

学術

催

講義

主題科目 / テーマ講義 2単位 1、2年生対象

多彩な物質の世界 —宇宙から地球への遙かなる旅

コーディネータ:岡村定矩(理学部) ナビゲータ:永田敬(教養学部)



ミクロな素粒子からマクロな宇宙へ 駒宮幸男(理学部)、須藤靖(理学部)

第1回	10/7	素粒子研究の過去・現在・未来—最先端加速器LHCが何を变えるか	駒宮	
第2回	10/14	物理屋の世界観、我々は何も知らなかった	須藤	
第3回	10/21	宇宙の組成と物質の起源、太陽系外惑星の世界	須藤	
第4回	10/28	宇宙における偶然と必然、科学は世界をどこまで記述できるか	須藤	

原子・電子・分子のふるまいが生む物質の多様性 家泰弘(物性研)、小島憲道(副学長)

第5回	11/4	現代社会と物質科学、原子から固体へ	家	
第6回	11/11	量子の世界—ナノサイエンス、超伝導、超流動	家	
第7回	11/18	分子の集団が生み出す高度な機能性	小島	

望ましい性質を持つ物質の探索と創成—創薬科学の分野から 杉山雄一(薬学部)

第8回	11/25	薬はどうして効くのか?		
第9回	12/2	薬のトランスポーター		
第10回	12/9	薬とヒトの相性		

物質が変わる—物質から材料へ 小関敏彦(工学部)、鳥海明(工学部)

第11回	12/16	物質から材料として使われるまで—鉄鋼材料を例として	小関	
第12回	1/13	シリコン時代における技術の特徴	鳥海	

小さな地球を永遠に 小宮山宏(初級長、三層研)

第13回	1/20	地球環境の持続性		
------	------	----------	--	--

駒場キャンパス 18号館ホール 木曜日 5時限 (16:20-17:50)

<http://www.gfk.c.u-tokyo.ac.jp/>



「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

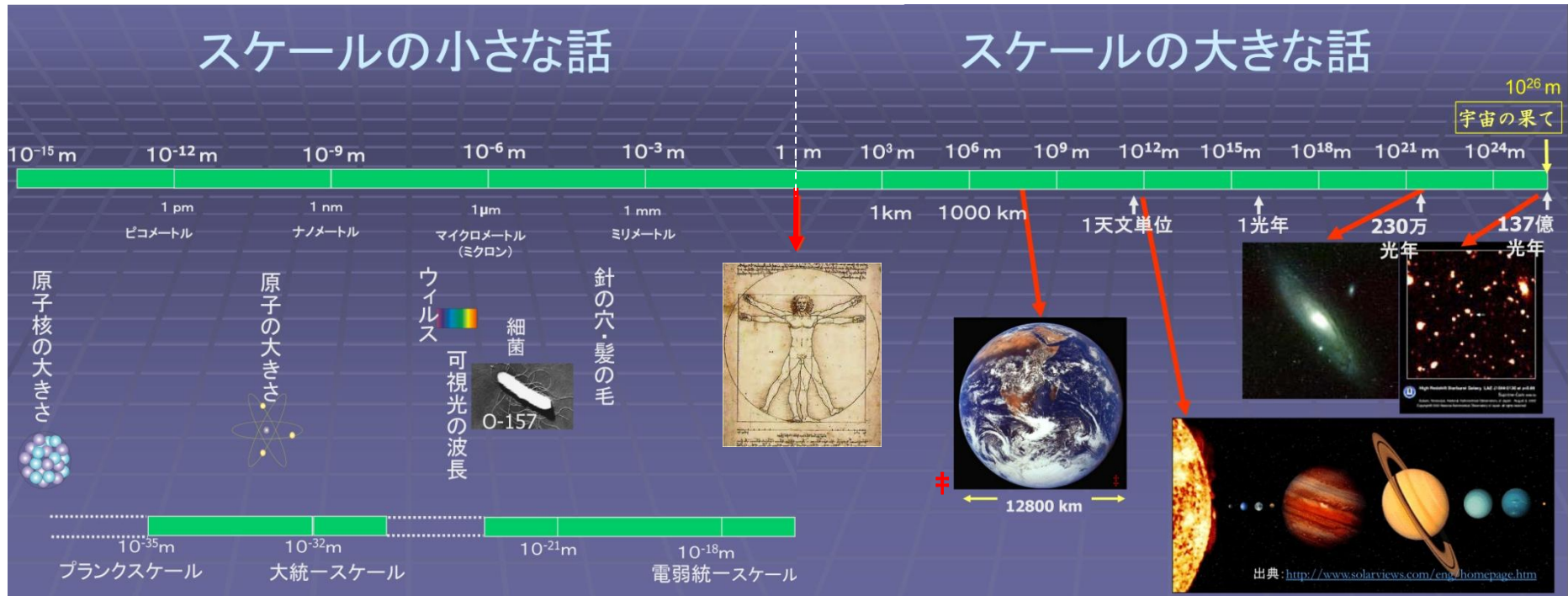
自然界のスケール

(家 先生講義資料より改変)

原子核
(10^{-15} m)

41桁の違い！

宇宙の果て
(10^{26} m)



原子
(10^{-10} m)

物質界

17桁

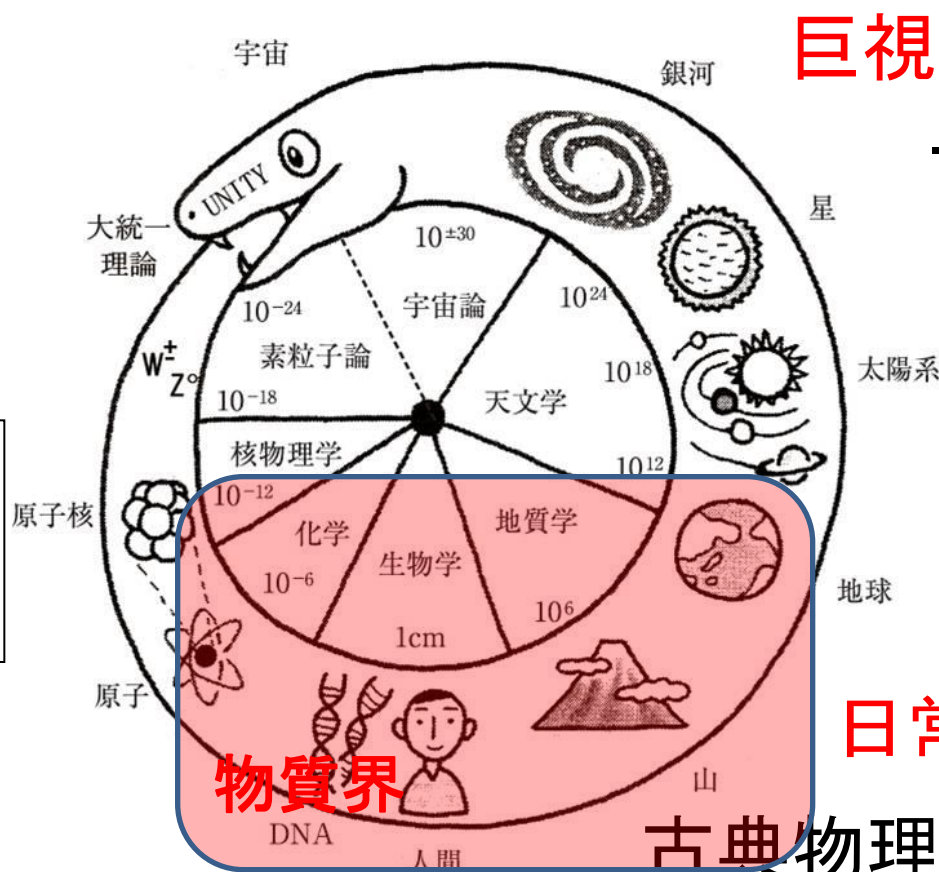
地球
(10^7 m)

巨視的世界と微視的世界はつながっている

ウロボロス:「尾を飲み込む蛇」を意味するギリシャ語

微視的世界 量子力学

- ・ 粒子性と波動性
- ・ プランク定数 h_p が重要な役割



巨視的世界

一般相対論

- ・ 時間、空間、物質の結びつき
- ・ 光速度 c が無限大とは見なせない

日常の世界

古典物理学 (ニュートン力学)

- ・ 時間、空間、物質は独立な概念
- ・ $h_p \rightarrow 0$ ($c \rightarrow \infty$) の極限

※ 図の出典: 須藤靖著「ものの大きさ」
東大出版会 2006年

イラスト: いずもり よう

物質界を把握する2つの軸

この軸に沿った講義の配置には特別な意味はない

人間・社会との関わり

統合性・応用の広がり

理学(物理・化学)的な探求の広がり

駒宮 家 小島

杉山

鳥海

小宮山

小関

須藤

駒宮

10^{-10}

10^{-6}

10^{-2}

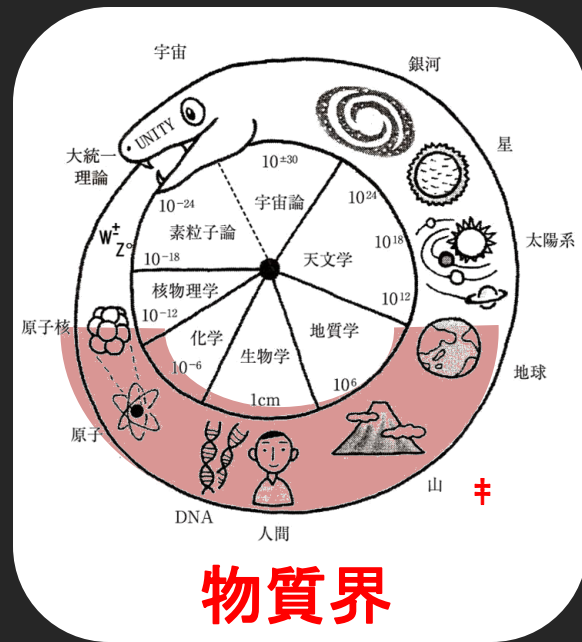
10^2

10^6

10^{10}

(m)

大きさ



物質界

素粒子物理学

現代・過去・未来

2010年10月7日

学術俯瞰講義

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

東京大学素粒子物理国際研究センター

駒宮幸男

話の流れ

- 宇宙と素粒子の関係

宇宙の膨張とビッグバン

加速器実験＝初期宇宙を実験する

- 素粒子物理の歴史 (過去～現在)

原子模型から「標準理論」の成立

素粒子と宇宙の謎: まだわからないこと

- 高エネルギー加速器 (現在～未来)

LHC と ILC

- 大型基礎科学計画の役割

宇宙と素粒子の関係

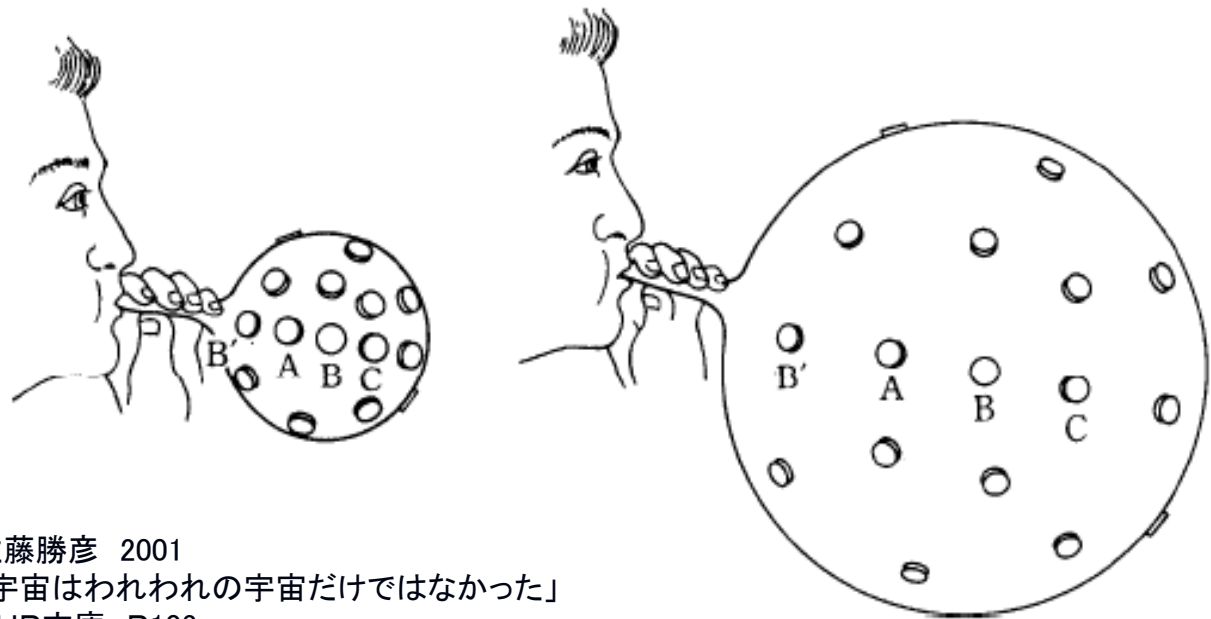
宇宙史をさかのぼり、ビッグバンを実験する



膨張宇宙の発見 (E.Hubble,1929)



✦ NASA
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Edwin_Hubble.jpg



✦ 佐藤勝彦 2001
「宇宙はわれわれの宇宙だけではなかった」
PHP文庫 P103

ハッブルの法則:

遠くにある銀河ほど、
高速度で遠ざかっている。

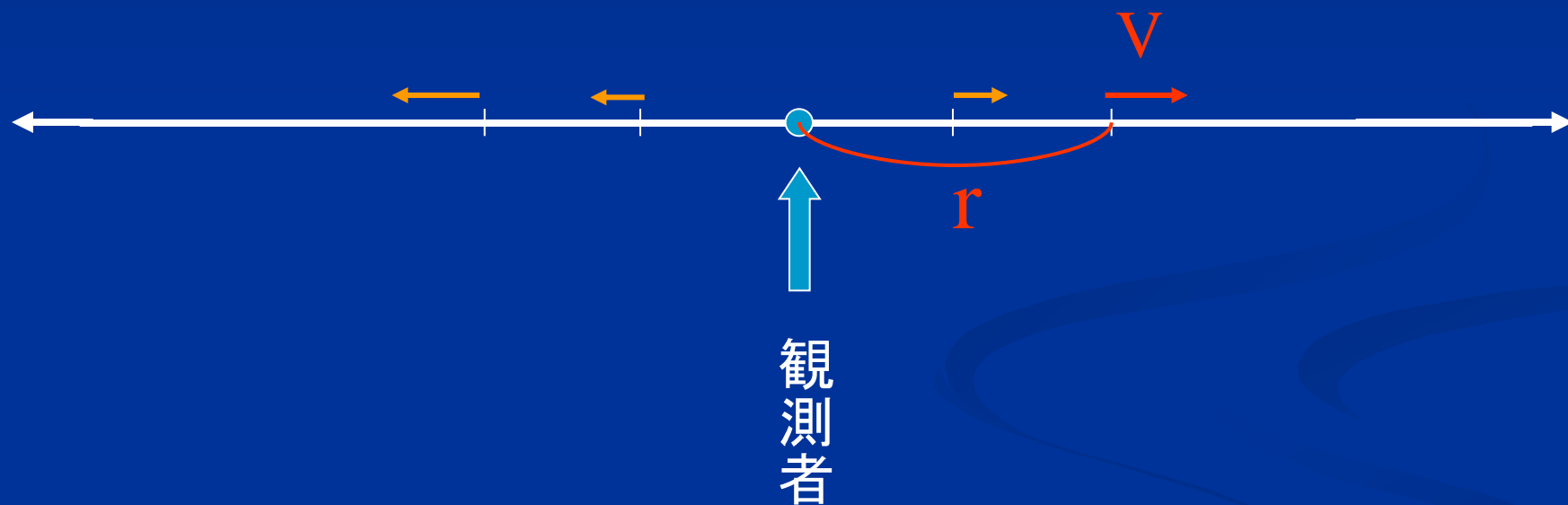
ノーベル賞を束にして出してよい大発見。

もはやこの世界は永遠不変ではなく、始まりがあり、動的に進化する存在である。

$$V = H_0 \cdot r$$

宇宙の膨張

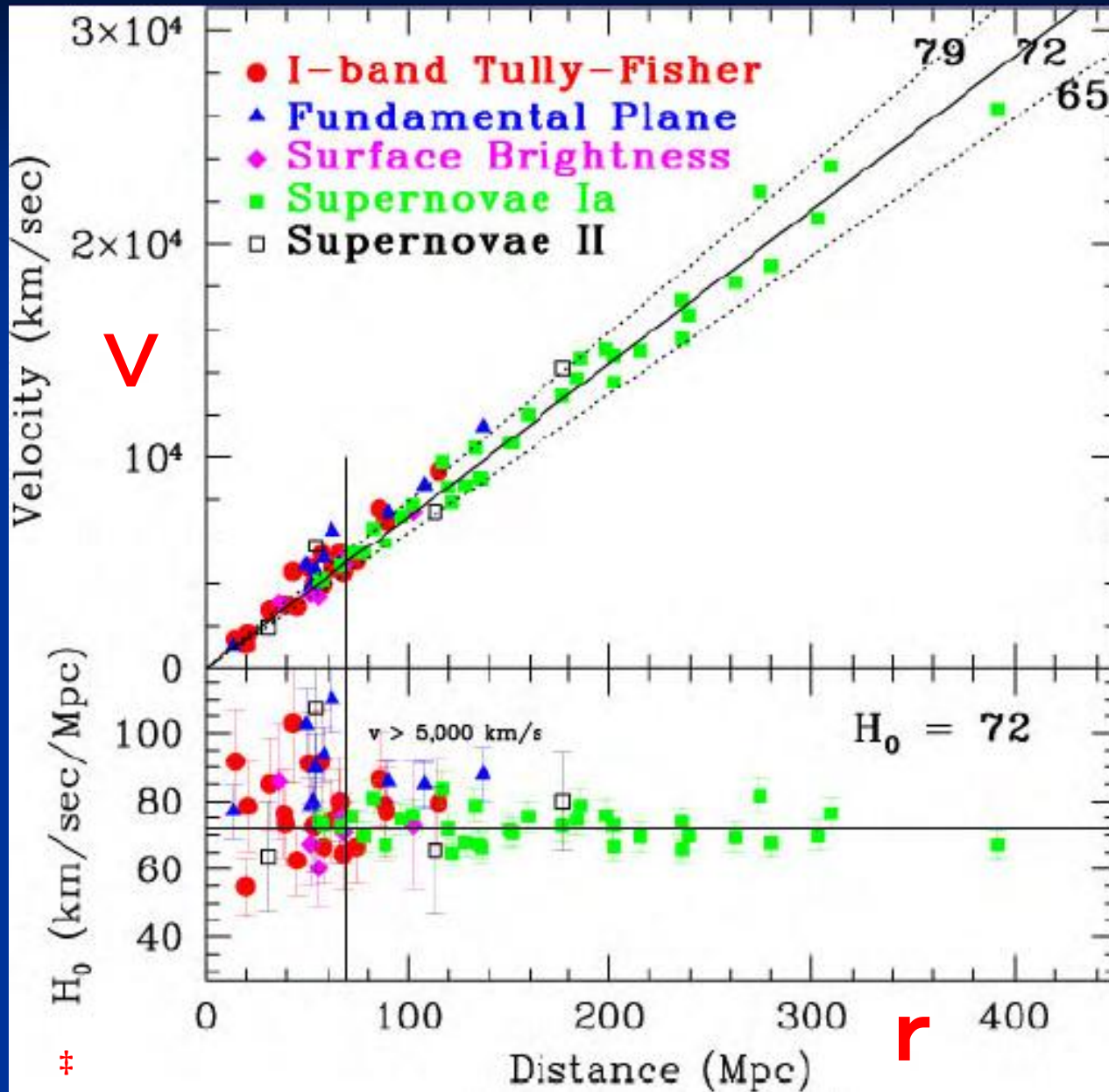
3次元の宇宙で膨張を考えるのは難しい
宇宙が一次元だったら宇宙が膨張したらどうなるだろう



ゴムひものように伸びる宇宙で、観測者は宇宙のどこにいても同じように膨張が観測される(宇宙に中心はない)

観測者から見て遠い点(銀河)ほど速く遠ざかる $v = H_0 r$

宇宙膨張の実際の測定結果



宇宙の年齢は
137億年

$$v = H_0 r$$

いかにして銀河の速度 v を測るか

「ドップラー効果」を使う

救急車のサイレン 音は波（音波）

近づくと音が高くなる

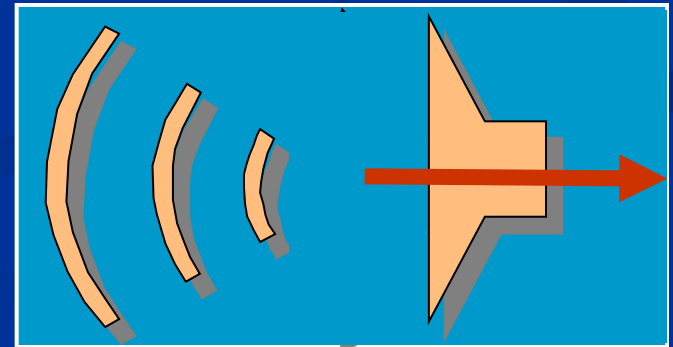
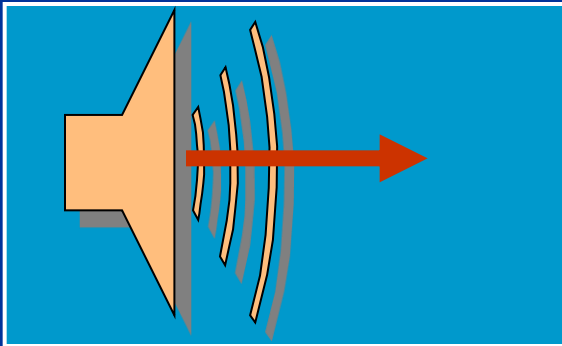
⇒波と波の間隔が短くなる

⇒波長が短くなる

遠ざかると音が低くなる

⇒波と波の間隔が長くなる

⇒波長が長くなる（速度が速いほど）



銀河の速度（光の波長が変わる）

光も波（電磁波）

可視光の色は波長で決まる。

赤外、赤、橙、黄、緑、青、藍、紫、紫外

波長 0.77 0.57 0.45 0.38 μm (10^{-6} m)

遠ざかる速度が大きいほど、赤い方（波長が長くなる方）に波長がシフトする（赤方偏移）



銀河までの距離 r の測り方

我々のいる銀河(天の川)の他に
無数の銀河が宇宙にはある

近い銀河 明るい

遠い銀河 暗い

同じ性質の銀河(Ia型超新星=標準光源)ならば、

望遠鏡に入ってくる光量(L)は距離の2乗に反比例する



$$L \propto 1/r^2$$



$$L \propto 1/R^2$$

R



ジョージ・ガモフ(ロシア人)



膨張宇宙の映画のフィルムを逆回しすると(時間をさかのぼると)収縮して熱くて密度の高い宇宙になる。

火の玉宇宙(ビッグバン宇宙)の提唱者

宇宙膨張



過去にさかのぼれば
宇宙は高温高圧の状態

圧縮すると温度が上がる



✦ <http://www.aip.org/history/cosmology/ideas/larger-image-pages/pic-gamow.htm>

宇宙のエポックと素粒子

現在: 暗黒エネルギー、暗黒物質
2.7K宇宙背景輻射、
2.2K宇宙背景ニュートリノ

星と銀河の形成

宇宙の晴れわたり(分子、原子の形成)

Heなど軽い原子核の形成

弱い相互作用と電磁相互作用の分岐

現在の加速器の限界

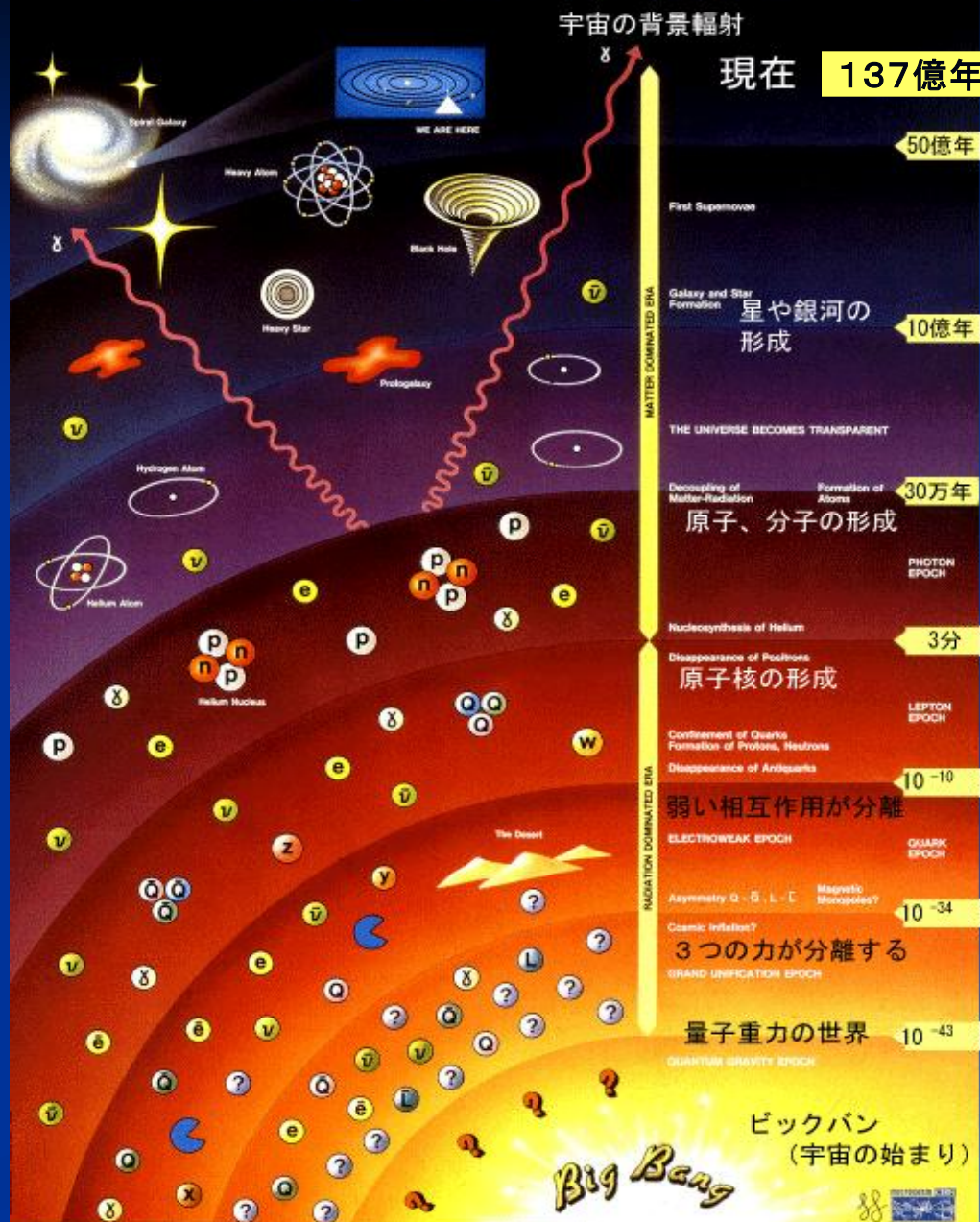
強い相互作用と電弱相互作用の分岐

インフレーション 大統一

プランクスケールの世界

量子重力の世界

History of the Universe

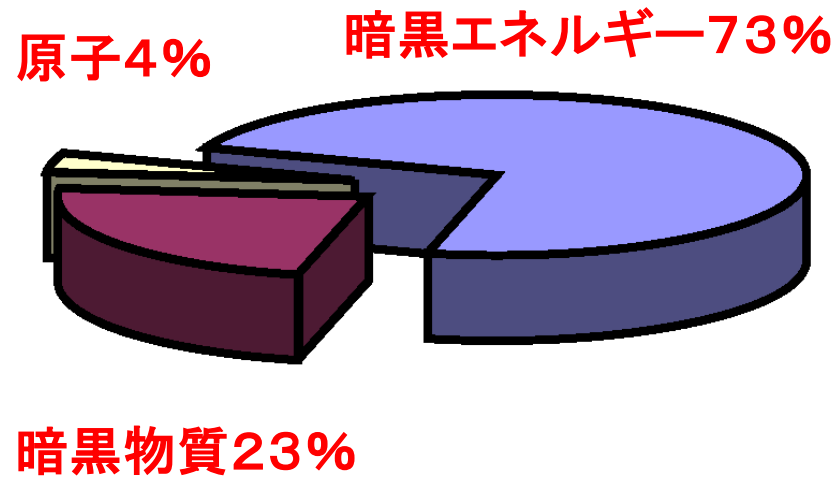


現在の宇宙で最も不思議なこと

■ 宇宙のエネルギー組成

反物質	~0%
原子	$4.4 \pm 0.4\%$
暗黒物質	$23 \pm 4\%$
暗黒エネルギー	$73 \pm 4\%$

(WMAPなどでの観測)



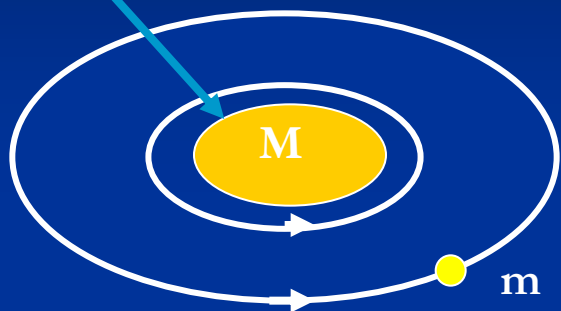
96% は未解決

これらは素粒子物理学で理解されるべき

宇宙の暗黒物質 (Dark Matter)

銀河の周りを回る星の速度

銀河



重力=遠心力

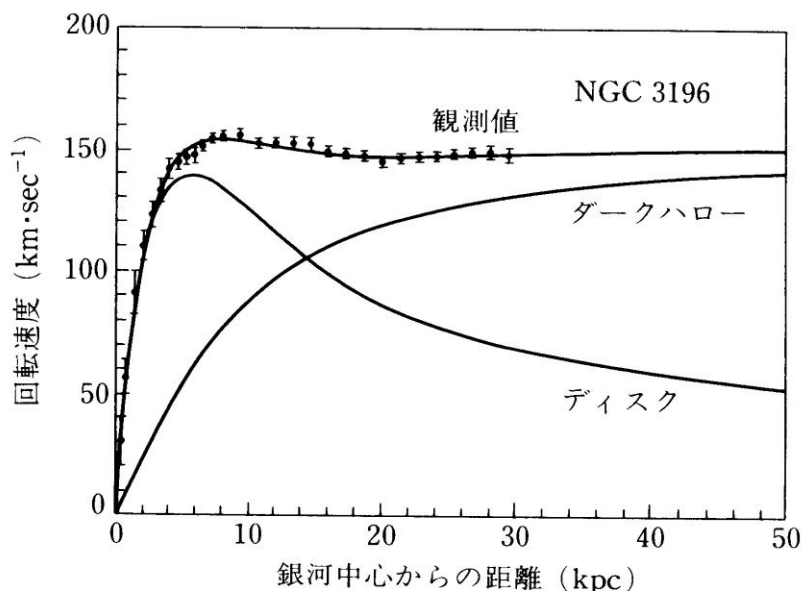
$$G M m / r^2 = m v^2 / r$$

銀河外

$$v = \sqrt{GM/r}$$

銀河内

$$v = \sqrt{\pi G \sigma r}$$



星がほとんどいない遠方まで行っても速度は減少しない。

⇒我々の銀河にも 1 cm³ 当たりに陽子の質量の1/3の光らない物質がある 即ち、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 $\tilde{\chi}^0$

暗黒エネルギー (Dark Energy)

現在の宇宙の膨張は加速されている。
これは、真空に何らかのエネルギーが必要
まったくの謎

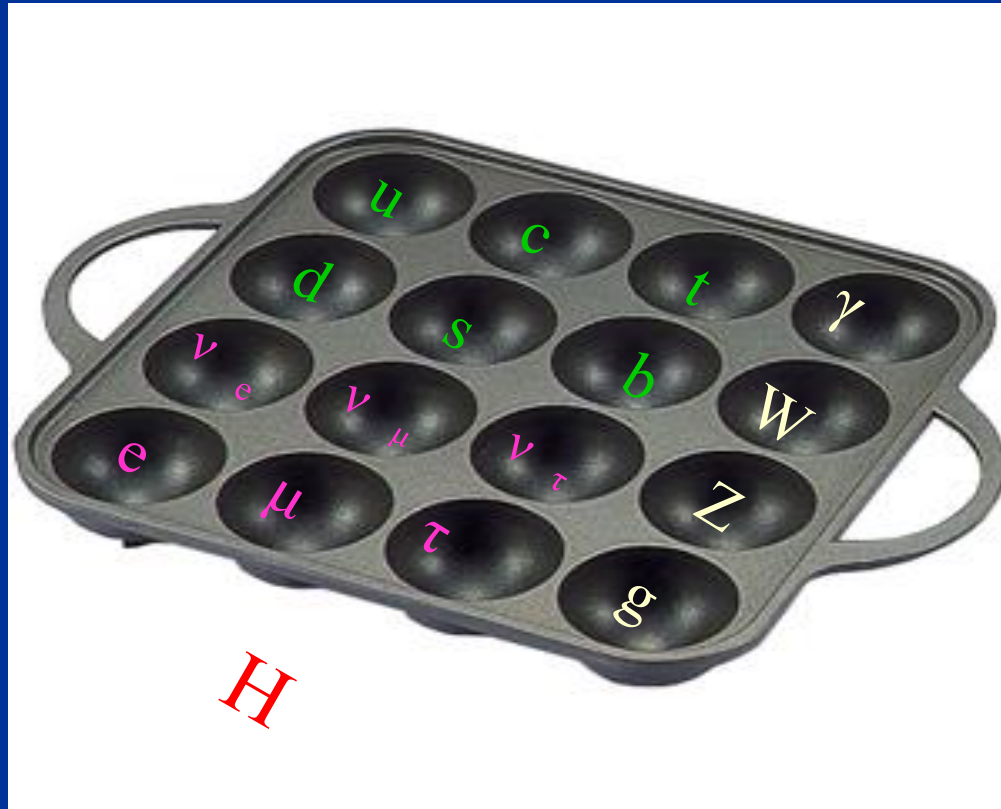
著作権の都合により、
ここに挿入されていた
セーラームーンの画像を削除しました。



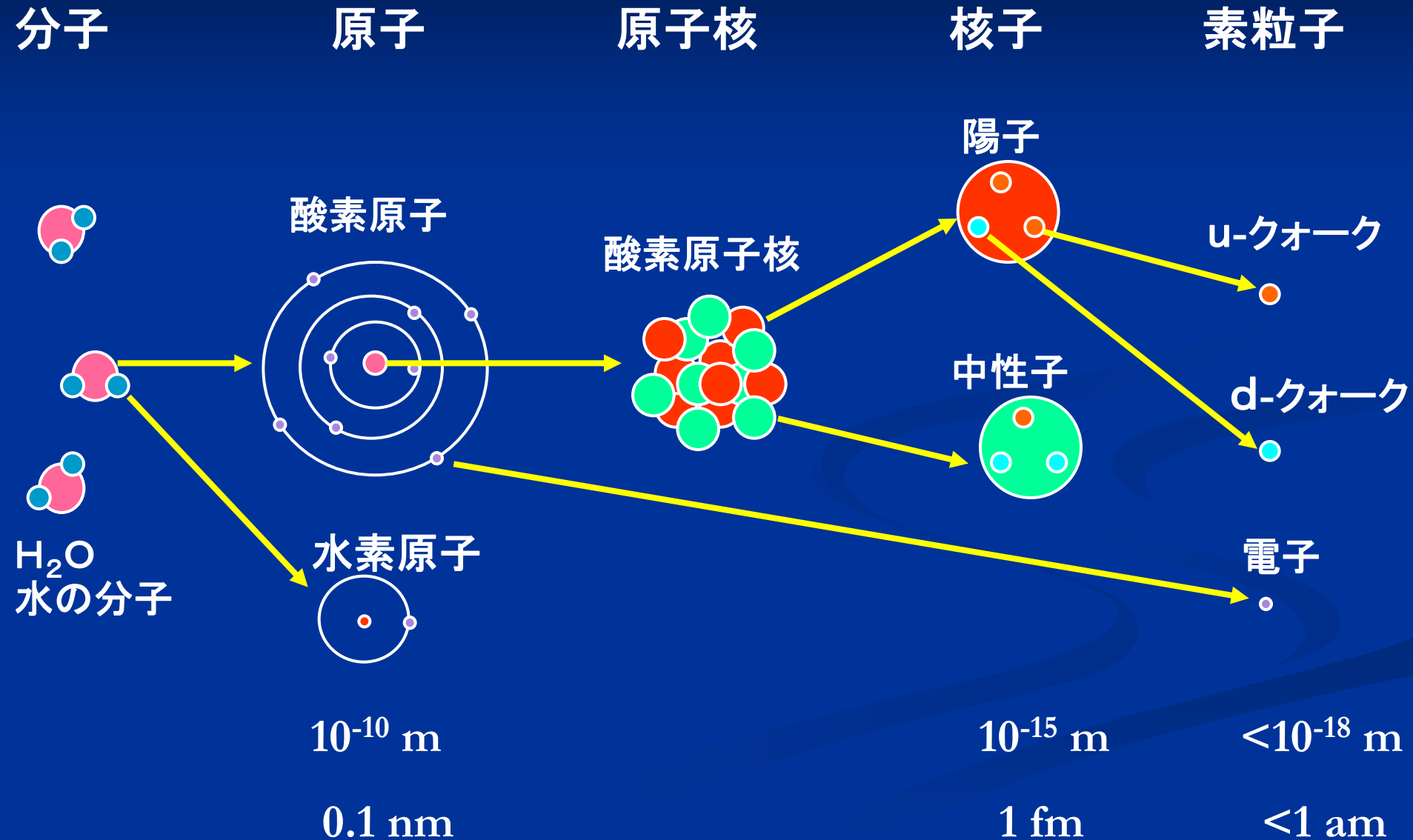
セーラームーンに「ダークエナジー」
が出てきた

怪しいクスリ

素粒子物理の歴史



物質の階層構造とそのスケール



大きさの比較

陽子

1mm



原子

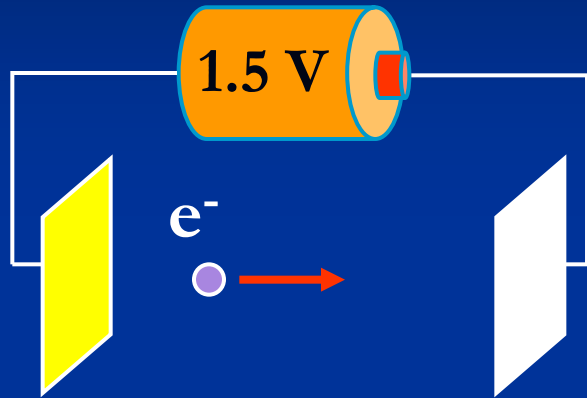
100m



✚ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stitched_003.jpg

エネルギーの単位

電子ボルト $1 [eV] = 1.6 \times 10^{-19} [J]$



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。

$1 [MeV] = 10^6 [eV]$ (メガ)

原子核反応のエネルギー

$1 [GeV] = 10^9 [eV]$ (ギガ)

$1 [TeV] = 10^{12} [eV]$ (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 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}$

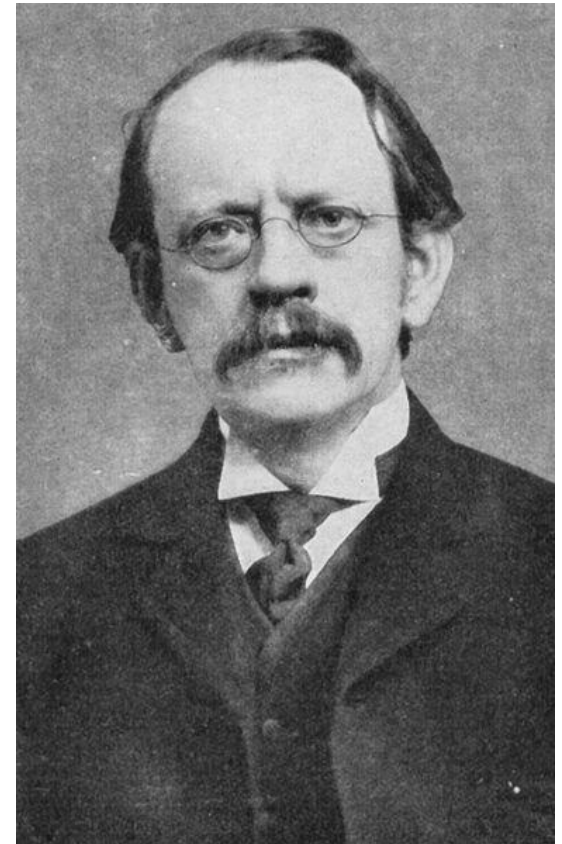
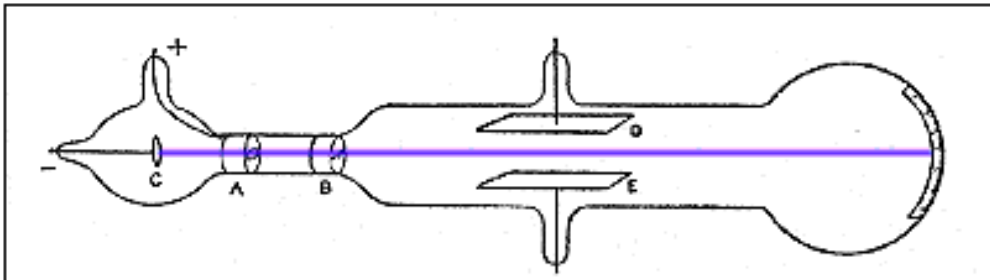
最初の素粒子「電子」の発見

1897年 J.J. Thomson

下の装置で電子の比電荷
(Q/m) を測定した。

⇒ Q/m が、電気分解で
求められた元素の Q/m
よりも非常に大きい
電子は極めて軽い。

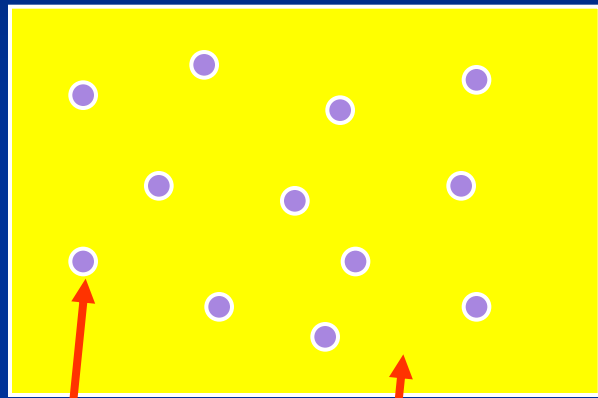
⇒ 原子構造の探求へ



http://en.wikipedia.org/wiki/File:J.J_Thomson.jpg

ラザフォードの原子核の発見

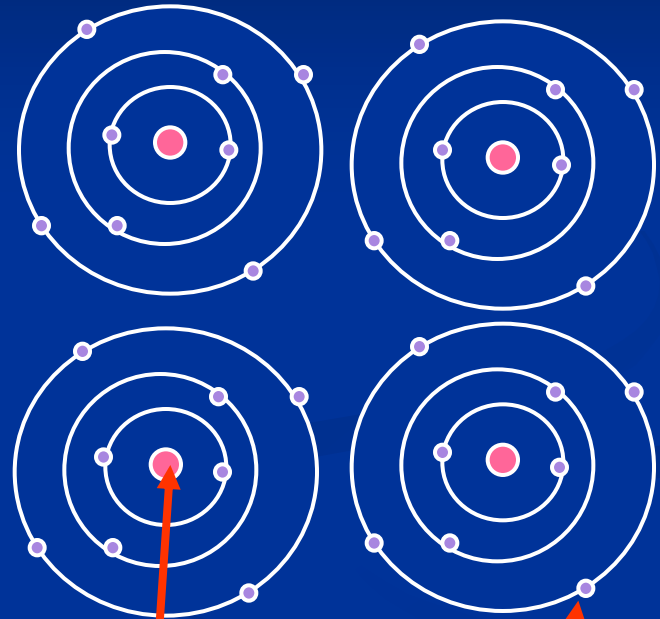
モデル 1



電子

均質な+電荷

モデル 2



硬く重い核 +電荷

電子

ぶどうパンモデル

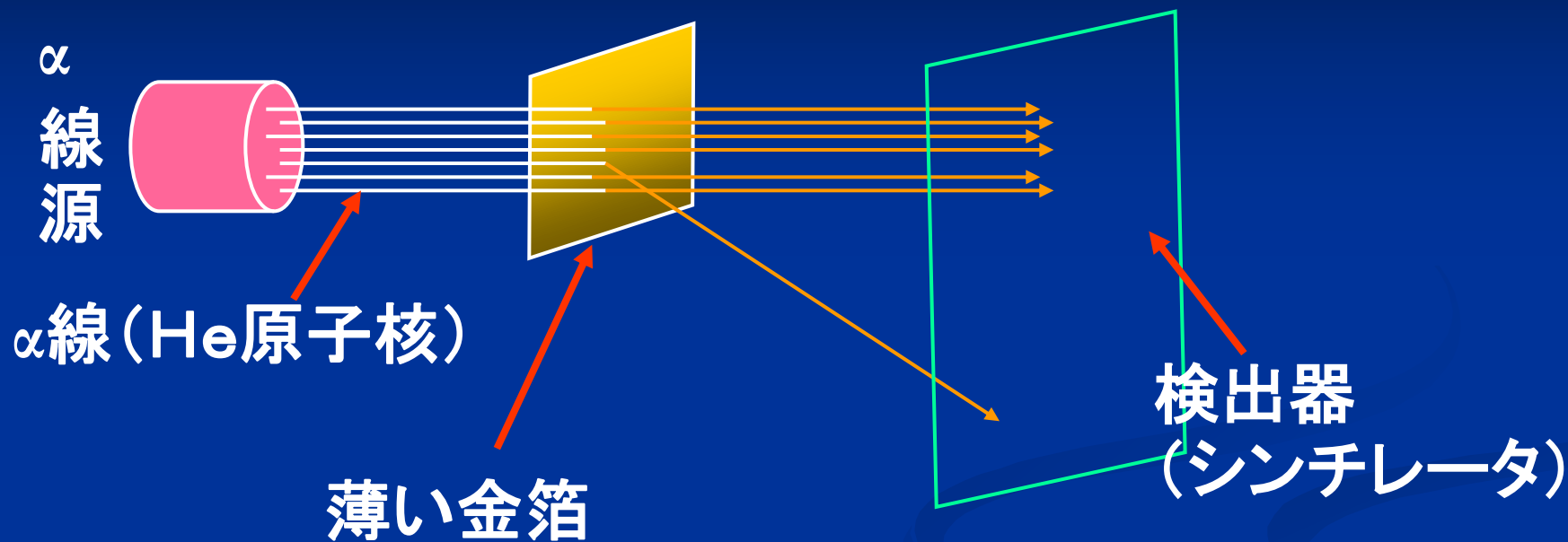
J. J. トムソン

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

1930年代初頭の「素粒子」

電子 e^- 1897年

陽子 p^+ 1911年

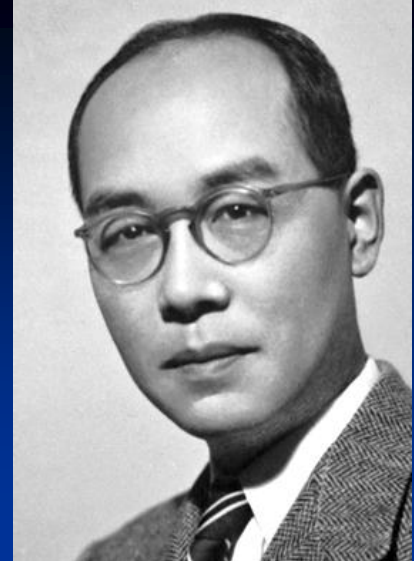
中性子 n^0 1932年

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

湯川秀樹博士の π 中間子の の予言(1935年)



<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Yukawa.jpg> より

- 新しい力(相互作用)

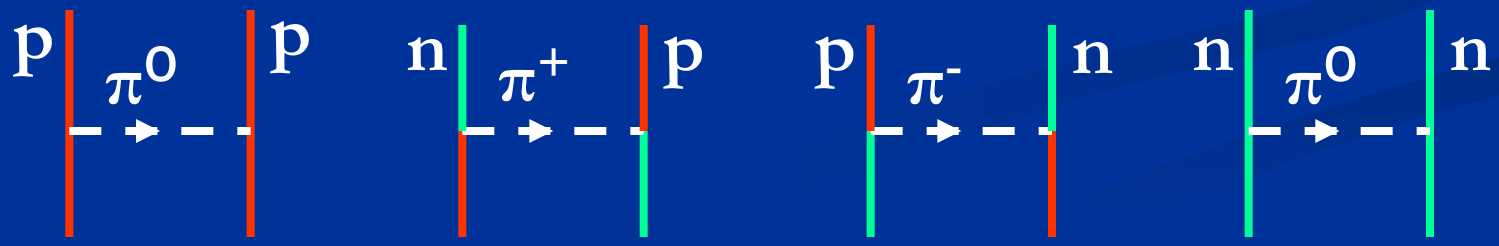
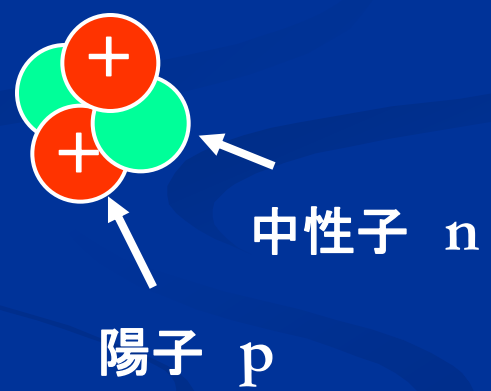
電磁力よりも強い引力

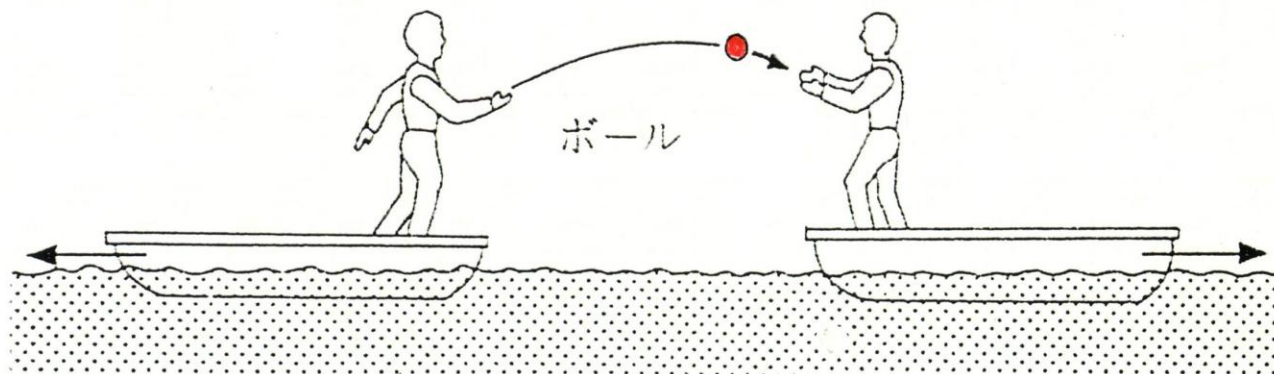
- 力(相互作用)の本質

力を媒介する粒子の存在

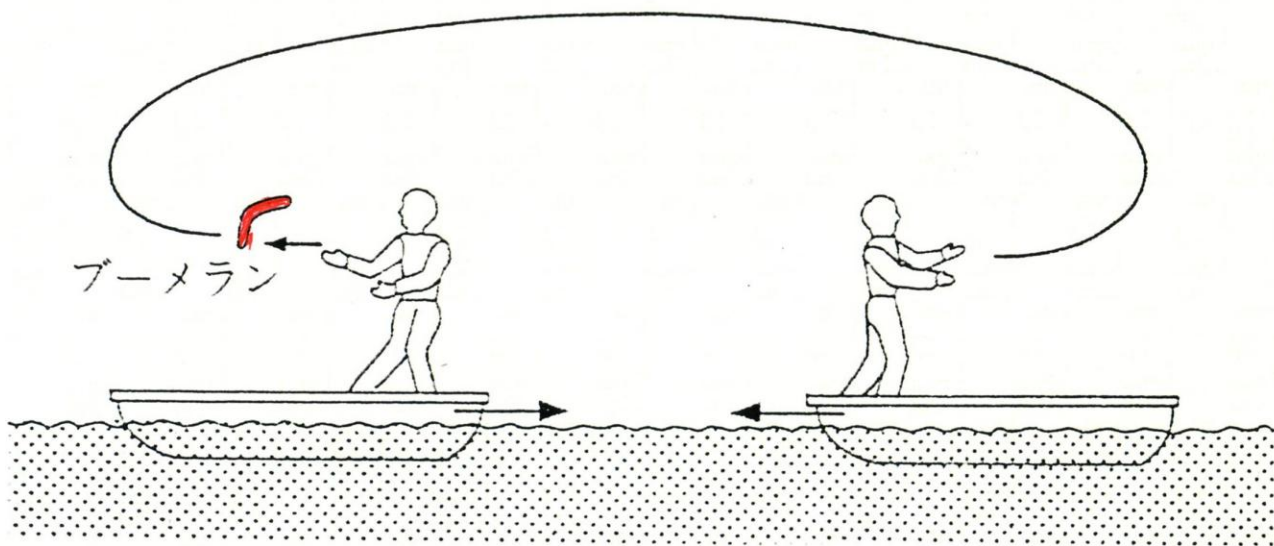
- 新粒子の性質の予言

力の到達距離 \Rightarrow π 中間子の質量の予言





反発力

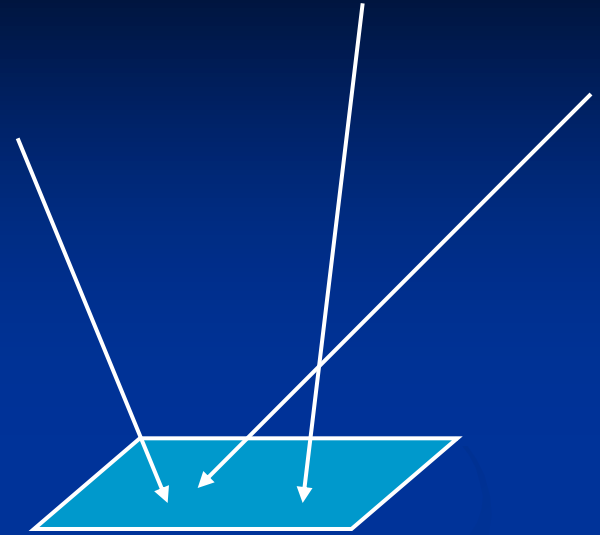


引力

図2.11 力を橋渡しするもの

μ 粒子の発見 Anderson Neddermeyer 1937

宇宙線：
地上で 1cm^2 当たり
約1分に1個の粒子が
降っている



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。

(2中間子理論: 坂田、谷川、井上) μ 粒子 = 電子の兄弟

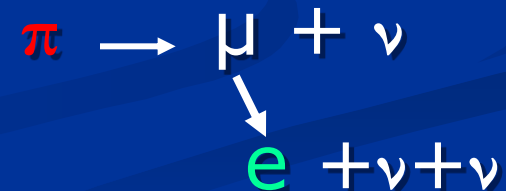
偉い理論家の新粒子・新現象の予言は、理解できなくても一応聞いた振りをして、何しろ実験で探してみる
⇒ 予想もしなかった新しい粒子や現象が発見される
(ことがある)。

π 中間子の予言 ⇒ μ 粒子の発見 (Anderson)

陽子の崩壊 ⇒ 超新星からのニュートリノの観測 (小柴先生)

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)



加速器による新粒子群の発見

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)が発見され、収拾がつかなくなった。

「もしこんな多くの粒子の名前を全て覚えることができたなら、私は植物学者になっていたであろう」 E.Fermi

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

$$\left. \begin{array}{l} p \text{ 電荷} = 1 \\ n \text{ 電荷} = 0 \\ \Lambda \text{ 電荷} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} u\text{-クォーク} \text{ 電荷} = 2/3 \\ d\text{-クォーク} \text{ 電荷} = -1/3 \\ s\text{-クォーク} \text{ 電荷} = -1/3 \end{array} \right\}$$

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

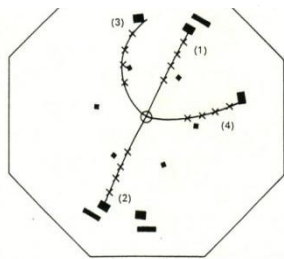
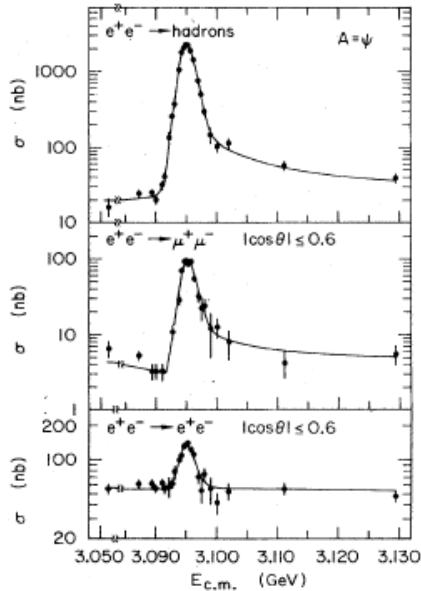
$$n = udd \quad \text{電荷} = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$$

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。

The November Revolution

1974年11月 J/ψの発見



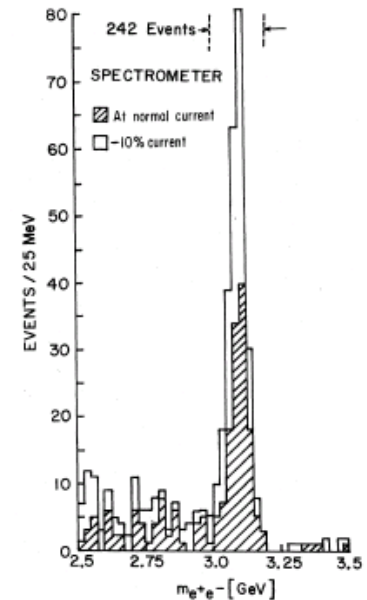
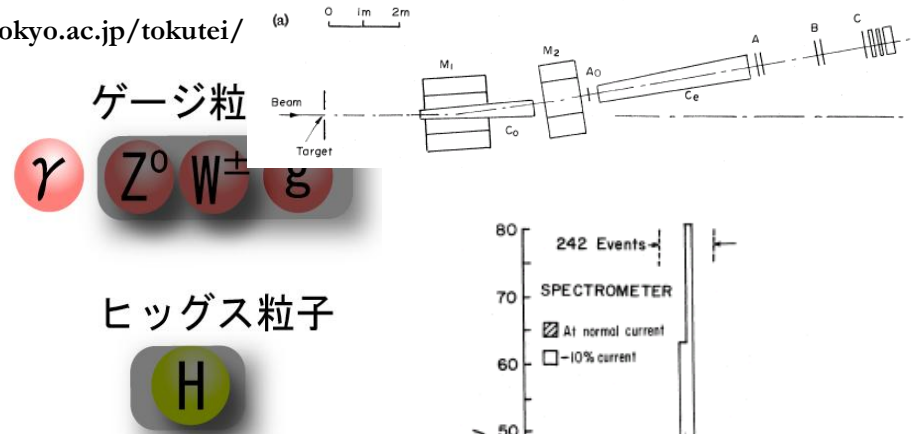
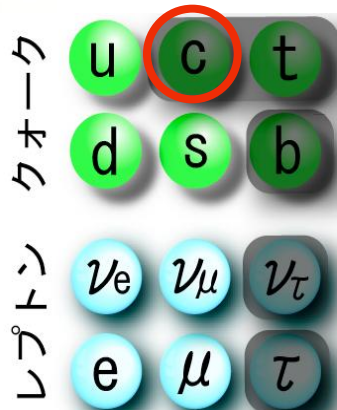
✦ $e^+e^- \rightarrow \psi$ SLAC

Richter et al.

<http://www.slac.stanford.edu/spires/find/photoindex/www?rawcmd=FI&ND+NEGATIVE-NO+slide747>

✦ 東大素粒子センター

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tokutei/>



$J/\psi = c\bar{c}$ 結合状態

クォークとレプトンが物質を形成する基本粒子であることが実験家にも明確に分かった

$J \rightarrow e^+e^-$ BNL
Ting et al.

2008年ノーベル物理学賞

小林誠 先生

益川敏英 先生

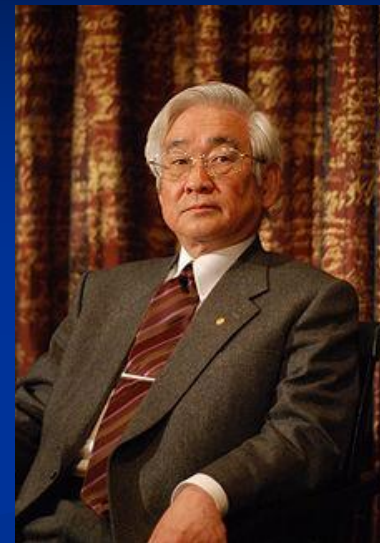
クォークが3種類しかない時代
(1972年)に、
すなわち「1974年11月革命」
以前に、6種類(3世代)あるこ
とを理論的に予言

(K^0 中間子のCP非保存)

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

クォーク

レプトン



✦ <http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Mkobayashi.jpg> ✦ http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Toshihide_Masukawa-press_conference_Dec_07th,_2008-2.jpg

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) 東京大学も参加

1983 W 、 Z ボゾンの発見 CERN(欧)

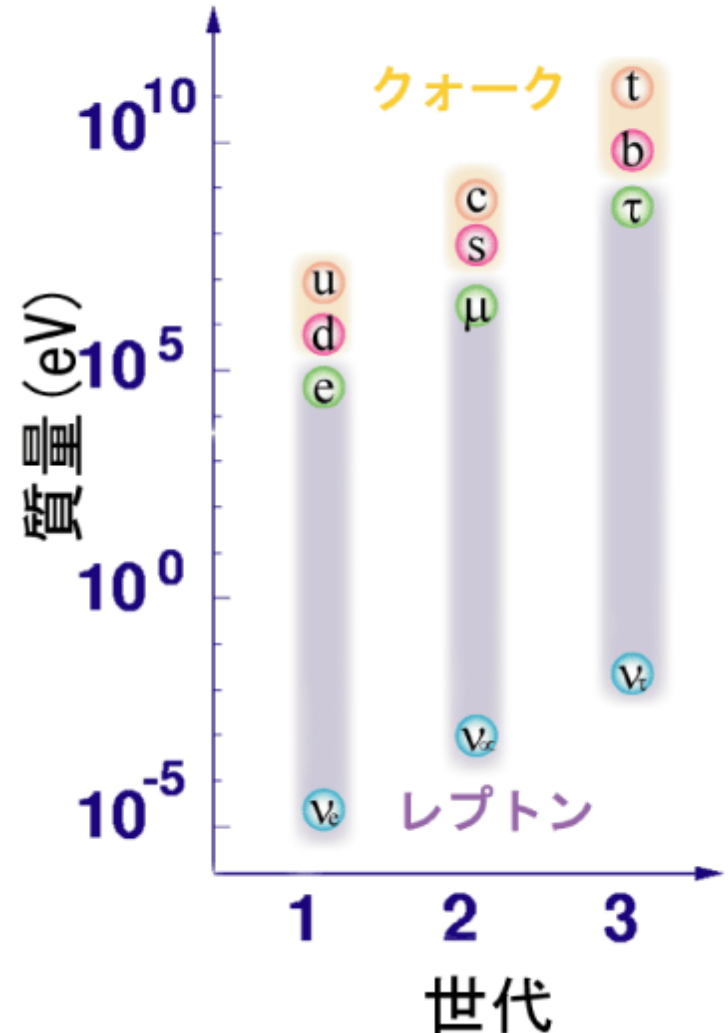
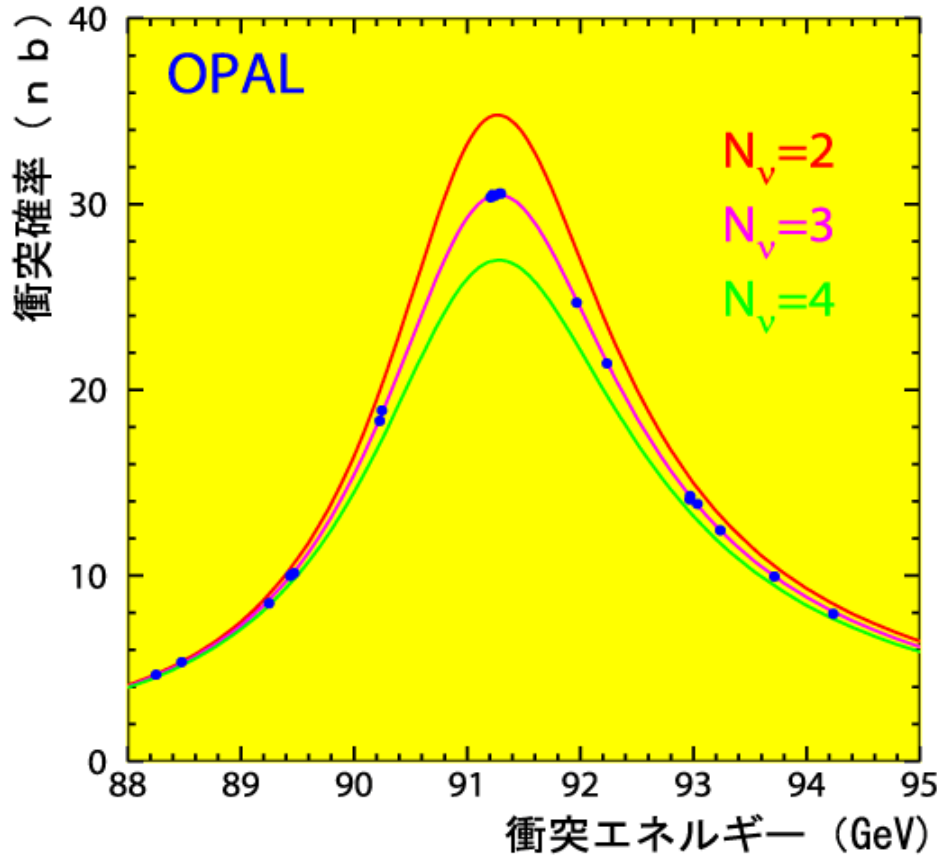
1989 素粒子の世代数=3 CERN/SLAC 東京大学も参加

1994 t クォークの発見 Fermilab(米)

1999 ニュートリノの質量 Super Kamiokande (日)

素粒子の世代構造

$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow qq \rightarrow \text{hadrons}$$



素粒子の世代数は3で打ち止め

$$N=2.9841 \pm 0.0083 \quad (\text{LEP})$$

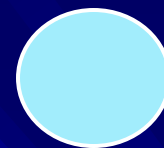
‡東大素粒子センター

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/physics/3gen.html>

‡東大素粒子センター

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tokutei/>

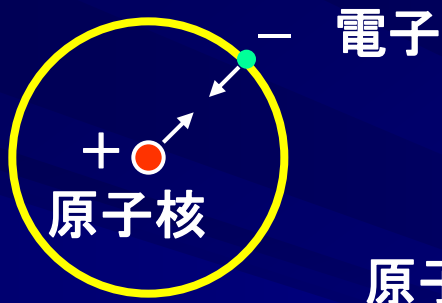
4種類の力(相互作用)



相対的な強さ

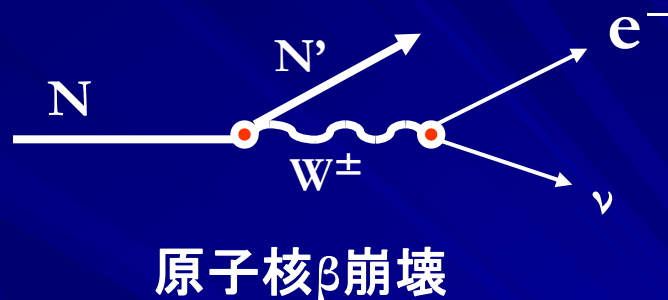
電磁力 γ (光子)

10^{-2}



弱い相互作用 W^{\pm}, Z^0

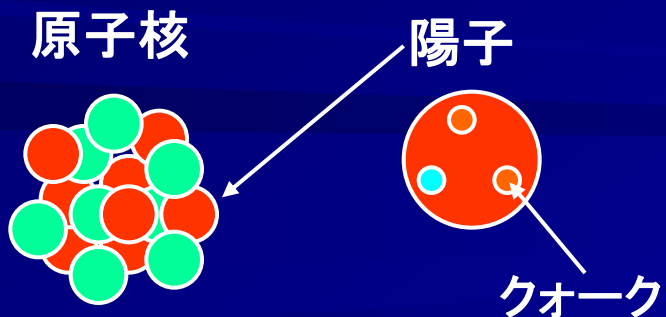
10^{-5}



強い相互作用

1

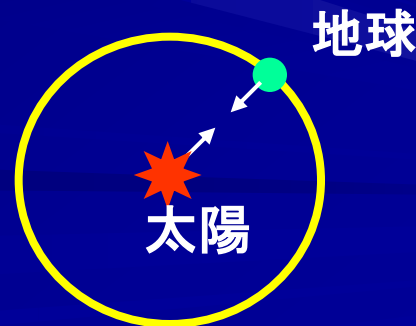
グルーオン (8種類)



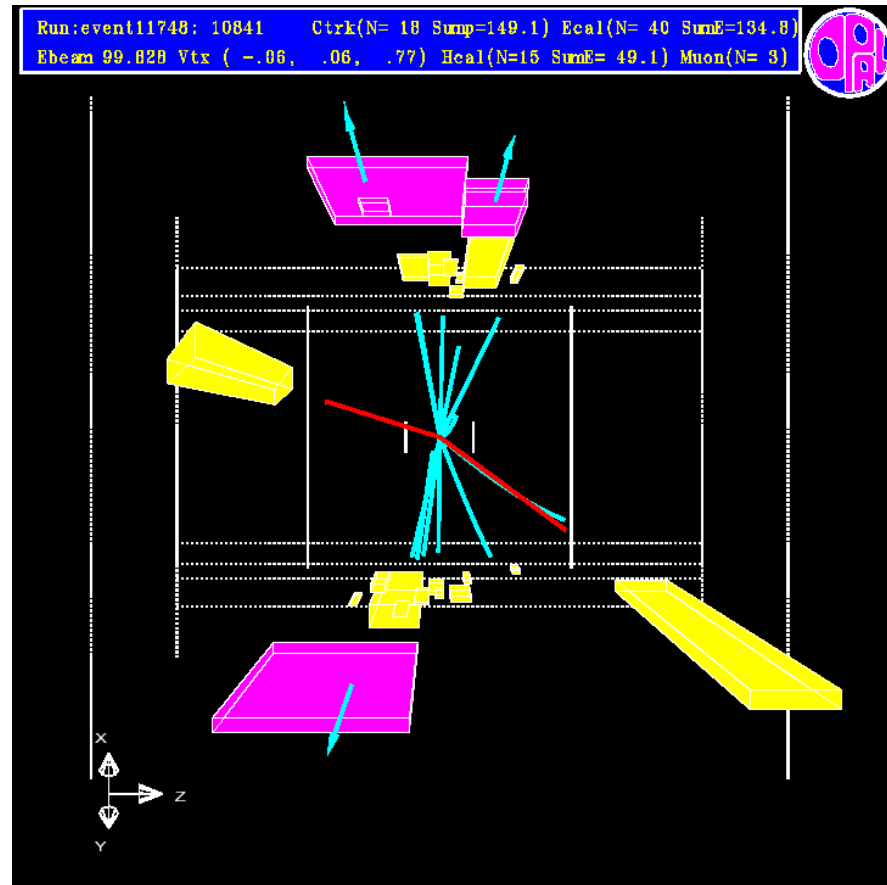
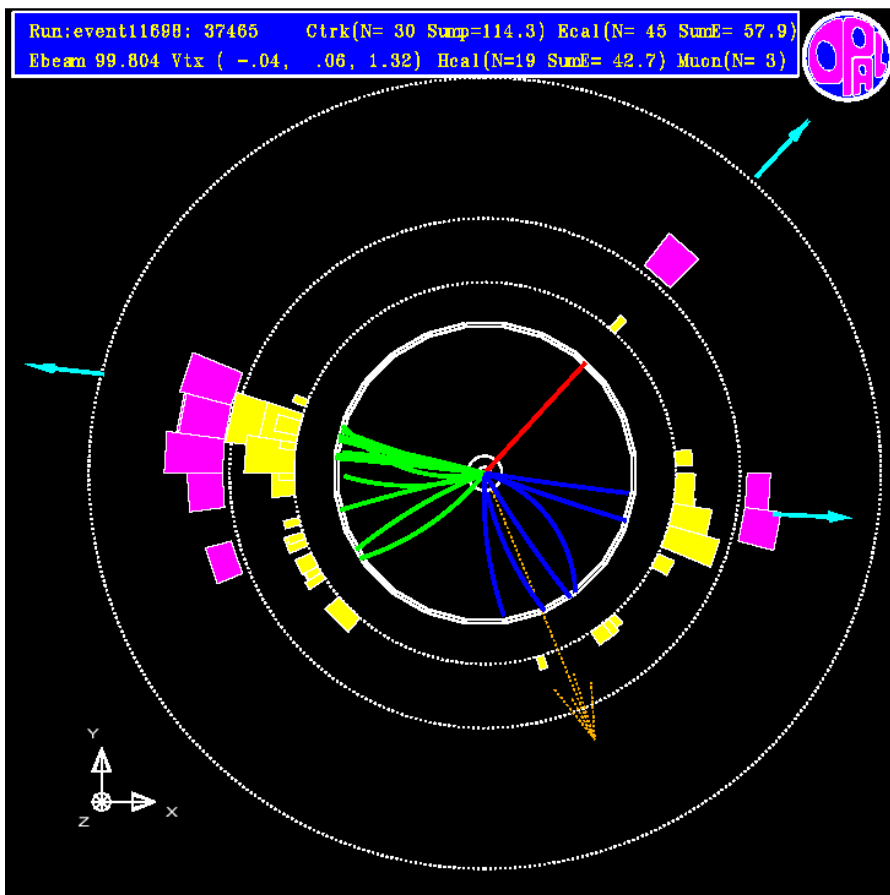
重力相互作用

10^{-40}

重力子 (未発見)



ゲージボソンの精密測定(LEP・OPAL実験)



$$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow \mu^+ \nu_\mu + q\bar{q}$$

$E_{cm}=200 \text{ GeV}$

$$e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow e^+ e^- + q\bar{q}$$

$E_{cm}=200 \text{ GeV}$

素粒子の標準理論

(1) 物質を形成する粒子 ($J=1/2$)

クォーク

レプトン

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

+ 反粒子

+ 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

南部陽一郎 自発的対称性の破れ = ヒッグス粒子の理論の基礎

南部陽一郎先生(シカゴ大学)
様々なアイデアのパイオニア



✦ <http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:YoichiroNambu.jpg>

小柴昌俊 ファインマン 南部陽一郎



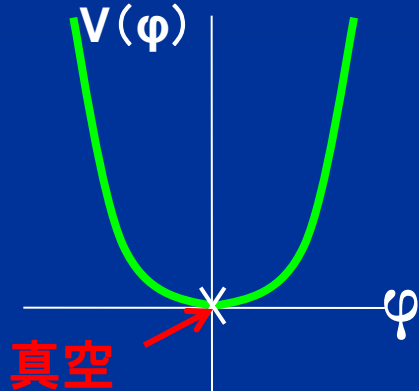
✦

ヒッグス粒子と真空

ヒッグス粒子は「真空」と同じ量子数を持つ

⇒ 真空でのヒッグス場が $\varphi=0$ から $\varphi=\varphi_0$ に転移する。

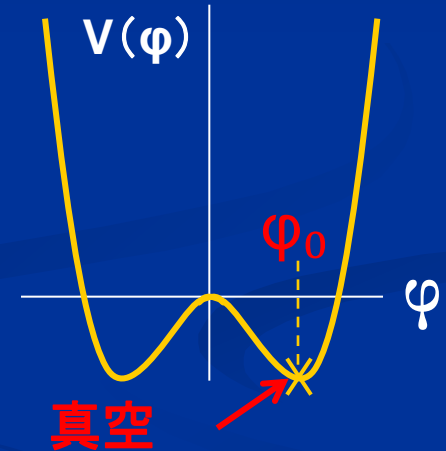
水が氷になるような相転移が生ずる。



初期宇宙



膨張による冷却

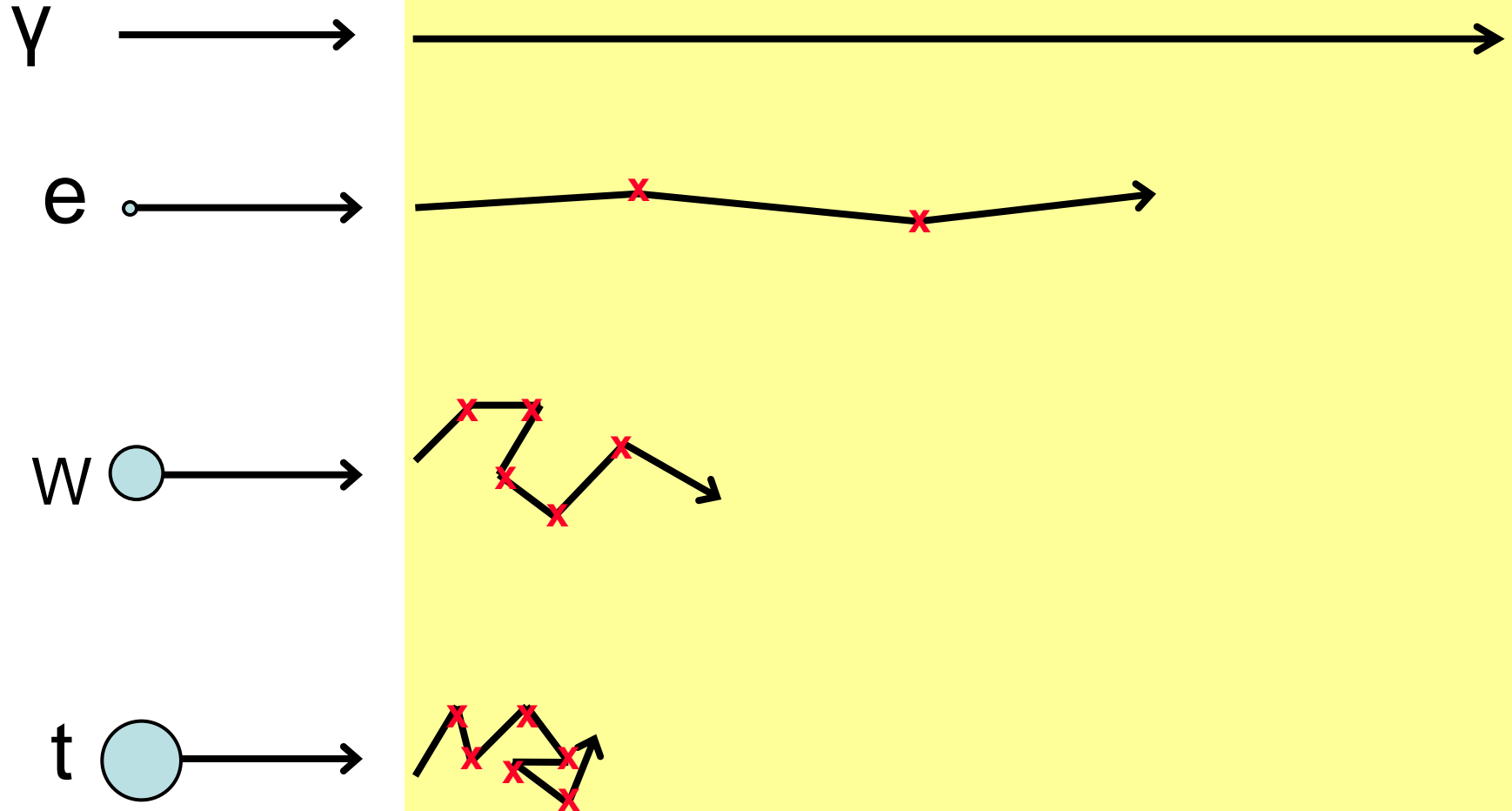


φ_0 = ヒッグス場の真空期待値

真空(エネルギーが最も低い状態)では $\varphi=0$.
ヒッグス場は真空で φ_0 という値を取り, 対称性が破れる.

「超対称性」があると、この状態を実現: 井上研三(九州大学)

空間(真空)に充満している**ヒッグス粒子**と衝突することによって素粒子はブレーキをかけられる
動き難さ = 質量



超対称性 (Supersymmetry)

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。

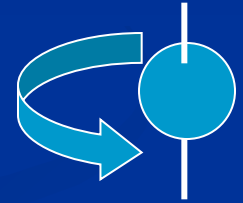
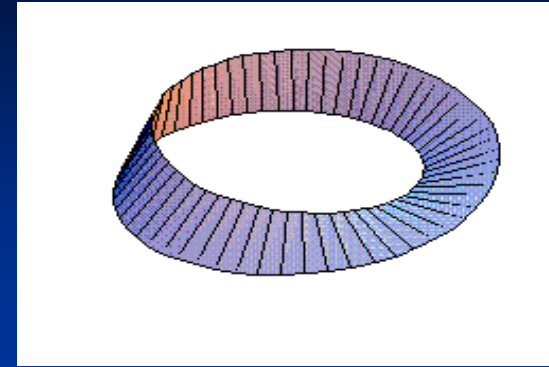
⇒ 原子の電子軌道の殻構造

電子は 720° 回転しないと元に戻らない。

ボーズ粒子 光子など スピン $0, 1, 2, \dots$

同じ状態に何個でも入れる。

360° 回転すれば元に戻る。



スピン
= 粒子の自転の量子数
= 時空の構造

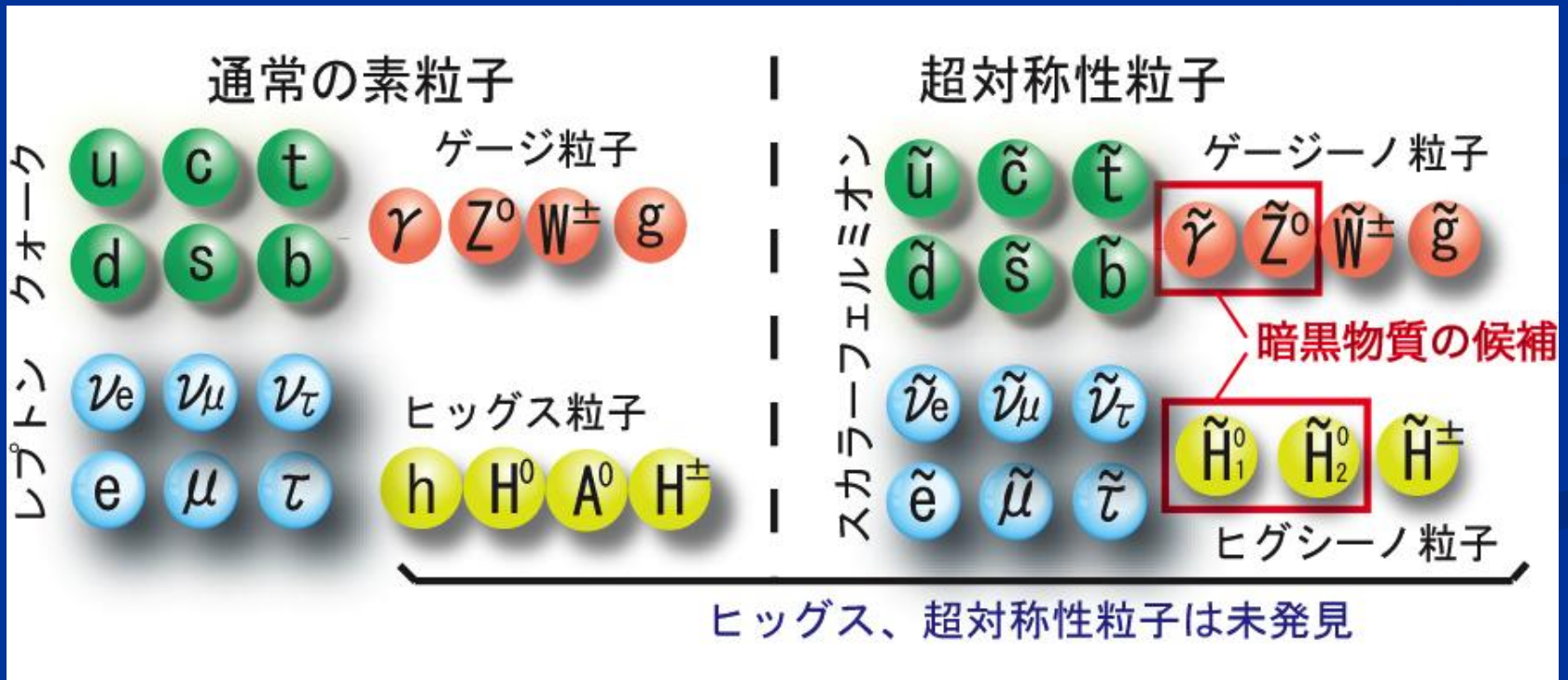
4次元時空の拡張

フェルミ粒子とボーズ粒子は対称であるべき

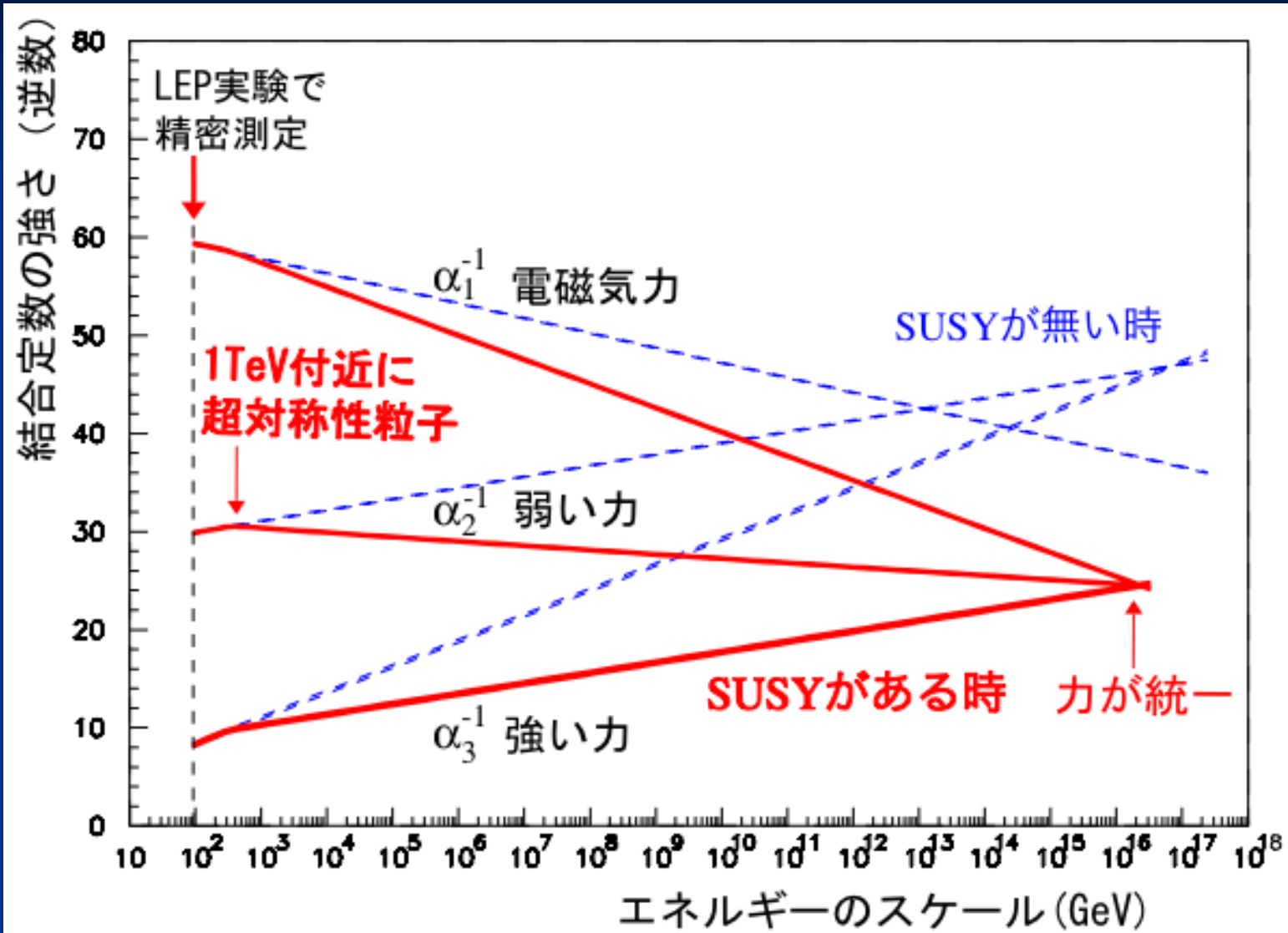
超対称性 (SUSY)

- ・超対称性＝フェルミ粒子とボーズ粒子を入れ換える対称性
 重力を含む力の統一で決定的な役割（新たな時空の対称性）
- ・全ての素粒子に超対称性パートナーが存在し、その質量は T_{eV} 程度以下
 ⇒超対称性パートナーの発見は反粒子の発見に匹敵する成果
- ・最も軽い超対称性粒子は、宇宙の「暗黒物質」の最有力候補
 ⇒宇宙構造の理解

超対称性は破れている $m(\tilde{e}) \neq m(e)$ 破れのメカニズム???



超対称性(SUSY)は、力の大統一を予言



隠れた次元

我々が住んでいる時空＝空間3次元＋時間1次元

この他に隠れた次元はあるか？

重力
⇔空間の曲がり

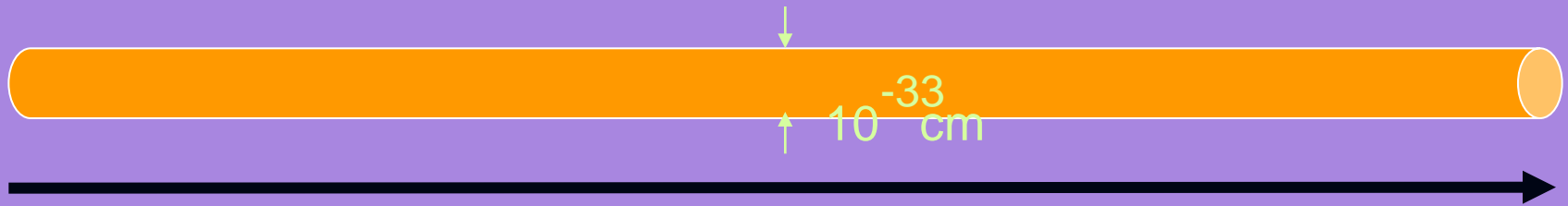
他の相互作用
⇔隠れた次元の曲がり



超弦理論 (Superstring Theory)

空間 3次元 + n次元

超弦理論 n=6 (超対称性から)



我々が住んでいる次元(簡単のために1次元だけ書く)。この他に小さく丸まっている次元がある(余りに小さいので見えない)。この余分な次元の幾何学で素粒子の種類や性質が決まる。

重力も含めたすべての相互作用の統一

まだ解明されていないこと

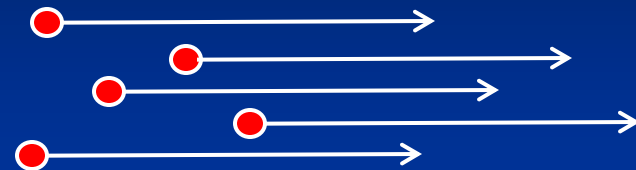
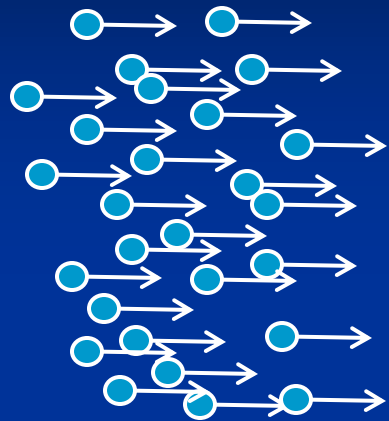
- 素粒子の**質量の起源**はヒッグス粒子(真空の構造)か？
- 何故**3世代**のクォーク・レプトンがいてそれぞれの質量が異なるのか？(ニュートリノの質量は何故軽い？ トップクォークは何故重い？)
- 何故**4種類**の**力**があるのか？
いかにして**重力**を理論の枠組にいれられるか？
- なぜ**時空**は空間3次元、時間1次元か？
隠れた次元はあるのか？
- **暗黒物質**は？
- **暗黒エネルギー**は？
- **宇宙**はどのようにして生じたか？

エネルギーフロンティア加速器(LHC、ILC)
によって多くの謎が解明

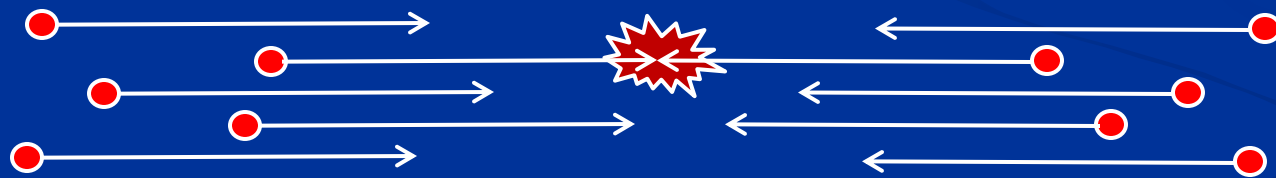
高エネルギー加速器



素粒子物理で「エネルギーが高い」ということは、
個々の粒子の持つエネルギーが高い(粒子の波
長が短い)ことである

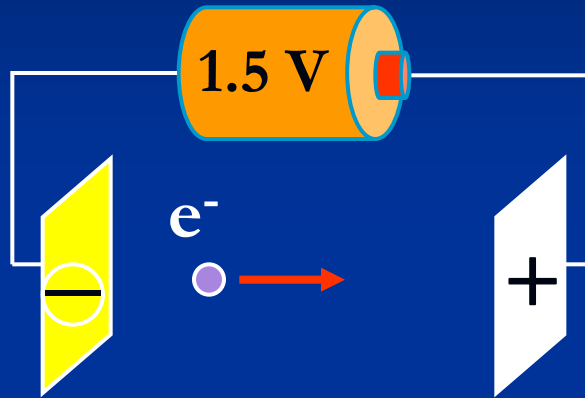


粒子衝突型加速器では粒子の束と束を衝突させる

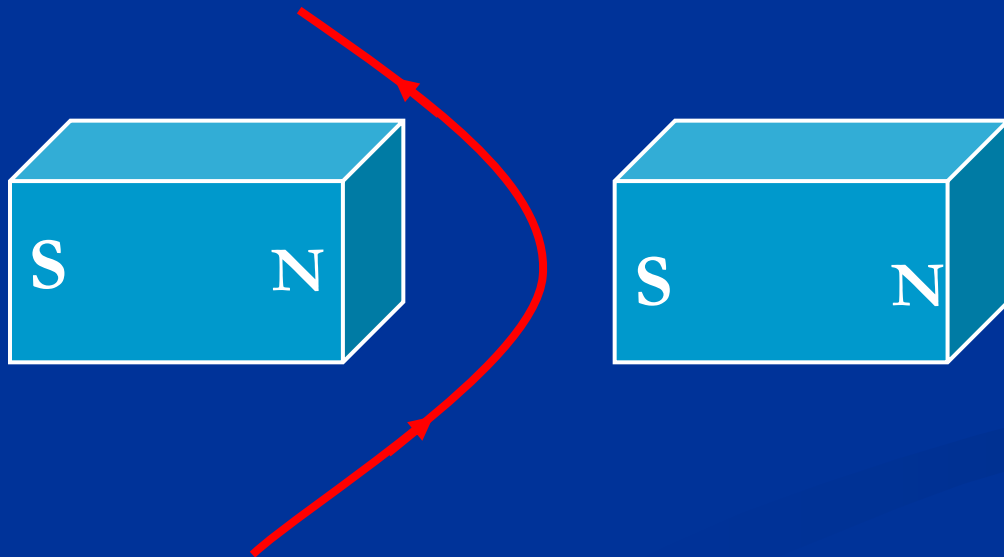


粒子の束(バンチ)の粒子の数を増やすことで
衝突頻度を増やす

加速器の原理



電場(電界)によって
加速する



磁場(磁界)によって
軌道を曲げる

初めての本格的 加速器

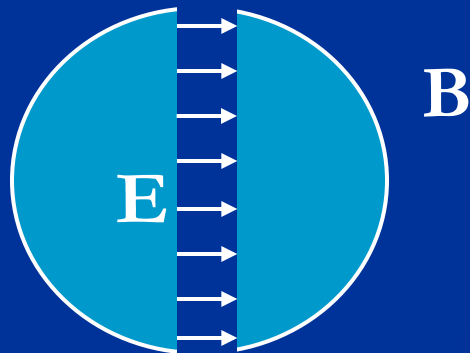
ローレンス(アメリカ)
サイクロトロン¹の発明

交流電場Eで荷電粒子を加速

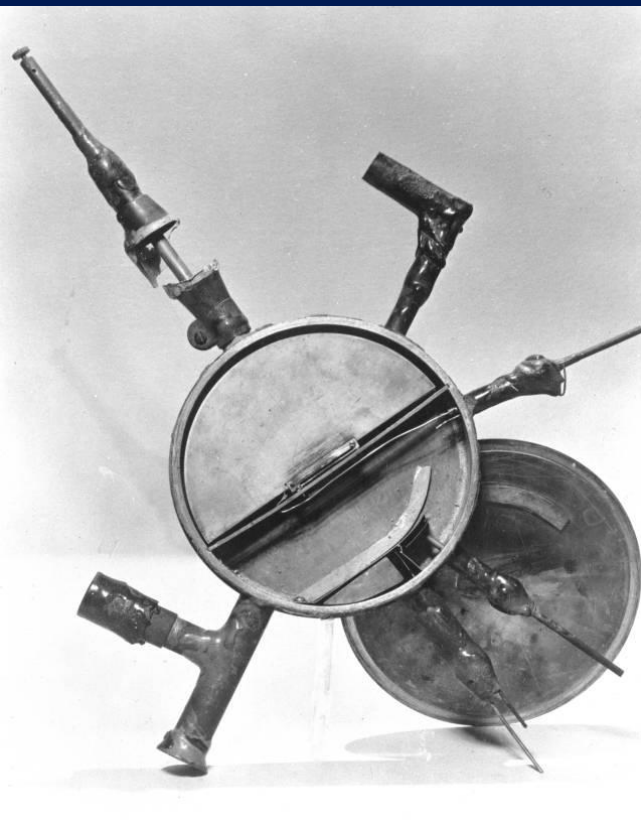
$$F = q E$$

一定磁場Bで軌道を曲げる

$$F = q v \times B$$



加速器の技術革新（約75年の歴史）



✦ Lawrence Berkeley Nat'l Lab

1932年 ローレンス世界初のサイクロトロン
直径13 cm, エネルギー80keV



LHC 2008年完成 2009年稼動
直径9km, エネルギー 14TeV

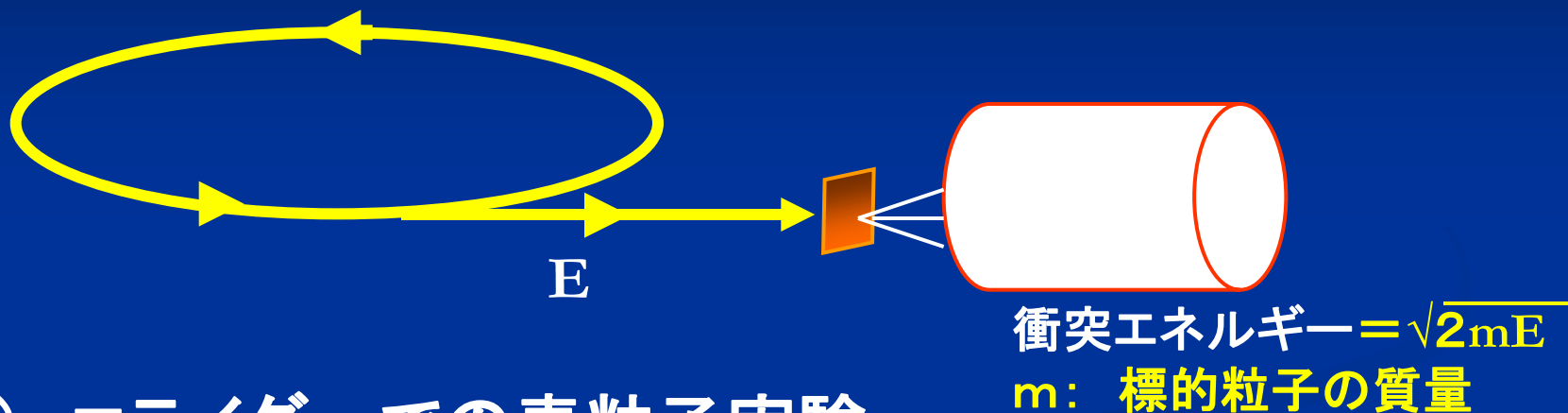
$$9\text{km}/13\text{cm} = 69,231$$

$$14\text{TeV}/80\text{keV} = 175,000,000$$

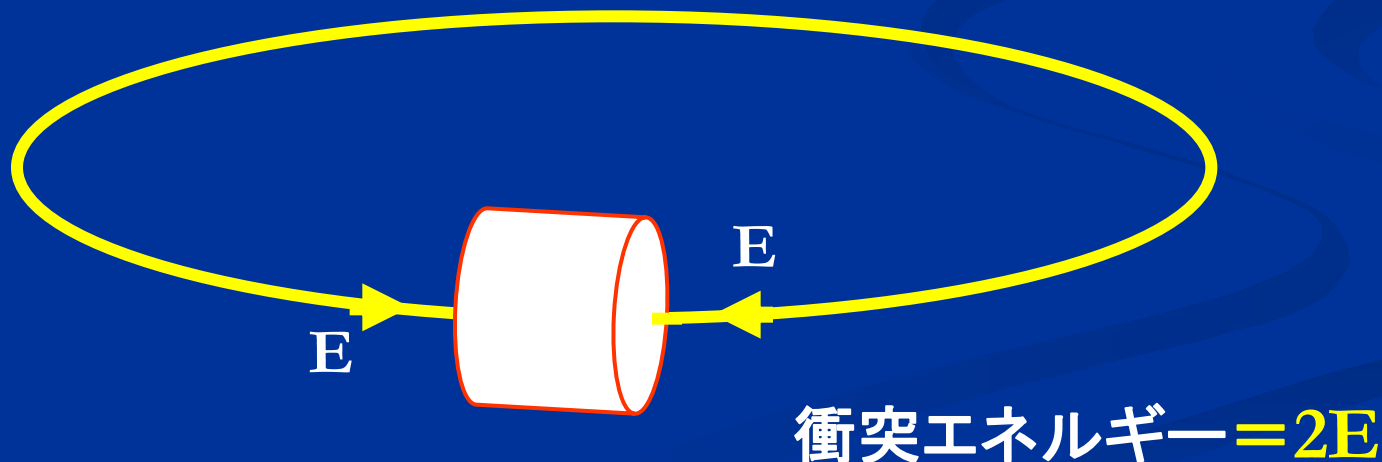
$$175,000,000/69,231 = (1.11)^{75}$$

粒子衝突型加速器(コライダー)の威力

(1) 従来の加速器を用いた素粒子実験 (標的実験)



(2) コライダーでの素粒子実験



電子・陽電子衝突 vs 陽子・陽子衝突

電子・陽電子衝突

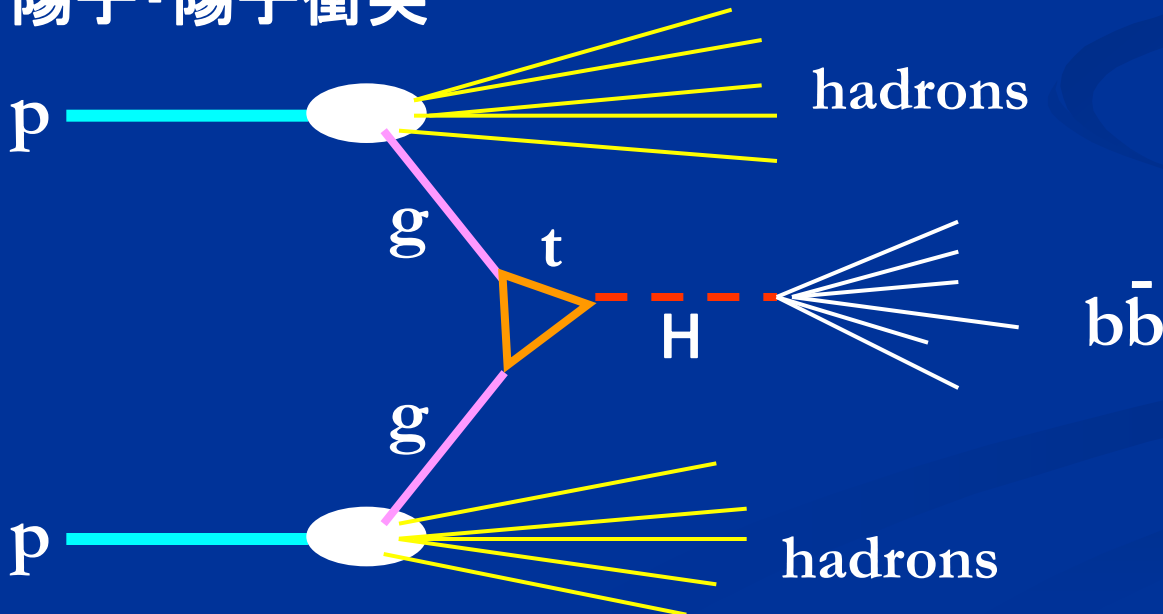


例 ヒッグス粒子生成

電子・陽電子は素粒子
素過程の直接観測

⇒ 実験は容易

陽子・陽子衝突



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

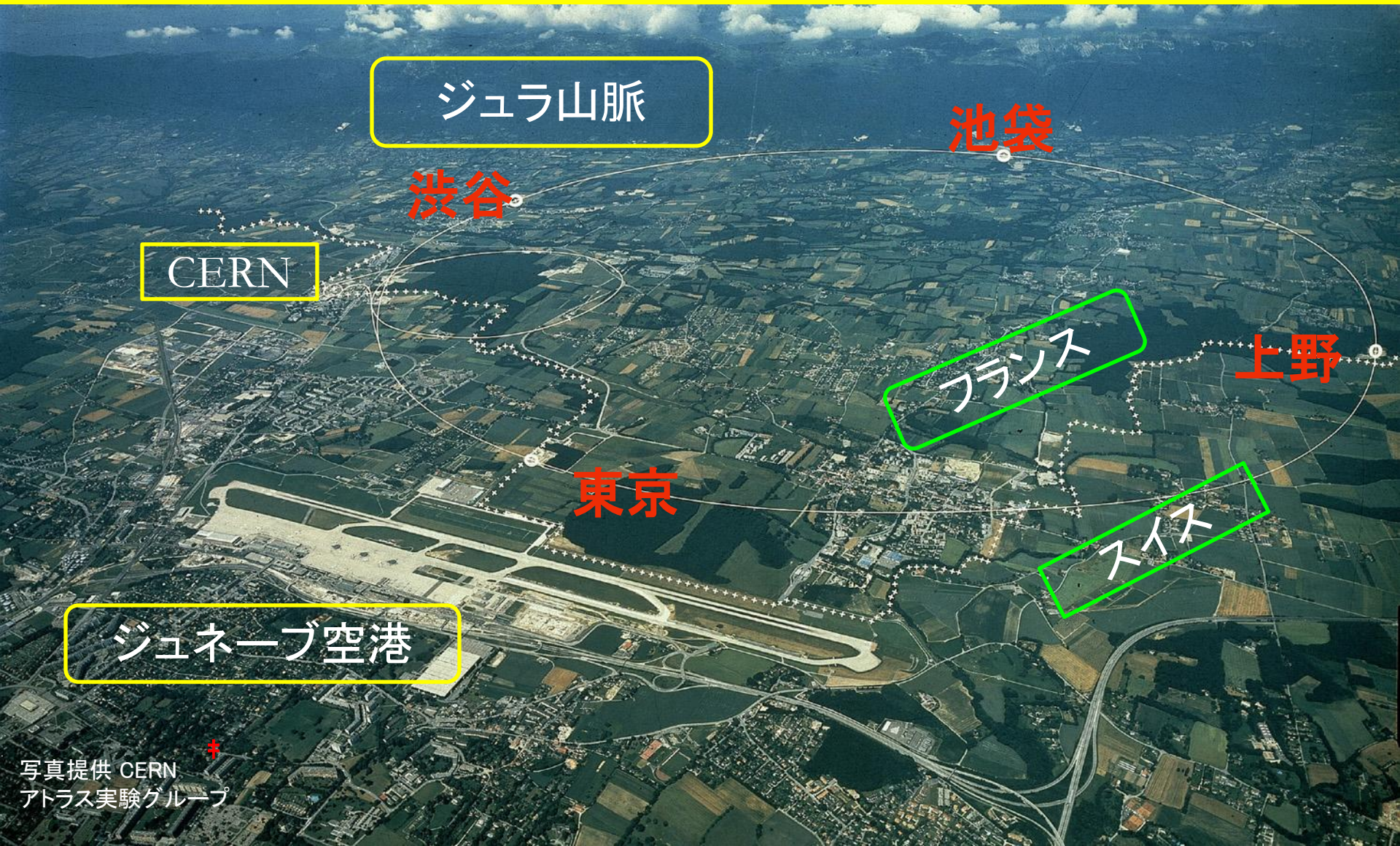


LHC

(Large Hadron Collider)



陽子を加速し衝突させる巨大加速器 CERN LHC(Large Hadron Collider) 2009年始動



ジュラ山脈

池袋

渋谷

CERN

フランス

上野

東京

スイス

ジュネーブ空港



⌘ Copyright: CERN

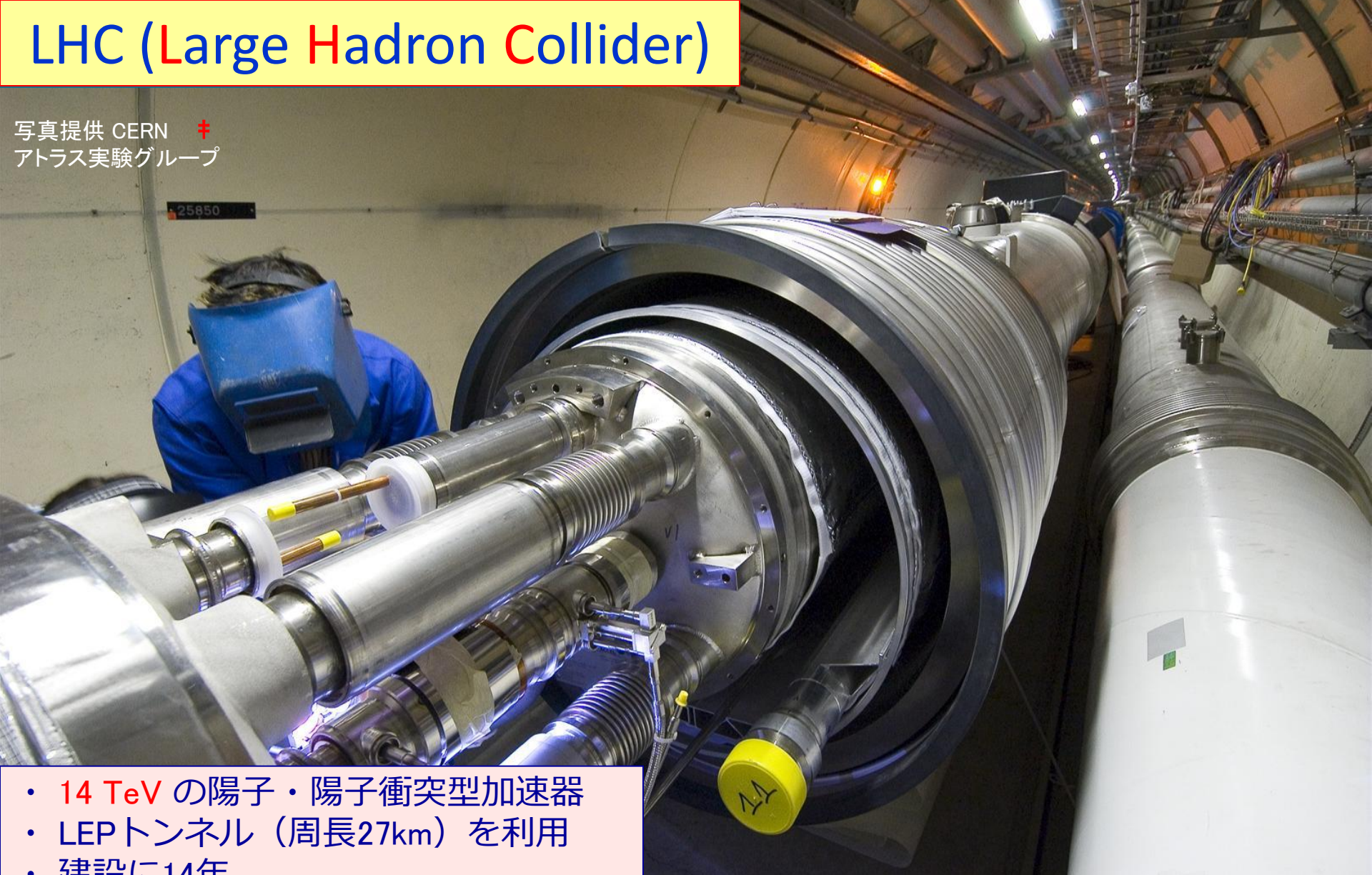
著作権の都合により、ここに挿入されていた
映画「天使と悪魔」の画像を削除しました。



⌘ Copyright: CERN

LHC (Large Hadron Collider)

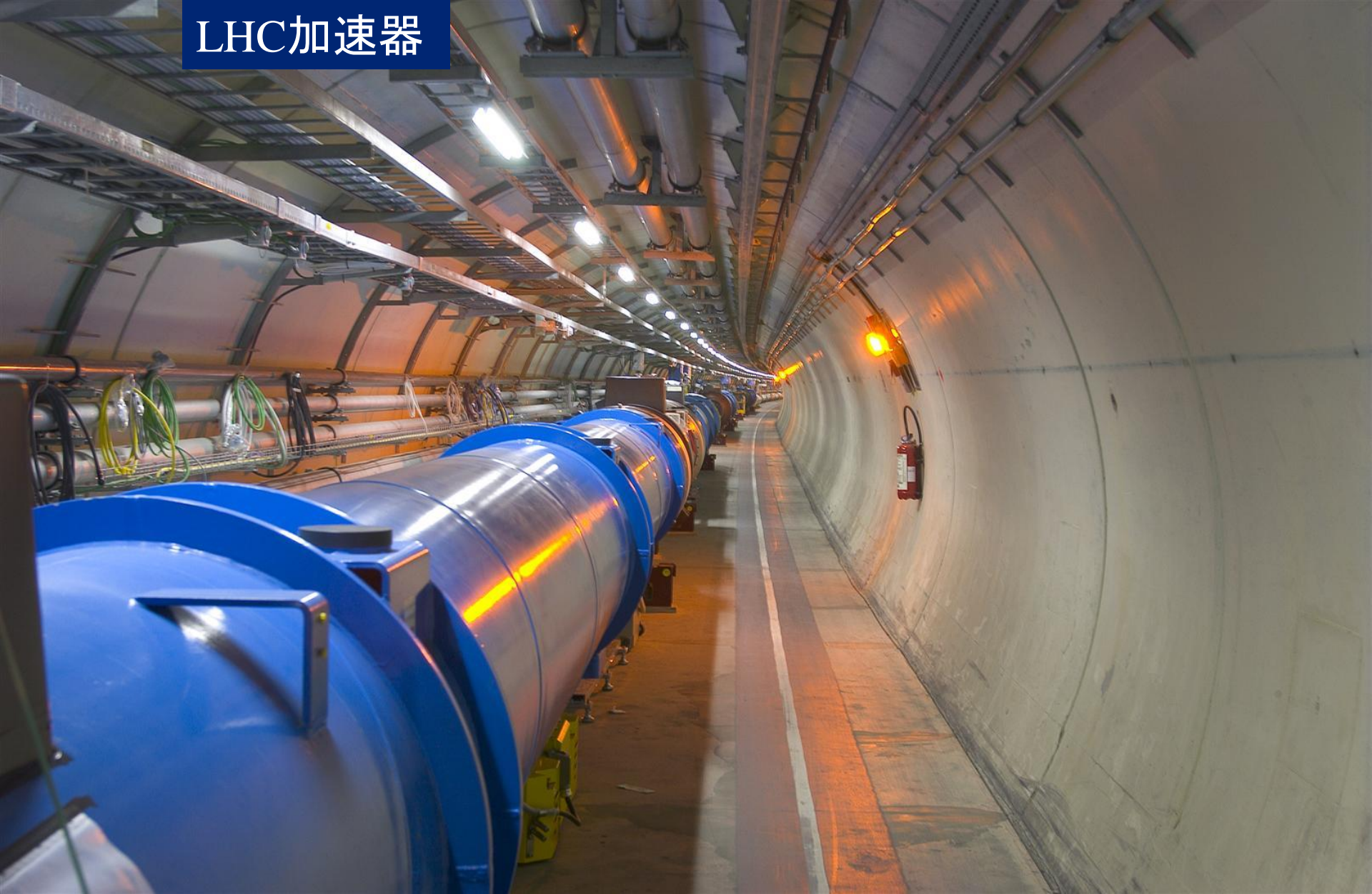
写真提供 CERN ㊦
アトラス実験グループ



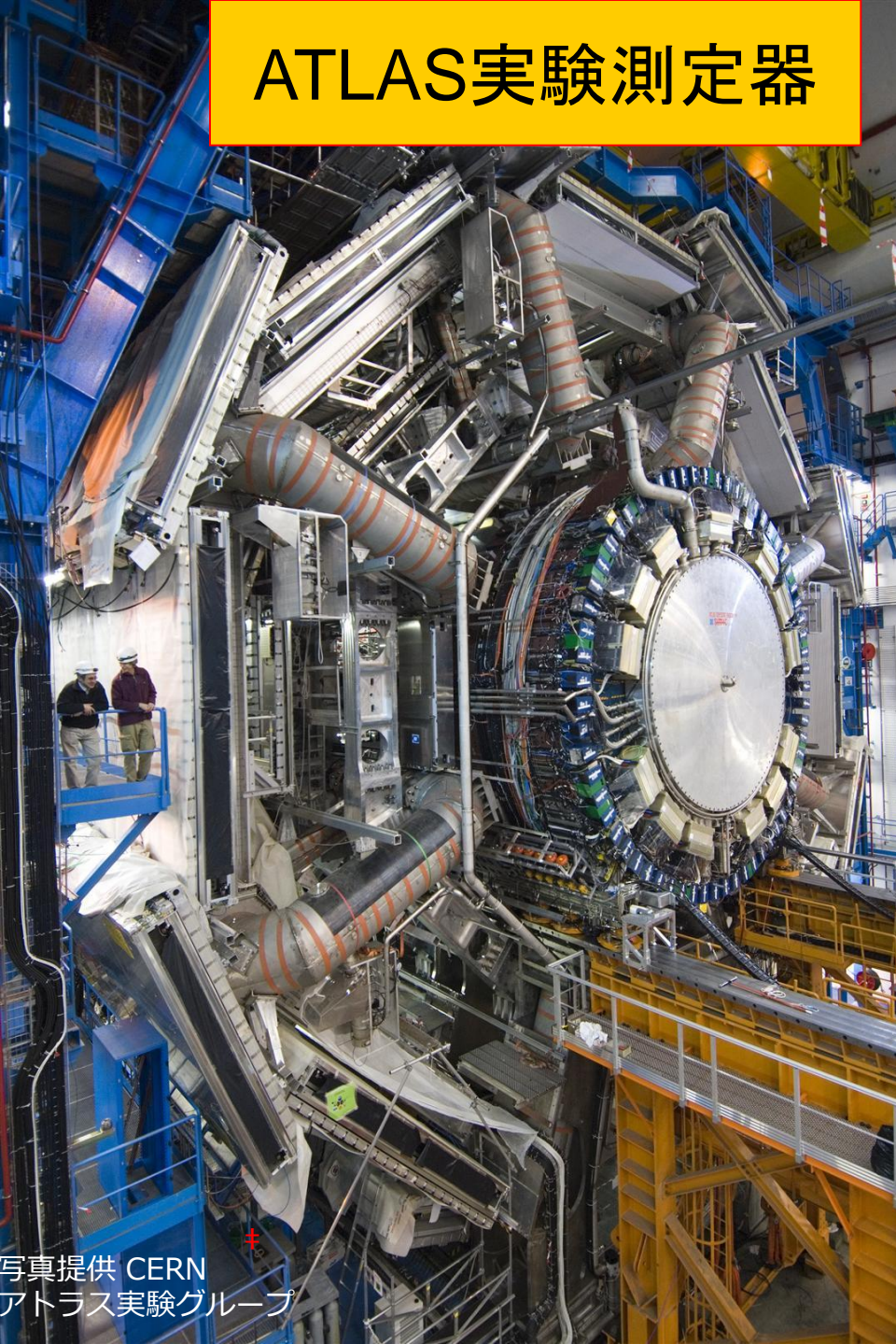
- 14 TeV の陽子・陽子衝突型加速器
- LEPトンネル (周長27km) を利用
- 建設に14年
- 総建設費は約5000億円
- 2008年9月完成、ビーム周回に成功
- 2010年3月、7TeVでのビーム衝突

超伝導ダイポールマグネット：
磁場強度 8.3T、超流動ヘリウム温度 1.9K
長さ 14.3m、1232台

LHC加速器

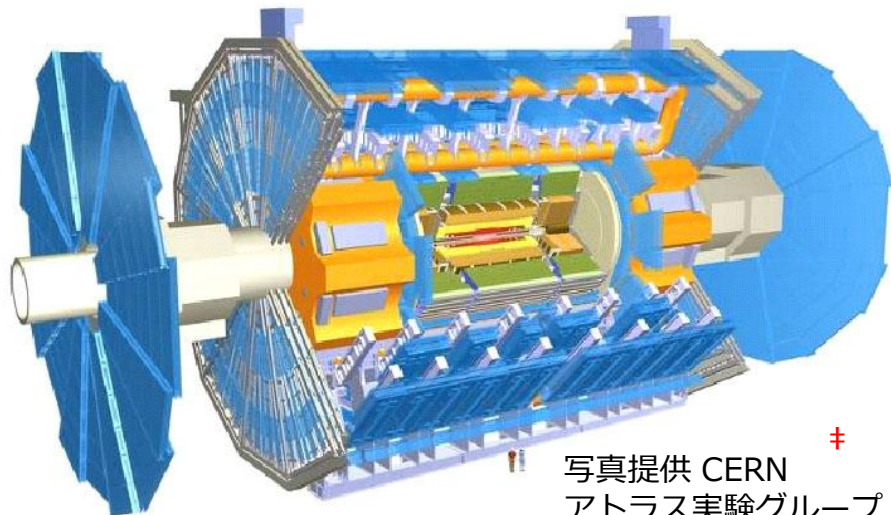


ATLAS実験測定器



写真提供 CERN
アトラス実験グループ

(A Toroidal LHC Apparatus)



写真提供 CERN
アトラス実験グループ



写真提供 CERN
アトラス実験グループ

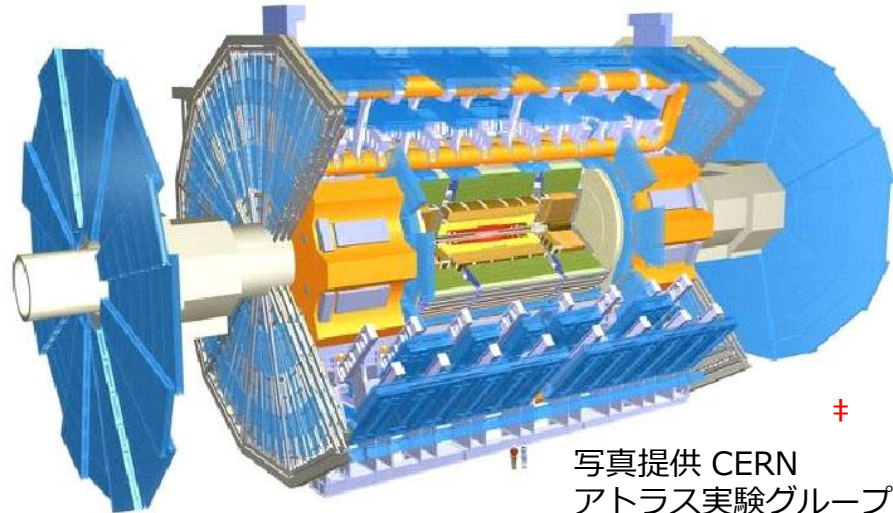
ATLAS実験測定器



写真提供 CERN
アトラス実験グループ

- 直径 22m、長さ 44m、重さ 7000t
- 世界最大の超伝導トロイド磁石
- センサー数 1億チャンネル
- 37カ国、173の参加機関、2990^名₁₀₀₀ の研究者による国際共同実験
- 日本グループ (15の大学・研究所、110名)

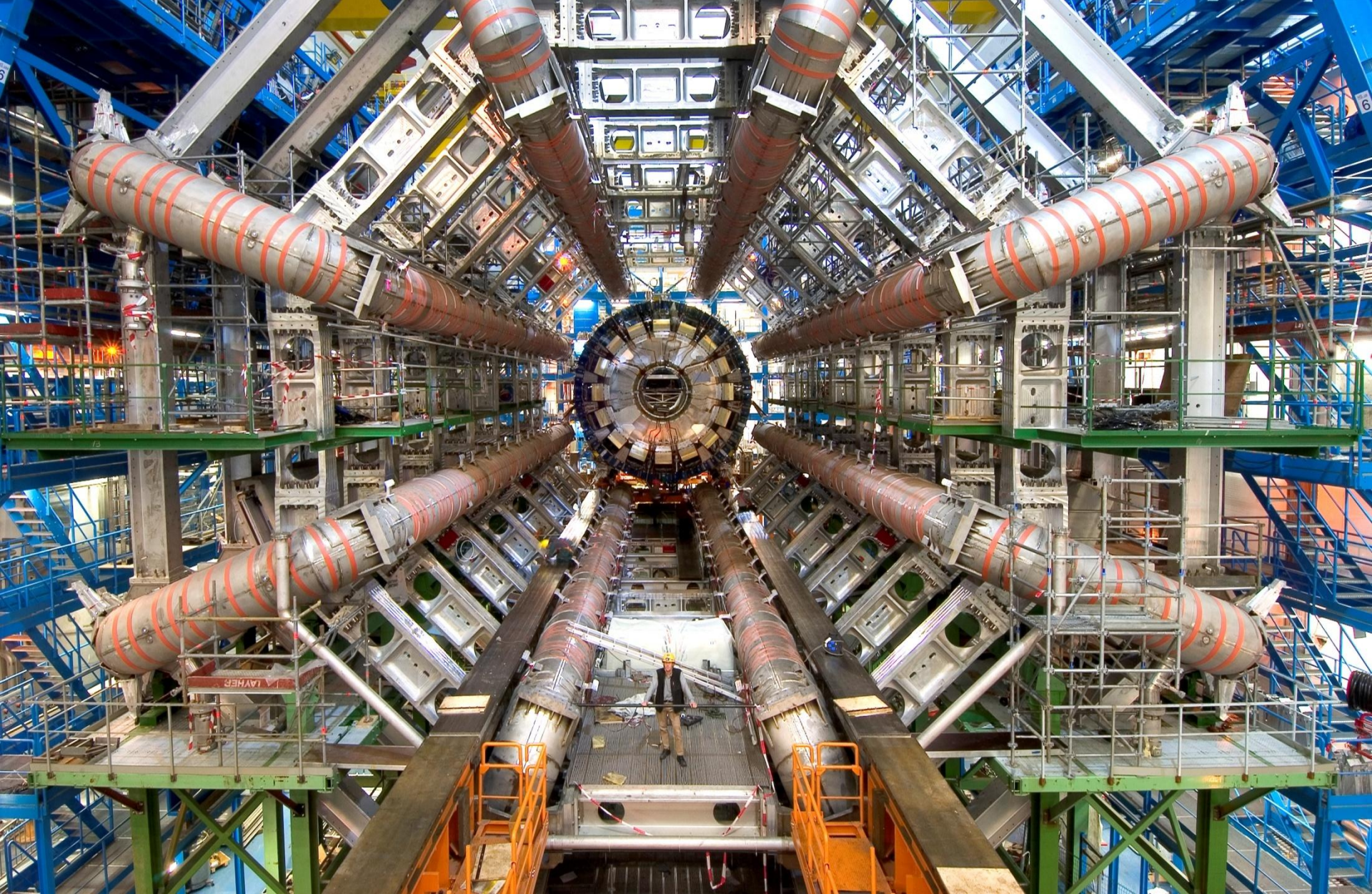
(A Toroidal LHC Apparatus)



写真提供 CERN
アトラス実験グループ

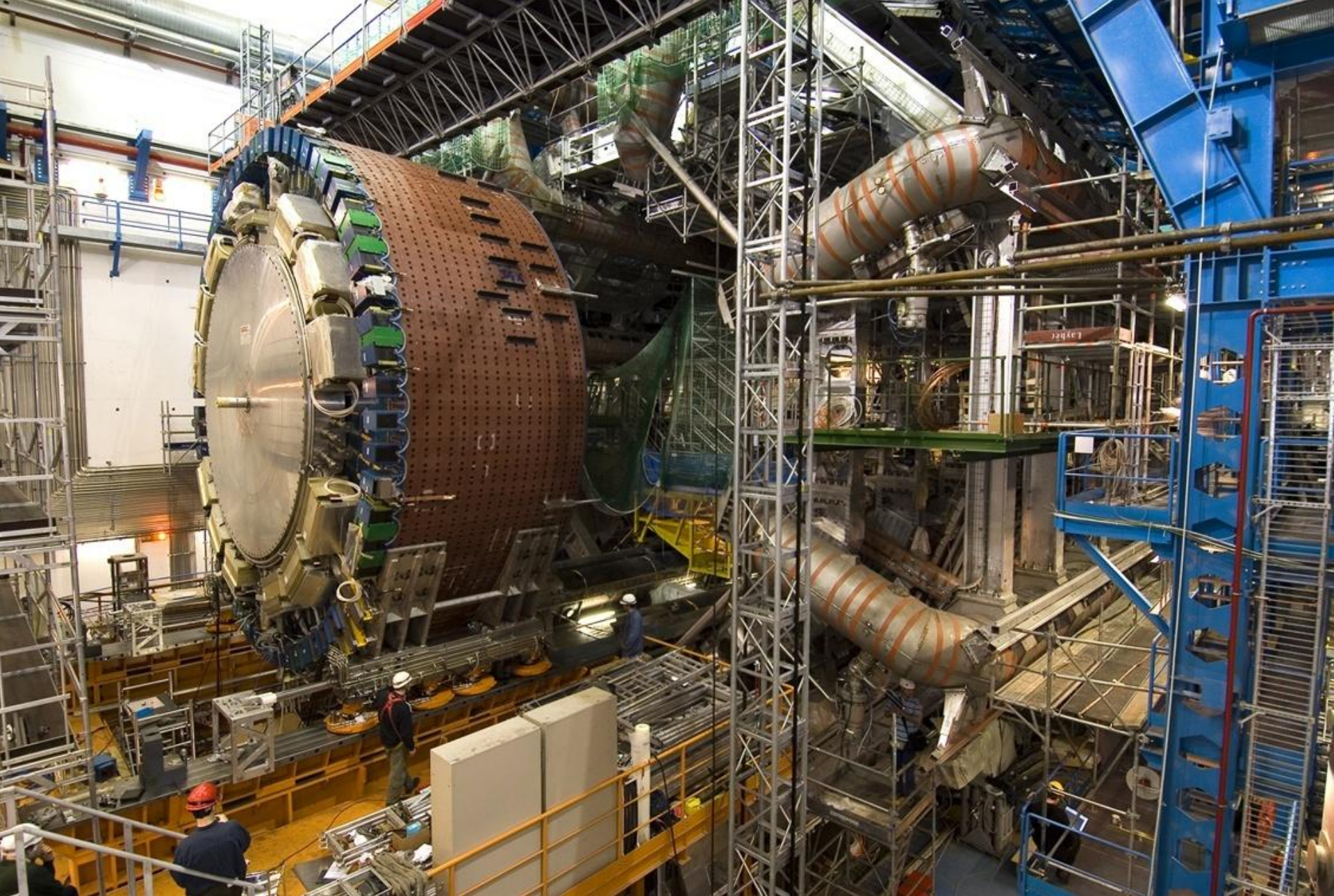


写真提供 CERN
アトラス実験グループ



建設中のATLAS実験測定器（CERN ジュネーブ）

✦ 写真提供 CERN アトラス実験グループ

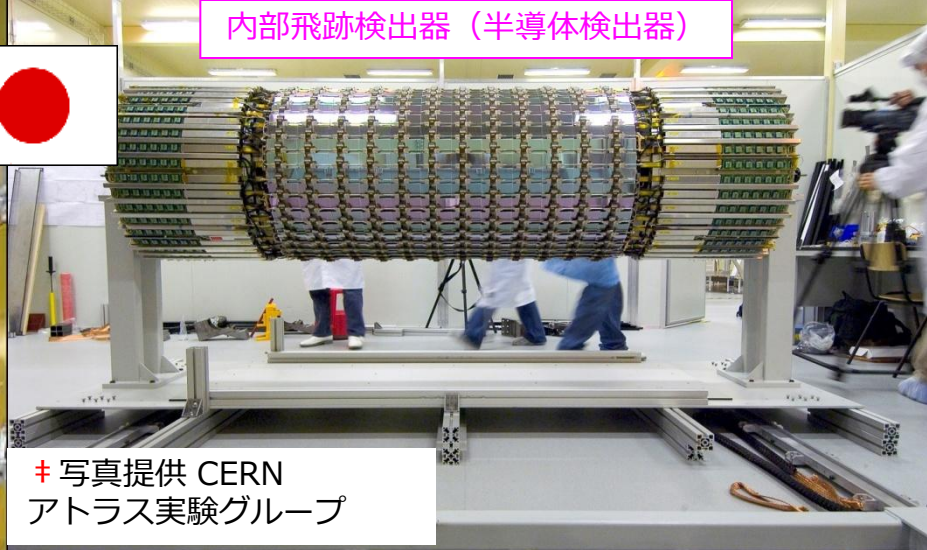


内部の測定器の搬入（2006年）

アトラス測定器 (日本担当部分)



内部飛跡検出器 (半導体検出器)



※ 写真提供 CERN
アトラス実験グループ



ミュオントリガー検出器



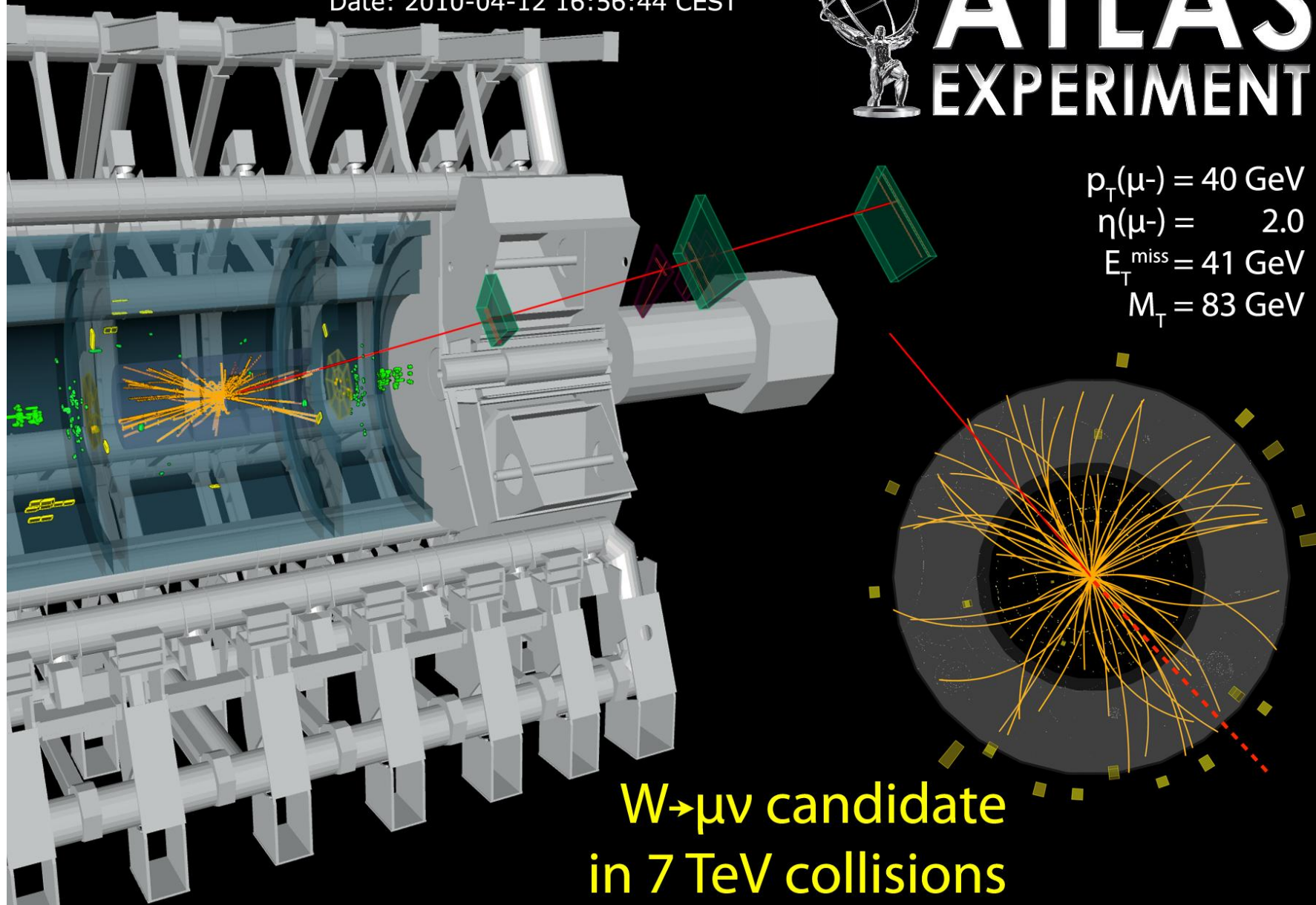
ミュオントリガー検出器の設置

Run: 152845, Event: 3338173
Date: 2010-04-12 16:56:44 CEST



ATLAS EXPERIMENT

$p_T(\mu^-) = 40 \text{ GeV}$
 $\eta(\mu^-) = 2.0$
 $E_T^{\text{miss}} = 41 \text{ GeV}$
 $M_T = 83 \text{ GeV}$

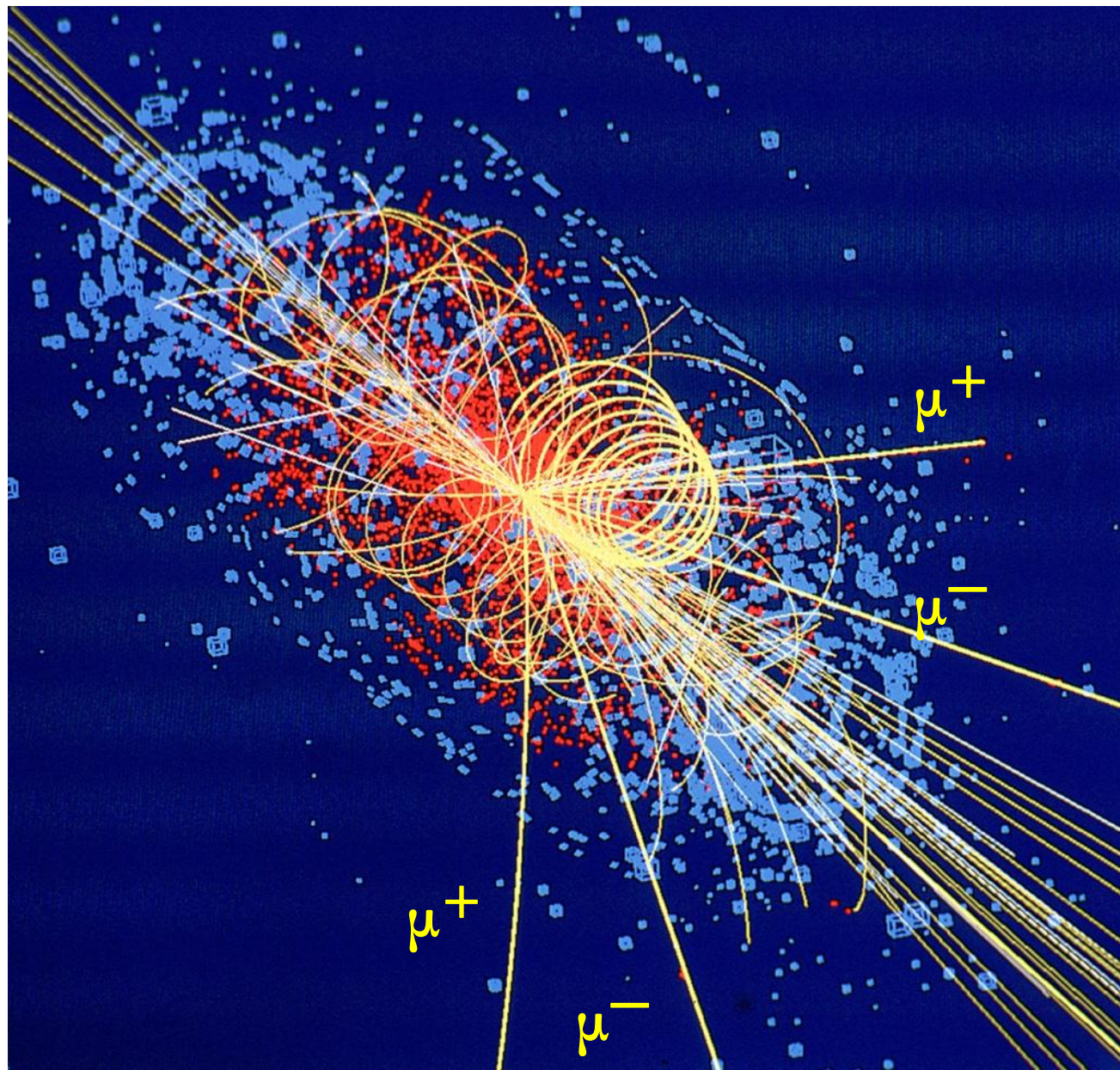
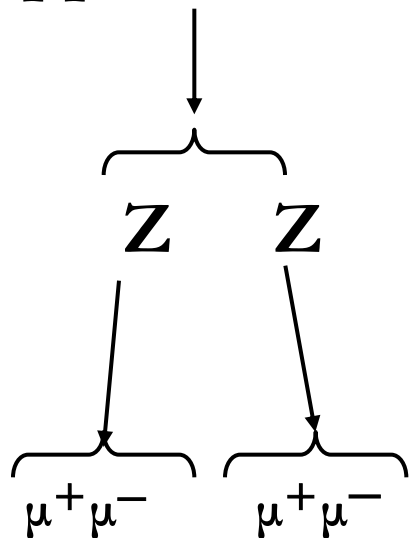


**$W \rightarrow \mu\nu$ candidate
in 7 TeV collisions**

LHCでヒッグス粒子はどう見えるか

シミュレーション

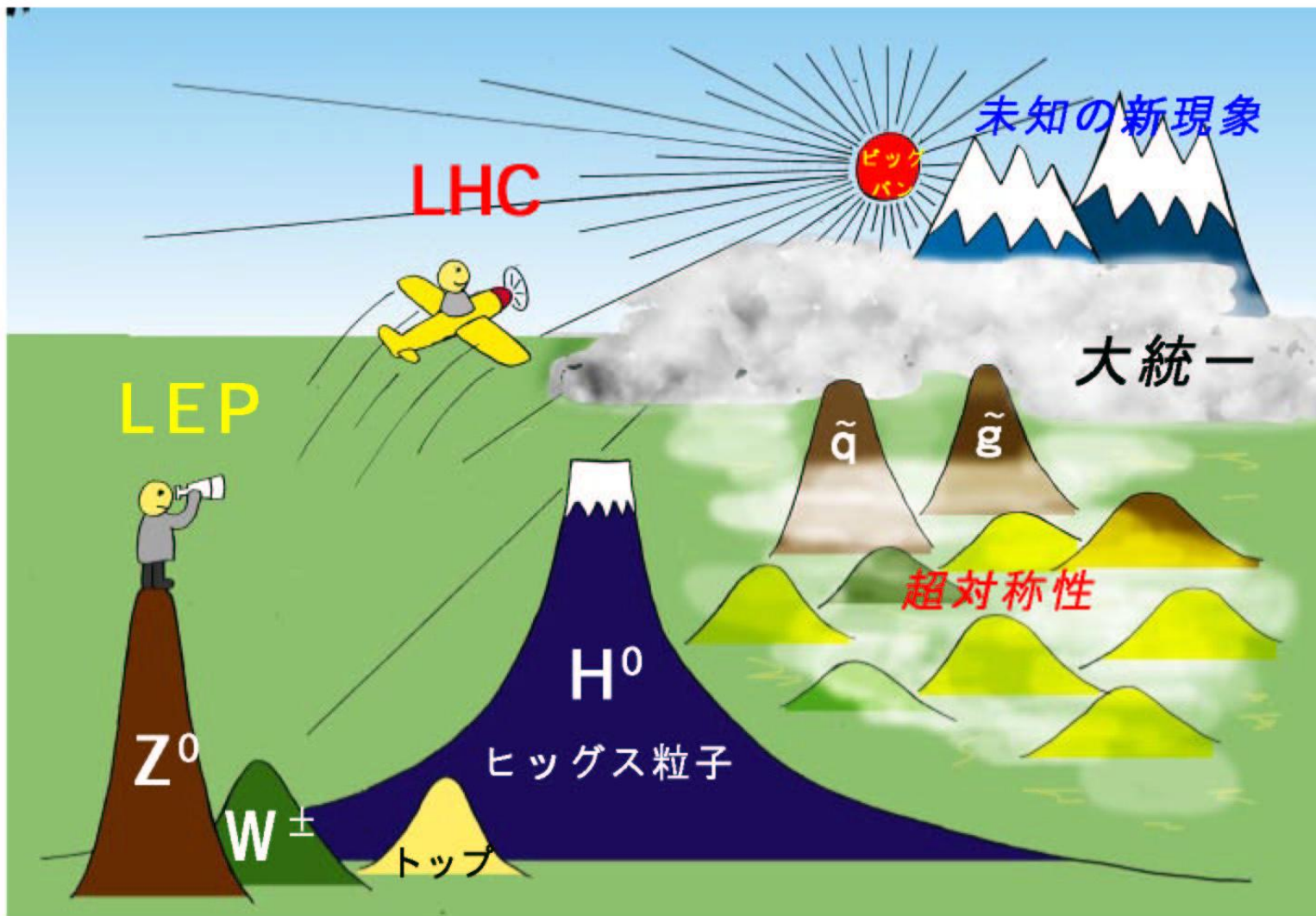
$pp \rightarrow H + \dots$



† CERN

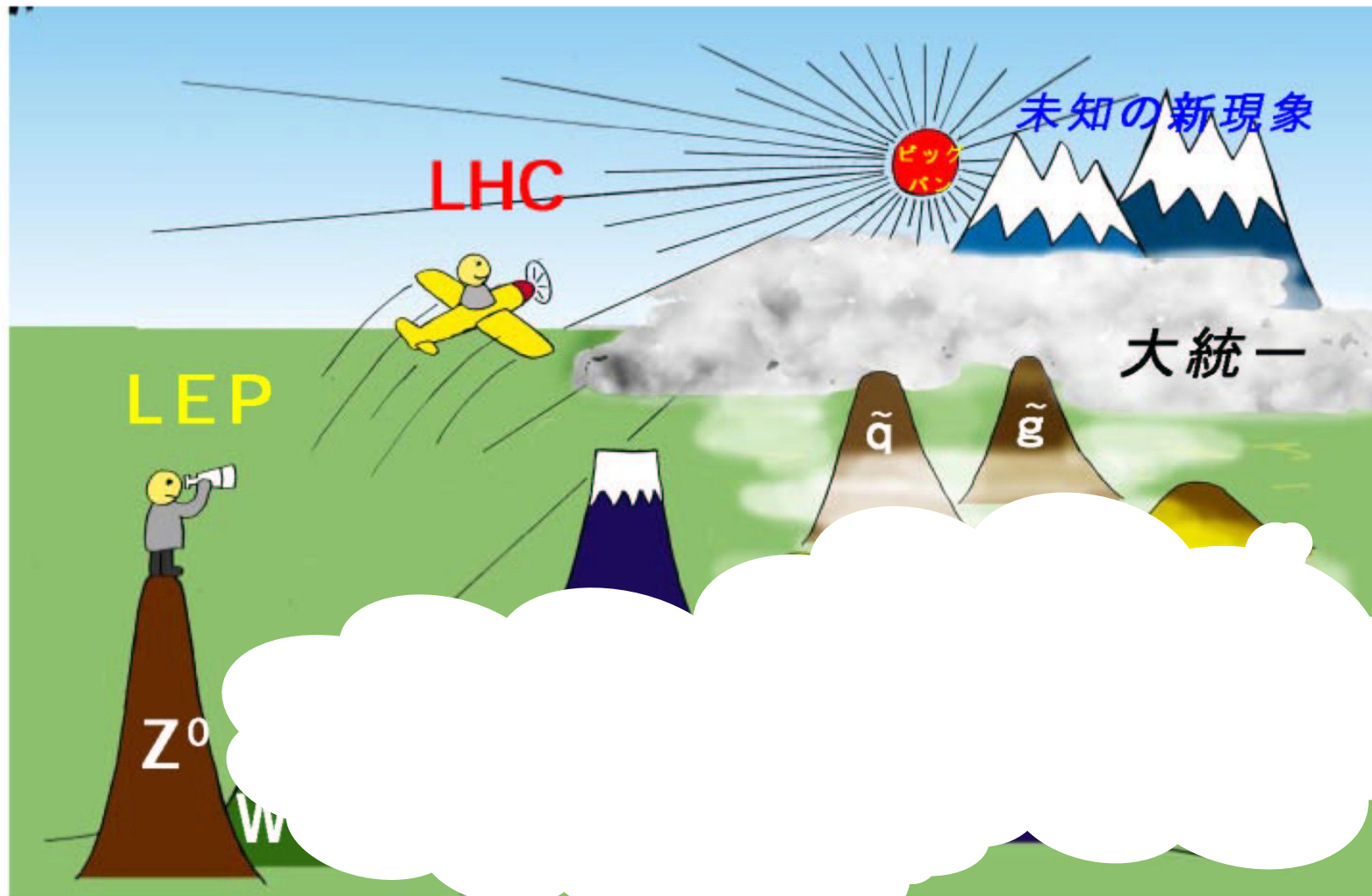
<http://cdsweb.cern.ch/record/39444>

LHC: 文部科学省用プロパガンダ



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

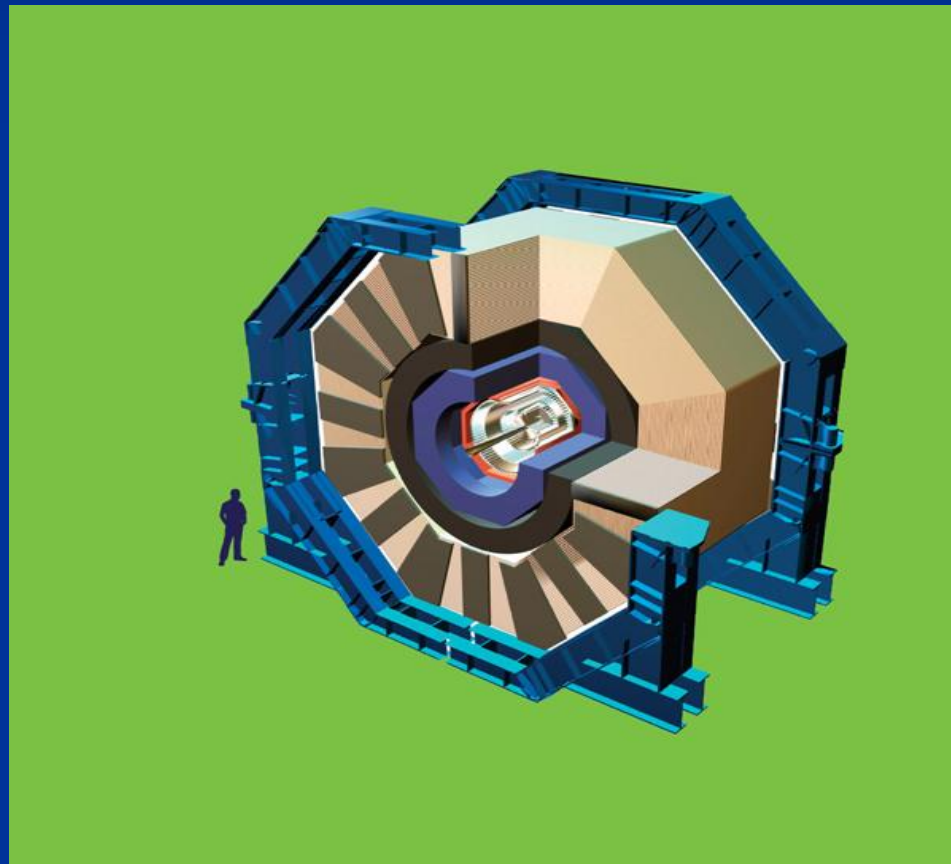
恐らく実際は



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

ILC

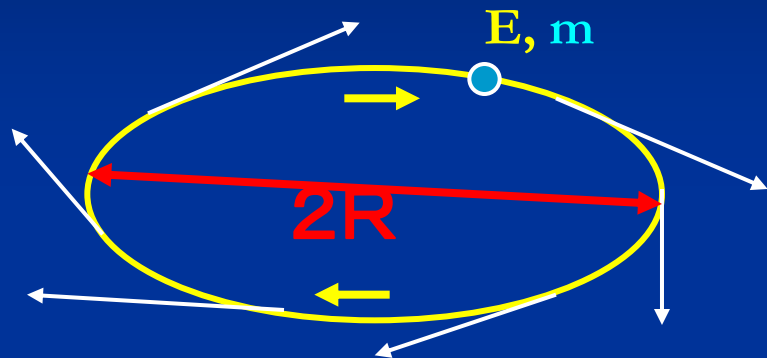
(International Linear Collider)



円形電子・陽電子コライダーの限界

反応は単純、実験は容易

しかし...



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 ΔE は

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

E: 粒子のエネルギー

m: 粒子の質量 R: 半径

ローン破産の状態

エネルギー欠損を補ってより高いエネルギーを得たい

(1) 重い粒子を回す (陽子質量/電子質量=1800) \Rightarrow LHC

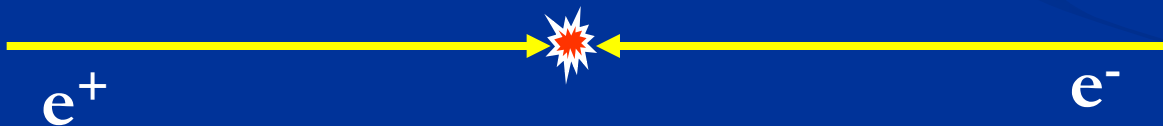
(2) Rを大きくする \Rightarrow LEP(周囲27km)が限界

電子・陽電子リニアコライダー

放射光のエネルギー欠損を補ってより高いエネルギーを得たい

R を大きくする $\Rightarrow R=\infty$ にしてしまえ !

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
高加速勾配、ビームを小さく絞り込む技術が必要
LEP/LHC加速器を伸ばしたくらいの長さ

国際リニアコライダー

ILC

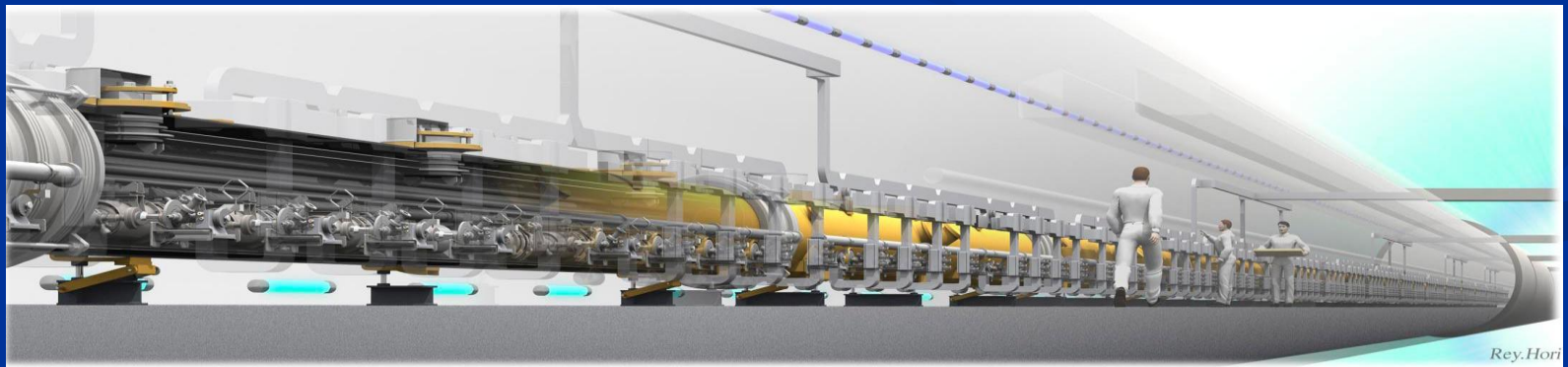
電子・陽電子の衝突は、
陽子・陽子の衝突と比べて
反応が簡単。
⇒実験が簡単

加速器はチャレンジング
⇒技術開発
⇒工学設計 2012年

我が国に誘致したい



画像提供: KEK、(C)Shigemi Numazawa



画像提供: KEK、(C)Rey.Hori

ILCでのヒッグス粒子の研究

ILC は ヒッグス・ファクトリー

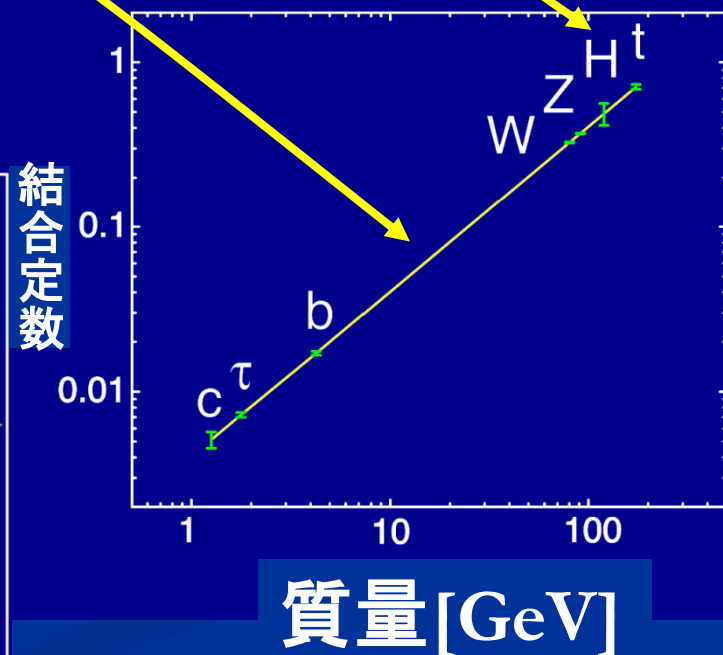
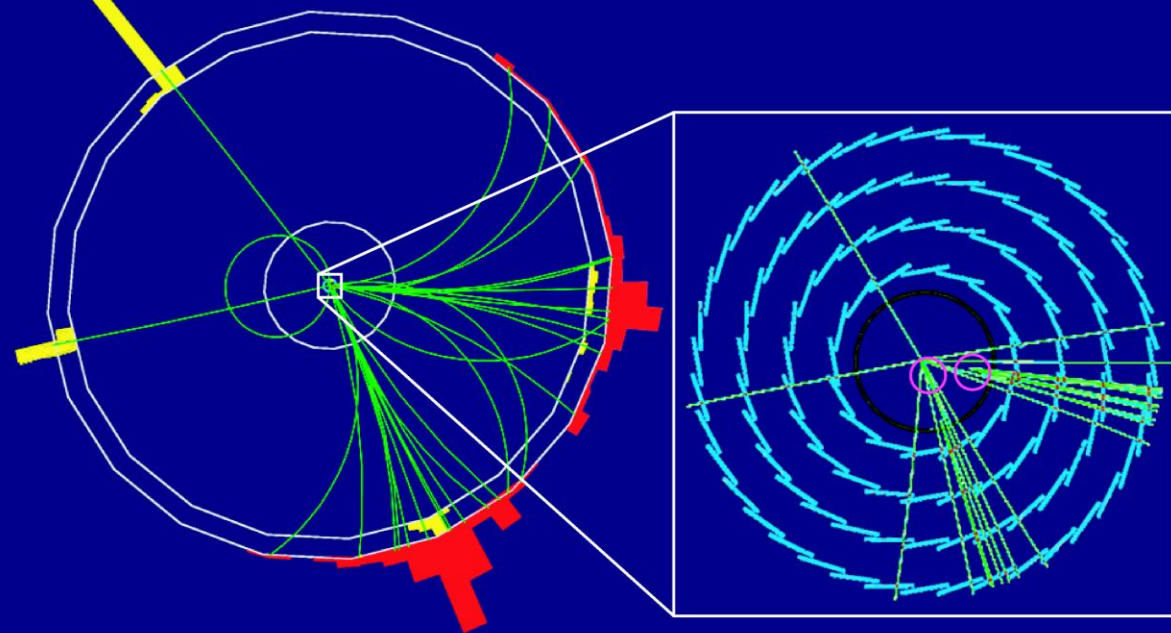
$O(10^5)$ 個の事象を生成して徹底的に研究

質量の起源

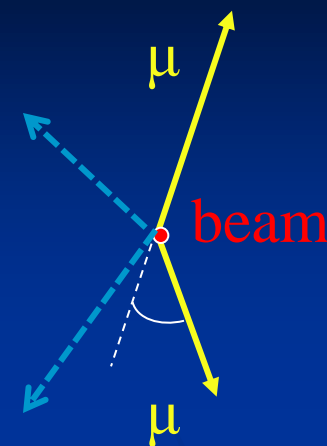
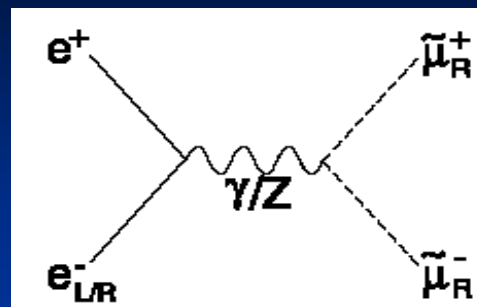
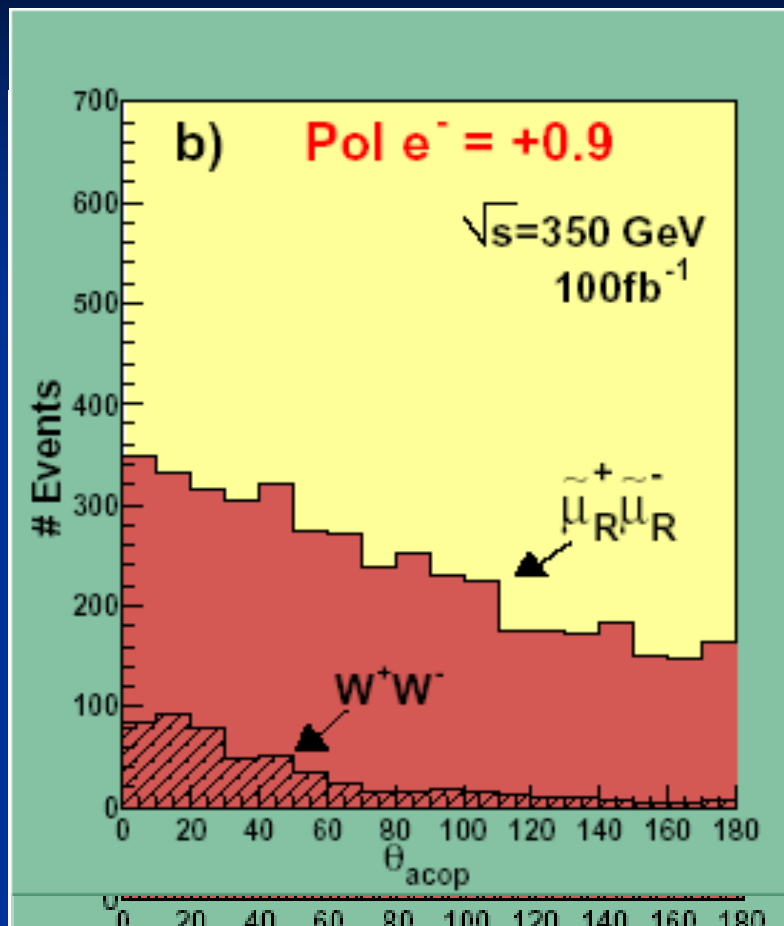
「真空」の構造

$$M(\text{素粒子}) = g(\text{結合定数}) v(\text{真空期待値})$$

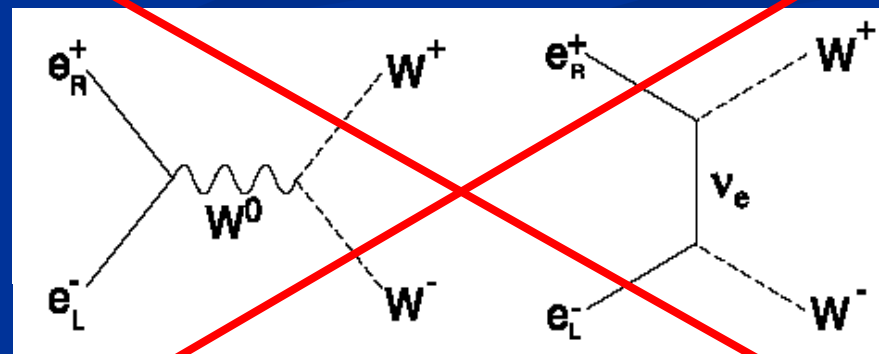
$$e^+e^- \rightarrow Z^0H^0 \rightarrow e^+ e^- + bb$$



ILCでの超対称性粒子の探索(電子偏極)



スカラー μ の生成



バックグラウンド

電子スピン縦方向偏極 (90%)

電子スピン無偏極

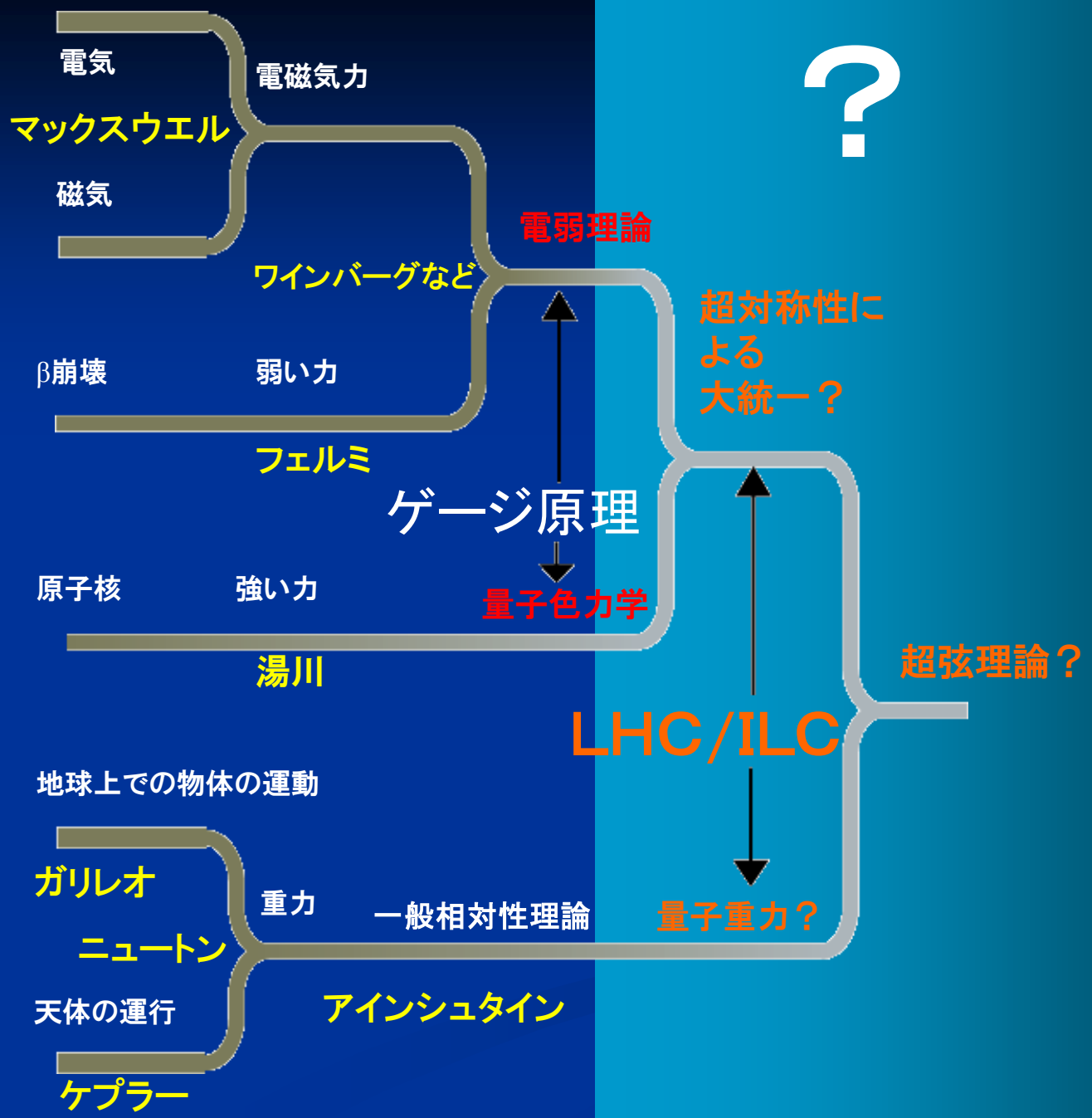
出典: "GLC Project" Linear Collider for TeV Physics, KEK

Report 2003-7, September 2003

計算: KEKのリニアコライダーの物理グループ(宮本彰也氏、藤井恵介氏など)

中西研究室(名古屋大学)

力（相互作用）の統一



アインシュタインの夢

大型基礎科学計画の役割



「我々はどこから来たのか
我々は何者か
我々はどこへ行くのか」

最高エネルギーのコライダー

もはや、世界で協力して一基を建設する段階

ヨーロッパ

PETRA
HERA DORIS

ISR
SppS

LEP/LHC

日本

TRISTAN

米国

SLC PEP
SPEAR

ISABELLE

TEVATRON

SSC

最高エネルギーのコライダー

もはや、世界で協力して一基を建設する段階

ヨーロッパ

PETRA
HERA DORIS

ISR
SppS

LEP/LHC

日本

TRISTAN

ILC

米国

ISABELLE
SLC PEP
SPEAR

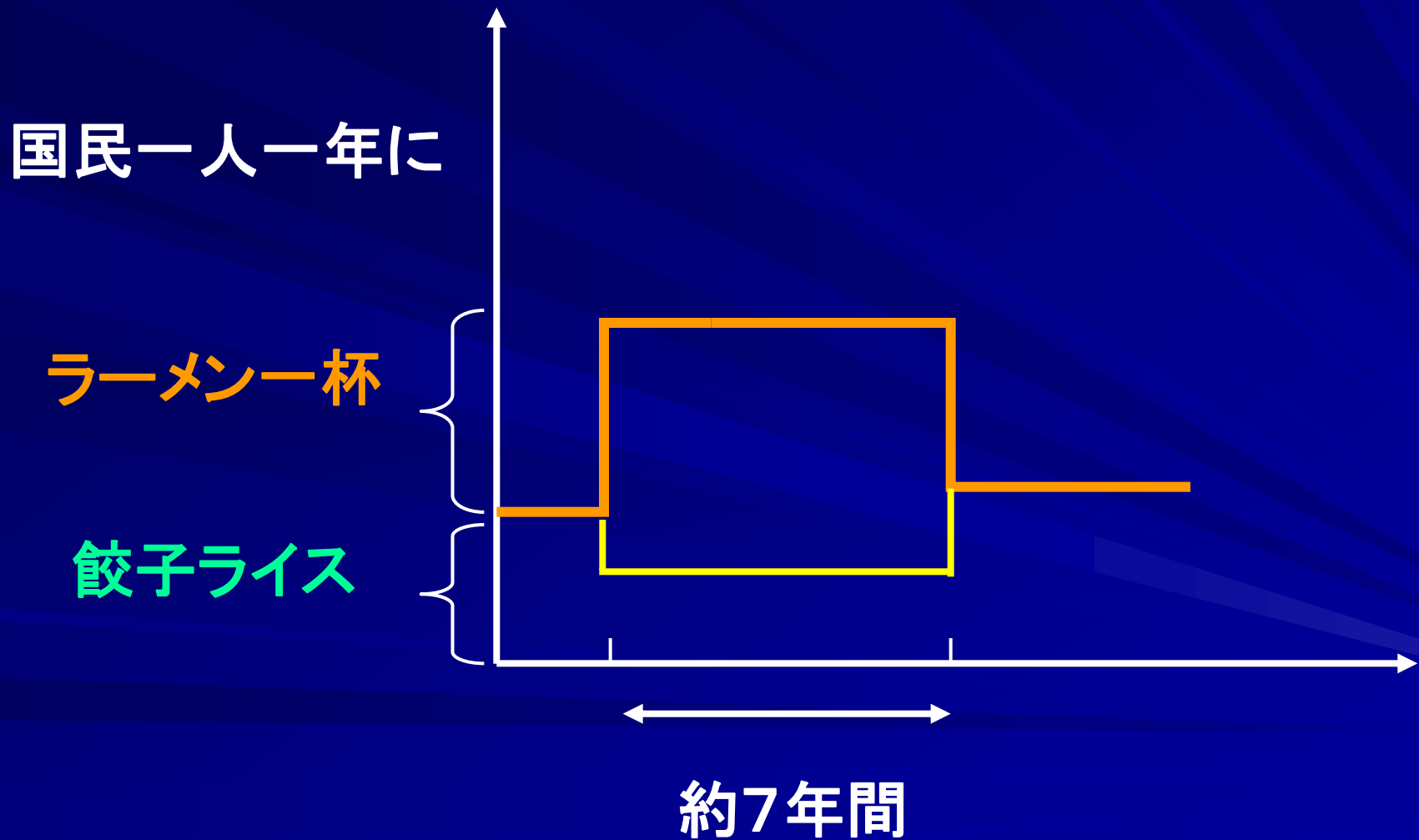
TEVATRON

SSC



ILCの予算

(我が国にサイトがきた場合)



ILC budget

ドイツ版(日本ドイツ年)

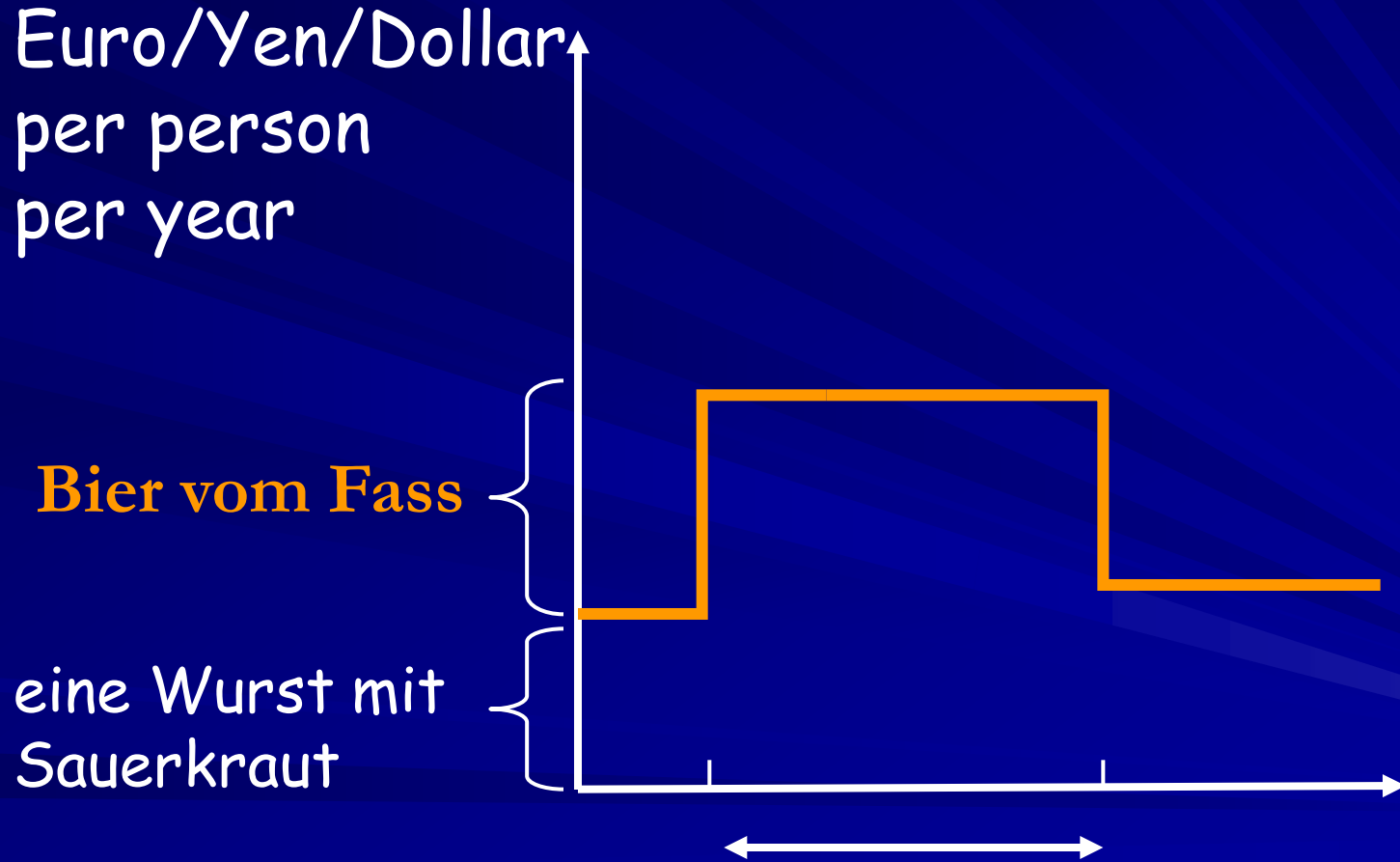
(for a host country/region)

Euro/Yen/Dollar
per person
per year

Bier vom Fass

eine Wurst mit
Sauerkraut

7 years



政治

国民の理解がなければ到底出来ない。基礎科学よりも、むしろ福祉、教育、赤字財政の再建...に予算を使うべきという意見が当然ある。

米国の巨大加速器を建設中のフェルミ研究所に米国の議員が来て質問した：

「このような装置は**国家の防衛**にどのように役に立つのか？」

当時の所長ウイルソン氏、答えて曰く：

「基礎科学に対する投資は、直接防衛には役立ちませんが、わが国を尊敬される**品格のある防衛**するに値する**国家**にすることが出来ると考えます」

短絡すると... 「**国家の品格は素粒子物理の研究から**」

経済・産業

宇宙や素粒子研究のもたらした技術

アインシュタインの「一般相対性原理」を証明する実験のために
正確な原子時計を作った

⇒ GPSが可能となった（カーナビ、携帯電話の地図）

CERNで研究者がコンピュータの介して情報やデータをやりとり

⇒ CERNでのWorld-Wide-Web(WWW)の発明

⇒ インターネット 情報化社会 携帯電話

発明者：バーナー
ズ・リー(CERN)

⌘ Copyright: CERN



素粒子の実験に使う加速器技術

⇒ 医療用の加速器(癌の治療)、滅菌用の電子
加速器、

超伝導技術(超伝導磁石、リニアモーターカー)、.....

大実験の波及効果（国益に合致）

(1) 社会的・教育的な効果

- 若い世代に夢と誇りを与える⇒次世代の科学者、技術者へのインセンティブ
- 新発見が国民の知的好奇心を喚起⇒科学リテラシーの向上・復権
- ILCなどのプロジェクトは真の国際的な計画 ⇒科学における重要な国際貢献
我が国の存在意義（品格）を高める。

(2) 即効的な経済効果（CERN:経済効果波及係数=3）

- 産業界への経済還元：総合建設、重工業、電機、材料、計算機・情報産業
など 多くの産業・技術に繋がる ⇒科学技術立国
- リニアコライダーは世界的な基準を決める総合的なシステム

(3) Spin-off（派生技術）

加速器や測定器の派生技術は様々な産業に役立つ

WWW (CERNでの発明), GRID ⇒ IT (Internet、情報化社会)

XFEL ⇒ バイオ、ナノテク、物質科学, 化学反応, 構造生物学

医療、環境 ⇒ 滅菌用小型電子加速器、超電導技術 など

(4) 長期的な効果 人類共通の知的財産の創造 ⇒文化創造立国

百年の計：電子、原子核はほぼ100年前に発見され、量子力学、
相対性理論もおおよそ100年前に構築された ⇒ 現在の産業基盤

まとめ

LHC加速器が稼動を始め、ヒッグス粒子や超対称性粒子などを発見できる時代が来た。

これに続きリニアコライダーではクリーンな環境での実験でその詳細を明らかにし「原理」に高める。

⇒

国際的な時代認識として素粒子物理の新たなパラダイムを構築する時代が来る。

大型加速器実験は即効的な経済効果、派生技術による新産業の創成、人類の文化への貢献がある。