



核子崩壊の探索—物質の安定性

渡邊 靖志*

Search for Nucleon Decay - Stability of Matter

Yasushi WATANABE*

1. はじめに

核子とは原子核を構成する陽子と中性子の総称である。核子崩壊とは？ その探索にどんな意味があるのか、どのように探索するのか、その現状がどうなっているのか、等についてできるだけ平易な解説を試みたい。

2. 物質の安定性

形あるものは滅す。ものには全て寿命がある。ものは原子からできている。ということは、原子そのものにも寿命があるのだろうか？ 原子は原子核とそのまわりの電子とからなる。原子の安定性は、結局、原子核や電子の安定性に帰着される。

19世紀末、壊変する原子核が発見された。α崩壊、β崩壊、γ崩壊である。放射性原子核は、より安定な原子核に壊変することがわかった。量子力学では個々の原子核がいつ壊れるのかを予言することはできない。同じ原子核がたくさんあるとき、統計的なふるまいは予言できる。時刻 t に N 個の放射性原子核があるとしよう。 dt 時間に崩壊する原子核の数 dN は N に比例する。すなわち $dN/dt = -N/\tau$ と書ける。負符号は、壊変により数が減少することを表す。比例定数 τ は平均寿命と呼ばれ、その原子核固有の性質の1つとなっている。この式を積分して次式を得る。

$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau} \quad (1)$$

すなわち不安定な原子核は指数関数的に崩壊し、時間 τ 毎にその数が $1/e$ になることを示す。

それでは、安定な原子核の寿命はどのくらいなのだろうか。原子核は陽子と中性子からできている。原子核の

安定性は、それを構成する陽子や中性子の安定性に帰着される。

2.1 素粒子の安定性

陽子、中性子、電子などは「素粒子」と呼ばれる⁽¹⁾。素粒子はその量子数（質量、電荷など）により区別される。素粒子の寿命も式(1)で定義される。すなわち素粒子もそれぞれ固有の寿命をもっている。

まず素粒子の安定性について考えてみよう。表1は核子とそれより軽い素粒子を質量の小さい（軽い）順に並べたものである⁽²⁾。なぜ軽い順なのだろうか。アインシュタインの $E=mc^2$ という関係式を思い起こそう。 E はエネルギー、 m は質量、 c は光速である⁽³⁾。すなわち、質量が大きい粒子は高いエネルギー状態にある。エネルギーの高い状態は、水が低きに流れるように、より低い状態に落ち着こうとする。すなわち、より軽い2個以上の粒子に壊れようとする。光子は安定である。なぜなら質量が0で、エネルギー的にこれ以上壊れようがない。次に軽いニュートリノについては、質量をもつことがわかったばかりで詳細は謎のままであるので、ここではこれ以上立ち入らない。

電子は安定である。物理学は実証科学の典型であるから、実験家は何でも実験的に検証しようとする。その結果、電子の寿命は 4.6×10^{26} 年以上となっている⁽⁴⁾。なぜこんなに長生きをするのであろうか。実は素粒子の寿命を決めているのは、保存則である。電子は負の最小の電荷（素電荷）をもつ粒子であり、電荷をもつ粒子の中で一番軽い。電子より軽い粒子として知られるのは、電荷を持たない光子とニュートリノしかない。これらの粒子に壊れるためには、電荷保存則を破らなければならない。電荷保存則は、ゲージ不変性という深遠な対称性の帰結として成立する。たとえば、ゲージ不変性により、

*教授 物理学教室
Professor, Institute of Physics

表 1: 素粒子の種類 (軽い順)

名称	記号	スピン (\hbar)	電荷 (e)	質量 (MeV/c^2)	寿命 (s)	反粒子	主な崩壊 モード
光子	γ	1	0	0	安定	同	-
電子ニュートリノ	ν_e	1/2	0	$< 0.2?$?	$\bar{\nu}_e$?
ミューニュートリノ	ν_μ	1/2	0	$< 0.2?$?	$\bar{\nu}_\mu$?
タウニュートリノ	ν_τ	1/2	0	$< 0.2?$?	$\bar{\nu}_\tau$?
電子	e^-	1/2	-1	0.511	安定	e^+	-
ミューオン	μ^-	1/2	-1	105.7	2.2×10^{-6}	μ^+	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
中性 π 中間子	π^0	0	0	135.0	8.4×10^{-17}	同	$\gamma\gamma$
荷電 π 中間子	π^+	0	1	139.6	2.6×10^{-8}	π^-	$\mu^+ \nu_\mu$
荷電 K 中間子	K^+	0	+1	493.7	1.2×10^{-8}	K^-	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
中性 K 中間子	K^0	0	0	497.7	注 1	\bar{K}^0	$\pi\pi, \pi\pi\pi$
η 中間子	η^0	0	0	547.3	5.6×10^{-19}	同	$\gamma\gamma, \pi\pi\pi$
荷電 ρ 中間子	ρ^+	1	+1	775.8	4.4×10^{-24}	ρ^-	$\pi^+ \pi^0$
中性 ρ 中間子	ρ^0	1	0	775.8	4.4×10^{-24}	同	$\pi^+ \pi^-$
ω 中間子	ω	1	0	781.9	7.8×10^{-23}	同	$\pi^+ \pi^- \pi^0$
荷電 K^* 中間子	K^{*+}	0	+1	891.7	1.3×10^{-23}	K^{*-}	$K\pi$
中性 K^* 中間子	K^{*0}	0	0	896.1	1.3×10^{-23}	\bar{K}^{*0}	$K\pi$
陽子	p	1/2	+1	938.3	安定	\bar{p}	-
中性子	n	1/2	0	939.6	885.7	\bar{n}	$pe^- \bar{\nu}_e$

注 1 : K^0 中間子は \bar{K}^0 中間子と混合し, 短寿命 (0.089×10^{-8} s) の粒子と長寿命 (5.2×10^{-8} s) の粒子として崩壊する。

光子の質量が 0 であることが保証される。

全ての粒子にはその反粒子が存在する。光子のように自分自身が反粒子である粒子もある。電子の反粒子である陽電子は, 正の素電荷をもっている。陽電子の寿命はどのくらいであろうか。物質と出会ってすぐ消えてしまいそうな気がする。しかし粒子の寿命は真空中に置かれたときの寿命として定義される。CPT 定理というものがある。C は粒子⇄反粒子の反転, P は空間反転, T は時間反転の操作である。「これら 3 つの操作を行ったとき, 物理法則は不変である」ことを保証するのが CPT 定理である。CPT 定理によれば, 反粒子と粒子とは, 符号のつく量子数は逆符号でその絶対値は等しい。したがって陽電子の寿命は電子の寿命と等しいのである。

陽子は, 電子の約 1800 倍もの質量をもつ。現在実験的に求められた寿命の下限値は後述のように約 10^{33} 年である⁴⁾。宇宙の年齢 137 億年に比べて 23 桁も長い。なぜだろうか。これを「説明する」ために, **重粒子数保存則** (バリオン数保存則) が導入された。すなわち, 陽子や中性子は, 重粒子数をもつ粒子であるとする。素粒子の反応では, その前後で重粒子数が保存される。たとえば, 中性子は (なぜか) 陽子より重いので, 陽電子とニュートリノとに崩壊することができる (ベータ崩壊)。これを式で書き, 重粒子数と電荷保存則 (および軽粒子保存則) を見ると,

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2)$$

$$\text{電荷} \quad 0 = +1 + (-1) + 0$$

$$\text{重粒子数} \quad +1 = +1 + 0 + 0$$

$$\text{軽粒子数} \quad 0 = 0 + 1 + (-1)$$

同様に軽粒子数保存則 (レプトン数保存則) も存在し, それを満たすべく電子と反電子ニュートリノが対で生成される。中性子は陽子より重いので壊れることができる。より厳密には, 中性子, 陽子, 電子, ニュートリノの質量を m_n, m_p, m_e, m_ν とすると, $m_n > m_p + m_e + m_\nu$ が成り立っているので崩壊できる。

もし $m_n < m_p + m_e + m_\nu$ であったとすると, 中性子は崩壊できない。すると, この宇宙に, 生物学的に危険な中性子が安定粒子として飛び交い, 生命などとても生まれない世界になっていたであろう。

陽子は, 重粒子数をもつ粒子の中で一番軽い。それで, 重粒子数保存則を破らない限り崩壊できない。しかし, 重粒子数保存則は, 電荷保存則ほど確固たる理論的根拠は無い。そもそもなぜ重粒子数は保存するのであるか。

2.2 原子の安定性

物質の安定性について考えてみると, 自然界の微妙なバランスや偶然に改めて驚かされる。一番単純な原子である水素原子について考えてみよう。水素原子は陽子と

電子から成っている。なぜ陽子と電子はくっついてしまわないのだろうか。それは不確定性原理による。電子が陽子にくっついてしまうと、電子の位置が精度よく決まってしまったことを意味する。すると不確定性原理によって電子の運動量（したがってエネルギー）は無限大になってしまう。だから電子は陽子のまわりに雲のように広がっている。しかしながら、電子が陽子の近くにいる確率は0ではない。式(2)で、 ν を「移項」した $e^- + p \rightarrow n + \nu$ は起こらないのであろうか。実はより重い原子核ではこれが起こっていて、電子捕獲反応と呼ばれる。しかし幸いなことに、水素原子での電子捕獲反応は起こらない。なぜなら、エネルギーが足りないからである。すなわち $m_p + m_e < m_n + m_\nu$ である。もし電子が少し重くて電子捕獲反応が起こってしまうと大変である。宇宙から水素原子が消えて中性子（とニュートリノ）が残る。やはり大変な世界である。

それでは重粒子数保存則はどの程度確実なのだろうか。それをどのように実験的に検証すればよいのだろうか。

3. 大統一理論と核子崩壊

自然界には4つの力が存在する。万有引力である重力、電気や磁気の電磁力、原子力として知られる「強い力」、ベータ崩壊などを引き起こす「弱い力」の4つである。ここで、「強い力」や「弱い力」は重力などと同じく力の固有名詞である。強い力と弱い力の及ぶ範囲は極く短い ($<10^{-15}$ m)。このため重力と電磁力が日常生活を支配している。電磁力は重力に比べて数十桁も強い。しかしながら宇宙を支配するのは重力である。なぜだろうか。実は、プラスの電荷とマイナスの電荷は引き合い、水素原子のように電氣的に中性になってしまうからである。

1970年代に入って、重力を除く3つの力を記述するミクロの世界の理論、標準理論が確立された。3つの力はゲージ不変性という美しい対称性によって統一的に記述される。しかしながら、3つの力はそれぞれ独立であり、電気力と磁力が電磁力として統一されたのとは異なる。それを端的に表すのが結合定数である。電磁力の結合定数は電荷である。同様に、強い力のそれは「色電荷」、弱い力のそれは「弱電荷」と呼ばれる。それぞれ別の大きさなので、3つの力は独立である。ところが結合定数は、名前に反して定数ではなく、エネルギーとともに変化する。強い力と弱い力の結合定数はエネルギーとともに弱くなり（漸近的自由）、電磁力の結合定数は逆に強くなる。3つの力の結合定数のエネルギー変化は理論的に予言でき、結合定数の逆数はエネルギーの対数に比例する。この3つの直線が超高エネルギーの一点で交わるよ

うに見える（図1）。すなわち、3つの力が一つの力に統一される可能性が示された。これが大統一理論（GUT: Grand Unification Theory）である。そのエネルギー領域は、現在加速器で到達できる領域より十数桁上の超高エネルギー領域である。そのような超高エネルギー領域での数少ない検証可能な予言が重粒子数の破れ、すなわち、核子崩壊であった。

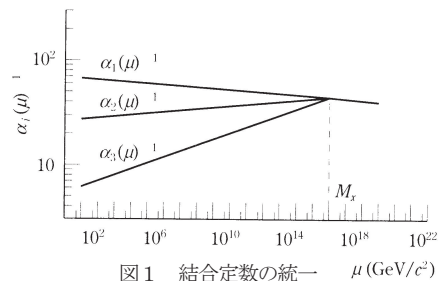


図1 結合定数の統一 μ (GeV/c²)

4. 核子崩壊の探索

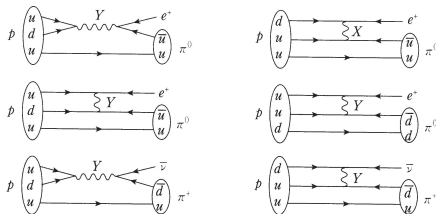
最初の大統一理論が提案されたのは、やっとな標準理論が確立されようとしていた1974年のことであった⁶⁾。標準理論の正しさや美しさが認識され、大統一理論への夢がふくらんで来た1978年、私は小柴昌俊研究室の助手を務めていた。その年の秋、高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）の菅原寛孝所長（当時）に次のように頼まれた。「1979年2月に大統一理論に関する理論の研究会を開きたい。そこで一つだけ実験の話として、核子崩壊探索についてこれまでの結果のレビューをしてもらえないか」。早速調べてみると、それまでの世界記録は宇宙線ニュートリノを測る実験の副産物で、核子の寿命の下限値は 2×10^{30} 年だった。大学に戻って小柴先生にレビュートークを頼まれた話をする。「実はこんなアイデアがある」と先生の頭に仕舞ってあったアイデアの一つを話してくれた。それが大量の水を地下にため、光検出器（光電子増倍管）で囲む水チェレンコフ検出器のアイデアであった。2月の研究会では、レビューに加えて、このアイデアをもとに検討した新たな核子崩壊実験を提案した⁶⁾。それが後の神岡実験へと発展した。

4.1 核子崩壊モード

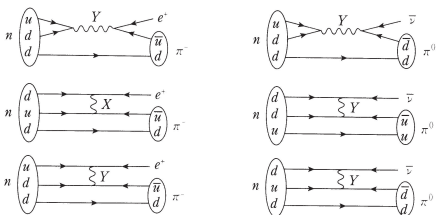
核子崩壊を探索するためには、まずどのような崩壊モードが可能かを考えなければならない。陽子は水素原子の原子核として存在する。酸素原子核中の陽子や中性子も通常の意味で安定である。それは原子核として束縛される際に余分なエネルギー（核融合エネルギー）を放出

し、自由な粒子より質量が小さくなっているからである。そこで陽子と中性子両方の崩壊モードを考える。核子が崩壊して生成される粒子は、表1に掲げた粒子に限られる。

最初に提案された大統一理論はSU(5)-GUTと呼ばれる⁶⁾。SU(5)という群に、基本粒子が配置される。陽子や中性子を構成するクォークが電子やニュートリノと同じ群に属すことから、その間を媒介する粒子が存在する。それらはX粒子とY粒子と呼ばれ、質量は $10^{15} \sim 10^{16}$ GeV c^2 ととても重く、核子の寿命は媒介粒子の質量の4乗に反比例するため、核子は長生きをする。X、Y粒子を介して起こる核子崩壊の過程を図2に示す。SU(5)-GUTが予言する崩壊モードは $p \rightarrow e^+ + \pi^0, \nu + \pi^+$ および $n \rightarrow e^+ + \pi^-, \nu + \pi^0$ である。



陽子崩壊のファインマン図



中性子崩壊のファインマン図

図2 核子崩壊のファインマン図¹⁾

4.2 水チェレンコフ検出器

新たな実験を提案するからには、従来の記録を二桁くらい凌駕したい。目標の寿命の下限値を 10^{32} 年としよう。核子の寿命がこの下限値のとき、 10^{33} 個の核子を用意し、その全てを四六時中1年間休まず観測したとしよう。すると、平均10個の崩壊が観測にかかるはずである。 10^{33} 個の核子とはどのくらいの物質質量だろうか。核子1個の質量が分かると計算できる。実はその値はおおよそ $1/(6 \times 10^{23})$ gである。分母はアボガドロ数である。これは陽子と中性子の質量がほぼ等しいことと1gの定義から容易に導ける。すると 10^{33} 個の核子の物質質量は $10^{33}/(6 \times 10^{23})$ g = 1700tであり、物質が水であると1700m³となる。

しかも水は観測物質として大変都合がよい。たとえば崩壊モード $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ を例として考えよう。陽子はほとんど静止しているので、 π^0 中間子と陽電子は、反対方向に同じ大きさの運動量を持って飛び出す。 π^0 中間子はすぐに2つのガンマ線(光子)に崩壊する。陽電子は水中の光速($\sim 2c/3$)より速いので、チェレンコフ光を放出する。チェレンコフ光は、ちょうど衝撃波のように粒子の進行方向と約42°の方向に円錐状に広がる。やがて粒子はエネルギーを失い止まるので、光の輪(チェレンコフリング)が広がる。さらに、(陽)電子やガンマ線は、水中の原子核と相互作用をくり返し、多数の電子・陽電子対を生成する。生成された(陽)電子それぞれがチェレンコフ光を放出するので、核子崩壊で生成された陽電子やガンマ線の方向には、輪郭のぼやけた光の輪ができる。それに対し、ミュオンや荷電 π 中間子は輪郭のはっきりした光の輪を生成する。このように水チェレンコフ検出器では粒子の識別も可能である。陽子のこの崩壊モードでは、図3に示すように3つの光の輪が生成される。

光の輪を周囲に配置した光検出器で観測すれば、粒子の生成時刻、方向、およそのエネルギー、生成位置、および粒子の種類がわかる。核子崩壊の信号であれば、ある一点から同時に逆方向に向かう2つ以上の光の輪が生成される。水は透明であり、チェレンコフ光を観測するには最適である。水は安価で豊富にあり、しかも全ての核子を観測対象として活用できる。ただし、検出器は地下深くに置かれなければならない。地上では大量の宇宙線が降り注ぎ、それらが絶え間なくチェレンコフ光を出して、稀にしか起こらない信号が埋もれてしまうからである。

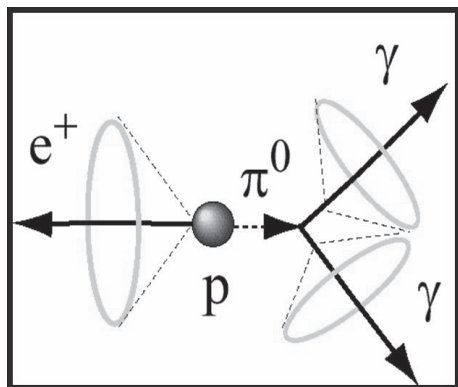


図3 陽子の、陽電子と π^0 中間子への崩壊と3つの光の輪⁷⁾

研究会で提案された検出器は、3000 トンの水槽の壁に 8000 個の光検出器を取り付けたものだった。その後私はドイツでの実験に派遣され、帰国後は（現）高エネルギー加速器研究機構に職を得て、この問題から遠ざかっていた。

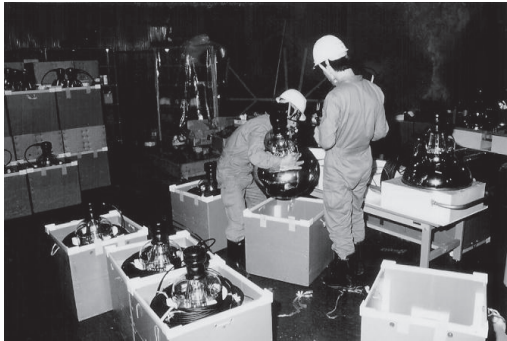


図4 口径50cm 光電子増倍管⁷⁾

5 その後の発展

その間に小柴先生は、（現）浜松ホトニクス社と直径 50 cm の巨大光検出器の開発を成功させ（図4）⁷⁾、1983年に神岡実験が始まった。光検出器の数はその巨大さ故に、3000 個で十分な性能が出せた（図5）。アメリカでも 5000 トンの水チェレンコフ検出器の実験（IBM 実験）がそれより半年早く実験を開始していた。

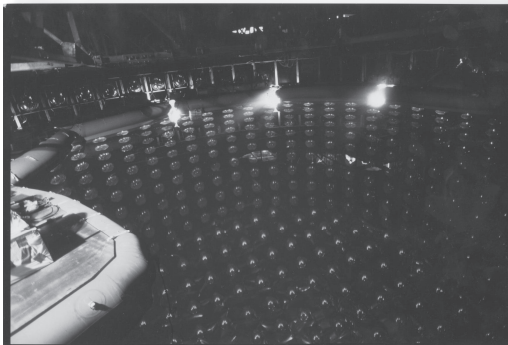


図5 神岡実験装置⁷⁾

残念ながら核子崩壊と断定できる現象は測定にかからないままだった。そこで神岡実験では核子の寿命の下限値を塗り替えるとともに、次の目標、太陽からのニュートリノの観測を目指して装置を改良していた。太陽ニュートリノのエネルギーは核子崩壊生成粒子の約二桁低いので、その観測には水中のバックグラウンド（ラドンなどからの崩壊生成粒子）を数桁減らさなければならない。

水の純化作業によりバックグラウンドの低減が成ったこ

ろ、超新星爆発が起こった。超新星爆発では放出されるエネルギーの 99%を膨大な数のニュートリノが持ち去る。17 万光年離れた SN1987A から放出されたニュートリノのうち約 11 個を観測することに成功して神岡実験は一躍有名になった⁸⁾。アメリカの IBM 実験でも「同時刻」に 8 個ほど観測して超新星からのニュートリノであることが確認された。この業績により、小柴昌俊先生は 2002 年のノーベル物理学賞を受賞された。

この快挙により、神岡実験をアップグレードした 50000 トンの水チェレンコフ検出器、スーパー神岡実験（SK）の建設が認められた。口径 50 cm の光検出器を約 11200 個壁に取り付けた検出器である（図6）。大型の水チェレンコフ検出器はニュートリノの測定にも威力を発揮する。SK は 1996 年 4 月に観測を開始し、1998 年夏にニュートリノ振動の確かな証拠を発見して世界の賞賛を浴びた⁹⁾。実際、核子探索における最終的なバックグラウンドは、宇宙線ニュートリノである。SK の主要の目的の一つ、核子崩壊探索についても表2に示すように、いろいろな崩壊モードについて他の追従を許さない厳しい下限値を得ている（表に掲げてない他のいろいろな崩壊モードについても下限値を得ている）。

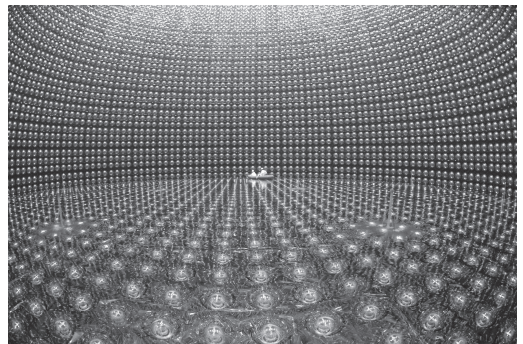


図6 注水途中のスーパー神岡実験装置⁷⁾

理論の発展としては、単純な SU(5)-GUT では、力は大統一されないことがわかった。1 点で交わるはずの 3 つの結合定数が 1 点で交わらないことが、その後の精密実験で明らかになった。そこで、自然界にはさらに別の対称性、「超対称性」(SUSY: Super Symmetry) が働いているという見方が有力になった。SUSY - SU(5) - GUT では、結合定数が見事 1 点で交る。

超対称化されたモデルでの主な崩壊モードは、 $p \rightarrow K^+ + \nu$, $n \rightarrow K^+ + e^-$ 等、 K 中間子を含む崩壊である¹⁰⁾。ここで放出される K^+ 中間子はチェレンコフ光を出さない。その速さが水中の光速より遅いからである。しかし

表2 核子崩壊モードと寿命の下限值 (90%信頼度)
(単位 10^{30} 年)

陽子		中性子	
崩壊モード	下限値	崩壊モード	下限値
$e^+\pi^0$	1600	$e^+\pi^-$	158
$\mu^+\pi^0$	473	$\mu^+\pi^-$	100
$\nu\pi^+$	25	$\nu\pi^0$	112
$e^+\eta$	313	$\nu\eta$	158
$\mu^+\eta$	126		
$e^+\rho^0$	75	$e^+\rho^-$	217
$\mu^+\rho^0$	110	$\mu^+\rho^-$	228
$\nu\rho^+$	162	$\nu\rho^0$	19
$e^+\omega$	107	$\nu\omega$	108
$\mu^+\omega$	117		
e^+K^0	150	e^+K^-	17
μ^+K^0	120	μ^+K^-	26
νK^+	670	νK^0	86
νK^{*+}	51	νK^{*0}	78
e^+K^{*0}	84		
$e^+\pi^+\pi^-$	82	$e^+\pi^-\pi^0$	52
$e^+\pi^0\pi^0$	147		
$\mu^+\pi^+\pi^-$	133	$\mu^+\pi^-\pi^0$	74
$\mu^+\pi^0\pi^0$	101		
		$e^+K^0\pi^-$	18
$e^+\gamma$	670	$\nu\gamma$	28
$\mu^+\gamma$	478		
$e^+\gamma\gamma$	100	$\nu\gamma\gamma$	219
$e^+e^+e^-$	793	νe^+e^-	257
$e^+\mu^+\mu^-$	359	$\nu\mu^+\mu^-$	79
$\mu^+\mu^+e^-$	6	$\nu e\mu$	83
$e^+\nu\nu$	100		
$\mu^+e^+e^-$	529		
$\mu^+\mu^+\mu^-$	675		
$\mu^+\nu\nu$	21		

K^2 中間子はすぐに止まって崩壊する。その時生成される μ^+ 粒子は一定のエネルギーで放出され、チェレンコフ光も放出する。それだけではバックグラウンドに埋もれてしまう。しかし水中の酸素原子核の中の核子が崩壊すると一定のエネルギーの γ 線も一緒に放出されるはずである。 γ 線と μ^+ の信号を「同時に」観測すれば、バックグラウンドを大幅に除去できる。そのような崩壊も探索したが観測されず、SUSY・SU(5)-GUT のモデルに厳しい制限をつけることができた⁽⁴⁾。

5 終わりに

核子崩壊が観測されたとしても、もちろん現代物理学にとっては大変な発見である。加速器では到底手が届かない超高エネルギー領域での現象が捉えられたことになり、崩壊モード等の詳細な研究は標準理論を超える理論の大きな手がかりを与えることになる。しかし、もっと一般的にはどんな意味があるのだろうか。もし仮に、

核子の寿命が 10^{35} 年と測定されたとしても、宇宙の終焉の一つのシナリオが決まるのである。 10^{35} 年後には核子の数が $1/e$ になってしまっている。すくともはや星などを生成することは不可能であろう。まさに宇宙の崩壊である。もつとも、現在、宇宙の膨張が加速していることが明らかになっている。加速の程度によっては 10^{35} 年よりずっと前に、原子核さえもばらばらになってしまうという予言もある (Big Rip)。まあ気が遠くなるほど先のことであるので、それについて人類が心配する必要もないのではあるが。

参考文献および注

- (1) 素粒子についての入門書はたくさんあるが、拙著もぜひ参考にさせていただきたい。渡邊靖志，“素粒子物理入門”，培風館，2002年。素粒子の性質等について次の文献も参考になる。三田一郎，“CPの破れ—新しい物理を探る”，工学研究所報 29号 (2006-11)，P35。
- (2) 人類が男と女に分けられるように、粒子もスピン (自己角運動量) が ($\hbar =$ プランク定数 2π の単位で) 整数か半整数かにより、それぞれボソンとフェルミオンに分けられる。フェルミオンはパウリの排他律にしたがう。すなわち、同じ量子状態には一個のフェルミオンしか占めることはできない。電子や核子がフェルミオンであることは大変幸運であった。もしボソンだったら物質は接触すると爆発的に融合して大きな塊になってしまうと予言されている。
- (3) 正しくは $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$ と書くべきである。 p は運動量で、本文の式は $p=0$ のとき ($m \neq 0$ の粒子が静止しているとき) の式と理解すればよい。
- (4) W.-Y. Yao *et al.*, (Particle Data Group), *J. Phys. G* **33**, 1 (2006).
- (5) H. Georgi and S. Glashow, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 438 (1974).
- (6) Y. Watanabe, “Trying to Measure the Proton’s Lifetime”, *Proc. of the Workshop on “Unified Theories and Baryon Number in the Universe”*, Ed. O. Sawada and A. Sugamoto, *KEK79-18*, 1979.
- (7) 写真等は東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設提供。
- (8) K. Hirata *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1490 (1987).
- (9) Y. Fukuda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998).
- (10) N. Sakai, *Nucl. Phys. B* **238**, 317 (1984).
- (11) Y. Hayato *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **83** 1529 (1999).