低エネルギー領域における反ニュートリノ－鉄荷電カレント反応断面積の測定

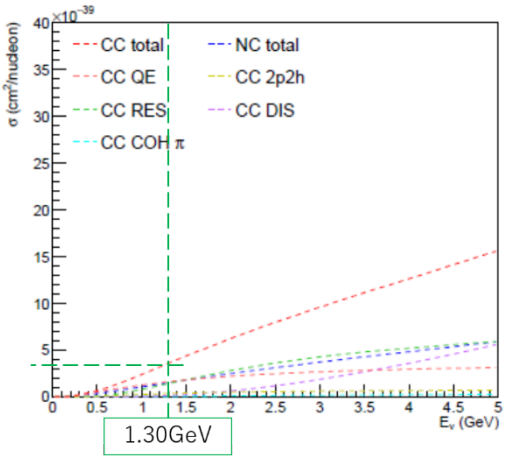
高木秀彰（素粒子物理学教室）

数百 MeV から数 GeV の低エネルギー領域におけるニュートリノ反応断面積はニュートリノ振動の精密測定にとって必要不可欠な要素であるが、我々の理解は十分とは言えない。
NINJA 実験（Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator）は高い位置分解能を有する原子核乾板を用いることで低エネルギーの陽子まで検出可能にして、ニュートリノ- 原子核反応の詳細な解析を行うことを目的として行われている実験である。
原子核乾板は古くから使われている写真乾板の一種で、荷電粒子が通過すると乳剤中に存在するハロゲン化銀と反応し、黒い銀粒子が析出する。これにより、荷電粒子の飛跡を顕微鏡で高い位置分解能で観測することができる。

本研究では 2016 年に行われた 65kg の鉄標的に平均エネルギー1.49GeV の反ニュートリノビームを照射した実験において抽出された反ニュートリノ- 鉄反応事象について解析を行った。
検出器はビーム上流から ECC(Emulsion Cloud Chambar)、多段シフター、INGRID で構成されており、ECC は鉄板と原子核乾板の積層構造をしており、標的兼検出器の役割を持っている。INGRID は鉄板とシンチレーターバーで構成された検出器で、本実験ではミュー粒子の選定に用いている。多段シフターでは原子核乾板を一定時間ごとに移動させる機構を備えており、原子核乾板に記録される飛跡に通過した時刻に対応したずれが生じる。この飛跡のずれによって原子核乾板に写る荷電粒子の飛跡に時間情報を付与する。それによって INGRID で検出された飛跡と ECC に記録された飛跡のマッチングを取ることが可能となっている。
各検出器で検出された飛跡情報を使い、ニュートリノ反応によって出てくるミュー粒子を INGRID で捉え、その飛跡を ECC まで逆追跡する手法でニュートリノ反応の再構成を行う。

その結果で抽出された反応点候補は 1098 事象あり、それら全ての事象について顕微鏡を用いたマニュアルチェックを行い、標的物質が鉄となる反応事象候補を確定した。

ニュアルチェックの結果、解析対象の反ニュートリノ – 鉄反応は 833 事象であり、それらについて各事象から放出される荷電粒子の本数分布、反応由来のミュー粒子、荷電パイ中間子、陽子それぞれの運動量分布をモンテカルロシミュレーション(NEUT)の結果と比較を行った。また、先行研究やモンテカルロシミュレーションを用いて背景事象を見積もることで反ニュートリノの鉄反応における全反応断面積は(4.143±0.217)×10^{-39}cm^2/nucleon という結果が得られた。



タウニュートリノ・反タウニュートリノ識別のための新薄型エマルションスペクトロメーターの開発

鶴岡千穂 (素粒子物理学教室)

現代の素粒子物理学において標準理論(Standard Model)は、素粒子のふるまいを記述する理論の一つで、これまでの数多くの実験で理論に矛盾が見つかっていないが、ニュートリノ質量や振動、ダークマターの存在などの多くの現象を説明できていない。標準理論は自然を記述する究極の理論ではなく、これらの現象を記述できる未知の粒子や相互作用の存在が期待される。ν_τは標準理論の中ではあまり性質が知られていない粒子の 1 つであり、新しい物理においてν_τが重要な役割を果たす例がいくつか挙げられている。また、$\bar{\nu}_\tau$の直接検出はまだなされていないため、これを分離識別する必要がある。

本研究室ではν_τ・$\bar{\nu}_\tau$識別を目的としたニュートリノ検出器、Compact Emulsion Spectrometer(CES)の開発を行っている。これはν_τにおいては $\tau \to \mu$ だけでなく $\tau \to$h(ハドロン)への崩壊モードの崩壊娘粒子の電荷識別が可能なユニークな検出器でもある。CES は原子核乾板と低物質量の支持体を交互に積層した構造をもち、厚さ 3 cm の空間で(10 GeV/c ハドロンの場合、±4 μm の)サジッタ s の測定をして、τ 崩壊娘ハドロンの電荷符号を分離・識別する。

これまでに先行研究で原理検証は行われており、0.5~2.0 GeV/c ,tanθ=0 (4 cm^2)の条件下で sagitta と運動量(1/p)に良い相関がみられることが確認された。

さらに、実用化に向けて 2017 年 CERN で行ったテスト実験では、200 μm 厚のガラスベース乾板が平面性や熱膨張の観点から適していることが分かり、2,6 GeV/c ,tanθ=0 において 3.6σ 以上の電荷識別精度を得て、良いパフォーマンスを発揮することが確認された。しかし、課題として 200 μm ではガラスが割れやすく扱いが困難であり、たわみもみられた。

本研究では、これらを解決すべくガラスの厚みを 500 μm に変更し、平面性保証のために CES の枠を改良した。新たに作製した CES の性能評価をするために宇宙線照射実験を計画し、これまでに 2019・20 年の 2 回実験を行った。磁場をかけない状態で CES に宇宙線を照射するもので、たわみの調査や sagitta の測定精度であれば宇宙線でも可能であり、磁場をかけなくても s=0 を中心とする sagitta 分布の幅σ_sから性能を確かめることが出来る。宇宙線を使うことによって様々な運動量の粒子が CES に入射することになるが、運動量測定・低運動量成分の分離のために ECC を導入した。また、500 μm ガラスベース乾板の測定精度を見積もるために Doublet 構造を導入したセットアップで実験を行った。

結果として、ガラスベースの厚みを 200 から 500 μm へ変更したことで 2 枚の乾板間の位置差分布の幅 σ が 60.9→29.4 μm とおよそ半分となりたわみの抑制が確認された。また、ガラスベース乾板の角度測定精度は 200 μm に比べて tanθ=0, 0.3 で 1.8 倍以上向上している。

sagitta 分布の幅σ_sによる解析では sagitta に対して 2σ 以上の信頼性で電荷識別することを目標としている。乾板全面積に対する結果では 6 GeV/c までの運動量で、19 年で 2.5 σ 、20 年で 3.2 σ 以上の精度で電荷識別可能な性能があると確認された。

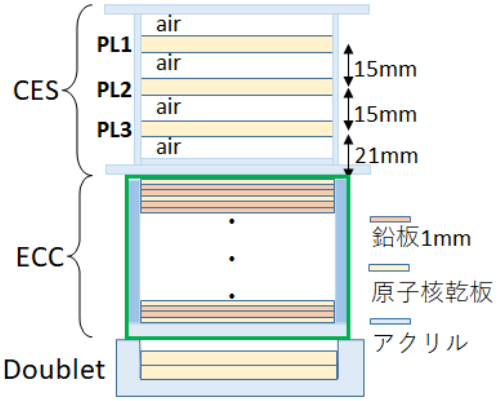


図 1 宇宙線照射実験の照射時セットアップ

ガンマ線バーストに伴う光学閃光探査

永澤陸飛（素粒子物理学教室）

宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (Gamma-ray Burst: GRB)はいつどこで起こるか分からない現象であり未だ謎が多く、近年様々な実験で活発に観測が行われている。全天監視型高精度宇宙線望遠鏡実験 Ashra は、この GRB の発生の瞬間、またはそれ以前からの可視光領域での観測を目的のひとつとしている。Ashra（All-sky Survey High Resolution Air-shower detector）は、突発的高エネルギー天体から放出される高エネルギー宇宙線を観測し、突発的高エネルギー天体の発見や高エネルギー放射機構の解明を第一目的とした実験である。さらに Ashra 実験は宇宙線観測だけでなく 2008 年 6 月末より本格的な光学閃光の監視観測を開始している。その視野領域は 42 度の超広視野であり、検出器の分解能は数分角である。Ashra はこの集光器を複数台用いて、全天の広い領域をカバーする。

本研究では Ashra 実験による突発閃光天体の可視光観測のために、画像データの座標変換を自動化した。観測で得られる光学画像はピクセル座標を持つが、GCN からのアラートで得られる GRB の位置情報は赤道座標である。両者を照らし合わせるために、画像中の天体を自動的に天体カタログ中の天体とパターンマッチングを行うプログラムを作成した。この結果、半手動で 1 画像当たり約 5 分の処理時間がかかっていた処理を全自動で 1 画像当たり約 3 分に改良することに成功した。その座標決定の精度は約 2 分角と Ashra で撮像される画像の 1 ピクセル相当の精度であり、精度を落とさずに自動化、高速化を行うことができた。

加えて、GCN に出された GRB アラートの情報を基に Ashra の光学観測期間内に発生した GRB の観測候補を抽出するプログラムを作成し、トリガーの瞬間を観測可能なプロンプトイベントを Fermi、Swift から出されたアラートでそれぞれ 5 イベントずつの観測候補を見出した。

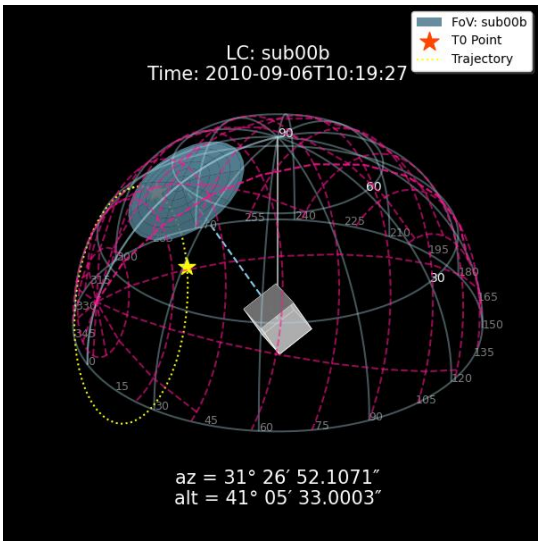


図 1 :GRB の軌道計算の様子

また、本研究では抽出された観測中かつ観測視野内に発生したイベントである、GRB100906A について可視光解析を行った。画像解析の結果 GRB の光学像の確認はできなかったが、限界上限等級を 4 秒の積分時間で $T0^{+2000\,s}_{-5000\,s}$ に亘り約 12 等と見積もった。他の観測結果と比較すると、限界等級は浅いが、T0 +30s 以前の光学解析は Ashra が唯一の結果である。今後は画像の重ね合わせを行い、積分時間を増やすことで限界等級をより深くすることが期待される。

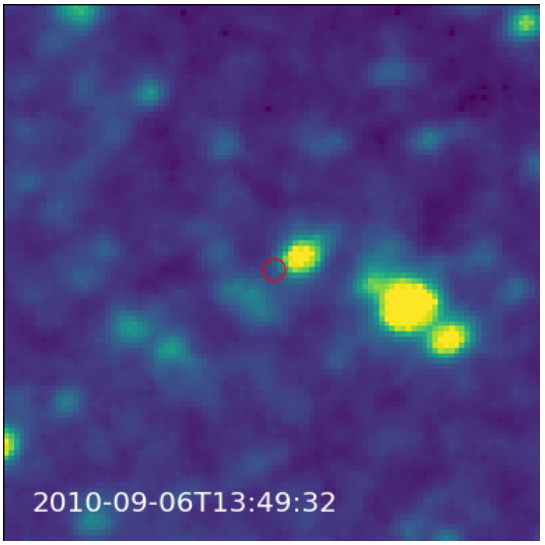


図 2: GRB アラートのあった局所領域。赤丸が GRB アラートの位置とその誤差を表す。

大立体角アクセプタンスを持たせた水標的ニュートリノ反応検出器の構築と解析

水野耕作（素粒子物理学教室）

ニュートリノ振動の研究は、全ての混合角が有限値で測定され、CP 位相の測定が可能になった。この測定のための様々な長基線ニュートリノ振動実験が進行・計画されている。しかし、その一方で、振動測定において主要な系統誤差となるニュートリノ反応断面積の不定性は大きいままである。また、短基線ニュートリノ振動実験では、$\nu_\mu(\overline{\nu_\mu}) \rightarrow \nu_e(\overline{\nu_e})$の出現を主張しているが、系統誤差の不定性が大きいという問題がある。

これらの加速器ニュートリノ振動実験は全て数百 MeV～数 GeV のエネルギー領域であるニュートリノを用いて実験を行っており、このエネルギー領域のニュートリノ・原子核反応の研究は極めて重用である。ニュートリノ振動確率がエネルギーに依存しているため、検出した入射ニュートリノエネルギーを正しく再構成することは大変重要である。しかし、既存の検出器は～cm オーダーの分解能を持つものが主であるため、低エネルギーな陽子に十分な感度がない。また、構成 2 次粒子を分離できる位置分解能を持っていないことから、正確なニュートリノ反応モデルを構築するための情報が不足しているため、ニュートリノエネルギーを正しく再構成できないことが問題となっている。

NINJA 実験では、～2mm という分解能を持ち、200MeV/c の低エネルギー陽子の検出が可能である原子核乾板を用いて標的とニュートリノの反応を測定し、反応から出てくる構成 2 次荷電粒子の数・角度・エネルギーを詳細解析する。なかでも本研究では、NINJA 実験初の物理ランである E71a 実験として T2K 実験の標的である水とニュートリノの反応を測定し、解析する。

本研究では、過去に行った水標的テスト実験の 17 倍の規模である約 68kg の水と、鉄標的テスト実験である run6 の 2.5 倍である約 150kg の鉄を標的物質として使用した。この規模の実験は本実験(Physics Run)が初めてであり、大規模化するにあたって原子核乾板にバックグラウンドとなる余計な宇宙線を貯めないように、より、効率的な実験運用を行う必要があった。そこで我々は原子核乾板の製造・運用・現像までを大量かつ効率的に行えるよう実験方法を改良し、実際にデータの取得までを遂行した。2019 年 11 月に物理ランの照射をおえ、現在解析を行っている。

本論文では、この物理ランにおいて初めて導入した、隣接 ECC 間を接続するために用いた Side SS の解析方法の確立について報告する。

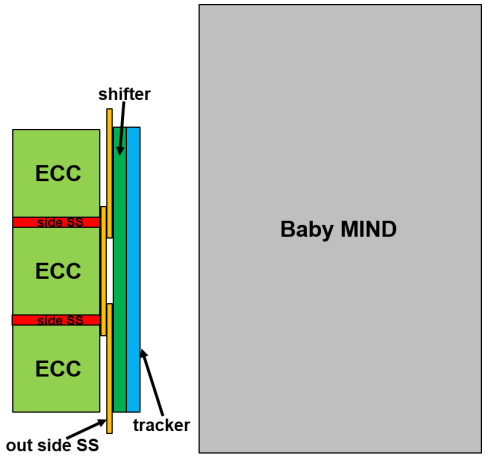


図 1 : Top view

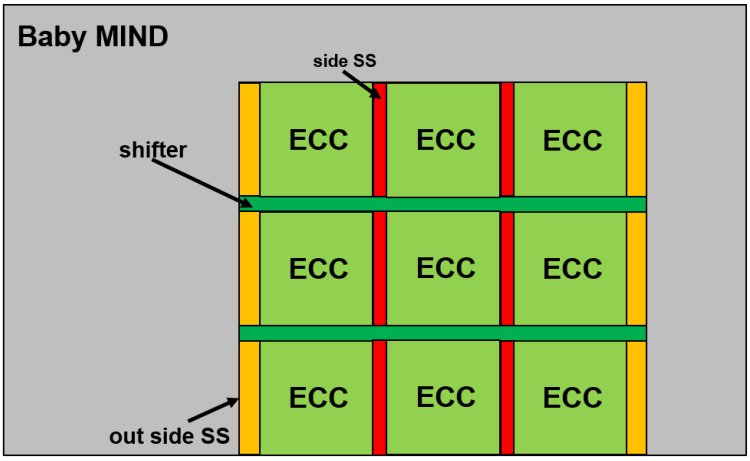


図 2 : Front view

ECC 等のニュートリノ検出に用いる原子核乾板は全てビーム軸に対して垂直な向きに原子核乾板を置くが、SideSS はビーム軸に平行な向きに乾板を配置することで ECC 間の接続を可能にする。