

総合科目
現代物理学への招待 B
— 素粒子物理学(実験) —
物理 原 和彦

- 素粒子探求の歴史(標準模型の素粒子)、ニュートリノ質量
- 標準模型の力と「真空」
- ヒッグス粒子をとらえる



十分な理解はできない部分もあるだろうが、全体の流れをつかむ
興味のある部分は、自ら調べる。質問をする。

参考書、南部陽一郎「クォーク」Blue Backs

<http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~hara/gendai.pdf>

「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
を探究する研究分野

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」？

元素 (element, $\alpha \rho \chi \eta$ ^{アルケー})

= 物質を構成する基本的要素として導入

古代ギリシャ (BC6～4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: エンベドクレス「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・分割不可能な無数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。

古代インド (BC5世紀)

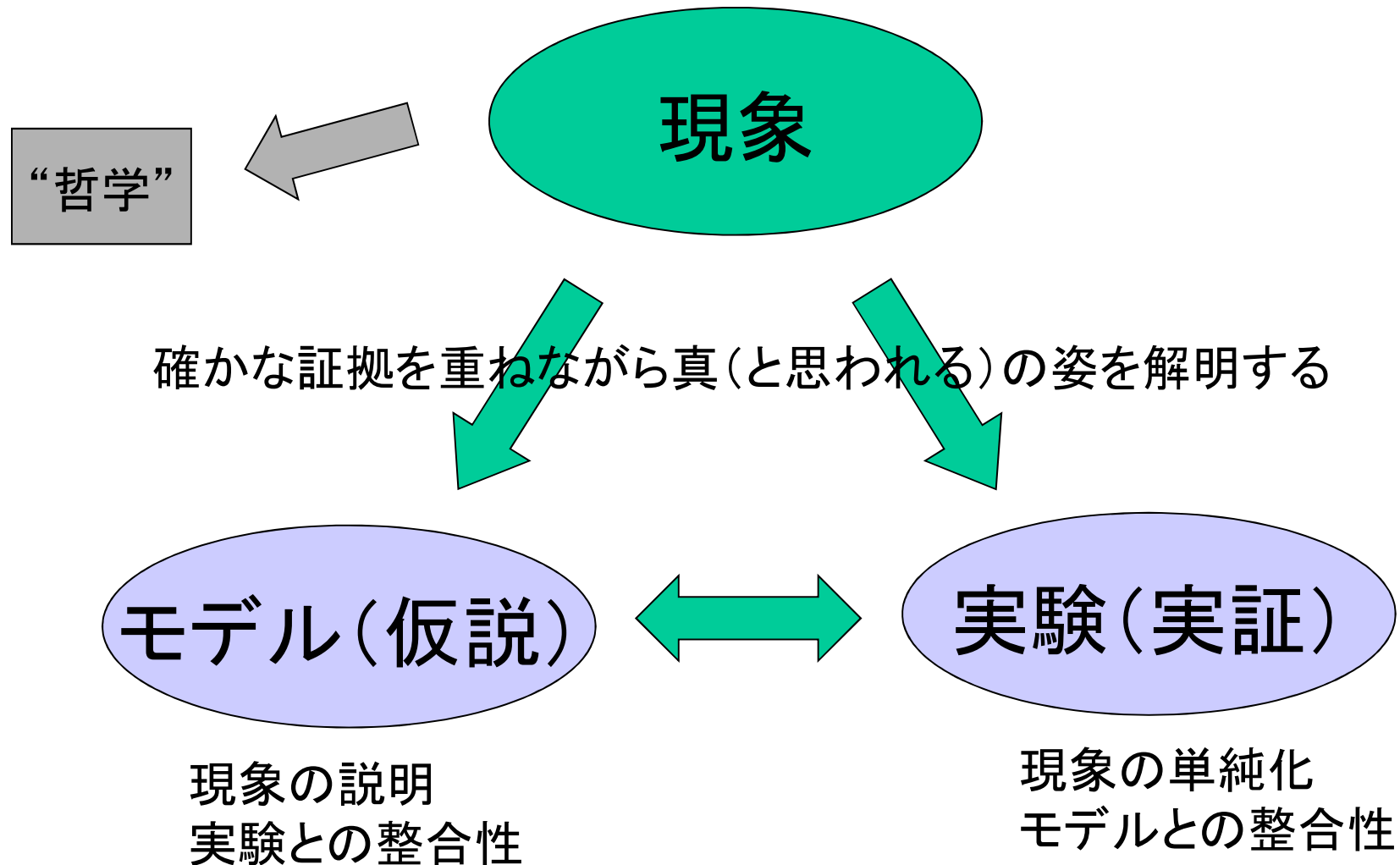
釈迦が登場する前 四大^(しだい) = 「地、水、火、風」 + 「苦、楽、靈魂」 +

古代中国 (BC3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* —



Galileo Galilei (1564–1642)

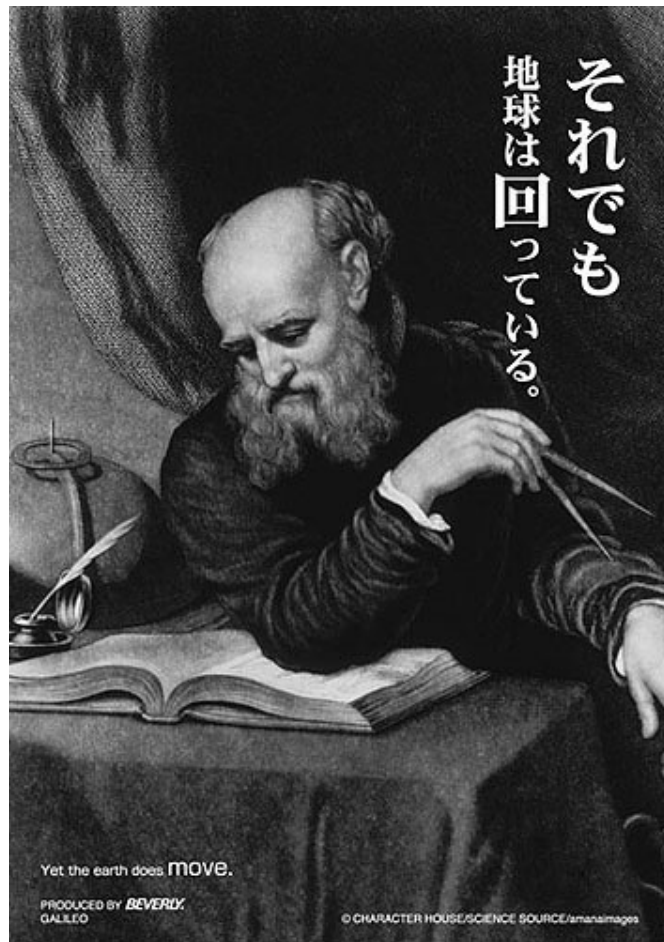
- ・ 最初の実験科学者(それまでは天体運動の観測)

振り子の等時性(ピサの大聖堂のランタン)

落体の運動(ピサの斜塔?)

斜面の運動⇒運動速度は重さによらない

⇔アリストテレス哲学への反証



*現在は、原子を「元素」としているが、原子は本来の元素ではない

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

ラバアジエ(1774)

約30種類の元素を確認(化学反応での質量保存):

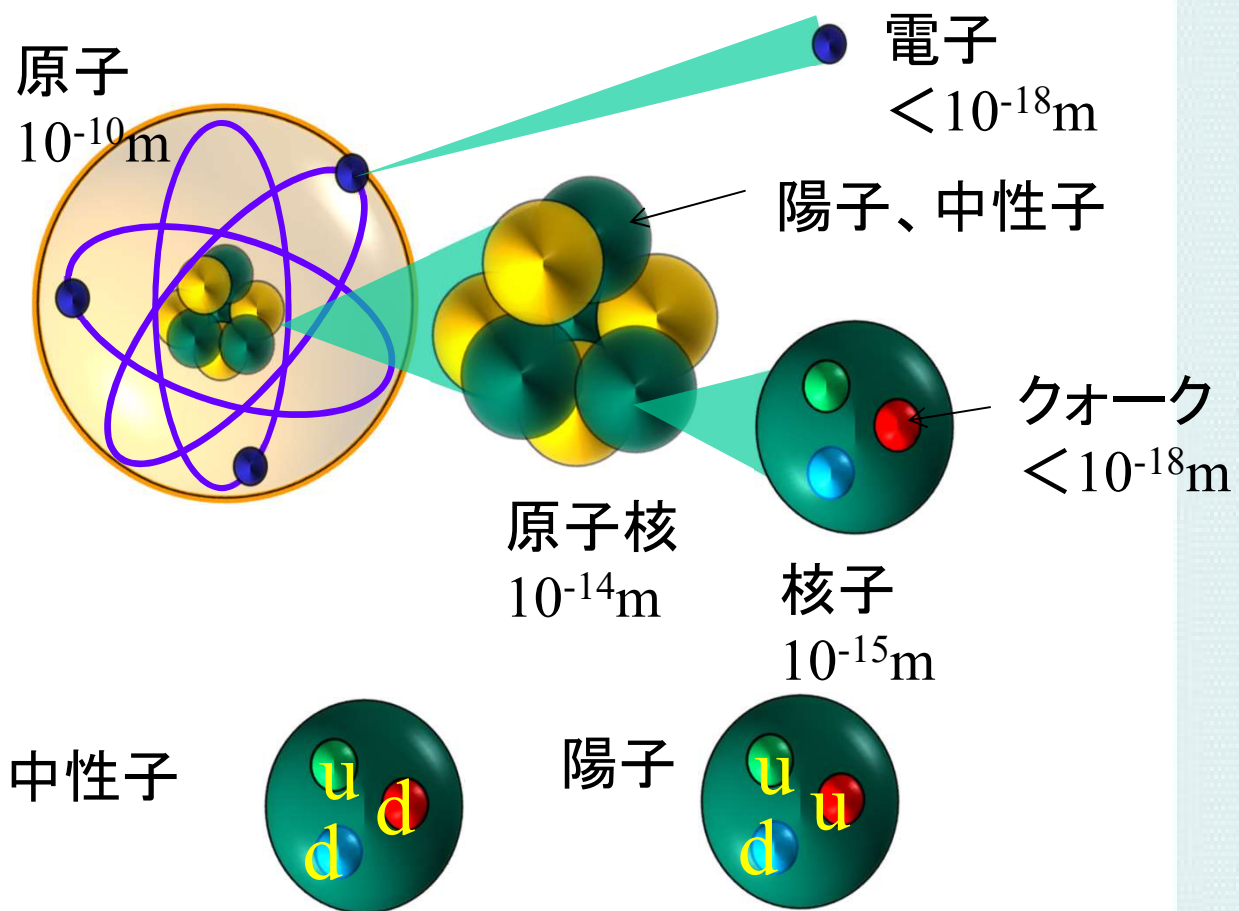
ドルトン(1802) 原子モデル(倍数比例の法則)

アボガドロ(1811) 分子モデル

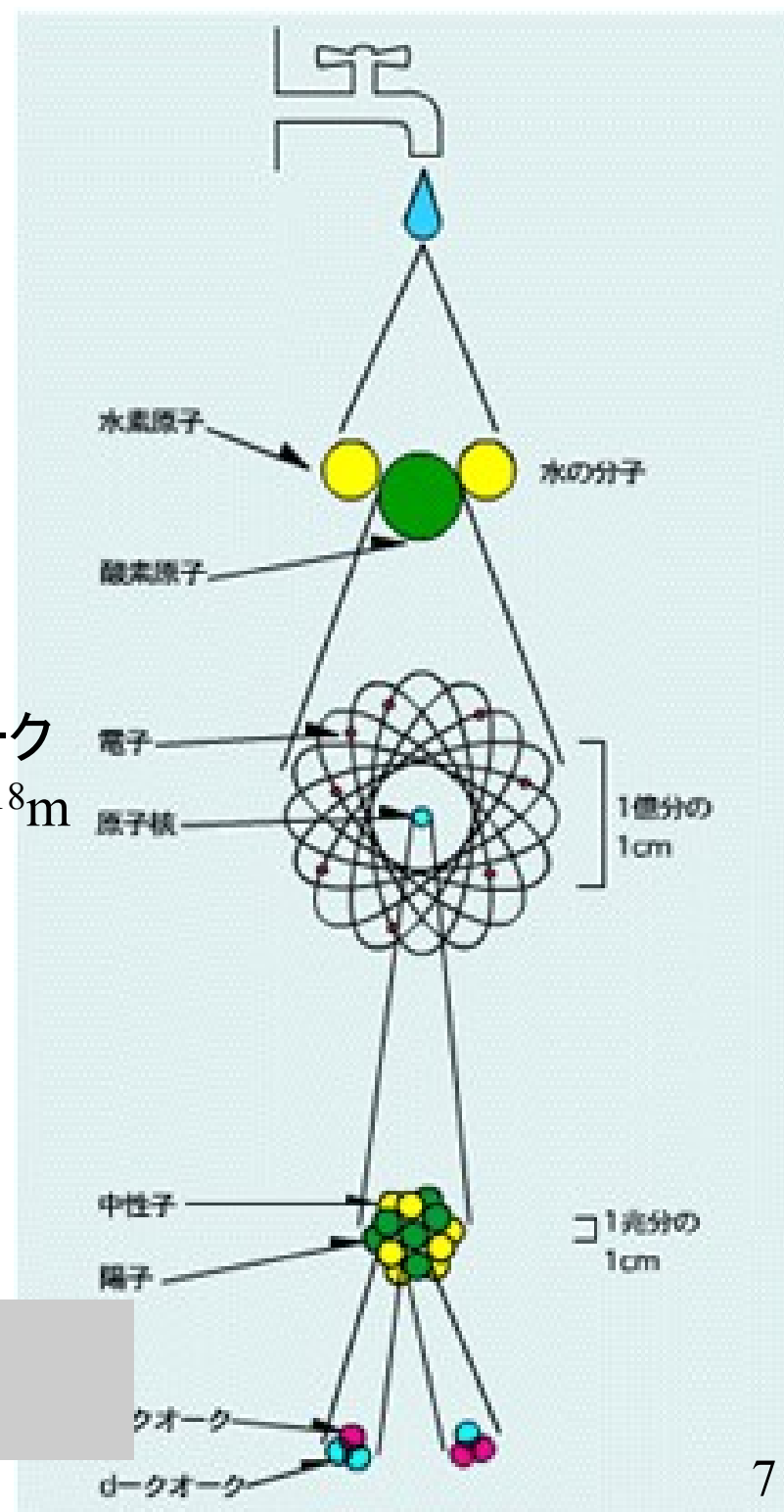
メンデレーエフ(1869)

周期表: 約60種類の元素を分類し、27の新元素を予言

素粒子の「大きさ」



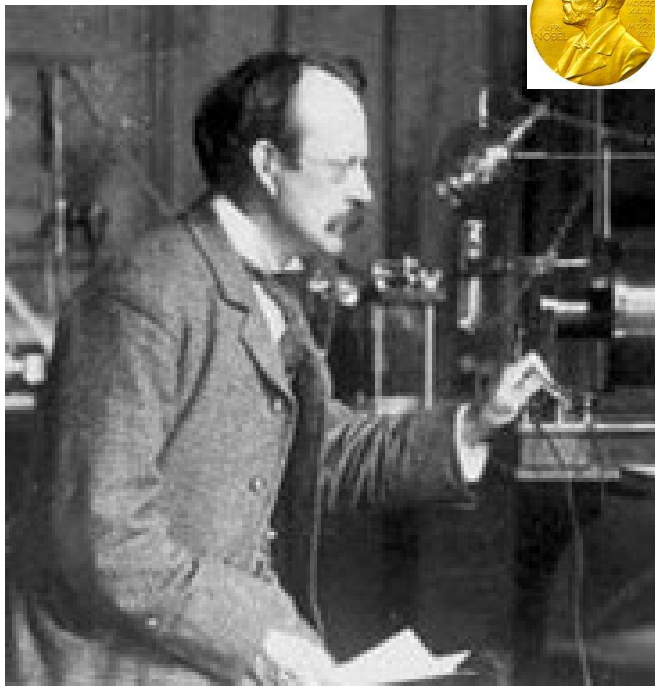
日常のものは、
up クォーク, downクォーク、電子でできている



「真の」素粒子探求の歴史-実験の観点

- 1 8 9 7 陰極線の正体は「電子」である (Thomson)
- 1 9 0 9 ~ 原子は核とその周りの電子から構成される (Rutherford)
- ~ 1 9 3 1 原子核は陽子・中性子で構成される
- 1 9 3 3 反粒子 (陽電子) を宇宙線中に発見 (Dirac, Anderson)
- 1 9 6 4 クォーク模型 (核子は素粒子ではない) (Gell-mann, Zweig)
- 1 9 7 0 年代 素粒子の標準模型ができる (Weinberg, Salam, Glashow)
- 1 9 8 3-8 5 弱い相互作用を伝えるW,z粒子の発見 (UA1/UA2)
- 1 9 9 5 6つ目のクォークtop発見 (CDF)
- 2 0 1 2 重さを与える ヒッグス粒子の発見 (?)

標準模型を超えるものとして、「String理論」



電子の発見

1897年 J.J. Thomson

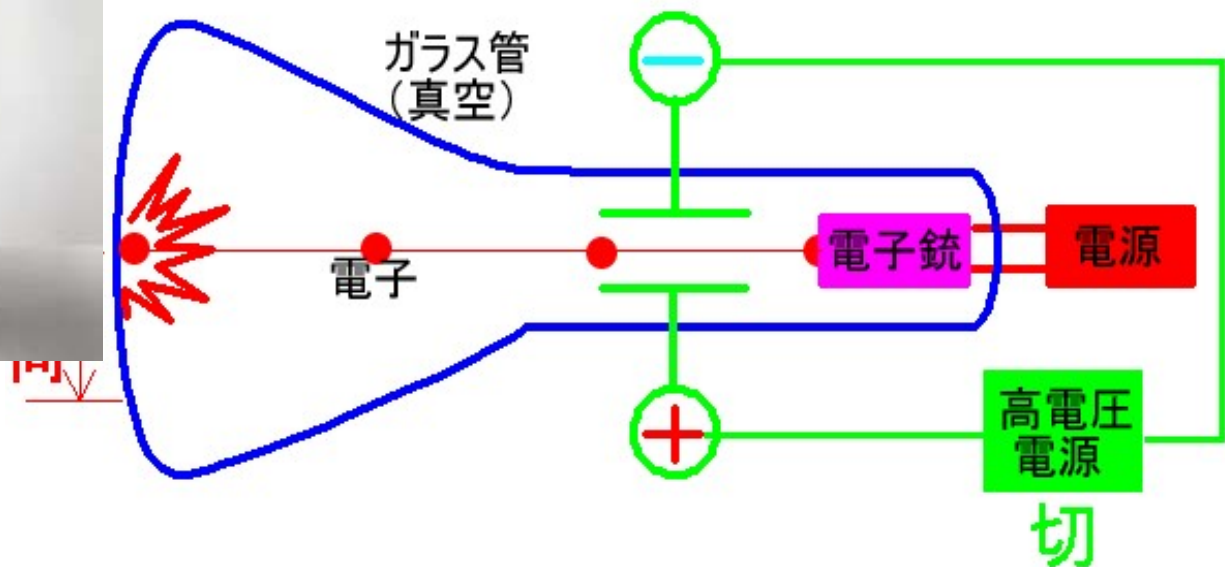
「電子」＝1891年電荷を担う仮想粒子として提唱

クルックス管で、フィラメントを熱すると発生する陰極線の正体は、負の電荷を持った粒子＝電子（トムソンは真空度を上げて、電場や磁場により偏向する実験をした）

波動ならば磁場の影響を受けない



クルックス管



素粒子実験 (別名 高エネルギー実験)

素粒子構造の尺度は短い

自然単位系 : $\hbar = c = 1$



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

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

エネルギー \leftrightarrow 長さの変換

物質波 $E = h\nu = hc/\lambda$



$$\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

を用いればSI単位系に変換できる

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

E	$\lambda(\text{m})$	
1 eV	$10^{-6} = \mu\text{m}$	分光學、物性
1 keV	$10^{-9} = \text{nm}$	X線回折、原子構造
1 MeV	$10^{-12} = \text{pm}$	原子核
1 GeV	$10^{-15} = \text{fm}$	素粒子

<1 fm の解明>

(原子核レベルより小さなものの観測には $\sim 1 \text{ GeV}$ 以上が必要)

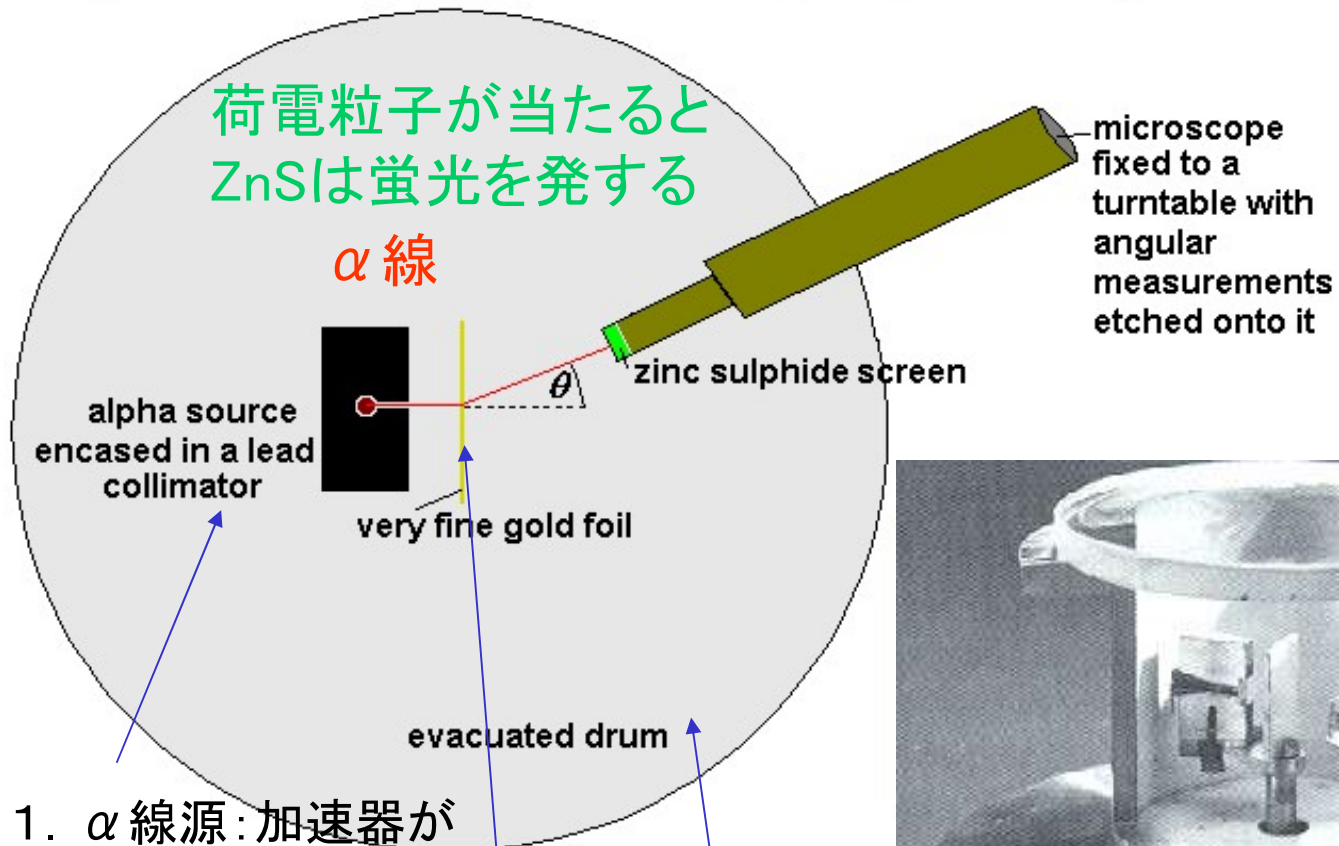
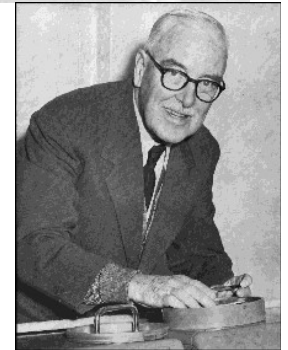
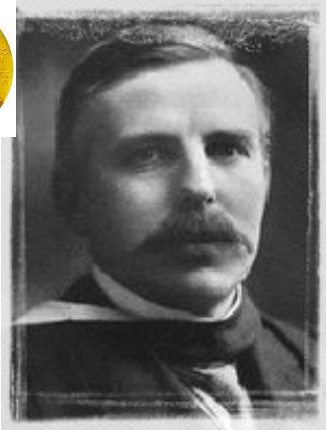
175 GeVのtopの観測: $\sim 10^{-18} \text{ m}$ の大きさを観る

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

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



1. α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



α線を後方に跳ね返す「核」
原子核の存在が分かった

Rutherford散乱：原子核の存在

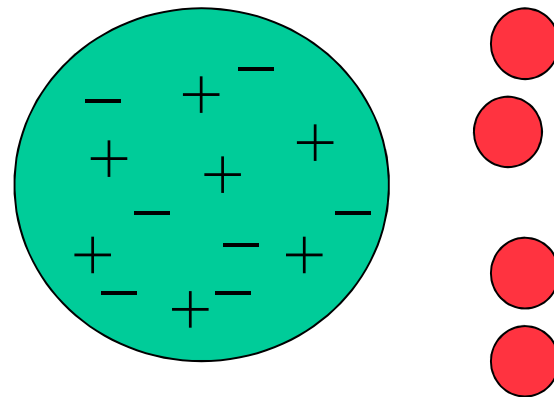
1909 Geiger-Marsdenの α 線の金箔での散乱

1911 Rutherfordの原子核

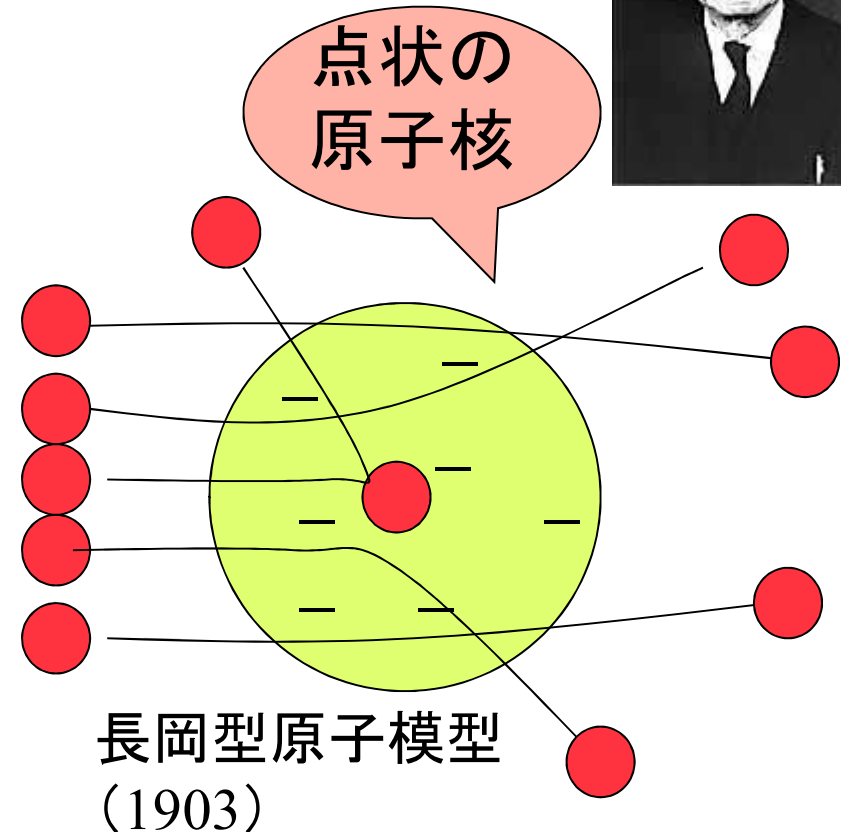
素粒子実験の「起源」：
エネルギーの高い粒子をぶつ
けて反応をみる



He^{++}



Thomson型原子模型(1903)



長岡型原子模型
(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)

⇒ 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)

重要

最初の素粒子の枠組み

1930年代： 陽子、中性子、電子←素粒子(elementary particle)

1931

反粒子

Schroedinger(1926)方程式(大学3年)は
相対論を満たしていなかった

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \Leftrightarrow \text{微分が時間と空間で非対称}$$

ハミルトニアン: "全エネルギー"
(質量は含まない)

$$H\psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t).$$

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)

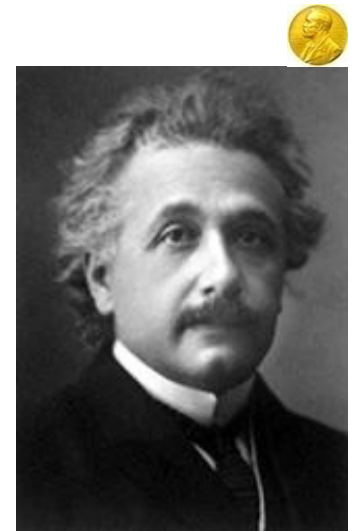
Dirac(1928): 相対論を満たす方程式は、負のエネルギー解も含む
(大学4年)

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



但し

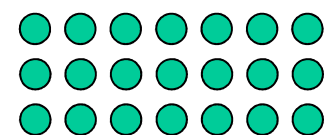
$$E^2 = (mc^2)^2 + \sum_{j=1}^3 (p_j c)^2 = \left(\alpha_0 mc^2 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j p_j c \right)^2.$$



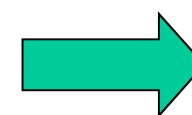
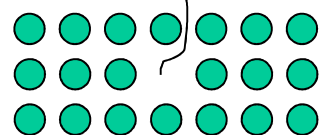
1930 Dirac: 空間は負のエネルギー電子で詰まっている。1つが飛び出ると、空間には正の粒子が残るように見える←真空は負に帯電?

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 =
質量とスピンは同じ
他は反対の性質



相対論のここでの要点



$$E = m_r c^2 \quad \text{「質量はエネルギー」}$$

↑
相対論的質量で運動量とともに増加する

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

「静止質量」あるいは「Lorentz不変な質量」で、運動系によらない



$$E^2 = (mc^2)^2 + \sum_{j=1}^3 (p_j c)^2 = \left(\alpha_0 mc^2 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j p_j c \right)^2.$$

を要求すると

$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

負のエネルギー状態？

— 古典論との関係

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} = (mc^2) \sqrt{1 + \left(\frac{p}{mc} \right)^2} \approx (mc^2) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{mc} \right)^2 \right] = mc^2 + \frac{p^2}{2m}$$

↑
あまり相対論的でない場合

質量エネルギーと
運動エネルギー

1932

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(上から下へ)

磁場中で荷電粒子はローレンツ力により円運動する。遠心力とのつりあいから

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

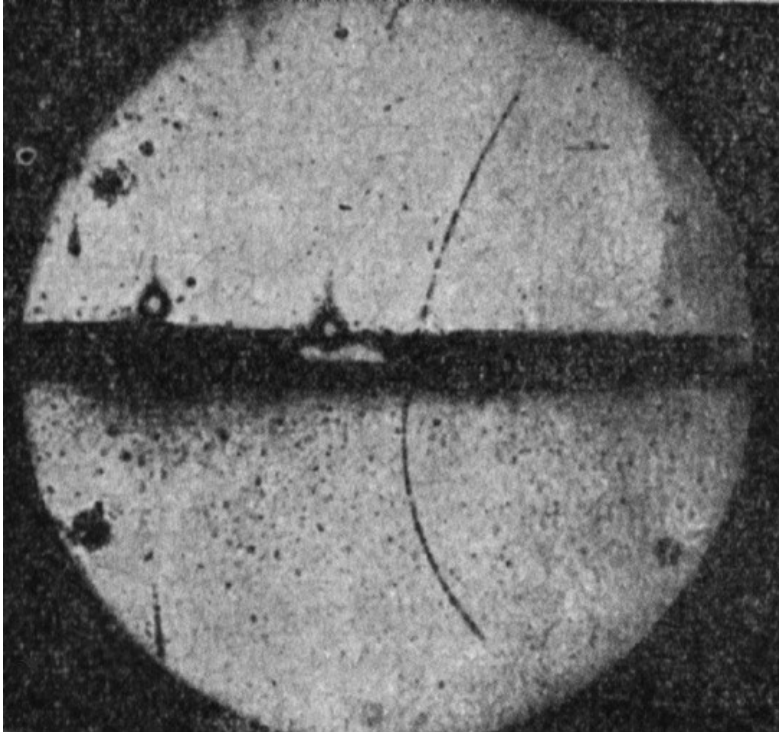
$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

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

$$p[\text{kgm/s}] = e[\text{C}]r[\text{m}]B[\text{T}]$$

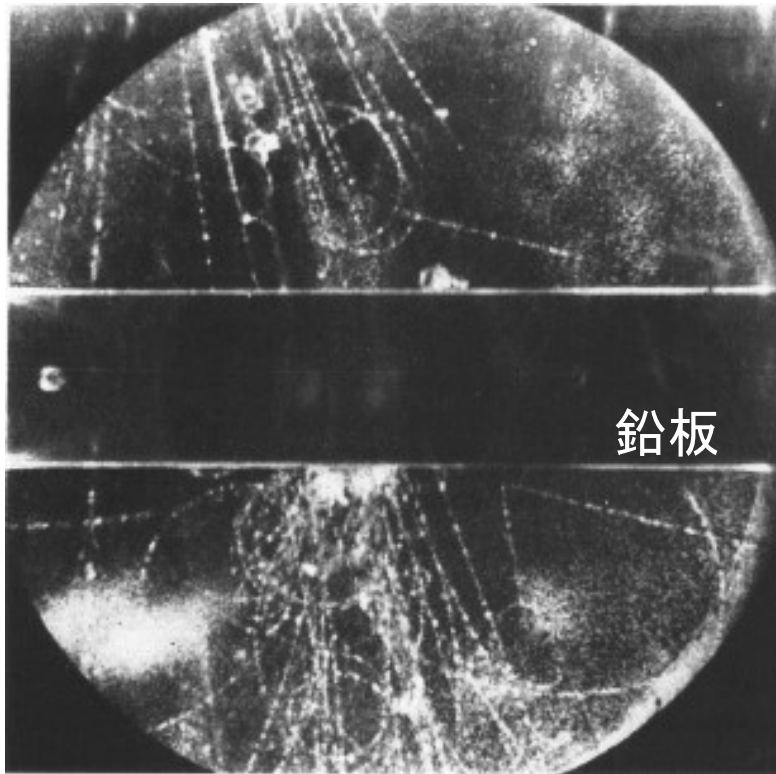
$$p[\text{GeV}/c] = 0.3qr[\text{m}]B[\text{T}]$$

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



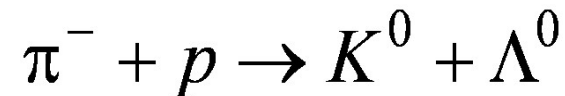
新たな素粒子(クォーク): 奇妙な粒子 (strangeness)

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



反応は起きやすい(対で生成されるので量子数保存)、
寿命は長い(崩壊=量子数が変化する)

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

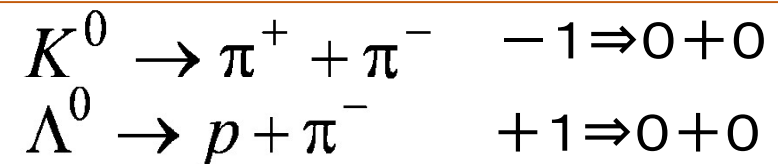


$$S: 0 + 0 \rightarrow (-1) + (+1)$$

$$B: 0 + 1 \rightarrow 0 + 1 \quad \text{Baryon Numberの保存}$$

$$Q: (-1) + (+1) \rightarrow (0) + (0) \quad \text{電荷の保存}$$

崩壊ではstrangenessは保存できないので長寿命



強い力で生成され、**弱い力**で崩壊する

弱い力の定義は後で

反応(崩壊)が起き難いのは、相互作用が弱いから

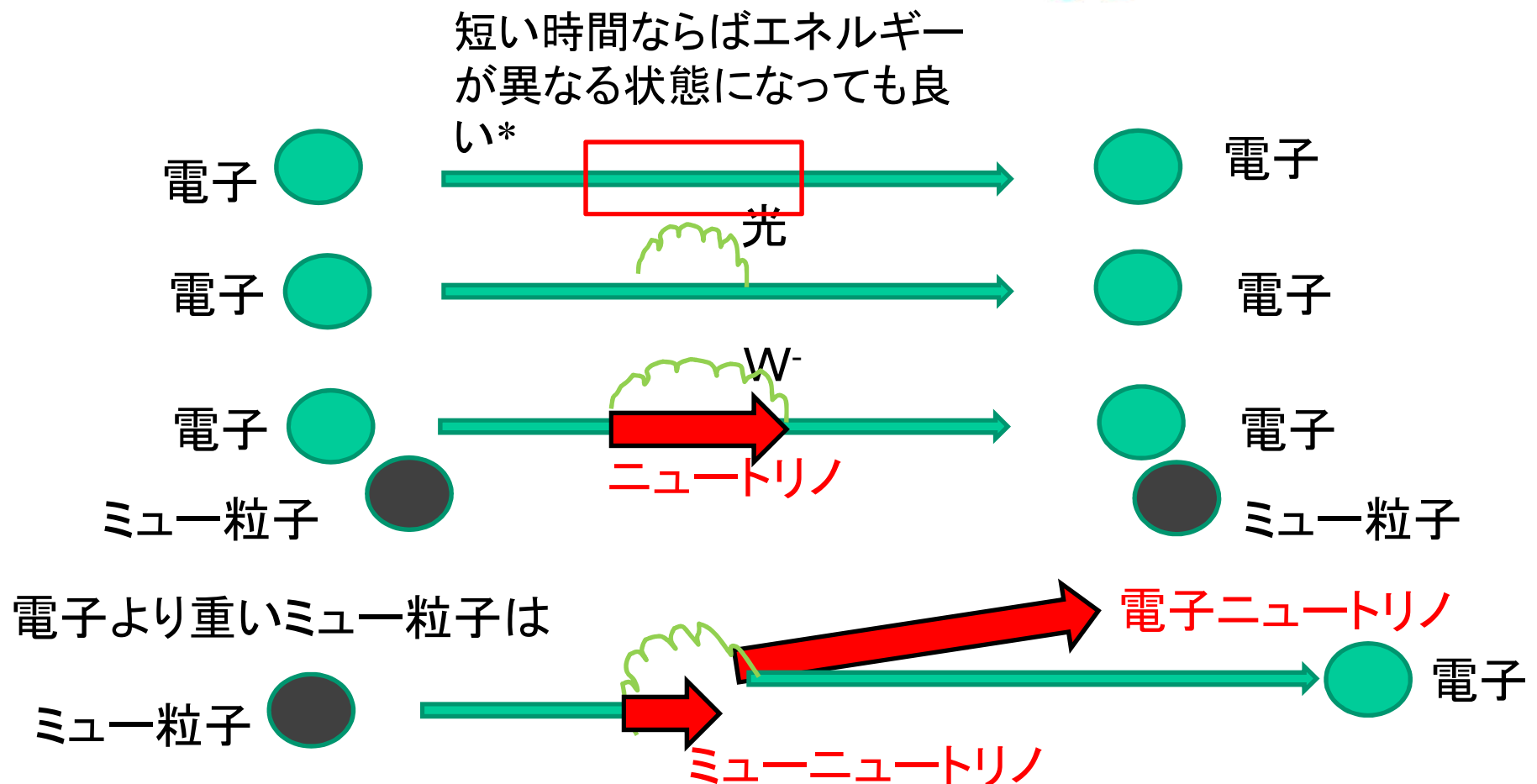
弱い力ではstrangeness保存が破れてもよいが、そのために反応(=崩壊)しにくい

量子力学の世界

*不確定性原理

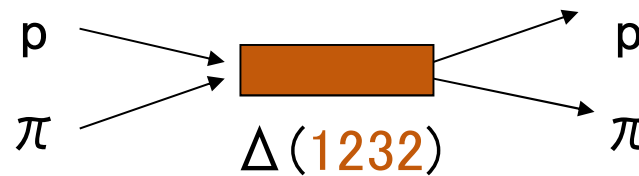
$$\Delta t \times \Delta E < h$$

- 中間状態は、「量子数」(電荷、クォーク数、レプトン数、)が保存されること
- エネルギーが許せば、他の粒子になれる
- 何が起こるかは確率で決まる



多くの粒子が発見される

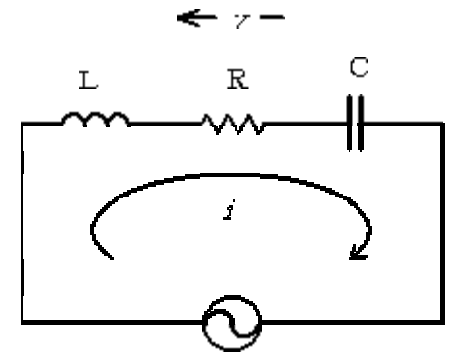
1953入射 π が特定のエネルギーで、断面積が増加
 ~ 特定の周波数でラジオの受信電波が増加
 (物理B3、物理実験I)



LCR回路の

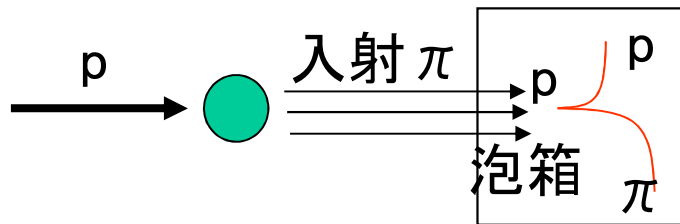
$$\omega_0 \equiv M = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\Gamma = 2R/L$$



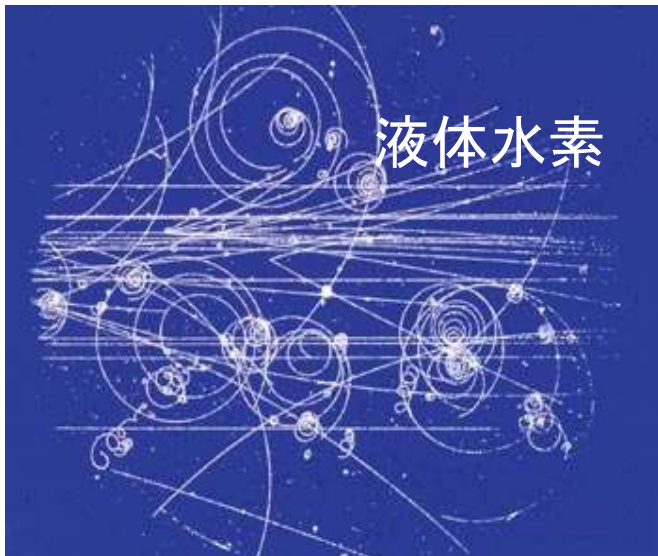
粒子加速器

共鳴状態のハドロンが生成



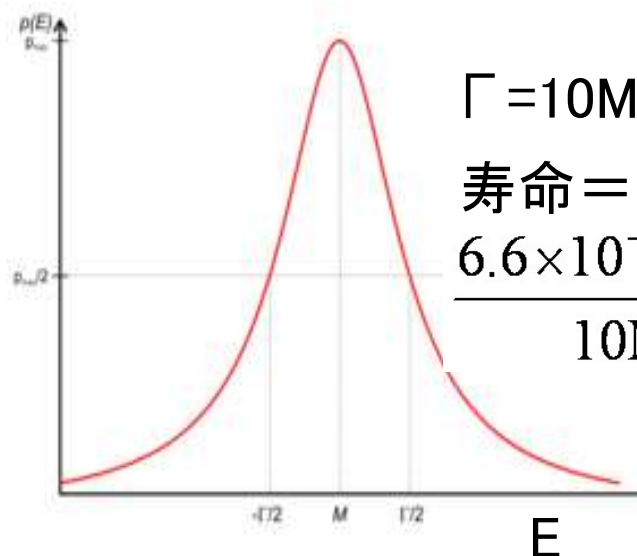
$$\sigma_t = \frac{A}{(E - M)^2 + \Gamma^2/4}$$

質量 M
 寿命 \hbar/Γ



液体水素

反応断面積



$\Gamma = 10 \text{ MeV}$ だと

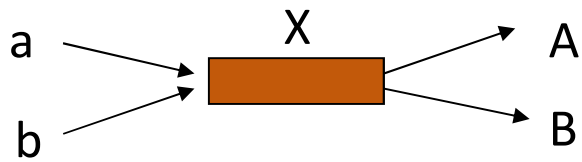
寿命 =

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

~強い力で崩壊する
 ハドロンの寿命

粒子の質量測定 ローレンツ不変質量

素粒子実験検出器の機能



$X \rightarrow A + B + C + \dots$ 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: $E = E_A + E_B + \dots$

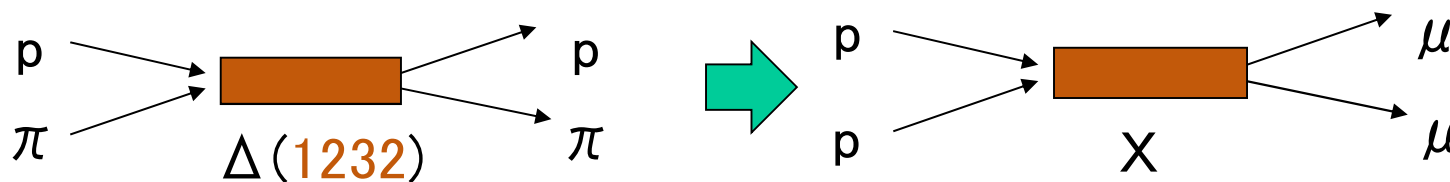
運動量保存: $\vec{p} = \vec{p}_A + \vec{p}_B + \dots$

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

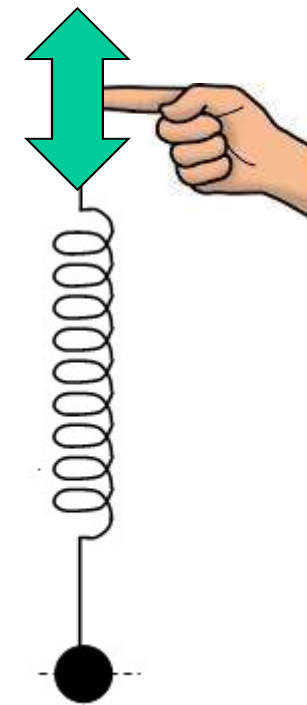
どんな運動系でも子供のエネルギーと運動量を測定すると親の静止質量は計算できる

← 相対論的に不変な質量: ローレンツ不変質量

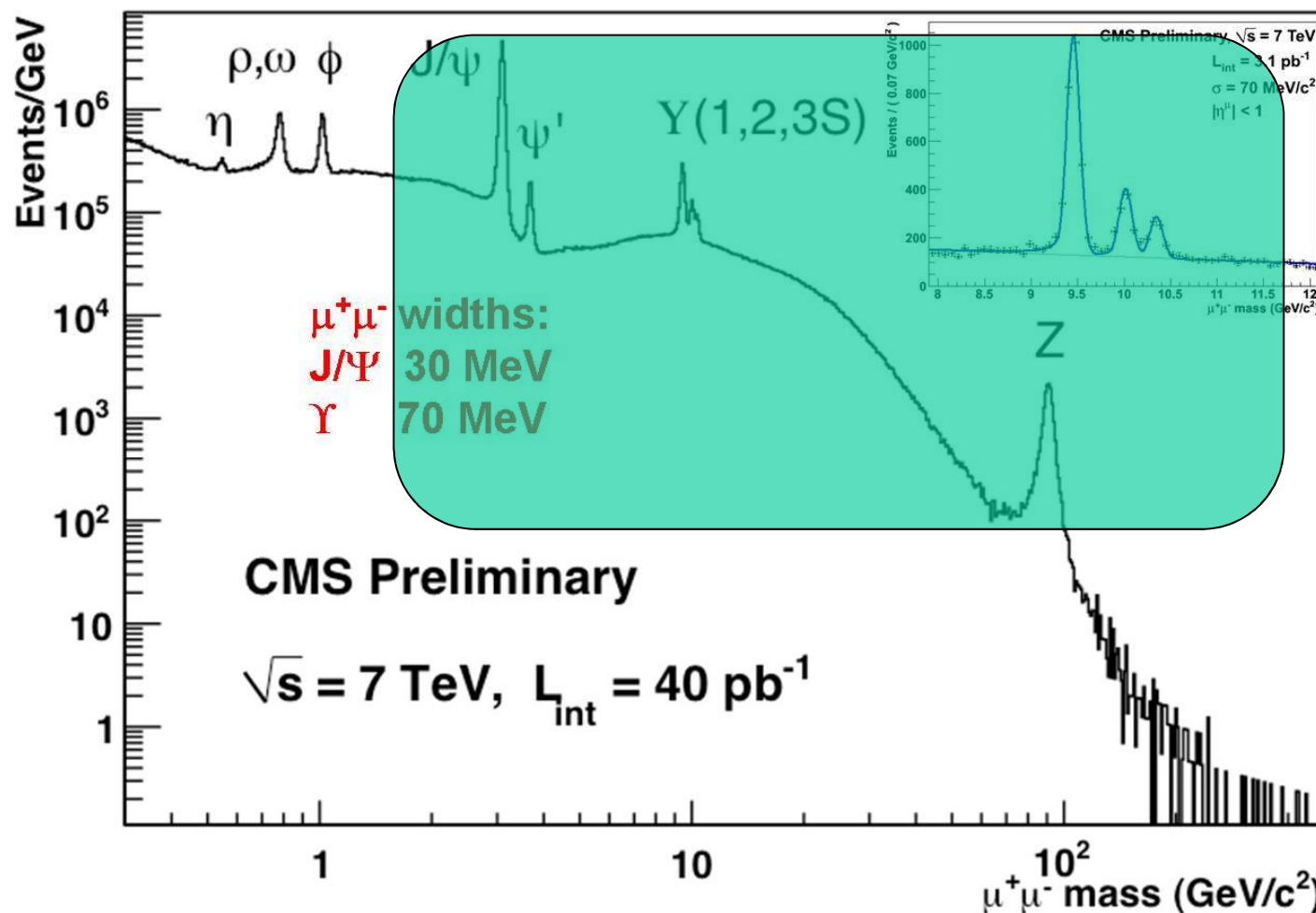
共鳴状態 —当時のデータではありません—



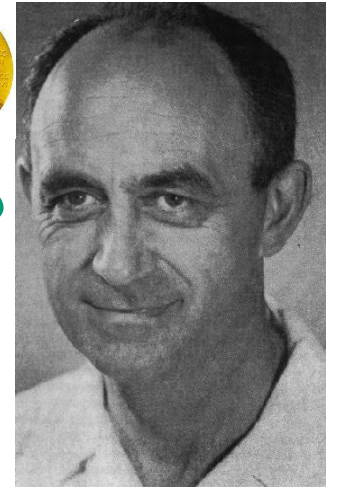
外からのエネルギー
～振動数



ばねの固有振動
～粒子の質量
 $E=hf \sim mc^2$



様々なハドロンの発見と対称性



Baryon (重粒子): $p, n, \Lambda, \Sigma, \dots$ ← barys (重いGr)

Meson (中間子): $\pi, K, \rho, \omega, \dots$ ← mesos (中間Gr)

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

原子核をつくる

核の外

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)

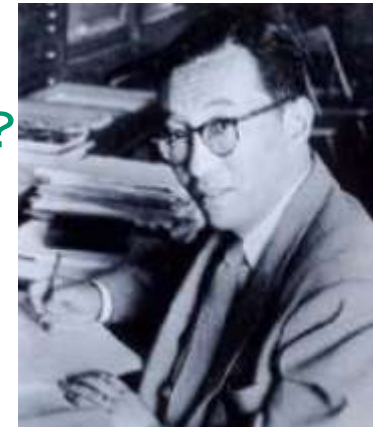
多くのハドロンが発見され、ハドロンが基本粒子とは考えにくい

ハドロン質量間に特定の関連がある ← グループ分け ~ 素となる構成物?

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

1956 Sakata: p, n, Λ が基本粒子としたモデル

1958 Ogawa 群論を使って Sakata model を補強



$\left[\begin{matrix} p \\ n \end{matrix} \right]$	938.28	$\left[\begin{matrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{matrix} \right]$	139.57	$\left[\begin{matrix} \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{matrix} \right]$	1189.36	$\left[\begin{matrix} K^+ \\ K^0 \end{matrix} \right]$	493.67
	MeV		134.96		1192.46		
	939.57		139.57		1197.34		497.70
$\frac{\delta m}{m}$	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

⇔ 似た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みたい

(p,n) は「ひとつのものA」の2つの状態 (アイソスピンが違うという) \Leftrightarrow 電子の2つのスピン状態

一般に、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

$$A = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} u' \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\gamma} \cos \beta & e^{i\alpha} \sin \beta \\ -e^{-i\alpha} \sin \beta & e^{-i\gamma} \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \leftarrow \text{SU(2) 変換の一般形}$$

$\det U = 1$ 確率の保存
 $UU^\dagger = U^\dagger U = 1$ 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:

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

混合 混合

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

行列表示すると

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

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

粒子・反粒子の
SU(2)変換対応

SU(2) 対称性のある粒子反粒子対の変換: $2 \otimes \bar{2}$

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

混合 混合 混合

$3 \oplus 1$ 粒子数表現
 $1 \quad 0$: アイソスピン

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

は似た質量 ($\pi^+ \pi^- \pi^0$) = (140, 140, 135 MeV)

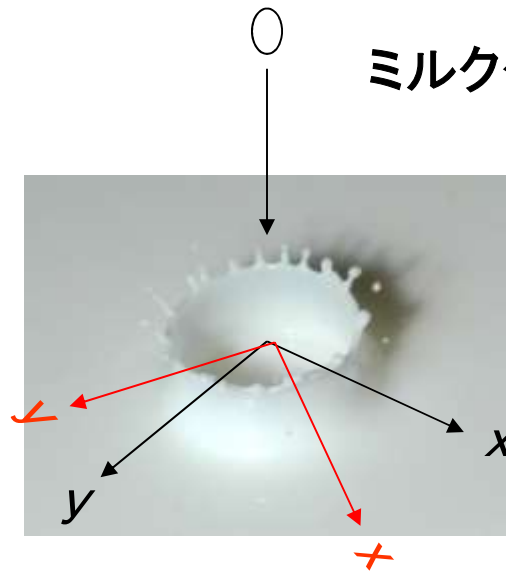
直交状態

$$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$$

η (548)

2: π (中間子) は粒子と反粒子の結合状態

物理法則の対称性



ミルククラウンのでき方は、

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

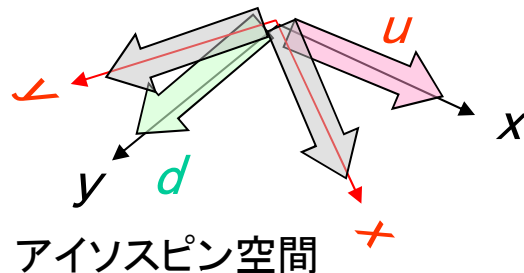
⇒ エネルギー(E)の保存

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:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} u' \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

← SU(2)変換で
 $\alpha = \gamma = 0$ の場合

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

バリオン: 3種類のクォークが3個 $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$



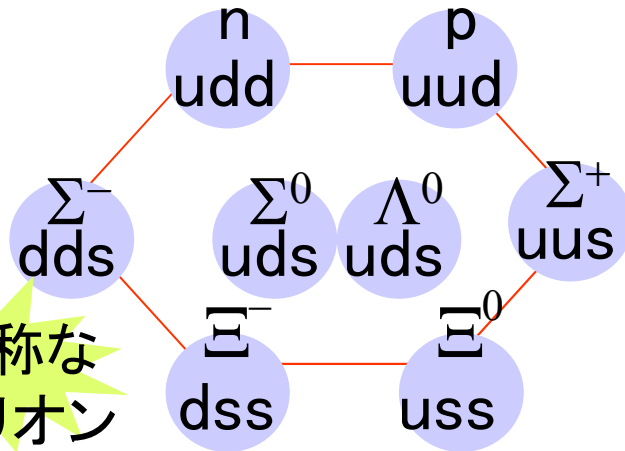
部分対称な
8のバリオン

1964 Gell-man Zweig:
(u,d,s) 3クォーク模型

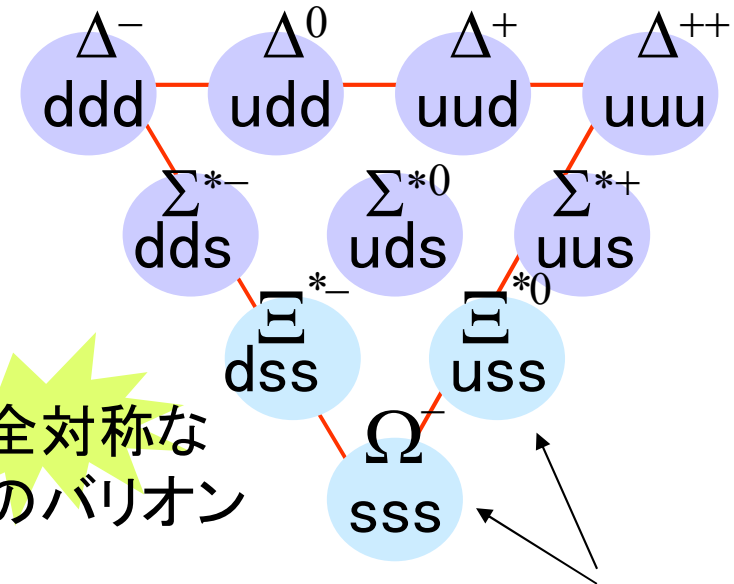
SU(3)の対称性をもつ

(p,n,Λ)に対応するものとして(u,d,s)
電荷2/3,-1/3を持つクォークを導入

Three quarks for Muster Mark !
“Finnegans Wake” James Joyce



完全対称な
10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(Ω 1964)

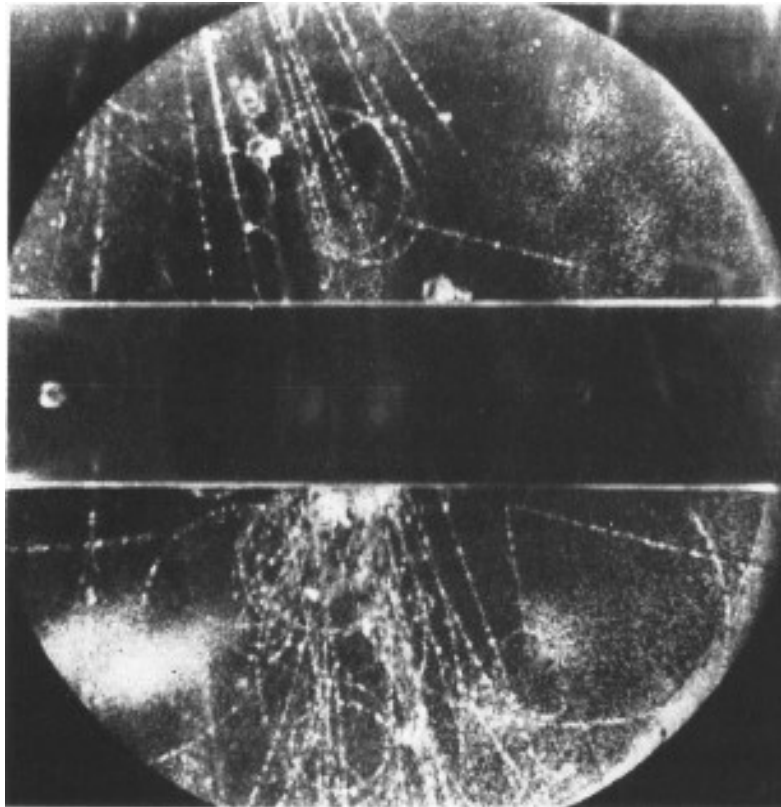
半端な電荷の粒子は見つかっていない
Gell-Mann自身、数学的なものと説明
⇒ パートン模型(実験)との一致から実在へ

1968

クォークモデルの実証

1947年: 宇宙線の中に奇妙な
イベントを発見 $\Rightarrow \Lambda$ 粒子

1964: ゲルマンとツバイクは, p, n, Λ その他
多く発見された粒子を、「クォークの構成物」
と仮定



Strange quark



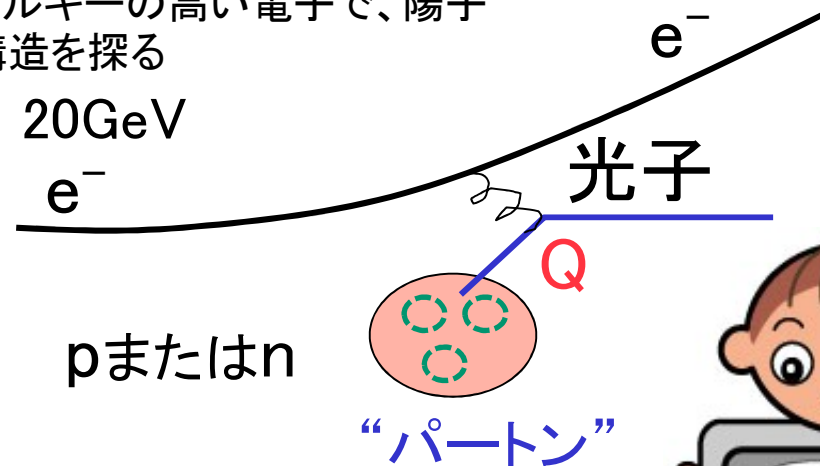
$$p=uud \quad n=udd \quad \Lambda=uds$$

1968: クォークは実在のものと判明

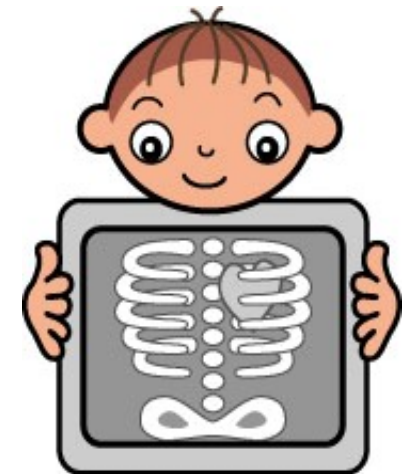


エネルギーの高い電子で、陽子
の構造を探る

20GeV



X線: エネルギーの高い光



クォークの香り (種類) + レプトンの種類

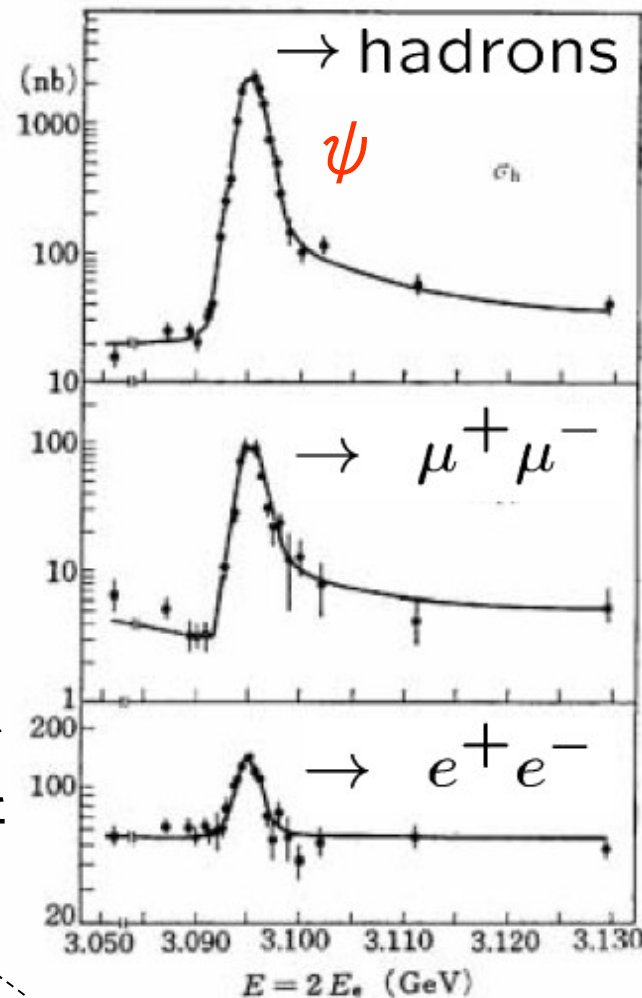
- 👤 1897 Thomson: 電子
- 1937 👤 Anderson/Nedermeyer: μ 粒子
- 1947 Rochester/Butler ; ストレンジネス
- 👤 1959 Reines: 電子ニュートリノ
- 👤 1962 Lederman/Schwartz/Steinberger: μ ニュートリノ
- 1964 👤 Gell-man, Zweig: 最初のクォーク模型 = u, d, s
- 1970 Glashow, Iliopoulos, Maiani: 4クォーク模型
(レプトンとクォークの対称性)
- 👤 1973 小林・益川の6クォーク (CP非保存)
- 👤 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

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

チャームの発見

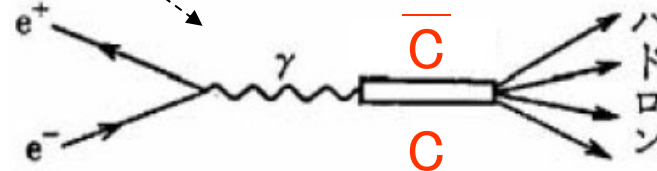
1974 SLACとBNLの加速器実験で発見←November Revolution

Richter et al., @ SLAC

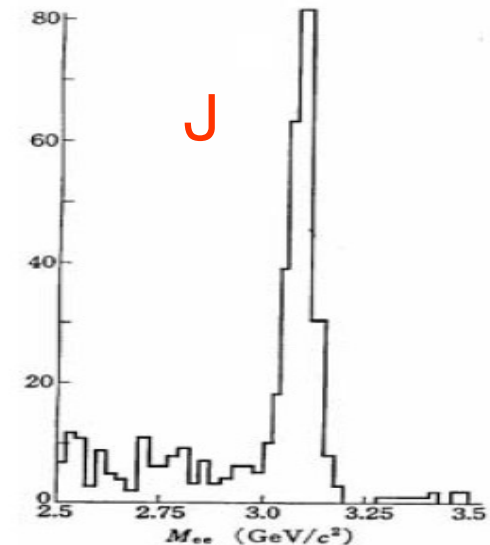


電子・陽電子対は消滅し γ となる。 γ の $E \sim 2m$ で新たな粒子・反粒子対の共鳴状態になる。

J/ ψ 粒子
チャーム・反チャーム
クォークの共鳴状態



Ting et al.,
@ BNL



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

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

SLAC

SLAC SPEAR 1972~ 電子・陽電子衝突器



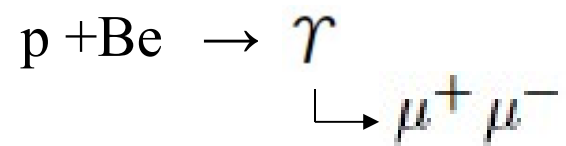
直径80m

Spark chamberの画像
写真⇒電子検出器へ

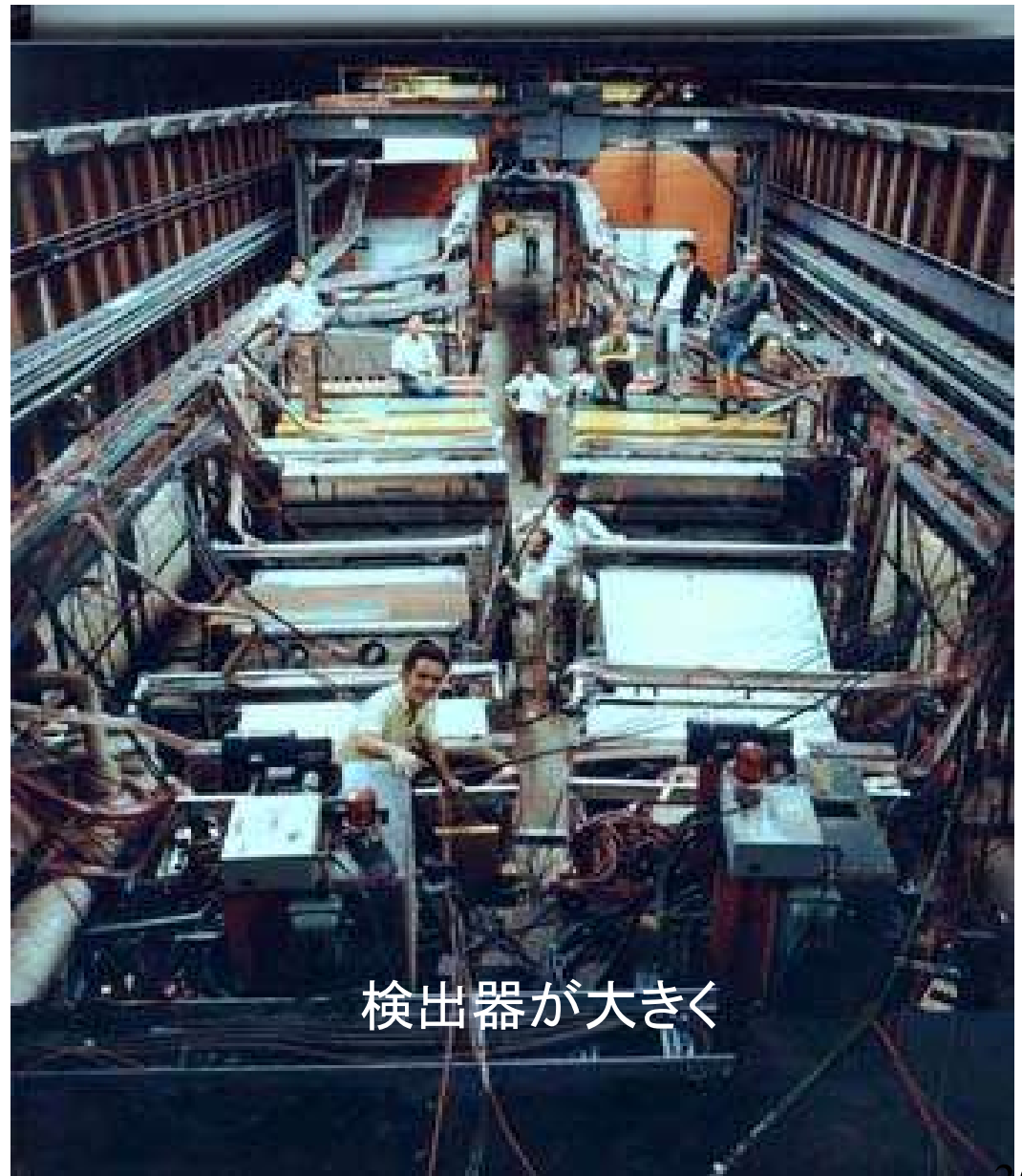
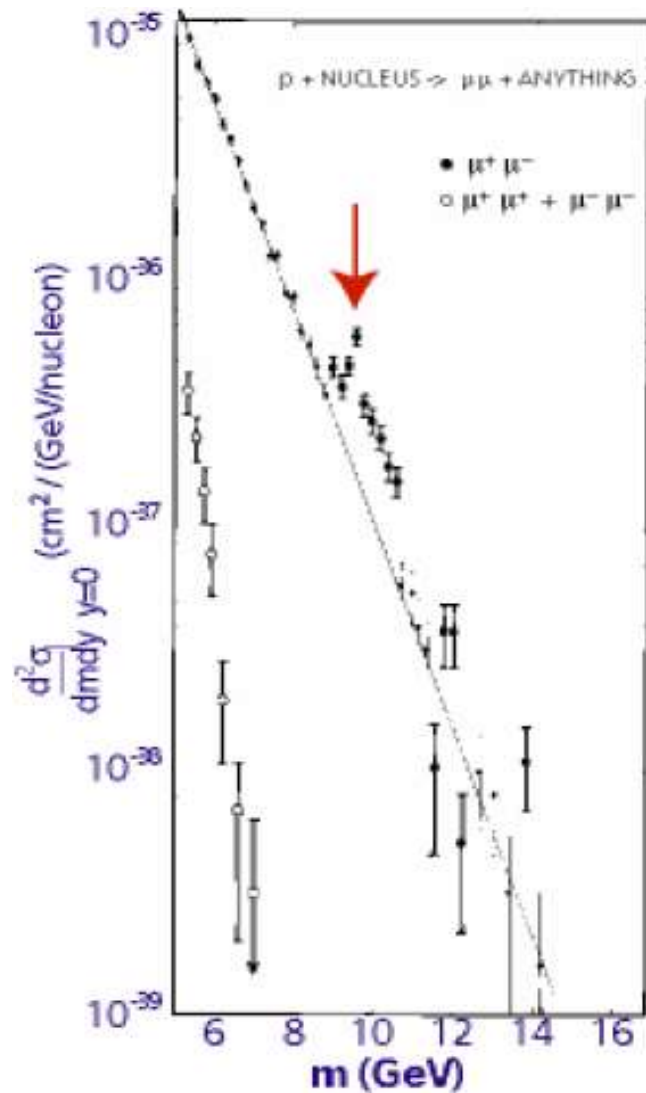


1977 FNAL 300GeV p

ボトムクォーク



$\gamma = \bar{b}b$ の束縛状態



トップクォーク

CDF検出器(1985-2012)
(米国フェルミ研究所)

TEVATRON
陽子反陽子衝突器
 $0.9\text{TeV} \times 0.9\text{TeV}$



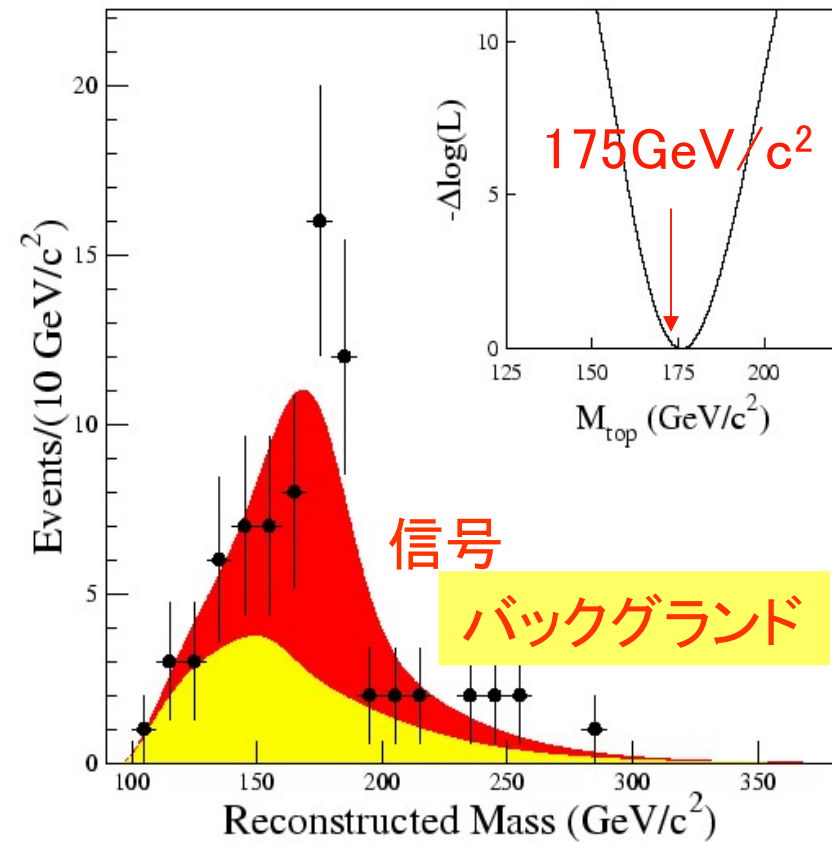
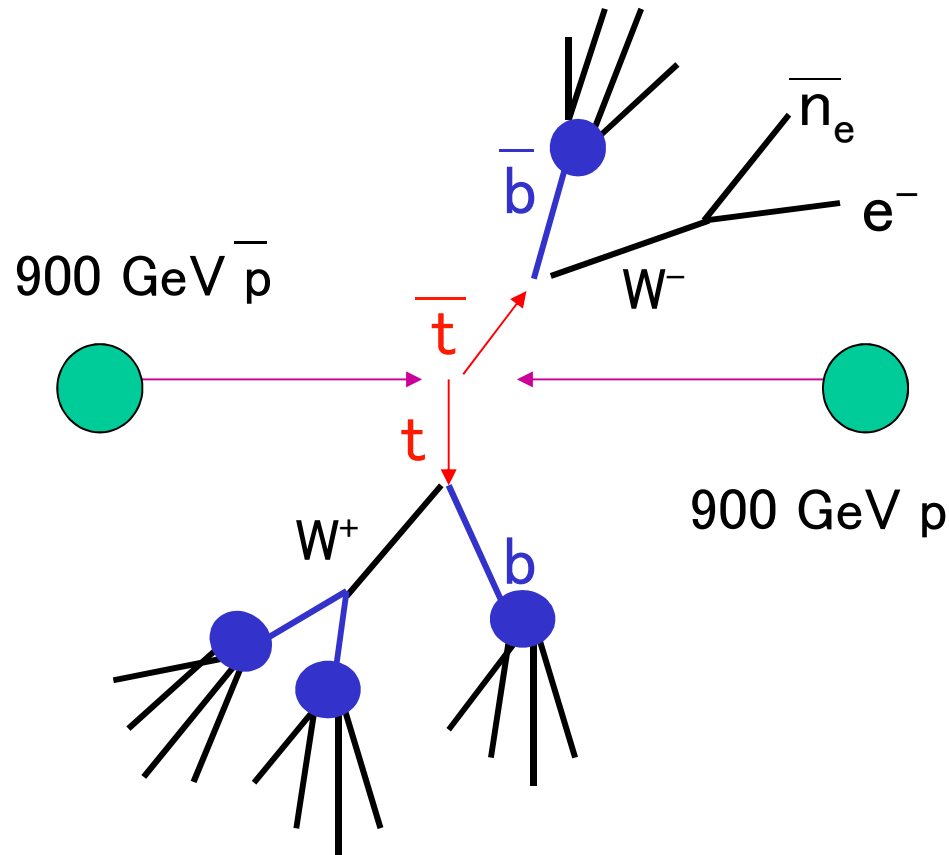
日米伊の共同実験としてスタート
日本代表: 筑波大素粒子実験



トップクォーク

1994 CDF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最終的に多くのハドロンを発生する(色のため)←ジェット

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

Leptons	Quarks		
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e- neutrino	ν_μ μ - neutrino	ν_τ τ - neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	(u,d,v,e)のコピーは重い		

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

電荷

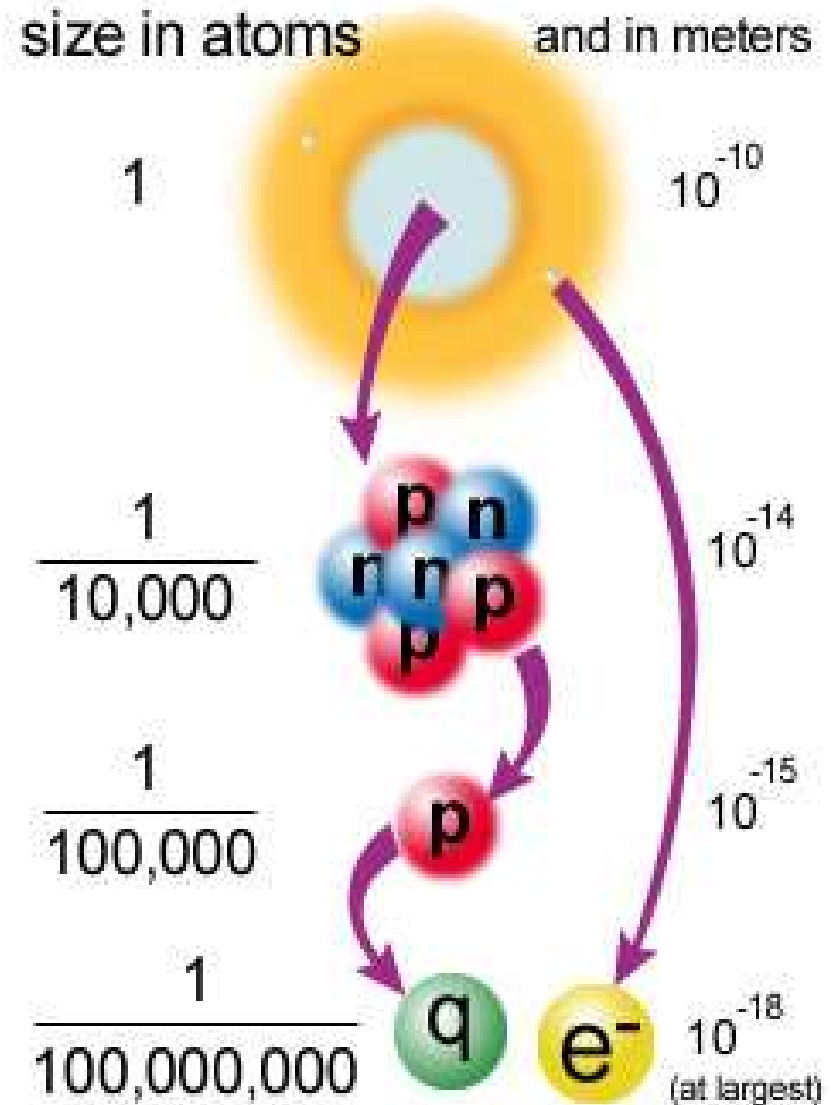
$+2/3$

$-1/3$

0

-1

<



ニュートリノ

不安定な原子核 \Rightarrow 安定な原子核 + 何か (エネルギー保存のため)
放射線元素 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

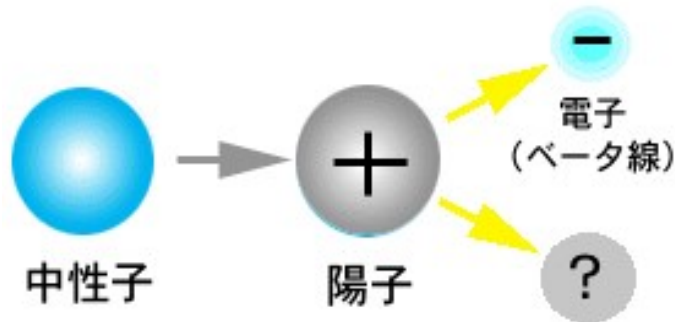
ベータ線 = 電子 : ベータ崩壊

ガンマ線 = 光 (高エネルギーで目に見えない) : ガンマ崩壊

ベータ崩壊の本質は 中性子 \rightarrow 陽子 + 電子 + ?

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

Pauli(1930): ? = 電氣的に中性で重さの軽い粒子 Neutral+Ino \rightarrow neutrino (Fermi)

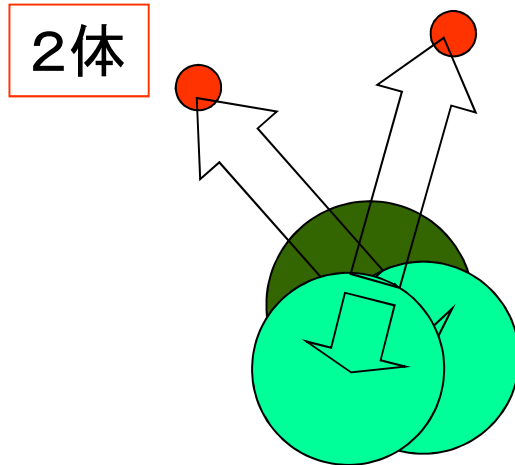
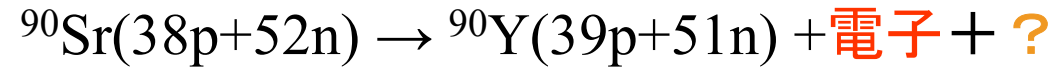


Reines/Cowan(1956) ニュートリノの検出

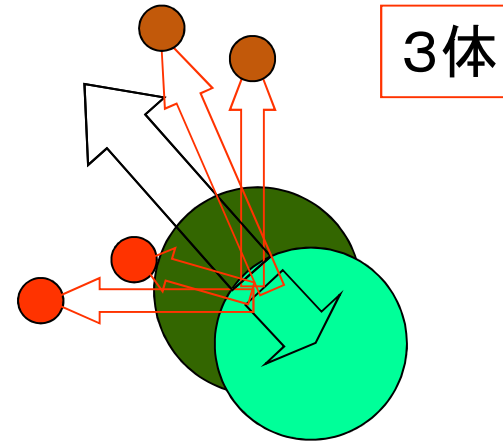


物理実験I

2対崩壊と3対崩壊

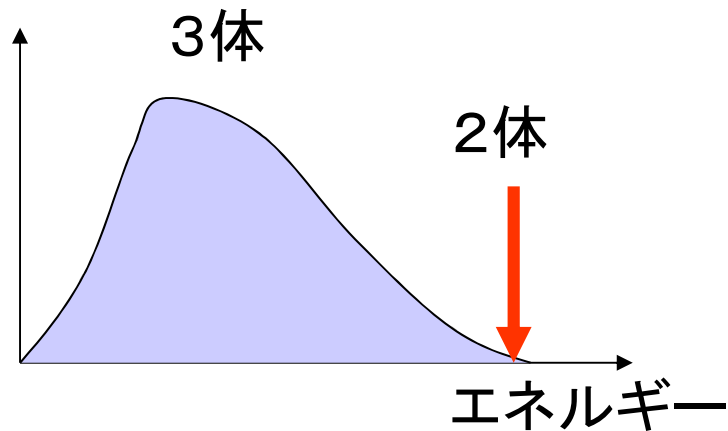


$$0 = \vec{P} + \vec{p}$$



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

質量がゼロの場合 $|\vec{p}_2| = E_2 / c$

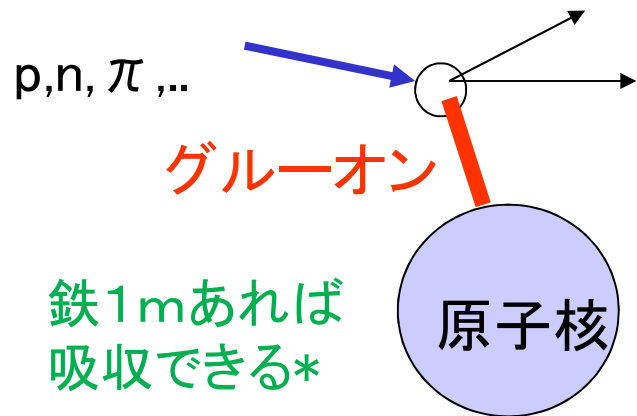


^{90}Y と **電子** だけだと、電子のエネルギーは ^{90}Sr と ^{90}Sr の重さの差で決まるが、測定結果は**連続分布** (~1911Hahn/Meitner)

ニュートリノの検出は難しい

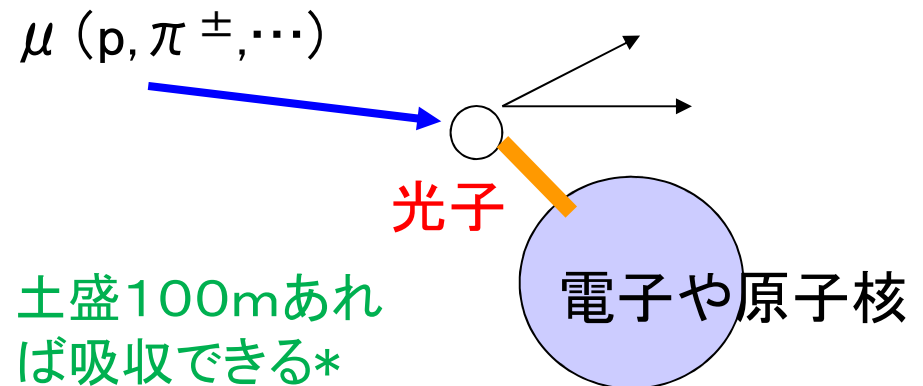
レプトン(電子の仲間=強い力を受けるクォークの仲間ではない)

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)



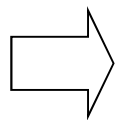
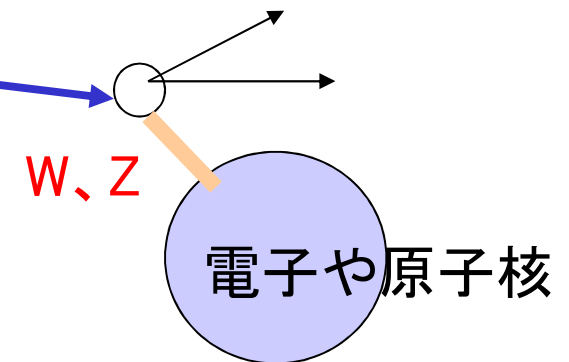
*加速器で発生する高エネルギーの粒子に対して

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



ニュートリノ
(電子、ハドロン、...)

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

*太陽系~45億km

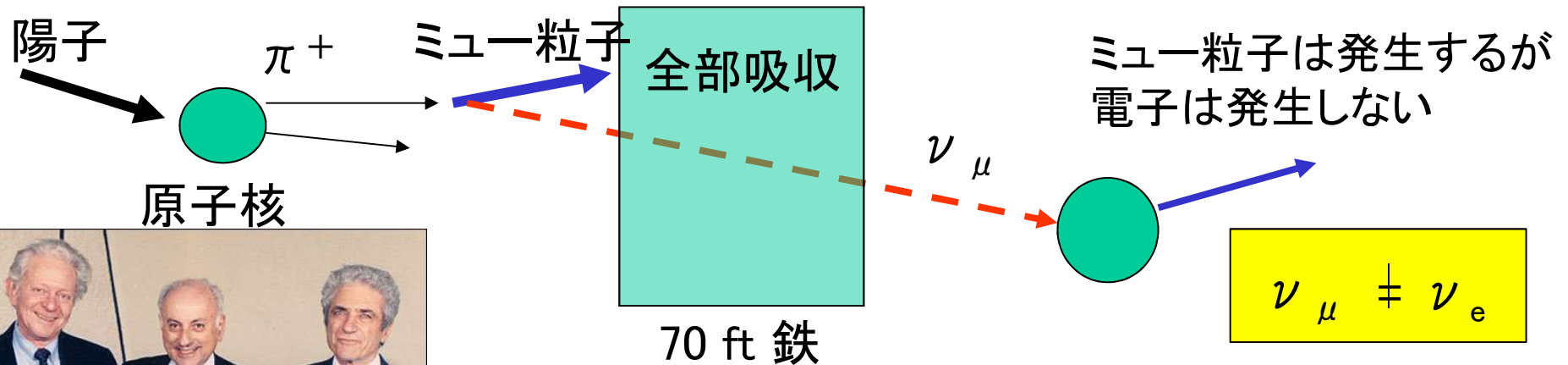
ニュートリノを検出して種類を判定するには

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

加速器で作る

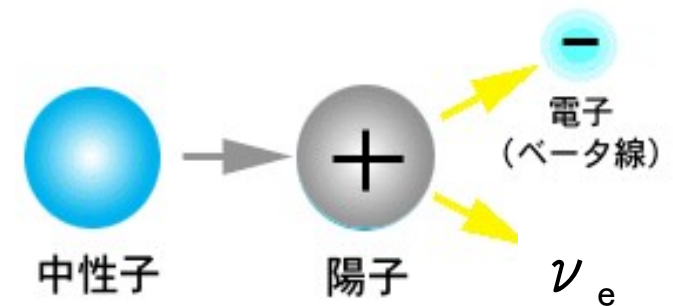


1962 Lederman/Schwartz/Steinberger

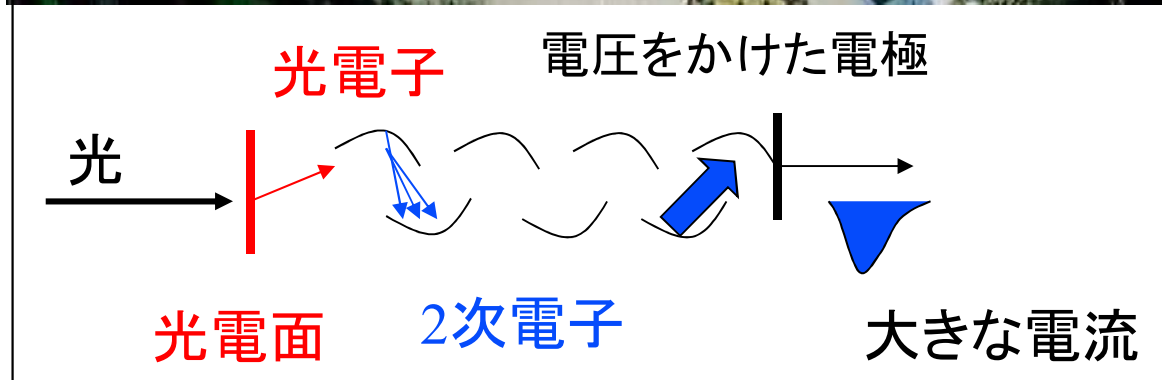
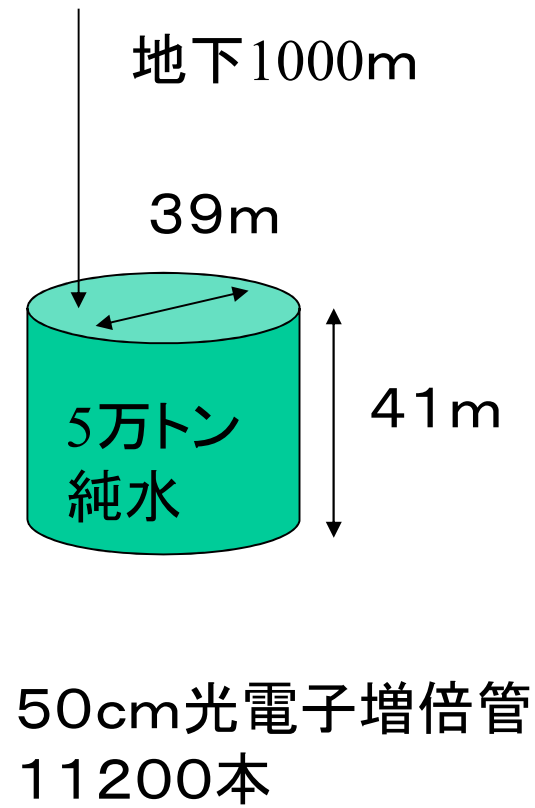
μ 粒子には ν_μ が結合

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

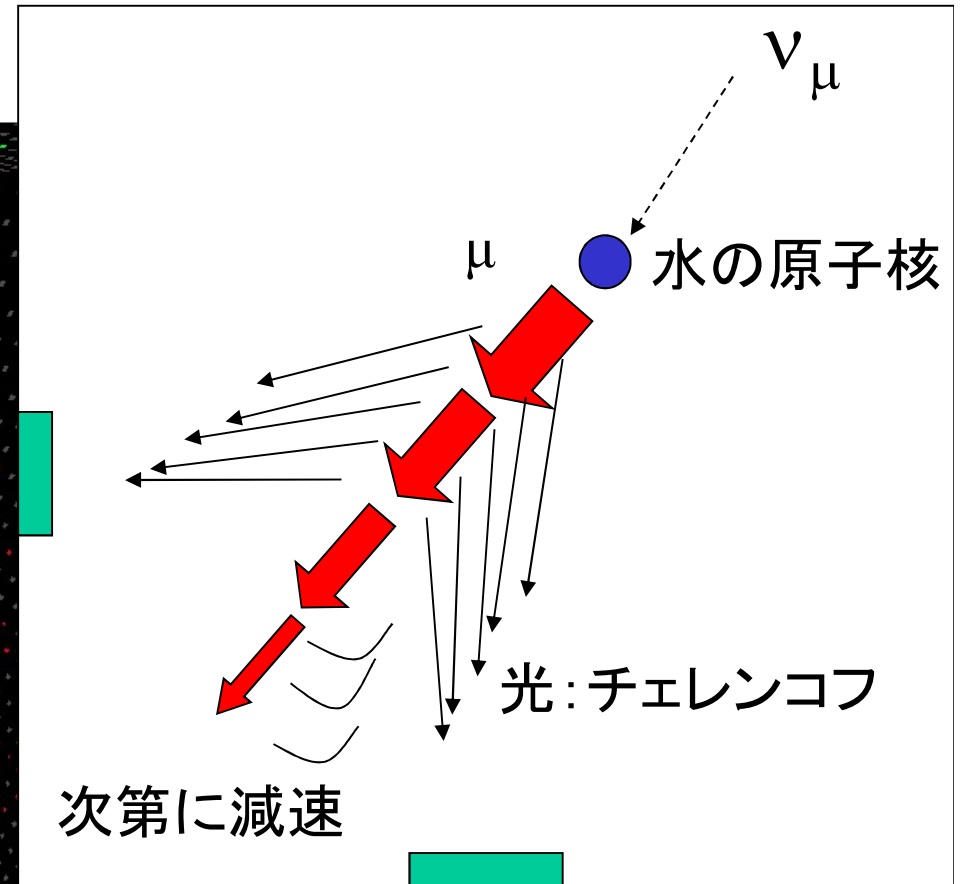
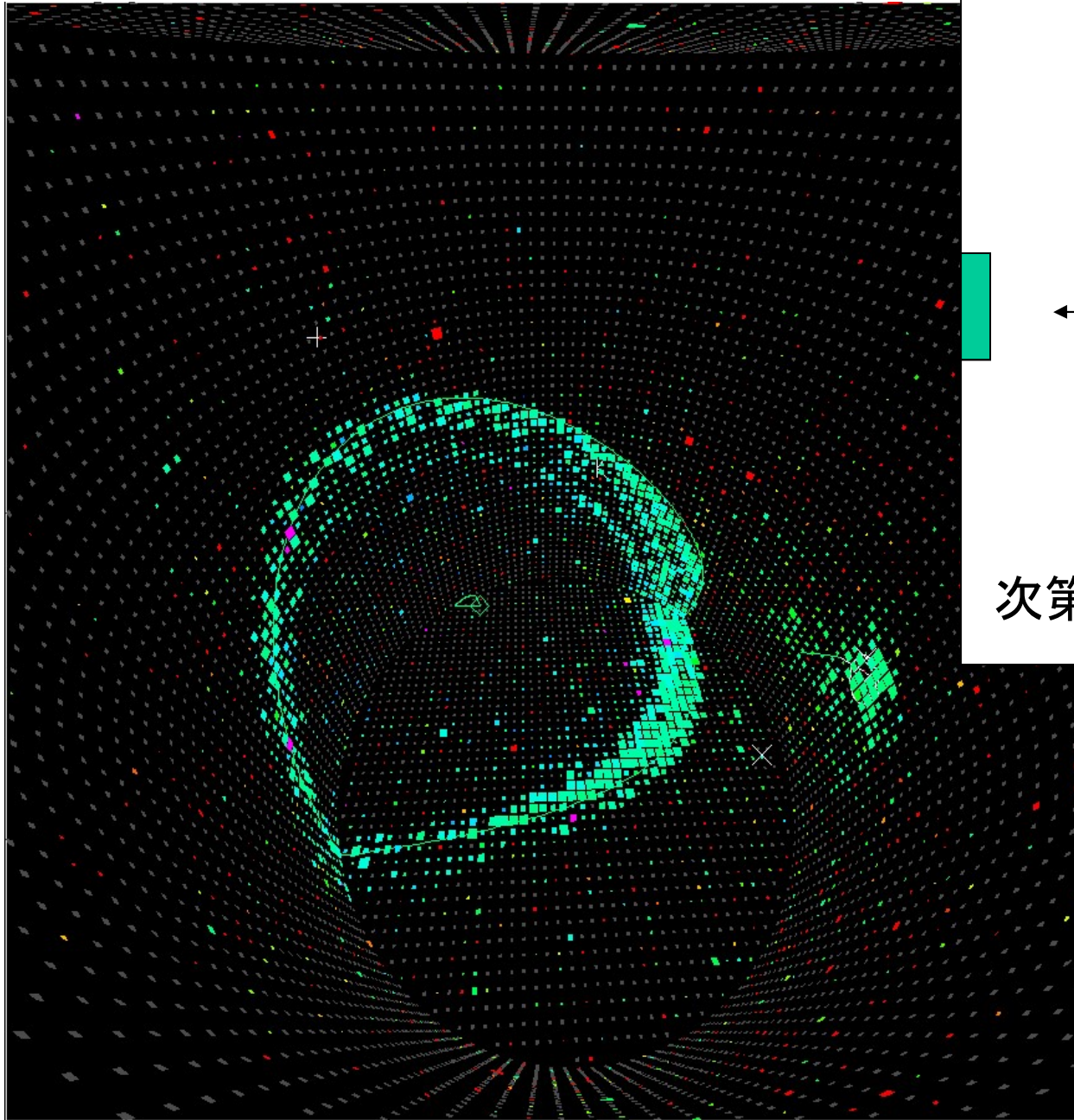
- ・ たくさんのニュートリノが必要
(大気、原子炉*¹、太陽、超新星*²、加速器、…)
- ・ 大きな検出器でより多くの反応を見る
- ・ 発生する粒子が電子か μ 粒子か (τ 粒子か) 判別する
原子炉*¹(1995年ノーベル賞 Reines)
超新星*²(2002年ノーベル賞 小柴)



SuperKamiokande



SuperKamiokande μ 粒子の信号

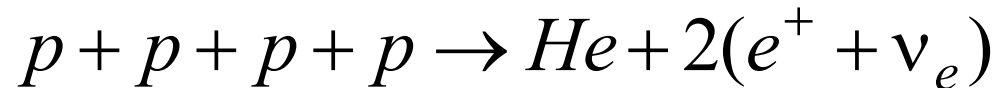


μ 粒子が水中での光速
($=c/1.3$)より速いと、前方
に指向性のある
チェレンコフ光が発生

ニュートリノに関する新事実(1):2003年に作ったPPT

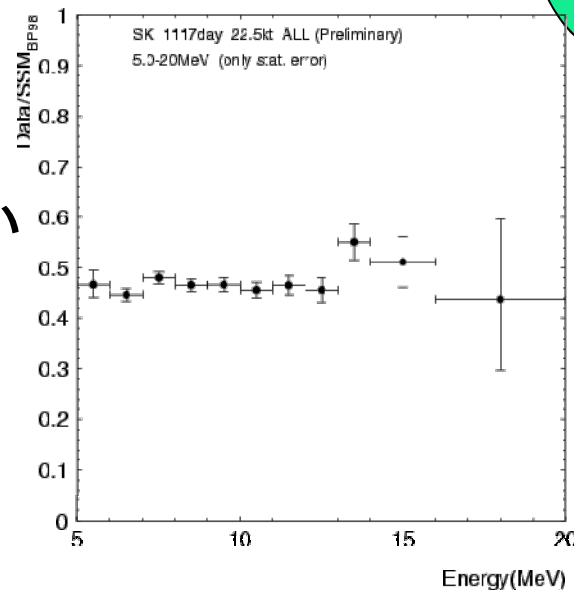
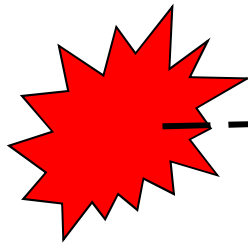
太陽ニュートリノ問題

太陽での核融合反応

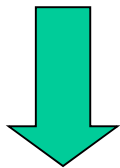


地表で1cm²あたり7×10¹⁰ 個/秒
のニュートリノ

1秒に約300兆個
が人体を貫く

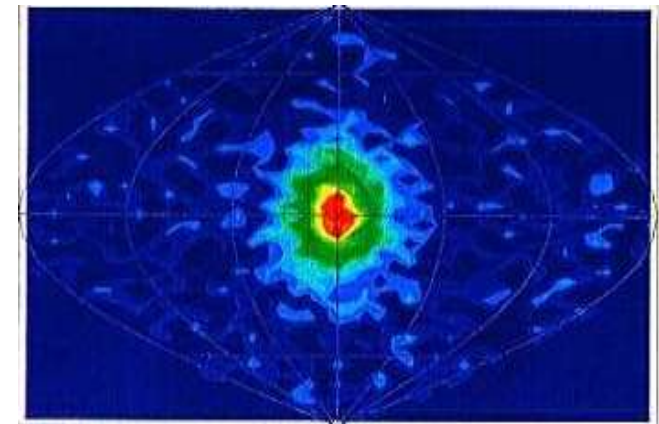


予想の約半分しかない



SuperKamiokandeは年間約1万個の
太陽ニュートリノを観測できる

観測したニュートリノによって太陽を観測



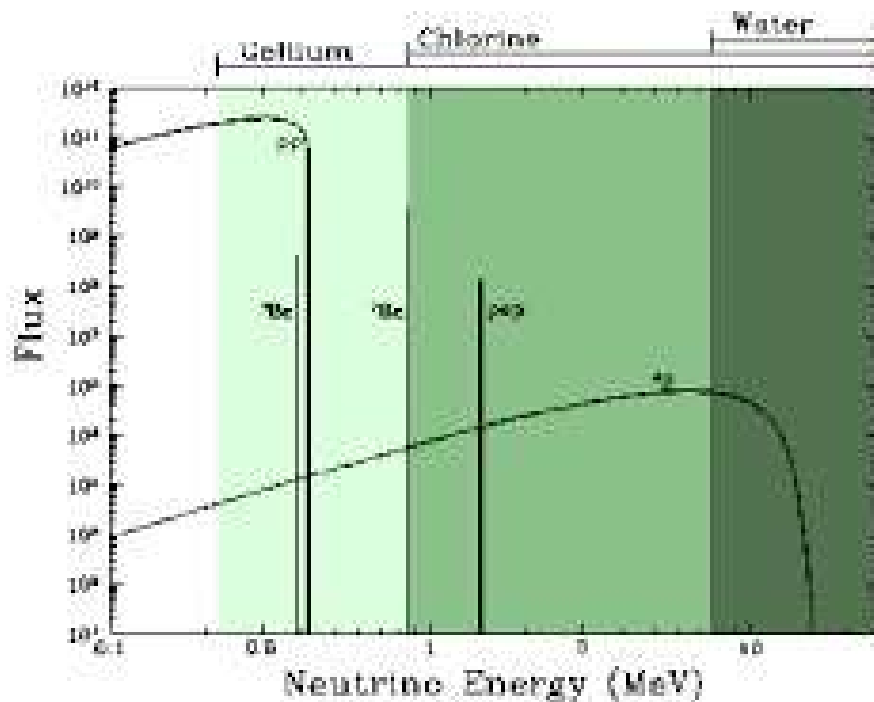
太陽モデルが違う？

電子ニュートリノが途中で**少なくなる**？

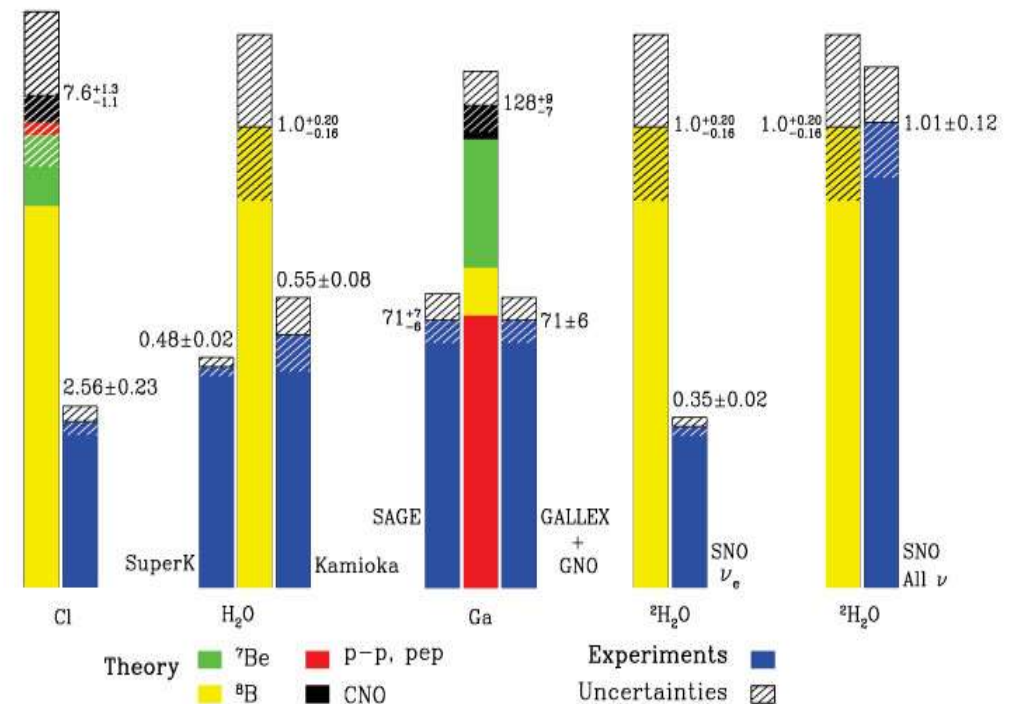
$$\nu_e \Rightarrow \nu_X$$

太陽ニュートリノ「問題」 追加資料

- 太陽からのニュートリノは様々なエネルギー
 - 観測装置によって測定する範囲が異なる
- どの測定でも電子ニュートリノの数は予想の約半分
(ν_μ 、 ν_τ にも感度がある測定SNOでは予想に近い)

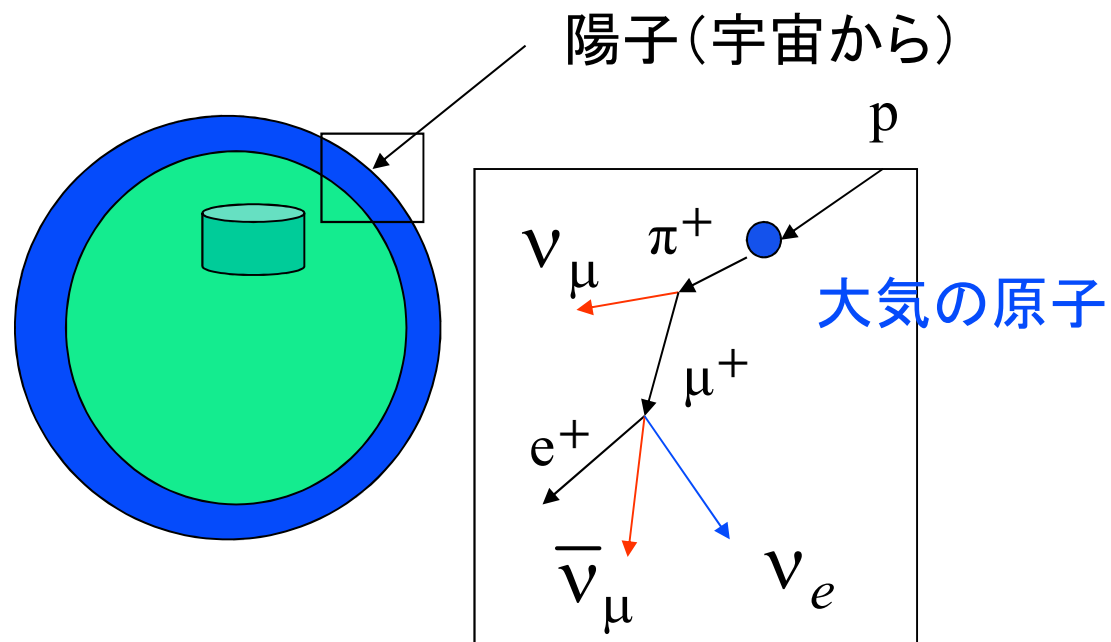


Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



ニュートリノに関する新事実(2)

2015年ノーベル賞のプロット

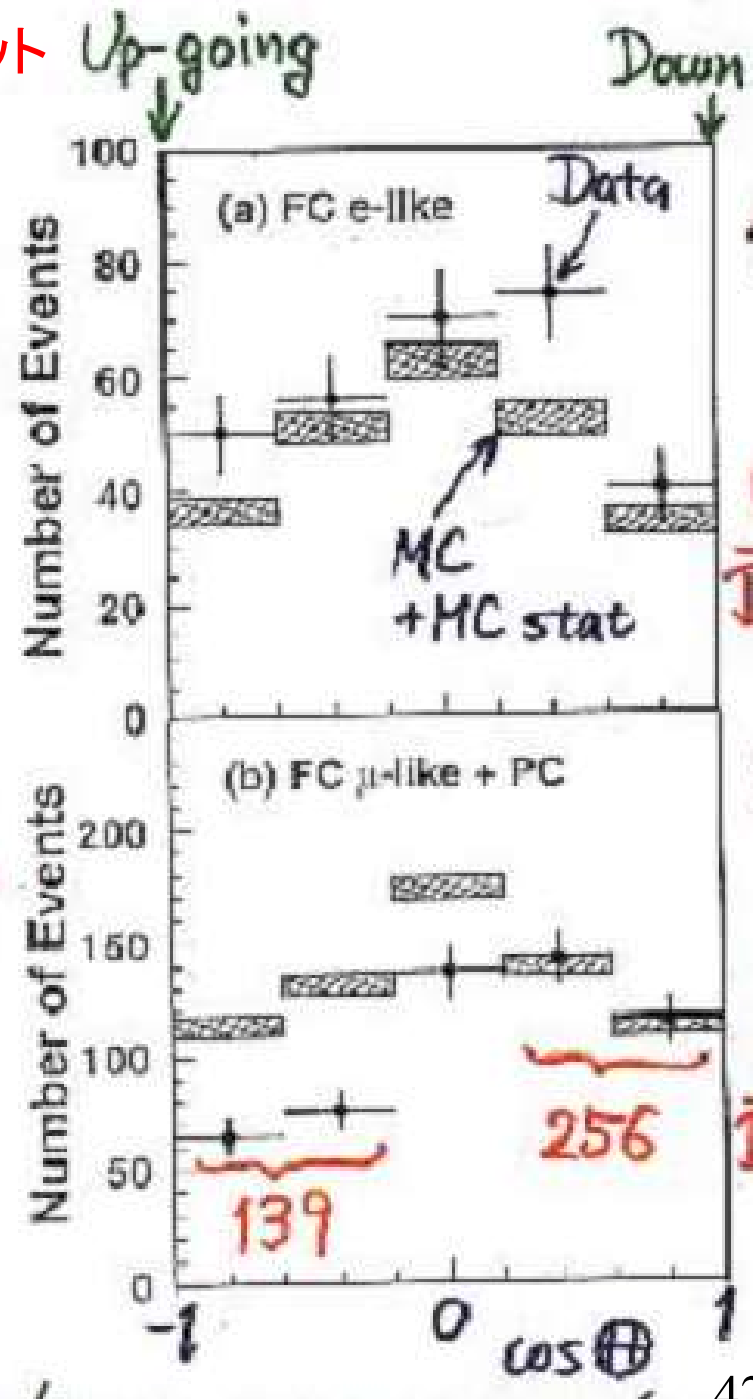


大気ニュートリノは $\frac{N\nu_{\mu}}{N\nu_e} \approx 2$

上から来るニュートリノは予想に近い

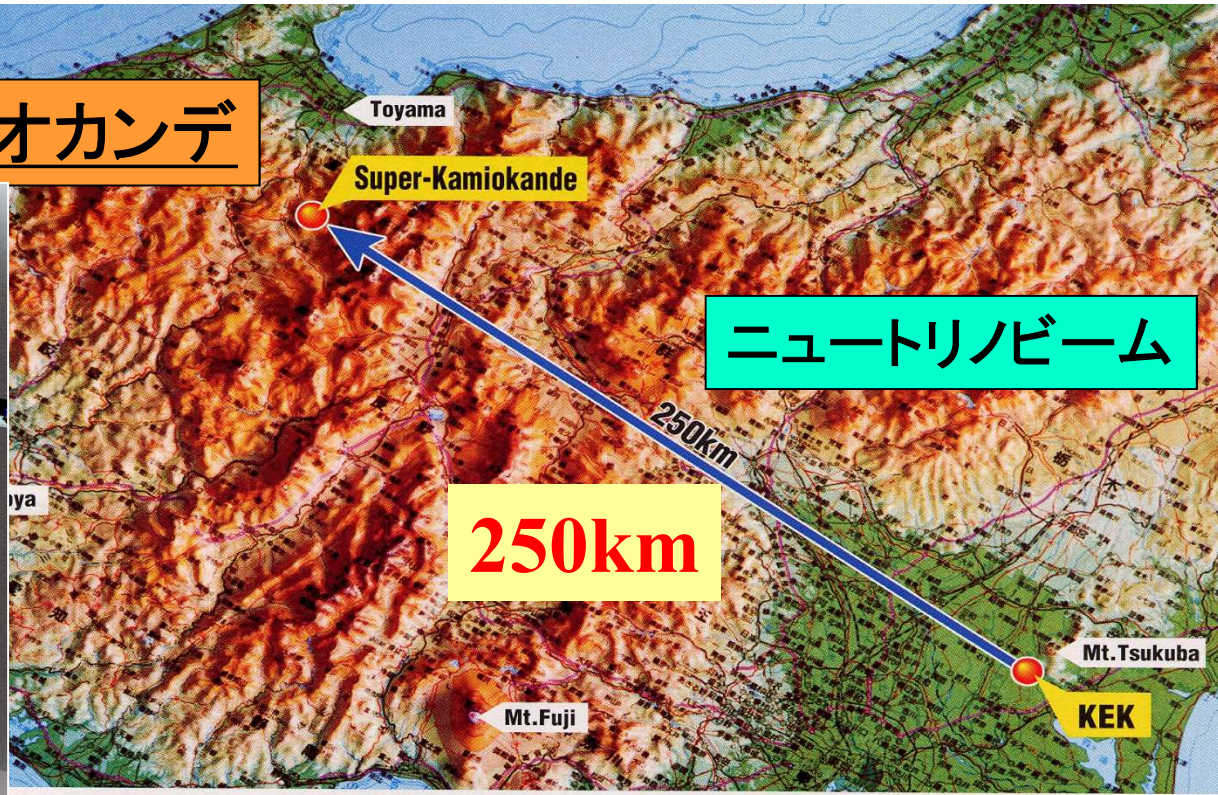
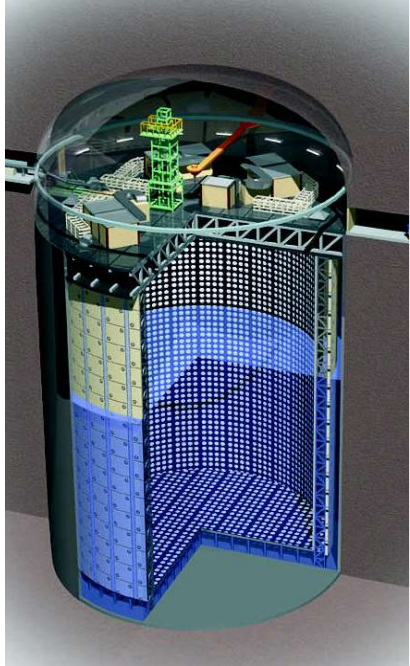
下から来るニュートリノは ν_{μ} が少ない

地球を貫通する間に別のタイプの
ニュートリノに変わっている



K2K実験 (*KEK* to *Kamioka*)

スーパーカミオカンデ



つくばのKEKから250km離れた
SuperKamiokandeに ν_μ を打ち込む

現在はJ-PARC(東海村)からT2K実験



ニュートリノの重さと振動

ド・ブロイ 「粒子は波としての性質をもつ」 物質波

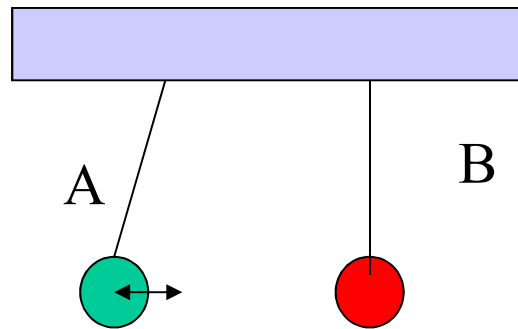
光(=波動)は、エネルギーが高いと粒子としての性質が現れる←光電効果
粒子は、エネルギーが高いと波としての性質が現れる

物質波のエネルギー～振動数: $E=h\nu$

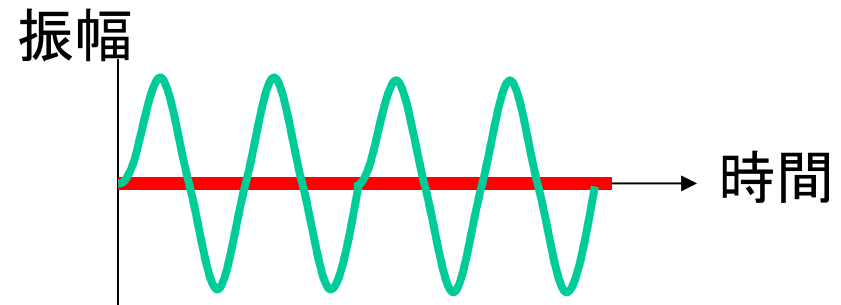
アインシュタインの質量-エネルギー関係式: $E=mc^2$

⇒ 物質波は、重さに比例した振動数で振動している

2種類のニュートリノが「無関係」だと

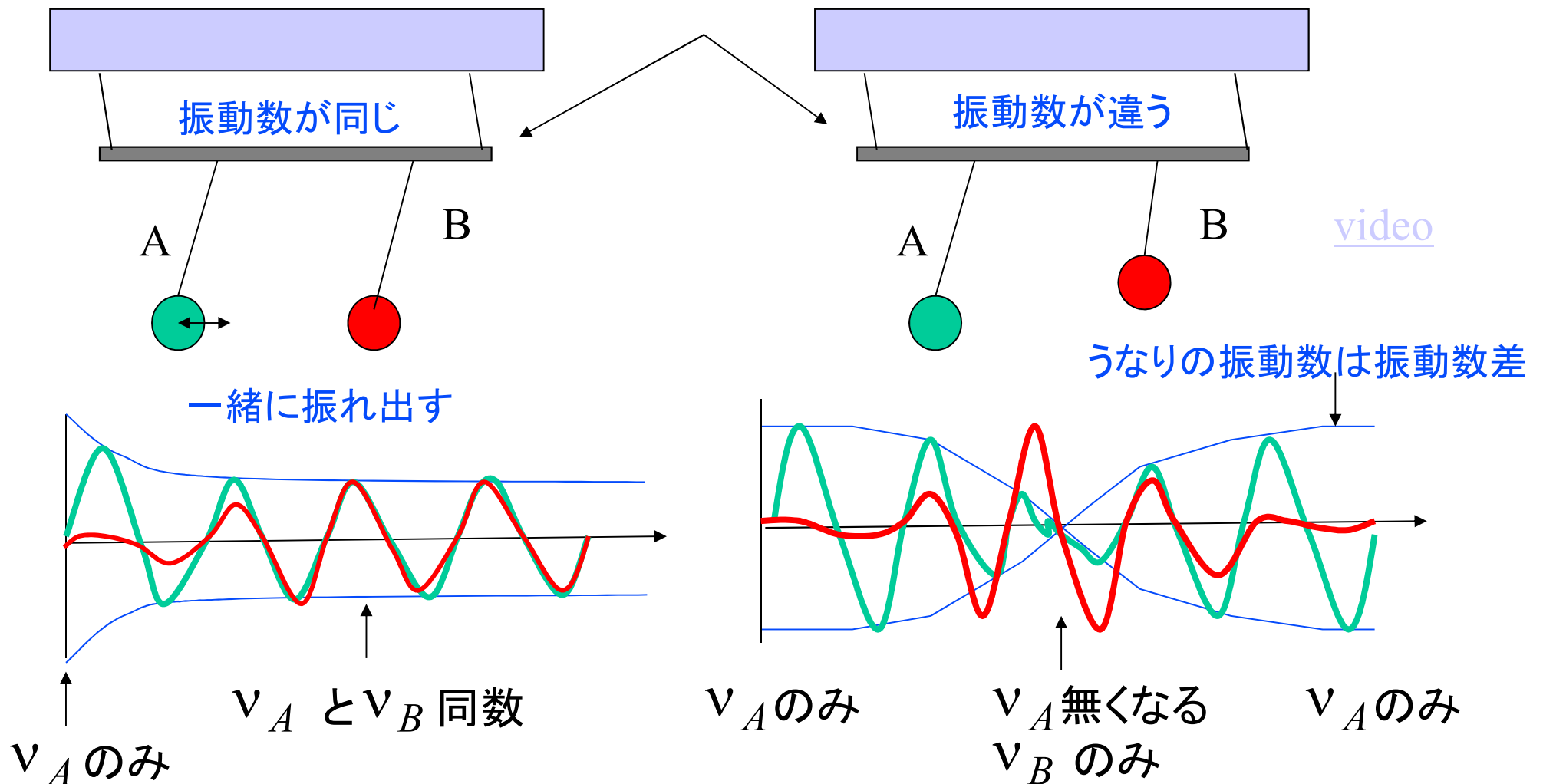


止まっている振り子Bに変化ない



ニュートリノの重さと振動

2種類のニュートリノが「関係ある」とAの振動がBに伝わる



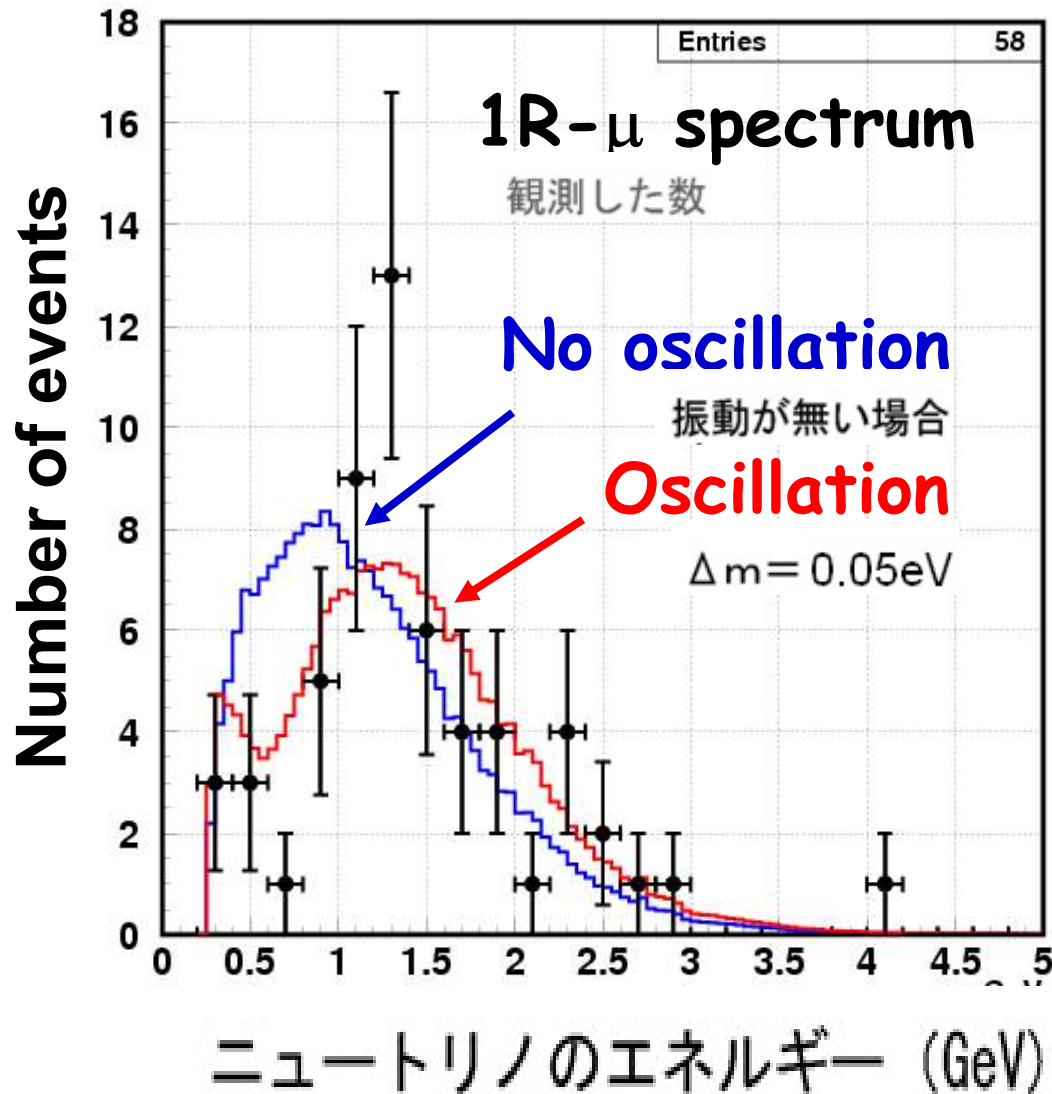
[video](#)

$$\nu_e = A\nu_A + B\nu_B +$$

ニュートリノ振動があると

- 2種類(以上)に関連があり、状態は混合する
- 質量差があるから、ニュートリノには質量がある

観測結果



データ量が少ないが、質量差
がありそう...

99.998%の確率で質量がある

質量があるとする

標準模型 ($m_\nu=0$ を仮定) の変更
クォーク間の質量関係との関連
は？

↓
T2K実験

現在はもっと正確に分かっている

重力波の検出

2017年ノーベル物理学賞



Rainer Weiss

Barry C.Barish

Kip S.Thorne

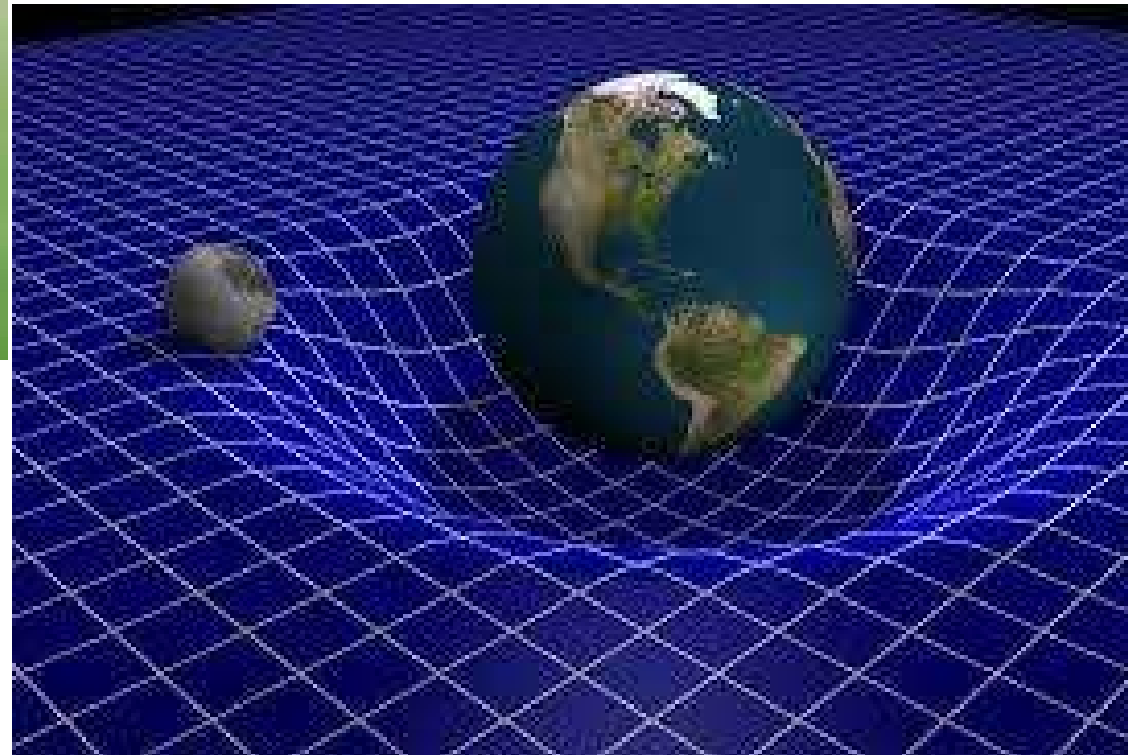
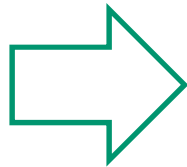
LIGO(Laser Interferometer Graviatatal-wave Observatory)実験への貢献

重力: NewtonからEinsteinへ



りんごへの重力＝惑星間引力＝万有引力
重力の大きさ F

なぜ働くか？
どのように力が伝わるか？
伝わる速さは？



一般相対性理論
(1916)

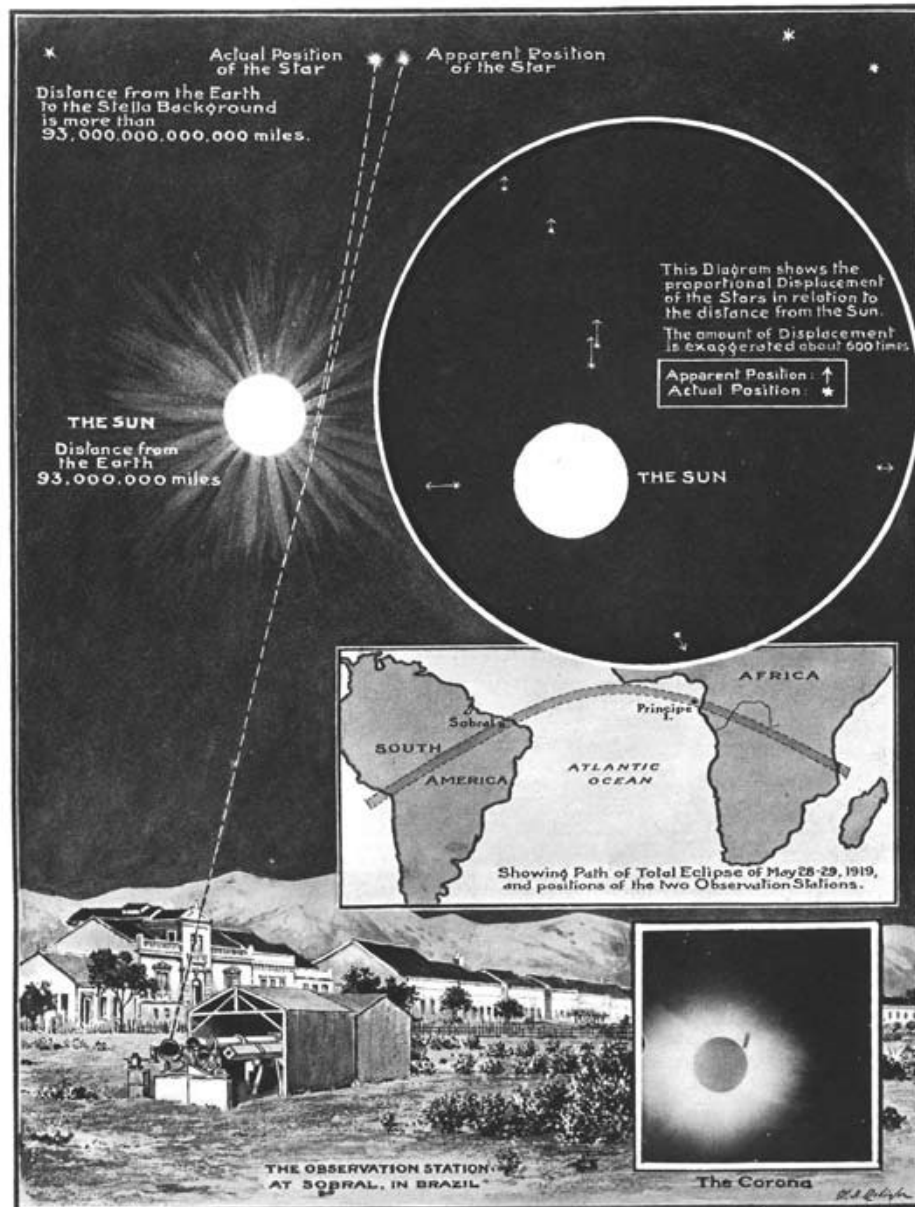
重さがあると空間がゆがむ
引力は空間のゆがみを感じるため生じる
空間のゆがみは光速で伝わる

一般相対論：実験的証拠

Illustrated London News (Nov.22,1919) 「光は直進する」？

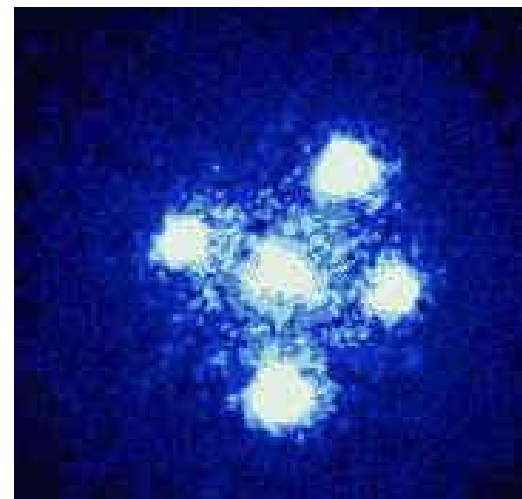
YES

ただし、空間の最短距離を進む
空間が曲がれば⇒光も曲がる



Eddington

太陽により星の位置がずれて
見えることを観測

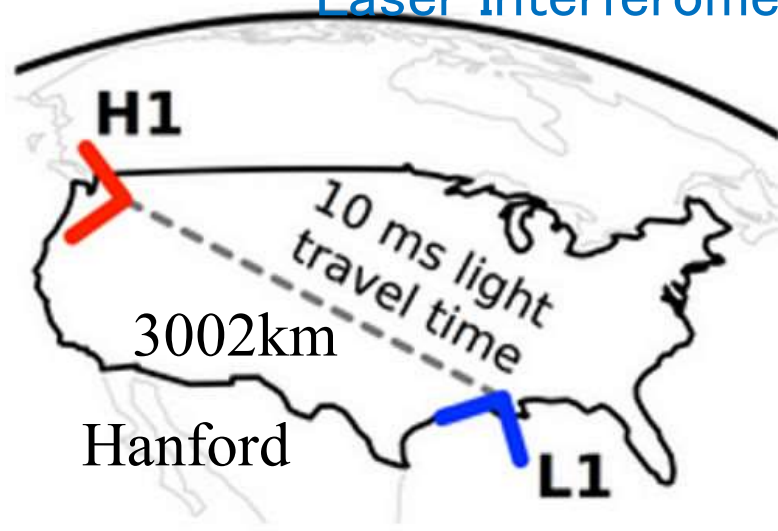


Einstein Cross
(1985 Hubble)

1つの準星が前
にある銀河により
4つの像に
(=重力レンズ)

LIGO

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



空間のゆがみ

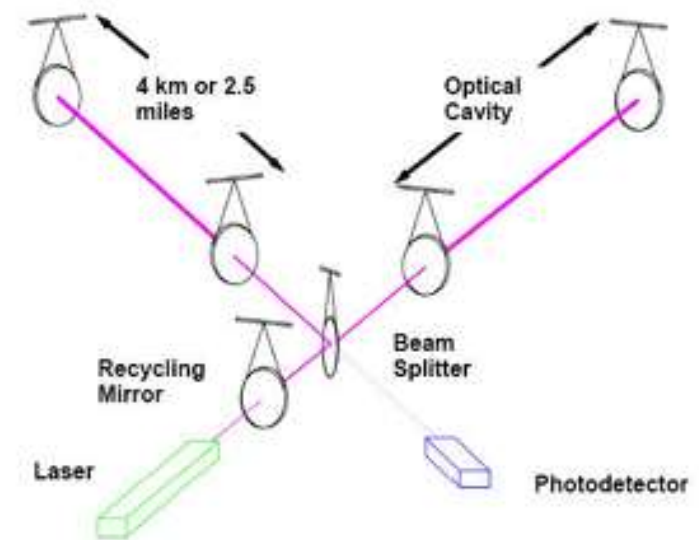
=レーザー光到達時間のずれ

=干渉パターンのずれ

離れた2か所で同時測定する

Livingstone

4kmのL字型レーザー干渉計



LIGO laser mirror

地面の振動をミラーに伝えない

4重振り子

重い振り子 (test mass 40kg:慣性の法則)

active damping

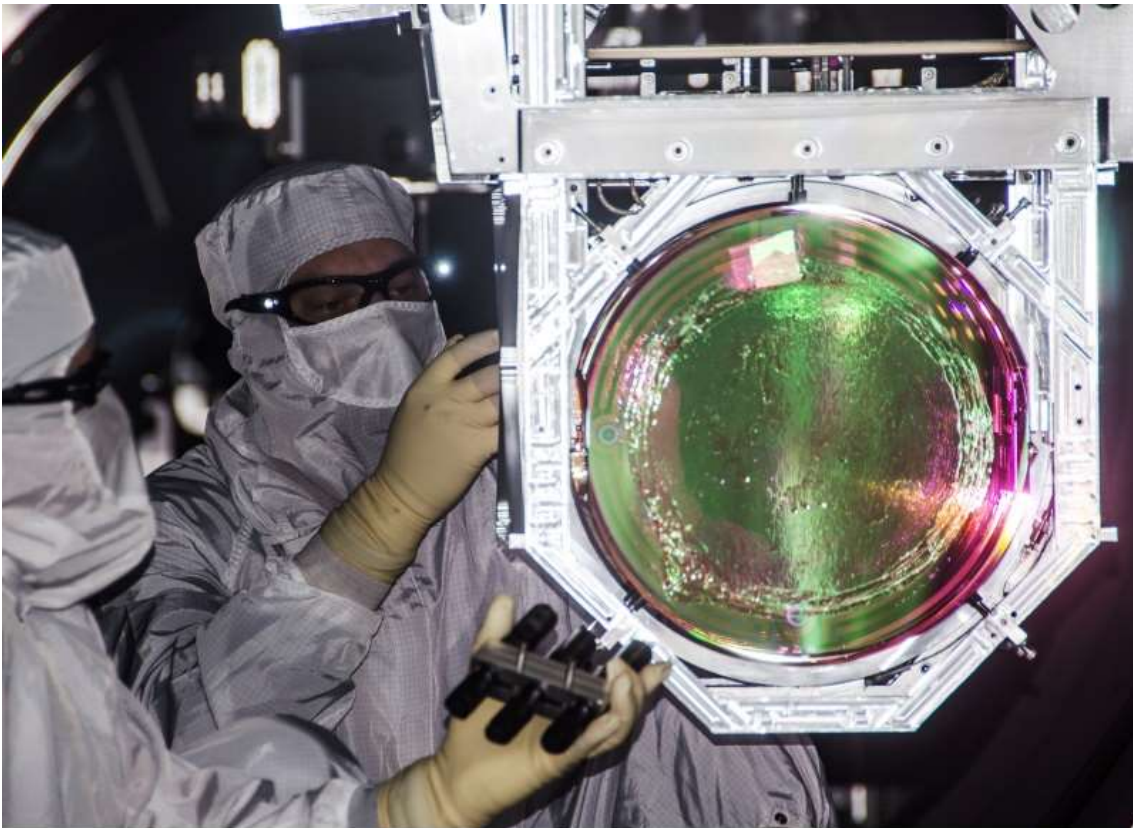
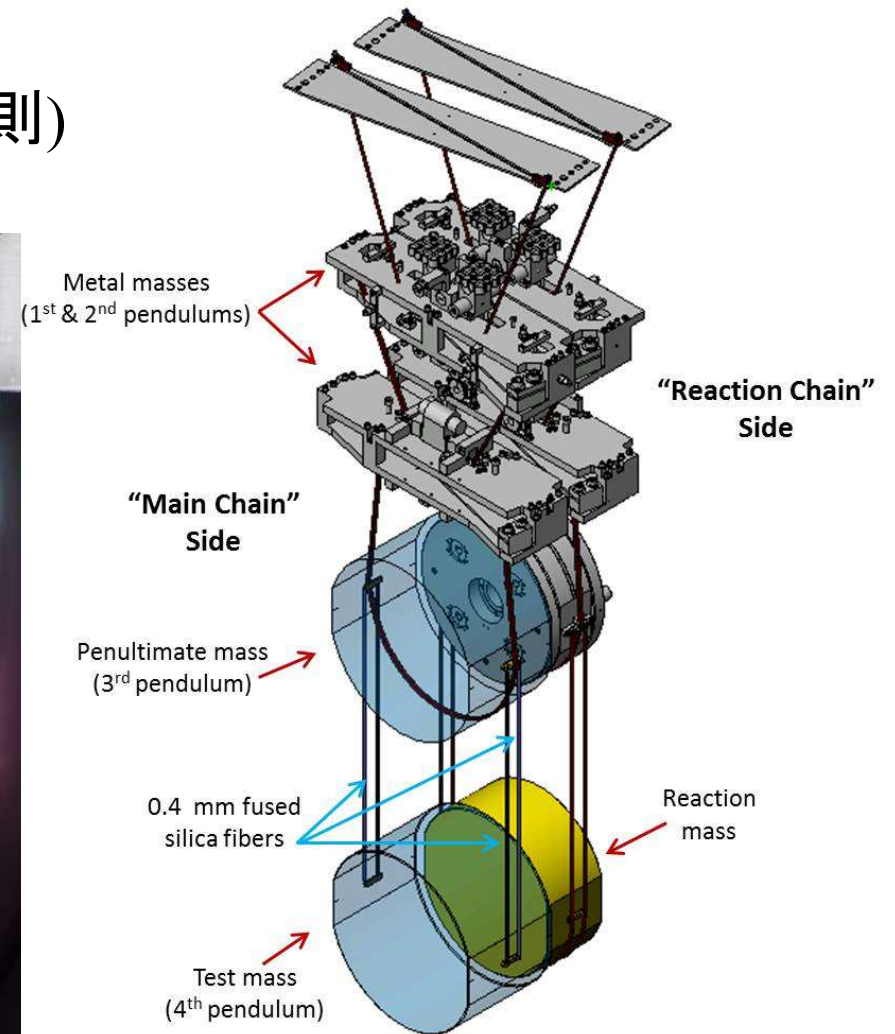
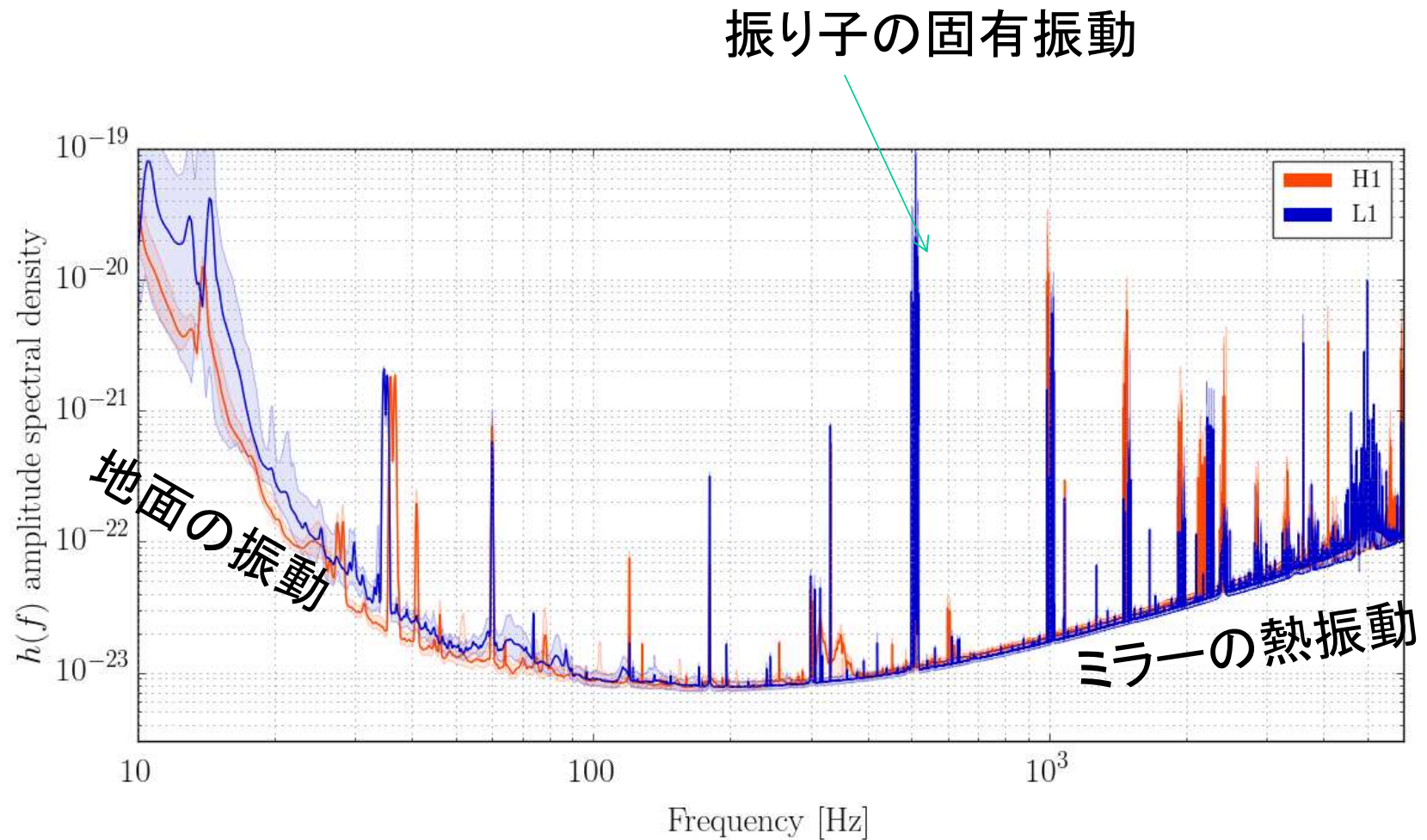


Image: LIGO



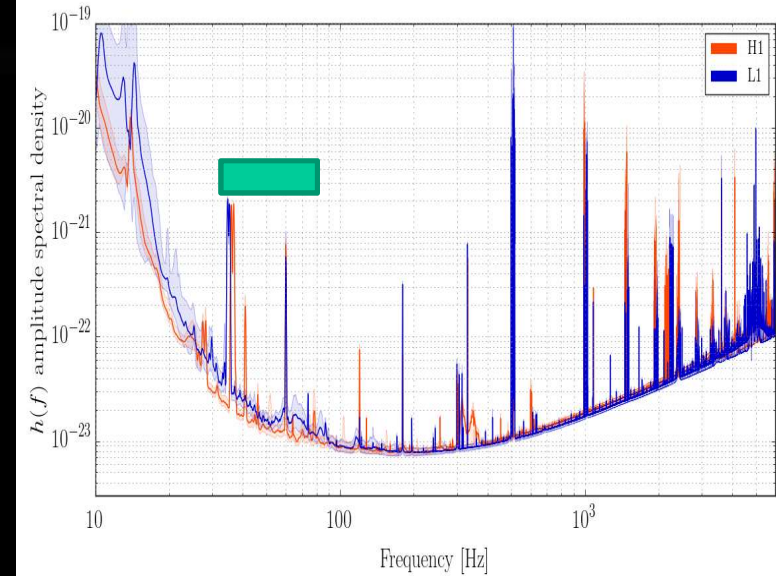
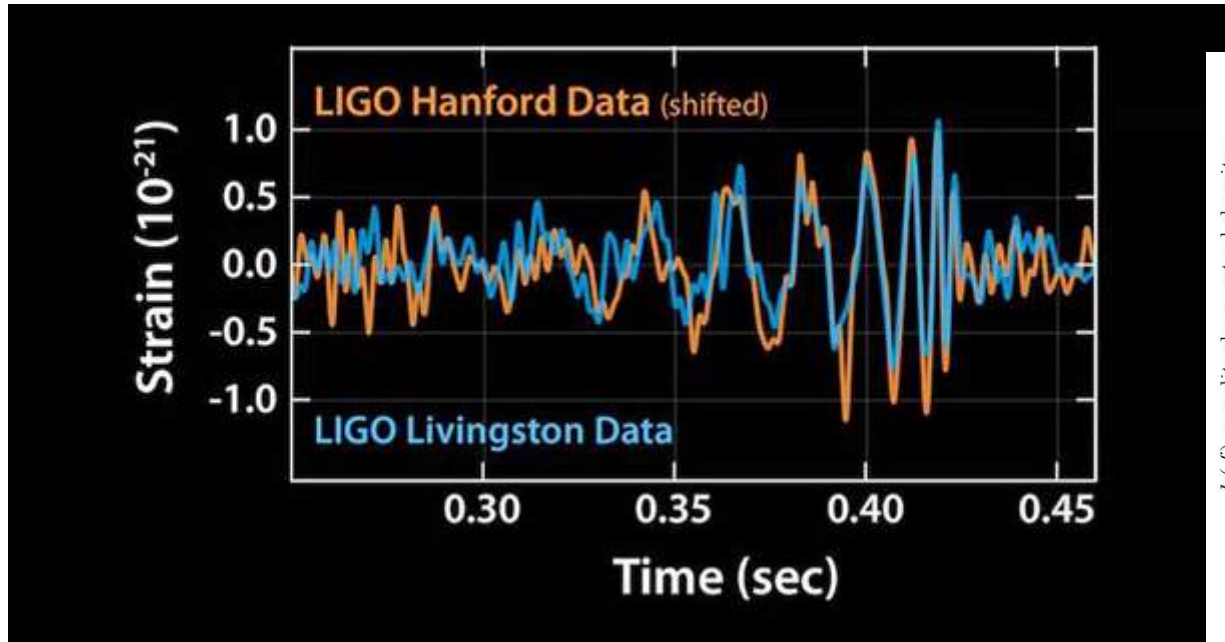
LIGO noise

10^{-23} : 水素原子核 (1 fm) / 10^8 m (=月までの距離/4)

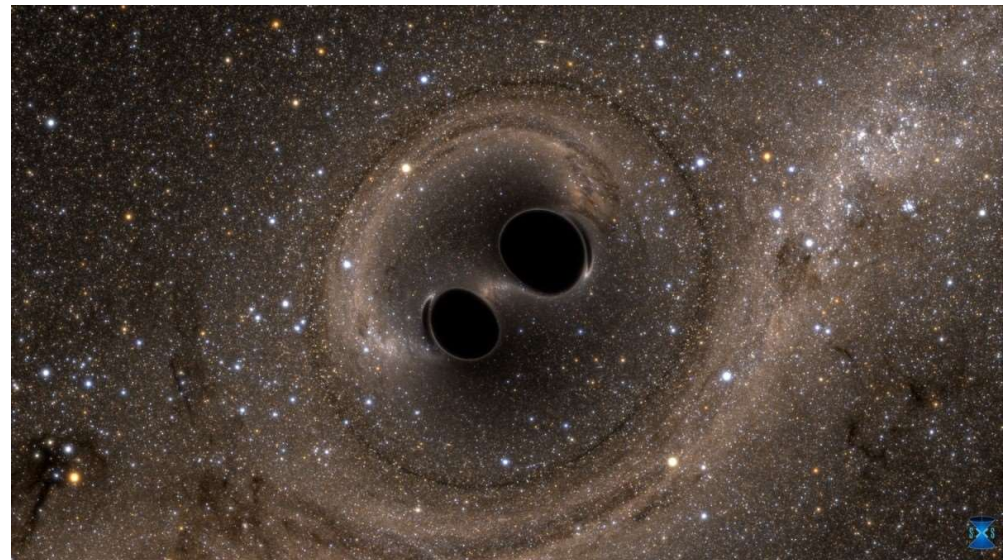


LIGO: 最初の信号

10^{-21} : 水素原子核 (1 fm) / 10^6 m (=地球直径の250倍) GW150914



シミュレーションとの比較により
2つのBH ($36, 29M_{\odot}$) が $62M_{\odot}$ へ
= GWのエネルギーは $3M_{\odot}$



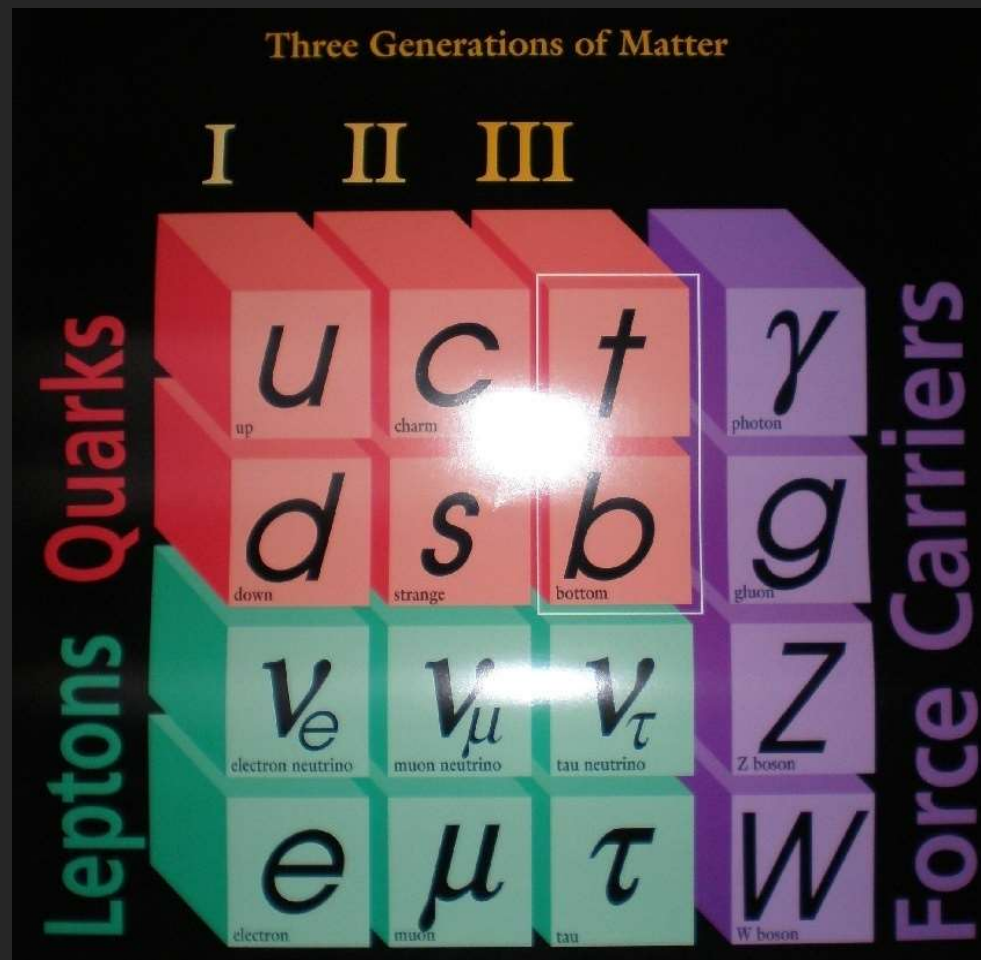
重力波検出のその後



	GW150914	GW151226	GW170104	GW170814	GW170817
LIGO	*	*	*	*	*
VIRGO	-	-	-	*	*
KAGRA	-	-	-	-	-

1226: 2つのBH ($14.8M_{\odot}$) が $21M_{\odot}$ へ @1.4億光年
 104: 2つのBH ($31.19M_{\odot}$) が $49M_{\odot}$ へ @2.9億光年
 814: 2つのBH ($30.25M_{\odot}$) が $53M_{\odot}$ へ @1.8億光年
 817: 中性子連星が $2.8M_{\odot}$ へ @Fermi/INTEGRAL

クォークとレプトン+ゲージ粒子



すべてが実験で確認

ヒッグスを理解
するキーポイント

ものを作る素粒子

力を伝える素粒子

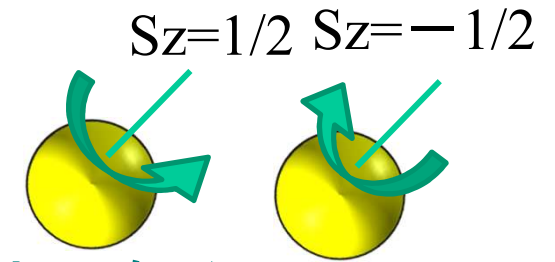
標準模型の粒子の種類

ものを構成する粒子($s=1/2$)

力を伝える粒子($s=1$)

重さを与える粒子($s=0$)

スピンについて



- ・ スピンは素粒子が持っている(量子)数
スピンの性質は良く分かっているが、スピンとは何か？

観測されている素粒子とそのスピン状態

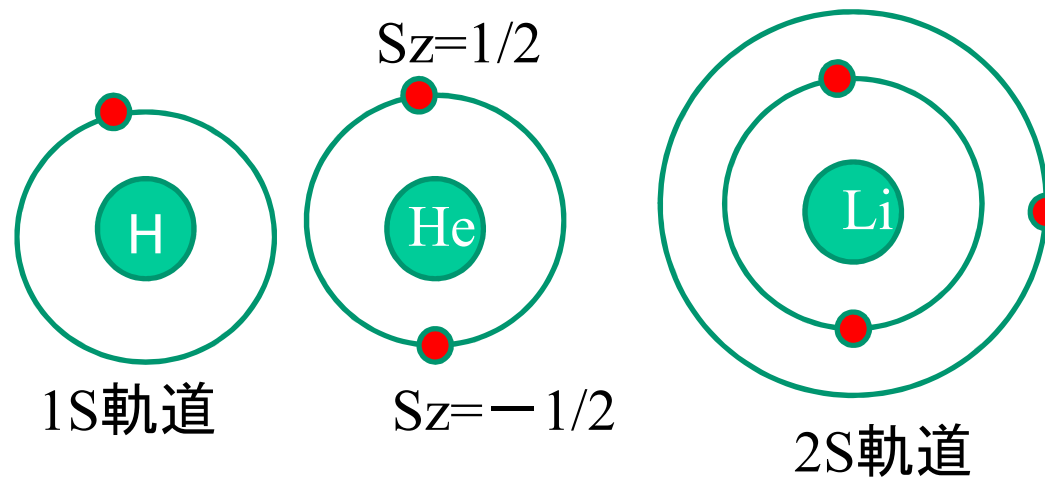
$s=1/2$ フェルミ粒子 (fermion) クォークとレプトン ←物質を作る粒子

$s=1$ ボーズ粒子 (boson) 光子、グルーオン、W/Z ←力を伝える粒子

$s=0$ ボーズ粒子 (higgs) ←真空と同じ量子数



パウリの排他原理 「同じ量子状態にフェルミ粒子は1つのみ存在可能」

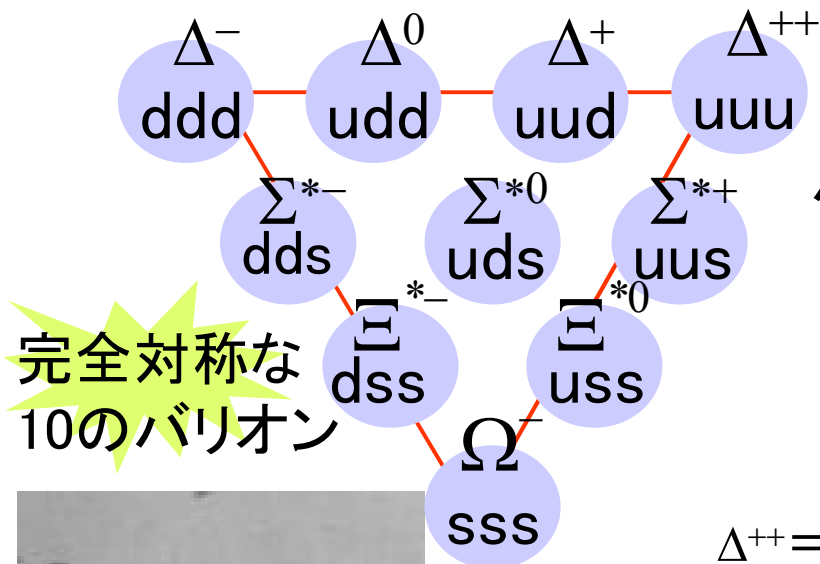


パウリの排他則により、原子の大きさが決まる

クォークの別の自由度(=色)

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)

→ 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)



$\Delta^{++} = \underline{u \uparrow u \uparrow u \uparrow}$ 実験データより Δ^{++} のスピンは3/2

バリオンの量子数 =
(クォークの香り)(スピン)(軌道角運動量)

完全対称 = 入換えに対して対称

別の自由度がある(=色 Gell-mann)

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

波動関数は反対称

南部: 観測される粒子は無色($qqq, q\bar{q}$)である

↔ 強い力は短距離力



クォークの色と閉じ込め

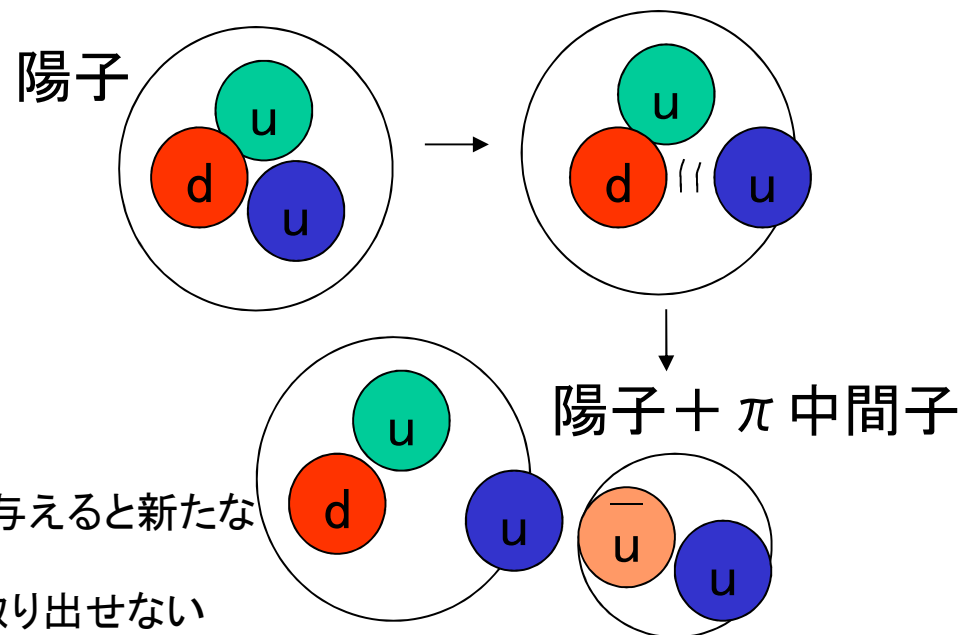
半端な電荷の粒子は見つかっていないことは(色)
によるクォークの閉じ込めで説明

ハドロン qqq (3原色)

メソン $q\bar{q}$ (補色)

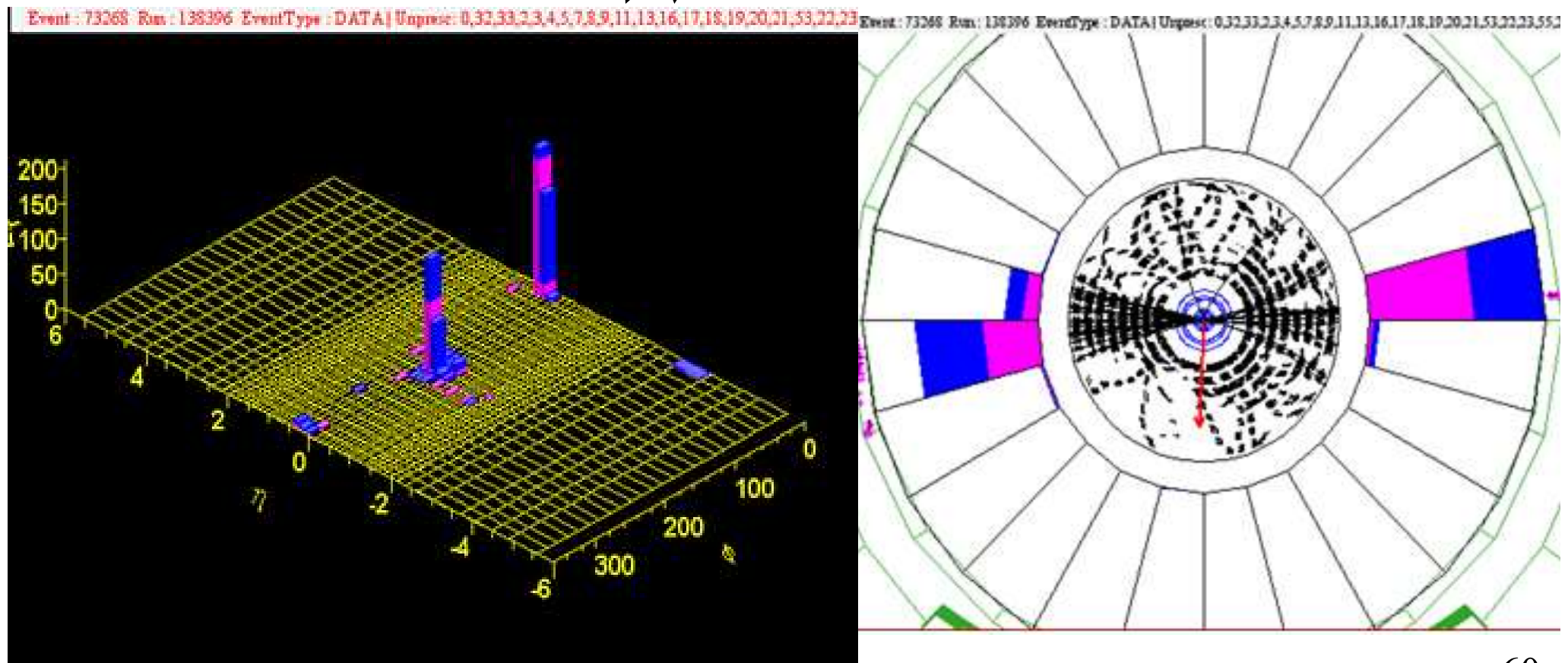
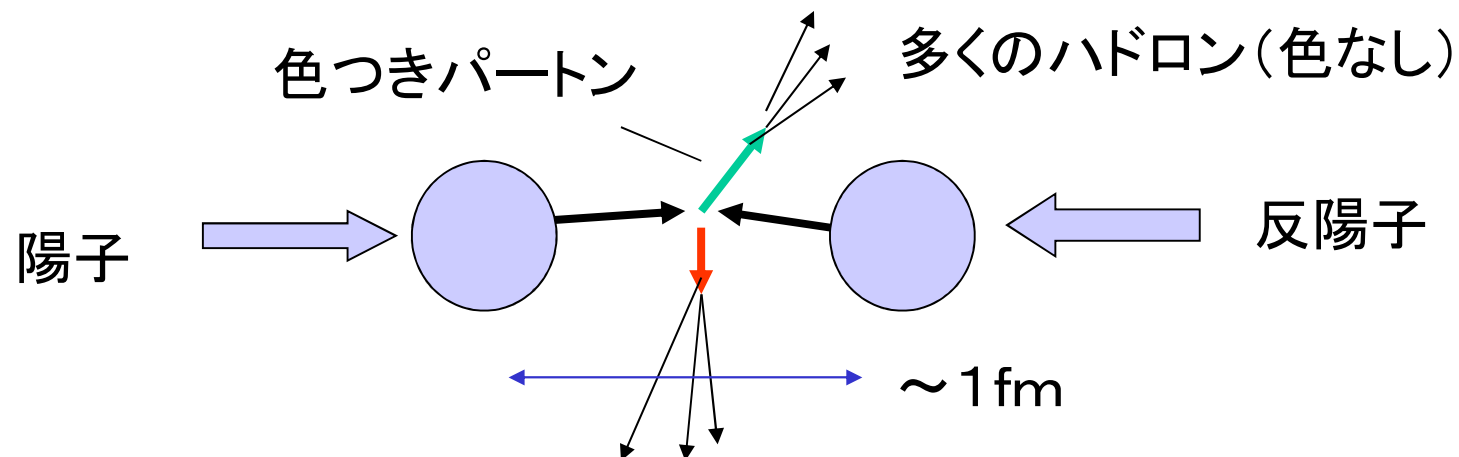


強い力が及ぶのは1fm程度(原子核内)
それを越えると、色つきの状態にならないよう
に粒子ができる。
＝核の外ではいつも無色:クォークは有色な
ので、単独では観測されない



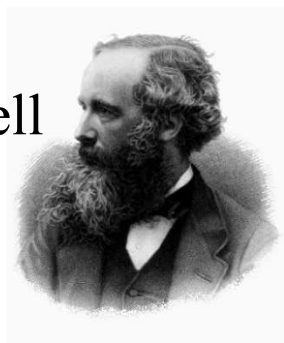
高いエネルギーを与えると新たな
粒子を作る
単独でクォークを取り出せない

カラー閉じ込めによるジェットが発生



力の統一 —電弱相互作用の登場—

1864:Maxwell



1919~1937:陽子・中間子

強い力

電気力

磁気力

電磁気力

電弱力

弱い力

1911~1931: β 崩壊・フェルミ理論

1687:Newton



地上の重力

重力=万有引力

天体間の引力



1979

1984

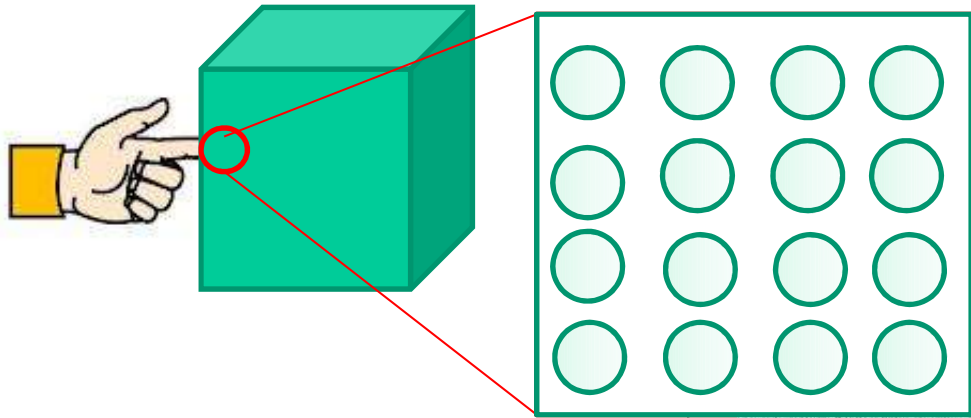
陽子崩壊？
XYボゾン？

統一場理論
超弦理論？
重力子？

力(相互作用)とは？

作用: 指で押す⇔脳が指令する、電気信号が筋肉で発生

反作用: 指が押し返される

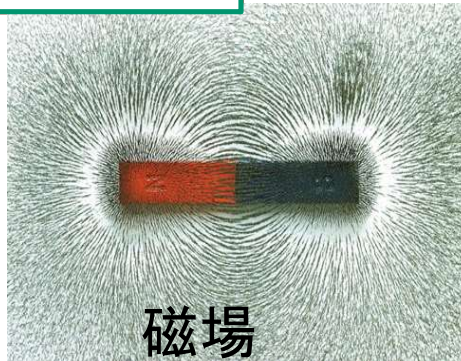


原子の位置がずれされたために、
元に戻ろうとする: 電気の反発

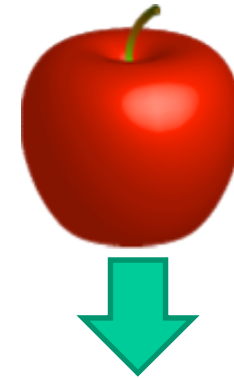
電場や磁場とは何か？

「光の粒(光子)が発生する能力
が高いところ」←量子の考え方

(量子力学)



磁場



重力場

(地球という重いものがあるため)

日常見られる力: 「電磁気力」と「重力」

量子の世界: +「強い力」「弱い力」



$$F = G \frac{mM}{r^2} = ma = Ma'$$

(Galilei, Newton)

物があれば力は「ある」

力を考える＝**場を理解**する
(qは結合定数)
(場⇔**力**)はなぜあるか
「量子場」

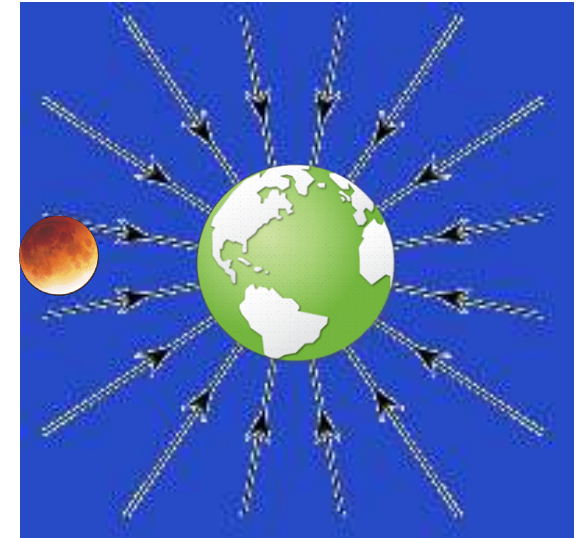
近接作用

vs 遠隔作用

「場」と力

$$F = qE$$

「場」



(Newton, Laplace)

- **場のある空間のどこでも 力の方向と大きさが与えられる**
- 空間を力が伝わる＝遠隔作用/近接作用？

「場」はエネルギーや運動量をもつ実体
ex 電磁波(Hertz)

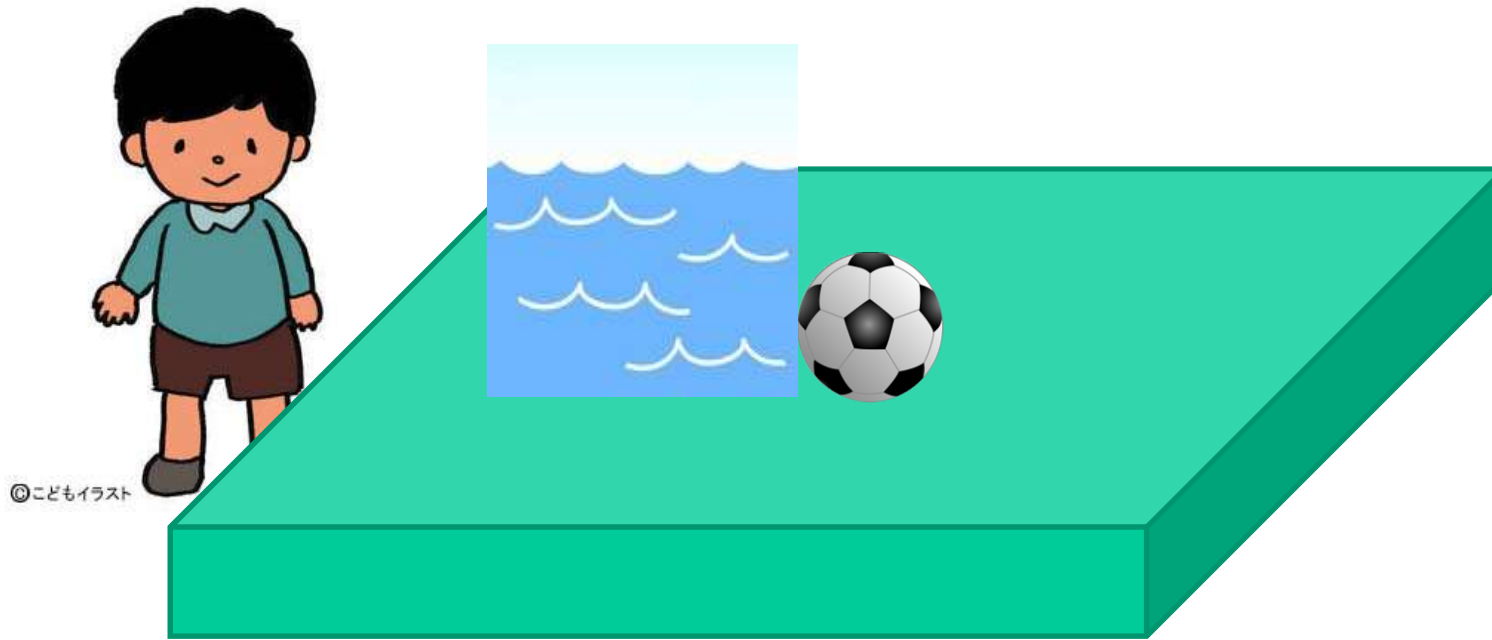


「古典場」

電磁場(Maxwell 1864)

相対論的重力場(Einstein 1916)

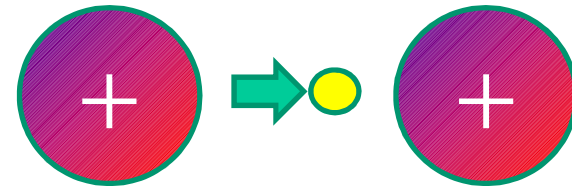
素粒子 が力を伝える



ミクロ(量子力学)の世界では、粒子も波動もおなじ??

力を伝える粒子は、「ゲージ原理」により生み出される素粒子
＝ゲージ粒子

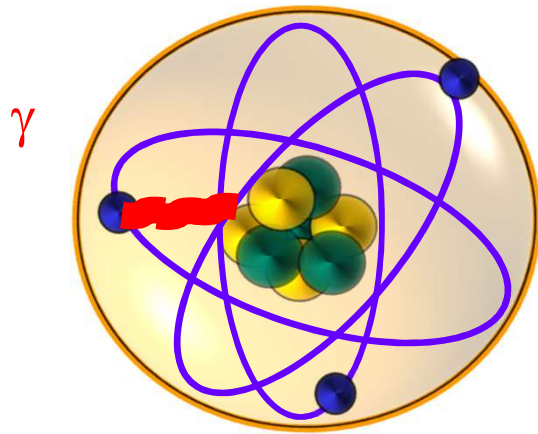
電磁気力は、**光子**のやりとりで作用する



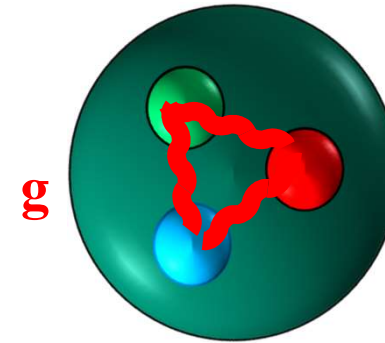
重力は、**重力子**のやりとりで作用する

↑ただし、発見されていないし、量子論での計算もできていない。

素粒子が力を伝える

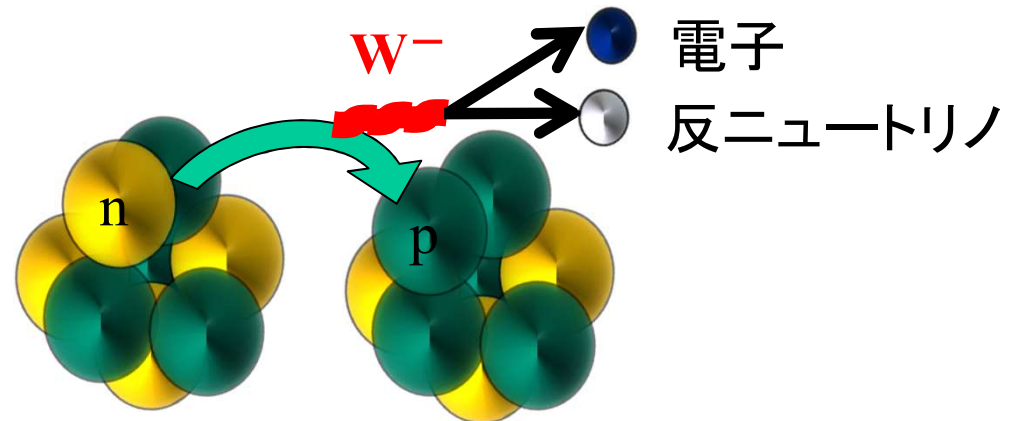


光の交換で電子は原子核に束縛される: 電磁相互作用



グルーオンの交換でクォークは核内に束縛される: 強い作用

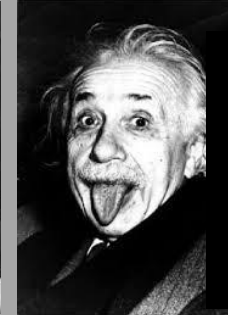
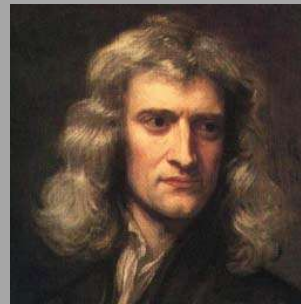
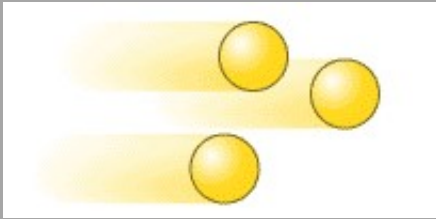
W 粒子の交換で β 崩壊が起こる
(例 ${}_{40}\text{Sr} \rightarrow {}_{39}\text{Y} + e + \bar{\nu}$): 弱い相互作用
他に中性の Z 粒子もある



光は粒子なの？

ニュートン、プランク、アインシュタイン

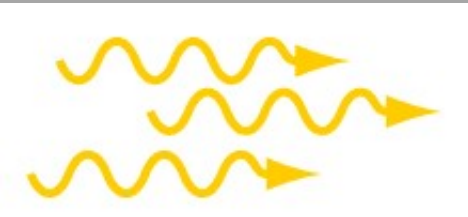
粒子？



「光こそ、私にとっては最大の問題でした。光の正体は、まったく謎めているのです。」

ホイヘンス、ヤング、フレネル、マックスウェル、ヘルツ

波？



ドブロイ
(粒子も波動)

ハイゼンベルグ
(不確定原理)

ボーア
(原子模型)

その他？？？



光-電磁気力を伝える粒子

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」が観測されないから

⇒ 光は粒子

光は粒子か波動か？

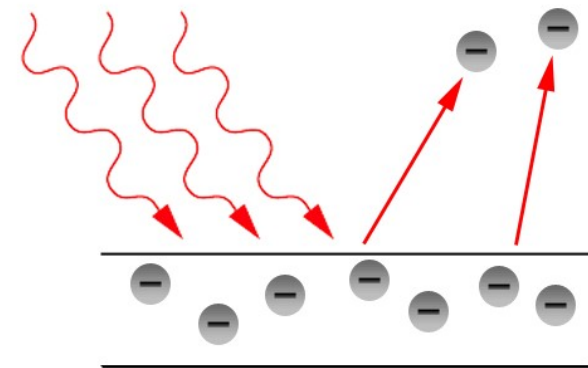
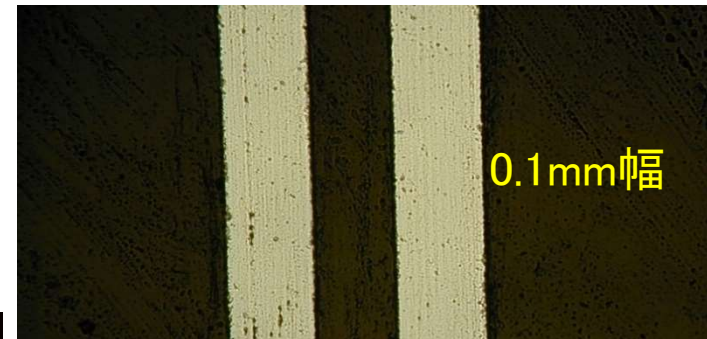
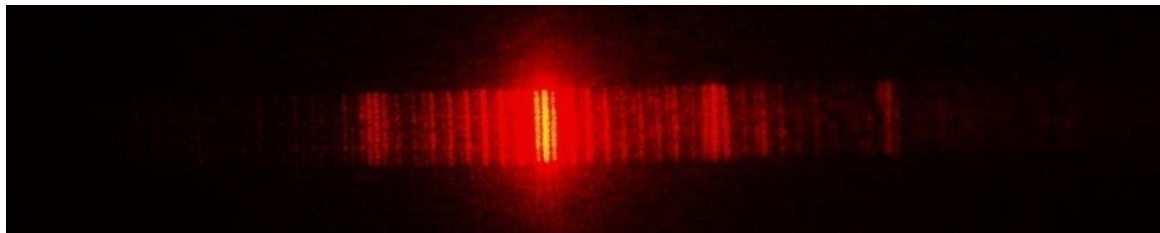
ミクロの世界では両方の性質をもつ

⇒ 波と粒子の区別はない

19世紀初頭：ヤングやフレネルの実験

1888：ヘルツ「電磁波*は光である」

⇒ 光は波

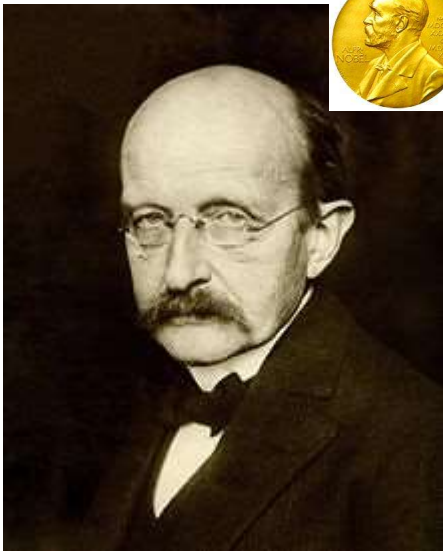


1900：プランク定数（光のエネルギーの量子性）

1905：アインシュタイン「光は粒子の性質をもつ」
（光電効果）

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

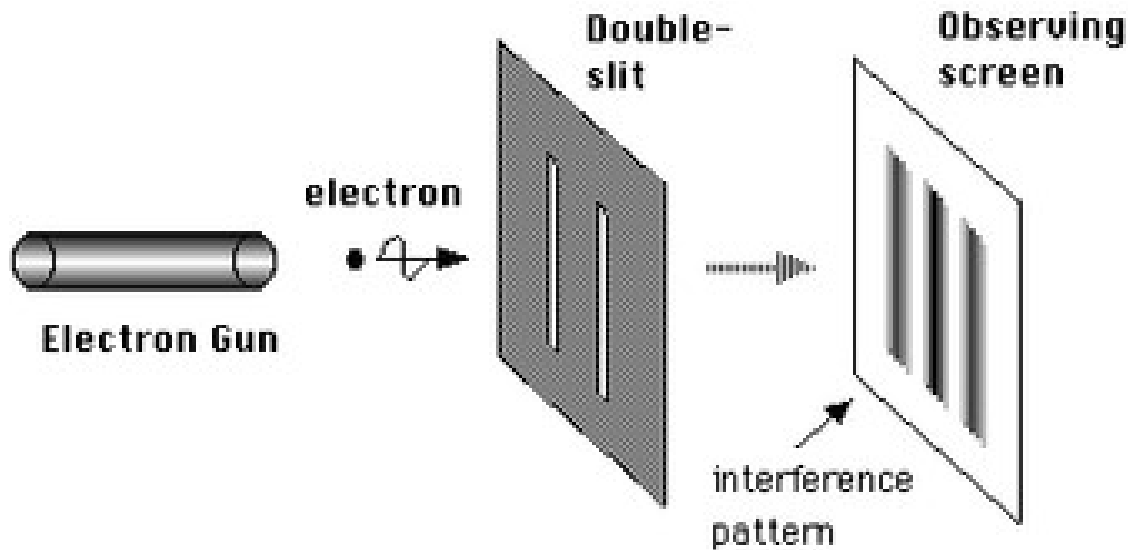
ところで電子も波でもある



光には粒子の性質がある
1900 プランク 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



1個の電子も干渉する
1989 外村

素粒子の標準模型

— 力を伝える粒子 —

力を伝える粒子:

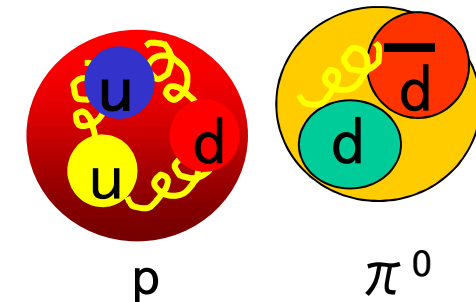
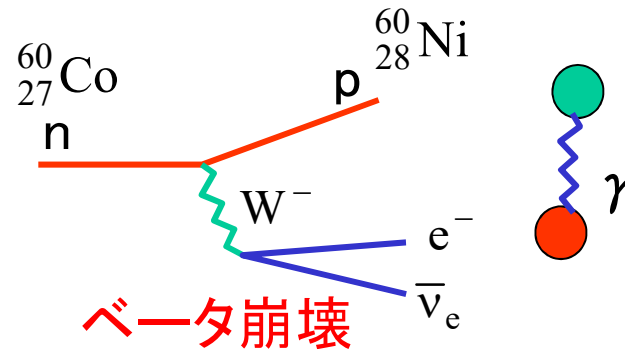
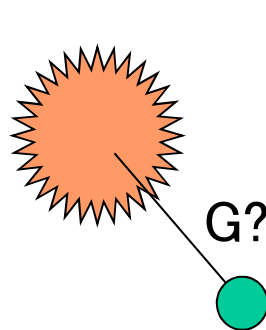
4種類の相互作用それぞれに

(グルーオン、光子、ウィークボゾン、グラビトン?)

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

3 + 1 個の粒子

8 個の粒子



クォークを結合

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	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



3つの力

電弱相互作用 - ウィークボゾンW/Z

電磁相互作用は光子により媒介

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

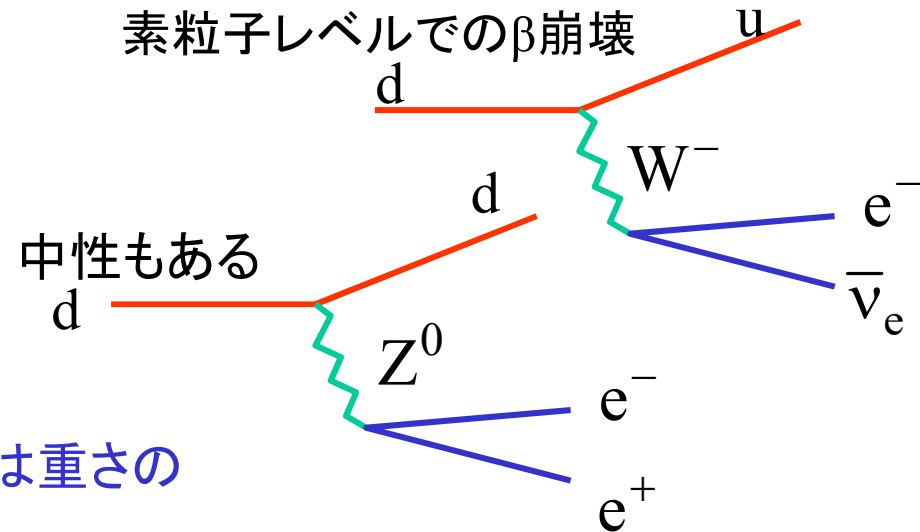
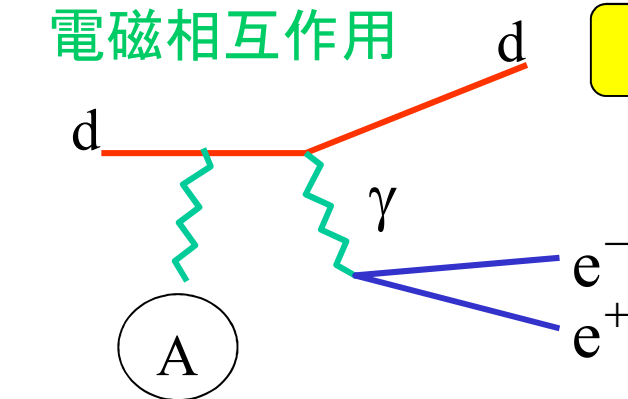
弱い相互作用

電磁相互作用

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

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

素粒子レベルでのβ崩壊



弱い力

$$V(r) \approx \frac{e^{-(Mc/\hbar)r}}{r}$$

短距離力: 弱い力は重さのある粒子で媒介

電磁気力 $\frac{1}{r}$

10^{-18} m

← エネルギー

距離 →

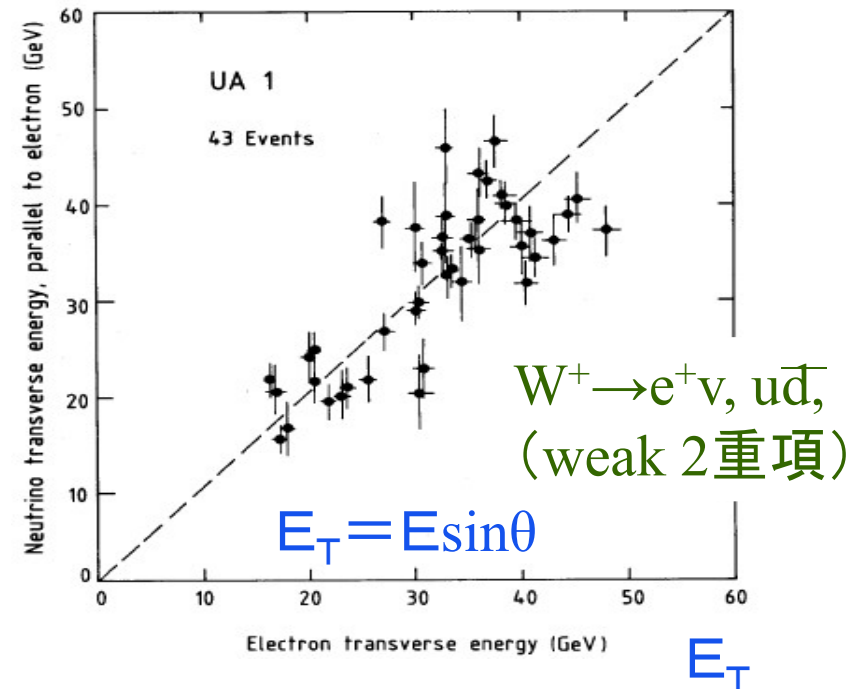
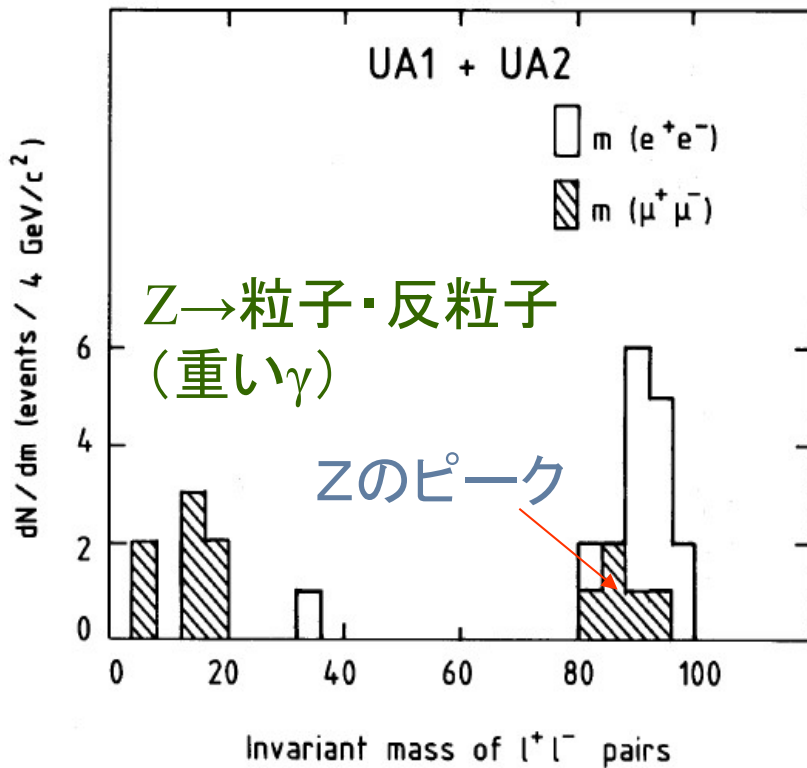
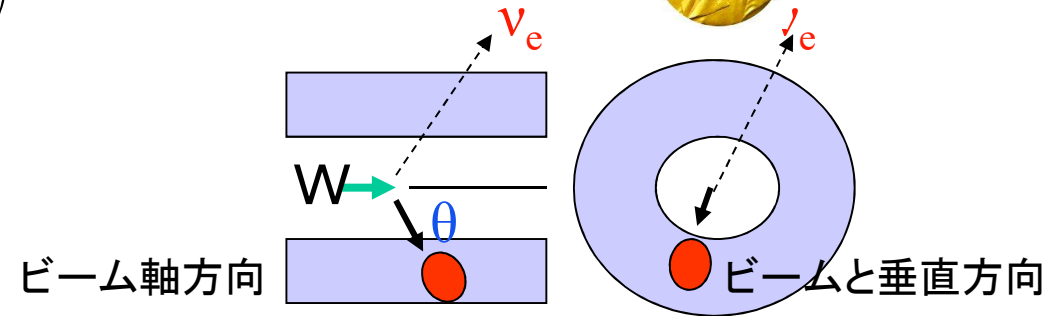
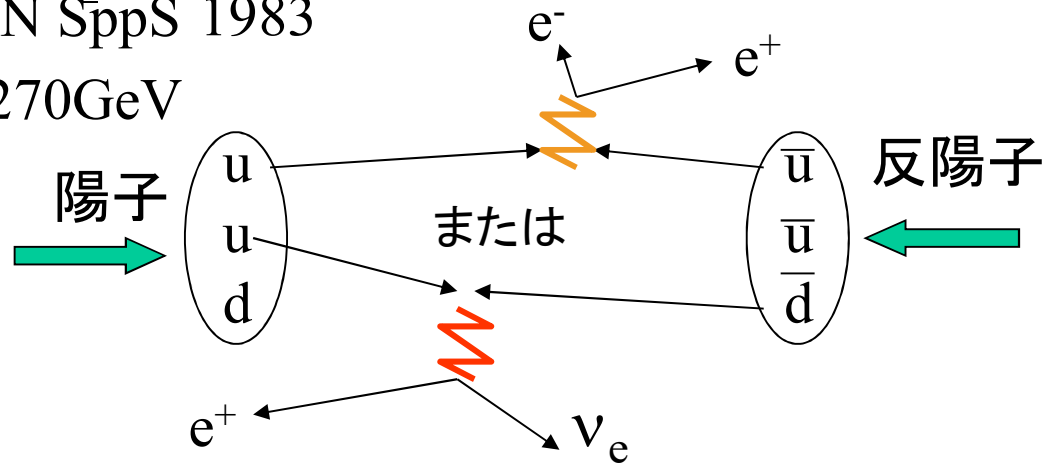
人間界では電磁気力が支配的だが高エネルギー (E~100GeV) では弱い力は電磁気力と同程度
⇒ “力の統一” の可能性(Glashow) ⇔ 電弱統一

W/Z粒子の発見

Rubbia/Van der Meer

CERN SppS 1983

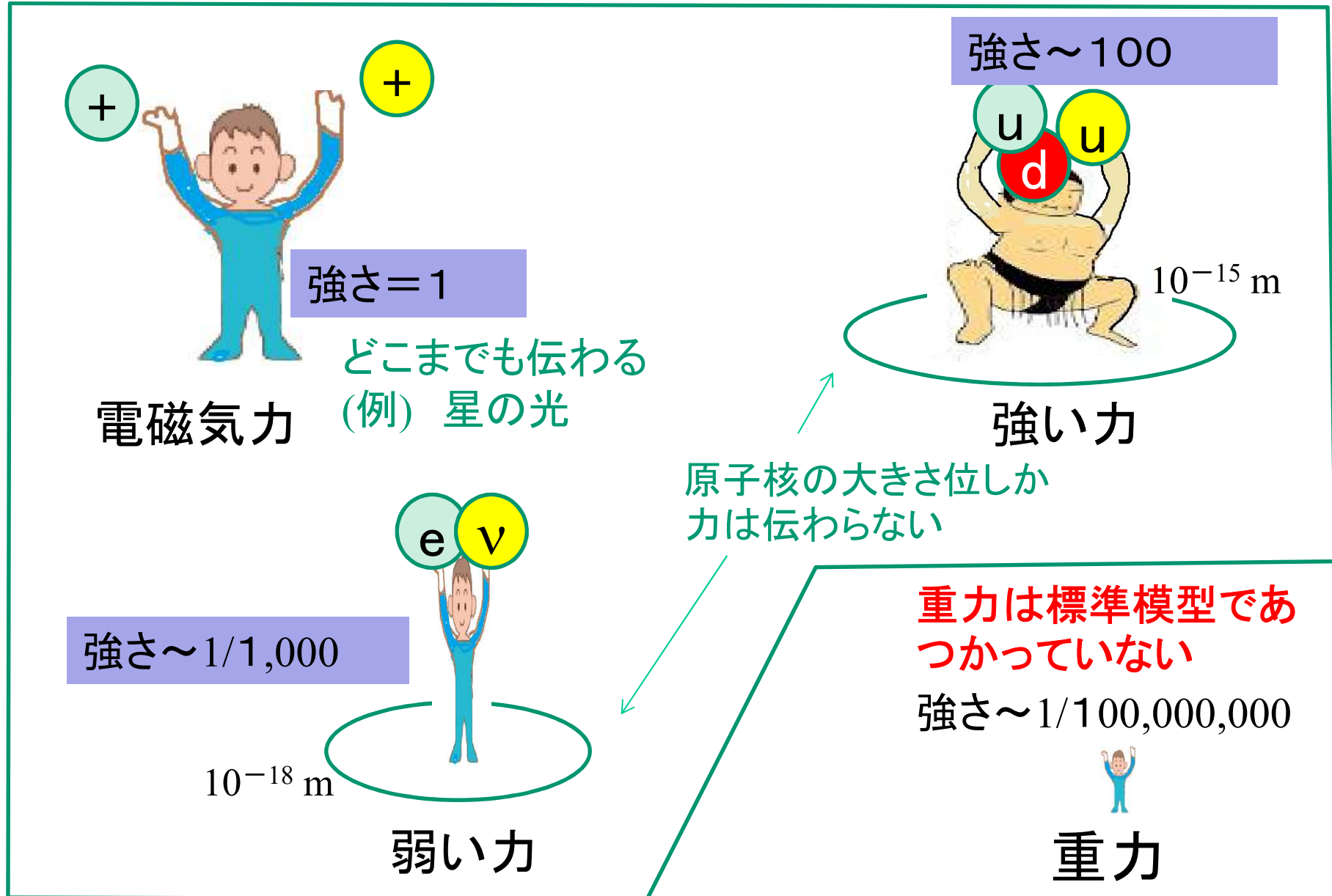
$E_p = 270 \text{ GeV}$



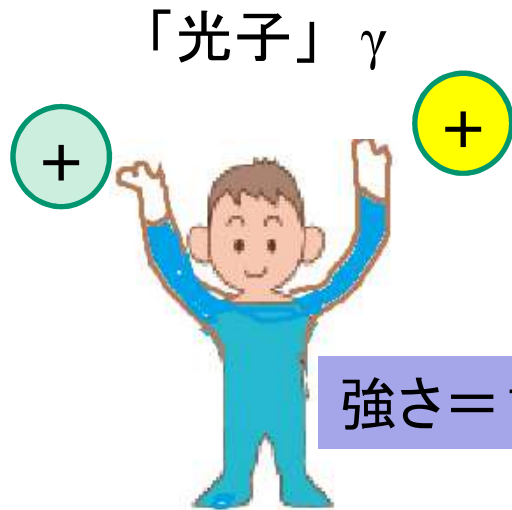
4種類の力

標準模型であつかう力: 3つの力

標準模型では、さらに
2つに分類した (1973-1983)



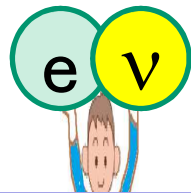
電磁気力と弱い力の統合



強さ=1

電磁気力

β 崩壊では、弱い力であるが、高いエネルギーにすると電磁気力と似たような強さになる。
ただし、重いために遠くまで力が伝わらない。



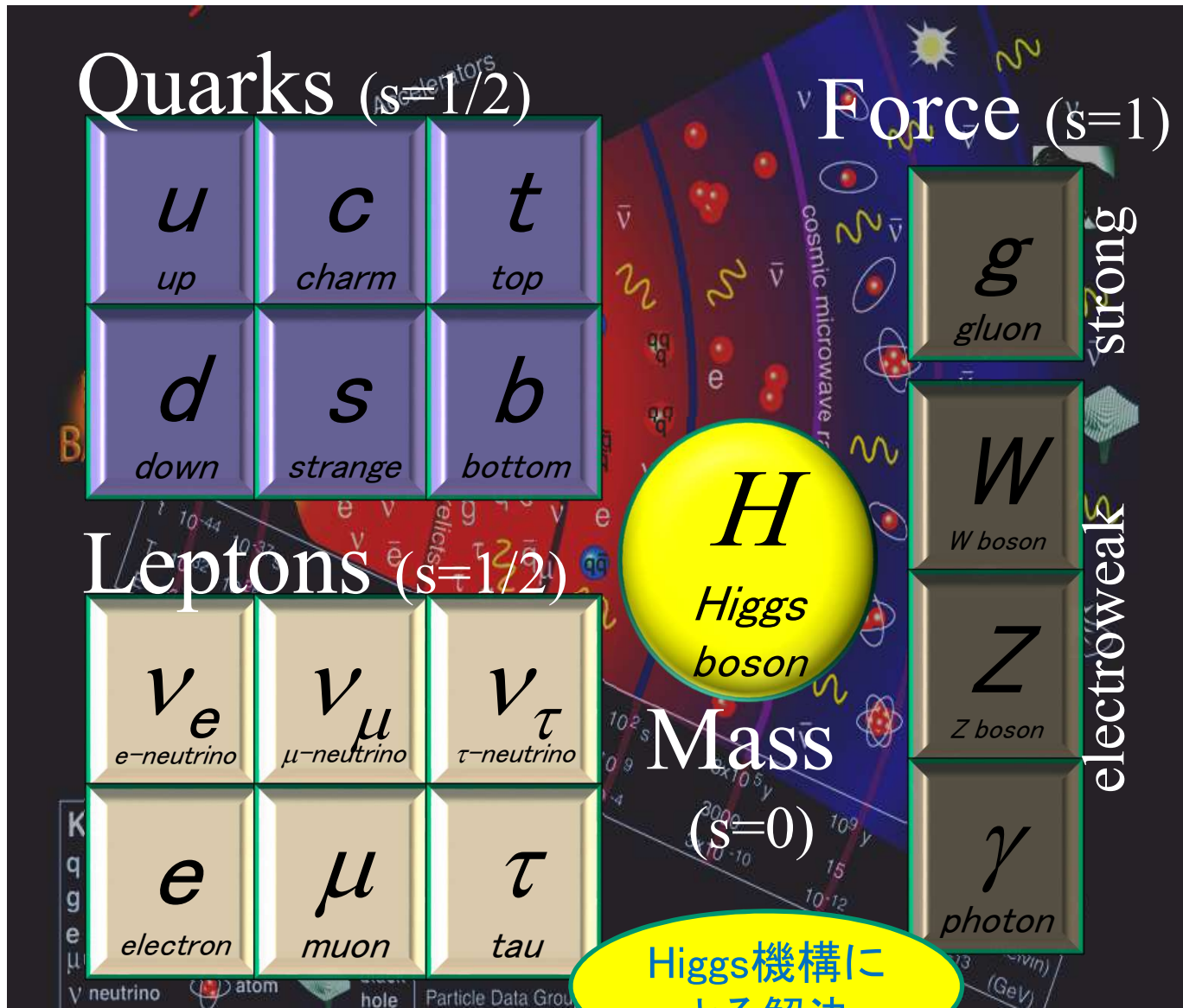
強さ $\sim 1/1,000$

弱い力



重い「光子」 Z

電気をもったのもある W



標準理論の根幹の原理

「ゲージ原理」により相互作用を生み出す。
ゲージ粒子 ($W/Z, \gamma, g$) は質量ゼロである。

電磁力と弱い力統一の現象論解釈
弱い力は重い光(=W/Z)による力なので到達距離が短く弱い

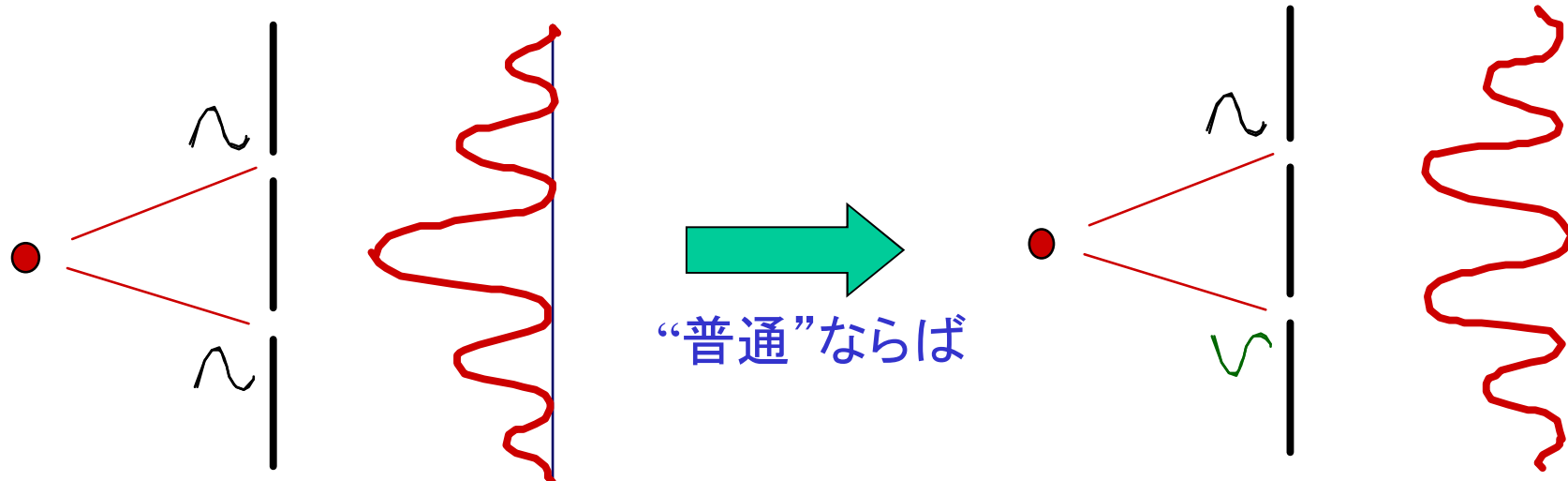
素粒子の質量

重さとはなんだろう？

標準模型:力を伝えるゲージ粒子

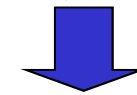
— ゲージ原理とは —

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

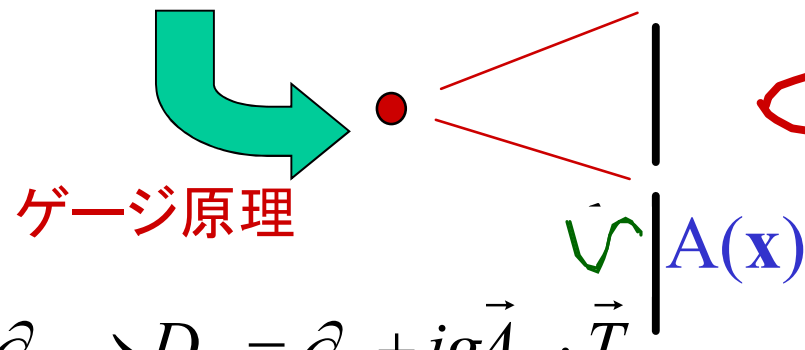


“普通”ならば

ゲージ原理を実現しようと空間に場
(＝ゲージ場)が発生する



電磁場、W/Zの場、グルーオン場
“ゲージ粒子の質量はゼロ”



$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu + ig\vec{A}_\mu \cdot \vec{T}$$

*(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、到達距離は無量大)

γ , g は質量ゼロ

W , Z は γ の仲間だが質量がある!

力の強さ

実験により、 W や Z は重たいと判明した (~1985)



光子

距離

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

$$\propto \frac{e^{-Mr}}{r}$$

: W/Z 質量の必要性



南部

力を生み出すゲージ原理は守りたい

- ゲージ粒子にはゼロ質量が要求

「重さとは何か」

本来質量ゼロのゲージ粒子が周囲の環境により質量を獲得

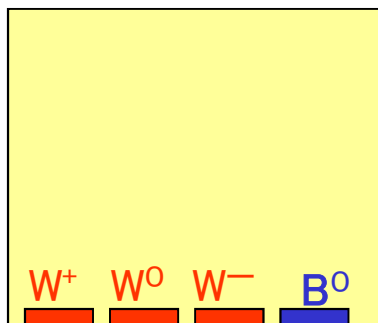
標準模型: W/Z粒子の質量獲得

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 \longleftrightarrow ゲージ粒子の数

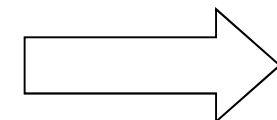
$SU(2) \times U(1)$

質量

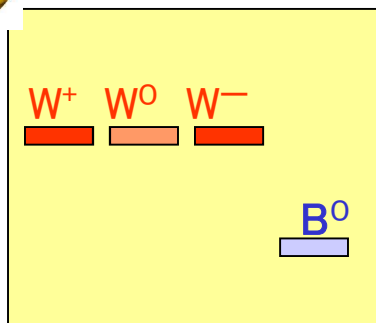


ゲージ粒子の質量=0

“BEH機構” 1966



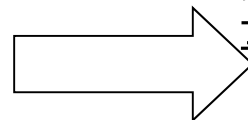
自発的対称性の破れ



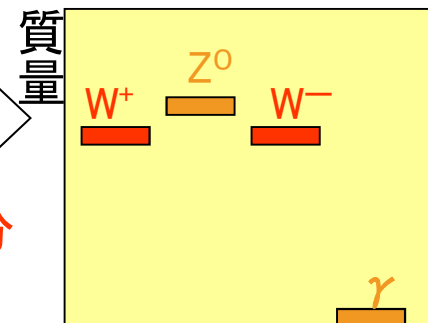
南部
1959



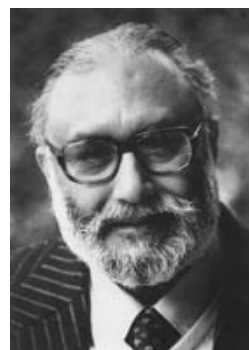
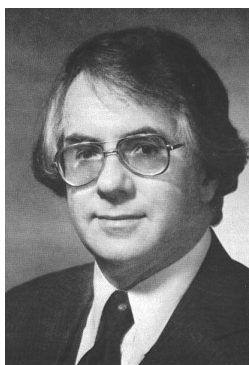
“Weinberg角”



中性成分の混合



W/Z/ γ 粒子の質量固有値

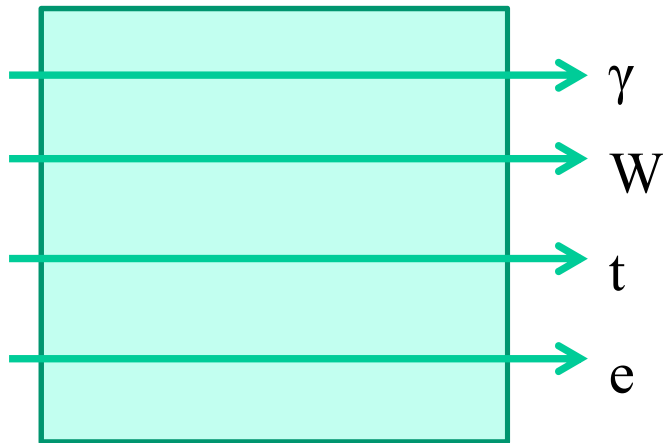


光子とウィークボゾン($W^\pm Z^0$)は兄弟

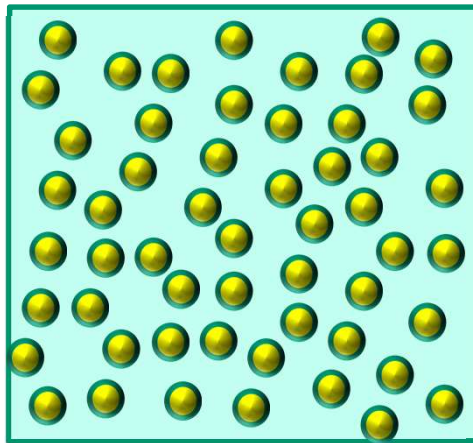
Glashow-Weinberg-Salam理論
1968



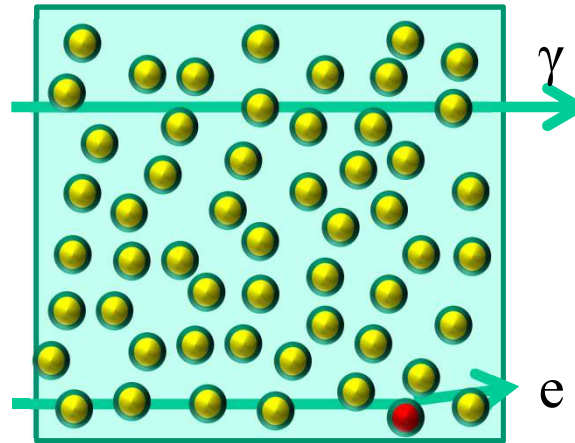
ヒッグスが質量をうむ



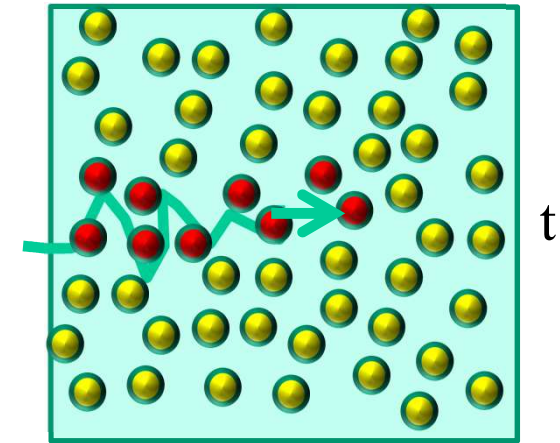
BigBang直後:
すべての素粒子は質量ゼロ、光速



真空中にヒッグスが充満



人気の全くない γ は素通り
ファンがわずかにいる電子は、
ちょっと遅れ小さな質量



ファンの多いWやtは、大きく
遅れ、質量が大きい

「ヒッグス場」を実験室に再現する

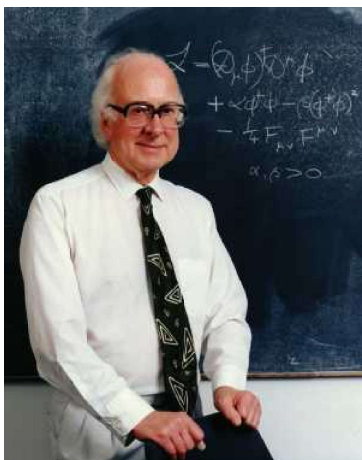
実験の考案・実施 筑波大 原

慣性抵抗により「質量」を獲得する実験

モータで一定速度で糸を巻上げ、先につけたモノを移動させる。

周囲を空気と水の場合で、抵抗による「重さ」の違いをばね秤で測定する



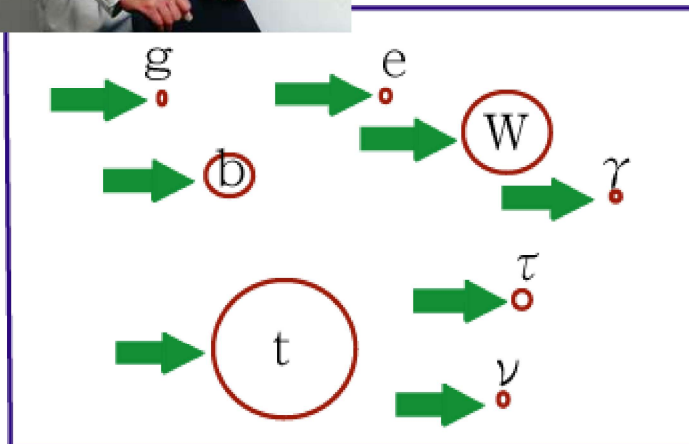


素粒子の標準模型とヒッグス粒子

— ヒッグス粒子と質量の起源 1966 —

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

慣性質量: 力に対して加速されにくさ

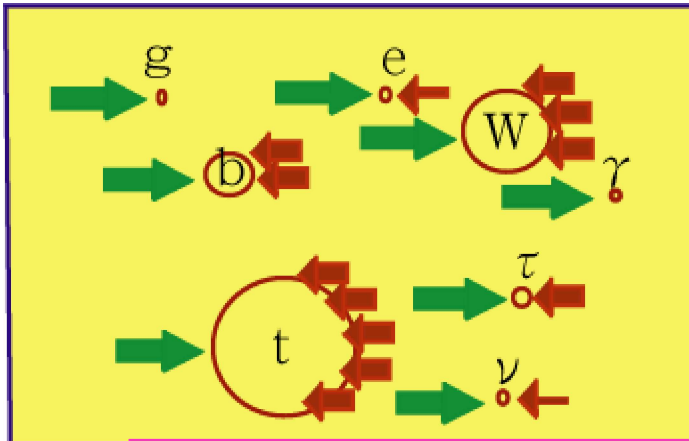


ビッグバン直後:
真空から抵抗を受けずに
すべての粒子の質量=0

相転位が起きたのは

$$T_c \sim 10^{16} \text{ 度}$$

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

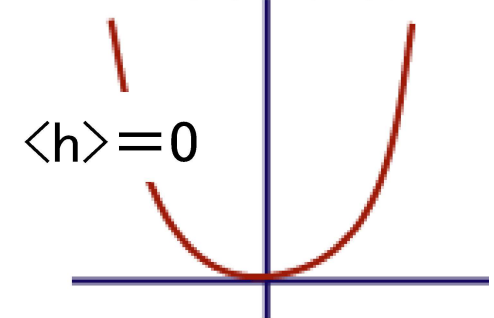


真空中にヒッグスが充満 (Higgs場
がゼロでない条件が最低エネ
ルギー=真空):

“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

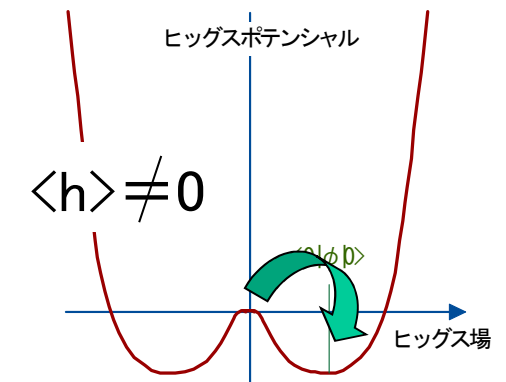
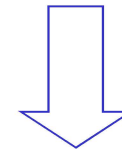
おまけ: フェルミオンでは重い粒子ほどヒッグスと相互作用
しやすいので重くなる⇒Higgsは質量の起源粒子

ヒッグス
ポテンシャル



ヒッグス場の波動関数

真空の
相転位



ヒッグス場が有限
=ヒッグスで充満

真空

ダークエネルギーによる
宇宙の加速膨張

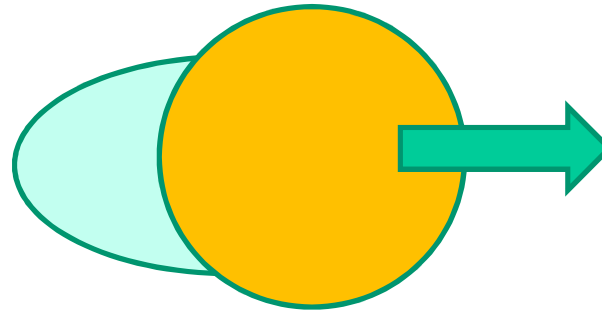


アリストテレス



- ・ (机上の物体は)力を加えれば動き、加えなければ止まる
- ・ 投げ出された物体はなぜ動き続けるのか？

物体が動くと後ろに真空
ができ、そこに空気が入
り込むので空気におさ
れて進む



真空はできてもすぐになくなる

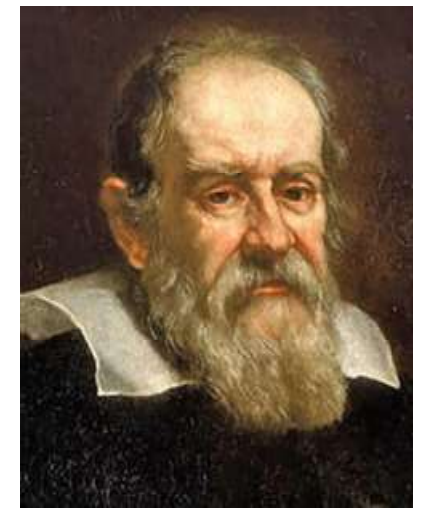
「自然は真空を嫌う (真空はない)」

慣性の法則をしらない⇒何かがつまっている

超有名学者のアリストテレスは、デモクリトスを一蹴

デモクリトス: 真空「Kenon」の中を「Atom」が飛び交っている

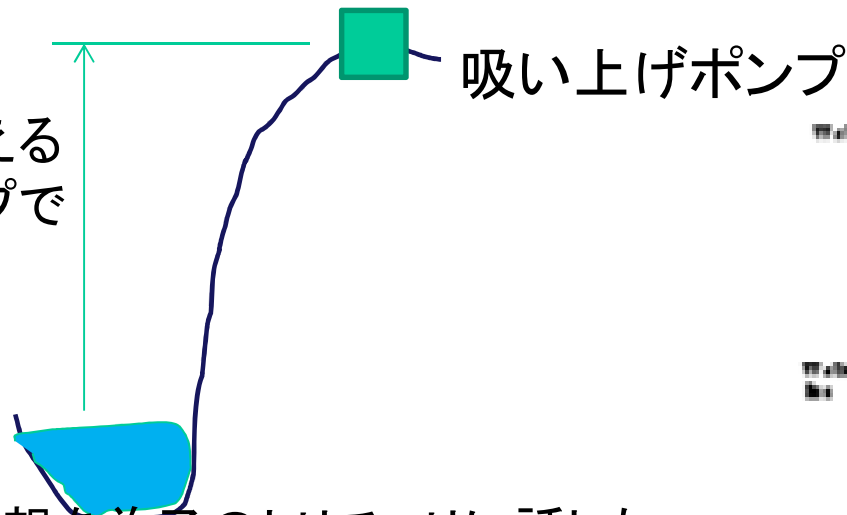
ガリレイ



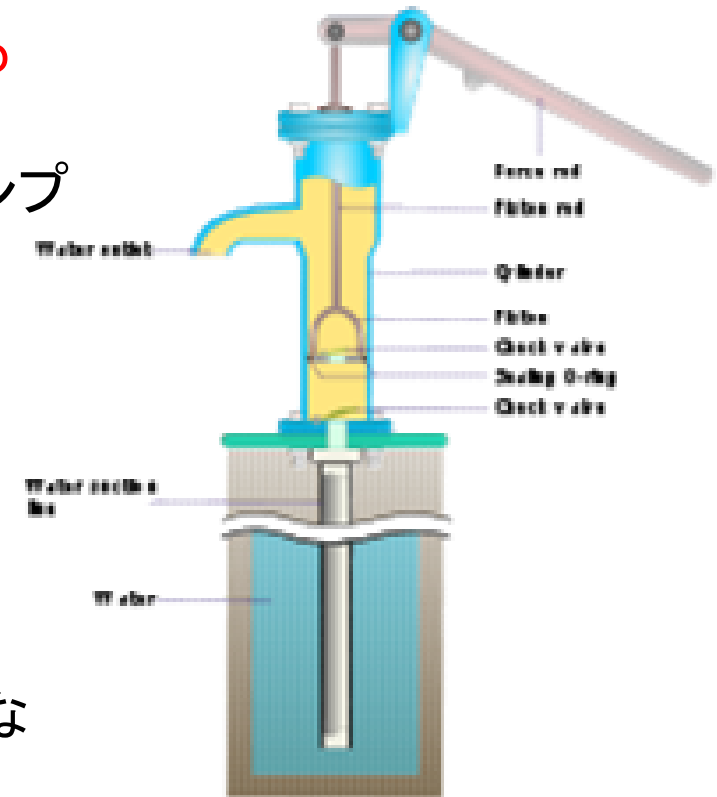
- ・ 鉱山で10m以上深くなると水が吸い上げられない。
- ガリレイは
- ・ 「自然がどのくらいの真空を嫌っているのかですな」
 - ・ 1630=>「自然は真空を嫌っていない。必ず真空はある」

慣性の法則を発見⇒真空は実現できる

18キュービットを超えるとどんな強力なポンプでも吸い上げられない

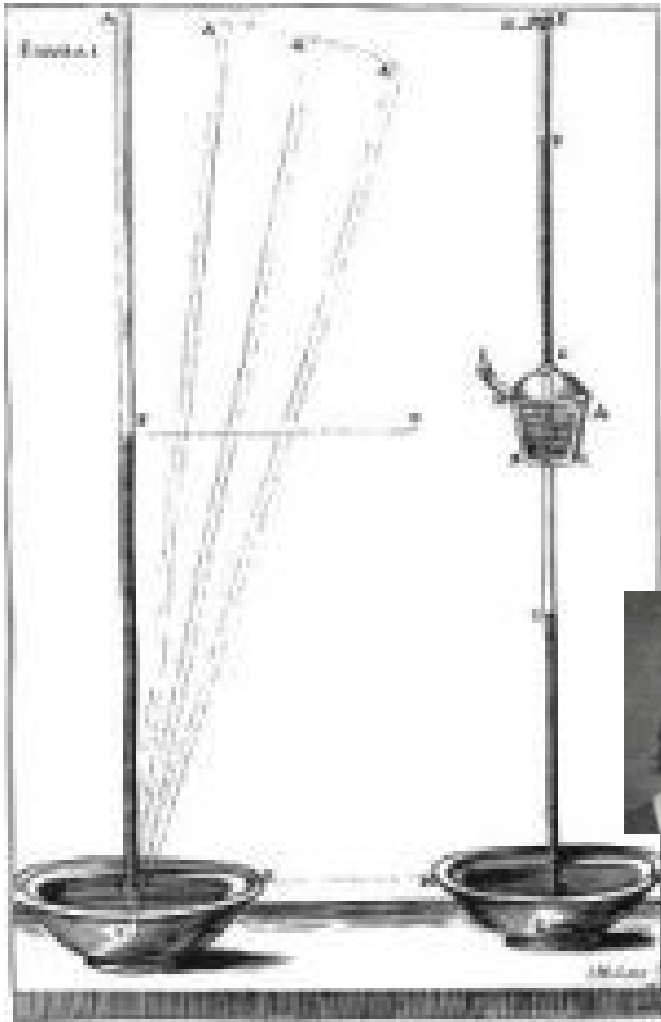


ガリレイは、実験構想を弟子のトリチェリに話した：
「真空嫌悪には限界がある。水以外に、水銀、葡萄酒などを使うと比重に応じて高さが変わるはずだ」



トリチェリ

・ 1643



←「真空などない。見えない糸が引張っているのだ」
(真空嫌悪はカトリックの教理のひとつ)

・ 1648 パスカル

Puy de Dome山を登り水銀柱の高さが76⇒69cm
になることを公開実験。
真空が大気圧と直接関連することを実証。



人類が初めて作った真空
「大気には重さがある」

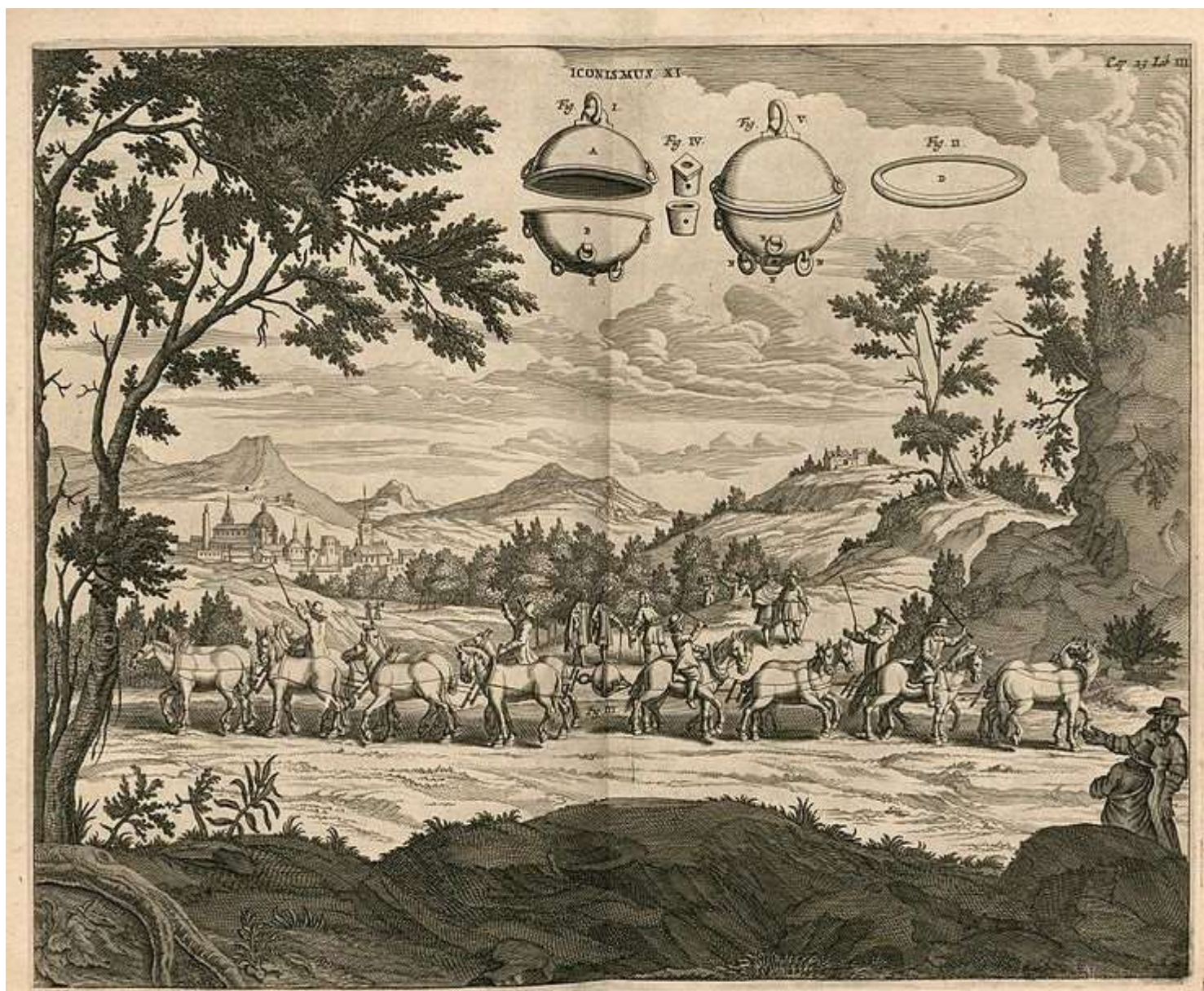
$$1\text{atm}=760\text{mmHg}=760\text{Torr}$$



$$1\text{atm}=760\text{mmHg}\sim 1013\text{hPa}$$

Magdeburg

1656 ゲーリケ市長(真空ポンプを発明)



あらたな真空の存在が明らかになってきた (即ち、原子があること)



ボイルの法則(1661)「大気は空気で満たされている。
その空気が圧力のもと」

沢庵和尚(1573-1645)「紙鉄砲がとぶのは、
弾の間に空気が満たされているからだ」

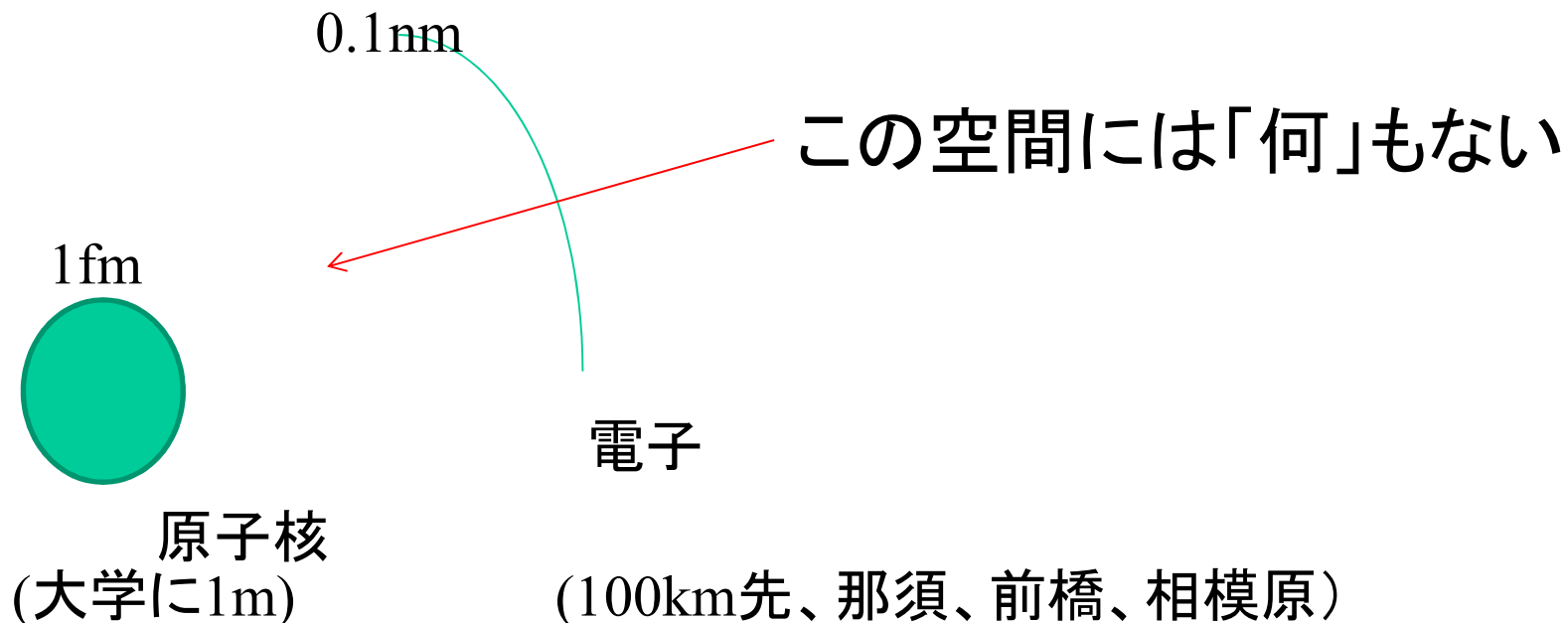
1647「東海夜話」小児、竹鉄砲と名付けて、竹の筒に紙をかみし
ぎて球となして、これを入れて、又後より一つ重ねて紙のしたきを入
れて突きやる時、先へ入れたる紙の玉のへ、後の玉行き届かぬ先
に、はっしとなりて先に行くなり。これ、先の玉と後の玉との間は空
なれども、その間に気*が充ちてある故なり。



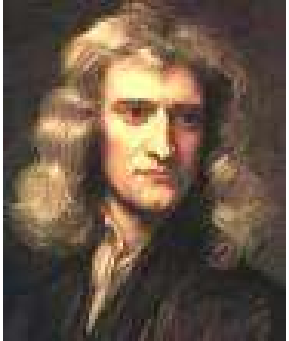
真空はどこにあるか？

大気を取り除けば「真空」？

- ・ 真空ポンプ 10^{-11} Torr = 30万個分子/cc
- ・ 上空1000km = 3万個陽子/cc
- ・ 星間ガス(淡) = $(10p + \sim 200v)/cc$



真空は「力をどう伝えるのか？」と関連



- ・ 万有引力の法則（ニュートン）

ニュートンは力がいかにして**作用するか**説明せず、如何に**作用しているか**実験結果から法則を演繹した。

- ・ パリ学派（デカルト）

力を伝えるものが必要



「**力は媒質を伝わる**」のであり、如何に力が伝わるかを説明しない万有引力は認められない！

空間には微粒子が満ちている。微粒子が周囲からぶつかるので静止した物体は動かない。

回転している地球から微粒子が逃げ出さないのは、遠心力の反作用が働いている証拠。これが重力となる。

「**力の近接作用**」(力は瞬時に遠くまで伝わるものではない)



「力の伝達」は近接作用へ

- ・ クーロン力も万有引力と同じ $1/r^2$ に比例

(電荷から微粒子が出ていると思ってガラスをかざしても作用したので、原因は分らない)「**近接作用**」、「**遠隔作用**」は別として、法則を適用

- ・ ファラデー

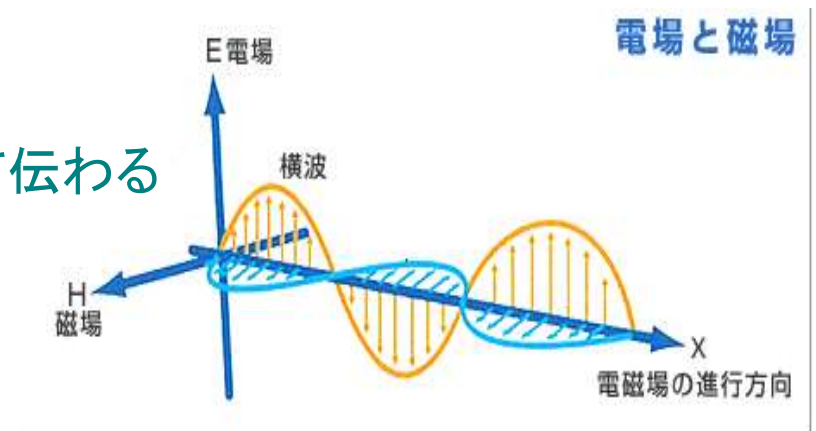
「力は遠隔作用ではなく、**近接作用**で伝わる」

砂鉄で観測する磁力線が曲がっている＝力が伝わる方向を示すので、曲がっているのは瞬時に伝わるのではない、という証拠

⇒ 電気力の大きさを表す「電場」や「磁場」の「**場**」の導入。
場のエネルギー

⇒ マックスウェルの電磁場の方程式

「場」の伝搬＝電磁波、電場と磁場がからみあって伝わる
＝「**近接作用**」⇒光の伝搬



近接作用：空間を満たすエーテル

- ・ **エーテル**（常に輝き続けるもの）：アリストテレスが考えた星を動かし続ける天界を満たす第5の物質
- ・ 1864マックスウェルは**電磁波伝搬**する媒質としてエーテルを考えた
- ・ 1887ヘルツの電磁波の発見により、エーテル説はさらにひろまる*
- ・ 1805ヤング、フレネルの光の干渉、回折観測により、波動は決定的

*光の波動説の前は、ニュートンらの粒子説が有力。ニュートン「光を波と考えエーテルを導入すると、空間がエーテルで満たされる。星の運行に影響がでるのでおかしい。」

デカルトは力を伝える「仮想的」なものを考え、**微粒子**があると信じれば事足りた。その信念から「自然学」を作り上げた。（エーテルの証明は不要）

電磁波の確立とともに近接作用の源となるエーテルの存在を実証しなくてはならなくなった。

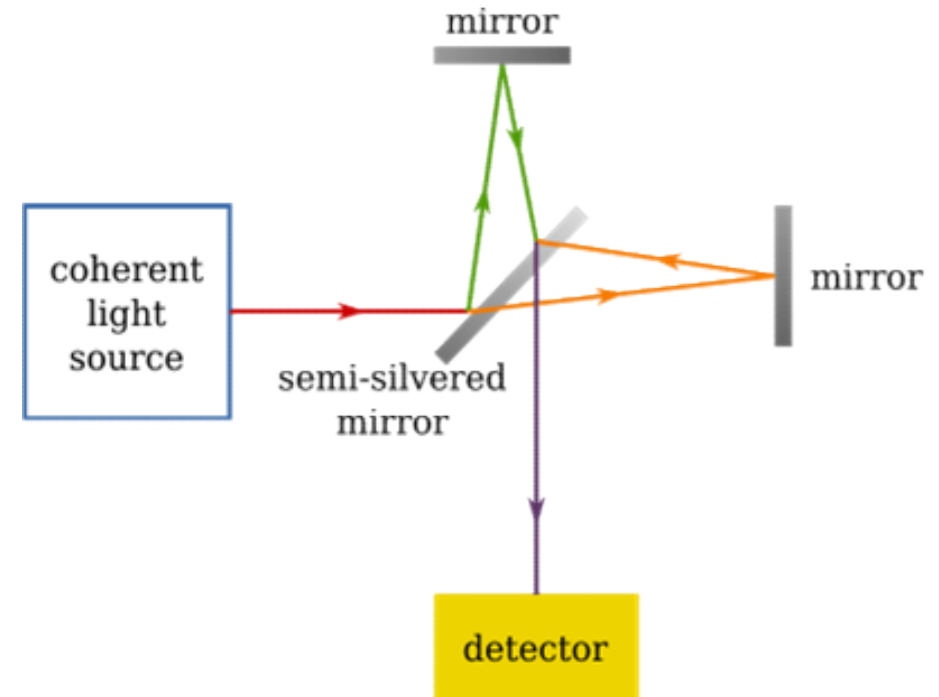
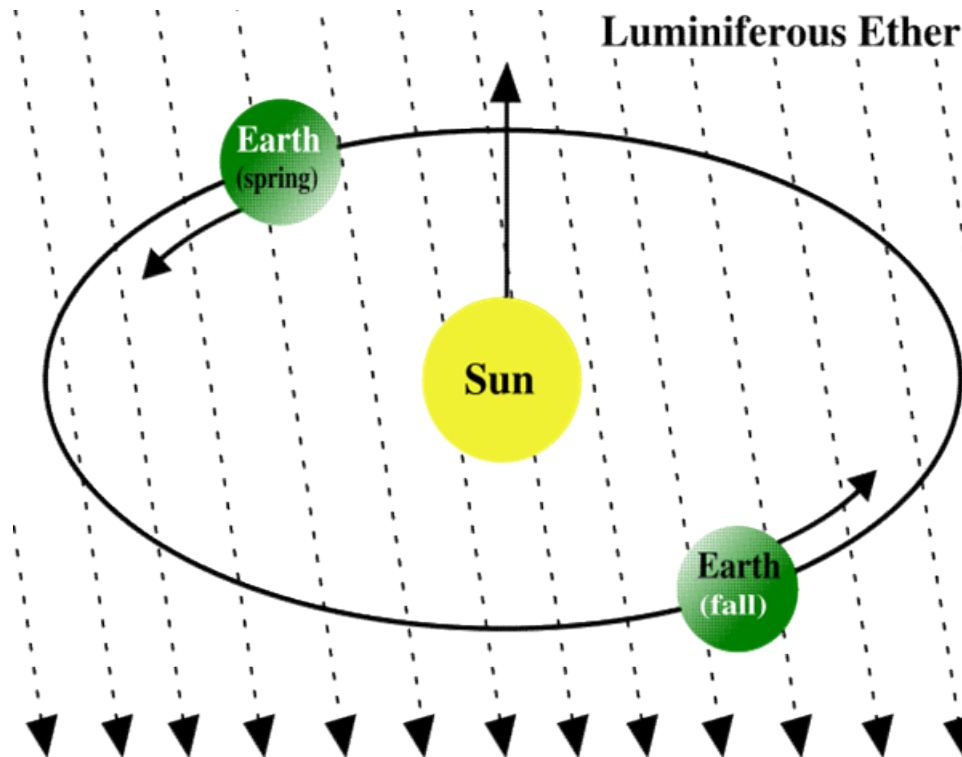


エーテルを検出する試み



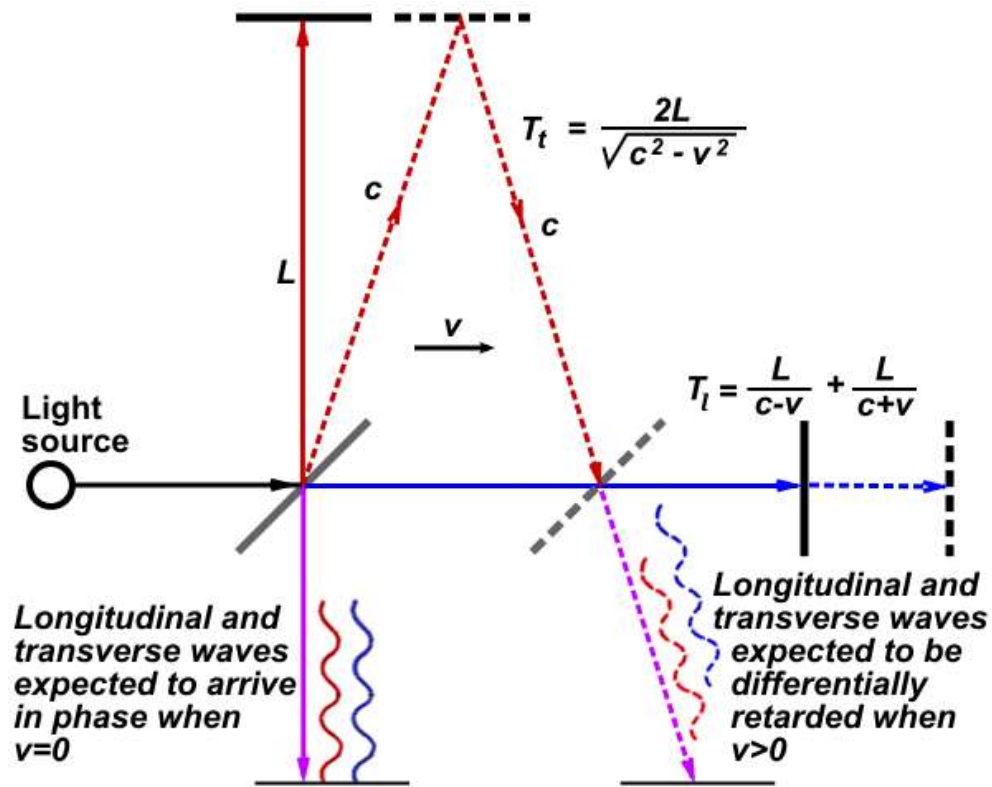
予想を証明できなかった実験(≠失敗)

- マイケルソン＝モーリー： 季節(昼夜)によりエーテルとの相対速度の差から光速が変わって見えるはず。



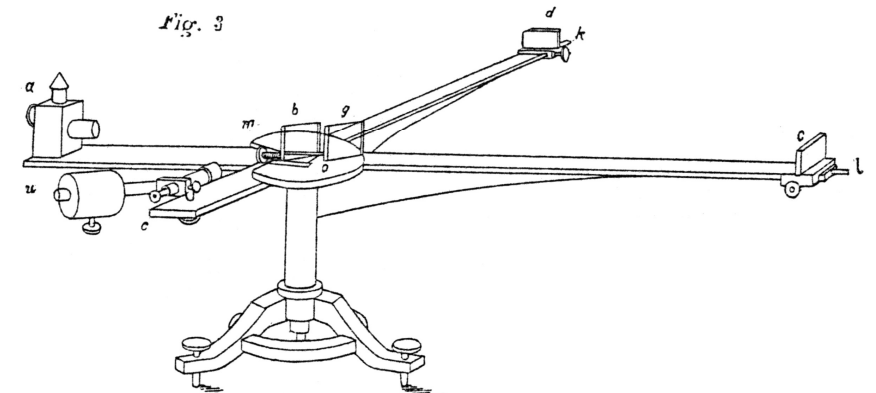
90度交差する方向で光速が違うと干渉縞にずれが生じる。

系(エーテルの静止系)に対する装置(=地球)の速度を v



$$= \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

v の大きさを測定する



Michelson(1881)

否定されるエーテル



L~11m(反射を繰り返させ距離を稼ぐ)
温度変化の少ない石盤
装置全体を回転させ系統誤差を抑える
⇒ T_p T_l に違いがなかった

季節のずれ、昼夜のずれは、期待値の1/40
で、エーテルの存在を証明できなかった。

干渉パターン(再現):干渉縞がずれるはず

装置を回転させて測定

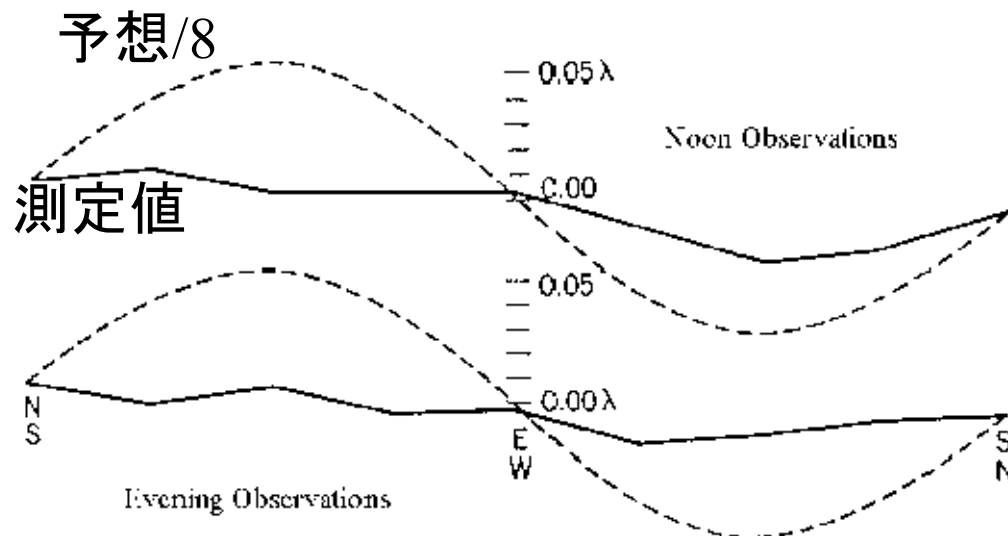
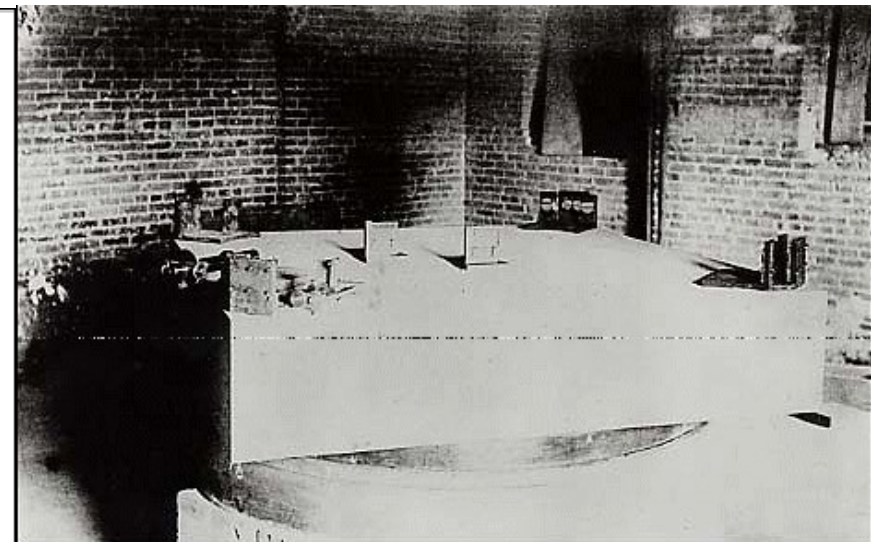


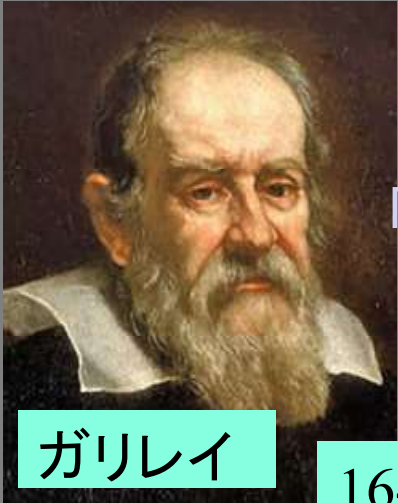
Figure 6 from Mickelson and Morley (1887)

1881-1887 エーテルの否定
光速度不変⇒相対性理論



Michelson & Morley's 1887 interferometer
built in the basement of Western Reserve
Photo: Case Western Reserve Archive

19世紀までの真空の歴史



ガリレイ

「自然は真空を嫌わない」



デモクリトス

「Kenonの中にAtom
が飛び交っている」



アリストテレス

BC4c「自然は真空を嫌う」

1643 トリチェリの「真空」

1661 ボイルの法則「大気圧は空気による」

1650 デカルト「力は空間に満ちる粒子により伝わる」「近接作用」

1665 ニュートンの万有引力の法則

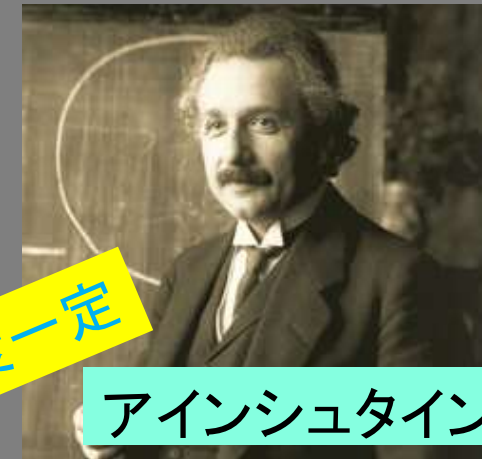
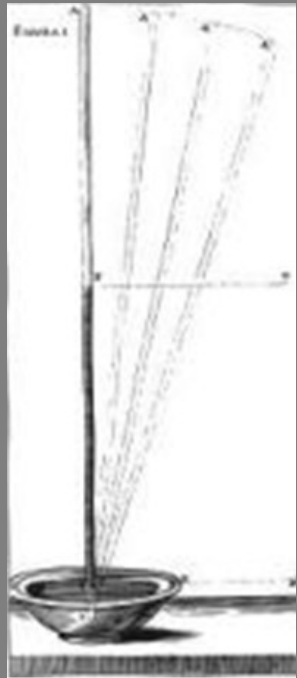
「力を伝えるものを明確にしない」

1864 マックスウェル 電磁波の存在

1887 ヘルツ 電磁波の実証

⇒エーテルが波を伝える

1881 マイケルソン・モーリーの実験によりエーテルを否定



アインシュタイン

1905 相対性理論

光速度一定

相対性理論と場の誕生

デカルト以来の議論は

- (1)力は時間をかけて伝わる(近接作用)
- (2)力の媒介には媒質が必要(微粒子、エーテル)

相対論：新しい時間、空間の概念

「どのような規準系も同等である」=エーテルを否定

⇒(2)は修正され、

力の媒介に媒質は不要。真空中に現れる「場」が力を伝える。

「真空」は「電磁場」や「重力場」を発生する能力をもつ

さらに、「W/Zの場・グルーオンの場」などの力の場も作る

場の量子化⇒力を伝える素粒子

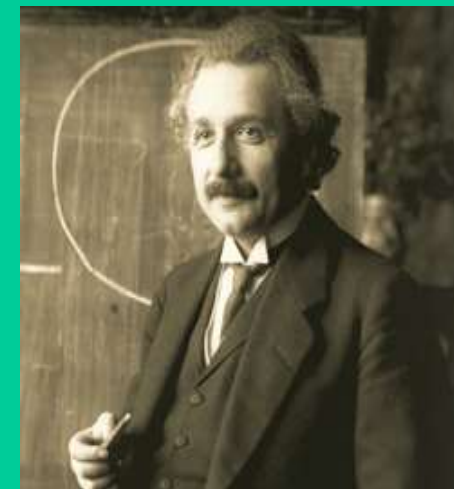
現代物理学の3原理

現代物理学に必須な考え



ゲージ理論

量子論

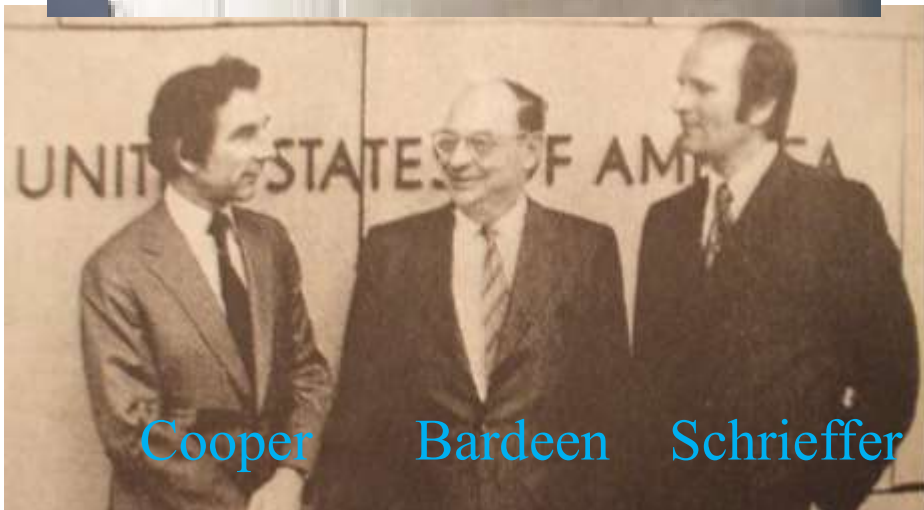


相対論

超伝導

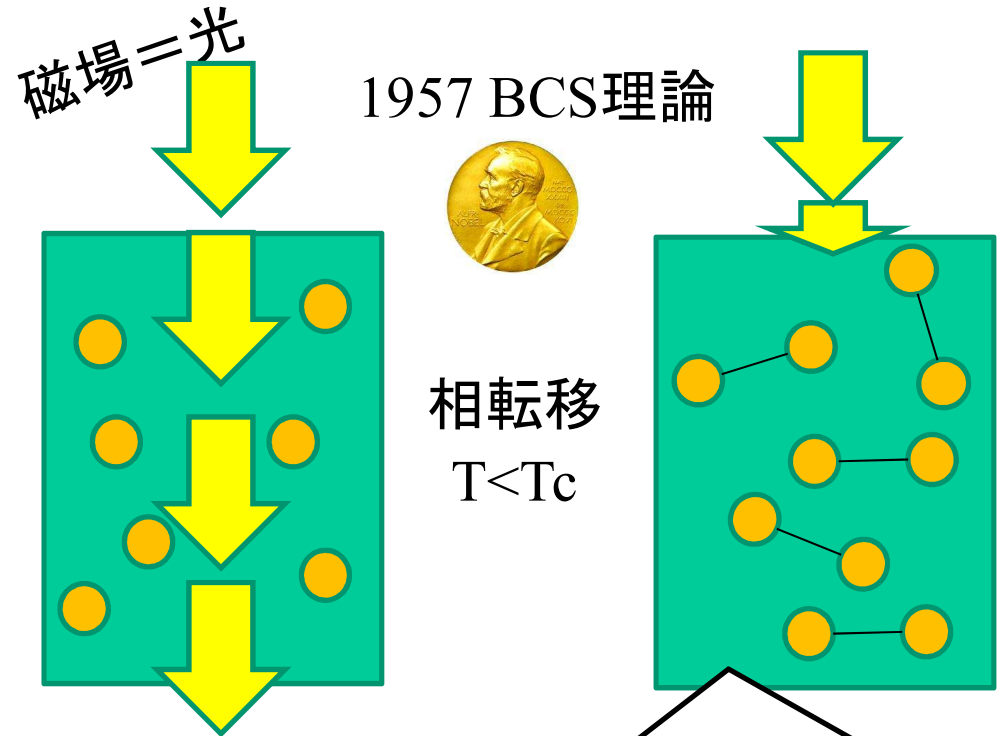
マイスナー効果

(超伝導体中に磁場が入り込めない)



常伝導: 電子がばらばらの相互作用

超伝導: 電子対が一緒に相互作用し、光を侵入させない
(「真空」=cooper対が同じ最低エネルギー状態に凝縮)



Cooper対が一斉に磁場変化を打ち消す

光の「重さ」:

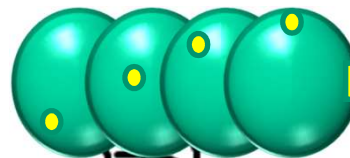
クーパー対との相互作用で内部に侵入できなくなった。
質量0の光が、大きな質量を獲得したとみなせる

右と左 -自然界で左右が区別されている例-

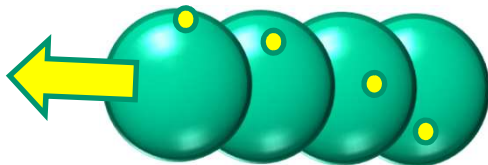


やまいも

すし



光速で運動する(質量ゼロ)粒子



粒子より速い系でみると右巻き



弱い力は、決まったchirality(左巻き粒子、右巻き反粒子)を感じるが、
質量を与える⇒右巻き成分(=helicity)もある粒子にする

南部(フェルミオン質量の獲得)

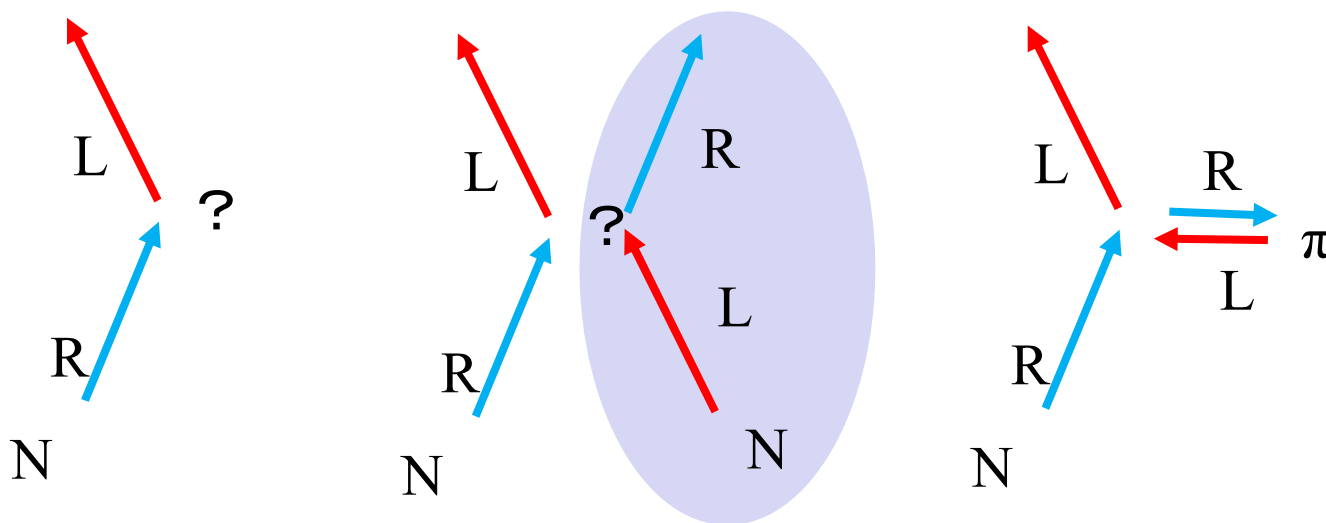
1960 南部「自発的対称性の破れ」BCS理論をゲージ不変を満たす理論へ

「自発的対称性の破れ」 \Rightarrow スピン0のボゾン (Nambu-Goldstone)

超伝導理論: 質量のゼロの光が、NGボゾンと相互作用してみかけの質量をもつ(電磁力)

場の理論に拡張: 超伝導で起こるエネルギーの有限の飛びが、「真空」でも起こる

「カイラル対称性」の自発的に破ることで、 π 中間子が現れる(核子間強い力)



1964:クォーク模型



質量有限ではL-Rが変わる

L-Rの自発的破れによりfermion(=核子)が質量を得る

真空中にNNが凝縮した状態がある

π 中間子はNNの凝縮

南部2008ノーベル賞

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

自発的でない
対称性の破れ

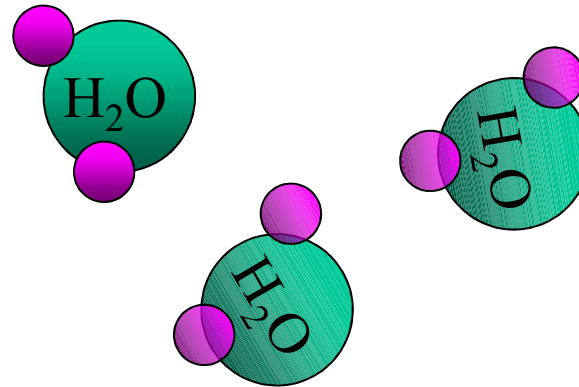
我々は地球の重力の中にいるため、上下と水平で対称性が破れてみえる。宇宙にいけば対称である

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

=>これは、重力が要因なので、自発的でない。

— 自発的対称性の破れ —

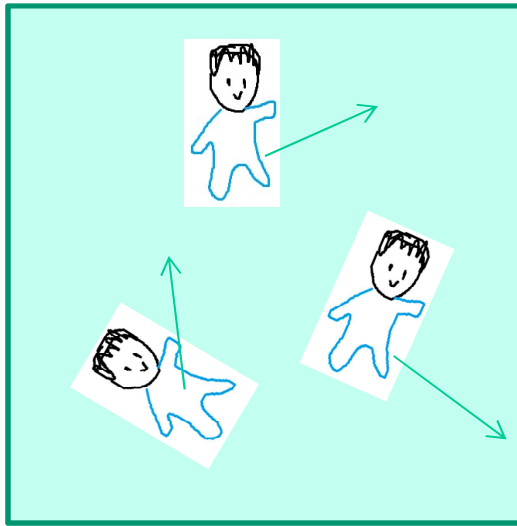
水の分子は気体や液体の状態では自由に動きまわり、回転対称な状態にある。



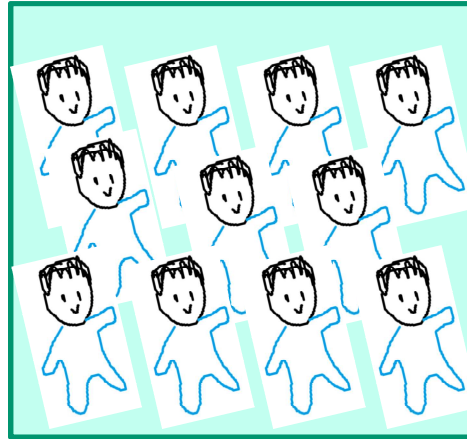
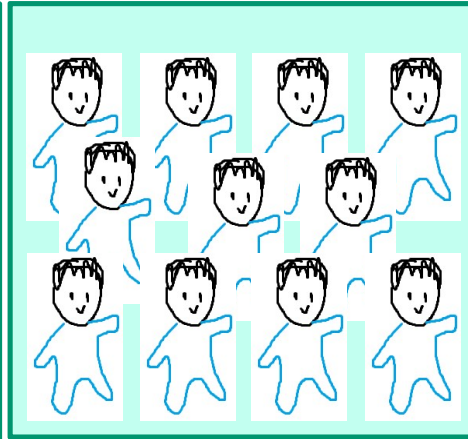
温度が冷えて、氷になると、回転対称性が失われる。



「自発的対称性の破れ」

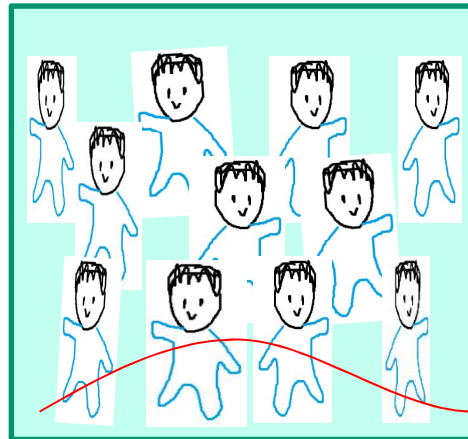


0) エネルギーが高くと、自由な方向に飛び回る「真空」の回転対称性



1) 止まらせると、同じ方向を向く「真空」は回転対称性を失った。但し、どちらを向くか無限個の「真空」がありえる。

しかし、これらの状態間遷移は、大きなエネルギーが必要



1') 少しずつ回転させる「真空」にはエネルギー ~ 0 で遷移が可能。

大きな回転周期 \Rightarrow 質量 \sim ゼロの粒子

Nambu-Goldstone ボゾン
(自発的対称性の破れのなごり)

BigBang
直後

高温では対称
(ゲージ対称)

「運動方向の対称性」

低温では「自発的に破れる」
(ゲージ対称性の自発的破れ)

今の
世界

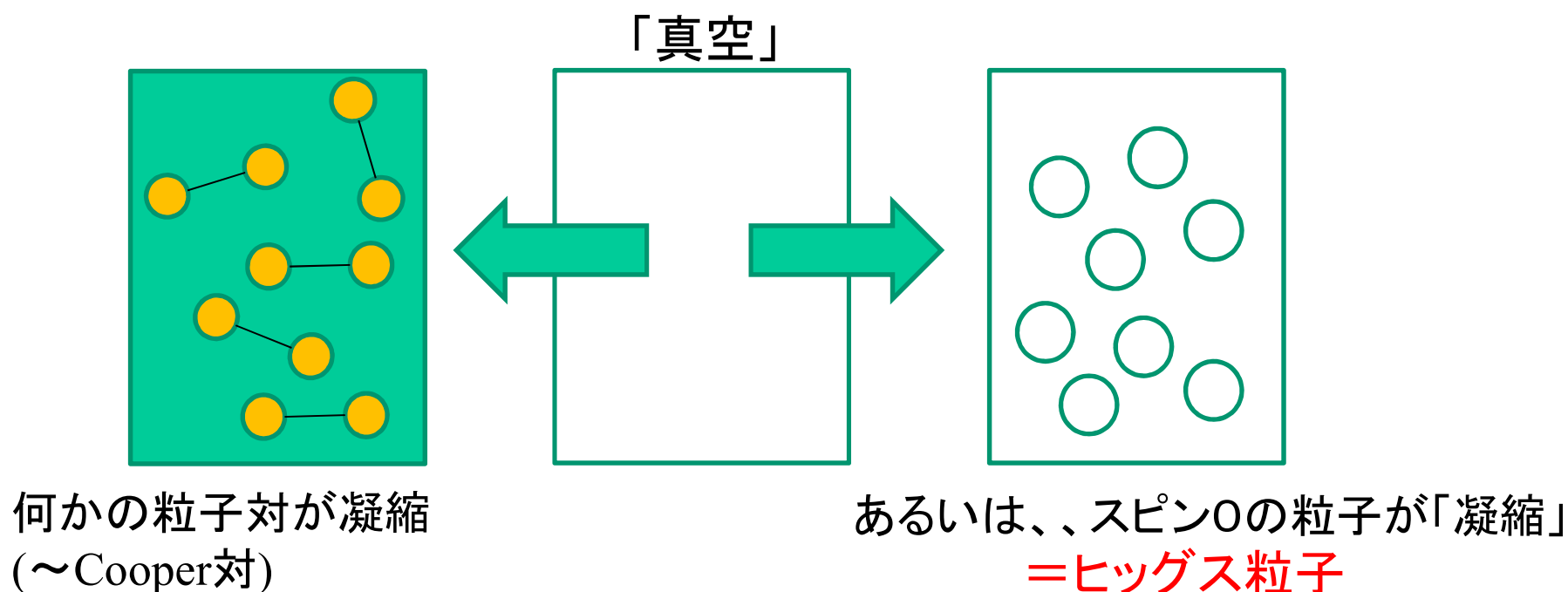


= 原子核
Higgs

BEH機構からGWS標準模型

- 弱い力を伝えるW/Zには、質量がある
(力を伝える粒子に重さがあるとゲージ対称性が破れる)

本来質量が0であるW/Zに質量を持たせたい=>真空を「変える」



真空中に凝縮したスピン0粒子と相互作用して質量をもつ
標準模型はBEH機構を選択し、 $SU(2) \times U(1)$ のゲージグループに適用した

南部からBEH機構

1960 南部「自発的対称性の破れ」BCS理論をゲージ不変を満たす理論へ
「自発的対称性の破れ」 \Rightarrow スピン0のボゾン (Nambu-Goldstone)

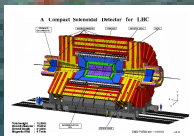
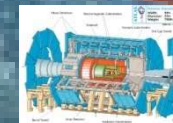
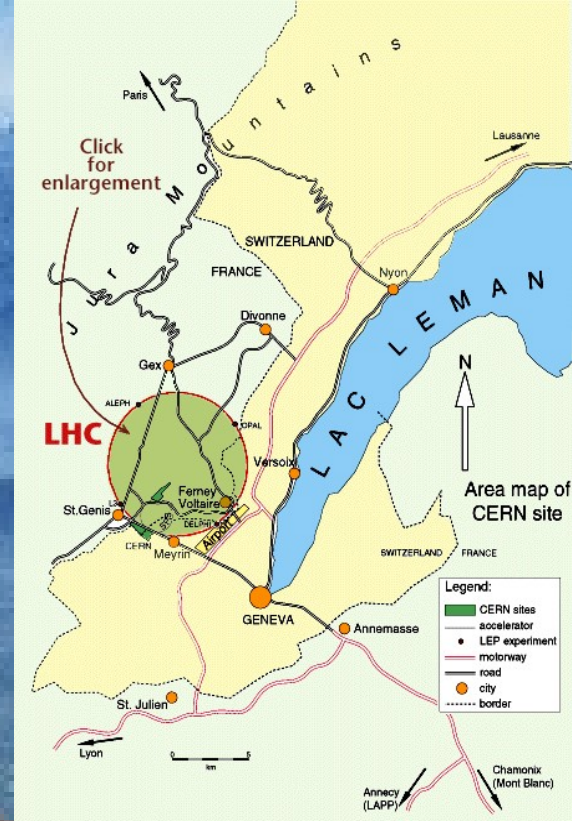
1964 Brout,Englert/Higgs/Guralnik,Hagen,Kibble
が相対論的場の量子論に適用



ゲージ場+「自発的対称性の破れ」からのNGボゾン \Rightarrow ゲージボゾンが質量を持つ
(ゲージボゾンが質量を持つにはスピン=0の成分が必要: massless NGボゾン)
Higgsはスピン0のボゾンの性質を記述した

真空中の素粒子を探る

LHC加速器(ヒッグス探索)



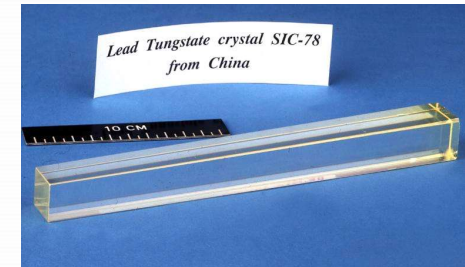
$6m \times (22km/5m) = \text{円周} 27km$



CMS (Compact Muon Solenoid)検出器

PbWO₄

A Compact Solenoidal Detector for LHC



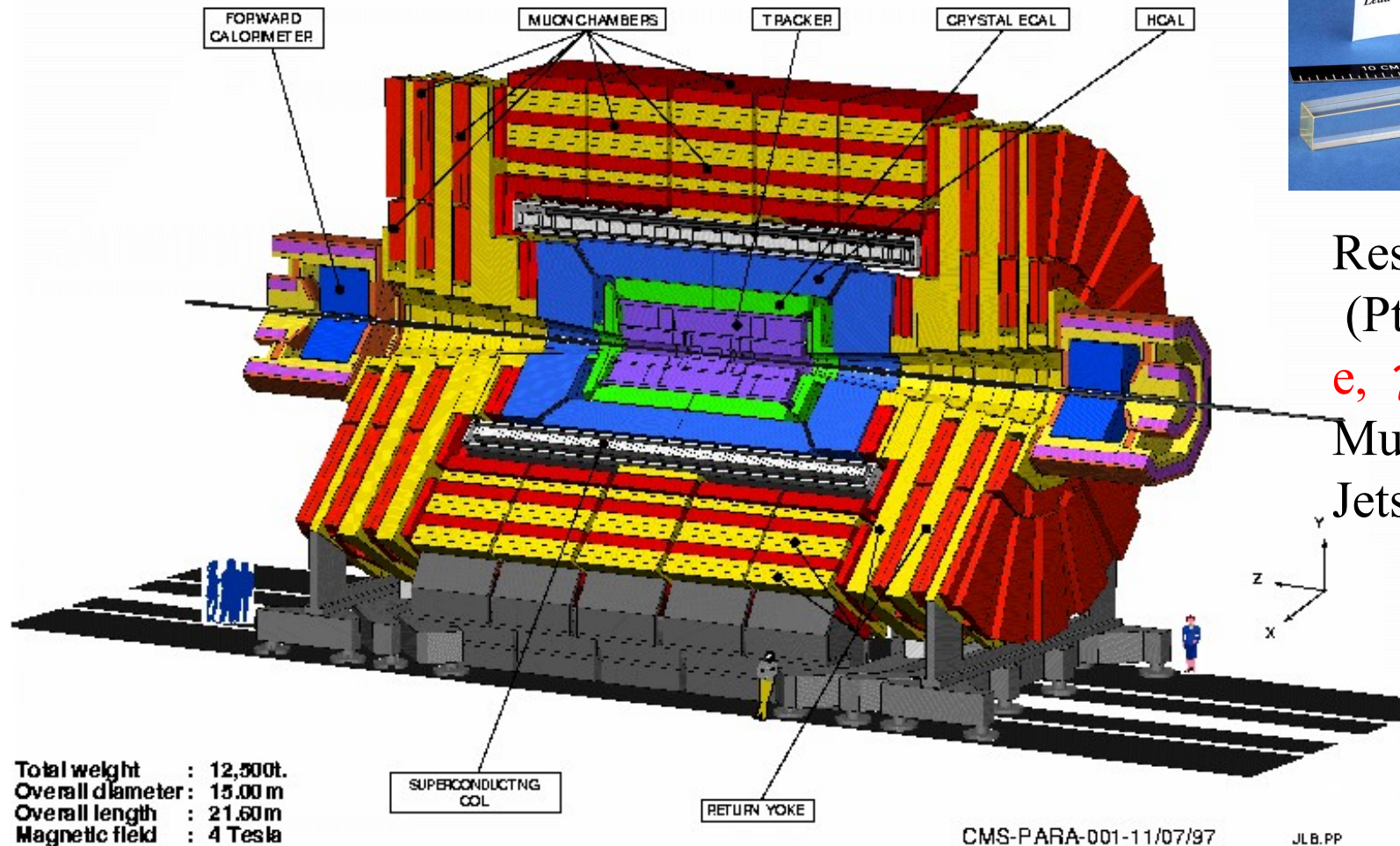
Resolution

(Pt=100GeV)

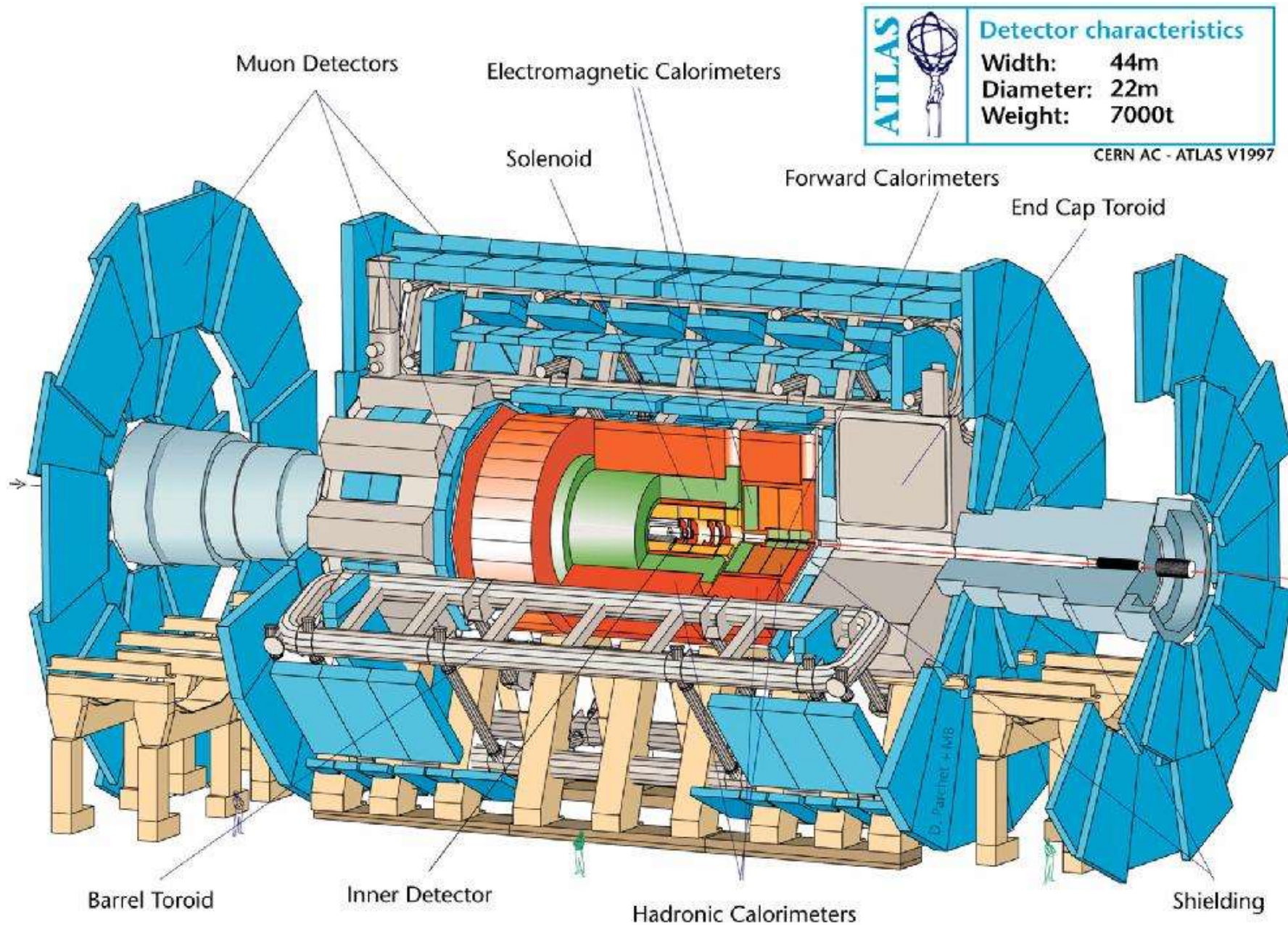
e, γ 0.9% !!

Muon 2-3%

Jets 12%

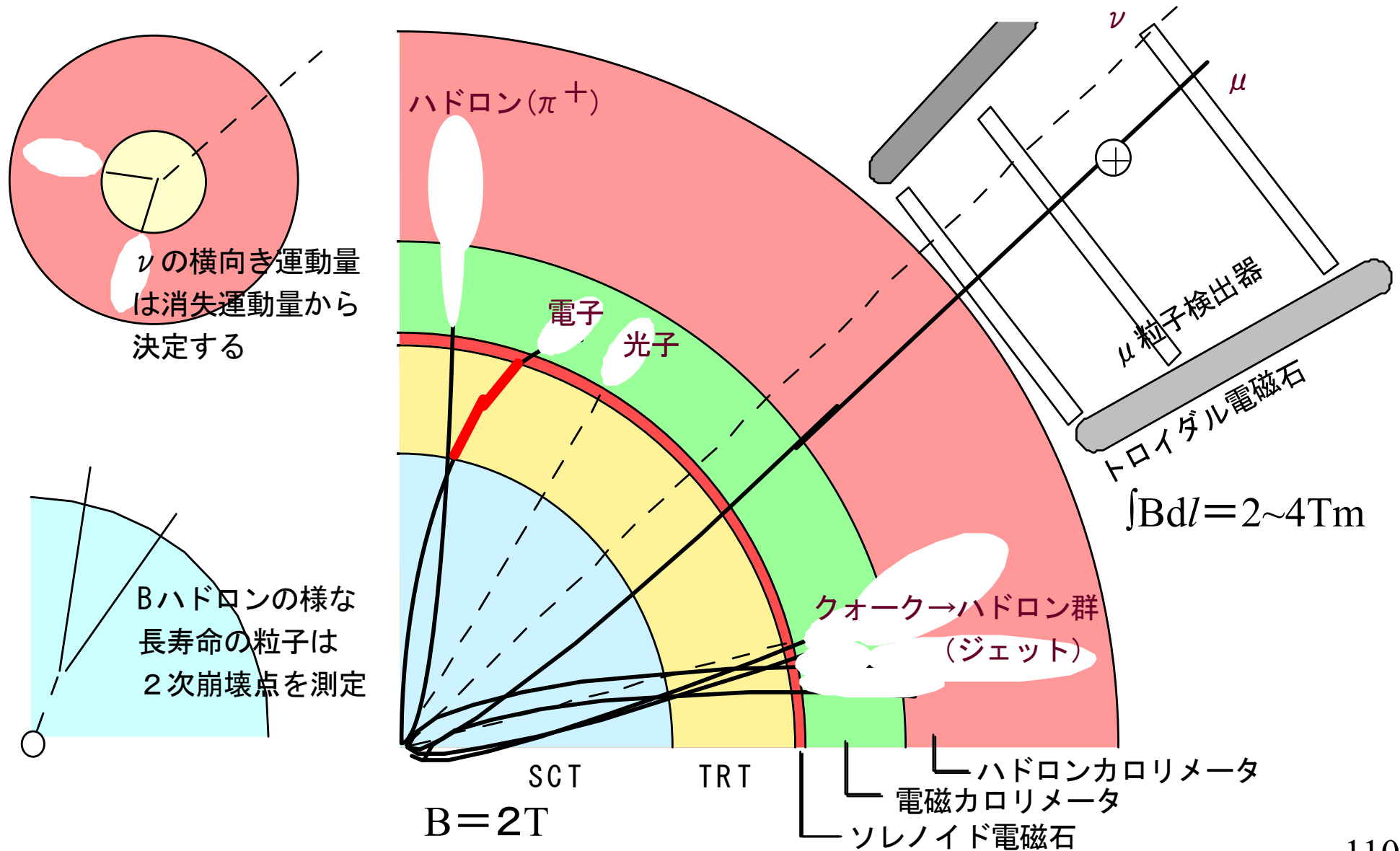


ATLAS (A Toroidal Apparatus)検出器



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

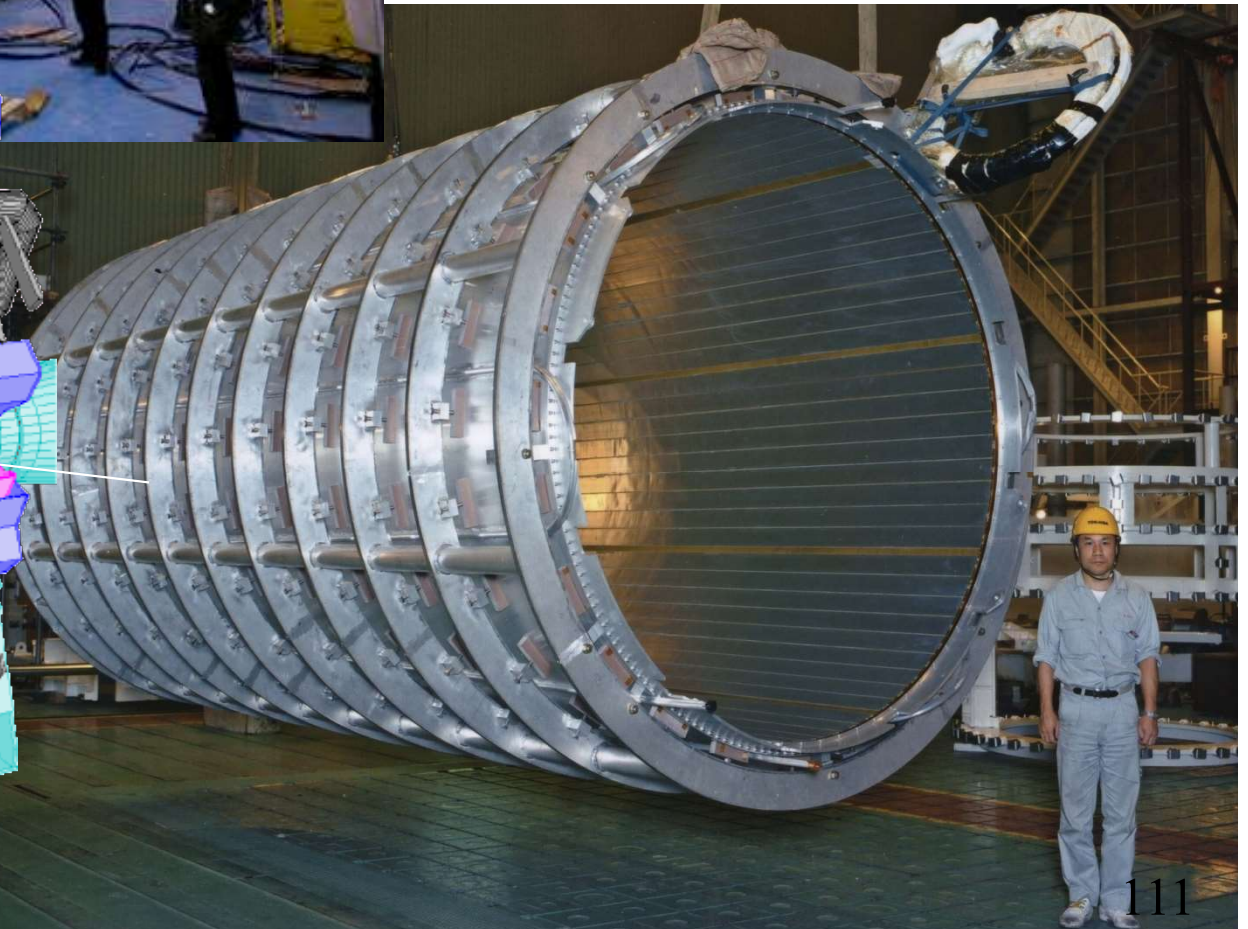
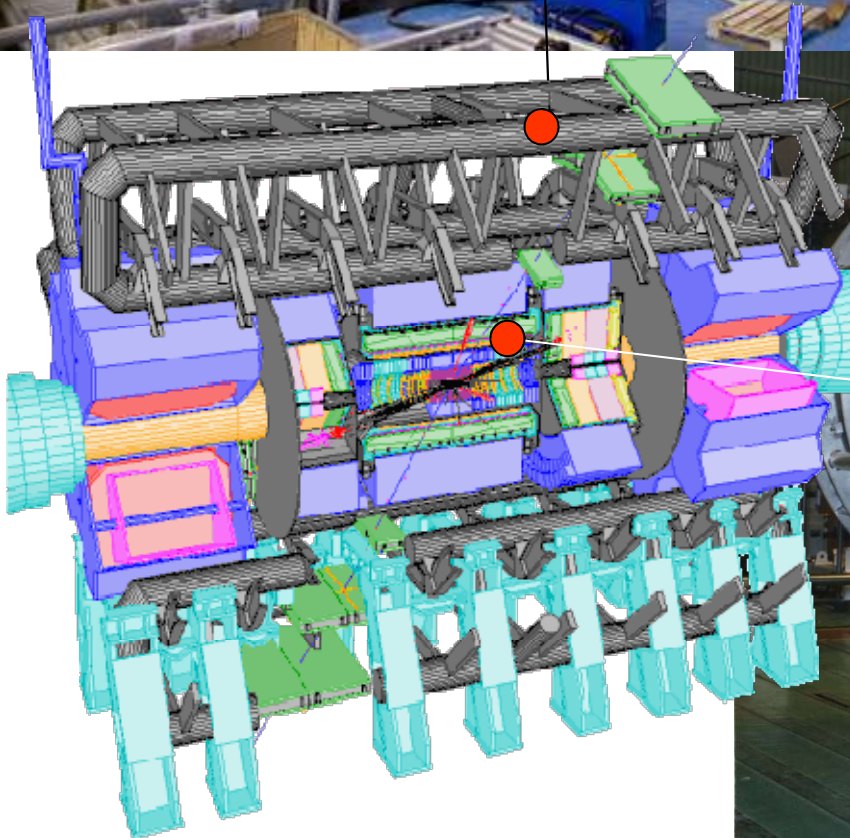


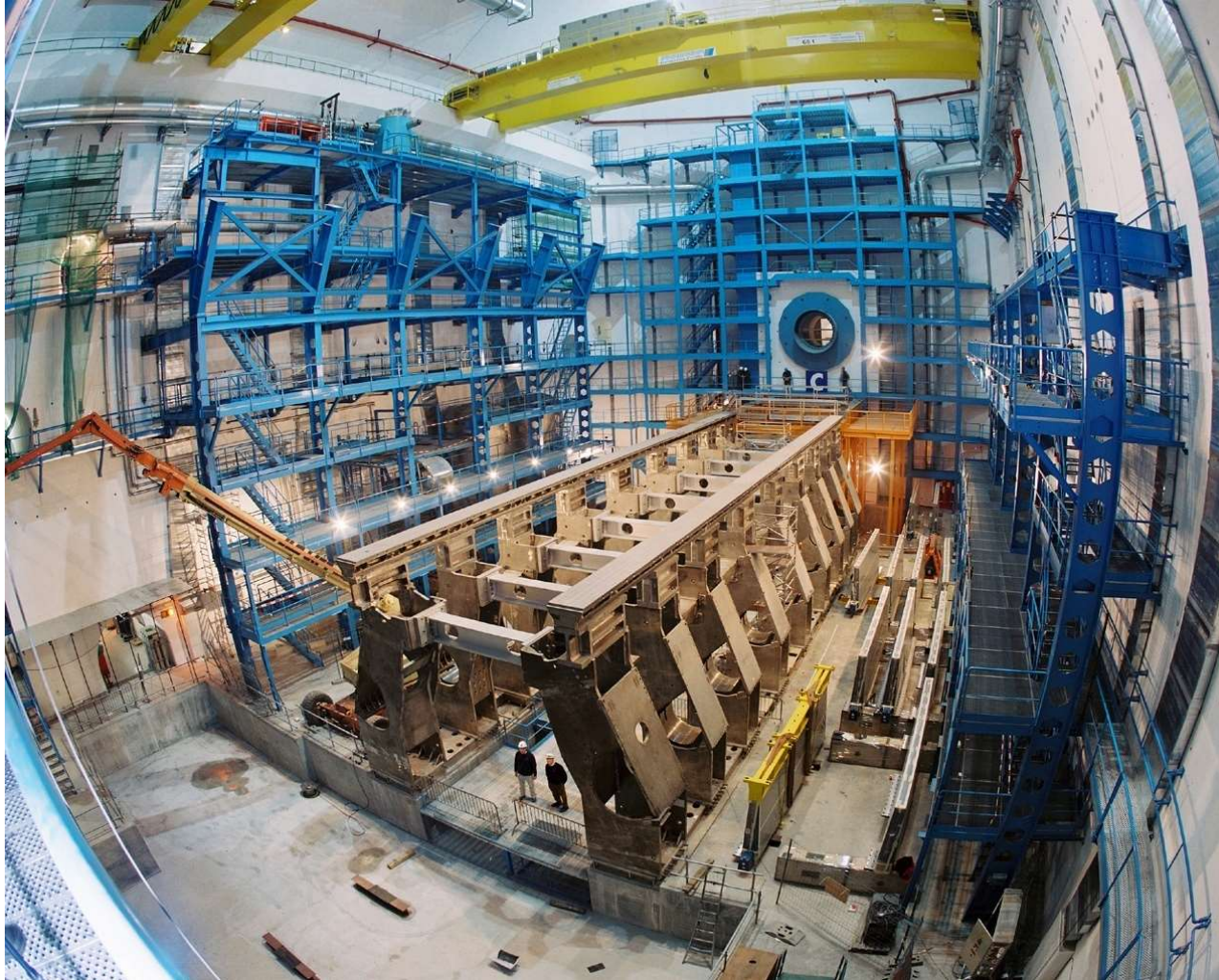
荷電粒子の運動量測定

超伝導電磁石で軌道
を曲げる(Lorentz力)

$$p = 0.3 B \rho$$

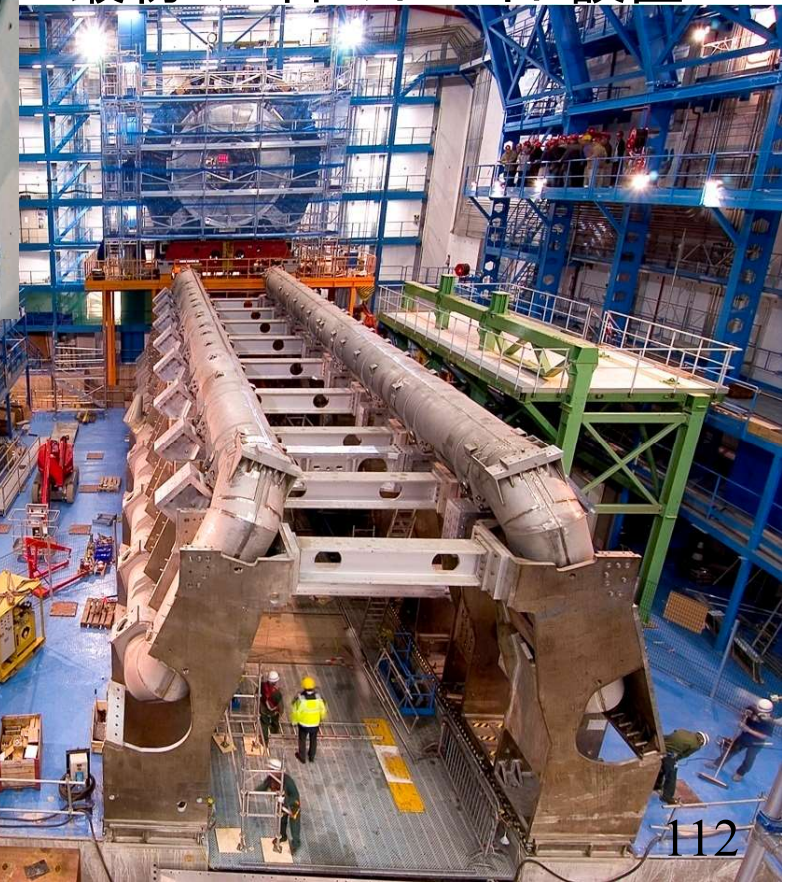
GeV/c T m



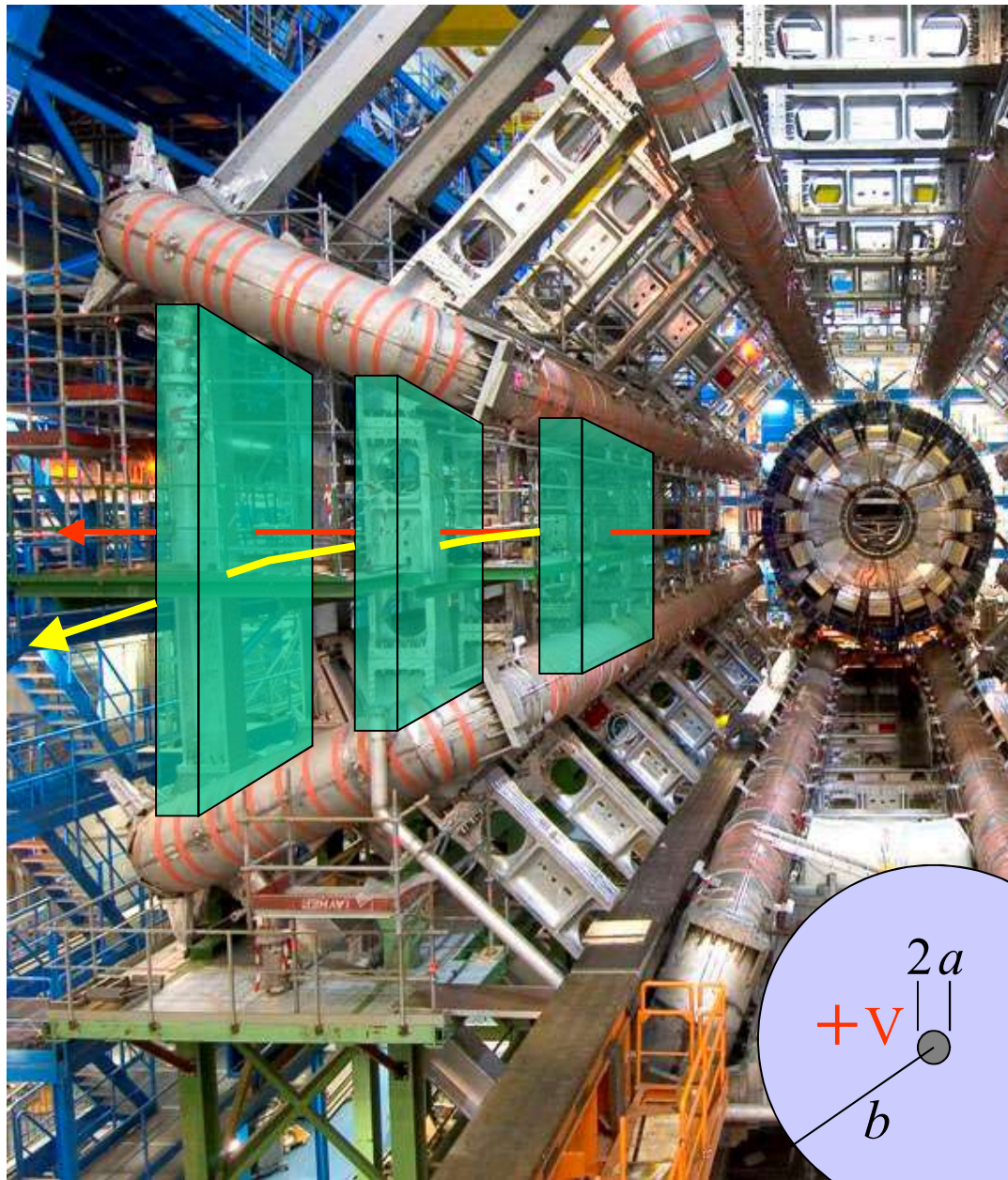


検出器を載せる台

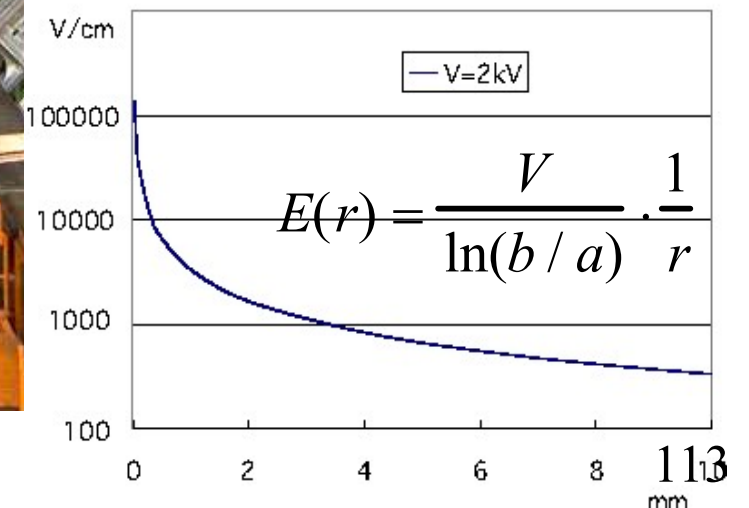
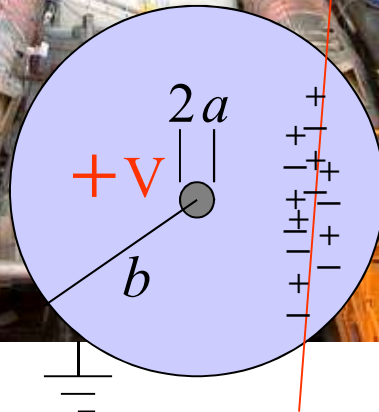
2005年
最初の2台のトロイド設置



μ 粒子検出器



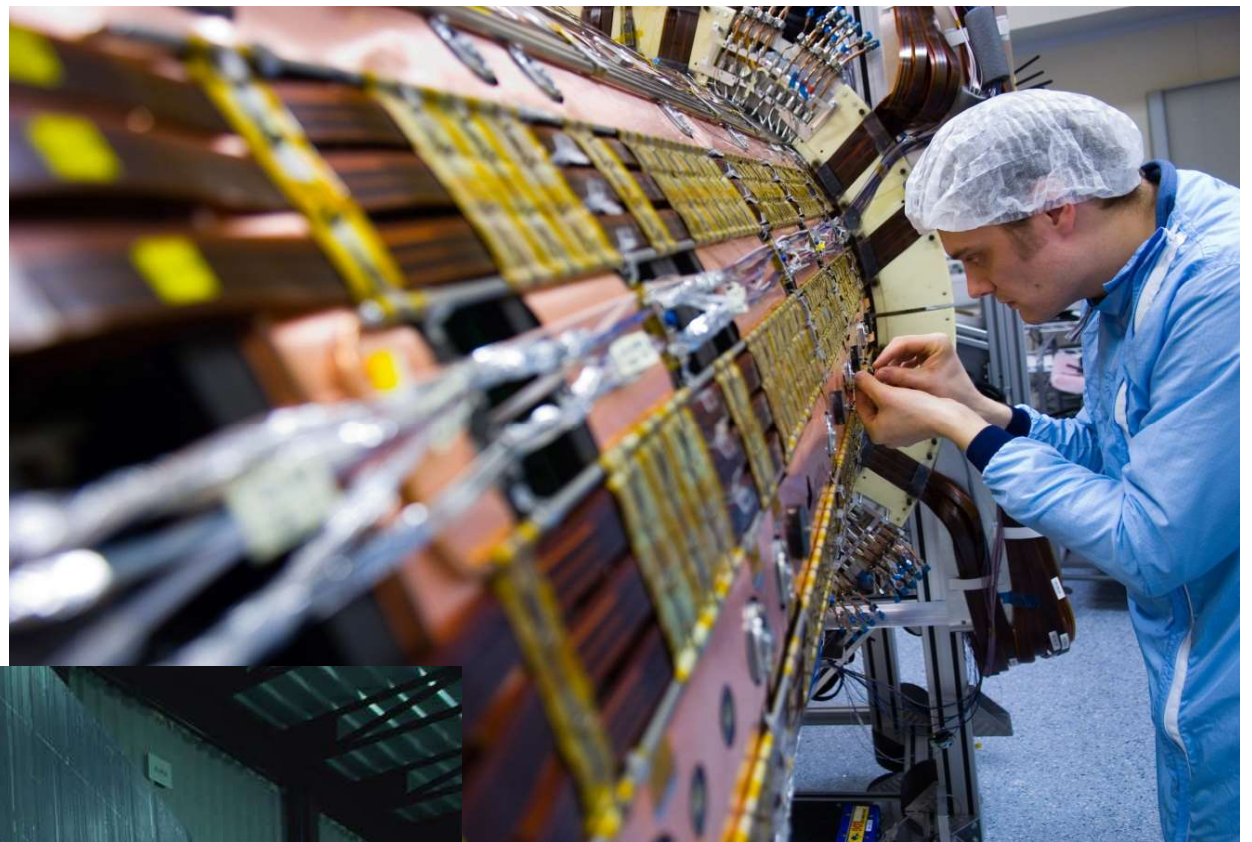
2005年10月に8つのトロイドが設置



飛跡検出器

(tracker)

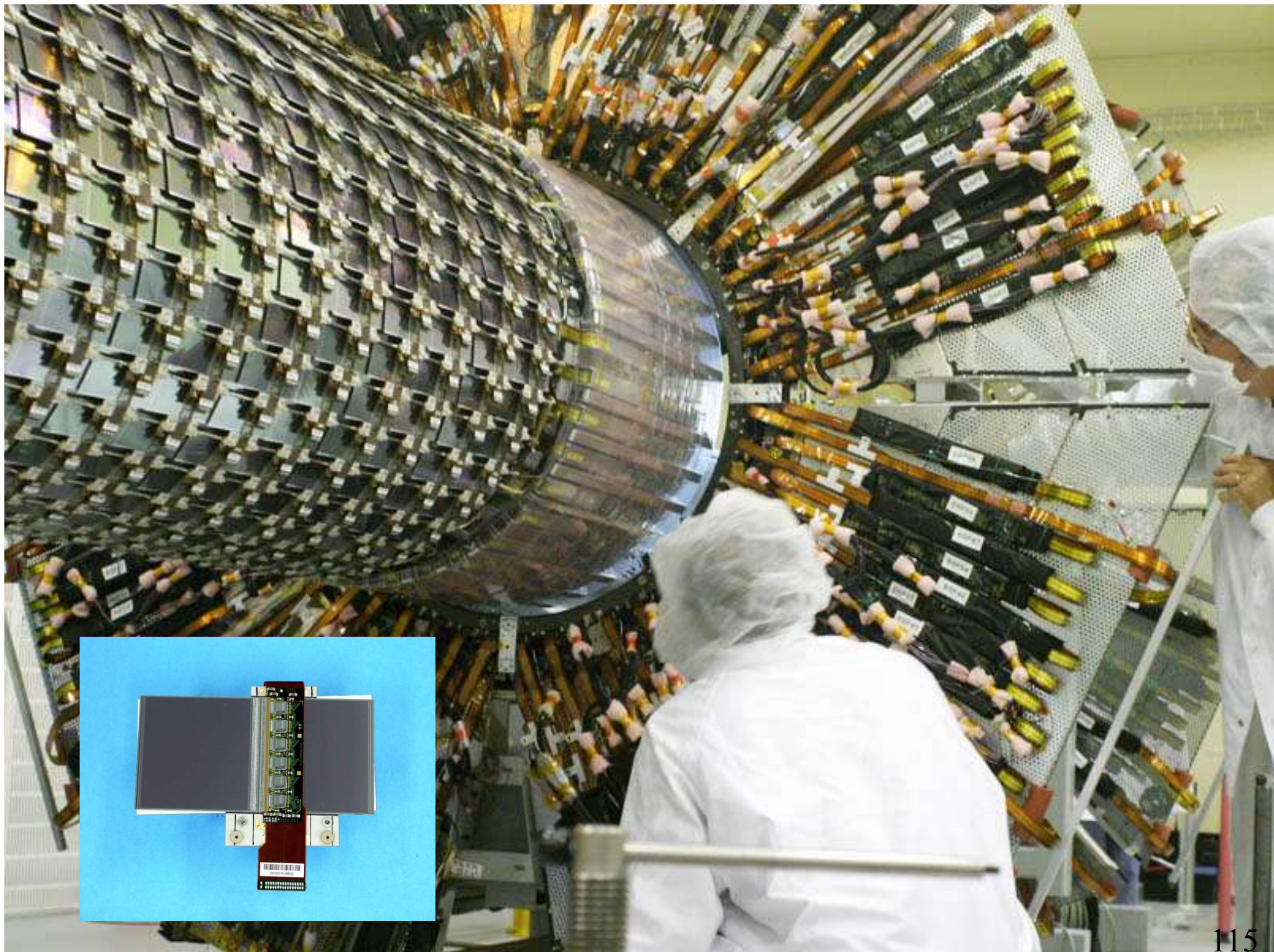
気体や半導体を通過する
荷電粒子の位置を測定



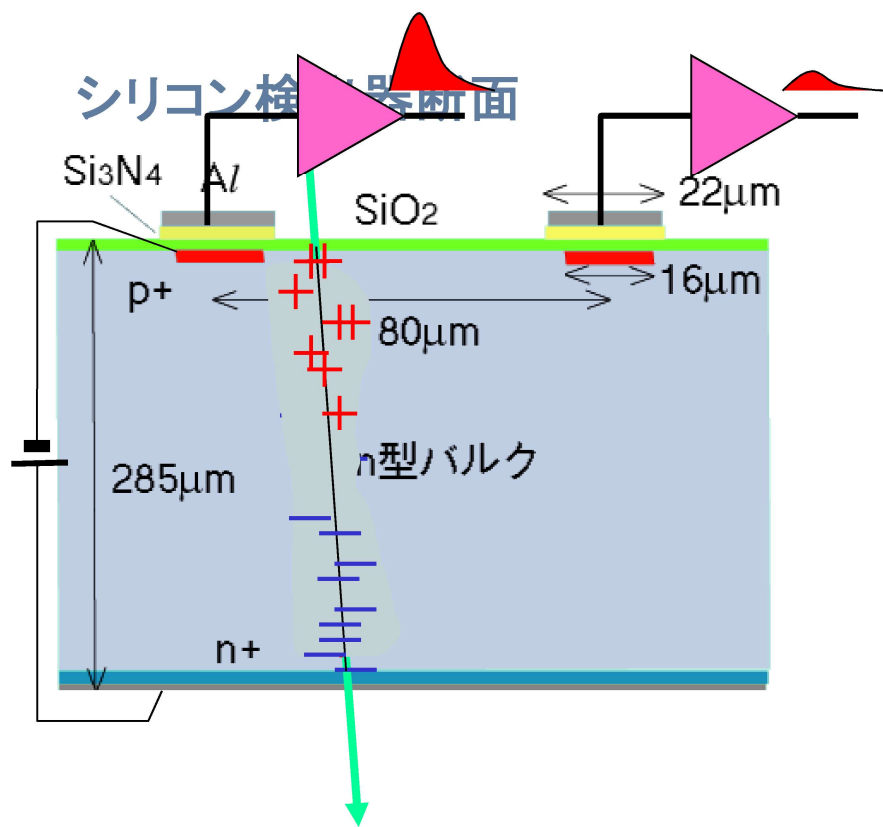
エネルギー測定器

(calorimeter)

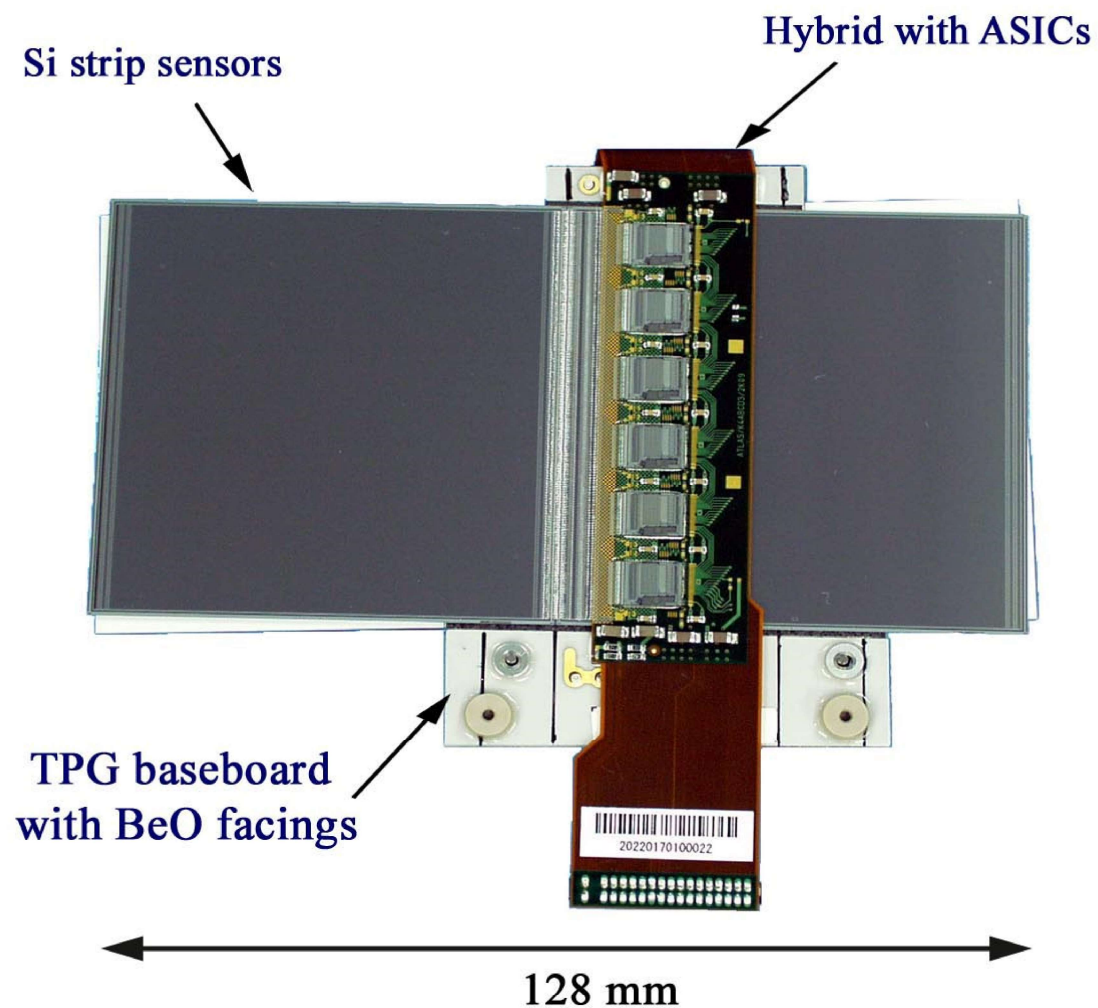
金属で粒子を止め、発生
する信号を読み取る

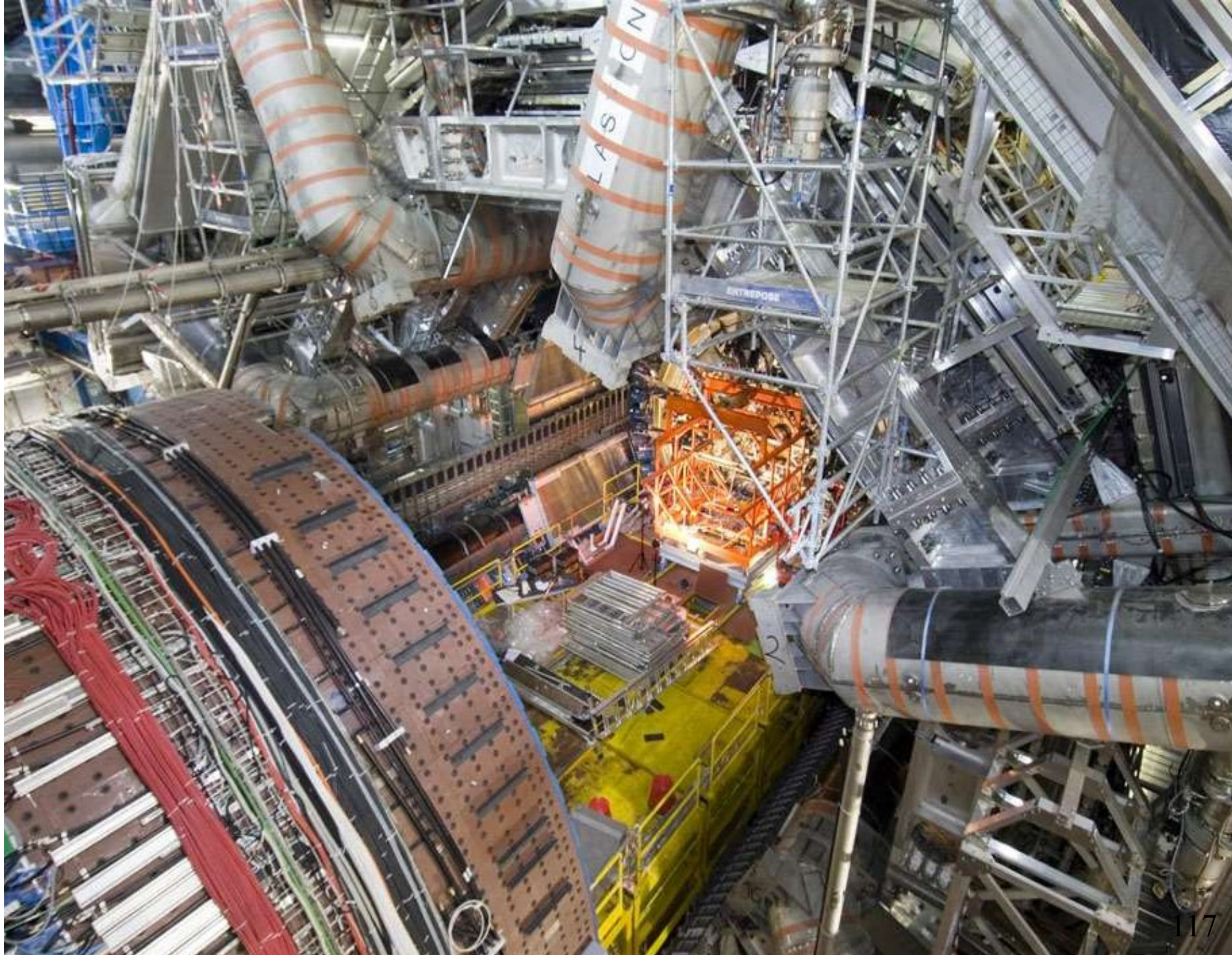


精密に粒子飛跡を捕らえる半導体検出器



シリコン半導体を使った粒子検出器



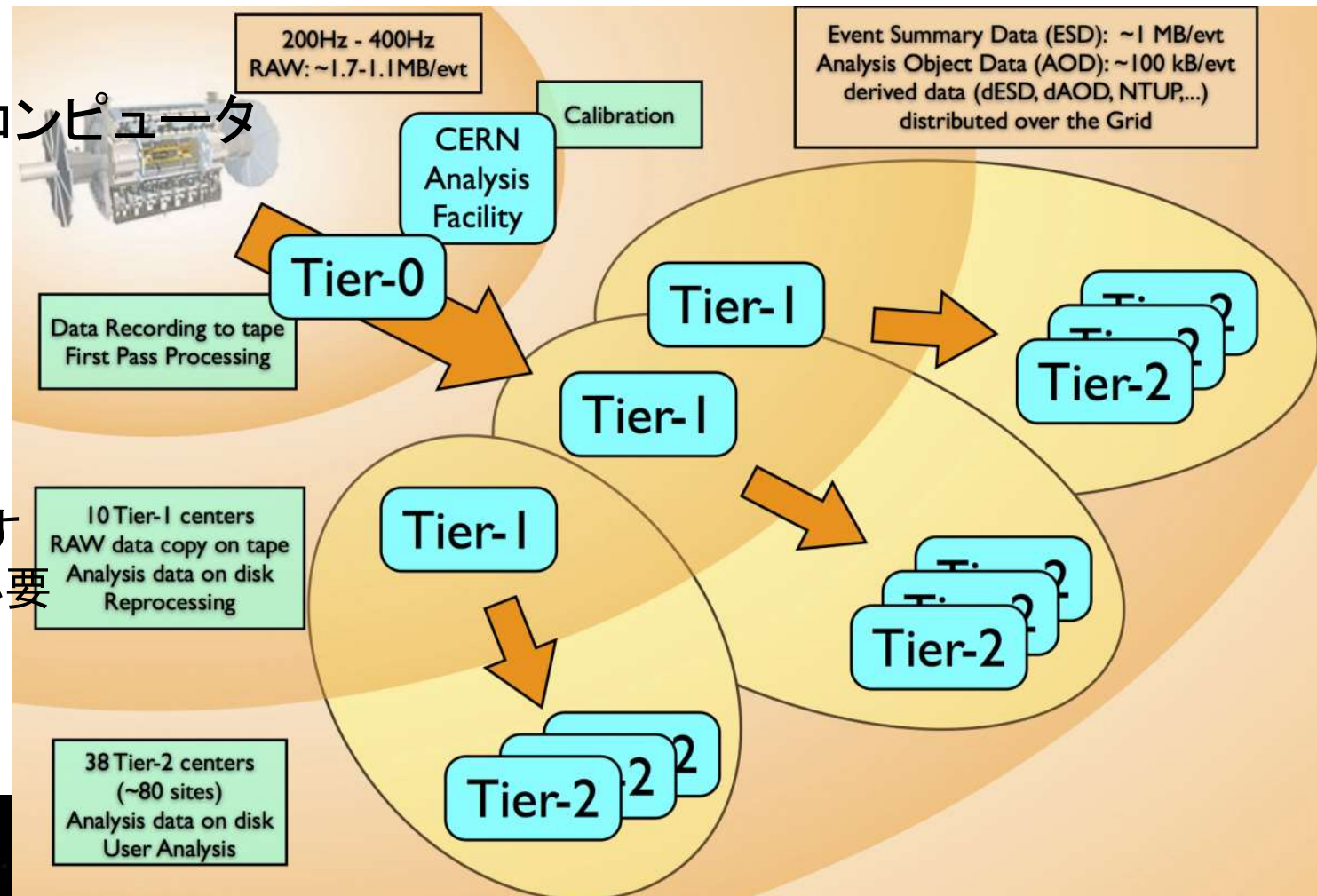






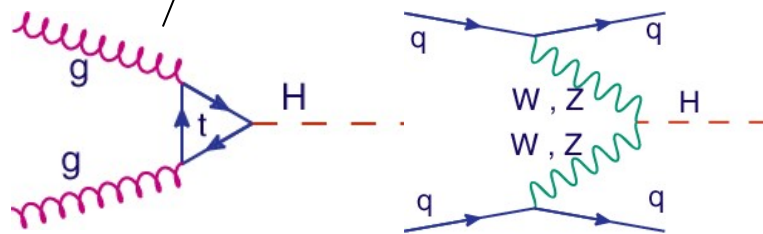
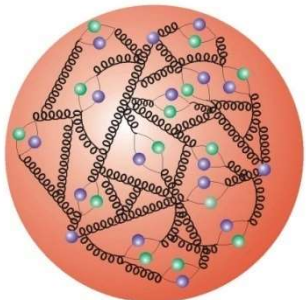
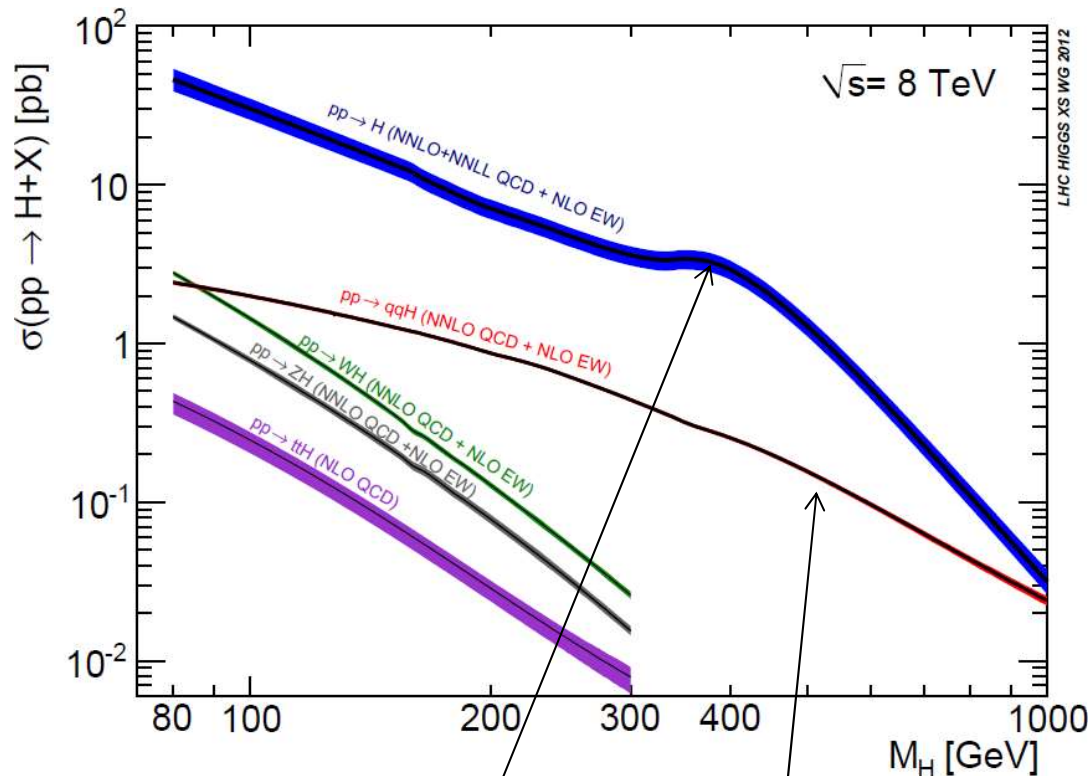
データは世界中のコンピュータ
で分散解析する

実験データ量：
10秒でDVDを書き尽くす
最低5000CPUが常時必要



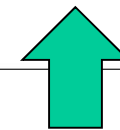
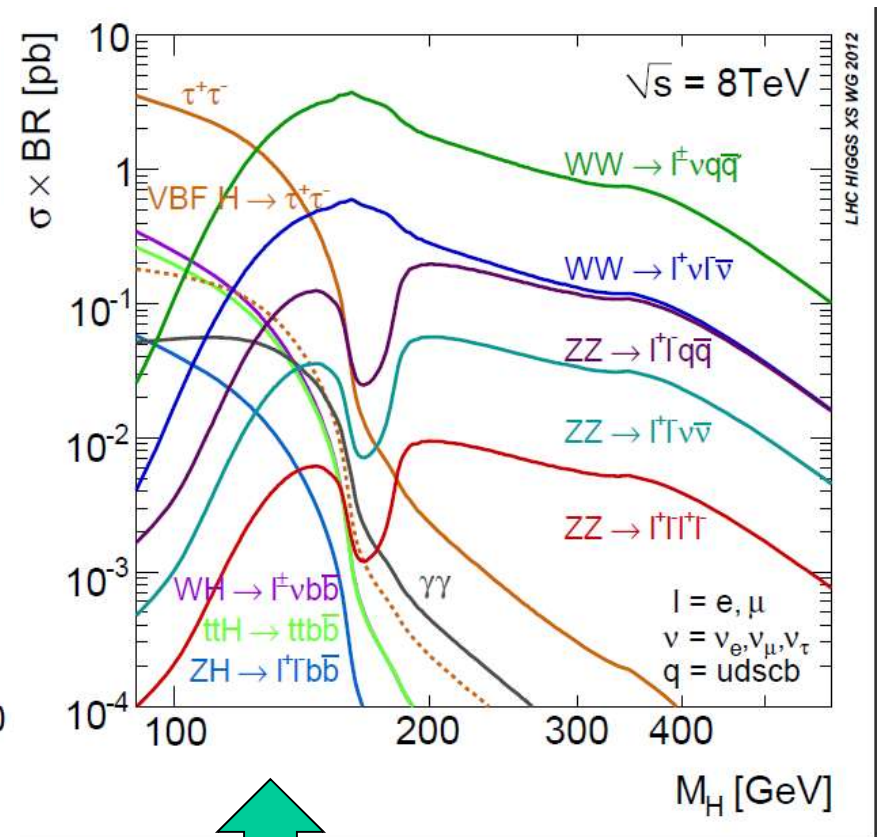
LHCでどのように探索するか

Higgsの生成



LHC:陽子を4TeVまで加速して衝突させる
陽子中のquark, gluonがHiggsを生成する
 $gg \rightarrow H$ (10pb) : ATLASで50000個生成
 $qq \rightarrow qqH$ (1.2pb) : 6000個生成

Higgsの生成x崩壊



- $H \rightarrow WW$ (ν のため質量がぼやける)
- $H \rightarrow \tau\tau$ (Bkg大, 分解能可)
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow l\bar{l}q\bar{q}$ (バックグラウンド大)
- ◎ $H \rightarrow \gamma\gamma$ (Bkg大, 分解能優)
- ◎ $H \rightarrow ZZ \rightarrow l\bar{l}l\bar{l}$ (Bkg小, 分解能優)

ATLAS EXPERIMENT

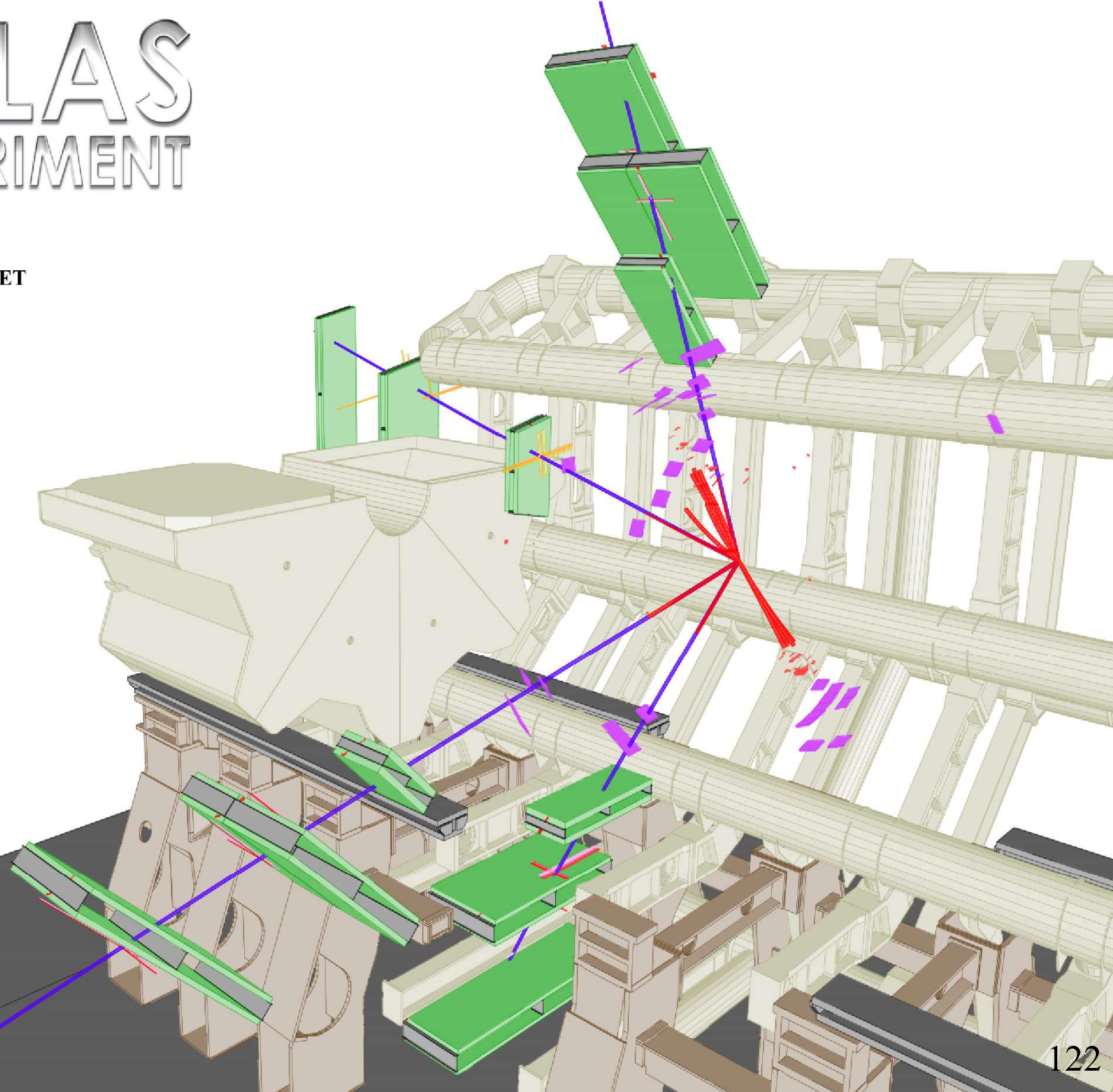
Run Number: 189280,
Event Number: 143576946
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

EtCut>0.3 GeV
PtCut>3.0 GeV
Vertex Cuts:
Z direction <1cm
Rphi <1cm

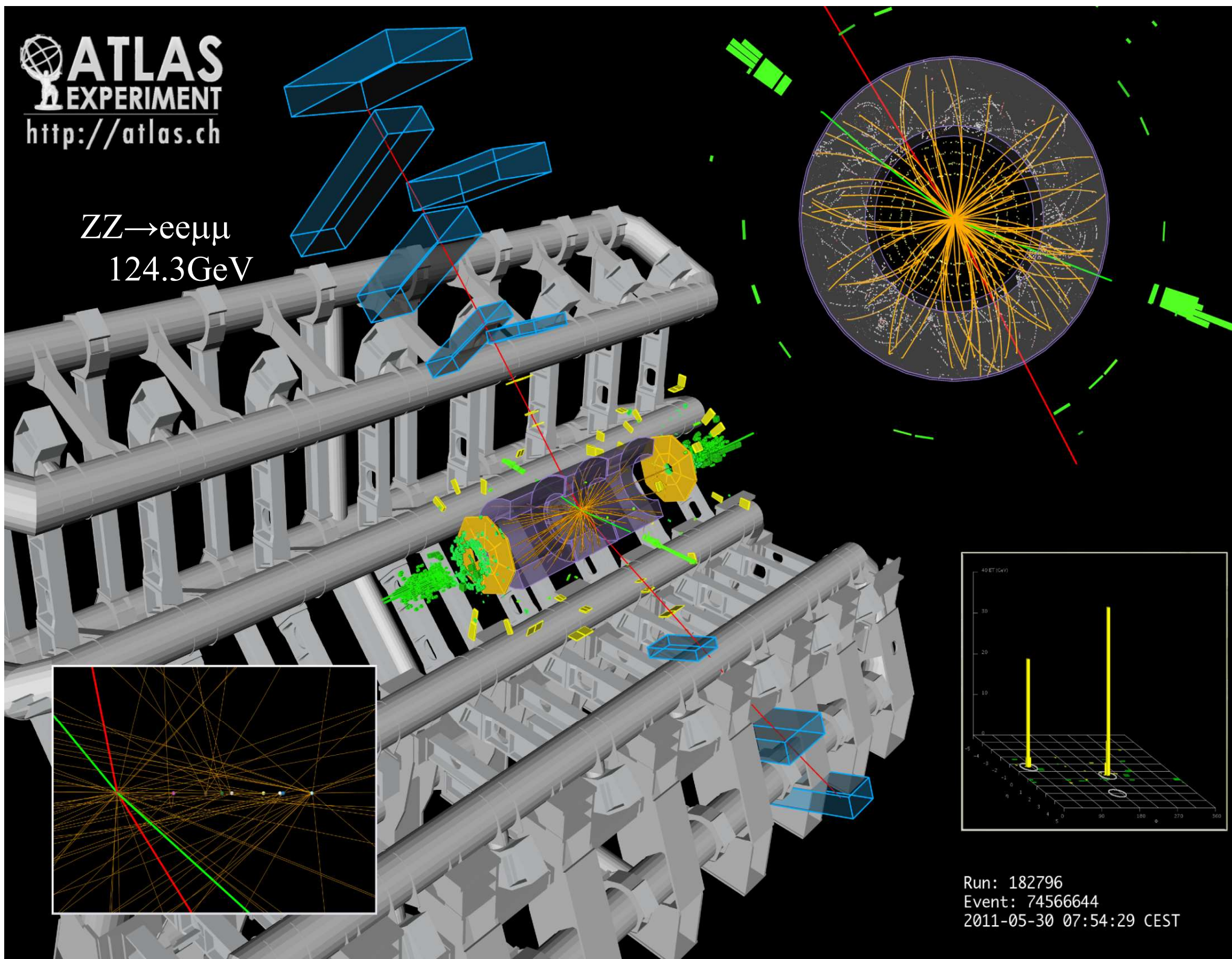
Muon: blue
Cells: Tiles, EMC

$ZZ \rightarrow \mu\mu \mu\mu$
124.6 GeV

Persint



$ZZ \rightarrow e e \mu \mu$
124.3 GeV

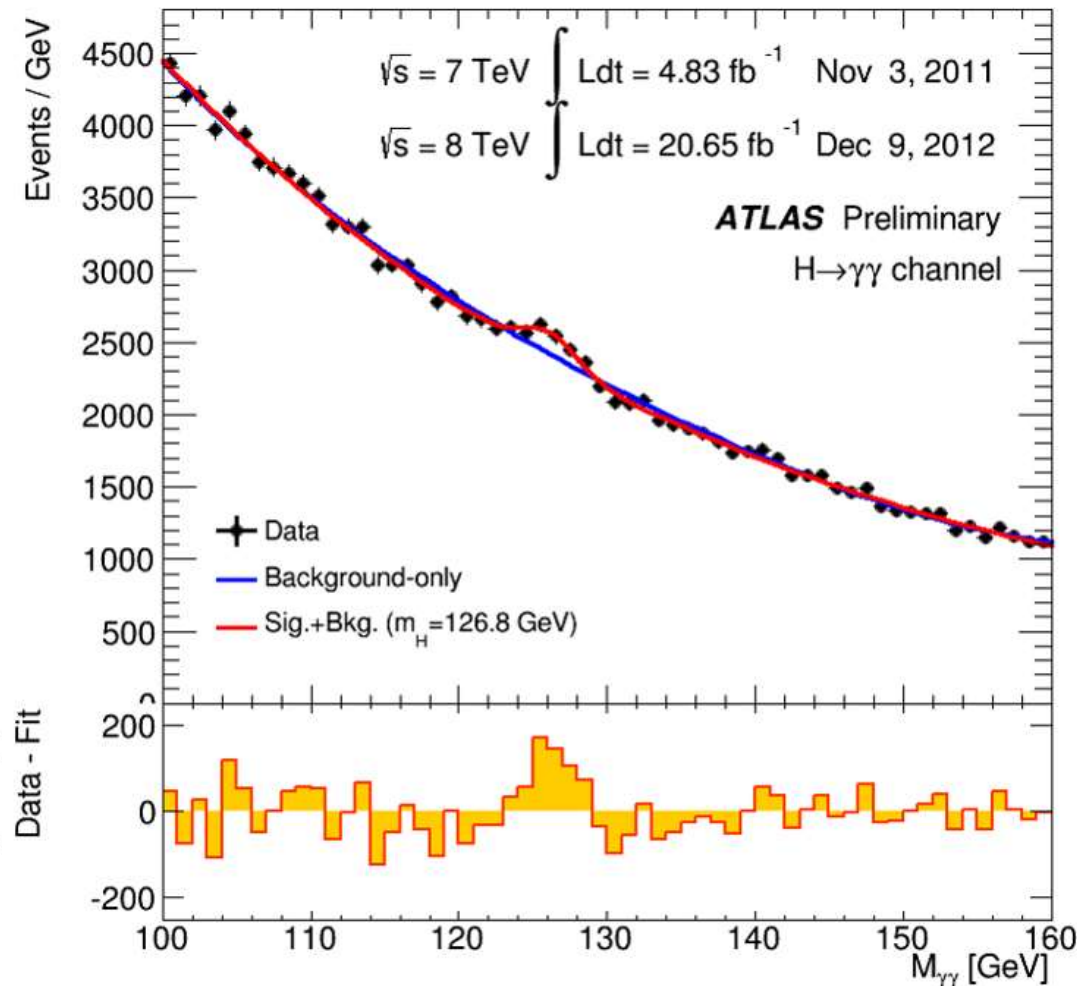
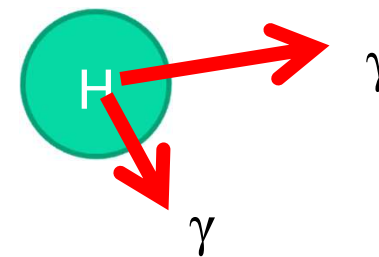


Run: 182796
Event: 74566644
2011-05-30 07:54:29 CEST

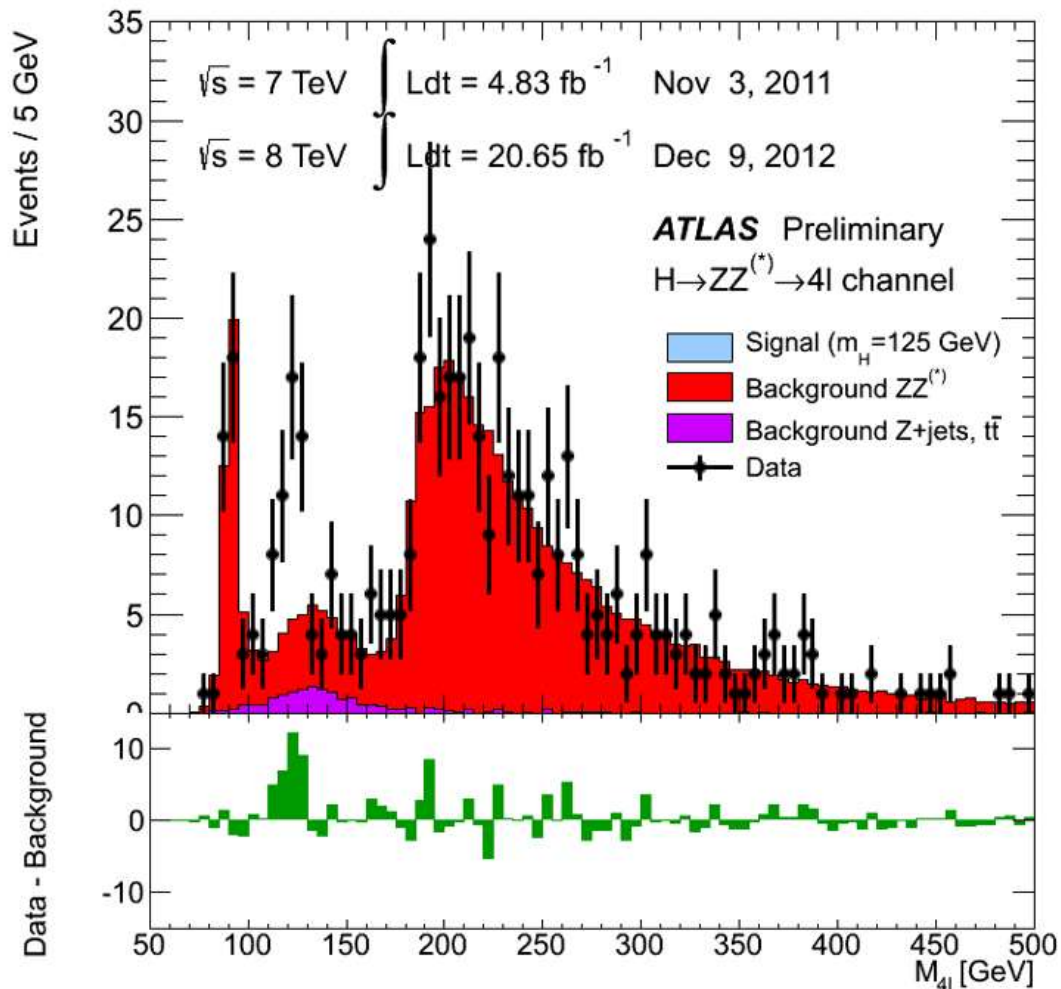
$\gamma\gamma$ に崩壊する粒子を探す

γ 線のエネルギーは精度良く測定できるので、2つの γ 線を捉えて、親の質量を計算することで新粒子を見つける能力が高い。

殆どは、バックグラウンドと呼ぶ他の過程から発生する γ や、 γ と間違えて測定したもの。
バックグラウンドは質量ピークを作らないので、連続な関数で評価すると、差の分布126GeVあたりにピークが観測された。



2つのZ粒子に崩壊する粒子を探す

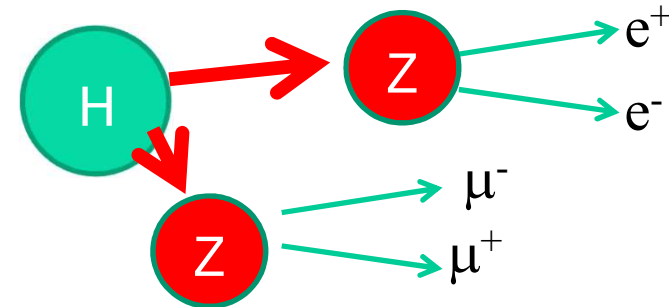


2つのZ(標準模型で力を伝える粒子～重い γ)に崩壊し、不安定なZは様々な粒子ペアに崩壊するが、運動量測定精度に優れた電子・陽電子ペアかミュー粒子ペアに崩壊するモード

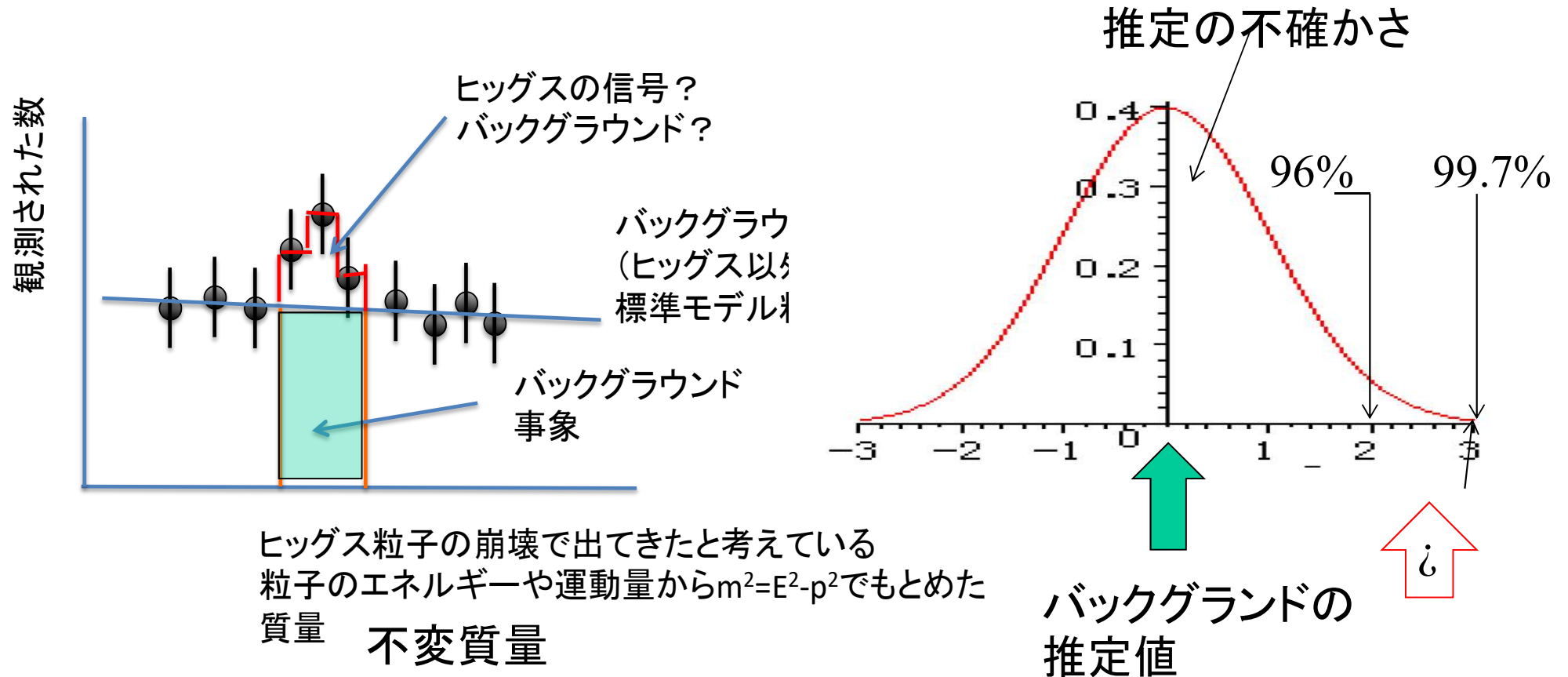
誤測定する(紫)確率は小さいが、別の過程でZZが生成されることがある(赤)

バックグラウンド＝紫＋赤

⇒ヒッグスの質量が125GeVあたりに期待される数の超過が見られる



信号の有意性：光子2つがある事象 $\Rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$ ？



バックグラウンドのふらつき：標準偏差 σ

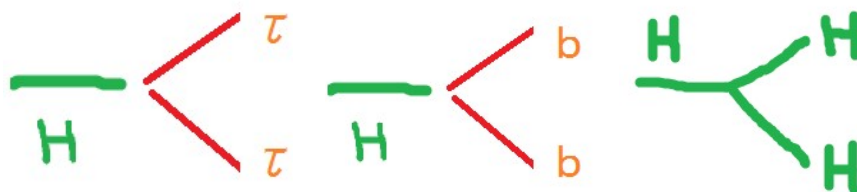
「発見Discovery」 $> 5\sigma$ (ふらつきで起きる確率 100万分1以下)

「兆候Evidence」 $> 3\sigma$ (ふらつきで起きる確率 0.3%)

分かった事・今調べている事

標準模型が予測する生成割合
一致するか？

1. “H” $\rightarrow\tau\tau$ や $\rightarrow bb$ を測定し、クォーク
やレプトンにも質量を与えるか？
ヒッグスにも？

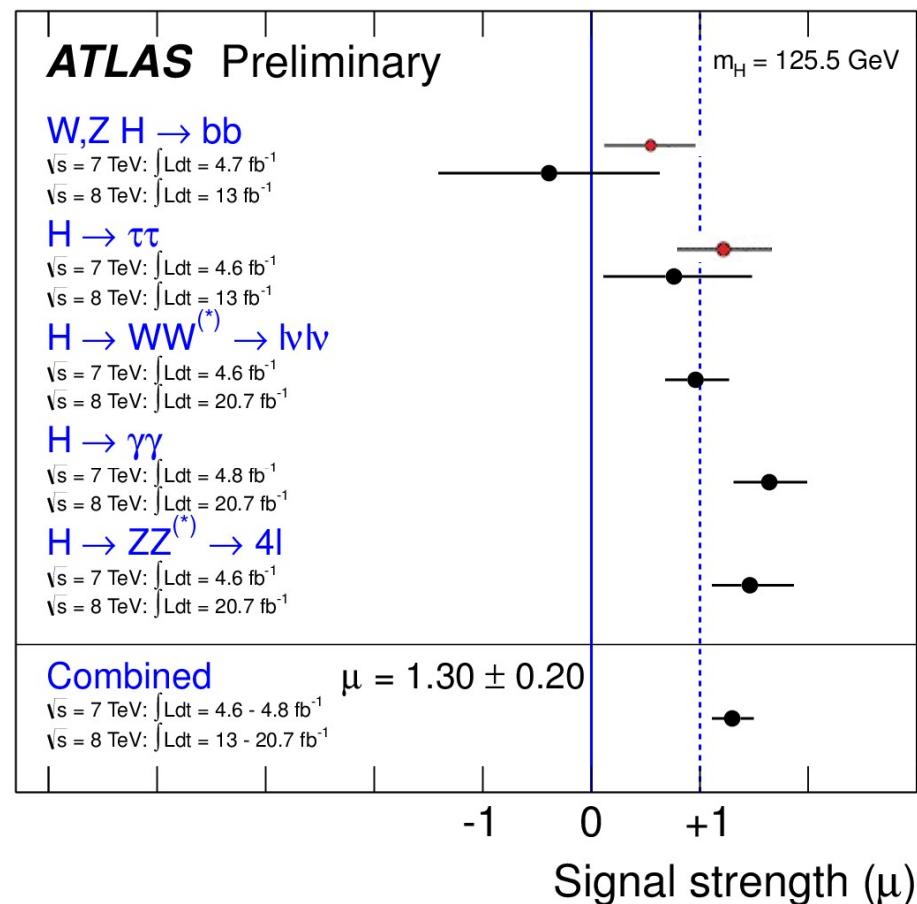


2012 D

2014D

\Rightarrow すべての粒子の質量の起源である
か？

2. 他にもヒッグスはないか
(SUSYでは他にあることを予言)



「質量の起源」へのプロセス

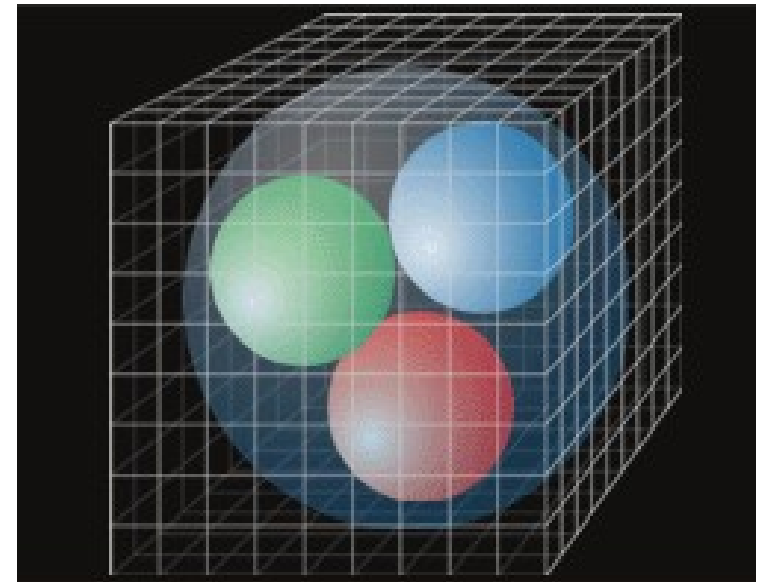
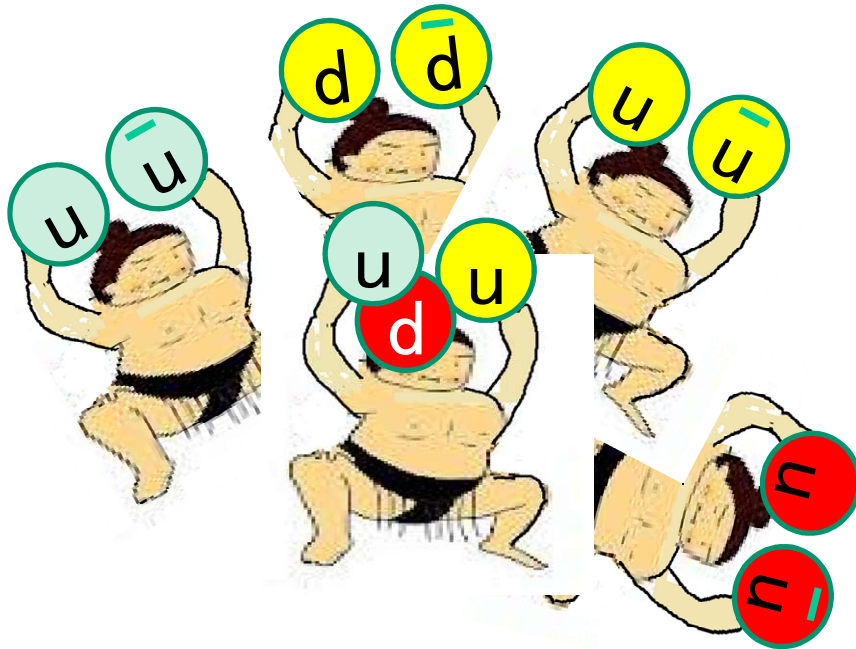
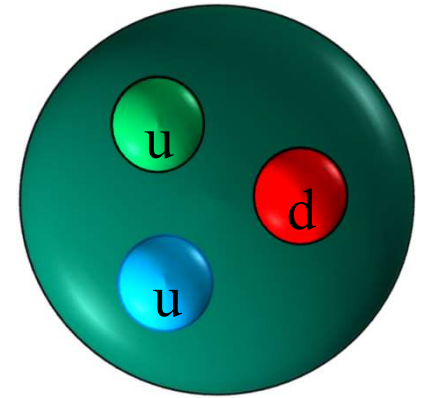
- 1957 **BCS** 電子対(Cooper対)の凝縮が起こることで超伝導を説明
対称性の破れた状態がよりエネルギー的に安定
- 1960 **南部**「自発的対称性の破れ」BCS理論をゲージ不変を満たす理論へ
ー「真空」が対称性の破れた状態である
フェルミオンの質量は自発的対称性の破れで獲得できる
自発的対称性の破れでNGボゾンが発生
- 1964 **Brout,Englert/Higgs/Guralnik,Hagen,Kibble**が相対論的場の量子論に
質量0のNGボゾンは、ゲージ粒子のスピン0成分＋ヒッグス
- 1967/68 **Glashow-Weinberg-Salam**が標準模型(電弱統一理論)
- 1973 **Gargamelle** 中性カレント(Z^0)の検出
- 1983 **UA1/UA2** W, Z^0 の検出
- 2012 **ATLAS/CMS** ヒッグスボソンの検出

ところで、あなたの質量は？

$p=uud$ (陽子は3個のクォークから成る)

- u や d クォークがHiggsから得る質量 $\Rightarrow 10\sim 20\text{MeV}$
- $p\Rightarrow 938\text{MeV}$

QCD(色つき)クォークがあると、周りには多くのクォーク・反クォーク対およびグルーオンが発生しまとわりつく。
 \Rightarrow 重さの98%は真空から引っ張り出されている



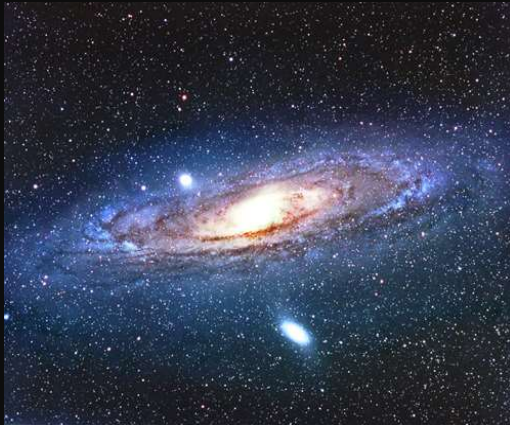
QCD Lattice

陽子や中性子の重さが分かると、人間 $\sim 4\times 10^{27}$ 個の陽子+中性子 $\Rightarrow 70\text{kg}$

では、宇宙の質量は？

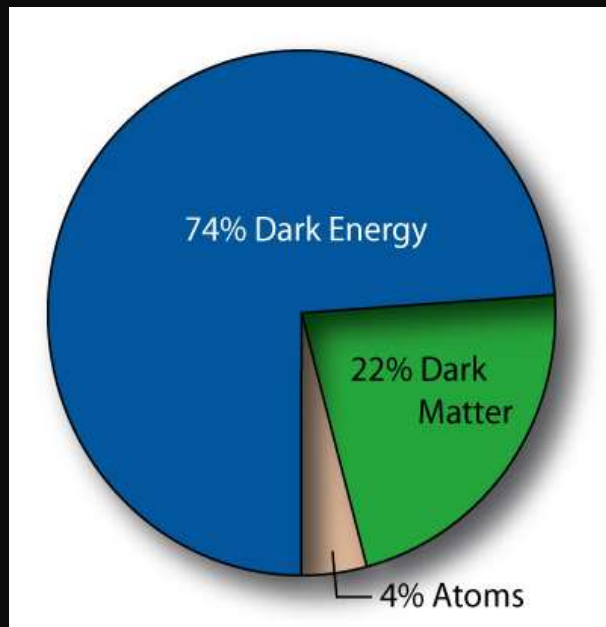
暗黒物質 1930's

ニュートラリーノ,,,
ブラックホール,,,

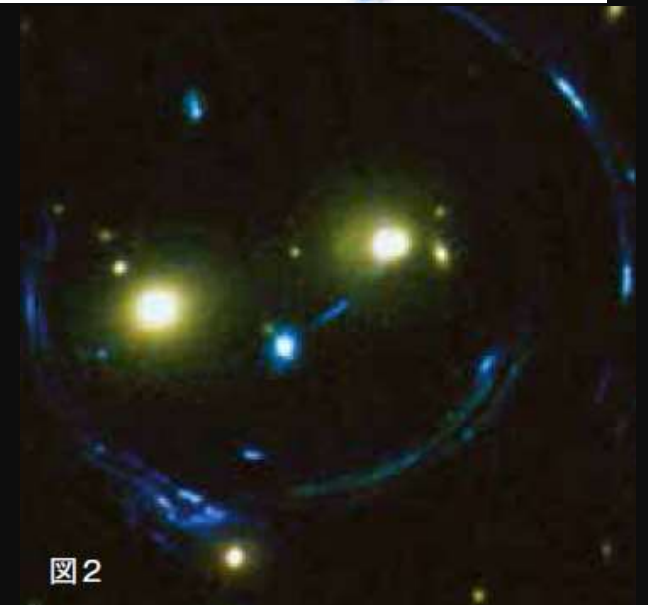
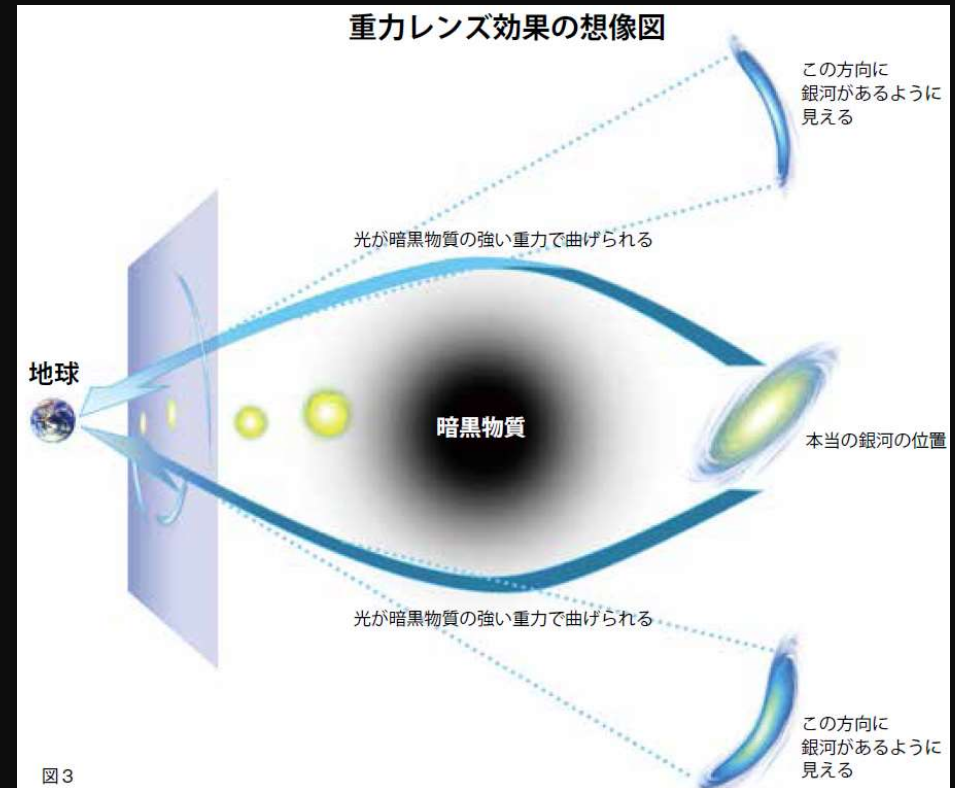


アンドロメダ銀河の回転速度が遅い⇒目に見えない重さ？
(1980)

暗黒エネルギー 1998



重力レンズ効果により
光が曲る。薄青が暗黒物質の分布



ヒッグス粒子発見の意義

「真空」でのものの探索の歴史（成功例）

- 空気（トリチェリー,,,）
- 反粒子（エネルギーのある場から発生する）
- ヒッグス（唯一のスピン0の素粒子）

真空との差を我々は観測する。

真空の「姿」=力学を理解することが素粒子の世界を探ること。

標準模型のすべての粒子を観測（17番目）

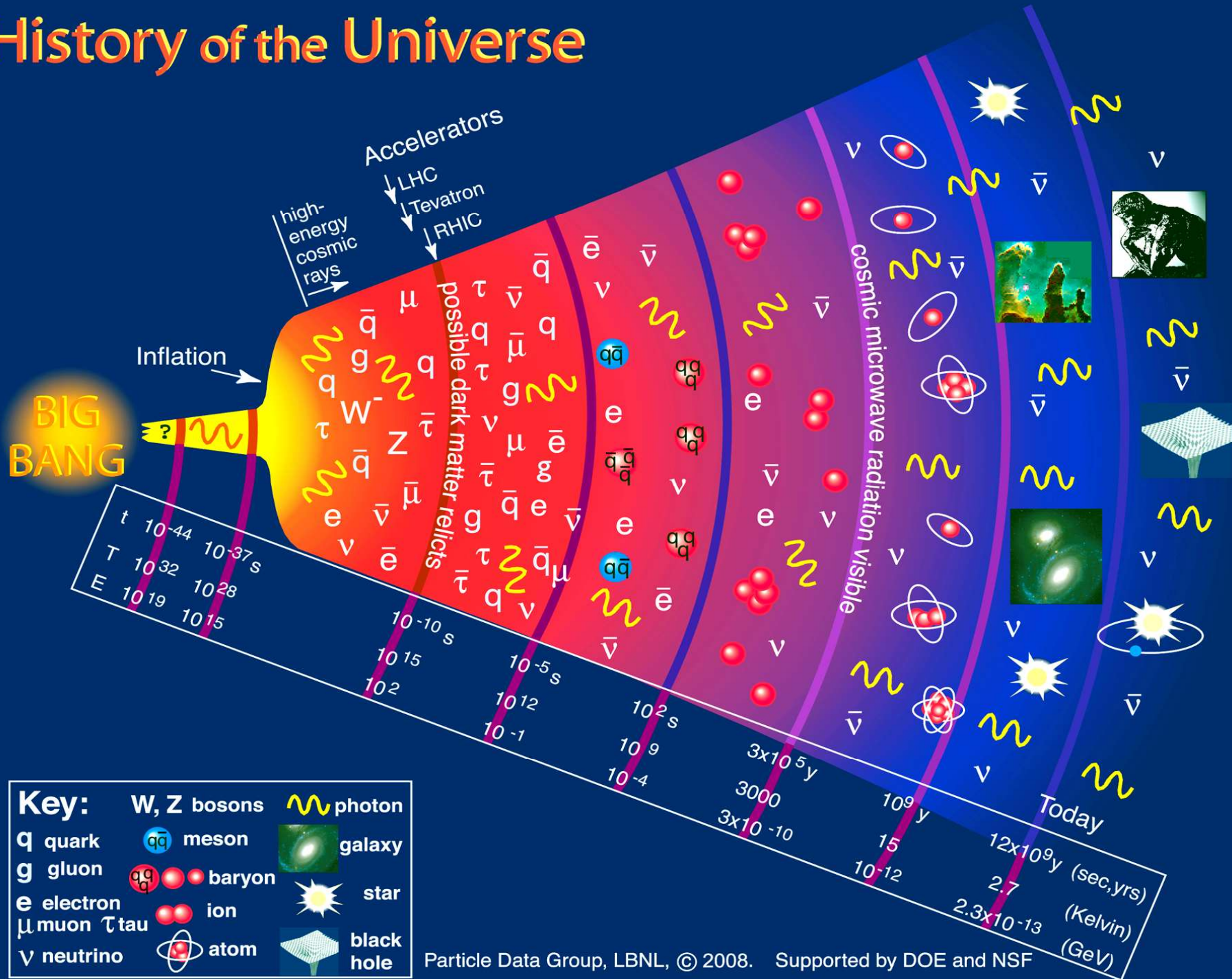
質量の概念

真空を埋めるヒッグス粒子により質量が獲得される。

ゲージ原理を保つ（現代物理の3本柱：相対論、量子論、ゲージ理論）

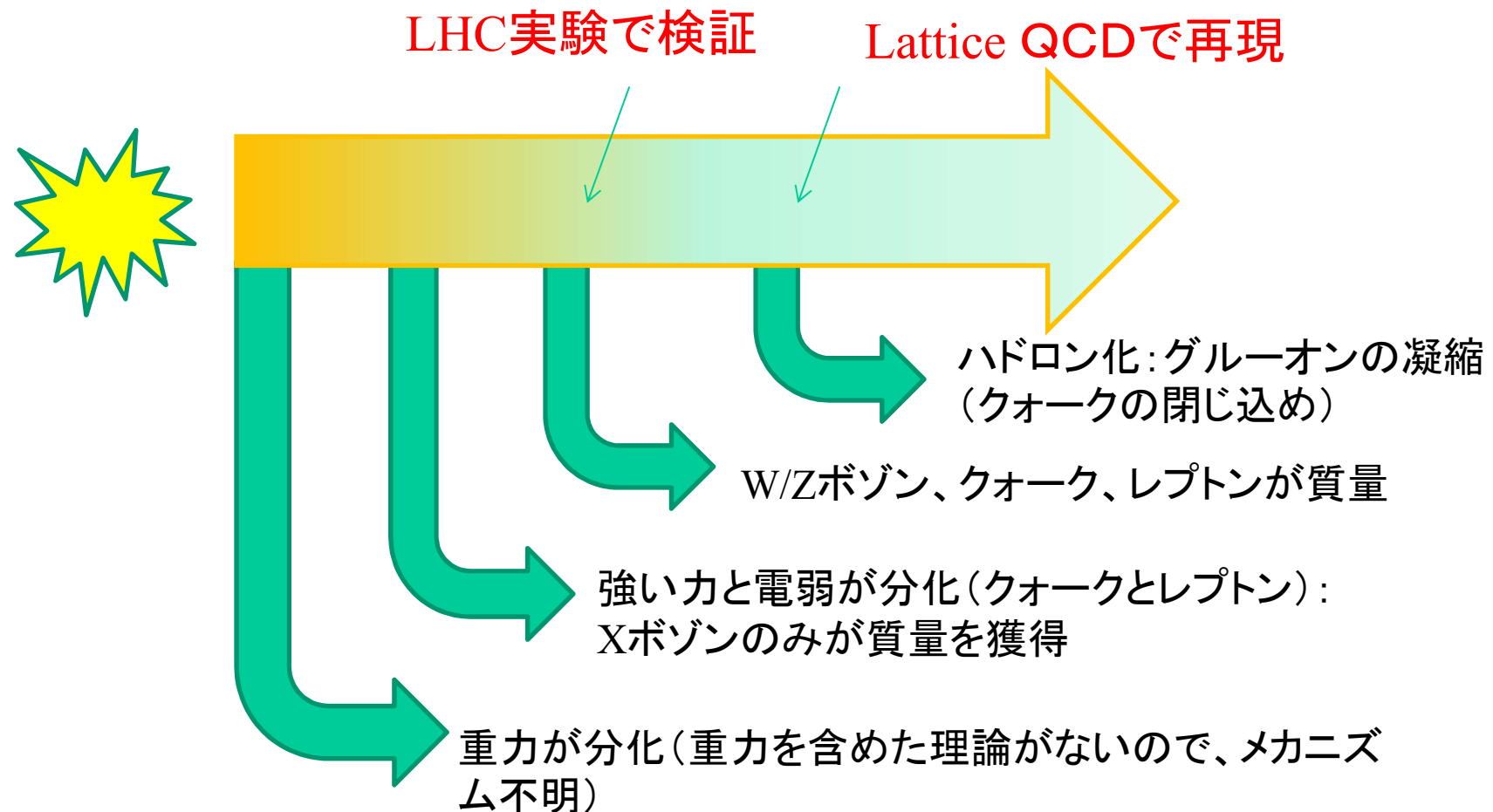
単純な物理法則によって生み出された宇宙が、自発的対称性の破れにより豊かな多様性のある世界を形成した。

History of the Universe



「真空」の相転移：世界の多様化

- ビッグバンにより質量0の粒子、反粒子が生成された。
冷却に従い、真空は何回かの相転移(＝凝縮)をした。



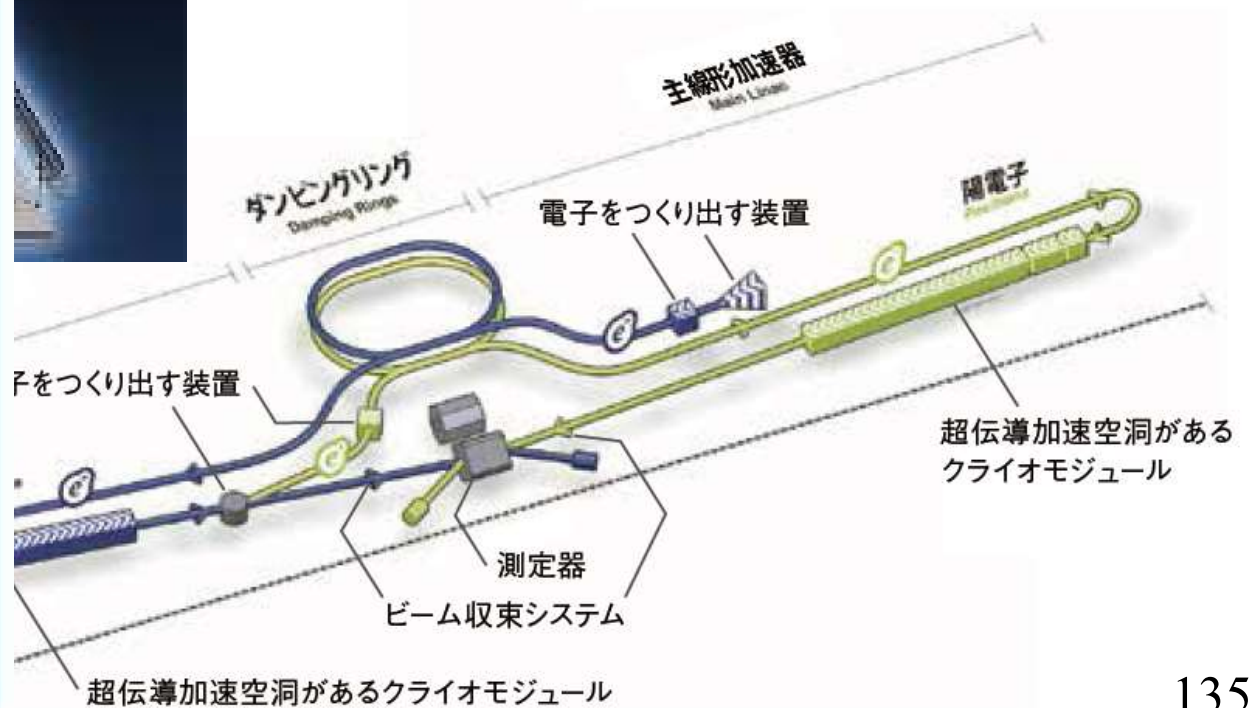
標準模型を超える

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た今、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 γ 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？
- ・ 暗黒物質とは、暗黒エネルギーとは,,,
- ・ ...

ILC-International Linear Collider

ヒッグス粒子の性質を精密に測定する
“どのヒッグスなのか”を解明



最も基礎的な「原理」

原理名	説明	関連物理定数	定数の次元
宇宙原理	宇宙は極めて一様で、距離に比例して膨張	ハッブル定数 $H \sim 100 \text{ km/Mpc}$	T^{-1}
等価原理	重力で定義できる質量と慣性質量が同じ	重力定数 $G \sim 6.7 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-3}$	$L^3 M^{-1} T^{-2}$
光速不変の原理	光速は観測者の状態によらずに一定	光速定数 $c \sim 3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$	LT^{-1}
量子力学原理	運動量 p の粒子は、波長 $2\pi\hbar/p$ の波動として振舞	プランク定数 $\hbar \sim 1.1 \times 10^{-34} \text{ Js}$	$L^2 MT^{-1}$

原理定数が含む基本量

半径 r での膨張速度<光速 $Hr < c$: $r < 100$ 億光年 (宇宙の年齢137億年)

(ハッブル定数を用いない長さ) $[G\hbar/c^3]^{1/2} \sim 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$ (プランク長)

これよりちいさな粒子はない: 粒子描像の限界

重力が関わってくる: 量子重力は破たんする