

論文の内容の要旨

Search for Proton Decay Using an Improved Event Reconstruction Algorithm in Super-Kamiokande

(スーパーカミオカンデにおける改良型事象再構成アルゴリズムを用いた陽子崩壊探索)

氏 名 須田 祐介

物理学は力を統一的に理解することで発展し続けてきた学問である。これまでの力の統一の例として、ニュートンが身の回りにあるものに働く力と天体が受ける力が同一のものであると考察し万有引力の法則（重力）を発見したこと、ファラデーが電気力と磁気力の間に電磁誘導の法則（電磁気力）を見出したこと、そしてワインバーグとサラムにより電磁気力と弱い力が統一的に記述されたこと（電弱力）が挙げられる。現在までに知られている素粒子の振る舞いのほとんどは、ワインバーグ・サラム理論と強い力を記述する量子色力学で驚異的な精度で説明することができる（重力の影響は無視できる）。この理論体系を素粒子の標準理論と呼ぶ。一方で、Super-Kamiokande 実験（SK）が 1998 年に最初に発見したニュートリノ振動現象はニュートリノに質量があることを意味し、ニュートリノ質量をゼロとする標準理論のほころびを明らかにした。また、標準理論においてクォークと電子の電荷は自由にとることが可能なはずであるが、3つのクォークからなる陽子と電子の電荷の絶対値が 10^{-21} の精度で一致することが測定されている事実は、電子とクォークの間に潜む何らかの関係が標準理論では説明できていないと考えられる。これまでの物理学の歴史を振り返ると、標準理論を超える理論では電弱力（ $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ）と強い力（ $SU(3)_C$ ）が統一されるべきであろうと考えるのが自然である。そこで、ジョージヤイとグラシウは標準理論のゲージ群を含む最も小さな単純群としての $SU(5)$ 理論を 1974 年に

提唱した。この理論の発展形として、Supersymmetry (SUSY)と呼ばれるフェルミオンとボソン間の対称性を取り入れた SUSY $SU(5)$ 理論や、 $SU(5)$ の次に大きなランクを持つ $SO(10)$ 理論などがあげられる。電弱力と強い力を統一するこれらの理論は大統一理論 (Grand Unified Theory、GUT) と呼ばれるが、未だに実験的な証拠は見られていない。多くの大統一理論に共通する予言として、陽子がより軽い粒子に自発的に崩壊するという標準理論で禁止されている現象がある。そのため、もし陽子崩壊を実験的に確認することができれば、大統一理論の初めての検証となり、ニュートリノ振動の発見以来、膠着状態の続いている新物理探索において大きなブレークスルーとなる。

陽子や中性子などの3つのクォークからなる複合粒子はバリオンと呼ばれ、経験則的にバリオン数は保存することが知られていた。しかし、バリオン数保存に関する理論的な裏付けは存在せず、バリオンの中で最も軽い陽子が永久に安定であることは保証されていない。そのような観点から、陽子崩壊の探索は $SU(5)$ 理論以前の1950年代頃から放射化学的方法や液体シンチレータを用いた実験により行われてきた。 $SU(5)$ 理論が発表された後は、鉄を使ったカロリメータによる実験が $SU(5)$ 理論に対し、強い制限を与えていた。 $SU(5)$ 理論が予言する陽子寿命範囲 ($10^{30} - 10^{32}$ 年) を完全に調べ尽くすためには、より大きな検出器が必要であったが、鉄カロリメータは巨大化しづらい。そこで、現在においても最も有効な陽子崩壊探索手段として知られる、陽子源に水を使う大型の水チェレンコフ検出器が IMB 実験や KAMIOKANDE 実験において用いられた。しかしながら、 $SU(5)$ 理論に対し十分な感度を持つそれらの実験においても陽子崩壊の有意な兆候は見られず、ミニマルな $SU(5)$ 理論は棄却された。

大統一理論の雛形は棄却されてしまったが、右巻きニュートリノを自然な形で含む $SO(10)$ 理論 (陽子寿命: $10^{32} - 10^{39}$ 年) などの有望なモデルを検証する必要がある。陽子崩壊に対し現在最も高い感度を持ち、1996年の実験開始以降トップランナーであり続けているのが、KAMIOKANDE 実験の後継機の SK である。SK は、岐阜県飛騨市にある神岡鉱山の地下1000mに建設された5万トンの超純水で満たされた円柱型の水チェレンコフ検出器である。水槽は同心円柱に二層かつ光学的に分離されている。陽子崩壊時に生成される荷電粒子から放射されるチェレンコフリングを捉えるため、内水槽の壁面には中心方向を向いた約1万本の50cm口径の光電子増倍管 (PMT) が均一に設置されている。一方、外水槽には20cm口径のPMTが1885本設置され、主に検出器に侵入する宇宙線ミューオン事象を除去するために用いられる。SKの観測期間は検出器の状態毎に4つに分けられており、2008年9月に開始し現在まで稼働し続けている期間を SK-IV と呼ぶ (全 SK の約半分

のデータ量に相当)。Non-SUSY GUT 理論では、陽子が陽電子と中性パイ中間子に崩壊する $p \rightarrow e^+ \pi^0$ モードが最も支配的と予言され、SK の先行研究ではこの崩壊モードに対する陽子の部分寿命は 1.6×10^{34} 年以上 (90%信頼区間) であるという結果を得ている。

陽子崩壊の発見に向け、探索領域を拡大するためには、さらなる観測データの取得に加え、解析手法の向上が重要である。SK は長期間観測を続けているため、背景事象の混入が最も少ない $p \rightarrow e^+ \pi^0$ モードにおいても、背景事象の削減は大きな課題である。本論文では、SK における陽子崩壊モード $p \rightarrow e^+ \pi^0$ の発見を目的とし、実験開始以来使用され続けてきた事象再構成アルゴリズム (APfit) とそれにとって代わるべく新しく開発したアルゴリズム (fiTQun) による探索結果を報告する。

事象再構成アルゴリズムは、事象の発生点、チェレンコフリングの数、各リングを生成する粒子の種類及び運動量を決定する。APfit は光を検出した PMT の電荷・時間情報のみを用い、これらの変数を順番に再構成する。一方、fiTQun では全 PMT の電荷・時間の確率情報から Likelihood を構成し、最尤法によって全変数を同時に再構成することができる。より多くの情報を扱う fiTQun は、APfit に比べ高い性能を持つ。事象再構成アルゴリズムには観測期間毎に異なるチューニングなどが必要となり、本論文では SK-IV のみに fiTQun を適用した。水の透過率の時間変動について fiTQun 内で補正し、 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ モンテカルロシミュレーションを用いて偽リング削減のためのパラメタ調整を行った。宇宙線ミューオンや陽子崩壊の背景事象となる大気ニュートリノの実データとモンテカルロシミュレーションを用い、新しい解析アルゴリズムである fiTQun の妥当性を確認した。

$p \rightarrow e^+ \pi^0$ モードの探索には、事象発生点が内水槽にあり、かつ発生したチェレンコフ光が全て内水槽に収まっている事象を集めたデータセットを用いる。このデータセットについて、以下の条件を満たすものを候補事象とする。

1. 事象発生点が内水槽の壁から 150cm (APfit: 200cm) 以内の内側にある
2. チェレンコフリング数が 2 もしくは 3
3. 全リングが electron-like
4. ミューオン崩壊電子なし
5. (3 リング事象のみ) 再構成 π^0 質量が、85 MeV/c² から 185 MeV/c² の範囲にある
6. 再構成全不変質量が、830 MeV/c² (APfit: 800 MeV/c²) から 1050 MeV/c² の範囲にあり、かつ再構成全運動量が、250 MeV/c 以下である
7. (SK-IV のみ) 先発信号の後に中性子捕獲による脱励起ガンマ線がない

従来の SK の有効体積は 22.5kton (壁から 200cm 内側の領域) であったが、 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ モンテカルロシミュレーションを用いた評価から、fiTQun による解析では外側に 1 割拡大し有効体積を 24.7kton に設定することにした。また、fiTQun は APfit より高い運動量決定精度を持つため、全不変質量のカットをより厳しくかけることができ、信号効率は APfit と同等に保ちつつ、期待される背景事象数を約 3 割削減することができた。また、エレクトロニクスが SK-IV で新しくなったことにより、大気ニュートリノ事象内の中性子を捕獲することができ、陽子崩壊探索における背景事象数を半減することができる。さらに、核内効果の影響を受ける酸素原子中の陽子と、その影響がない水素原子中の陽子では運動量が異なるため、再構成した全運動量について 100 MeV/c を境に信号領域を 2 つに分割することで、分割しない場合に比べ、将来においてより高い感度を達成できるようになる。SK-IV における信号検出効率と期待される背景事象数は、fiTQun による解析では、低い全運動量領域について $(20.0 \pm 0.3)\%$ と $(0.028 \pm 0.019)/\text{Mt/yr}$ 、高い全運動量領域については $(18.1 \pm 0.3)\%$ と $(0.778 \pm 0.102)/\text{Mt/yr}$ を得た。ここで、誤差として統計誤差のみを表示している。同様に、APfit による解析では、低い全運動量領域について $(19.0 \pm 0.3)\%$ と $(0.030 \pm 0.021)/\text{Mt/yr}$ 、高い全運動量領域については $(19.0 \pm 0.3)\%$ と $(1.116 \pm 0.132)/\text{Mt/yr}$ であった。陽子崩壊による π^0 が受ける核内効果の不定性や Likelihood 関数のデータとモンテカルロシミュレーションとの違いなどによる系統誤差は、信号検出効率について、fiTQun (APfit) による解析では、低い全運動量領域で 9.9% (9.7%)、高い全運動量領域では 18.8% (16.6%) であった。背景事象数の系統誤差は 2 つの運動量領域で合わせて評価し、fiTQun (APfit) による解析では、41.4% (40.6%) であった。

探索結果を見る前に、信号領域の外側にある実データと大気ニュートリノモンテカルロシミュレーションのサンプルを比較し、各評価分布がよく一致していることを確認した。SK-IV の 2008 年 9 月から 2016 年 8 月までの 179.5 (163.0) kton \cdot years の観測データに fiTQun (APfit) を適用し、 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ モードを探索した結果、残念ながら候補事象を見つけることはできなかった。FiTQun を適用した SK-IV の結果と、実験開始当初から 2008 年 8 月までの観測データに APfit を適用した場合の結果 (172.8 kton \cdot years、候補なし) と合わせて、ベイズ統計の方法を用いて $p \rightarrow e^+ \pi^0$ モードに対する寿命の下限値を 1.88×10^{34} 年 (90%信頼区間) と与えることができた。この結果は、従来の結果 (1.6×10^{34} 年) で用いられた観測期間に 483 live days 分のデータを追加したもので、18%長い陽子寿命下限値を与えている。本研究により、SO(10)理論などが予言する陽子の寿命領域をさらに排除することができ、多くの non-SUSY GUT 理論に対して最も強い実験的制限を課すことに成功した。