

物質と時空の謎を探る

2002年10月19日

公開講演

東京大学素粒子物理国際研究センター

駒宮幸男

素粒子物理学 ↔ 宇宙論

極微の世界

壮大な宇宙

素粒子物理 宇宙の理を知りたい。

{ 物質の基本単位は？
究極の法則は？ ドグマ: 基本法則は単純

宇宙との関連

ビッグバン直後の初期宇宙(高エネルギー-高圧の世界)

現在の加速器では宇宙創成後 10^{10} 秒まで遡れる。

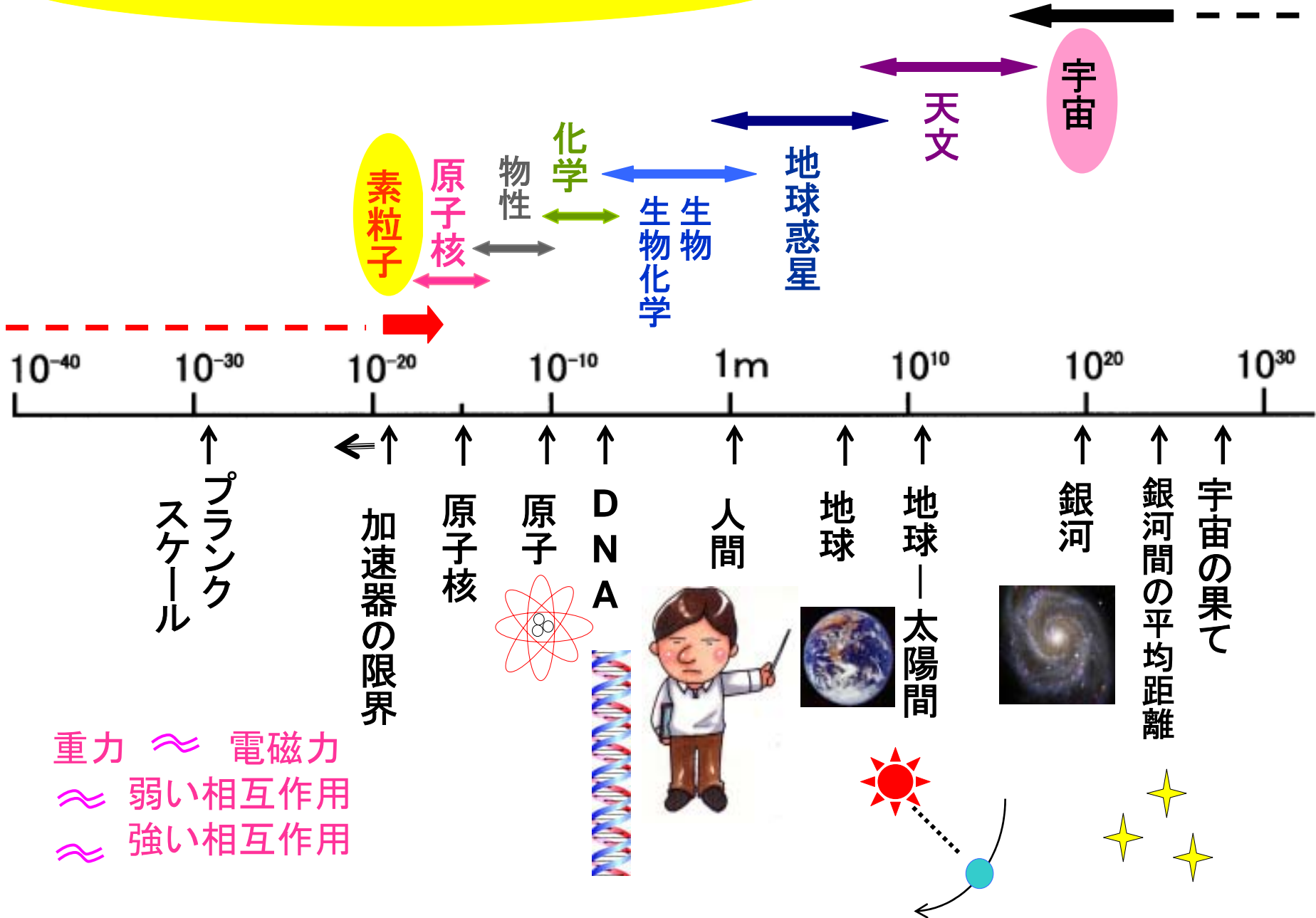
最近の宇宙観測データ ⇒ 宇宙のエネルギー組成

暗黒エネルギー (~2/3) 暗黒物質 (~1/3)

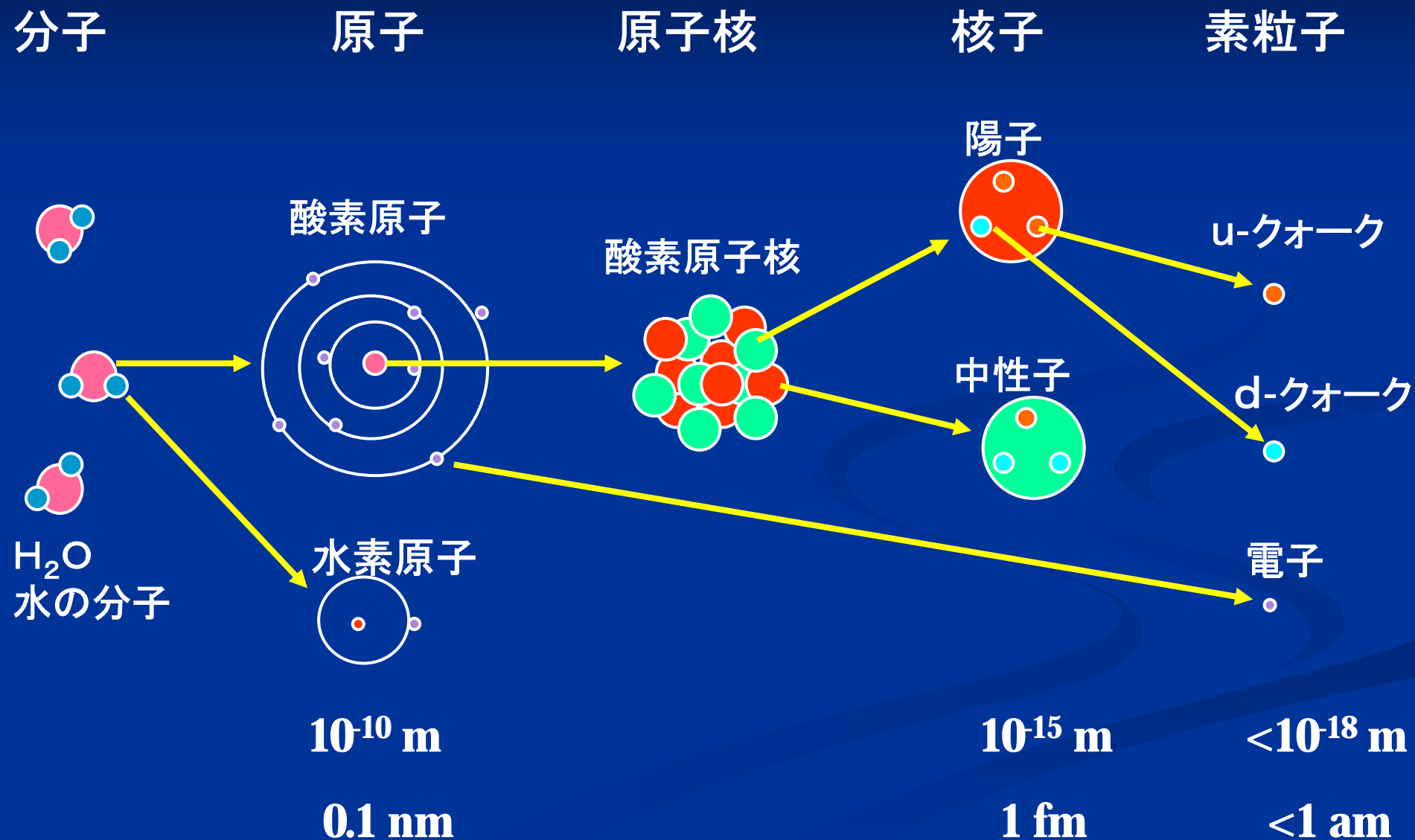
インフレーション(宇宙の爆発的な膨張)

} 素粒子が原因？

基本的スケールと学問分野



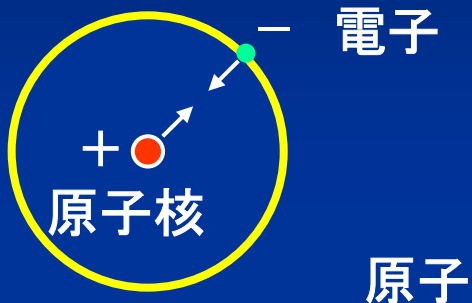
物質の階層構造とそのスケール



力(相互作用) ゲージ相互作用

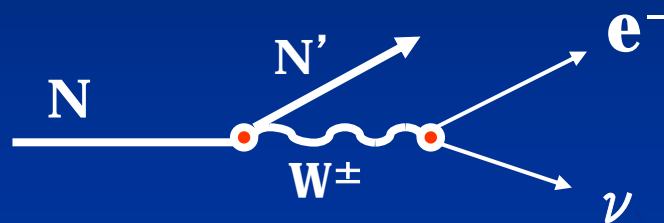
電磁力 γ (光子)

10^{-2}



弱い相互作用 W^\pm, Z^0

10^{-13}

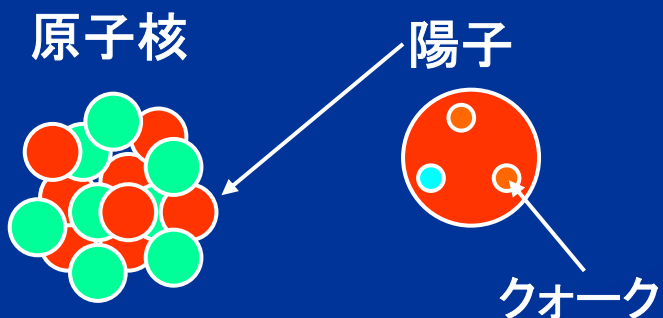


原子核 β 崩壊

強い相互作用

1

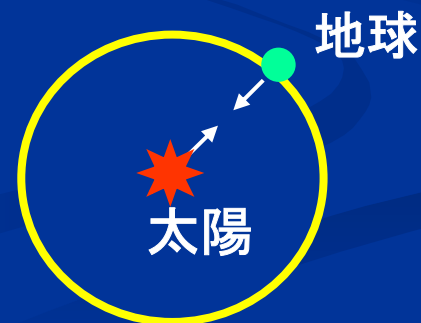
グルーオン (8種類)

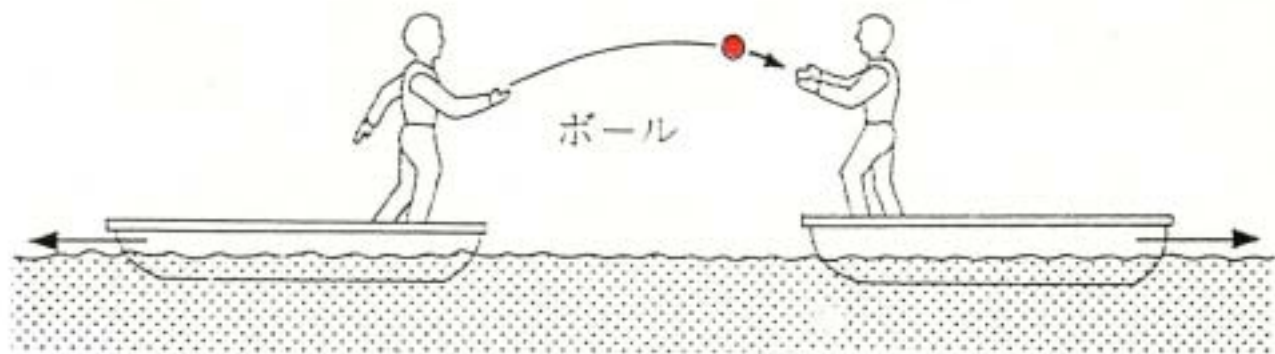


重力相互作用

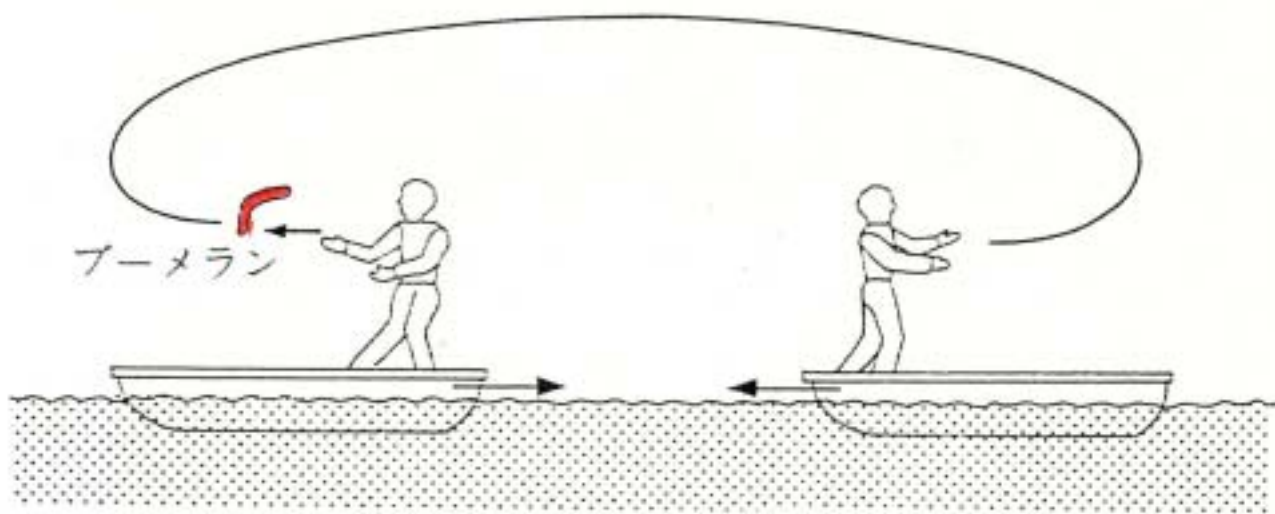
10^{-40}

重力子 (未発見)





反発力



引力

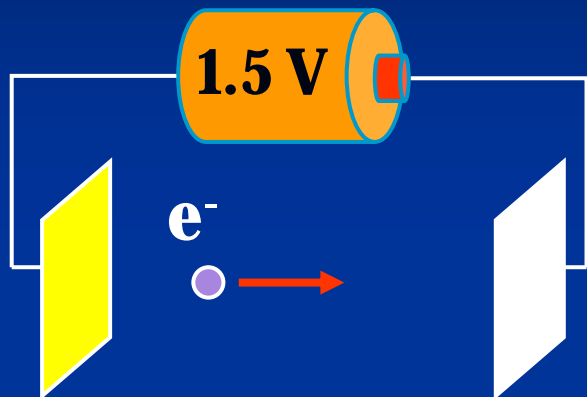
図2.11 力を橋渡しするもの

ニュートリノ天文学の誕生 ブルーボックス 小柴昌俊 著

エネルギーの単位

電子ボルト

$$1 [\text{eV}] = 1.6 \times 10^{-16} [\text{J}]$$



化学反応のエネルギー

錬金術：化学反応のエネルギーで原子核変換をしようとした。

$$1 [\text{MeV}] = 10^6 [\text{eV}] \quad (\text{メガ})$$

原子核反応のエネルギー

$$1 [\text{GeV}] = 10^9 [\text{eV}] \quad (\text{ギガ})$$

$$1 [\text{TeV}] = 10^{12} [\text{eV}] \quad (\text{テラ})$$

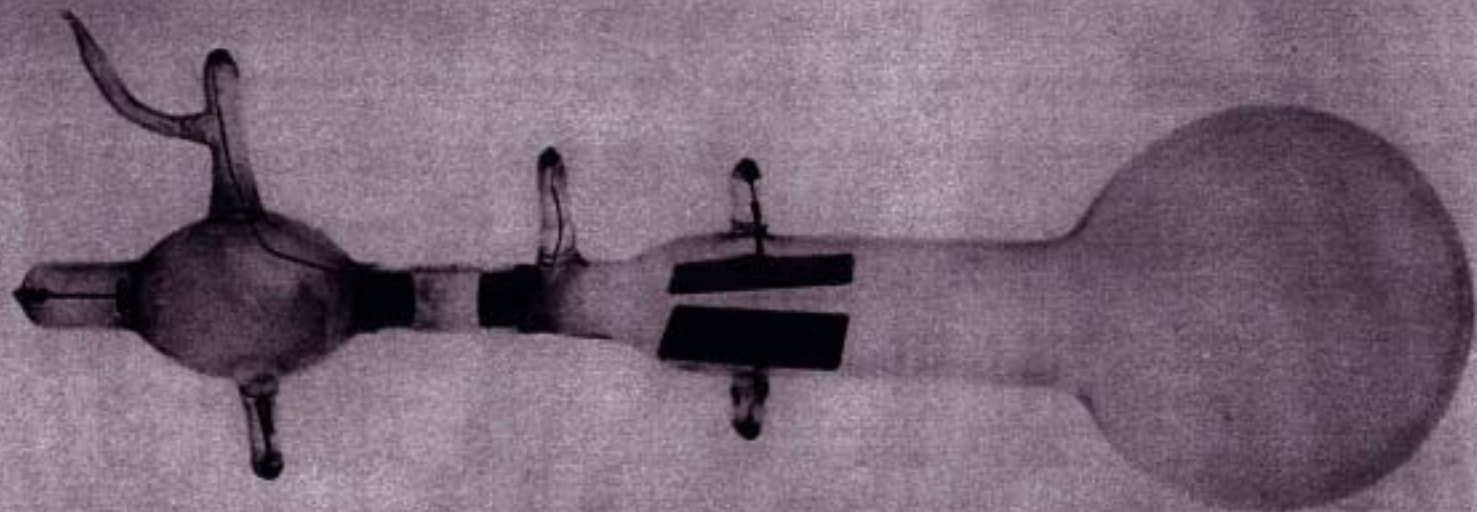
素粒子反応のエネルギー

$E=Mc^2$ 質量の単位もエネルギーの単位で測る。

例：電子の質量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}$

最初の素粒子「電子」発見

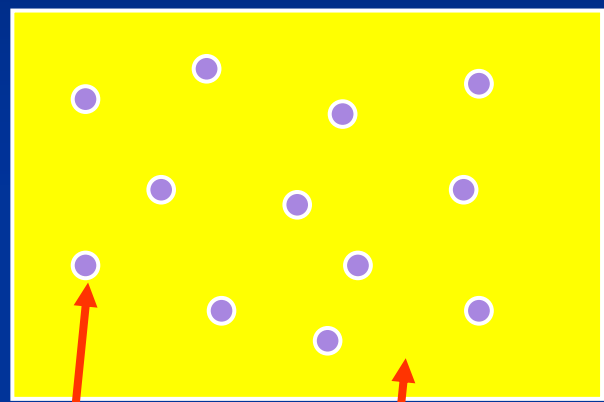
1897



J. J. Thomson

ラザフォードの原子核の発見

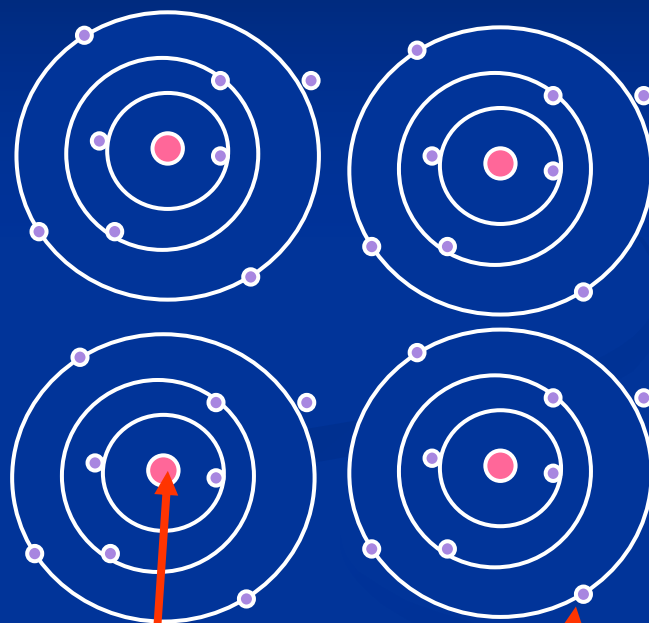
原子モデル 1



電子

均質な+電荷

原子モデル 2



硬く重い核 +電荷

電子

ぶどうパンモデル

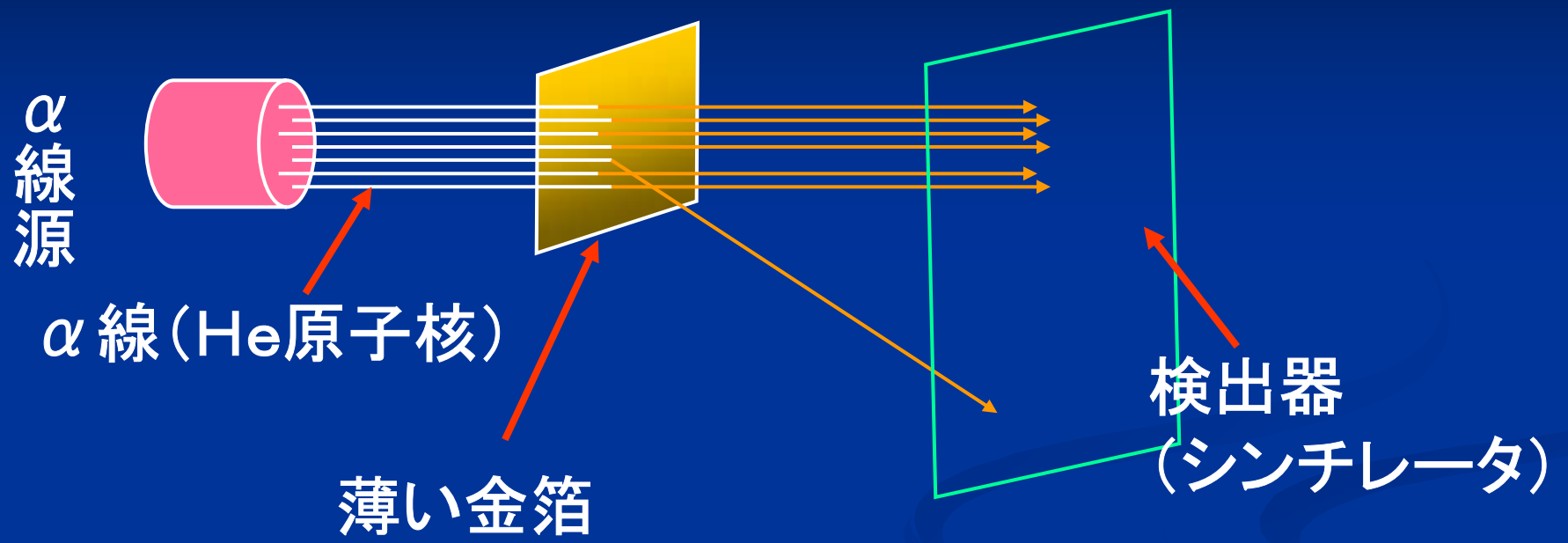
J. J. トムソン

太陽惑星モデル

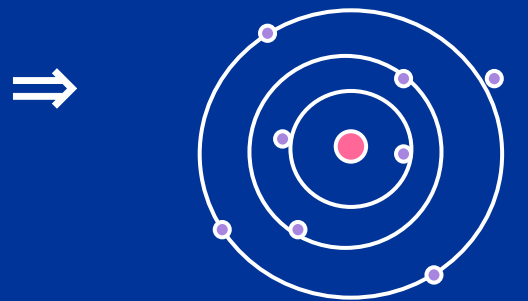
ラザフォード 長岡半太郎

ラザフォードの原子核の発見

1911年 弟子のガイガーとマースデンの実験で決着



ほとんどすり抜ける。たまに大角度に散乱される。



このモデルが正しい。

素粒子実験の原型

量子力学

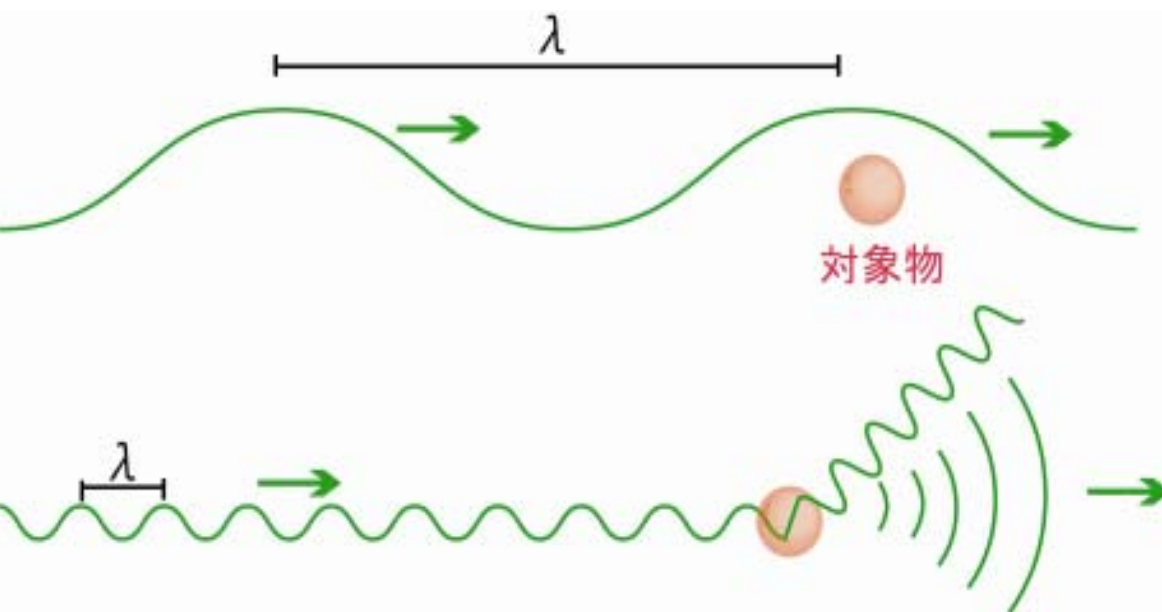
波長

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

プランク定数

運動量～エネルギー

素粒子 = 粒子 + 波



《応用》

電子顕微鏡、粒子加速器

小さな波長で物質を「見る」
= 高いエネルギーの粒子の
散乱を「見る」

1930年代の「素粒子」

電子 e^- 1897年

陽子 p^+ 1911年

中性子 n^0 1932年

光子 γ^0 1905年

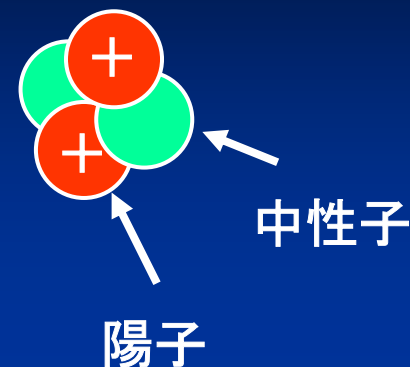
非常に単純、美しい体系

しかし、これでは終わらなかった

湯川博士の π 中間子の予言 (1935年)

- 新しい相互作用

電磁力よりも強い引力

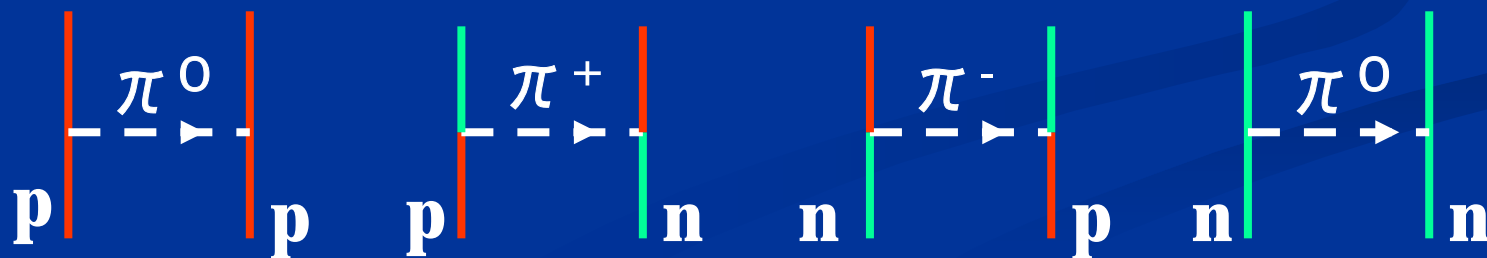


- 相互作用の本質

力を媒介する粒子の存在

- 新粒子の性質の予言

力の到達距離 \Rightarrow π 中間子の質量の予言



μ 粒子の発見 Anderson Neddermeyer 1937

宇宙線中に湯川博士が予言した π 中間子を探索

π 中間子は物質とすぐに反応すると考えられたが、発見された

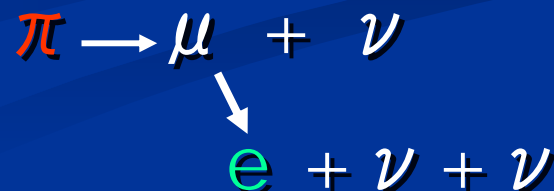
粒子は地中深くまで透過した。 **予期せぬ発見**

⇒ Anderson 達が発見した粒子は湯川が予言した粒子とは異なる。

(坂田、谷川、井上)

π 中間子の発見 Powell Occhialini 1947

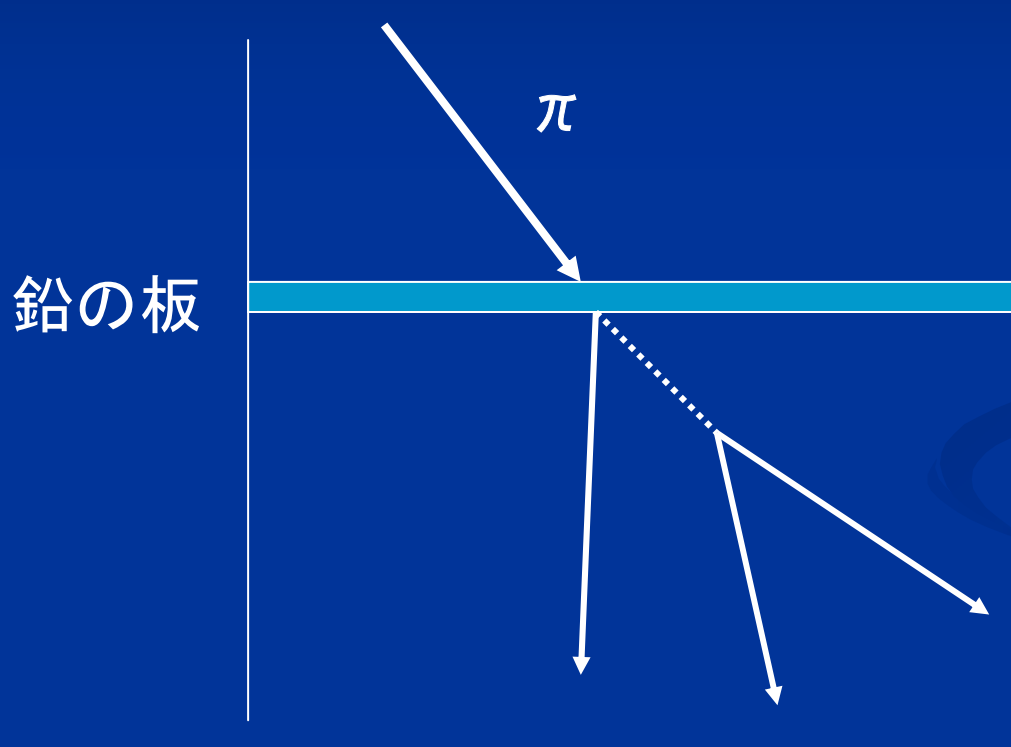
$\pi \Rightarrow \mu \Rightarrow e$ の崩壊を写真乾板で発見 (アンデス山中)



奇妙な粒子の発見(宇宙線、加速器)

Rochester Butler 1947

霧箱実験で長寿命のV粒子を発見



現在の解釈

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

$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$

$$K^0 = (d\bar{s})$$

$$\Lambda = (uds)$$

西島-ゲルマンのストレンジネス(新しい量子数の発見)

現在の解釈 新しいクォークを含んだハドロンの発見

1940年代後半の「素粒子」

e^- 1897

e^+ 1932

μ^- 1936

μ^+ 1936

p 1919

(\bar{p})

n 1932

(\bar{n})

π^+ 1947

π^- 1947 (π^0)

γ 1905

V粒子 1947

1928年 ディラックが「反粒子」を予言

加速器の出現

1932年 ローレンス サイクロトロンを試作

直径 13cm ビームエネルギー=80 keV

(CERNのLHC 直径9km $E_{\text{beam}}=7000 \text{ GeV}$)

約7万倍

約9千万倍

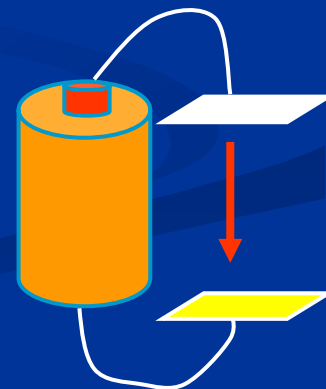
その後大型陽子加速器の建設競争

Cosmotron (Brookhaven) 1952 3GeV

Bevatron (Berkeley) 1954 6GeV

1 eV = 1V の電圧で加速できるエネルギー

1 GeV=1000,000,000 eV



強い相互作用をする新粒子群の発見

1950—60年代には加速器によって多くの強い相互作用する粒子群(ハドロン)が生成され、**收拾がつかなくなった。**

π^+ 、 π^0 、 π^- 、 K^+ 、 K^- 、 K^0 、 \bar{K}^0 、 ρ^+ 、 ρ^0 、 ρ^- 、 ω 、.....

p 、 n 、 Λ 、 Σ^+ 、 Σ^0 、 Σ^- 、 Ξ^0 、 Ξ^- 、.....、 \bar{p}

複合粒子モデル(坂田昌一) 1959

p 、 n 、 Λ 、 \bar{p} 、 \bar{n} 、 $\bar{\Lambda}$ が基本粒子、全てのハドロンは、この組み合わせ 例 $\pi^+ = p\bar{n}$

クォークモデル Gell-Mann Zweig 1964

坂田モデル \Rightarrow クォークモデル

$$\begin{array}{l} p \\ n \\ \Lambda \end{array} \left\{ \Rightarrow \begin{array}{ll} \text{u-クォーク} & \text{電荷} = 2/3 \\ \text{d-クォーク} & \text{電荷} = -1/3 \\ \text{s-クォーク} & \text{電荷} = -1/3 \end{array} \right.$$

$$p = uud \quad \text{電荷} = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$$

$$n = udd \quad \text{電荷} = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$$

クォークは実在するか \Rightarrow ラザフォードの実験の進化形

高エネルギー電子を陽子に衝突させて陽子に硬い芯のあることを発見。1960年台終わりころ。

クォークの混合 Cabbibo 1963

S-クォークの反応は d-クォークの反応に比べて弱い。

$$d \rightarrow u + e + \nu \quad \cos \theta_C$$

$$s \rightarrow u + e + \nu \quad \sin \theta_C$$

$$\mu \rightarrow \nu + e + \nu \quad 1$$

$\sin \theta_C = 0.23$ という関係があるようだ。

弱い相互作用に対しては sクォークとdクォークは

$$d' = d \cos \theta_C + s \sin \theta_C$$

の様に振舞う。

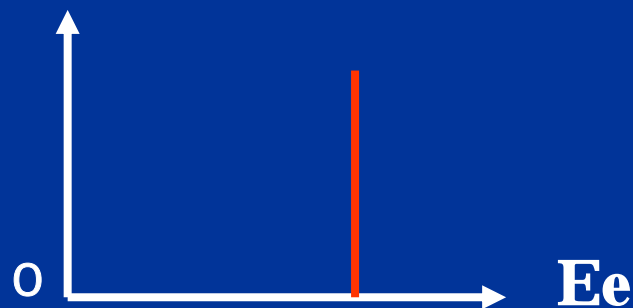
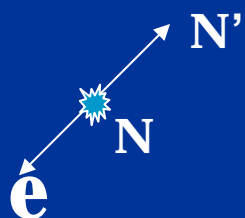
ニュートリノ

1930年 パウリ ニュートリノの予言

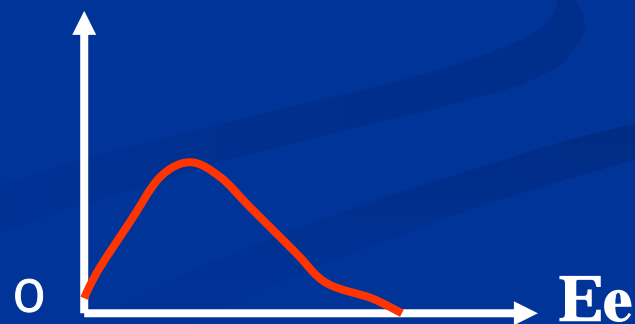
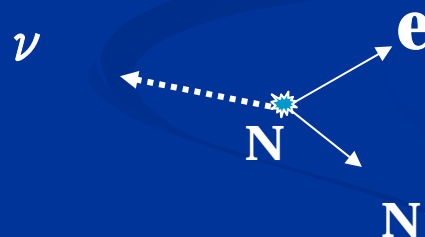
ベータ崩壊は2体崩壊と考えられていたが、電子のエネルギー分布が三体崩壊の分布を示していた。

見えない軽い粒子(ニュートリノ)が出ている。

二体崩壊



三体崩壊



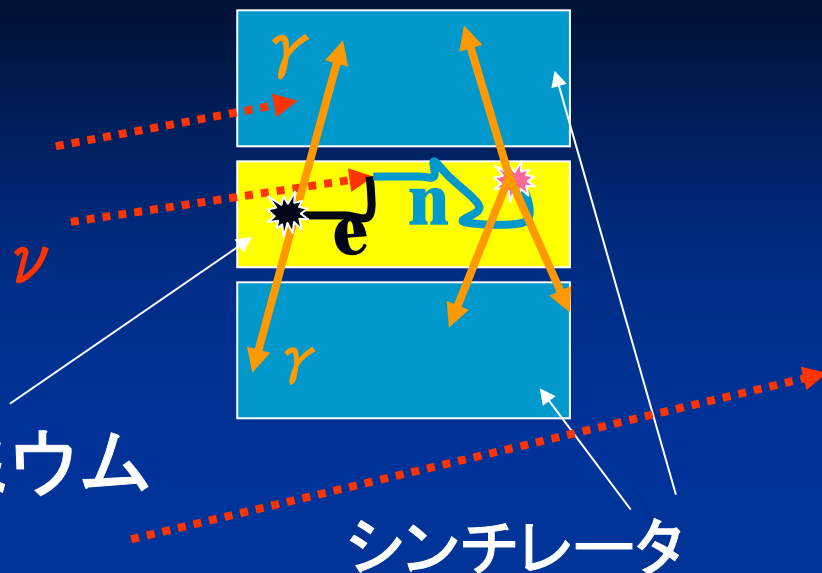
ニュートリノの検出

Reines と Cowan の実験 1956

原子炉からのニュートリノ

水とカドミウム

シンチレータ

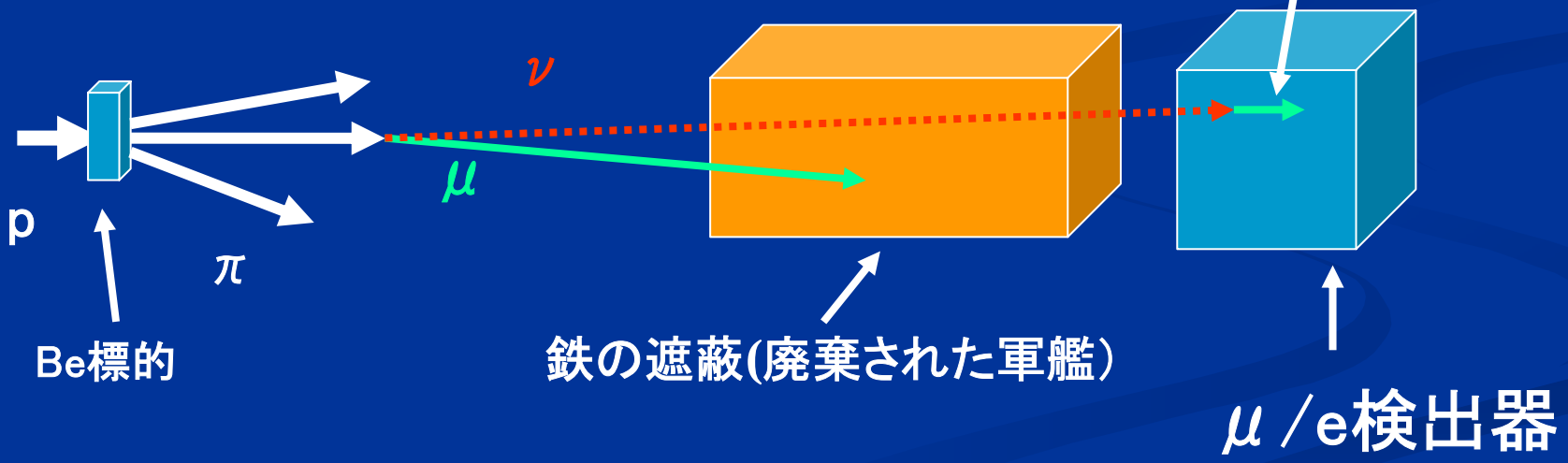


ニュートリノは2種類

π の崩壊から生ずるニュートリノとベータ崩壊で出るニュートリノ
は異なる種類か？



電子ではなく μ が必ずでた



チャームクォークの予言

電子と μ は似ている（レプトン 軽粒子）。ニュートリノもレプトンの仲間。クォークは強い相互作用をするので別の仲間

第1世代 第2世代 レプトンとクォークの対応関係がある

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

Q=0 ニュートリノ

Q=-1 荷電レプトン

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} ? \\ s \end{pmatrix}$$

Q=2/3 クォーク

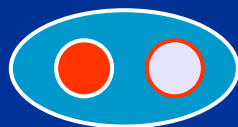
Q=-1/3 クォーク

?に対応するQ=2/3のクォークが存在するはず

1974年11月革命

チャームクォークの発見 (2箇所ではほぼ同時)

(チャーム-反チャーム の 束縛状態 J/ψ の発見)



Brookhaven Sam Ting 達

固定標的実験

SLAC

Burton Richter 達

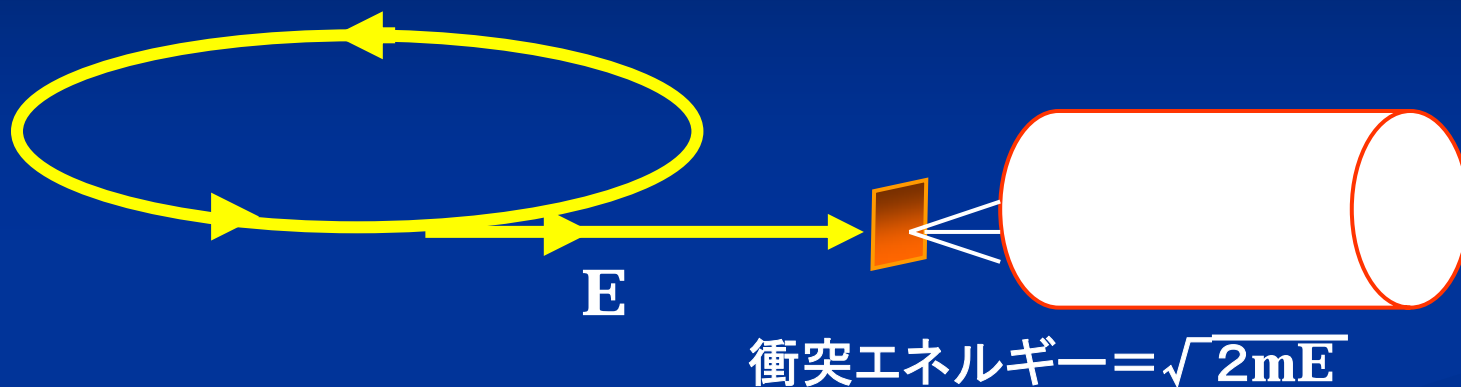
電子・陽電子コライダー

電子・陽電子コライダーの威力が身にしみた。

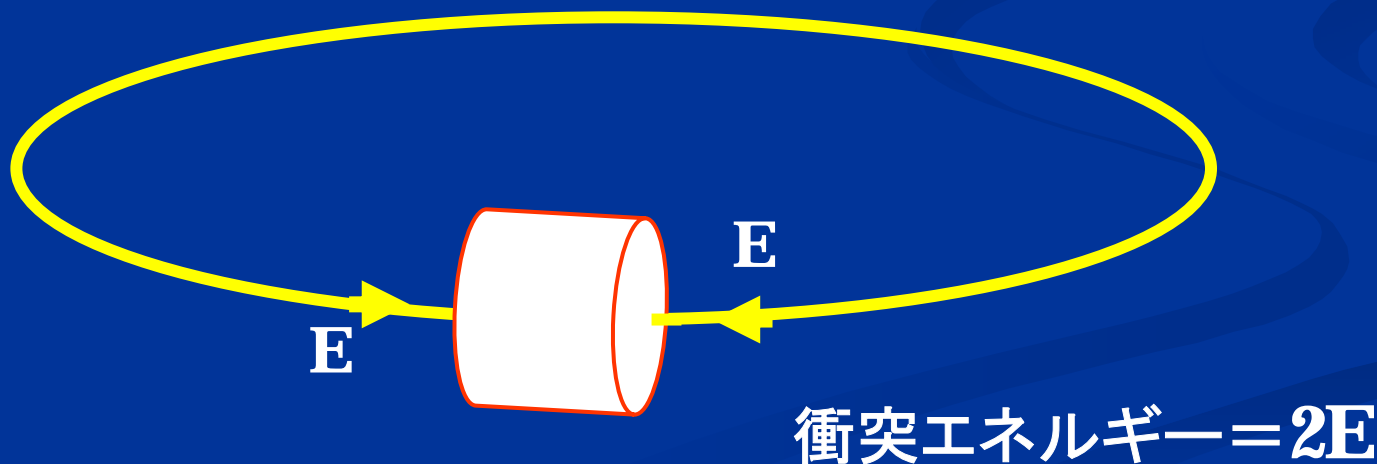
新粒子の怒濤のような発見劇

粒子衝突型加速器(コライダー)の威力

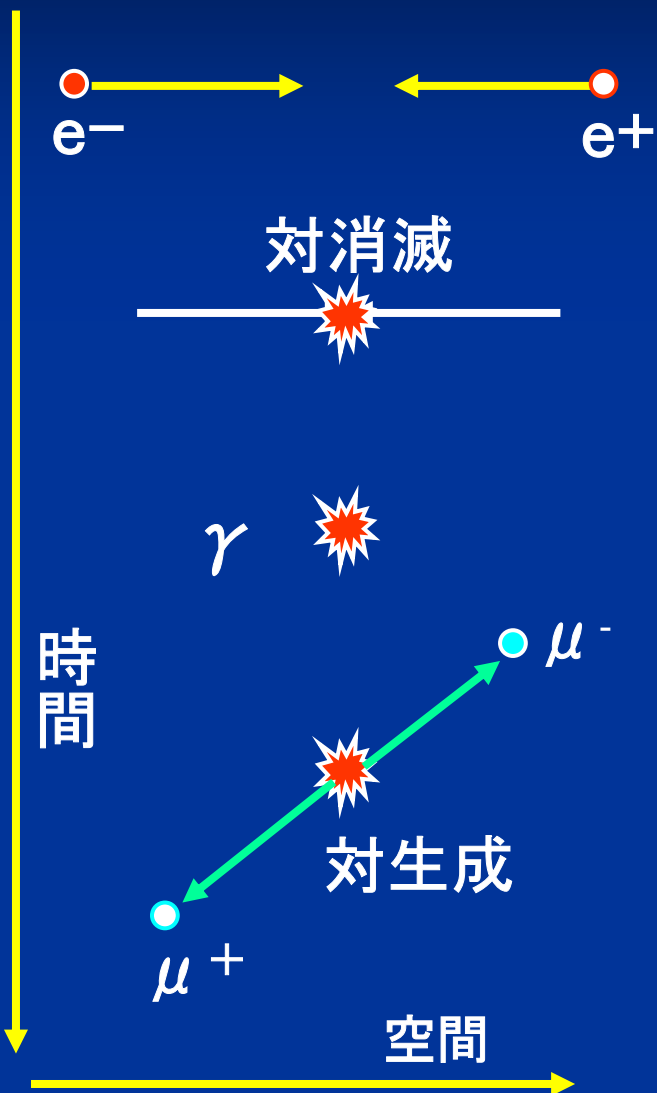
従来の加速器を用いた素粒子実験 (標的実験)



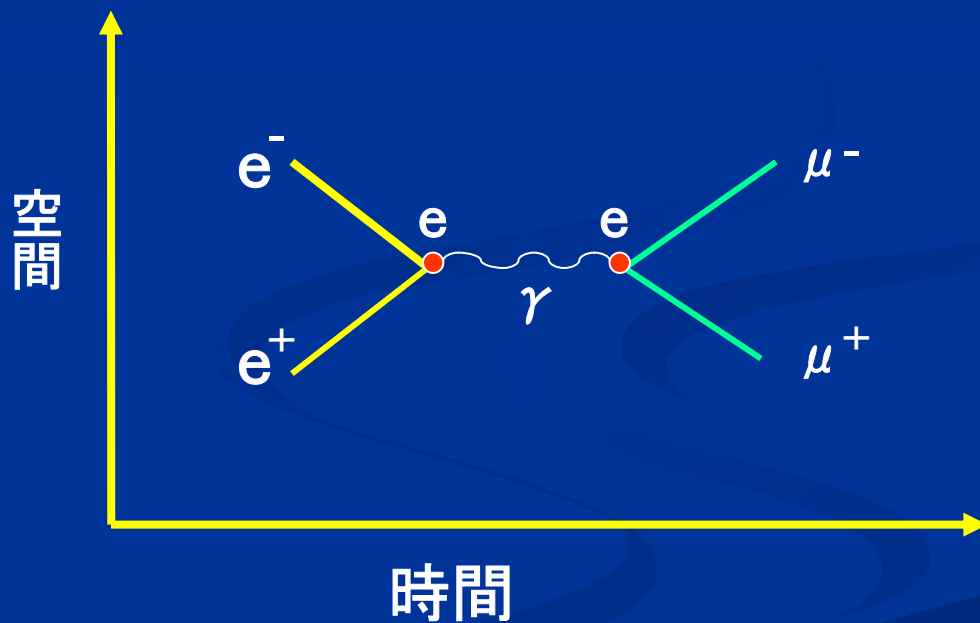
コライダーでの素粒子実験



電子・陽電子衝突

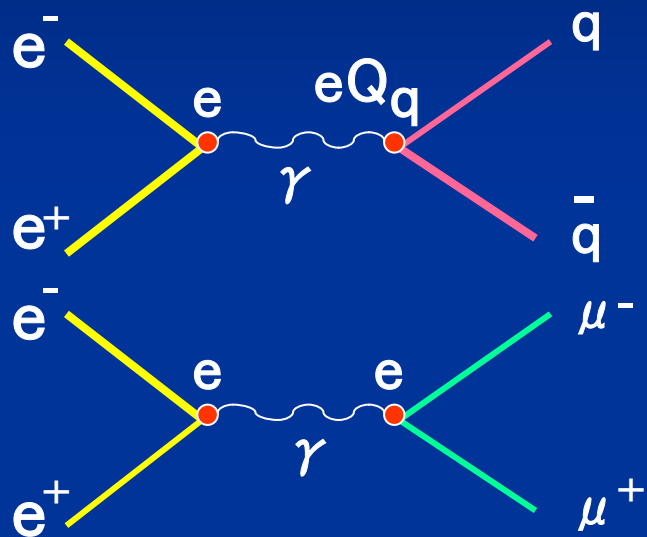


ファインマン ダイアグラム



R-value

クォークはいくつあるか？

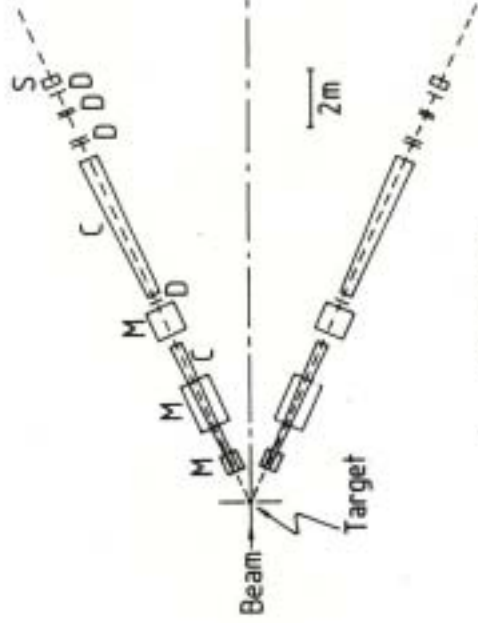


$$\sigma(ee \rightarrow qq) \sim \sum_q e^4 Q_q^2$$

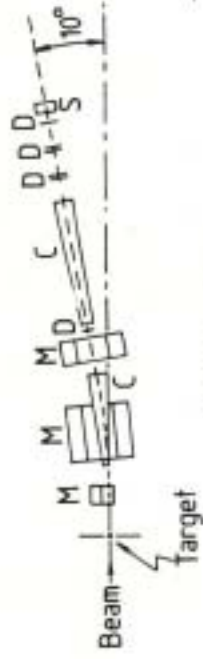
$$\sigma(ee \rightarrow \mu\mu) \sim e^4$$

$$R = \frac{\sigma(ee \rightarrow qq)}{\sigma(ee \rightarrow \mu\mu)} = \sum_q Q_q^2 = \begin{cases} 2/3 & \text{uds} \\ 2 & \text{uds x3} \\ 1(1/9) & \text{udsc} \\ 4/3 & \text{udsc x3} \end{cases}$$

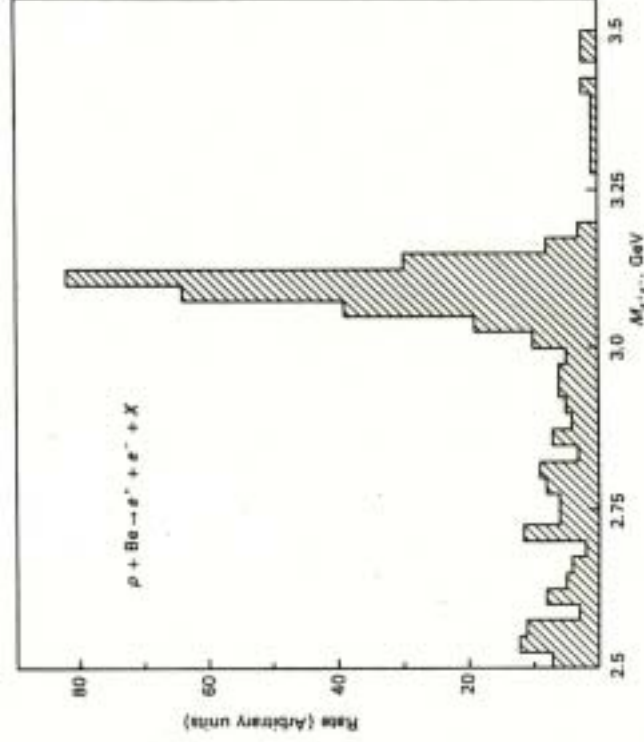
$P \rightarrow J + \dots$
 $\hookrightarrow e^- e^-$
 Ting et al.
 J



(a) Plan view

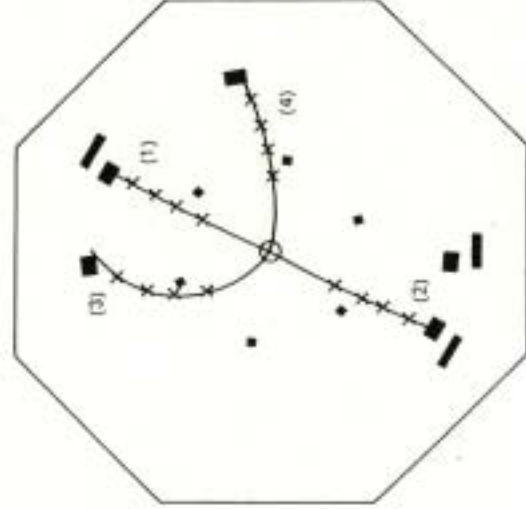
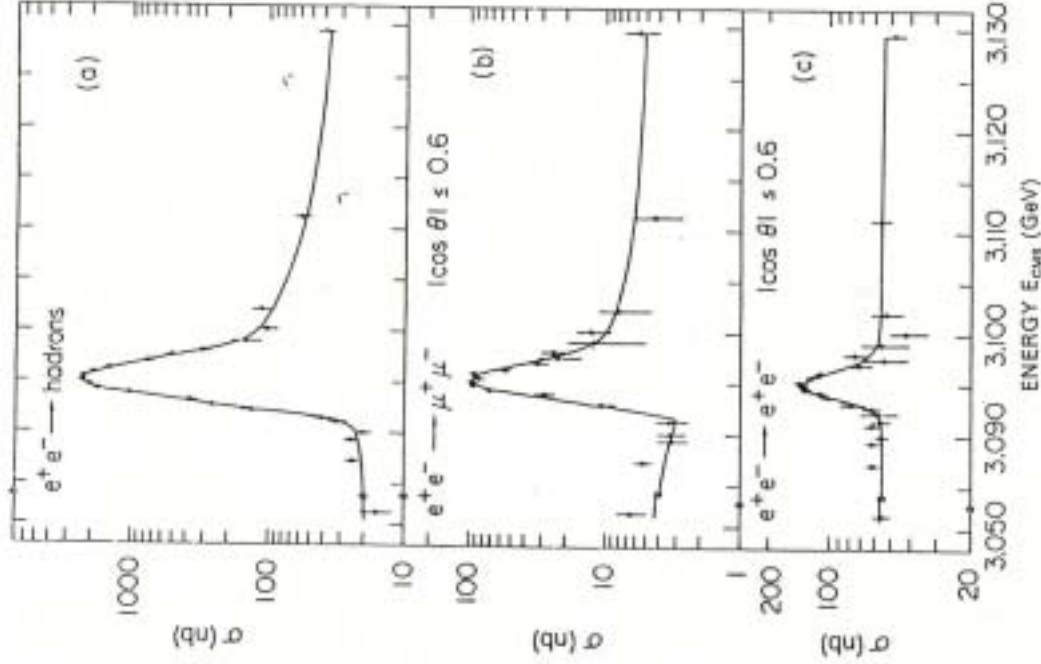


(b) Side view



$e^+e^- \rightarrow \psi \rightarrow \text{hadrons}$
 $\mu^+\mu^-$
 e^+e^-

Richter
 et al



1974年11月革命の帰結とその後

レプトンとクォークは同じ階層の素粒子であることが
実験家にもわかった。 ⇒ 素粒子物理の方向を決定

- 1975 τ レプトンの発見 (第3世代の発見) SLAC(米)
- 1976 b クォークの発見 Fermilab(米)
- 1979 グルーオンの発見 DESY(独) 素粒子センターも参加
- 1983 W 、 Z ボゾンの発見 CERN(欧)
- 1989 素粒子の世代数=3 CERN/SLAC 素粒子センターも参加
- 1994 t クォークの発見 Fermilab(米)
- 1999 ニュートリノの質量 Super Kamiokande(日)

素粒子の標準理論の粒子

(1) 物質を形成する粒子 ($J=1/2$)

クォーク

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{d} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$$

+ 反粒子

レプトン

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

+ 反粒子

(2) 相互作用を担う粒子 ($J=1$)

電磁相互作用

γ

(光子)

弱い相互作用

$W^+ W^- Z^0$

(ウィークボゾン)

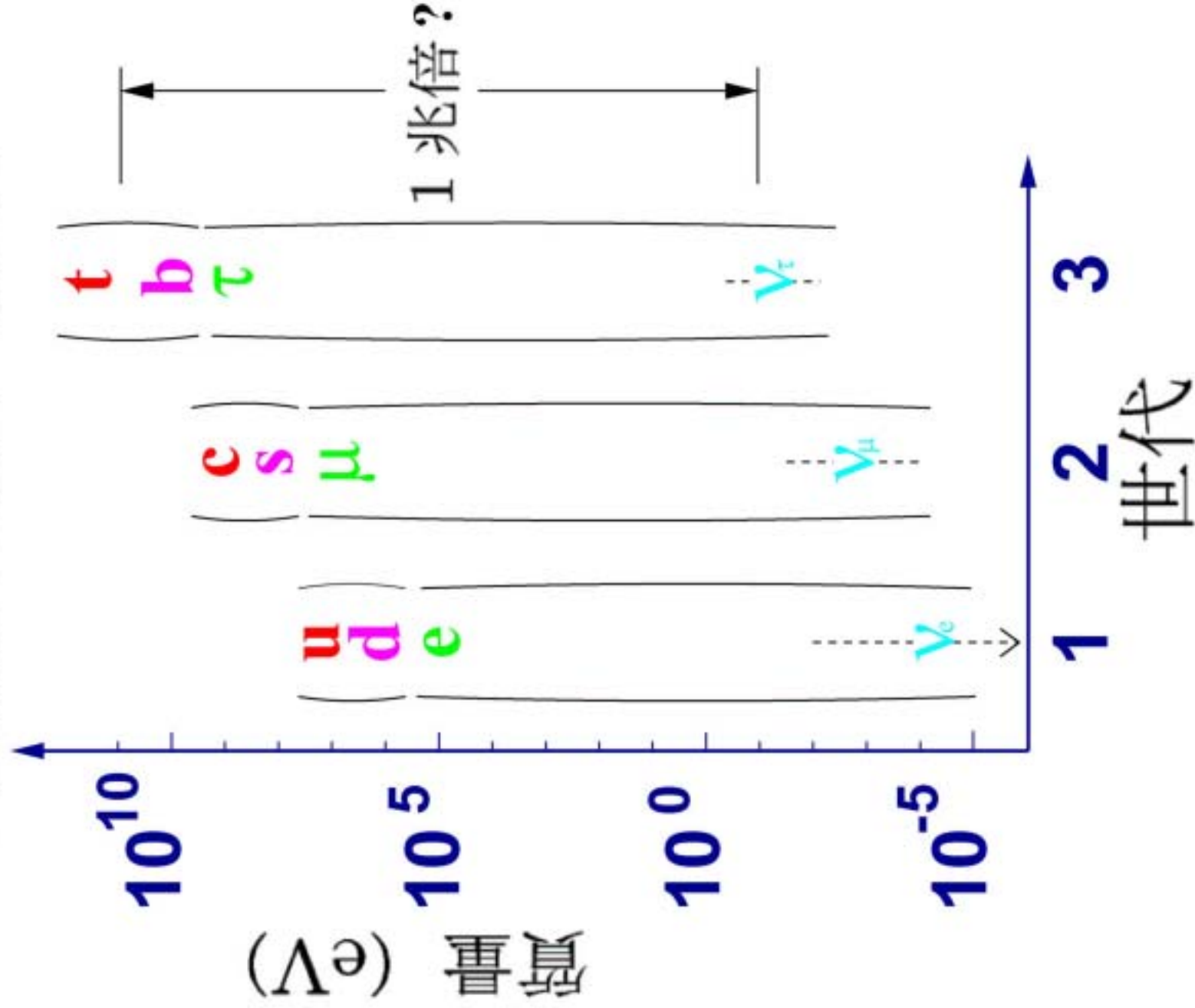
強い相互作用

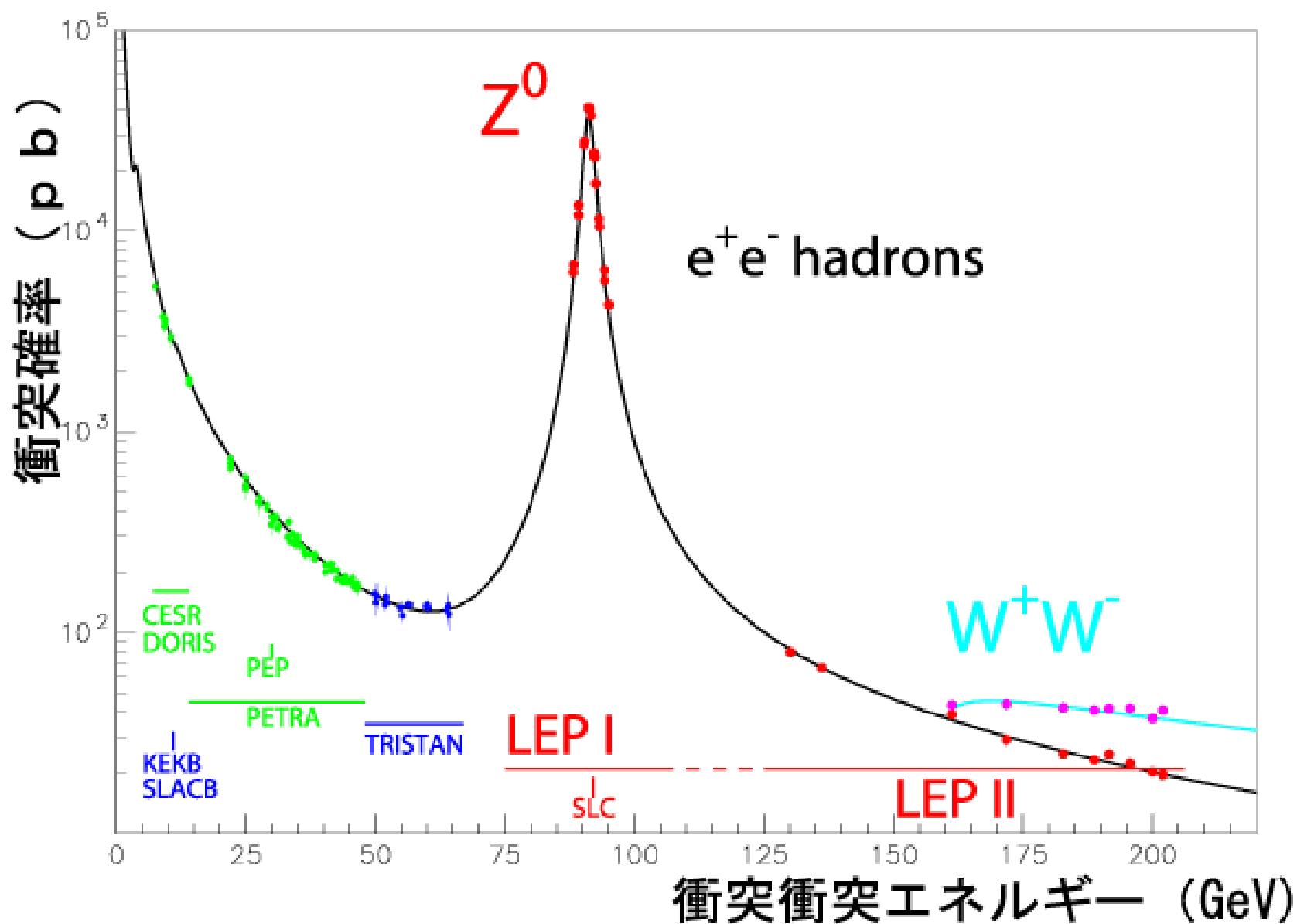
g (8種類)

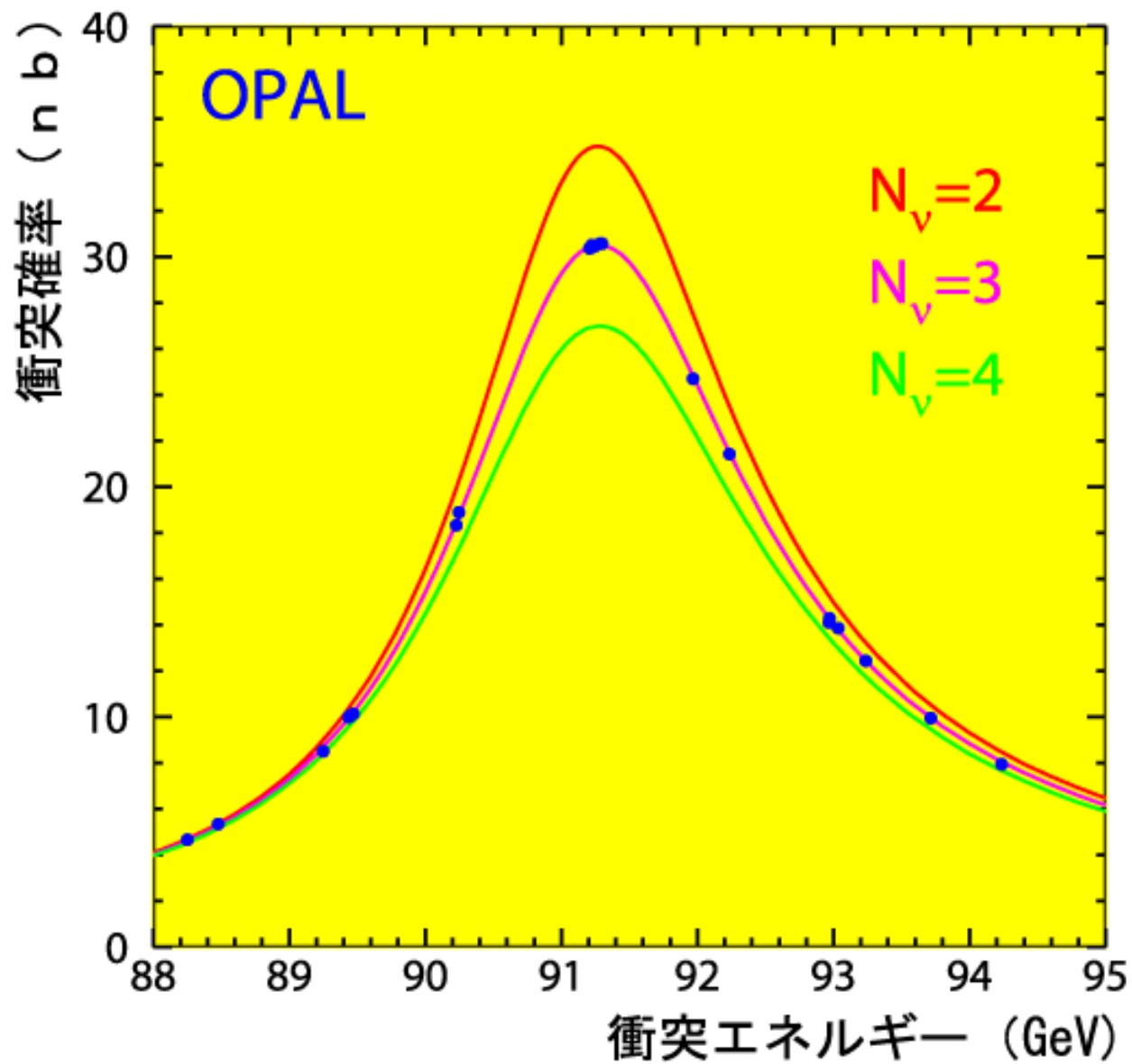
(グルーオン)

(3) 質量の起源 ($J=0$) H^0 (ヒッグス粒子) 未発見

基本構成粒子（クォーク・レプトン）の 3世代構造と質量の階層性







宇宙論からの問題点

(1) なぜ時空は空間3次元・時間1次元なのか？

(2) 暗黒物質何からできているのか？

(3) 暗黒エネルギーの起源は何か？

ヒッグス粒子の真空エネルギーで計算されるよりも
120桁も小さいのか？

(4) 宇宙にはなぜ物質が反物質に比べて多いのか？

標準理論の問題点

- (1) 重力相互作用を無視している。
- (2) 実験で決定すべきパラメータが多過ぎる。
 α 、 $\sin^2\theta_W$ 、 α_S 、 μ 、 λ 、 ν 、 θ 、
 m_e 、 m_μ 、...、 m_d 、 m_u 、...、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 δ 、
 m_{ν_e} 、 m_{ν_μ} 、 m_{ν_τ} 、 θ_1^ν 、 θ_2^ν 、 θ_3^ν 、 δ^ν
- (3) クォークとレプトンの世代構造の説明がない。
- (4) ヒッグス粒子が未発見。

ヒッグス粒子 (最重要かつ緊急)

標準理論で唯一未発見

2000年にはLEPの実験で兆候があったが未確認

質量の起源、真空の構造を決定

ヒッグスボソンは軽い

$$114\text{GeV} < m_H < 200\text{GeV}$$

LEPでの直接探索

電弱相互作用精密測定

⇒ LHC, JLC に期待

JLC (e⁺e⁻リニアコライダー) はヒッグス・ファクトリー

ヒッグス粒子

- 質量の起源・真空の構造 -

全ての相互作用はゲージ相互作用

ゲージ粒子
クォーク、レプトン

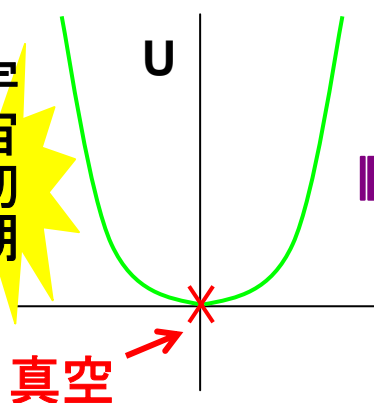
質量=0
質量=0

が自然な姿。

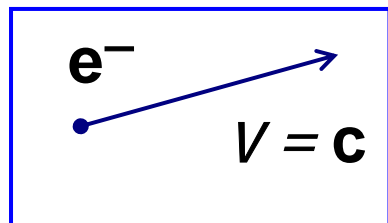
いかにしてこれらに質量を持たせるか。

ヒッグス ポテンシャル $U(\phi)$

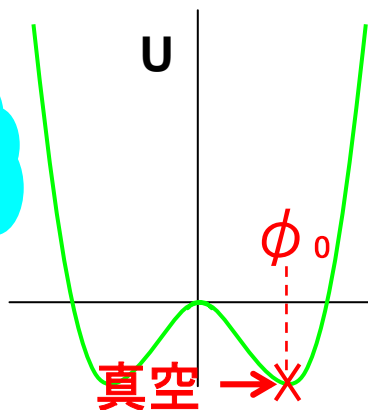
宇宙初期



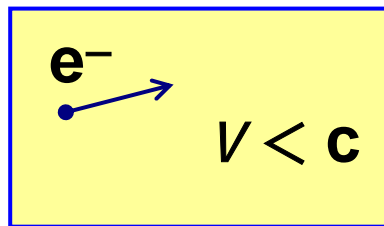
$$m_e = 0$$



宇宙が冷える



$$m_e >$$



質量=ヒッグス粒子との
相互作用の強さ

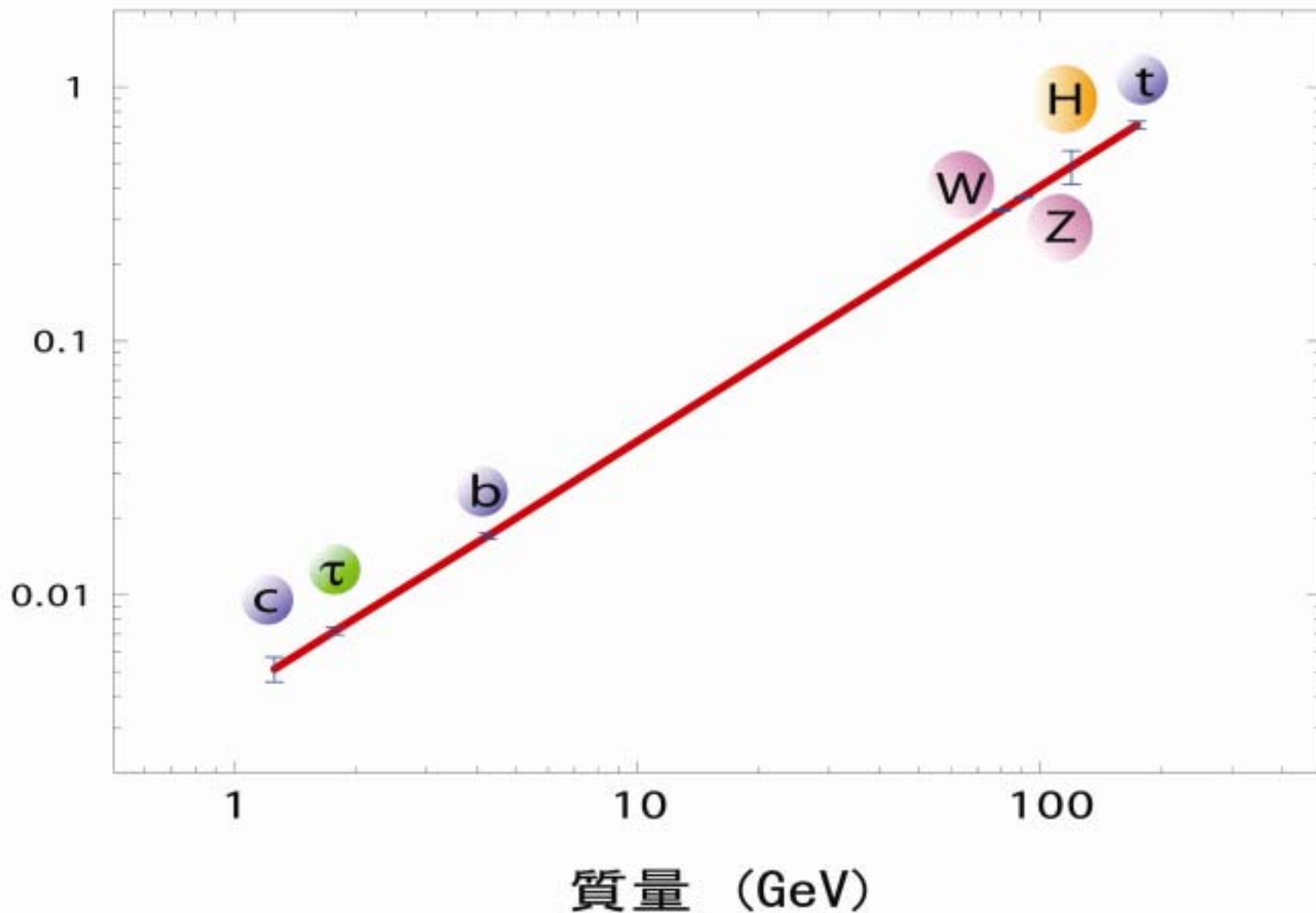
光子はヒッグス粒子と
相互作用しない。 $m_\gamma = 0$

$$m_i = g_i \phi_0$$

↑ ヒッグス真空期待値

Coupling-Mass Relation

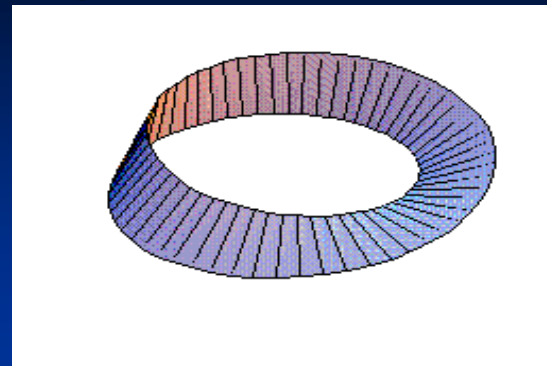
ヒッグス粒子との結合の強さを表すパラメータ



超対称性 (Supersymmetry)

普通のものには 360° 回転すれば元に戻る。

電子は 720° 回転しないと元に戻らない。

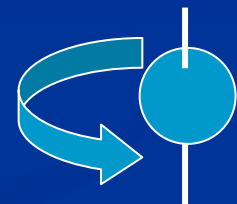


フェルミ粒子 電子など スピン $1/2, 3/2, \dots$

同じ状態に2粒子以上入れない。

ボーズ粒子 光子など スピン $0, 1, 2, \dots$

同じ状態に2粒子以上入れる。



スピン = 粒子
の自転

4次元時空の拡張

フェルミ粒子とボーズ粒子は対称であるべき

超対称性の間接的証拠

- (1) ヒッグス粒子が軽い
- (2) 相互作用の大統一
- (3) 暗黒物質の最有力候補

全ての素粒子は超対称性パートナーを持つ。

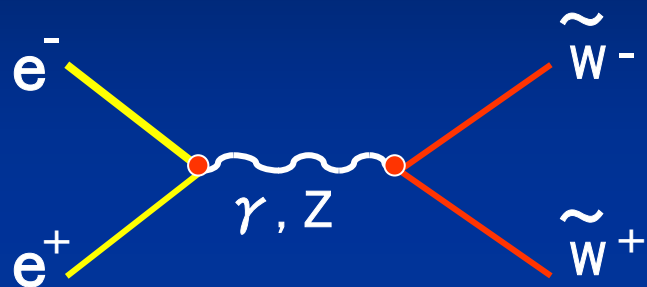
例	電子	e^-	スカラー電子	\tilde{e}^-
	Wボゾン	W^+	ウィーノ	\tilde{W}^+

一つでも見つければ大発見

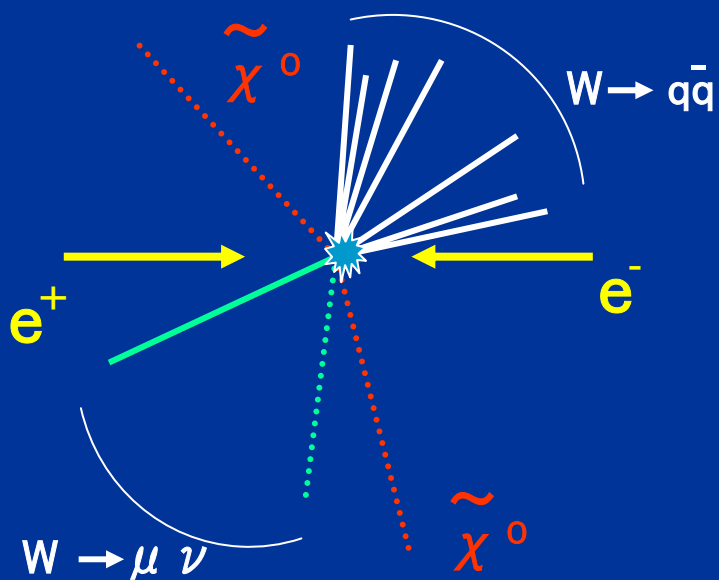
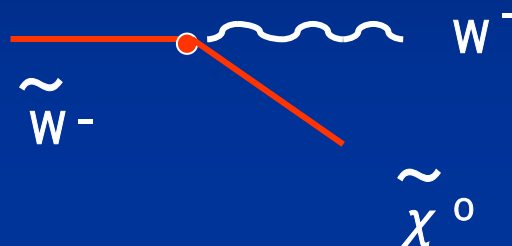
超対称性は破れている ($m_e \neq m_{\tilde{e}}$)。原因 ?

超対称性粒子の探索

生成



崩壊



$\tilde{\chi}^0$ は最も軽い超対称性粒子

= ニュートラリーノ

ニュートリノのように測定器に見えない

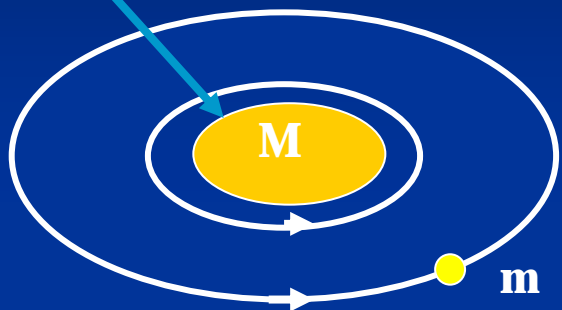
$\tilde{\chi}^0$ がエネルギーと運動量を持ち去る

⇒ 非常にバランスの悪い事象となる

宇宙の暗黒物質

銀河の周りを回る星の速度

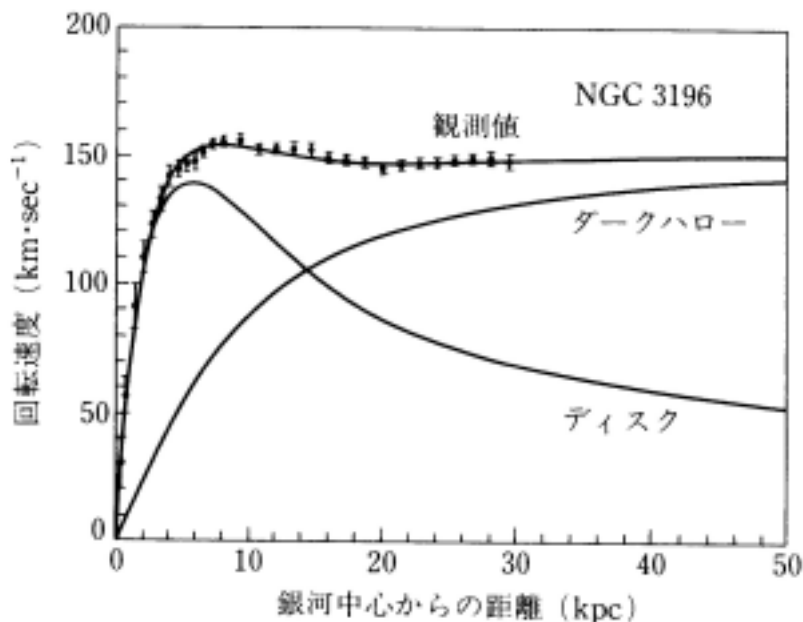
銀河



重力=遠心力 $G M m / r^2 = m v^2 / r$

銀河外 $v = \sqrt{GM/r}$

銀河内 $v = \sqrt{4\pi G \rho / 3} r$



星がほとんどいない遠方まで行っても速度は落ちない。

⇒我々の銀河にも $0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ の暗黒物質が存在

暗黒物質の最有力候補

=最も軽い超対称性粒子 $\tilde{\chi}^0$

超弦理論 (Super-string)

我々が存在する時間1次元・空間3次元の時空の他に、7次元の空間が存在し、これらの空間は小さくまるまっている。



この余計な次元の空間の構造が素粒子の内部量子数を決めている

カルーツァ・クラインの理論

時間1次元・空間3次元に1次元の空間を新たに加えて、アインシュタインの一般相対論と電磁相互作用を統一しようとした。

試みは失敗したが、思想は受け継がれた。

Large Extra-dimension

電弱相互作用のエネルギースケール 1000 GeV
 プランクスケール 10^{19} GeV } 10^{16}

階層問題

Super-stringでは、基本エネルギースケールは**プランクスケール**。

基本エネルギースケールを**電磁スケール**とすると？

余次元	空間のサイズ
2次元	$O(10^{-3} \text{ m})$
7次元	$O(10^{-15} \text{ m})$

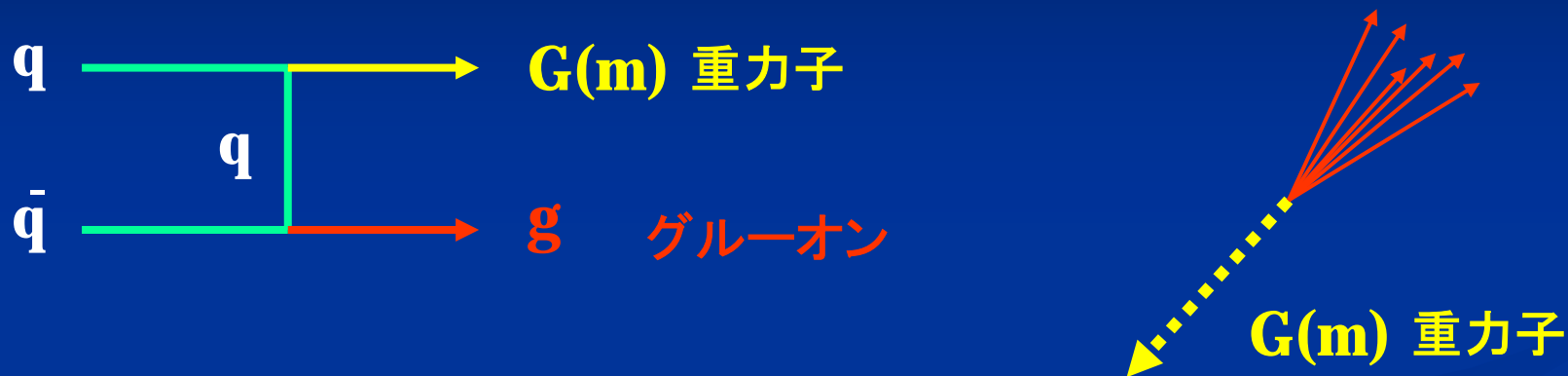


このサイズよりも小さい距離では、重力相互作用が、強くなる。

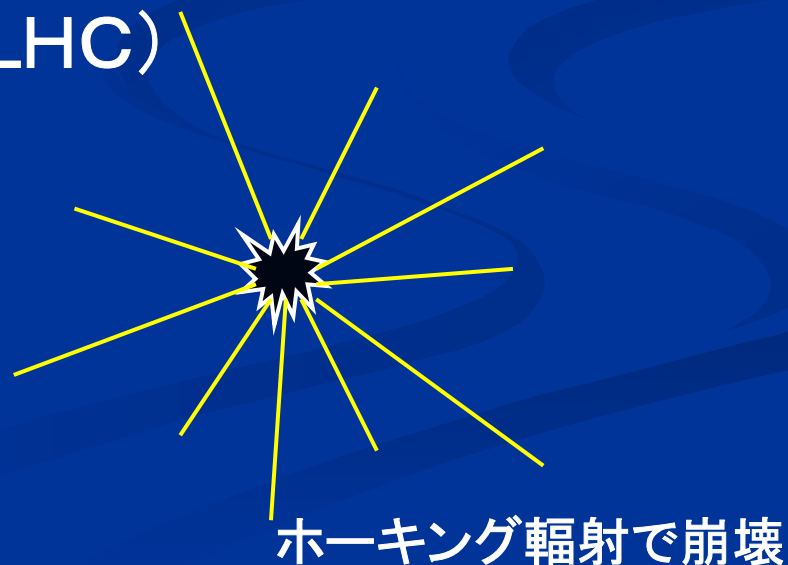
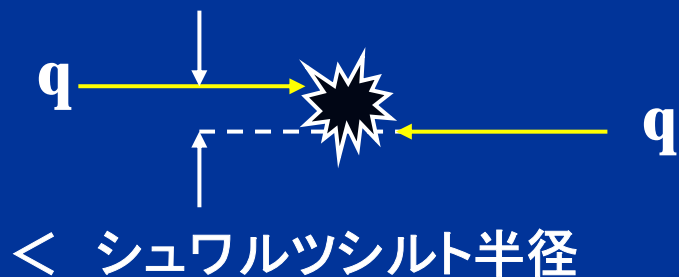
重力相互作用が、高エネルギーの素粒子衝突実験にかかる。

Large Extra-dimensionの実験的検証

(1) 高エネルギーグルーオン(モノジェット)の検出(LHC)



(2) ブラックホールの生成(LHC)



LHC (Large Hadron Collider)

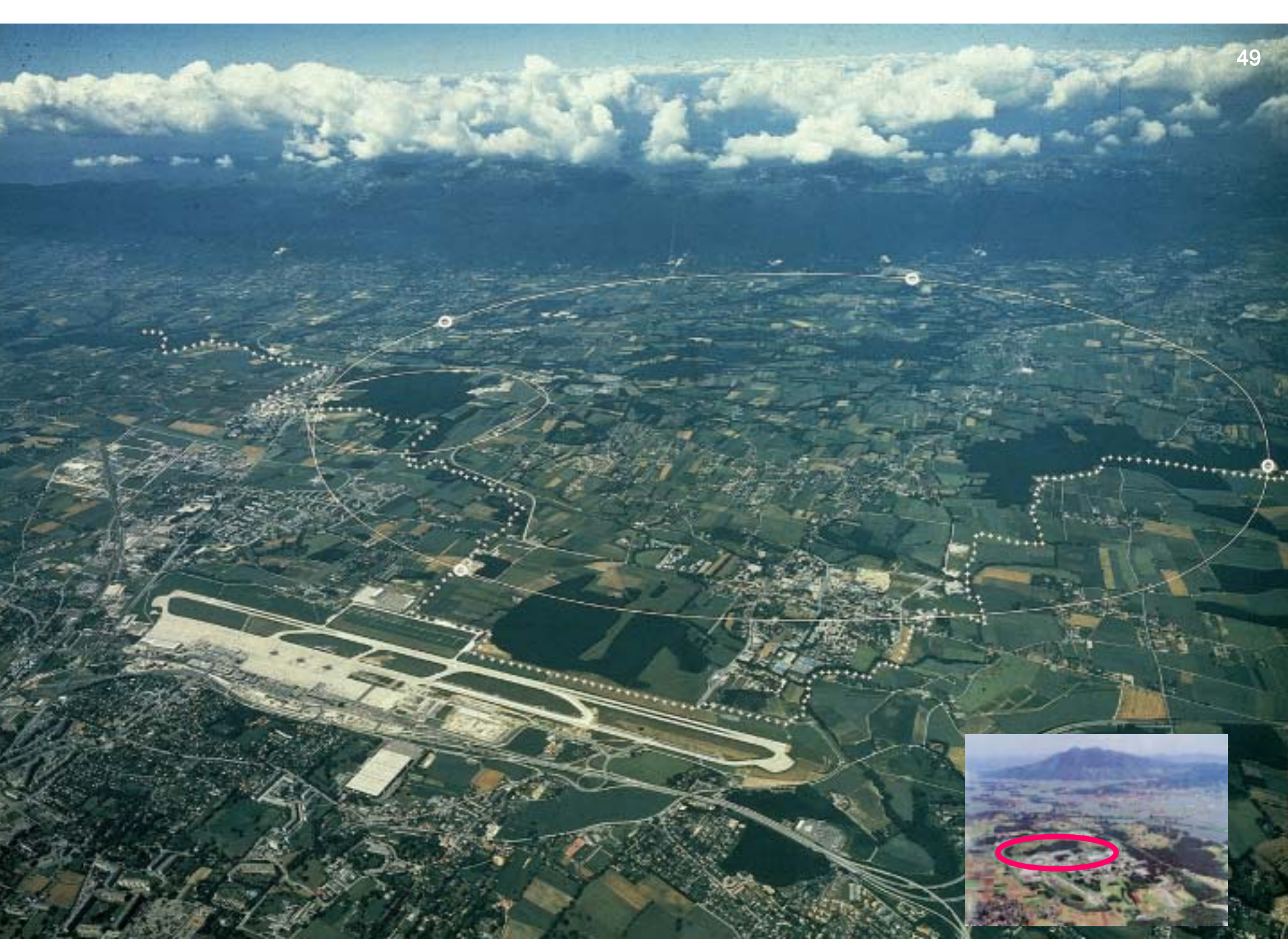
CERN(欧州原子核研究機関)の次期加速器計画

2007年に完成の陽子-陽子の衝突型加速器

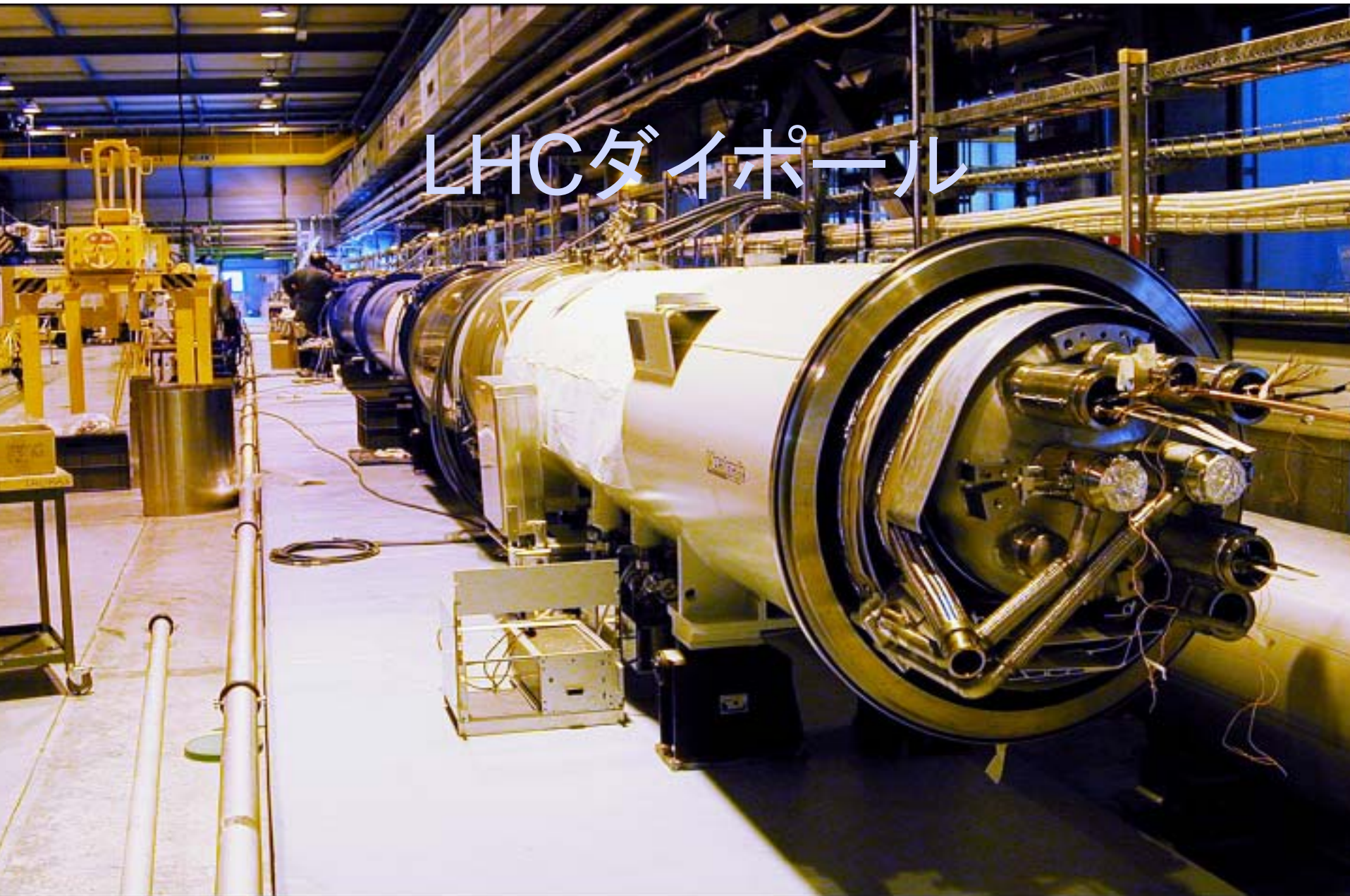
衝突エネルギー = 14TeV


ATLAS実験(2000人の物理学者が参加)には
日本も参加。

素粒子物理国際研究センターはわが国のデータ解析
センターとなる。

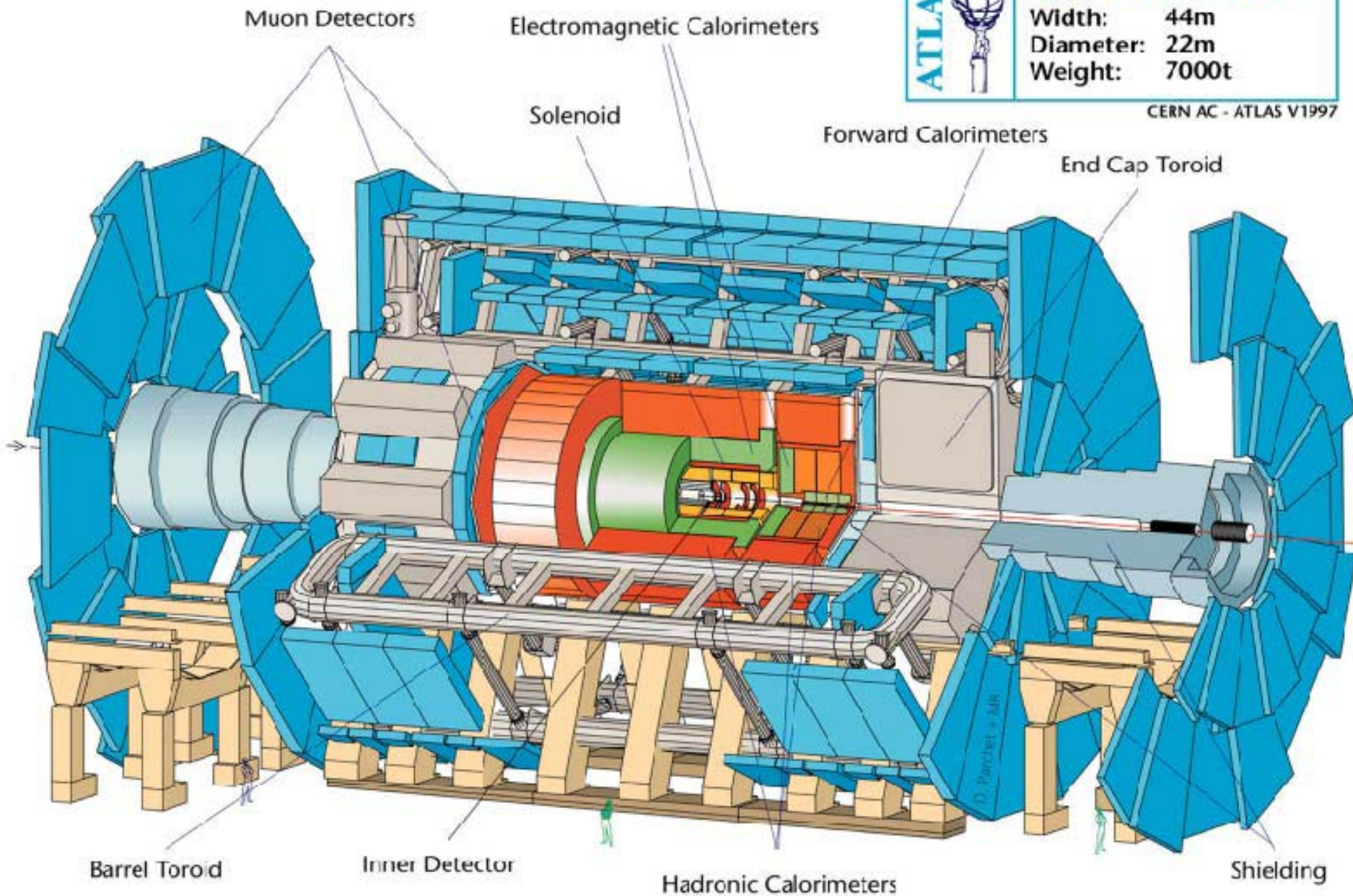


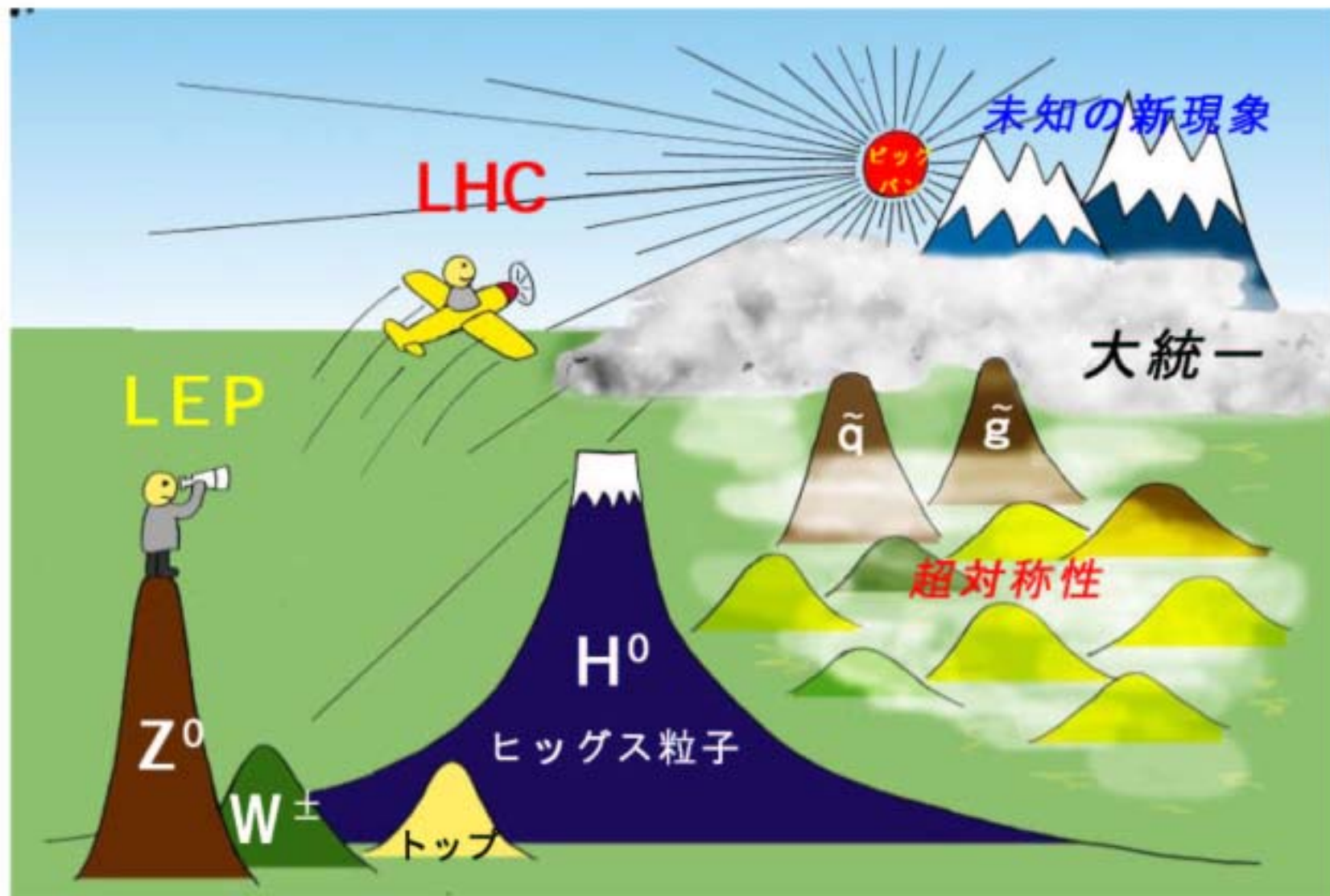
LHCダイポール



	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

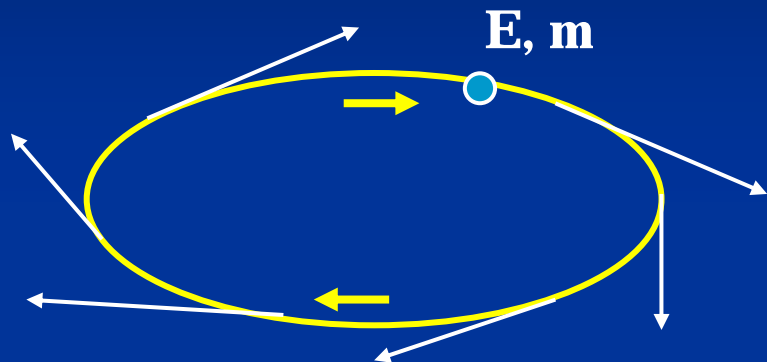




ヒッグス粒子、超対称性粒子も含め未知の新現象を俯瞰できるLHC

電子・陽電子リニアコライダー

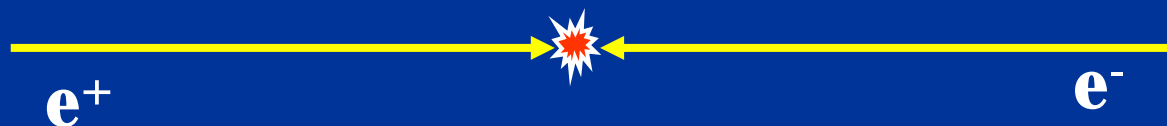
電子(陽電子)は素粒子 ⇒ 反応は単純、実験は容易



電子は磁場で曲げられると放射光を出してエネルギーを失う。
一周に失うエネルギーは

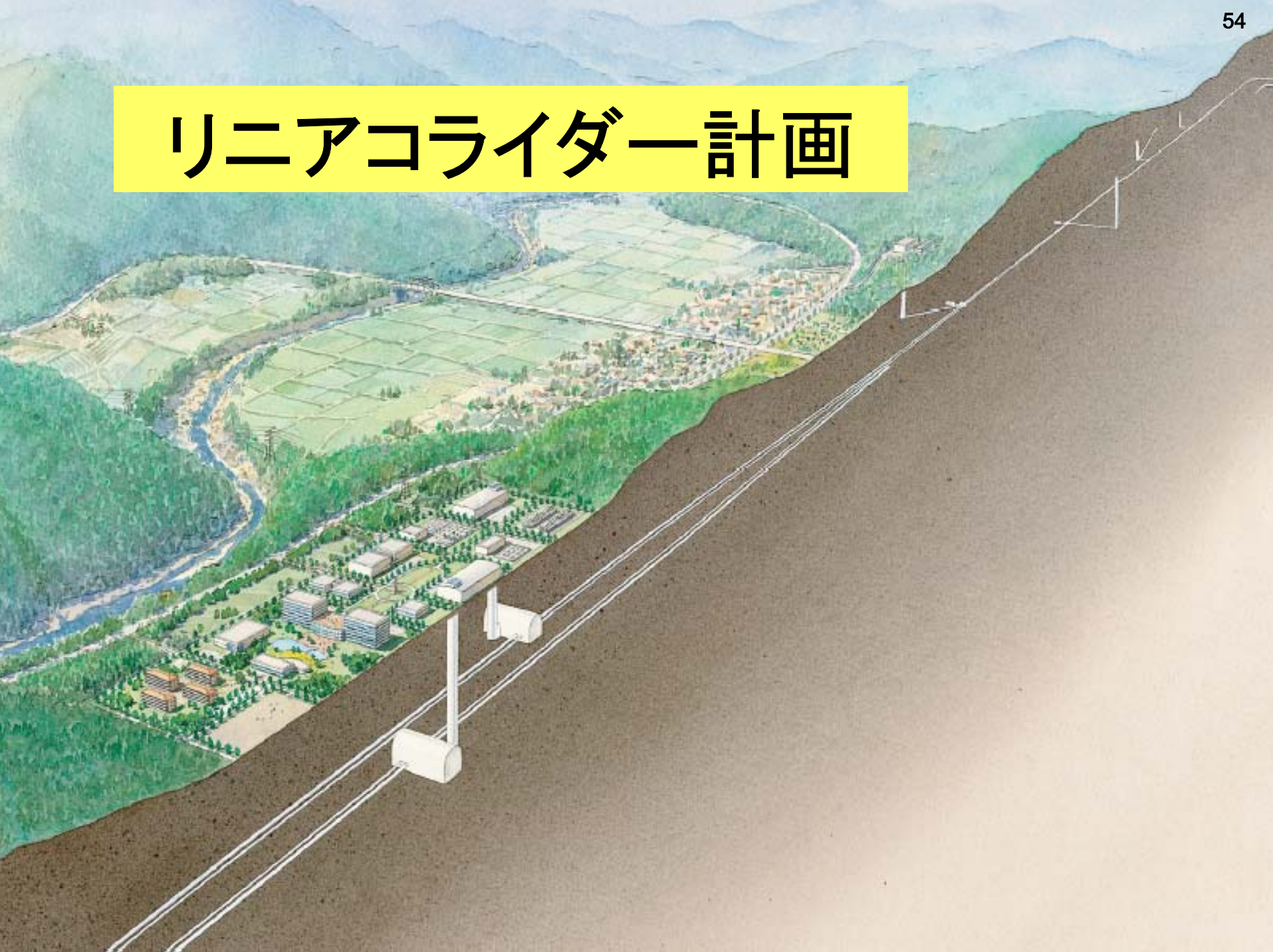
$$\Delta E \propto (E/m)^4 / r$$

そこで放射光の出ない線形加速器(リニアコライダー)

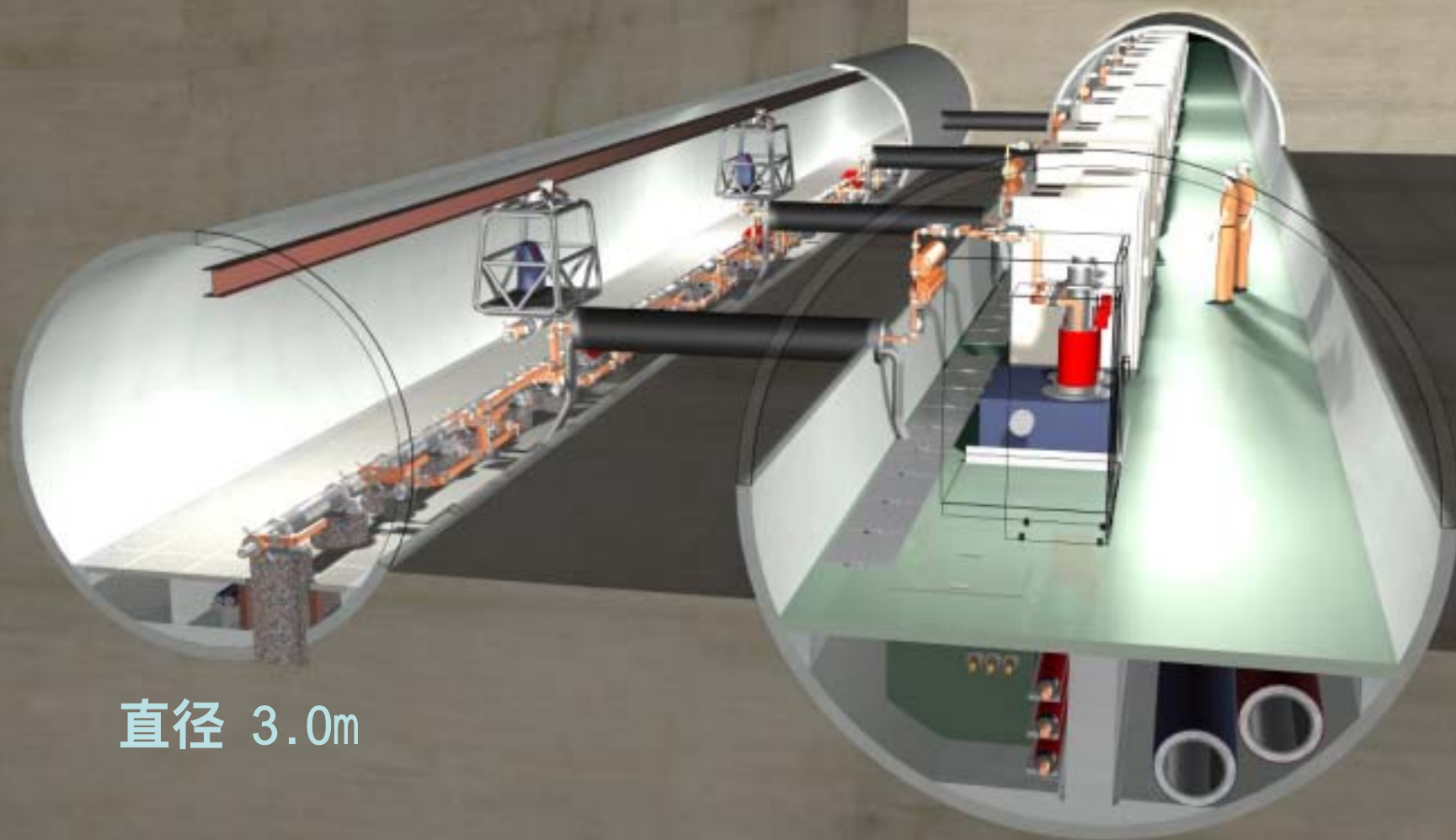


一方から電子、他方から陽電子を加速して正面衝突

リニアコライダー計画



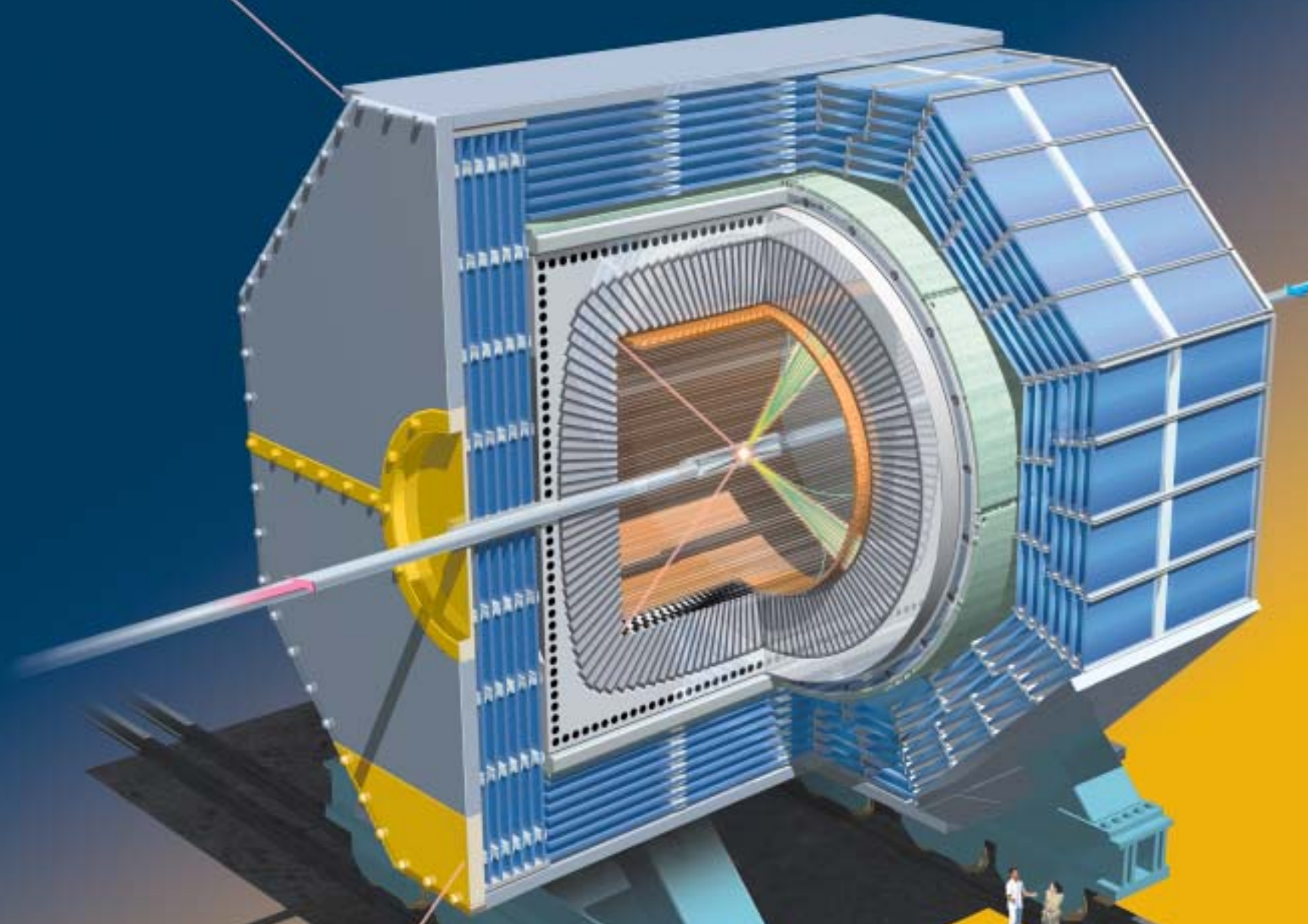
硬岩盤

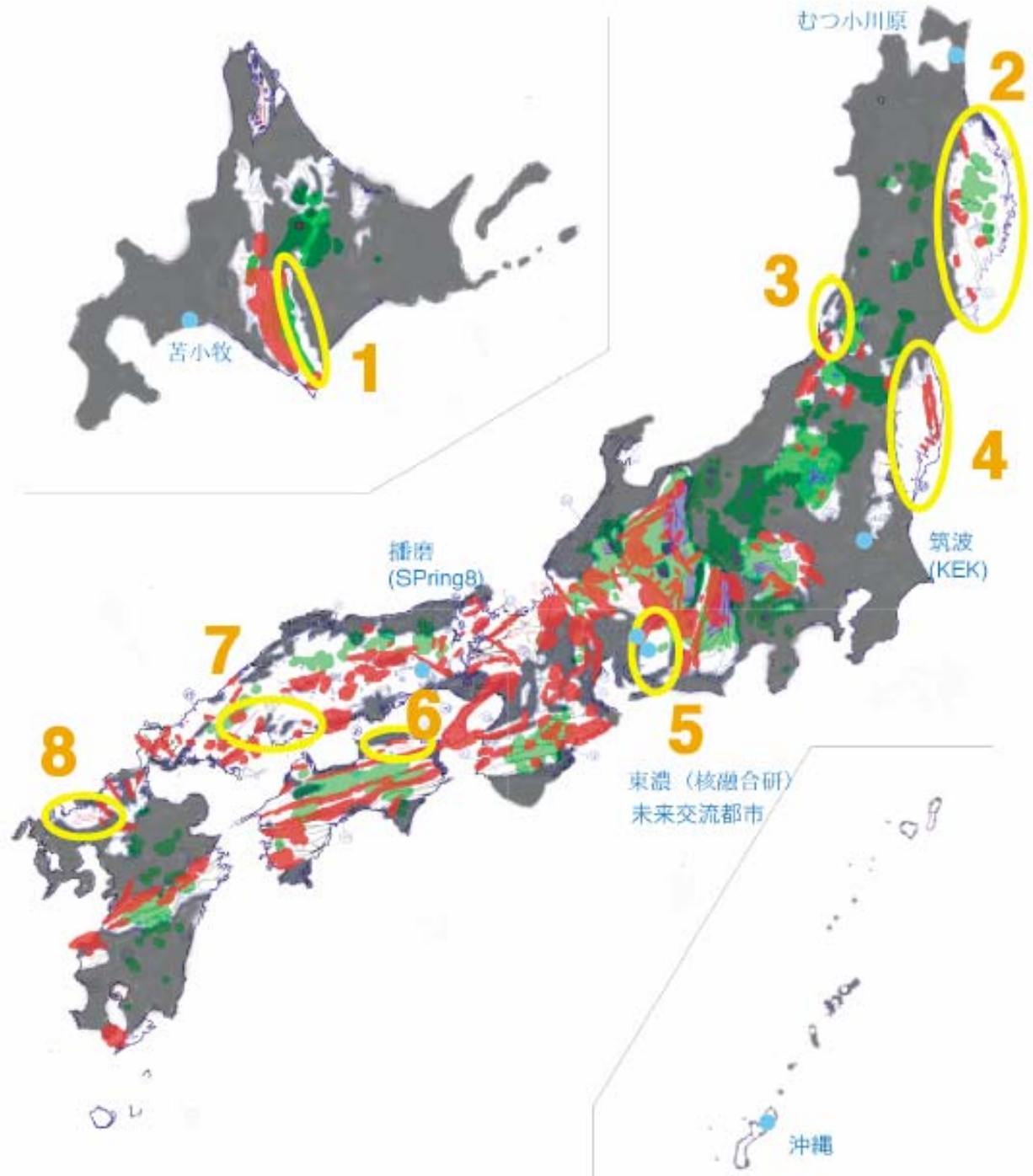


直径 3.0m

JLC 20Km以上の長さを持つ直線加速部分

直径 4.2m

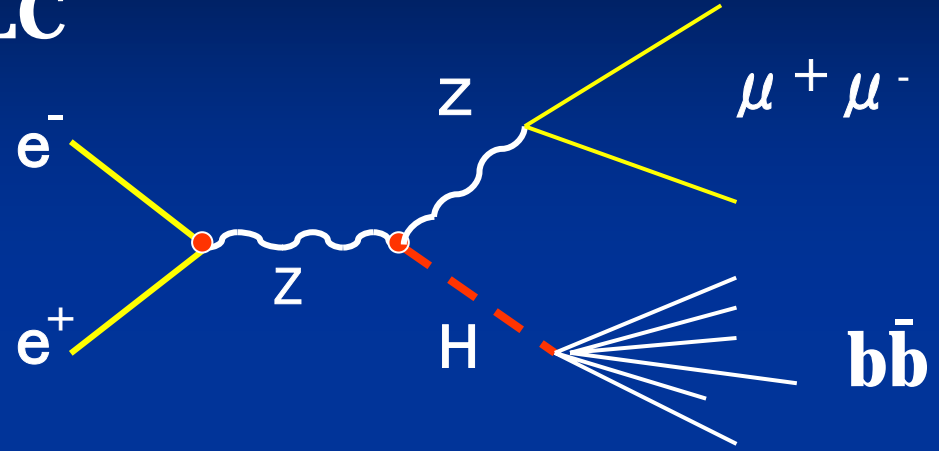




リニアコライダー と LHC

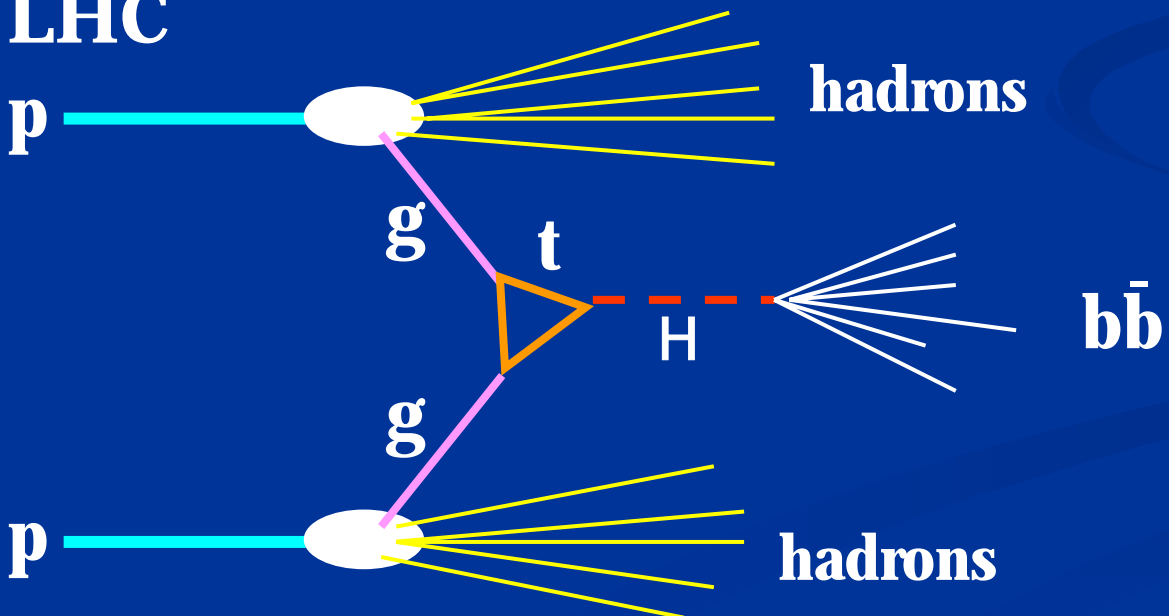
例 ヒッグス粒子生成

LC



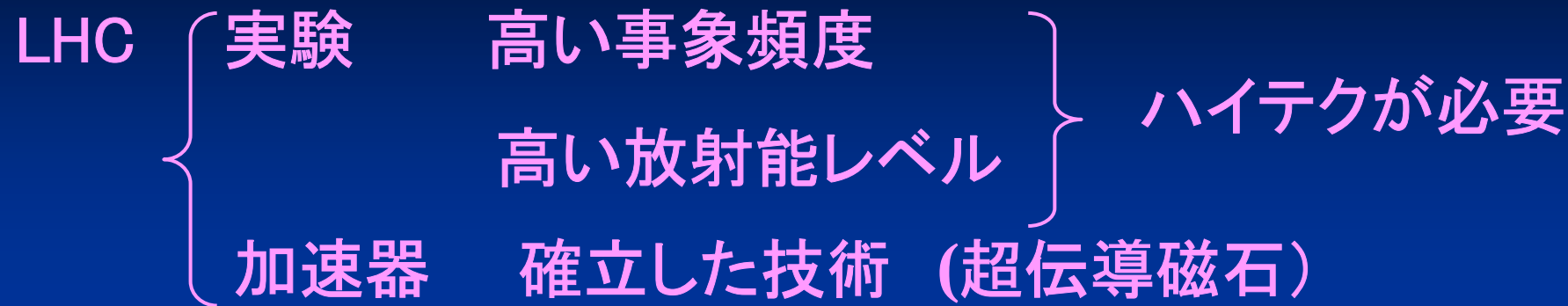
電子(陽電子)は素粒子
 ⇒素過程の直接観測
 実験は容易

LHC



陽子は複合粒子
 ⇒反応は複雑
 高放射線
 高事象頻度
 ハイテクが必要

リニアコライダーとLHC



最高エネルギーで新しい物理を俯瞰する

リニアコライダー



新粒子の発見だけでなく「物理の原理」の発見を目指す

両方が長所を出し合うことで「新たなパラダイム」を構築

リニアコライダーの目的

21世紀の基礎科学、技術、科学教育の基盤

⇒ 文化創造立国、科学技術創造立国

次世代に夢を与える

わが国の高エネルギー物理学研究者の総意

アジア諸国の強い後押し

アジア、アメリカ、ヨーロッパ 全てで次期最優先計画

日本、米国、ドイツが競争。大きな予算の出た国がホスト

⇒ 真の国際協カプロジェクト、国際貢献のシンボル

加速器技術：KEKBで証明済み、神岡実験：パイオニア

**ASIANS DESPERATELY NEED
A MAJOR HEP (ENERGY FRONTIER) MACHINE**

EUROPE

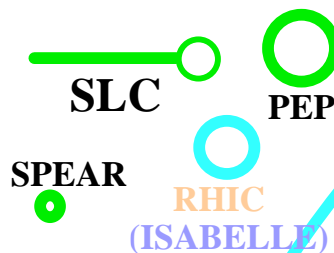


LEP/LHC

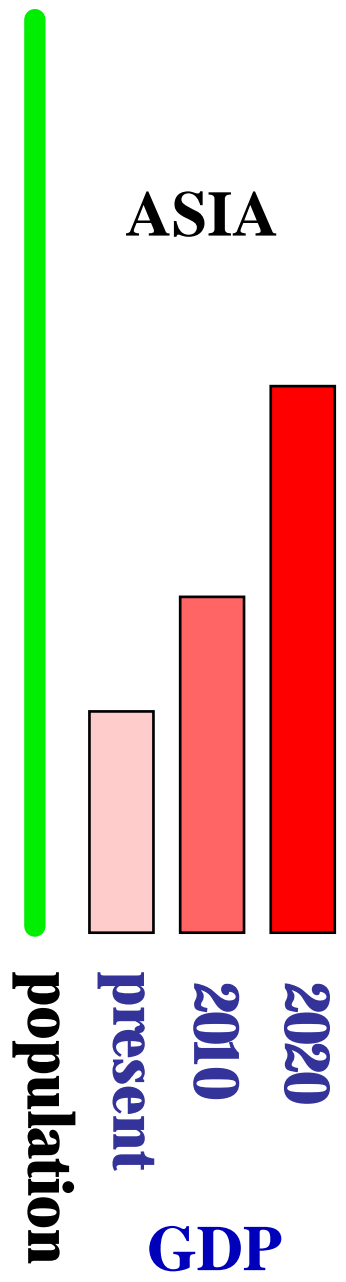
ASIA



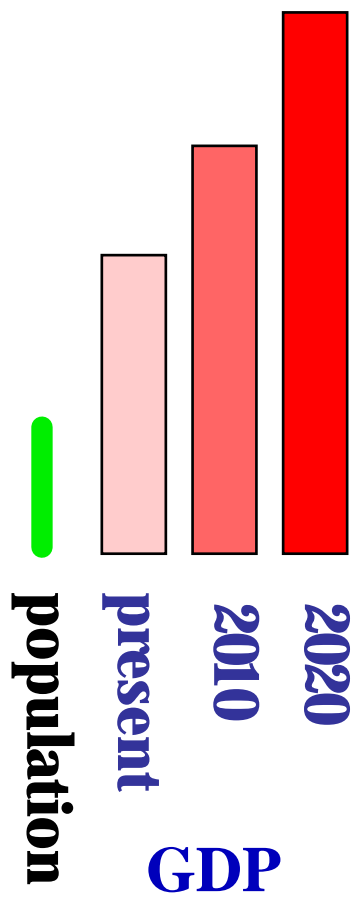
NORTH AMERICA



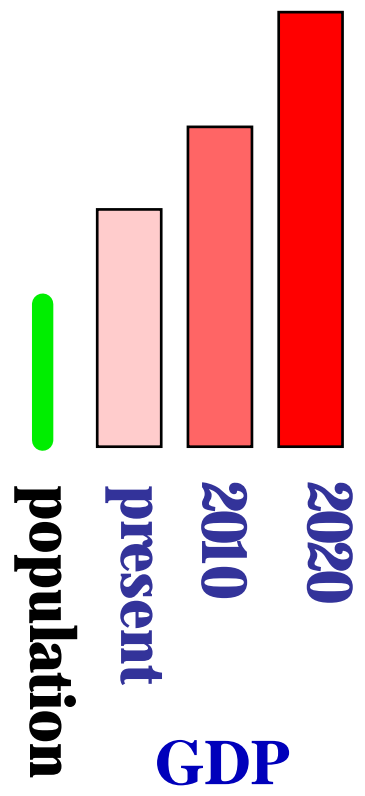
ASIA



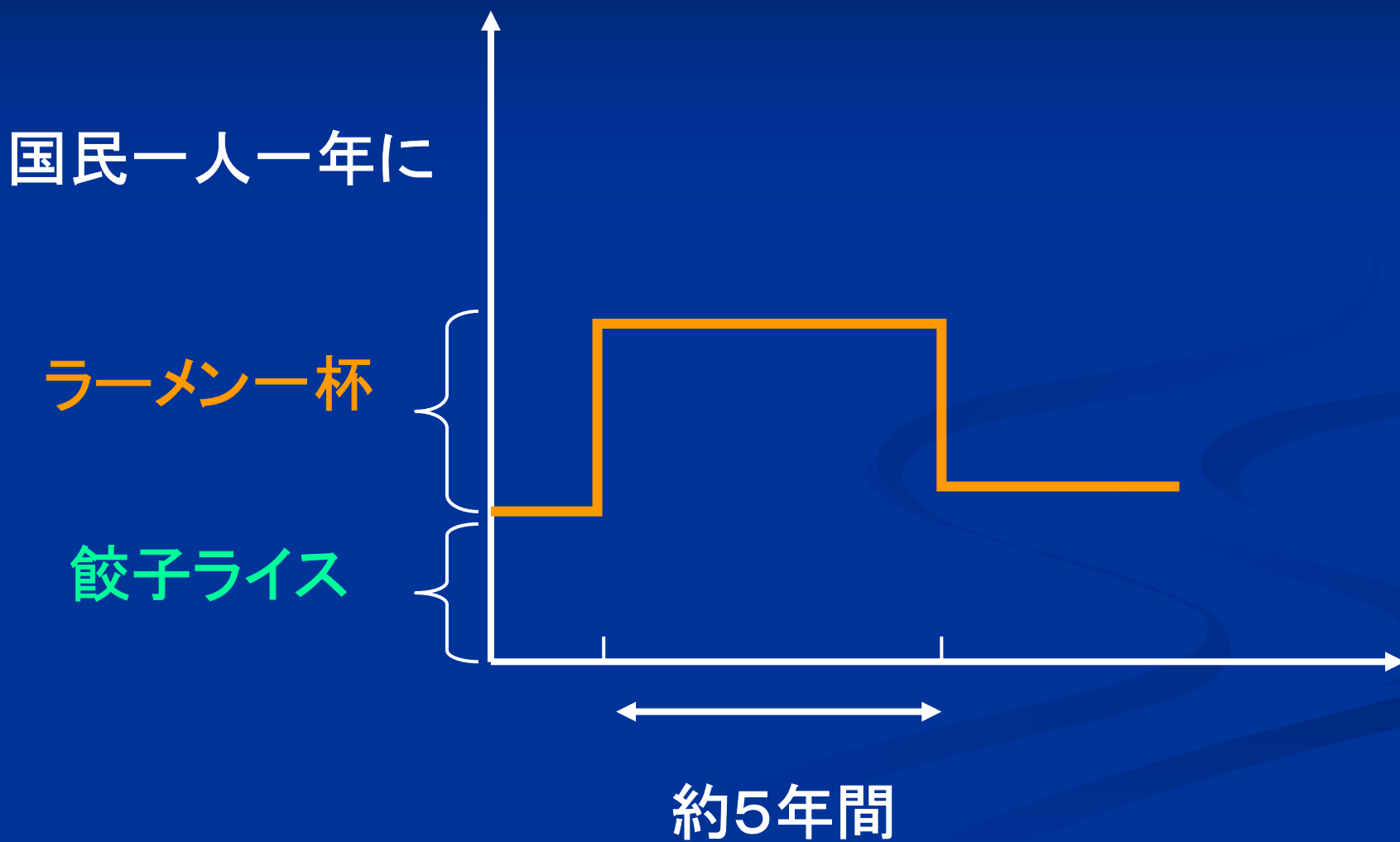
NORTH AMERICA



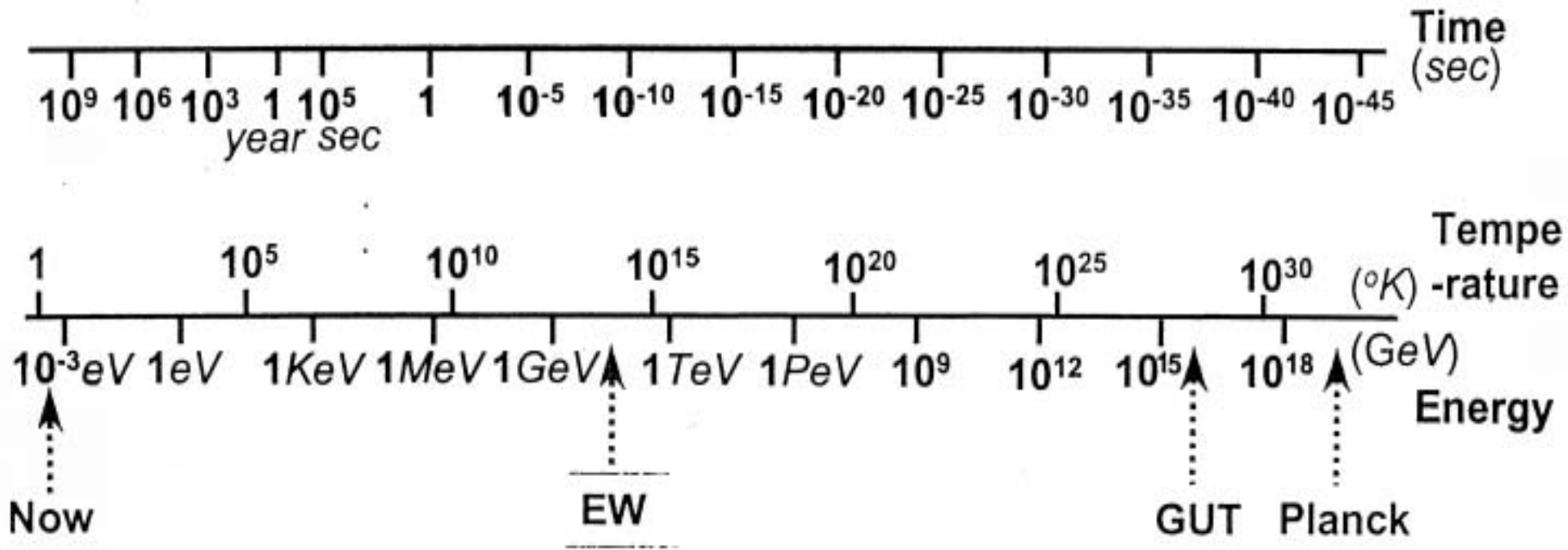
EUROPE



JLCの予算



相互作用の統一



加速器直接実験 ←

SUSY:
超対称性理論

Super-string:
超ひも理論



ハドロン