

## 大統一と陽子崩壊の探索

### 陽子崩壊で大統一理論をテストする

自然界の力を単一の数学的記述によって統一することは、物理学者の長年の目標の一つである。電磁的な力と弱い力は既に電弱理論として統一され、次のステップは強い力を含む統一である。これを目指す種々の試みは大統一理論 (GUT's) と呼ばれる。大統一の起きるエネルギーは未知ではあるが、 $10^{16}$  GeV程度と予想されている。このエネルギー領域は加速器で到達可能なエネルギーより遙かに高い。そのため、この領域での研究は挑戦そのものである。しかし、大抵の大統一理論は陽子崩壊を予言する。陽子崩壊を観測しどのような粒子に崩壊するか調べることで、大統一を

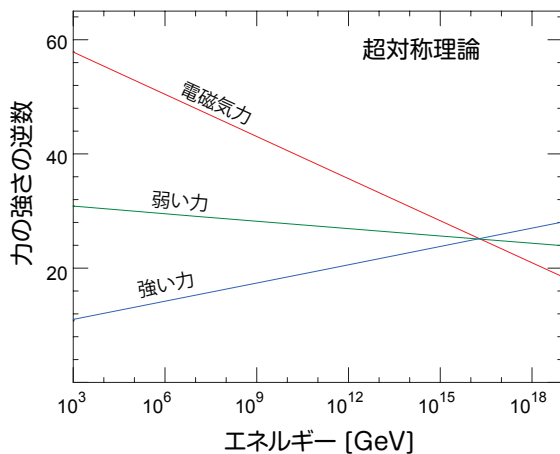


図1 力の統一。力の強さはエネルギーと共に変わる。力の強さの逆数をエネルギーの関数としてプロットすると、 $10^{16}$  GeVで3つの力の強さが等しくなる(統一される)ように見える。

立証し、理論模型の区別が可能となる。従って、陽子崩壊の探索は大統一理論を実験データと比較検討できる限られた手段の一つであり、この目標に向けての進歩はどのようなものであれ、将来の物理学の進展にとってユニークな価値を有する。

初期の陽子崩壊探索の動機は、保存則のテストであった。物理学において、保存則は我々が物質の振る舞いを理解するための強力な手段である。保存則のうち、エネルギー保存、運動量保存、角運動量保存、電荷の保存、等は古典的物理学の時代から良く知られている。これらは一般的な理論原理に立脚しており厳密に成り立つ。他の保存則は純粹に経験則であり、言い換えれば、明確な理論的根拠をもたず、実験的にある反応が起きないことを説明するために提唱されたものである。この第2のグループにはバリオン数の保存やレプトン数の保存がある。一般的には、保存則で禁止されない反応はどんなものであれ、頻度は高くはないかもしれないが、起きることが期待される。厳密な保存則は自然の対称性に対応するものである。例えば、運動量と角運動量の保存は、それぞれ並進対称性と回転対称性に由来する。

ワイルが初めて陽子の絶対的安定性を示唆したのは1929年のことであった。1954年にゴールドハーバーは非常に一般的な根拠に基づき、陽子の寿命は $10^{18}$ 年より長いことを示し、また同一年、最初の実験的な陽子寿命の下限として $10^{20}$ 年を得た。1954年から1974年にかけて、他の目的で作られた、より大きな測定器を用いることにより陽子寿命の下限は、徐々に

改善された。状況が一変したのは1974年のことである。最初の有望な大統一理論であるSU(5)理論が発表され、陽子の寿命が $10^{27}$ 年と $10^{31}$ 年の間であることを予言した。うまいことに、その予言は当時得られていた寿命の下限より長く、しかし陽子崩壊探索に特化した実験であれば到達可能な範囲にあった。

## 巨大測定器が必要

とはいえ、この予言をテストするために必要な実験のスケールは、挑戦的な課題を突きつけるものであった。陽子崩壊は統計的な過程である。もしたった1個の陽子に注目するなら、その崩壊を観測するためには $10^{31}$ 年待たなければならぬ。一方、 $10^{31}$ 個の陽子を閉じこめた容器の中では平均して毎年1個の陽子が崩壊する。1トンの物質中には約 $6 \times 10^{29}$ 個の陽子（と中性子）があるので、必要とされる測定器の大きさは100トン級であるが、安全を図れば1,000トン級の測定器が必要であろう。アメリカのIMBと日本のカミオカンデは第1世代の測定器であり、1980年代に稼働し、結果を出した。しかし、残念ながらSU(5)により予言された寿命で陽子崩壊は発見されず、予言より長い陽子寿命の下限値を得たのみである。かくて、最初の大統一理論は実験により葬り去られたのである。

IMBとカミオカンデの時代以来、SU(5)に替わる多様な大統一理論が発展した。これらはSU(5)より大きな基本的な数学的対称性を仮定し、また超対称性の可能性を含むものである。幾つかの魅力的なモデルは、

ニュートリノの質量及び混合と陽子崩壊の関係を強調する。一般的に、これらの理論は新たな崩壊の様式と、より長い寿命を予言する。

従って、陽子崩壊探索実験は、進歩が続く限り必然的により大きな測定器を要求する。陽子の寿命は先験的には知られておらず、現在の下限値のすぐ上から何桁も大きな値までのどこかにあるかもしれないので、測定器の感度を高々数倍にする程度では新しい実験の動機付けとしては不十分である。しかし、寿命の下限を1桁改善するにはスーパーカミオカンデを更に10倍以上運転するか、1桁大きな測定器を建設するしかない。

## スーパーカミオカンデが保持する世界記録

今や「古典的」な、陽子が陽電子と中性パイ中間子へ崩壊する過程、 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ はバックグラウンド（本物と混同するような他の事象）が少なく、効率の良い検出が可能である。現在、スーパーカミオカンデがこの崩壊様式について最良の制限 ( $\tau/\beta > 8 \times 10^{33}$ 年, 90% CL; 脚注\*参照) を与えている。超対称理論によれば $p \rightarrow \nu K^+$ 崩壊が主であるが、ニュートリノは検出できないので実験的に

\* 陽子が崩壊してどのような粒子になるか（崩壊様式）は、いろいろな可能性がある。全崩壊確率を1とすると、それは全ての可能な崩壊様式への崩壊確率の総和である。一つの崩壊様式*i*への崩壊確率 $\beta_i$ は当然1より小さい。理論モデルは $\beta_i$ についても予言するが、実験的に測定されるまでは未知の量である。一つの崩壊様式だけを調べると、陽子の寿命 $\tau$ そのものではなく、 $\tau/\beta_i$ を調べていることになる。ここでは*i*を省略して $\tau/\beta$ で代表させる。測定から得られる $\tau/\beta$ に対する制限は、通常90%信頼限界(CL)という統計的な量で表される。この意味は、仮想的に何度も同じ実験を繰り返したとして、毎回の結果は統計的にふらつくが、90%の場合はこの制限内に収まるというものである。逆に言えば10%の場合はこの制限に収まらない結果になり得る。

はずっと難しい。スーパーカミオカンデによる現在の制限は $\tau/\beta > 2 \times 10^{33}$  年 (90% CL) である。しかし、陽子の本当の崩壊様式は先験的には未知であるため、実験的に得られる崩壊の信号は多様で有り得る。従って、将来の測定器は、運動学的に許されるほとんど全ての崩壊様式に感度を持つ必要がある。さらに、次のことが強調される。現在の制限を大幅に改善するためには巨大な測定器の質量と長い測定期間を要するため(また、本当に陽子崩壊を観測できるか、不確定要素が大きいため)、陽子の崩壊を待ちつつ他の重要な物理的問題を研究することができるような能力を持つべきである。過去、陽子崩壊実験はニュートリノ物理と天体物理学に重要な貢献をしてきた。当然、将来の実験も同様の研究に備えなければならない。

陽子崩壊発見のための測定技術については、いろいろな方法が議論に上っている。その中で、 $10^{35}$ 年あるいはそれ以上の寿命を測れるのは水チェレンコフ検出器だけと思われる。他に、液体アルゴンや液体シンチレーターを用いる技術も議論はされてきたが、それらが優るとされる点の大部分は推測によるものであり、必要とされる巨大なサイズでちゃんと働くのかどうかは証明されたというには程遠い。

## 次世代実験に向けて

根本的な物理である陽子崩壊の探索を前進させるには、理想的には全世界的な協力の一環としての新たな参加表明が必要となるであろう。欧州、日本、米国の

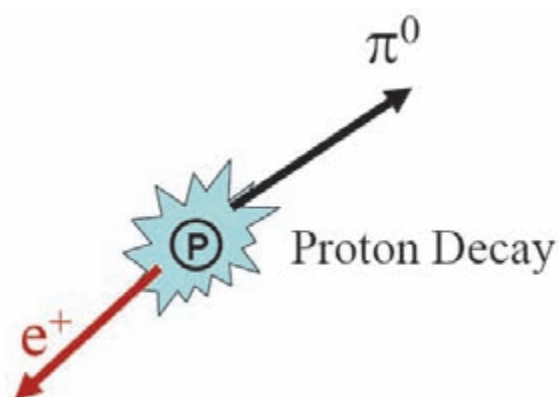


図2 代表的な陽子の崩壊様式  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

研究グループは共同作業の必要性を十分に認識しており、実際、既にそのように動いている。将来の水チェレンコフ検出器による陽子崩壊探索地下実験について、大筋で協力しながら各地域でそれぞれのプロジェクト(米国の新しい国立地下研究所DUSELにおける計画、日本のハイパーカミオカンデ計画、欧州のMEMPHYS計画)の検討が進められている。提案されているのは全て100万トン級の計画である。モンテカルロ法による詳細なシミュレーションによれば、提案されている測定器によりスーパーカミオカンデの与えた陽子崩壊に対する制限を1桁改善する目標は、達成可能であると考えられる。測定に十分時間をかければ、 $10^{35}$ 年の数倍の寿命でも陽子崩壊の明確な発見が可能であろう。また、100万トン級の測定器はニュートリノ物理の研究にも強力な手段となる。

スーパーカミオカンデは、引き続き素晴らしいエキ

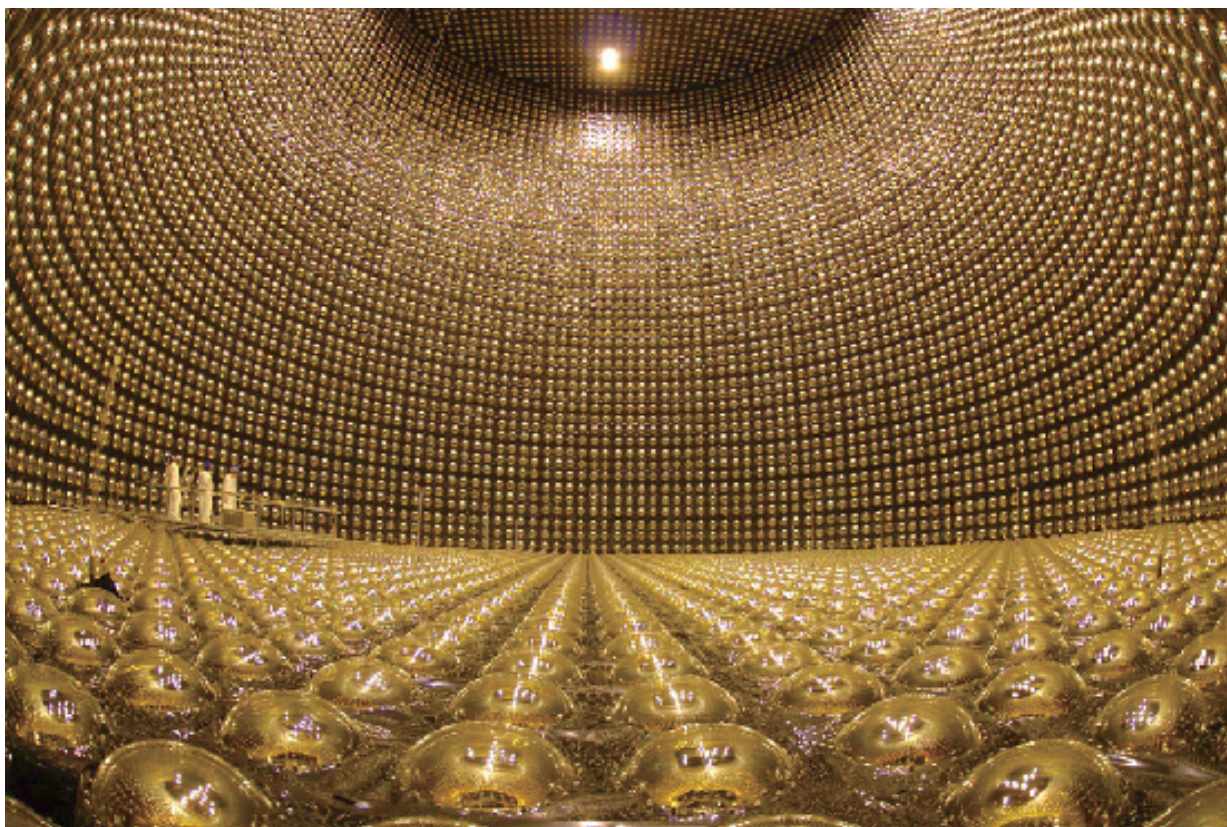


図3 スーパーカミオカンデの内部（2006年の改修後、純水を満たす前に撮影）

サイティンクな結果を出し続ける。次世代の陽子崩壊実験は、期待される物理を展開するのにふさわしい規模（スーパーカミオカンデの10倍以上）の支援が得られれば、スーパーカミオカンデが上げてきた成果に匹敵するような重要な成果を続々と上げるであろう。そう期待するだけの十分な理由がある。

効率的で安価な光検出器の開発研究（通常の光電子増倍管の改良と新規技術の開発の両面がある）は、次世代の巨大測定器建設の必要条件ではないが、経費を低減できると共に測定能力を大幅に高められるであろう。この開発研究は、他の多くの研究にも役立つことから、強

く支援されて然るべきである。

最後に、陽子崩壊の探索は、大規模かつ現代的な地下実験施設を必要とする多くの素粒子物理、天体物理研究の一つに過ぎないことを指摘したい。アメリカで計画中の国立地下研究所は、陽子崩壊だけでなく、現在計画中ないしは検討中の大小さまざまな実験全てを促進するであろう。このような研究所は多くの実験に対して集中的研究施設を提供する。これがなければ各実験がそれぞれ重複して実験施設を用意せざるを得ないことを考えると、間違いなく非常に経済的である。