

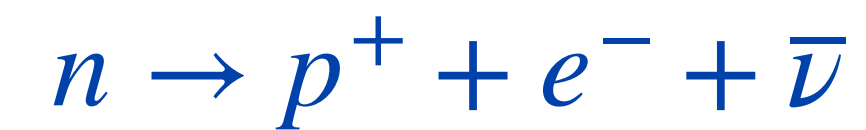
実験ゼミ グリフィス

1.5ニュートリノ

田舎 和也

1.5 ニュートリノ 目次

- ベータ崩壊の時に電子のエネルギーが一定でないことから予言



- カワン、ライネスによるニュートリノ観測実験

- ニュートリノと反ニュートリノは同じ？

- ニュートリノの種類

- 質量とニュートリノ振動

ニュートリノ観測まで

- 1950年までには、理論的にニュートリノの存在を強いる確証があったが、実験的な確証得られず。
- ニュートリノはエネルギー保存則を満たすためだけの仮想的な粒子？
- ニュートリノは飛跡を残さず、崩壊もしない。
- ニュートリノと物質の相互作用が極度に弱く、適当なエネルギーのニュートリノは1000光年分の鉛を通過してしまう。

カワン、ライネスのニュートリノ観測実験

1950年半ば サウスカロライナのサバンナ・リバー原子炉にて

- 原子炉で起こるベータ崩壊で反ニュートリノが発生。
$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$$
- 原子炉地下の貯水槽中の水素の陽子と反ニュートリノが逆ベータ崩壊を起こす。この陽電子を観測することでニュートリノの存在を確認した。 $p^+ + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+$
- 彼らの検出器におけるニュートリノフラックスは毎秒1平方センチあたり 5×10^{13} と計算されていたが、それでも毎時間2,3事象しか期待できなかった。

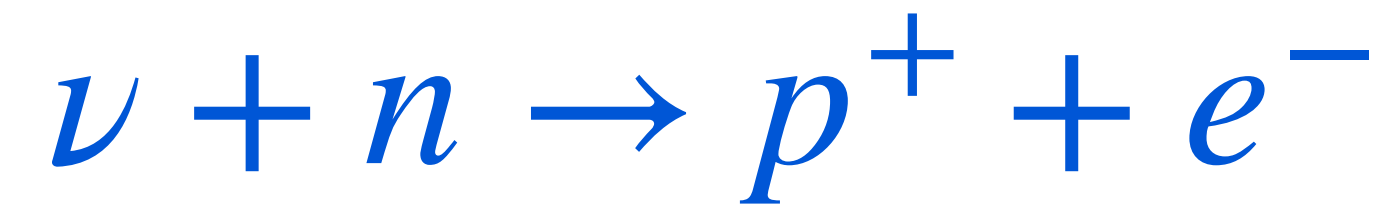
遅延同時計測法

- 陽電子は電子と対消滅して二本の γ 線を放出しそれを検出する。
- 遅れて中性子は陽子に捕獲されて重水素と γ 線を放出しそれを検出する。
- この二本の γ 線の時間差を利用してバックグラウンドを排除。

ニュートリノと反ニュートリノ②

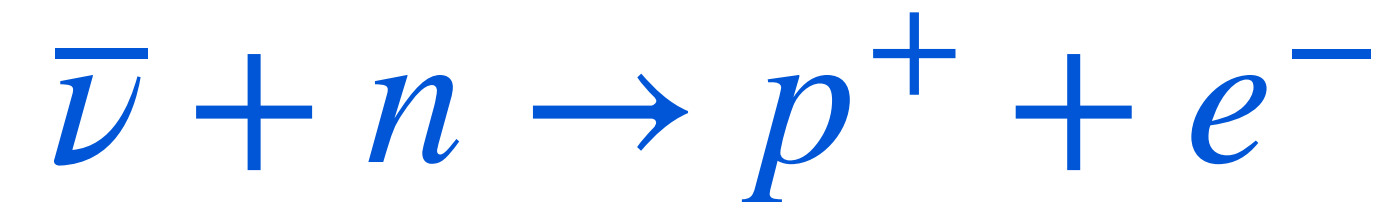
ニュートリノと反ニュートリノは別物

ベータ崩壊の交差反応である



がほぼ同じ頻度で起こらなければならない。

しかしデービスは反ニュートリノを使って



が起こらないことを突き止め、ニュートリノと反ニュートリノは別物であるという結論に達した。

ニュートリノと反ニュートリノ③

本当に別物...?

- 先程の結論は実際には、そのとき考えられたほど確固たるものではない。
- 反応 $\bar{\nu} + n \rightarrow p^+ + e^-$ を禁止したのは ν と $\bar{\nu}$ の違いではなく $\bar{\nu}$ のスピンの違いかもしれない。
- 実際、今日では、反粒子との違いのあるディラックニュートリノと、 ν と $\bar{\nu}$ が同じ粒子とするマヨナラ・ニュートリノという2つの模型が存在する。

ニュートリノと反ニュートリノ④

レプトン数

- 起こる反応、起こらない反応を決めるルールを定めたい。
- e^- , μ^- , ν にはレプトン数 $L = +1$ を e^+ , μ^+ , $\bar{\nu}$ にはレプトン数 $L = -1$ を割り振り、その他の粒子はレプトン数を0にした。
- コノピンスキーとマハムッドがあらゆる物理過程で反応前後のレプトン数の合計が変わらないという、レプトン数保存則を提案。

レプトン数保存則

1. $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$

2. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$

3. $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$

4. $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$

5. $\bar{\nu} + n \rightarrow p^+ + e^-$

6. $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$

ニュートリノと反ニュートリノ⑤

結局何が違うのか

- ニュートリノと反ニュートリノを区別しているのはレプトン数(電荷がそうであるように、調べたい粒子が他の粒子とどのように反応するかを見ることで実験的に決めることができる)。
- 実はニュートリノと反ニュートリノはヘリシティも違う。ニュートリノが左巻きで反ニュートリノが右巻き

ニュートリノの種類

レプトン数保存則では不十分？

- なぜ $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ は観測されないのか？
- ミュー粒子は電子に変わらない？ しかし $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$ は起こる。
- 1950年代後半から1960年代初頭かけて多くの人がある答えとなるものを提示した。

ニュートリノの種類②

電子数、ミュー粒子数保存則

- 電子に付随するもの(ν_e)と,ミュー粒子に付随するもの(ν_μ) 2つのニュートリノの存在を仮定する。
- 右表のように電子数 L_e ,ミュー粒子数 L_μ を割り振る。
- レプトン数保存則を電子数保存とミュー粒子数保存という2つの別々の法則に仕立て直すと前ページの過程が説明できる。

表 1.1 1962~1976年のレプトンの仲間

	レプトン数	電子数	ミュー粒子数
レプトン			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
反レプトン			
e^+	-1	-1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	-1	0
μ^+	-1	0	-1
$\bar{\nu}_\mu$	-1	0	-1

電子数, ミュー粒子数保存則

1. $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
2. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
3. $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
4. $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
5. $\bar{\nu} + n \rightarrow p^+ + e^-$
6. $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$

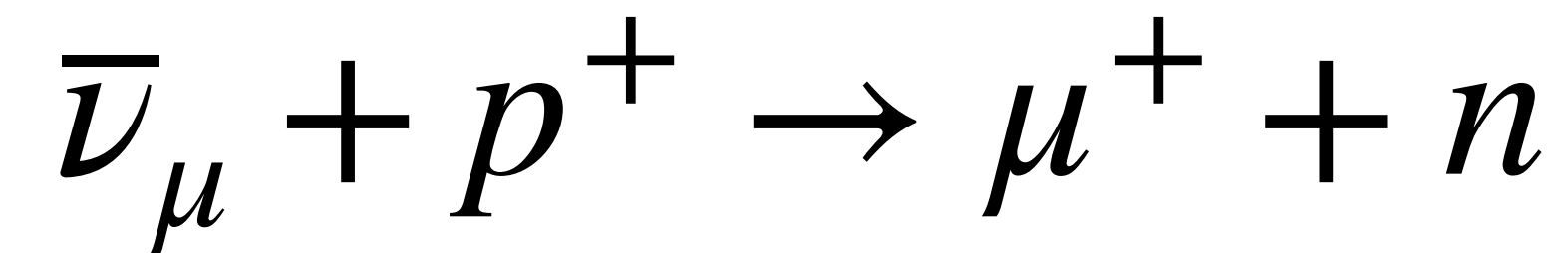
表 1.1 1962~1976 年のレプトンの仲間

	レプトン数	電子数	ミュー粒子数
レプトン			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
反レプトン			
e^+	-1	-1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	-1	0
μ^+	-1	0	-1
$\bar{\nu}_\mu$	-1	0	-1

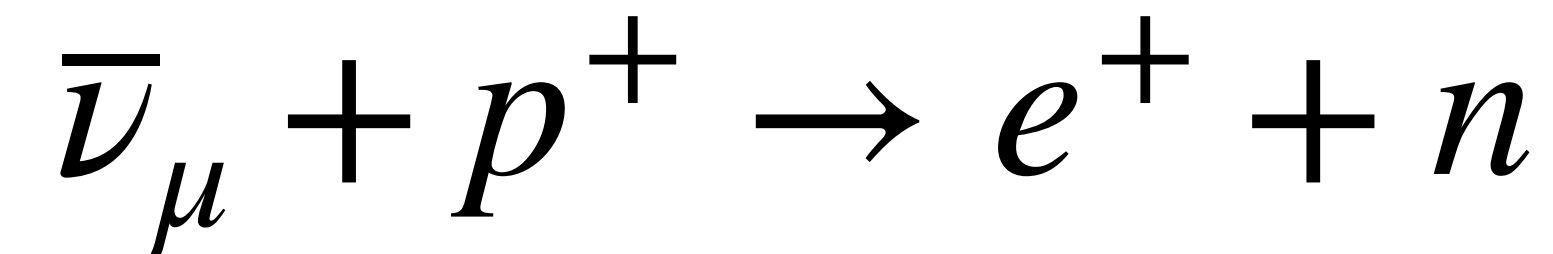
ニュートリノの種類③

1962年 ブルックリンでの実験

π^- 崩壊で生成される約 10^{14} 個の反ニュートリノを使い、レーダーマン、シュワルツ、スタインバーガーらは



を同定した。一方禁止される過程である



は観測されなかった。

ニュートリノが1種類だけならば、二番目の反応も最初の反応と共通のはず。

ニュートリノ振動

- つい最近までニュートリノの質量はゼロであると広く仮定されてきたが、違っていたことが明らかになった。
- 電子と比べても非常に軽いが値はまだわかっていない。
- 長距離飛行するとニュートリノが別のタイプのニュートリノに変換し、その後また元に戻るニュートリノ振動という現象が知られている。

レプトンまとめ

- 1962年には右図のようにレプトンの仲間は8種類まで増えた。
- レプトンは強い相互作用に寄与しないという事実で特徴づけられる。
- その後14年間、少なくともレプトンにとっては静かな時代だった。

表 1.1 1962~1976年のレプトンの仲間

	レプトン数	電子数	ミュー粒子数
レプトン			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
反レプトン			
e^+	-1	-1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	-1	0
μ^+	-1	0	-1
$\bar{\nu}_\mu$	-1	0	-1

1.6 ストレンジ粒子

(1947~1960)

K中間子①

- 1947年12月ロチェスターとバトラーは
図1.7に示される霧箱の写真を発表した。
- 少なくともパイ中間子の2倍の質量を持つ新しい中性粒子の存在

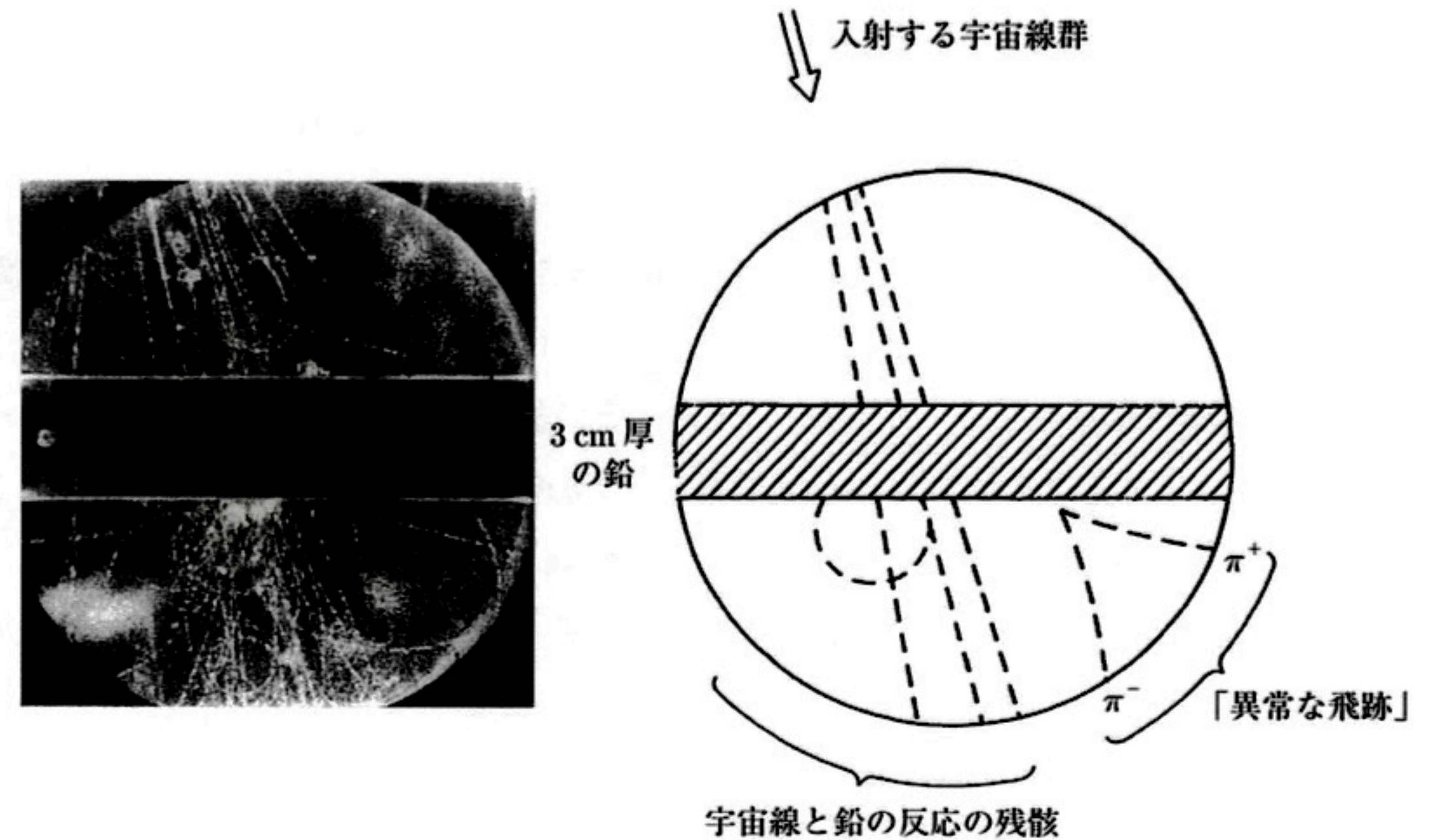
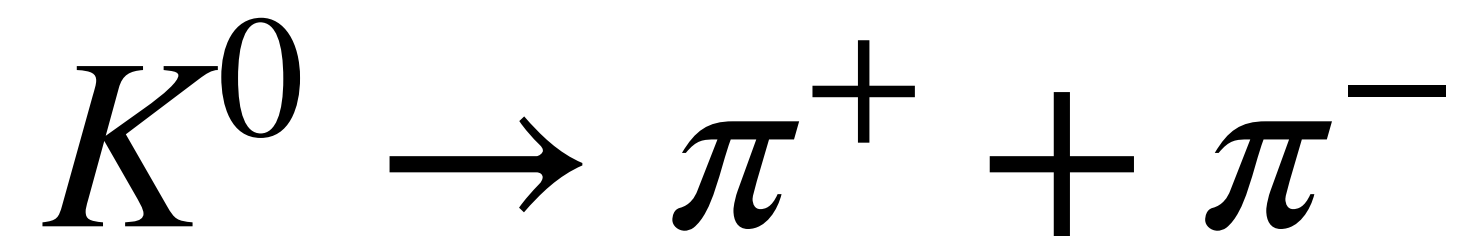
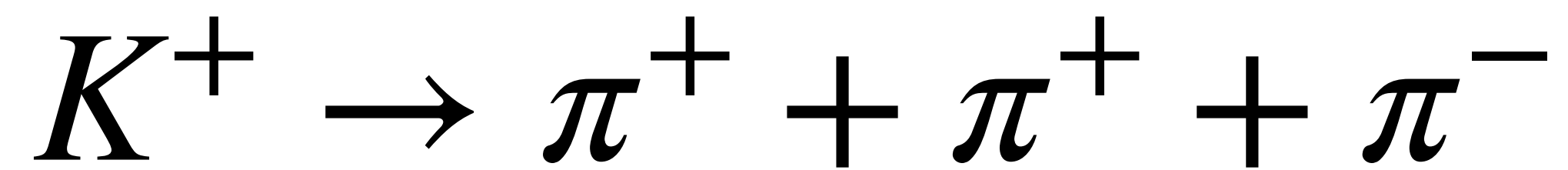


図 1.7 最初のスレンジ粒子. 宇宙線が鉛の板に当たり, K^0 が生成され, その K^0 は荷電パイ中間子対に崩壊している (写真著作権: Prof. Rochester, G. D.: Nature, 160, 855 (1947). 版權: Macmillan Journals)



K中間子②

- 1949年、ブラウンと共同研究者らは、図1.8に掲載した荷電K中間子の崩壊を示す写真を公表した。



- K中間子はいくつかの点で重いパイ中間子のように振る舞う。
- やがて、 η, ϕ, ω, ρ などの多くの中間子が発見された。

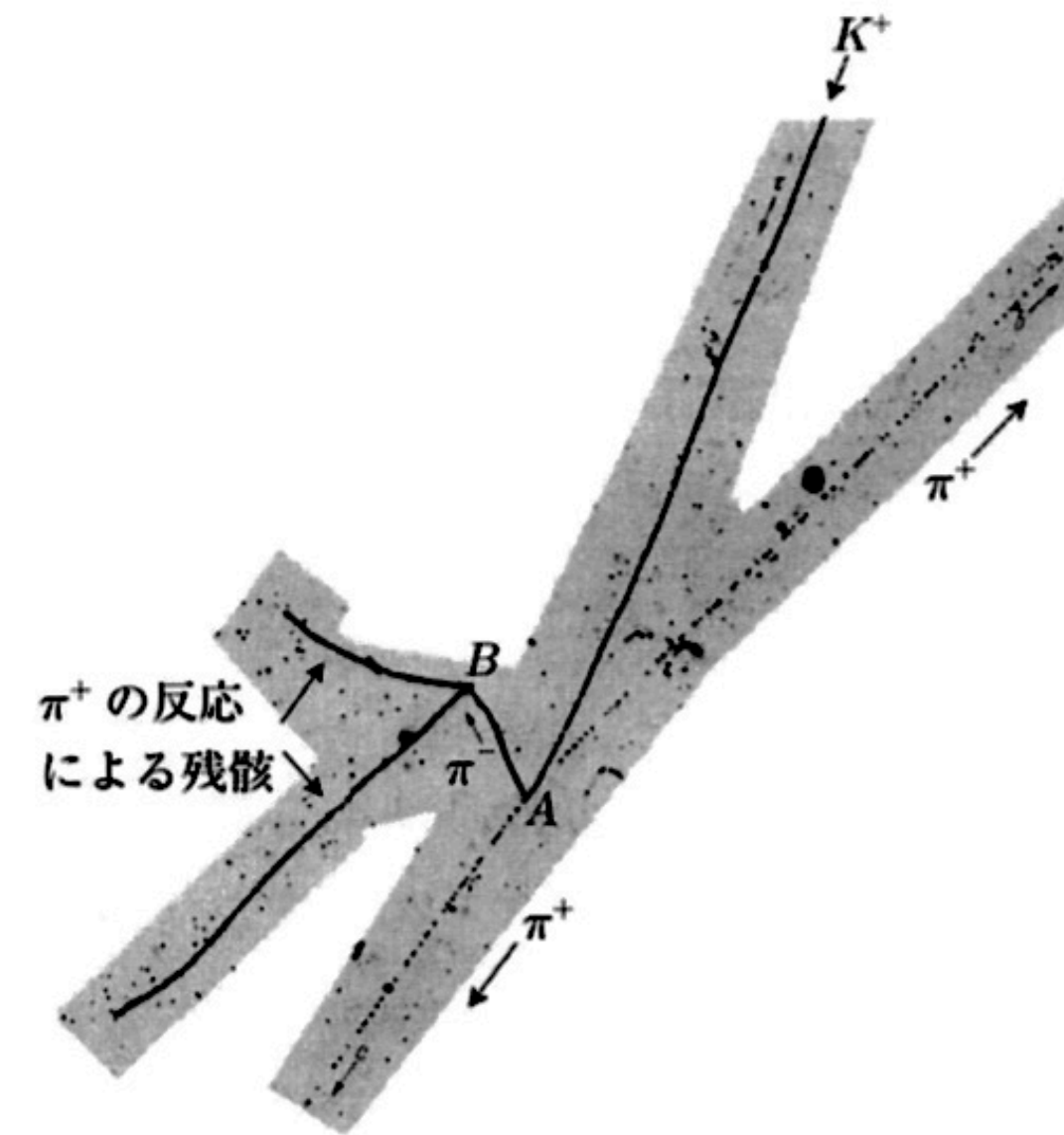


図1.8 上から来た K^+ が A で $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ に崩壊している（その後、この π^- は地点 B で崩壊している）（出典：Powell, C. F., Fowler, P.H. and Perkins, D.H.: The Study of Elementary Particles by the Photographic Method (Pergamon, 1959). 初めて掲載されたのは Nature, 163, 82 (1949))

バリオン

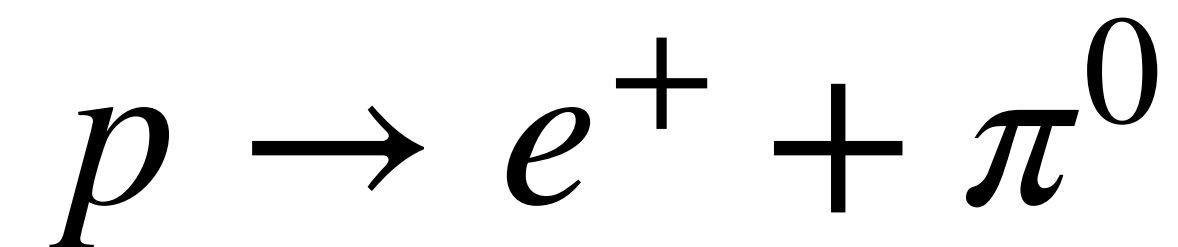
- 1938年、なぜ陽子は安定なのか？ という疑問があった。
- 例えば $p^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ が起こらないのは何故か。
- レプトン数保存則を破っているが当時はまだ知られていなかった。
- シュテュッケルベルグは陽子の安定性を説明するために陽子と中性子にバリオン数 $A = 1$ を、反バリオン (\bar{p}, \bar{n}) に $A = -1$ を割り当て、バリオン数保存則を主張。

バリオン数保存

- 中性子のベータ崩壊 $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$
- 反陽子を初めて検出した反応 $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$
- 陽子は最も軽いバリオンなので崩壊先がなく、バリオン数保存により安定性が保存される

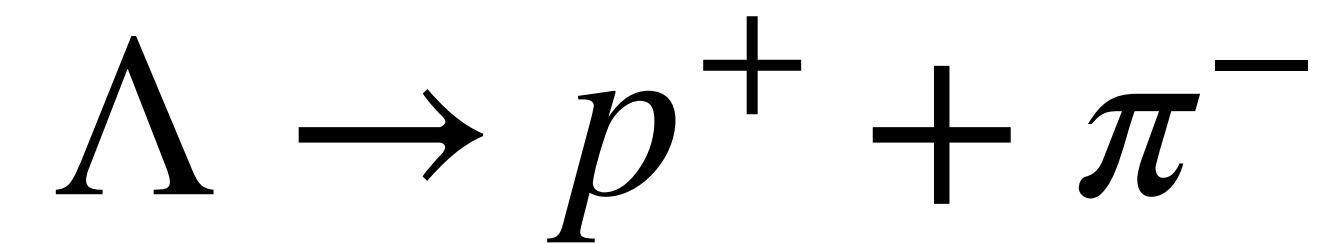
陽子は本当に絶対的に安定か？

- 大統一理論では僅かなバリオンの破れは許されている。
- しかし未だ陽子崩壊は観測されておらず、少なくとも 10^{34} 年以上。宇宙の年齢が 10^{10} くらい。
- 大統一理論は陽子がパイ中間子と陽電子に壊れることを予言...



ラムダ

- 1950年カルテックのアンダーソンらが明らかに陽子より重い Λ と呼ばれる粒子を発見。反応は以下で書ける。



- バリオン数保存則を満たす為には Λ にもバリオン数を与える必要がある。
- その後の何年かで Σ, Ξ, Δ など、さらにたくさん重いバリオンが発見。

中間子には保存則がない

- レプトンやバリオンと違い、中間子には保存則がない。

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}$$

$$\Lambda \rightarrow p^{+} + \pi^{-}$$