

総合科目
現代物理学への招待 III

— 素粒子物理学(実験) —

物理 原 和彦

- 素粒子探求の歴史
- ハドロンからクォークへ - 標準模型の概要
- 素粒子に大きさがあるか? - 加速器の紹介
- 素粒子探求の現状 重さとは何だろう?

「素粒子物理学」とは

物質の極限的本質を探り、最も基本的な物理法則を探求する研究分野

具体的には、

物質の**構成要素**である素粒子と
それらに及ぶ**相互作用**を理解する

物は何からできているのだろうか
物の間に働く力とは一体何なんだろうか

「素粒子」だから「何から」は分かるけど、なぜ「力」？

以下は、今のところ正しいと考えられている

知らないことをチェックしてみよう

1. 電子は素粒子である
2. 陽子(水素の原子核)は素粒子でない
3. クォークは素粒子である
4. 素粒子には、「物を構成する」と「力を伝える」ものがある
5. 力には、「重力」「電磁気力」「強い力」「弱い力」がある
6. 光(電磁波)はクーロン力を伝える素粒子である
7. W/Z粒子は弱い力を伝える素粒子である

この講義の最後には、

- 上の項目の意味を理解できる。
- 素粒子の質量についてどのように考えられているのか分かる。

総合科目 現代物理学への招待 III

- 素粒子探求の歴史
- ハドロンからクォークへ - 標準模型の概要
- 素粒子に大きさがあるか？ - 加速器の紹介
- 素粒子探求の現状

元素 (element, ^{アルケー}) = 物質を構成する基本的要素として導入

世界の各地で、数個の「元素」により、すべての物質が構成できていると考えられた...
数例を挙げると

古代ギリシャ (BC 6 ~ 4 世紀)

1 元素: ターレス「水」、アナクシメネス「空気」、クセノファネス「土」、ヘラクレイトス「火」

4 元素: エンペドクレス「火、空気、水、土」 アリストテレスの4元素論

原子論: デモクリトス

原子=atom は不生・不滅・無性質・分割不可能な無性質の物質単位であって、たえず運動し、その存在と運動の場所として 空虚 が前提とされる。

アリストテレスによる反論 (無性質のアトムどうしに作用は及ぼされない。作用により性質は変わるだろうから無性質のアトムの存在は不可能)

以降、近世までアリストテレスの考えが継承された。

結局、「atomは無性質である (quarkには性質がある)」が原子論の問題であった

古代インド (BC 5 世紀)

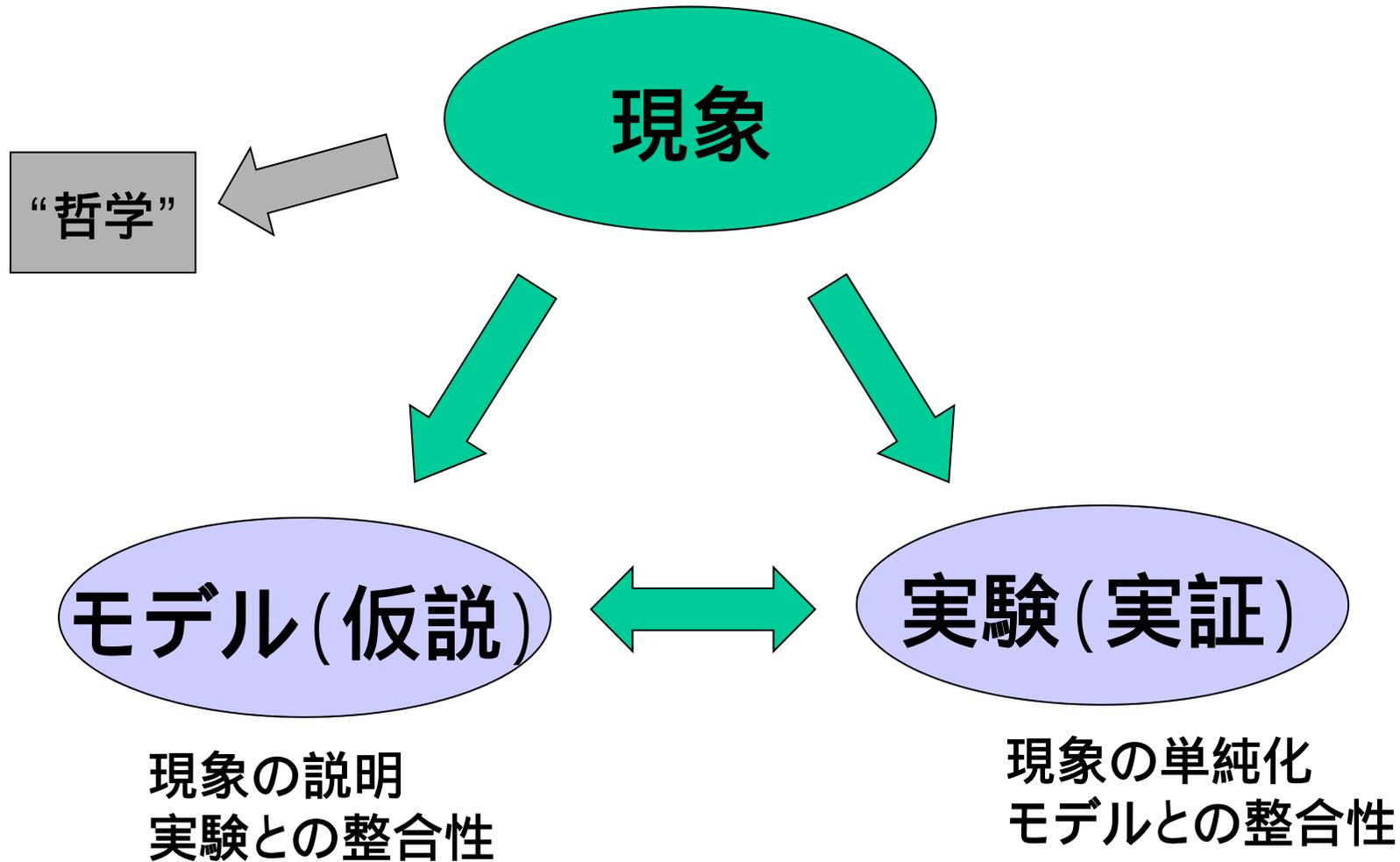
釈迦が登場する前 四大^(しだい) = 「地、水、火、風」 + 「苦、楽、霊魂」 +

古代中国 (BC 3 世紀)

鄒衍^(すうえん) 陰陽五行説 = 「闇、光、木、火、土、金、水」

近代自然科学の方法論

- 単なる「思惟」は自然科学ではない -
- 実験による検証が不可欠 -



* 自然現象を記述できそうなモデルをたて実験で検証する、あるいは、単純化した実験結果を受け、自然現象を記述できるモデルをたてる。

近世の「元素」*

素粒子 = elementary particle

近世には実験検証を経ることが可能になった

4元素説に基づく錬金術を実現しようと実験技術が蓄積された

ボイル(1662)

分割できない物質としての元素(硫黄、水銀、銅、銀など)
4元素説を否定し原子論へ

ラヴォアジエ(1774)

約30種類の元素を確認(化学反応での質量保存):

ドルトン(1802) 原子モデル(倍数比例の法則)

アボガドロ(1811) 分子モデル

メンデレーエフ(1869)

周期表: 約60種類の元素を分類し、27の新元素を予言

(メンデレーエフの考え方は予言能力があるため革新的なもの: 予言能力のある理論は重要)

*現在は、原子を「元素」とよぶが、原子は本来の元素ではない

「真の」素粒子探求の歴史

- 1897 陰極線の正体は「**電子**」である (Thomson)
- 1909 ~ 原子は核とその周りの電子から構成される (Rutherford)
- ~ 1931 原子核は陽子・中性子で構成される
- 1933 **反粒子**(陽電子)を宇宙線中に発見 (Dirac, Anderson)
- 1964 **クォーク**模型(核子は素粒子ではない) (Gell-mann, Zweig)
- 1970年代 素粒子の**標準模型**ができる (Weinberg, Salam, Glashow)
- 1983-85 弱い相互作用を伝える**W,Z粒子**の発見 (UA1/UA2)
- 1995 6つ目のクォーク**top**発見 (CDF)
- 2012 重さを与える **ヒッグス**粒子の発見(?)

主な粒子の発見の歴史をふりかえる
発見には工夫が必ずあるはず

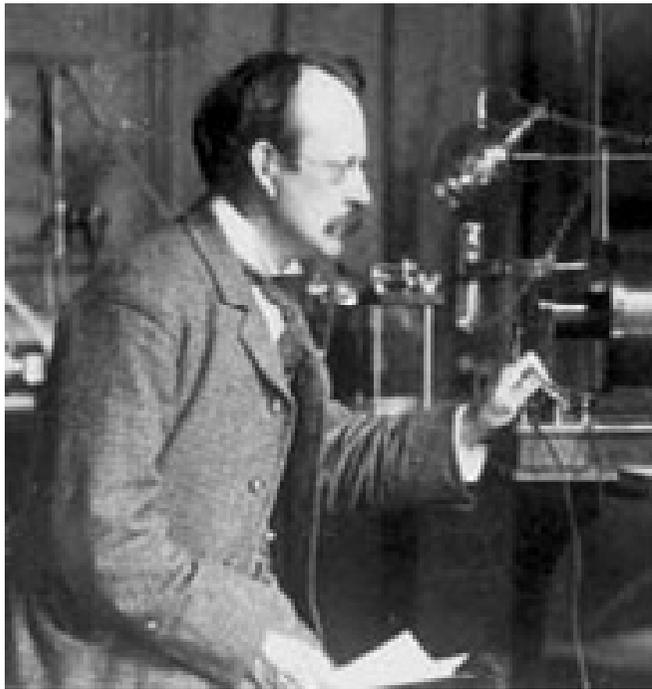
電子の発見

「電子」 = 1891年電荷を担う仮想粒子として提唱

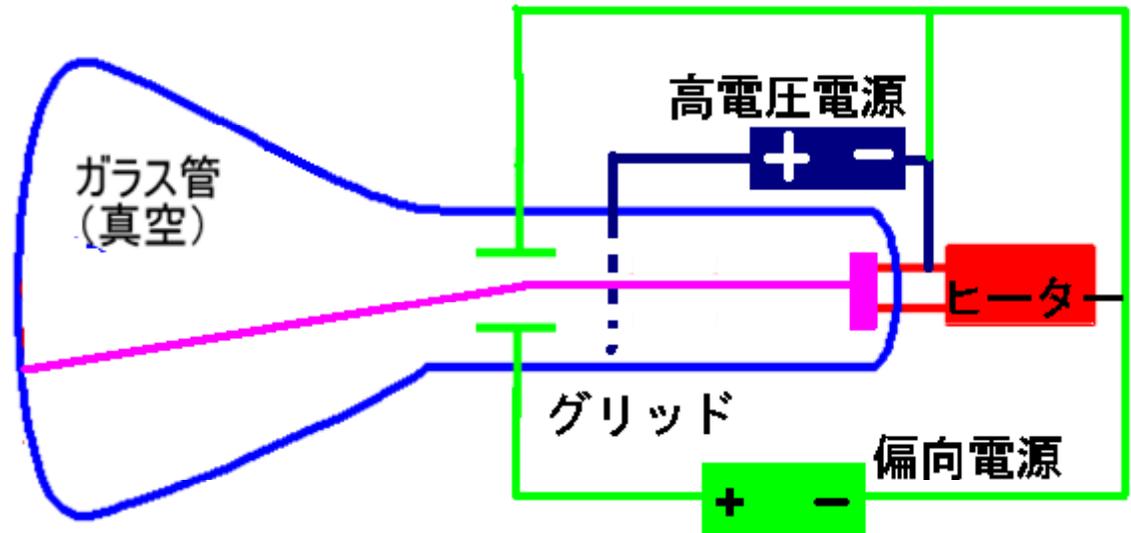
1897年 J.J. Thomson

クルックス管で、フィラメントを熱すると正の電極に向かう「流れ」 (= 陰極線) の正体は、負の電荷を持った粒子 = 電子

(波動であるか粒子であるか議論されていたが、トムソンは真空度を上げ、電場や磁場により偏向する実験をすることで、粒子と結論した)



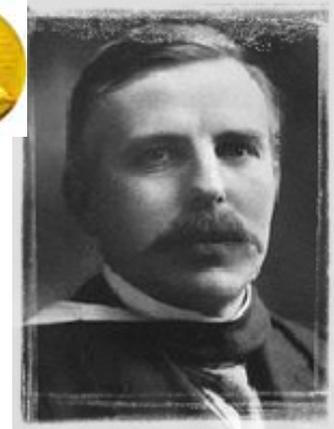
クルックス管



テレビのブラウン管は投影面に蛍光剤 (あるいは3原色の発光剤) を塗ったもの。偏向電圧を変化させることで特定の蛍光剤のみを発光させる

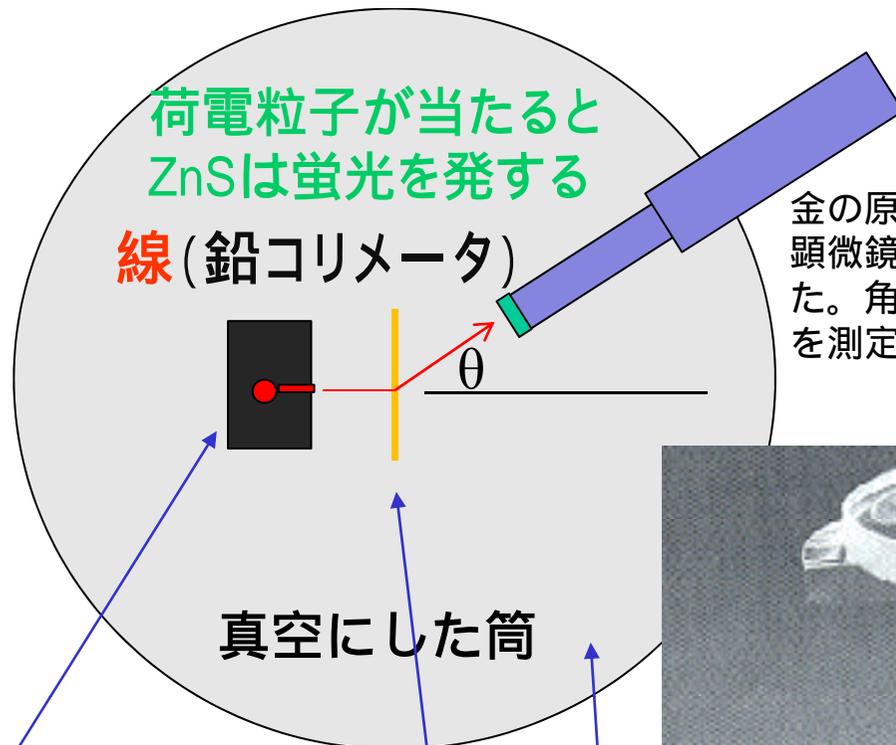
電荷をもった粒子ならば磁場や電場の影響を受ける 実際に観察しよう!

Rutherfordの実験

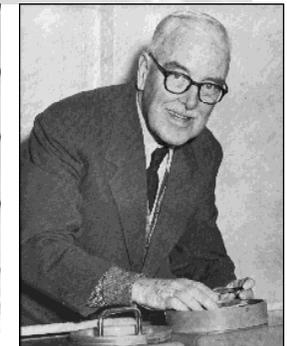
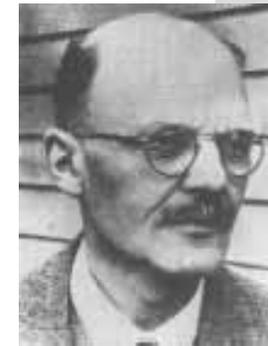


Rutherfordの実験は、素粒子実験の「起源」：
エネルギーの高い粒子をぶつけて反応をみる

1911 Rutherford/Geiger/Marsden



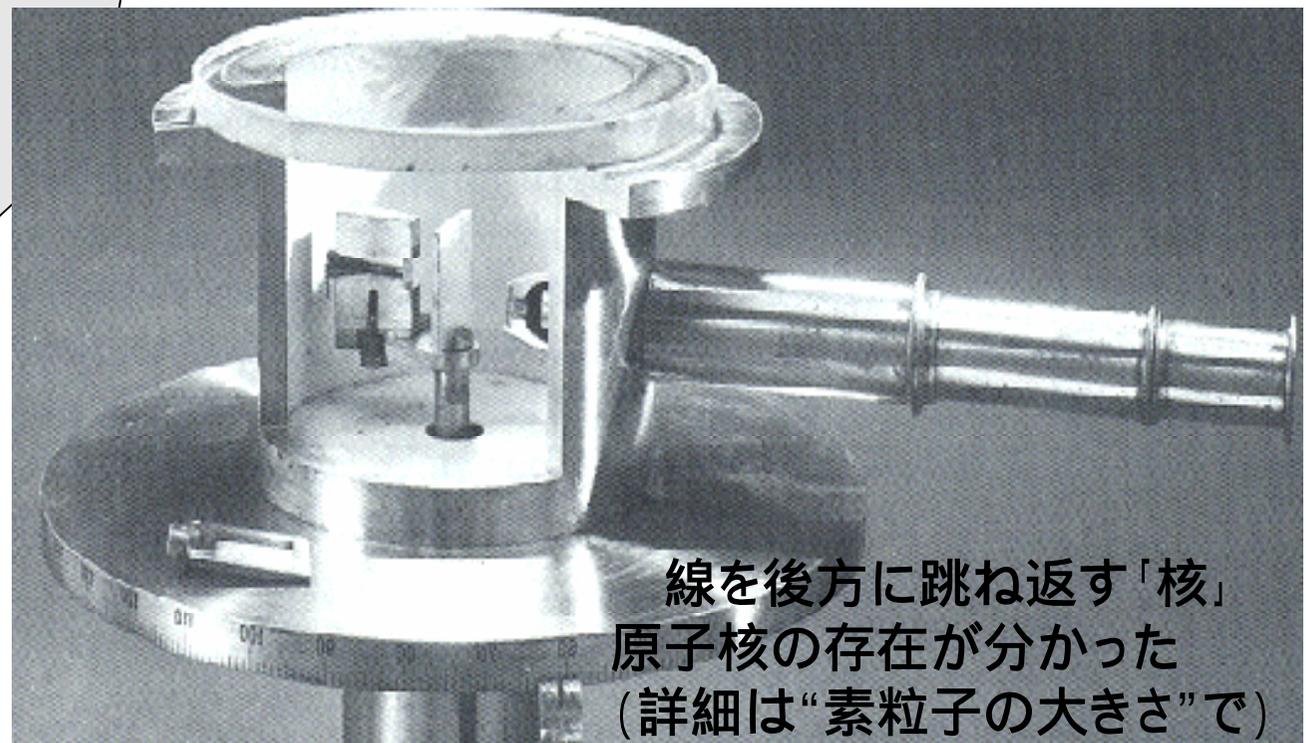
金の原子により散乱された α 線を顕微鏡につけたZnSにより観測した。角度 θ を変え、散乱角の分布を測定した。



1. 線源: 加速器が無い当時、最も高エネルギーの粒子を発生

2. 金箔: 薄くでき吸収を抑える

3. 真空: 散乱や吸収を抑える



線を後方に跳ね返す「核」原子核の存在が分かった (詳細は「素粒子の大きさ」で)

陽子の発見

Rutherford散乱の装置で、金箔なしで真空を空気に戻すと、様相が変わる...

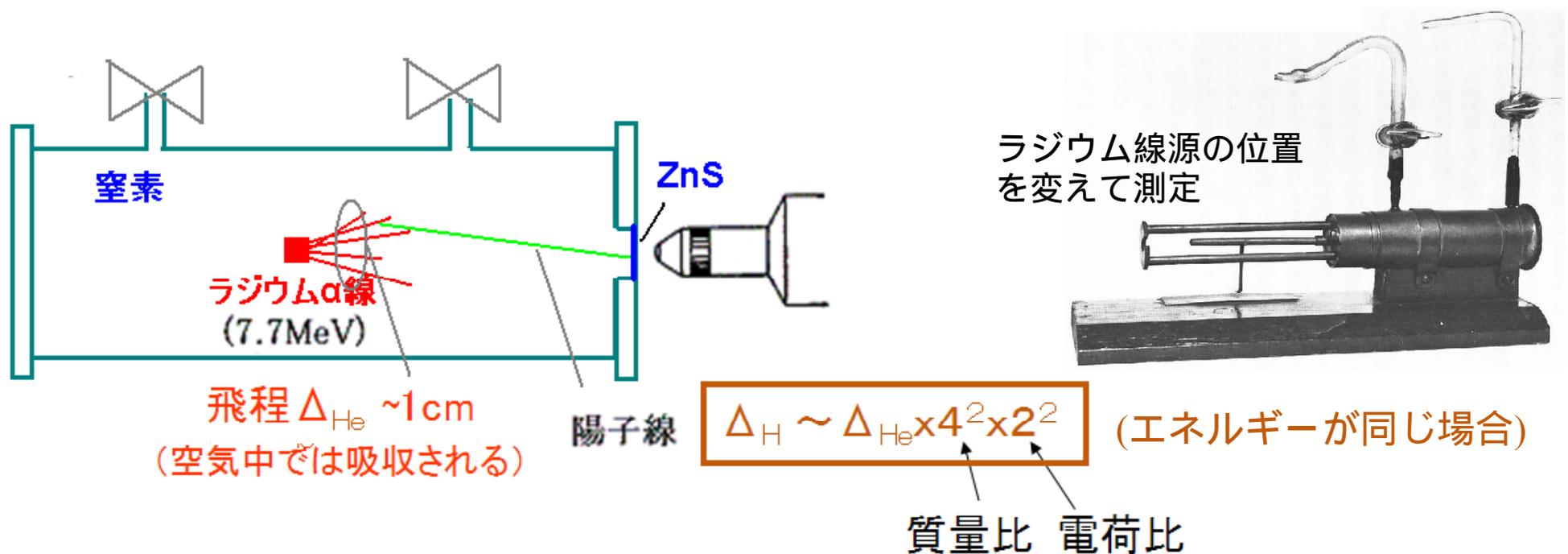
Marsden (1915) 線(He) + 空気 Heより**透過力の強い粒子***が発生

原子が電子と核からなるので、核が正電荷であることは分かってきた。Rutherfordは透過力の強い成分が特定の粒子であるかを、単純化した雰囲気(=窒素)にし、粒子の飛程を計測できる霧箱(後述)で測定し、単一の粒子(=陽子)である同定した。

Rutherford (1919) ${}^4\text{He} + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + {}^1\text{H}$ の反応を同定

結論: 「原子核には**水素核**が含まれる」 proton (ギリシャ語でfirst particle)
「元素は変換する」

* α 線(=He⁴⁺)は空気や窒素中では1cm程度で吸収される。透過力の強い粒子は、Heより軽く電荷も少なく、実際、陽子の飛程はHeの数10倍になる



陽子核反応の条件

α粒子は原子核まで到達できるか？（クーロン反発力と初期運動エネルギーの関係）

質量 m の α 粒子が静止した質量 M の原子核（原子番号 Z ）に正面衝突する。クーロン反発力のために r_0 より近くには近づけない。

$$\begin{array}{ccc} \text{He} & \text{Z} & \\ \circ & \circ & \\ \vec{v} = v_0 & v=0 & \Rightarrow \quad \begin{array}{c} \vec{v} \\ \circ \end{array} \quad \begin{array}{c} \vec{v} \\ \circ \end{array} \\ & & \text{終状態} \end{array} \quad \text{運動量保存} \quad mv_0 = mV + MV \quad \therefore V = \frac{m}{m+M} v_0$$

あるいは $E = \frac{1}{2}mv_0^2$ (運動エネルギー) を用いると $V = \frac{m}{m+M} \sqrt{\frac{2E}{m}}$ (1)

終状態では、2粒子の運動エネルギーに加え、クーロン力による位置エネルギー $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \Rightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot Ze}{r_0}$

エネルギー保存より $E = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}MV^2 + \frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_0}$ (2)

(2) より V を消去して $E = \frac{1}{2}(m+M) \cdot \frac{2mE}{(m+M)^2} + \frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_0}$

$$\therefore r_0 = \frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{m+M}{ME}$$

Rutherford の実験 Ra の α は $E = 7.7 \text{ MeV} = 7.7 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.23 \times 10^{-12} \text{ J}$, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \sim \text{C}^2/\text{J}\cdot\text{m}$ とすると

$$\frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 E} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 \cdot \text{C}^2}{2 \times 3.14 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{J}\cdot\text{m} \cdot 1.23 \times 10^{-12} \text{ J}} = 3.74 \times 10^{-16} \text{ m} \quad \therefore r_0 = 3.74 \times 10^{-16} \times \frac{m+M}{M} \cdot Z \text{ [m]}$$

target が ${}^4_7\text{N}$ の場合 $r_0 = 3.74 \times 10^{-16} \times \frac{14+4}{14} \times 7 = 3.4 \times 10^{-15} \text{ m} \sim 3.0 \times 10^{-15} \text{ m}$

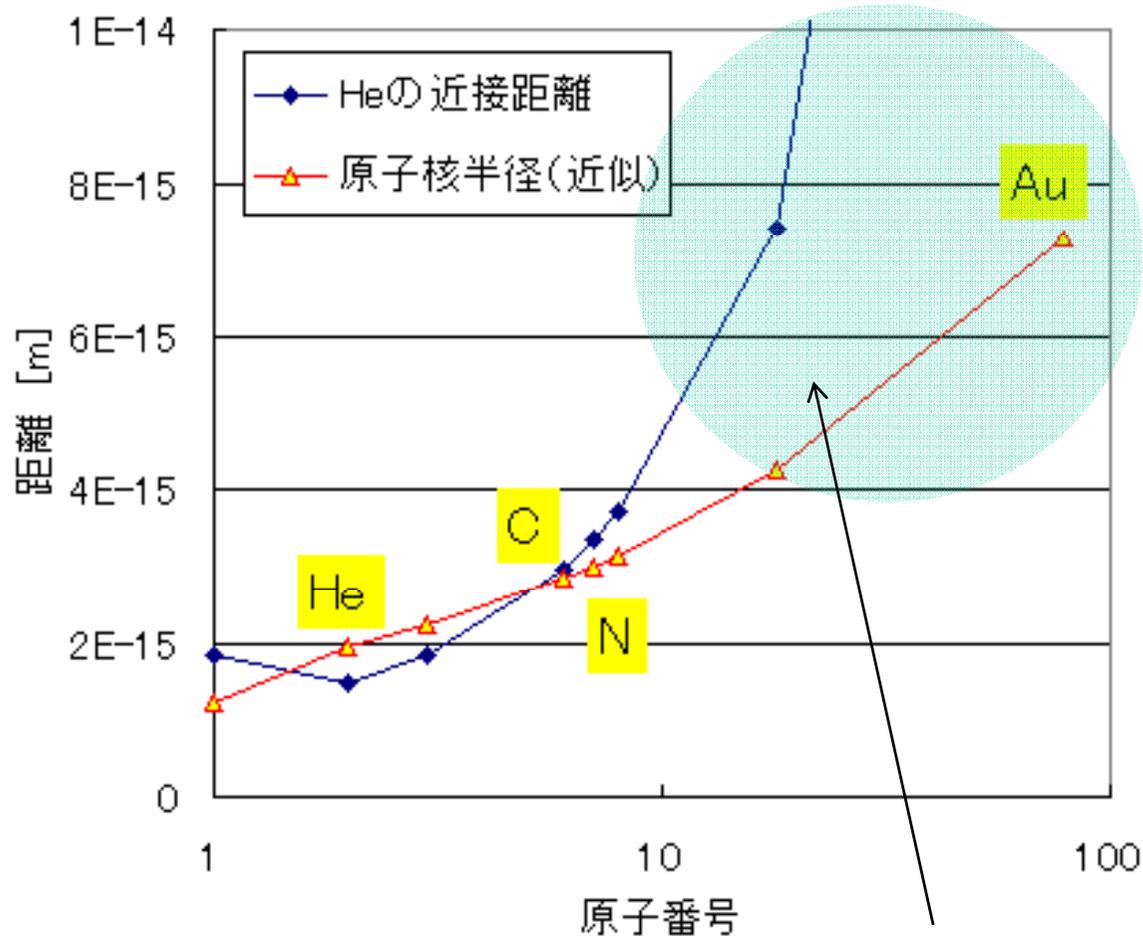
${}^{197}_{79}\text{Au}$ の場合 $r_0 = 3.74 \times 10^{-16} \times \frac{197+4}{197} \times 79 = 3.0 \times 10^{-14} \text{ m} \gg 7.2 \times 10^{-15} \text{ m}$

今では核半径は $\sim 1.25 \times 10^{-15} \text{ m} \times \sqrt[3]{\text{質量数}}$ と知られている。

Rutherford の実験 ${}^4_7\text{N}$ の target ではぎりぎり α 粒子は核反応できた。

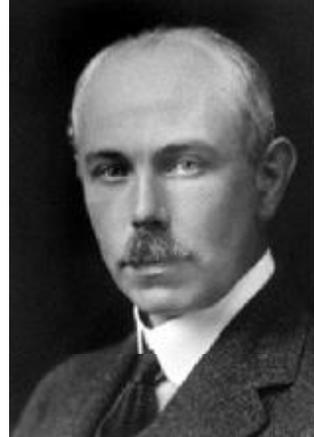
陽子核反応の条件

Raの線を使う場合



クーロン反発により、金では、核反応を起こすほど近づけない
Rutherfordの窒素ガスでは、核反応がぎりぎり観測できた
NかHe(気体)でしか陽子発生を観測できなかった！
または、薄い軽い金属(Be,B,C)をターゲットにして、真空にする

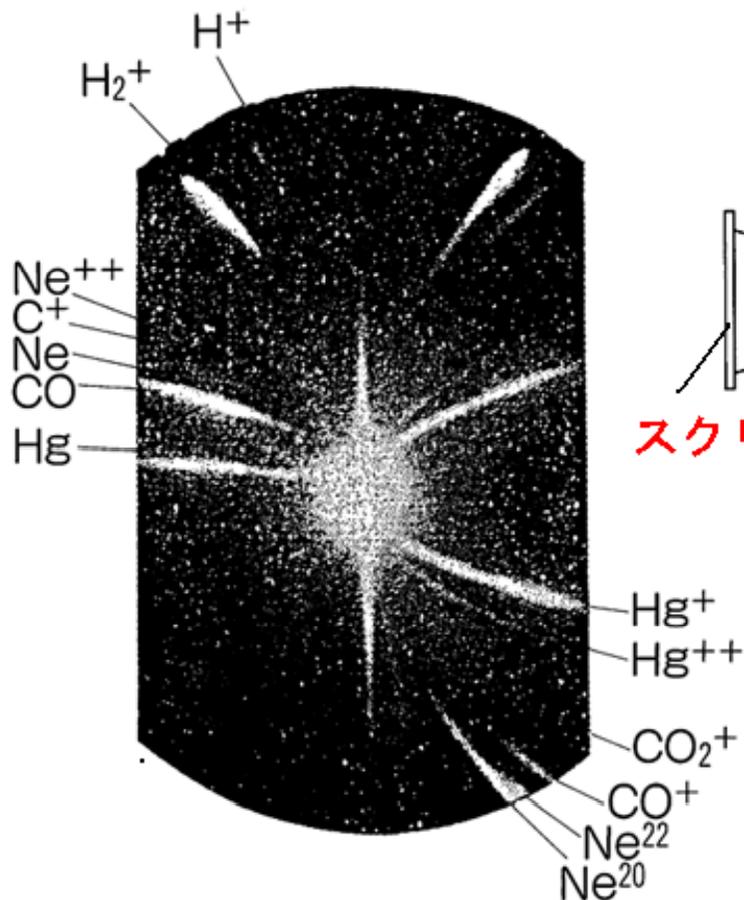
中性子：兆候と予言



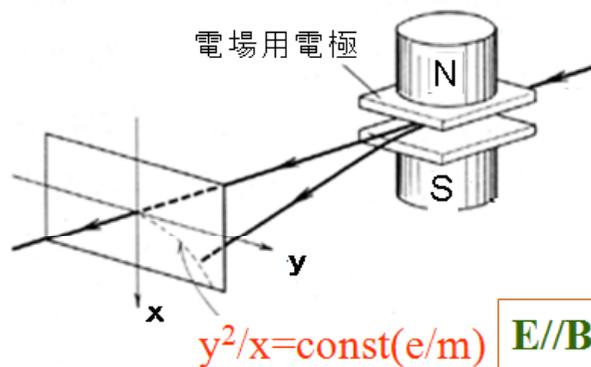
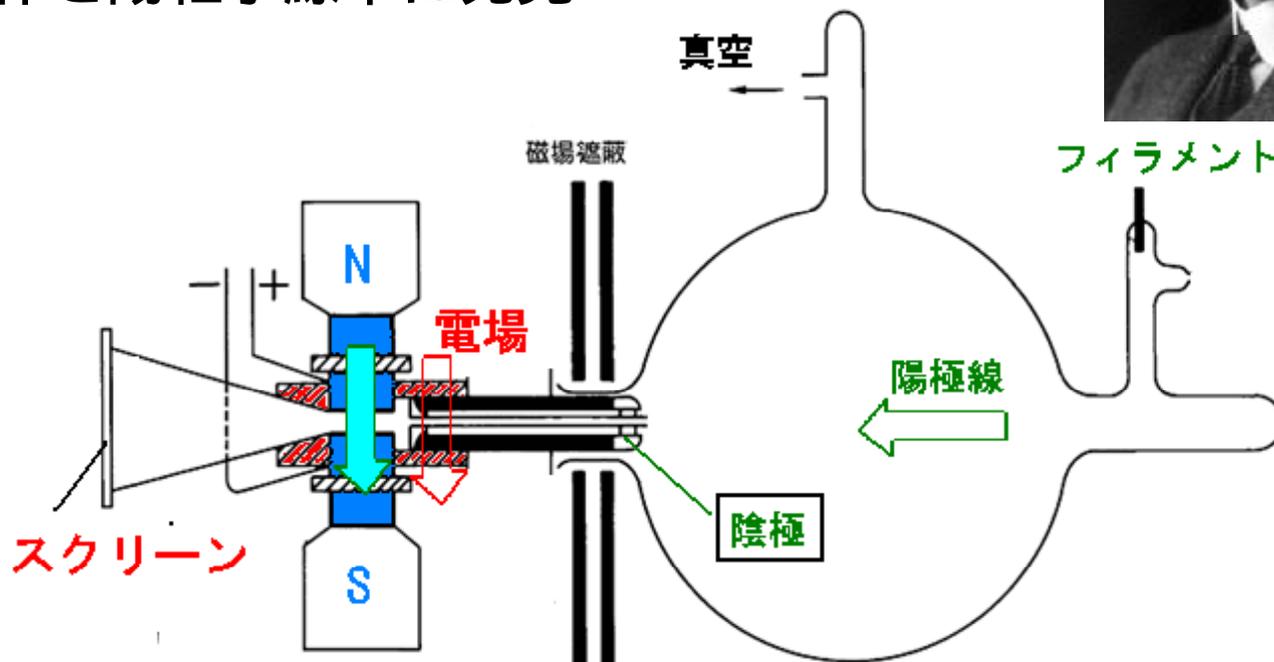
Thomson

Thomson/Aston (1913 ~)

ネオンや他種の同位体を陽粒子線中に発見



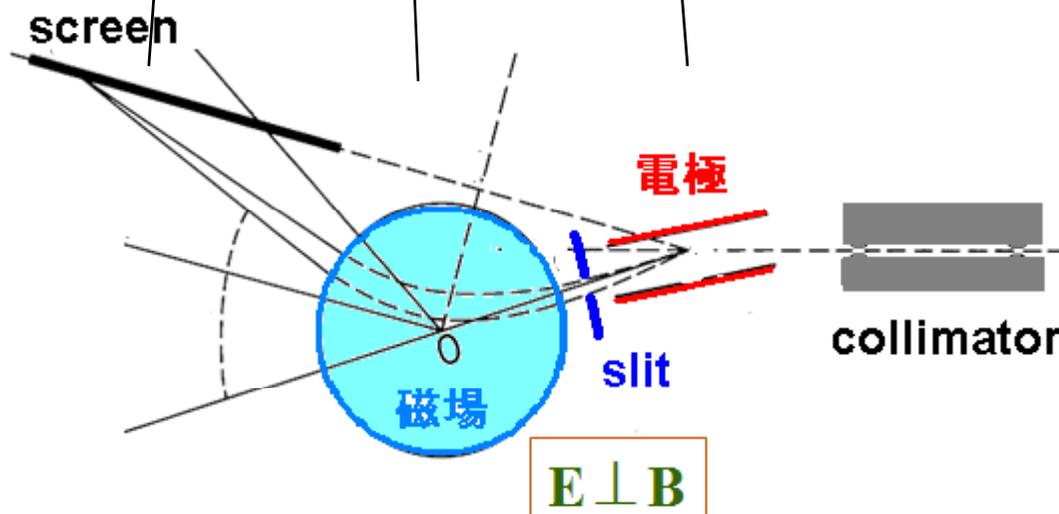
Neの同位体を観測
(図は上下が右図のy)



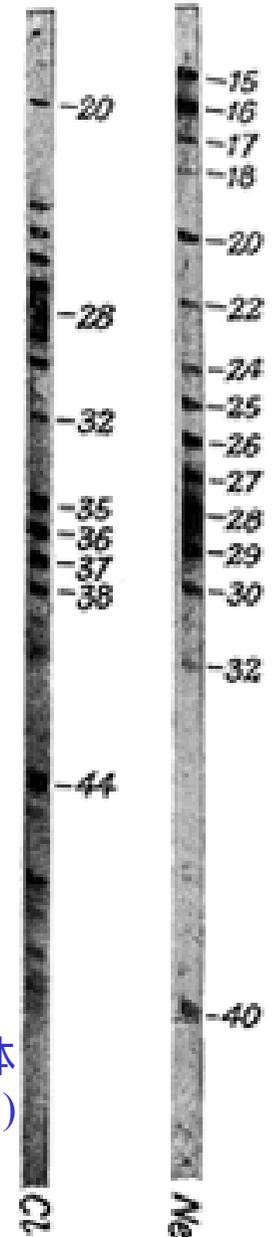
速度と電荷の違いにより
同種イオンは放物線上に
分布する

原子核には陽子程度の重さを持つ中性粒子がある
Rutherford (1920) 中性子の存在を予言

質量分析器の改良 Aston



1919年の
データ
(最初の同位体
発見から6年)



Astonは電場と磁場の方向を垂直にすることで、運動量が異なっても同じ e/m のイオンを焦点へ集めた：現在の質量分析器も同じ原理

中性子の発見

陽子より透過力があるから粒子は中性

Bothe/Becker (1930) + 原子核 1cmの鉛を貫く粒子をガイガー管で計測

Joliot-Curie夫妻(1931) + Beから発生する粒子はHを含む物質に当たると陽子を発生

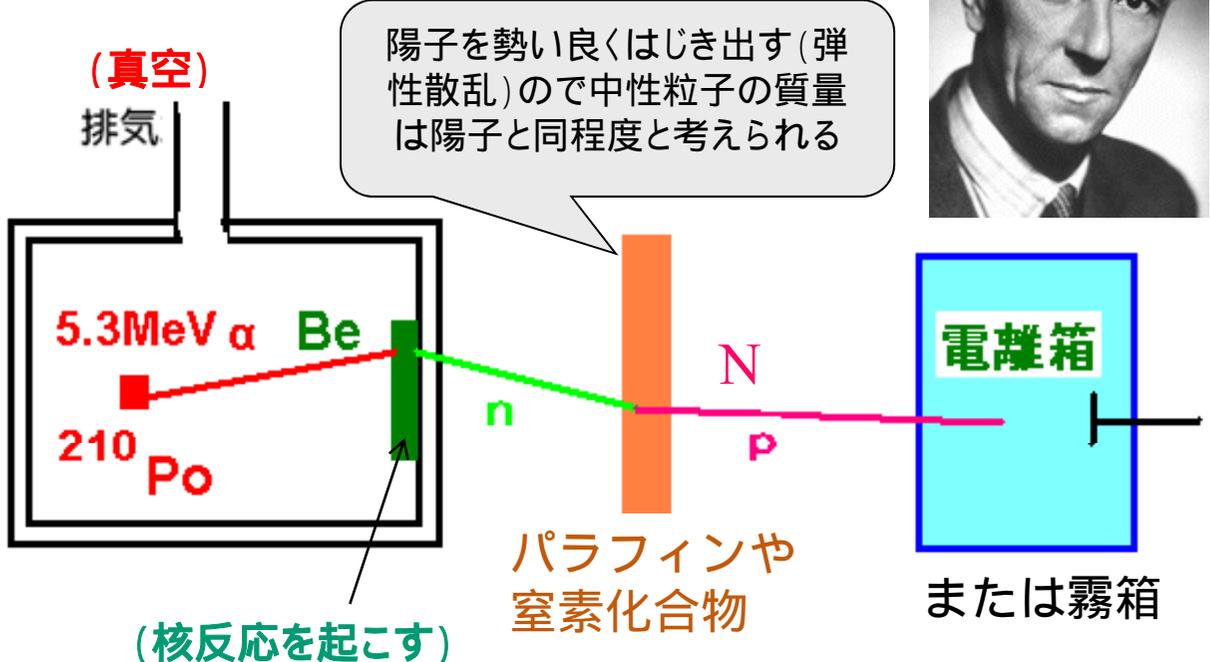
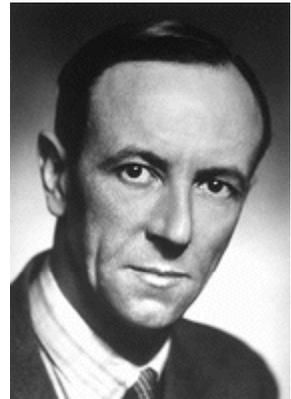
彼らは高エネルギーのガンマ線と推測した(エネルギーから矛盾している)。

Chadwick (1932) 中性子の発見

中性粒子がたたき出す電離箱*や霧箱内の核(陽子や窒素原子核)の速度を、パルス高や飛程から測定した。これより中性粒子の質量を得た(次頁)。



Rutherfordの弟子であるChadwickは中性子予言を知っていたので、中性粒子が高エネルギーのガンマ線であろうとの考えにとらわれることはなかった。



電離箱* (気体で満たし、イオン化された電荷を集める。気体を窒素にして、直接nとの散乱も測定した)

画像 1

画像 2



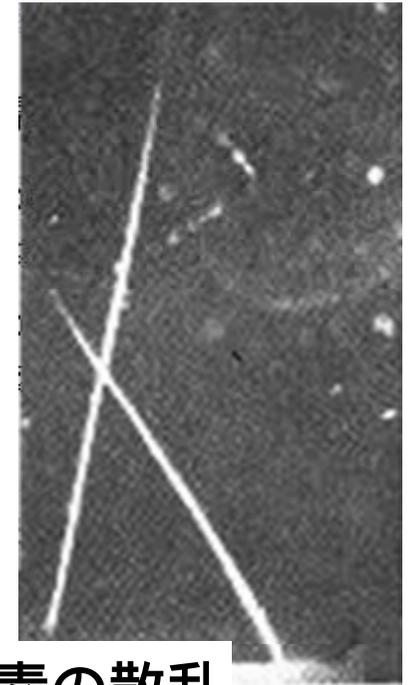
霧箱



霧箱は1897年にウィルソンにより発明

アルゴンとエチルアルコールなどの混合
気体を断熱膨張により過飽和状態にする

荷電粒子の通過で生成された正・負イオン
を核として霧滴の列が形成



nと水素の散乱

霧滴生成の空間

可動ピストン

真空

これを引くと弁
が開き真空により
可動ピストン
が急に下がる

真空ポンプへ

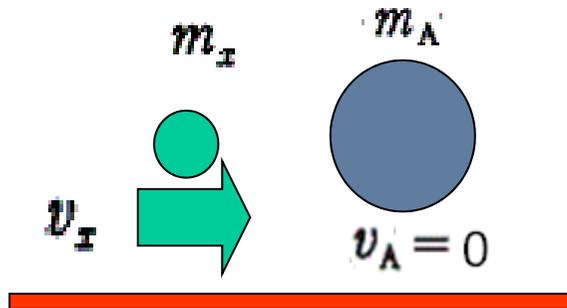


nと窒素の散乱

中性子の質量

Chadwickは、未知の粒子 m_x と最初止まっている核Aとの衝突を以下のような計算から見積もった

衝突前



運動量保存: $m_x v_x = m_x v_x' + m_A v_A'$

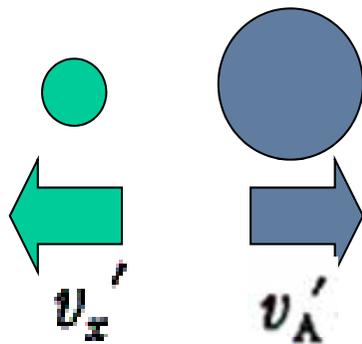
エネルギー保存: $\frac{1}{2} m_x v_x^2 = \frac{1}{2} m_x v_x'^2 + \frac{1}{2} m_A v_A'^2$

v_x' を消去: $v_A' = \frac{2m_x v_x}{m_A + m_x}$

別の核Bとの衝突の場合も同様に求められるので

$$\frac{v_A'}{v_B'} = \frac{m_B + m_x}{m_A + m_x}$$

$$m_x = \frac{m_B v_B' - m_A v_A'}{v_A' - v_B'}$$



衝突後

A=H, B=Nの速度を霧箱で測定し $m_x = 1.16m_H$

最初の素粒子の枠組み

1930年代： 陽子、中性子、電子 これらが素粒子と考えた

反粒子の予言

Schroedinger(1926)方程式(大学3年)は相対論を満たしていない

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi(\mathbf{r},t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\mathbf{r},t)$$

微分が時間と空間で対称に扱われていない

Dirac(1928)方程式(大学4年): スピン1/2粒子の相対論的量子場の運動方程式

$$i\hbar\frac{d\psi}{dt} = \left[c\sum_{i=1}^3\alpha_i p_i + \alpha_0 mc^2 \right] \psi$$

但し $E^2 = (mc^2)^2 + \sum_{j=1}^3 (p_j c)^2 = \left(\alpha_0 mc^2 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j p_j c \right)^2$ を満たす事を要請

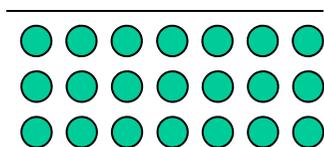


EinsteinのE-pの関係式 関係式は E^2 の式なので負のエネルギーでも解になれる

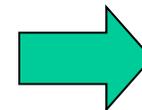
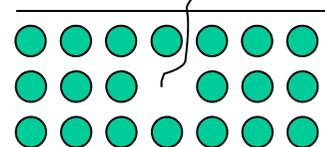


負の解について: 1930 Dirac「空間は負のエネルギー電子で詰まっている。1つが飛び出ると、空間には正の粒子が残るように見える」 真空が負に帯電しているのは不合理であるので、1931 Dirac「電荷正の粒子は電子の反粒子である」

真空は電子で占拠



電子 ● 負エネルギーの電子



反粒子 = 質量やスピンは粒子と同じ、他は反対の性質

陽電子（電子の反粒子）の発見



Anderson(1932)：霧箱により、宇宙線中に電子と同じ質量で正電荷の粒子を発見
鉛板を入れることで、減速させ、粒子の入射方向を決定できる（写真では、粒子は上から下へ）

荷電粒子は磁場中で円運動する。
ローレンツ力と遠心力のつりあいから

$$evB = \frac{mv^2}{r}$$

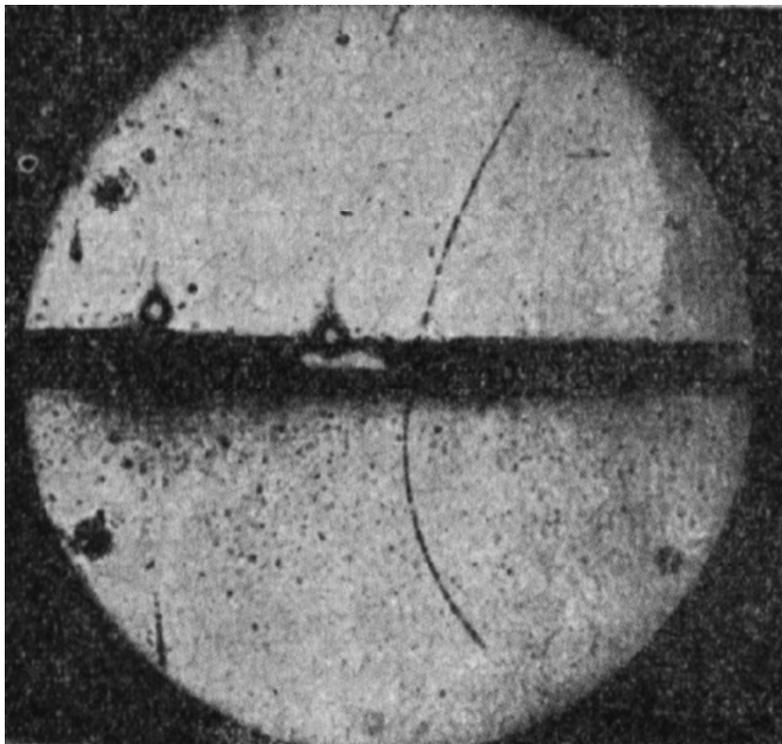
これよりSI系で $p[\text{kgm/s}] = e[\text{C}]r[\text{m}]B[\text{T}]$

$$1\text{GeV}/c = \frac{10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{0.3} \text{ kgm/s}$$

の関係から、GeV/cで表すと、

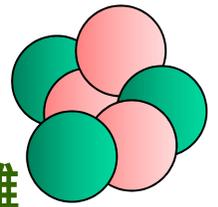
$$p[\text{GeV}/c] = 0.3qr[\text{m}]B[\text{T}] \quad (\text{但し } q \text{ は電荷数})$$

例 $B = 0.1 \text{ T}$
 $r = 0.1 \text{ m}$ \longrightarrow $p = 3 \text{ MeV}/c$



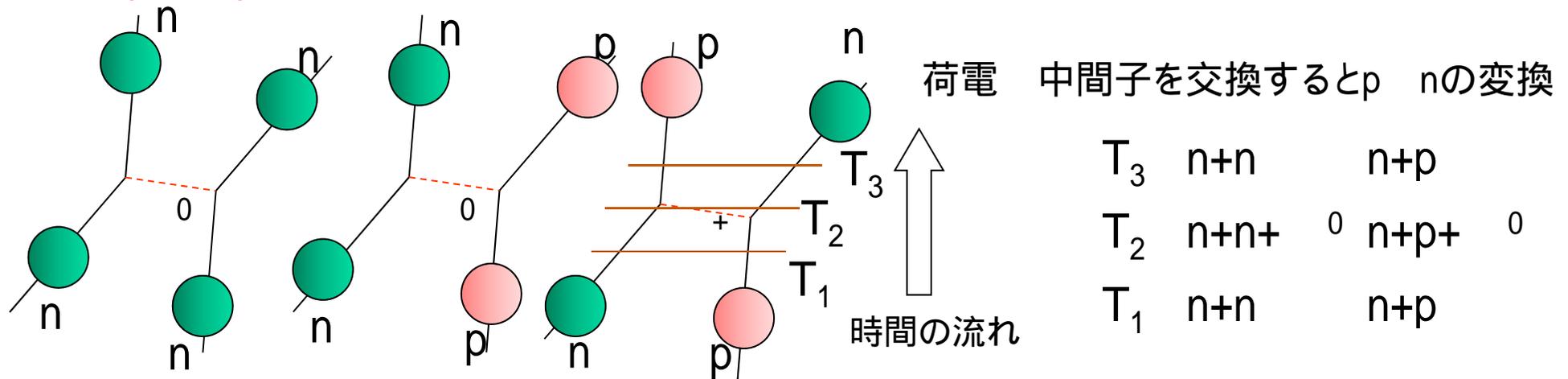


核力と中間子



核子間の相互作用: 原子核内の陽子や中性子はなぜ離れないか 強い力(陽子間のクーロン反発力より強い)で束縛されている

湯川(1937)中間子論: 強い力は、陽子や中性子間で未知の**粒子**の交換による



陽子 + 陽子の散乱(クーロン効果は除く)は、 $\sigma = 4 \times 10^{-30} \text{ m}^2$ の領域で起こることが分かっていた。
核力の最大伝達距離は、 $r^2 = \frac{\hbar}{Mc}$ を満たす $r \sim 1 \times 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$ (これ位近づくと強い相互作用が利く)

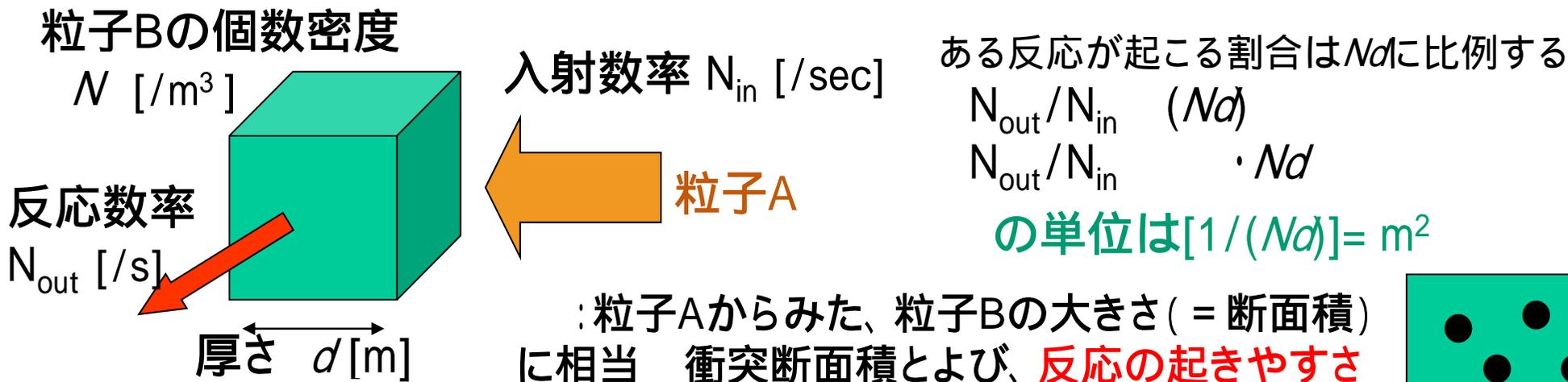
T_2 では中間子の質量分($E = Mc^2$)エネルギーが増える 不確定性関係から
中間子は $t = r/c$ の間(ほぼ光速で移動するとして)は存在できるので、

$$E \quad t \sim \hbar \quad M \approx \frac{\hbar}{rc} = \frac{1.05 \times 10^{-34} [\text{Js}]}{10^{-15} [\text{m}] 3 \times 10^8 [\text{m/s}]} = 3.5 \times 10^{-28} [\text{kg}] = 200 \text{ MeV} / c^2$$

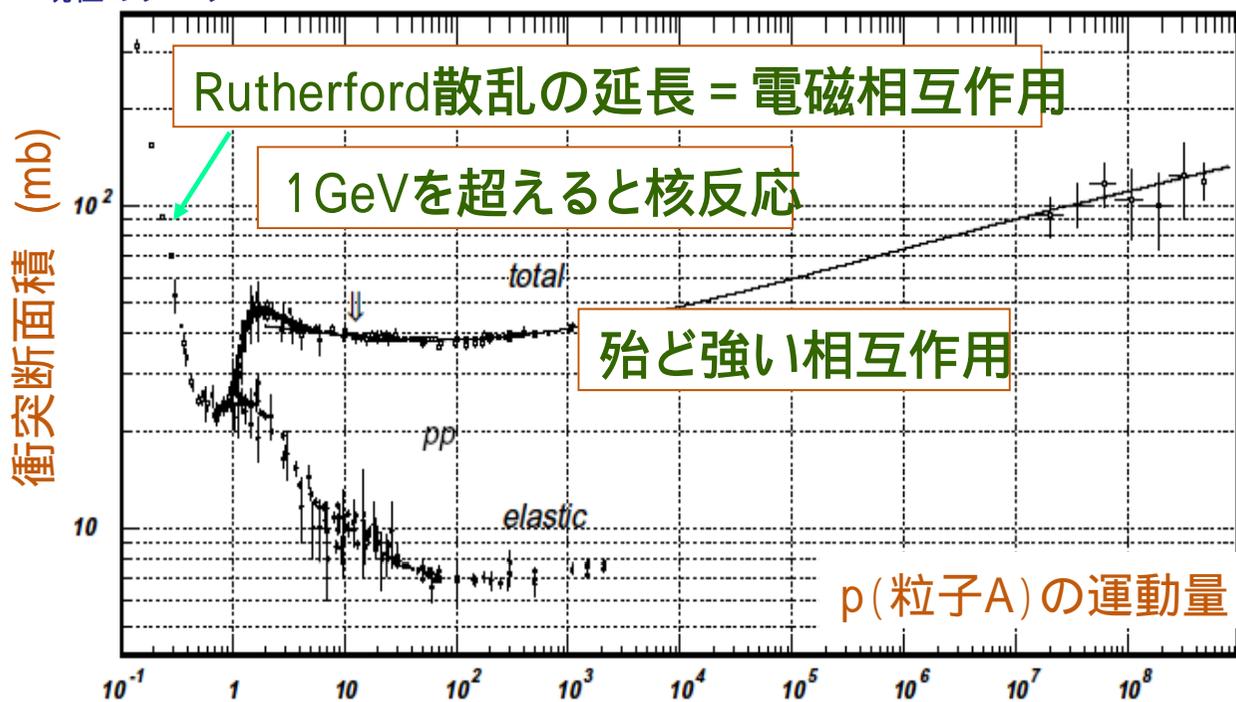
質量が電子と陽子の中間なので、中間子という
相互作用が粒子の交換であることは当時議論されていた

衝突断面積

前頁の「陽子 + 陽子の散乱 (クーロン効果は除く) は、 $= 4 \cdot 10^{-30} \text{ m}^2$ の領域で起こる」



現在のデータ



バーン barn が単位

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

ppの核反応は1 GeV辺りから起き始め*10GeV辺りでほぼ一定値、

$$40 \text{ mb} = 4 \cdot 10^{-30} \text{ m}^2$$

*エネルギーをあげると核に近接でき核反応するようになる。そのようなエネルギーでは、図より、強い相互作用は電磁相互作用よりはるかに起きやすい。

中間子(と μ 粒子)の発見

Anderson/Neddermeyer

1936: 宇宙線中の透過力の強い荷電粒子

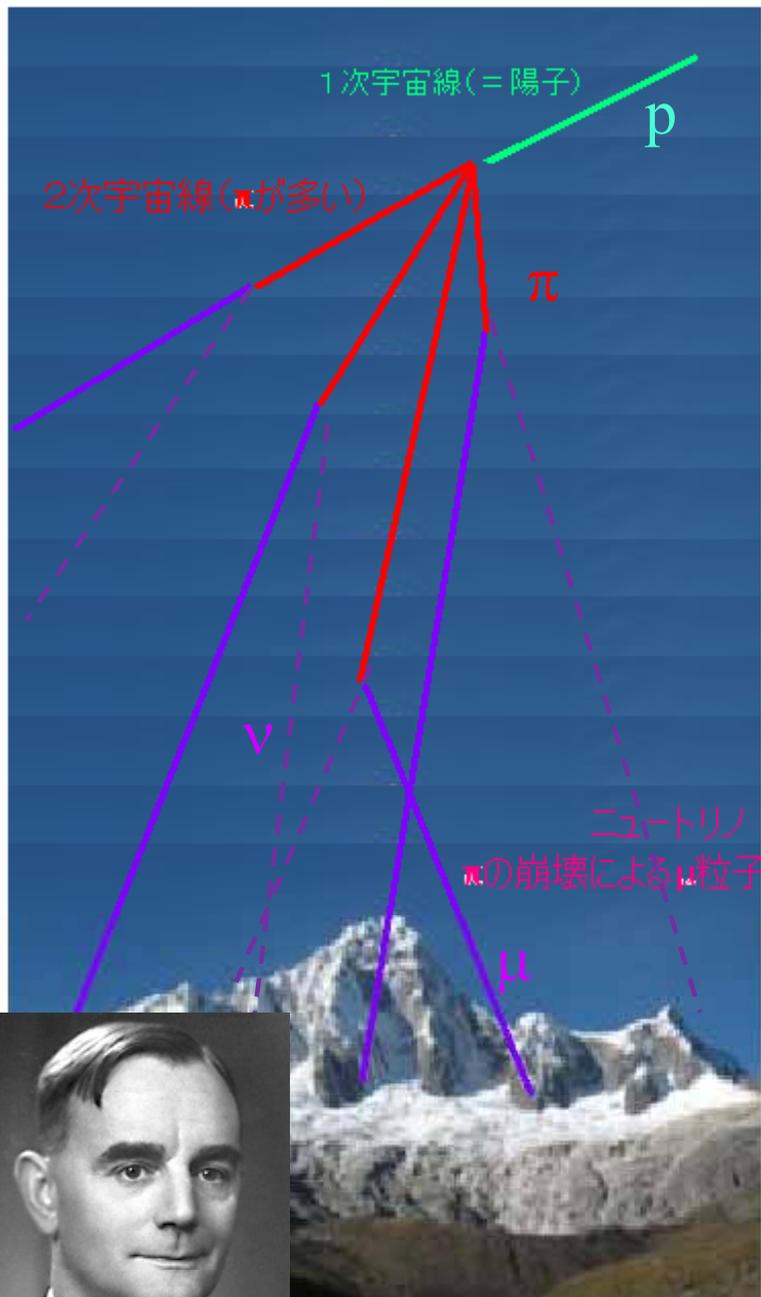
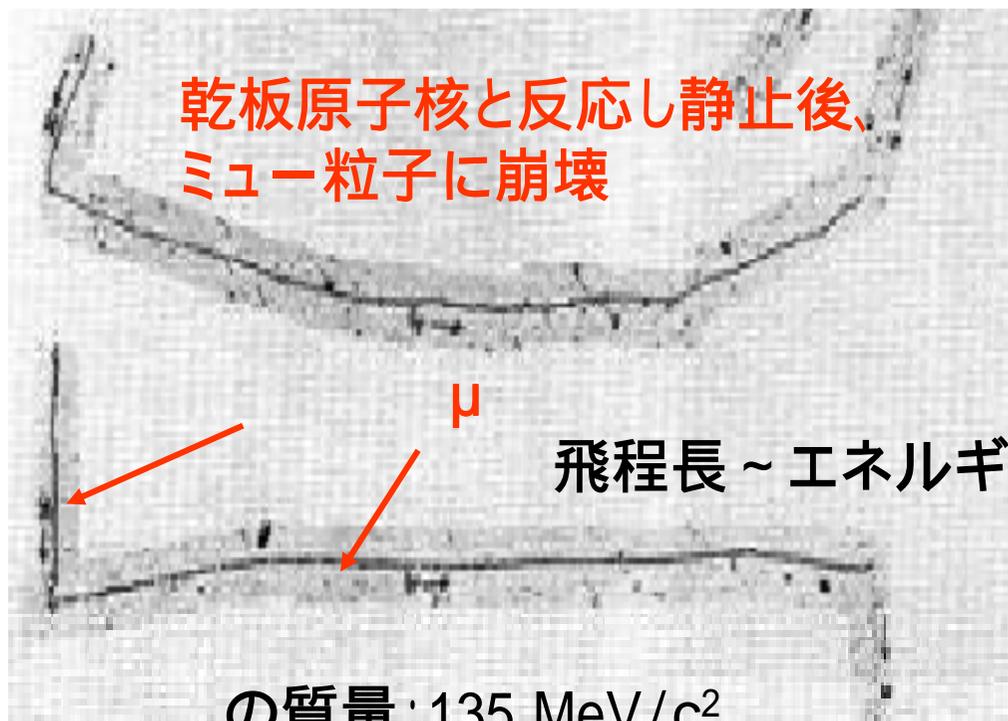
最初は湯川の間中子と思われたが強い相互作用をしない(=止まりにくい)ので違う

電子の仲間:「重い電子」= μ 粒子

質量: $106 \text{ MeV}/c^2$

Powell(1947): 上空での写真乾板実験

(山岳、バルーン、飛行機) は強い相互作用により上空で生成され、地上には崩壊による μ 粒子が届く



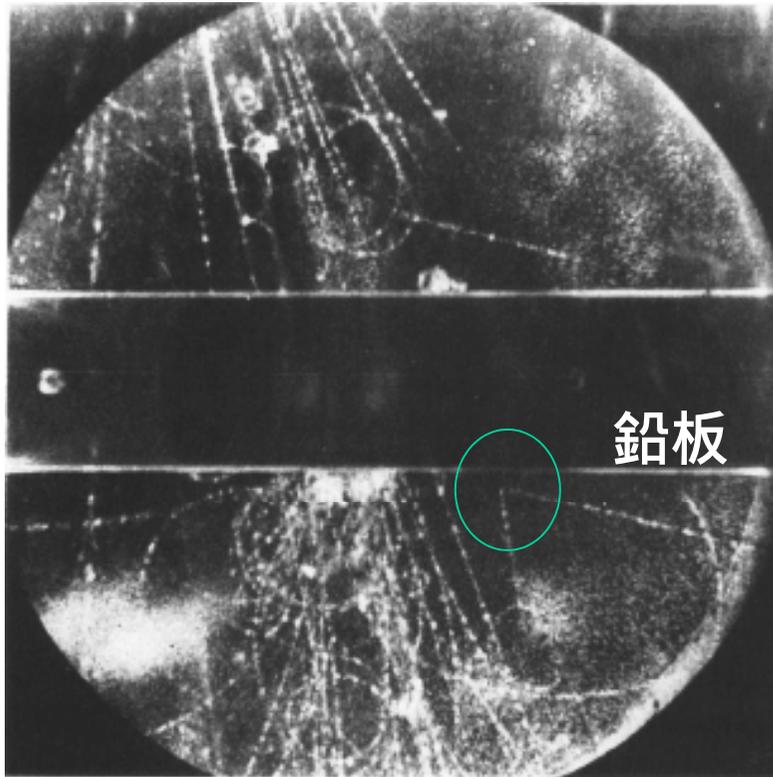
総合科目 現代物理学への招待 III

- 素粒子探求の歴史
- ハドロンからクォークへ - 標準模型の概要
- 素粒子に大きさがあるか？ - 加速器の紹介
- 素粒子探求の現状

新たな素粒子(クォーク): 奇妙な粒子 (strangeness)

1947 Rochester/Butler: 宇宙線中に“V”(中性粒子の崩壊)を2事象観測

あまりに稀なので、理由が分からなかった 奇妙な粒子と呼んだ

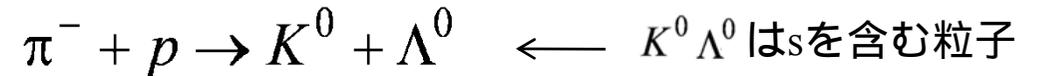


特徴:

1. 中性粒子の生成反応は起きやすい
2. 中性粒子の崩壊は起きにくい (= 寿命は長い)

新しい**保存量S**を導入し、それを破る反応は起き難い
= **strangeness** (西島, Gell-Mann)

(生成反応では、対に作ることで量子数を保存)



$$S: 0 + 0 \quad (-1) + (+1)$$

(崩壊ではstrangenessを保存できないので長寿命)

$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	- 1	0 + 0
$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$	+ 1	0 + 0

別の言い方をすると、**強い力**で生成され、**弱い力**で崩壊する

弱い力の本質は後で ↑

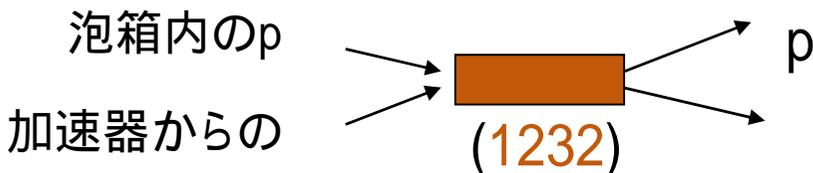
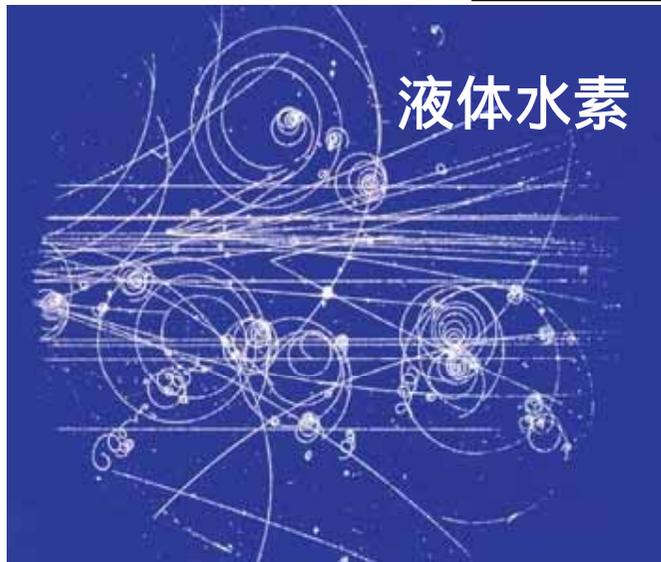
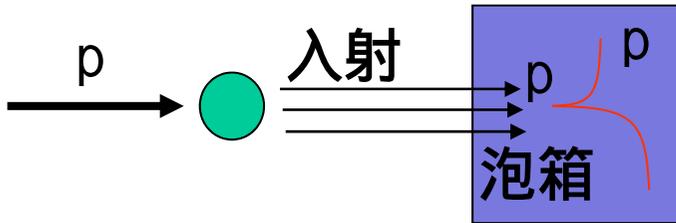
反応(崩壊)が起き難いのは、相互作用が弱いから
弱い力ではstrangeness保存が破れてもよい

加速器の登場でさらに多くの粒子が発見される

1953以降: 加速器で が人工生成できるようになった

特定の入射エネルギーで、反応断面積が急激に増加 (共鳴状態)

~ 特定の周波数でラジオの受信電波が増加する (物理B3、物理実験I)と同じ現象

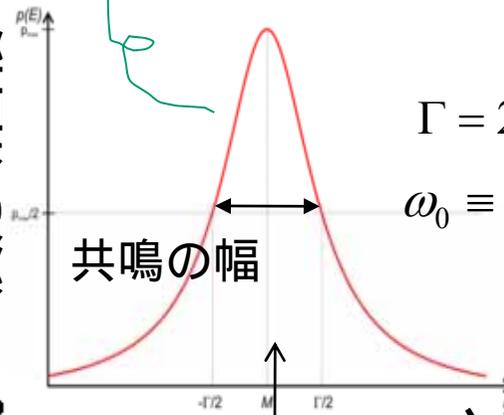


共鳴状態のハドロン (質量1232MeV) が生成される反応図

LCR回路の共鳴曲線

$$\sigma_t = \frac{A}{(E - M)^2 + \Gamma^2/4}$$

反応断面積
または V_R

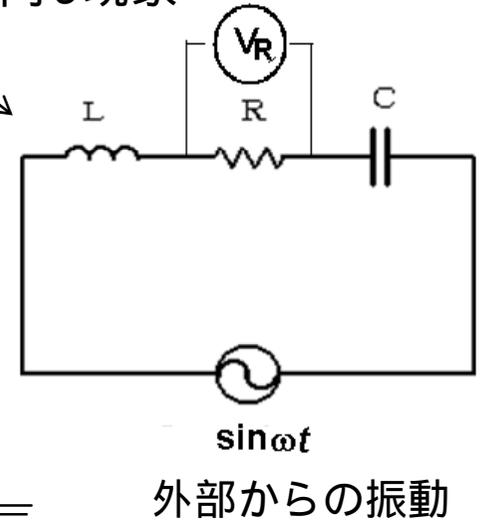


入射エネルギー または ω

共鳴ハドロンでは 質量 M
寿命 \hbar/Γ

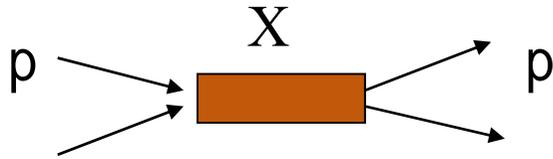
共鳴の幅 = 10MeVの場合

$$\text{寿命} = \frac{6.6 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}}{10 \text{ MeV}} = 6.6 \times 10^{-23} \text{ s}$$



強い力で崩壊するハドロンは短寿命である

Lorentz不変質量



X A+B+C+... に崩壊するとき、
A, B, ...のエネルギーと運動量をすべて測定すればXの質量が分かる

Einsteinの関係式

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2$$

エネルギー保存: $E_X = E_A + E_B + \dots$

運動量保存: $\vec{p}_X = \vec{p}_A + \vec{p}_B + \dots$

よって $(m_0 c^2)^2 = E_X^2 - (\vec{p}_X c)^2 = (E_A + E_B + \dots)^2 - (\vec{p}_A c + \vec{p}_B c + \dots)^2$

どんな運動系でも静止質量(相対論的に不変な質量)が求められる

問 入射 (140)の運動量がいっつだと、 (1232)を生成するか。ただし、p(938)

の運動量 $p = (0, 0, kc)$ とすると、 $E_\pi = \sqrt{140^2 + k^2}$
ターゲットのpは静止しているとして運動量 $p_p = (0, 0, 0)$ 、 $E_p = 938$

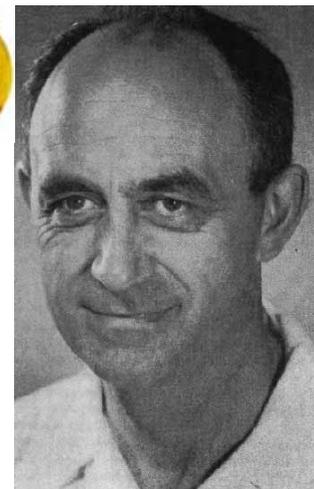
$$1232^2 = (E_\pi + E_p)^2 - (p_\pi c + p_p c)^2 = \left(\sqrt{140^2 + k^2} + 938 \right)^2 - k^2$$

を解くと $kc = 298 \text{ MeV}/c$

ところで陽子の質量 $938 \text{ MeV}/c^2$ は ?

$$\begin{aligned} 1 \text{ GeV}/c^2 &= \frac{10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ kgm}^2/\text{s}^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 1.8 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 1 \text{ g} / (6.02 \times 10^{23} \times 10^3) \end{aligned}$$

様々なハドロンの発見と対称性



Baryon (重粒子): p, n, , , barys (重いGr)

Meson (中間子): , K, , , mesos (中間Gr)

両方を総称して **Hadron(ハドロン)** hadros (強いGr)

これに対し、強い相互作用をしない**電子などは Lepton(レプトン)** (小さいGr)

多くのハドロンが発見され、ハドロンが基本粒子とは考えにくい
ハドロン質量間に特定の関連がある **内部構造があるのでは?**

1949 Fermi/Yang: p,nが基本粒子で、中間子は $\sim \bar{p}n$

1956 Sakata: p,n, が基本粒子としたモデル

1958 Ogawa 群論を使ってSakata modelを補強



$\frac{\delta m}{m}$	$\begin{bmatrix} p \\ n \end{bmatrix}$	938.28 MeV	$\begin{bmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{bmatrix}$	139.57	$\begin{bmatrix} \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{bmatrix}$	1189.36	$\begin{bmatrix} K^+ \\ K^0 \end{bmatrix}$	493.67
				134.96		1192.46		497.70
				139.57		1197.34		
		0.14%		3.3%		0.33%		0.8%

特定のグループ(スピン、奇妙さS)に属する粒子の質量は極めて近い
特定の内部構造をもった粒子がグループを作っている

SU(n)対称性: 似た粒子の内部構造を分類する

なんか難しそうだけど、この数学をつかうと分類ができる。。。

アイデア: 質量の近い(p,n)は「A」の2つの状態(アイソスピンが違うという) ~ 電子に2つのスピン状態があると似た考え
「iso ~」= ~と同じ

Aの2つの状態(uとdとする)はSU(2)変換により混じり合う

$$A = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} u' \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\gamma} \cos \beta & e^{i\alpha} \sin \beta \\ -e^{-i\alpha} \sin \beta & e^{-i\gamma} \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

この2x2行列はSU(2)変換の一般形

SU変換の満たすべき性質

$$\det U = 1 \quad \text{確率の保存}$$

$$UU^\dagger = U^\dagger U = 1 \quad \text{ユニタリー性}$$

SU(2)対称性のある粒子対の変換を成分で書くと:

$$uu \rightarrow u'u' = U_{11}^2 uu + U_{12}^2 dd + U_{11} U_{12} (ud + du)$$

反粒子を粒子の複素共役と定義すると: $\bar{d}' = -\bar{u} e^{i\alpha} \sin \beta + \bar{d} e^{i\gamma} \cos \beta$ となる
 $\bar{u}' = \bar{u} e^{-i\gamma} \cos \beta + \bar{d} e^{-i\alpha} \sin \beta$

混合成分
もう1成分

これを行列表示すると

$$\begin{pmatrix} \bar{d} \\ -\bar{u} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \bar{d}' \\ -\bar{u}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\gamma} \cos \beta & e^{i\alpha} \sin \beta \\ -e^{-i\alpha} \sin \beta & e^{-i\gamma} \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{d} \\ -\bar{u} \end{pmatrix}$$

を比べると
粒子・反粒子のSU(2)変換対応が得られる

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \bar{d} \\ -\bar{u} \end{pmatrix}$$

本命: SU(2)対称性のある粒子反粒子対の変換: の片方をの対
応で反粒子にする 数学的表現は $2 \otimes \bar{2}$

$$u\bar{u} \rightarrow u'\bar{u}' = U_{11}^2 u\bar{d} - U_{12}^2 d\bar{u} + U_{11} U_{12} (-u\bar{u} + d\bar{d})$$

混合 混合 混合

混合する3状態: $u\bar{d}$ $d\bar{u}$ $(-u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$ $(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$

は似た質量 (π^+ π^- π^0) = (140, 140, 135 MeV) 直交状態 (548)

(中間子)は粒子と反粒子の結合状態

アイソスピン=1でz成分が+1, -1, 0の状態

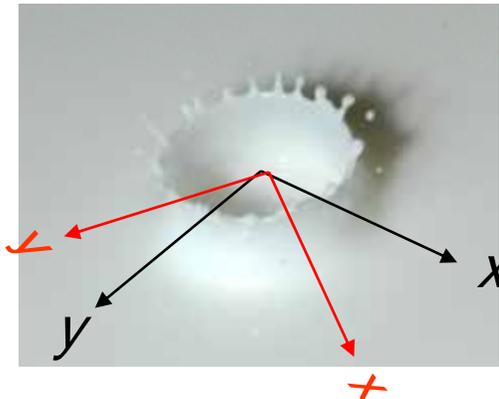
アイソスピン=0の状態の粒子もある

物理法則の対称性

「対称性があると、**保存量**がある」

ミルククラウンの作り方は、

ミルクにごみが混入している、気圧が変わる、温度が変わる、...、
などを考慮すると、変わらない(=対称性がある)



時間(今日と明日)で変わらない: **時間対称性があるか**

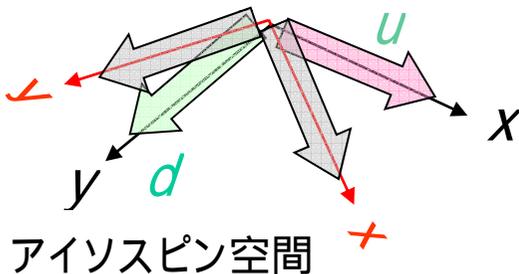
⇒ **エネルギー (E) の保存**

場所(つくばとジュネーブ)で変わらない: **空間対称性があるか**

⇒ **運動量 ($\vec{p} = m\vec{v}$) の保存**

座標を回転したら変わらない: **回転対称性があるか**

⇒ **角運動量 ($\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$) の保存**



新しい(x,y)で表される状態:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} u' \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \leftarrow \begin{matrix} \text{SU(2)変換で} \\ = 0 \text{の場合} \end{matrix}$$

このような回転をしても物理法則が変わらないと要請すると

- ✓ 「アイソスピン電荷」が保存される
- ✓ アイソスピンが同じものは混合する

対称性からクォーク模型へ: メソンは $q\bar{q}$; バリオンは qqq

坂田-小川の(p,n,)に対応して、(u,d,s)電荷 $+\frac{2}{3} -\frac{1}{3} -\frac{1}{3}$ を持つクォークを導入

バリオン: 3種類のクォークが3個

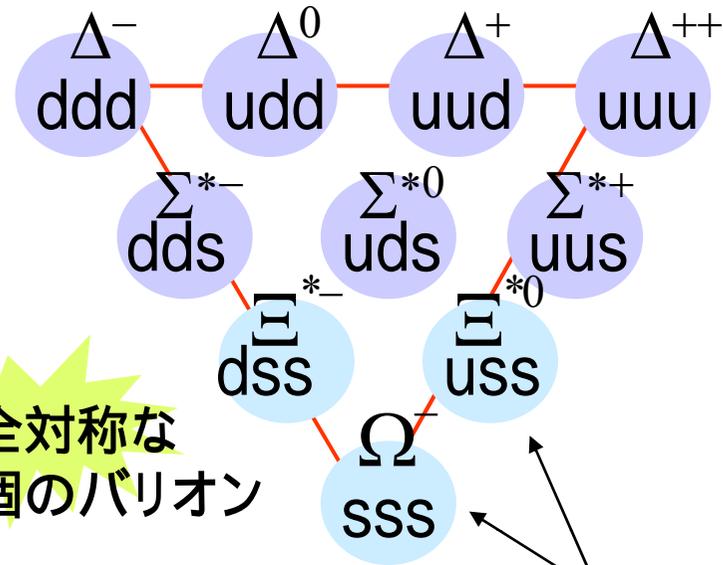
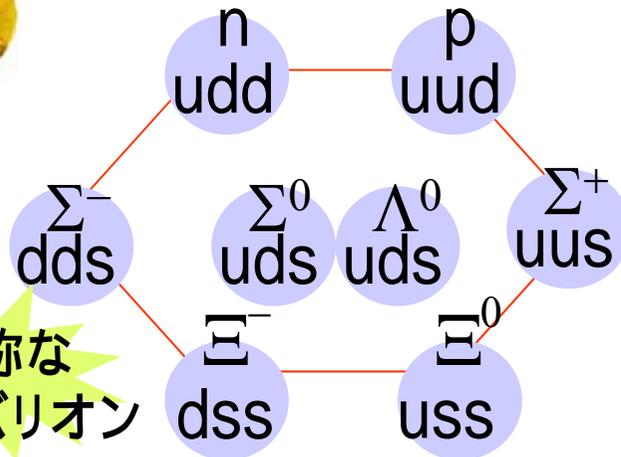
$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

対称性

粒子数表現



部分対称な
8個のバリオン



完全対称な
10個のバリオン

当時発見されていなかった粒子も
対称性から発見 (1964)



1964 Gell-manとZweig:
(u,d,s) 3クォーク模型

SU(3)の対称性をもつ

Quarkの由来:
Three quarks for Muster Mark!
"Finnegans Wake" James Joyce

半端な電荷の粒子は見つかっていないので
Gell-Mann自身、数学的なものと説明した
パートン模型(実験)との一致から実在へ

あとで説明

クォークの香り (種類) + レプトンの種類

- 1897 Thomson : 電子
- 1937 Anderson/Nedermeyer: μ 粒子
- 1947 Rochester/Butler ; ストレンジネス
- 1959 Reines : 電子ニュートリノ
- 1962 Lederman/Schwartz/Steinberger: μ ニュートリノ
- 1964 Gell-man,Zweig: 最初のクォーク模型 = u,d,s
- 1970 Glashow,Iliopoulos,Maiani: 4クォーク模型
(レプトンとクォークの対称性から)
- 1973 小林・益川の6クォーク (CP非保存を説明するために)
- 1974 Ting(BNL)/Richter(SLAC): c (チャーム)の発見
- 1975 Perl(SLAC): τ の発見
- 1977 Lederman(FNAL): b (ボトム)の発見
- 1995 CDF,D0(FNAL): t (トップ)の発見

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

チャームの発見

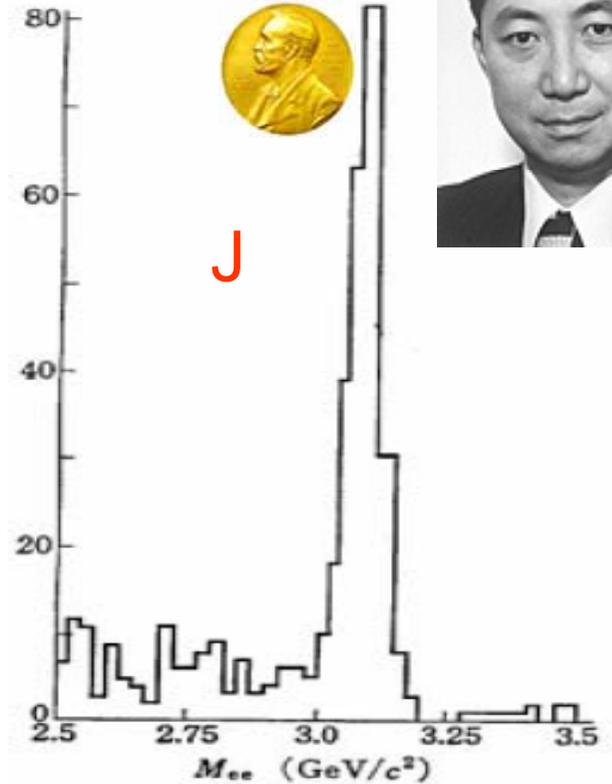
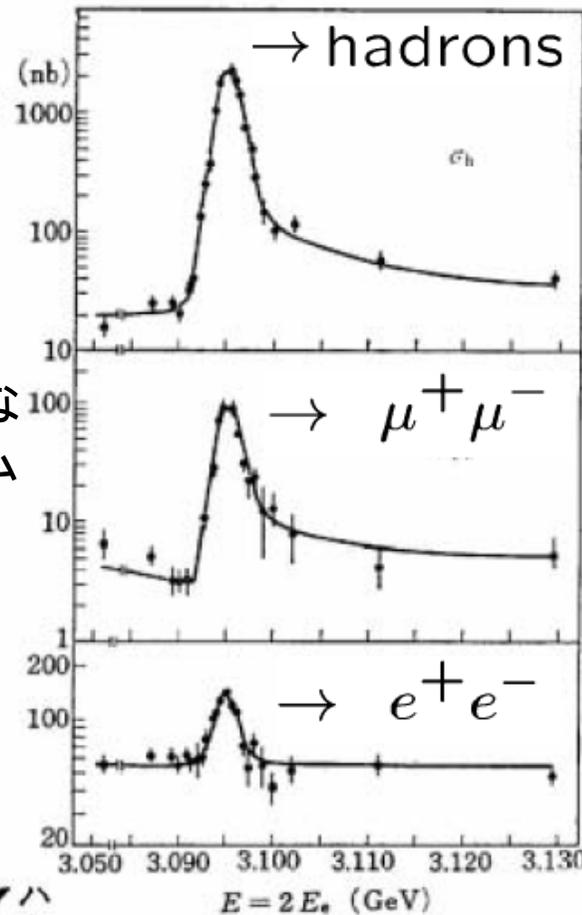
1974 SLACとBNLの加速器実験で発見 November Revolution

電子・陽電子の衝突器

陽子を標的に衝突させる

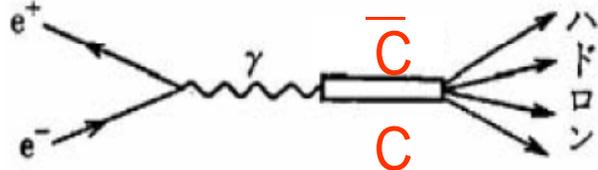
Richter et al., @ SLAC

Ting et al., @ BNL



電子・陽電子対は消滅し となる。 のエネルギーがチャームクォークの質量の約2倍になると、共鳴状態になる。

J/ψ 粒子
チャーム・反チャーム
クォークの共鳴状態



$$p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + X$$

$$|M_{ee}^2 = (E_{e^+} + E_{e^-})^2 - (p_{e^+} + p_{e^-})^2$$

SLACの加速器

SLAC SPEAR 1972 ~ 電子・陽電子衝突器



直径80m

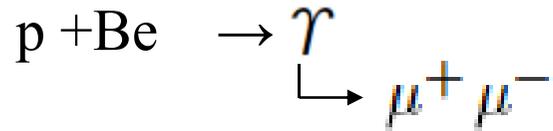
Spark chamberの画像
写真 電子検出器へ



Richterは新quarkをSPとしたかったが、
空いているギリシャ文字 (PSI)とした。
Spark chamberの画像にも似ているし,,,

ボトムクォーク

1977 FNAL 300GeV の陽子を標的に

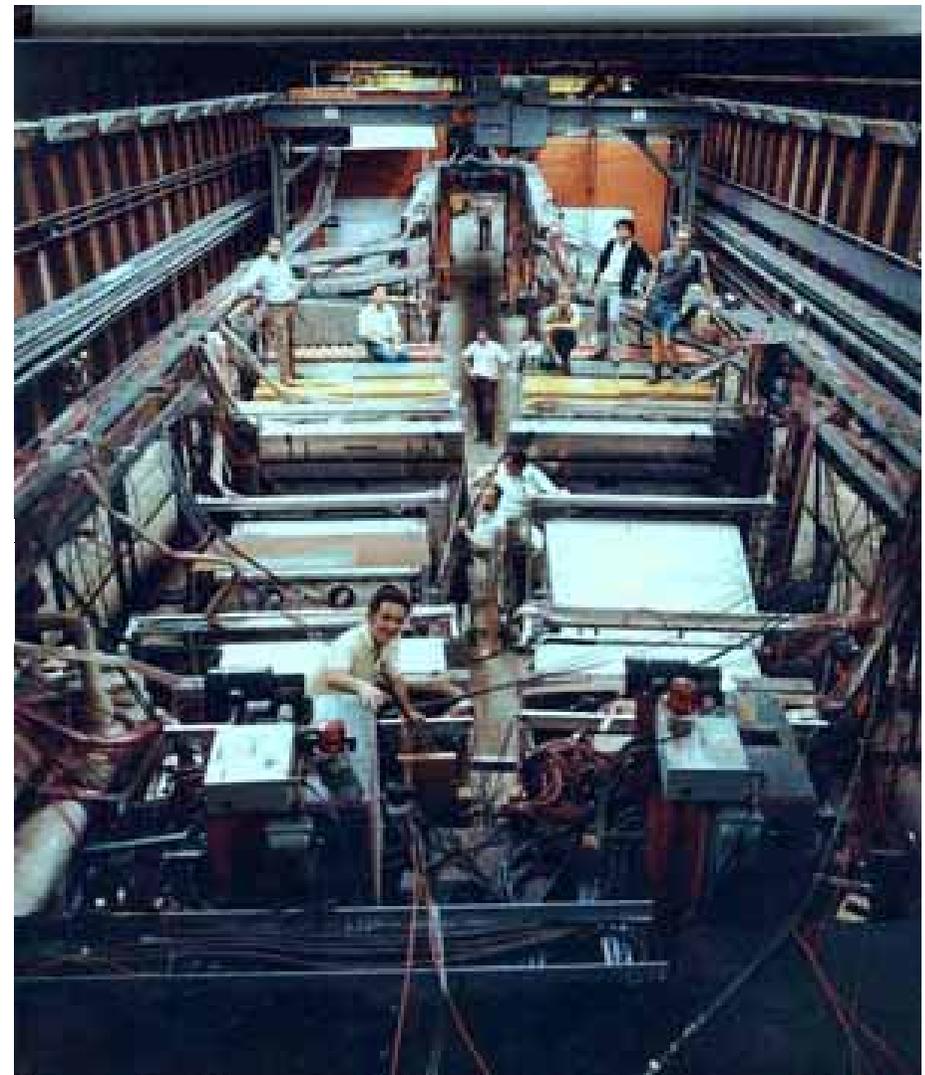
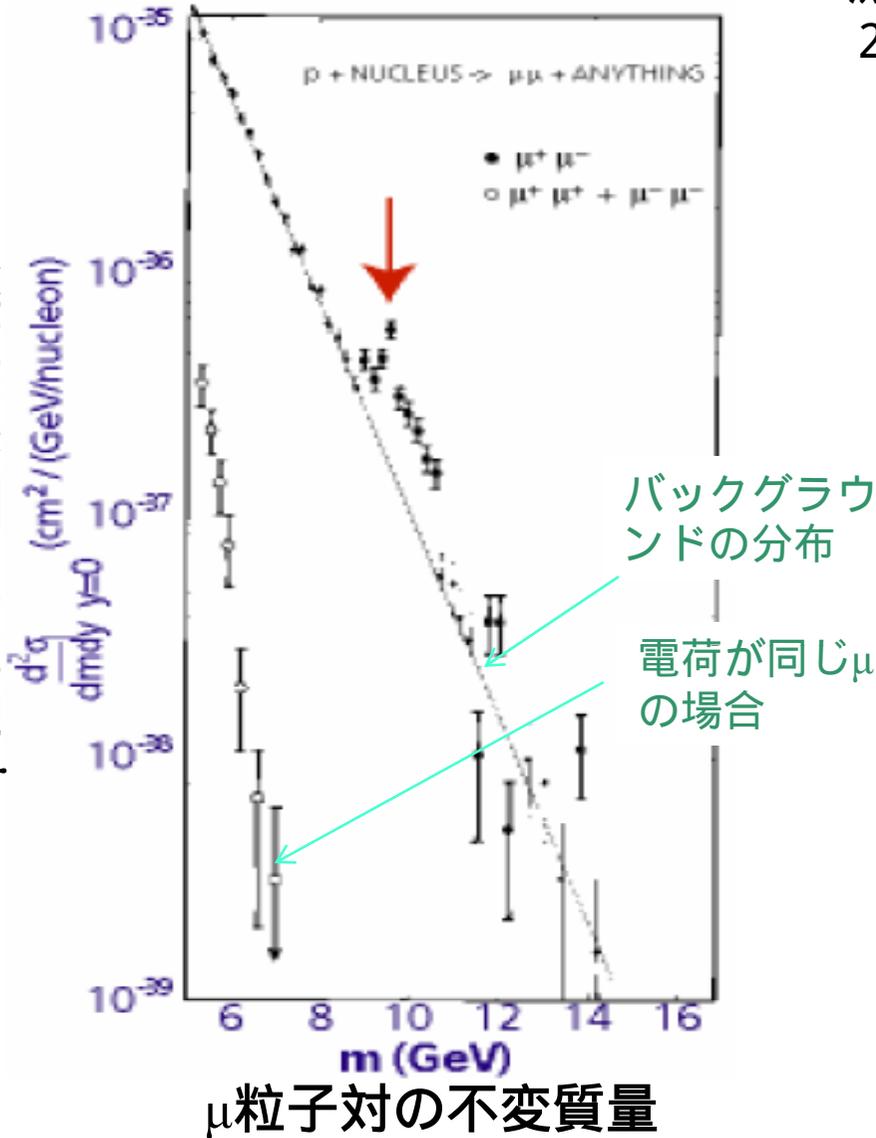


ウプシロン

$\gamma = bb$ の束縛状態

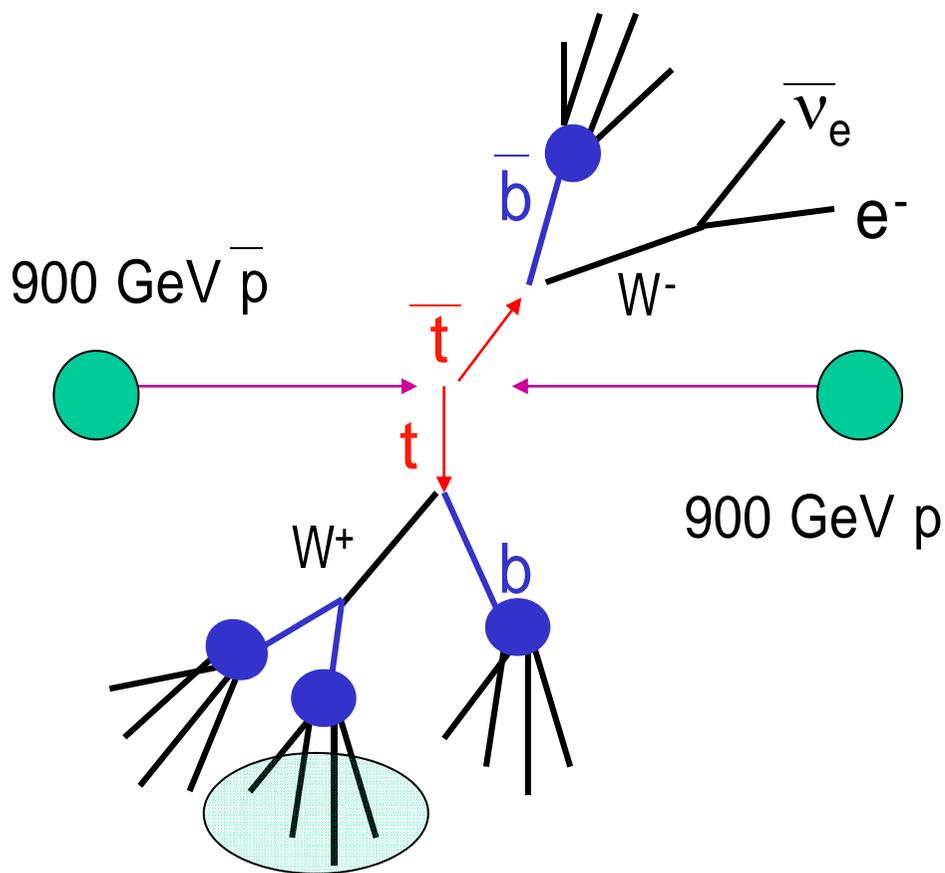
測定する運動量が高くなり装置も大きくなった
2つの μ を2セットのスペクトロメータで捉えた

μ粒子対の生成断面積

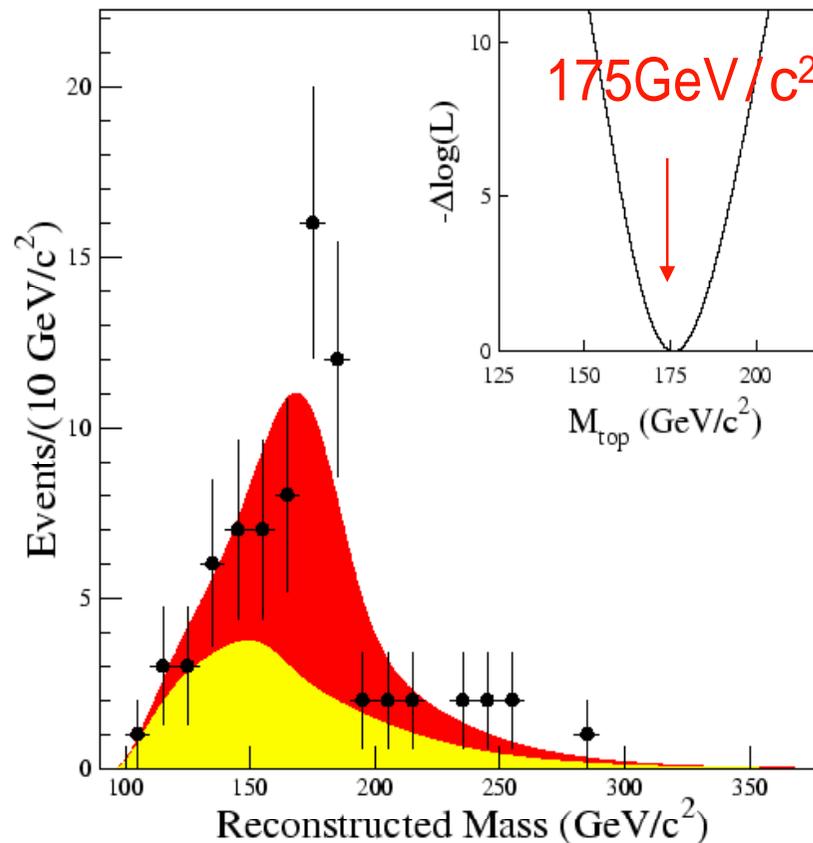


トップクォーク

1994 CDFグループによる信号の兆候
 1995 CDF/D0による発見



高エネルギーのクォークは、多くのハドロンを
 集合的に発生する 集合をジェットとよぶ

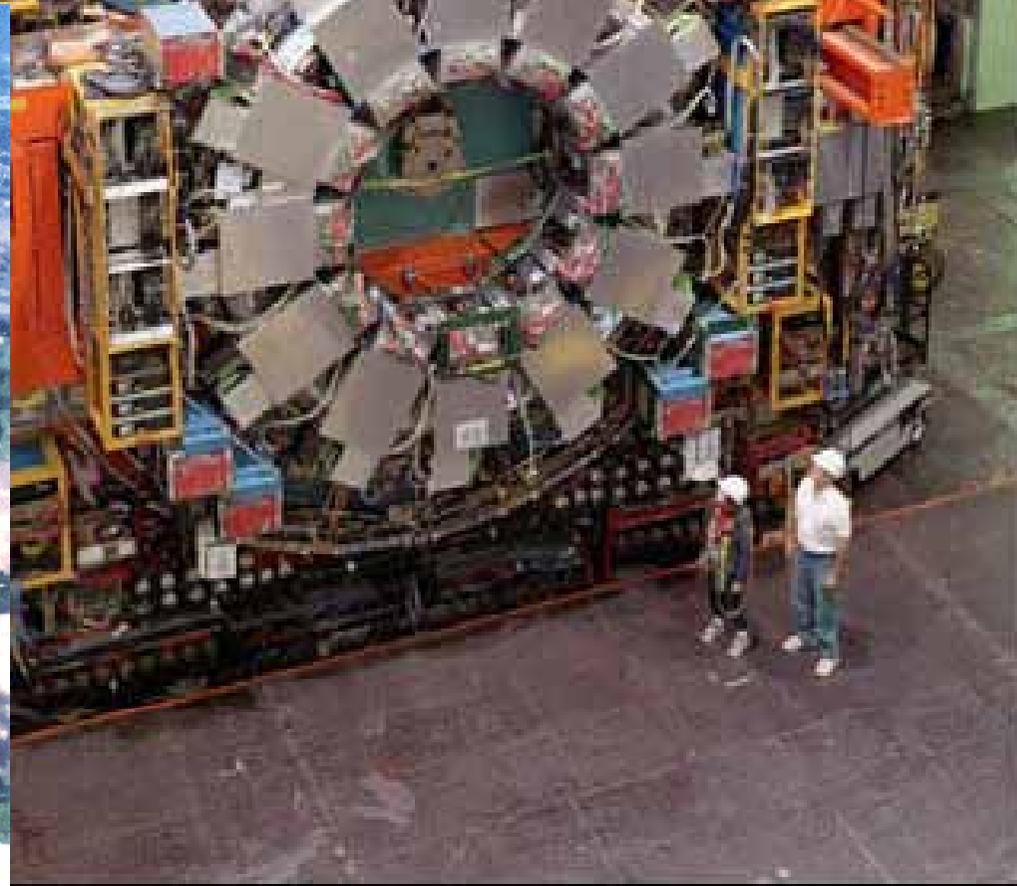


信号

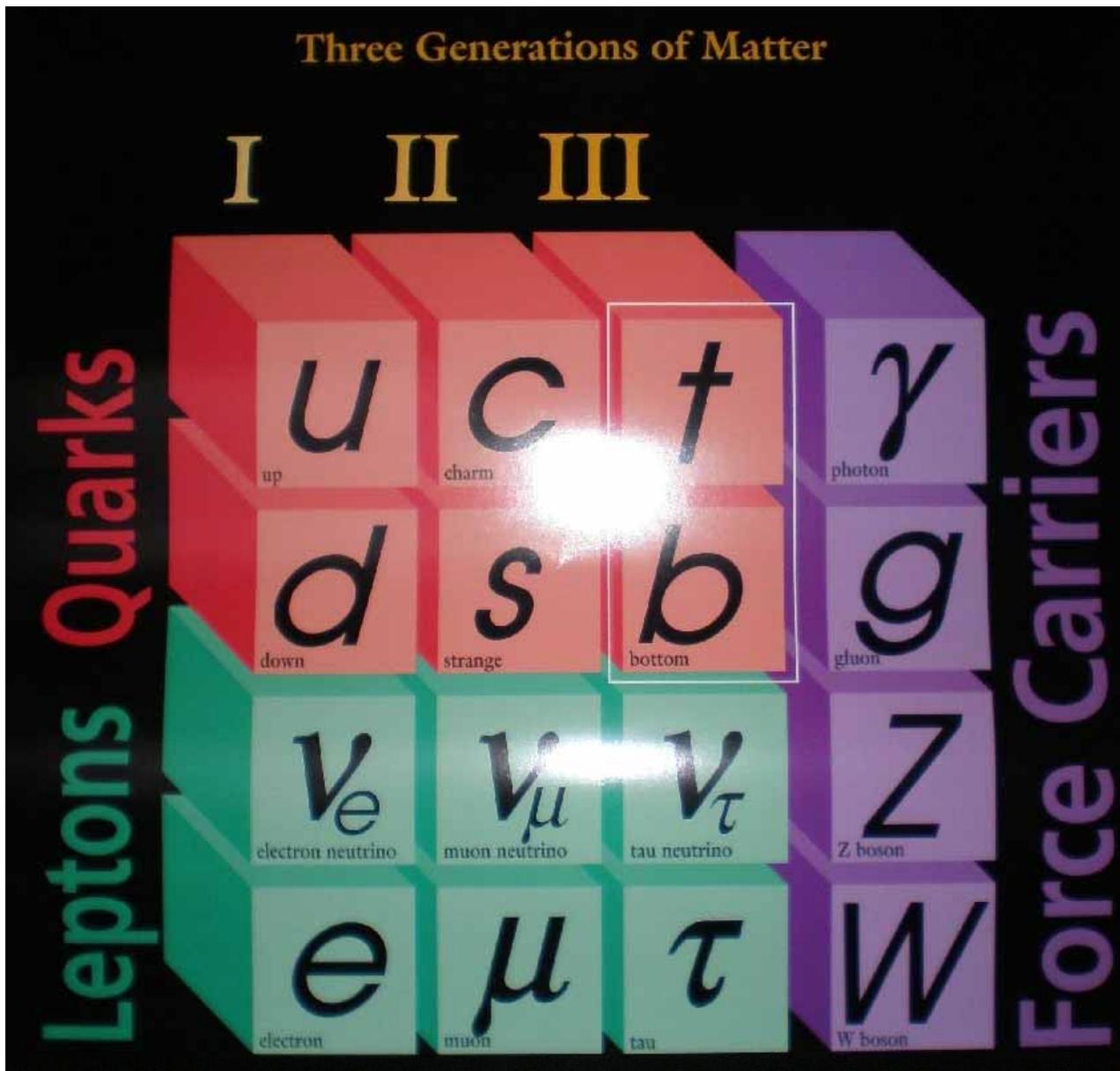
バックグラウンド

CDF検出器 (米国フェルミ研究所)

TEVATRON
陽子反陽子衝突器
0.98TeV × 0.98TeV
周長6.2 km



素粒子の標準模型



の内、Quarksと荷電Leptonはこれで登場した...

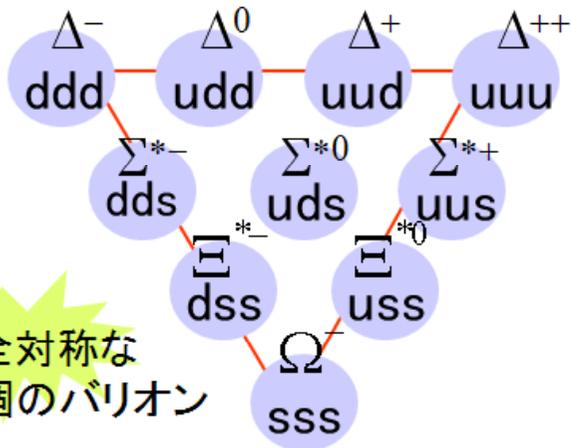
物を構成する素粒子

力を伝える素粒子

クォークのもうひとつの自由度 (= 色) スピンは後で

クォークはスピン1/2のフェルミ粒子(スピン量子数が半整数の粒子)

Pauliの排他律により、同じ量子数のフェルミ粒子は同じ状態を占められない
(入換えに関してフェルミ粒子の波動関数は反対称であるから)



$\Delta^{++} = \underline{u\uparrow u\uparrow u\uparrow}$ 実験データより Δ^{++} のスピンは3/2
(すべて同じ向き)

ハドロンの量子数 =
(クォークの香り) (アイソスピン) (スピン) (色)

完全対称 = 入換えに対して対称

(はuのみで、スピン部を含め量子数は完全に対称)

反対称な別の自由度がある (= 色 Gell-mann)

$$\Delta^{++} = (u\uparrow u\uparrow u\uparrow - u\uparrow u\uparrow u\uparrow + u\uparrow u\uparrow u\uparrow - u\uparrow u\uparrow u\uparrow + u\uparrow u\uparrow u\uparrow - u\uparrow u\uparrow u\uparrow) / \sqrt{6}$$

色の入れ換えで符合を反転することで反対称な波動関数

なぜ色は反対称か？

南部: 観測される粒子は無色 ($qqq, q\bar{q}$) である

完全対称な
10個のバリオン

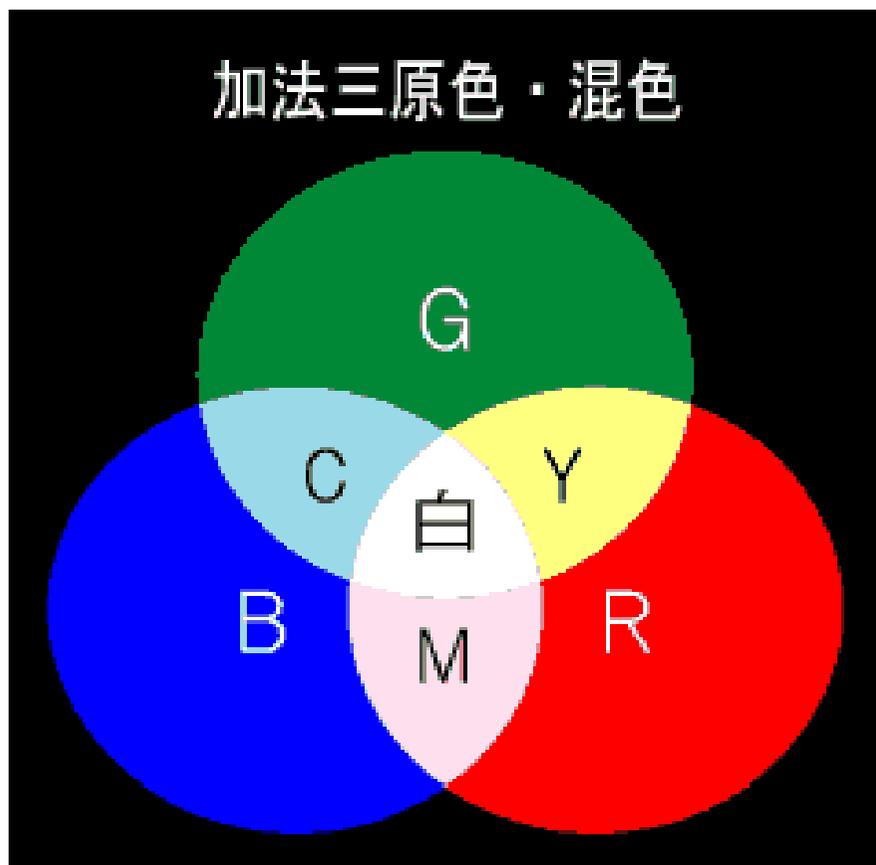


クォークの色と閉じ込め

半端な電荷の粒子が見つからないことは
(色)によるクォークの閉じ込めで説明できる

ハドロン qqq (3原色)

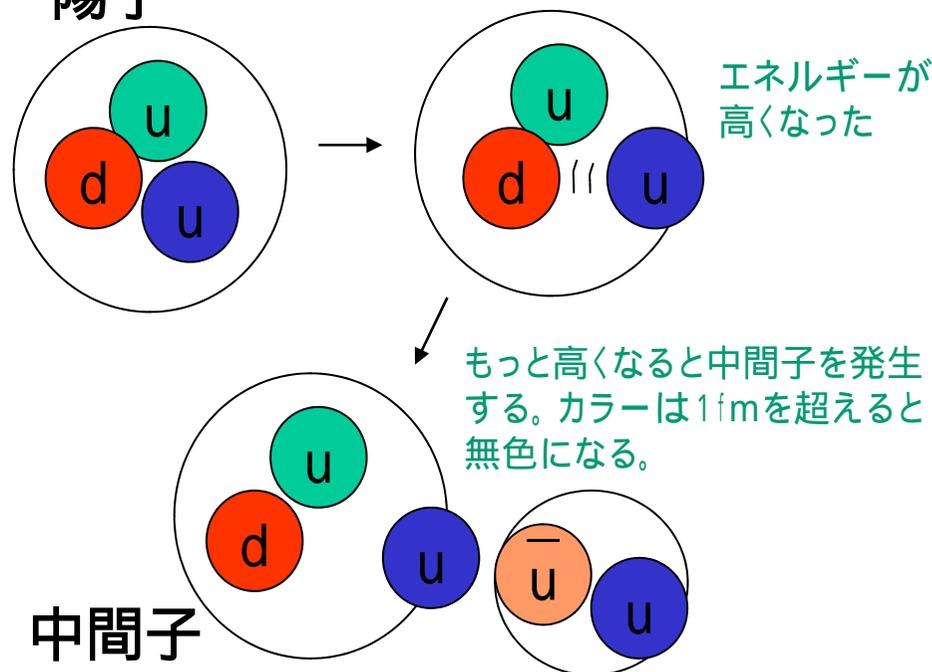
メソン $q\bar{q}$ (補色)



強い力が及ぶのは1fm程度(原子核内)
それを越えると、色つきの状態にならないように
粒子ができる。

=核の外ではいつも無色:クォークは有色な
ので、単独では観測されない

陽子



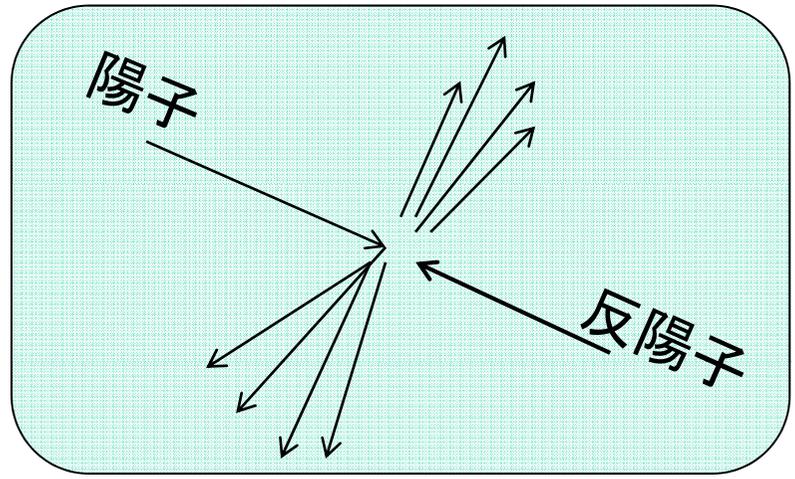
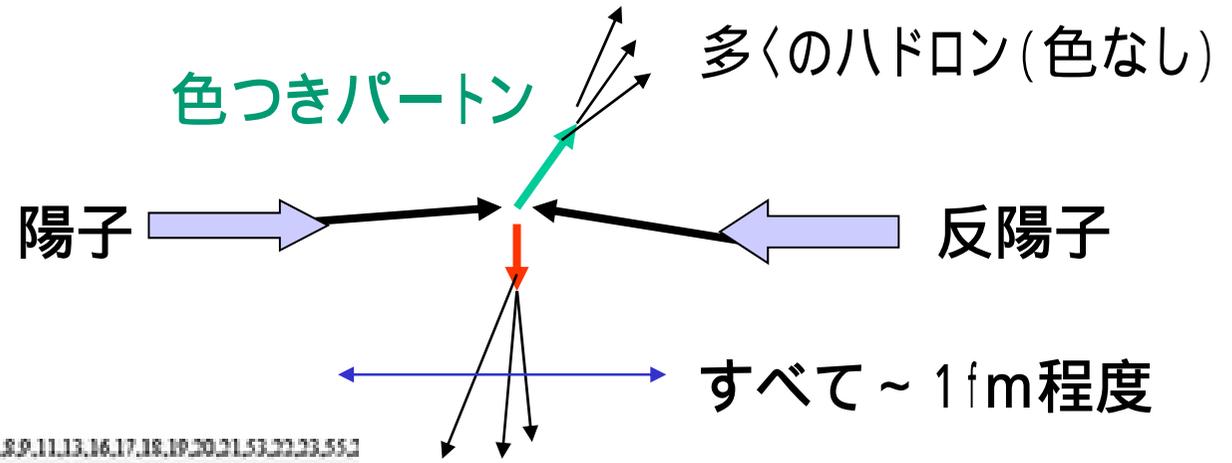
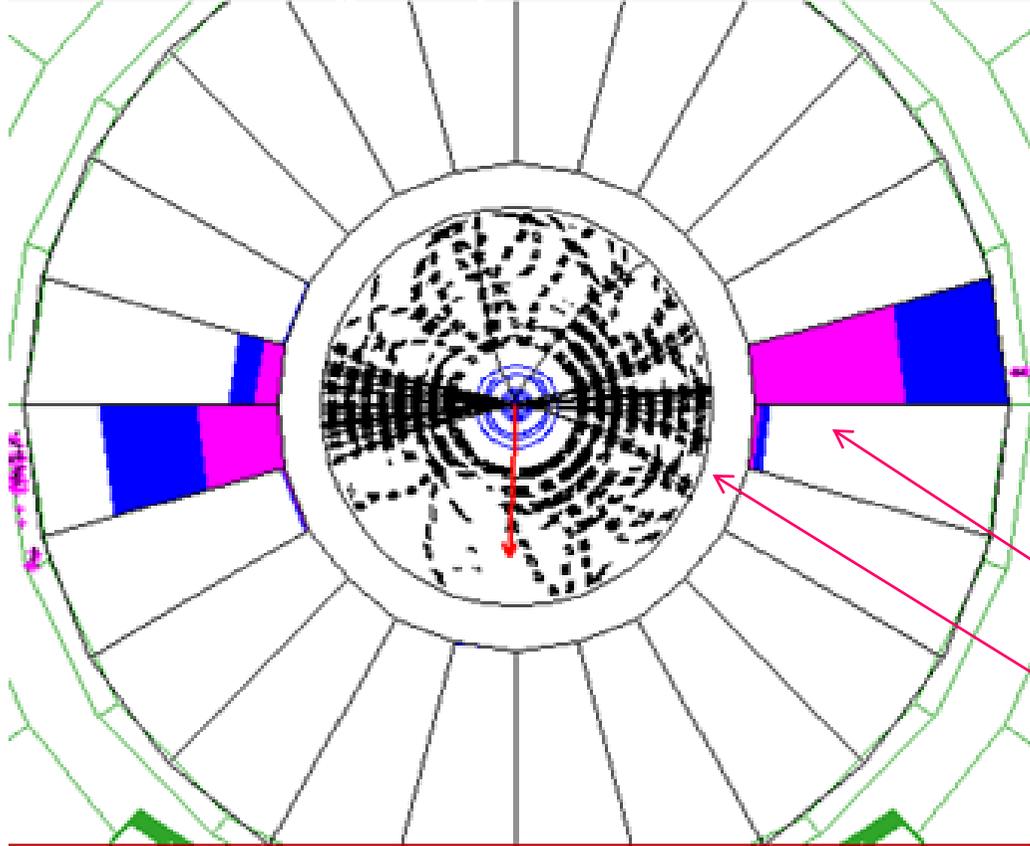
陽子 + 中間子

カラー閉じ込めによるジェットが発生

高エネルギークォークは、
ジェットになる

CDFでの観測例

Event: 73248 Run: 138396 EventType: DATA Unpess: 0,32,33,2,3,4,5,7,8,9,11,13,16,17,18,19,20,21,53,22,23,55,1

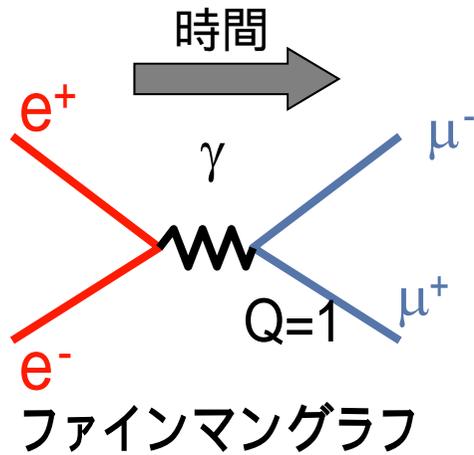


エネルギーが集中して観測
多くの飛跡が集中して発生

クォークの色と半端な電荷の証拠(1/2)

電子・陽電子を衝突させると、どうなるか

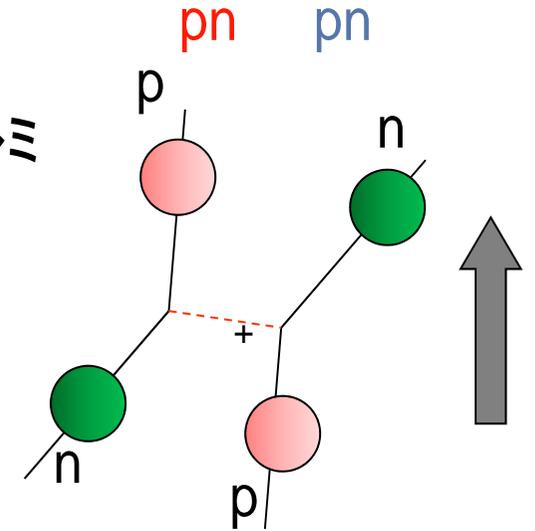
例えば $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$



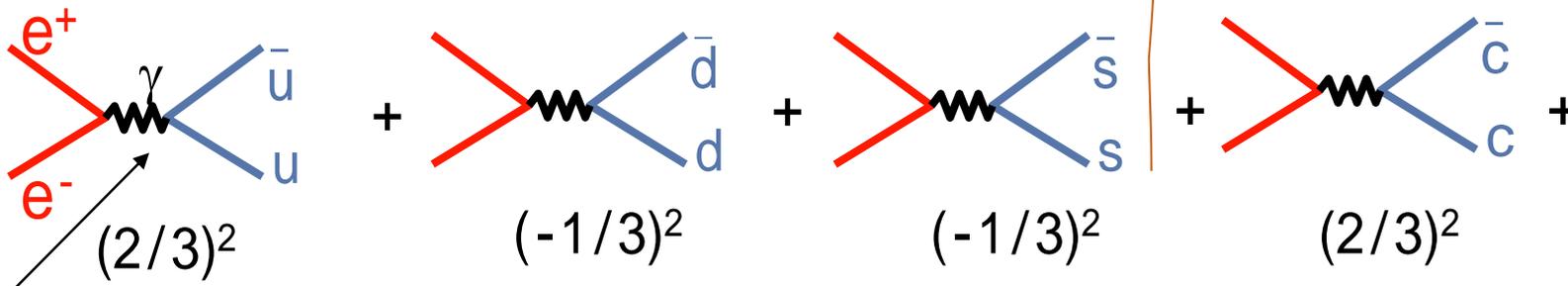
(左図)湯川の考えと同様に、フェルミオンとボゾンは3点で結合する

e^+e^- の中間状態は光

これは電磁相互作用であり、結合の強さは電荷Qに比例



他にクォーク対も(軽ければ)同じようにできる



但し e^+e^- のエネルギーが高く
cペアーができる場合のみ

反応断面積はファインマングラフを2乗したもののなのでクォークの電荷の2乗に比例して反応しやすい(どの対になるかは、この確率で決まる)

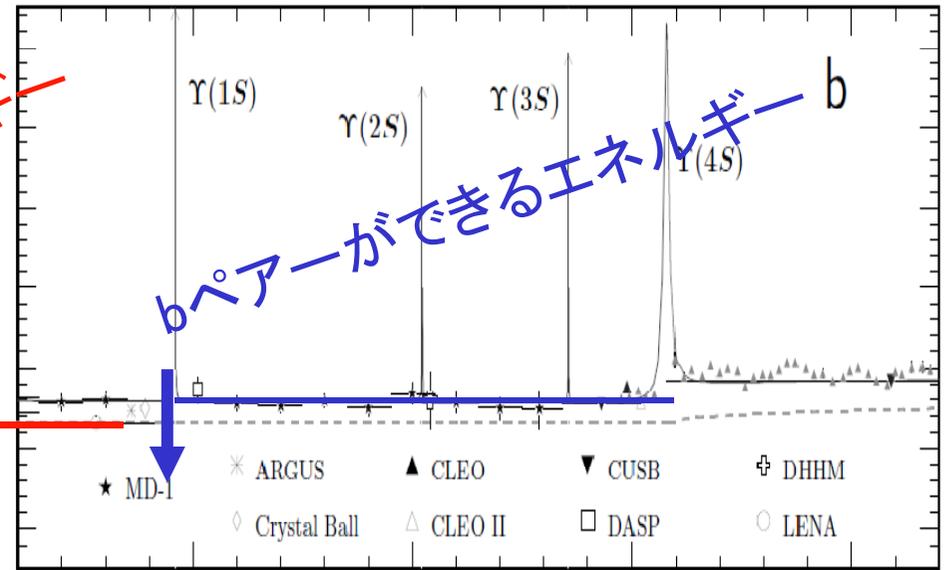
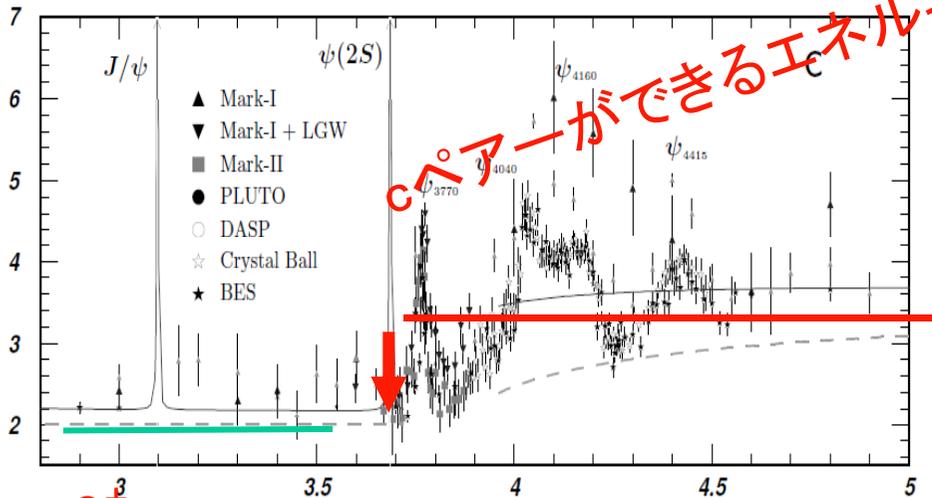
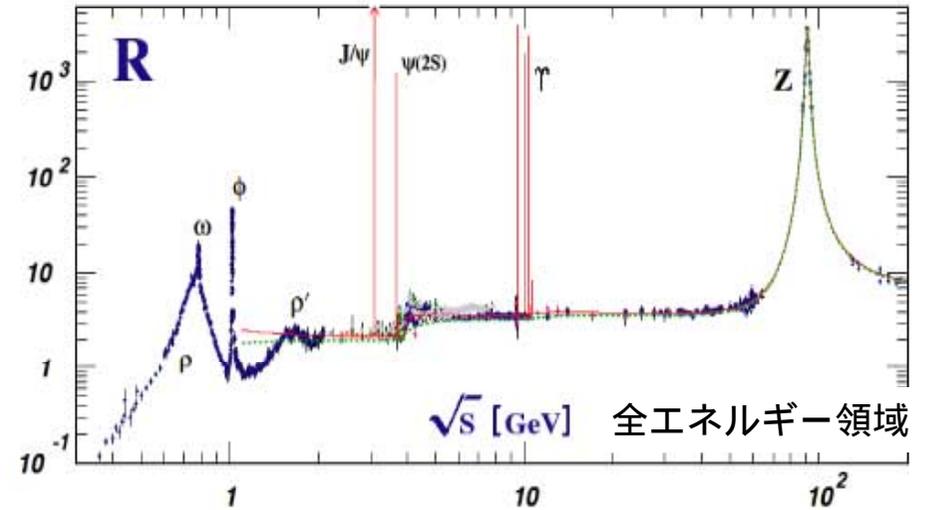
クォークの色と半端な電荷の証拠(2/2)

R e^+e^- 衝突で、ハドロンと μ 粒子発生比

カラー自由度がないとすると
u,d,s 対の発生エネルギーでは

$$R = (2/3)^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2 = 2/3 \quad \longleftrightarrow \quad \text{実際は約 } 2$$

カラー自由度3を入れると実験データとほぼ合う(QCD補正が必要だが)



$$R = \left[\begin{array}{c} e^+ \\ \gamma \\ e^- \end{array} \begin{array}{c} \bar{u} \\ u \end{array} \right] \frac{(2/3)^2}{(2/3)^2} + \left[\begin{array}{c} e^+ \\ \gamma \\ e^- \end{array} \begin{array}{c} \bar{d} \\ d \end{array} \right] \frac{(-1/3)^2}{(-1/3)^2} + \left[\begin{array}{c} e^+ \\ \gamma \\ e^- \end{array} \begin{array}{c} \bar{s} \\ s \end{array} \right] \frac{(-1/3)^2}{(-1/3)^2} + \left[\begin{array}{c} e^+ \\ \gamma \\ e^- \end{array} \begin{array}{c} \bar{c} \\ c \end{array} \right] \frac{(2/3)^2}{(2/3)^2} + \left[\begin{array}{c} e^+ \\ \gamma \\ e^- \end{array} \begin{array}{c} \bar{\mu} \\ \mu \end{array} \right] \frac{(-1)^2}{(-1)^2} \right]$$

ニュートリノ

不安定な原子核
放射線元素

安定な原子核 + 何か (エネルギー保存のため)
放射線

放射線の種類:

アルファ線 = He原子核 (ppnn) : アルファ崩壊

ベータ線 = 電子 : ベータ崩壊

ガンマ線 = 光 (高エネルギーで目に見えない) : ガンマ崩壊

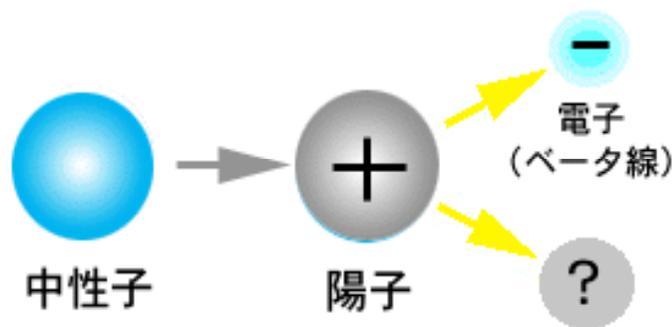
物理実験

ベータ崩壊の本質は 中性子 陽子 + 電子 + ?

例: $^{90}\text{Sr}(38\text{p}+52\text{n}) \rightarrow ^{90}\text{Y}(39\text{p}+51\text{n}) + \text{電子} + ?$



Pauli(1930): ? = 電氣的に中性 (電荷の保存から) で重さの軽い (エネルギー分布から: 次頁) 粒子を提唱
Neutral+Ino neutrino

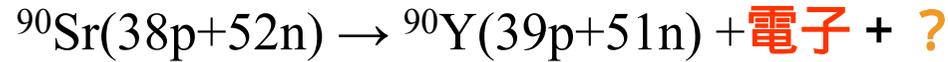


(Pauliはneutronと呼んだが Chadwickが1932にneutronを発見し、Fermiが決定)

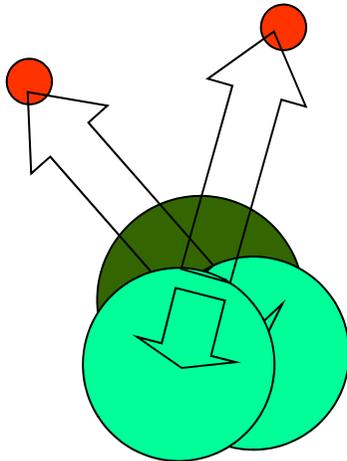
Reines/Cowan(1956) ニュートリノを検出



2体崩壊と3体崩壊



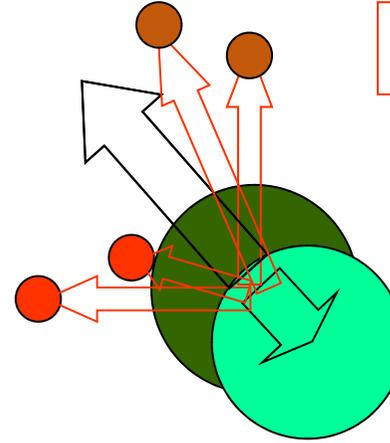
2体



p は決まった値になる

$$0 = \vec{P} + \vec{p}$$

3体

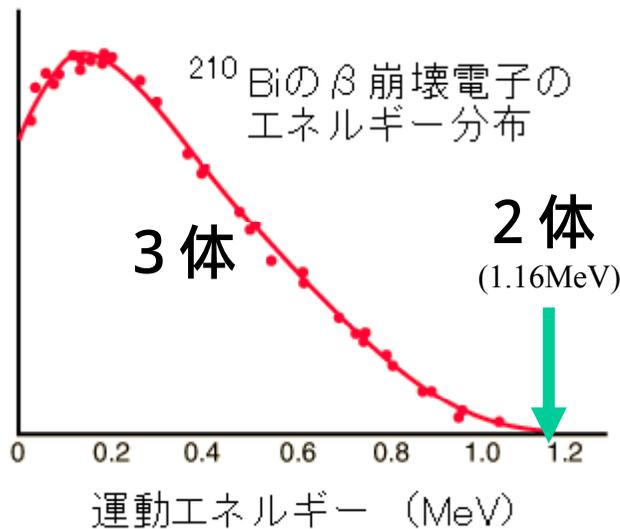


p_2 は連続的な値になる

$$0 = \vec{P} + \vec{p} = \vec{P} + (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)$$

質量がゼロの場合 $|\vec{p}_2| = E_2 / c$

強度



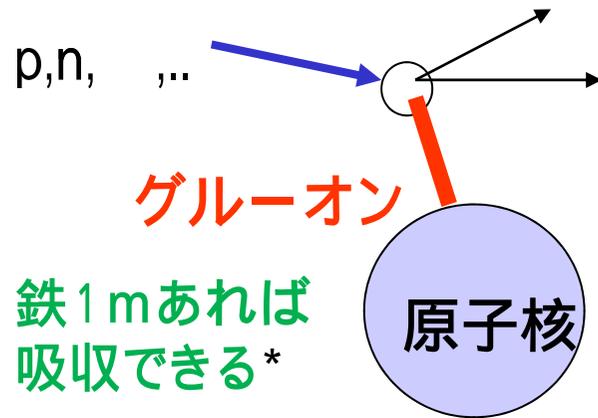
${}^{90}\text{Y}$ と電子以外に発生粒子がないと、スピンの保存しない。
また、電子のエネルギーは ${}^{90}\text{Sr}$ と ${}^{90}\text{Sr}$ の重さの差で決まるはずである。測定結果は連続分布(~1911 Hahn/Meitner)

最大エネルギー値は、2体の場合の値に極めて近く、これは?の質量がほぼゼロであることを示す
(質量があると質量エネルギーに使われる)

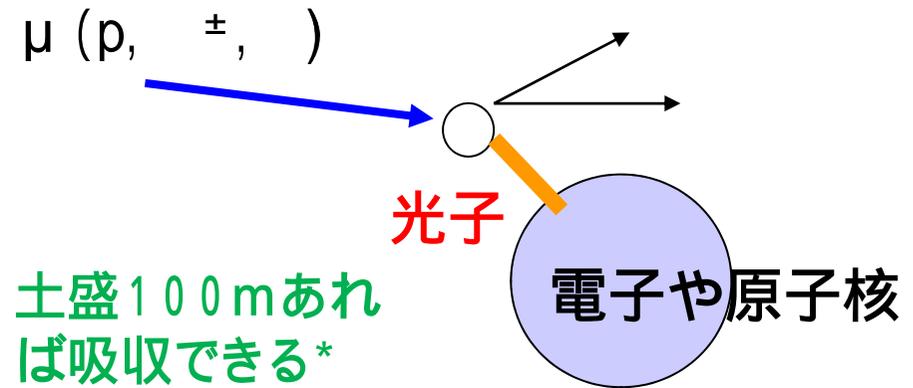
ニュートリノの検出は難しい

レプトン(電子の仲間 = 強い力を受けるクォークの仲間ではない)
検出: 粒子の信号を得るために、測定器と相互作用を起こさせる

強い力を受ける粒子 (= ハドロン)
は、原子核と反応できる(しやすい)

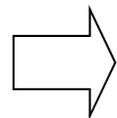
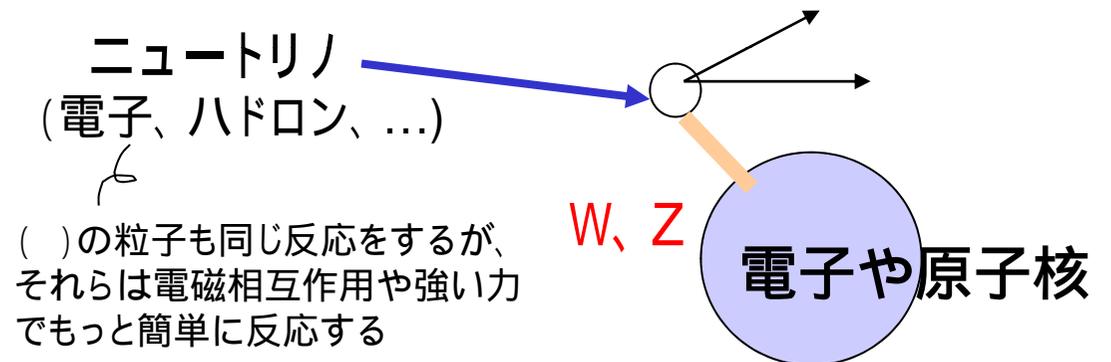


レプトンでも電荷をもっているミュー粒子は電磁気力で反応できる



*加速器で発生する高エネルギーの粒子に対して

レプトンで電荷をもたない
ニュートリノは弱い力でのみ反応できる(とても反応しにくい)



地球を簡単に貫く(水中約1兆km*を走ると平均して半分が反応)
検出器とも反応しにくい = 検出しにくい

cf. 太陽系~45億km

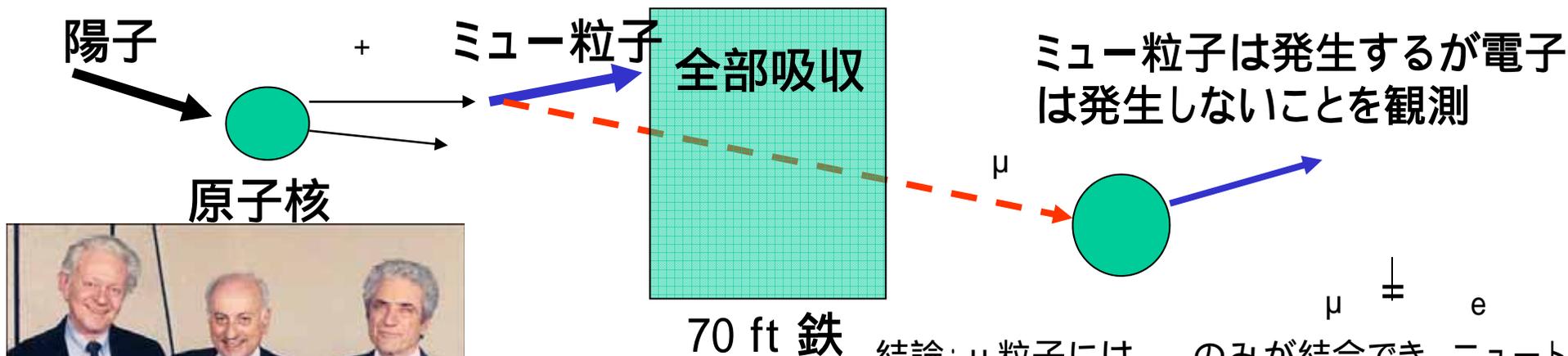
ニュートリノを検出して種類を判定するには

ニュートリノには3種類ある

(荷電レプトンも3種類 = 電子、ミュー粒子、タウ粒子)

宇宙線で発見

加速器で発見



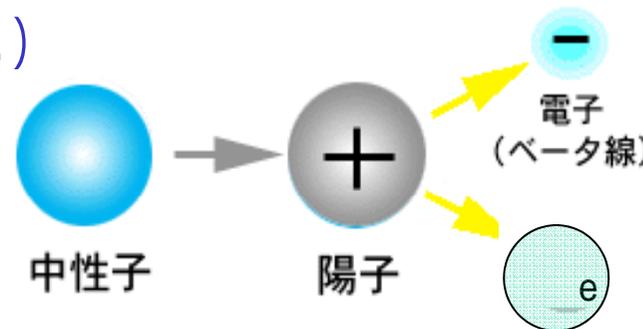
1962 Lederman/Schwartz/Steinberger

結論: μ 粒子には ν_{μ} のみが結合でき、ニュートリノには種類があることが判明。荷電レプトンに対応して3つのペア (weak 2重項) が構成される

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{\mu} \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{\tau} \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

- 観測にはたくさんのニュートリノが必要 (大気、原子炉*1、太陽、超新星*2、加速器、...)
- さらに大きな検出器でより多くの反応を見る

原子炉*1 (1995年ノーベル賞 Reines)
超新星*2 (2002年ノーベル賞 小柴)

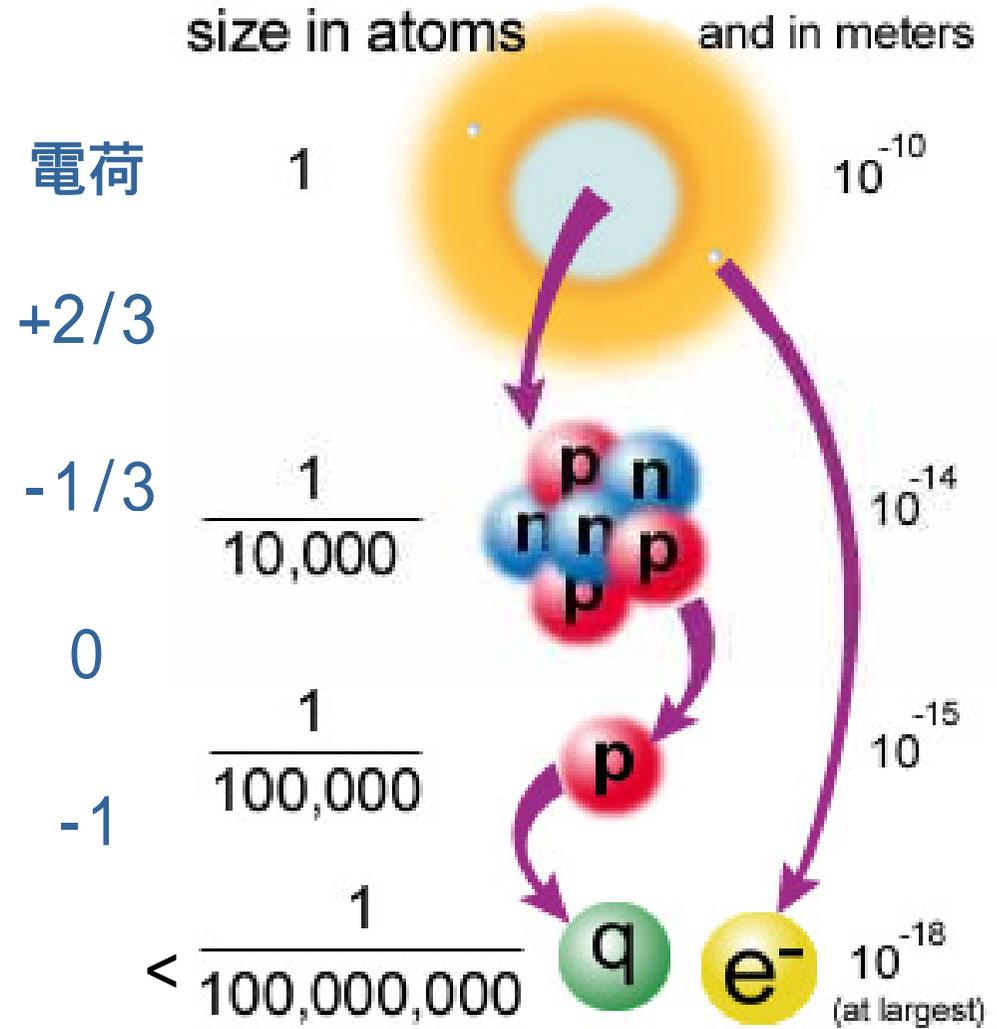
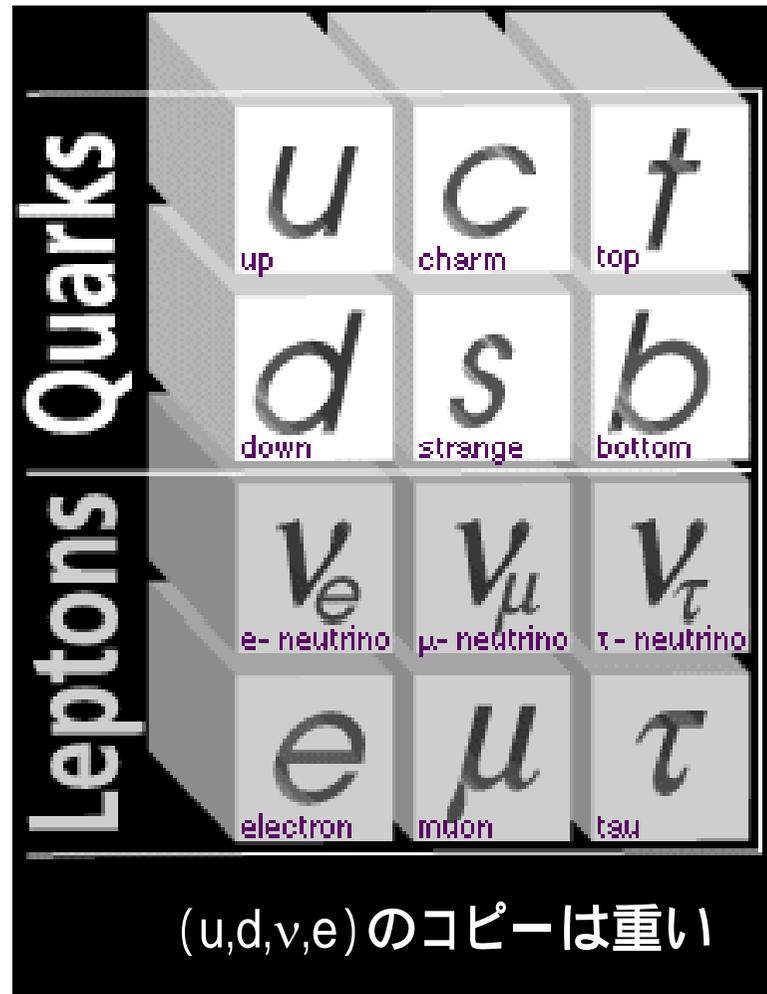


素粒子の標準模型

— 物を構成する粒子 —

物を構成する粒子:

6個のクォークと6個のレプトン



3つの“世代(種族)”：似たグループのコピー
通常世界はほとんど第一世代でできている

素粒子の標準模型

— 力を伝える粒子 —

力を伝える粒子 (スピンの整数のボーズ粒子):

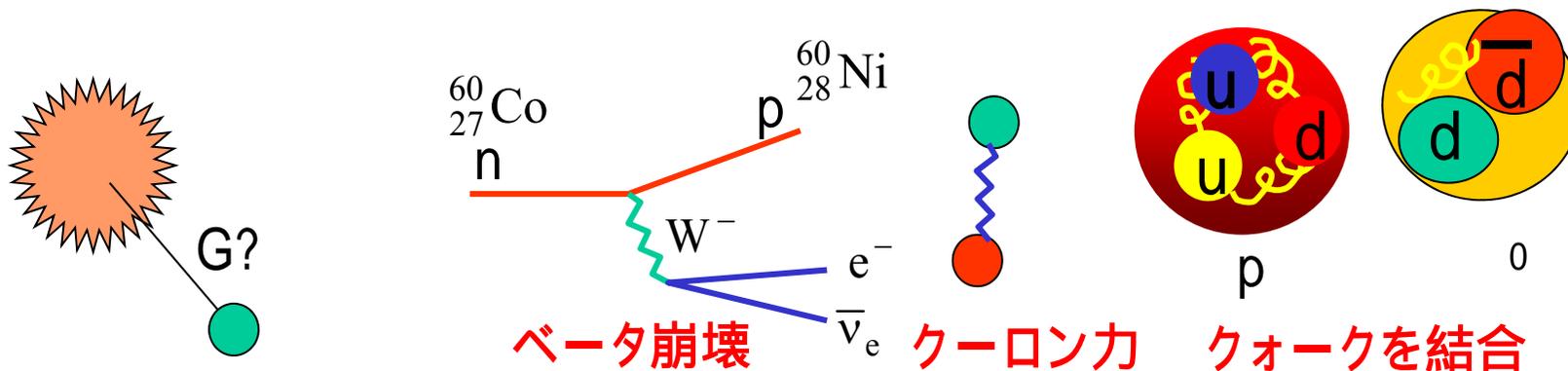
ゲージ群 $SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(3)$
 後で

4種類の相互作用それぞれに

3 + 1 個の粒子

8 個の粒子

(グルーオン、光子、ウィークボゾン、グラビトン?)



相互作用	重力	弱い (電弱相互作用)	電磁	強い
媒介粒子	グラビトン (未確認)	W^+, W^-, Z^0	光子	グルーオン
作用する粒子	重さのあるもの すべて	クォークや レプトン, WZ	電荷のある ものすべて	色のあるクォーク やグルーオン



Glashow-Weinberg-Salam

1985年までにウィークボゾンが
発見され、統一された

光-電磁気力を伝える粒子

光は粒子か波動か？

18世紀末までは

光は直進する

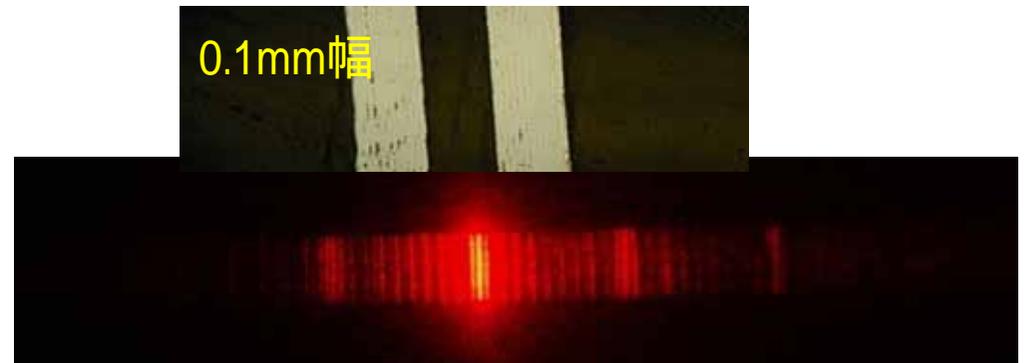
光は鏡で反射する

波に特徴的な性質：「回折」や「干渉」
が観測されない

光は粒子(ニュートンら)

19世紀初頭：ヤングやフレネルの実験

光の波長の短さに相応し、微細加工した
スリットでの干渉実験(実際に干渉をみよう)



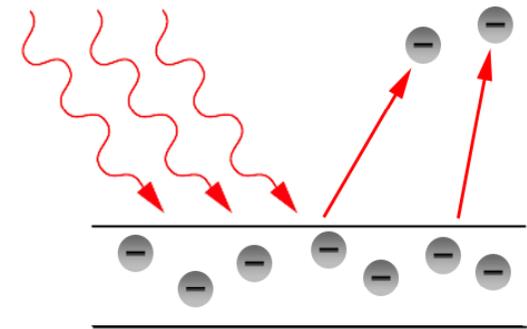
1864：マックスウェル「電磁波」 電磁波の速度は光速と同じ

1888：ヘルツ「電磁波の観測」

光は電磁波

1905：アインシュタイン「光は粒子の性質をもつ」

(光電効果：光という粒子が電子を弾き飛ばす)



ミクロの世界では両方の性質をもつ

波と粒子の区別はない

場の量子論(ハイゼンベルグ、パウリ)、中間子論、ファインマン/シュウィンガー/朝永

力を伝えるのも粒子(と考えてよい)である

ところで 電子も波でもある



光には粒子の性質がある
1905 アインシュタイン

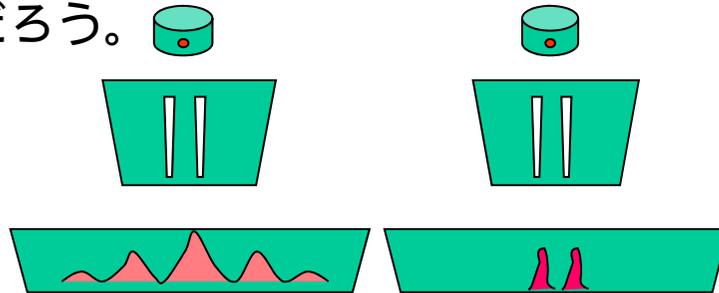


粒子には波の性質がある
1924 ド・ブロイ

粒子が波の性質をもつことは、
量子力学の中心概念である

量子力学の概念を理解できますか？

複数の電子を同時に発射して2重スリット実験をすれば、左のような干渉縞が得られるだろう。



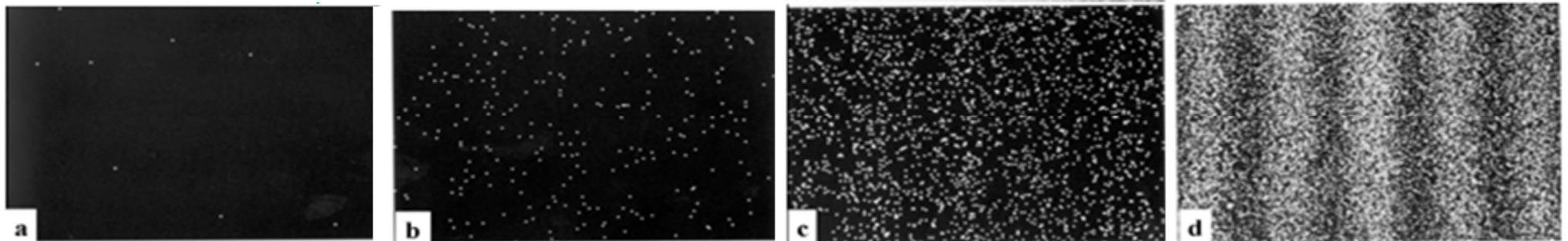
では、電子1個ずつ発射したら、
左右どっち？

1個の電子にも波動
の性質がある！



1個の電子も干渉する
1989 外村

単電子による2重スリット実験結果 測定個数を増やすと2重スリットと同じの分布になる



弱い相互作用を伝える - ウィークボゾンW/Z

電磁相互作用は光子により媒介、弱い力はウィークボゾン

場と量子：Maxwellの式に現れるEやB（場）はマクロな量で量子場の平均値
ミクロには、光子が生成消滅している。場は量子を生成する能力。

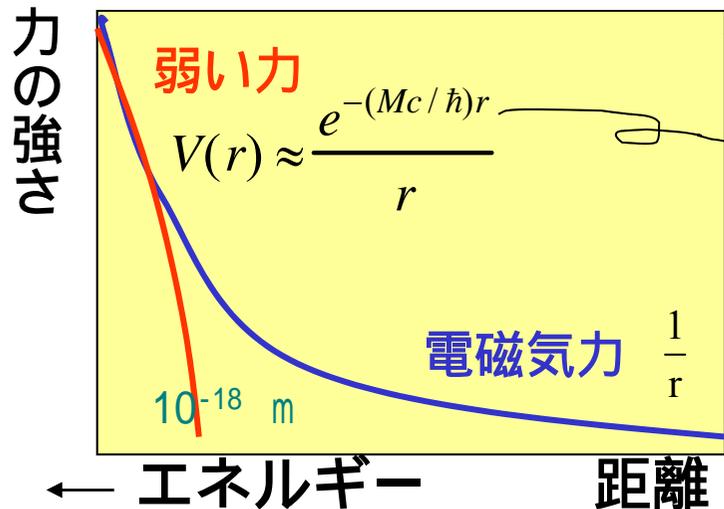
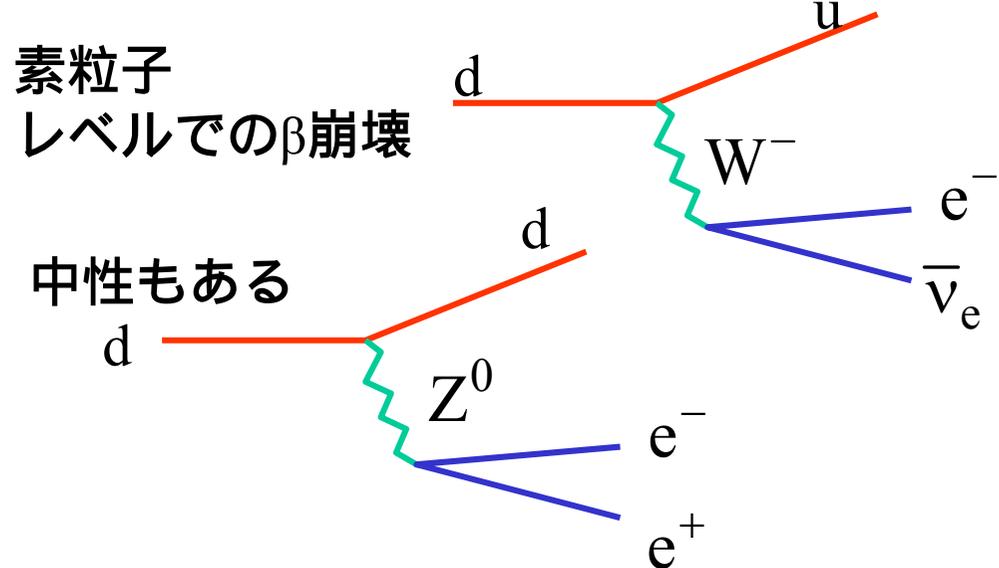
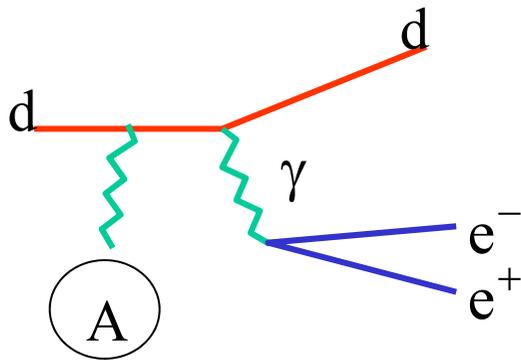
光：電磁相互作用

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$

弱い相互作用

物質Aと反応して電子・陽電子対を発生

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



重さのある粒子で媒介されると、到達距離は短くなる
人間の世界では電磁気力が支配的で、弱い力は極めて弱い。高エネルギー（ $E \sim 100 \text{ GeV}$ ）では弱い力の大きさは電磁気力と同程度になる
“電磁気力と弱い力の統一”の可能性

W/Z粒子の発見

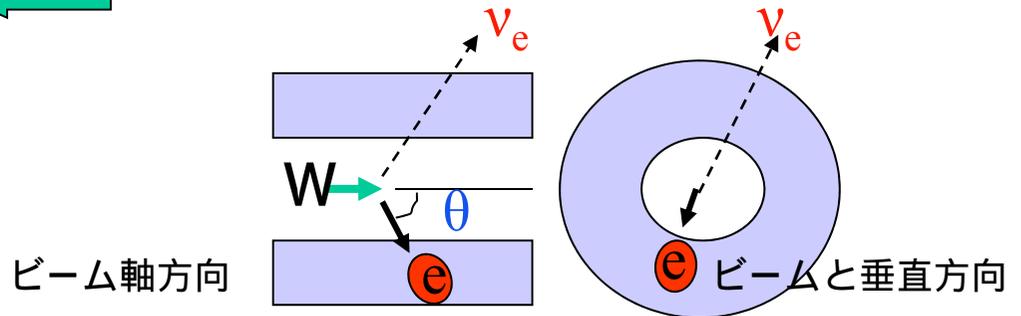
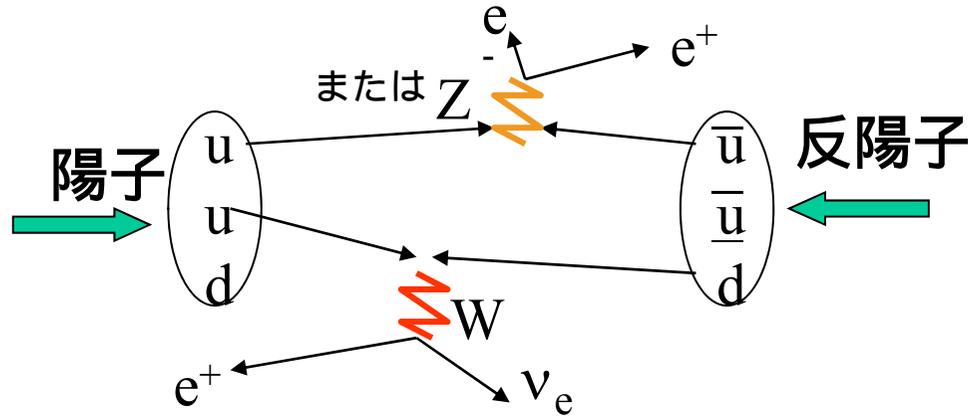
Rubbia/Van der Meer



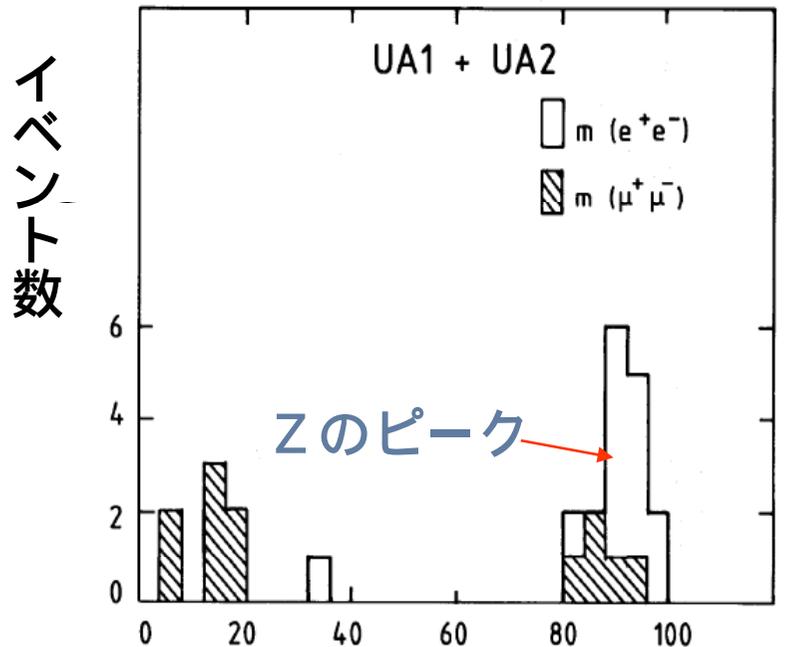
実験を設計

反陽子ビーム

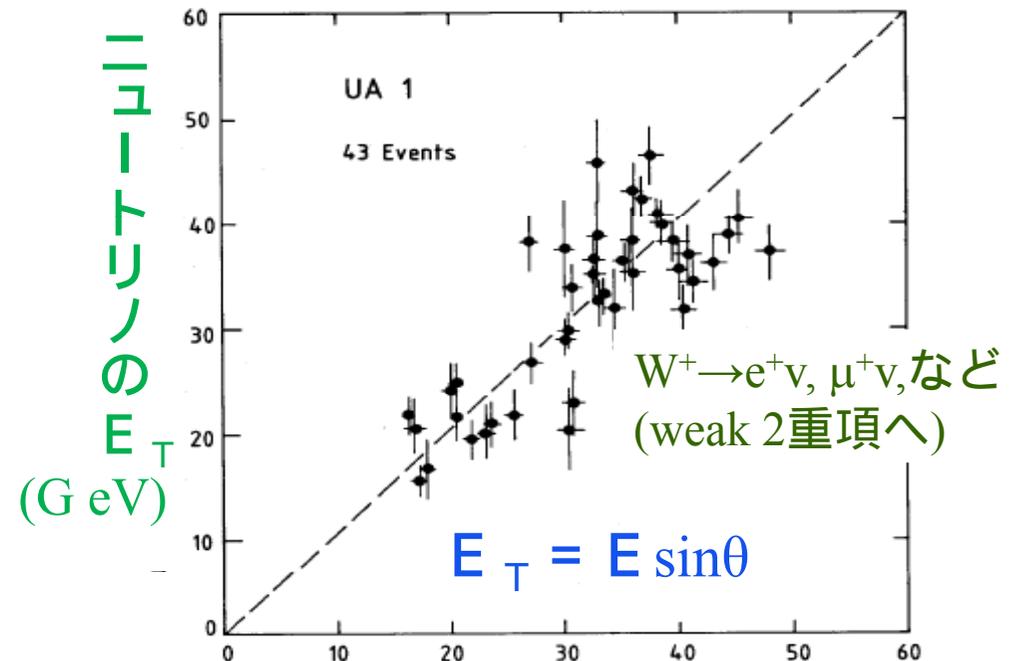
1983 CERN SppS加速で270GeVの陽子と反陽子を正面衝突させ、W/Z粒子を観測した。



$Z \rightarrow e^+e^-, \mu^+, \mu^-$ などに崩壊 (γ と同じ)



e^+e^- や μ^+, μ^- の不変質量(GeV)

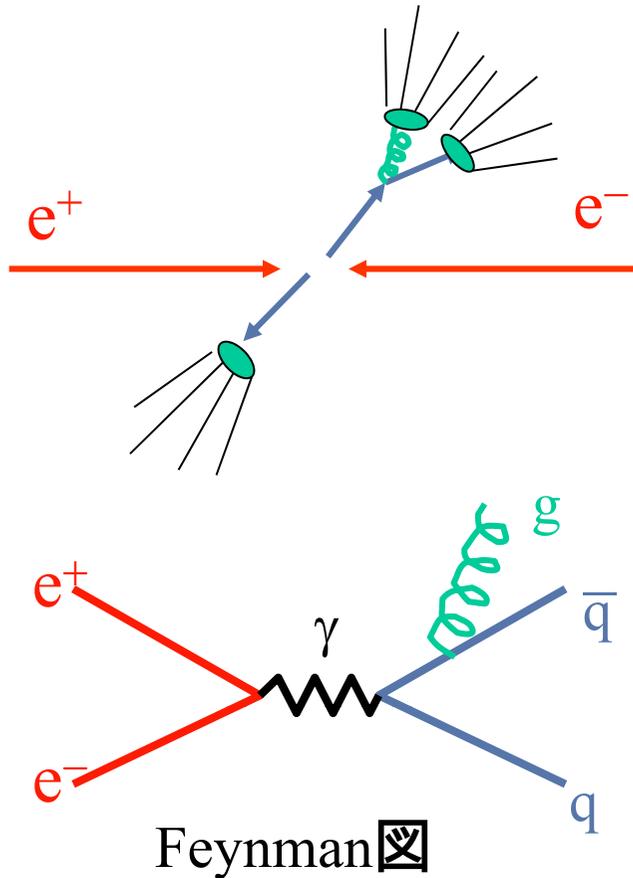


ニュートリノの E_T (GeV)

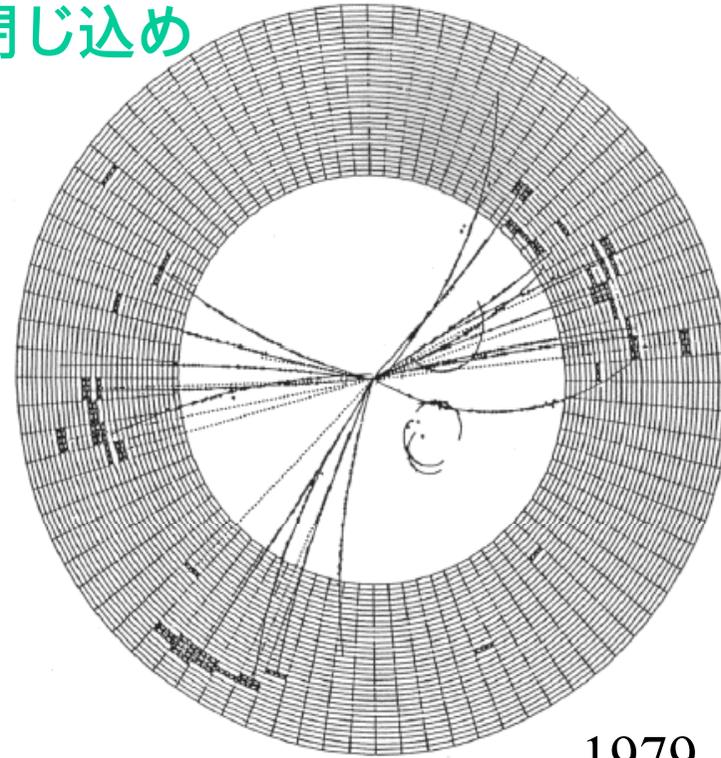
電子の E_T (GeV)

$$E_T = E \sin\theta$$

強い相互作用を伝える：グルーオンの存在



カラーの閉じ込め

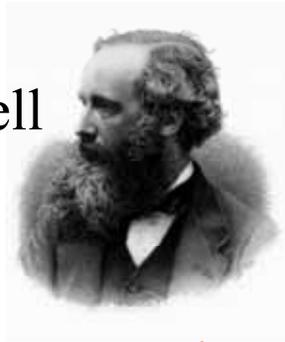


*** SUHS (GeV) *** PTOT 35.788 PTRANS 29.954 PLONG 15.788 CHARGE -2
TOTAL CLUSTER ENERGY 15.169 PHOTON ENERGY 4.893 NR OF PHOTONS 11

クォーク(と思われる)からグルーオン(と思われる)が放出された3ジェット事象を観測 予想される分布と一致
グルーオンもカラーを持っているので、1fmを超えて存在できずに、多くのハドロンになる(ジェットの生成)

力の統一の変遷

1864:Maxwell



Glashow-Weinberg-Salam

1983

1984

Rubbia
Van der Meer

1919~1937:陽子・中間子

強い力

電気力

磁気力

電磁気力

電弱力

陽子崩壊？
XYボゾン？

1687:Newton



弱い力

1911~1931 : β 崩壊・フェルミ理論

地上の重力

重力 = 万有引力

天体間の引力

統一場理論
超弦理論？
重力子？

総合科目 現代物理学への招待 III

- 素粒子探求の歴史
- ハドロンからクォークへ - 標準模型の概要
- **素粒子に大きさがあるか？ - 加速器の紹介**
- 素粒子探求の現状

素粒子は不可分のものだから、大きさが測定できればそれは素粒子ではなく内部構造のあるもの

微細構造を観測するには高エネルギーが必要

素粒子構造の尺度は短いので、素粒子の実験的研究には高エネルギー粒子が必要。そのため、素粒子実験は、高エネルギー実験とも呼ばれる。



通常、自然単位系を使う $\hbar = c = 1$

エネルギーと1/(長さ)は同じもの

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\hbar = 6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

$\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ を用いればSI単位系に変換できる

エネルギー 長さの変換

物質波 $E = h \nu = hc / \lambda$ を使うと

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1.2 \times 10^{-12} (\text{MeV} \cdot \text{m})}{E(\text{MeV})}$$

観測に必要なエネルギー

E			
1 eV	10^{-6}	=mm	分光学、物性
1 keV	10^{-9}	=nm	X線回折、原子構造
1 MeV	10^{-12}	=pm	原子核
1 GeV	10^{-15}	=fm	素粒子

原子核レベル < 1 fm > より小さなものの観測には ~ 1GeV以上が必要

175 GeVのtopの観測: ~ 10^{-18} m の大きさを観る

Mjj = 1364 GeVの観測: ~ 10^{-19} m の大きさを観る

Rutherford散乱: 原子核の存在

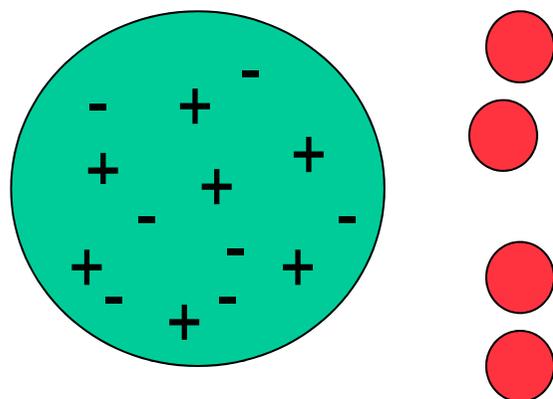
1909 Geiger-Marsdenの 線の金箔での散乱

1911 Rutherfordの原子核

素粒子実験の「起源」:
エネルギーの高い粒子をぶつけて反応をみる

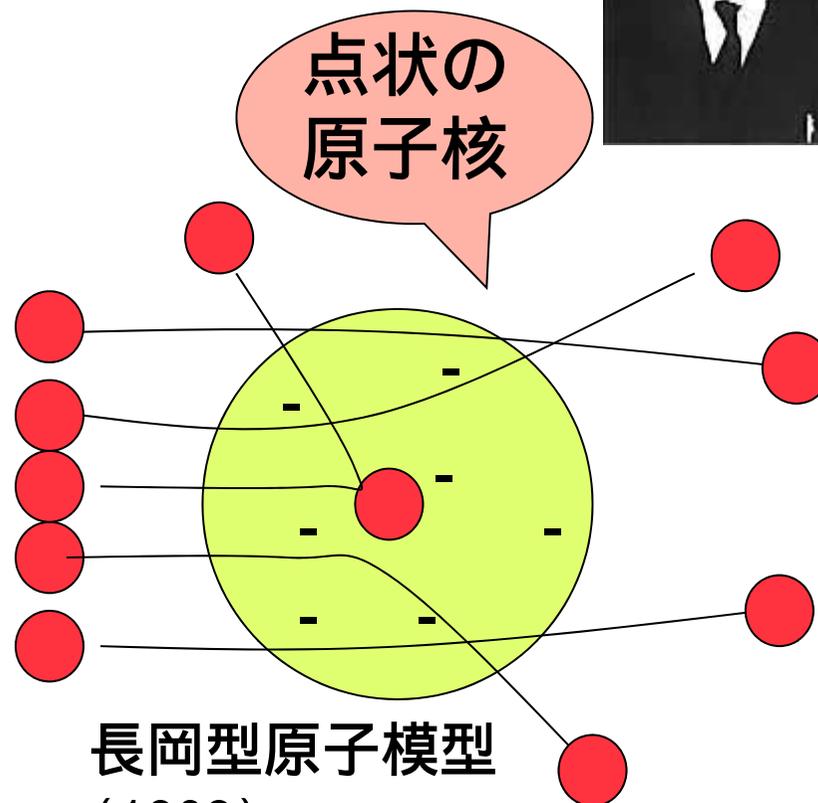


He⁺⁺



Thomson型原子模型 (1903)

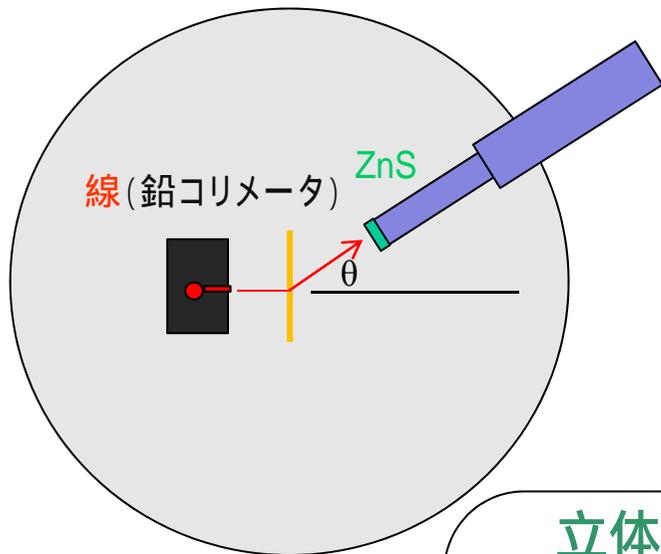
公転する電子はエネルギーを放出して
安定な軌道を取れないから長岡型では
あり得ない(Thomson)



長岡型原子模型
(1903)

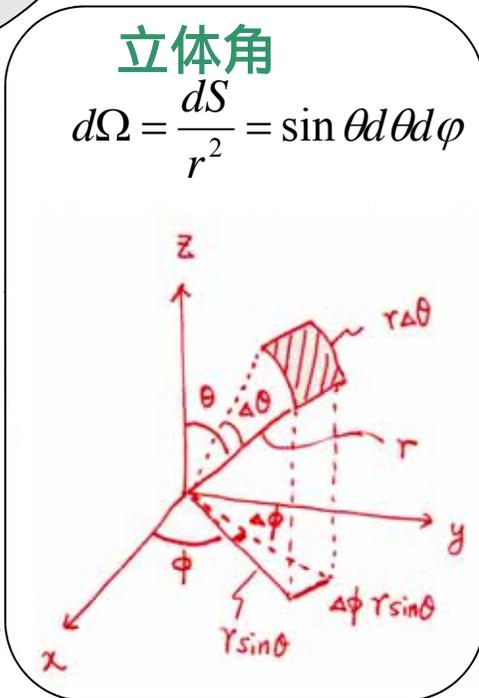
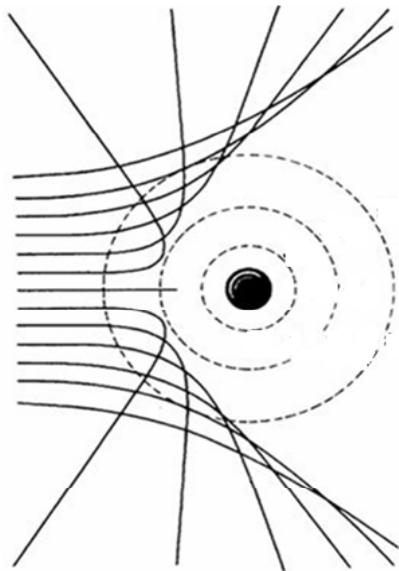
量子力学の確立により、電子軌道は量
子化している。最低より低いエネルギー
(準位)はないため、電子は安定して公転
できる(Bohr)

Rutherford 散乱角度分布

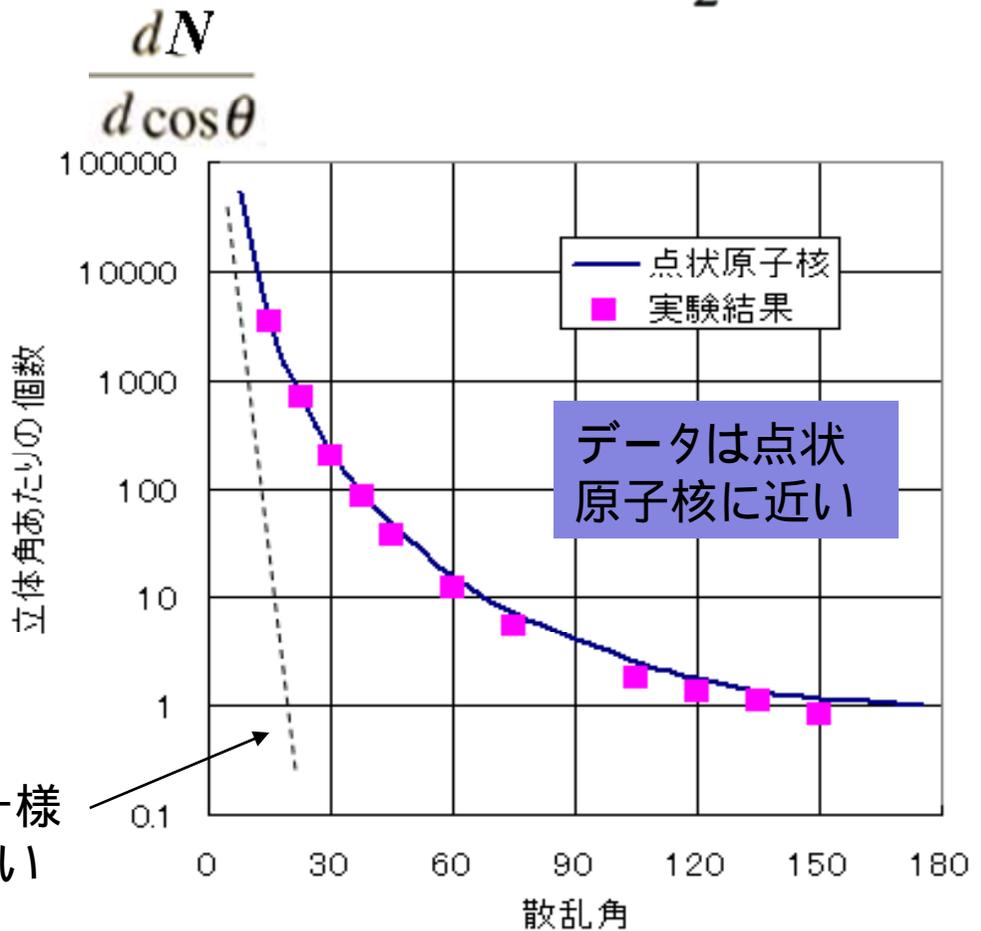


スピン 0 の点状荷電粒子とのクーロン散乱

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Rutherford}} = \frac{1}{4} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m^2}{p^4} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$



原子の電荷分布が一様である場合は、一様の条件によるが、後方散乱は極めて小さい

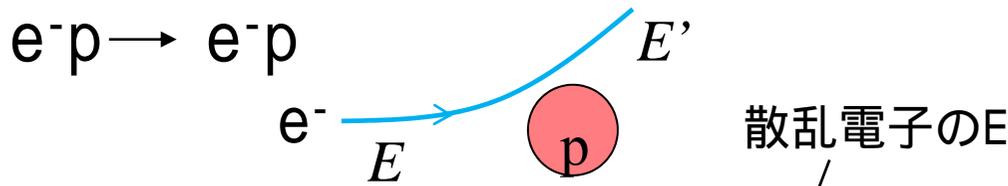


陽子の大きさの測定



1956 Hofstadter

SLAC 600MeV 電子加速器を陽子に当て、陽子の電荷分布 (= 陽子のサイズ) を測定した。Rutherfordの実験よりエネルギーが高く、より良い顕微鏡！



$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rutherford} \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot \frac{E'}{E}$$

eのスピンの1/2の効果 pの反跳の効果

Dirac: 陽子のスピン1/2も考慮

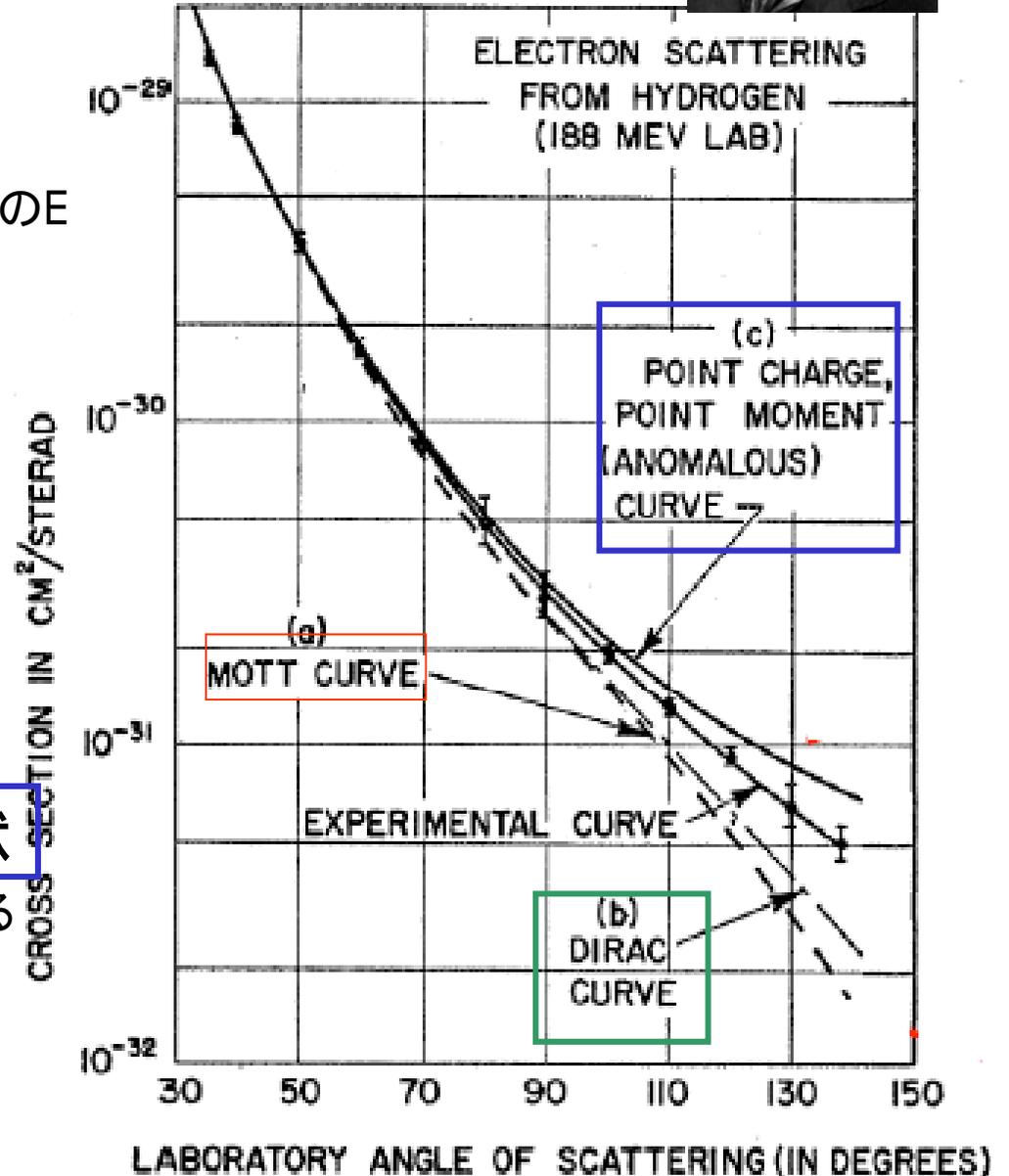
まだ実験を説明できない

異常磁気モーメント*(後述)を考慮した点状

やっと大きくなった。大きさを考えられる

実験値は「点」よりも低く、電荷に分布がある
形状因子

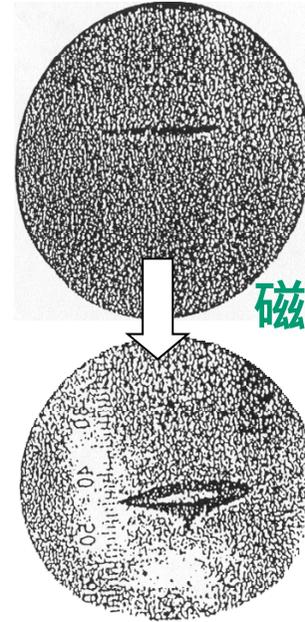
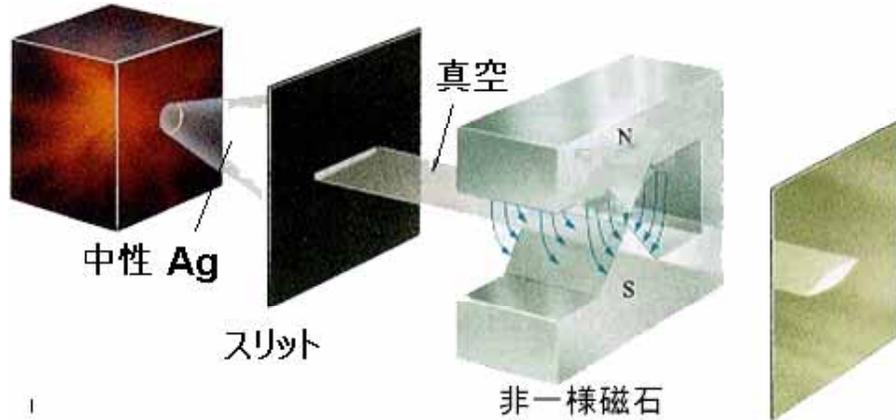
陽子や中性子の大きさ ~ 0.8 fm



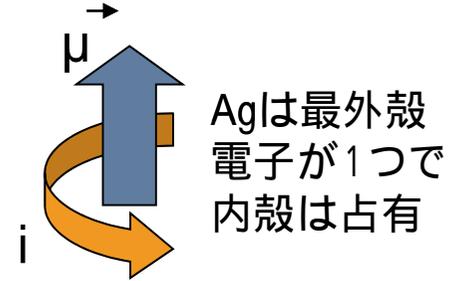


磁気モーメントとスピンの導入

1922年: SternとGerlach は銀原子⁰が磁場の影響を受け、強さに依存して配向する 磁気モーメント



~ 原子は磁石になっている



角運動量 \vec{L} の電荷 e の磁気モーメントは $\frac{e\hbar}{2m} \vec{L}$

1924年 Pauli: 最外殻電子は2つの自由度がある; 電子は同じ量子数を取れない (Pauliの排他律を提唱)



1925年 2つの自由度は電子の回転方向(=spin) 電子に「回転」はおかしい
しかし実験事実が、自由度2を必要とした

1927年 Pauli: 内部自由度としての「スピン」を定式化(つまり回転とspinは無関係)

1928年: Dirac方程式(スピン1/2粒子の相対論的量子場の運動方程式)

電磁場中のスピン1/2の点状粒子の運動を非相対論近似で解くと

磁気モーメント $\frac{e\hbar}{2m}$ を持つ (回転のない素粒子にも磁気モーメントがある)



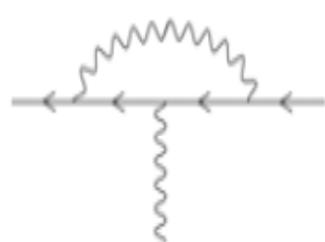
磁気モーメントと電子の大きさ

磁気モーメント $\frac{e\hbar}{2m}$ を持つ (回転のない素粒子にも磁気モーメントがある)

電子の磁気モーメントを $\vec{\mu} = g \vec{s} \frac{e\hbar}{2m}$ とすると (g: 磁気回転比)
 Dirac: 「スピン1/2の素粒子は $g=2$ である」

$g(\text{測定値}) = 2.002319304374(8)$
 とわずかにずれている

1948: Schwinger 量子電磁気学*
 $g=2 + \frac{\alpha}{\pi} + O(\alpha^2) = 2.00232 +$

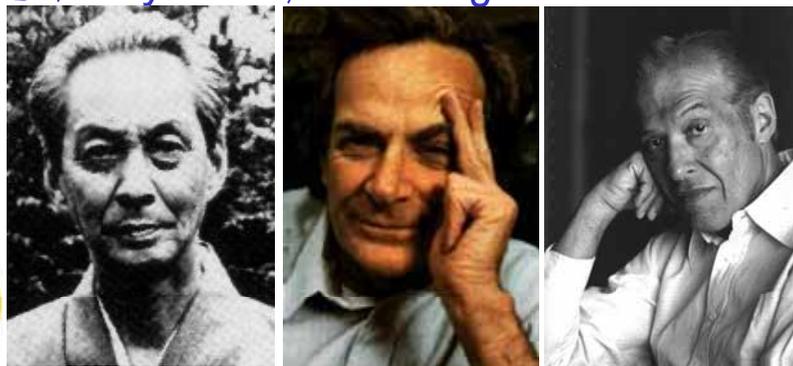


光子の放出・吸収(量子効果)により実効的な電荷が変わる。その効果を量子電磁気学で計算し2からのずれを説明した。

↑
 微細構造定数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137}$

*朝永、Feynman, Schwinger

μ 粒子に対しても
 $g(\text{測定値}) = 2.0023318320(12)$

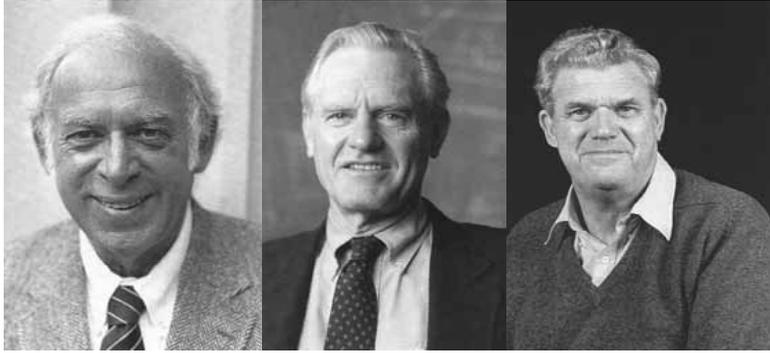


高次の補正も考えると電子や μ 粒子の磁気モーメントはDirac素粒子と一致
 異常磁気モーメントが検出されていないことから、今もeや μ は素粒子
 陽子($g/2=2.79$), 中性子($g/2= - 1.91$)は異常磁気モーメントがあり、素粒子でない



核子中のパートン(クォークやグルーオン)の存在

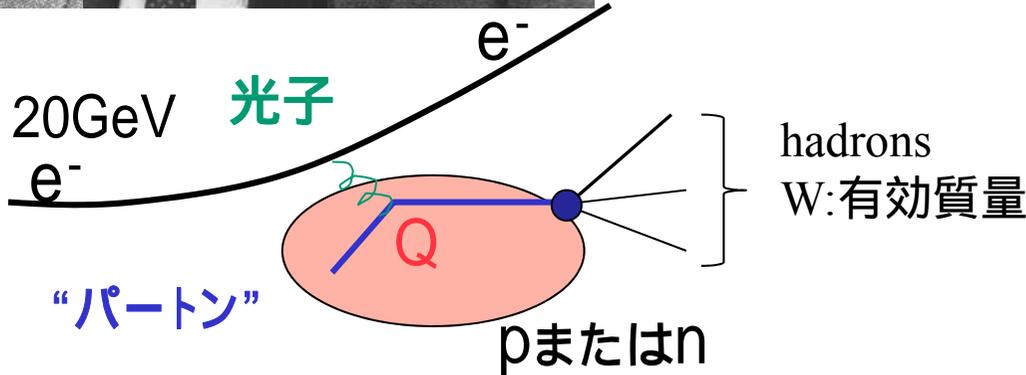
1968 Friedman, Kendall, Taylor



もっとエネルギーを上げる(20GeV)と陽子の内部が見えてきた(深非弾性散乱)

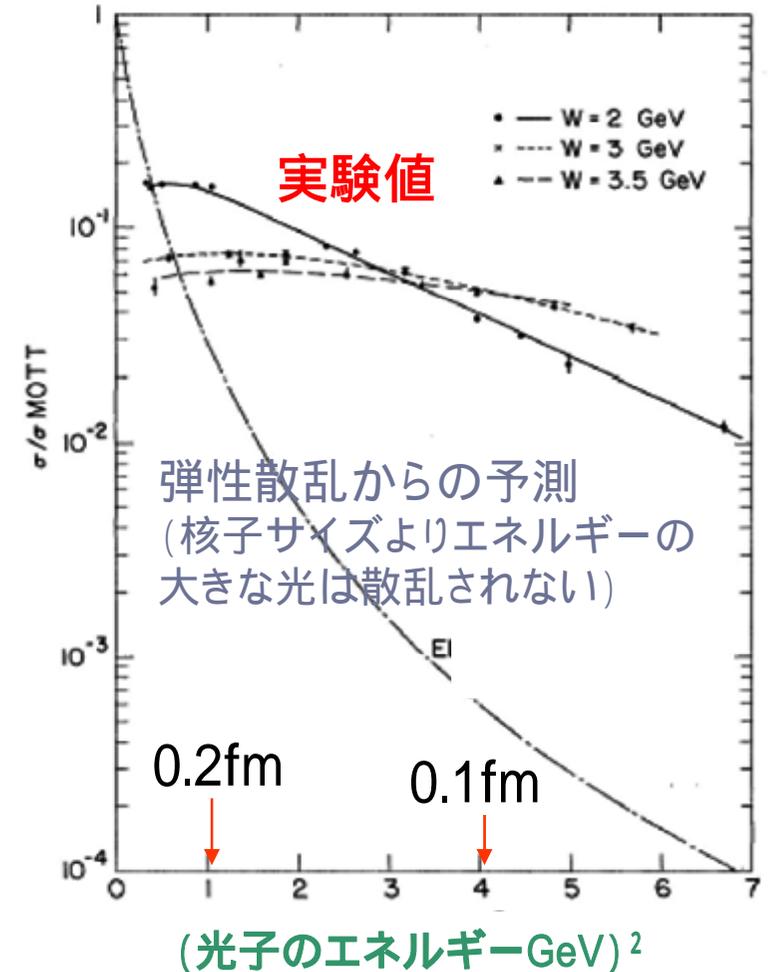
$$e^- p \rightarrow e^- + n + p + \dots$$

散乱電子が弾性散乱よりさらに大角度に観測され、核子に内部構造がある = **パートン**(Bjorken, Feynman)



反応のおこりやすさは: パートの数分布と**電荷Q**
 核子中のクォークの電荷と分布が分かる
 運動量分布から: 中性のパートンの数分布も分かる
 核子中のグルーオンの分布が分かる

測定されたパートンの電荷や数は、クォーク模型のものと一致し、クォークが実体のものとなった



高エネルギー実験を支えてきたものは加速器である

粒子加速器



最初の4”サイクロトロン

サイクロトロン (~ 30 MeV) Lawrence/Livingstone 1931

2つのD型真空容器に一様磁場Bを加える

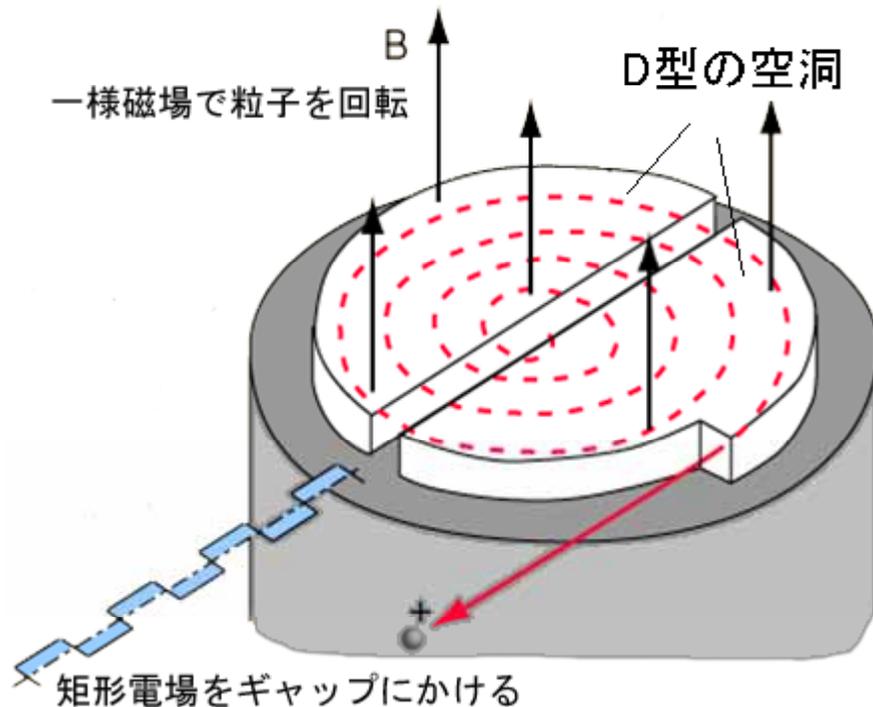
中心から荷電粒子を発射すると、周期 $=eB/m$ で円運動

回転周期に一致させてDのギャップに電圧を送り、粒子を加速す

(加速とともに半径は大きくなるがエネルギーが低い限り、

周期数は一定でよい)

(今でも人工放射能の生成に用いられている)



中央部に本体、上下は電磁石

粒子加速器 -synchrotron-

シンクロトロン：サイクロトロンの一定周波数での加速では、エネルギーが高くなると相対論的効果（実効質量が増す）で加速できなくなる

2極電磁石を粒子のエネルギーとともに強くする（シンクロさせる）

高周波発生器の周期を粒子の通過に同期させる（シンクロさせる）

4極電磁石でビームの拡がりを防ぐ（シンクロさせる）

図では簡略化しているが多くの電磁石が使われる

世界最大のシンクロトロン LEP

電子×陽電子 104 GeV

周長 27 km

3280 Dipoles (0.14T)

816 Quadrupoles

最大エネルギーのシンクロトロン TEVATRON

陽子×反陽子 980 GeV

周長 6.3 km

774 Dipoles (4.4T)

216 Quadrupoles

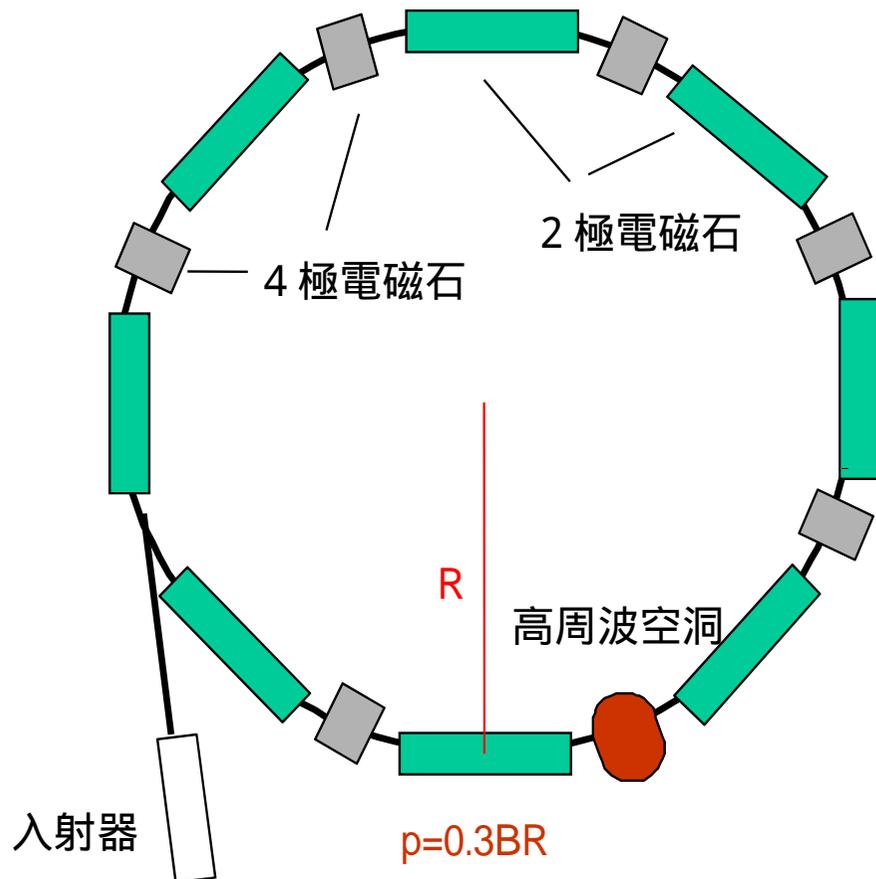
LEPを陽子シンクロトロンへ LHC(2008～)

陽子×陽子 7 TeV

1232 Dipoles (8.3T)

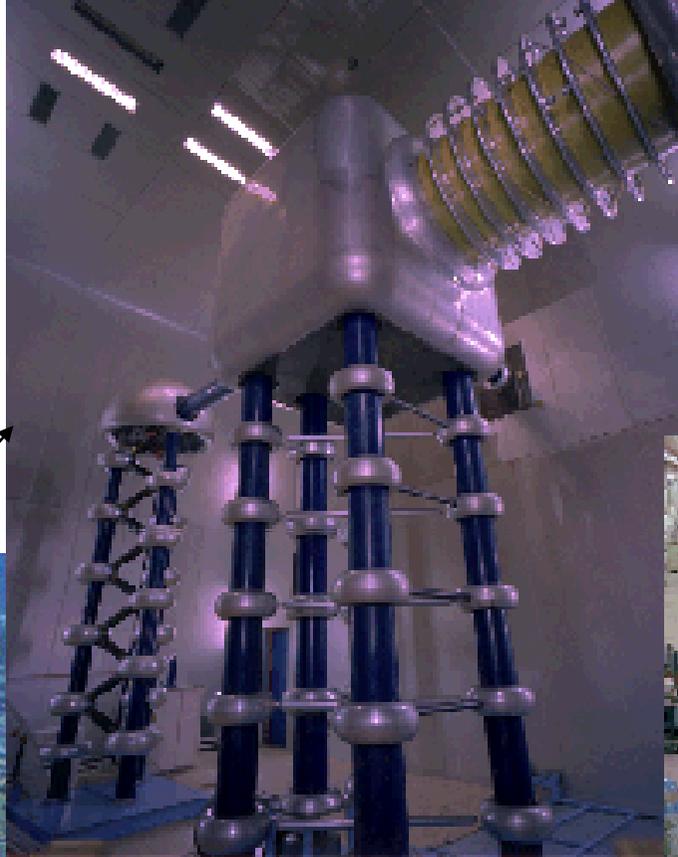
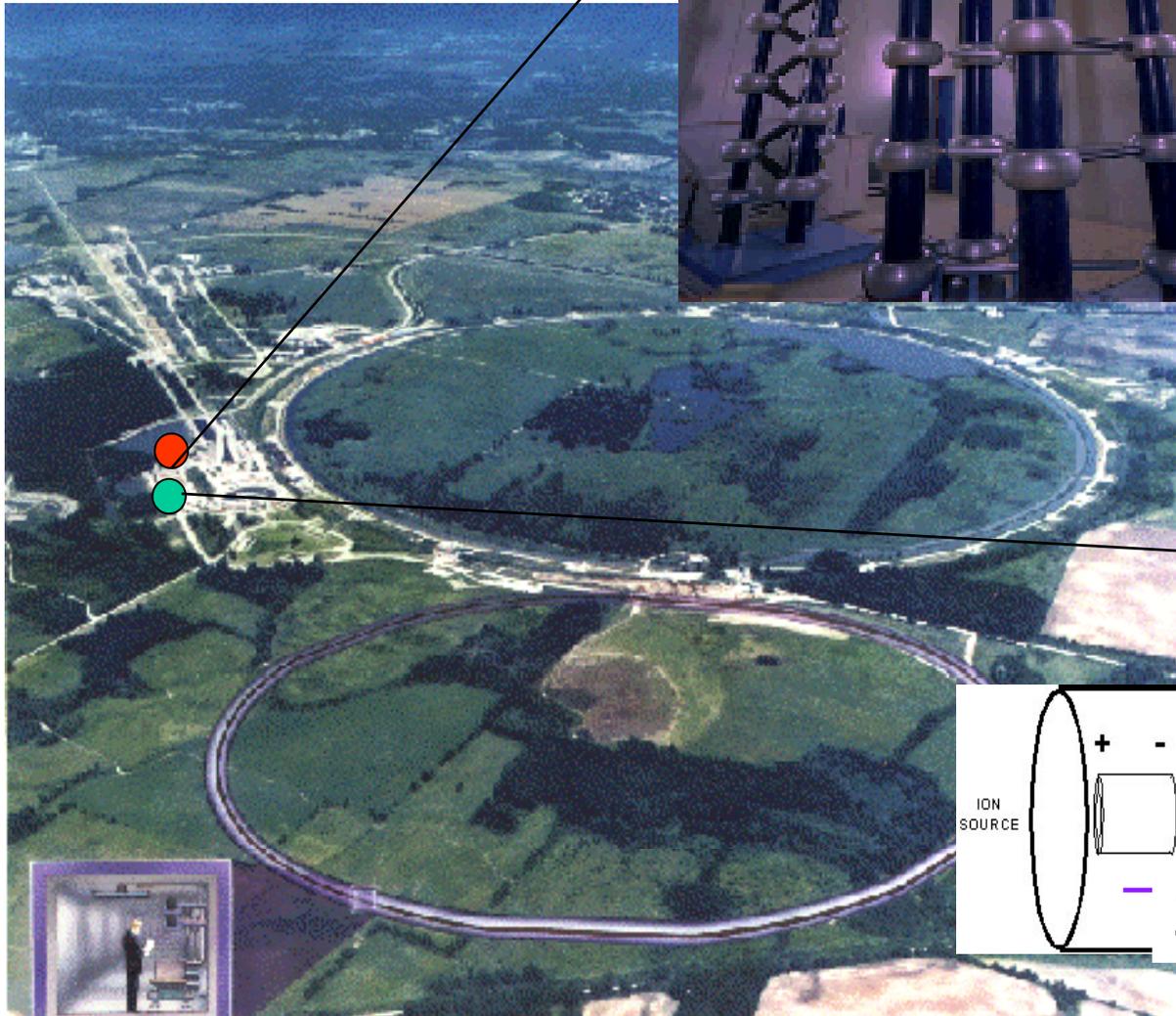
482 Quadrupoles

2009年12月にTEVATRONエネルギーを超える衝突を実現



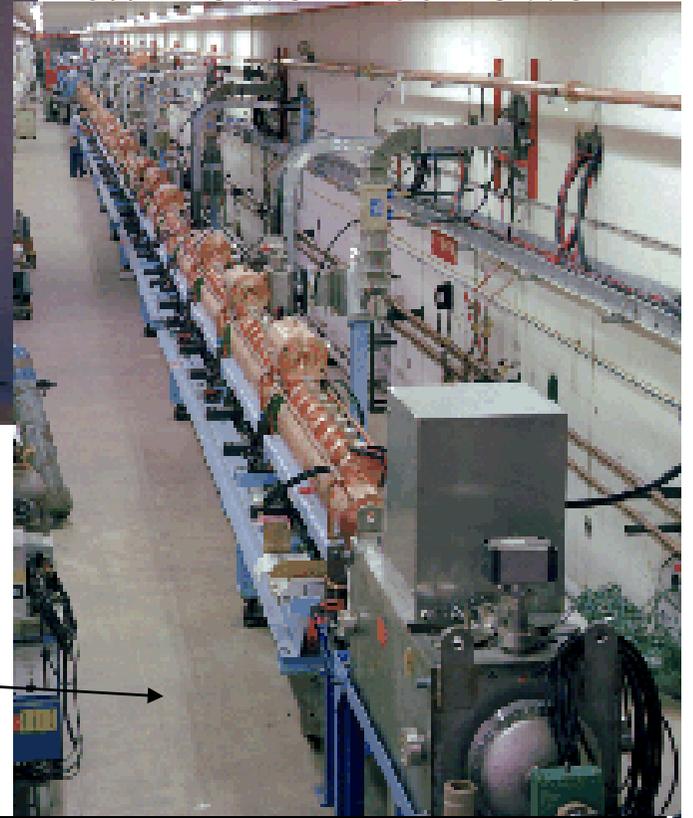
粒子を加速する TEVATRONの例

いくつかの装置を使って、
徐々にエネルギーを上げる



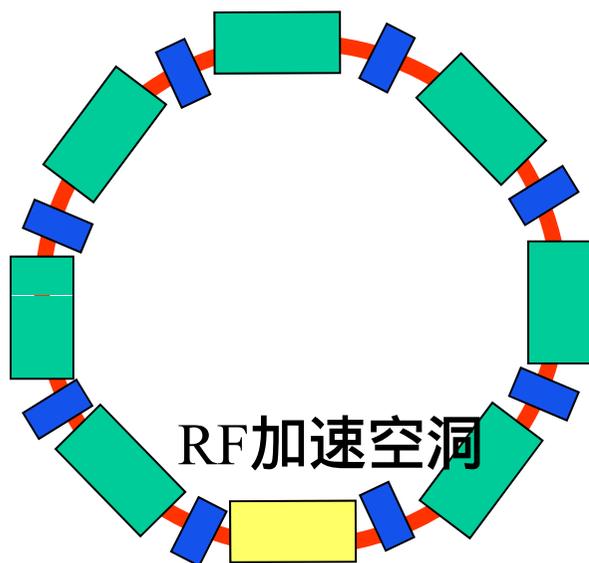
1 : Cockcroft-Walton :
P 0.7 MeV/c

2 : LINAC :
0.7 MeV/c 400MeV/c

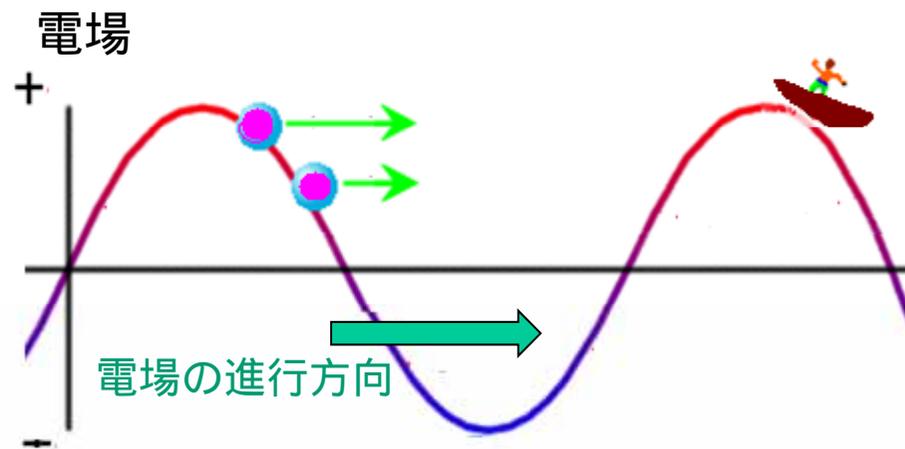


真空 粒子の通過に合わせて電圧をかける

粒子を加速する

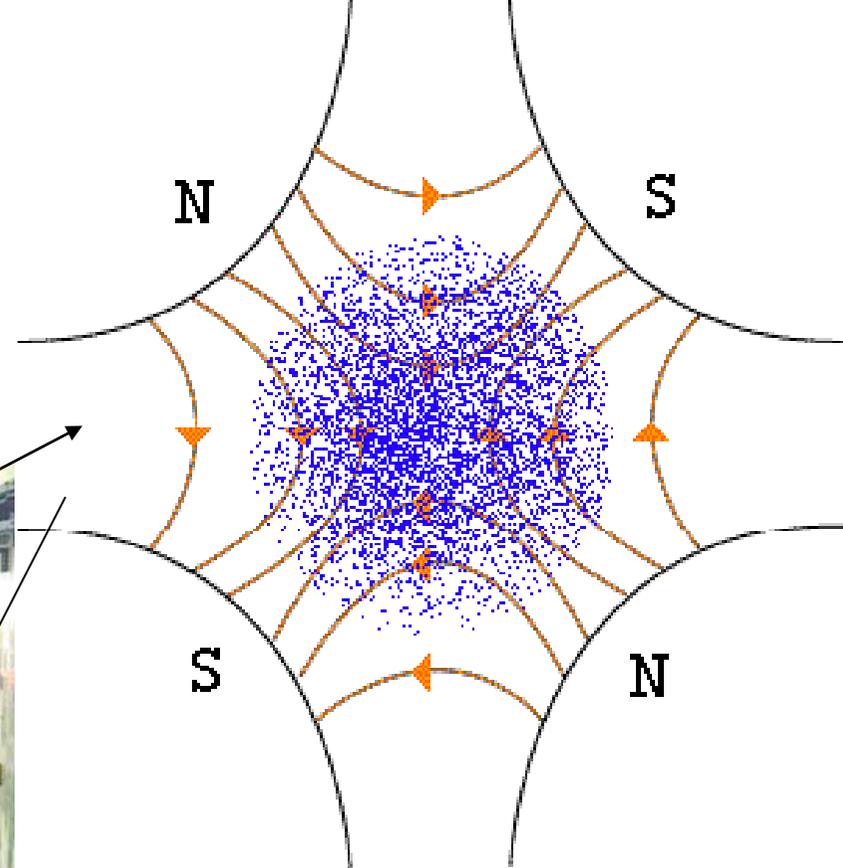
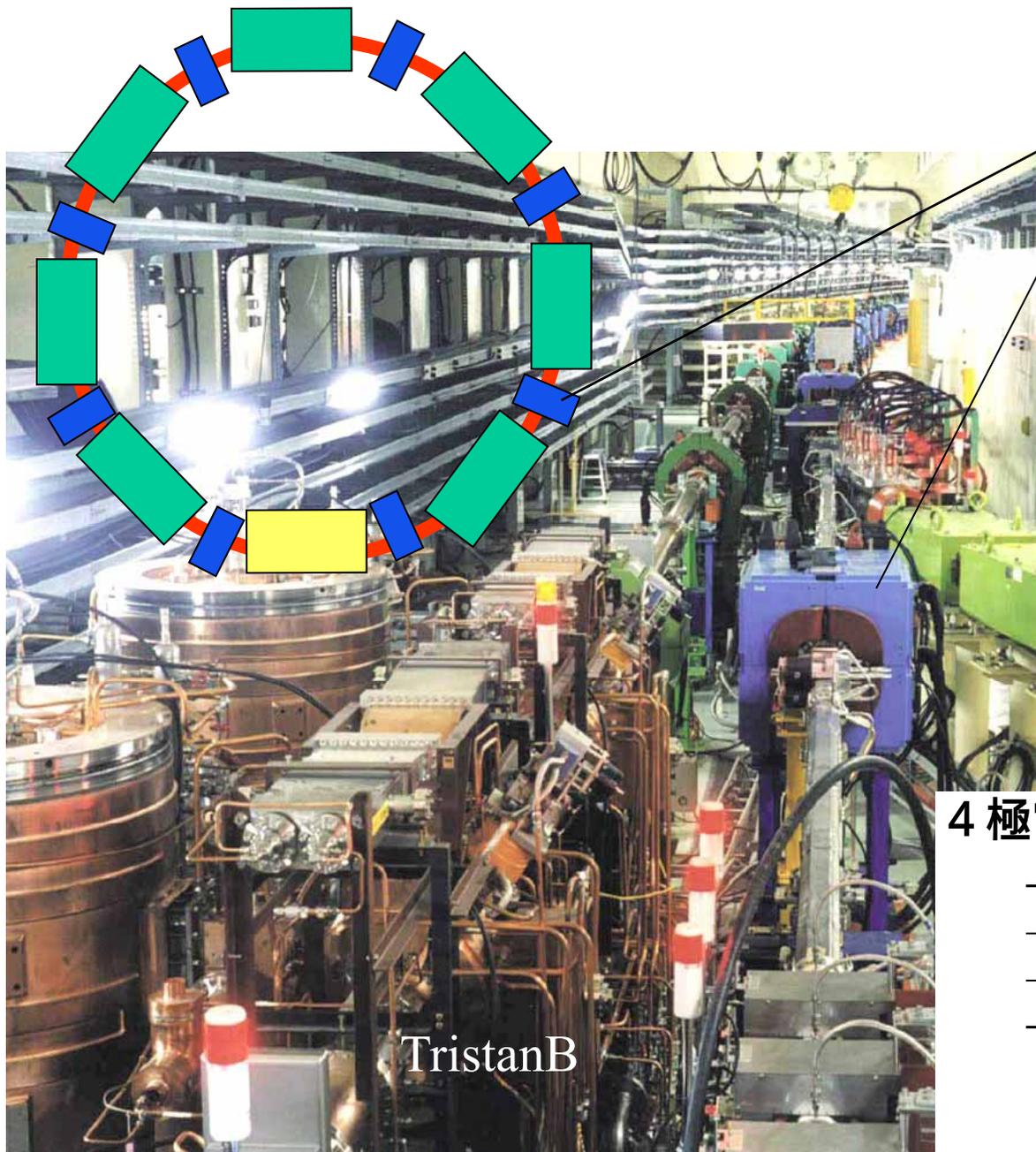


円形加速器では、
電磁石はビームの保持（回転）に使われる。加速は、
高周波電場（LHCでは400MHzのRF）を粒子の通過に合わせて発生することで、粒子を「波乗り」させる。

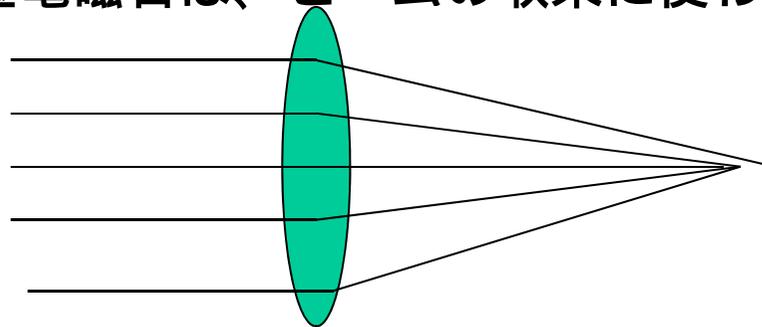


通過する粒子に合わせて電場をかける。
遅い粒子（エネルギーが小さい）には大きな電場をかけることで、粒子全体が一体になって加速される。

粒子を加速する



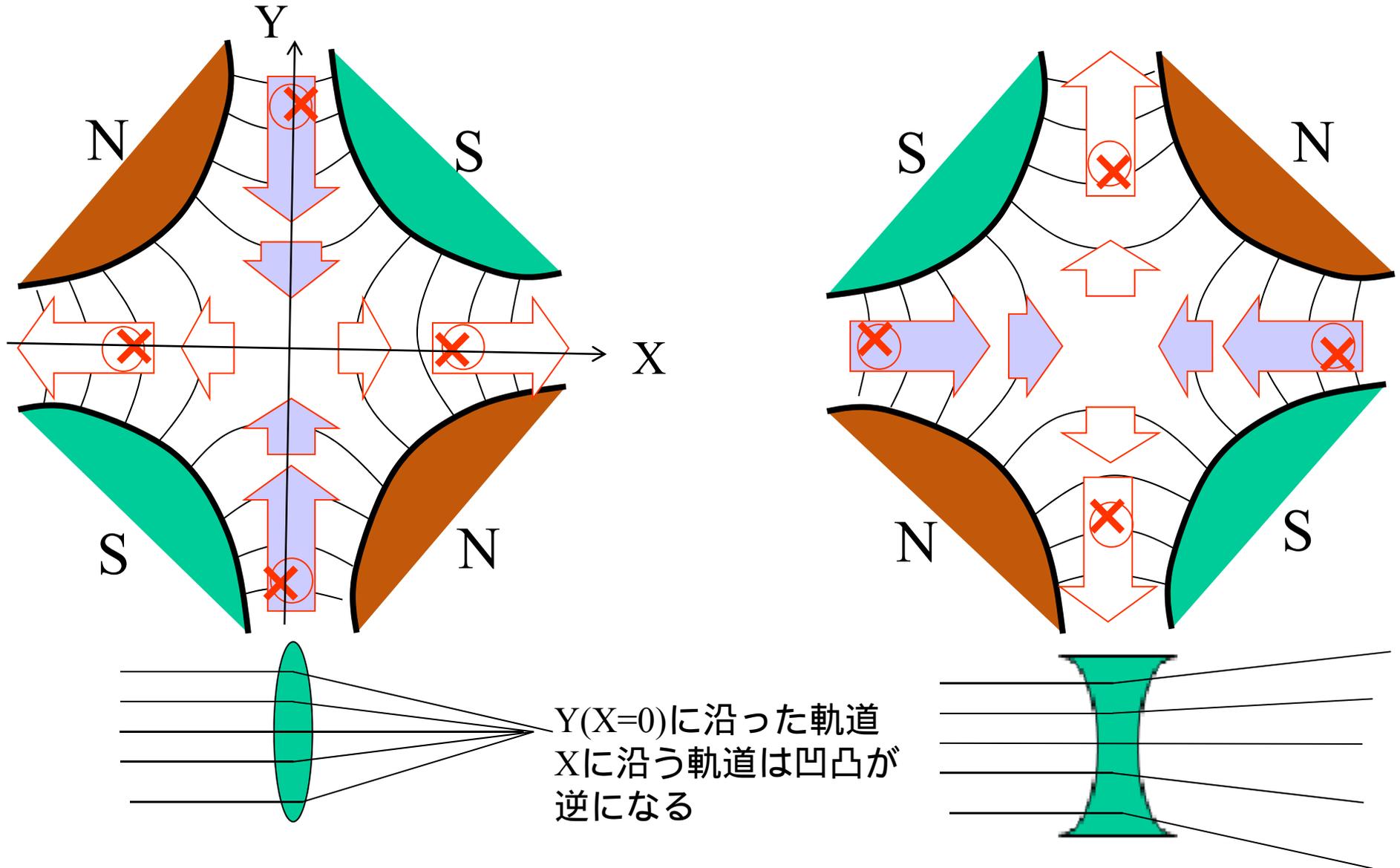
4 極電磁石は、ビームの収束に使われる



TristanB

4重極電磁石

磁極を双曲線にすると、磁場の大きさは中心からの距離に比例して大きくなる
中心から外れた粒子は、大きく戻す(凸レンズ)か、さらに広げる(凹レンズ)
ビームの広がらないように制御する。
特に衝突させる場合には、ビームを絞る(16 μm @LHC)



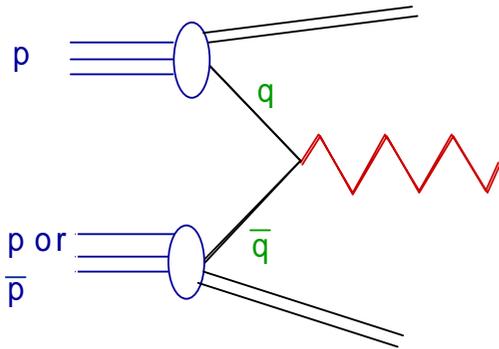
エネルギー最前線の実験

重い粒子の発見のため加速器のエネルギーを増加してきた。エネルギーが上がる衝突型加速器が主流。

ハドロン衝突器

衝突を起こすのはハドロンの一部(パートン)なので、様々なエネルギーで衝突が起きる。シンクロトロン放射が少ないので加速しやすい。

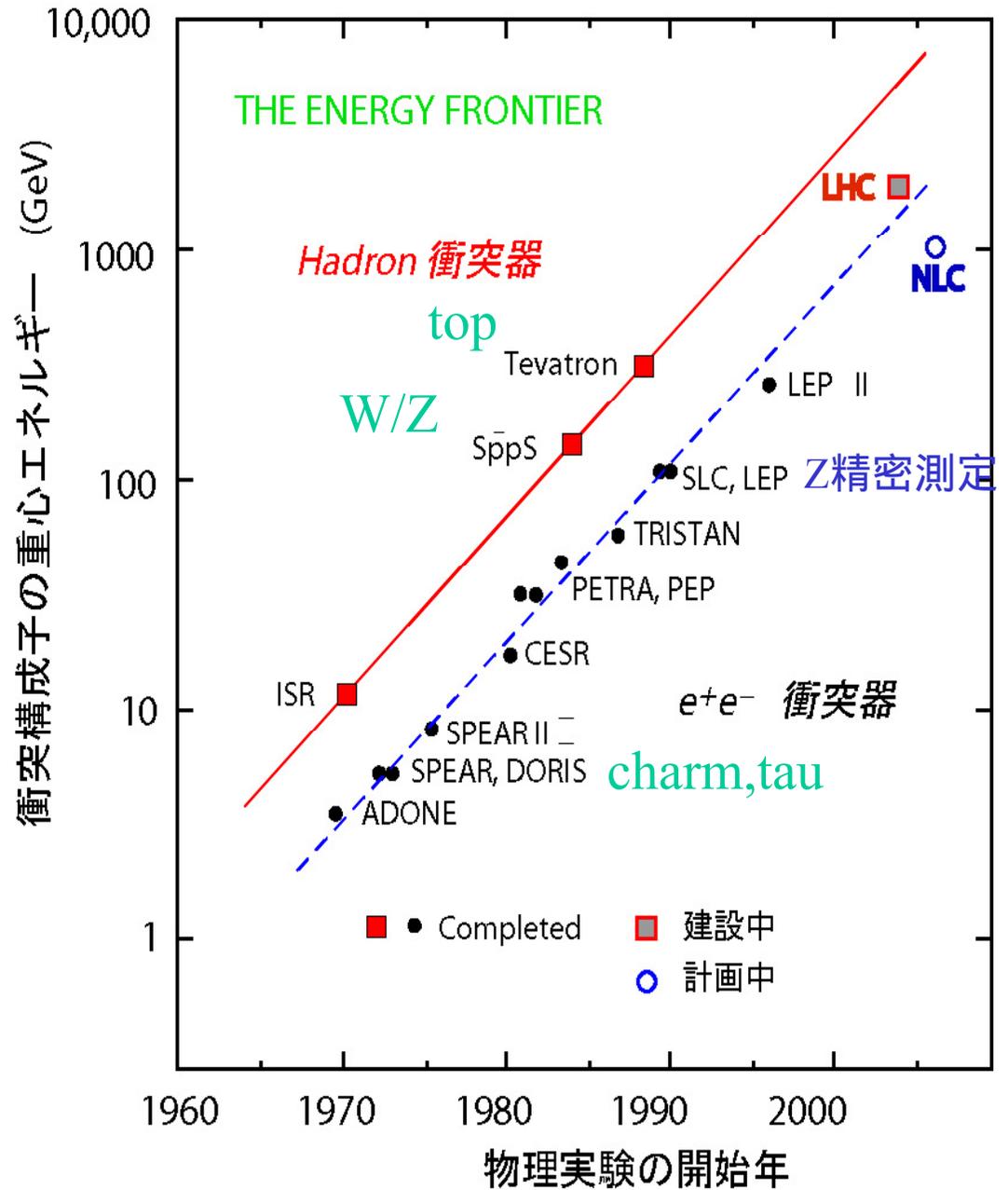
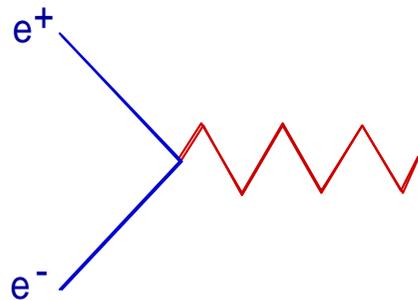
新粒子の発見に威力



電子陽電子衝突器

決まったエネルギーで衝突。シンクロトロン放射のため、次世代は直線型へ

新粒子の精密測定に威力



素粒子物理の実験研究

研究手段としてエネルギー最前線と精密実験に大別できる

エネルギー最前線:

新しい素粒子や相互作用

Fermilab, CERN-LHC

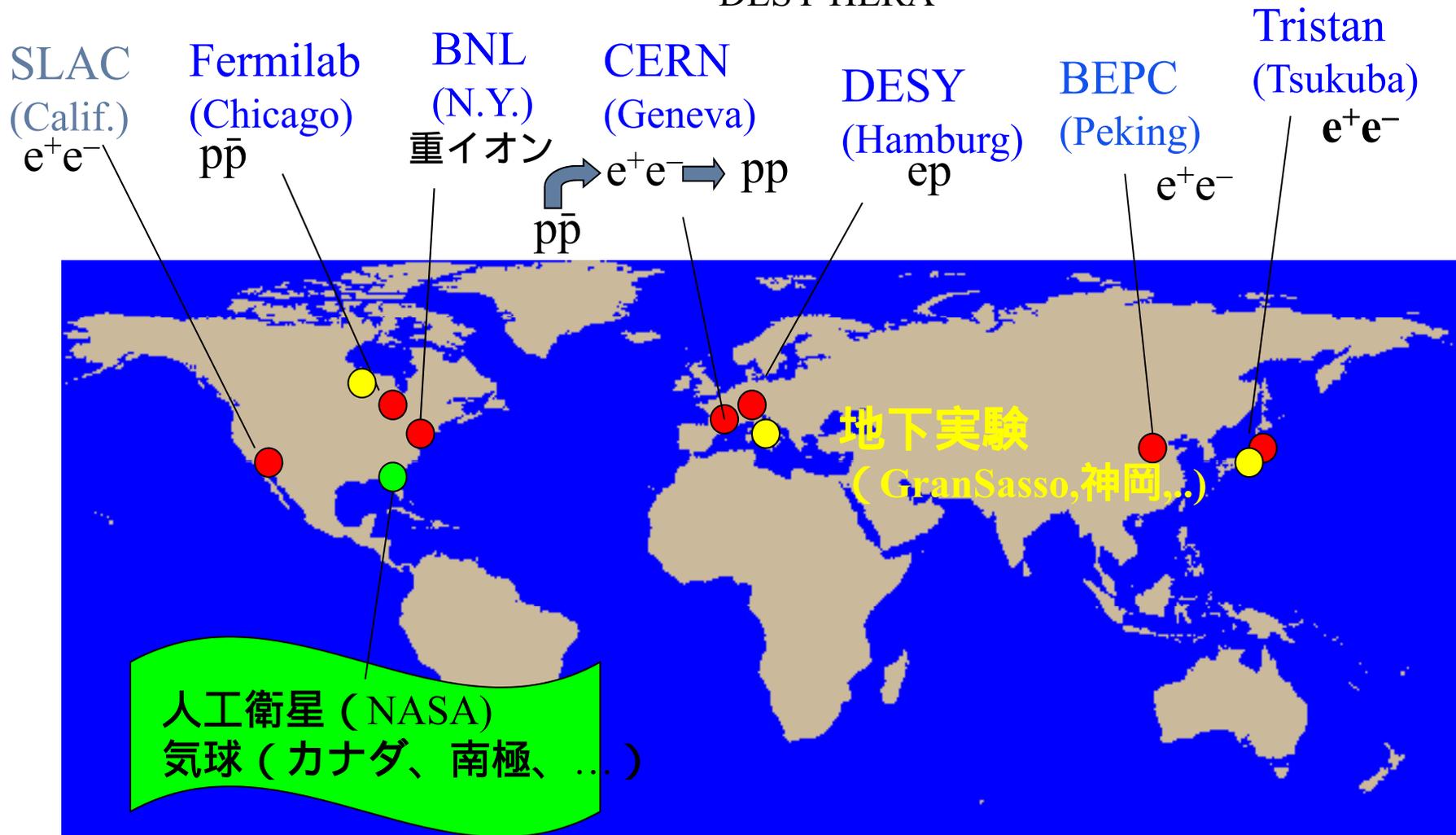
Tristan, CERN-LEP, LC(?)

精密実験:

相互作用を詳しく測定し新素粒子の影響を見る

LEP (Z-factory), TristanB/SLAC(b-factory)

DESY-HERA

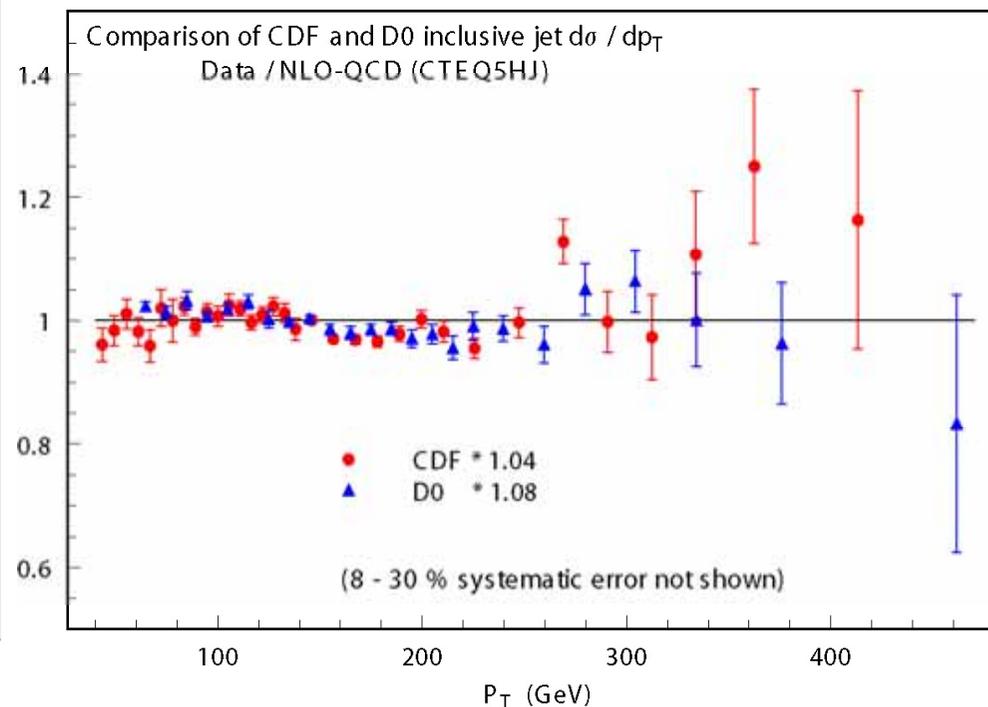
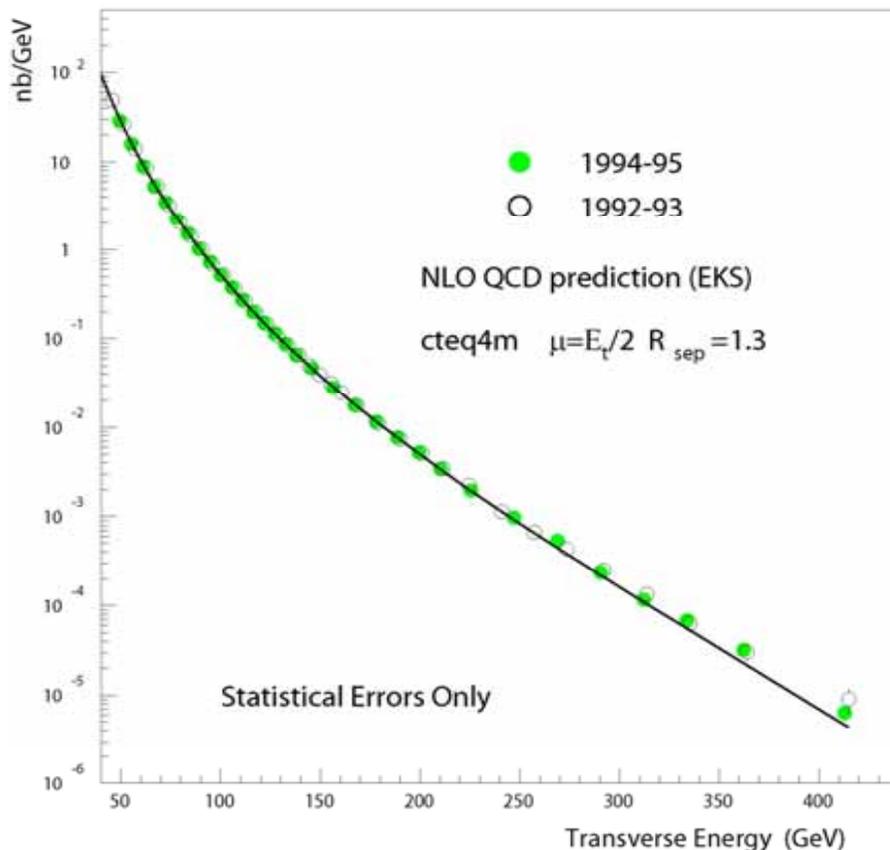
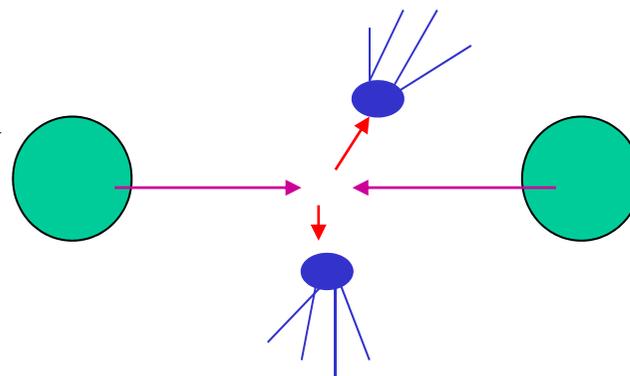


クォークやグルーオンの大きさ

もっとエネルギーを上げ、高いエネルギーのパートン（クォークやグルーオン）を正面衝突させる

現在：陽子・反陽子の衝突 1.96 TeV

2009～：陽子・陽子の衝突 最終的に14 TeV



ジェットの生成断面積は大きさの無い場合の予想値にほぼ一致している

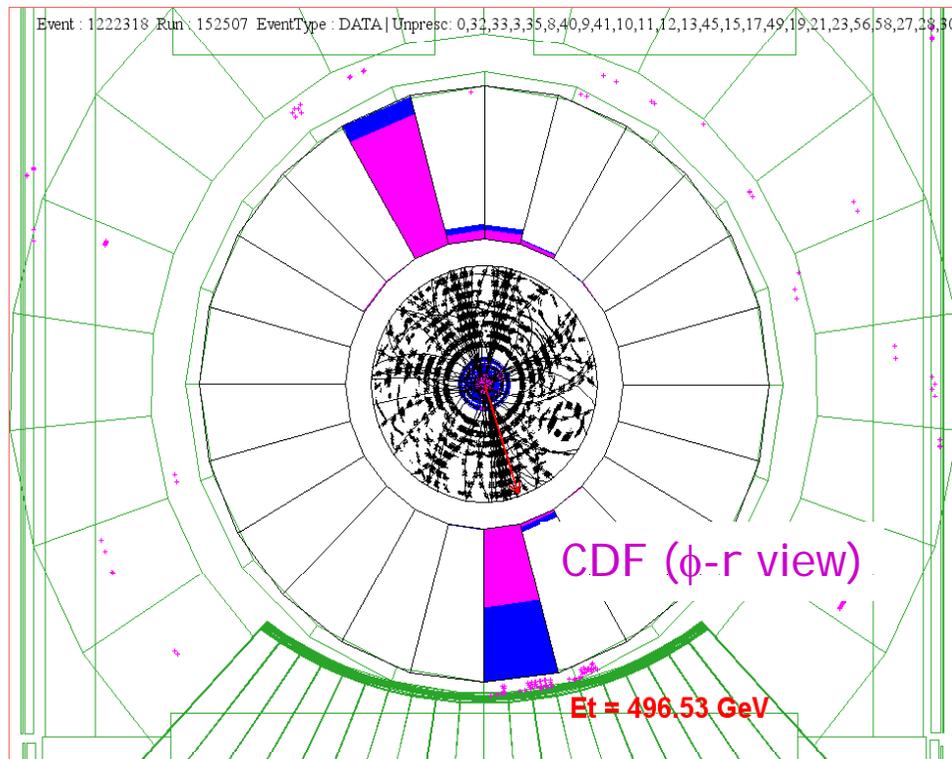
今の所、**大きさは無い** $< 10^{-18}$ m

加速器で観測された最大エネルギー事象

2jet 不変質量= 1364 GeV

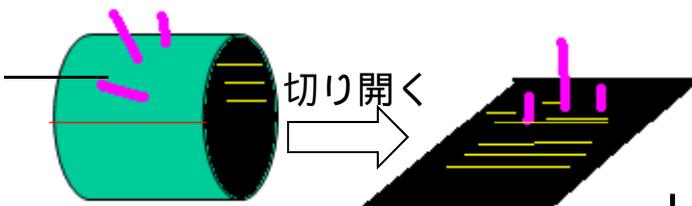
(このエネルギーを距離に換算すると $\sim 10^{-19}$ m)

Tevatronの1.96TeVの衝突全エネルギーの70%をこのジェット対発生に使った。
ハドロン衝突器での衝突パートンのエネルギーは一部なので、この事象は極めて稀。

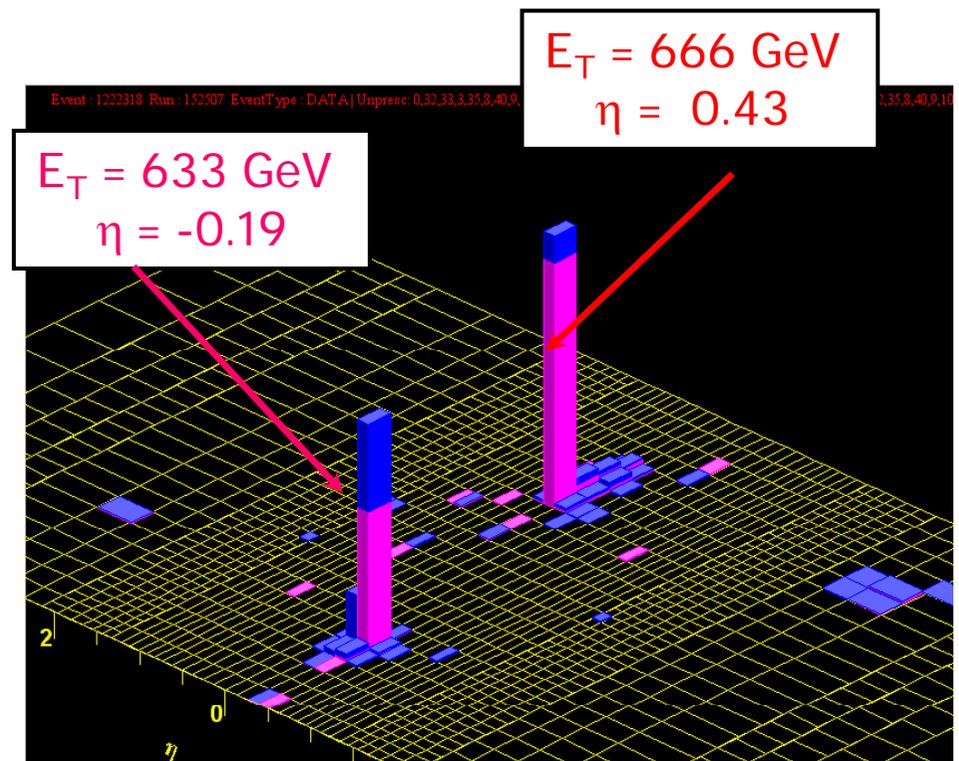


LHCではさらに高エネルギーの研究が可能となる

エネルギー
の大きさ



LEGO plot



総合科目

現代物理学への招待 III

- 素粒子探求の歴史
- ハドロンからクォークへ - 標準模型の概要
- 素粒子に大きさがあるか？ - 加速器の紹介
- 素粒子探求の現状
 - CP非保存 (Belle / Babar)
 - 質量の起源 (Tevatron LHC)

CP対称性の話： C、P、T変換

C変換：粒子と反粒子の入れ換え

P変換：座標の反転(鏡面変換)

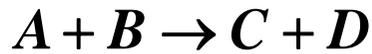
$$\vec{x} \leftrightarrow -\vec{x}$$

T変換：時間の反転

$$t \leftrightarrow -t$$

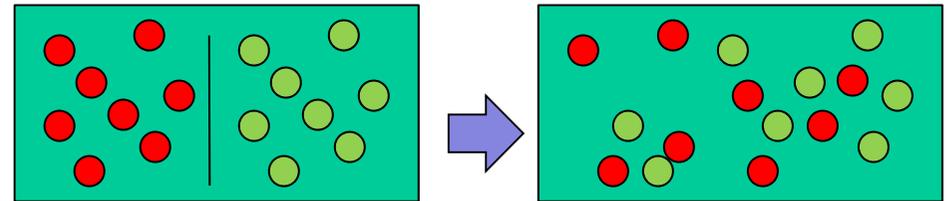
時間反転？:Newtonの運動方程式はT変換に不変(時間に-をつけても同じ運動方程式になる)

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F} \iff \frac{d(-\vec{P})}{d(-t)} = \vec{F}$$



どちらも同様に起こる

多粒子系の非可逆過程と時間反転不変とは？



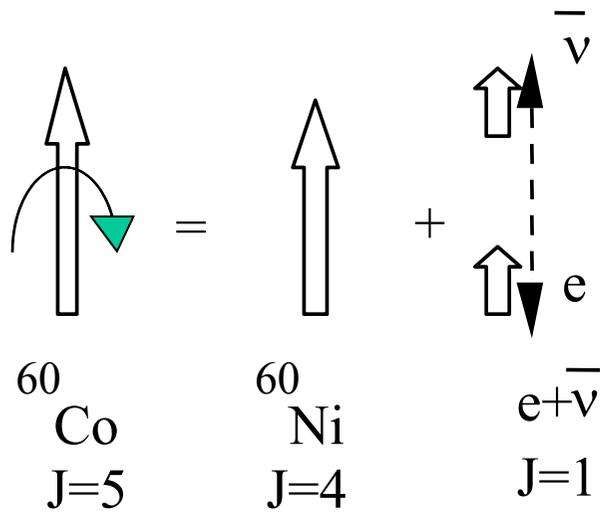
左から右への状態変化(エントロピーの増大)は普通にあるが、逆はないのでは？ 各粒子に番号をつけると、右から左の状態になると、左から右の状態になる確率は同じ(つまり、粒子個別で考えると、どちらにも同じ確率であり得る)

✓**CPT定理**： 各変換は破れていても構わないが、3つをすべて施せば不変である
(Lorentz不変な局所的場の量子論：標準模型、超対称性理論、などの一般性質)
粒子と反粒子で、質量や寿命が同じなどの結論が得られる

✓各個別の変換も、不変であると思われていた。

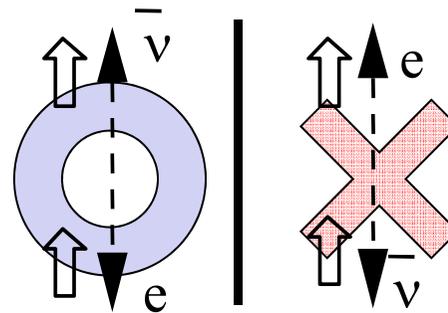
P変換(パリティ対称性)の破れ

弱い相互作用ではParity(鏡面对称)が破れている可能性が出てきた
 Lee & Yangが実験を提案(1956 Oct) → Wuが実験に成功(1956 Dec)



運動量: ベクトル $\vec{p} \leftrightarrow -\vec{p}$
 スピン: 軸性ベクトル $\vec{s} = \vec{r} \times \vec{p} \leftrightarrow (-\vec{r}) \times (-\vec{p}) = \vec{s}$

P変換で符号を変えないベクトル



冷却し磁場をかけるとCoのスピ
 ンが揃う(崩壊して出来る電子と
 ニュートリノのスピンの和は、い
 つも磁場の方向)

上の左右は、パリティ変換(運動量ベクトルのみ反転する)
 パリティ対称性があれば、両方が同じ割合で観測されるはず

実験結果

${}^{60}\text{Co}$ のベータ崩壊からの電子は、常に、
 ${}^{60}\text{Co}$ のスピンの逆方向に発生する

Parityは100%破れている
 左右を物理現象で定義できる



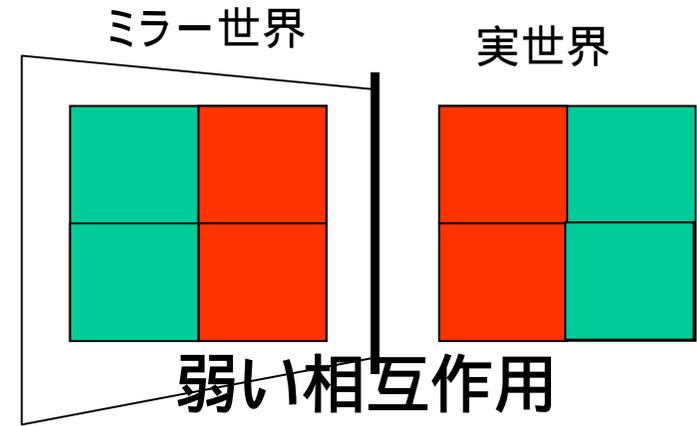
1957年

パリティ対称性の破れの意味

弱い相互作用では100% parityが破れている

これは、ニュートリノの性質

- ニュートリノ粒子(ν)のスピンは常に運動方向と逆
- ニュートリノ反粒子($\bar{\nu}$)のスピンは、運動方向と同じ
- 質量のある粒子は、重さに従い守らなくても良いが、基本的には、質量ゼロの場合と同じ



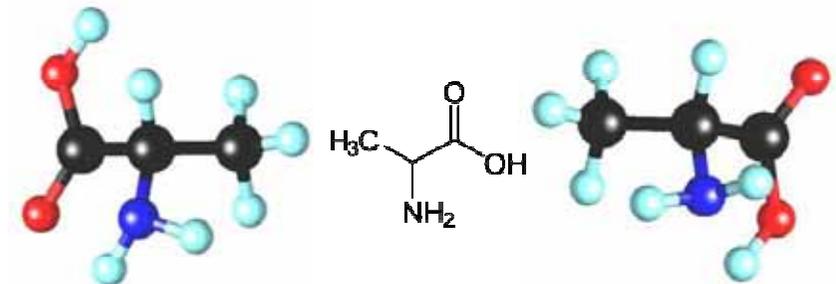
粒子と反粒子の分布が偏っているの
で、ミラー対称性は保たれない

粒子運動より速く動く系(重さがある粒子の場合)では、スピン方向と運動方向が反転するので、両者の規則性は決まらない。光速で運動する(=質量ゼロ)粒子では、粒子より速く運動する系がないので、どちらかに定まっても不思議でない



実際、「弱い相互作用での粒子のスピンは左、反粒子は右巻きになっている」

似た例: アラニンには鏡面对称なものがあり、実験室では、同等に作れるが、自然界ではL-アラニンにしかない。
別例: シンデレラの靴

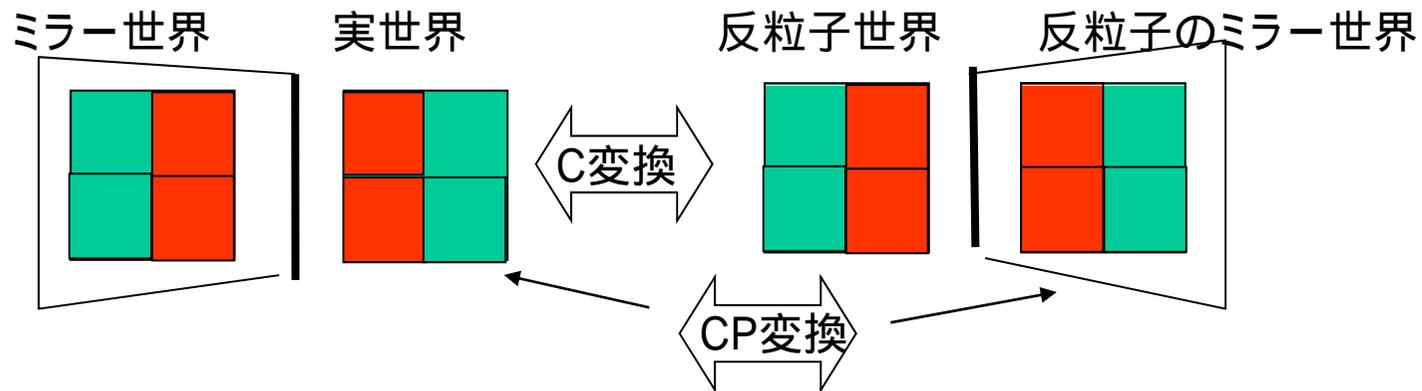


D-アラニン

L-アラニン

CP非保存の研究 TristanB

パリティの破れは、粒子と反粒子を分けて考えているからであり、C変換も同時に考えたCP変換では対称性が保たれているのでは？(反粒子のミラー世界は実世界と同じ？)



- 1964 AGS CP非保存の反応がK中間子の粒子・反粒子で観測
- 1973 小林・益川 6クォークあれば標準模型でCP非保存が説明できる
- 1979 サハロフ・吉村 ビッグバン 10^{-36} 秒に、わずかに多いクォークを残し、殆どのクォークと反クォークは対消滅した(物質の世界ができる)
- 2001 TristanB/SLAC B中間子の粒子・反粒子でCP非保存が観測(寿命が粒子・反粒子で異なる)

ビッグバンにより、粒子と反粒子は同等生成された。
なぜ、我々の世界は粒子によって構成されているか？

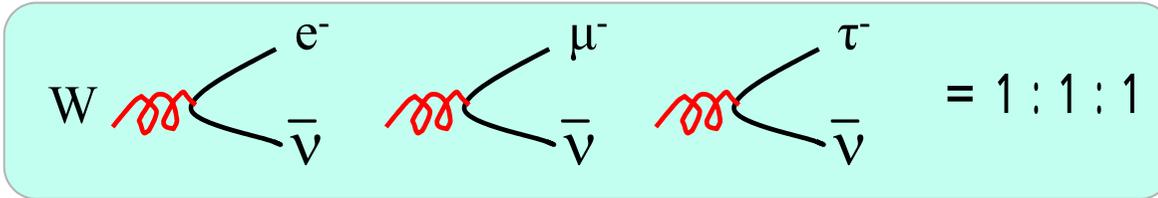
小林・益川

CP非保存の原因は { 相互作用が複素数(6クォーク標準模型)？
CPを保存しない第5の力がある？

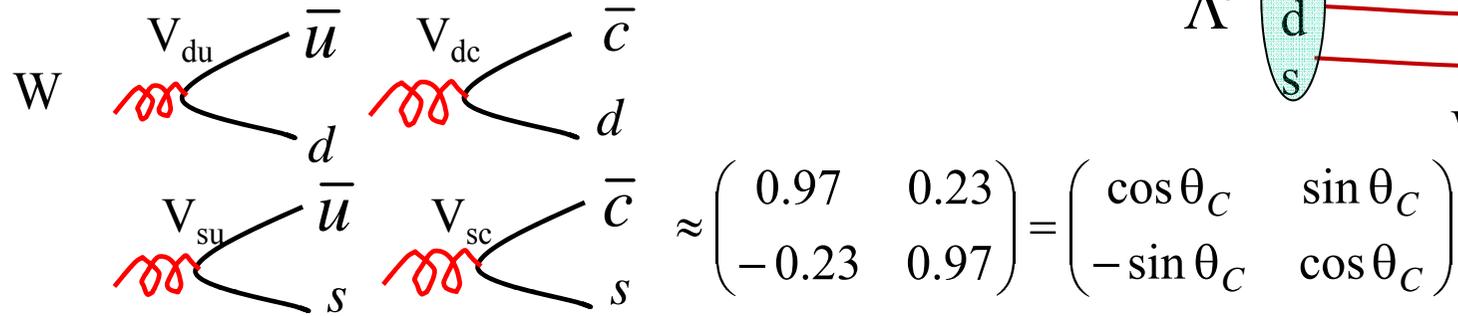
クォーク混合とCKM行列

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa

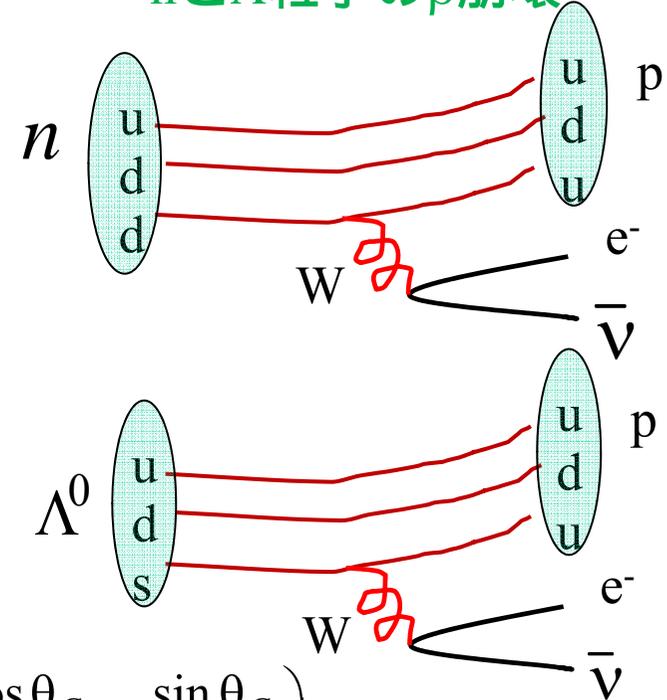
「Wはweak 2重項に崩壊」：レプトンの2重項には厳密に等しく崩壊するが、クォークには(u,d)以外に(u,s)もある



1963 Cabibbo: クォークもレプトンと同じであるとするには、クォークが混合しているとすればよい



nと Λ 粒子の β 崩壊

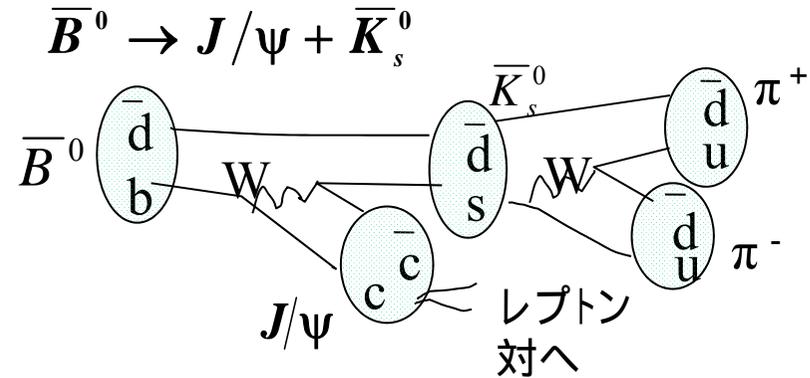
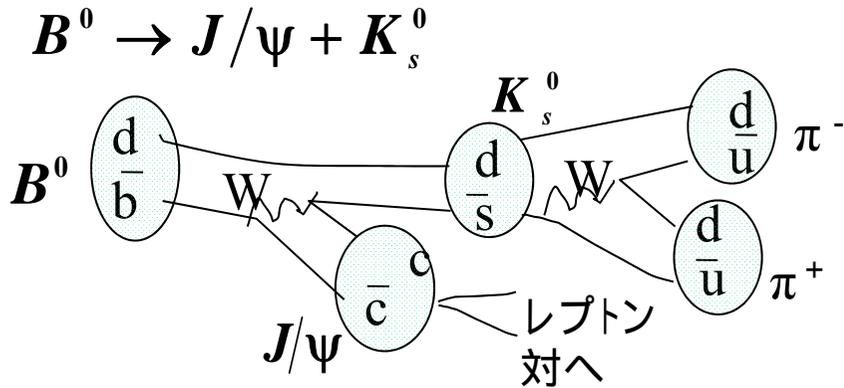


1973 小林 益川 標準模型でCP非保存を説明するには、クォーク混合に虚数が残る必要。4クォークではだめで、6クォークならOK

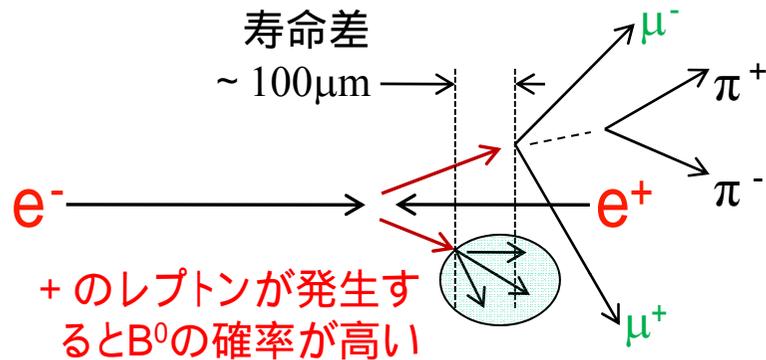
混合行列	自由度 N^2	クォーク位相自由度 $2N - 1$	回転自由度	CP位相
2 x 2	4	3	1	0
3 x 3	9	5	3	1

TRISTANでの測定例

B中間子 (db)と反B中間子 (bd) の寿命の違いを測定した

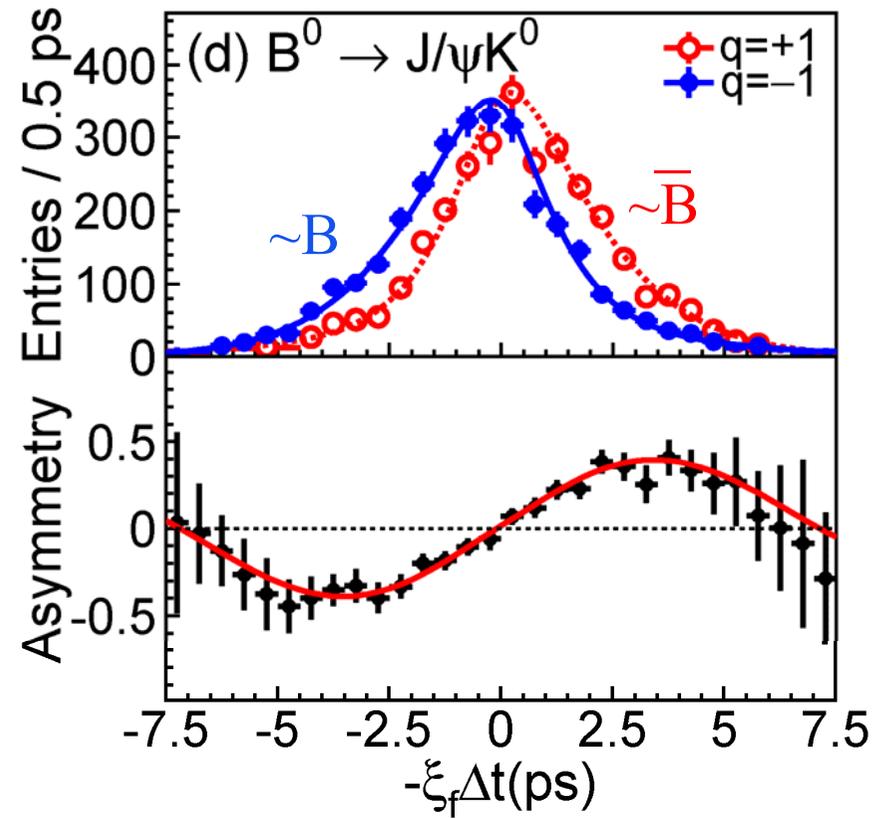


2過程の終状態は全く同じでCP対称状態



$B\bar{B}$ はペアで生成されるので、片方を時刻 t_{tag} で捉え、残りの崩壊時刻 t_{CP} を測定した。

$t = t_{\text{CP}}$ t_{tag} が初期状態B中間子と反B中間子の場合で異なる。他の過程でも観測されたがK-Mの考え方でCP非保存が説明できる。

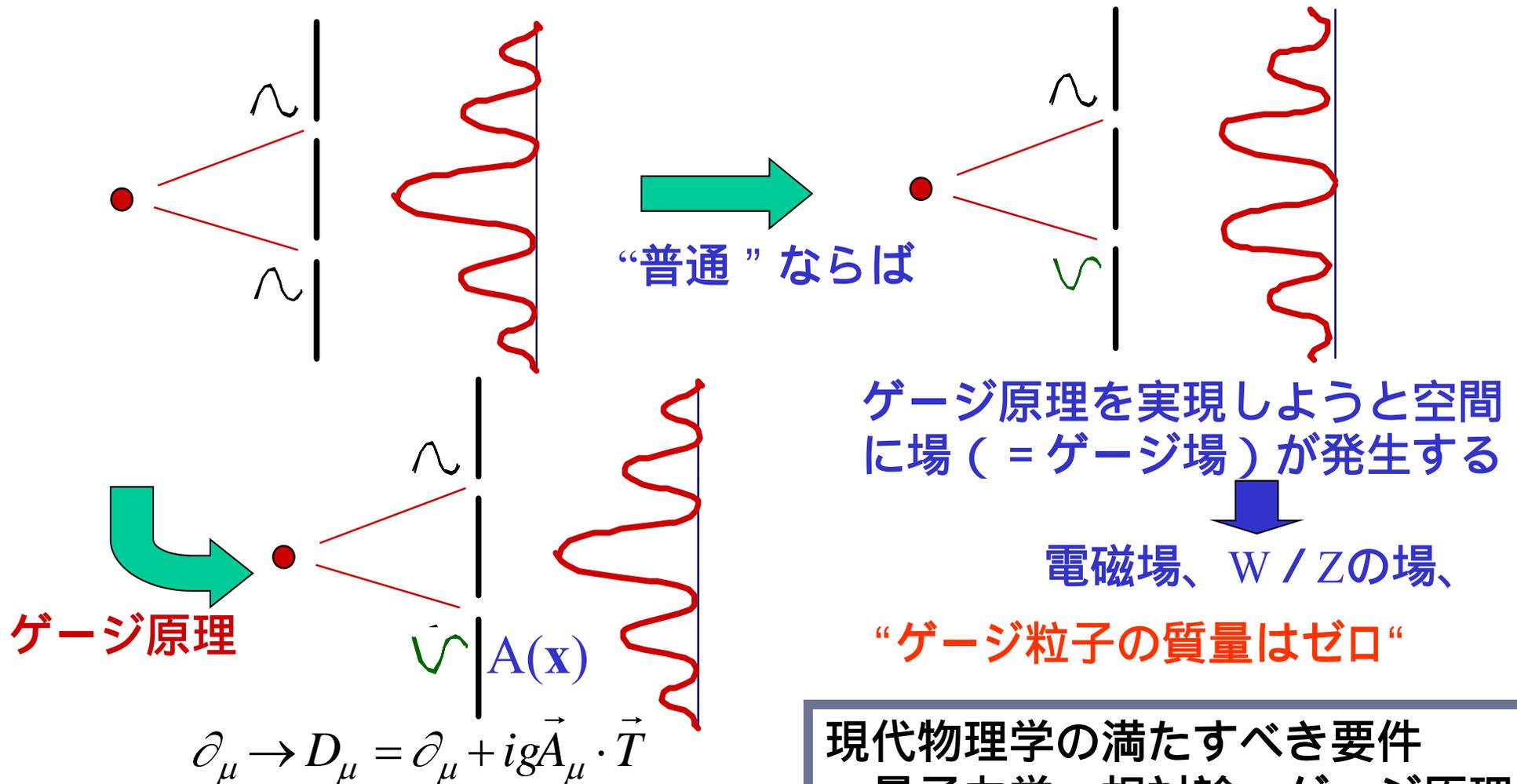


素粒子の質量

標準模型:力を伝えるゲージ粒子

— ゲージ原理とは —

ゲージ原理: 任意の空間でゲージ変換 (~波動関数*の位相変換) を行っても観測量は変化しない = 局所ゲージ変換に対する不変性

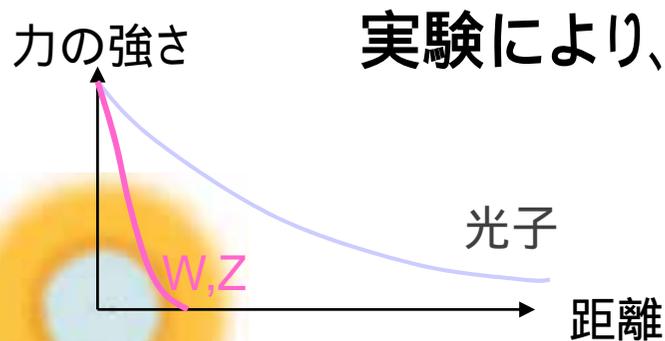


現代物理学の満たすべき要件
量子力学、相対論、ゲージ原理

*(3年)粒子は波動として表現できる

力を伝える粒子の重さ

- 力を伝える粒子は
- 力を伝えるには身軽でなくてはならない
(ゲージ原理:空間の任意の点でゲージ変換を施すには、到達距離は無有限大)
 - γ , g は質量ゼロ
 - W , Z は γ の仲間で質量は本来ゼロ



実験により、 W や Z は重たいと判明した (~1985)

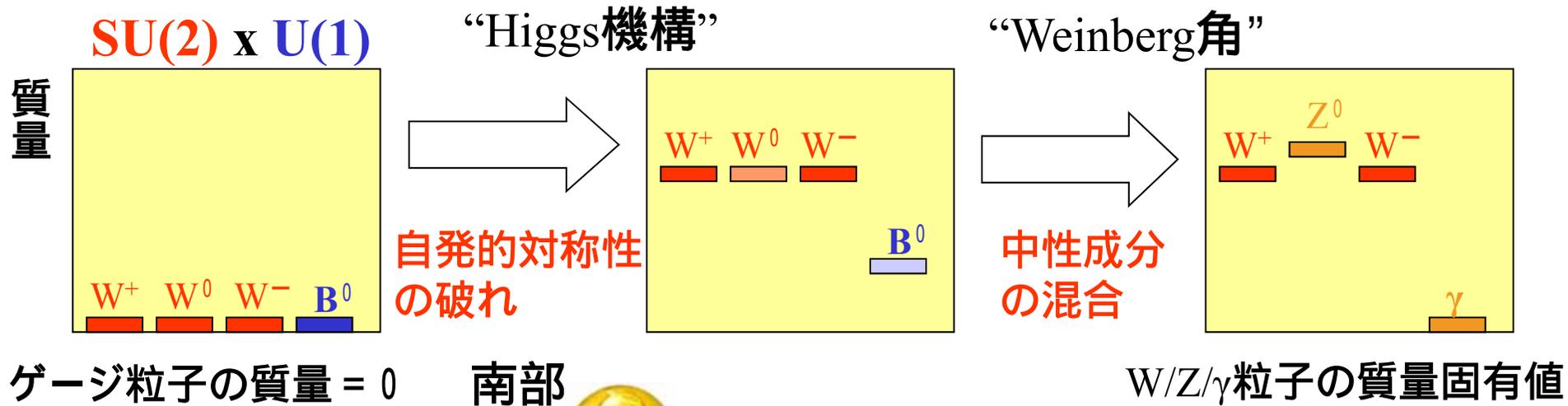
重たいために遠くまで届かずに力は弱い
エネルギーを上げる(短距離)と電磁気力と同等

本来、重さがゼロなのに、なぜ、現実には重さがあるのだろう
「重さとは何か」という問題に初めて直面した

標準模型: W/Z粒子の質量獲得

力の素粒子はすべてゲージ粒子と考えられている

ゲージ場の対称性 ↔ ゲージ粒子の数



光子とウィークボゾン (W[±] Z⁰) は兄弟

Glashow-Weinberg-Salam理論



ゲージ対称性を保つヒッグス粒子

— 物理法則の対称性と観測での対称性の破れ —

ゲージ対称性(質量 = 0)を保ちながら、ゲージ粒子に質量を与える
(= ゲージ対称性が自発的に破られている)

物理法則は対称だが、観測する場が対称でない

自発的対称性の破れ

「電磁気の法則は、空間対称性がある」

多数の方位磁石を並べて静止させると、指示
方向がクラスター状に分布する



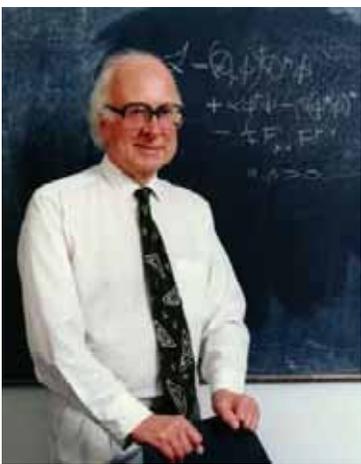
(低温になり)針の動きが止まったため、空間対称性が破れてみえる。(高温の)自由に回転できる状態では、クラスターはない
物理法則は対称だが、相転位(針の回転エネルギー < 隣との磁気エネルギー)により、みかけの対称性が失われた

「力学の法則は、空間対称性がある」

確かに水平方向に依存しないが、上下は法則が異なる

我々は地球の重力の中にいるため、上下と水平で対称性が破れてみえる。宇宙にいけば対称である

物理法則は対称だが、相転位(人間が地球の重力に閉じ込められた)により、みかけの対称性が失われた

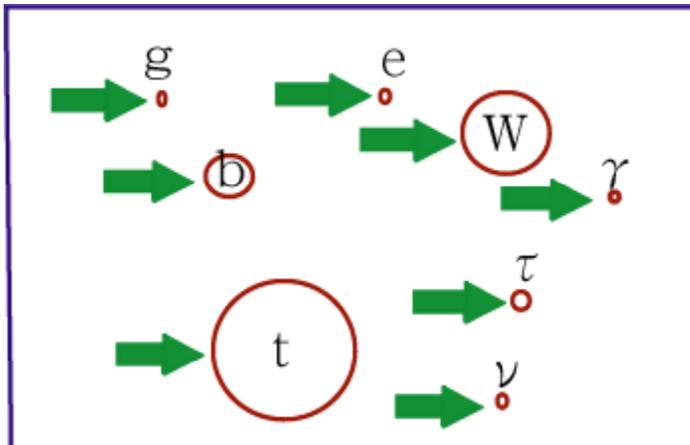


素粒子の標準模型とヒッグス粒子

— ヒッグス粒子と質量の起源 —

$$F=ma \quad m=F/a$$

質量: 力に対して加速されにくさ



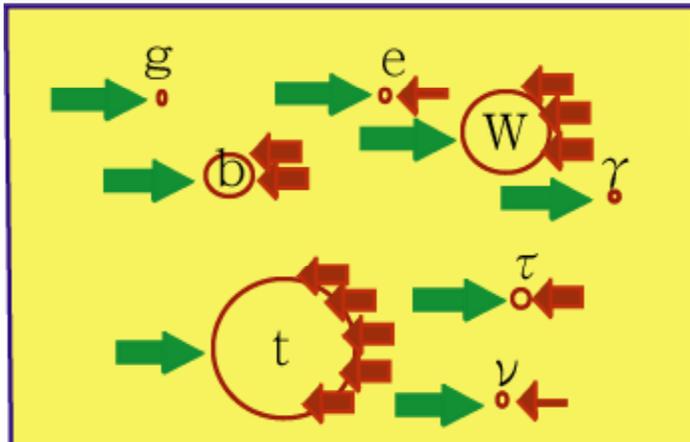
ビッグバン直後:
真空から抵抗を受けずに
すべての粒子の質量 = 0

相転位が起きたのは

$$E_c \sim 1.2 m_H \sim 1 \text{ TeV}$$

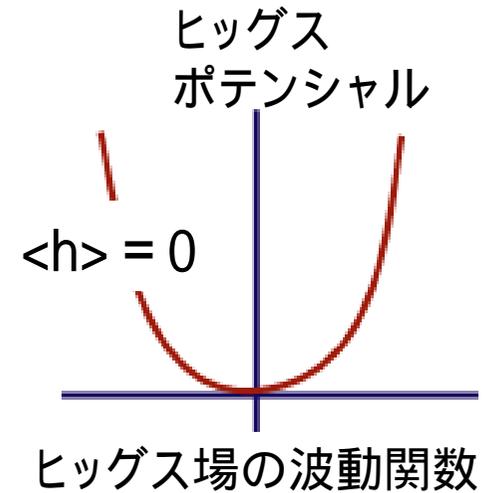
$$T_c \sim 10^{16} \text{ 度}$$

$$t_c \sim 10^{-13} \text{ s}$$

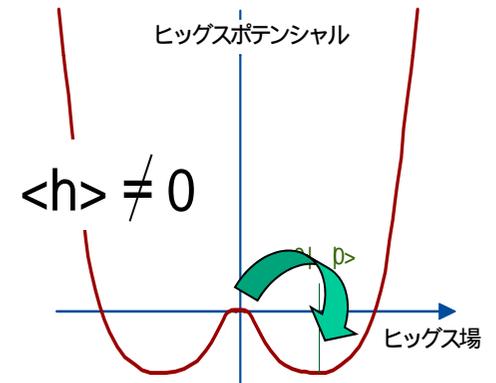


真空にヒッグスが充満 (Higgs
場がゼロでない条件が最低
エネルギー = 真空):
“重たい粒子”ほど真空中の
ヒッグスと衝突しやすく抵抗
が大きい

フェルミオンでは重い粒子ほどヒッグスと
強く相互作用し重くなる Higgsは質量の起源粒子



真空の
相転位

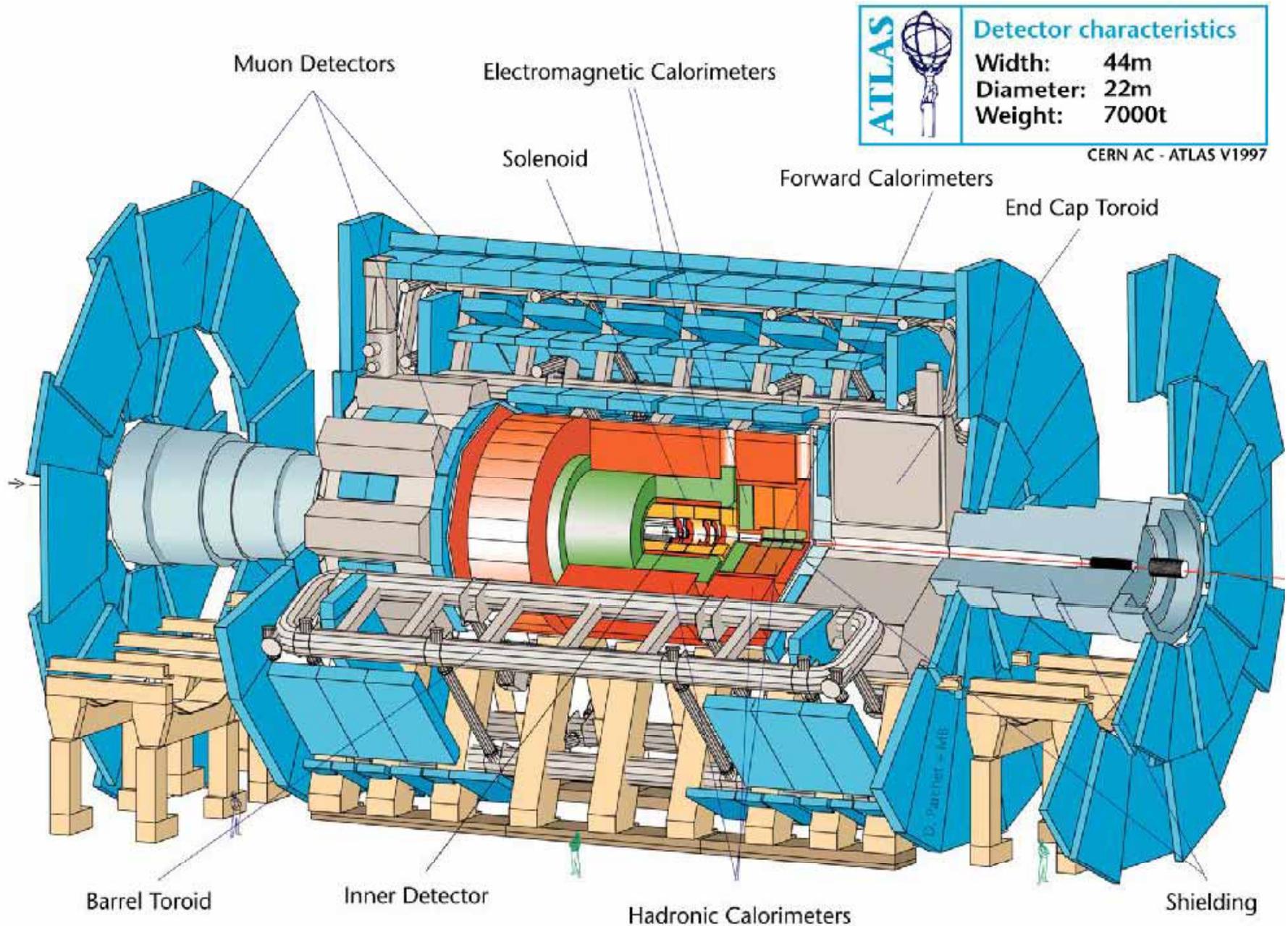


ヒッグス場が有限
= ヒッグスで充満



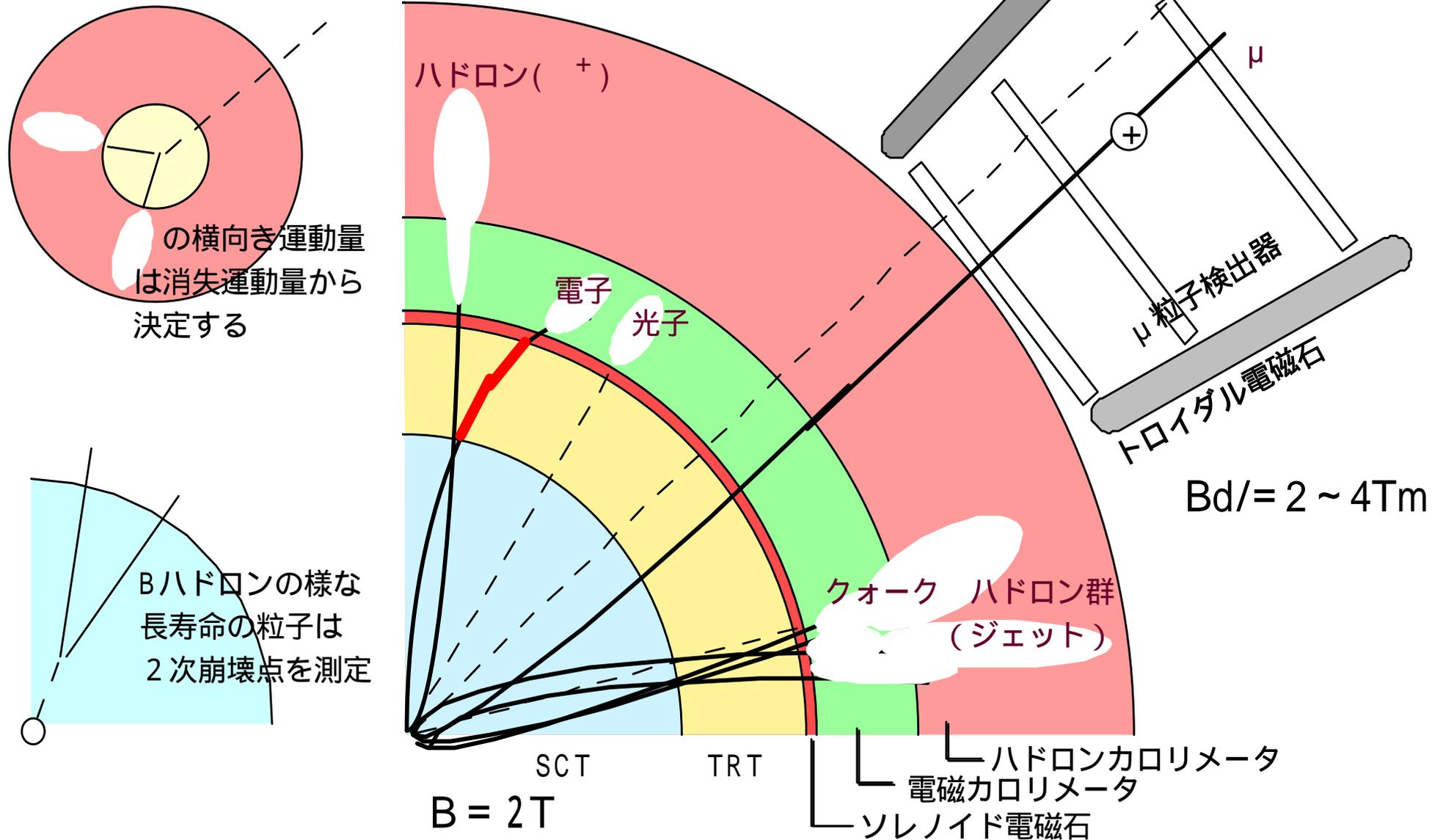
LHC加速器（ヒッグス探索）

ATLAS検出器 (欧州CERN研究所)



ATLAS検出器での粒子検出の原理

反応の違いを利用して粒子を同定し、運動量を測定する

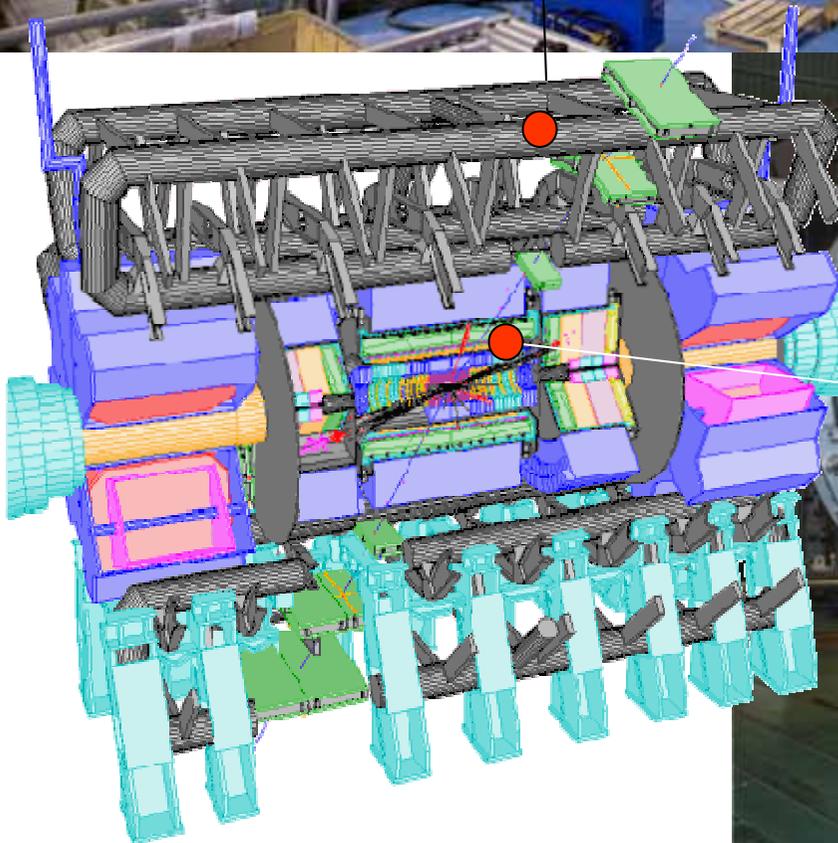


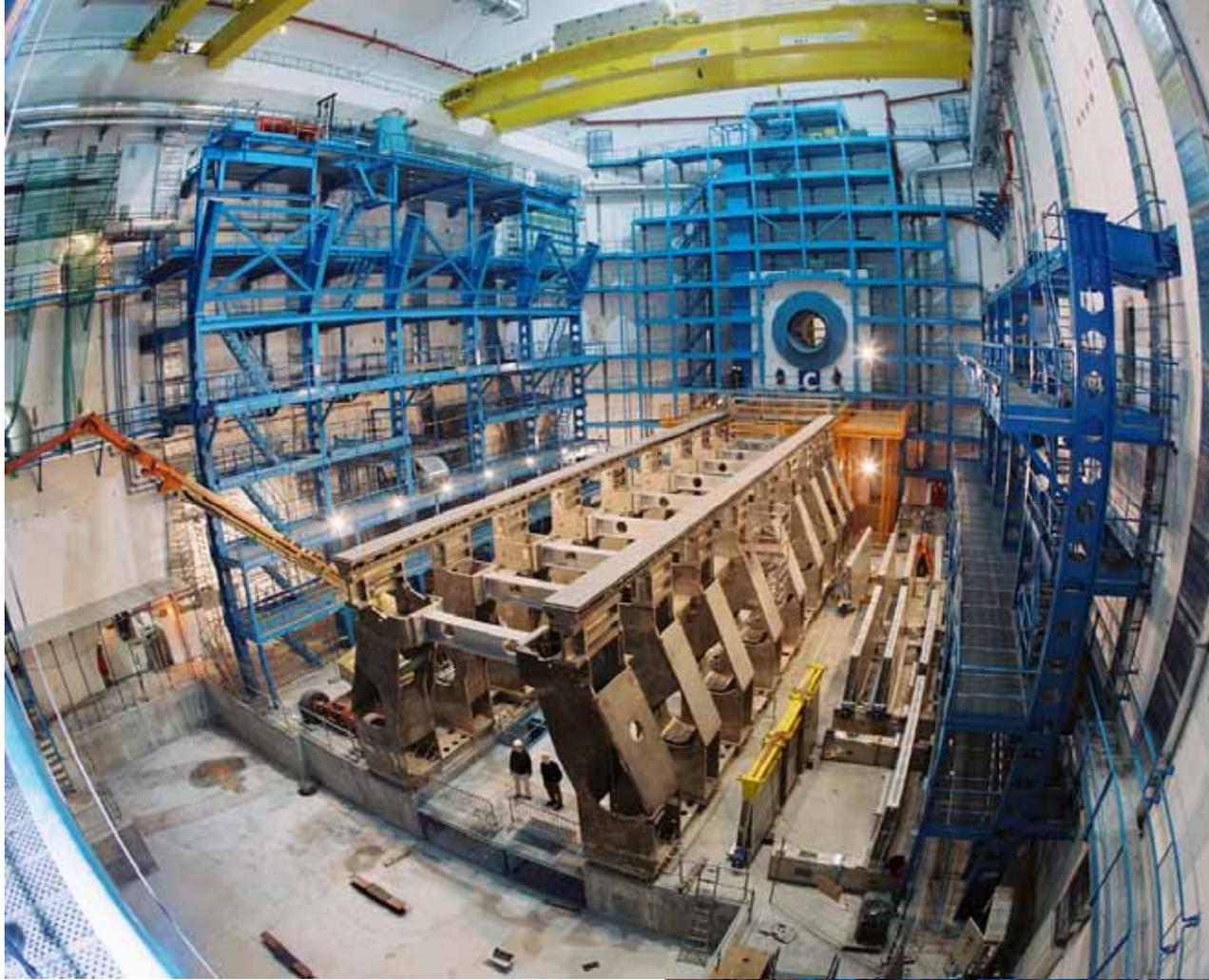
荷電粒子の運動量測定

超伝導電磁石で軌道
を曲げる（Lorentz力）

$$p = 0.3 B\rho$$

GeV/c T m



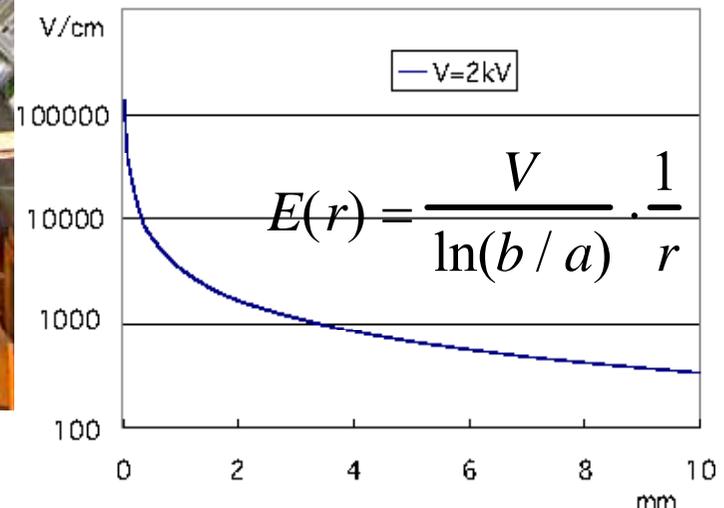
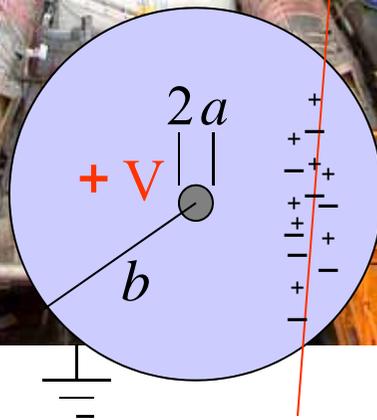
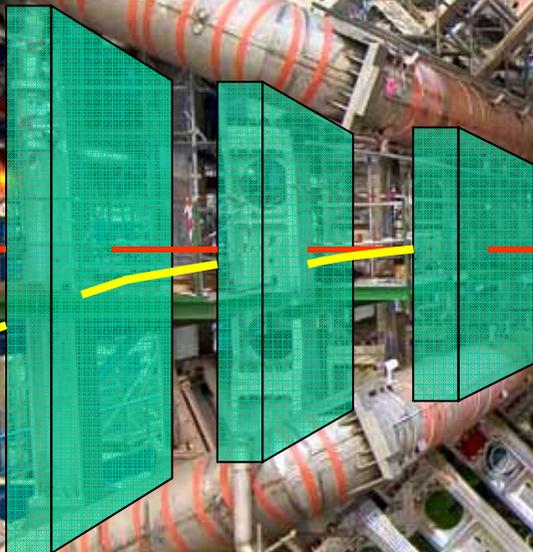
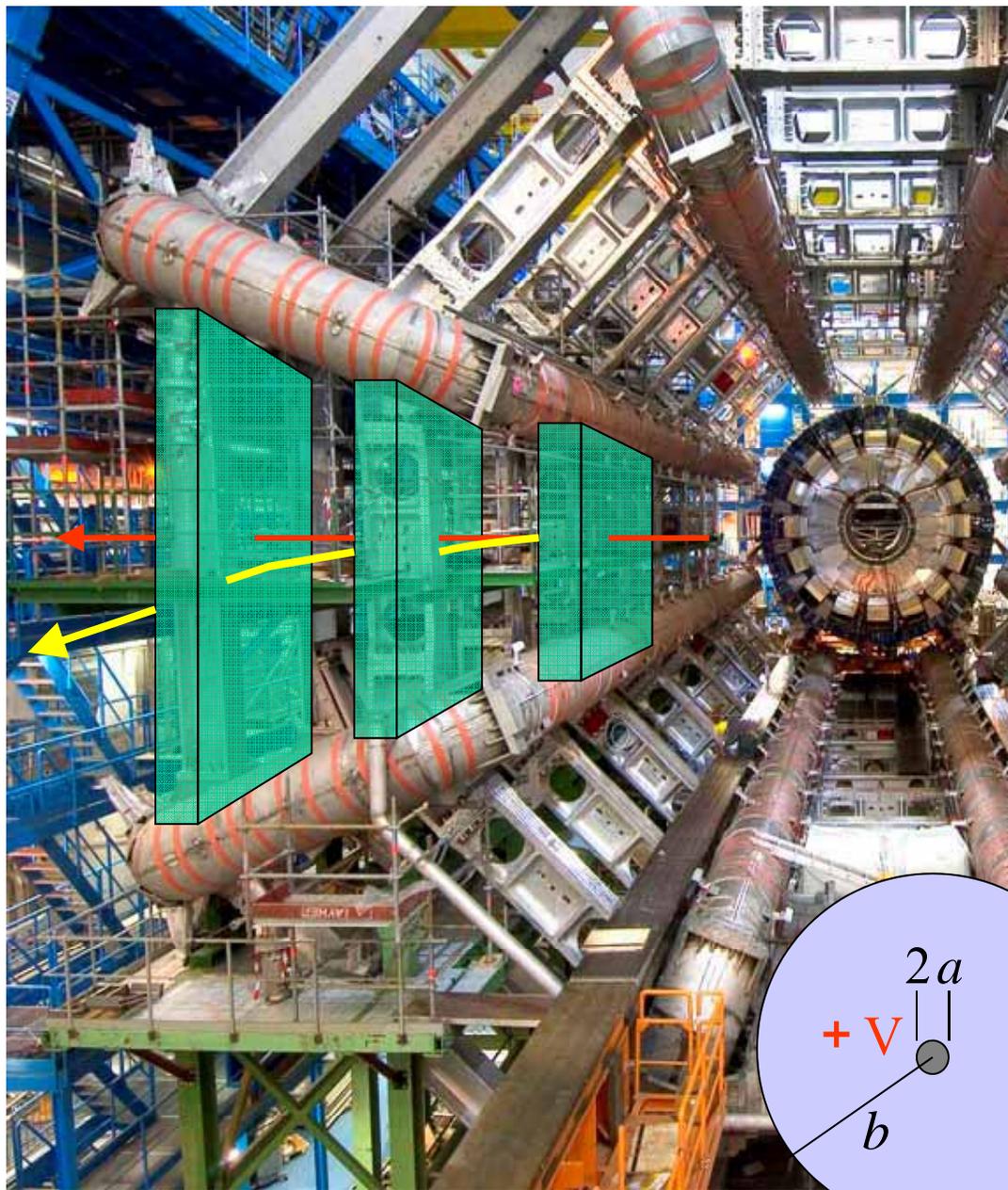


検出器を載せる台

最初の2台のトロイド設置

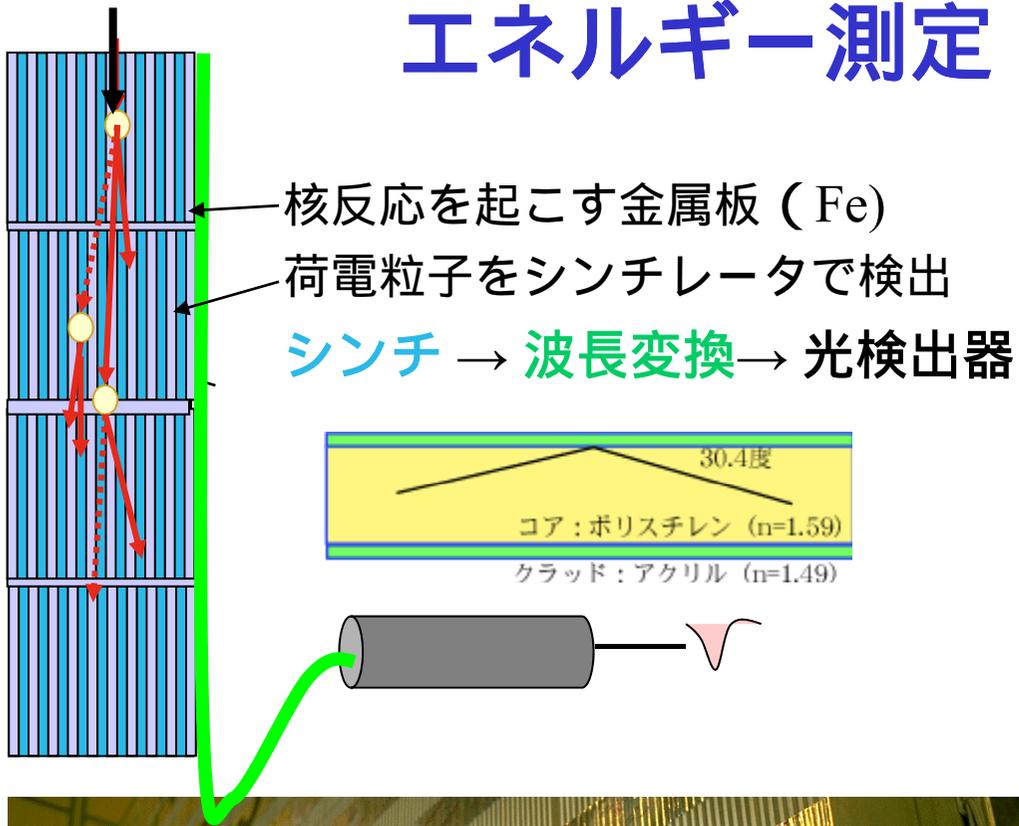


μ 粒子検出器

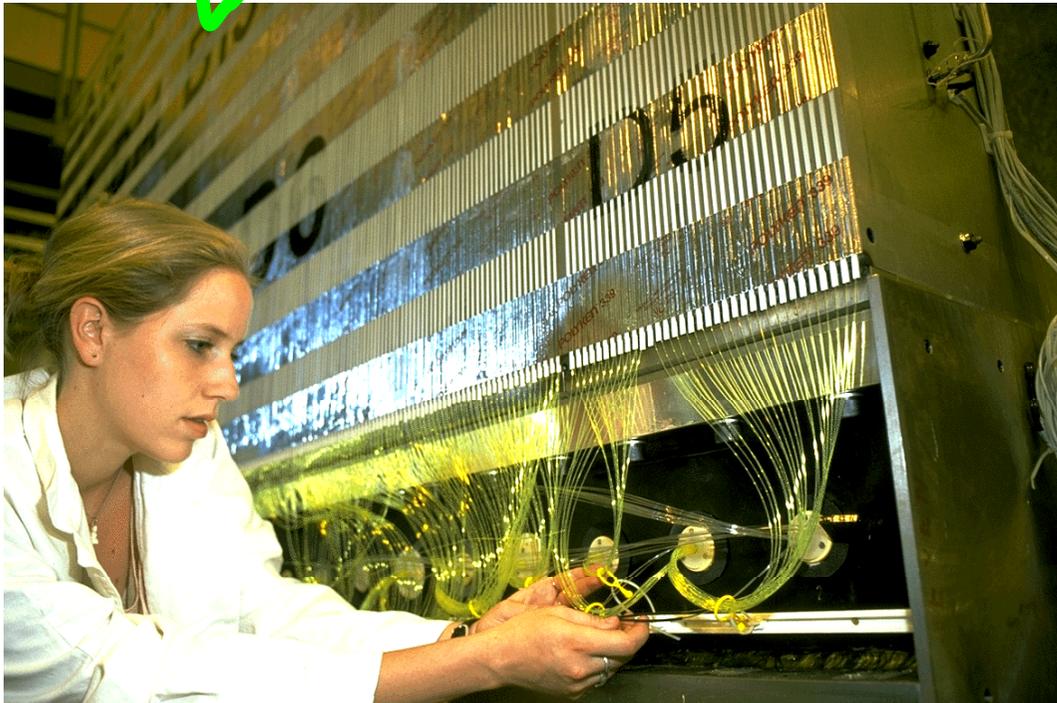


エネルギー測定（カロリメータ）

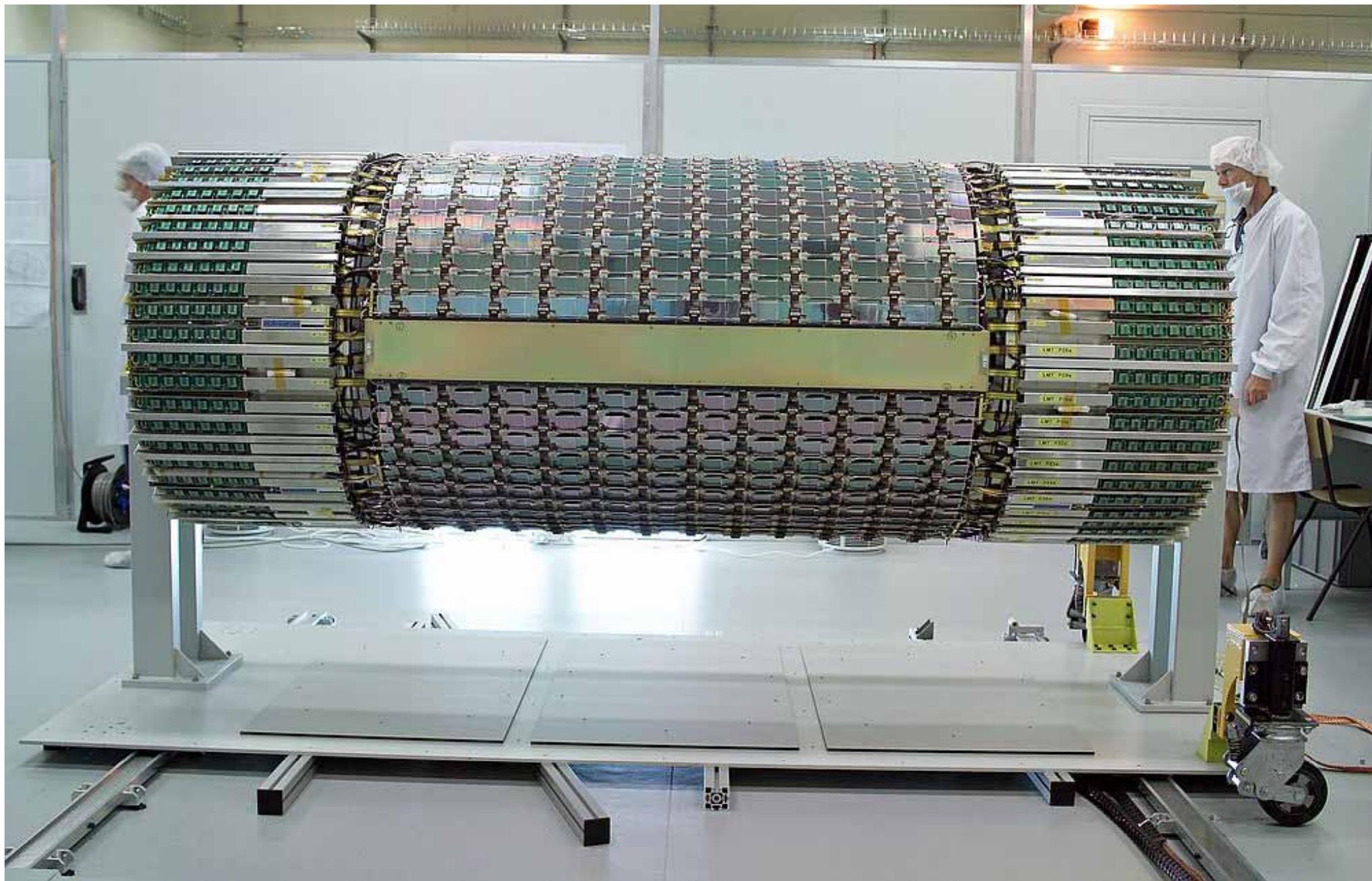
入ってきた粒子のエネルギーに比例した電流が光検出器から得られる



衝突点を取り囲む



運動量測定（SCT半導体検出器）：ソレノイド中に設置

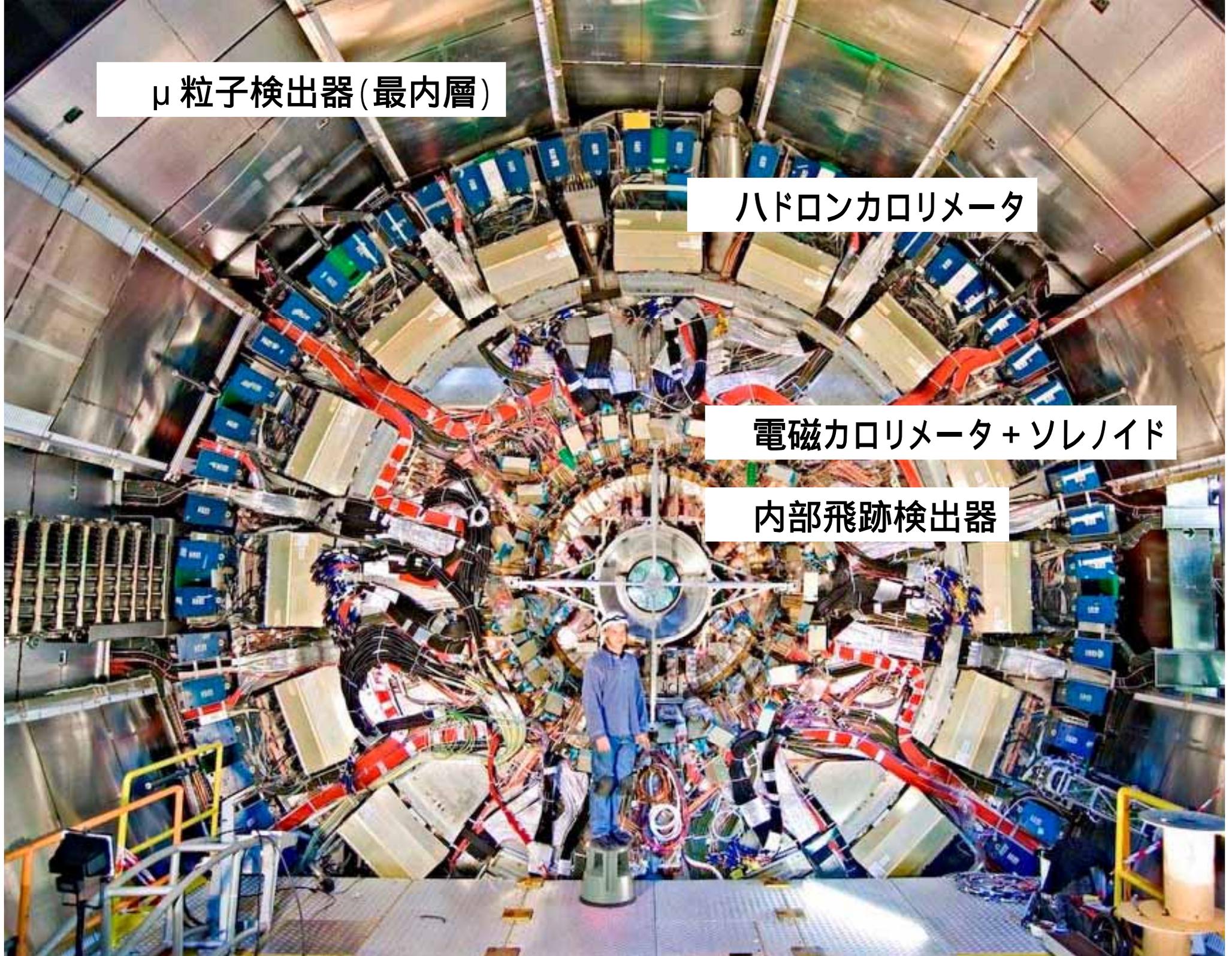


μ 粒子検出器(最内層)

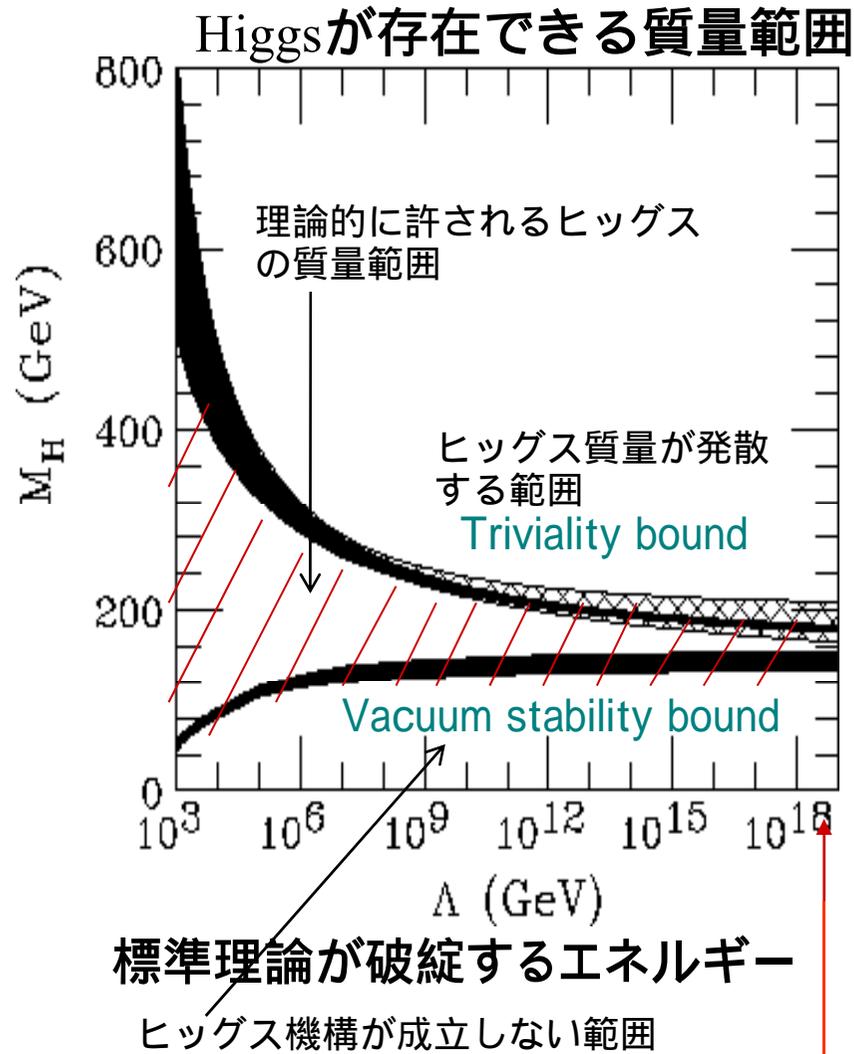
ハドロンカロリメータ

電磁カロリメータ+ソレノイド

内部飛跡検出器

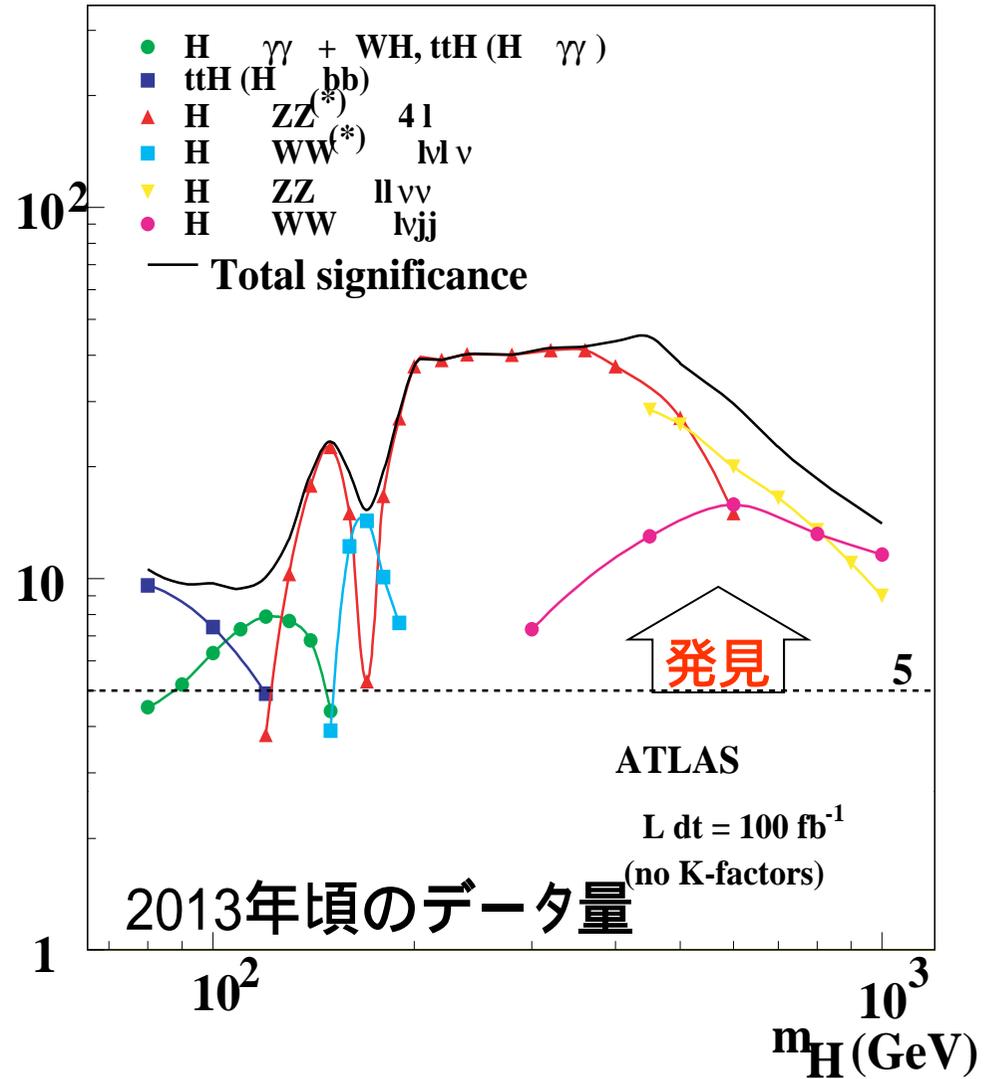


LHC-ATLASでのヒッグス粒子探索



信号の有意性

ATLASでHiggsを検出できる質量範囲



Planck質量

このエネルギーを超えると重力が組み込まれるので標準理論は必ず破綻

Higgs粒子が存在すれば、必ず0.8TeV以下であり、その領域ならばLHCで必ず発見できる

標準模型を超える

今までの多くの精密測定の結果、標準模型に破綻はない。
ヒッグス粒子が確認されれば、素粒子物理は完成か？

- 相互作用の強さ（結合定数）はなぜ違うのか？
- Weinberg角（ Z と W への混合角）とは何か？
- 電子と陽子の電荷の大きさは同じか？
- なぜクォークとレプトンは同じ世代数か？なぜ3世代なのか？
- クォークやレプトンの質量には規則性がないのか？
- もっと重い素粒子はないのか？他の相互作用はないのか？
- クォークやレプトンは本当に素粒子か？内部構造はないのか？
- 標準モデルにどう重力が組み込まれるのか？
- 時空間は4次元であるのか？
- ...

まとめとして：素粒子実験の当面の課題

質量の起源 Higgs粒子 (Tevatron)、LHC (~ 2012), LC (精密測定)

標準模型を超える物理

超対称性粒子 SUSY LHC (~ 2012)、LC (精密測定)

余剰次元 (black holeの生成) LHC

重いゲージボソン W', Z' e.g. $SU(2)_L \times SU(2)_R$ LHC

複合粒子 LHC

精密測定から B-factory、、、

ニュートリノ質量の測定 K2K、T2K、

陽子崩壊 GUT SuperKamiokande

宇宙暗黒物質の検出 低ノイズカロリメータ、SUSY粒子(LHC)、、、

グラビトンの検出 大規模レーザー干渉計実験 (TAMA, LIGO, VIRGO, ...)

量子色力学の検証

large Q^2 : 摂動理論計算との精密比較

small Q^2 : ハドロン化...Lattice QCD計算

何でも、物質の究極的本質にかかわること。また、素粒子に基づく宇宙モデルから

素粒子の理解が宇宙起源の理解につながる