基礎物理学特別講義II

佐久間　史典
e-mail : sakuma@ribf.riken.jp

理化学研究所
仁科加速器センター
岩崎先端中間子研究室

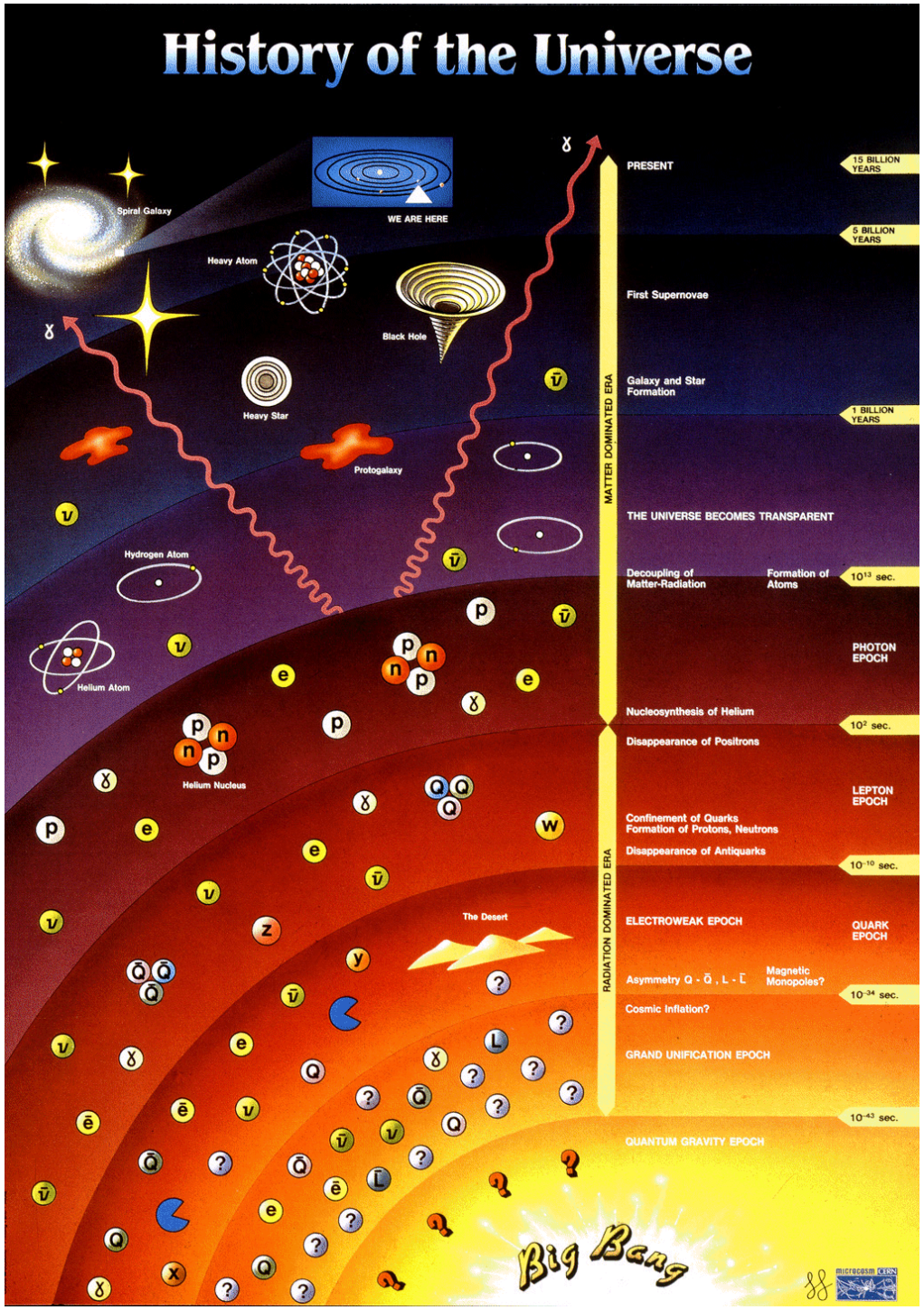
講義の内容

- 1コマ目:素粒子・原子核”実験”入門
  - 素粒子・原子核物理学の成り立ち
- 2コマ目:加速器実験入門
  - 最近の加速器実験の紹介も
- 3コマ目:検出器入門
  - 飛跡検出器や粒子同定検出器など
- 4コマ目:J-PARC紹介
  - J-PARCとそこで行われる数々の実験
- 5コマ目:J-PARCでのハドロン実験I
  - 原子核中でのカイラル対称性回復検証実験
- 6コマ目:J-PARCでのハドロン実験II
  - K中間子に関する実験

1.素粒子・原子核”実験”入門

- 単位系
- 素粒子・原子核物理学の成り立ち
  - 原子核
  - ハドロン
  - クォーク
  - レプトン

今までの素粒子・原子核物理学の歴史(概念)を実験屋の視点で簡単に紹介します。数式を用いた厳密な議論はしないので、もしもっと詳しく知りたいときは最後に述べる参考図書等で勉強してください。



宇宙の歴史

- 現在 (137億年)
- 重い原子の生成
- 軽い原子の生成
- 軽い原子核(He等)の生成
- ハドロンが生成され、質量を獲得 (カイラル対称性=強い相互作用の破れ)
- クォークやレプトンが質量を獲得 (ヒッグス機構=電弱相互作用の破れ)
- 質量0のクォークやレプトンの誕生
- ビッグバン：4つの力は統一していた

単位系

素粒子・原子核物理学で良く用いられる単位1

- エネルギーの単位 : MeV/GeV/TeV
  - 1 GeV/c^2 = 1.78 x 10^{-27} kg
    - 陽子質量 = 938.27 MeV/c^2 ~ 1 GeV/c^2
    - 電子質量 = 0.51 MeV/c^2
- 長さの単位 : fm
  - 1 fm = 10^{-13} cm
    - 陽子の大きさ = (0.87 x 2) fm ~ 1 fm
- 断面積の単位 : barn
  - 1 barn = 10^{-28} m^2 = 10^{-24} cm^2
    - pp全断面積 ~ 40mb (p運動量 数GeV/c~数TeV/c)

素粒子・原子核物理学で良く用いられる単位2

- $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34}$ J s
- c = 2.998 x 10^8 m s^{-1}
- $\hbar \boldsymbol{c} = \mathbf{197}$ **MeV fm ~ 200 MeV fm**
- $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \sim \frac{1}{137}$（微細構造定数）

不確定性原理

- $\Delta p \Delta x \sim \hbar \quad (\Delta E \Delta t \sim \hbar)$
  - $(\Delta pc)\Delta x \sim \hbar c$より
    - Δx = 1 fm → Δp ~ 100 MeV/c
  - $\Delta E(c\Delta t) \sim \hbar c$ より
    - ρ中間子(質量~800MeV/c^2, 崩壊幅(ΔE)~150MeV) → 寿命(cΔt) ~ 1 fm
    - 1TeVの加速器では、cΔt ~ (200MeV/1TeV) fm = 10^{-4} fmを見る事が可能

$\hbar c \sim$ ***200 MeV fm***

- ΔE=mc^{2}とすると、$\Delta E \Delta t = mc^2 \Delta t \sim \hbar$
  - 力の到達範囲 ~ cΔt ~$\frac{\hbar c}{mc^2}$
    - π^0中間子 : m = 135 MeV/c^2 → 力の到達範囲 ~ 1 fm ~ 原子核の大きさ
    - Z^0粒子 : m = 91.19 GeV/c^2 →力の到達範囲 ~ 10^{-3} fm

自然単位系

- 自然単位系 : $\hbar = c = 1$
  - 実際の値を求める際には、適当に$\hbar$やcを補う必要有り
- 例
  - $E^2 = p^2c^2+m^2c^4 \rightarrow E^2 = p^2+m^2$
  - 質量 : 1 GeV/c^2 = 1.78×10^{-27} kg

    → 1 kg = 5.6×10^{26} GeV
  - 長さ : $\hbar c$ ~ 0.2 GeV fm = 1

    → 1 m ~ 5×10^{15} GeV^{-1} (1 fm ~ 5 GeV^{-1})
  - 時間 : c ~ 3×10^{8} m s^{-1} = 3×10^{23} fm s^{-1} = 1

    → 1 s ~ 1.5×10^{24} GeV^{-1}

(1 fm = 10^{-13} cm = 10^{-15} m)

素粒子・原子核物理学の成り立ち

物質は何から出来ている?

●物質の構成要素:

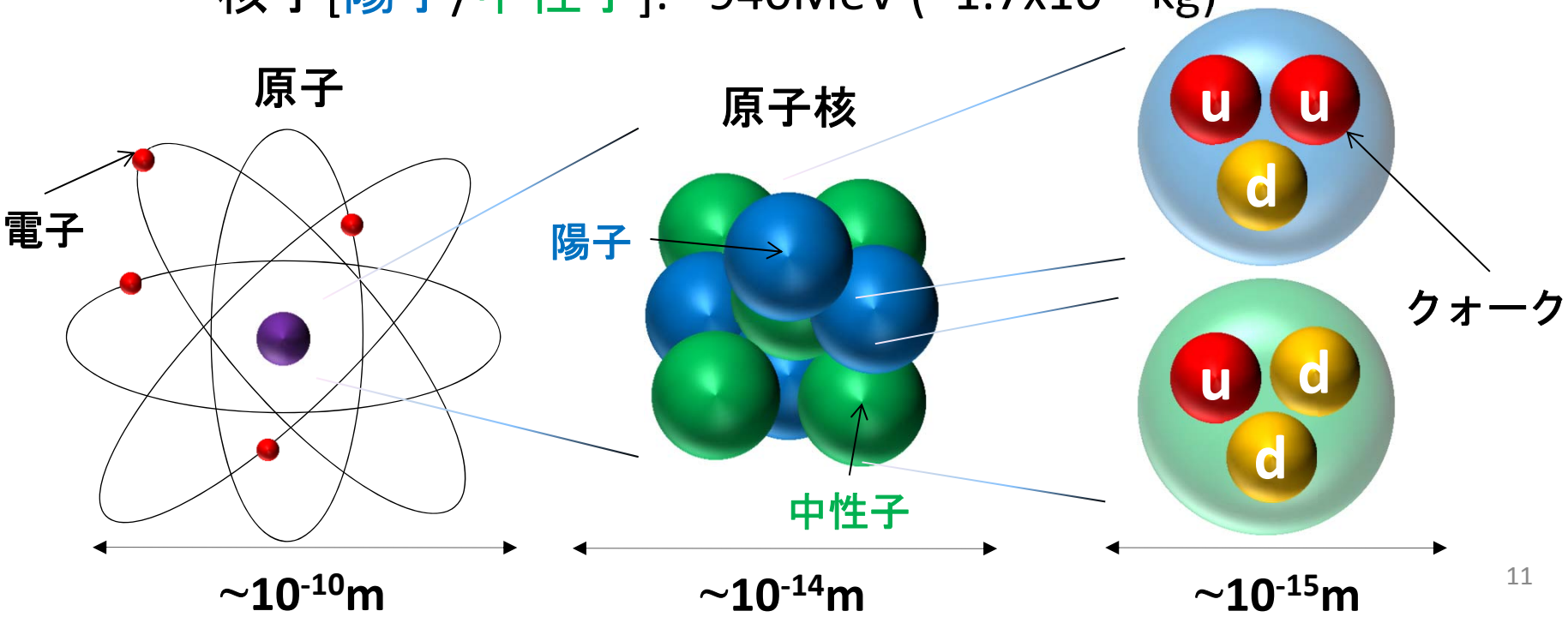
分子 → 原子 → 原子核+電子

→ 核子[陽子/中性子] → クォーク

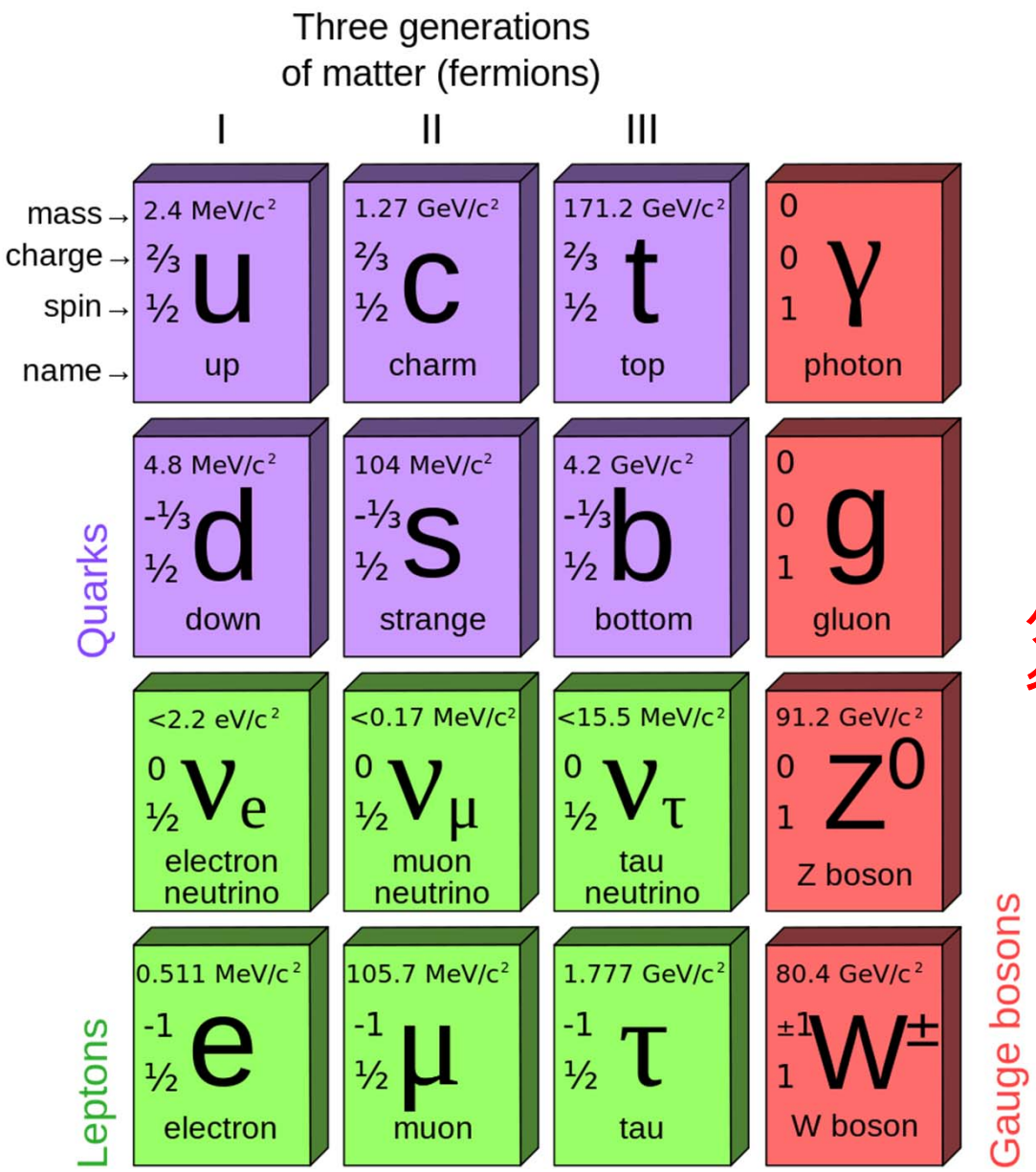
●**物質の質量の99.9%以上は、原子核の質量**

電子 : ~0.5MeV (~9.1×10^{-31}kg)

核子[陽子/中性子]: ~940MeV (~1.7×10^{-27}kg)



現在分かっている素粒子



クォークとレプトンは
各々の反粒子も存在

(from Wikipedia)

ハドロン

- 中間子(メソン)
  - クォーク・反クォーク対から構成
  - スピンが整数のボース粒子
- バリオン
  - 3つのクォークから構成
  - スピンが半整数のフェルミ粒子
- テトラクォーク?
  - 4つのクォークから構成
- ペンタクォーク?
  - 5つのクォークから構成
- ダイバリオン?
  - 6つのクォークから構成

"Sクォーク"を含むバリオン
= ハイペロン
"ハイペロン"を含む原子核
= ハイパー核

これらを総称して"ハドロン"と呼ぶ

4つの基本相互作用で世界は回る

相互作用	力の伝達粒子	力の到達距離 (fm)	典型的な寿命 (sec)	典型的な断面積 (mb)	典型的な結合定数 a_i
量子色力学 (Quantum chromodynamics, QCD)					
強い相互作用	グルーオン	1fm ~ $1/m_\pi$	10^{-23} ($\Delta \to p\pi$)	10	1
量子電磁力学（Quantum electrodynamics, QED)					
電磁相互作用	光子	∞	$10^{-20} \sim 10^{-16}$ ($\pi^0 \to \gamma\gamma$)	10^{-3} ($\pi p \to \pi p$)	10^{-2}
弱い相互作用	W,Z	10^{-3}fm ~ $1/m_W$	$>10^{-12}$ ($\pi^- \to \mu^- \bar{\nu}$)	10^{-11} ($\nu p \to \nu p$)	10^{-7}
一般相対性理論（general theory of relativity）					
重力相互作用	(グラビトン)	∞			10^{-39}

“素粒子”発見の歴史

- ハドロン、クォーク、レプトン、ゲージボソンがどのような経緯(実験)で発見されてきたのか

- “歴史は繰り返す”事から明らかなように、歴史を知ることはそれなりに意味がある

元素

- 古代 : (wikipedia)ドイツ語におけるAtomという言葉は、元はギリシャ語のἄτομοςであり、「分割できないもの」という意味である。

- 19世紀 :ロシアの化学者ドミトリ・メンデレーエフ(D.I.Mendelejev)が周期表としてまとめる。→ 分子や原子の確立

文部科学省 http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/week/1298266.htm

素粒子・原子核物理学の夜明け

- １９世紀末になって、この不可分の物質構成要素としての原子の考え方を根本から揺さぶるような3つの重要な物理学上の発見が相次いでなされた。

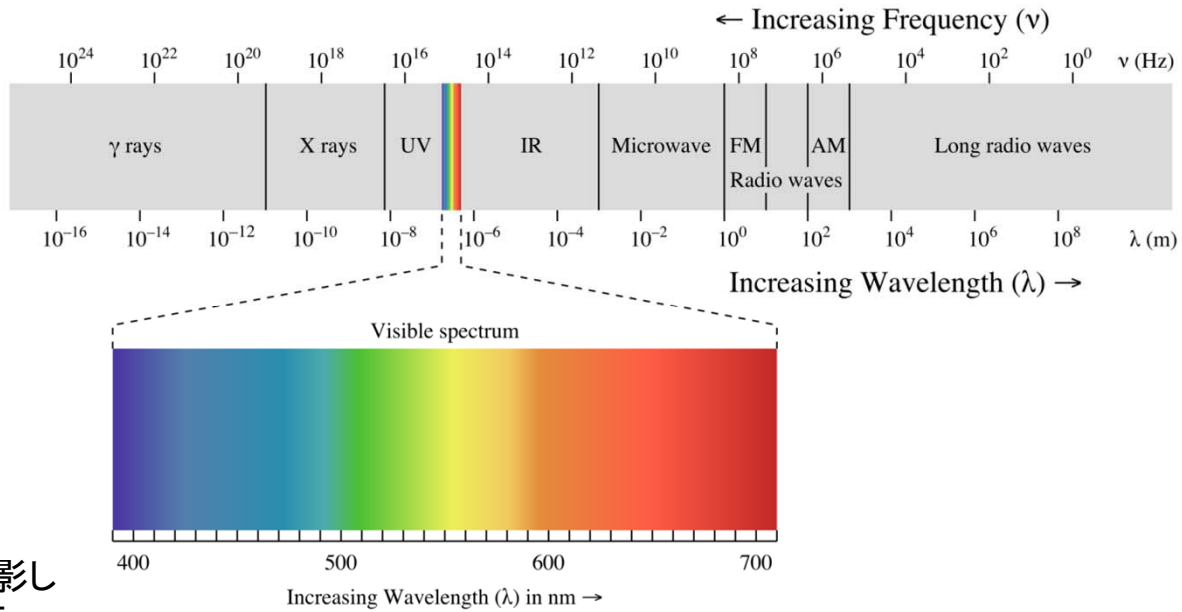
●レントゲン(W.C. Roentgen)によるX線の発見(1895)
●ベクレル(A.H. Becquerel)による放射線の発見(1896)
●トムソン(J.J. Thomson)による電子の発見(1897)

- この発見を機に、素粒子・原子核物理学が現在に至るまで発展してきた。

X線の発見(1895年)

- ヴィルヘルム・コンラート・レントゲン（W.C.Röntgen)が真空管(クルックス管)による陰極線(電子線)の研究中に、物を突き抜ける光線のようなものを発見(特性X線)。未知の光線→X線。
- 1901年、第1回ノーベル物理学賞

(wikipedia) 1896年1月23日にレントゲンが撮影したアルベルト・フォン・ケリカーの手のX線写真



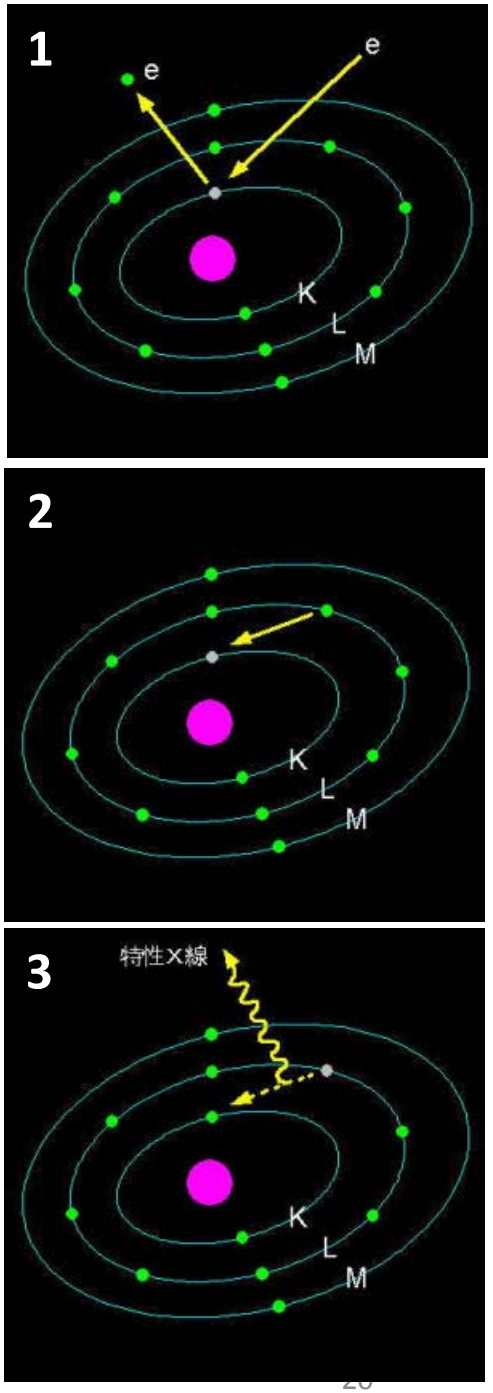
特性X線とは

- ある原子の電子軌道や原子核において、高い電子準位から低い電子準位に遷移する過程で放射されるX線。単一エネルギー、線スペクトルが特徴。
  1. 入射電子のエネルギーが軌道電子の結合エネルギー以上のときに，衝突により軌道電子がはじき出される
  2. 電子が1個はじき出されたことで不安定な状態になると，上の軌道の電子が下の軌道に落ち込み安定状態に戻ろうとする
  3. この際、余分なエネルギーを特性X線などとして放出

(例) 55Feの特性X線 = 5.9keV

<u>電子捕獲</u>(K 殻電子)により55Mnへ変化するときに放出

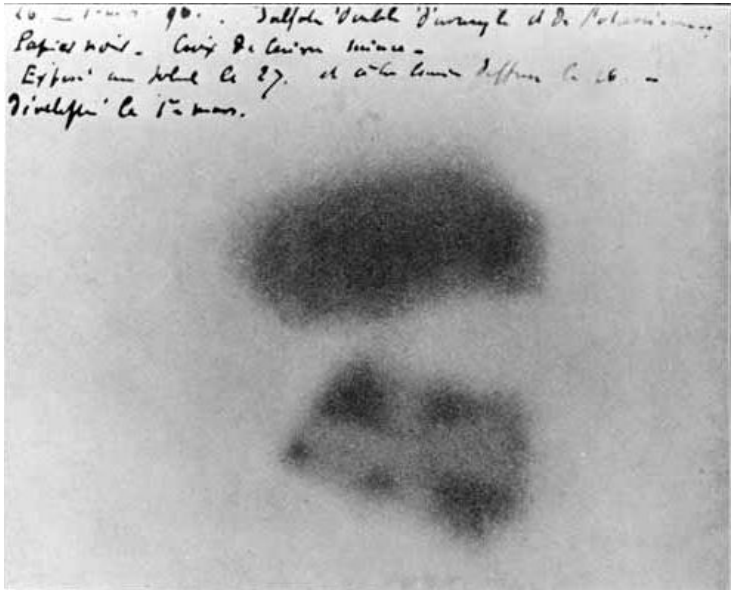
- 特性X線：Kα=5.9keV(L殻→K殻), Kβ=6.5keV(M殻→K殻)
- オージェ電子(自己電離して放出される電子)：5.2keV



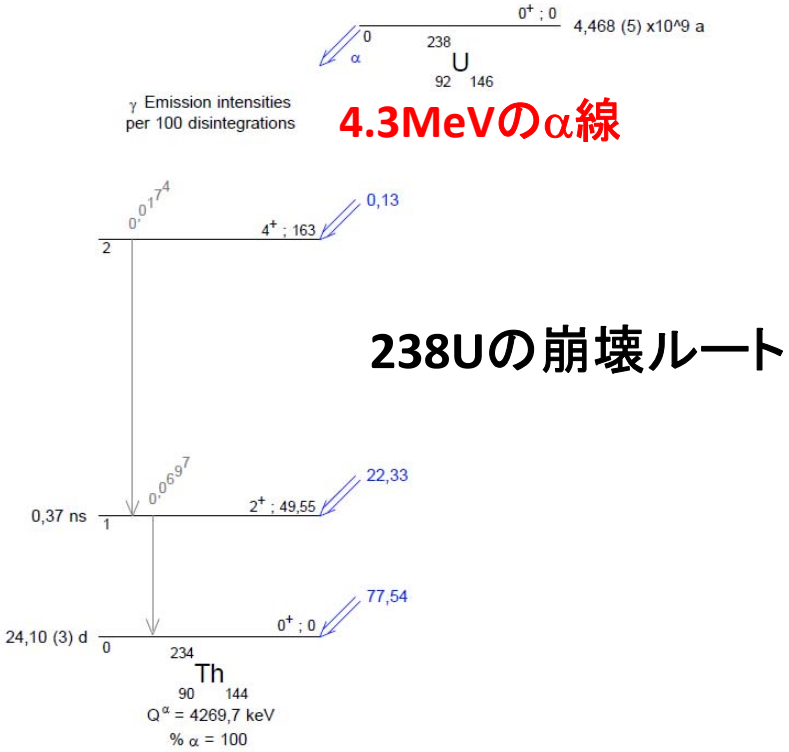
新潟大学機器分析センターより

放射線の発見(1896年)

- アントワーヌ・アンリ・ベクレル（A.H.Becquerel)がウラン塩の蛍光を研究中に、ウラン元素から放出した放射線（α線=^{4}He）が写真乾板を露光させることを発見。
- 1903年、ノーベル物理学賞

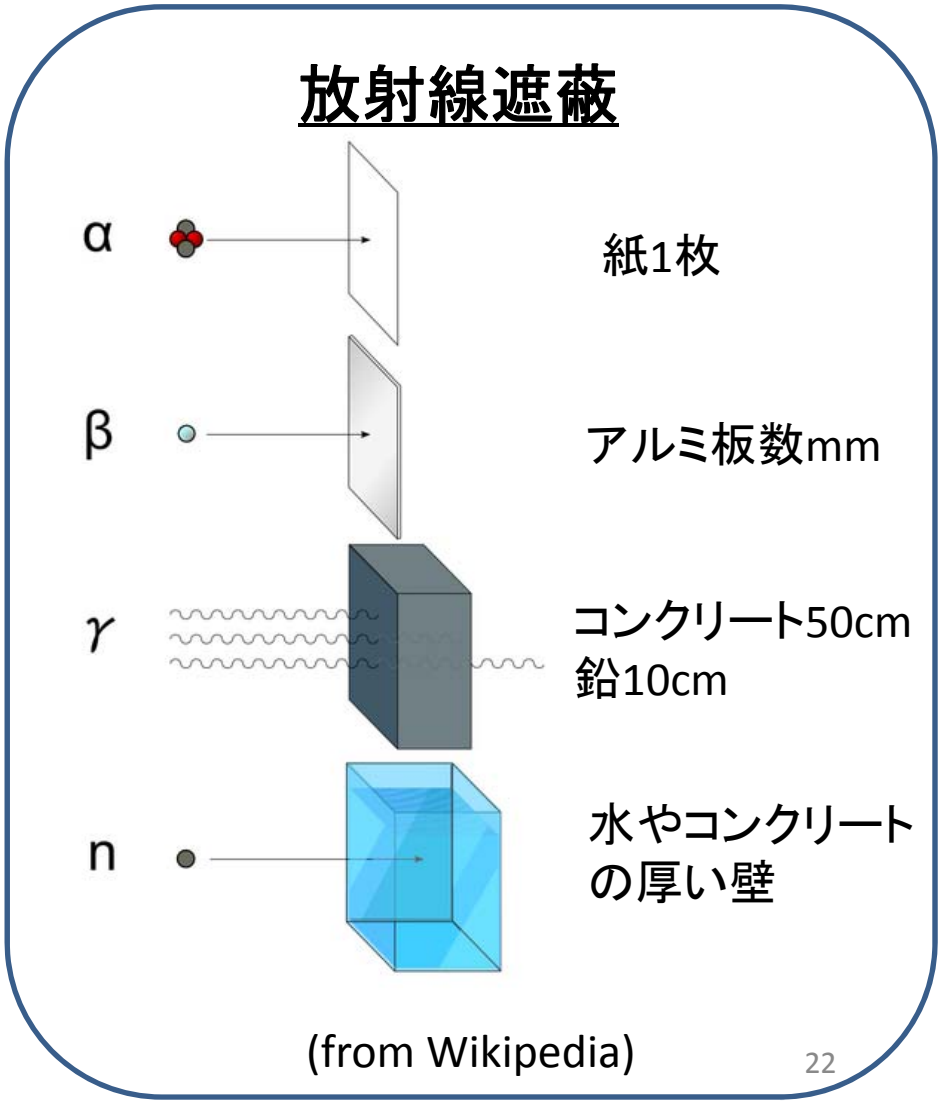


(wikipedia)ベクレルがウラン塩によって偶然感光させてしまった写真乾板



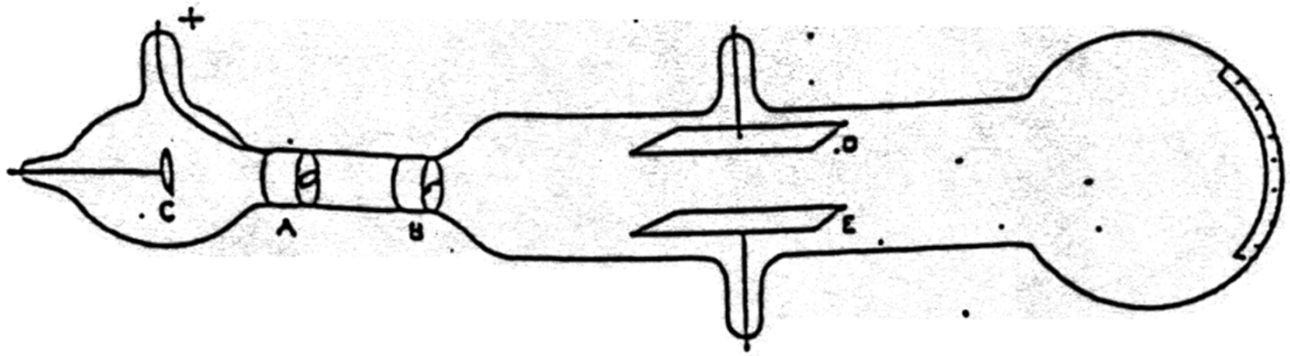
放射線の種類

- α線(^{4}He)、β線(電子)、X線/γ線(電磁波=光)、中性子線(中性子)がある。
- 1989-1900年にポール・ヴィラールとラザフォードによりα/β/γ線と分類



電子の発見(1897年)

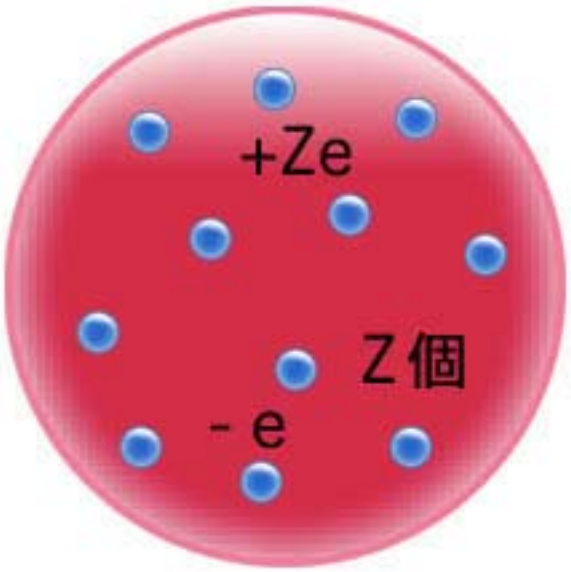
- ジョセフ・ジョン・トムソン(J.J.Thomson)が真空管(クルックス管)と電場/磁場を用いて発見。
  → 原子は分割可能!
- 1906年、ノーベル物理学賞

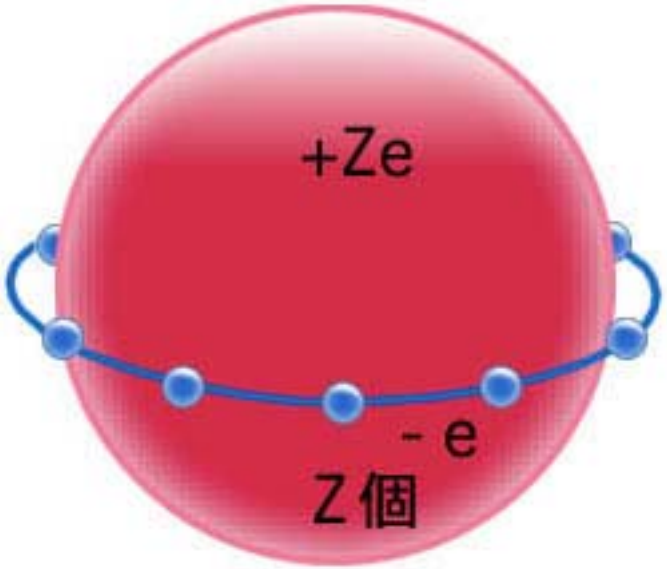


(wikipedia)電場によって陰極線が曲がることを確認したときのクルックス管の（トムソンが描いた）図。陰極線はカソード C から発せられ、アノード A と B を（接地されている）通過し、電場を印加した D と E のプレートの間を抜け、もう一方の端にぶつかる。

1900年頃の原子モデル

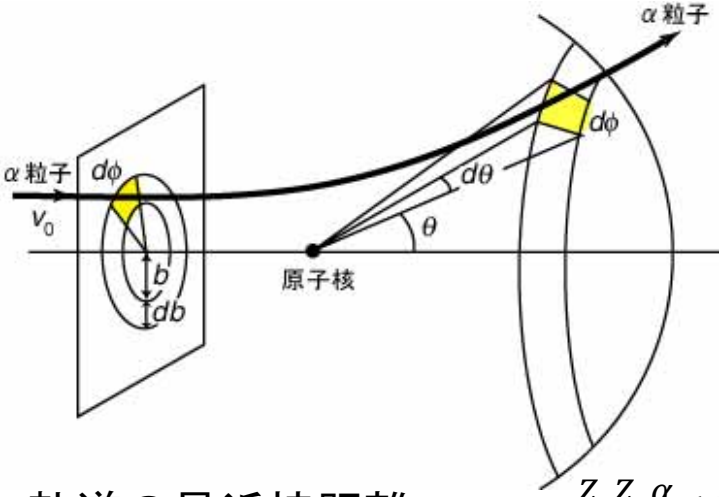
- J.J.トムソン
  - プラムプディングモデル
- 長岡半太郎
  - 土星型モデル



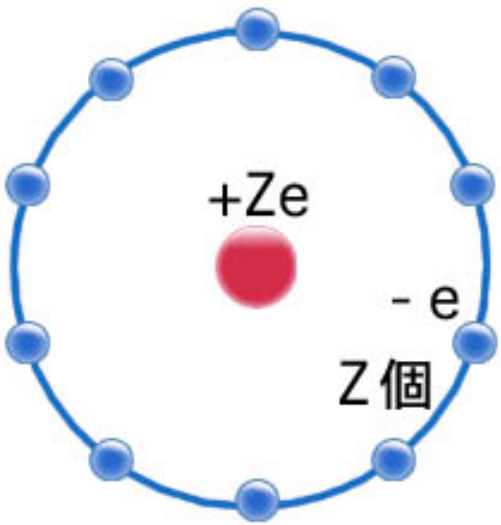


原子核の存在の確認(1911年)

- (先生)アーネスト・ラザフォード(E.Rutherford),(助手)ハンス・ガイガー,(学生)アーネスト・マースデンはラジウムからのα線(^{4}He)と金箔(Au)による散乱パターンを調べることにより、原子の中に正電荷を持った小さな構造体(原子核)があることを発見。



ラザフォードモデル



クーロン軌道の最近接距離: $r_{min} = \frac{Z_\alpha Z_A \alpha}{2E}(1 + \frac{1}{\sin(\theta/2)})$

ラザフォード散乱公式: $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2\alpha^2}{4E^2} sin^{-4}\frac{\theta}{2}$

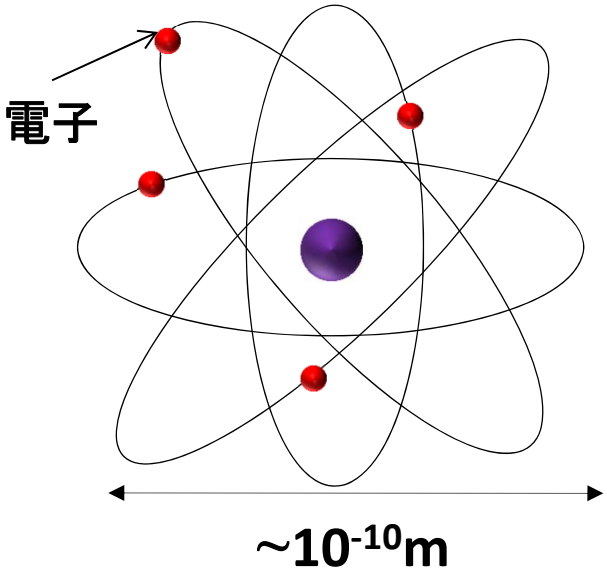
陽子・中性子の発見

- 陽子の発見(1917-1919年)
  - ラザフォードにより、α線を窒素ガスに打ち込むことにより+1の電荷を持った粒子(陽子)を発見。1920に彼により陽子(proton)と名付けられる。

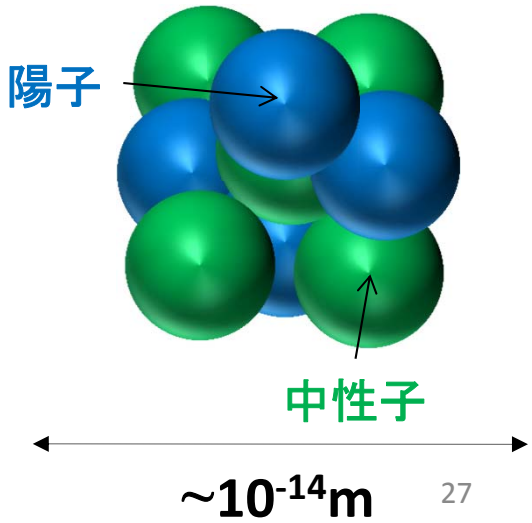
- 中性子の発見(1932年)
  - ジェームズ・チャドウィック(J.Chadwick)が、ポロニウムから発せられるα線を軽い元素(ベリリウム、ホウ素、リチウム等)に当てたときに陽子とほぼ同じ質量を持つ中性粒子(中性子)が放出されることを発見。

現在の原子・原子核モデル

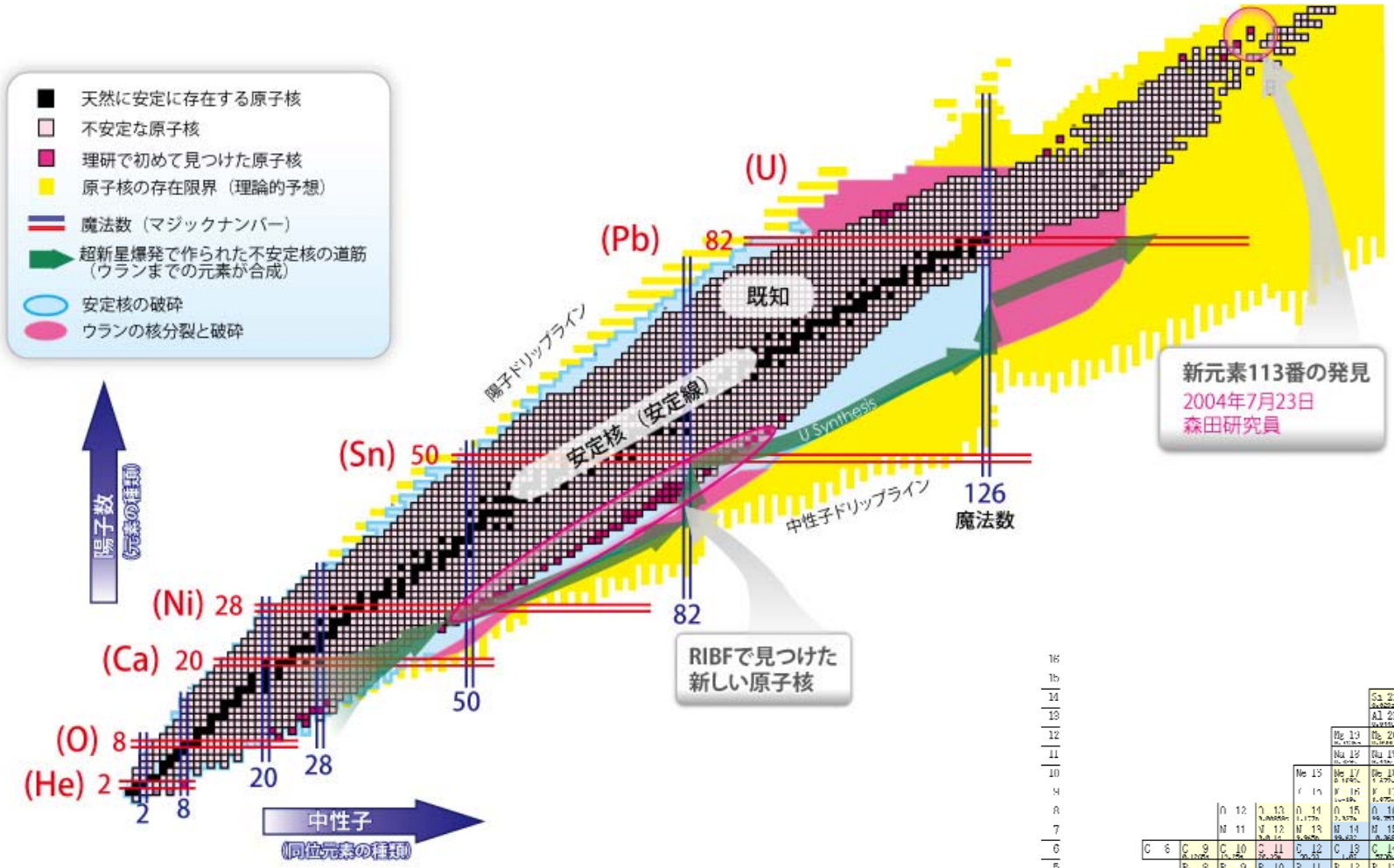
- ボーア・モデル(1913年)
  - ニールス・ボーア(N.Bohr)により、量子条件を原子内の電子に取り入れた原子モデルを提唱。
  - 現在の量子力学の先駆けに。

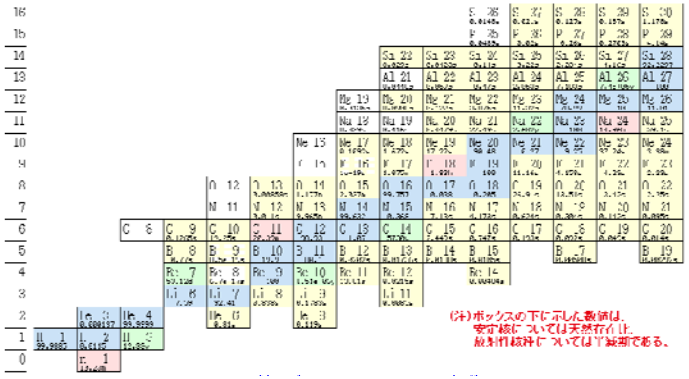


- ハイゼンベルグ・モデル(1932年)
  - ヴェルナー・ハイゼンベルク(W.Heisenberg)によって、原子核は陽子と中性子で構成されるという原子核モデルが提唱される。



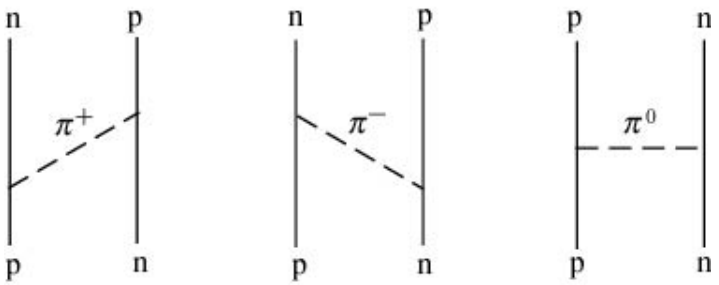
現在分かっている原子核(核図表)





原子核中の陽子と中性子はどうやってくっついているか?

- 原子核を束縛する核力は、1935年に湯川秀樹により、核子間に中間子(π中間子など)を交換することによって生ずる力であると導入された。



核子とπ中間子相互作用

電磁力より強いが、到達距離は短い

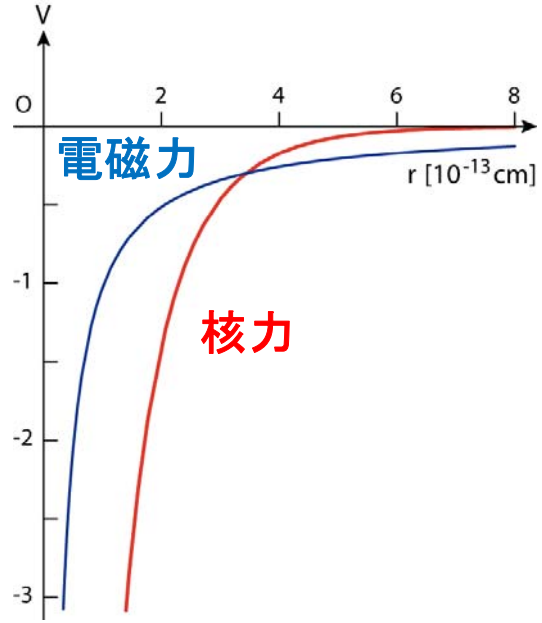
クーロンポテンシャル : $V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r} = \alpha\frac{\hbar c}{r}$

湯川ポテンシャル : $V(r) = \frac{g}{4\pi}\frac{e^{-r/R}}{r}, R = \frac{\hbar}{mc}$

R:力の到達距離

1fm(核子の大きさ)の相互作用を考えると、

$mc^2 = \hbar c/R \sim 100\text{MeV}$ ← 湯川中間子の予言



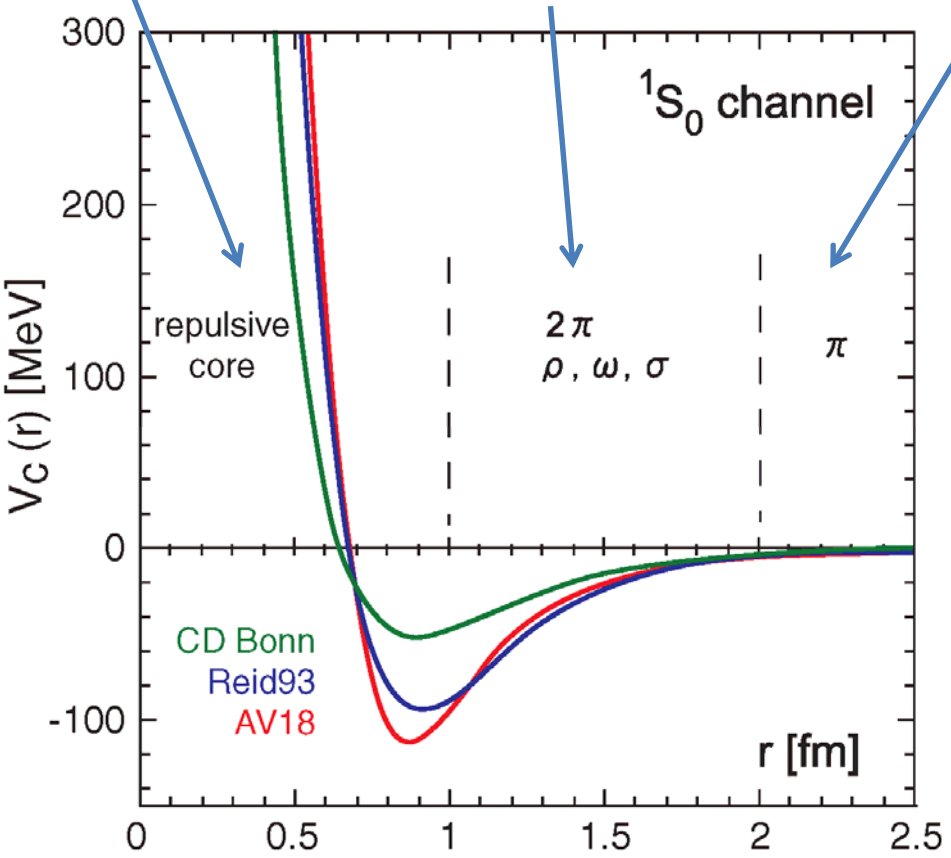
核力の現状

- 様々なエネルギーでの陽子や中性子を用いた散乱実験により、過去半世紀にわたって核力が調べられてきた

短距離
強い斥力
理論的に未解明

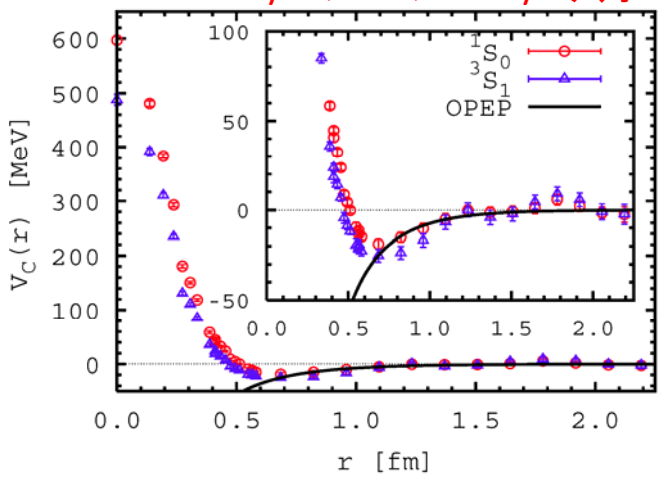
中間距離
引力
2つのp中間子やベクター中間子交換

遠距離
弱い引力
1つのp中間子交換
(湯川ポテンシャル)



スパコンを用いた計算であるLattice QCD (格子QCD)により、核力を再現!

KEK/ブルージーン/4ヶ月



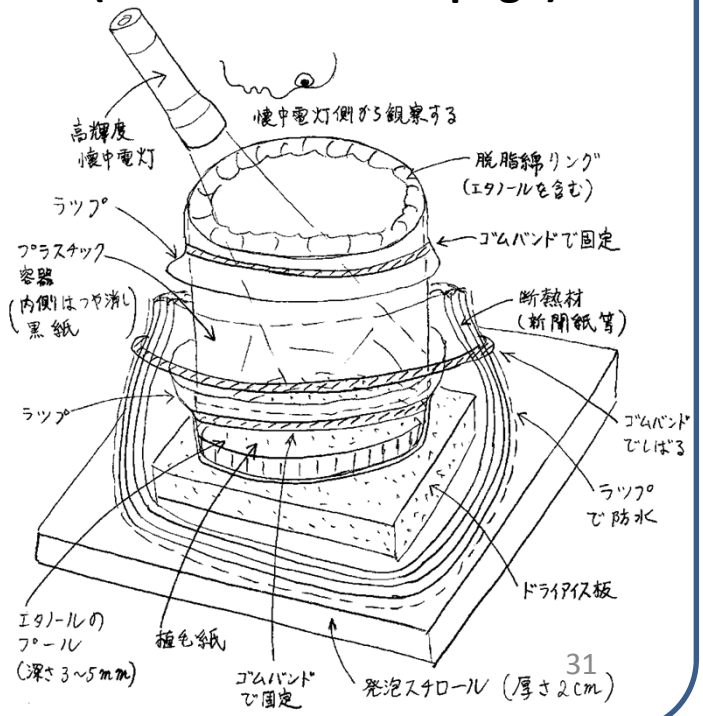
Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007)

μ粒子の発見

- 1937年、アンダーソン(C.D.Anderson)とネッダーマイヤー(S.H.Neddermyer)が霧箱で捕らえた宇宙線の軌跡の中に、質量が約100MeV/c^2の軌跡を見つける。
  - 同時期、理化学研究所の仁科芳雄のグループ（仁科芳雄、竹内柾、一宮虎雄）およびストリート（J.C. Street）とスティヴンソン（E.C. Stevenson）らも独立に観測。
- 質量が電子と陽子の中間であることから中間子(meson)と名付けられた(μ中間子)。
  - 湯川中間子は強い相互作用を担う粒子であるために大きな断面積(~10mb)を持つはずだが、大気を通過した後の地上でたくさん見えるのはおかしい。
  - 後のπ中間子発見に伴い、muonと改名。また、核力による強い相互作用をしない素粒子としてレプトンという名称と概念が導入された(電子もレプトン)。

霧箱

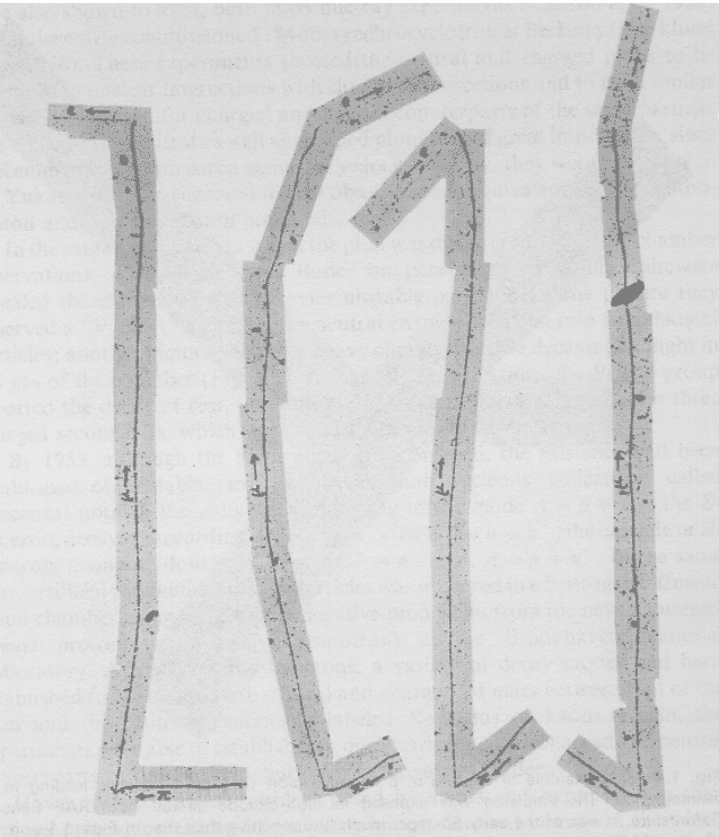
簡単にできる霧箱
(名大・F研・home-page)



π中間子の発見

- 1947年、パウエル(C.F.Powell)達が、写真乾板を設置した観測気球を宇宙線を受ける高度まで上げ、気球を回収後、顕微鏡による検査で電荷を持つ約140MeV/cのパイ中間子を発見。
  - また、μ粒子も観測し、それぞれの崩壊を特定した。

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



Powell, Repts. Prog. Phys. 13, 384 (1950)

<u>(例)陽子加速器でπ中間子を$\mathbf{p} + \mathbf{p} \rightarrow \boldsymbol{p} + \boldsymbol{n} + \boldsymbol{\pi}^+$反応により生成</u>

必要な陽子のエネルギーは、2粒子系の関係式(固定票的)

$$s = (E_1 + m_2)^2 - (\overrightarrow{p_1} + 0)^2 = {m_1}^2 + {m_2}^2 + 2m_2E_1$$

を用いて$s > (m_p + mn + m_{\pi^+})^2 = (2017)^2$となれば良い。

閾値は　E=1230 MeV, T=E-m=292MeV, p=780MeV/c

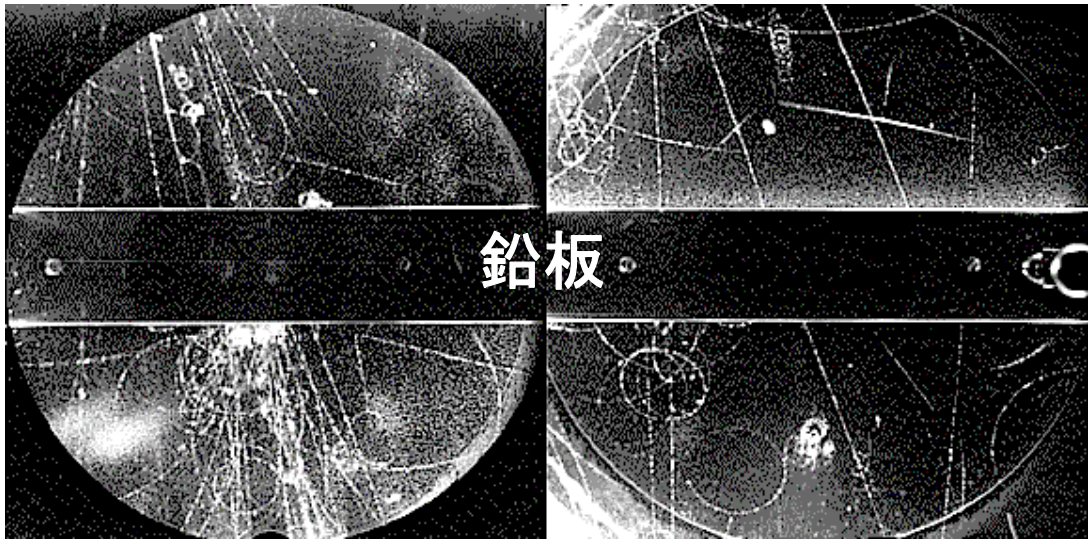
つまり、300MeV以上の陽子加速器でπ中間子は生成可能。

(実際には原子核内でのフェルミ運動により、180MeV程度で生成可能)

ストレンジ粒子の発見

- 1947年、ロチェスター(G.O.Rochester)とバトラー(C.C.Butler)は、磁場のかかった霧箱を用いて宇宙線シャワーを調べているうちに、V字型の軌跡を残す”奇妙な”2種類の反応を観測した。
  - 崩壊時間が10^{-10}~10^{-8}秒と弱い相互作用による崩壊 (強い相互作用では崩壊時間は10^{-24}~10^{-22}秒程度)
  - 霧箱で頻繁に作られるほど反応が強く、強い相互作用で反応
- 後に、下記のストレンジネス粒子(sクォークを含む)であることが判明:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$



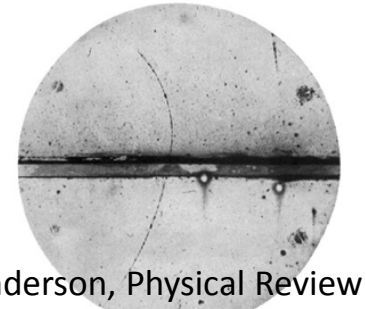
G.D.Rochester and C.C.Butler, Nature 106, 885 (1947)

反粒子発見

- 反粒子とは:
  - ディラック方程式からの要請/予言(負のエネルギー粒子の存在)。
  - ある粒子に対して、質量とスピンが等しく、電荷など正負の属性が逆の粒子
  - 数学的には粒子が時間軸を過去に向かって進んでいるものとして取り扱う

● **陽電子**

1932年、アンダーソン(C.D.Anderson)が霧箱を用いて宇宙線の軌跡の中から発見。



Anderson, Physical Review Vol.43, p491 (1933)

● **反陽子**

1955年、セグレ(E.G.Segre)とチェンバレン(O.Chamberlain)達により、ローレンス・バークレー国立研究所の加速器ベバトロンを用いた実験により発見。

$$6.2GeV\ p + A \rightarrow \bar{p} + X$$

● **反中性子**

1956年、ブルース・コーク(Bruce Cork)達により、ローレンス・バークレー国立研究所の加速器ベバトロンを用いた実験により発見。

$$6.2GeV\ p + A \rightarrow \bar{n} + X$$

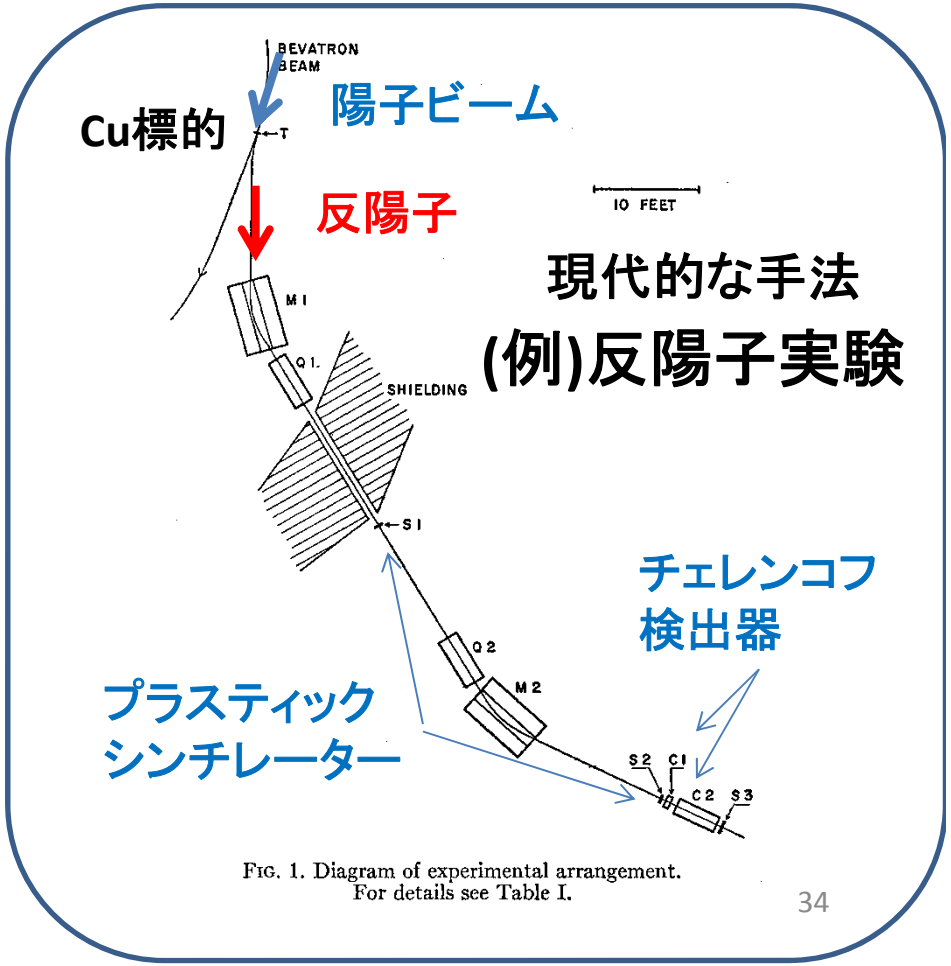
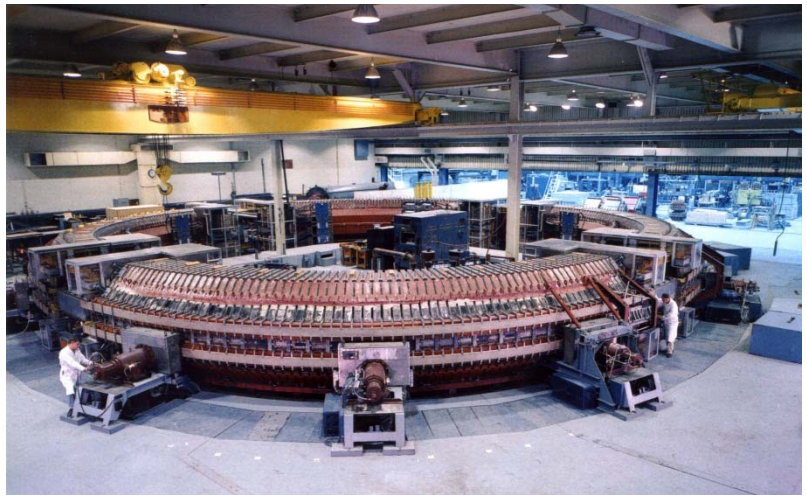


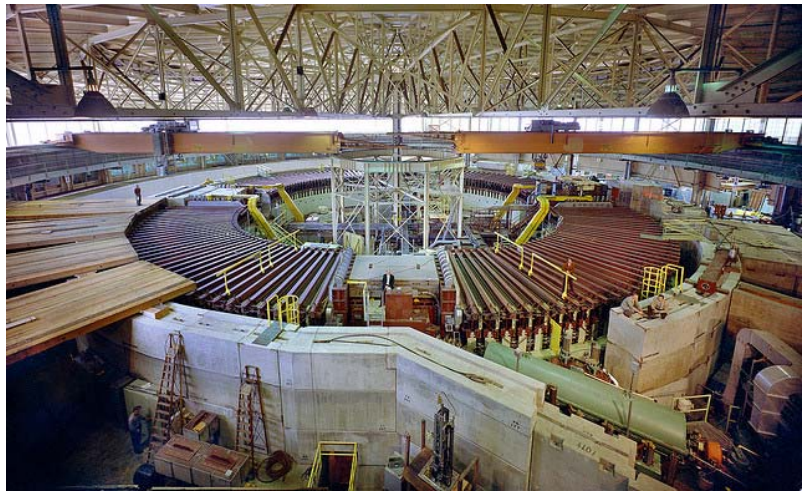
FIG. 1. Diagram of experimental arrangement. For details see Table I.

加速器を用いた
高エネルギー物理学の幕開け

- 1940年代までは宇宙線を用いた実験のみ。
- 1950年代から、加速器(シンクロトロン)を用いた高エネルギー物理学実験(>GeV)に取って変わられる。



Cosmotron@BNL (1953~66)
3.3GeV 陽子シンクロトロン



Bevatron@LBNL (1954~93)
6.2GeV 陽子シンクロトロン
→Bevalac (1971~93)
2.1GeV/neucleon 重イオン加速器

現在分かっているハドロン

--- 増えすぎた”素粒子” ---

バリオン

p	P_{11}	****
n	P_{11}	****
$N(1440)$	P_{11}	****
$N(1520)$	D_{13}	****
$N(1535)$	S_{11}	****
$N(1650)$	S_{11}	****
$N(1675)$	D_{15}	****
$N(1680)$	F_{15}	****
$N(1700)$	D_{13}	***
$N(1710)$	P_{11}	***
$N(1720)$	P_{13}	****
$N(1900)$	P_{13}	**
$N(1990)$	F_{17}	**
$N(2000)$	F_{15}	**
$N(2080)$	D_{13}	**
$N(2090)$	S_{11}	*
$N(2100)$	P_{11}	*
$N(2190)$	G_{17}	****
$N(2200)$	D_{15}	**
$N(2220)$	H_{19}	****
$N(2250)$	G_{19}	****
$N(2600)$	$I_{1,11}$	***
$N(2700)$	$K_{1,13}$	**

$\Delta(1232)$	P_{33}	****
$\Delta(1600)$	P_{33}	***
$\Delta(1620)$	S_{31}	****
$\Delta(1700)$	D_{33}	****
$\Delta(1750)$	P_{31}	*
$\Delta(1900)$	S_{31}	**
$\Delta(1905)$	F_{35}	****
$\Delta(1910)$	P_{31}	****
$\Delta(1920)$	P_{33}	***
$\Delta(1930)$	D_{35}	***
$\Delta(1940)$	D_{33}	*
$\Delta(1950)$	F_{37}	****
$\Delta(2000)$	F_{35}	**
$\Delta(2150)$	S_{31}	*
$\Delta(2200)$	G_{37}	*
$\Delta(2300)$	H_{39}	**
$\Delta(2350)$	D_{35}	*
$\Delta(2390)$	F_{37}	*
$\Delta(2400)$	G_{39}	**
$\Delta(2420)$	$H_{3,11}$	****
$\Delta(2750)$	$I_{3,13}$	**
$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$	**

Λ	P_{01}	****
$\Lambda(1405)$	S_{01}	****
$\Lambda(1520)$	D_{03}	****
$\Lambda(1600)$	P_{01}	***
$\Lambda(1670)$	S_{01}	****
$\Lambda(1690)$	D_{03}	****
$\Lambda(1800)$	S_{01}	***
$\Lambda(1810)$	P_{01}	***
$\Lambda(1820)$	F_{05}	****
$\Lambda(1830)$	D_{05}	****
$\Lambda(1890)$	P_{03}	****
$\Lambda(2000)$		*
$\Lambda(2020)$	F_{07}	*
$\Lambda(2100)$	G_{07}	****
$\Lambda(2110)$	F_{05}	***
$\Lambda(2325)$	D_{03}	*
$\Lambda(2350)$	H_{09}	***
$\Lambda(2585)$		**

Σ^+	P_{11}	****
Σ^0	P_{11}	****
Σ^-	P_{11}	****
$\Sigma(1385)$	P_{13}	****
$\Sigma(1480)$		*
$\Sigma(1560)$		**
$\Sigma(1580)$	D_{13}	*
$\Sigma(1620)$	S_{11}	**
$\Sigma(1660)$	P_{11}	***
$\Sigma(1670)$	D_{13}	****
$\Sigma(1690)$		**
$\Sigma(1750)$	S_{11}	***
$\Sigma(1770)$	P_{11}	*
$\Sigma(1775)$	D_{15}	****
$\Sigma(1840)$	P_{13}	*
$\Sigma(1880)$	P_{11}	**
$\Sigma(1915)$	F_{15}	****
$\Sigma(1940)$	D_{13}	***
$\Sigma(2000)$	S_{11}	*
$\Sigma(2030)$	F_{17}	****
$\Sigma(2070)$	F_{15}	*
$\Sigma(2080)$	P_{13}	**
$\Sigma(2100)$	G_{17}	*
$\Sigma(2250)$		***
$\Sigma(2455)$		**
$\Sigma(2620)$		**
$\Sigma(3000)$		*
$\Sigma(3170)$		*

Ξ^0	P_{11}	****
Ξ^-	P_{11}	****
$\Xi(1530)$	P_{13}	****
$\Xi(1620)$		*
$\Xi(1690)$		***
$\Xi(1820)$	D_{13}	***
$\Xi(1950)$		***
$\Xi(2030)$		***
$\Xi(2120)$		*
$\Xi(2250)$		**
$\Xi(2370)$		**
$\Xi(2500)$		*
Ω^-		****
$\Omega(2250)^-$		***
$\Omega(2380)^-$		**
$\Omega(2470)^-$		**

Λ_c^+	****
$\Lambda_c(2595)^+$	***
$\Lambda_c(2625)^+$	***
$\Lambda_c(2765)^+$	*
$\Lambda_c(2880)^+$	***
$\Lambda_c(2940)^+$	***
$\Sigma_c(2455)$	****
$\Sigma_c(2520)$	***
$\Sigma_c(2800)$	***
Ξ_c^+	***
Ξ_c^0	***
$\Xi_c^{\prime +}$	***
$\Xi_c^{\prime 0}$	***
$\Xi_c(2645)$	***
$\Xi_c(2790)$	***
$\Xi_c(2815)$	***
$\Xi_c(2930)$	*
$\Xi_c(2980)$	***
$\Xi_c(3055)$	**
$\Xi_c(3080)$	***
$\Xi_c(3123)$	*
Ω_c^0	***
$\Omega_c(2770)^0$	***
Ξ_{cc}^+	*
Λ_b^0	***
Σ_b	***
Σ_b^*	***
Ξ_b^0, Ξ_b^-	***
Ω_b^-	***

Particle Data Group (PDG)
http://pdg.lbl.gov/

メソン

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)

	$I^G(J^{PC})$
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$
• π^0	$1^-(0^{-+})$
• η	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(600)$	$0^+(0^{++})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^{++})$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^{-+})$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$
$h_1(1380)$	$?^-(1^{+-})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$
• $f_2'(1525)$	$0^+(2^{++})$
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$
$h_1(1595)$	$0^-(1^{+-})$
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^{-+})$
$a_1(1640)$	$1^-(1^{++})$
$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_2(1645)$	$0^+(2^{-+})$
• $\omega(1650)$	$0^-(1^{--})$
• $\omega_3(1670)$	$0^-(3^{--})$

	$I^G(J^{PC})$
• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^{-+})$
• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$
• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$
• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$
$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$
$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$
• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$
$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$
$X(1835)$	$?^?(?^{-+})$
• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$
$\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$
• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^{-+})$
$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$
$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$
• $f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$
$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{--})$
• $f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$
$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$
• $a_4(2040)$	$1^-(4^{++})$
• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$
$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$
$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(2150)$	$1^+(1^{--})$
• $\phi(2170)$	$0^-(1^{--})$
$f_0(2200)$	$0^+(2^{++}$ or $4^{++})$
$\eta(2225)$	$0^+(0^{-+})$
$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{--})$
• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$
• $f_2(2340)$	$0^+(2^{++})$
$\rho_5(2350)$	$1^+(5^{--})$
$a_6(2450)$	$1^-(6^{++})$
$f_6(2510)$	$0^+(6^{++})$

OTHER LIGHT

Further States

STRANGE ($S = \pm1$, $C = B = 0$)

	$I(J^P)$
• $K^\pm$	$1/2(0^-)$
• K^0	$1/2(0^-)$
• K^0_S	$1/2(0^-)$
• K^0_L	$1/2(0^-)$
$K^*_0(800)$	$1/2(0^+)$
• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$
• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
• $K^*_0(1430)$	$1/2(0^+)$
• $K^*_2(1430)$	$1/2(2^+)$
$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$
$K(1630)$	$1/2(?^?)$
$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1680)$	$1/2(1^-)$
• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$
• $K^*_3(1780)$	$1/2(3^-)$
• $K_2(1820)$	$1/2(2^-)$
$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$K^*_0(1950)$	$1/2(0^+)$
$K^*_2(1980)$	$1/2(2^+)$
• $K^*_4(2045)$	$1/2(4^+)$
$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$
$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$
$K^*_5(2380)$	$1/2(5^-)$
$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$K(3100)$	$?^?(?^{??})$

CHARMED ($C = \pm1$)

	$I(J^P)$
• $D^\pm$	$1/2(0^-)$
• D^0	$1/2(0^-)$
• $D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$
• $D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$
• $D^*_0(2400)^0$	$1/2(0^+)$
$D^*_0(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$
• $D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$
$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$
• $D^*_2(2460)^0$	$1/2(2^+)$
• $D^*_2(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$
$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$

CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)

	$I(J^P)$
• $D^\pm_s$	$0(0^-)$
• $D^{*\pm}_s$	$0(?^?)$
• $D^*_{s0}(2317)^\pm$	$0(0^+)$
• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s2}(2573)$	$0(?^?)$
$D^*_{s1}(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$D^*_{sJ}(2860)^\pm$	$0(?^?)$
$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(?^?)$

BOTTOM ($B = \pm1$)

	$I(J^P)$
• $B^\pm$	$1/2(0^-)$
• B^0	$1/2(0^-)$
• $B^\pm/B^0$ ADMIXTURE	
• $B^\pm/B^0/B^0_s/b$-baryon ADMIXTURE	
V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements	
• B^*	$1/2(1^-)$
$B^*_J(5732)$	$?(?^?)$
• $B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$
• $B^*_2(5747)^0$	$1/2(2^+)$

BOTTOM, STRANGE ($B = \pm1$, $S = \mp1$)

	$I(J^P)$
• B^0_s	$0(0^-)$
• B^*_s	$0(1^-)$
• $B_{s1}(5830)^0$	$1/2(1^+)$
• $B^*_{s2}(5840)^0$	$1/2(2^+)$
$B^*_{sJ}(5850)$	$?(?^?)$

BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm1$)

	$I(J^P)$
• $B^\pm_c$	$0(0^-)$

$c\bar{c}$

	$I^G(J^{PC})$
• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_c(1P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
• $X(3872)$	$0^?(?^{?+})$
$\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
$X(3940)$	$?^?(?^{??})$
$X(3945)$	$0^+(?^{?+})$
• $\psi(4040)$	$0^-(1^{--})$
$X(4050)^\pm$	$?(?^?)$
$X(4140)$	$0^+(?^{?+})$
• $\psi(4160)$	$0^-(1^{--})$
$X(4160)$	$?^?(?^{??})$
$X(4250)^\pm$	$?(?^?)$
• $X(4260)$	$?^?(1^{--})$
$X(4350)$	$0^+(?^{?+})$
$X(4360)$	$?^?(1^{--})$
• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$
$X(4430)^\pm$	$?(?^?)$
$X(4660)$	$?^?(1^{--})$

$b\bar{b}$

$\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
$\Upsilon(1D)$	$0^-(2^{--})$
• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$

NON-$q\bar{q}$ CANDIDATES

NON-$q\bar{q}$ CANDIDATES

よく使う内部量子数について

π^0

$I^G(J^{PC}) = 1^-(0^{-+})$

Mass $m = 134.9766 \pm 0.0006$ MeV (S = 1.1)
$m_{\pi^\pm} - m_{\pi^0} = 4.5936 \pm 0.0005$ MeV
Mean life $\tau = (8.52 \pm 0.18) \times 10^{-17}$ s (S = 1.2)
$c\tau = 25.5$ nm

- I : アイソスピン　陽子と中性子の対称性を説明するためにハイゼンベルグが導入
- G: Gパリティー　荷電共役とアイソスピンを組み合わせて定義
- J: 全角運動量　空間の回転、のようなもの
- P: パリティー　空間の反転
- C: 荷電共役　粒子・反粒子の入れ替え

全角運動量(J)、パリティー(P)、荷電共役(C)

- J: スピンと軌道角運動量の和, J=L+S
  - 全てにおいて保存
  - |L – S| ≤ J ≤ L + S
  - (例) 電子のスピンは1/2

- P: 空間座標を全て反転

  (例) x → -x
  - 強い相互作用と電磁相互作用で保存
  - 弱い相互作用で破れている

- C: 粒子を反粒子に変換

  (例) $\pi^{+}(u\bar{d}) \rightarrow \pi^{-}(\bar{u}d)$
  - 強い相互作用と電磁相互作用で保存
  - 弱い相互作用で破れている

中間子($q\bar{q}$):
$P = -(-1)^{L}$
中性中間子($q\bar{q}$):
$C = (-1)^{L+S}$

バリオンは
$P = (-1)^{L}$

L	S	J	J^{PC}
0	0	0	0^{-+}
0	1	1	1^{--}
1	0	1	1^{+-}
		0	0^{++}
1	1	1	1^{++}
		2	2^{++}

1-+, 0--, 2+-等はエギゾチック

アイソスピン(I)

- 強い相互作用で保存する内部量子数
  - 弱い相互作用、電磁相互作用では保存しない
- 質量がほぼ同じで、強い相互作用の大きさが同一、電磁相互作用のみ異なる

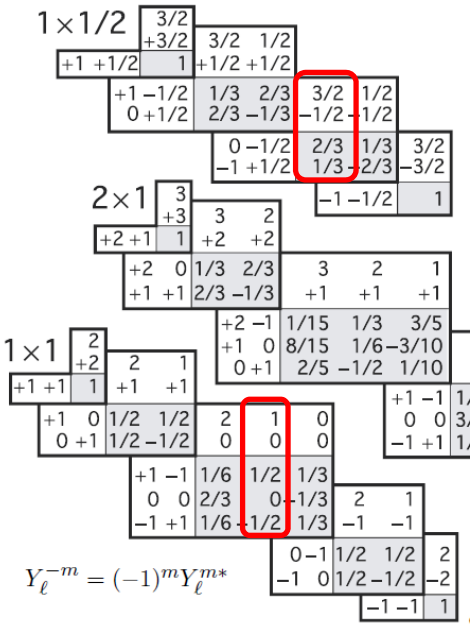
p (938.27), I_3=+1/2
n (939.57), I_3=-1/2

π^+ (139.567), I_3=+1
π^0 (134.963), I_3=0
π^- (139.567), I_3=-1

- (例) ρ中間子($I^G(J^{PC})=1^+(1^{--})$)の(強い相互作用による)崩壊ではアイソスピンが保存し、Clebsch-Gordan 係数より

$\rho^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ 許されない
$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 許される

- その他の例
  π^-+p → π^0+n / π^-+p
  の終状態の確率は2:1



Gパリティー(G)

- C変換とアイソスピンの向きの反転 を同時に行う変換
  - 強い相互作用で保存
  - 弱い相互作用、電磁相互作用では保存しない
  - S/C/B(/T)量子数を持たない中間子のみ
    - $G = (-1)^{I+L+S}$

- (例) ρ/ω中間子の崩壊
  - π:−, ρ:+, ω:−より、(強い相互作用では)

    $\rho \rightarrow 2\pi$, $\omega \rightarrow 3\pi$と崩壊

SU(3)とクォークモデルを用いたハドロン分類

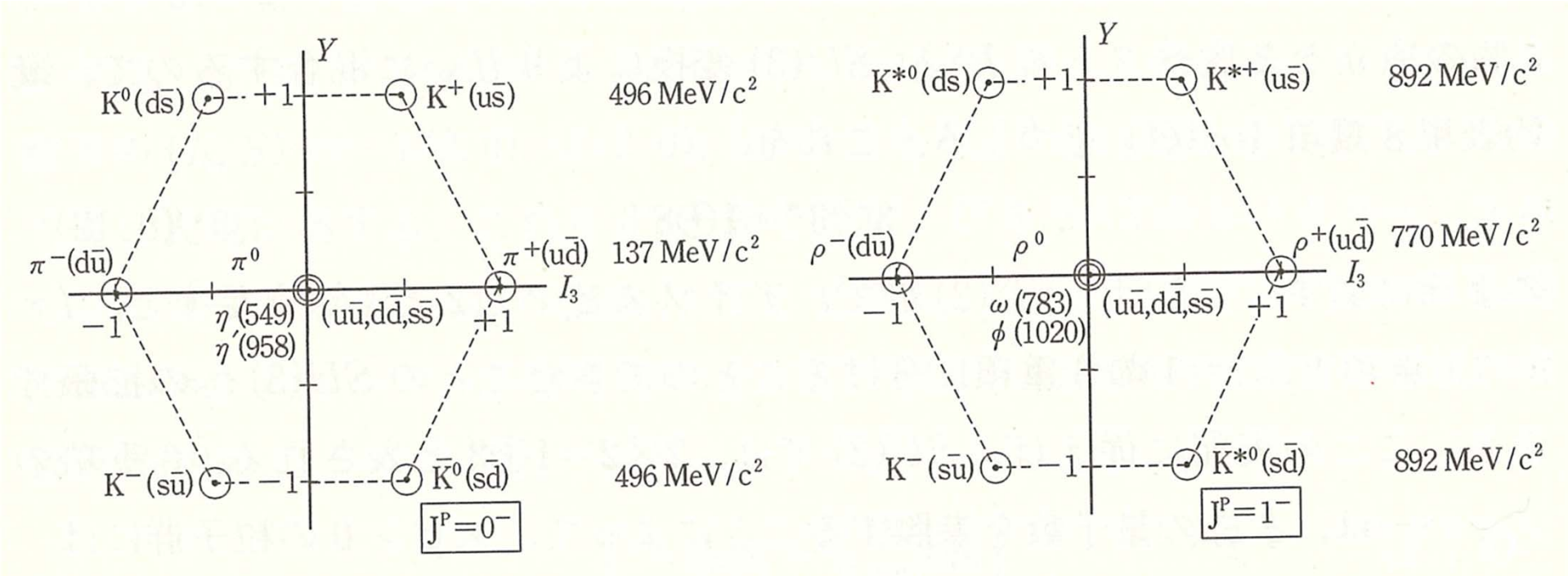
実際には次に述べるΩ粒子発見に刺激されてクォークモデルが提唱された

- 3次の特殊ユニタリ群SU(3)を用いてハドロンは分類できる!
  - 歴史的にはp,n,Λの質量がほぼ等しい事から、これらをSU(3)の基底ベクトルとして導入(坂田モデル)
- ハイパーチャージY:

  Y=B+S (B:バリオン数、S:ストレンジネス)
- 西島-ゲルマンの法則(1955年):

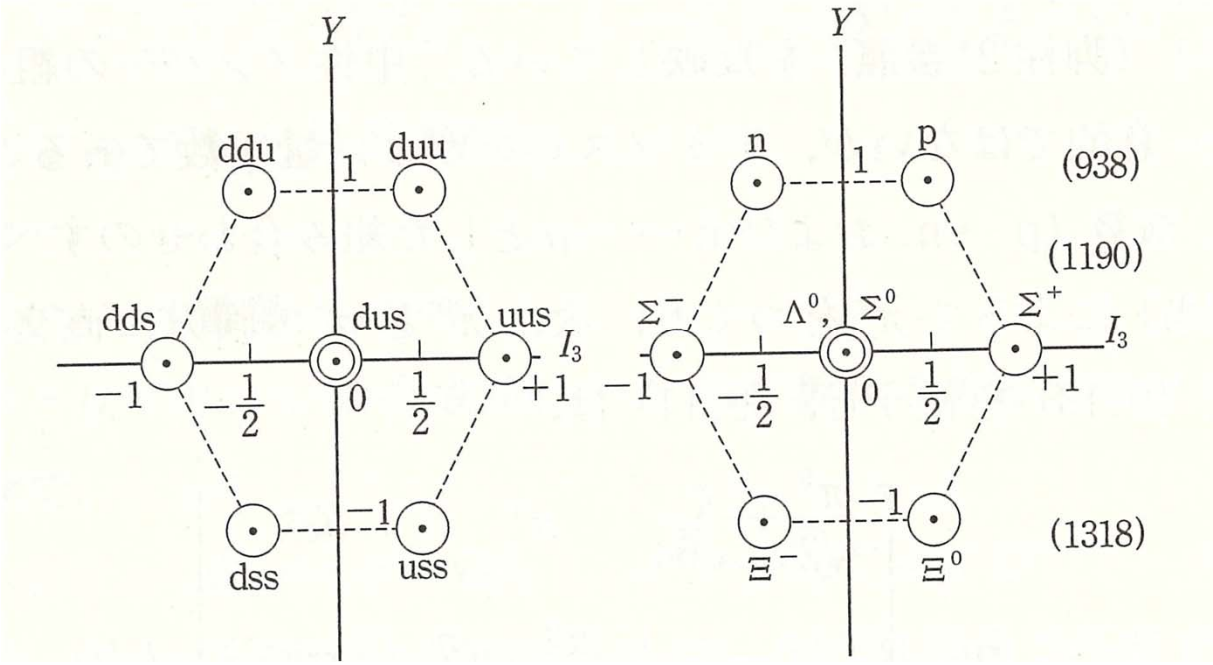
  $Q=I_3+Y/2$ (Q:電荷、I_3:アイソスピン第2成分)

メソン8重項(octet)

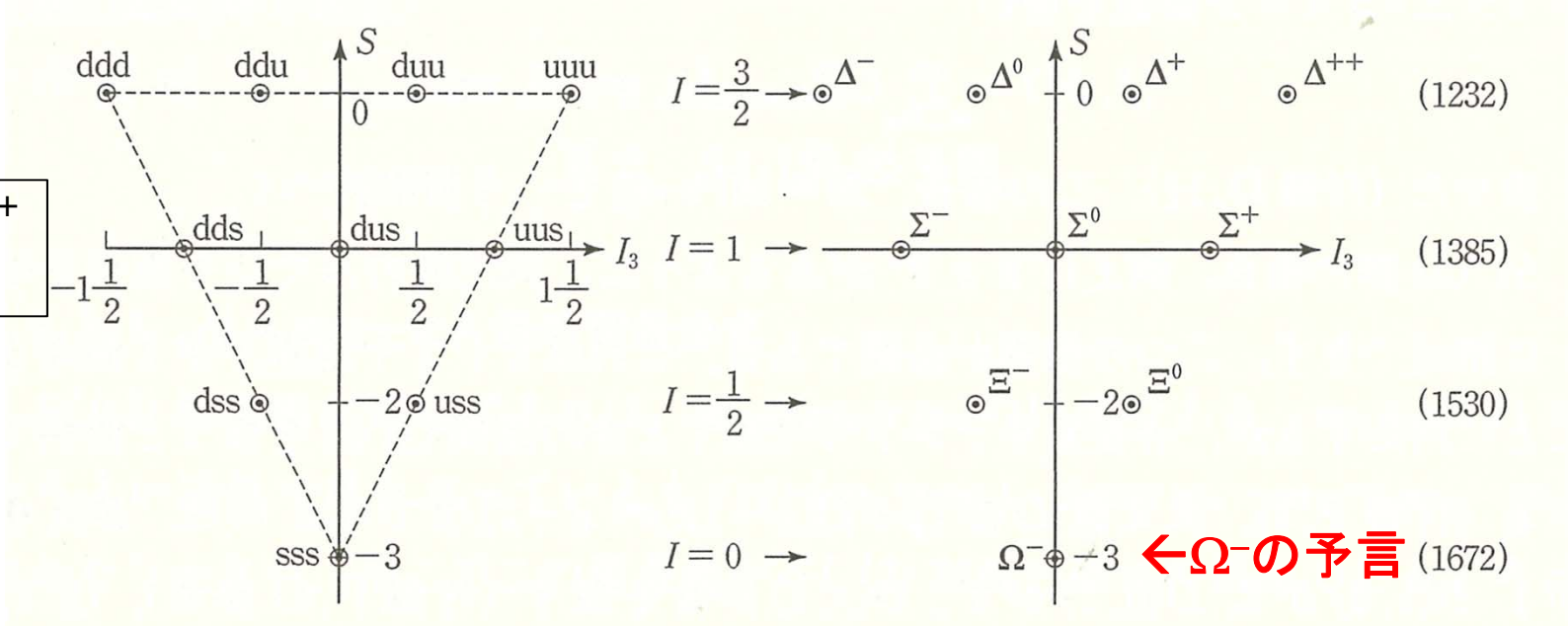


バリオン8重項(octet)、10重項(decuplet)

$$J^P = \frac{1}{2}^+$$



$$J^P = \frac{3}{2}^+$$

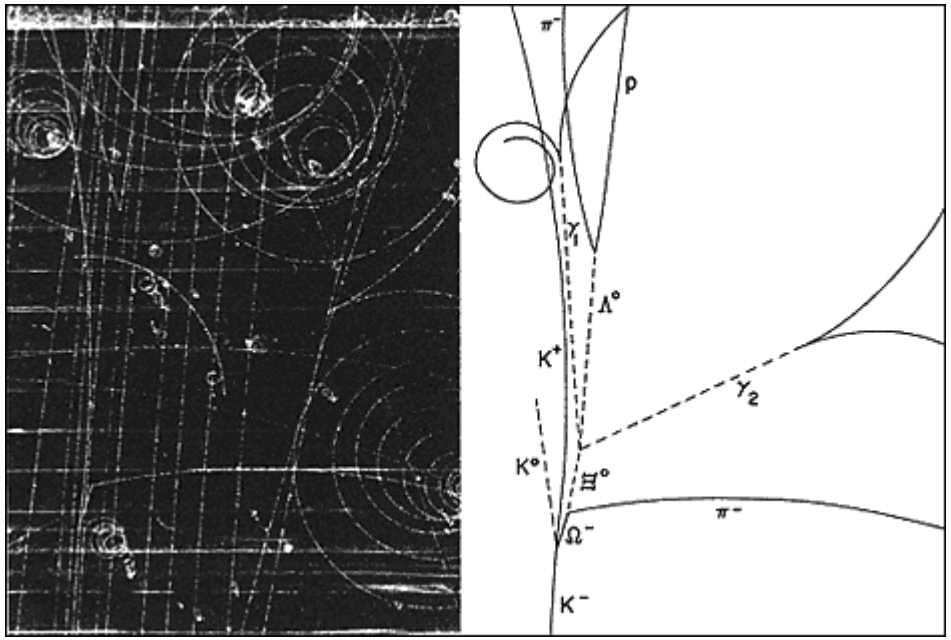


←Ω^-の予言

Ω^-粒子の予言と発見
--- SU(3)の勝利 ---

- 1964年、BNLの80インチ泡箱(bubble-chamber)で得た約10万枚の写真の中から発見。

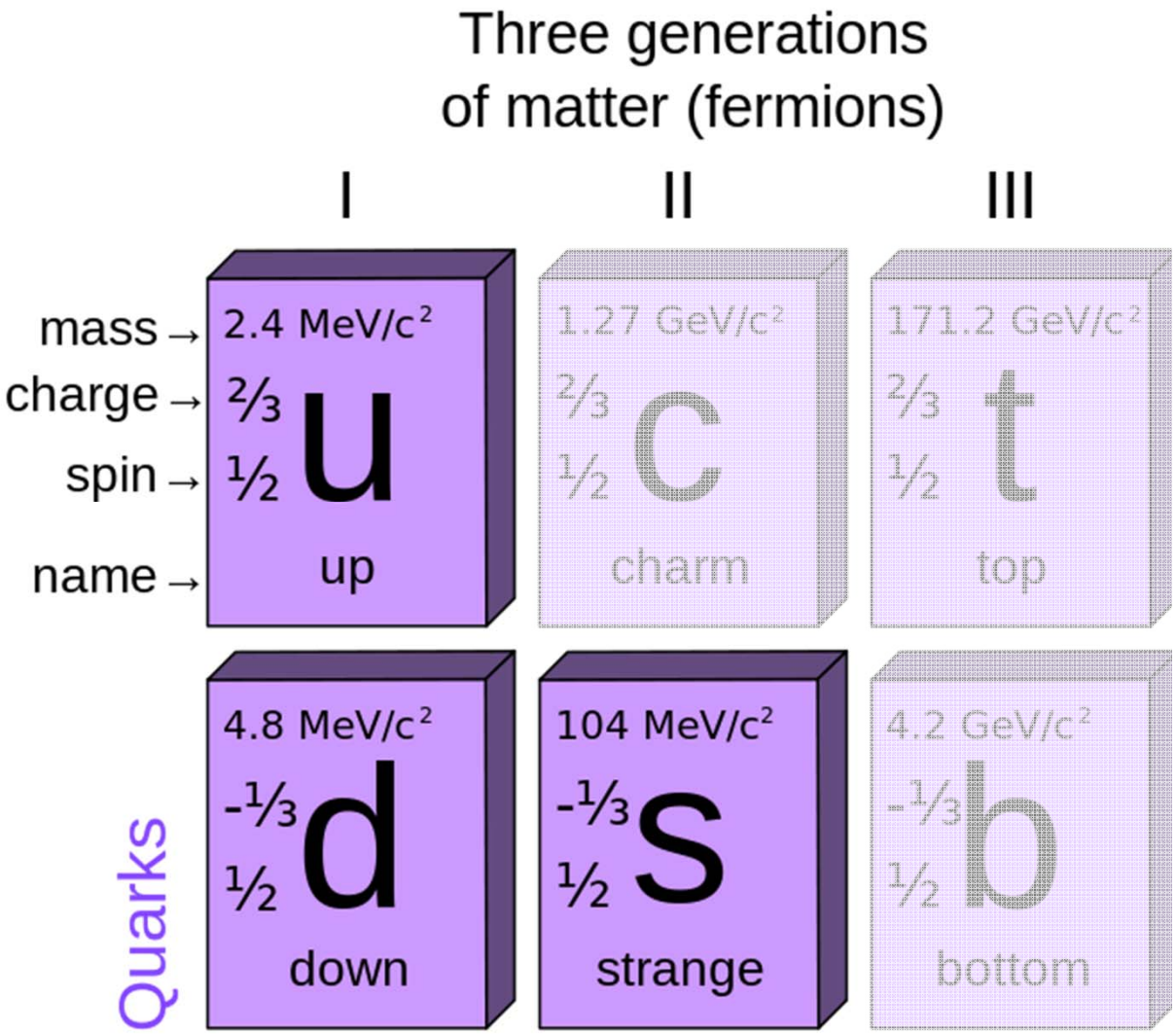
The 80-inch Bubble Chamber



SU(3)による粒子分類は正しい事が分かった

1964年、ゲルマン(M.Gell-Mann)、ツヴァイク(G.Zweig)による
クォークモデルの提唱
[3種のクォーク(u,d,s)を基底とした$SU(3)_{flavor}$による粒子分別]

軽いクォーク

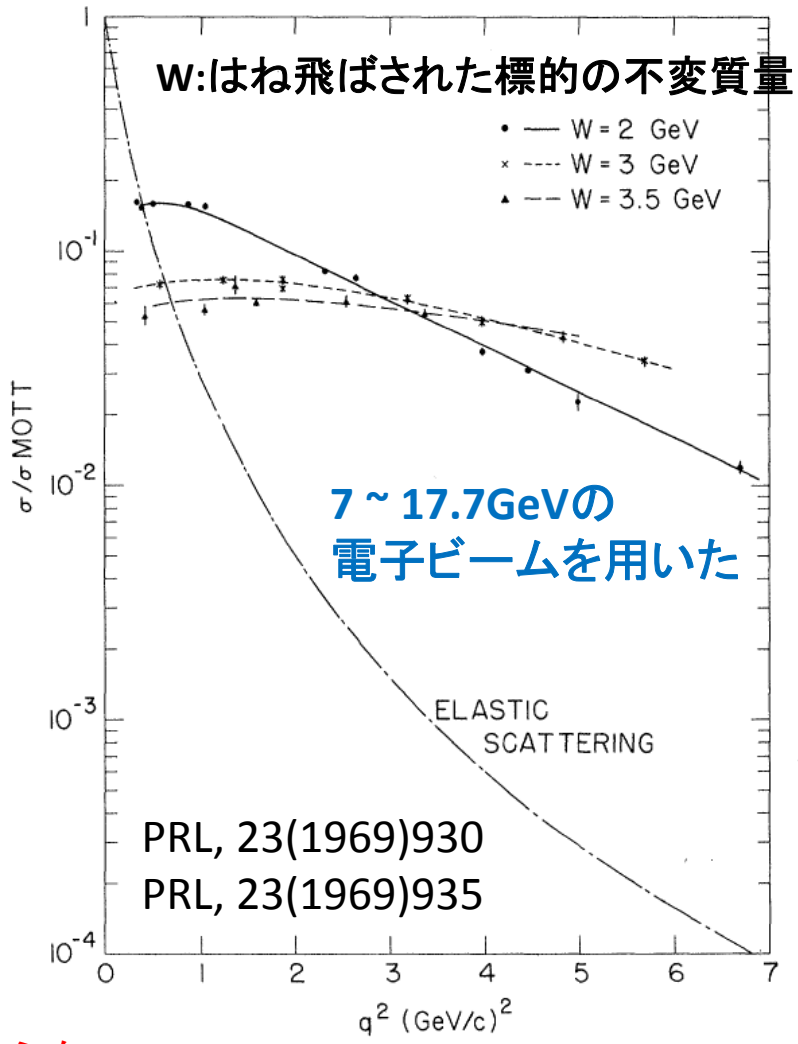


(from Wikipedia)

クォーク存在の証拠

クォークの語源: ゲルマンによりジェイムズ・ジョイスの小説『フィネガンズ・ウェイク』中の鳥の鳴き声「quark」から命名(1963年)

- 1968年、SLACにおいてe-p深非弾性散乱実験により、核子中にパートン(構造の無い点粒子)=クォークがあることが発見される
  - 同じく、e-p弾性散乱より核子のサイズr~0.7fmが決められた
    - 核子は綿菓子のようなふわふわした状態



q:遷移運動量

*核子の形状因子が近似的にエネルギースケールによらない(Bjorken スケーリングが成り立つ)事が、パートンの存在証拠

核子のクォーク・グルーオン

- 電子-核子(SLAC)/ニュートリノ-核子(CERN・FNAL)散乱実験から得た構造関数などより、次のことが明らかになった
  - クォークのスピンは1/2
  - 核子内には(価)クォークが3つ存在する
  - 価クォーク3つは(グルーオンによって)束縛されている
  - 価クォークのみならず、海クォークも($g \to q\bar{q}$により)存在している
  - 核子内のクォークが担う運動量は、全体の50%程度 → 残りはグルーオンが担う

その他、クォーク・グルーオン

- クォークは1/3e,2/3e単位の電荷を持つ
  - πC→$\mu^+\mu^-$X反応(ドレルーヤン反応, $q\bar{q} \to \mu^+\mu^-$)より
    - $\pi^- = \bar{u}d, \sigma(\pi^- C \to \mu^+\mu^- X) \propto 18{Q_u}^2 = 18(\frac{4}{9})$
    - $\pi^+ = u\bar{d}, \sigma(\pi^+ C \to \mu^+\mu^- X) \propto 18{Q_d}^2 = 18(\frac{1}{9})$
  - 実験値も$\frac{\sigma(\pi^- C)}{\sigma(\pi^+ C)} = \frac{4}{1}$
- 中間子は2つの価クォークから構成される
  - $\frac{\sigma(\pi N)}{\sigma(NN)} = \frac{2}{3}$の実験事実より

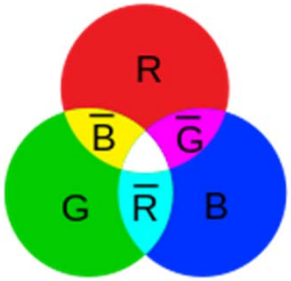
カラー自由度の導入

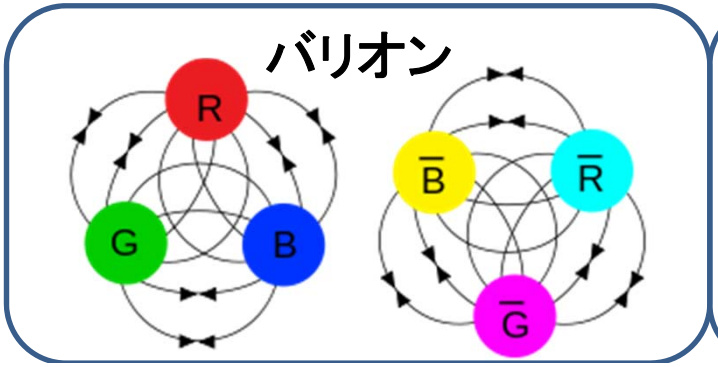
- Ω^-はsss、Δ^{++}はuuuのように同一粒子3個より構成されるスピン3/2の粒子である
- つまり、クォークのスピンも↑↑↑と並んでいることを示すが、これでは対称な波動関数となってしまう

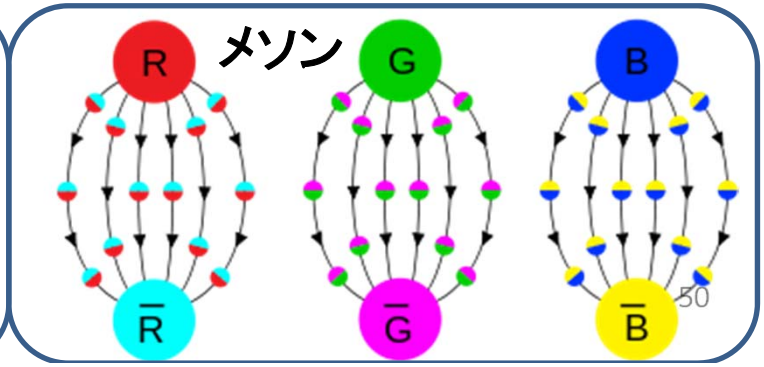
- **パウリの排他原理より、スピン1/2のクォーク(フェルミ粒子)は同じ量子状態を取れない**
- **フェルミ粒子の波動関数は反対称**

- 新しい自由度"カラー"を導入し、全体で反対称になっていると考える
- 3個のクォークから反対称の波動関数を作るには、カラー自由度は3
- 色の3原色をもじって、**赤(Red)**/**緑(Green)**/**青(Blue)**と名付けられた

- **働く強い相互作用 = クォーク間でグルーオン(カラー8重項)が色荷をやりとり**
- **ハドロン = カラー1重項でのみ存在**







(from Wikipedia)

カラー自由度存在の証拠

- 電子-陽電子衝突におけるR値
  - クォークの持つ電荷Q_i、カラー自由度N_cとして、

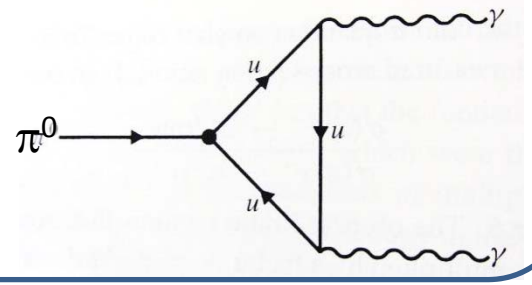
$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \to hadron)}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} = Nc \sum_i (Qi)^2$$

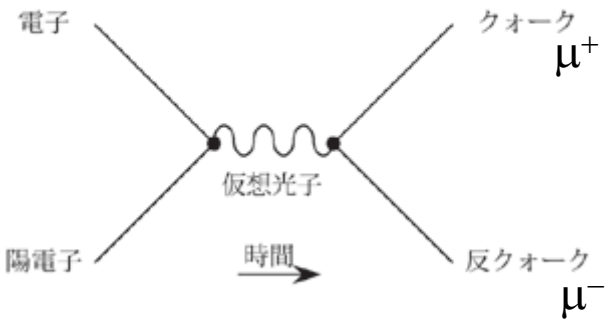
$$= Nc \times \left[(\frac{2}{3})^2 + (-\frac{1}{3})^2 + (-\frac{1}{3})^2 + \cdots \right]$$

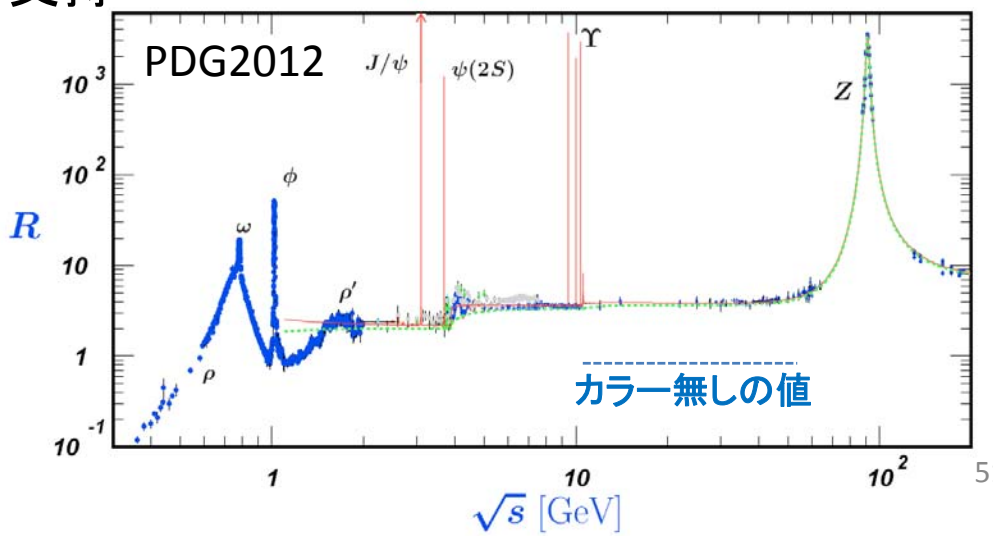
(クォーク、μ共にスピン1/2の粒子なので、電荷が異なる以外は生成断面積は等しい)

  - =2/3*N_c(u,d,sの時)、10/9*N_c(u,d,s,cの時)、11/9*N_c(u,d,s,c,bの時)となるが、実験結果はN_c=3を支持

その他、$\pi^0 \to \gamma\gamma$崩壊(クォークループを通じで崩壊(アノマリ))においても、実験結果よりN_c=3





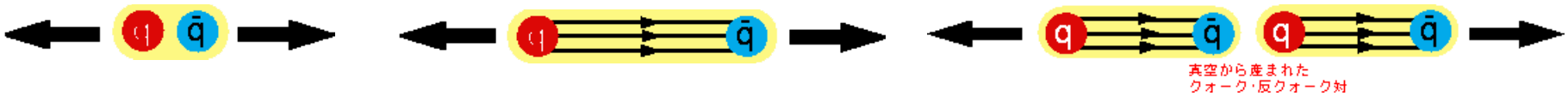


クォークの閉じ込め

- **クォークは単独では取り出せない**
  - 必ずカラーが無色(カラー1重項)であるハドロンとして存在
  - クォーク・反クォーク間のポテンシャルは次のように取られる事が多い (α_sは運動量移行量Q^2、つまり距離による)

$$V_s = -\frac{3}{4}\frac{\alpha_s}{r} + kr$$

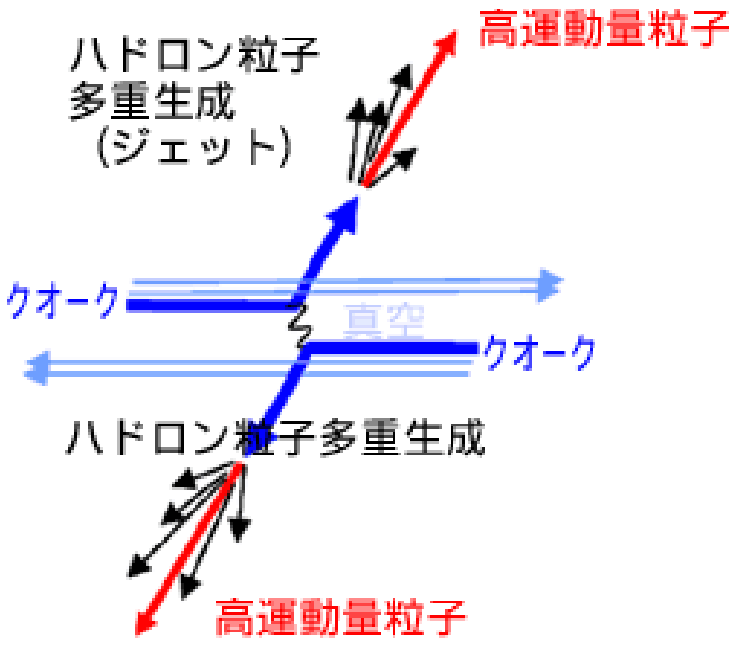
    - <u>近距離</u>: α_sが小さくなり、クォーク同士はほとんど力を及ぼし合わなくなる[漸近的自由性]
    - <u>遠距離</u>: α_s~1となり、また、離れれば離れるほど相互作用が増大。ある程度離れると、真空中からクォーク・反クォークを作れるほどのエネルギーとなり、ハドロン(カラー1重項)となって分離する(r≳1fm)[クォークの閉じ込め]



クォーク ジェット

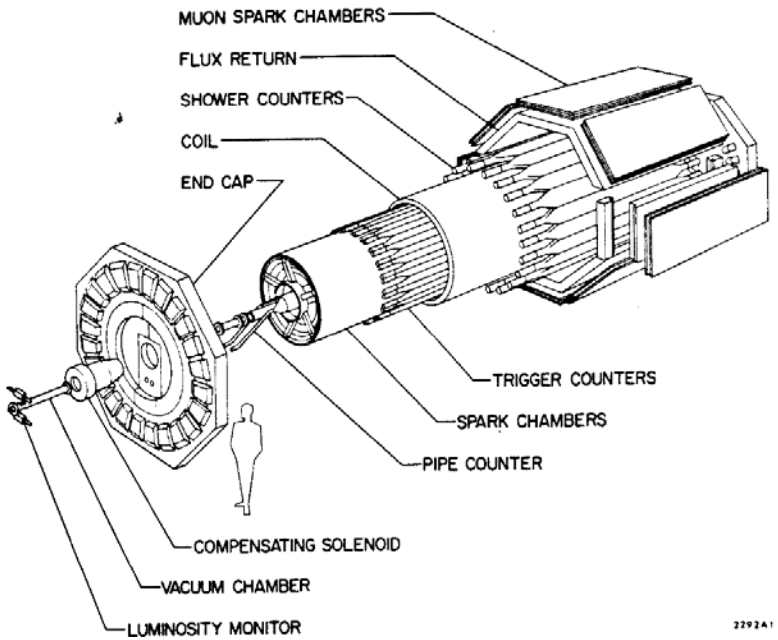
- これまでの実験結果においても単独でのクォークは見つかっていない

- 高エネルギー加速器実験で出来たクォーク・反クォーク対は、運動量保存により180度反対方向に飛び出し、上述の分離を繰り返しながら同方向にたくさんのハドロンをクラスター状に放出する
← ジェット (2jet)

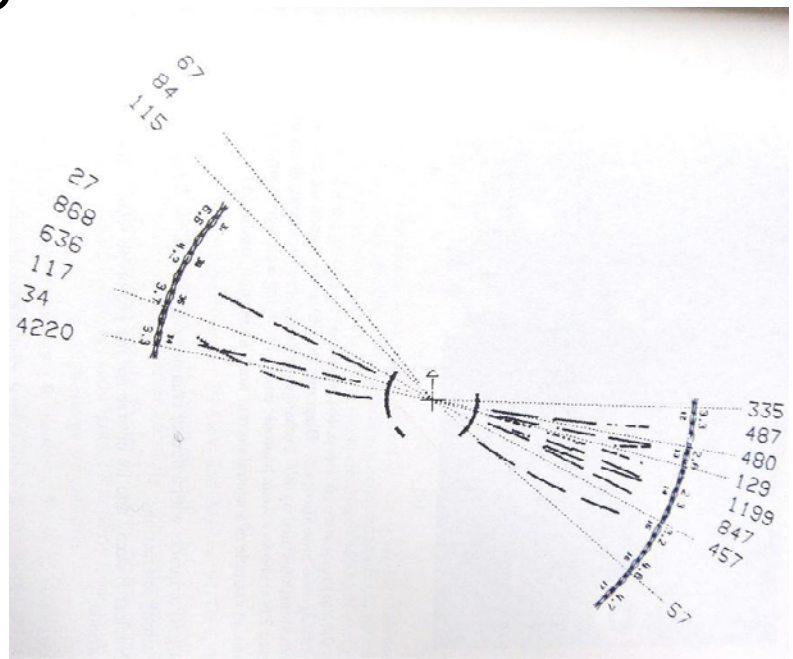


クォーク ジェット発見

- 1975年、SLACのSPEARにおける電子・陽電子衝突実験($\sqrt{s} = 6.2/7.4GeV$)において発見
  - 2jet, PRL 35 (1975) 1609



SLAC/LBL magnetic detector @ SPEAR
(slac-pub-1814)



JADE検出器@DESY-PETRAでの
クォーク・ジェット(e^+e^-, $\sqrt{s}$~30GeV)

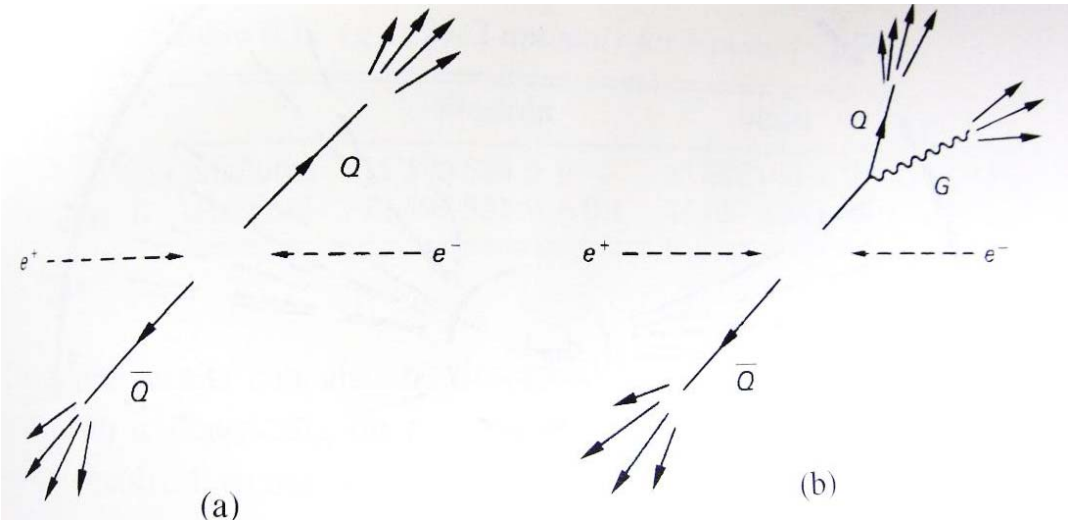
グルーオン存在の証拠

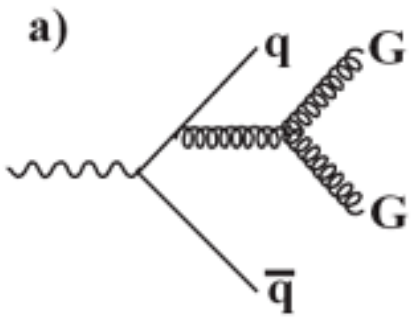
- グルーオンはクォーク同様、単独では取り出すことが出来ない

- 高エネルギー加速器実験(30GeV程度以上)において生成される$q\bar{q}$対の一方または両方からグルーオンが放出され*、すぐさま複数のハドロンに崩壊してジェット(グルーオン・ジェット)となる

  * 電磁相互作用における制動放射に対応

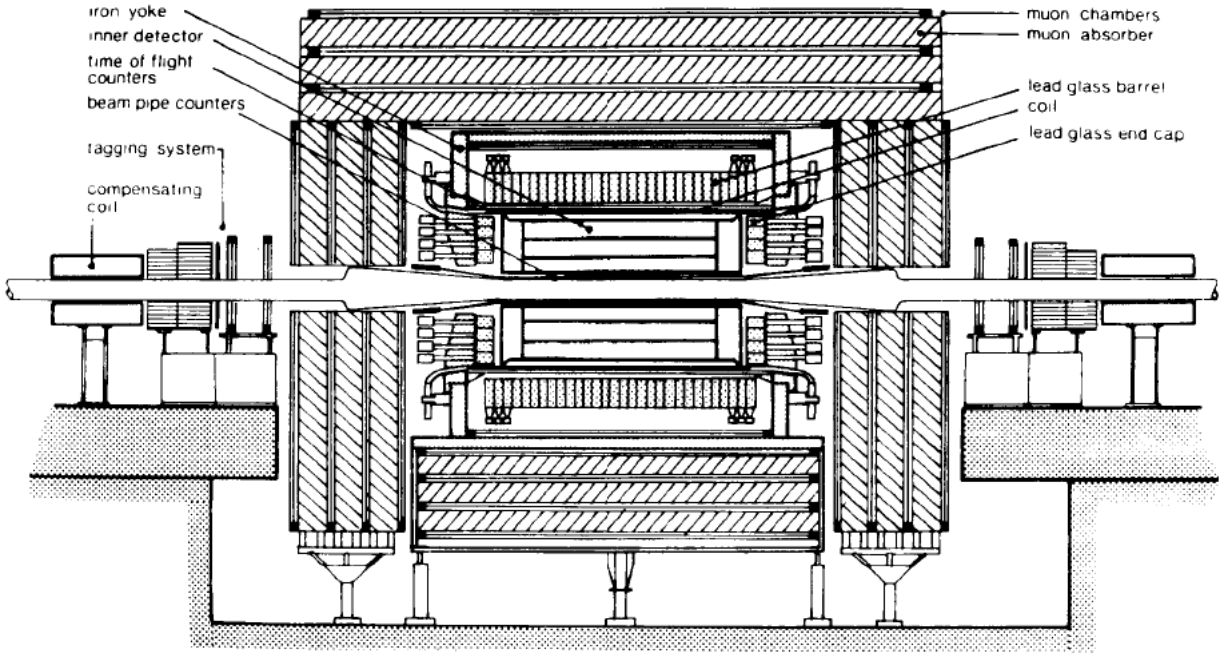
  – クオークジェットに比べて、多重度（ジェットに含まれるハドロンの数）はより大きく（およそ2倍）、従って個々のハドロンの平均エネルギーはより低くなる
  – 3jet($q\bar{q} \to q\bar{q}g$)の角度分布より、グルーオンのスピンが1であることが分かる
  – グルーオンの自己結合($g \to gg$)も4jetを調べることにより明らかに。
    →グルーオンは「色電荷」を持って自己結合できる粒子



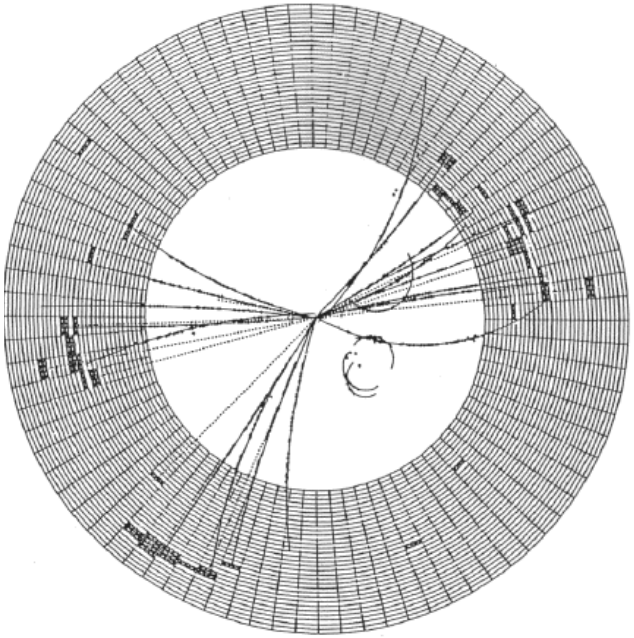


グルーオン ジェット発見

- 1979年、DESYのPETRAにおける電子・陽電子衝突実験($\sqrt{s}$~30GeV)において発見
  - 3jet, PLB86(1979)243, PRL43(1979)830, PLB86(1979)418, PLB91(1980)142

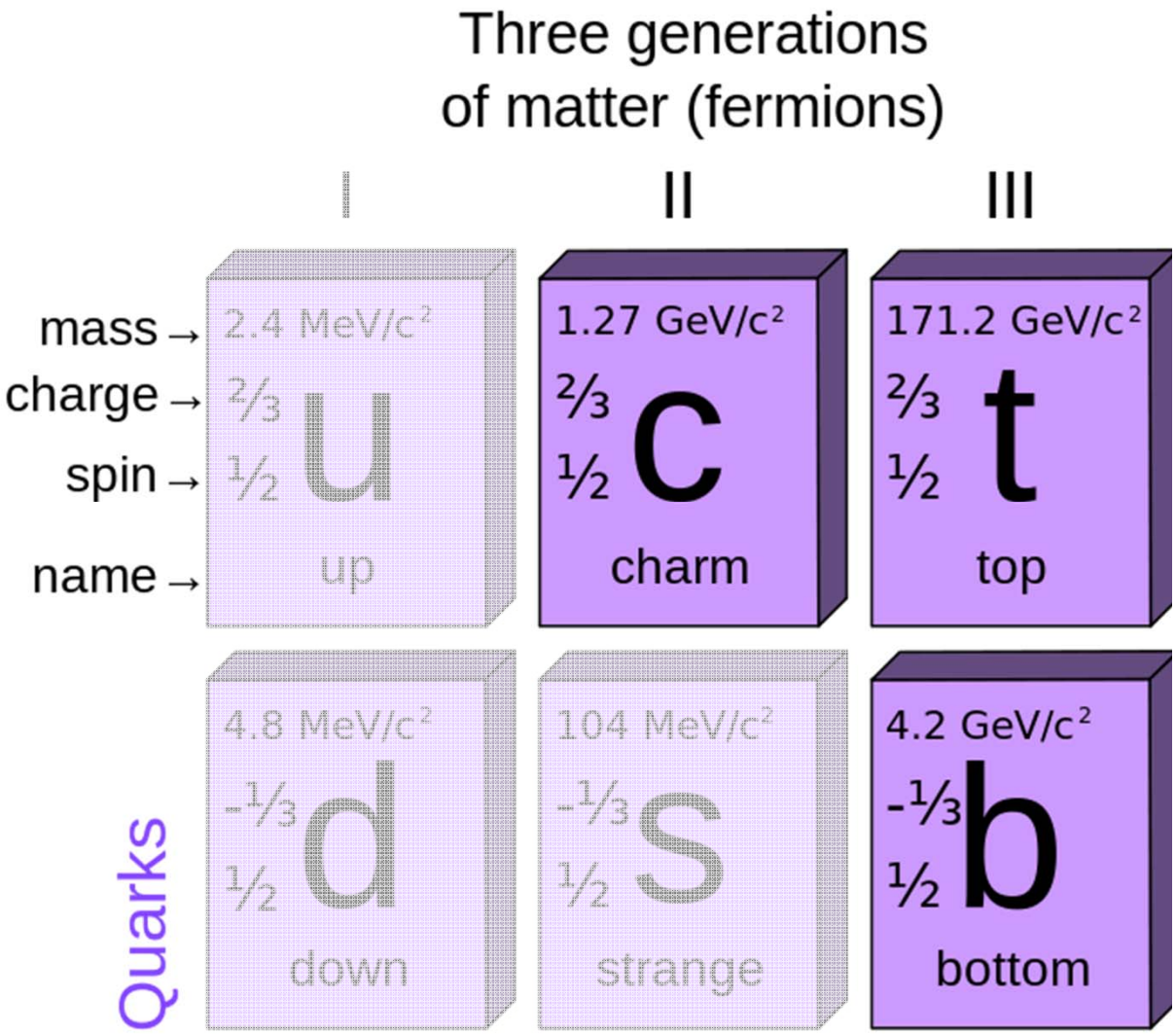


JADE detector @ DESY-PETRA
(PL88B(1979)171



JADE検出器@DESY-PETRAでのグルーオン・ジェット(e^+e^-, $\sqrt{s}$~30GeV)

重いクォーク



(from Wikipedia)

チャームクォーク発見
--- 4番目のクォーク ---

- 1974年11月、BNLとSLACにてJ/ψが発見される
  - 3.1GeVに大きく鋭いピーク
  - 崩壊幅(Γ)が測定精度(数MeV)の限界を超えていたため、大騒ぎに
    - 質量が大きく、崩壊幅が小さい粒子はQ値(親質量ー子質量)が大きいため非常に不安定であると考えられていた
    - cf. 強い相互作用で崩壊するρはM=775MeV/c^2, Γ=150MeV
- その2週間後、今度は3.7GeVに鋭いピーク → ψ'

11月革命

- すぐに、チャーモニウム($c\bar{c}$)であるとして決着
  - チャームクォークは以前から予言されていた (弱い相互作用の理論で電荷2/3を持ったもう1つのクォークが必要とされていた)

実験

BNL-AGS

30GeV p+Be→J/ψ+X, J/ψ→e^++e^-

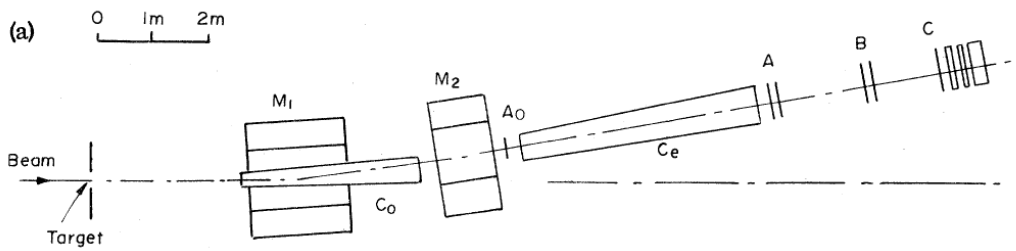
- ティン（Samuel Chao Chung Ting, 丁肇中）のグループ
- J粒子と命名

SLAC-SPEAR

$\sqrt{s}$=3.1GeV e^++e^-→J/ψ→μ^++μ^-

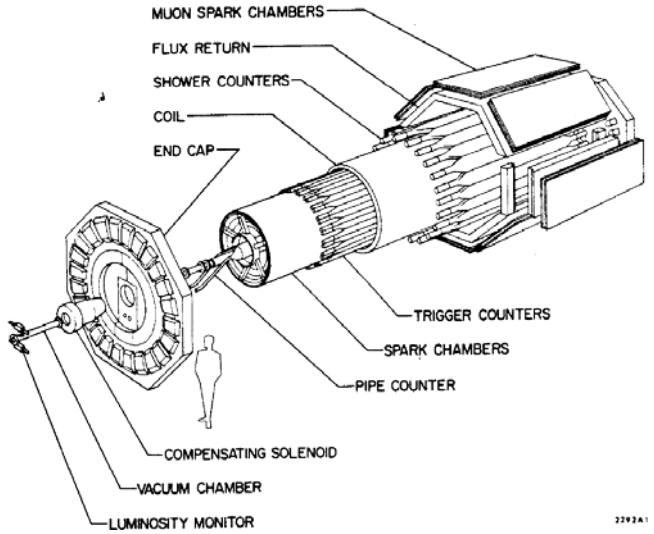
- リヒター（Burton Richter）のグループ
- ψ粒子と命名

2アーム電子スペクトロメーター



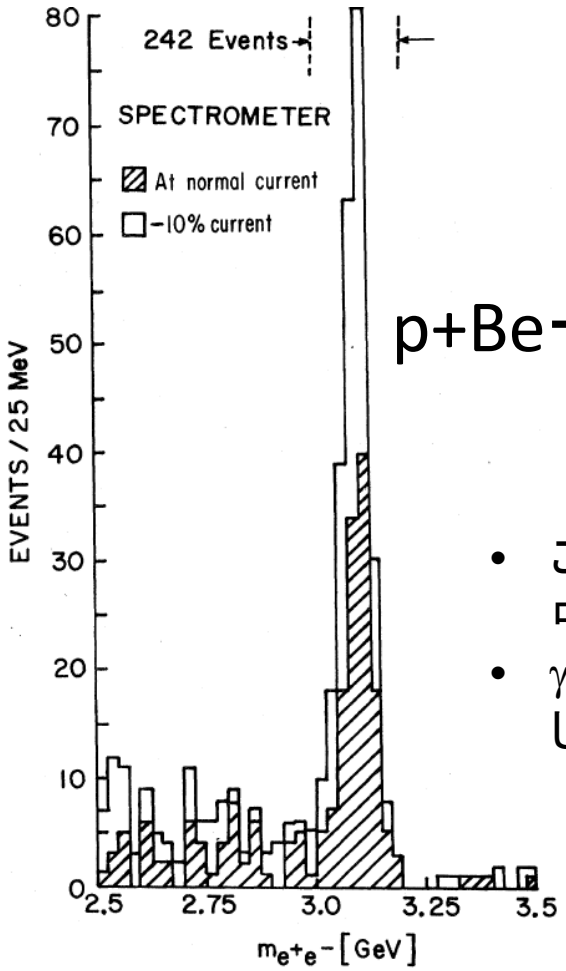
ビームを挟んでもう一方の検出器もある

SLAC-LBL検出器 – 円筒形スペクトロメーター



実験

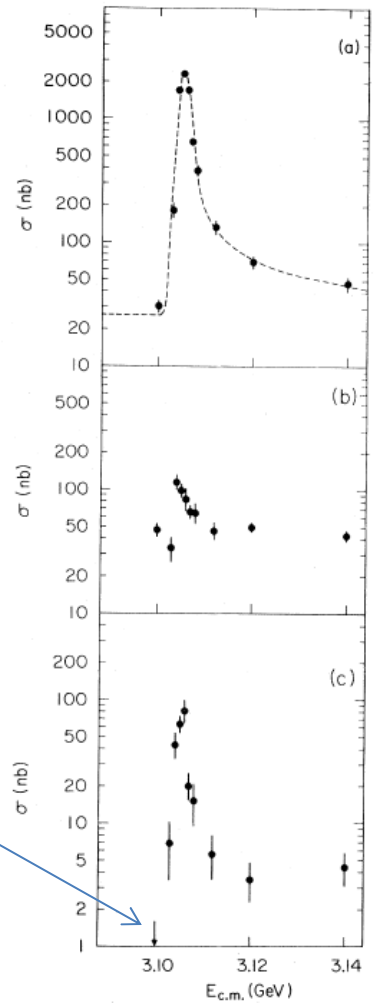
BNL-AGS PRL,33,1404(1974)



$p+Be \rightarrow e^+ + e^- + X$

- この下がり具合が1γ中間状態との干渉
- γ:$J^{PC}=1^{--}$より、J/ψも同じ量子数

SLAC-SPEAR PRL,33,1406(1974)



$e^+ + e^- \rightarrow hadron$

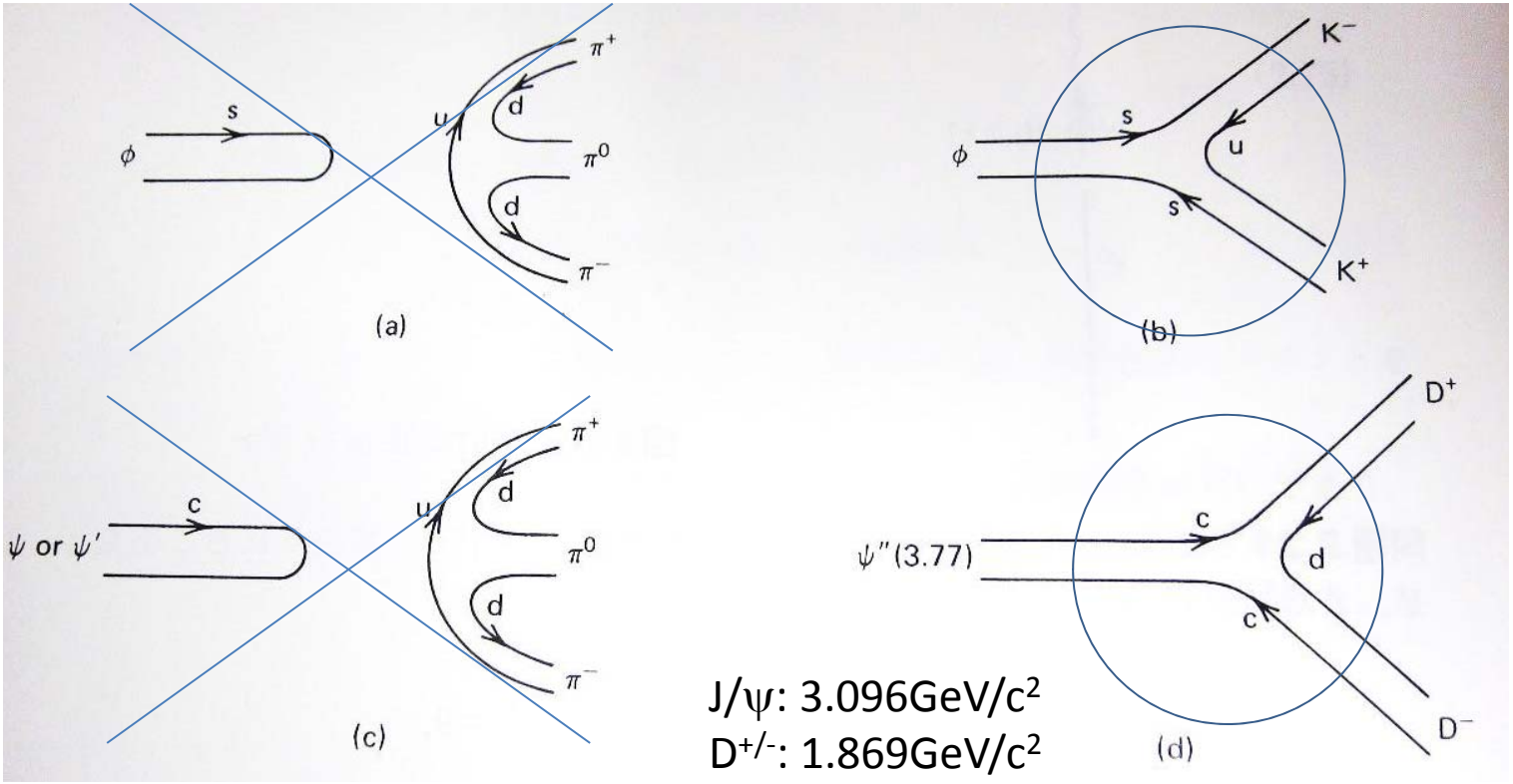
$e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$

$e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

$+\pi^+\pi^-$, K^+K^-

OZIルール

- J/ψの崩壊幅(Γ~0.1MeV)は何故狭いか?
- 大久保-ツヴァイク-犬塚則(OZIルール)で説明



J/ψ: 3.096GeV/c^2
$D^{+/-}$: 1.869GeV/c^2

よく使う力学変数 (1粒子系)

- $E^2 = p^2+m^2$
- $E = \gamma m \leftrightarrow \gamma = E/m$
- $p = \gamma m\beta \leftrightarrow \beta = p/E$
- $\beta\gamma = p/m$
- $T = E-m = m(\gamma-1)$ [運動エネルギー]

(z軸方向の)ローレンツ変換

$$p'_z = \gamma(p_z - \beta E)$$
$$E' = \gamma(E - \beta p_z)$$
$$\beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- (例) π^+粒子[質量(m)~140MeV/c^2, 崩壊距離(cτ)~7.8m]が運動量(p)=1GeV/cで飛ぶと(距離x) 、その崩壊距離はどうなるか?
  - $N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{\beta\gamma c\tau}}$

    ← 崩壊距離はβγcτ
    - $\beta\gamma = 1000/140 \sim 7$
    - 崩壊距離はβγcτ~55m、7倍伸びる

<u>非相対論では</u>

$$\frac{dN}{N} = -\frac{dt}{\tau}$$
$$N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{v\tau}}$$

<u>相対論では</u>

$$dt = \gamma dt'$$
$$\frac{dN}{N} = -\frac{dt/\gamma}{\tau}$$
$$N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{\gamma v\tau}}$$

よく使う関係式(2粒子系)

- 質量m_1,m_2の2粒子の系
  - エネルギーE_1+E_2, 運動量$\overrightarrow{p_1}+\overrightarrow{p_2}$はどの系でも保存
  - $E_1^2=\overrightarrow{p_1}^2+m_1^2,\ E_2^2=\overrightarrow{p_2}^2+m_2^2$
  - どの系でも一定な$s=(E_1+E_2)^2-(\overrightarrow{p_1}+\overrightarrow{p_2})^2$

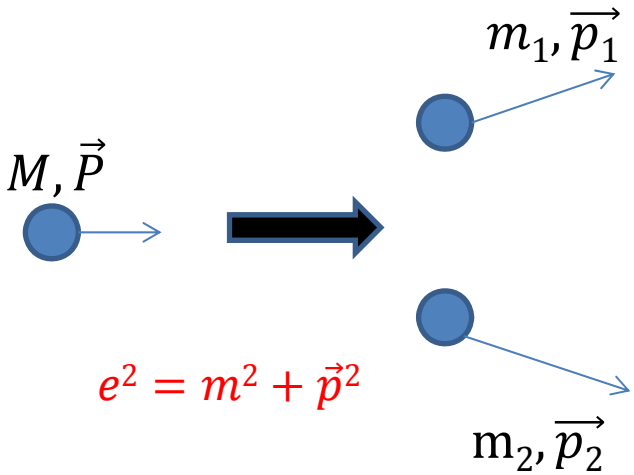
- 実験室系(標的実験), $\overrightarrow{p_2}=0$
  - $s=(E_1+m_2)^2-(\overrightarrow{p_1}+0)^2$ =m_1^2+m_2^2+2m_2E_1
  - 陽子+陽子、エネルギーが大きい(E>10GeV)ときには、m_1=m_2~1GeV/c^2より、$\sqrt{s}=\sqrt{2m^2+2mE}\sim\sqrt{2mE}$
    - (例1) AGS 30GeV-PS : $\sqrt{s}\sim 8GeV$
    - (例2) J-PARC 50GeV-PS : $\sqrt{s}\sim 10GeV$

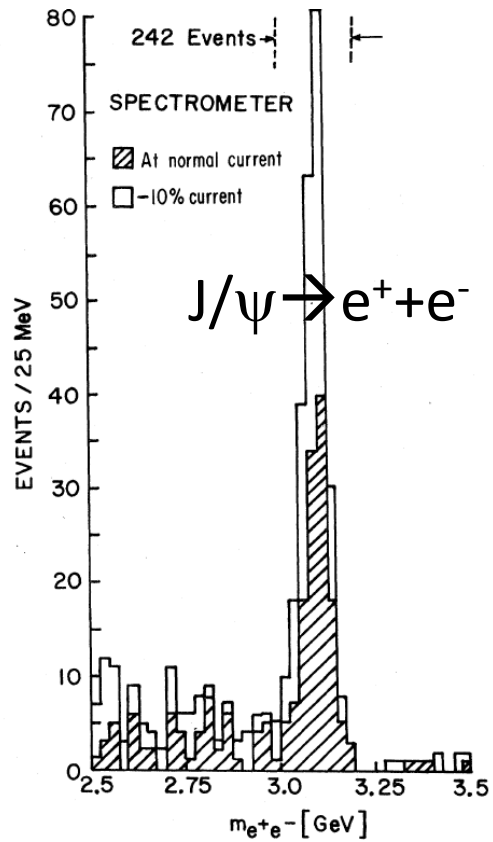
- 重心系(コライダー実験), $\overrightarrow{p_1}+\overrightarrow{p_2}$=0
  - $\sqrt{s}=E_1+E_2$
    - (例1) TRISTAN : 32GeV+32GeV=64GeV
    - (例2) LHC : 3.5TeV+3.5TeV=7TeV @ 2012

不変質量と崩壊幅

- 不変質量(invariant mass)

$$\vec{P} = \overrightarrow{p_1} + \overrightarrow{p_2}$$
$$E = e_1 + e_2$$
$$M^2 = E^2 - \vec{P}^2$$



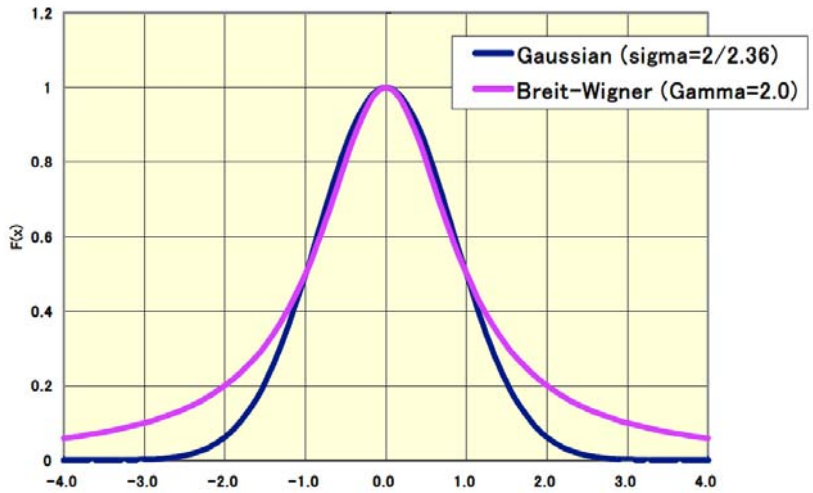


- GaussianとBreit-Wigner
  - Gaussian:

$$f(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(m-m_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

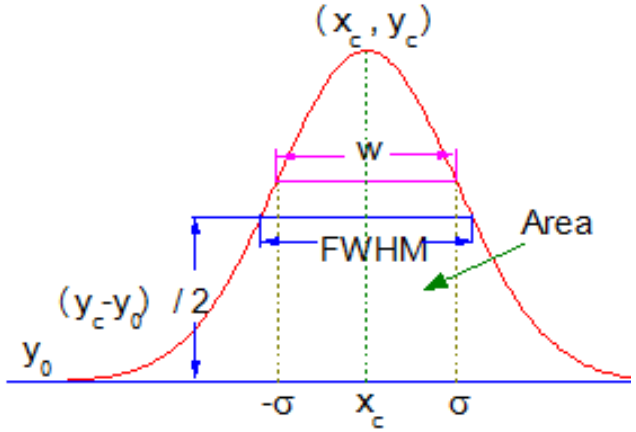
  - Breit-Wigner

$$f(m) = \frac{\Gamma^2/4}{(m-m_0)^2+\Gamma^2/4}$$

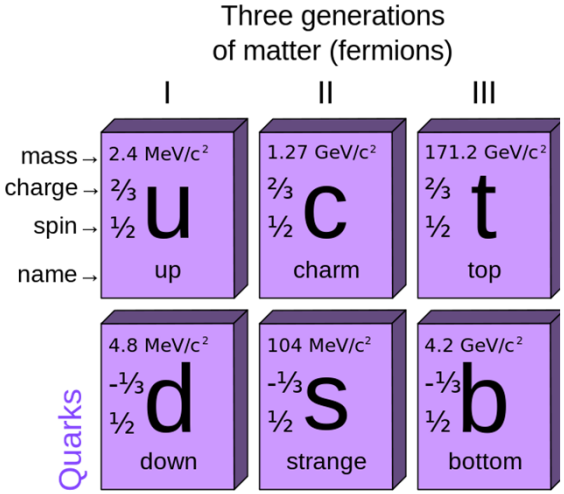


標準偏差σと半値全幅(FWHM)

- 標準偏差σ
  - -1σから+1σまでの範囲: 68.3%
  - -2σから+2σまでの範囲: 95.5%
  - -3σから+3σまでの範囲: 99.7%
- 半値全幅FWHM
  - 最大値の半分のところの全幅
- $\mathrm{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2\ln(2)} \sim 2.35\sigma$



3世代のクォーク?



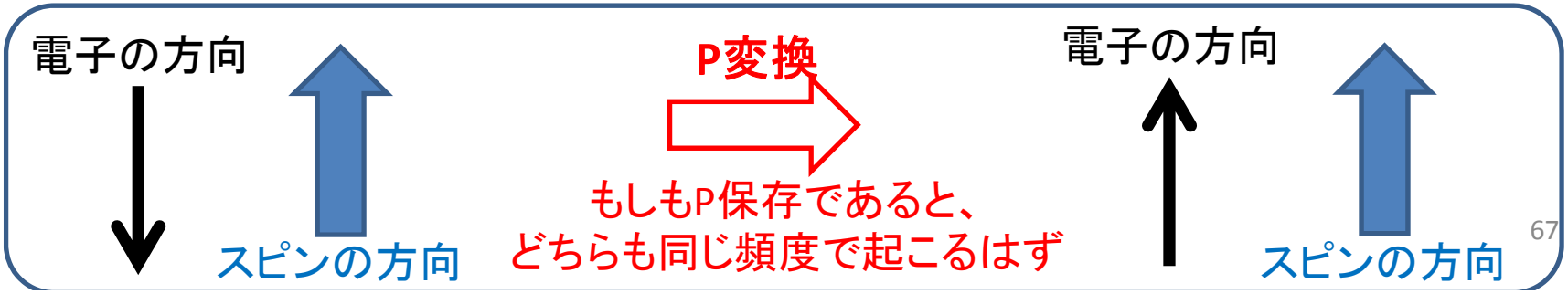
- 3世代以上のクォークの存在が
  知られていた訳では無い
  - C/P/T(荷電・空間・時間反転)は保存していると考えられてた
  - しかし、C/P/T/CPは弱い相互作用では破れている
    - Pの破れ: 1957年、ウー(C.S.Wu)達により^{60}Coのβ崩壊を用いて発見
    - CPの破れ: 1964年、クローニン(J.W.Cronin)とフィッチ(V.L.Fitch)達により中性K中間子の崩壊を用いて発見@AGS

- **1973年(cクォーク発見前)、小林・益川はCPの破れを説明するために「クォークが自然界に少なくとも3世代以上ある」事を提唱**

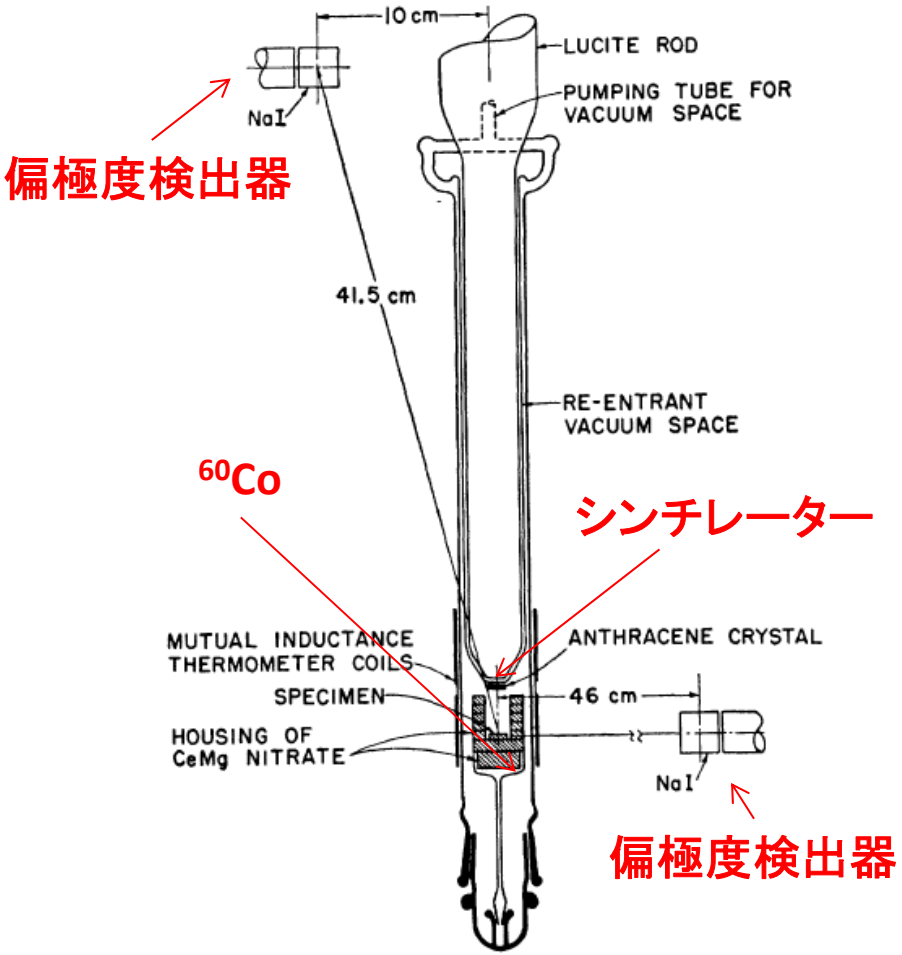
パリティの破れ --- ウーの実験

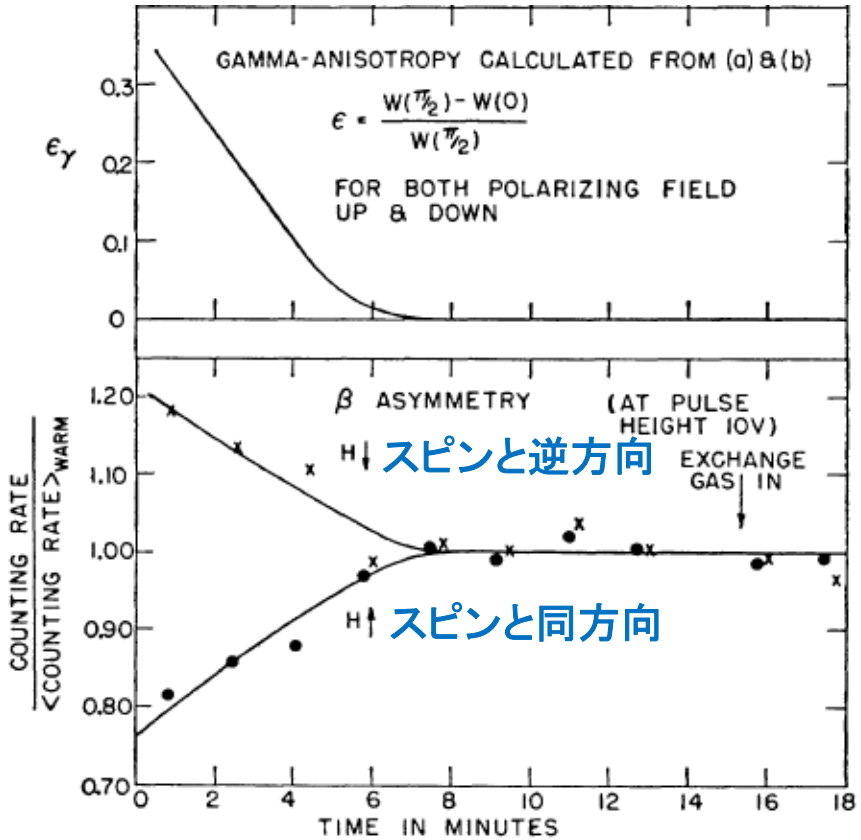
- $K^+(J^P=0^-)$は$2\pi(P=+)$と$3\pi(P=-)$へ崩壊
  - リー(T.D.Lee)とヤン(C.N.Yang)は弱い相互作用ではパリティが非保存であると主張

- ウー達は、偏極した$^{60}Co(5^+)$における$^{60}Ni^*(4^+)+e^-+\bar{\nu}_e$のβ崩壊を用いて、出てくる電子のスピンの向きに対する非対称性度を調べた
  - もしP保存が成り立っていると、空間反転の世界でも現実世界と同様の事が起こるはず
    - $P(\vec{p}) = -\vec{p},$
    - $P(\vec{L}) = P(\vec{r} \times \vec{p}) = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{L}$



パリティの破れ --- ウーの実験





Phys. Rev. 105, 1413 (1957)

- 電子がスピンとは逆向きに出やすい事を観測!

→ Pは弱い相互作用では破れている!

CPの破れ --- クローニン・フィッチの実験

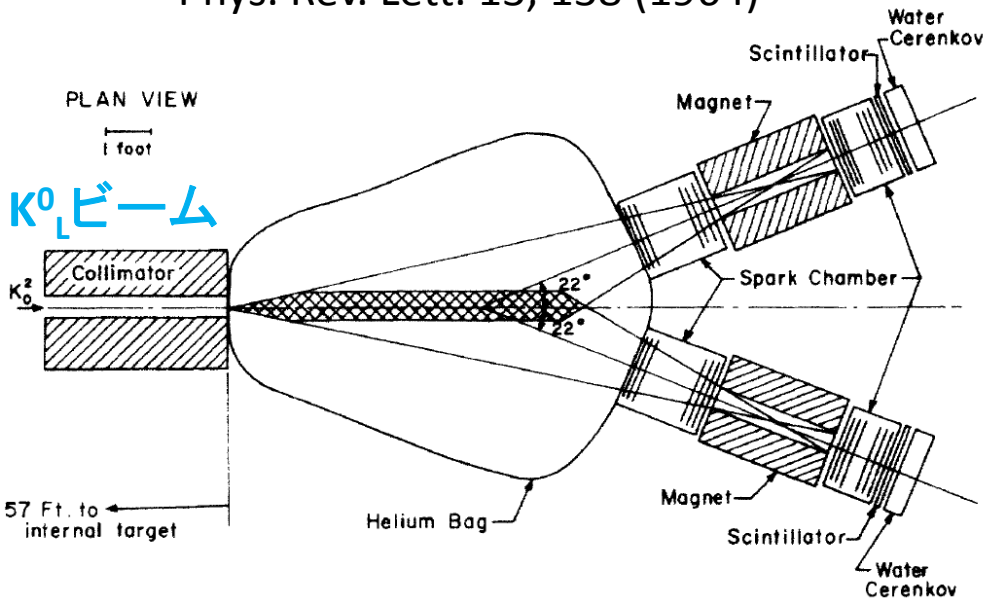
- $\mathrm{K}^0, \overline{K^0}$は$\mathrm{K}^0{}_S, \mathrm{K}^0{}_\mathrm{L}$として観測される
- 弱い相互作用ではCPは保存されると仮定する
  - $CP|K^0\rangle = |\overline{K^0}\rangle$
  - $CP|\overline{K^0}\rangle = |K^0\rangle$
  - $|K^0{}_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle) \rightarrow \pi\pi,$ cτ=2.68cm
  - $|K^0{}_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle) \rightarrow \pi\pi\pi,$ cτ=15.34m
  - $CP|K^0{}_S\rangle = |K^0{}_S\rangle$
  - $CP|K^0{}_L\rangle = -|K^0{}_L\rangle$
- $\mathrm{K}^0{}_S$ は時間がたてば崩壊して無くなってしまうが、$\mathrm{K}^0{}_\mathrm{L}$を適当な物質を通すことによって$\mathrm{K}^0{}_S$ が再生する

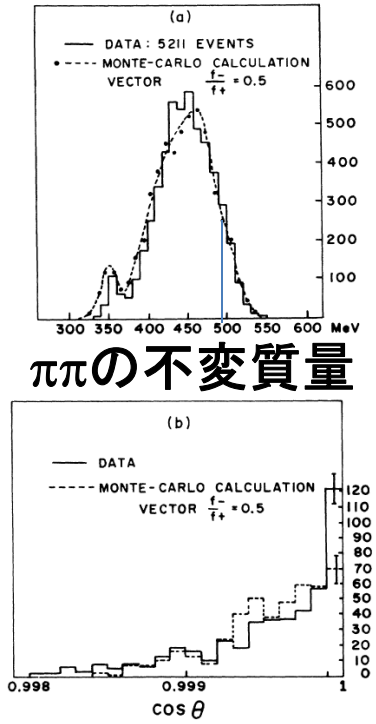
CPの破れ --- クローニン・フィッチの実験

- $CP|K^0{}_S\rangle = |K^0{}_S\rangle$ $\qquad K^0{}_S \to \pi\pi,$
- $CP|K^0{}_L\rangle = -|K^0{}_L\rangle$ $\qquad K^0{}_L \to \pi\pi\pi$

- もしもCP保存が破れていれば、$K^0{}_L$は$\pi\pi$へ崩壊するはず
- 1964年、クローニンとフィッチ達は30GeVのAGSでこれらのイベントを発見 (BR($K^0{}_L \to \pi^+\pi^-$)=(2.0±0.4)x10^{-3})
  - **CPは弱い相互作用では保存しない!**

Phys. Rev. Lett. 13, 138 (1964)





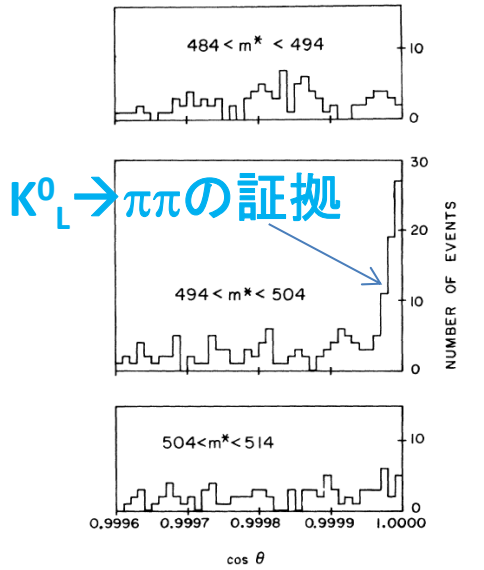


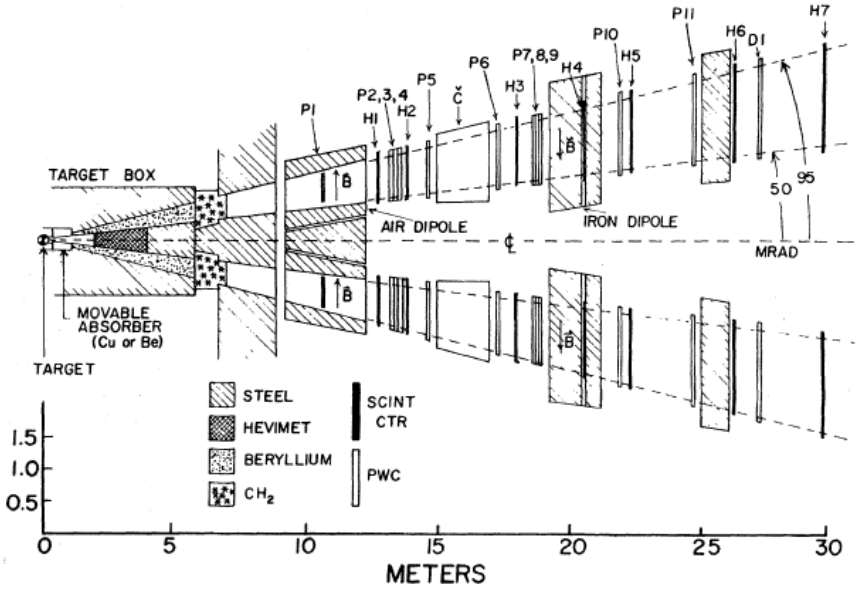
FIG. 3 ... mass ranges for event ...

sults from the more accurate measuring mach
The angular distribution from three mass rang
are shown; one above, one below, and one enc

bクォーク発見

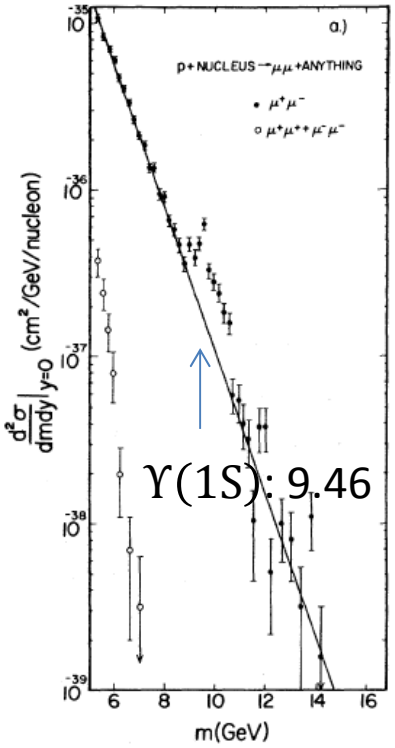
- 1977年、フェルミ研究所(FNAL)におけるE288実験(レーダーマン et al.)で、400GeV p+A→$\mu^+\mu^-$+X反応によりϒ(1S)粒子(9.46GeV/c^2)が発見される

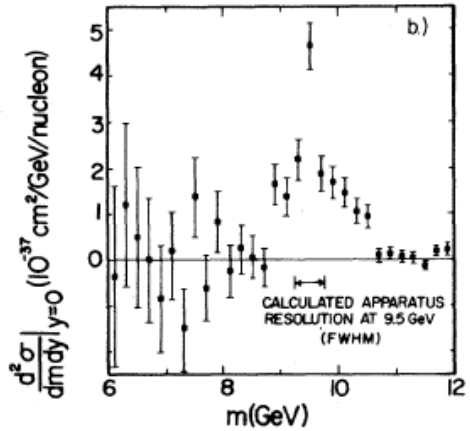
--- **Belle**実験などで利用 ---
$\Upsilon(4S)$: 10.57 GeV/c^2, B: 5.27 GeV/c^2
より、$\Upsilon(4S)$→BB崩壊が可能



di-muon spectrometer @ FNAL

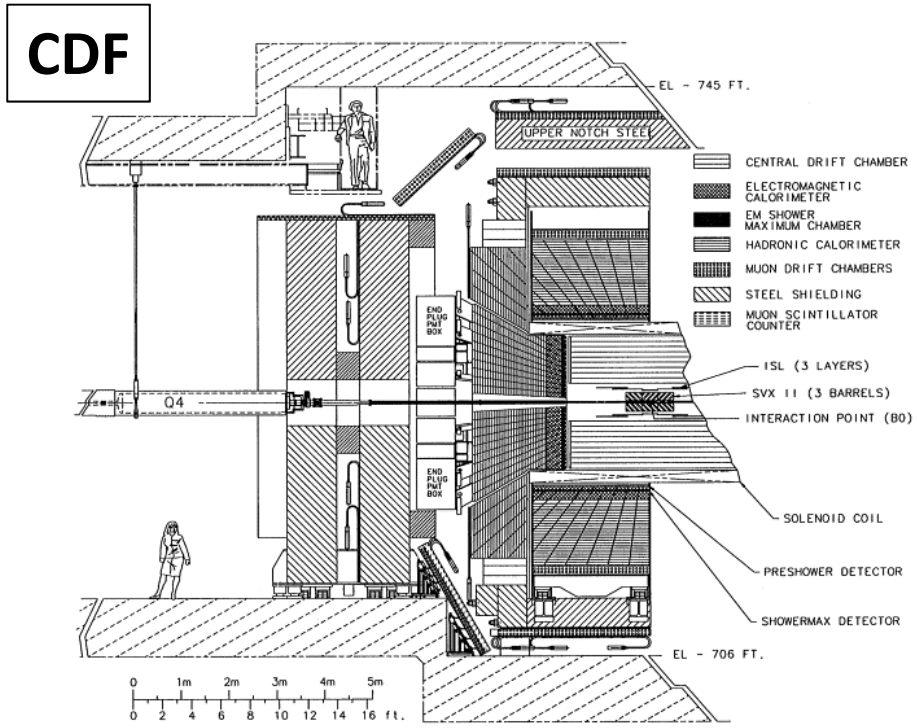
Phys. Rev. Lett. 39, 252(1977)

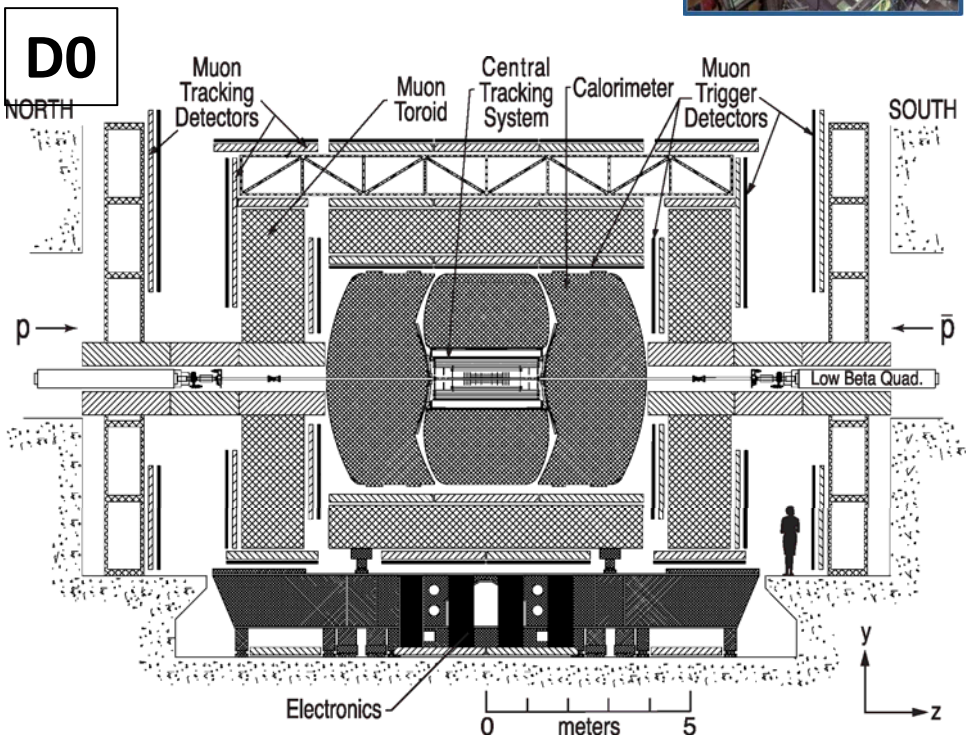




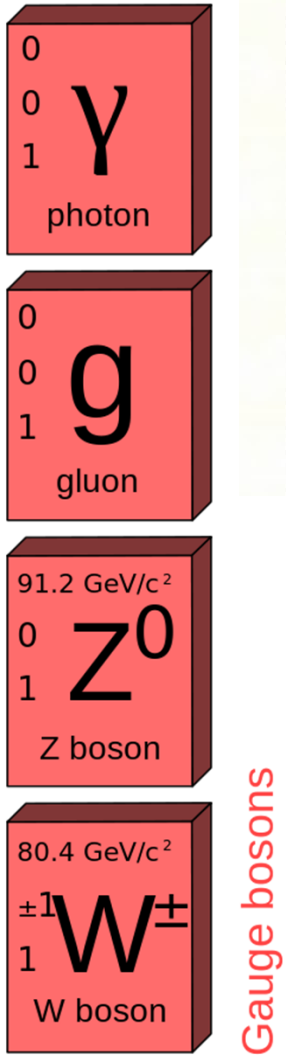
tクォーク発見

- 1995年に、フェルミ研究所の陽子・反陽子コライダーTevatron($\sqrt{s}$=2TeV)において、CDF実験およびD0実験が発見
  - ジェット再構成より176GeV/c^2あたりにtopのピーク
  - CDF: PRL74, 2626 (1995), D0:PRL74, 2422 (1995)



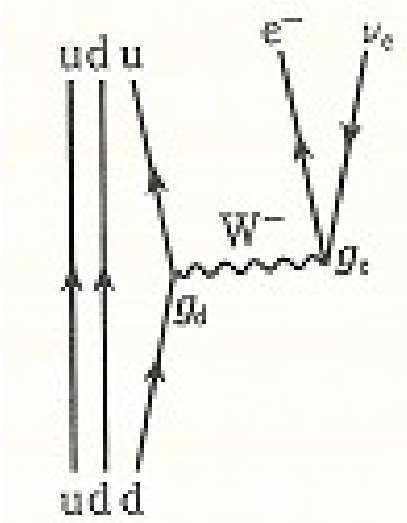


ウィークボソン(W,Z)と弱い相互作用

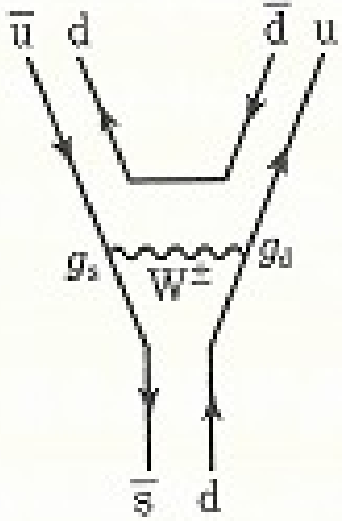


(from Wikipedia)

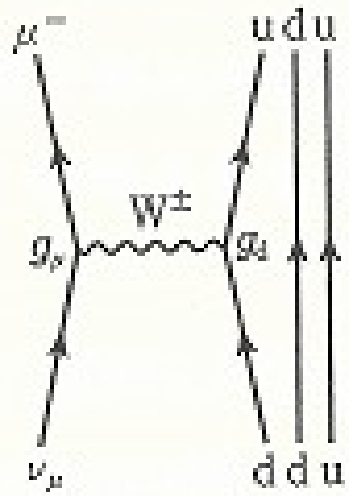
β崩壊



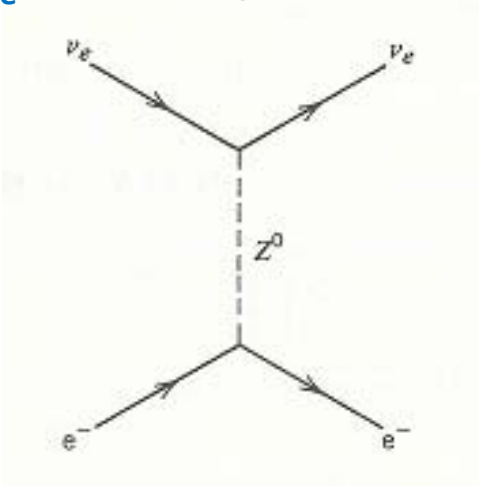
$K^0 \to \pi^+\pi^-$



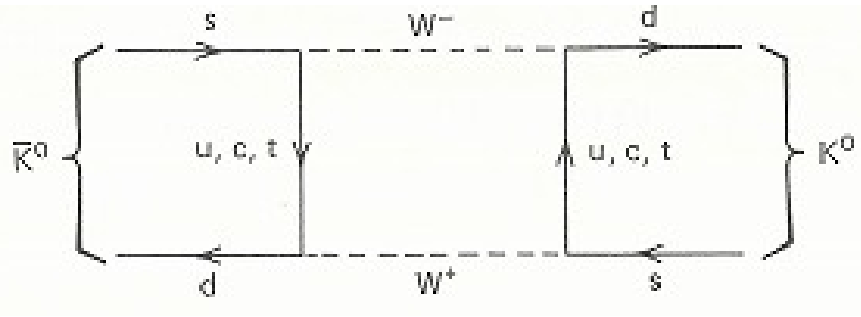
$\nu_\mu n \to \mu^- X$



$e\text{-}\nu_e$弾性散乱(弱中性カレント)



$K^0 - \overline{K^0}$混合



ウィークボソン($W^{\pm}$,Z^0)

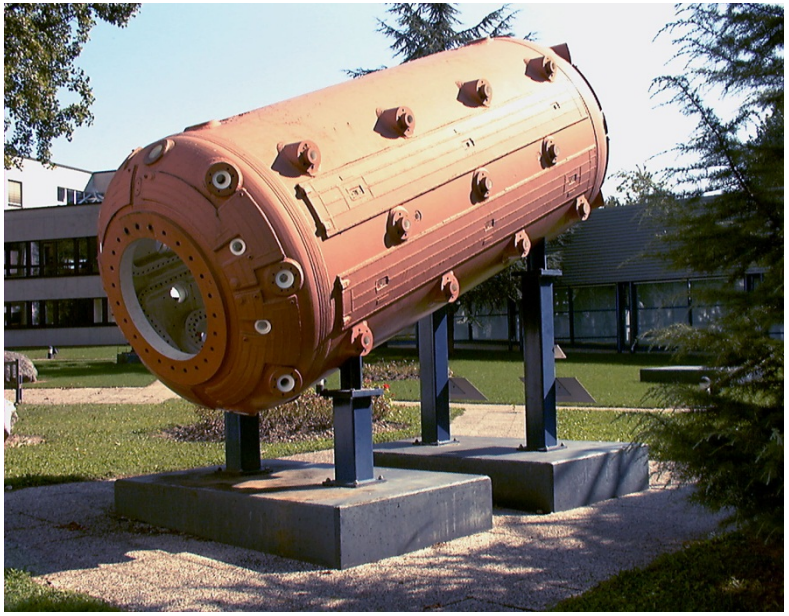
- 1934年、β崩壊を説明するため、フェルミ(E.Fermi)により弱い相互作用の理論が提唱される(フェルミ理論)
- 同じく1935年、湯川による中間子論によって、力の交換は粒子によって行われると提唱される
- 1957年頃、V-A相互作用理論が確立(V:ベクトル、A:軸性ベクトル、弱カレントによるβ崩壊の説明←Wボソンが絡む)

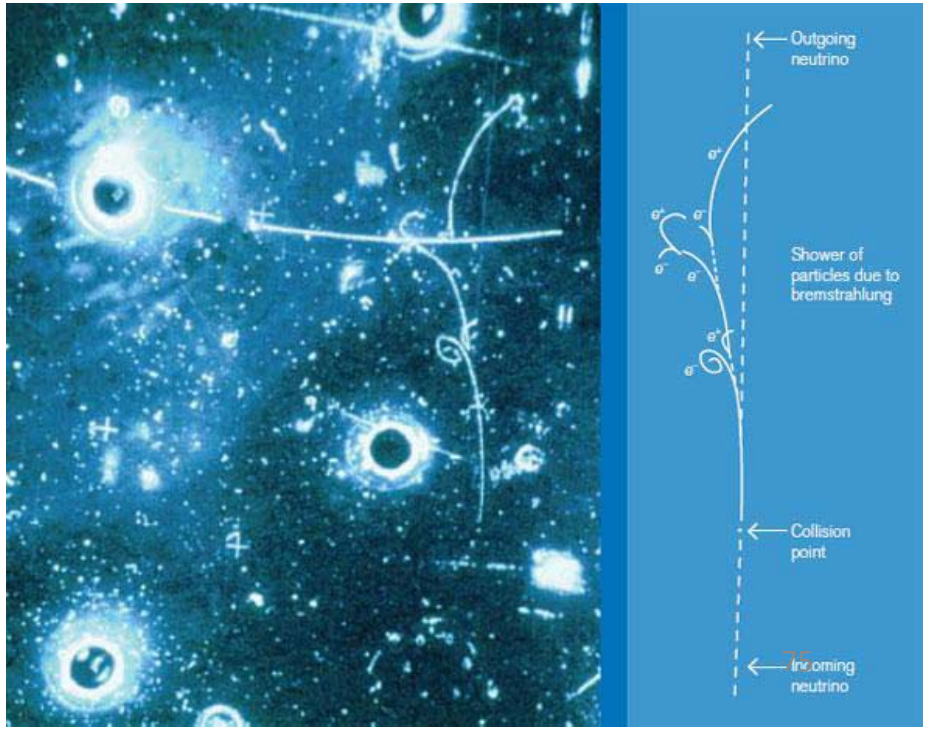
- 1968年、グラショウ・ワインバーグ・サラムによる電弱統一理論(GWS理論、弱い相互作用と電磁相互作用の統一)により、弱い相互作用の伝達粒子であるW,Zの存在と質量が予言される
  - Zボソンは弱中性カレントの存在予言より導入

弱中性カレント発見

- 1973年、ラガリグ(A.Lagarrigue)達による弱中性カレントの発見
  - CERNのPS(26GeV)で作られたニュートリノビームをガーガメル(Gargamelle)という10トンの巨大泡箱に照射し、100万枚の写真解析(50名からの研究者動員!)により発見

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$$





ウィークボソン(W,Z)発見

- 1983年、CERNの陽子・反陽子加速器$Sp\bar{p}S(\sqrt{s} = 540GeV)$を用いたUA1,UA2実験で発見
  - 1つの加速器で2種(陽子と反陽子)を逆方向に回す
  - メーア(Van der Meer):反陽子のビーム冷却及び貯蔵
  - ルビア(Carlo Rubia): $Sp\bar{p}S$ とUA1実験のボス
  - 1983年発見、1984年ノーベル賞 ← 史上最短

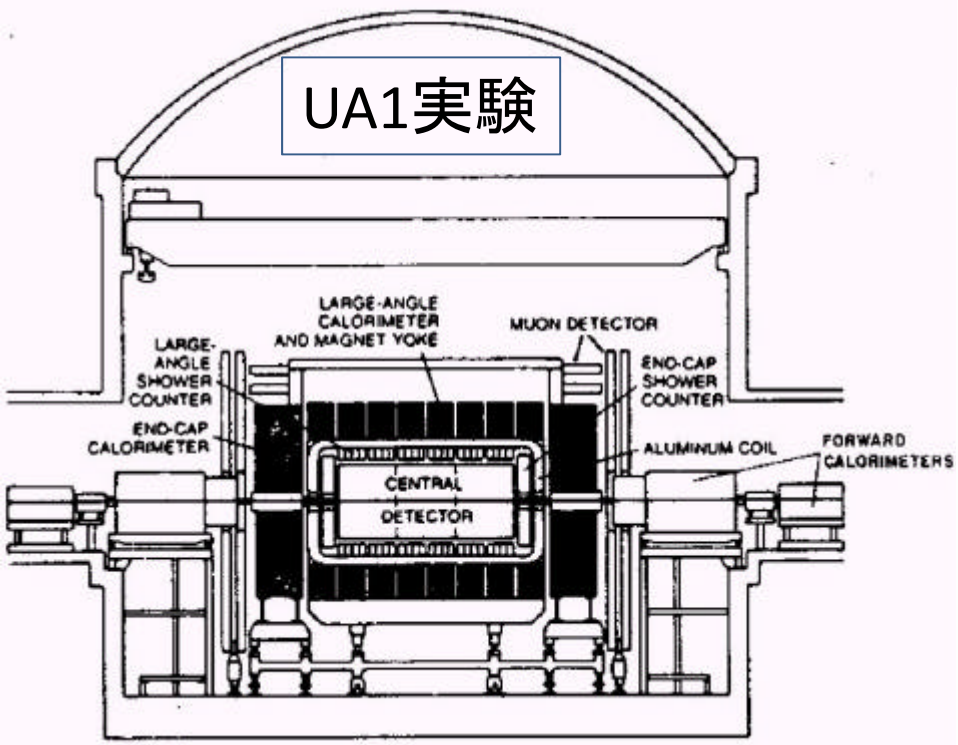
$$u + \bar{d} \to W^+$$
$$u + \bar{s} \to W^+$$
$$d + \bar{u} \to W^-$$
$$s + \bar{u} \to W^-$$
$$u + \bar{u} \to Z^0$$
$$d + \bar{d} \to Z^0$$

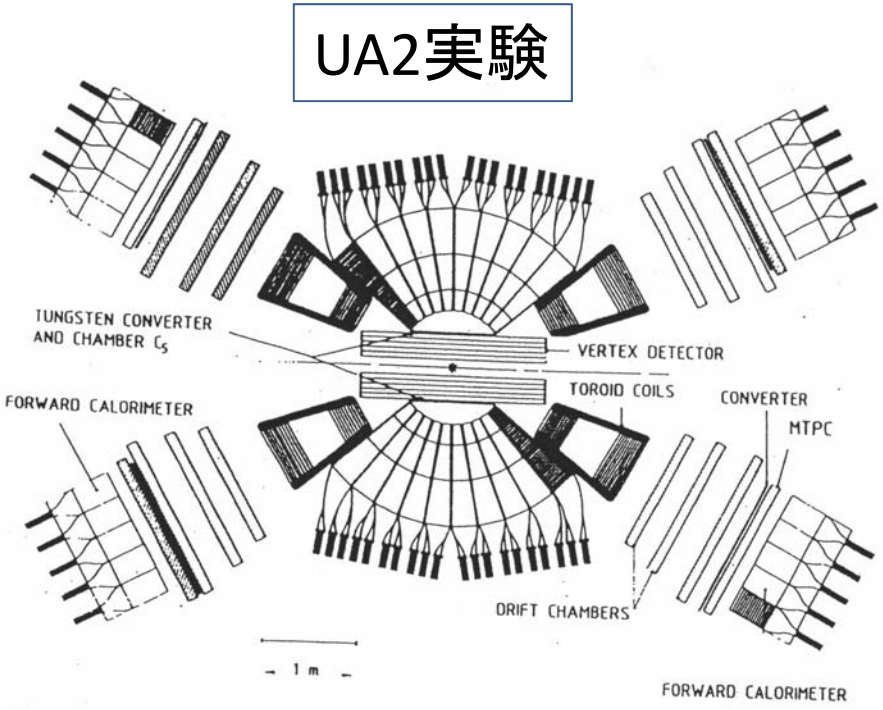
$$W^\pm \to e^\pm\nu,\ \mu^\pm\nu,\ \tau^\pm\nu$$
$$Z^0 \to e^+e^-,\ \mu^+\mu,\ \tau^+\tau^-,\ \nu\bar{\nu}$$

W(80GeV/c^2): νの見えないエネルギーから再構成
Z(91GeV/c^2): di-leptonの不変質量から再構成

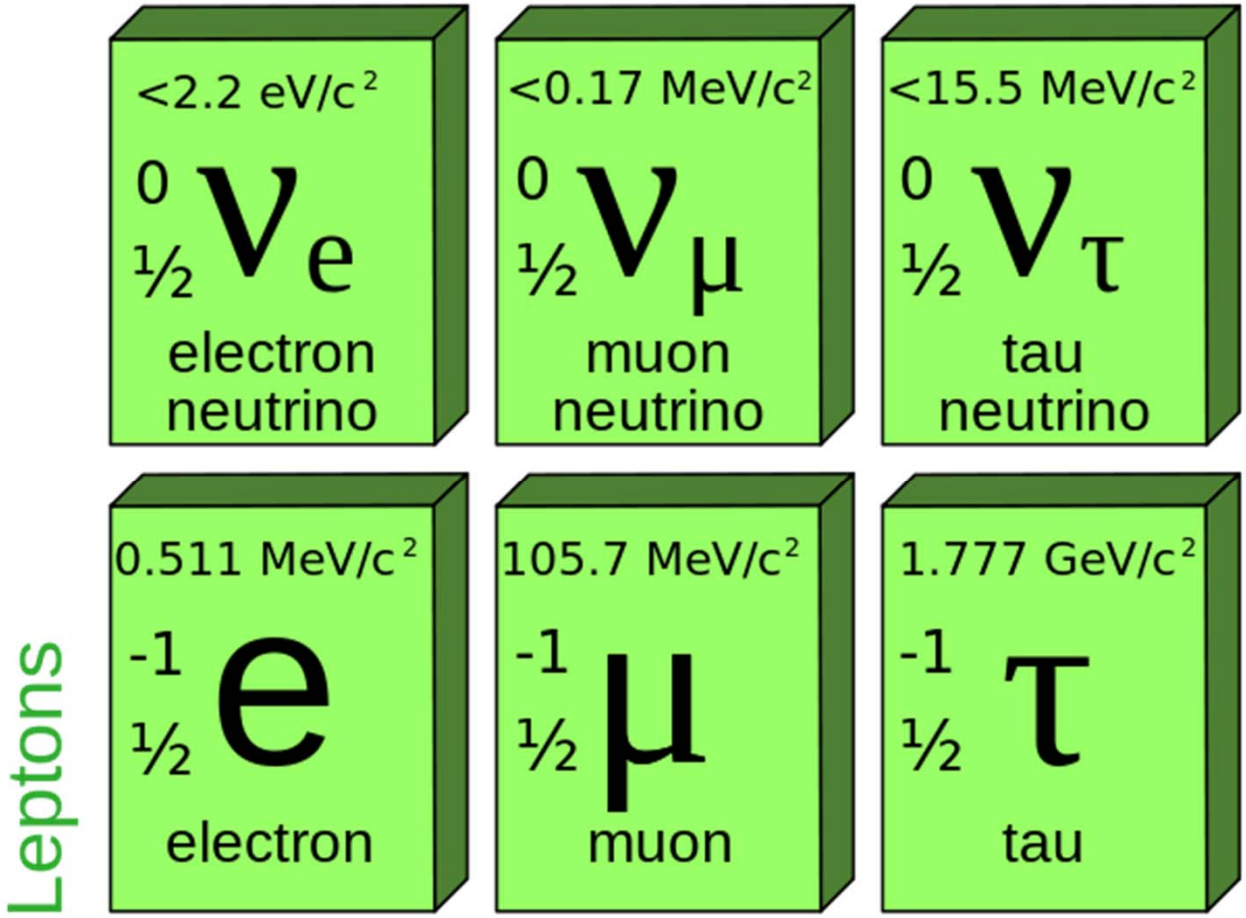
ウィークボソン(W,Z)発見

- W発見
  - UA1: PLB122 (1983) 103, W→eν (6 events)
  - UA2: PLB122 (1983) 476, W→eν (4 events)
- Z発見
  - UA1: PLB126 (1983) 398, Z→ee (4 events), μμ (1 event)
  - UA2: PLB129 (1983) 130, Z→ee (4 events)





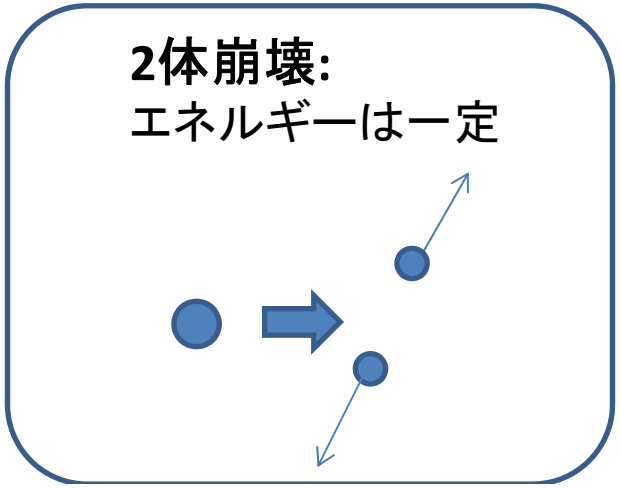
3世代のレプトン

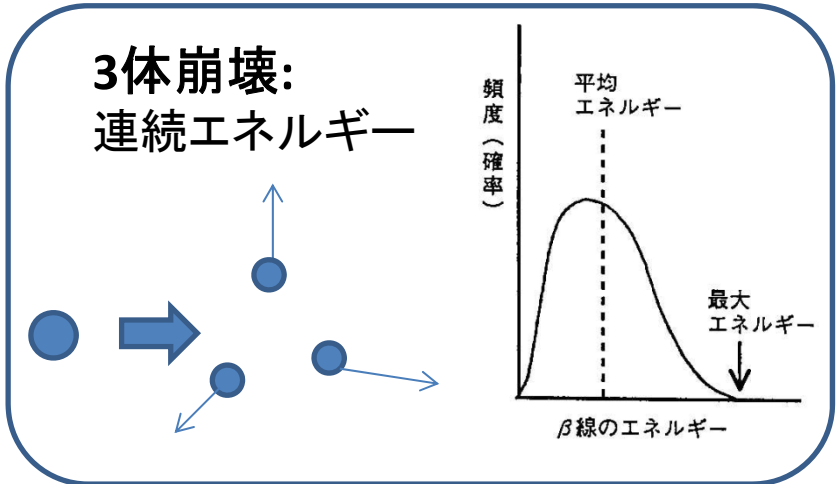


(from Wikipedia)

ニュートリノ

- 1930年、β崩壊のスペクトラムを説明するため、パウリ(W.A.Pauli)によるニュートリノ仮説によってその存在が予言される(質量は非常に小さいか、もしくはゼロ)
  - $n \rightarrow pe^{-}\overline{\nu}_e$
  - ニュートロンは1932年に発見されたため、フェルミのβ崩壊理論の中でニュートリノと命名



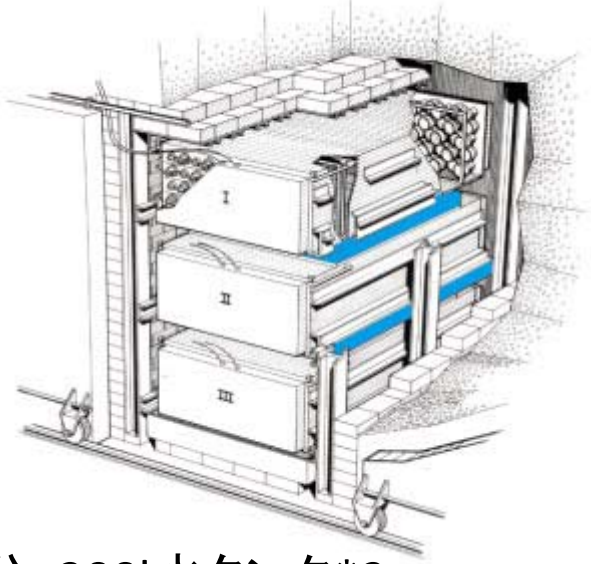


ニュートリノ発見(その1)

- 1956年、クライド・カワンとフレデリック・ライネス達は、サウスカロライナ州・サバンナリバーの原子炉横15mに400lの水タンクを設置し、

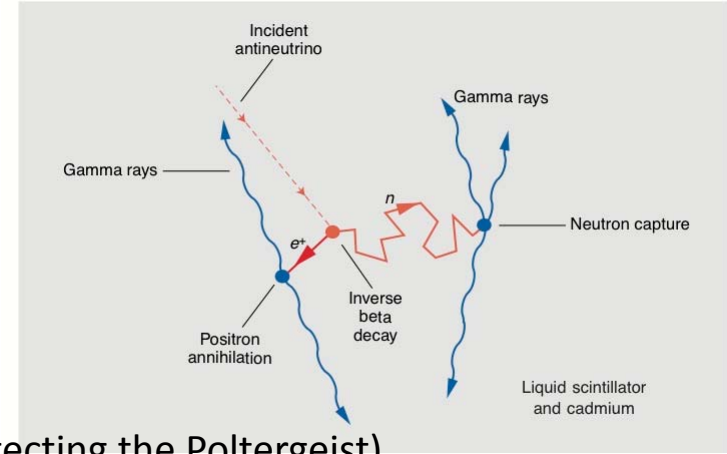
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

の反応より生じた陽電子と中性子を液体シンチレーターで検出することにより、ニュートリノの存在を確認



水色部分: 200l水タンク*2
I,II,III: 1,400l液体シンチレーター+110のPMT*3

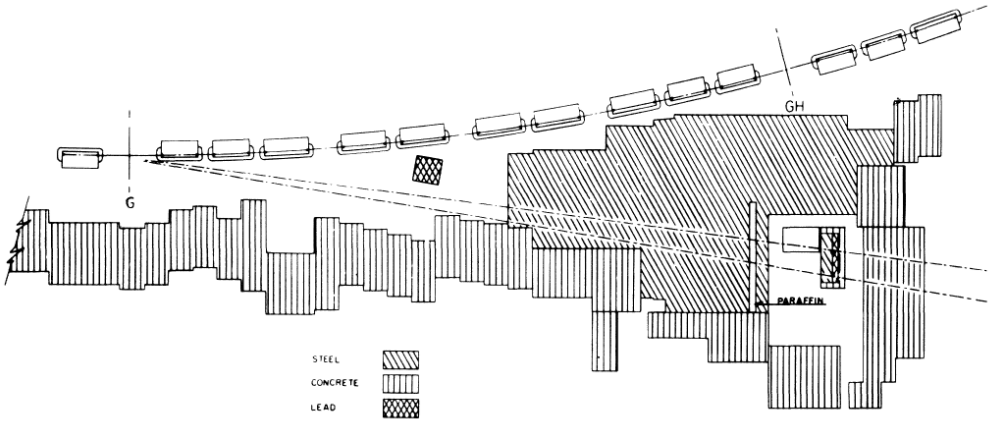
*中性子の検出:
水にカドミウムを混ぜる事で中性子を吸収させ、中性子を吸収した直後出るγ線を検出

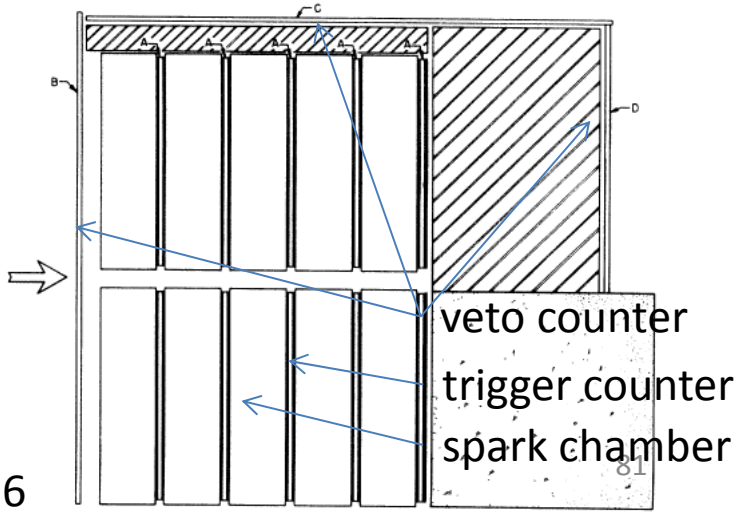


(The Reines-Cowan Experiments: Detecting the Poltergeist)

ニュートリノ発見(その2)

- 1962年、レオン・レーダーマン、メルヴィン・シュワーツ、ジャック・シュタインバーガー達によってν_eとν_μが違う粒子であることが確認される。
  - AGSからの15GeV陽子ビームよりπ中間子を生成し、その崩壊$\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$により生ずる$\nu_\mu$と核子の反応からは$\mu$しか出てこないことを発見(電子は出てこない)
    - $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$, $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$ 許される
    - $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + e^+$, $\nu_\mu + n \rightarrow p + e^-$ 禁止
- ニュートリノは反ニュートリノとは異なる粒子であり、ν_eとν_μは異なる粒子である事が分かった





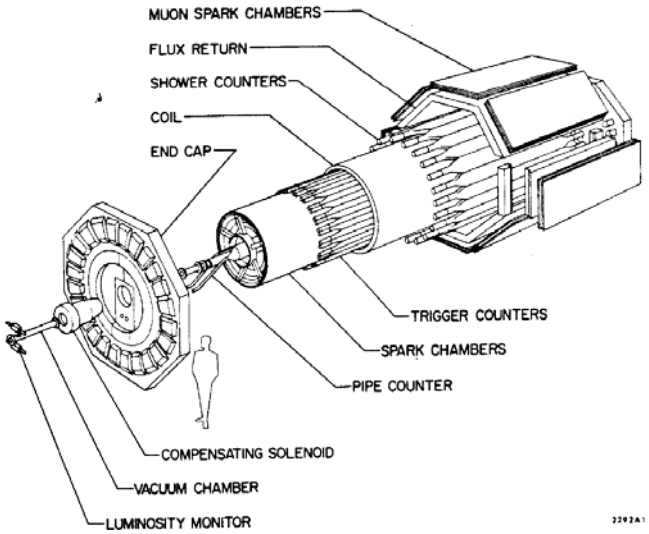
Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 36

τ粒子発見

- 1975年、マーチン・パール達がSLACのSPEARにおける電子・陽電子衝突実験において、$\sqrt{s}$>4GeVのときに

$$e^+ + e^- \to e^\pm + \mu^\mp + X$$

のイベントから発見(64イベント)
  - 質量は1.78GeV/c^2とe/μに比べ重い
  - $\tau^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$などの崩壊モード
  - レプトンでは唯一ハドロンへ崩壊できる($\tau^- \to \pi^- \nu_\tau$等)

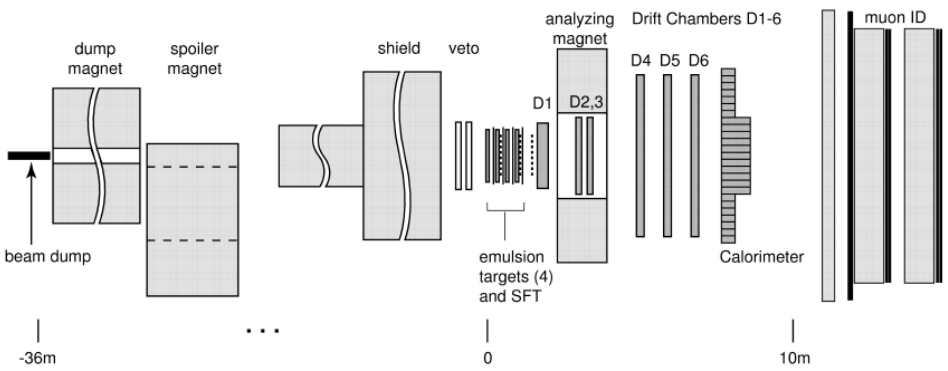


SLAC-LBL検出器

Phys. Rev. Lett. 35, 1489 (1975)

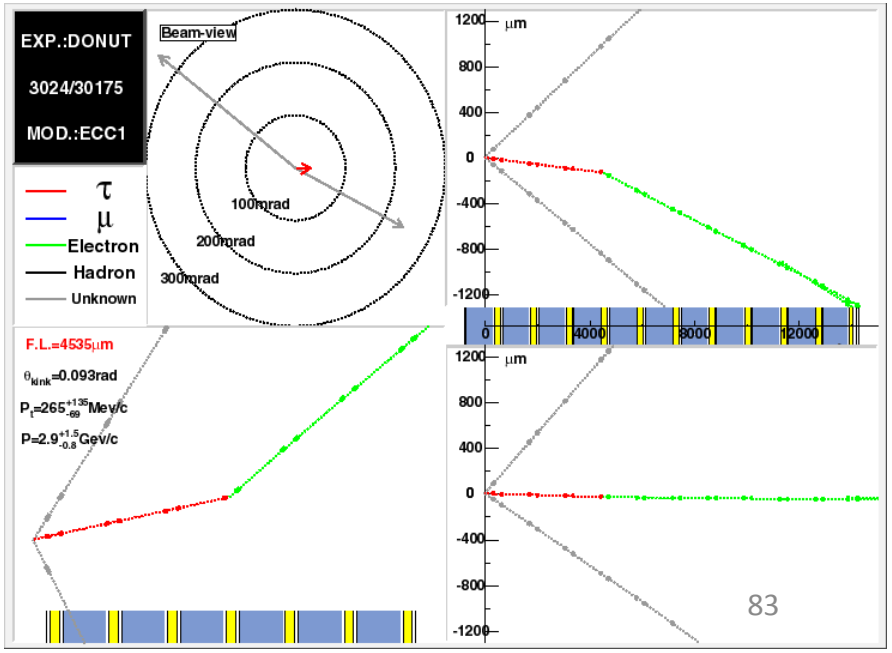
τニュートリノ発見

- 2000年(国際会議での発表は1998年)、DONUT実験は、FNALのTevatronの800GeV陽子ビームをタングステン標的に衝突させ大量のチャーム粒子を生成し、その崩壊から生ずるτニュートリノを写真乾板(エマルジョン)を用いて発見
  - エマルジョンは名古屋大の十八番

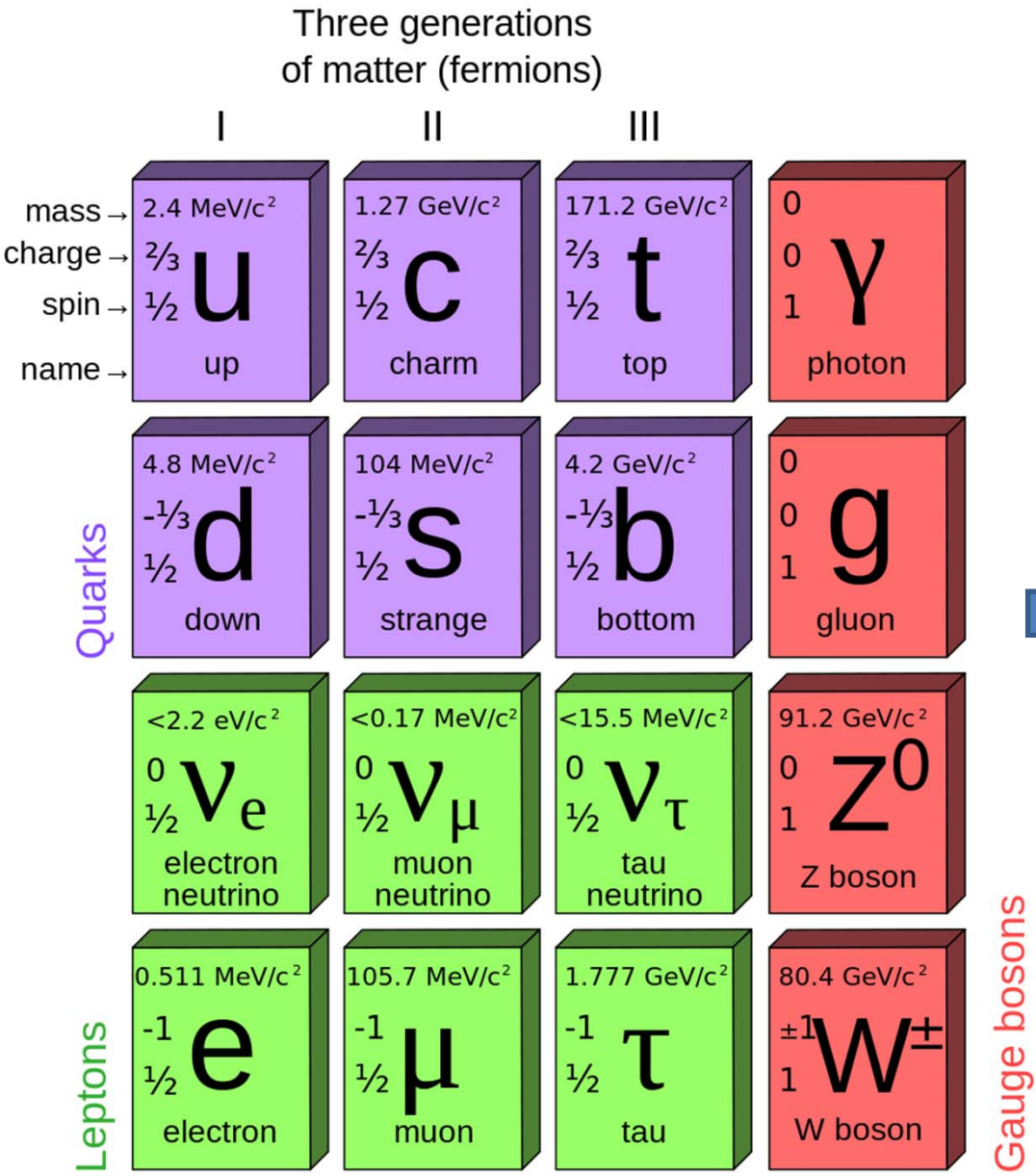


PLB504, 218 (2001)

τ粒子は長短命: cτ=87.11μm



現在分かっている素粒子



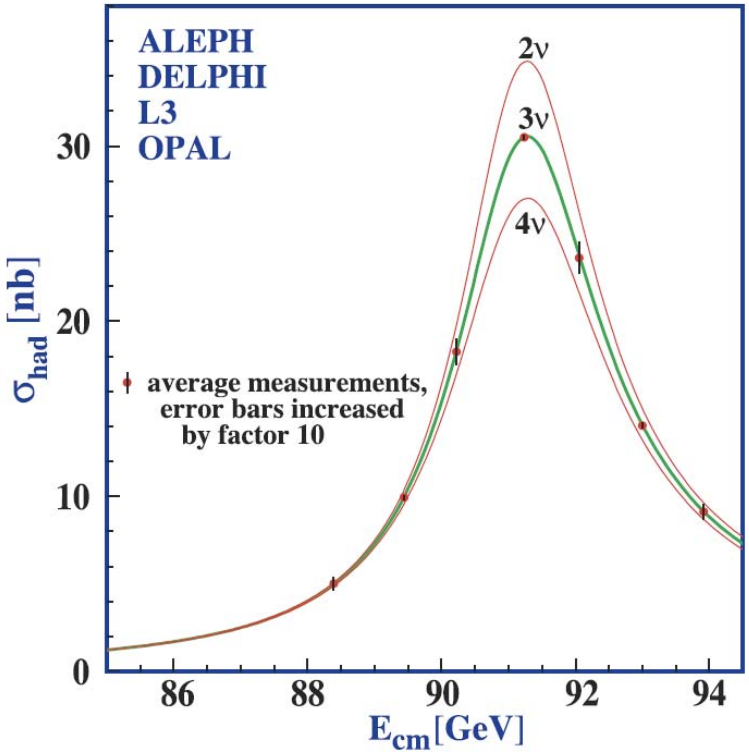
ヒッグスボソン

(from Wikipedia)

4世代以上?

- 標準電弱理論を用いて、Zボソンの質量・崩壊幅・断面積よりレプトンの世代が決まる!
- CERN-LEPにおける陽子・反陽子衝突実験(ALEPH/DELPHI/L3/OPAL)によるZボソンの精密測定によって、レプトンの世代は3である事が結論された
  - $N_F=2.91^{+0.19}_{-0.25}$ (PDG2012)
  - 4世代の可能性は98%の信頼度で却下
  - ただ、$M_\nu>M_Z/2$は否定できない
- しかし、なぜ3世代なのかは未だ分からず

- クォークの世代も現状の実験では4世代以上は見つかっていない
- ゲージ対称性では、クォークとレプトンの世代数は同じであるべし
- 標準理論を越える理論では可能 (大統一理論, etc.)



Particle Data Group (PDG) 2012,
Physics Letters B 231 (1989) 519 等

参考図書類

- 入門書
  - 真木晶弘「高エネルギー物理学実験」(丸善、1997)

- 1冊で網羅している本
  - F.ハルツェン・A.D.マーチン(小林テツ郎・広瀬立成訳)「クォークとレプトン—現代素粒子物理学入門」(培風館、1986)
  - D.H.Perkins「Introduction to High Energy Physics (4th)」(Cambridge University Press、2000)

- 系統的に学びたい方へ
  - 長島順清「素粒子物理学の基礎I」(朝倉書店、1998)
  - 長島順清「素粒子物理学の基礎II」(朝倉書店、1998)
  - 長島順清「素粒子標準理論と実験的基礎」(朝倉書店、1999)
  - 長島順清「高エネルギー物理学の発展」(朝倉書店、1999)