

機関番号：32661

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540296

研究課題名（和文） ニュートリノ振動研究のための磁場印加型エマルジョン検出器の研究

研究課題名（英文） Development of an emulsion detector placed in a magnetic field to study neutrino oscillations

研究代表者

渋谷 寛 (SHIBUYA HIROSHI)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：40170922

研究成果の概要（和文）：長基線ニュートリノ振動実験 OPERA の本格的データ収集が 2008 年から成功裡に行われており、最初のタウニュートリノ候補が検出された。この OPERA 実験で使われている技術を基に、6 種類のニュートリノ・反ニュートリノ荷電カレント反応全ての分離検出が可能な次世代ニュートリノ振動実験の検出器の研究を行った。我々は実際にそのような磁場印加型エマルジョン検出器の小型器を製作し、電子ビーム、ハドロンビームを用いた試験実験を行った。その結果、電荷符号の測定に対する精度は十分であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Physics data taking of OPERA, a long baseline neutrino oscillation experiment, has been successfully in progress since 2008 and a first tau neutrino candidate event has been found. Based on the techniques used in OPERA, we have studied a possible emulsion detector of next generation neutrino oscillation experiments to observe all the 6 types of neutrino/anti-neutrino charged current interactions. We have made a prototype of such a detector placed in a magnetic field and tested it with electron and hadron beams. As a result, we have found that it has sufficient accuracy for the electric charge sign measurement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術

1. 研究開始当初の背景

1998年のスーパーカミオカンデ実験によるミューオンニュートリノ欠損の観測以来、様々な（消滅型）ニュートリノ振動実験により、ニュートリノフレーバー振動の存在は確立されてきた。しかし、振動によって現れた

ニュートリノの反応から放出されたレプトンを識別して検出する出現型のニュートリノ振動実験は皆無であった。これを目指したのが OPERA 実験である。その次の課題は何か。未決定の混合角 θ_{13} と未発見の CP の破れの研究だといわれている。このような精密

測定の時に入ったニュートリノ振動実験にとって重要な検出器の一つが **Emulsion Cloud Chamber(ECC)**である。ECC は金属板とエマルジョンフィルムを交互に積層した構造をもつ検出器で、その最大の特長はタウニュートリノを検出できることである。ミューニュートリノと電子ニュートリノも観測できるので、3種類のニュートリノフレーバーを検出できる実績をもつ唯一の検出器である。これを磁場中に設置して荷電カレント反応から放出されたレプトンの電荷符号を決定できれば、6種類のニュートリノ・反ニュートリノ荷電カレント反応全ての分離検出、すなわち出現の観測が出来る次世代のニュートリノ振動研究にとって夢の検出器となる。

2. 研究の目的

OPERA 実験を遂行してニュートリノ振動研究を推進すると共に、次世代のニュートリノ振動研究への技術開発、すなわち磁場中に設置するエマルジョン検出器の設計と開発が本研究の目的である。

3. 研究の方法

3つのニュートリノ荷電カレント反応のうち、タウニュートリノ荷電カレント反応の検出が一番難しいが、それは OPERA 実験の中で成し遂げられる。検出されれば、その電荷符号の識別はタウレプトンの崩壊娘粒子の電荷符号を測ればよいので、比較的単純である。電荷符号識別が一番困難なのは電子ニュートリノ荷電カレント反応である。放出された電子の ECC 中の同定は可能だが、電子は電磁シャワーを起し、元々の電子とシャワーで発生した電子・陽電子が混じってしまうため、放出電子の電荷符号の測定は極めて困難な課題である。本研究では特にこの電子ニュートリノ荷電カレント反応に注目した。

この電子ニュートリノ荷電カレント反応から放出される電子の電荷符号の測定に向けて、

(1) 電子を ECC に照射し、どの程度の深さまで元々の電子を分離識別できるか、

(2) ECC とスペクトロメーター部から成る検出器を製作し、電子ビームを照射して、同定や電荷符号測定が可能か、また測定精度はどうか、

(3) 検出器内のフィルムとスペーサーの固定法およびその適切な締め付け強度、の研究を行った。

4. 研究成果

まず、前年度までの研究により、KEK PS の 0.5 GeV/c から 2.0 GeV/c ハドロンビームを 30mm 長のエマルジョンスペクトロメーターに照射した実験の解析を行い、約 13% の運動量分解能の達成を確認した。ビーム運動量が 10 GeV/c になっても運動量測定の誤差が約 28 % と十分な電荷符号識別能力があることがわかった。これを論文として投稿し、掲載された。

このエマルジョンスペクトロメーターの結果に基づき、ECC 標的部+スペクトロメーター部の繰り返しという構造のエマルジョン検出器を考案した。

(1) 電子ニュートリノの検出と放出レプトン(電子または陽電子)の電荷符号識別によるニュートリノ反応・反ニュートリノ反応の識別に注目すると、電子がどの程度の深さまで元々の電子を分離できて識別可能かということにより、ECC 標的部の金属板を何枚(何 mm)まで積層可能かということが決まる。そこで、ECC 標的部において電子がどの程度の深さでどう振舞うかをテスト実験の ECC を用いて調べた。

SPring 8 の 2.0 GeV 電子を照射した ECC で電子を追跡したところ、鉛板 5 枚(5 mm)までは約 90% の確率で追跡できることがわかった。ただし、電子の追跡には自動飛跡読取装置の検出効率が 90% 以上であることを確認の上、マッチング許容度を広く取る必要があることがわかり、バックグラウンドを低く抑える必要があることがわかった。

(2) OPERA 実験共同研究者の要請と協力を得て、CERN 研究所に 1 T 永久磁石と複数のエマルジョン検出器を持ち込み、CERN PS の 2 次ハドロンビーム(2.0 GeV/c, 4.0 GeV/c の電子を多く含むビームと 5.0 GeV/c, 10.0 GeV/c のハドロンビーム)を照射した。

①電子解析用エマルジョン検出器

構造: 1 mm 厚の鉛板 5 枚使用の ECC を上流と下流から 2 つの 5 層スペクトロメーターで挟んだ複合エマルジョン検出器である。

目的: ECC 内で電磁シャワーが発達するが、入射粒子をスペクトロメーター部まで追跡して、その電荷符号を測定可能か、また、ECC 中で入射電子を識別できるか、を調べる。

照射条件:

T1 2.0 GeV/c e^- 100 beam particles/cm²

T2 2.0 GeV/c e^+ 100 beam particles/cm²

T3 4.0 GeV/c e^+ 75 beam particles/cm²

T4 4.0 GeV/c e^+ 200 beam particles/cm²

リファレンス用照射(永久磁石の外):

10 GeV/c π^+ or π^- $\theta = 0, +0.1, -0.1$

1000 beam particles/cm²

②ハドロン運動量測定用エマルジョンスペクトロメーター

構造：中央部分(4 cm * 4 cm)をくりぬいた厚さ 15 mm の塩化ビニル板スペーサー2 枚を使用した 30 mm 長のエマルジョンスペクトロメーター、2 スタックで、上流と下流のフィルムはダブレット (フィルム 2 枚を密着したもの) 構造にした (5 層スペクトロメーター)。ダブレット構造にしたのは検出効率向上とともに測定精度向上を狙っている。

目的：ハドロン運動量測定用エマルジョンスペクトロメーターに前回の照射より高い運動量のビームを照射し、どのくらい高い運動量まで測定できるか、その精度を見極める。
照射条件：

T5 5 GeV/c π^+ & π^- 1000 beam particles/cm²

T6 10GeV/c π^+ & π^- 1000 beam particles/cm²

リファレンス用照射 (永久磁石の外)：

10GeV/c π^- $\theta = 0$ 2000 beam particles/cm²

ビーム照射後、精密フォトマスクを用いたグリッドマーク焼付けを行った。このグリッドマークは測定時にエマルジョンフィルムを顕微鏡ステージに固定するときのプレートセット (フィルム座標とステージ座標の対応付け) に用いると共に、解析時にサブミクロン精度でフィルムの変形を補正するためのリファレンスとして用いる。

照射後、エマルジョンフィルムはイタリア・グランサツソ研究所に運び、OPERA 実験用現像装置で現像を行った。十分な乾燥の後、OPERA 実験のフィルム同様に日本へ送り返した。飛跡の測定と解析は、東邦大学において高速自動飛跡読取装置 (Ultra Track Selector) を用いて行った。

電子解析用エマルジョン検出器の解析では、まず ECC 中の電子を追跡するにはつなぎの条件を緩めることが必要である。その位置と角度に対する条件を緩めれば追跡可能で、さらにスペクトロメーター部に入った電子ビームの曲がりを観測することが出来た。

ハドロン運動量測定用エマルジョンスペクトロメーターの解析では、エマルジョンフィルム同士の位置合わせ (アラインメント) を十分に行うと、サジッタの広がりには予想以上に小さく、位置分解能 (アラインメント誤差を含む位置測定精度) は当初想定していた 0.8 ミクロンではなく、0.3 ミクロン程度と小さいことがわかった。これは、特に運動量が高い粒子の運動量測定や電荷符号測定に対して重要な結果である。

一方、フィルムによっては場所により角度空間におけるビームの形状が異なっていることが観測された。これはフィルムが一平面ではなく、たわんでしまった結果と考えられる。また、磁石外で照射したリファレンスビームと磁石内で照射したビームとの位置関係が予想と異なり、y 軸方向 (磁場方向) に 10 ミクロン程度ずれてしまったものも観測された。エマルジョン検出器を製作した際の締め付け強度が十分でなく、複数回の照射の際の取り扱い時にエマルジョンフィルムがずれてしまったもの (スリップ現象) と考えられる。

(3) 検出器内のフィルムとスペーサーの固定法をどうするか、その最適な締め付け強度はどの程度か、定量的な結果を目指し、衝撃試験を行った。

衝撃試験の手順：

- ① OPERA フィルムに蓄積された放射線飛跡を消去するためにリフレッシュ作業 (摂氏 28 度、相対湿度 97% の環境に 6 日間放置) を行う。
- ② OPERA フィルム 4 枚と厚さ 5 mm の塩化ビニル製スペーサー 2 枚からなるエマルジョンスペクトロメーターを製作して、非磁性ビスで固定し、遮光パッキングを行う。
- ③ 1 回目の宇宙線照射 (フィルムが水平になるように設置して約 5 日～7 日間放置する)。
- ④ 落下実験 (10 cm の高さから横にして 1 回落とす) を行う。
- ⑤ 2 回目の宇宙線照射 (フィルムが水平になるように設置して約 5 日～7 日間放置する)。
- ⑥ 解体してフィルムを取り出し、現像する。
- ⑦ 自動飛跡読取装置によるスキヤニング (約 8 時間/cm²) を行う。
- ⑧ 各フィルムに記録された飛跡要素をつないで、宇宙線飛跡をエマルジョン検出器全体にわたって再構成する。

衝撃試験の解析：もし、落下実験により 2 枚のフィルムが互いにずれた場合には、飛跡要素同士の位置関係をとると 2 つのピークが現れる。もし、ずれなかった場合には 1 つのピークが現れる。

この衝撃試験は以下の 3 回行った。締め付けの力は 1 回目 2.7 kgf、2 回目 3.3 kgf、3 回目 4.3 kgf で、1 回目、2 回目は数十～200 ミクロン程度ずれてしまうことが確認されたが、3 回目はずれることなく固定されていたことが確認された。もちろん、試験回数を増やした追試験が必要であるが、宇宙線を用いた試験で固定法の確認が可能であることがわかった。宇宙線を用いた実験方法確立への第一歩になったと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

① N. Agafonova, S. Mikado(111 番目), S. Ogawa(126 番目), H. Shibuya(165 番目), et al. (計 200 名: OPERA), Observation of a first ν_τ candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam, Phys. Lett. B 691 (2010) 138-145 (査読有) .

② N. Agafonova, S. Mikado(99 番目), S. Ogawa(113 番目), H. Shibuya(151 番目), et al. (計 184 名: OPERA), Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector, Eur. Phys. J. C 67 (2010) 25-37 (査読有) .

③ N. Agafonova, S. Ogawa(128 番目), H. Shibuya(168 番目), et al. (計 204 名: OPERA), The detection of neutrino interactions in the emulsion/lead target of the OPERA experiment, Journal of Instrumentation 4 (2009) P06020 (17 pages) (査読有) .

④ T. Abe, S. Ogawa(51 番目), H. Shibuya(60 番目), et al. (計 71 名: International Scoping Study (ISS) for a neutrino factory and Super-Beam facilities), Detector and flux instrumentation for future neutrino facilities, Journal of Instrumentation 4 (2009) T05001 (83 pages) (査読有)

⑤ R. Acquafredda, S. Ogawa(173 番目), H. Shibuya(220 番目), et al. (計 262 名: OPERA), The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam, Journal of Instrumentation 3 (2009) P04018 (56 pages) (査読有) .

⑥ A. Anokhina, S. Mikado(104 番目), S. Ogawa(118 番目), H. Shibuya(148 番目), et al. (計 182 名: OPERA), Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment, Journal of Instrumentation 3 (2008) P07005 (19 pages) (査読有) .

⑦ A. Anokhina, S. Ogawa(118 番目), H. Shibuya(147 番目), et al. (計 183 名: OPERA), Study of the effects induced by lead on the emulsion films of the OPERA experiment, Journal of Instrumentation 3 (2008) P07002 (17 pages) (査読有) .

⑧ C. Fukushima, M. Kimura, S. Ogawa, H. Shibuya, G. Takahashi, K. Kodama, T. Hara, S. Mikado, A thin emulsion spectrometer using a compact permanent magnet, Nucl. Instr. and Meth. A 592 (2008) 56-62 (査読有) .

[学会発表] (計 4 件)

① 石田拓運、渋谷寛、小川了、三角尚治、他、ニュートリノ振動実験 OPERA における τ ハドロン崩壊のバックグラウンドの研究 2、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月、新潟大学.

② 渋谷寛、小川了、三角尚治、他、原子核乾板を用いたニュートリノ振動の研究、日本写真学会、2010 年 11 月、ハートピア京都.

③ 松尾友和、渋谷寛、小川了、三角尚治、他、ニュートリノ振動実験 OPERA における τ ハドロン崩壊のバックグラウンドの研究、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月、九州工業大学.

④ 木村充宏、渋谷寛、小川了、三角尚治、他、Photomask を用いた原子核乾板の歪み補正技術の開発、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月、山形大学.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ph.sci.toho-u.ac.jp/lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渋谷 寛 (SHIBUYA HIROSHI)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号: 40170922

(2) 研究分担者

三角 尚治 (MIKADO SHOJI)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号: 80408947

小川 了 (OGAWA SATORU)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号: 10256761

(H21→H22: 連携研究者)