後のステップとして、3 層の原子核乾板のうち、最上流と最下流 2 層の乾板での各飛跡の位置を直線で結び、中間の乾板で観測された飛跡位置と直線との距離サジッタ  $s(\text{m})$  を計算する。図 7<sup>[14]</sup>は、上から運動量  $0.5\text{ GeV}/c$ 、 $1.0\text{ GeV}/c$ 、 $2.0\text{ GeV}/c$  の正電荷および負電荷のハドロンのサジッタ分布で、よく分離できていることがわかる。

さらにこのサジッタ  $s(\text{m})$  から各粒子飛跡の運動量  $p(\text{GeV}/c)$  は、小角度近似において、

$$p(\text{GeV}/c) = \frac{0.3 z B(\text{T}) (L(\text{m}))^2}{8s(\text{m})}$$

と求めることができる。ここで、 $z$  は各粒子の電気素量  $e$  を単位とした電荷、 $B(\text{T})$  は磁束密度の大きさ、 $L(\text{m})$  はスペクトロメーターの長さである。解析の結果、運動量  $0.5\text{ GeV}/c$ 、 $1.0\text{ GeV}/c$ 、 $2.0\text{ GeV}/c$  の正電荷および負電荷のハドロンビームに対して、運動量分解能  $\sigma(p)/p = 13.3 \pm 0.3\%$ <sup>[14]</sup>で測定できることがわかった。図 8<sup>[14]</sup>は測定された

ビームの運動量/電荷  $p/z$  の分布である。これらのことから、3 層構造の薄型エマルシヨンスペクトロメーターが、原理的にはうまく機能することがわかる。

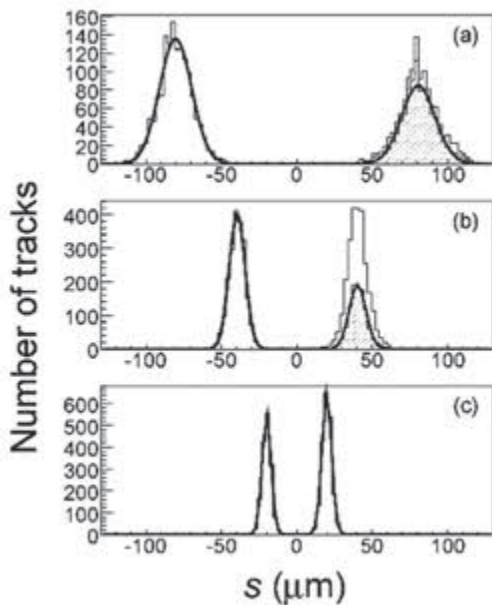


図7 観測された正電荷粒子と負電荷粒子のサジッタの分布  
(a) 0.5 GeV/c, (b) 1.0 GeV/c, (c) 2.0 GeV/c

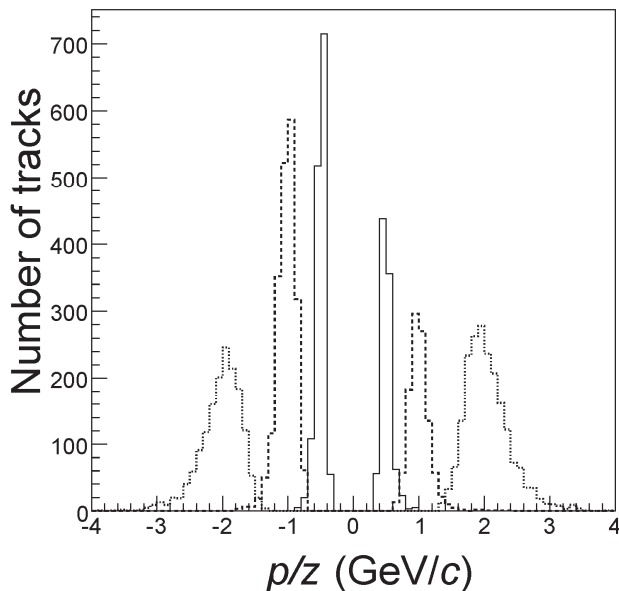


図8 測定された正電荷粒子と負電荷粒子の運動量/電荷の分布

#### 4. SHiP 実験における CES の実用化に向けた開発

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA でのタウニュートリノ出現の確認<sup>[17, 18]</sup>の後、タウニュートリノの研究を進める機運が高まった。純粋なタウニュートリノビームの生成は難しいが、タウニュートリノを多く含むビームは原子番号の大きな高密度物質を標的として用いるビームダンプ法により生成可能である。このビームダンプ法による新しい研究施設を CERN に建設し、隠れた粒子を探索する SHiP(Search for Hidden Particles)実験が立案された<sup>[19]</sup>。この中でタウニュートリノ研究が可能になるので、筆者らも参画することになった。SHiP 実験計画でタウニュートリノの標的兼検出器となるのは、DONUT 実験<sup>[13]</sup>や OPERA 実験<sup>[18]</sup>でタウニュートリノ観測に実績のある ECC(Emulsion Cloud Chamber)である。これは原子核乾板と厚さ 1mm の鉛板を交互に積層した構造で、密度の高い鉛板がニュートリノの標的となり、その両側の原子核乾板を飛跡検出器として、荷電カレント反応により生成したタウレプトンの崩壊を効率よく観測する。しかし、既存の ECC では電荷符号は分からないので、タウニュートリノと反タウニュートリノを識別することはできない。そこで SHiP 実験では強力な磁場中に 3 枚の原子核乾板をそれぞれ 15 mm 離して配置する CES(Compact Emulsion Spectrometer)の導入を計画している<sup>[19]</sup>。これは前述の CES 原理検証実験の応用である。標的兼検出器 ECC のすぐ下流に CES を配置して、タウニュートリノ荷電カレント反応から放出されたタウレプトンの崩壊娘粒子の飛跡の曲がりの向きからその電荷符号の正負を判別し、さらに飛跡の曲がりの大きさ(サジッタ)から運動量を測定する。この娘粒子の電荷符号により、正・反ニュートリノを判別できるので、分離した研究が可能になる。例として運動量 10 GeV/c の荷電粒子の場合、1.2 T の磁場を用いても、全長 30 mm の CES でのサジッタは約 4 μm しかない。このサジッタの検出は通常の検出器では難しく、原子核乾板の特長を生かした装置である。CES の原理は前述のように KEK のビーム照射実験によって実証されている。しかし、この実証実験は小さな乾板(約 50 mm × 50 mm)を用いた小型 CES でビーム運動量は 0.5~2.0 GeV/c、垂直照射という限られた条件下での検証であった<sup>[4]</sup>。実際の SHiP 実験で使用するためには、原子核乾板のサイズとして標準 OPERA film<sup>[16]</sup>サイズの 125 mm × 100 mm、運動量は 10 GeV/c 程度まで、また飛跡の原子核乾板に対する傾きも  $\tan \theta = 0.3$  程度まで、測定可能領域を拡張する必要がある。そのためには、原子核乾板自体の平面性や一様性がより厳しく要求されるので、CES 本体のスタックも大きくなった乾板の平行性を保ち、長い照射期間にわたって固定する構造が必要である。さらに、解析方法やその手順についても、大量の粒子飛跡を処理し、電荷符号識別と運動量測定を



可能にする方法を確立する必要がある。これらの課題を解決し、使用条件を満たす CES 原型を作り上げ、加速器ビームや宇宙線を照射してその性能を確認し、この技術の実用化を推進する研究を行った。具体的には以下の項目を検討課題とした。(1) 原子核乾板は透明なベースの両面に乳剤を塗布したものである。平面性と扱いやすさを考え、ベース材料として最適なものは何か。(2) CES 構造体として最適なものはどのようなものか。低密度物質をスペーサーとして乾板間に挿入して、乾板間の距離を保証するか、それとも中央部分に穴を空けた枠の構造体か。(3) 大量の自動解析に適した解析方法はどのようなものか。これらを念頭に、研究を進めた。検討課題(1)のベース素材としては、厚さ約200  $\mu\text{m}$  のポリスチレンシート、アクリル板、ガラス板の三種類の候補それぞれの原子核乾板を作製した。また、検討課題(2)の CES 構造体として、低密度物質としてロハセル板 ( $\rho = 0.057 \text{ g/cm}^3$ ) を用い、パネで押さえ込む構造体、アクリル製枠で乾板間に空気ギャップをつくる構造体の2種類を原型として作製した。これらを2017年8月、CERNに持ち込み、PS T9 ビームラインにて磁束密度 1 T の電磁石 MNP17 の内部に挿入して、運動量 1 GeV/c ~ 10 GeV/c の正電荷および負電荷のハドロンビームを照射した<sup>[20]</sup>。

この加速器ビーム照射実験の結果、わかったことをまとめる<sup>[20, 21]</sup>。

- ・運動量1 GeV/c から6 GeV/c までの電荷符号が正・負のハドロンビームのサジッタを測定したところ、きれいに分離できることがわかった(測定可能な運動量領域の拡張)。この結果を図9<sup>[21]</sup>と図10<sup>[21]</sup>に示す。

- ・使用した原子核乾板の中央部(全乾板面の約半分の面積)において、飛跡のサジッタをよい分解能で測定できることがわかった(測定可能なCES面積の拡張)。

- ・粒子飛跡の乾板に対する傾きが、 $\tan \theta = 0.3$  まで、飛跡のサジッタをよい分解能で測定できることがわかった(測定可能な角度領域の拡張)。

すなわち、当初の目標のうち、測定可能領域拡張の目標はほぼ達成できた。また、CES 製作に関して、以下の知見を得た。

- ・ベース素材としては、ガラス板が最適である。ただし、今回の加速器ビーム照射実験で試したガラス板厚さ200  $\mu\text{m}$  では、特に注意深い取扱いを必要とすることがわかった。

- ・CES 構造体として、低密度スペーサーを乾板の間に挟む構造のスタックは、低密度スペーサーとして使用したロハセル板の厚みの一様性が十分ではなく、またパネで押すことによるたわみも観測され、本研究に必要なサジッタ測定には十分な性能ではない。一方、空気ギャップを作り出す枠型のCES 構造体は、乾板を押さえる機構を工夫し、ガラス板を厚くすれば、改良型を作れそうなのことがわかった。

その後のSHiP実験グループの内部では、ECCには金属板として、より平面性が高く密度も大きいタングステン合金板を使用し、サイズも400 mm  $\times$  400 mm にすることが検討されている<sup>[22]</sup>。それに伴ってCESも大型化することになる。構造体やその材質も含め、現実化のためにはさらなる改良や工夫が必要になるが、上述のCES 構造体を基本的なモジュールとして、これを積み重ねていけば解決可能と考えられる。

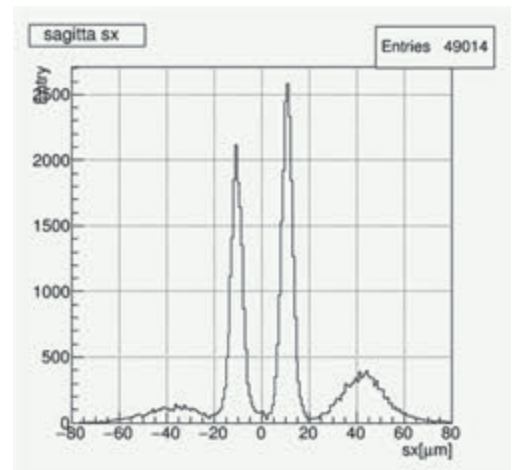


図9 観測された正電荷粒子と負電荷粒子のサジッタ分布  
(運動量 1 GeV/c, 4 GeV/c )

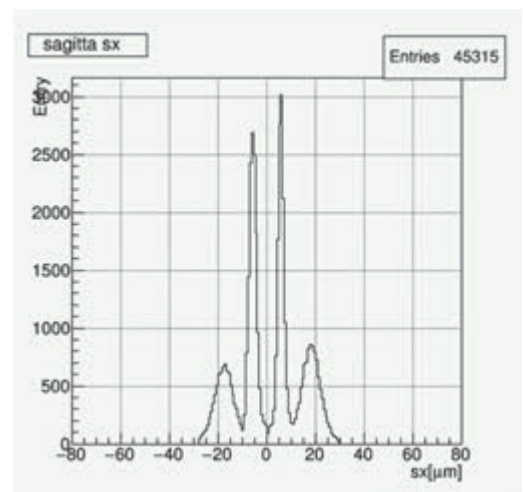


図10 観測された正電荷粒子と負電荷粒子のサジッタ分布  
(運動量 2 GeV/c, 6 GeV/c )

## 5. まとめと今後の展望

原子核乾板の技術も反応点近傍の観測という伝統的な使用法からラジオグラフィーやガンマ線天文学への応用<sup>[23, 24]</sup>などその使われ方は広がっている。本稿では、原子核乾板を高精度な粒子飛跡位置検出器として用い、磁場と組み合わせたエマルシヨンスペクトロメーターについて、その使用例とテスト実験の結果を紹介した。ニュートリノ実験においては、荷電カレント反応から放出されたレプトンの電荷符号の識別は正・反ニュートリノの判別に直接つながる重要な技術である。エマルシヨンスペクトロメーターの技術が今後、特にタウニュートリノ関連の研究でその真価を発揮し、新しい物理の発見に寄与することを期待している。

## 参考文献

- [1] a) S. Kinoshita, The Photographic Action of the  $\alpha$ -Particles emitted from Radioactive Substances, *Proc. Roy. Soc.* 83A, 432-458 (1910); b) C.M.G. Lattes, H. Muirhead, G.P.S. Occhialini and C.F. Powell, Processes Involving Charged Mesons, *Nature* 159, 694-697 (1947); c) K. Niu, E. Mikumo and Y. Maeda, A Possible Decay in Flight of a New Type Particle, *Prog. Theor. Phys.* 46, 1644-1646 (1971).
- [2] a) E.H.S. Burhop et al., Observation of a likely example of the decay of a charmed particle produced in a high energy neutrino interaction, *Phys. Lett.* 65B, 299-304 (1976); b) N. Ushida et al. (Fermilab E531 Collaboration), Measurement of the  $D^0$  Lifetime, *Phys. Rev. Lett.* 45, 1049-1052; c) N. Ushida et al., Measurement of  $D^+$ ,  $F^+$ , and  $A_1^+$  Charmed-Particle Lifetimes, *Phys. Rev. Lett.* 45, 1053-1056; d) N. Ushida et al. (Fermilab E531 Collaboration), Experimental details on Lifetime Measurements of Neutrino-Produced Charmed Particles in at Tagged Emulsion Spectrometer, *Nucl. Instrum. Meth.* 224, 50-64 (1984); e) K. Kodama et al. (Fermilab E653 Collaboration), Hybrid Emulsion Spectrometer for the Detection of Hadronically Produced Heavy Flavor States, *Nucl. Instrum. Meth. A* 289, 146-167 (1990).
- [3] a) T. Hayashino et al., A new method for momentum measurement of particle tracks in nuclear emulsions, *Nucl. Instrum. Meth. A* 255, 482-485 (1987); b) Tests of a magnetic emulsion spectrometer by high-energy heavy ions, *Nucl. Instrum. Meth. A* 271, 518-522 (1988); c) S. Buontempo et al., The compact emulsion spectrometer, *Nucl. Instrum. Meth. A* 457, 464-470 (2001).
- [4] E. Eskut et al. (CHORUS Collaboration), The CHORUS experiment to search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillation, *Nucl. Instrum. Meth. A* 401 7-44 (1997).
- [5] E. Eskut et al. (CHORUS Collaboration), Final results on  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillation from the CHORUS experiment, *Nucl. Phys. B* 793, 326-343 (2008).
- [6] N. Ushida et al. (Fermilab E531 Collaboration), Limits to  $\nu_\mu \nu_e \rightarrow \nu_\tau$  Oscillations and  $\nu_\mu \nu_e \rightarrow \tau^-$  Direct Coupling, *Phys. Rev. Lett.* 57, 2897-2900 (1986).
- [7] H. Harari, Light neutrinos as cosmological dark matter. A crucial experimental test, *Phys. Lett. B* 216 413-418 (1988).
- [8] S. Aoki et al., Nuclear emulsions in a large hybrid experiment (CHORUS) to search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillations, *Nucl. Instrum. Meth. A* 447, 361-376 (2000).
- [9] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Review of Particle Physics, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020, 083C01 (2020).
- [10] S. Aoki, J. Dupraz, J.P. Fabre, W. Flegel, T. Hara, Y. Ishii, T. Kawamura, D.C. Kim, T. Kurihara, E. Niu, S. Ogawa, H. Shibuya, J.S. Song, G. Van Beek, P. Vilain, J. Watanabe, G. Wilquet and C.S. Yoon, The large area emulsion tracker of the CHORUS experiment, *Nucl. Instrum. Meth. A* 488, 144-154 (2002).
- [11] a) T. Kawamura, Development of Large Area Emulsion Tracker for the CHORUS Experiment, Ph.D. Thesis, Toho University (1999); b) T. Kawamura, Developments in the Emulsion Technique, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 85, 105-110 (2000).
- [12] a) K. Kodama et al. (DONUT Collaboration), Observation of tau neutrino interactions, *Phys. Lett. B* 504, 218-224 (2001); b) K. Kodama et al. (DONuT Collaboration), Final tau-neutrino results from the DONuT experiment, *Phys. Rev. D* 78, 052002 (2008).
- [13] K. Kodama et al. (DONUT Collaboration), Detection and analysis of tau neutrino interactions in DONUT emulsion target, *Nucl. Instrum. Meth. A* 493, 45-66 (2002).
- [14] C. Fukushima, M. Kimura, S. Ogawa, H. Shibuya, G. Takahashi, K. Kodama, T. Hara and S. Mikado, A thin emulsion spectrometer using a compact permanent magnet, *Nucl. Instrum. Meth. A* 592, 56-62 (2008).
- [15] 福島知佳, ニュートリノ・反ニュートリノ反応識別のための薄型エマルシヨンスペクトロメーターの基礎研究, 博士論文, 東邦大学 (2008).
- [16] The OPERA film: New nuclear emulsion for large-scale, high-precision experiments, *Nucl. Instrum. Meth. A* 556, 80-86 (2006).
- [17] a) N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), Discovery of  $\tau$  Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment, *Phys. Rev. Lett.* 115, 121802 (2015); b) N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration), Final Results of the OPERA Experiment on  $\nu_\tau$  Appearance in the CNGS Neutrino Beam, *Phys. Rev. Lett.* 120, 211801 (2018).
- [18] R. Acquafredda et al. (OPERA Collaboration), The OPERA experiment in the CERN experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam, *JINST* 4, P04018 (2009).
- [19] M. Anelli et al. (SHiP Collaboration), Technical Proposal, A Facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS, CERN-SPSC-2015-016/ SPSC-P-350 (2015).
- [20] 河野歩実, SHiP 実験へ向けたコンパクトエマルシヨンスペクトロメーター, 修士論文 (東邦大学), (2019).
- [21] 河野歩実, SHiP 実験へ向けたコンパクトエマルシヨンスペクトロメーターの開発, 日本物理学会第 74 回年次大会 14aK305-06, 九州大学伊都キャンパス (2019.3).
- [22] SHiP Collaboration, SHiP Experiment PROGRESS REPORT, CERN-SPSC-2019-010 / SPSC-SR-248 (2019).
- [23] K. Morishima, A. Nishio, M. Muto, T. Nakano and M. Nakamura, Development of nuclear emulsion for muography, *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 60, S0112 (2017).
- [24] a) S. Takahashi, S. Aoki, K. Kamada, S. Mizutani, R. Nakagawa, K. Ozaki and H. Rokujo, GRAINE project: The first balloon-borne, emulsion gamma-ray telescope experiment, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2015, 043H01 (2015); b) K. Ozaki, S. Aoki, K. Kamada, T. Kosaka, F. Mizutani, E. Shibayama, S. Takahashi, Y. Tateishi, S. Tawa, K. Yamada, H. Kawahara, N. Otsuka and H. Rokujo, Development of new-type nuclear emulsion for a balloon-borne emulsion gamma-ray telescope experiment, *JINST* 10 P12018 (2015).