

論文内容の要旨

論文題目

Search for Proton Decay $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ in Super-Kamiokande

(スーパーカミオカンデによる陽子崩壊 $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ の探索)

氏名 小林兼好

陽子崩壊 $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ モードの探索をスーパーカミオカンデ検出器により行った。陽子崩壊は、大統一理論により予言される現象で、陽子崩壊を発見することは、大統一理論の直接的証拠となる。陽子崩壊モードは、その理論モデルに強く依存する。本研究で探索した $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ モードは、超対称性大統一理論によって好まれる崩壊モードである。

スーパーカミオカンデ検出器は、岐阜県神岡町の地下1000メートルにある水チェレンコフ型検出器で、直径39.3メートル、高さ41.4メートルの円筒形をしており、計50000トンの超純水で満たされている。水分子を構成する陽子が陽子崩壊源となる。崩壊粒子から発生するチェレンコフ光を11146本の光電子増倍管で検出することによりさまざまな物理量を再構成する。反応点、チェレンコフリング数、各リングの方向、粒子ID、運動量、Michel電子数などである。

再構成された物理量を用い、陽子崩壊 $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ モードの探索を次の3つの独立な方法により行った。

- $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$, $K^+ \rightarrow \mu^+\nu$ サーチ
- $^{16}\text{O} \rightarrow \bar{\nu}K^{+15}\text{N}\gamma$, $K^+ \rightarrow \mu^+\nu$ サーチ
- $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$, $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ サーチ

以下、これら3つの探索方法について説明する。

1 $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$, $K^+ \rightarrow \mu^+\nu$ サーチ

ニュートリノはチェレンコフ光を出さない、かつ K^+ もチェレンコフ光を出す閾値以下であるので出さない。よっての崩壊粒子である μ^+ とその Michel 電子を検出することにより探索する。 K^+ は止まって崩壊するので μ^+ の運動量は 236 MeV/c という単一の値をとる。この探索では以下の条件を課した。

- 1 μ -like リング
- 再構成された μ^+ の運動量が 215~260 MeV/c
- 1 Michel 電子
- 2 の探索方法により検出されない

大気ニュートリノ事象によるバックグラウンドが大きいので、 μ^+ の運動量分布において、信号領域の超過を χ^2 フィットにより求めた。結果は図 1 のようになった。信号の超過は見られず、この結果からこのモードに崩壊する陽子の寿命の下限値 6.1×10^{32} 年を得た。

2 $^{16}\text{O} \rightarrow \bar{\nu} \text{K}^{+15}\text{N} \gamma, \text{K}^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ サーチ

1 の方法ではバックグラウンドが大きいので、 $\text{K}^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ の崩壊様式に対し、もう 1 つの探索を行った。これは、酸素原子核内の陽子崩壊を探索するもので、その際、核にできる陽子ホールから出るガンマ線をタグすることによりバックグラウンドを減らすことができる。以下のようなカットをかけた。

- 1 μ -like リング
- 再構成された μ^+ の運動量が 215~260 MeV/c
- 1 Michel 電子
- $d_{\mu e} < 150 \text{ cm}$
- $g > 0.6$
- $t_{\mu} - t_{\gamma} < 100 \text{ ns}$
- $7 < N_{\text{hit}\gamma} < 60$

K^+ がチェレンコフ光を出さず、かつ、寿命が 12ns なので、ガンマ線と μ^+ の信号をわけることが可能となる。 t_{μ}, t_{γ} はそれぞれ μ, γ の検出された時間である。 $N_{\text{hit}\gamma}$ は、ガンマ線からくる光電子増倍管のヒット数である。大気ニュートリノの中性カレント事象により、リコイルされた陽子がバックグラウンドとなるので $d_{\mu e} < 150 \text{ cm}, g > 0.6$ のカットをした。図 2 にこの探索の結果を示した。この方法による検出効率は、8.6%、期待されるバックグラウンドは、0.2 事象であったが、データに残った事象はなかった。この結果からこのモードに崩壊する陽子の寿命の下限値 1.0×10^{33} 年を求めた。

3 $\text{p} \rightarrow \bar{\nu} \text{K}^+, \text{K}^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ サーチ

π^+ はチェレンコフ光を出す、その量はごくわずかなのでチェレンコフリングを再構成することはできない。そこで以下のようなカットをかけた。

- 2 e-like リング

- 1 Michel 電子
- 再構成された π^0 の運動量が 175~250 MeV/c
- 再構成された π^0 の質量が 215~260 MeV/c²
- $Q_{in} < 100$ P.E., $Q_{out} < 60$ P.E., $Q_{out} < 1.7Q_{in} - 25$

K^+ は静止してから崩壊するので、 π^+ 、 π^0 は 180° 反対方向へでる。光電子増倍管を、 π^0 の方向、 π^+ 方向、それ以外の3つの領域にわけると、 π^+ の方向にある光量を Q_{in} でそれ以外の光量を Q_{out} と定義する。この探索による結果は図3のとおりである。この方法による検出効率は、6.7%、期待されるバックグラウンドは、0.7 事象であったが、残った事象はなかった。この結果からこのモードに崩壊する陽子の寿命の下限值 8.1×10^{32} 年を求めた。

以上3つの独立な探索を行ったが、陽子崩壊の証拠を得ることはできなかった。表1にその結果をまとめた。3つの方法を結合することにより、 $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ モードに崩壊する陽子寿命の下限值 2.2×10^{33} 年を得た。この結果から超対称性大統一理論のモデルのなかで、minimal SUSY SU(5) モデルは完全に否定され、SUSY SO(10) モデルにも制限を与えた。

表 1: 3つの陽子崩壊探索のまとめ、およびその3つの方法を結合した結果。

	検出効率	バック グラウンド	候補数	寿命の下限值 ($\times 10^{32}$ 年)
$p \rightarrow \bar{\nu} K^+, K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ サーチ	35%	—	—	6.1
$^{16}\text{O} \rightarrow \bar{\nu} K^+ ^{15}\text{N} \gamma, K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ サーチ	8.6%	0.2	0	10
$p \rightarrow \bar{\nu} K^+, K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ サーチ	6.7%	0.7	0	8.1
3つの方法の結合	50%	—	—	22

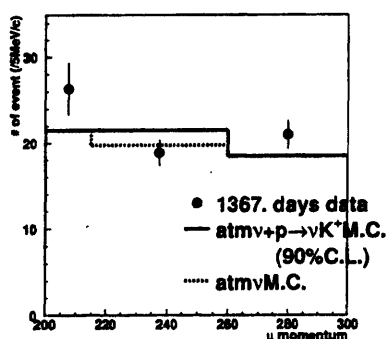


図 1: 再構成された μ^+ の運動量分布。点がデータ、点線が大気ニュートリノシミュレーション、線が点線 + $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ シミュレーションの90%信頼レベルの上限值。

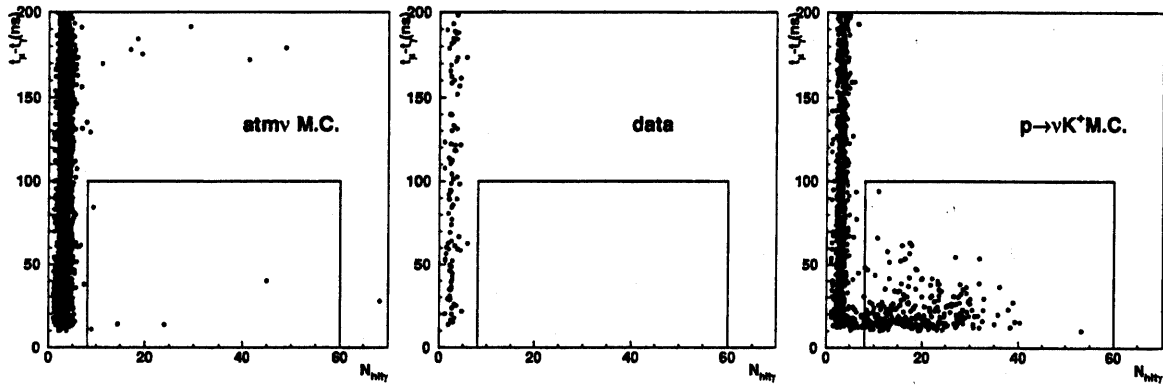


図 2: $t_\mu - t_\gamma$ versus N_{hits} 分布。それぞれ、大気ニュートリノシミュレーション (左)、 $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ シミュレーション (右)、データ (中)。四角でかこまれた部分が信号領域である。

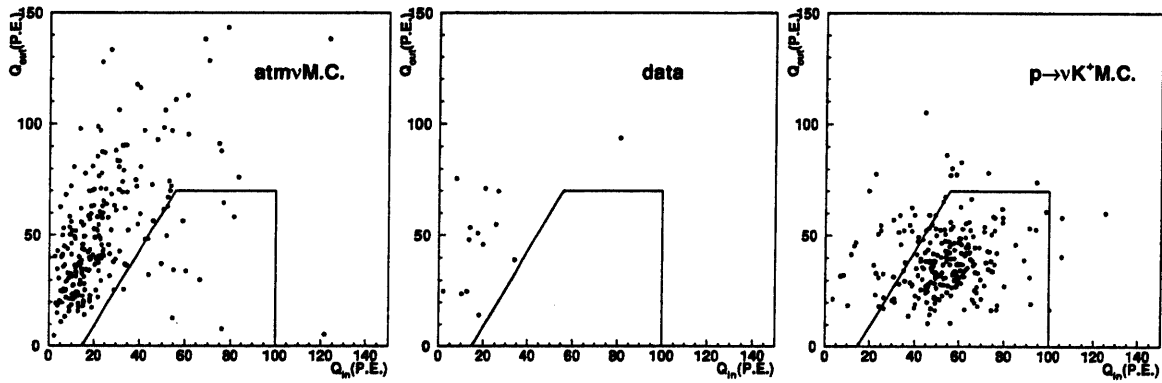


図 3: Q_{in} versus Q_{out} 分布。それぞれ、大気ニュートリノシミュレーション (左)、 $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ シミュレーション (右)、データ (中)。線でかこまれた部分が信号領域である。