



Title	プロトンの寿命
Author(s)	長島, 順清
Citation	大阪大学低温センターだより. 1983, 42, p. 1-4
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/8117
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

プロトンの寿命

理学部 長 島 順 清 (豊中 4 1 3 0)

はじめに

最近の統一場ゲージ理論、特に大統一理論の発展により陽子が崩壊する可能性が出て来た。陽子が不安定であれば、陽子・中性子（まとめて核子と云う）及び電子よりなるこの物質宇宙その物がいずれは崩壊することを意味し、我々の世界観を大きく変える。面白いことに陽子崩壊が存在すると180億年前ビッグバンにより始まったこの宇宙の物質質量（正確には核子数又はバリオン数）が、反物質の不在も含めてかなり定量的に説明できることもわかっている。

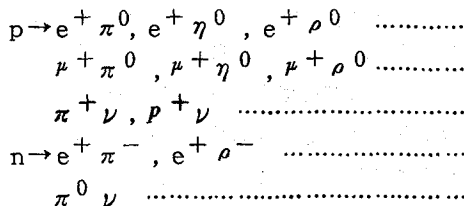
現代の素粒子像によると全ての物質は、“強い力”の働くクォークと、働かないレプトン（電子やニュートリノの仲間）より構成され各素粒子間の相互作用はゲージ場が仲介する。この内弱い力と電磁力はワインバーグ・サラムの理論として最近統一され、且つ弱い力を仲介するゲージ場“W粒子”もCERNで発見された（質量約80GeV）。大統一理論の考え方は、弱い力、電磁力、強い力は本来一つの力から派生したもので高温（ $E \geq 10^{15}$ GeV相当）では、単一の結合定数で表わされ、且つグロトン力と同じような長距離力となっているとする（本来のゲージ場は全て質量ゼロである）。ここでは強い力による素粒子の分類は意味がないから、クォーク・レプトン混合が当然の帰結として出てくる。低温になると相転移が起り、シャヘイ効果等により長距離力が短距離力となり、ゲージ場が質量を持つ。こうして第1の相転移により強い力が、第2の相転移により弱い力が分離する。この時力の強さはゲージ場の質量の自乗分だけ弱くなる。ゲージ場の質量は相転移の起るエネルギーと同程度であり、クォークとレプトンを混ぜる力即ち陽子中のクォークをレプトンに変換して崩壊させる相互作用は弱い力にくらべ更に $(m_w / 10^{15} \text{ GeV})^2$ 分だけ弱い。簡単な次元解析を使えば陽子寿命 τ_p は μ 中間子寿命 τ_μ より

$$\tau_p = \tau_\mu \times \left(\frac{m_\mu}{m_p}\right)^5 \times \left(\frac{10^{15} \text{ GeV}}{m_w}\right)^4 \sim 10^{34} \text{ 年}$$

となる。よりちゃんとした大統一理論モデルでは大体 10^{31+2} 年と計算されている。

陽子崩壊シグナル

陽子や中性子には次のような崩壊モードがある。



各モードへの分岐比はモデルによる。dt時間に崩壊する陽子の数は

$$dN = -\frac{dt}{\tau_p} N$$

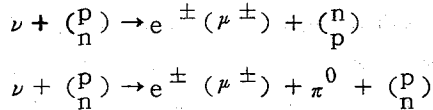
であるから、測定時間を2ヶ月、測定反応数を10個とすると $\tau_p = 10^{31}$ 年の場合、 $N = 6 \times 10^{32}$ 個即ち1,000トンの被検出体が必要である。

陽子崩壊のシグナルの条件は

- 1) 反応が被検出体の十分内側で起る
- 2) 反応点を中心として崩壊粒子が逆方向に放出される
- 3) 崩壊粒子の全エネルギーが陽子質量に等しい

1) は宇宙線 μ 中間子が外から入って来て起すバックグランド反応を除くためである。地上では、 μ の数は 1 cm^2 当り毎秒約1個あり、1,000トンの被検出体では2ヶ月で 10^{10} 個にもなるので、地下深く潜りこの宇宙線バックグランドを減らすことが不可欠である。

地下深く潜ることで解決されない宇宙線ニュートリノ対応策として2)、3)があるわけだが、それでも



の反応のうち、 π^0 等が後方に放出されるものは除ききれず、これが測定限界の一要因となる。もう1つの要因は作り得る被検出体の大きさから来る(最大 ≤ 1 万トン)。この結果測定可能な陽子寿命の上限値は $\sim 10^{33}$ 年とする。

陽子崩壊検出器

1,000トンもの被検出体としては通常水又は鉄が使われる。鉄は比重が大きくコンパクトに出来、従って検出器も小型となり比較的安価にできるので、即戦型の初期実験に有用である。阪大OBである宇宙線研三宅教授がインドのコーラー金鉱に設置した装置を図1に示す。全体の大きさは $4\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3.8\text{ m}$ あり、 2.3 mm 厚で 4 m 長又は 6 m 長の 10 cm 角鉄パイプを、1,600本縦横交互に34層積上げたもので、更に各層に 1.2 cm 厚の鉄板が敷詰めてあり総重量140トンある。鉄パイプの中に稀ガスをつめ高電圧をかけて比例計数管とし、荷電粒子が通るとイオン化により粒子が通過したこと、及びエネルギー損失(dE/dX)が測定できるようになっている。コーラー金鉱は非常に深く(水換算で7,600m)装置に入射する宇宙線 μ 中間子は1日2個程度に減っている。1980年10月より観測開始しており、陽子崩壊とみられる反応3例を見付けた。図1に反応例をも示す。 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ の e^+ が上方に行き π^0 は下方に約 30° の開角でカスケードを起し、且つ鉄中のエネルギー損失は約 1 GeV と測定された。この結果陽子崩壊寿命は約 8×10^{30} 年と推定された。

この実験は世界中の話題となっているが、いかんせん反応例が少な過ぎニュートリノによるバックグランドでないかという批判に答えられない。そこで反応例を増やし且つ崩壊粒子が逆方向にでていることをきちんと確認しようということで東大・高工研・宇宙線研共同で、総重量3,400トンの検出器を現在岐阜県神岡鉱山地下1,000mの所に建設中である。(図2)

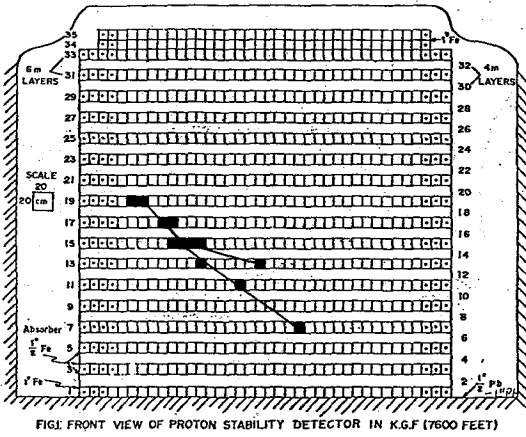


図 1

インド・コーラ金鉱における陽子崩壊検出装置
 高さ3.8 m、巾4 m、奥行6 mあり10 cm角の比例計数管を交互に積重ねている。
 図中の黒い四角は陽子崩壊と見られる現象により放電した所、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の e^+ は上方に、 π^0 は下方に約 30° の開角で2つのカスケードを起している。(三宅三郎教授提供)

純水タンク
 (直径15.5 m、高さ16 m)

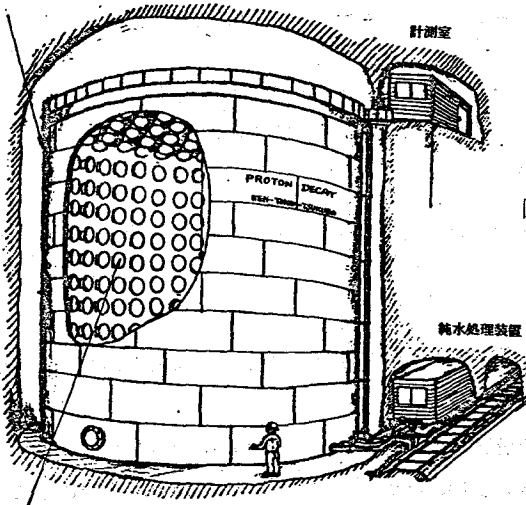


図 2 岐阜神岡鉱山中の水チェレンコフ陽子崩壊検出装置

20インチ光電子増倍管
 (1,000本)

これは高さ16 m、直径16 mの水タンクであり、壁のまわりに光電子増倍管1,000本をほぼ1 m置きに取付けてある。陽子崩壊の結果生じる荷電粒子によるチェレンコフ光を検出しようとするもので、図3 aに原理図を、図3 bに $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の場合の、チェレンコフ光を検知する光電子増倍管の予想配置を切開図として示してある。チェレンコフ光は粒子の飛翔方向から特定の角度で前方に且つリング状に放射され、又光量をも測ることにより粒子の崩壊方向、エネルギー等が定量的に決められる利点がある。

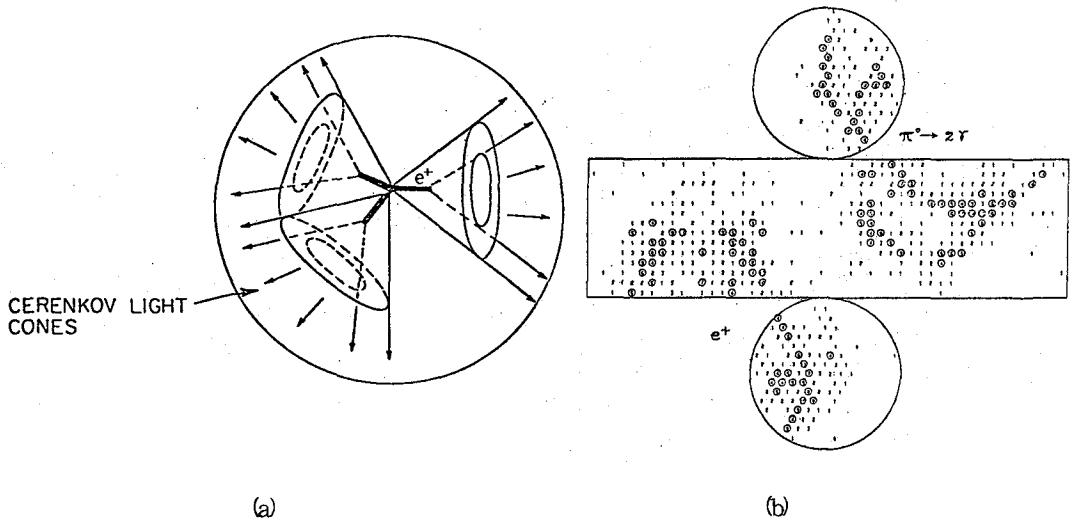


図3 (a)は水中を荷電粒子が通るとチェレンコフ光がリング状に放射される様子
 (b)は図2の検出装置で $p \rightarrow \pi^0 + e^+$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ が発生した時の予想チェレンコフパターン。各点が1個の光電子増倍管を示し数は光電子の数を示す。

アメリカでも、ライネス等のグループが同様の1万トンの水タンクを作り観測を始めたが、80日間で1例も見付かっておらず予備結果として

$$\tau > 6 \times 10^{31} \text{年}$$

という値をこの1月に報告した。しかし $p \rightarrow e^+ \pi^0$ の分岐比100%という仮定があり、三宅教授の結果と必らずしも矛盾する値ではない。

日本の検出器は50cm直径のお化け光電子増倍管を新しく開発して取付けているため、ライネスの検出器に比べ受光量が大きく、エネルギー分解能のよい、格が上の検出器であるので最終的にはこちらから良い結果が出ると予想される。

陽子寿命が 10^{33} 年を越えると、測定限界を越えるので、大統一理論の検証は陽子崩壊では不可能である。他の方法、例えば中性子振動と呼ばれる中性子の反中性子転化現象や、超重量 ($m \sim 10^{16}$ GeV) の磁気単極子(モノポール)の存在検証実験も盛んに行なわれている。もちろん大統一理論が正しくない可能性もあり得るわけだが、大統一理論は電磁力と弱い力の統一理論であるワインバーグ・サラム理論の自然な延長として出現したものである。これが正しくないとするとそれはそれで我々の自然に対する認識が非常に甘かったということになるわけで、自然の神秘性はますます深まるのである。