

素粒子実験

佐藤構二

基礎物理学セミナー

2018年7月20日 6限目(16:45-18:00)

内容

- 素粒子物理学って、どういうこと？
 - いままでわかってきたこと。
 - 素粒子実験の手法。
 - 筑波大学の素粒子実験室。
- LHC実験での素粒子研究
 - 加速器の原理
 - 粒子検出の原理
 - なぜ高エネルギー加速器なのか？
 - どうやって新粒子を探すのか？
 - ヒッグス粒子研究の成果。
- 標準理論を超えて
 - 標準理論の問題点、説明できないこと
 - 標準理論を超える物理の探索
- (素粒子物理は社会の役に立つのか？)
- (素粒子実験研究室卒業生の進路)
- (加速器運転にまつわる面白い出来事など)

素粒子物理学って、どういうこと？

- 物質の究極の構成要素が何かを研究する学問。
 - 究極の構成要素＝素粒子
- 素粒子同士にどういう相互作用(力)が働くか、も同時に理解することを目指す。

素粒子とは

物質を細分化していくと何に行き着くか？

それ以上分けられない物質は？

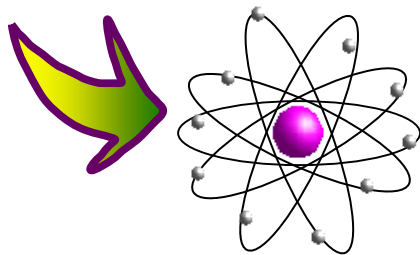
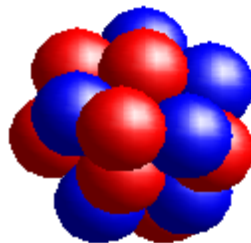
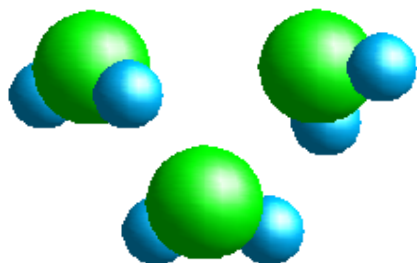
⇒ **物質の究極の構成要素＝素粒子**

クォークは現在知られている最小の物質構成要素＝素粒子。
クォークに内部構造はあるか？

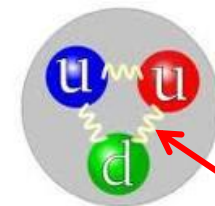
水の分子 10^{-7}cm

原子核 10^{-12}cm

クォーク $\leq 10^{-16}\text{cm}$



酸素原子 10^{-8}cm



陽子 10^{-13}cm

クォーク同士には
どういう相互作用
が働いているか？

物質を構成する素粒子

物質粒子				
単一で存在 ハドロンを構成		第1世代	第2世代	第3世代
	クォーク	アップ	チャーム	トップ
		ダウン	ストレンジ	ボトム
	レプトン	eニュートリノ	μニュートリノ	τニュートリノ
		電子	ミューオン	タウ

電荷

$$+\frac{2}{3}e$$

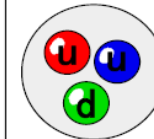
$$-\frac{1}{3}e$$

$$0e$$

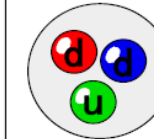
$$-1e$$

クォークモデル

粒子(質量)



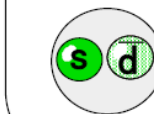
陽子 (938.3 MeV)



中性子 (939.6 MeV)



π^+ (139.6 MeV)



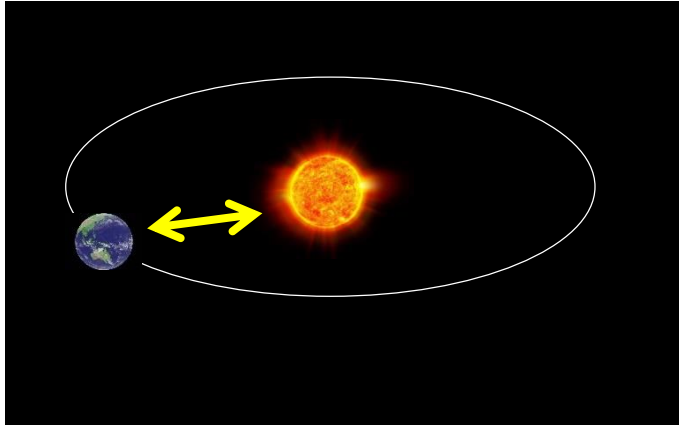
K^- (493.7 MeV)

- 物質は、クォークとレプトンからなる。
- クォーク、レプトンそれぞれ3世代。

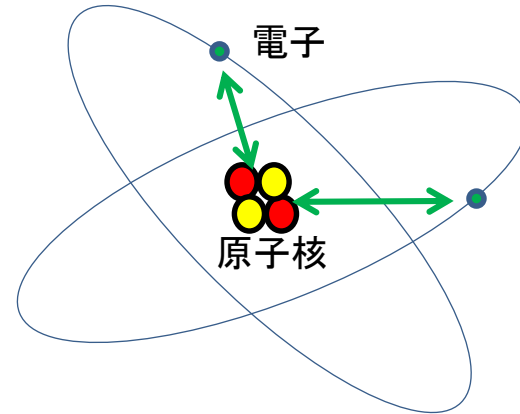
クォークは単独では自然界に存在できない。陽子、中性子、パイ粒子などのハドロンを形成し、複合粒子として自然界に存在する。

力は何だろう？

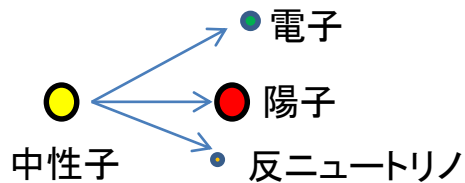
重力



電磁気力

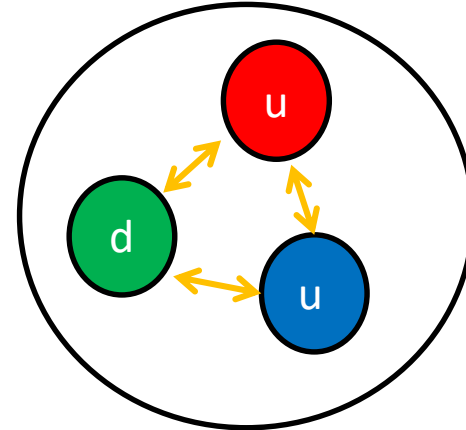


弱い力



β 崩壊

強い力



物質を構成する粒子の間に働く力は、素粒子によって媒介されている

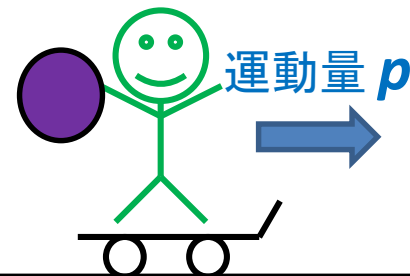
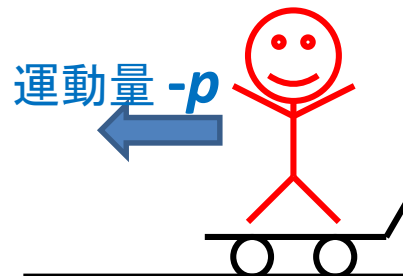
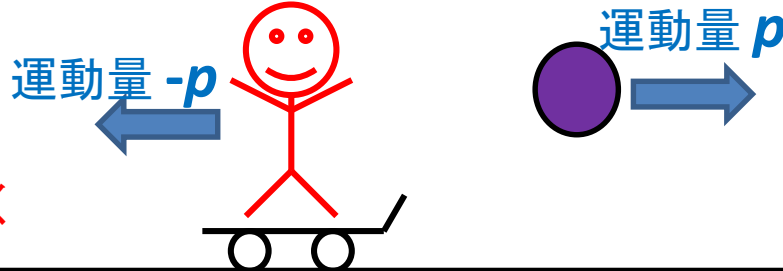
素粒子が力を媒介するって、どういうこと？

—現代物理学における理解—

- 地面との摩擦がない状況で、キャッチボールをすると...



ボールを投げた反動で、ボールと反対方向に動く



ボールを受け取った反動で、ボールと同じ方向に動く

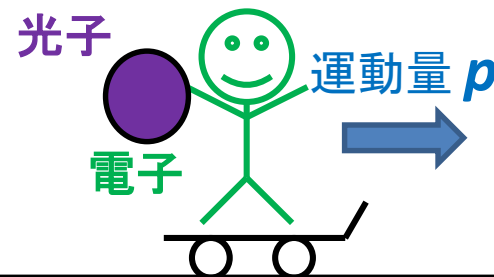
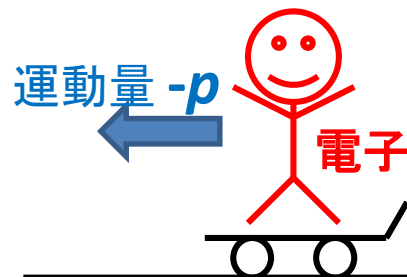
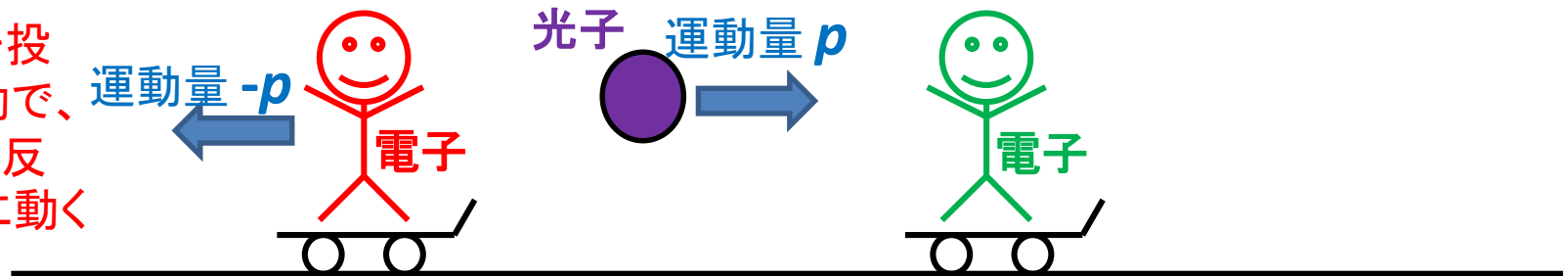
素粒子が力を媒介するって、どういうこと？

電磁気力による電子どうしの散乱

- 地面との摩擦がない状況で、キャッチボールをすると...



ボールを投げた反動で、ボールと反対方向に動く

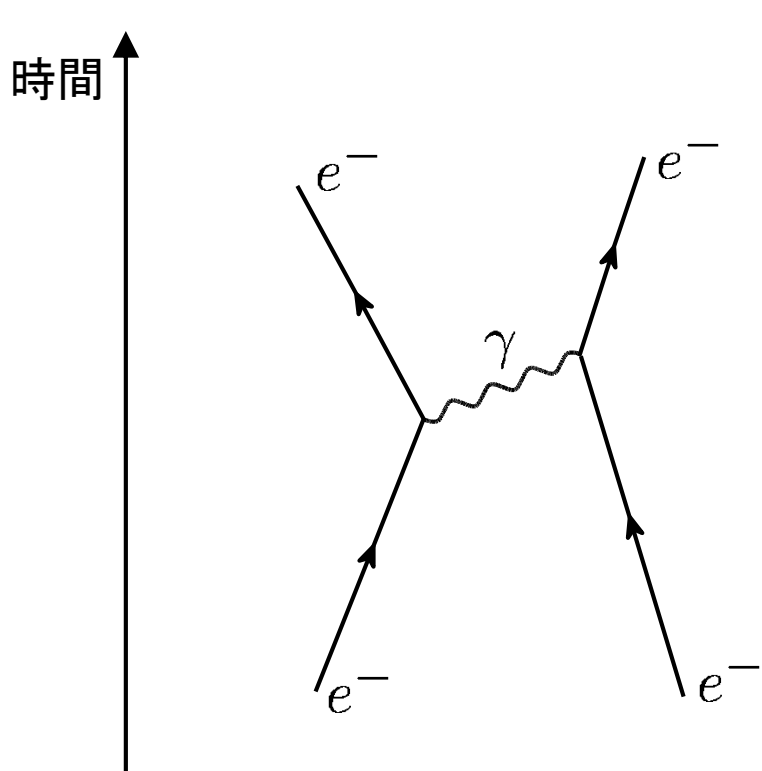


ボールを受け取った反動で、ボールと同じ方向に動く

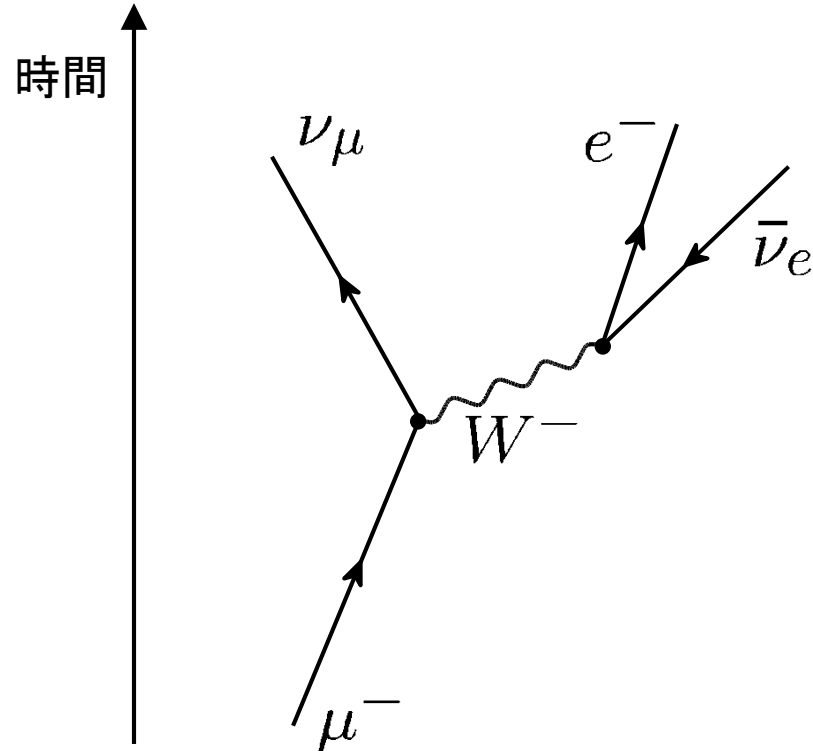
素粒子物理学では、電子同士の電磁相互作用は、光子をキャッチボールして起こる、と理解している。

素粒子反応過程の例

- 素粒子物理学では、以下のようなファインマン図を描いて、素粒子の反応を議論する。



電子と電子の電磁気力による散乱。光子が力を媒介。



ミュー粒子の崩壊。
W粒子が媒介する弱い相互作用によって崩壊する。

標準理論の粒子発見の歴史

単一で存在
ハドロンを構成

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ

ゲージ粒子 力を媒介

g 強い力 グルーオン
γ 電磁力 光子
w^+ w^- z 弱い力 Wボゾン Zボゾン

ヒッグス場に伴う粒子



現在の素粒子物理（標準理論）

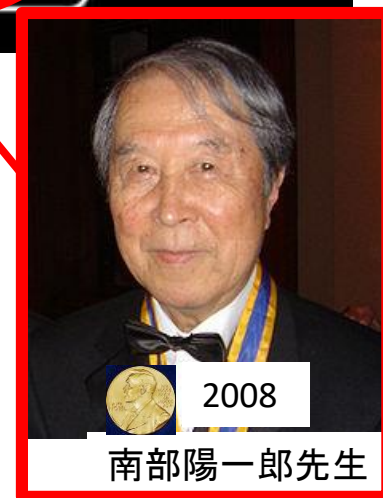
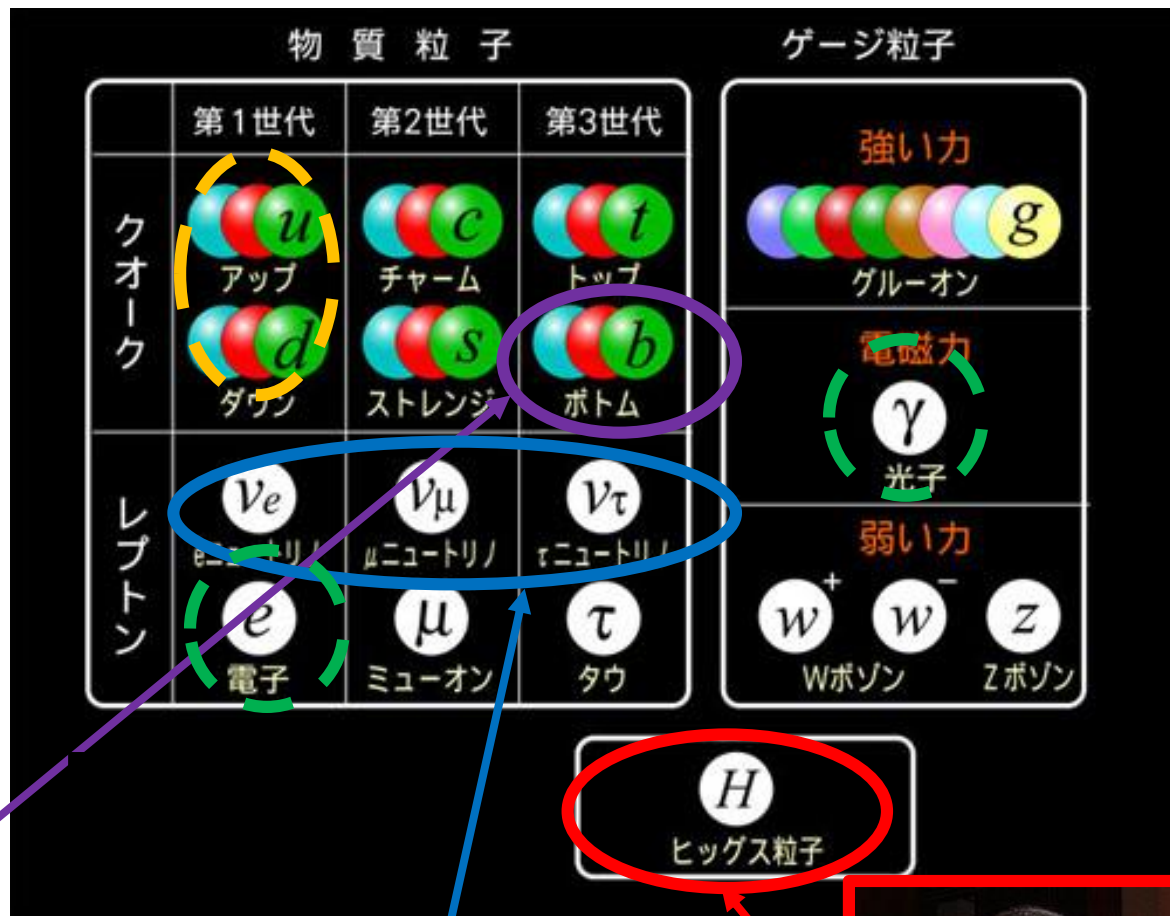
- 標準理論
 - 電弱統一理論
 - 電磁気力、弱い力を統一的に記述。
 - W,Z粒子の質量を説明。
 - ヒッグス粒子の物理。
 - 量子色力学
 - 強い力を記述。
 - 核子、中間子のクォーク模型。
 - 粒子混合の理論。
 - 粒子の混合を記述。
 - 粒子と反粒子の非対称性を記述。
- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。

標準理論の粒子発見の歴史

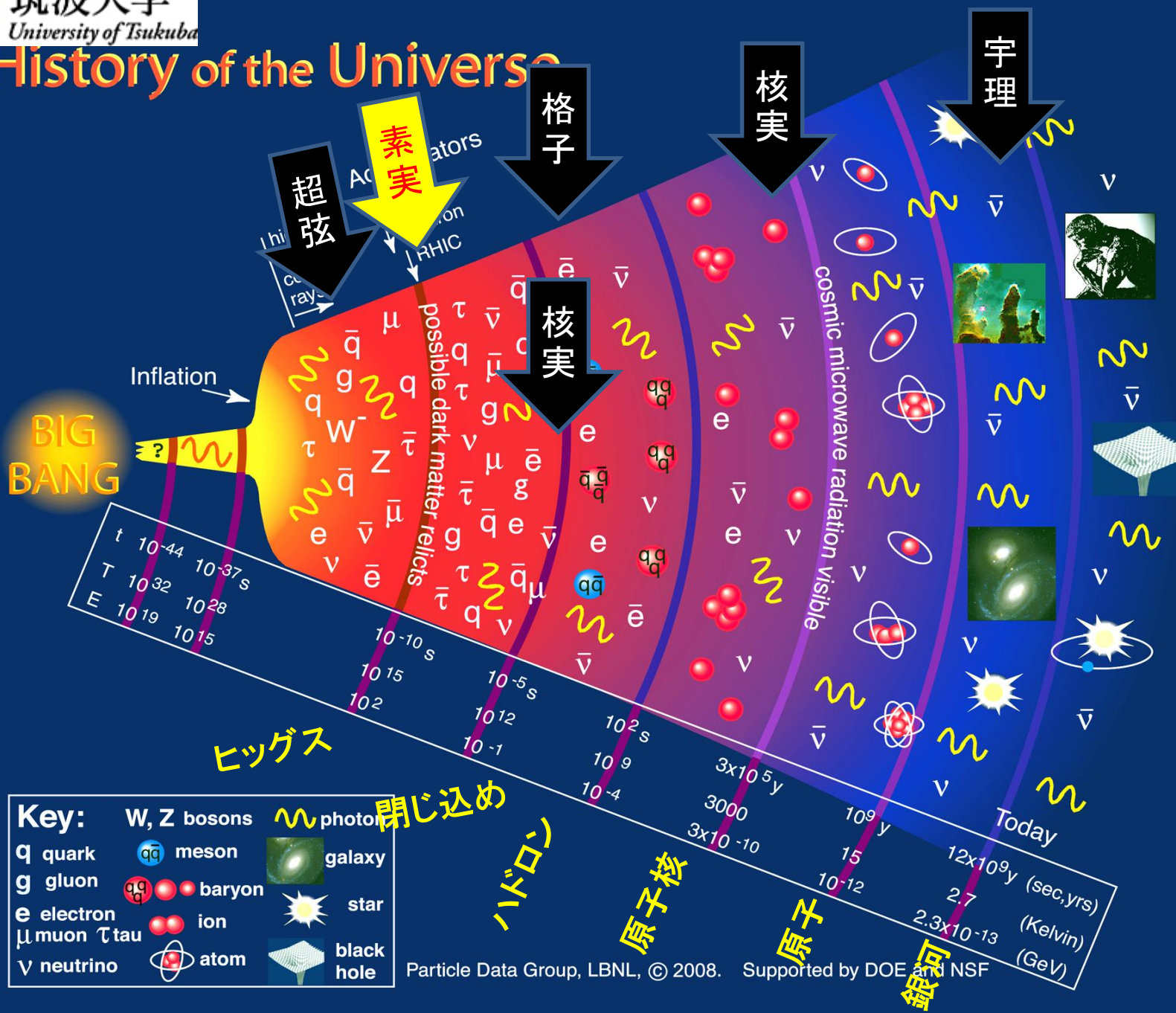
- 青:アメリカで発見、赤:ヨーロッパで発見。



日本の素粒子物理学

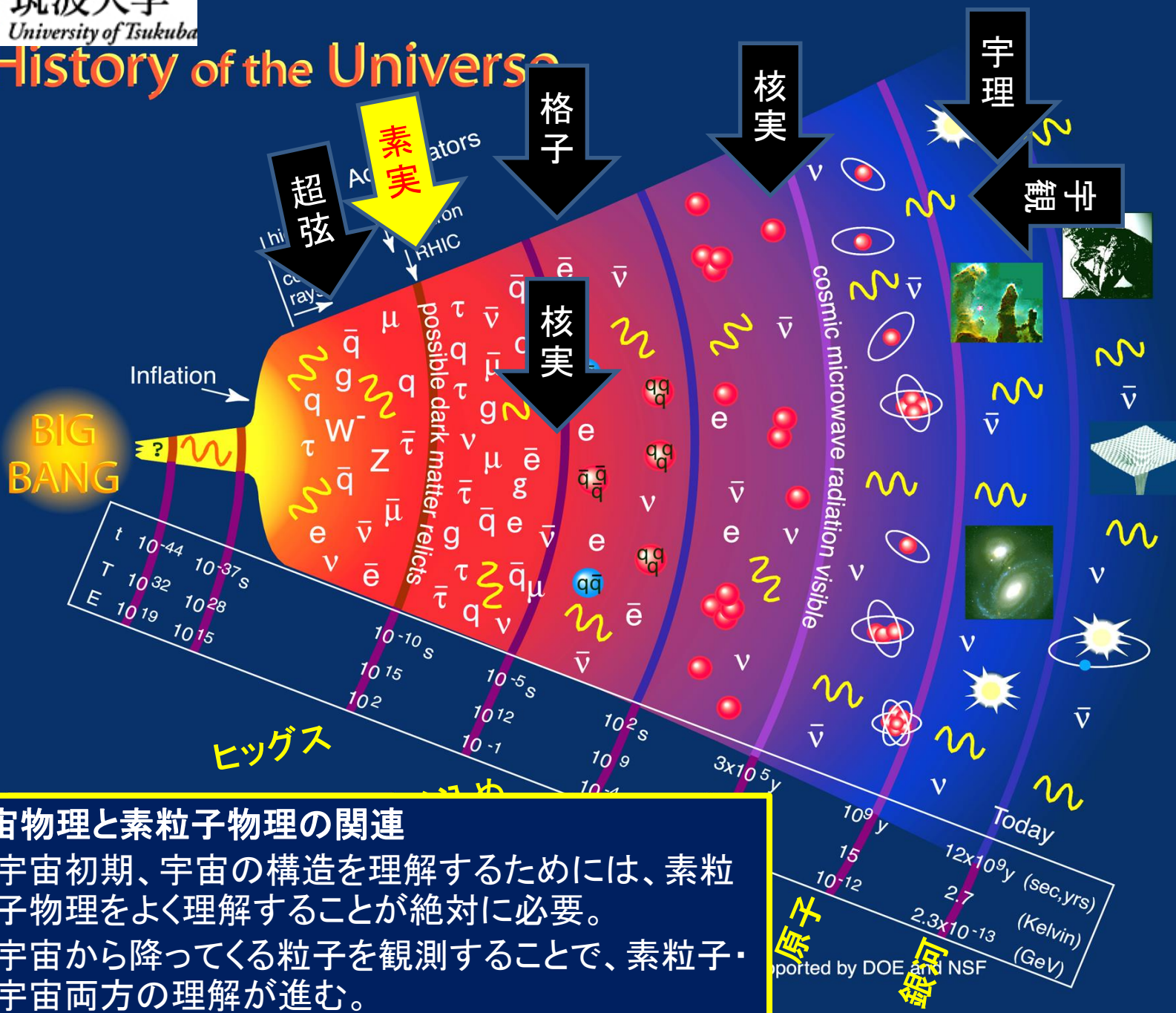


History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

History of the Universe



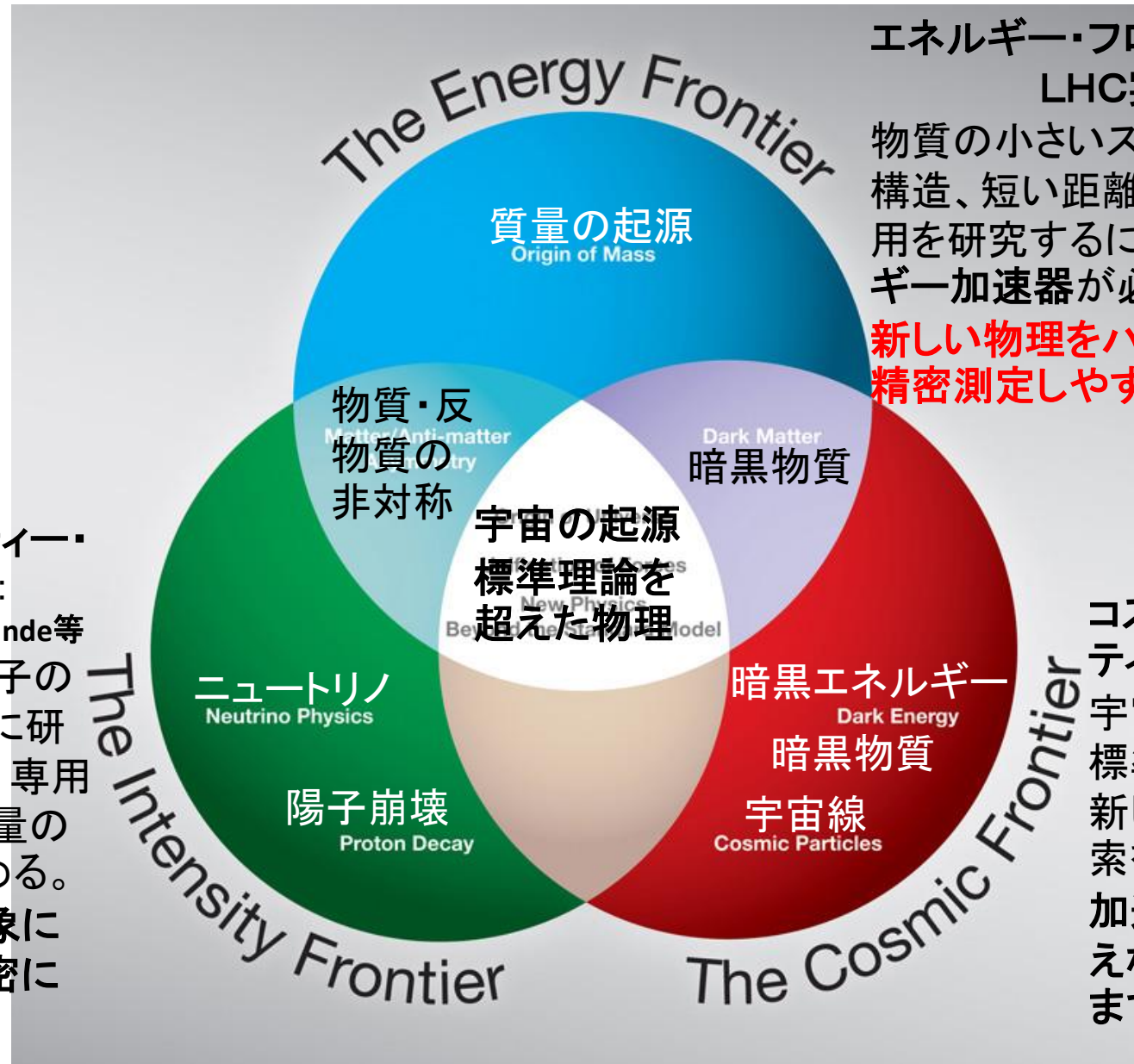
宇宙物理と素粒子物理の関連

- 宇宙初期、宇宙の構造を理解するためには、素粒子物理をよく理解することが絶対に必要。
- 宇宙から降ってくる粒子を観測することで、素粒子・宇宙両方の理解が進む。

素粒子実験の手法

インテンシティー・フロンティア:

T2K、sKamiokande等特定の素粒子の性質を詳細に研究するには、専用の装置で大量のデータを溜める。ひとつの現象に特化して精密に測定する。



エネルギー・フロンティア: LHC実験

物質の小さいスケールでの構造、短い距離での相互作用を研究するには高エネルギー加速器が必要。

新しい物理をハッキリと発見、精密測定しやすい。

コスミック・フロンティア:

宇宙観測をして、標準理論の検証・新しい物理の探索を行う。加速器実験で見えない新しい物理まで探索できる。

筑波大学素粒子実験室の研究テーマ

- **LHC加速器でのATLAS実験** 現在のエネルギー・フロンティア
 - 世界最高エネルギーでの素粒子反応の研究
 - ATLAS検出器の運転
 - シリコン検出器の開発
- **SOI検出器の開発** 次世代のエネルギー・フロンティア、産業への応用
- **ニュートリノ崩壊光の探索実験** 次世代のコスミック・フロンティア
 - ロケット・衛星実験にむけた物理シミュレーション
 - 超伝導トンネル結合(STJ)検出器の開発

素粒子実験室のスタッフ



受川 史彦

テバトロン、LHC:B中間子の物理、ヒッグス粒子の研究。



原 和彦

テバトロン、LHC:ヒッグス粒子の研究。
LHC用の半導体検出器、SOI検出器の開発。
ミューオン・ラジオグラフィ。



佐藤 構二

テバトロン、LHCでのトップクォーク、ヒッグス粒子の物理。



大川 英希

LHC実験でのヒッグス粒子物理、新物理探索。



金 信弘

テバトロン、LHC:ヒッグス粒子、トップ・クォーク、B中間子の研究。
ニュートリノ崩壊光の探索。
ミューオン・ラジオグラフィ。



武内 勇司

テバトロン実験でのトップ・クォーク測定。
ニュートリノ崩壊光の探索。



飯田 崇史

暗黒物質の探索。二重ベータ崩壊の探索。
ニュートリノ崩壊光の探索。

P-doc: 1

D3: 1

D2: 1

D1: 1

M2: 3

M1: 7

B4: 4

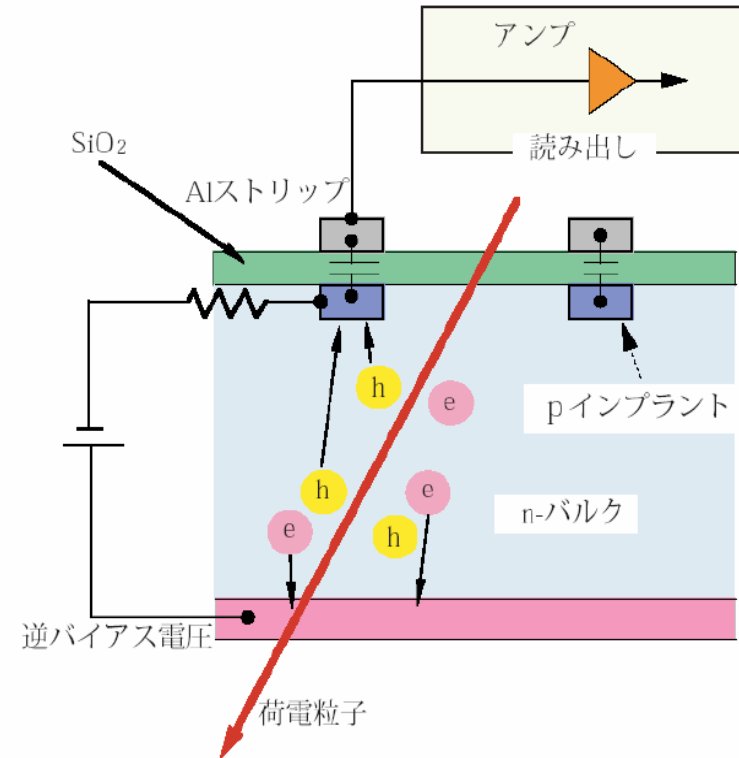




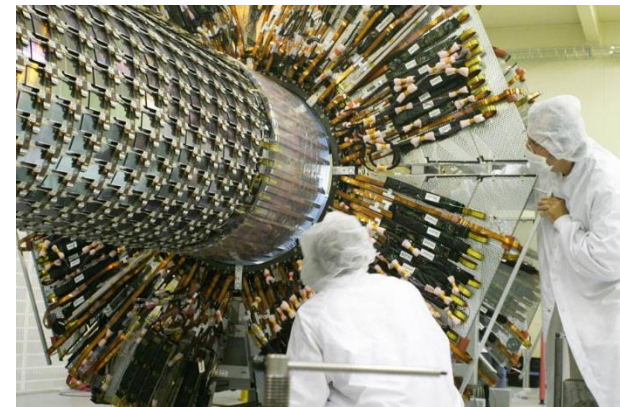
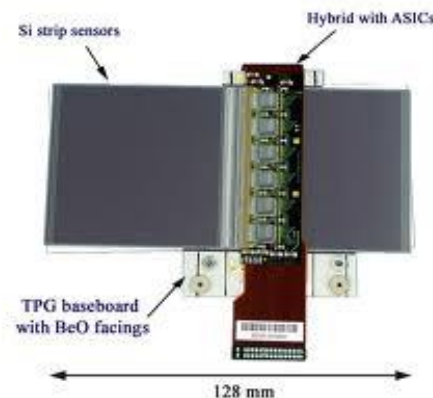
ATLAS実験（修士課程・4年）

シリコン検出器の開発

- 2023年からの運転時にむけ、シリコン検出器をアップグレード。
- シリコン検出器：粒子の飛跡を高い位置分解能（数十 μm ）で捕らえる。
⇒ b クォークの同定
- ビーム輝度が増すため、放射線耐性の優れた検出器が必要。



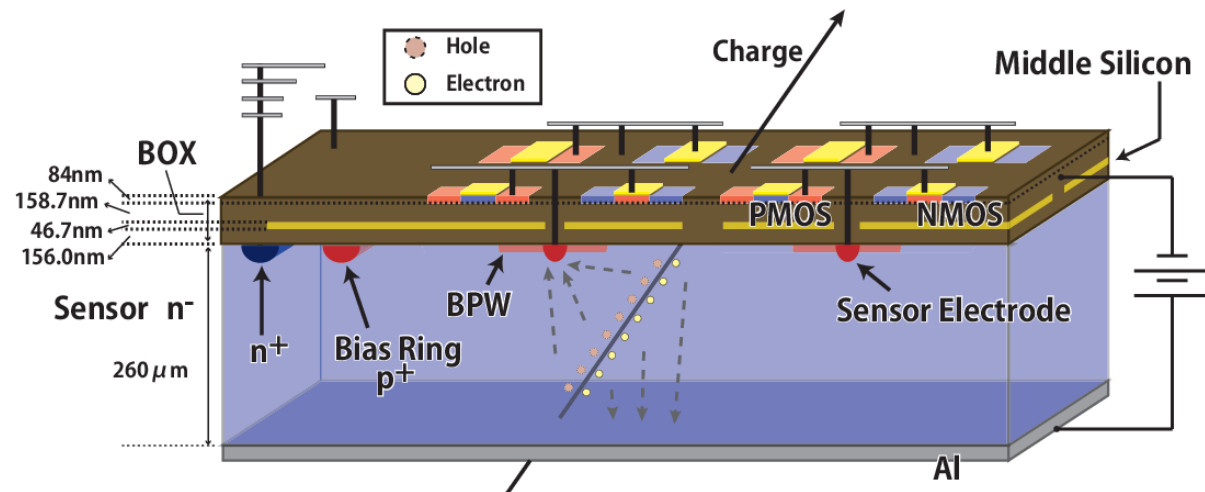
高エネルギー加速器研究機構などと共同研究
スイスで予備実験（ビームテスト）など



SOI検出器の開発（修士課程、4年）

- 次世代のシリコン検出器の開発研究。
- SOI=Silicon On Insulator、読み出し回路を、絶縁体をはさんでシリコン検出器と同じウェファァーに形成。
 - コンパクト化、ノイズ低減、省電力、低コスト化。
- トランジスタの特徴、検出器の性能評価、放射線耐性の試験等。

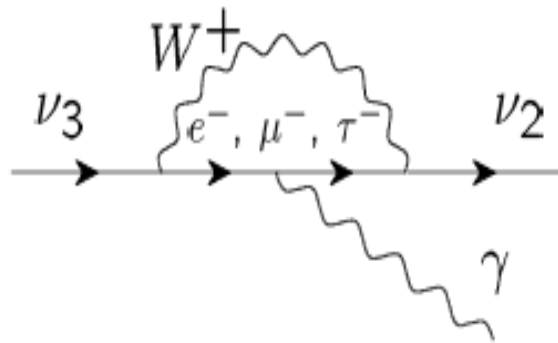
高エネルギー加速器研究機構などと共同研究



ニュートリノ崩壊光の探索

ニュートリノが崩壊すれば、崩壊光がでる：（遠赤外領域）

$$E_\gamma = \frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \sim 10 - 30 \text{ meV}$$

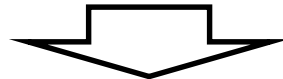


ニュートリノ振動実験(T2Kなど)

$$\Delta m_{32}^2 = m_{\nu_3}^2 - m_{\nu_2}^2$$

を測定。

- ニュートリノ崩壊光を測定できれば、**ニュートリノ質量を決定**できる。
- ビッグバン理論の予言：宇宙初期に生成されたニュートリノが、**背景ニュートリノ**として存在する。



宇宙背景ニュートリノの崩壊光を探索する!!

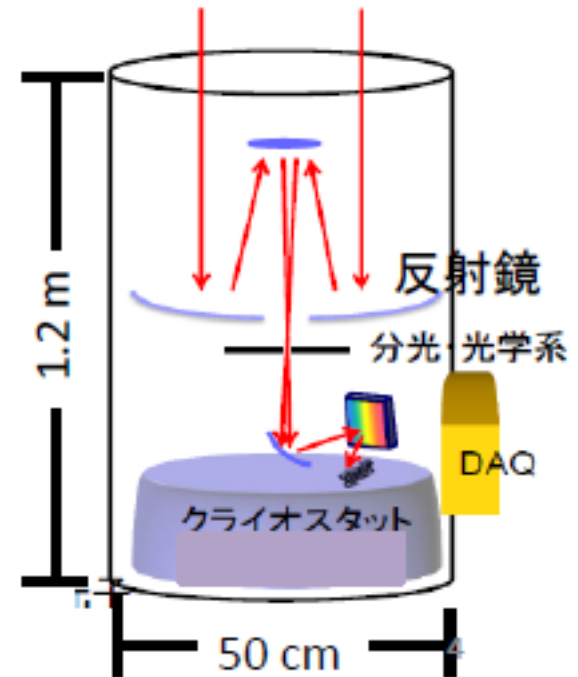
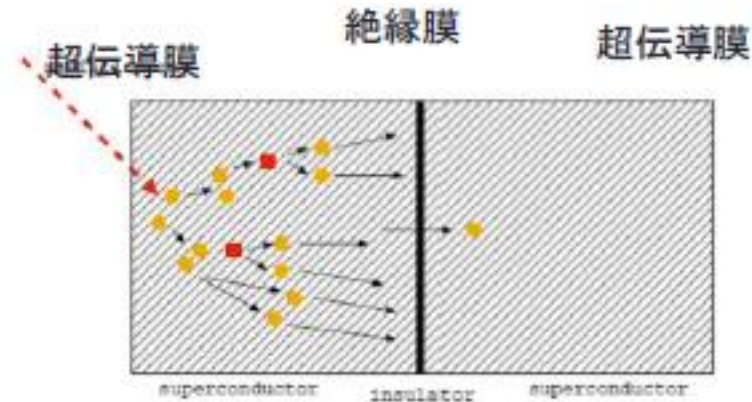
COBAND実験

STJ検出器の開発 (博士、修士、4年)

- 低エネルギーの光子 (数十meVの遠赤外光) を一個一個、高いエネルギー分解能で検出する必要がある。



- STJ検出器 = Superconducting Tunneling Junctionの開発。
- まずは、ロケット実験で実験手法の確立をめざす。
- 最終的には、人工衛星に搭載し、長期間の観測を行う。



C O B A N D 実験、出張先での実験・研究

米国フェルミ国立研究所



福井大



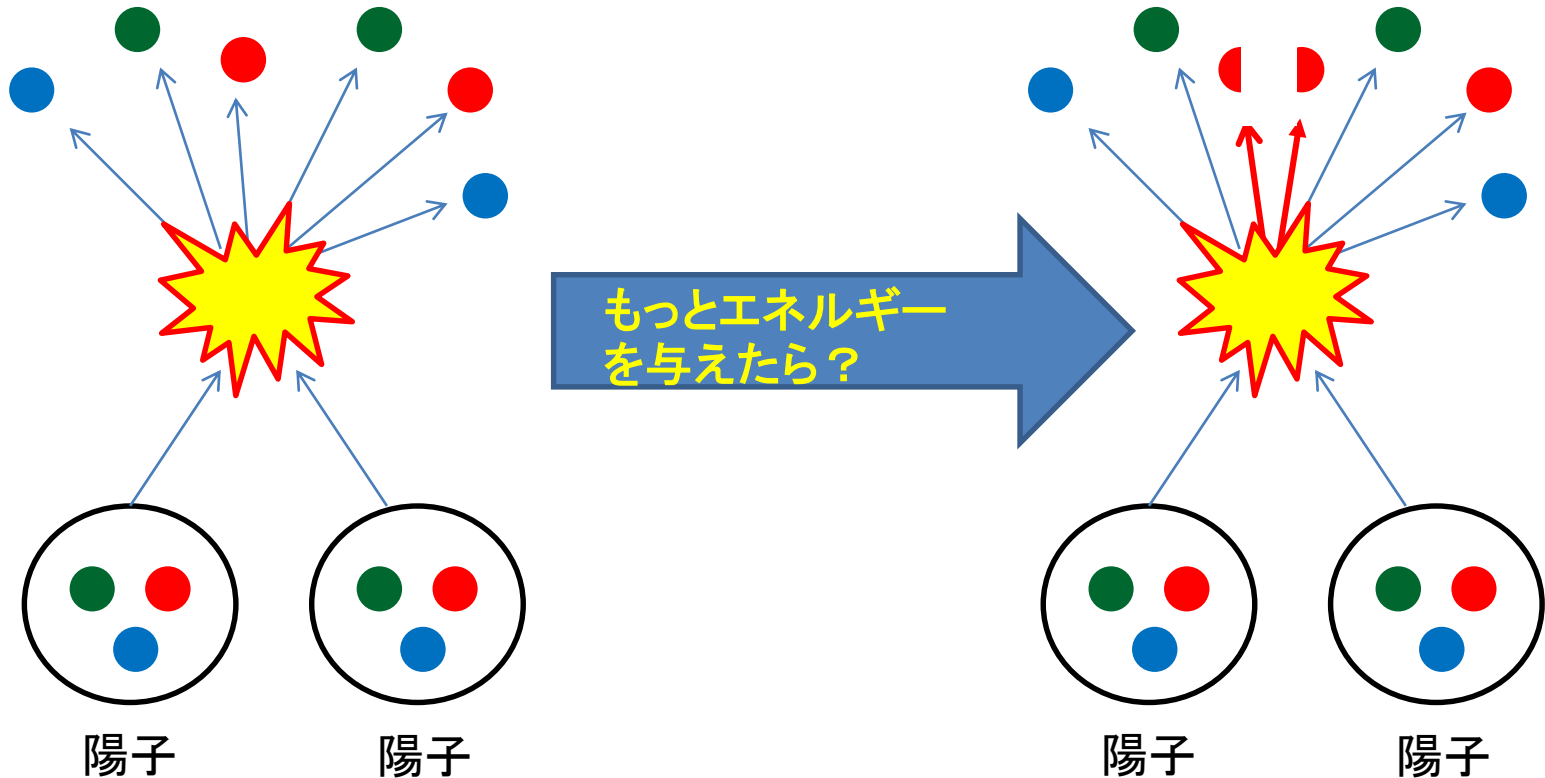
韓国、KAIST



**世界最高エネルギー、
L H C 加速器**

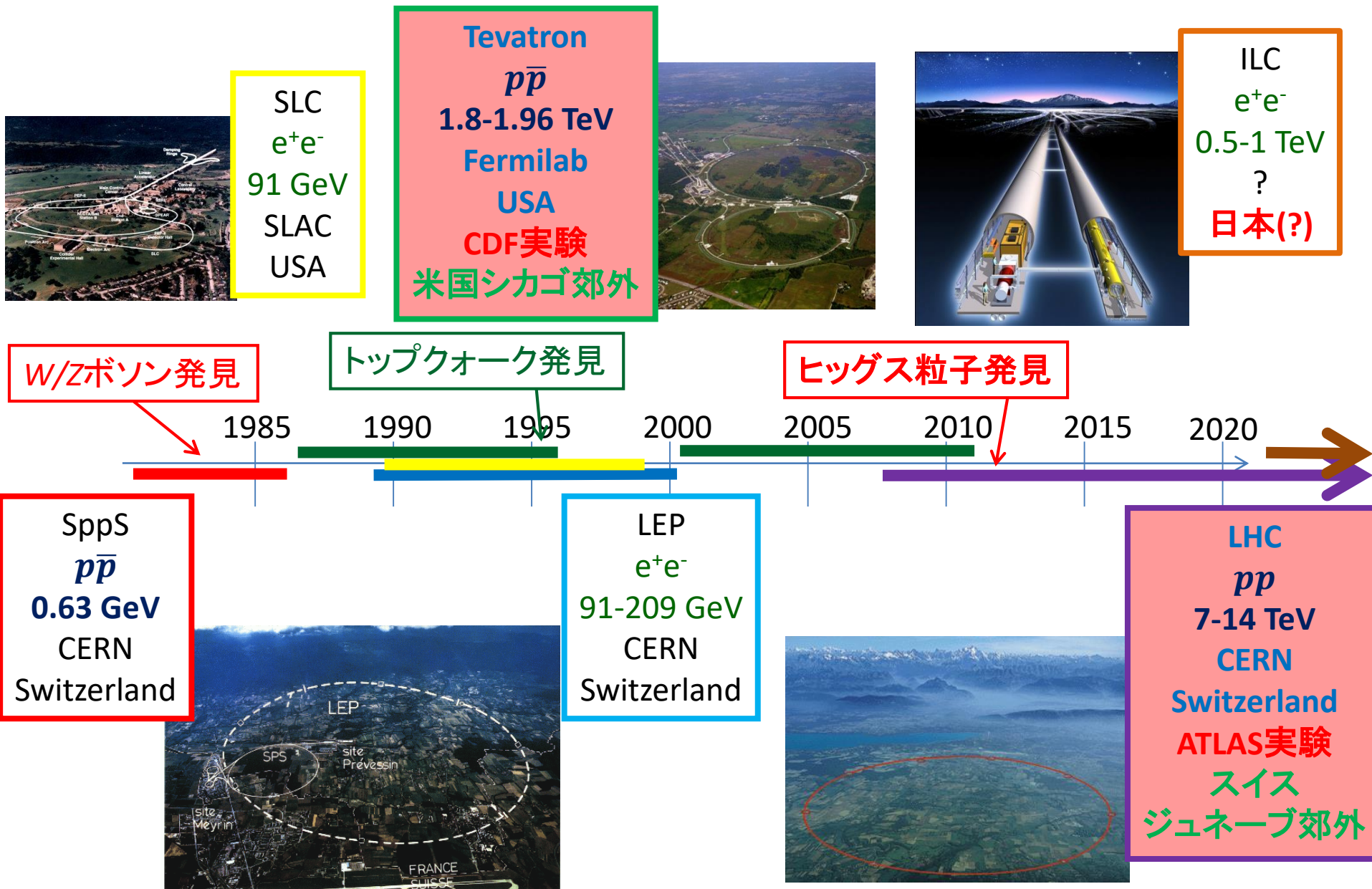
なぜ高エネルギー加速器なのか？（直感的には...）

- 陽子同士をぶつけて、素粒子反応の結果できた粒子を解析し、何が起こったのかを調べる（＝物理解析）。
- 十分にエネルギーでぶつければ、クォークを壊してクォークの内部構造を探る事ができる。



（実際に陽子を衝突させるとき、これほど単純なことがおこっているわけではない...。）

最近から近未来の最高エネルギー加速器



LHC実験

スイス・アルプス山脈

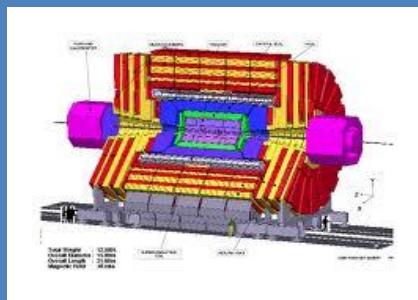
世界最高エネルギーでの素粒子研究

$\sqrt{s} \leq 14 \text{ TeV}$ での陽子・陽子衝突

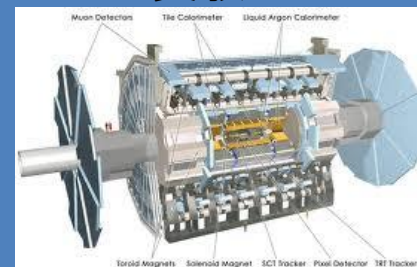
ジュネーブ市街



CMS実験



ATLAS実験



円周27km

陽子を7 TeVまで加速して正面衝突

LHC実験

スイス・アルプス山脈

世界最高エネルギーでの素粒子研究

$\sqrt{s} \leq 14 \text{ TeV}$ での陽子・陽子衝突

2010年 LHC加速器稼動開始。

2011-12年 物理Run開始。7 - 8 TeV, 25 fb^{-1} のデータ取得。

2012年 LHC加速器のATLAS/CMS両実験がヒッグス粒子を発見。

2015-18年 13 TeVの重心系エネルギーでデータ取得。目標: 100 fb^{-1} 。

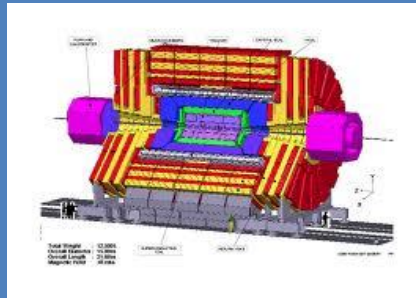
2023年 300 fb^{-1} のデータセット。

203X年 3000 fb^{-1} の大データセット。

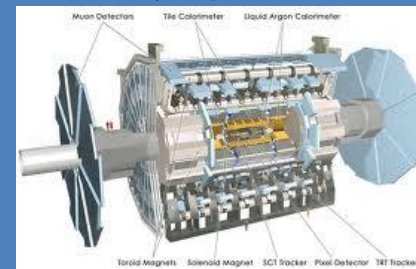


ジュネーブ市街

CMS実験



ATLAS実験

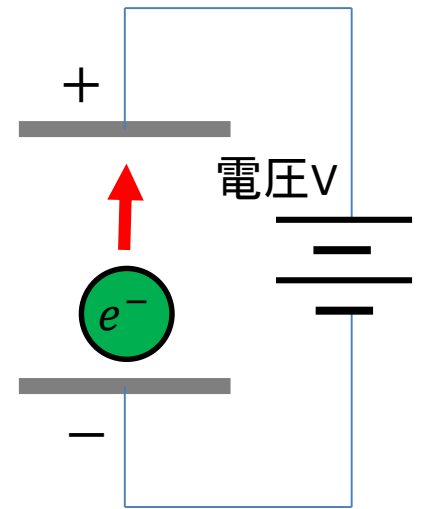


円周27km

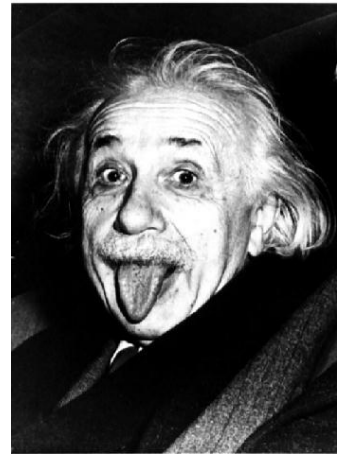
陽子を7 TeVまで加速して正面衝突

エネルギーと電場について

- 荷電粒子を電極間におくと:
⇒ 電場により加速される。
- 1Vの電圧で加速したときに粒子がもらうエネルギー:
 - 1 eV (エレクトロン・ボルト) $= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $E = Mc^2 \Rightarrow$ 質量の単位: eV/c^2
- LHCの陽子ビームのエネルギー:
 - 7 TeV ($= 7 \times 10^{12} \text{ eV}$)
- 1.5 Vの乾電池で加速しようとしたら...
 - 4.666×10^{12} 個の乾電池を直列。
 - 単1=6cm $\Rightarrow 2.8 \times 10^{11} \text{ m}$ の長さ。
 - 太陽と地球の距離(1.5×10^{11})の2倍!!



質量の単位

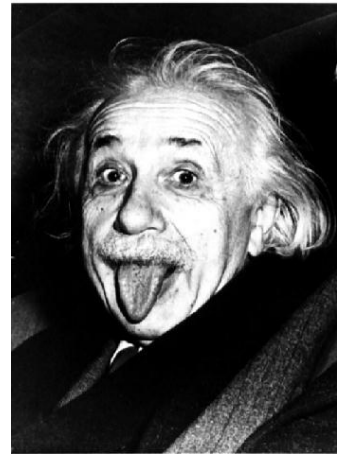


- $E_0 = Mc^2$ (相対性理論)
 - ← 質量はエネルギーである
 - ⇒ 質量は、 eV/c^2 の単位で測る。
 - "/ c^2 "を省略してしまっ、ただ eV とだけ表記すること多い。
- $1 \text{ eV}/c^2 = 1.782 \times 10^{-36} \text{ kg}$
- 電子の質量: $0.511 \text{ keV} = 0.511 \times 10^3 \text{ eV}$
- 陽子/水素原子の質量: $938 \text{ MeV} = 938 \times 10^6 \text{ eV}$
 - 陽子の質量エネルギーだけの運動エネルギーを得るためには乾電池を何m直列につなげればよいか? (乾電池一本の長さは6cm)

$938 \times 10^6 / 1.5 = 6.25 \times 10^8$ 個。

長さにすると37500 km ⇒ 地球一周ほどの長さが必要!!

質量の単位



- $E_0 = Mc^2$ (相対性理論)
 - ← 質量はエネルギーである
 - ⇒ 質量は、 eV/c^2 の単位で測る。
 - "/ c^2 "を省略してしまっ、ただ eV とだけ表記すること多い。
- $1 \text{ eV}/c^2 = 1.782 \times 10^{-36} \text{ kg}$

- 電子の質量: $0.511 \text{ keV} = 0.511 \times 10^3 \text{ eV}$

- 陽子/水素原子の質量: $938 \text{ MeV} = 938 \times 10^6 \text{ eV}$

– 陽子の質量エネルギーだけの
めには乾電池を何m直列に
池一本の長さは6cm)

質量エネルギーを運動エネルギーに変換できれば、物凄いエネルギーが取り出せる!!
⇒ 原子力発電・核融合

$938 \times 10^6 / 1.5 = 6.25 \times 10^8$ 個。

長さにすると37500 km ⇒ 地球一周ほどの長さが必要!!

素粒子の質量

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u 3 MeV	c 1.25 GeV	t 173.3 GeV
	d 5 MeV	s 100 MeV	b 4.2 GeV
レプトン	ν_e ~ 0	ν_μ ~ 0	ν_τ ~ 0
	e 0.511 MeV	μ 106 MeV	τ 1.77 GeV

ゲージ粒子

(強い力) g 0
(電磁力) γ 0
(弱い力) W Z 80.4 GeV 91.2 GeV

k	Kilo	10^3
M	Mega, Million	10^6
G	Giga, Billion	10^9
T	Tera	10^{12}

ヒッグス粒子

ヒッグス粒子 H 125 GeV

参考:

金原子核 183 GeV

キセノン原子核 122 GeV

周期表

1 1 IA New Original																	18 VIII	
1 H 水素 1.00794	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	2 He ヘリウム 4.002602	
3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012182											5 B ホウ素 10.811	6 C 炭素 12.0107	7 N 窒素 14.00674	8 O 酸素 15.9994	9 F フッ素 18.9984032	10 Ne ネオン 20.1797	
11 Na ナトリウム 22.989770	12 Mg マグネシウム 24.3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9 VIII	10	11 IB	12 IIB	13 Al アルミニウム 26.981538	14 Si 珪素 28.0855	15 P リン 30.973761	16 S 硫黄 32.066	17 Cl 塩素 35.453	18 Ar アルゴン 39.948	
19 K カリウム 39.0983	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.955910	22 Ti チタン 47.867	23 V バナジウム 50.9415	24 Cr クロム 51.9961	25 Mn マンガン 54.938049	26 Fe 鉄 55.8457	27 Co コバルト 58.933200	28 Ni ニッケル 58.6934	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.409	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.64	33 As ヒ素 74.92160	34 Se セレン 78.96	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.798	
37 Rb ルビジウム 85.4678	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.90585	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb ニオブ 92.90638	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム (98)	44 Ru ルテチウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.90550	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.8682	48 Cd カドミウム 112.411	49 In インジウム 114.818	50 Sn 錫 118.710	51 Sb アンチモン 121.760	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.90447	54 Xe キセノン 131.293	
55 Cs セシウム 132.90545	56 Ba バリウム 137.327	57 to 71		72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.9479	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.207	76 Os オスミウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.217	78 Pt プラチナ 195.078	79 Au 金 196.96657	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.3833	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 208.98038	84 Po ポロニウム (209)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)
87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89 to 103		104 Rf ラザホジウム (261)	105 Db ドブニウム (262)	106 Sg シーボーギウム (266)	107 Bh ボーリウム (269)	108 Hs ハッシウム (268)	109 Mt マイトリウム (271)	110 Ds ダウムス (272)	111 Rg レンドリウム (272)	112 Uub ウンウンビウム (285)	113 Uut ウンウントリウム (284)	114 Uuq ウンウンクワドニウム (289)	115 Uup ウンウンペンチウム (288)	116 Uuh ウンウンヘクシウム (292)	117 Uus ウンウンセプチウム (293)	

C

Br

H

Tc

固体

液体

気体

人工元素

Atomic masses in parentheses

ヒッグス粒子やトップクォークは、内部構造なしにこのくらい重い!!

Design Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com). <http://www.dayah.com/periodic/>

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

57 La ランタン 138.9055	58 Ce セリウム 140.116	59 Pr プラセオジム 140.90765	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユロピウム 151.964	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.92534	66 Dy ジスプロシウム 162.500	67 Ho ホルミウム 164.93032	68 Er エルビウム 167.259	69 Tm ツリウム 168.93421	70 Yb イットリウム 173.04	71 Lu ルテチウム 174.967
89 Ac アクチウム (227)	90 Th トリウム 232.0381	91 Pa プロトアクチウム 231.03588	92 U ウラン 238.02891	93 Np ネプツリウム (237)	94 Pu プルトニウム (244)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カリホルニウム (251)	99 Es アインシュタインウム (252)	100 Fm ファルミウム (257)	101 Md メンデルビウム (258)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (262)

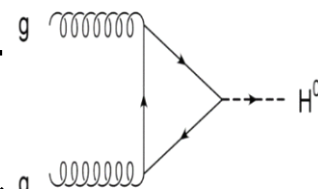
ヒッグス粒子を作るには、どのくらいの高エネルギー加速器が必要か？

• 特殊相対論: $E = Mc^2$ ($= \sqrt{(Mc^2)^2 + (pc)^2}$)

– 重い新粒子を発見するためには、高いエネルギーが必要 → 高エネルギー加速器

– $M = 125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子を生成するためには、2つのグルーオンのエネルギー和は125 GeV 以上が必要。

→ グルーオンのエネルギー $\geq 62.5 \text{ GeV}$



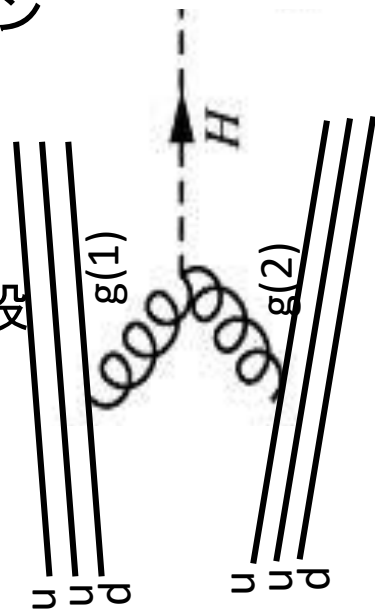
• LHC実験では、陽子・陽子衝突の際に、陽子から出てくるグルーオン同志を反応させてヒッグス粒子を生成している。

– 陽子の全エネルギーをグルーオンが使うわけでない。

→ 陽子のエネルギー $> \sim 600 \text{ GeV}$

もともと、ヒッグス質量が1000 GeVでも発見できるようにLHCは設計された → 陽子のエネルギー $> \sim 6000 \text{ GeV}$

→ LHCのデザイン・陽子エネルギー = 7000 GeV

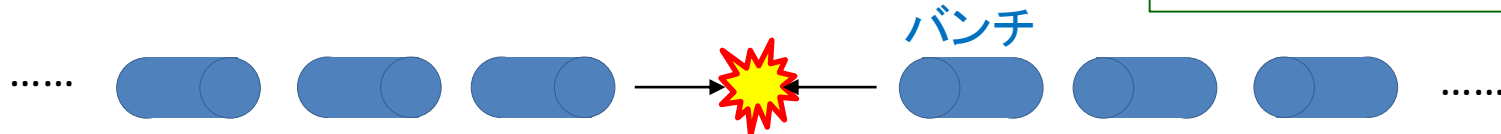


LHCの陽子ビームエネルギーを日常生活と比べる

- 7 TeV の陽子の速度 = $0.9999999991 \times$ 光速
- 現在のLHC加速器での陽子エネルギー = 6500 GeV = 6.5 TeV
 - 飛んでいる蚊のおよその運動エネルギー = 160 nJ = 1 TeV
 - 蚊の大きさ $\sim 1\text{ cm}$
 - 陽子の大きさ $\sim 1 \times 10^{-13}\text{ cm}$ (体積比 10^{-39})

- LHCでは陽子ビームはバンチ化している。

細い髪の毛の太さ $\sim 50\mu\text{m}$



- 衝突点でのバンチの大きさ: 半径 $16\mu\text{m}$ 、長さ 8cm
- バンチあたりに 1.1×10^{11} 個の陽子が入っている。
- バンチあたりのエネルギー:

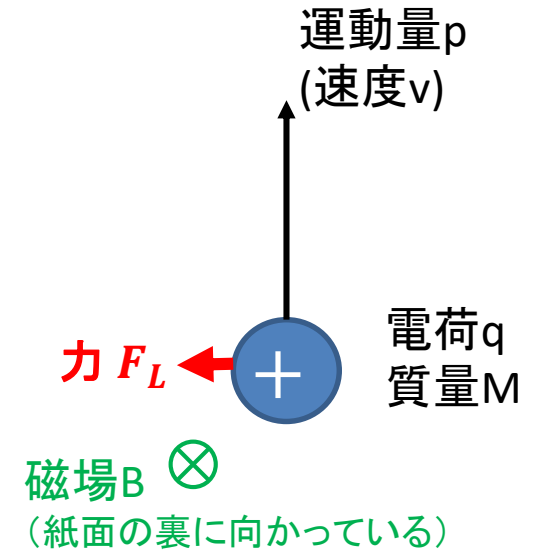
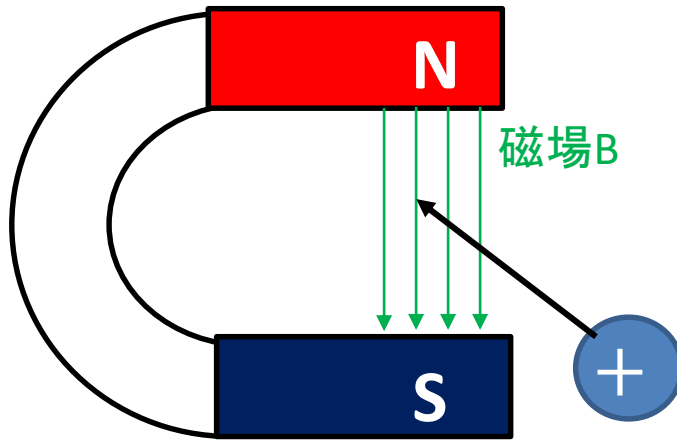
$$\begin{aligned} 7\text{ TeV} * 1.1 \times 10^{11} &= 7 \times 10^{12}\text{ eV} * 1.1 \times 10^{11} \\ &= 7 \times 10^{12} * 1.6 \times 10^{-19}\text{ [J]} * 1.1 \times 10^{11} = 9.2 \times 10^4\text{ [J]} \end{aligned}$$

- 100 km/hで走行する乗用車の運動エネルギー:

$$\frac{1}{2} \times 2000[\text{kg}] \times 100[\text{km/s}] = \frac{1}{2} \times 2000[\text{kg}] \times 27[\text{m/s}] = 7.3 \times 10^4\text{ [J]}$$

磁場中の粒子の運動

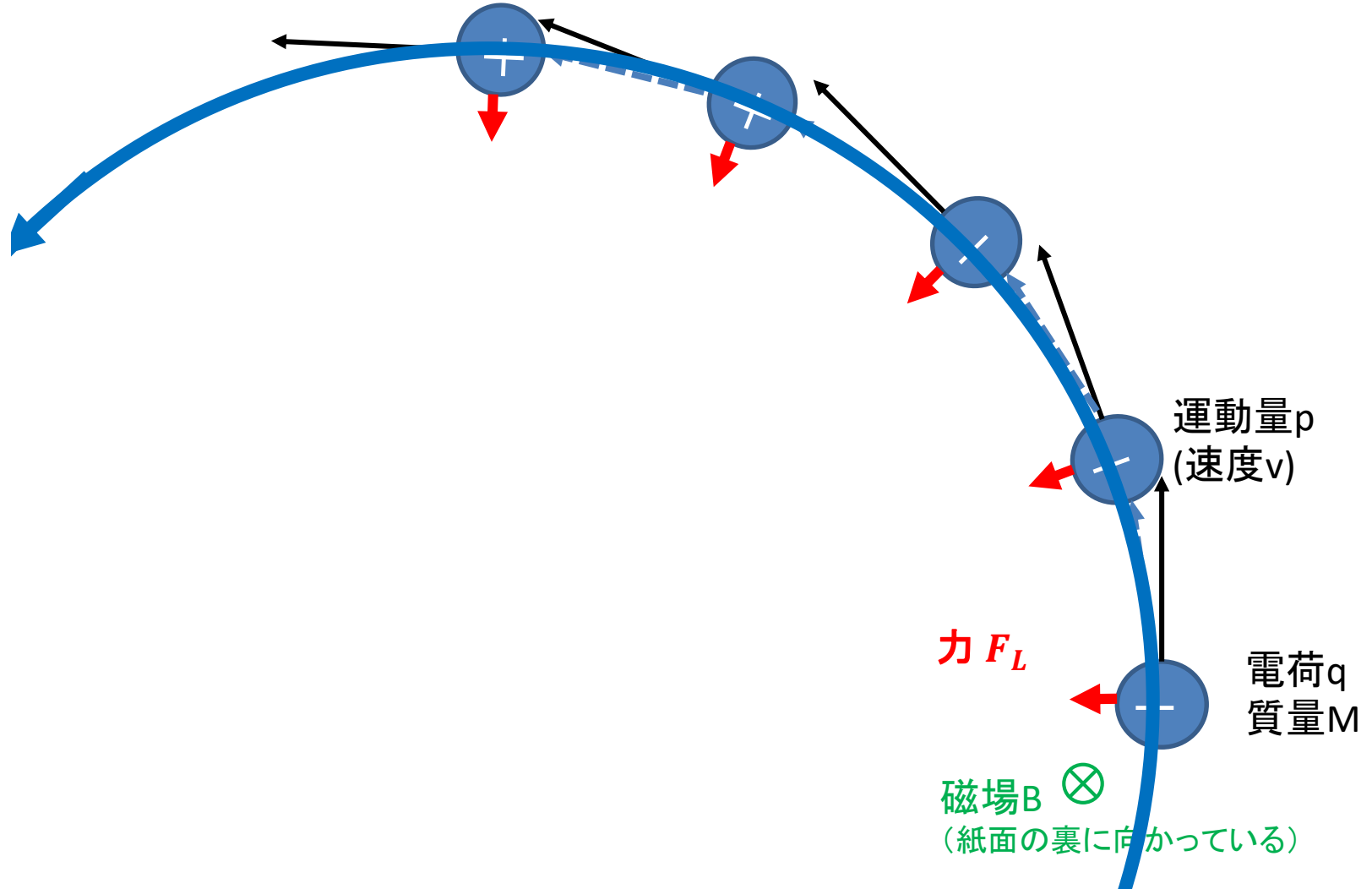
- 荷電粒子が磁場中を飛ぶことを考える。
- 上から見ると:



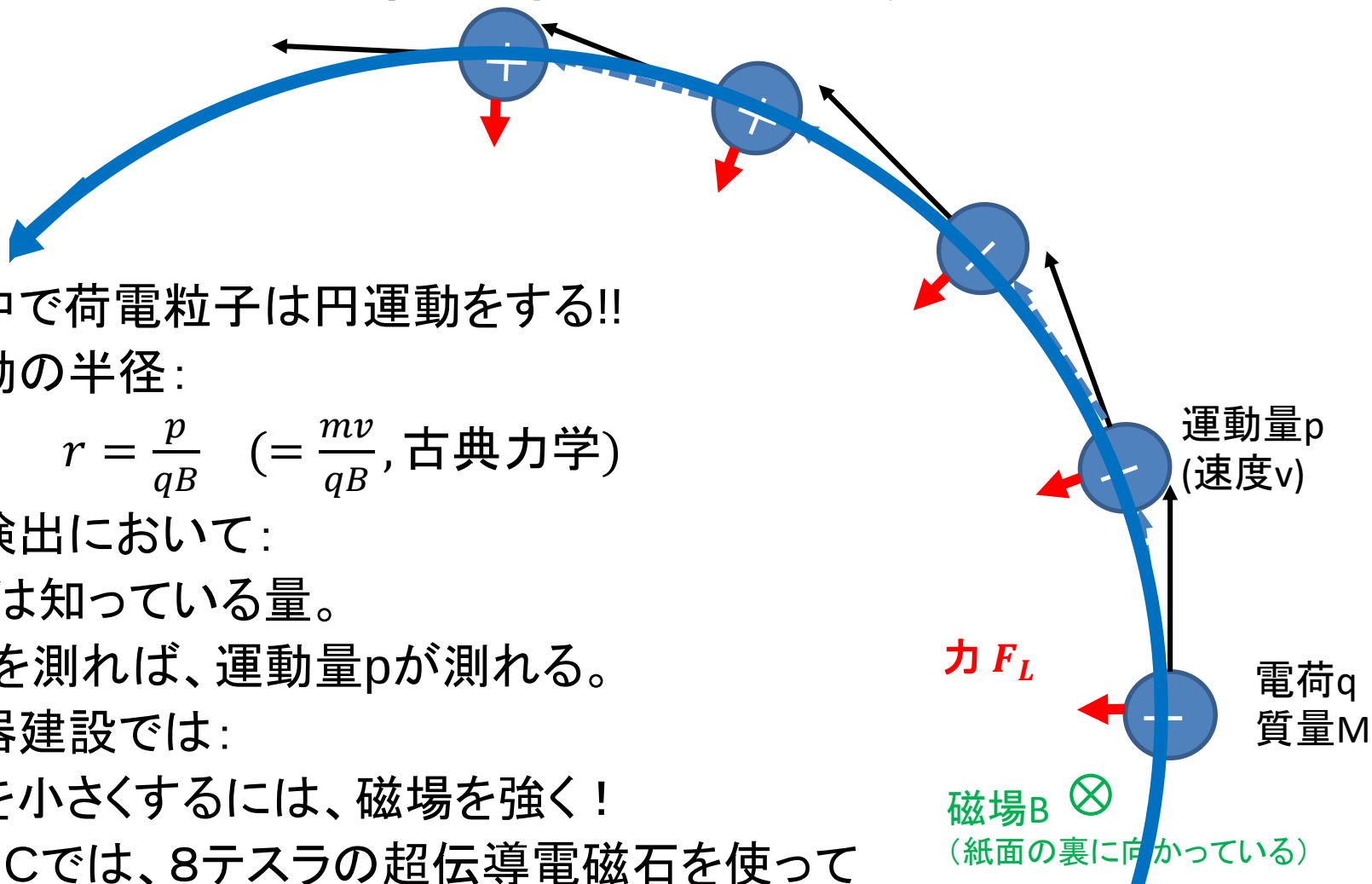
- 磁場中を飛ぶ荷電粒子には、磁場Bと運動量pの両方に垂直な方向に力が働く $\Rightarrow$ ローレンツ力。

$$F_L = q(v \times B)$$

磁場中の粒子の運動 2



磁場中の粒子の運動 3



- 磁場中で荷電粒子は円運動をする!!
- 円運動の半径:

$$r = \frac{p}{qB} \quad (= \frac{mv}{qB}, \text{古典力学})$$

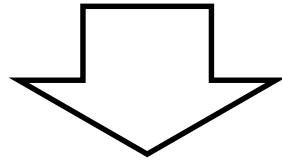
- 粒子検出において:
qとBは知っている量。
⇒ rを測れば、運動量pが測れる。
- 加速器建設では:
半径を小さくするには、磁場を強く!
– LHCでは、8テスラの超伝導電磁石を使っている。

(産業界最強級)
世界最強級

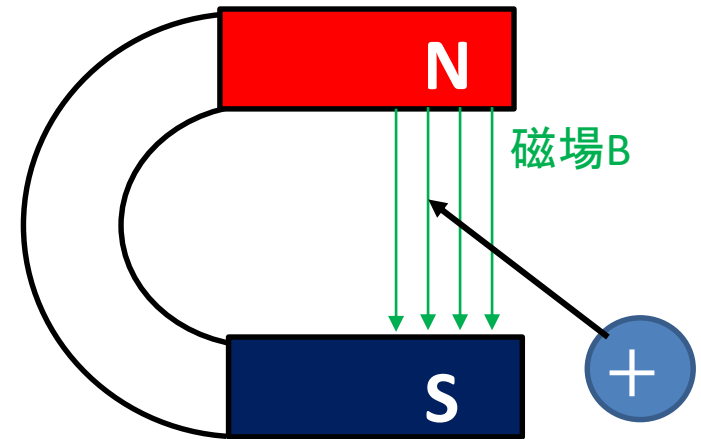
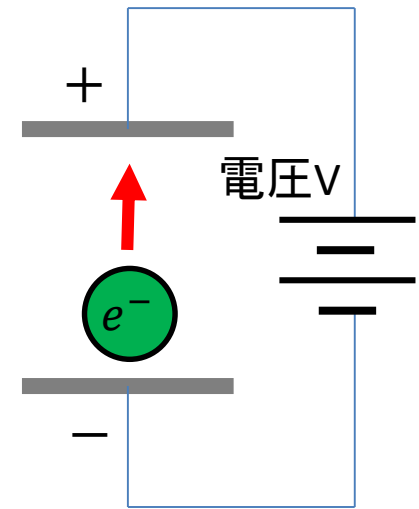
ピップエレキバン	0.08 テスラ
医療NMR	1テスラ
LHC	8テスラ

加速器の原理

- 電場中で荷電粒子は加速する。
 - かける電圧で加速具合を制御。
- 磁場中で荷電粒子は曲がる。
 - 磁場のかけ方で軌道半径を制御。

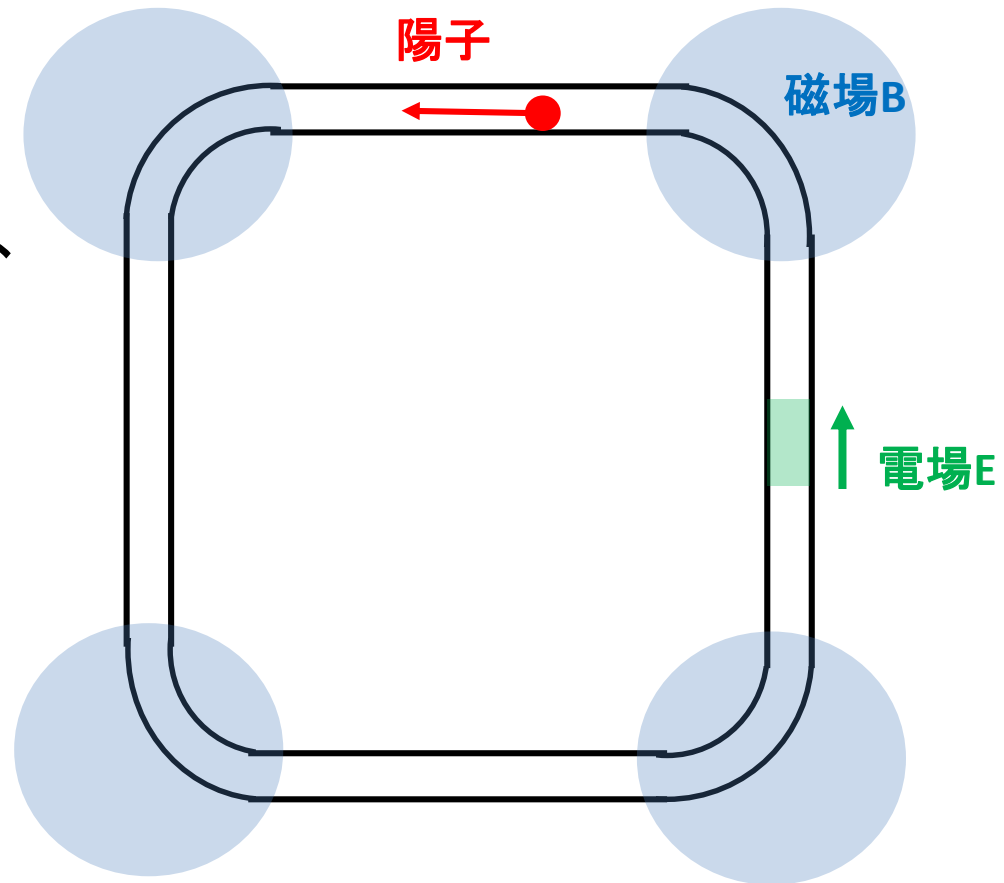


- これらを組み合わせて加速器は作る！



加速器の原理 2

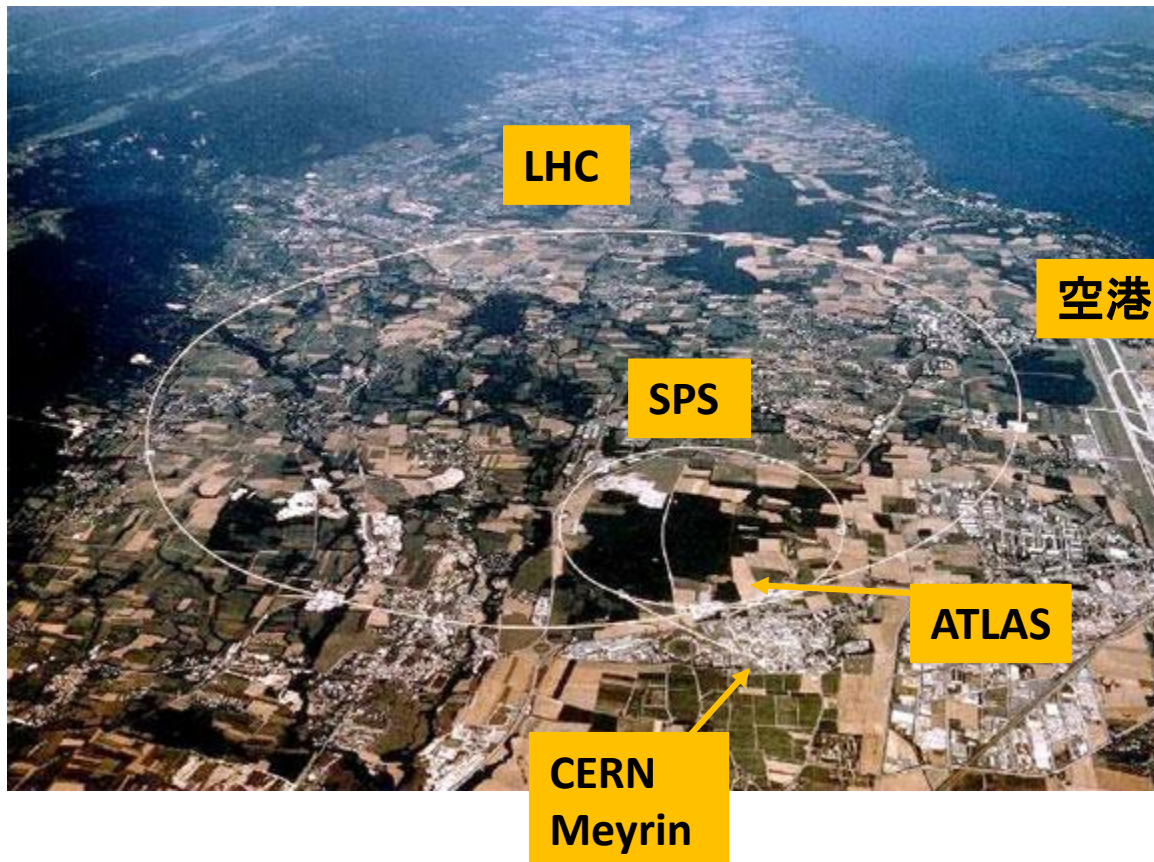
- 陽子は、電場を通るたびに加速される。
- さらに、磁場を通るたびに、軌道が曲がるから、加速器を周回する。
- グルグル回る間に何度も加速されて、高エネルギーまで加速することができる。



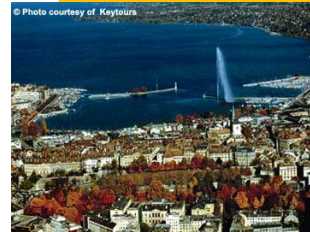
(もちろん、粒子が加速されるにつれて、磁場を強く調整しなくてはならない。)

LHC加速器

- 陽子・陽子衝突型加速器
- 重心系エネルギー： 現在8TeV、最終的には14TeV
- 周長 27km（～山手線一周：35km）
- 超伝導電磁石1700台（うち1232台が8テスラ・ダイポール）



ジュネーブ
市街



リラックス・タイム

- 加速器実験をしているといろんなことがあります。
- ちょっと物理の本質からはずれたところであった、面白い話について。

LEP実験

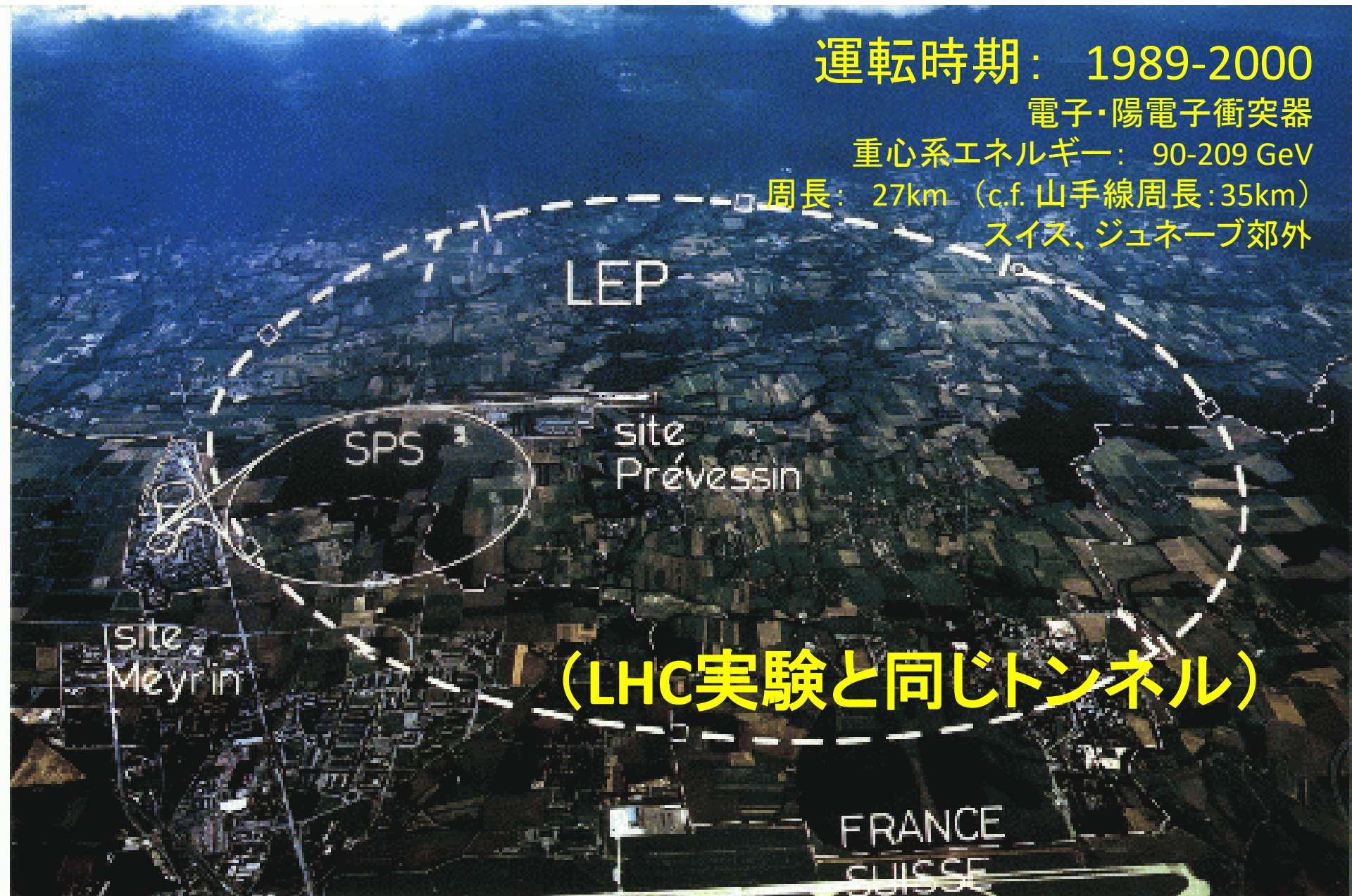
運転時期: 1989-2000

電子・陽電子衝突器

重心系エネルギー: 90-209 GeV

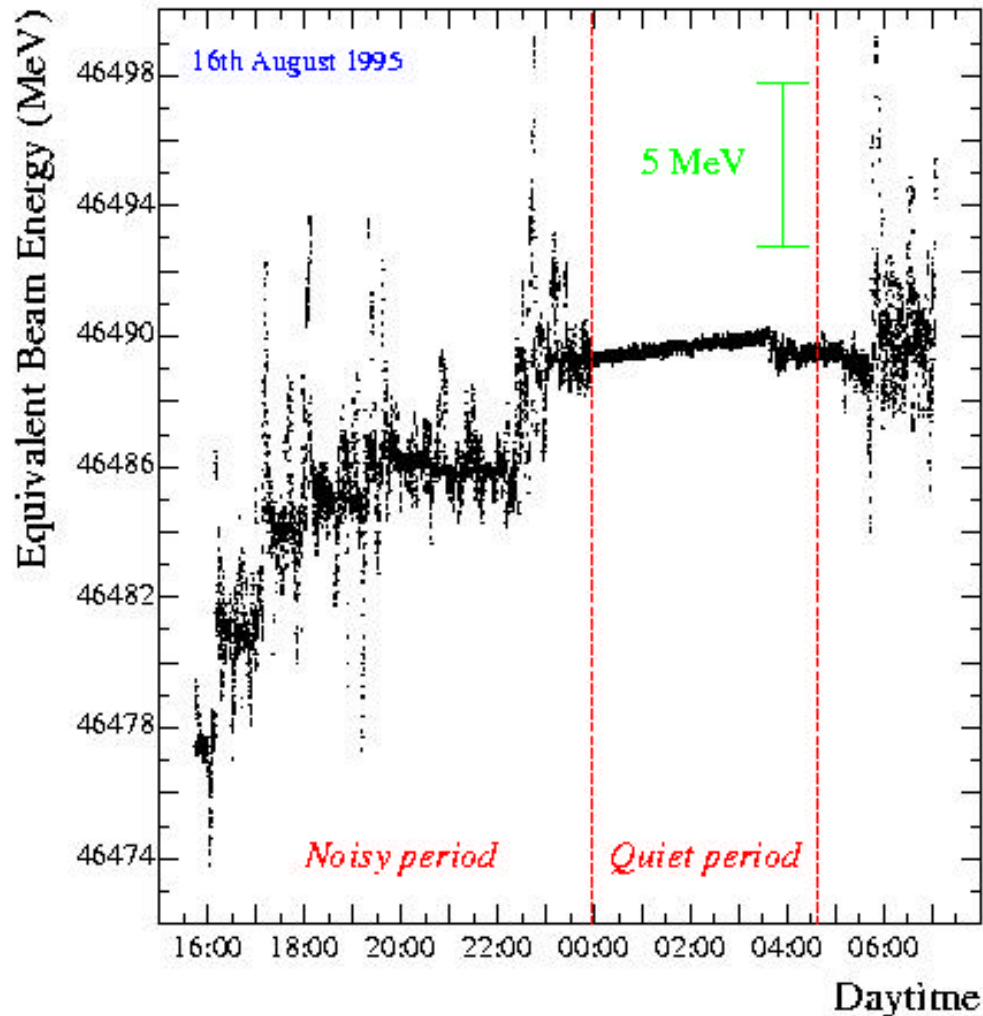
周長: 27km (c.f. 山手線周長: 35km)

スイス、ジュネーブ郊外



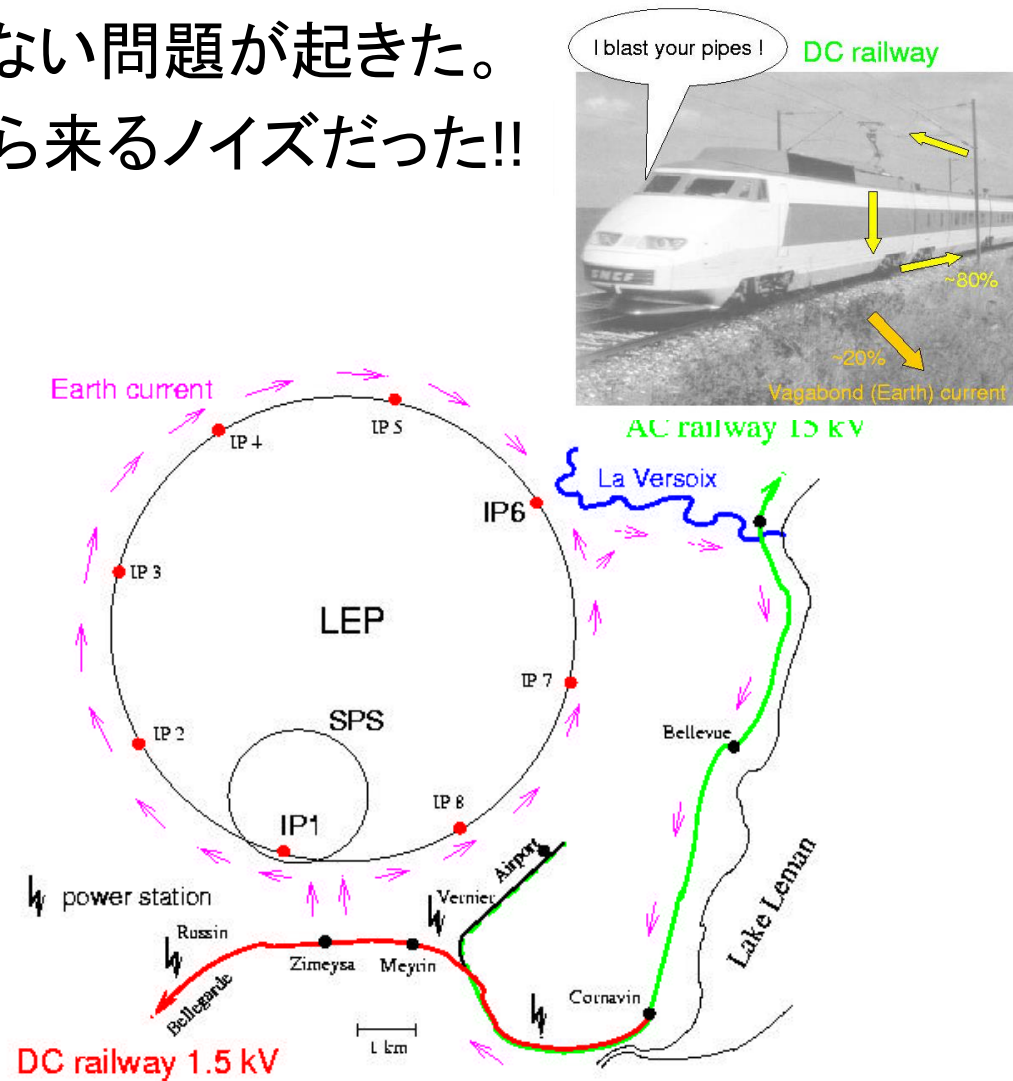
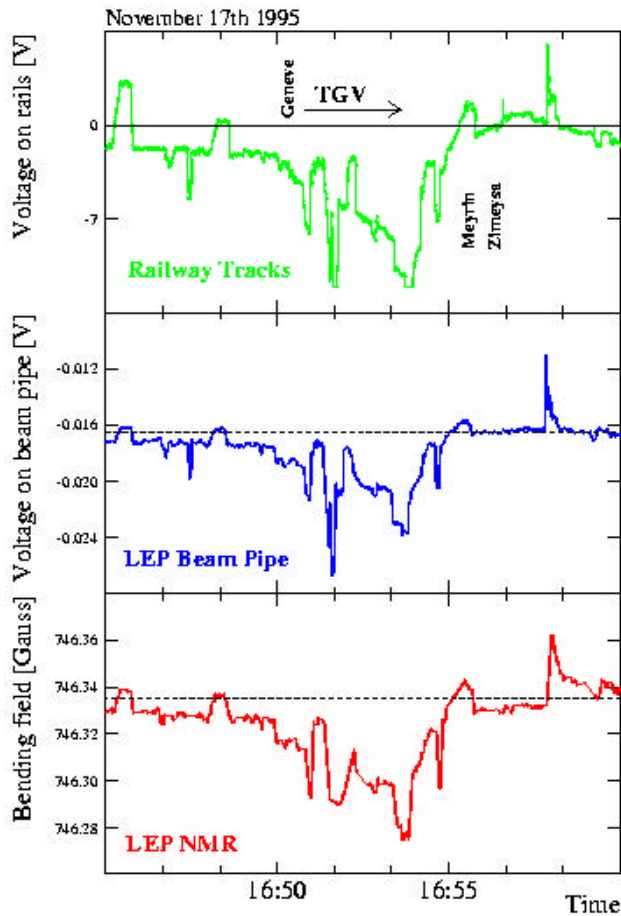
LEP実験、謎のノイズ

- ジュネーブ郊外、山手線くらいのサイズの超大型加速器
- 粒子エネルギーが安定しない問題が起きた。



LEP実験、謎のノイズ 2

- LEP実験＝ジュネーブ郊外、山手線サイズの超大型加速器
- 粒子エネルギーが安定しない問題が起きた。
- 原因は、新幹線の電流から来るノイズだった!!



TEVATRON加速器



運転時期： 1985-2011

陽子・反陽子衝突

重心系エネルギー： 1.8-1.96 TeV

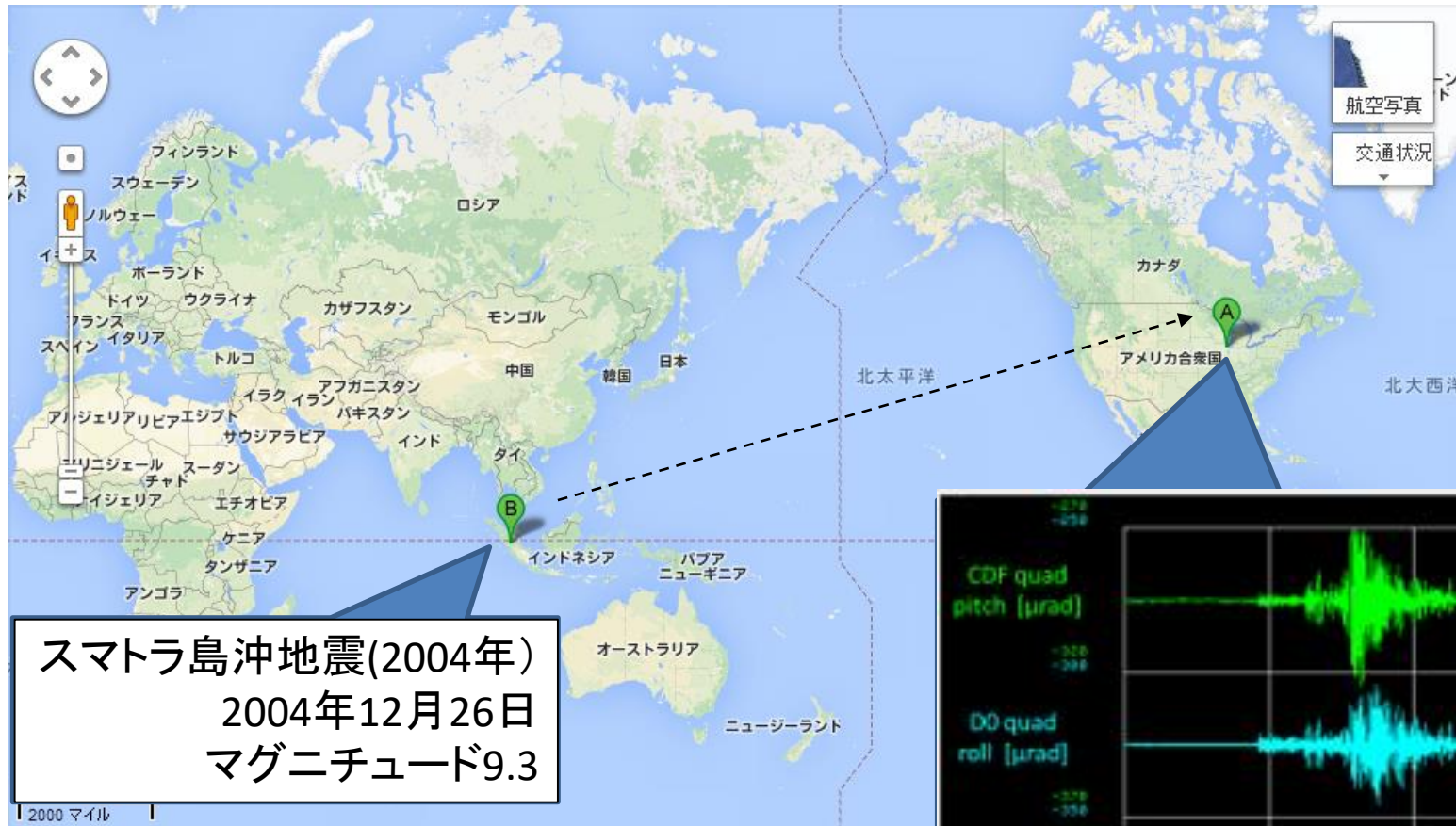
LHCの前のエネルギー・フロンティア実験

直径2km

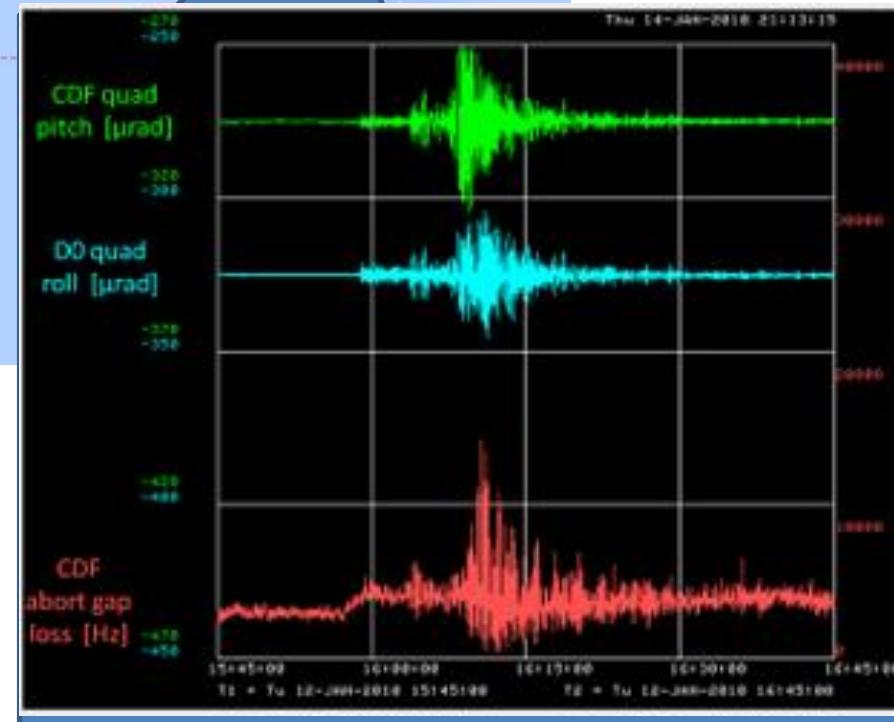
アメリカ、シカゴ郊外

1995年には、トップ・クォークを発見

テバトロンのあれこれ 4



- 加速器はマイクロメータの精度でビームを運転している。
- 地球の裏側の地震からくる、微弱な振動を感知。



LHC実験、稼働前夜

- ハリウッド映画「天使と悪魔」(2009年公開)がLHCを題材にし、CERN研究所でロケーションを行った。



LHC実験、稼働前夜

- ハリウッド映画「天使と悪魔」(2009年公開)がLHCを題材にし、CERN研究所でロケーションを行った。
- 映画は世界中で大ヒットしました。



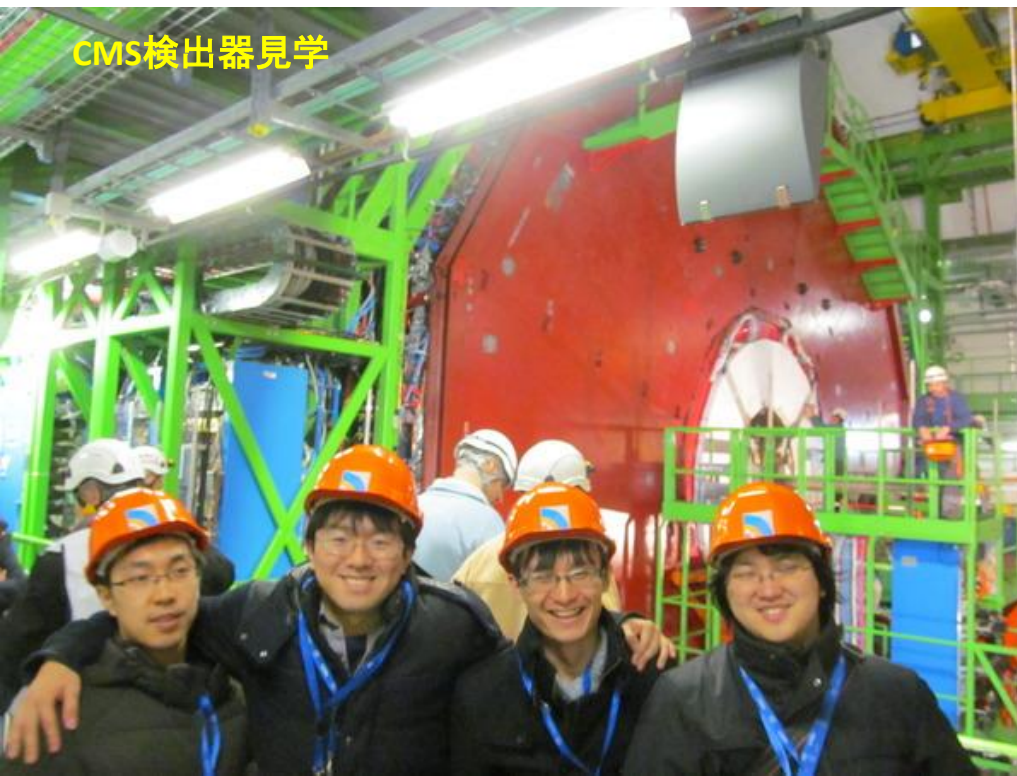
脱線おしまい

海外での研究 (スイス・ CERN)

- 博士課程学生はもちろん、修士課程でも海外で実験を行う機会もある。

旅費・滞在費は大学から支給

CMS検出器見学



CERNでのディスカッションの風景

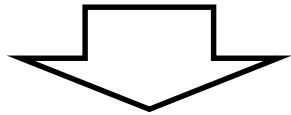


Mt. Blanc (4,810)



加速器実験で観測するもの

- 衝突の瞬間に何が起きたかは直接は観測できない。



- 衝突の後で出てきた粒子を観測・計測。



- どういう衝突が起きたかを再構成する。



ヒッグス粒子生成



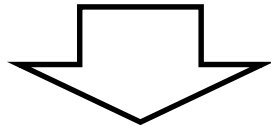
ヒッグス粒子崩壊



終状態粒子を観測

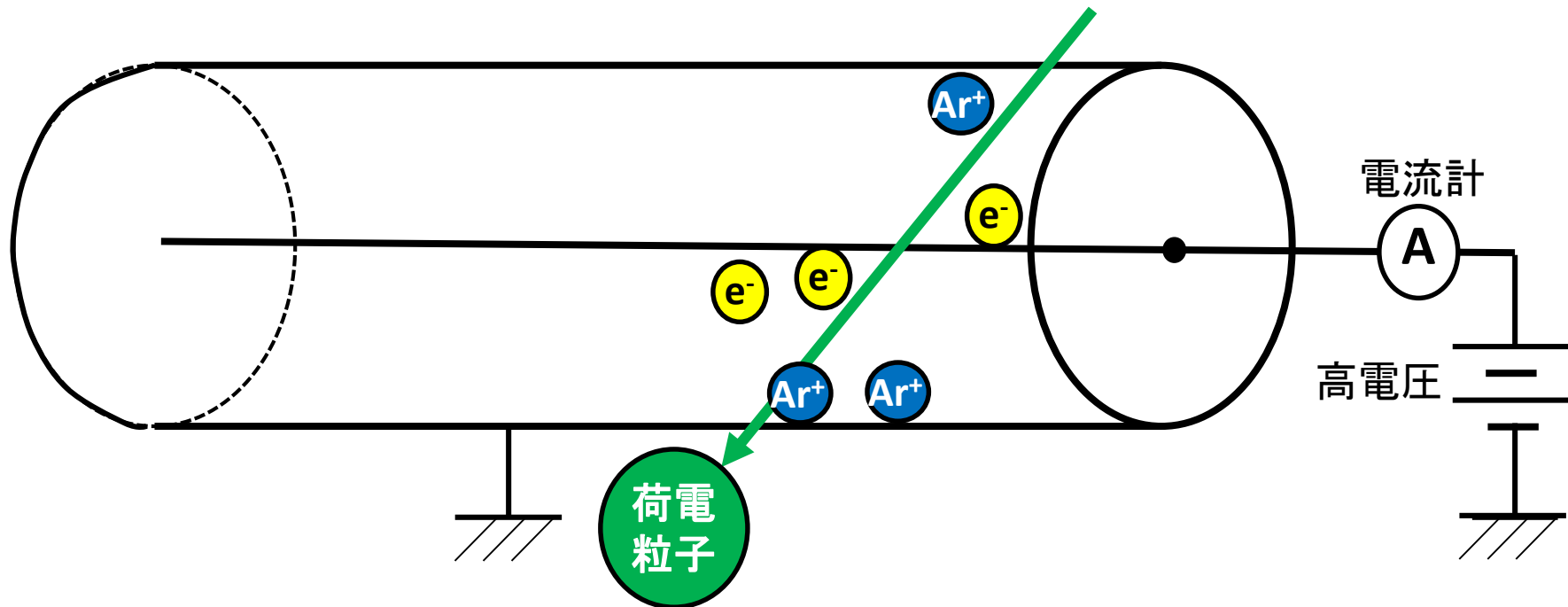
ガスチェンバーの原理

- 荷電粒子がArガスを封入した円筒内を通過すると...
- 粒子の通り道にあったAr分子がイオン化する。
- 電子はワイヤーに、イオンは側面に引き寄せられる。



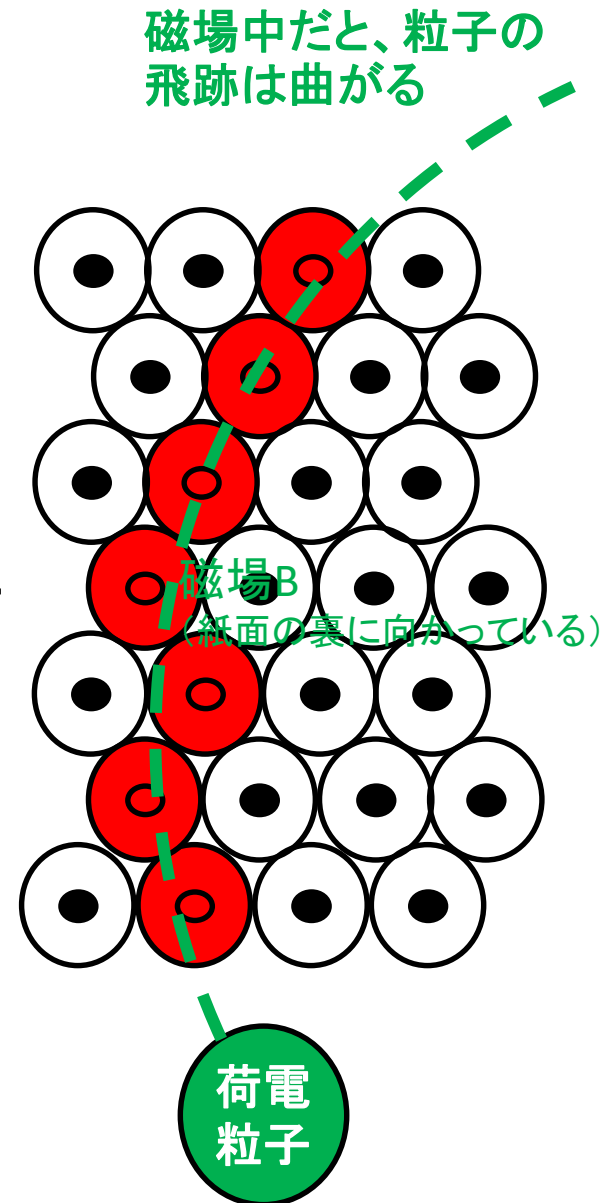
電流計に電流が流れることで、粒子が通したことがわかる

放射線計測に使うガイガーカウンターはこの原理で動作している。



ガスチェンバーでの粒子飛跡測定

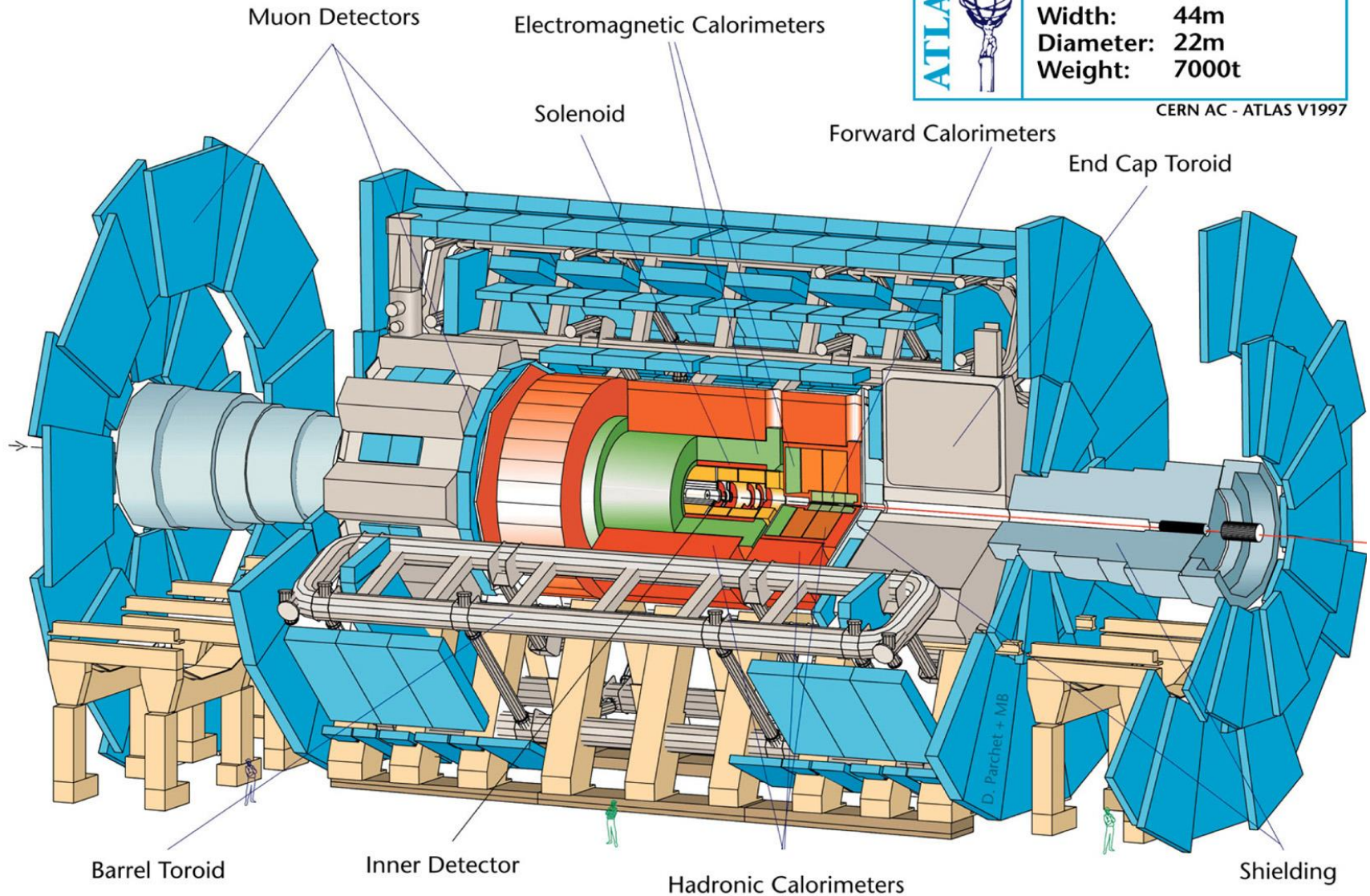
- ガスチェンバーを敷き詰めておく。
 - 粒子が通過したら...
- ↓
- 電流を生じたチェンバーをつなげれば、粒子の奇跡を再構成できる。
-
- 磁場中で運転すれば、秘跡の曲率半径を測定することで、粒子の**運動量を測定**できる。



ATLAS検出器

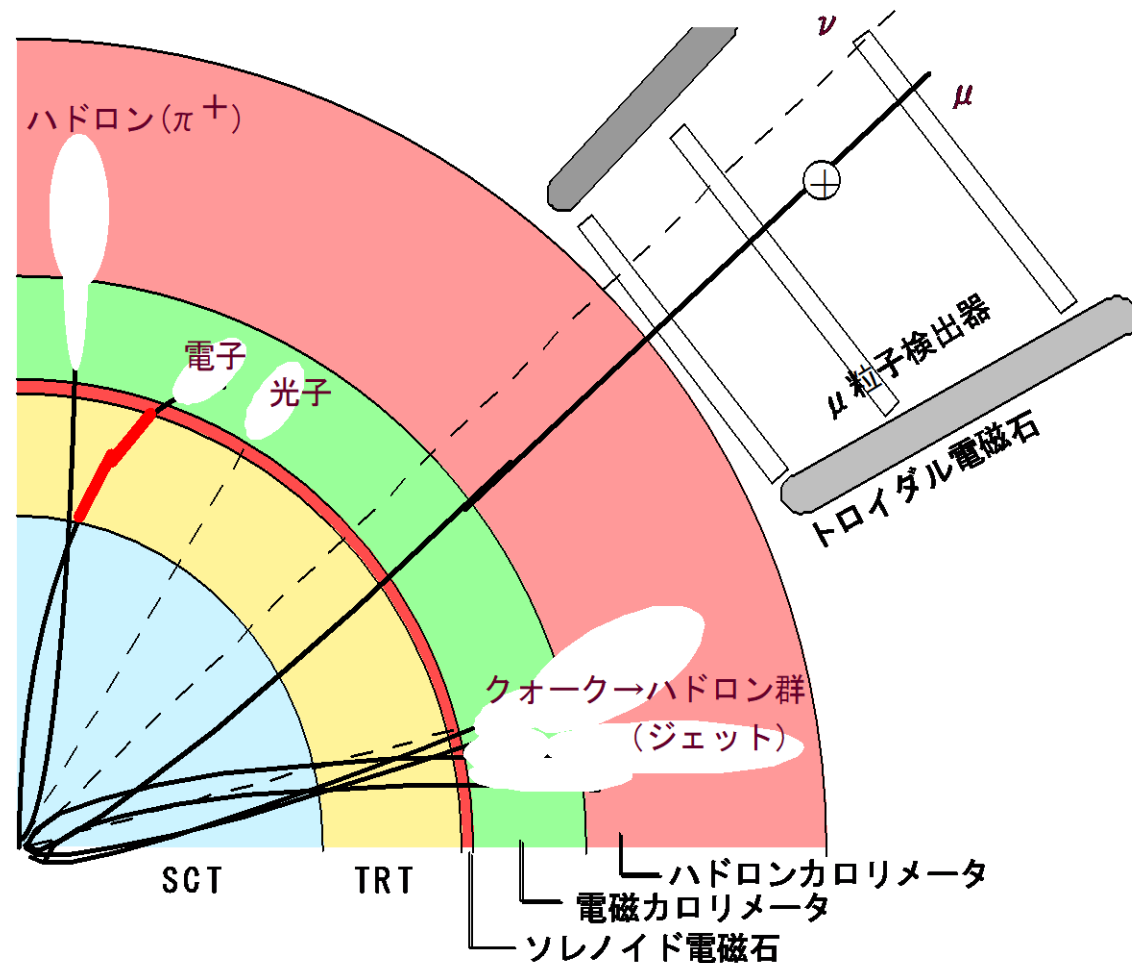
ATLAS		Detector characteristics	
		Width:	44m
		Diameter:	22m
		Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

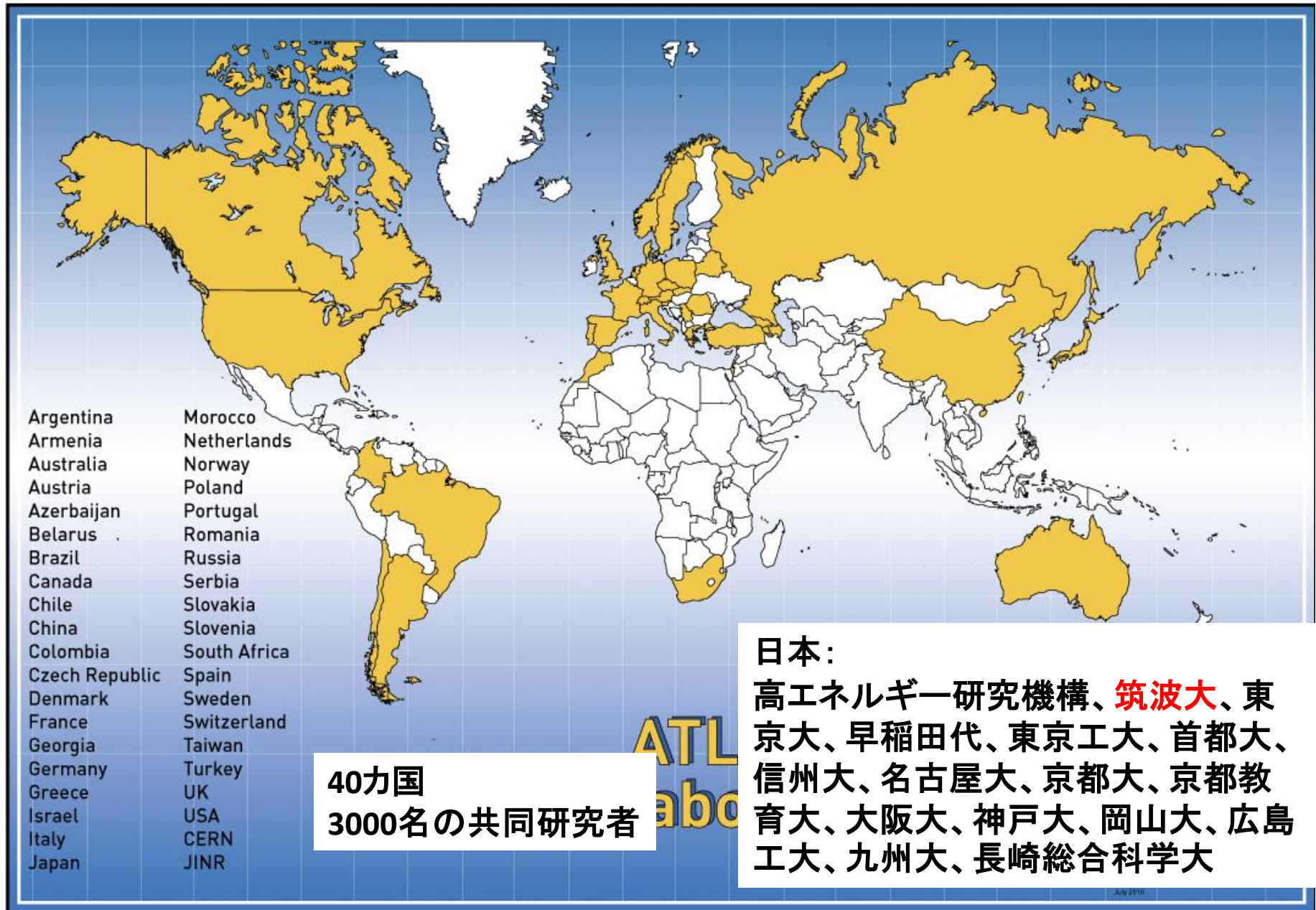


粒子の識別

- 飛跡検出による運動量測定、シンチレータによるエネルギー測定だけでなく、粒子の種類を識別することが非常に重要。
- ATLAS検出器内でどれだけ飛んで止まるか、で粒子の種類を識別する。
- 飛跡検出器での運動量測定用のソレノイド磁石のほかに、 μ 粒子の運動量測定のためにトロイダル磁石も設置されている。



ATLAS実験



ヒッグス粒子とはなにか？

標準理論の粒子発見の歴史

単一で存在
ハドロンを構成

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン	ν_e 電子	ν_μ ミューオン	ν_τ タウ

ゲージ粒子 力を媒介

グルーオン 強い力
光子 電磁力
Wボゾン Zボゾン 弱い力

ヒッグス場に伴う粒子



ヒッグス粒子とはどんなもの？

質量：力に対して加速されにくさ



- 会場(=真空)は人(=ヒッグス粒子)でいっぱいになっている。

ヒッグス粒子とはどんなもの？

質量：力に対して加速されにくさ



- 会場(=真空)は人(=ヒッグス粒子)でいっぱいになっている。
- スター(質量のある粒子)がくると人が集まり動きがゆっくりになる(質量を得る)。

ヒッグス粒子とはどんなもの？

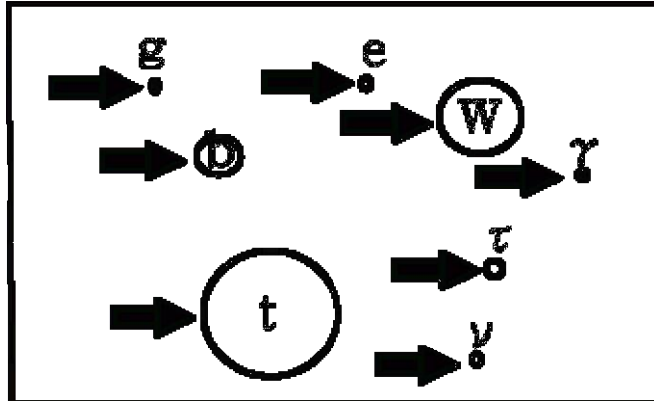
質量：力に対して加速されにくさ



- 会場(=真空)は人(=ヒッグス粒子)でいっぱいになっている。
- スター(質量のある粒子)がくると人が集まり動きがゆっくりになる(質量を得る)。
- ビッグスター(重い粒子)がくると多くの人が集まり動きはもっとゆっくりになる(より重い)。
- 質量とは、ここでいうスターの人気に相当。

ヒッグス粒子とはどんなもの？

ヒッグス粒子がなければ...



粒子は真空から力を受
けずに飛び回る。

宇宙のビッグバン直後はこうした
状況だったと考えられている。

現実には



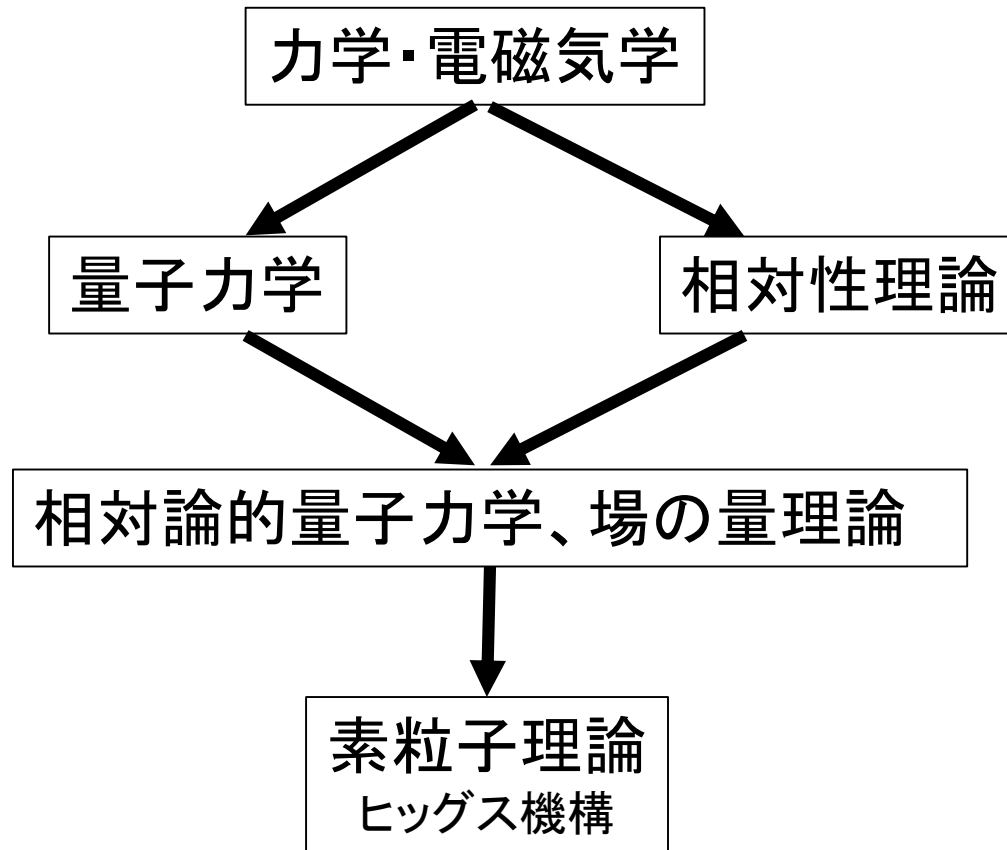
真空にはヒッグス場が
充満している。

粒子はヒッグス場(粒
子)とぶつかりながら飛
ぶので抵抗を受ける。

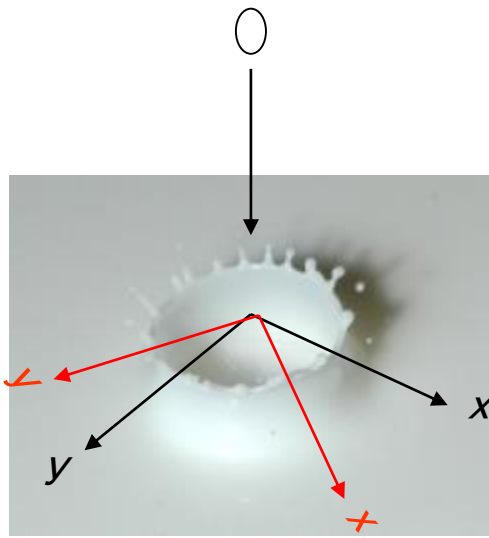
⇒ 質量を獲得

- 実はこの喩えは、少し正確さを欠く...
- 次ページ以降でもう少し頑張って説明を試みます。

ヒッグス粒子を本当に理解するには



- ヒッグス粒子の物理を正確に理解するには、大学・大学院で学ぶ物理学分野(とその使用する数学)の学習が不可欠...
- 大学でじっくり勉強しましょう！！



対称性とは

- たとえば、ミルクの液面に、ミルクを一滴垂らして、液面の波紋を観測する実験を考えてください。
 - ただし、温度・湿度・気圧・ミルクの質等の実験条件は完全に同じ条件で実験できるものとします。
 - 物理実験をするとき、実験結果は、
 - 実験する場所(つくばとジュネーブ)で変わらない
⇒空間対称性
 - 時間(今日と明日)で変わらない
⇒時間対称性
 - 座標を回転しても変わらない
⇒回転対称性
- ⇒ 物理法則は対称性を持っている!!

ゲージ対称性

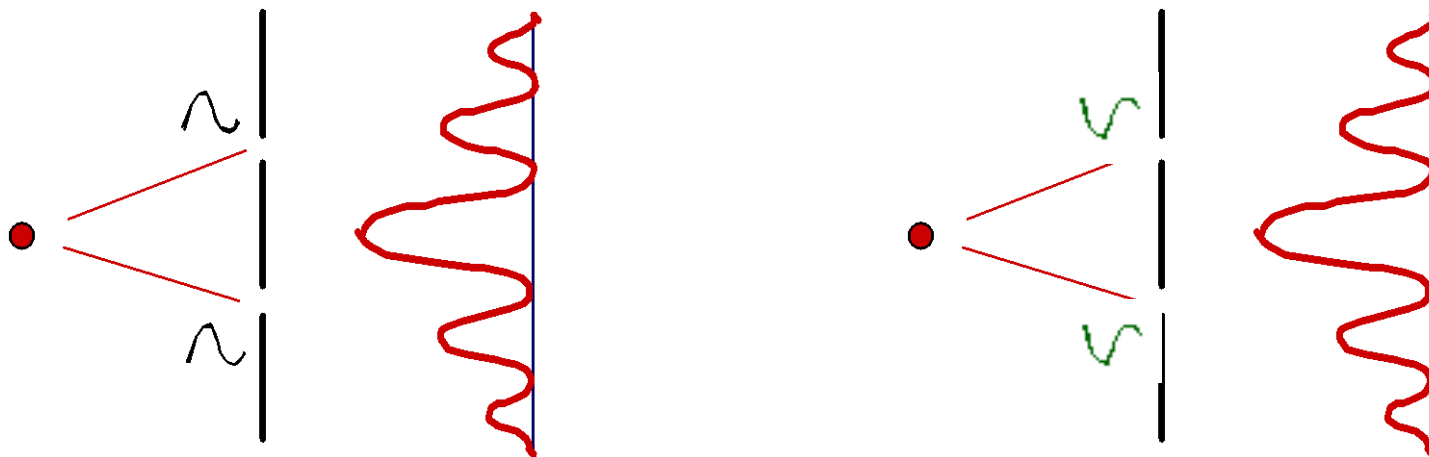
光の干渉のアナロジー

- われわれは光の強度を観測しているが、位相は観測できない。
- 入射波の位相を定数だけ変えても観測される干渉縞は不変。



量子物理は、位相対称性を持っているべき!!

入射波: $\psi(x, t) = A \sin[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})] \rightarrow \psi(x, t) = A \sin[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) + \delta]$

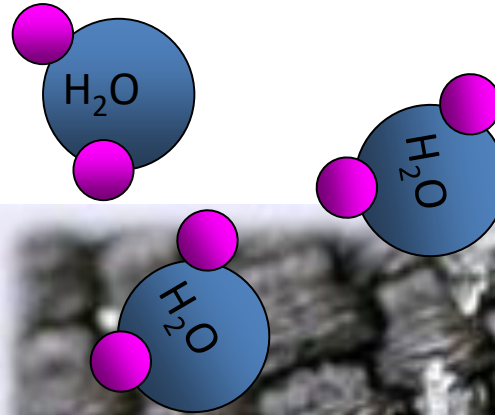


1960年代に入ると、弱い相互作用の素粒子理論が困難に直面
(ゲージ対称性を守る理論にできない←W/Z粒子の質量のせい)。

素粒子論では、大域的ゲージ対称性だけでなく、局所的対称性も仮定している。

自発的対称性の破れ

- もともと対称性があったのだが、相転移によって対称性が失われることがある。
- 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。
- 結晶化して氷になると、結晶の向きが生まれるために、回転対称性が失われる。
- 素粒子理論に自発的対称性の破れを取り入れ、問題を解決することを提唱。



南部陽一郎

ヒッグス機構

ヒッグスポテンシャル

- $V(\phi) = \mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4 \quad (\lambda > 0)$

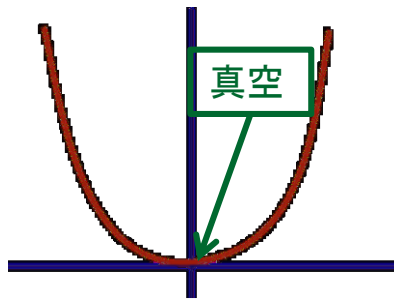
ヒッグス場

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}$$



ビッグバン直後 $\mu^2 > 0$

ヒッグスポテンシャル

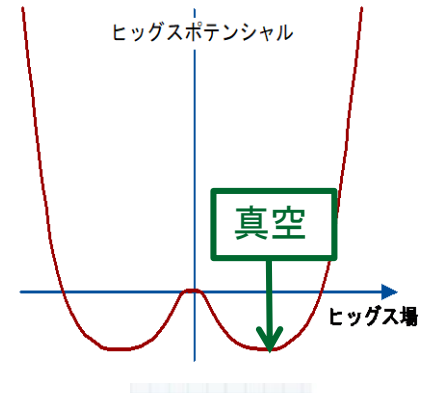


自発的対象性の破れ
(真空の相転移)

現在 $\mu^2 < 0$

ピーター・ヒッグス

ヒッグスポテンシャル

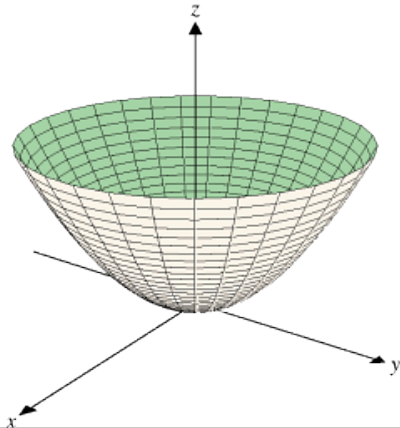


ヒッグス機構

ヒッグスポテンシャル

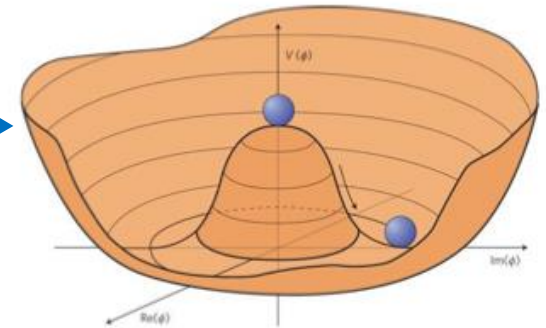
- $V(\phi) = \mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4 \quad (\lambda > 0)$

ビッグバン直後 $\mu^2 > 0$



自発的対象性の破れ
(真空の相転移)

現在 $\mu^2 < 0$



W^1	W^2	W^3	B
$m=0$	$m=0$	$m=0$	$m=0$

W^+	W^-	Z^0	γ
m_W	m_W	m_Z	$m=0$

ヒッグス場 $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$

H	m_H
-----	-------

4自由度

4つの質量に化けた



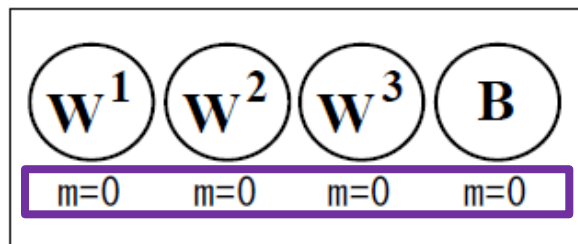
ピーター・ヒッグス

ヒッグス機構の意義

1968 Glashow-Weinberg-Salam理論



- ゲージ対称な理論の完成。
- 電磁と弱い相互作用を統一的に記述する理論。
- ヒッグス粒子の存在を予言。



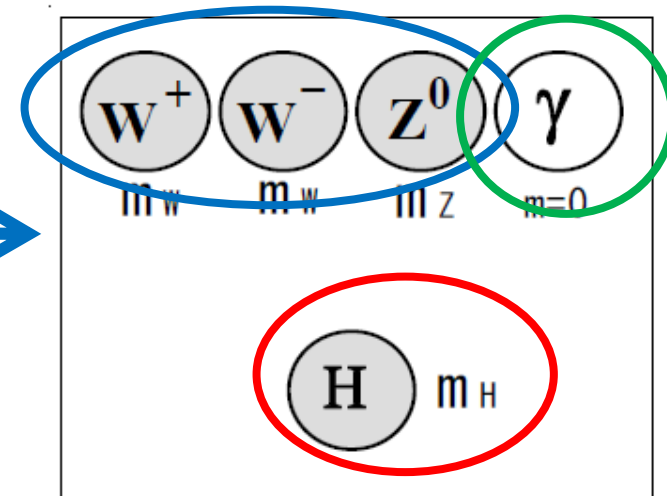
自発的対象性の破れ
(真空の相転移)

ヒッグス場 $\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}$

Φ_1, Φ_2 は複素数。

弱い作用

電磁相互作用



ヒッグス粒子の発見までの歴史

1960年代初頭 自発的対称性の破れ
(南部陽一郎)

1964年 ヒッグス機構 (Brout-Englert, Higgs)、ヒッグス粒子の存在を予言

1968年 電弱相互作用の統一理論
(Glashaw, Weinberg, Salam)、W,Z粒子の存在を予言

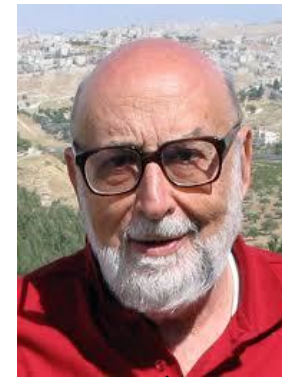
1983年 W,Z粒子の発見

2012年 ヒッグス粒子の発見

自然は物理学者たちが確信していた通りに美しい対称性をもつものだった。



南部陽一郎先生
2008年 ノーベル賞



アンダレール・ヒッグス
2013年 ノーベル賞

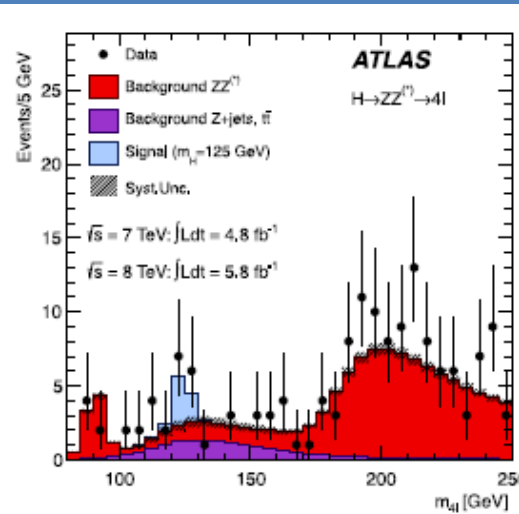
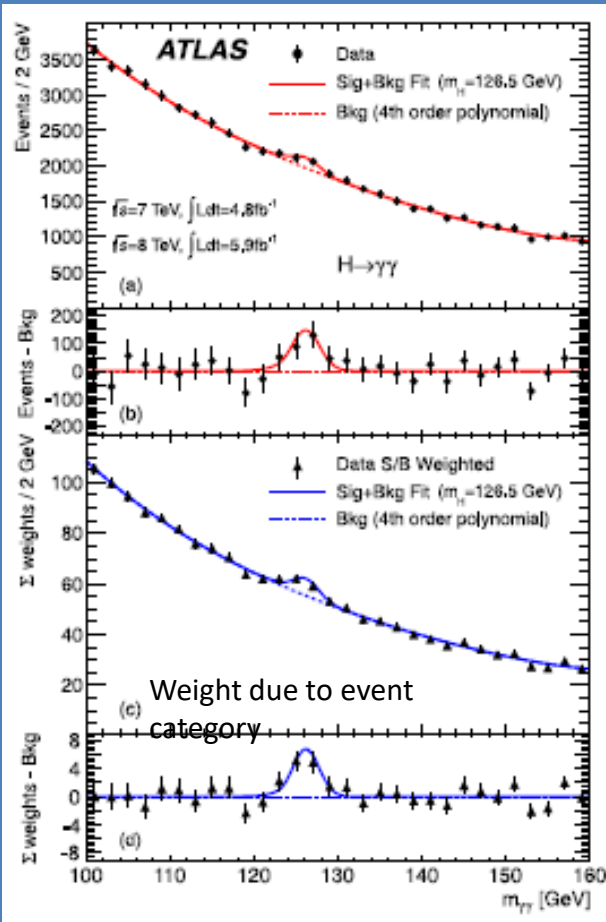


グラショー・ワインバーグ・サラム
1979年 ノーベル賞

LHCでのヒッグス粒子発見

- 2012年7月4日 CERNセミナーで発表

事象中のヒッグス粒子の質量を、相対性理論を利用して再構成した結果

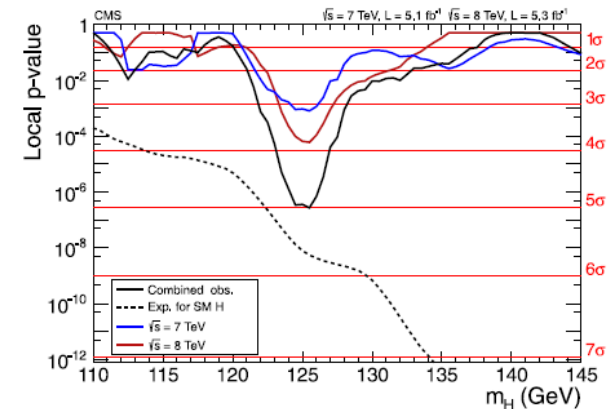
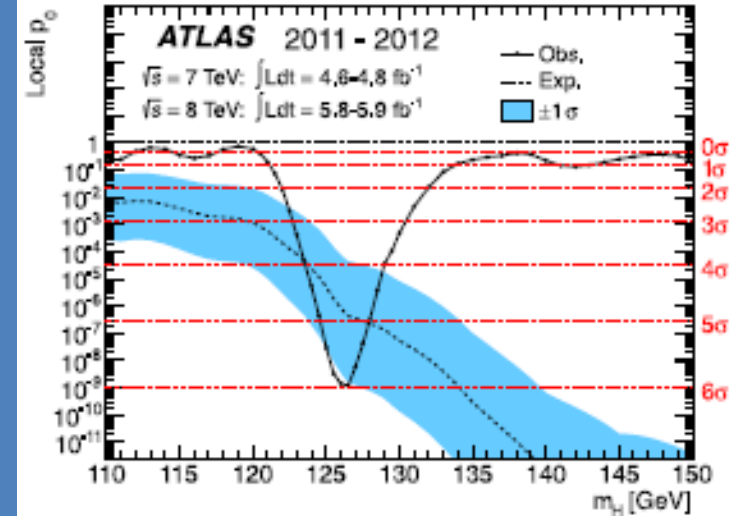


各実験単独で、同時に発見
ATLAS:

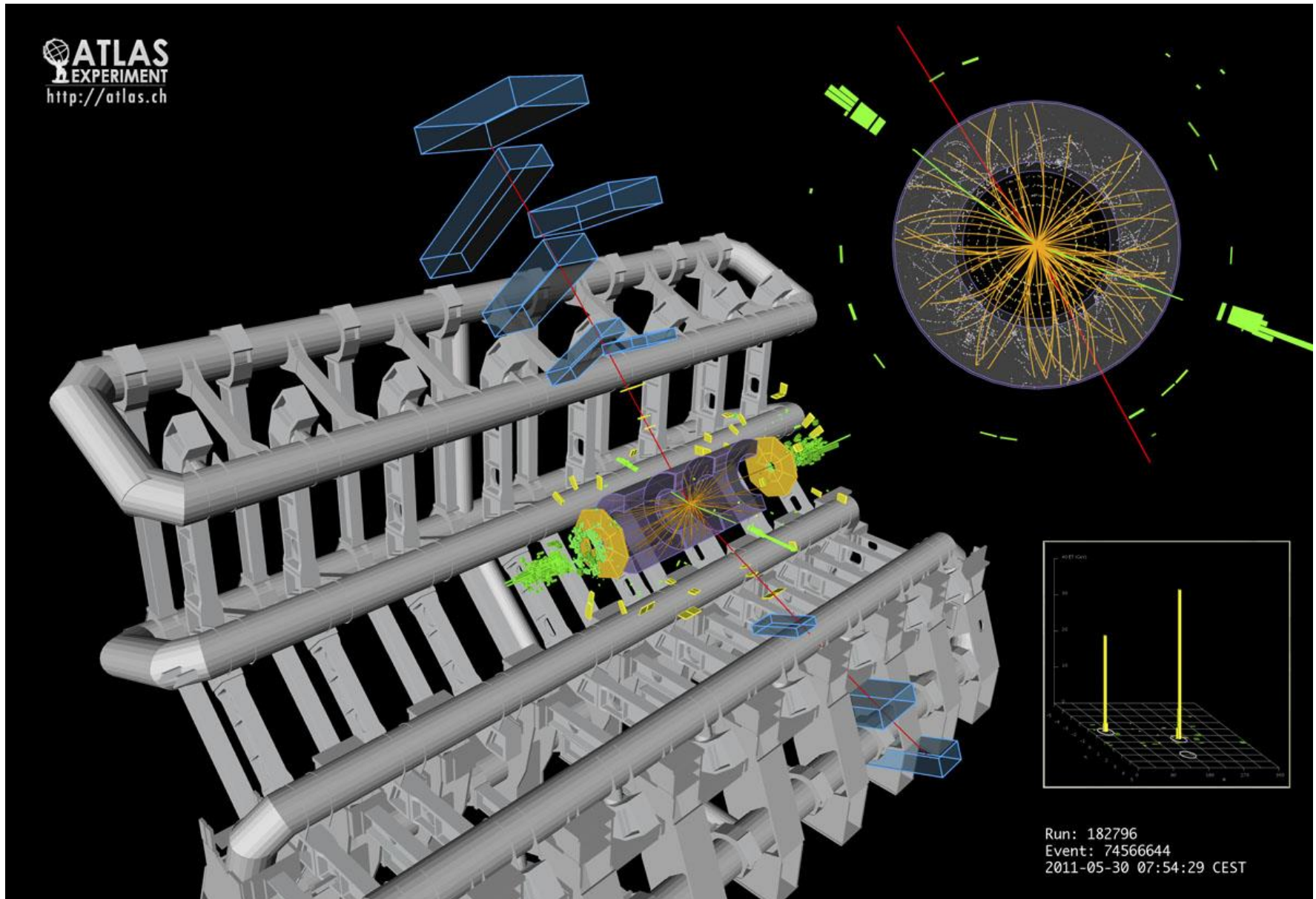
global 5.1σ , local 5.9σ .
 $m_H = 126.0 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$

CMS:

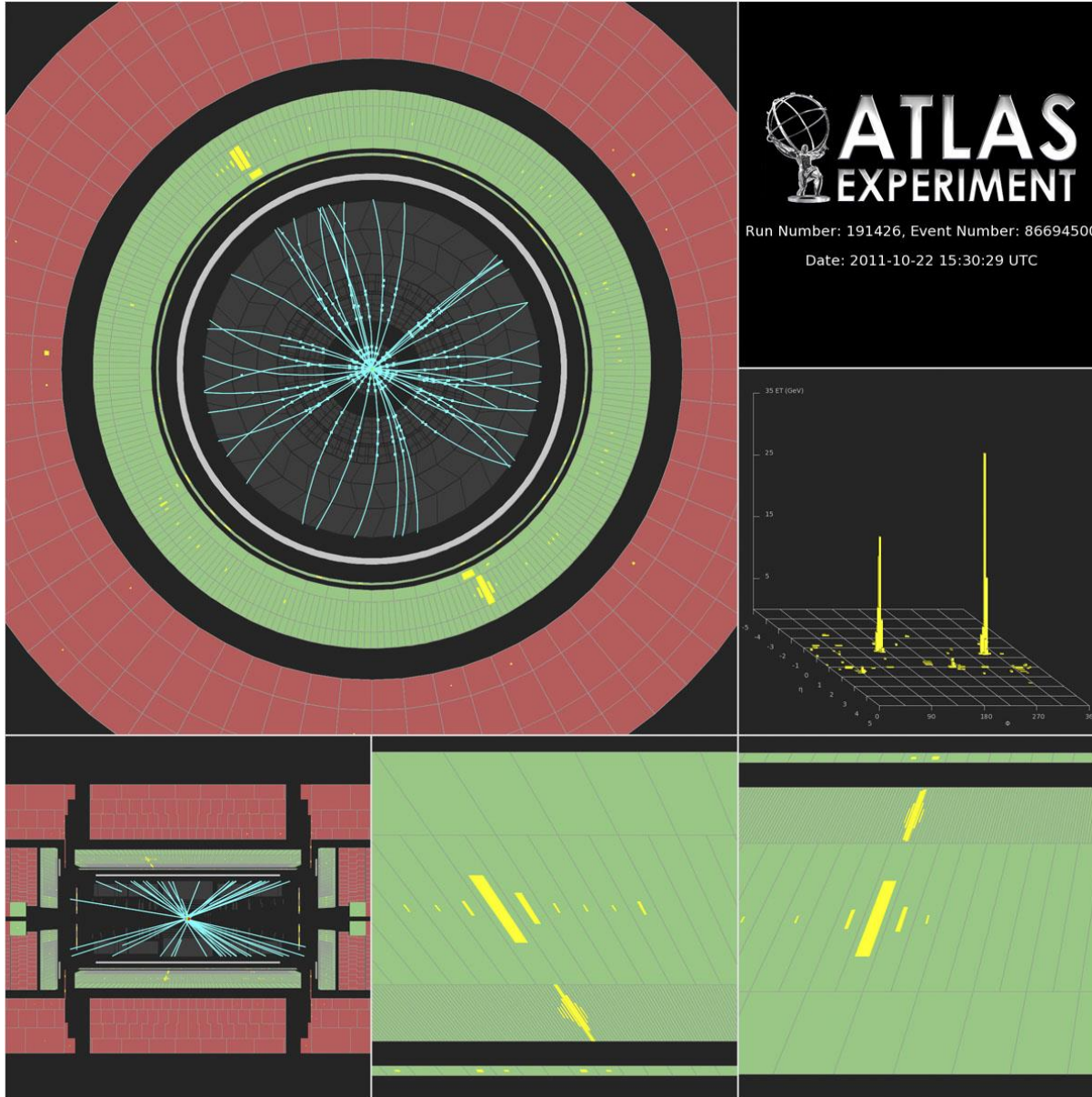
global 4.6σ , local 5.0σ .
 $m_H = 125.3 \pm 0.7 \text{ GeV}/c^2$



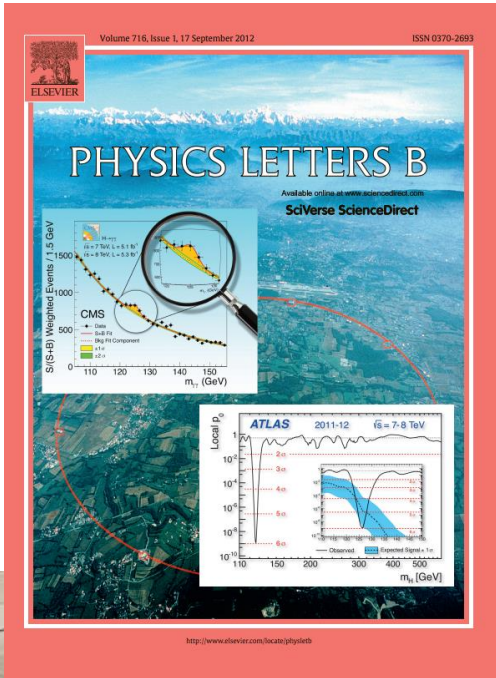
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ee\mu\mu$ candidate event



$H \rightarrow \gamma\gamma$ candidate event



ヒッグス粒子発見



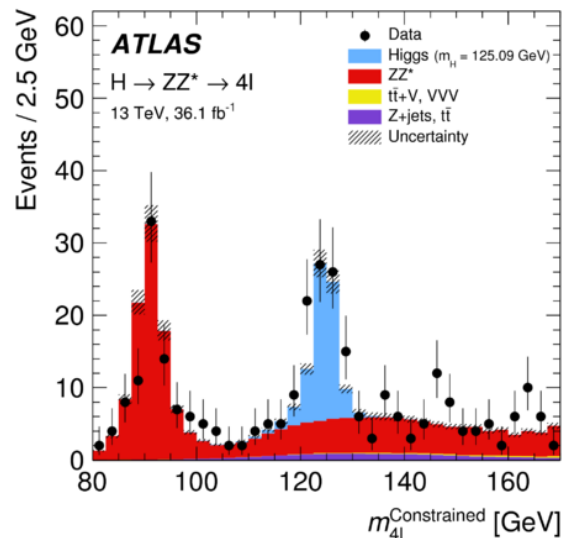
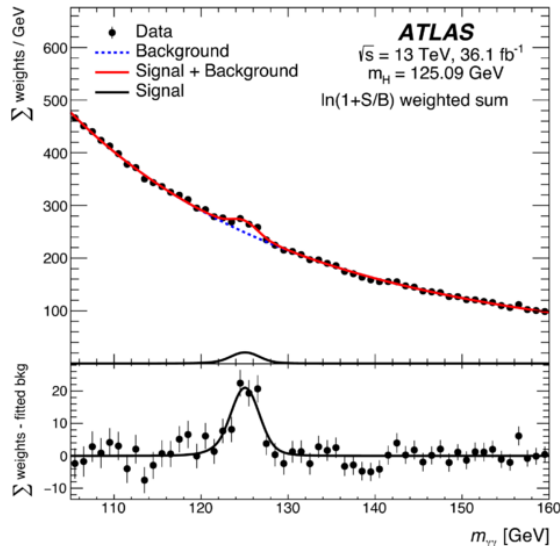
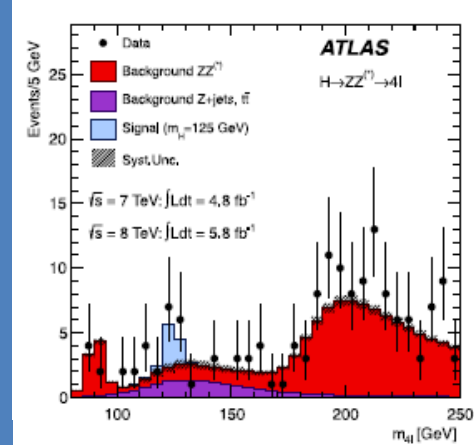
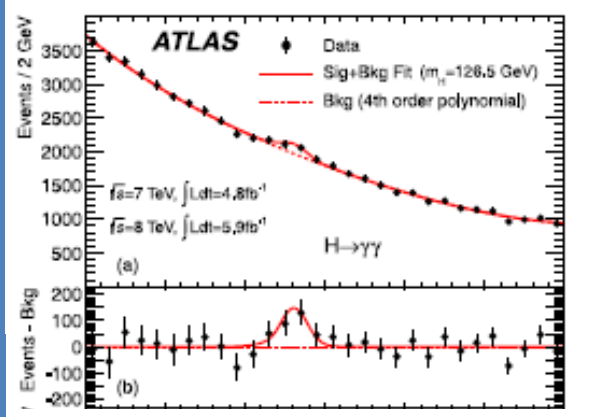
2012年7月4日 LHC加速器の
ATLAS/CMS両実験が発見を報告
2013年 アングラール、ヒッグス
がノーベル物理学賞を受賞

ヒッグス粒子・真空の構造に関する研究が始まった!



発見以後のヒッグス粒子測定の精度について

2012年夏の結果



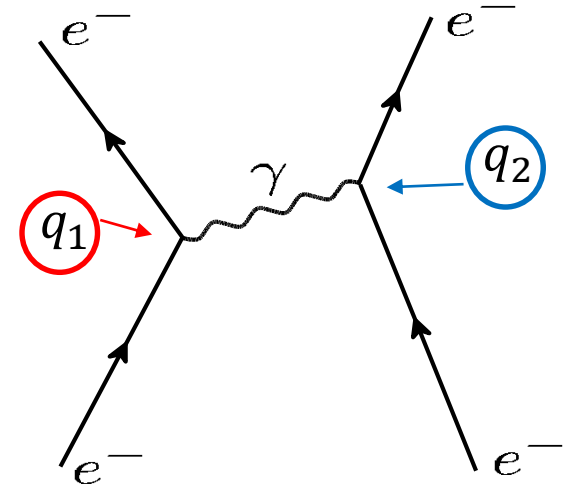
データが増え、解析手法も改善しているため、ヒッグス粒子のピークがよりハッキリ見える。

フェルミ粒子との結合の強さ

- クーロン力:

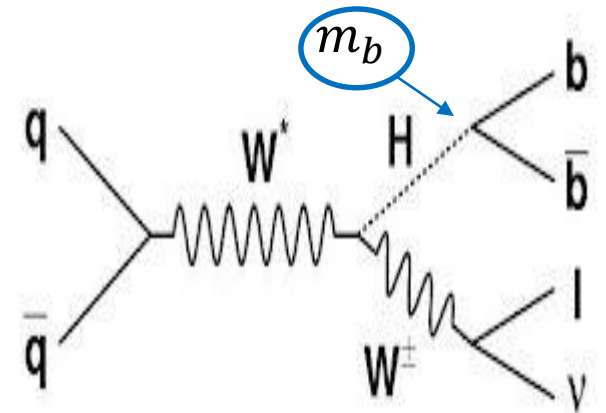
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

⇒光子と物質の相互作用の強さは、物質の電荷で決まる。

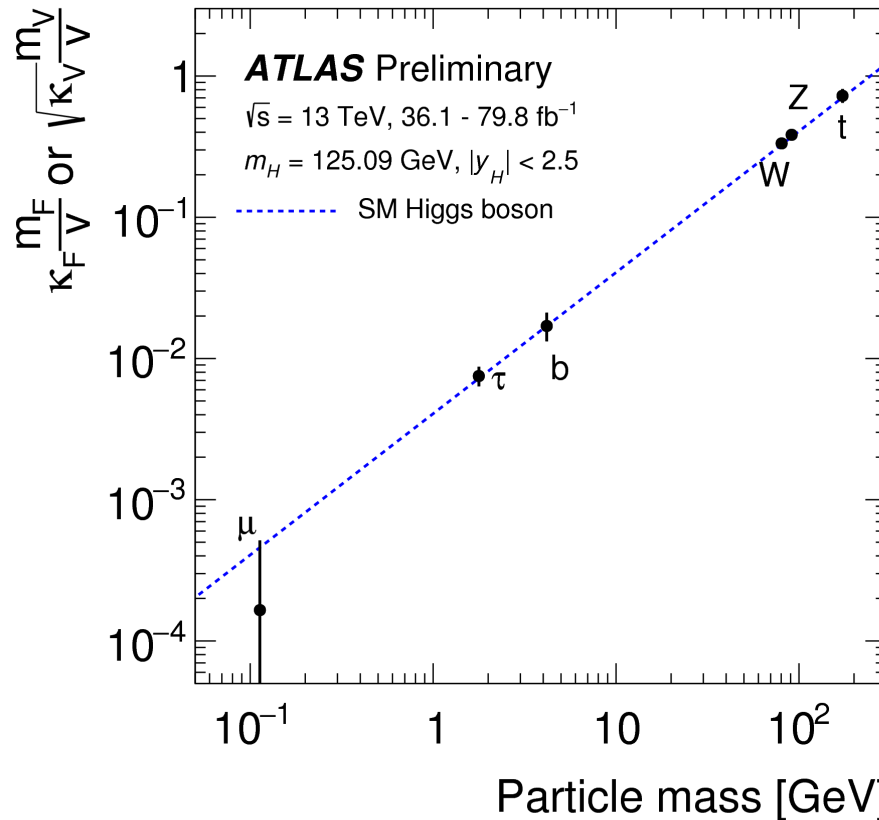


- ヒッグス粒子と物質粒子の相互作用:

- 強さは物質粒子の質量で決まる。
- (力を媒介する粒子はもう少し複雑)
- 相互作用の結合の強さを、「Yukawa結合」と呼んでいる。



Yukawa結合の測定



Top diagram: $g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$

Bottom diagram: $g_V = 2 \frac{m_V^2}{v}$

- いまのところ、標準理論と一致しているが、測定誤差が大きい。
- 今後、データを増やして精密測定していく。
 → 標準理論からずれていれば、新しい物理がそこにある!!

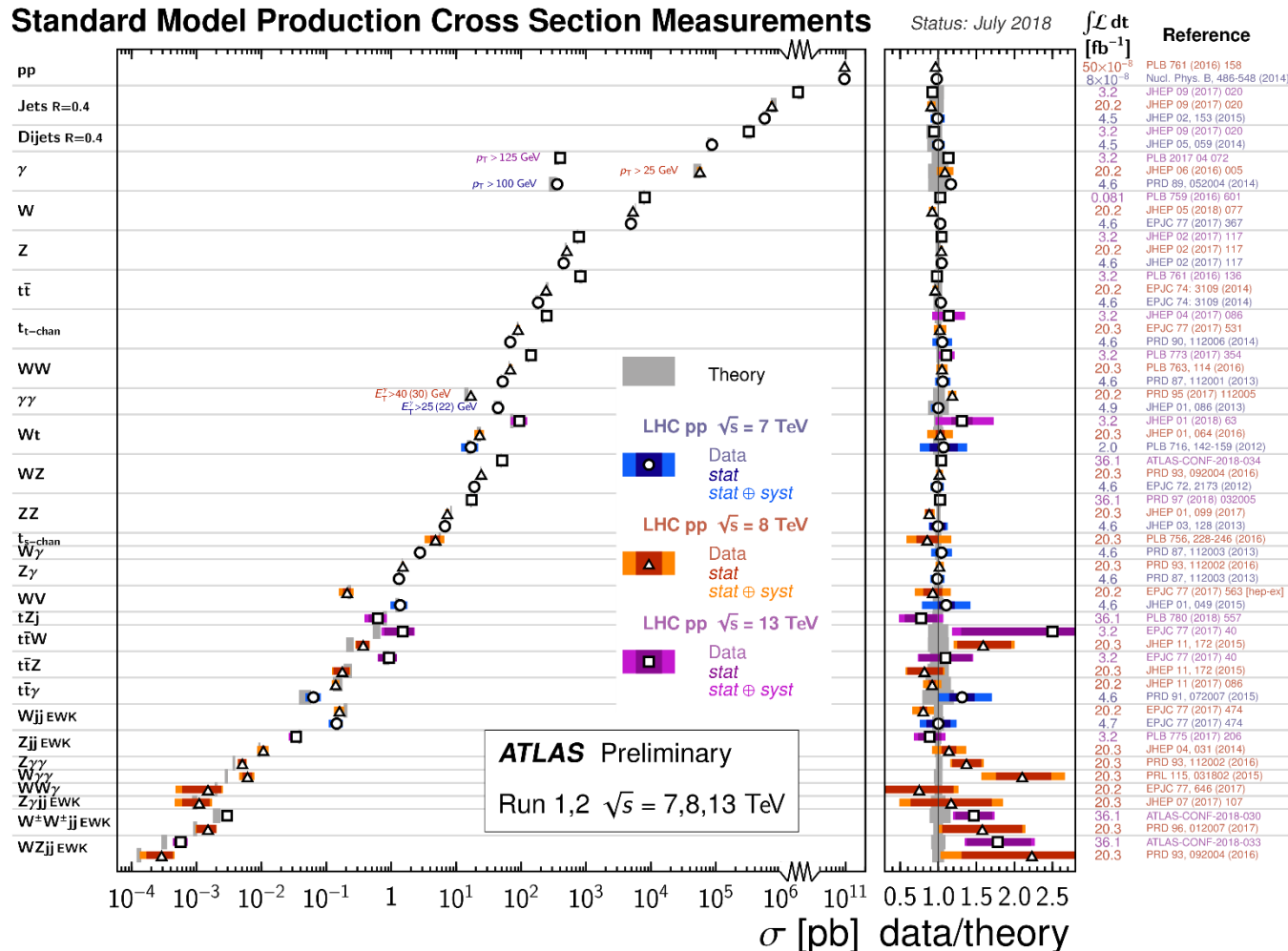
**ヒッグス粒子で物理は完成した
のか？**

現在の素粒子物理（標準理論）

- 標準理論
 - 電弱統一理論
 - 電磁気力、弱い力を統一的に記述。
 - W,Z粒子の質量を説明。
 - ヒッグス粒子の物理。
 - 量子色力学
 - 強い力を記述。
 - 核子、中間子のクォーク模型。
 - 粒子混合の理論。
 - 粒子の混合を記述。
 - 粒子と反粒子の非対称性を記述。
- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。

標準理論とLHCデータとの整合性

- さまざまな素粒子反応をLHCで測定したところ、どの反応の頻度も標準理論の計算値とよく合っている。

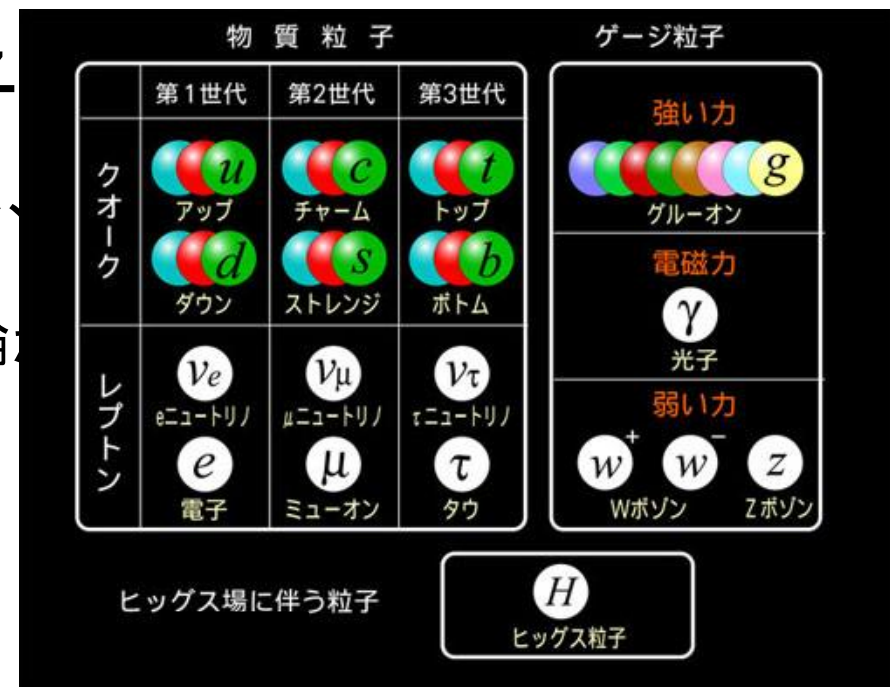


今後の素粒子物理の課題

- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。
- ヒッグス粒子の発見で、標準理論が予言していた粒子は全部発見が済んだ。
→ 究極の理論が完成??

今後の素粒子

- 現在までの素粒子実験の結果は、
る。
- ヒッグス粒子の発見で、標準理論が
済んだ。
→ 究極の理論が完成??



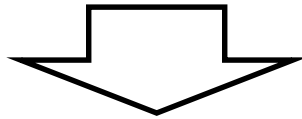
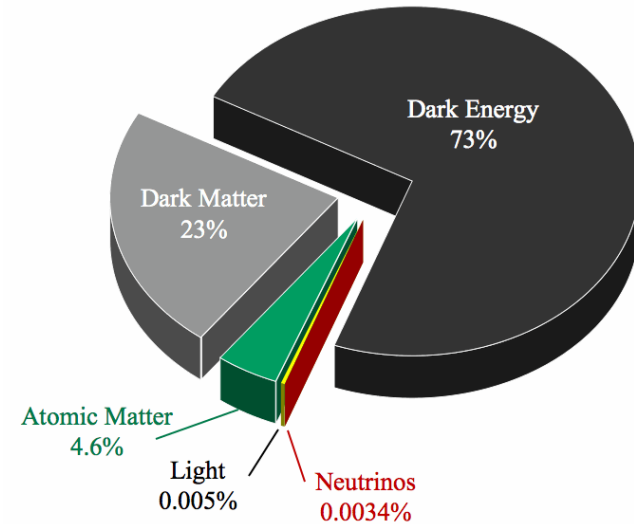
標準理論の問題点

- 重力が入っていない。
- 自然界に反物質が存在しないのはなぜか?
- ヒッグス機構では、力を媒介する粒子の質量は説明する。クォーク・レプトンの質量は説明がない。
 - 全部基本粒子の割に、レプトンとクォークの質量のばらつきが異常に大きいのはなぜか? $M_{\text{top}}/M_e \sim O(10^5)$
- なぜクォークやニュートリノが、粒子混合をしているのかの説明もない。
- なぜ3世代あるのか説明していない。現状は、元素が100種類ほどある周期表と似ている。

さらに小さいスケールで、新しい物理があるはず。

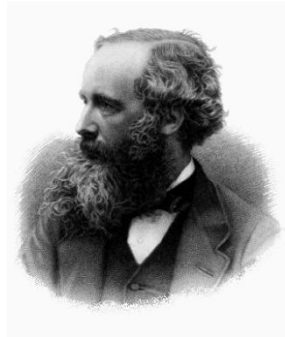
標準理論で説明できない実験事実

- 宇宙観測の結果
 - 暗黒物質は確実にある。
 - 標準理論では宇宙の質量構成の5%しか説明できない。
 - ⇒標準理論の粒子では説明できない。
 - 未知の新粒子。(超対称性粒子、etc)
 - ⇒(LHC)加速器で暗黒物質を作り出し、精密に測定することはできないか？



標準理論を超えた物理は間違いなくある。
素粒子実験での発見を目指す。

自然界の力の統一



1864:Maxwell

電気力

磁気力

電磁気力

強い力

1919~1937:陽子・中間子



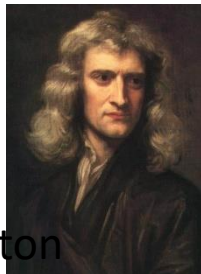
陽子崩壊？
XYボゾン？

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

統一場理論
超弦理論？
重力子⁸⁷？

新しい物理モデルの例

新しい物理の理論

超対称性

- Super Gravity
- Gauge Mediated Symmetry Breaking
- Anomaly Mediated Symmetry Breaking
-

余剰次元

- Large Scale Extra Dimension
- Kaluza-Klein theory
- Randall-Sundrum model

力の大統一

未知の力の理論

- Top Color model
- Top Condensation
- ...

拡張ヒッグス・セクターの理論

- Additional Higgs singlet
- 2 Higgs doublet model
- ...

第4世代

シーソー機構

重いゲージ粒子

コンポジットネス

テクニカラー

実験サイドとしては:

- いろいろな理論があり、どれが本当かはこれから検証していく。

今後の素粒子物理の課題

- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。
- **ヒッグス粒子の発見**で、標準理論が予言していた粒子は全部発見が済んだ。
 - **標準理論は完成した！**
 - **究極の理論が完成??**

物質を構成する粒子

	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク	u	s	t
	d	c	b
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

力を媒介するゲージ粒子

電磁気力	γ
強い力	g
弱い力	W^+ W^- Z^0

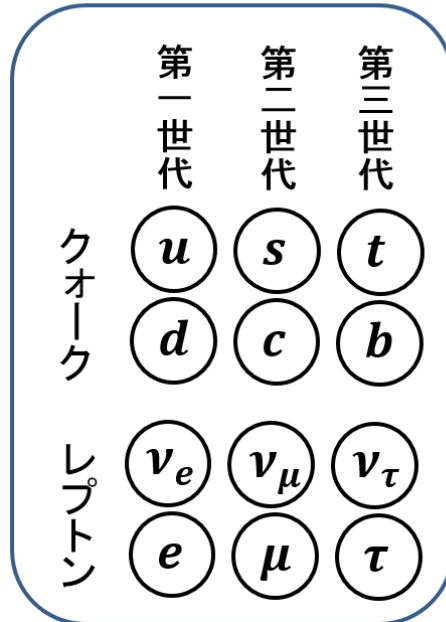
質量の起源、ヒッグス粒子

ヒッグス粒子	H
--------	-----

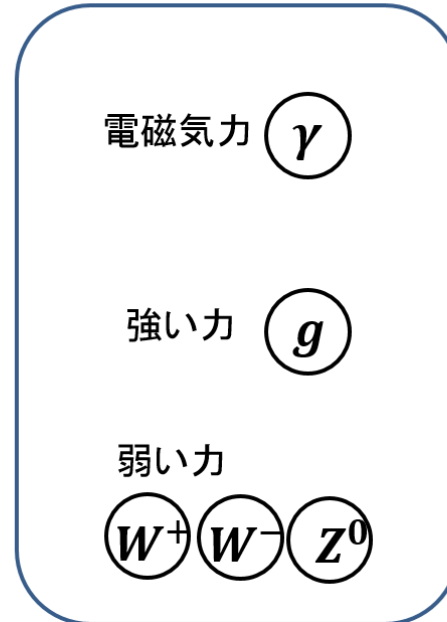
今後の素粒子物理の課題

- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。
- **ヒッグス粒子の発見**で、標準理論が予言していた粒子は全部発見が済んだ。
 - **標準理論は完成した！**
 - **究極の理論が完成??**

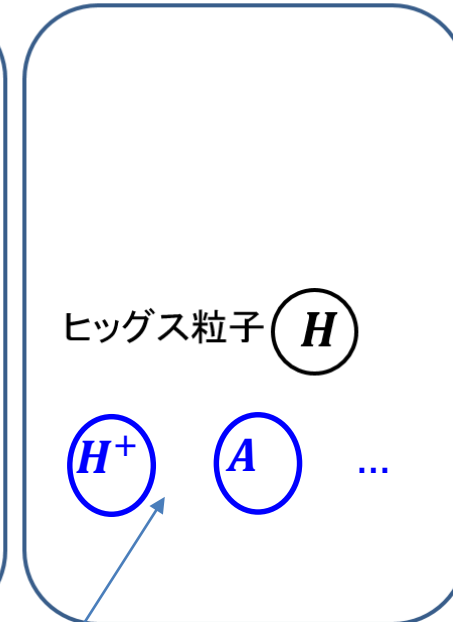
物質を構成する粒子



力を媒介するゲージ粒子



質量の起源、ヒッグス粒子



ヒッグス粒子だけ1種類しかない。。。
もっとあってもいいじゃないか？

2 Higgs Doublet Model (2HDM)

- 標準理論: ヒッグス・ダブレットを一個入れた。

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

- 4つの自由度 $\rightarrow W^+, W^-, Z$ の質量 + ヒッグス粒子
- Vacuum Expectation Value $v = 246 \text{ GeV}$
- ヒッグス・ダブレットを2つ入れたら、、、

$$H_u = \begin{pmatrix} H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix}, \quad H_d = \begin{pmatrix} H_d^0 \\ H_d^- \end{pmatrix}$$

- 8つの自由度 $\rightarrow W^+, W^-, Z$ の質量 + 5個のヒッグス粒子
 h, H, A, H^+, H^-

- 2つのVEV: v_1, v_2

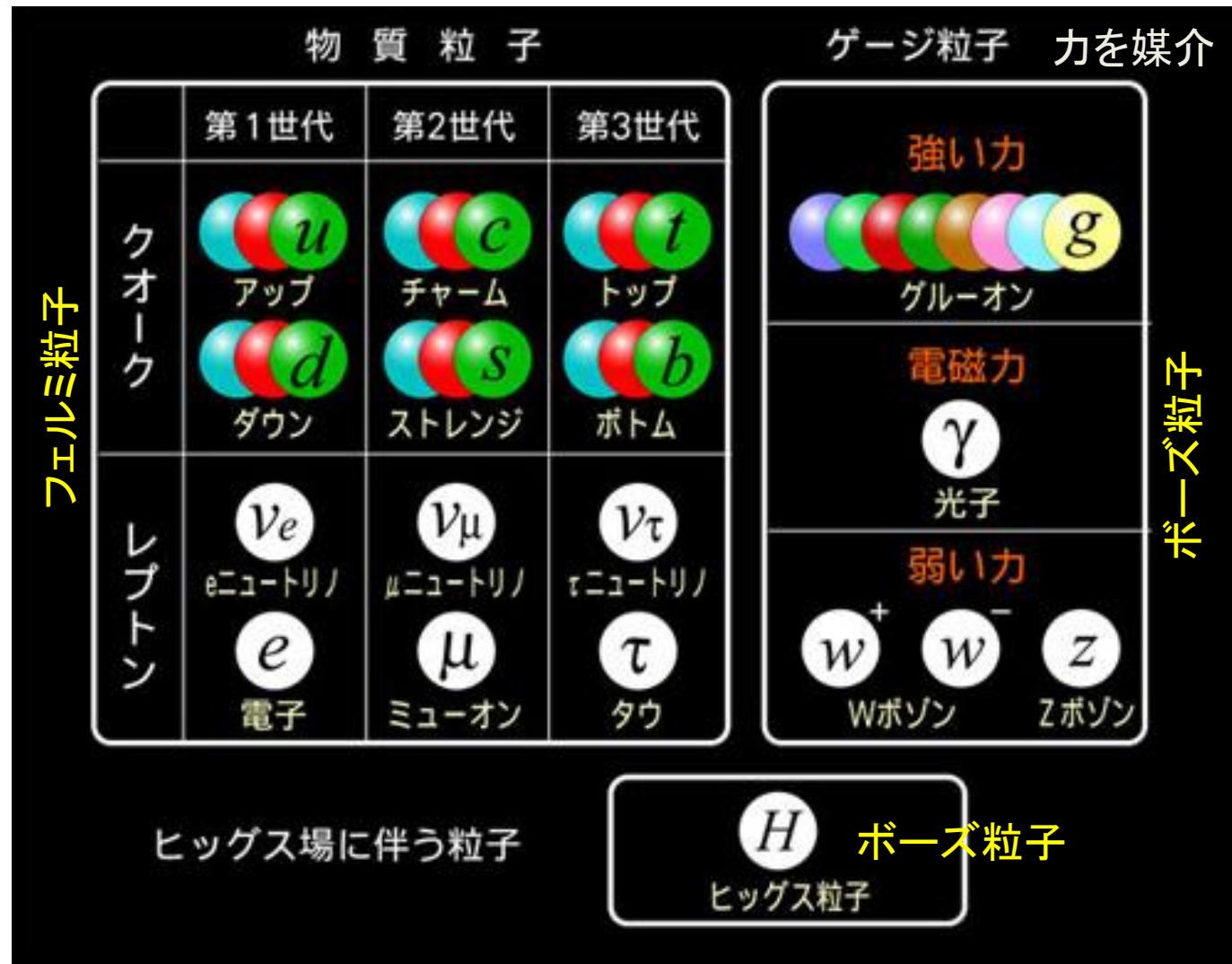
$$\sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 246 \text{ GeV}$$

$$\tan \beta = v_2 / v_1$$

超対称性理論では、標準理論どおりの単一ヒッグス粒子では筋の通った理論に作れない。必ず複数のヒッグス粒子があるべき。

超対称性とは

- スピンが半奇数(フェルミ粒子)か整数(ボーズ粒子)かで、粒子の振る舞いが大きく異なる。(←統計力学)

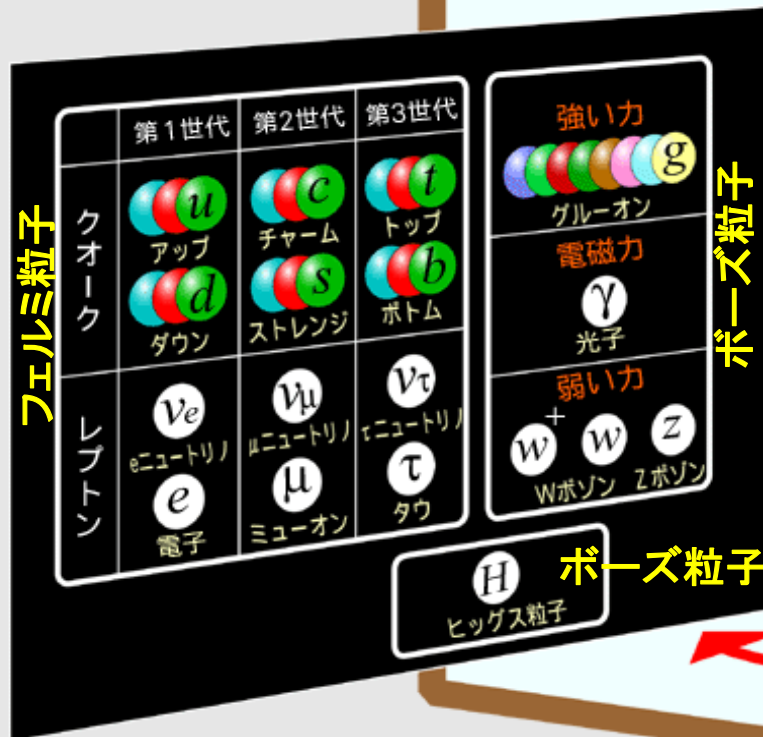


超対称性とは

フェルミ粒子とボーズ粒子の間の対称性＝超対称性（新しい仮説）。

今まで見つかっている各粒子に対して、質量、電荷等がまったく同じで、スピンだけ異なる粒子が存在することを仮定する。

-> 現在見つかっている粒子と同じくらい、未発見の粒子が存在する。



超対称性

超対称性の魅力

- LHC加速器で、新粒子をたくさん発見できるかも。
 - ラッキーなら、重力子のスーパー・パートナーも見つかるかも。 ←量子重力の発見。
- 力の大統一が、自然にできる。

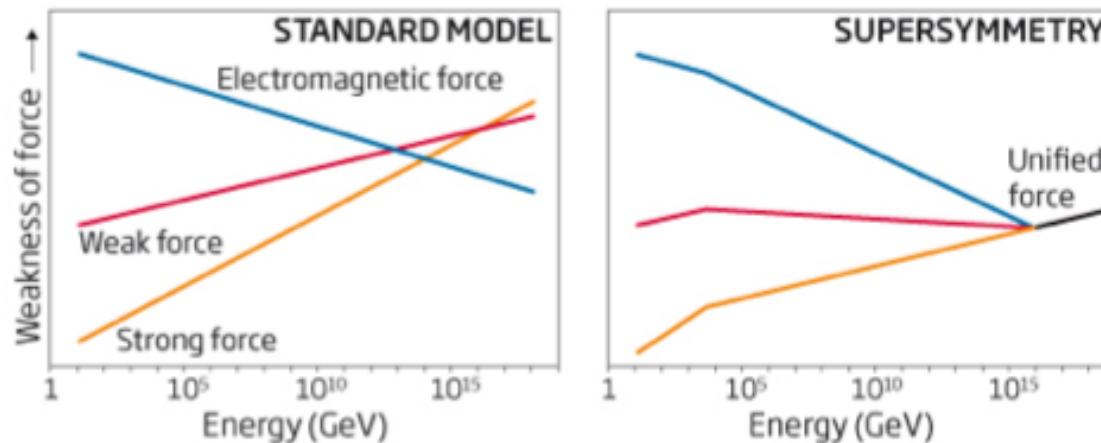


Figure 3 – Force unification in the Standard Model compared to supersymmetry
http://www.newscientist.com/data/images/ns/cms/dn20248/dn20248-2_534.jpg

- ヒッグス粒子の質量の発散を抑えられる。

超対称性

(MSSM=Minimal SuperSymmetric Model)

- フェルミオンーボソン間の対称性。

Names		spin 0	spin 1/2
squarks, quarks (×3 families)	Q	$(\tilde{u}_L \ \tilde{d}_L)$	$(u_L \ d_L)$
	$\bar{u}$	$\tilde{u}_R^*$	$u_R^\dagger$
	$\bar{d}$	$\tilde{d}_R^*$	$d_R^\dagger$
sleptons, leptons (×3 families)	L	$(\tilde{\nu} \ \tilde{e}_L)$	$(\nu \ e_L)$
	$\bar{e}$	$\tilde{e}_R^*$	$e_R^\dagger$
Higgs, higgsinos	H_u	$(H_u^+ \ H_u^0)$	$(\tilde{H}_u^+ \ \tilde{H}_u^0)$
	H_d	$(H_d^0 \ H_d^-)$	$(\tilde{H}_d^0 \ \tilde{H}_d^-)$

Names	spin 1/2	spin 1
gluino, gluon	$\tilde{g}$	g
winos, W bosons	$\tilde{W}^\pm \ \tilde{W}^0$	$W^\pm \ W^0$
bino, B boson	$\tilde{B}^0$	B^0

Radiative Correction

$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2 + \dots$$

$$2 \times \Delta m_H^2 = \frac{\lambda_S}{16\pi^2} \left[\Lambda_{UV}^2 - 2m_S^2 \ln(\Lambda_{UV}/m_S) + \dots \right]$$

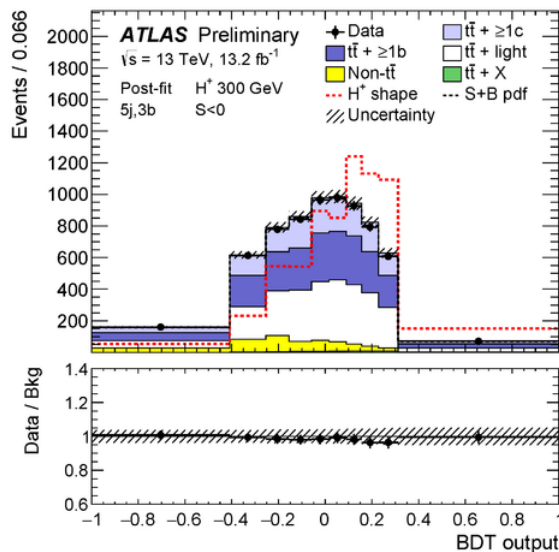
Λ_{UV}^2 項がキャンセルしあって、単なるlog発散になる。

MSSMでは、non-SUSYの2HDMとはRadiative Correctionの様相が大きく異なる。 96

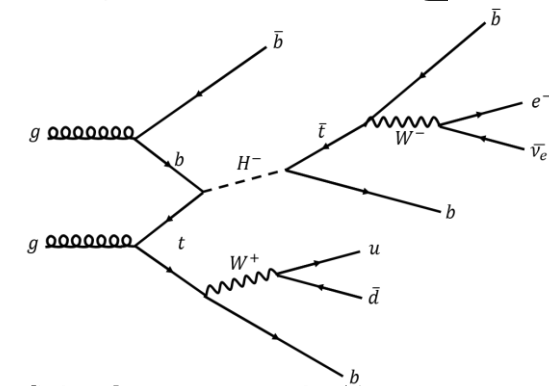
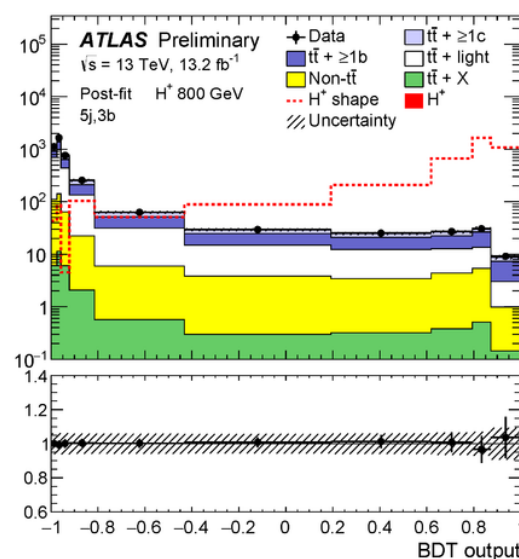
$H^\pm \rightarrow tb$ の探索

- 荷電ヒッグス粒子 $H^\pm$ は、超対称性理論を含め、多くの物理モデルで存在すべき粒子。
 - 1レプトン+6ジェットの事象を解析して探す。
 - さまざまな $H^\pm$ 質量に対してMVA(他変数解析)によるdiscriminantをtrainingした。

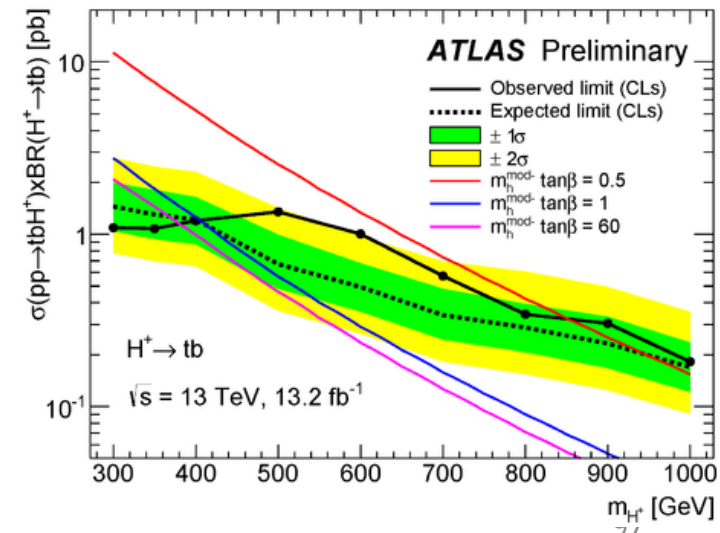
300 GeV/ c^2 の $H^\pm$ を探す



800 GeV/ c^2 の $H^\pm$ を探す



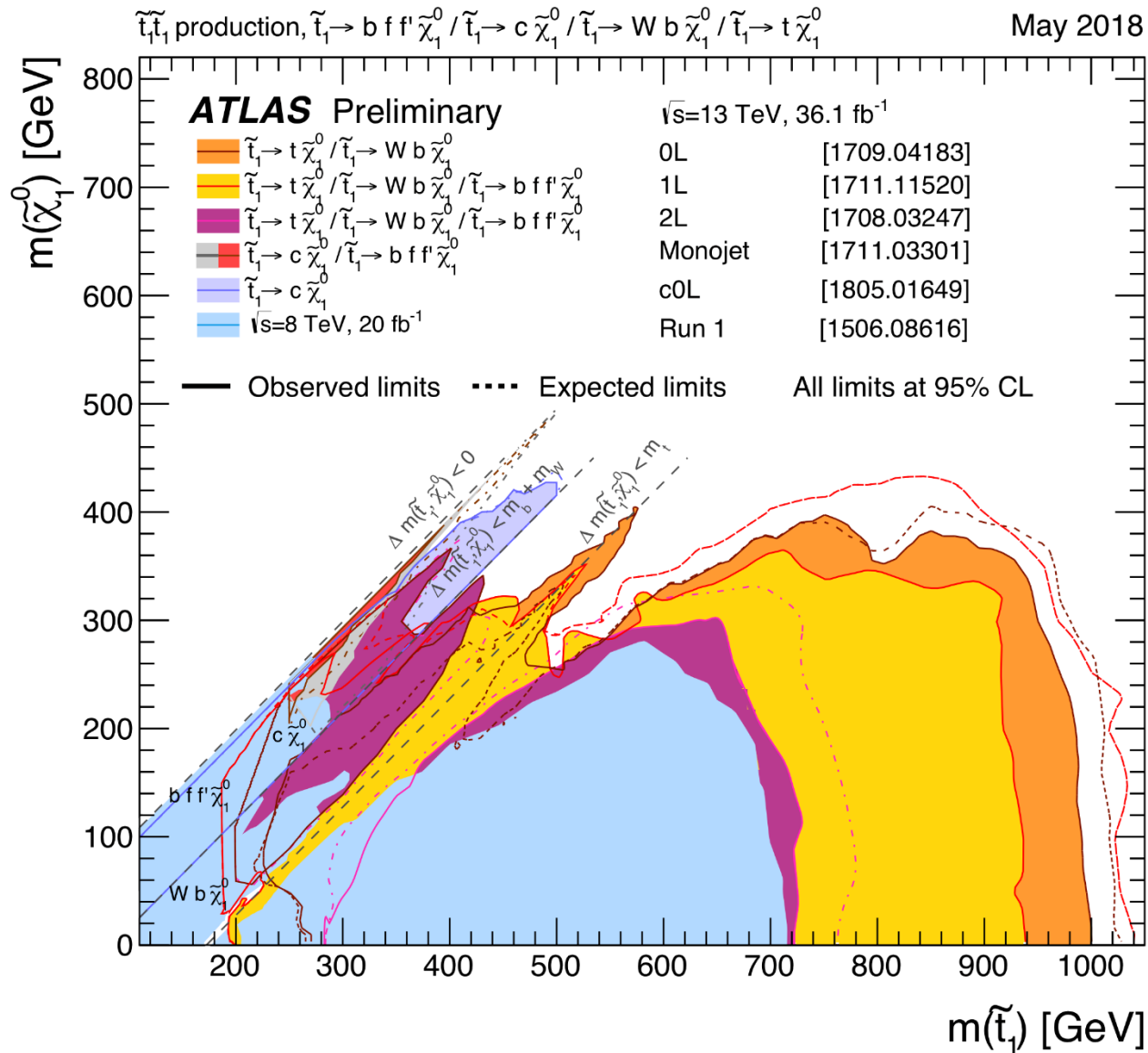
$H^\pm$ の生成頻度に対して制約



今回の解析では、新粒子(荷電ヒッグス粒子)の兆候は見つからなかった。

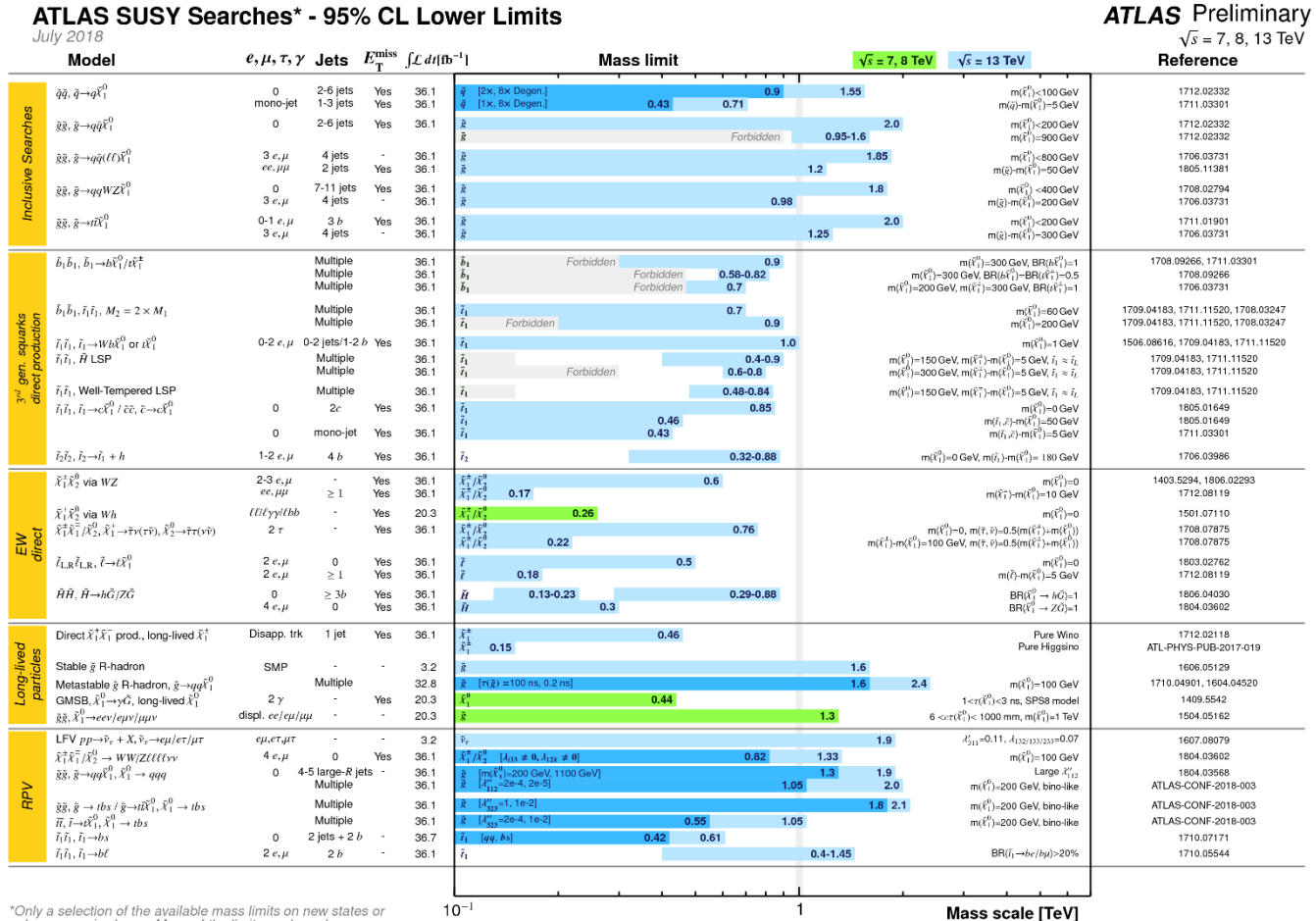
⇒もっとデータをたくさん溜めて、検出感度をあげて発見を目指す。

超対称性粒子の探索、stop探索の例



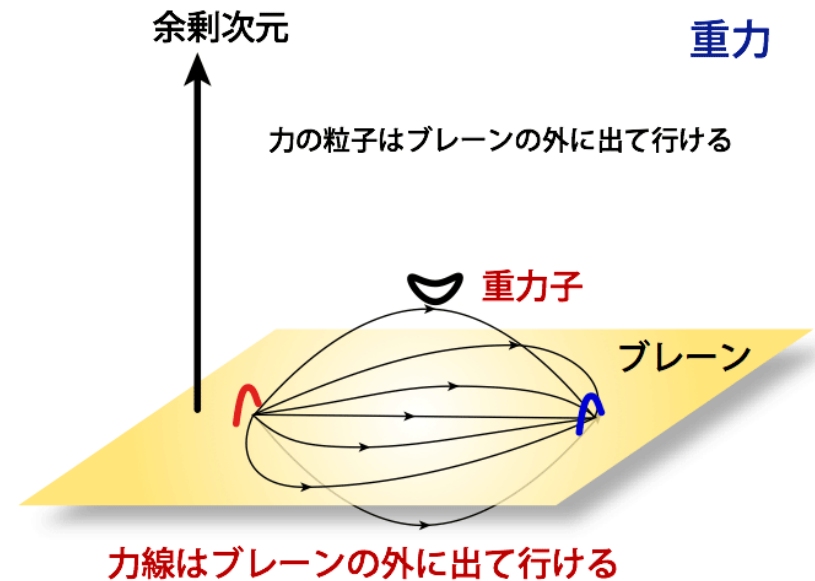
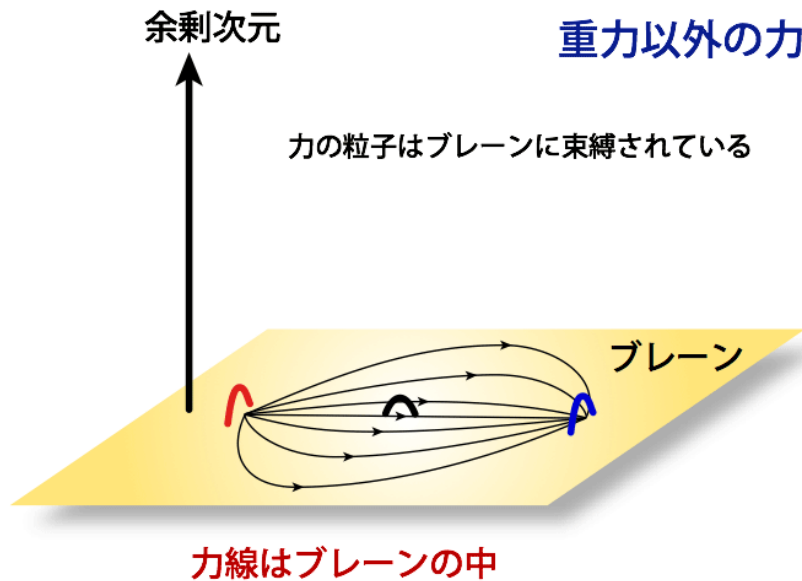
LHCでの超対称性の探索

- 理論のパラメータによって、さまざまな粒子の崩壊モードが可能性がある。
- さまざまな可能性を網羅する形で、データ解析をしている。
- いまのところ兆候はない。 データを増やしてどうなるか？



余剰次元

- われわれの空間は3次元である。
- たとえば、 $r \ll R$ のミクロな距離だけで、重力子だけ $(3+N)$ 次元に染み出せるとする。



余剰次元でのガウスの法則

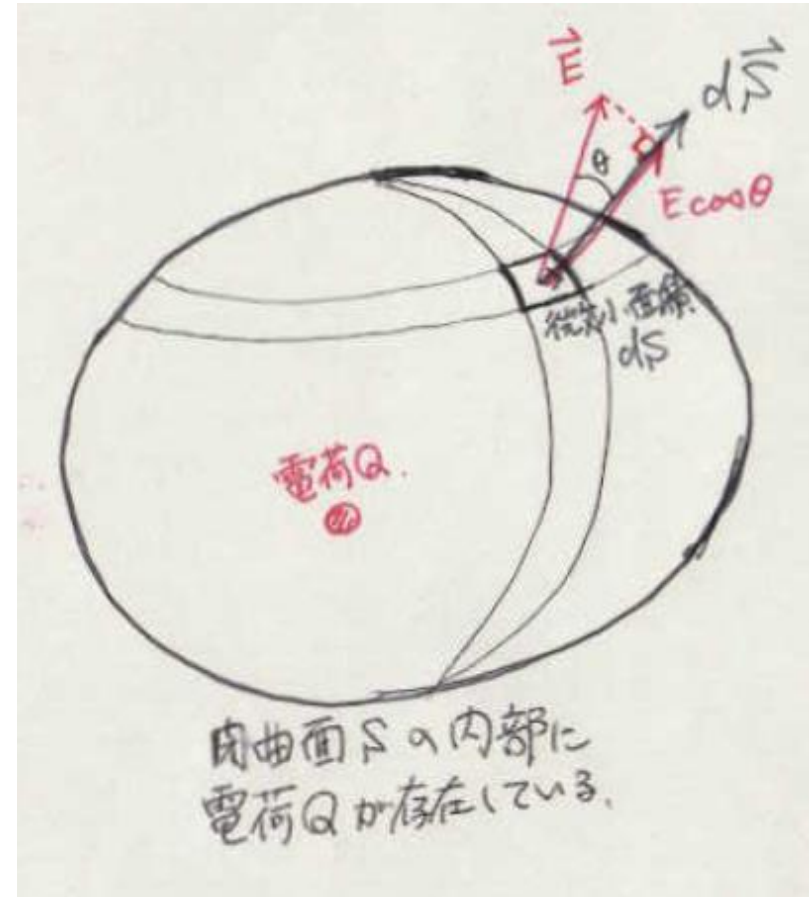
- 半径 r の球内に電荷 Q が置かれている場合を考えると、

$$\iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q/\epsilon_0$$

$$E \iint_S dS = Q/\epsilon_0$$

$$\iint_S dS = 4\pi r^2 \text{だから、}$$

$$E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$$



余剰次元でのガウスの法則

- 半径 r の球内に電荷 Q が置かれている場合を考えると、

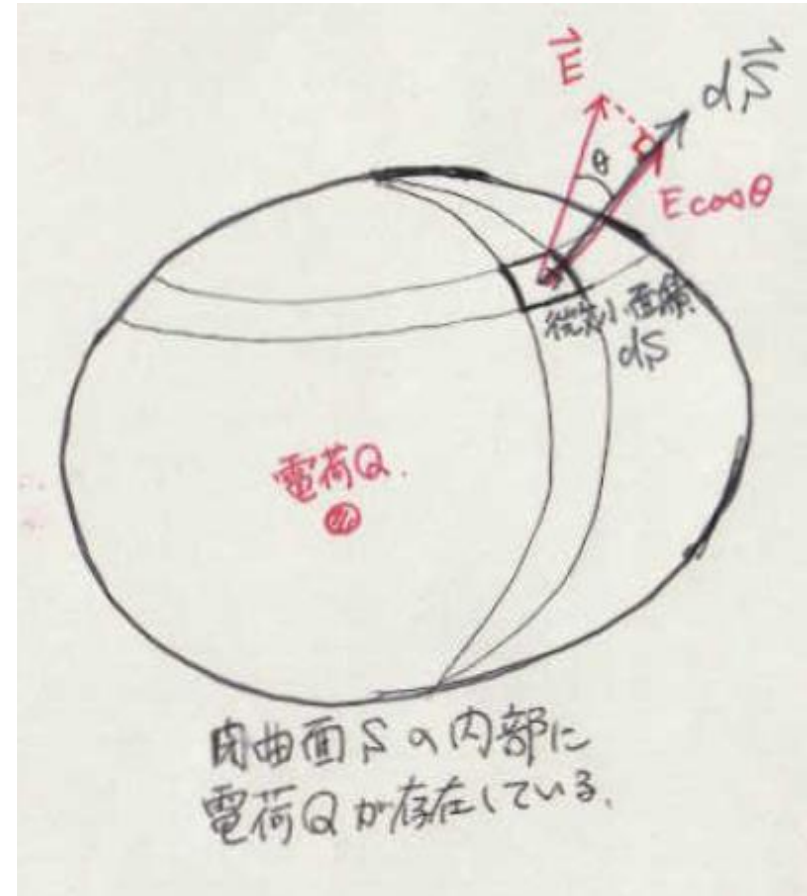
$$\iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q/\epsilon_0$$

$$E \iint_S dS = Q/\epsilon_0$$

$\iint_S dS = 4\pi r^2$ だから、

$$E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$$

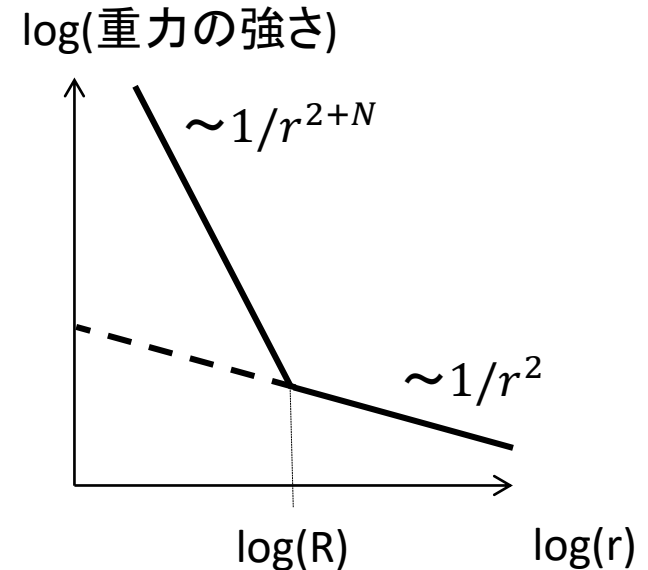
- 重力 $\sim 1/r^2$ も同様の理由。
- $(3+N)$ 次元空間での重力の強さは $\sim 1/r^{2+N}$ になるはず



	表面積
2次元内の球（円の長さ）	πr
3次元内の球	$4\pi r^2$
4次元内の球	$\frac{4}{3}\pi r^3$
$(3+N)$ 次元内の球	$\propto r^{2+N}$

余剰次元

- われわれの空間は3次元である。
- たとえば、 $r \ll R$ のミクロな距離だけで、重力子だけ $(3+N)$ 次元に染み出せるとする。
- 重力の強さは：
 - 巨視的な範囲 $r \gg R$ では： $\sim 1/r^2$
 - ごく短距離力では： $\sim 1/r^{2+N}$
- 素粒子実験(LHC実験)は、物質を小さいスケールで理解しようとしている。
 - ごく短距離での反応を実験している、ということ。
 - LHCで実験している短距離が R より短ければ、 $1/r^2$ より強い重力の効果が、素粒子どうしに働くのを見ることができはず。



余剰次元、ATLAS実験での探索

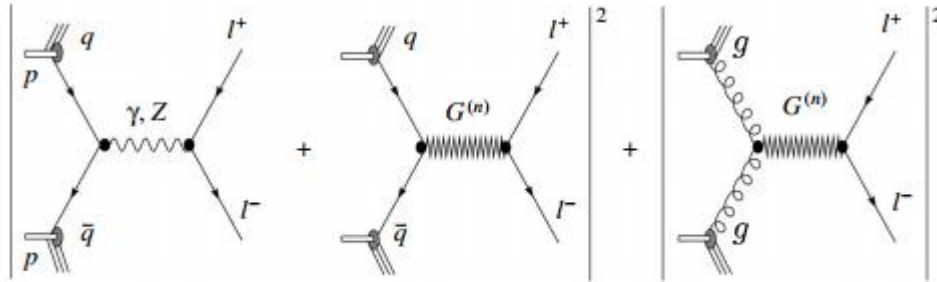
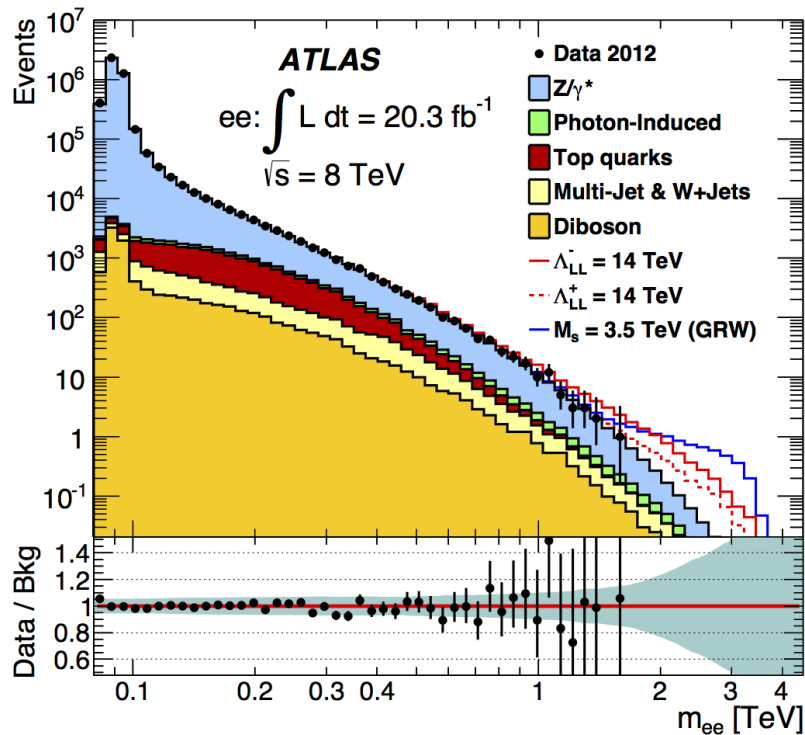


Fig. 1. Feynman diagrams describing dilepton production within the ADD model.



$$3.5 \text{ TeV} \sim 0.5 \times 10^{-19} m$$

- 標準理論では、 $q\bar{q}$ 衝突でゲージ粒子を介して電子対ができる。
- 余剰次元モデルでは、ゲージ粒子でなく、重力子を介しても電子対ができる。
- いまのところ、標準理論とよくあっている。これからの解析に期待。

新しい物理の発見に向けて

超対称性

- Super Gravity
- Gauge Mediated Symmetry Breaking
- Anomaly Mediated Symmetry Breaking
-

余剰次元

- Large Scale Extra Dimension
- Kaluza-Klein theory
- Randall-Sundrum model

力の大統一

未知の力の理論

- Top Color model
- Top Condensation
- ...

拡張ヒッグス・セクターの理論

- Additional Higgs singlet
- 2 Higgs doublet model
- ...

第4世代

シーソー機構

重いゲージ粒子

コンポジットネス

テクニカラー

実験サイドとしては:

- いろいろな理論があり、どれが本当かはこれから検証していく。
- 理論家がテキトーなことをたくさん言ってるけど、一個でも正しいのか？
- 誰も思いついていないような物理が見つかる可能性も大きい!!
 - 実験で実証しないかぎり、結論はでない。

おしまい

- ご清聴、ありがとうございました。

ここから先、おまけ

素粒子物理と産業の関り

素粒子実験研究室、卒業生の進路

加速器実験アネクドーツ

素粒子物理と産業の関わり

素粒子実験で培われた技術の産業応用

基礎物理学の成果の産業への応用

- ニュートン力学・万有引力の法則
 - 人工衛星の軌道計算
- マックスウェル電磁気学
 - 電波工学、テレビ・ラジオ・携帯電話
- 量子力学
 - 半導体技術
- 相対性理論
 - カーナビ等、GPSの補正
- 原子核物理・相対性理論
 - 原子力発電
- 素粒子物理(クォーク・ヒッグス等)
 - まだ応用分野が見つかっていない。

素粒子物理学は何か役に立つか？

- R.R. Wilson's Congressional Testimony, April 1969
 - Fermi国立研究所、初代所長の国会委員会での答弁、加速器の国防への応用に関して
- **SENATOR PASTORE.** Is there anything here that projects us in a position of being competitive with the Russians, with regard to this race?
- **DR. WILSON.** Only from a long-range point of view, of a developing technology. Otherwise, it has to do with: Are we good painters, good sculptors, great poets? I mean all the things that we really venerate and honor in our country and are patriotic about.
- In that sense, this new knowledge has all to do with honor and country but it has nothing to do directly with defending our country except to help make it worth defending.

Wilsonの国会答弁、日本語訳

- **PASTORE上院議員.** ロシアとの(軍備)競争の中で、素粒子実験加速器を作ることでも有利になることがありますか？
- **WILSON所長.** 加速器開発に伴う技術開発を、長い目で見れば、そうした実用的な応用もあります。
- ただしそういう観点からでなくとも、優れた画家、優れた彫刻家、優れた詩人を国が擁しているかどうかというのと同じで、素粒子研究というのは、国に尊厳、誇りをもたらすものです。
- そういう意味で、新しい知識は、国防の役に立つものとはいえませんが、国を守るに足る国にするのには役に立ちます。

1969年： 素粒子物理学の知識→ 国家の財産
現在の認識： 科学的知識→ 人類の財産

Wilsonの国会答弁、日本語訳

- **PASTORE上院議員.** ロシアとの(軍備)競争の中で、素粒子実験加速器を作ることでも有利になることがありますか？
- **WILSON所長.** 加速器開発に伴う技術開発を、長い目で見れば、そうした実用的な応用もあります。
- ただしそういう観点からでなくとも、優れた画家、優れた彫刻家、優れた詩人を国が擁しているかどうかというのと同じで、素粒子研究というのは、国に尊厳、誇りをもたらすものです。
- そういう意味で、新しい知識は、国防の役に立つものとはいえませんが、国を守るに足る国にするのには役に立ちます。

1969年： 素粒子物理学の知識→ 国家の財産

現在の認識： 科学的知識→ 人類の財産

某東大教授の解釈： 国の品格＝素粒子研究!!

素粒子実験と産業との連携

素粒子実験の実験装置は、最先端技術の集積になっている

- 素粒子実験自体は儲かる分野ではない。
- 企業がどうして、素粒子実験の高い要求を満たすデバイスを一緒に開発したがるのか？
 - 加速器の超伝導磁石
 - ATLAS実験の半導体検出器
 - カミオカンデの光電子増倍管
 -
- 高い要求を満たす開発研究をすることで、技術が上がる。
- 高まった技術を他分野に応用できる。

加速器実験で培われた応用技術

- 真空技術
 - 真空ポンプは昔からあるが、30kmにわたる広範囲を真空に保つ中で技術が進んだ。
- 超伝導技術
 - 素粒子実験で使っている超伝導電磁石は世界最強級。
 - LHCの磁場: 8テスラ ⇔ NMRの磁場: 1～2テスラ。
 - 多くの超伝導電磁石を同時に長時間運転する加速器の要請から、超伝導技術も進歩した。⇒リニア・モーターカー。
- 粒子検出器の技術
 - とくに医療機器への応用が広く行われている。CTスキャン、がんの粒子線治療など。
 - 半導体光検出器 ⇒ デジカメに応用
- インターネット技術
 - World Wide Webは、もともとCERNが研究者間のコミュニケーションのために開発したもの。
 - www.google.com, www.yahoo.co.jp,
- GRIDコンピューティング
 - 世界中にあるコンピューティング・ファームを統一的に使用する技術。
 - ATLASのコンピュータ環境は、世界最大級のスパコンに相当。

修士修了者の進路

- 研究室の4年生・修士学生は、検出器の開発を行う。
 - デバイス開発、プログラミング、物理解析の経験。
 - 放射線、半導体、超伝導、機器制御、プログラミング等、多くの技術を学ぶ。

	博士課程進学	(政府系)独立法人・研究機関	企業
2017 予定	1		SONY、富士通
2016	0	日立、太陽誘電、野村総研	原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構
2015	0	材料科学技術振興財団	東芝、東北電力、オリエンタルモーター、横川電機
2014	5(うち名古屋大1、総研大2)		NEC、JSOL、
2013	2		
2012	2		パイオニア、日立製作所
2011	1(マルセイユ大)	JAXA、日本入試センター	ローム
2010	1	原子力安全機構、NEDO(新エネルギー開発機構)	三菱電機、ブレインチャイルド
2009	4(うち総研大2)	原子力研究所(2)	浜松ホトニクス、NTT東日本、エプコ
2008	3(うち大阪大1)		日立製作所、シャープ

博士修了者の進路

年度	大学・研究機関	企業
2017	京都大	シンプレックス、中部電力
2016	筑波大	NTTデータ
2015		PWC
2014	筑波大	
2013	修了者なし	
2012	東京大	
2011	九州大	キーエンス
2010	修了者なし	
2009	マルセイユ大	
2008	早稲田大、東京大(のちKEK)	
2007	東京大、放射線医学研究所	キーウオーカー

素粒子物理学の塗り替えた基本概念

素粒子物理学は、物質の構造に関する概念を根本から覆す発見をしてきた学問でもある。

- 量子力学
 - 波動関数 ψ の確立解釈 ($|\psi|^2$)
⇒ 物質は、古典力学のように状態が確定しているわけではない。
- 相対論
 - 質量とエネルギーの同等性
- 素粒子物理学
 - 反粒子の発見
 - 核子の内部構造 (クォーク、グルオン)
 - 電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論
 - 粒子の混合 (K、B中間子の振動、ニュートリノ振動)
 - CP非保存 (粒子・反粒子の非対称)
 - ヒッグス機構
⇒ 質量の本質、真空の根源的な理解
 - Supersymmetry, ExtraDimension, Technicolor, (or something completely unexpected)?

加速器実験のいろいろな挿話

2000年以降の、ヒッグス発見にいたるまでの動向

加速器運転に関するハプニングなど

2015年のLHCでの新粒子の兆候が見えかけ、その後統計的な揺らぎと判明したことなど

LEP実験

運転時期: 1989-2000

電子・陽電子衝突器

重心系エネルギー: 90-209 GeV

周長: 27km (c.f. 山手線周長: 35km)

スイス、ジュネーブ郊外

LEP

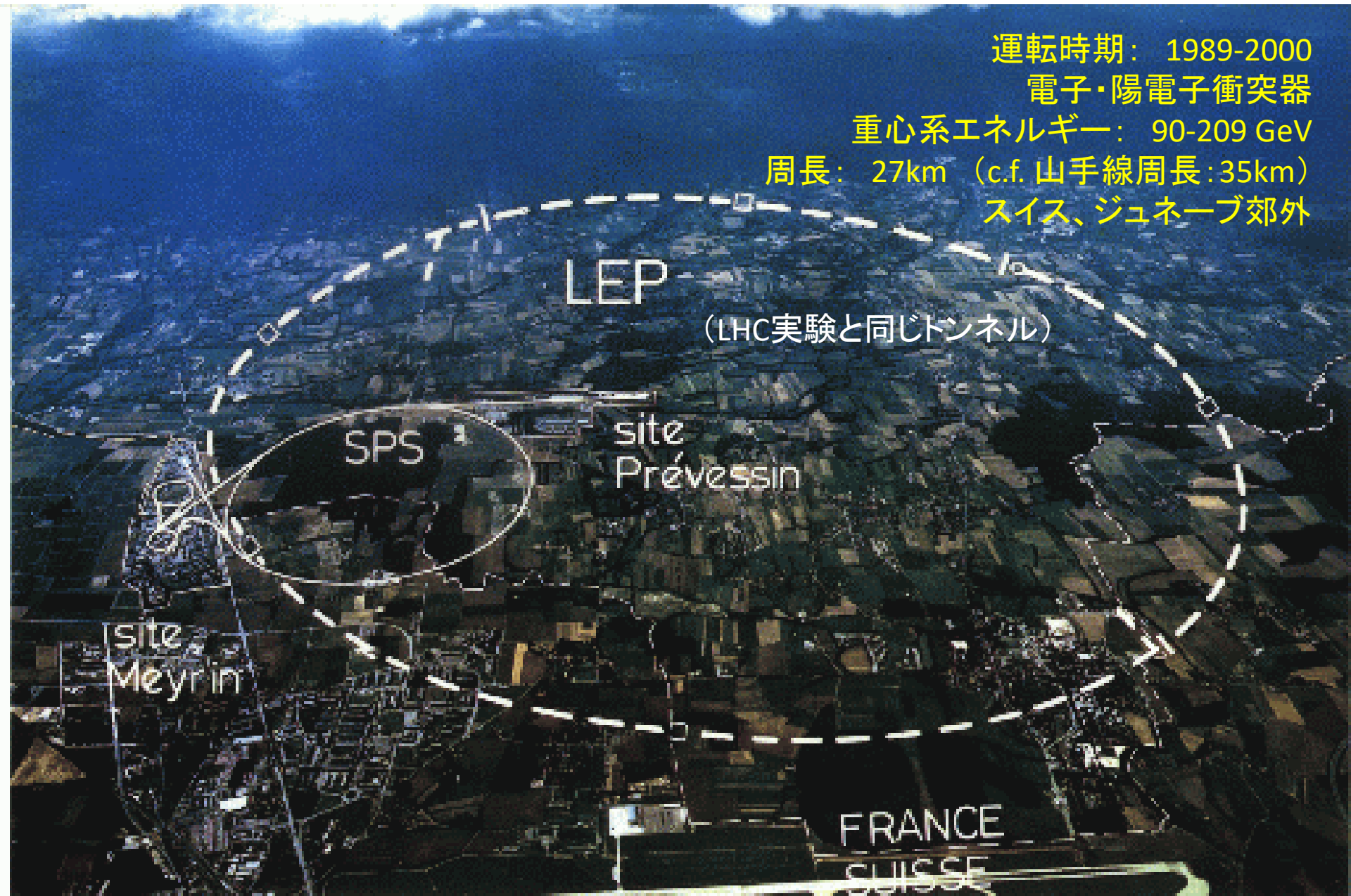
(LHC実験と同じトンネル)

SPS

site
Prévessin

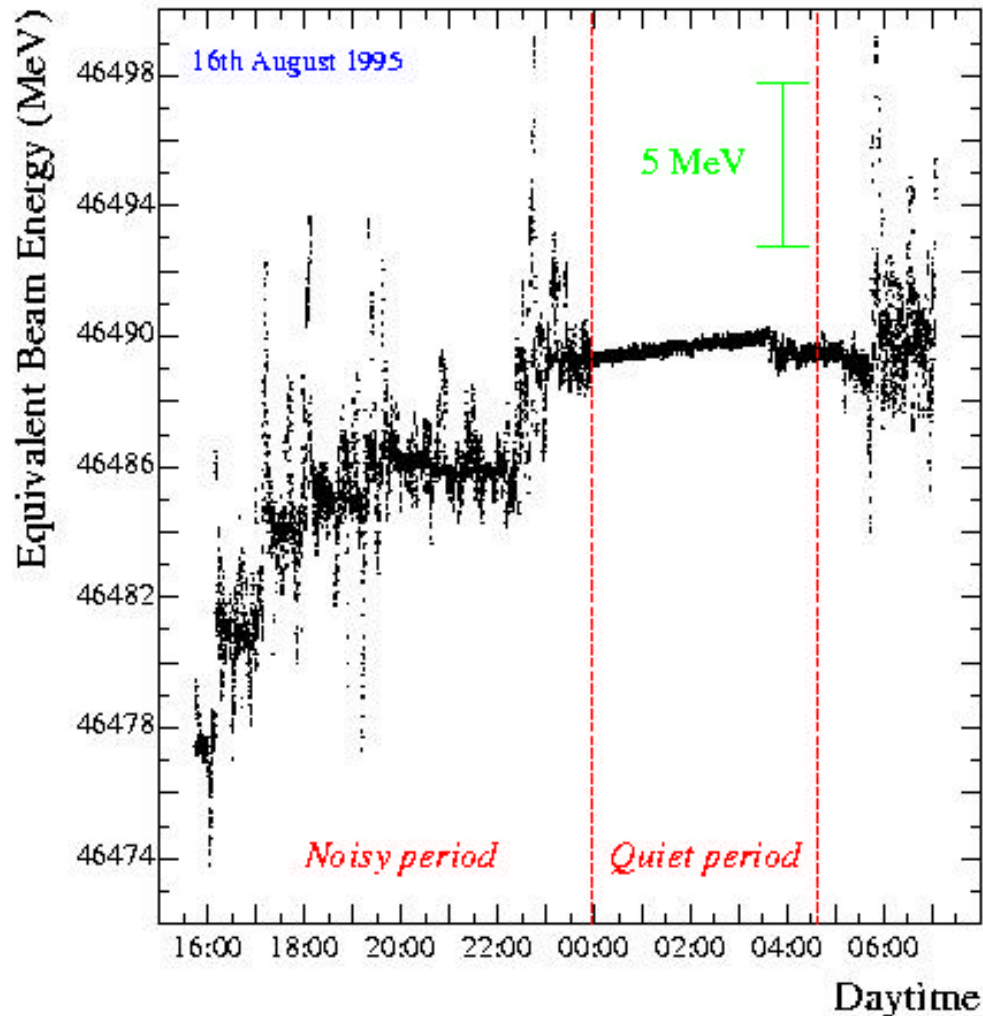
site
Meyrin

FRANCE
SUISSE



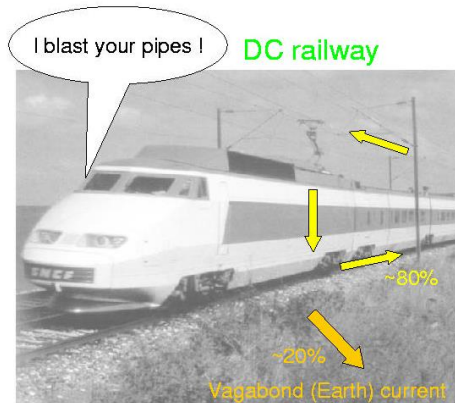
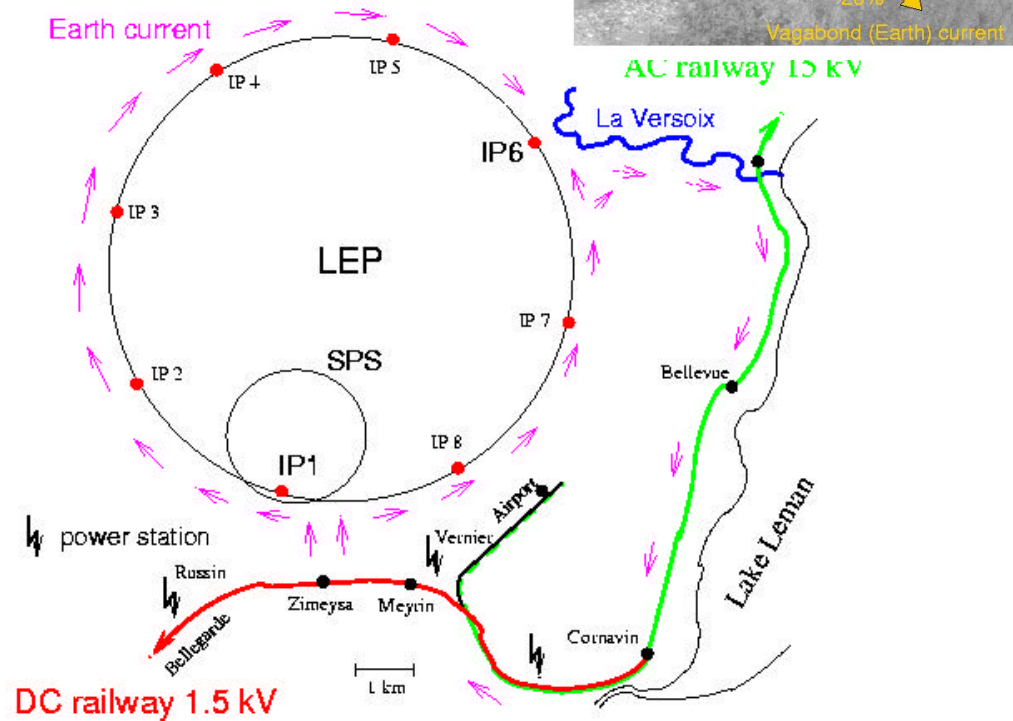
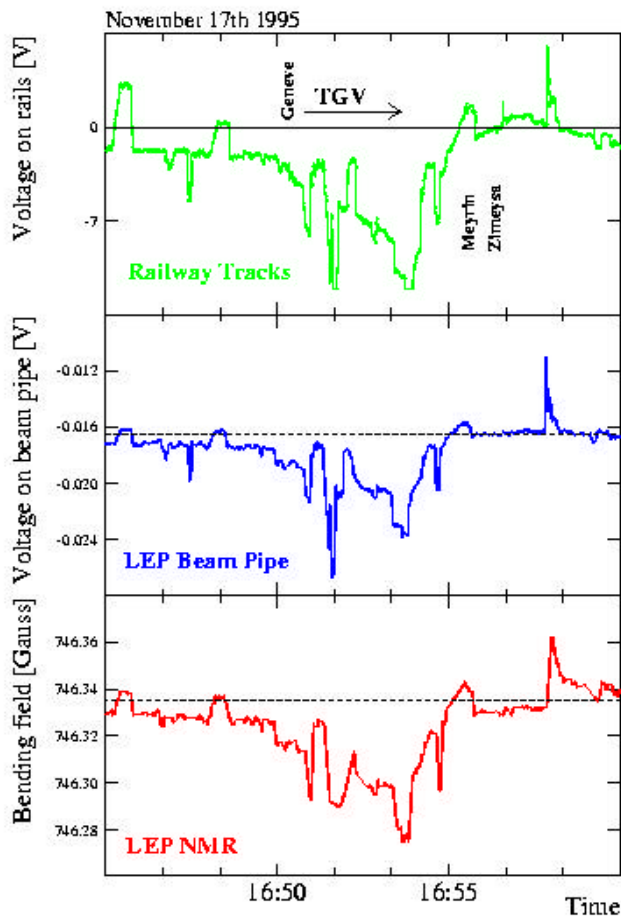
LEP実験、謎のノイズ

- LEP実験＝ジュネーブ郊外、山手線サイズの超大型加速器
- 粒子エネルギーが安定しない問題が起きた。



LEP実験、謎のノイズ 2

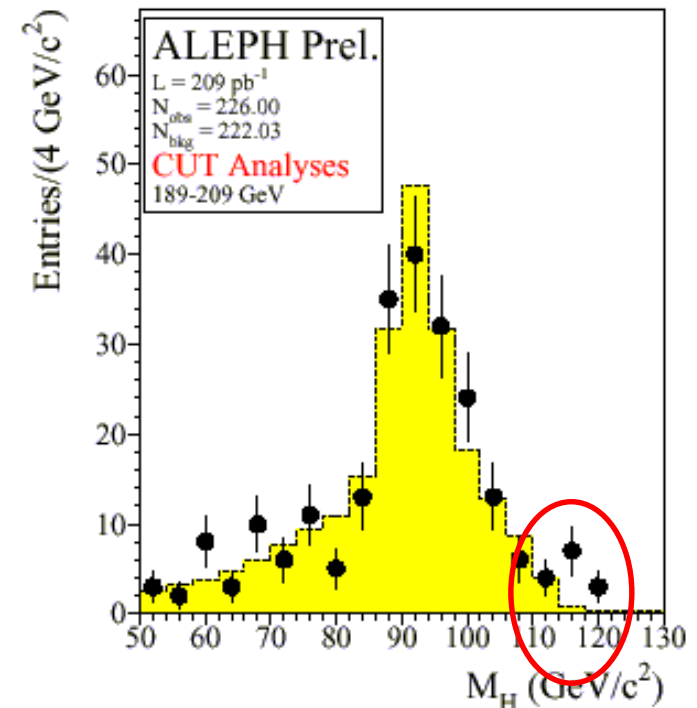
- LEP実験＝ジュネーブ郊外、山手線サイズの超大型加速器
- 粒子エネルギーが安定しない問題が起きた。
- 原因は、新幹線の電流から来るノイズだった!!



LEPでのヒッグス探索

- LEP加速器では4つの検出器が置かれ、データを解析していた。
- 2000年、LEP加速器の運転終了直前に、ALEPH実験がヒッグス粒子の兆候を確認(3.3σ)。
- 全4実験をあわせても、 2.9σ の有意度でヒッグス粒子の存在を示唆。

$$m_H = 115.0^{+1.3}_{-0.9} \text{ GeV}$$



S0370-2693(00)01269-7/S03 AID:16748 Vol.
ELSDML 2000/11/13 Pm:15/11/2000; 12:39
Doctopic: Experiments

PLB16748

P.1 (1-17)
by:ELE p. 1



ELSEVIER

Physics Letters B

PHYSICS LETTERS B

www.elsevier.nl/locate/npe

Observation of an excess in the search for the Standard Model Higgs boson at ALEPH

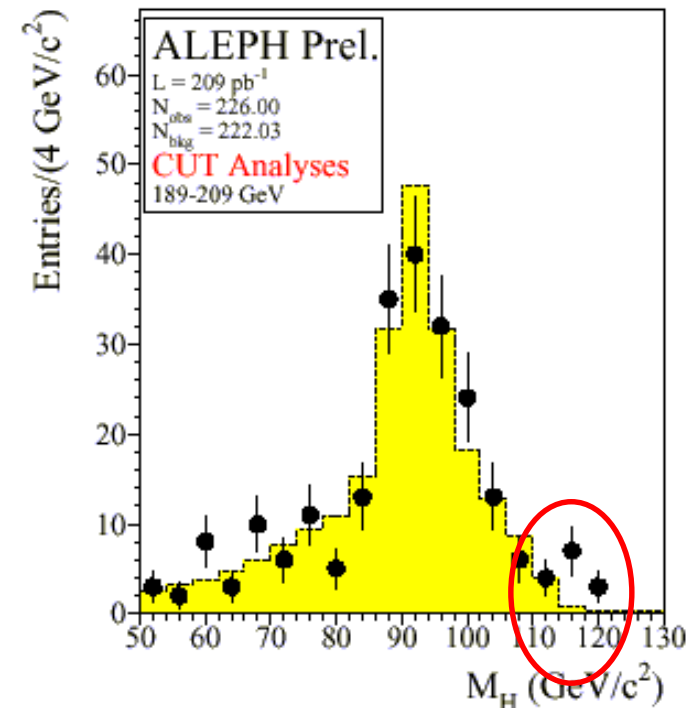
ALEPH Collaboration

R. Barate, D. Decamp, P. Ghez, C. Goy, S. Jezequel, J.-P. Lees, F. Martin, E. Merle, M.-N. Minard, B. Pietrzyk

LEPでのヒッグス探索

- LEP加速器では4つの検出器が置かれ、データを解析していた。
- 2000年、LEP加速器の運転終了直前に、ALEPH実験がヒッグス粒子の兆候を確認(3.3σ)。
- 全4実験をあわせても、 2.9σ の有意度でヒッグス粒子の存在を示唆。

$$m_H = 115.0^{+1.3}_{-0.9} \text{ GeV}$$



LEP実験の2001年への延長も検討されたが、LHC加速器建設を急ぐことに決定。当時のLHC実験開始予定は2005年だった。

S0370-2693(00)01269-7/S00 AID:16748 Vol.(....)
ELSEVIER 2000/11/13 Pm:15/11/2000; 12:39
Doctopic: Experiments

PLB16748

P.1(1-17)
by:ELE p. 1



ELSEVIER

Physics Letters B(....)-....

PHYSICS LETTERS B

www.elsevier.nl/locate/npe

Observation of an excess in the search for the Standard Model Higgs boson at ALEPH

ALEPH Collaboration

R. Barate, D. Decamp, P. Ghez, C. Goy, S. Jezequel, J.-P. Lees, F. Martin, E. Merle, M.-N. Minard, B. Pietrzyk

LEP実験

運転時期: 1989-2000

電子・陽電子衝突器

重心系エネルギー: 90-209 GeV

周長: 27km (c.f. 山手線周長: 35km)

スイス、ジュネーブ郊外

LEP

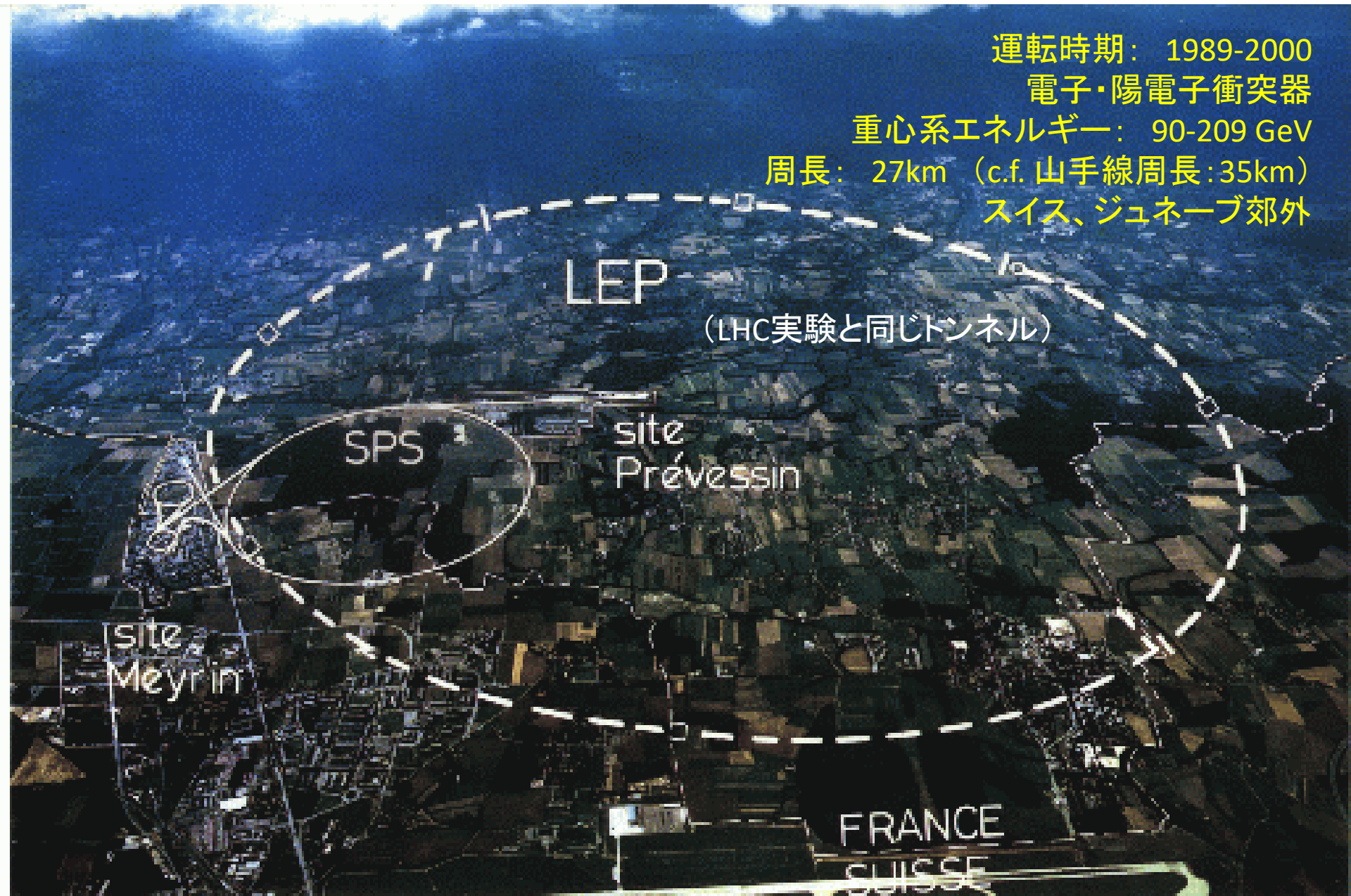
(LHC実験と同じトンネル)

SPS

site
Prévessin

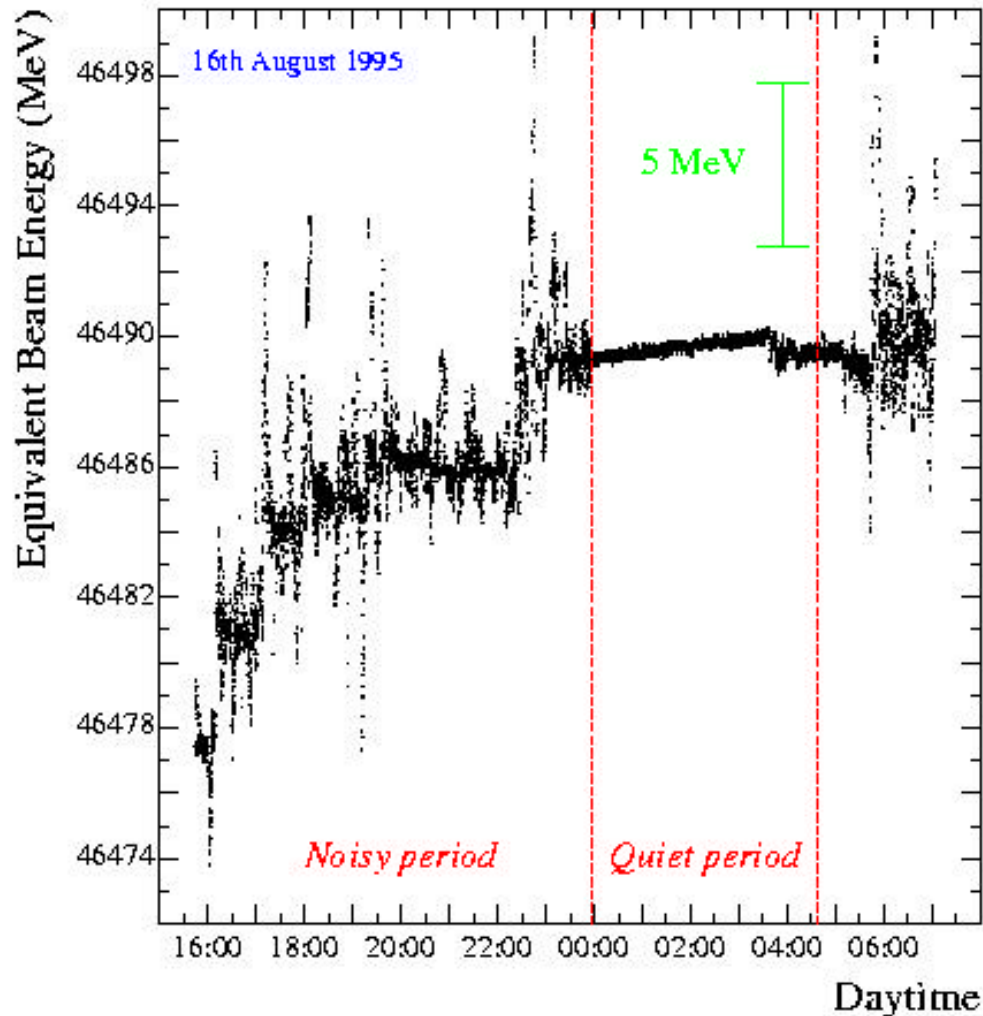
site
Meyrin

FRANCE
SUISSE



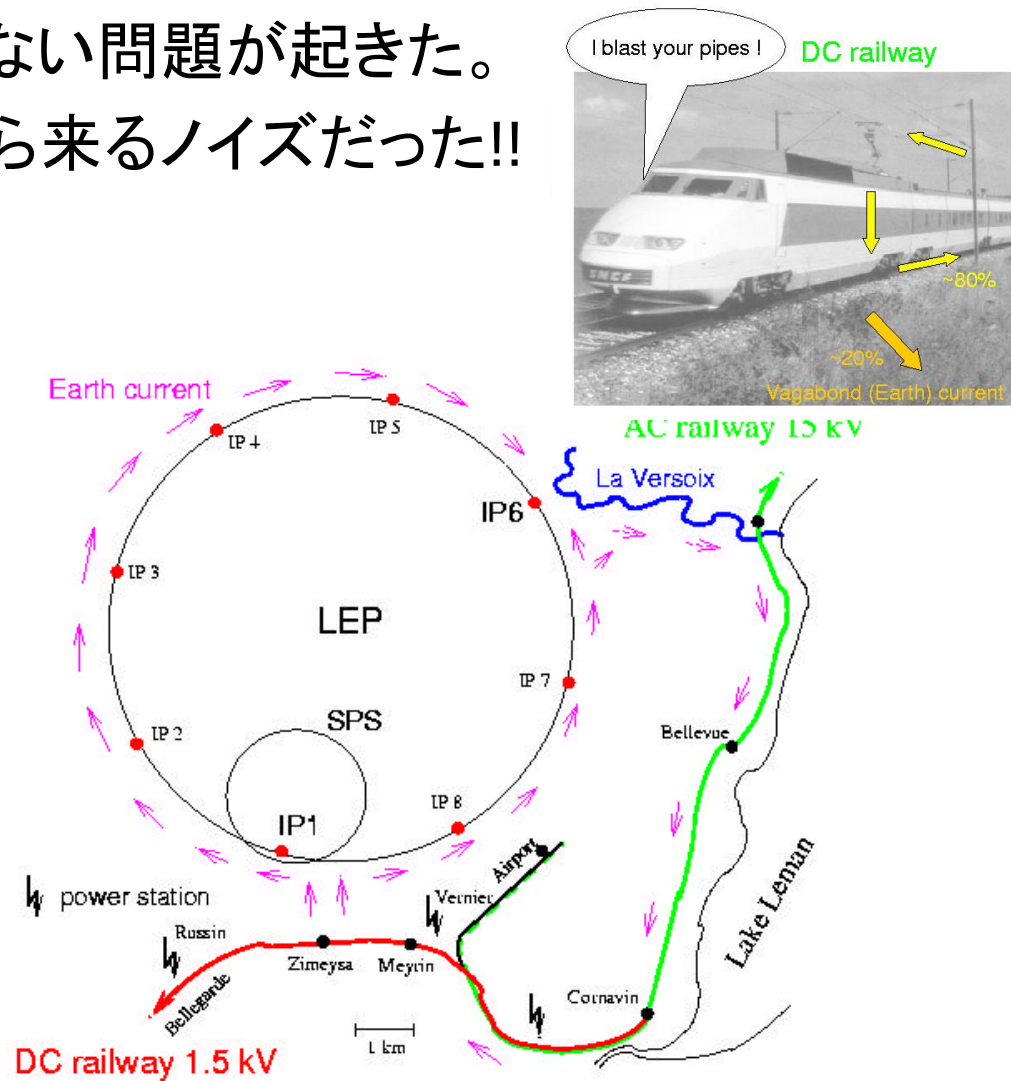
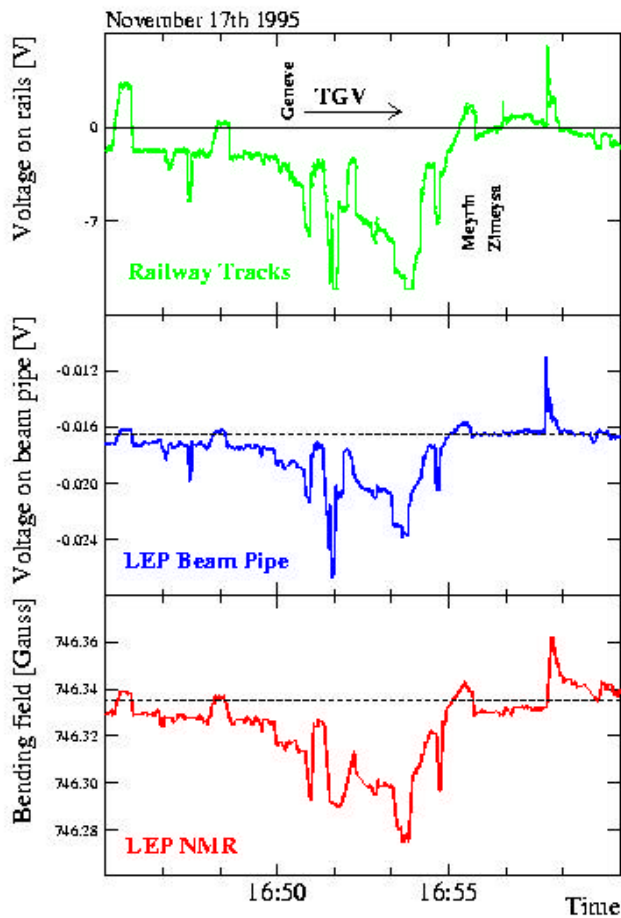
LEP実験、謎のノイズ

- LEP実験＝ジュネーブ郊外、山手線サイズの超大型加速器
- 粒子エネルギーが安定しない問題が起きた。

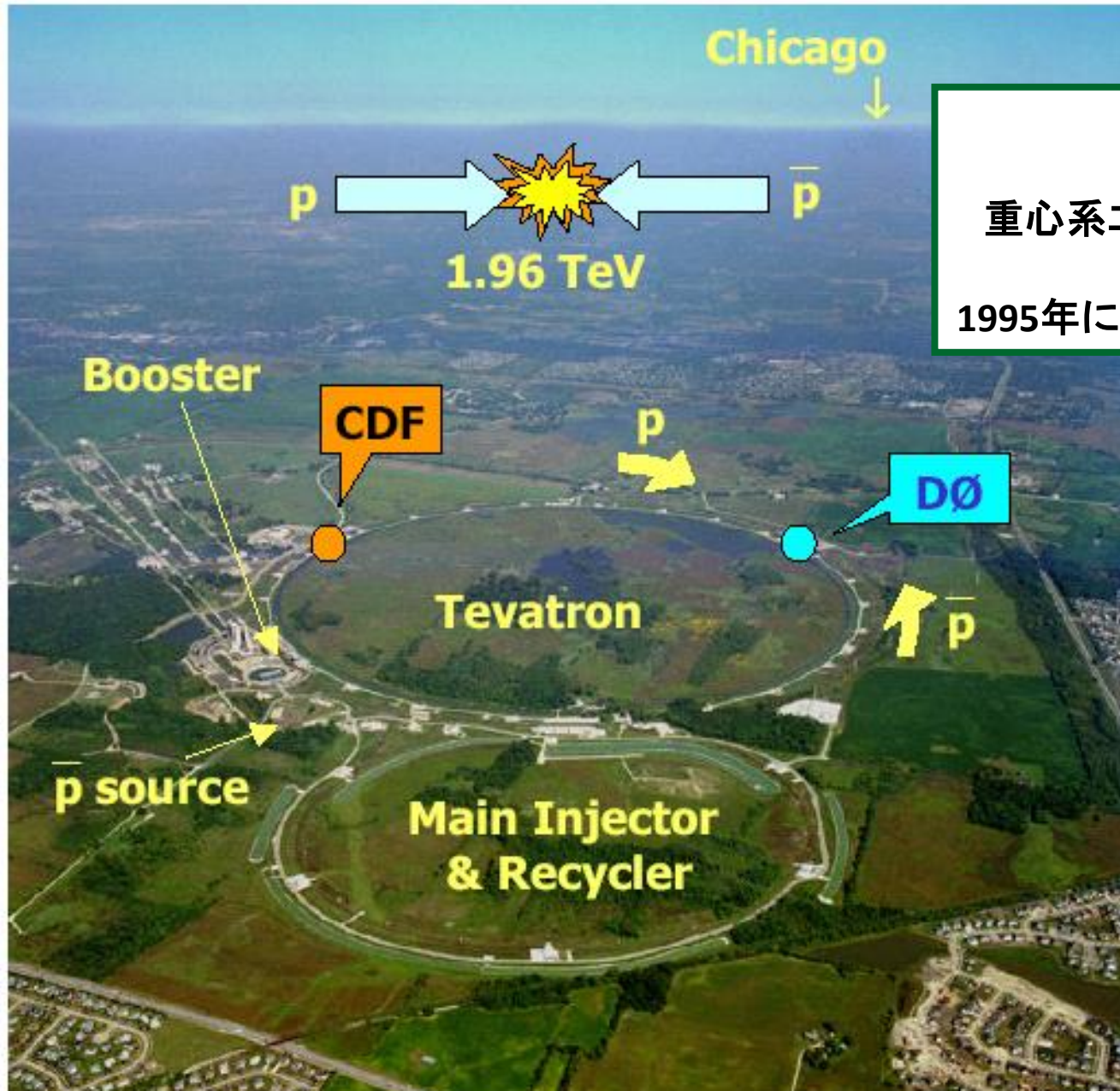


LEP実験、謎のノイズ 2

- LEP実験＝ジュネーブ郊外、山手線サイズの超大型加速器
- 粒子エネルギーが安定しない問題が起きた。
- 原因は、新幹線の電流から来るノイズだった!!



TEVATRON加速器



運転時期: 1985-2011

陽子・反陽子衝突

重心系エネルギー: 1.8-1.96 TeV

アメリカ、シカゴ郊外

1995年には、トップ・クォークを発見

テバトロン運転のあれこれ 1

- 落雷は常にTevatronの脅威であった。
 - 落雷が落ちると、超伝導電磁石にノイズが乗って誤動作するため、ビームが失われてしまう。



テバトロンの運転あれこれ 2



2001年8月5日 アライグマが高圧電源に
接触し、加速器の運転が停止

raccoon on frog farm transformer. They have disconnected the power to frog farm transformer feeding NUM1. They are in the process of disconnecting the TBM and backfeeding partial power from Pbar.



06:36:49-

2006年10月10日 研究所全体が停電



- djinn

— Tue Oct 10 06:39:57 comment by...djinn — The leftmost picture shows the cause of the glitch (one crispy critter). The other 2 pictures show the aftermath. Joe Pathiyil reports that it will take at least 3 hours to repair/replace the damaged switchgear. In the meantime, they will get B0 back on for the Cryo Guys. B0 will have to go off once the repairs are complete and before they can switch D0 back into the circuit.



テバトロン運転のあれこれ 3

- 2006年夏に水草が大繁茂。
- 水草がパイプに詰まり、テバトロンの冷却水の流れが止まりそうになった。

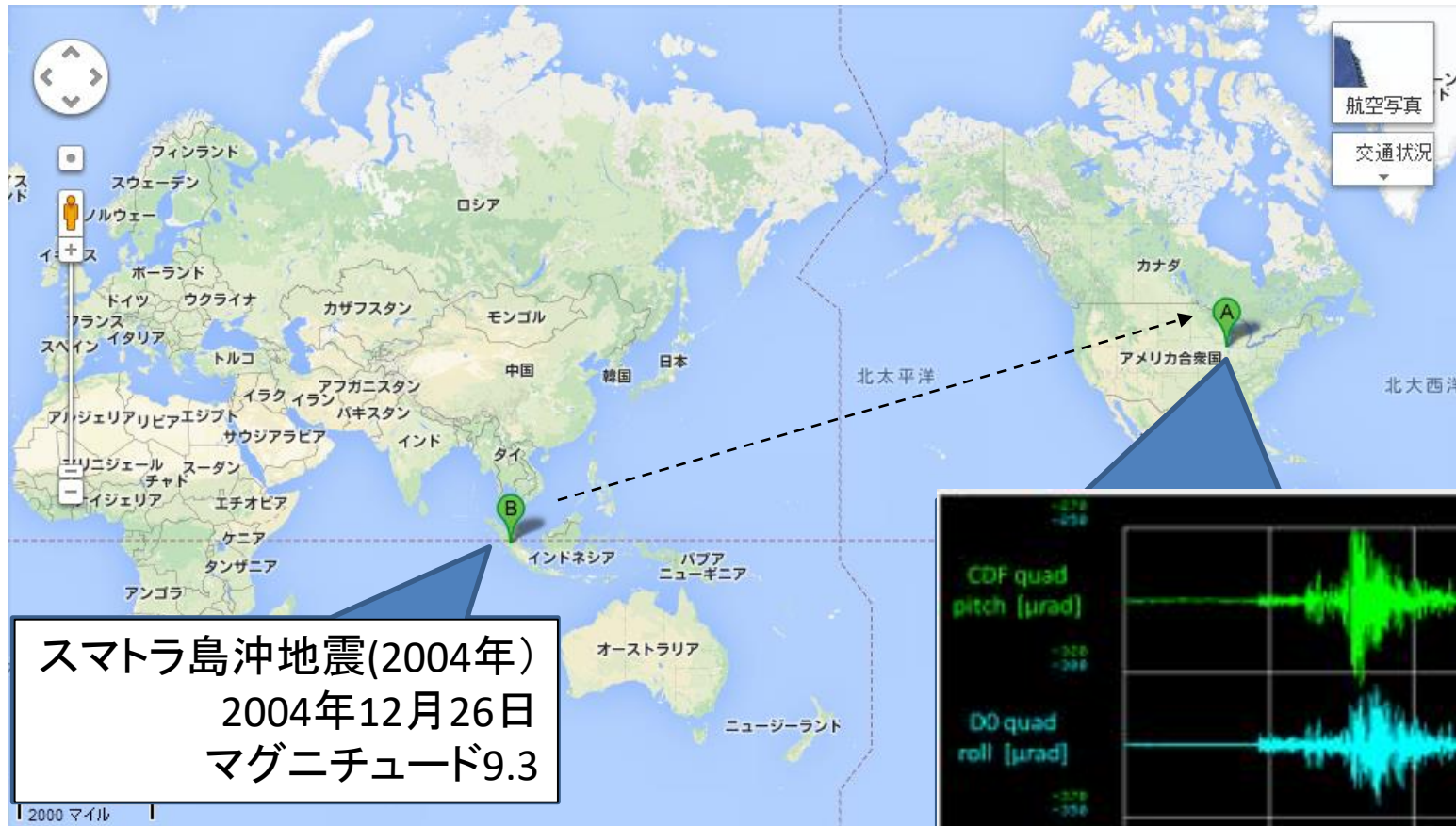


加速器部門のミーティングの
発表より:

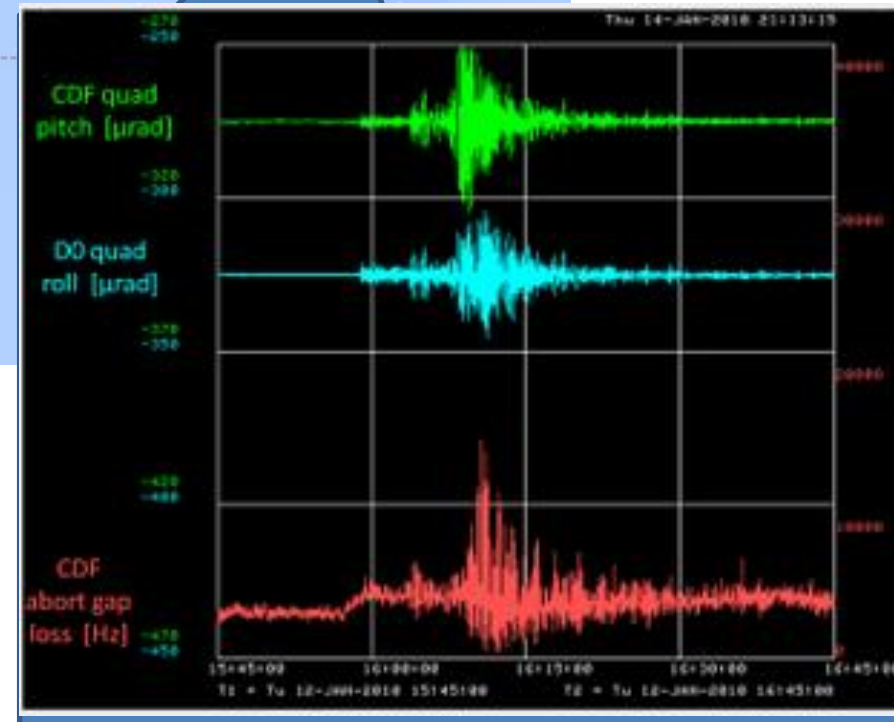
“These guys are keeping
our accelerator running!”



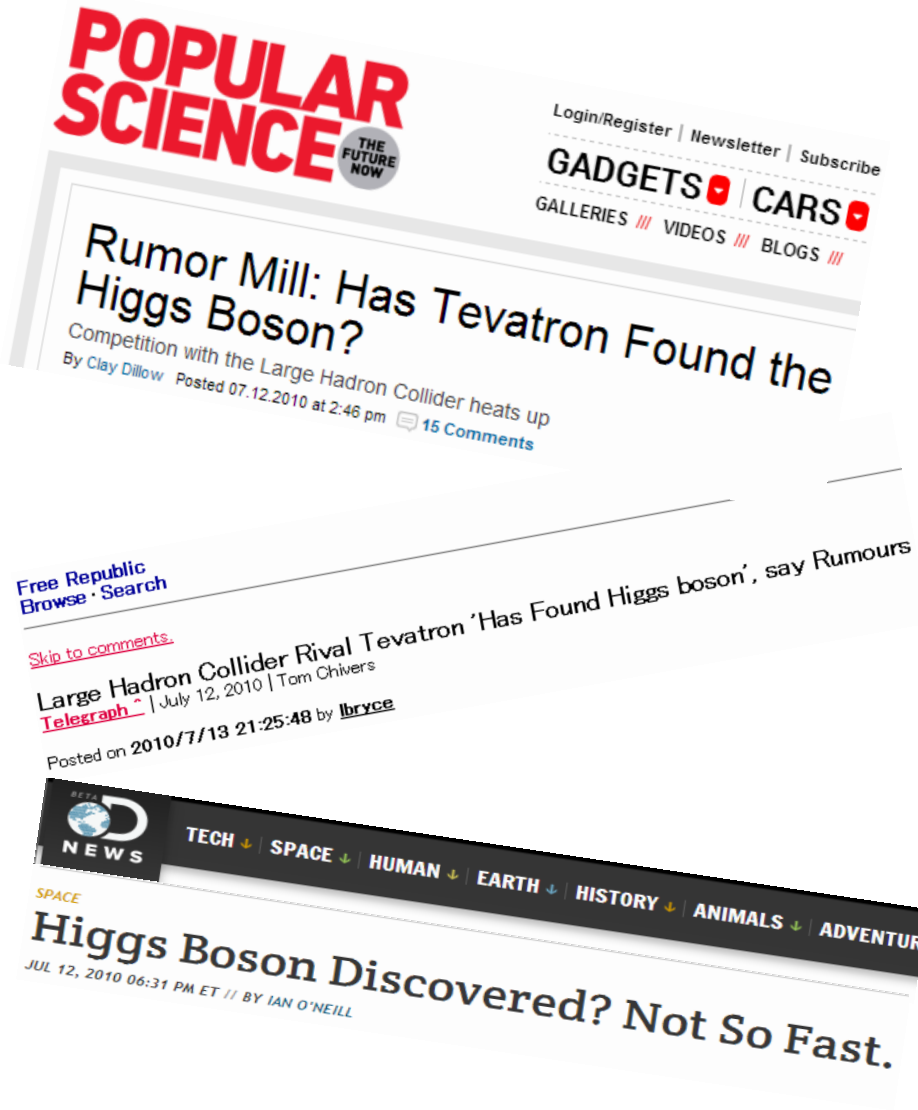
テバトロンのあれこれ 4



- 加速器はマイクロメータの精度でビームを運転している。
- 地球の裏側の地震からくる、微弱な振動を感知。

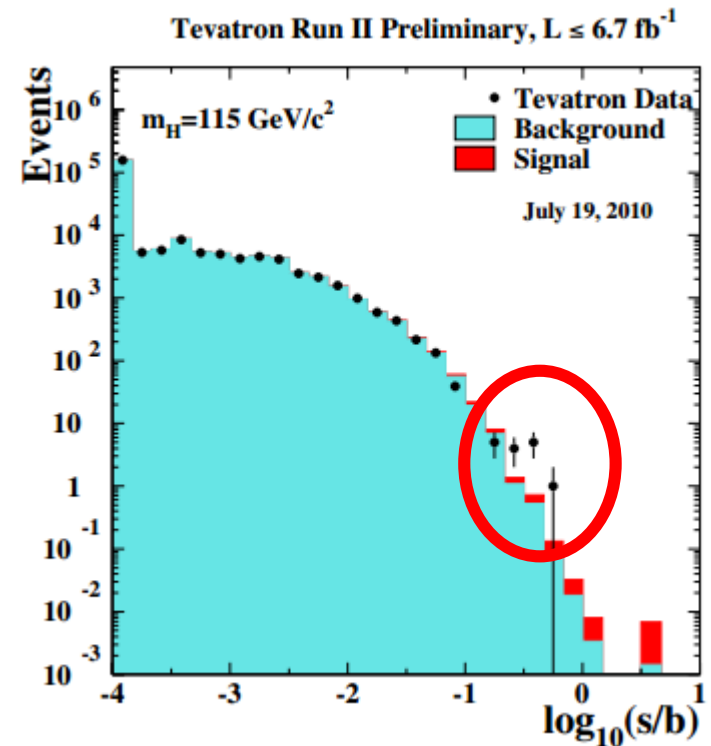
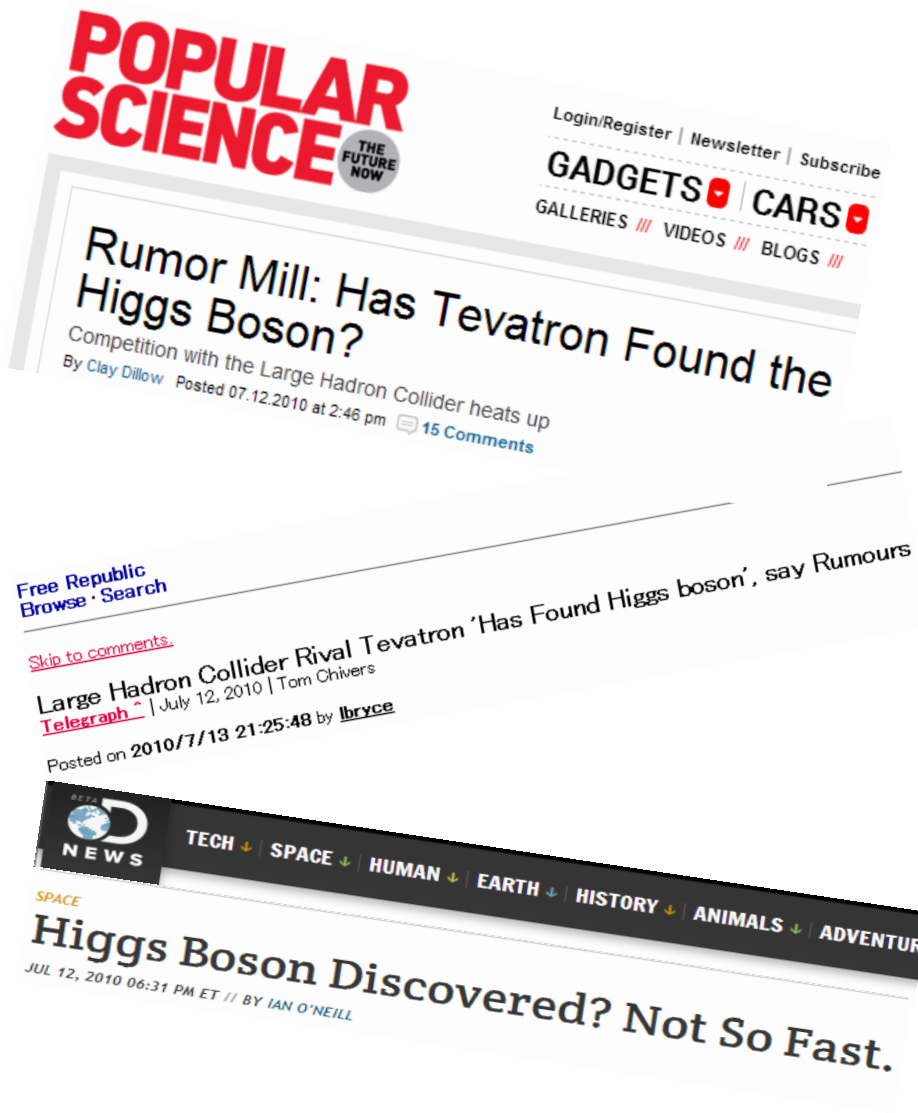


テバトロンでのヒッグス騒ぎ



テバトロンでのヒッグス騒ぎ

- 2010年夏の解析:
 - ちょっとだけヒッグス粒子っぽい信号が見えていたが、有意度は全然なし。



CDF実験、共同研究者がブログで情報を漏らしてしまった...。

LHC実験

アルプス山脈

ジュネーブ市街

円周27km

陽子を7TeVまで加速して正面衝突

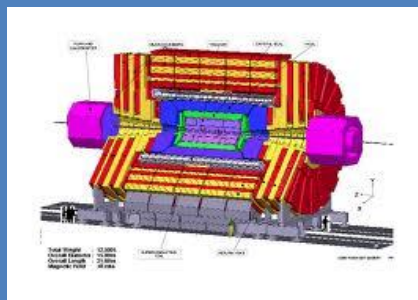
LHC実験

2008年9月10日 LHC加速器稼働開始

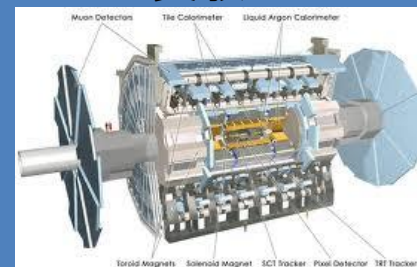
2009年3月30日 世界最高の重心系エネルギー3.5 TeVを達成



CMS実験



ATLAS実験



円周27km

陽子を7TeVまで加速して正面衝突

LHC加速器の事故

- 2008年9月20日 - 電気系統の欠陥による大電流で装置の一部が溶けて大量のヘリウムが漏洩。
- 39台の超伝導双極磁石、14台の四重極磁石等を交換。
- 徹底した再発防止策の検討・実装。
- 2009年11月20日 - 加速器運転再開。



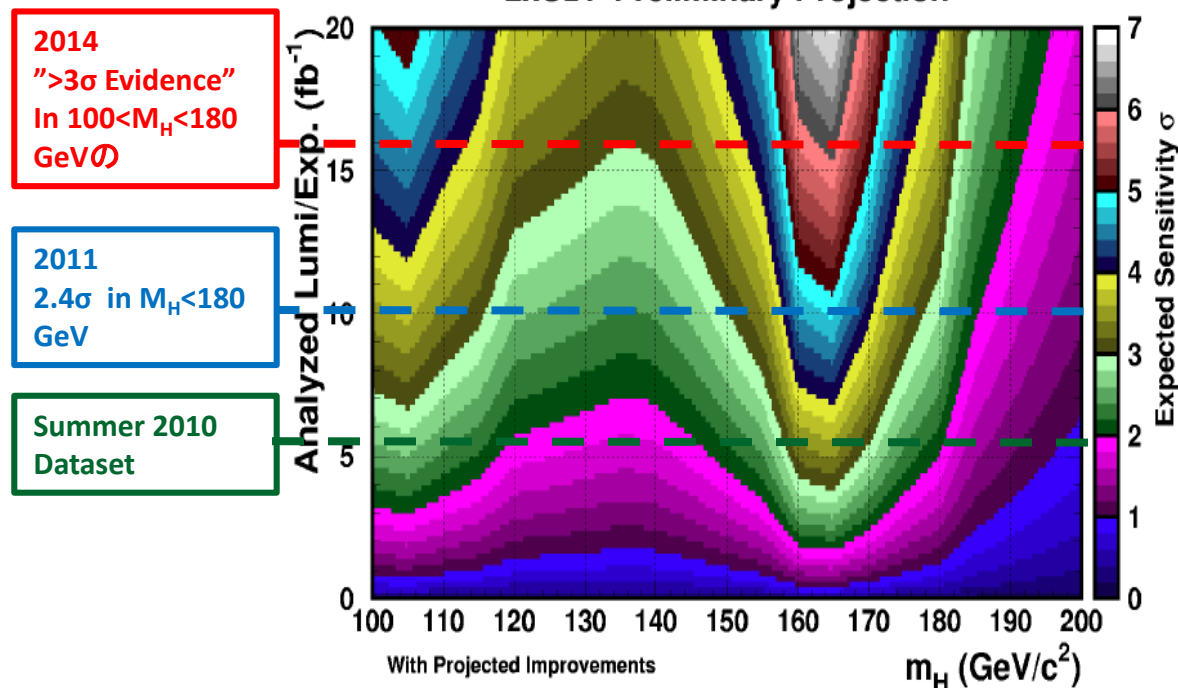
テバトロン実験延長の議論

- 2009～2010年の状況：
 - LHCの実験開始の不確定性：マグネットの事故、実験開始のスケジュール、検出器の校正はスムーズに行くか
 - テバトロンは順調にデータを取得
 - 先にテバトロンでヒッグス粒子が見つかる可能性

- テバトロン実験を2014年まで延長する議論が高まった。

SM Higgs Discovery Potential of Tevatron (2010 Projection)

2xCDF Preliminary Projection



テバトロン延長を断念

- 2011年1月11日、フェルミ研究所所長の決断

Tuesday, Jan. 11, 2011

[Subscribe](#) | [Contact Us](#) | [Archive](#) | [Classifieds](#) | [Guidelines](#) | [Help](#)Search [GO](#)

Calendar

[Have a safe day!](#)

Tuesday, Jan. 11
3:30 p.m.
DIRECTOR'S COFFEE
BREAK - 2nd Flr X-Over
THERE WILL BE NO
ACCELERATOR PHYSICS
AND TECHNOLOGY
SEMINAR TODAY

Wednesday, Jan. 12
12:30 p.m.
Physics for Everyone -
Ramsey Auditorium
Speaker: Patrick Fox,
Fermilab
Title: The hunt for the Higgs
3:30 p.m.
DIRECTOR'S COFFEE
BREAK - 2nd Flr X-Over
4 p.m.
[Fermilab Colloquium](#) - O
West
Speaker: Tom Malzbender,
Hewlett Packard
Title: Imaging the Antikythera

Special Announcement

**New year, new laboratory blogs
on *Quantum Diaries***



Thoughts on work and life from particle physicists from around the world.

**Tevatron will close at
the end of FY2011**

Highlighting these contributions, along with
the quirky world from physicists working
behind the scenes, has been the focus of
Quantum Diaries since it launched in 2005.
Quantum Diaries is sure to continue in that

**The present budgetary
climate did not permit ...**

started.
<http://www.quantumdiaries.org/>

Director's Corner

Tevatron
*Today's Director's
Corner includes more
details on yesterday's
Tevatron
announcement.*

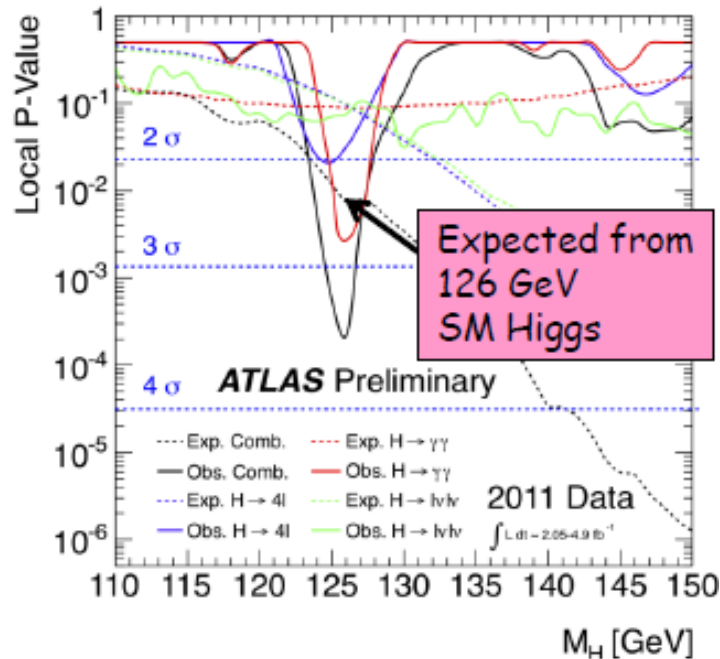
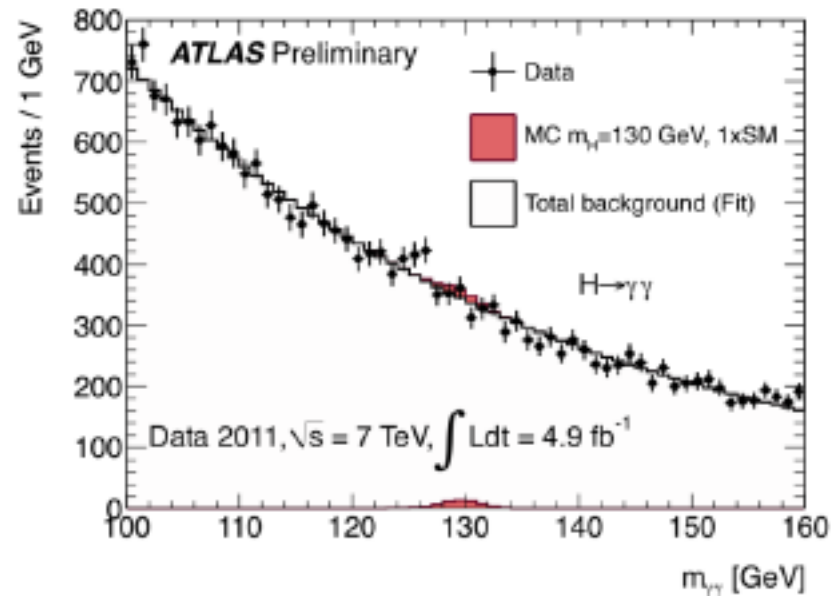
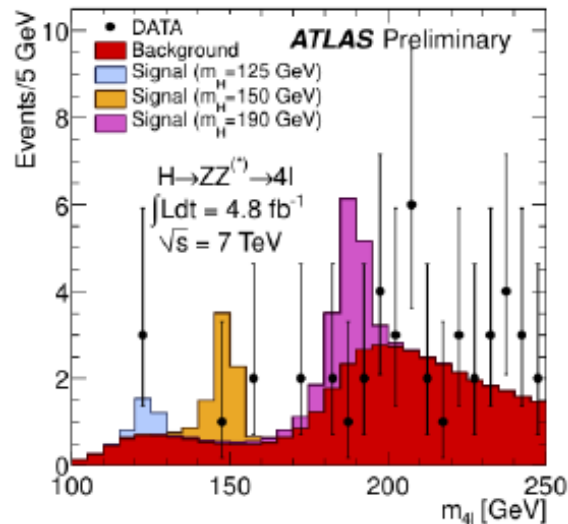


Pier Oddone

Yesterday we received
the [news](#) that we will
not receive funding for
the proposed Tevatron
extension and
consequently the
**Tevatron will close at
the end of FY2011** as was previously
planned. **The present budgetary climate did
not permit** the DOE to secure the additional
funds needed to run the Tevatron for three
more years as recommended by the High
Energy Physics Advisory Panel. Both
Tevatron collaborations did a splendid job
articulating the physics case and all the
relevant issues to both our Physics Advisory
Committee and the national advisory
committees, which led to the
recommendation to extend the Tevatron.

LHCでのヒッグス粒子の兆候

2011年12月13日 CERNのセミナーにおいて発表



ATLAS/CMSとも $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow WW$ チャンネルのコンビネーションで:

- ATLAS: local 2.8σ global 2.6σ

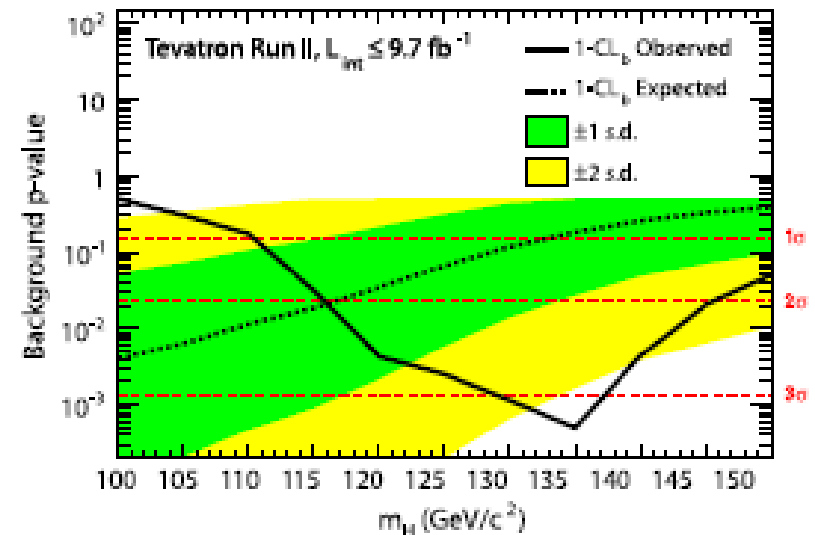
It's too early to draw definite conclusions
More studies and more data are needed
We have built solid foundations for the (exciting !) months to come

- CMS: 2.6σ local and 1.9σ global

テバトロンでのヒッグス粒子の兆候

- 2012年7月2日、フェルミ研究所のセミナー:
- テバトロン加速器のCDF、D0両実験の $H \rightarrow b\bar{b}$ モードをコンバインし、ヒッグス粒子の兆候を発表。
 - local 3.3σ 、global 3.1σ

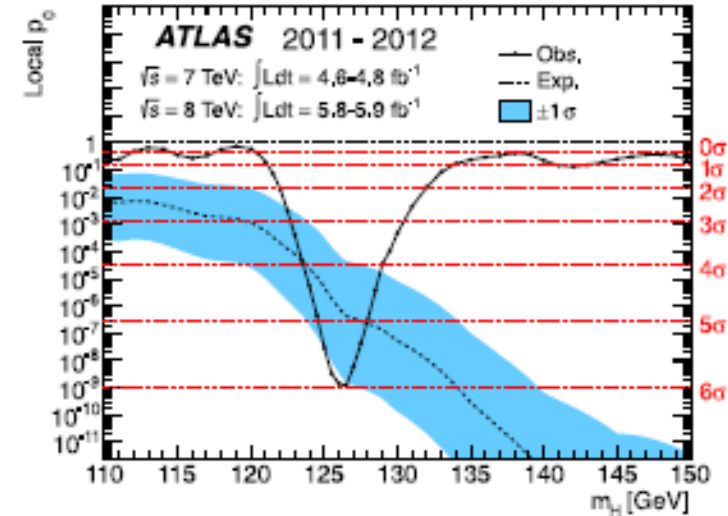
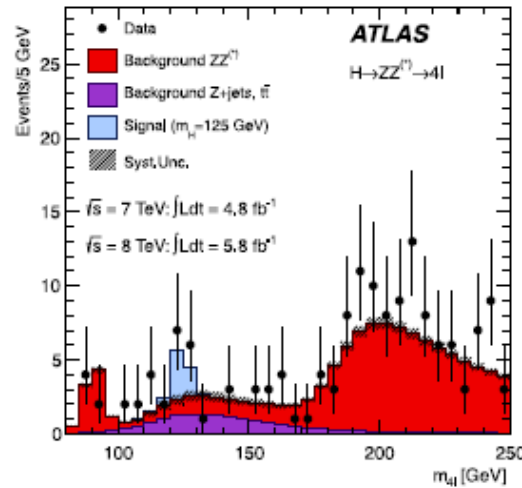
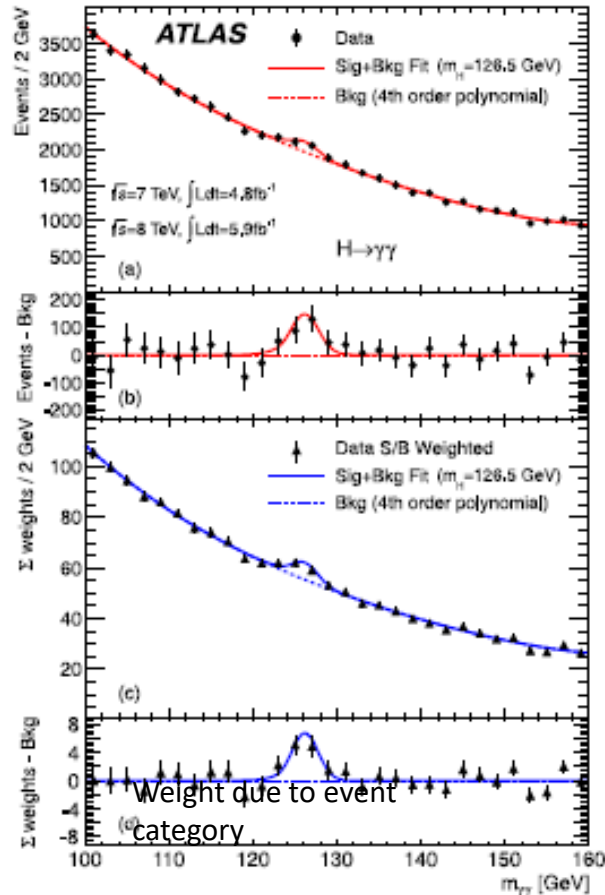
最近まで、物質粒子とヒッグス粒子との間の相互作用が存在することを直接的に示唆する、唯一の実験的根拠だった。



- LHCでは、ごく最近になってやっと、物質粒子とヒッグス粒子の間の相互作用を確認した。
- LHCで発見されたヒッグス粒子は、力を媒介する粒子だけに質量を与え、物質粒子の質量とは関係ないかもしれない議論などもあった。

LHCでのヒッグス粒子発見

- 2012年7月4日 CERNセミナーで発表



各実験単独で、同時に発見

ATLAS:

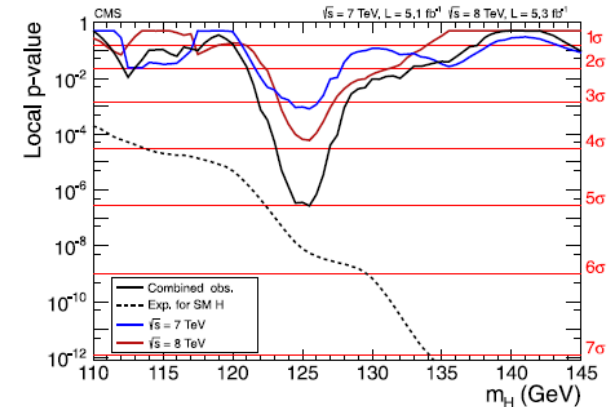
global 5.1σ , local 5.9σ .

$m_H = 126.0 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$

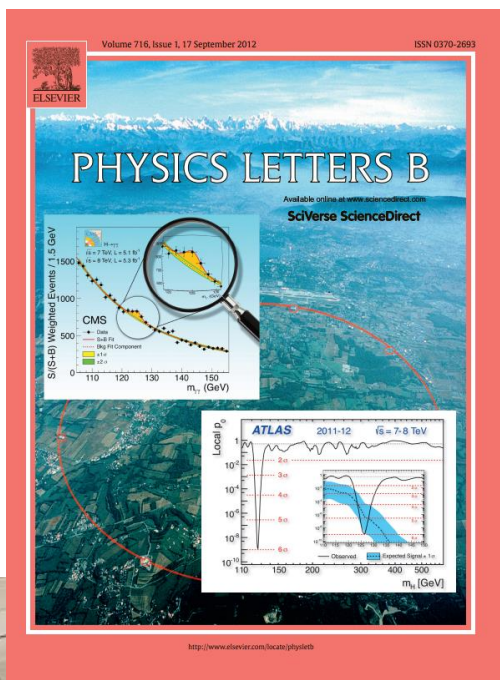
CMS:

global 4.6σ , local 5.0σ .

$m_H = 125.3 \pm 0.7 \text{ GeV}/c^2$



ヒッグス粒子発見の発表



2012年7月4日 LHC加速器の
ATLAS/CMS両実験が発見を報告
2013年 アングラール、ヒッグス
がノーベル物理学賞を受賞

ヒッグス粒子・真空の構造に関する研究は始まったばかり!



競合と強調について

「重要なのは誰がヒッグス粒子を発見するかでなく、ヒッグス粒子を発見・精密測定をして、真空の本質を理解することだ」

- 2000年代半ばには、LHC研究者がよく言っていた。
- LHCが走り出してからは、TEVATRON関係者がよくこの言葉をいうようになった。
- TEVATRONとLHCは、ヒッグス粒子の発見に向けて、熾烈な競争をした。
- 一方で、競争をしながらも、お互いに強い協力関係でもあった：
 - TEVATRONとLHCの実験グループの間で、一連の合同会議を、問題点・優れた点を情報交換し、お互いの実験を高めあった。
 - とくに、TEVATRON実験で経験を積み、その経験を生かしてLHC実験に移行、ヒッグス発見等に活躍した人は多い。

重い新粒子探索、2015年末の信号について

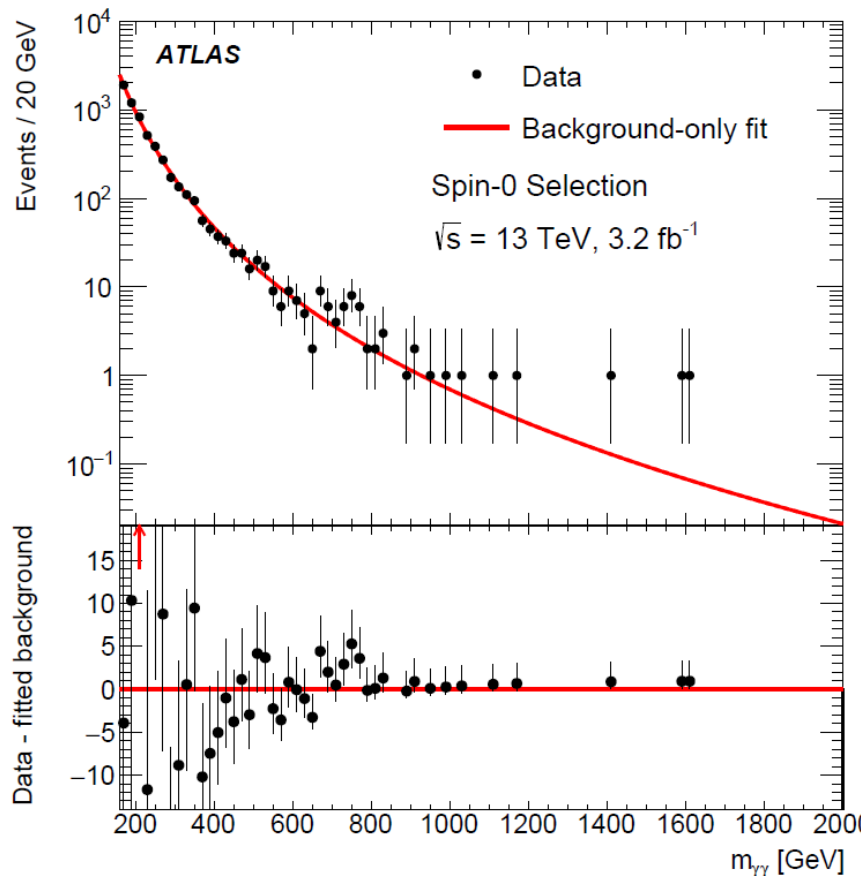
$\gamma\gamma$ に崩壊する重い新粒子の探索

$2\gamma, P_T^1 > 40, P_T^2 > 30$.

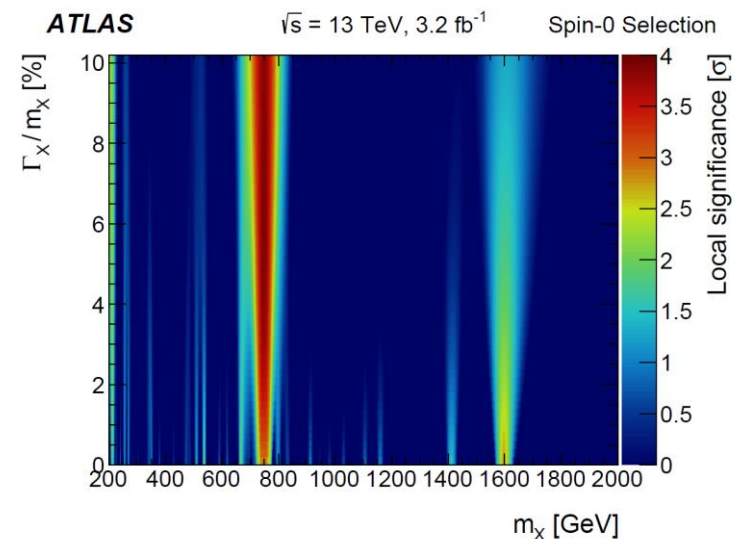
2通りのカットで解析。

- Spin-2 analysis: $P_T^\gamma > 55$.
- Spin-0 analysis: $P_T^1 > 0.4m_{\gamma\gamma}, P_T^2 > 0.3m_{\gamma\gamma}$.

ATLAS
2015 データ
3.2 fb⁻¹



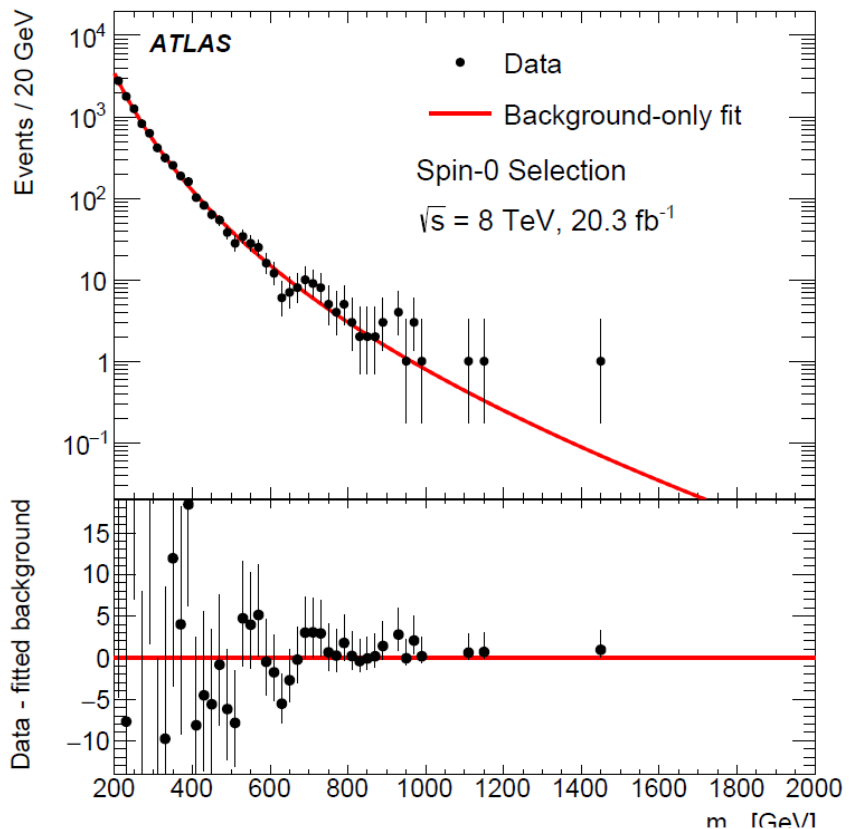
	Spin 0	Spin 2
Mass (GeV)	~750	~770
Local Significance	3.8 σ	3.9 σ
Global Significance	2.1 σ	2.1 σ



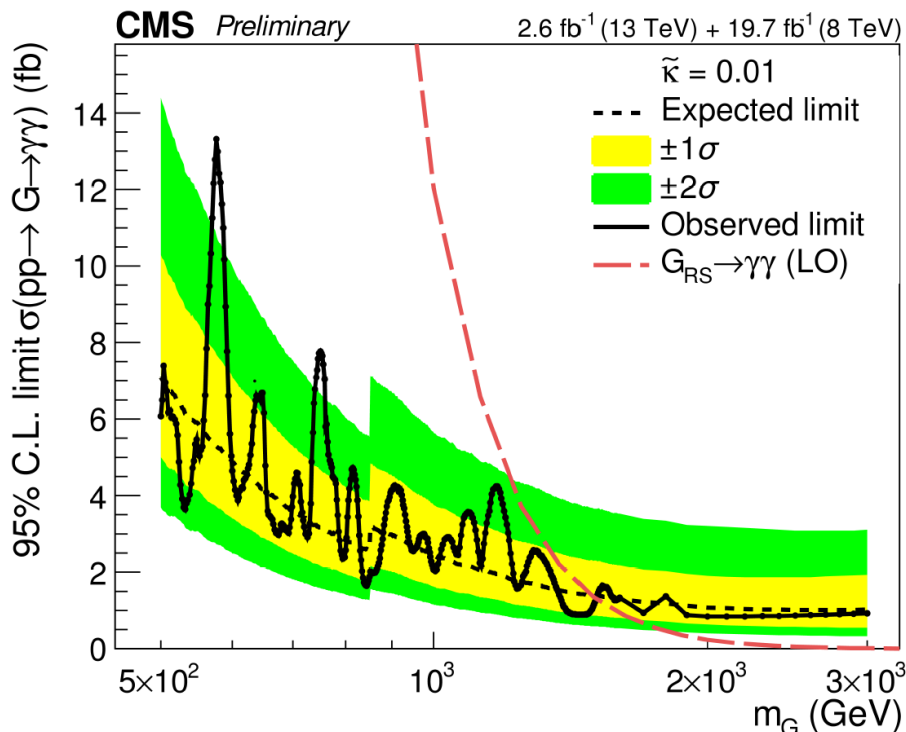
$\gamma\gamma$ に崩壊する重い新粒子の探索

ATLAS RUN 1とCMS

ATLAS 8TeV (2012) data



CMS 8TeV+13 TeV data



8TeVデータを足したことで、2015末より解析感度が20-40%上がった。

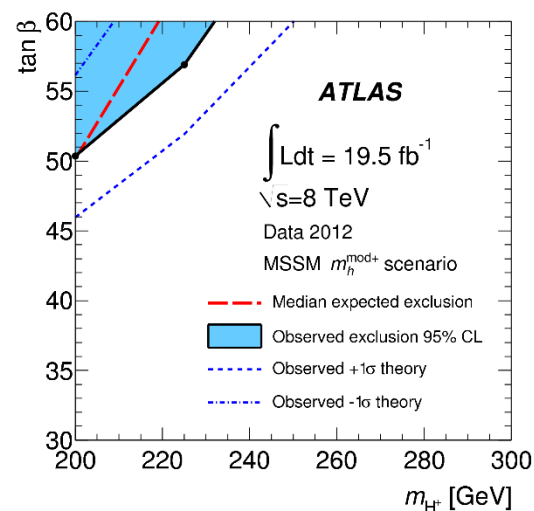
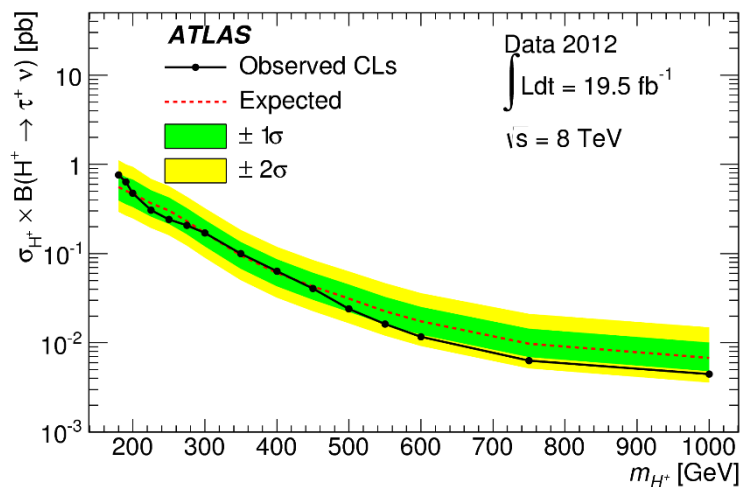
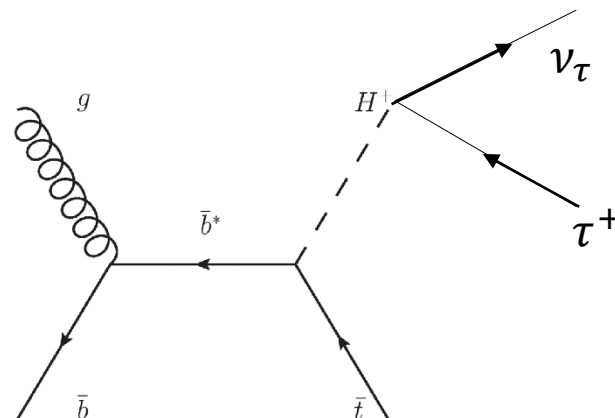
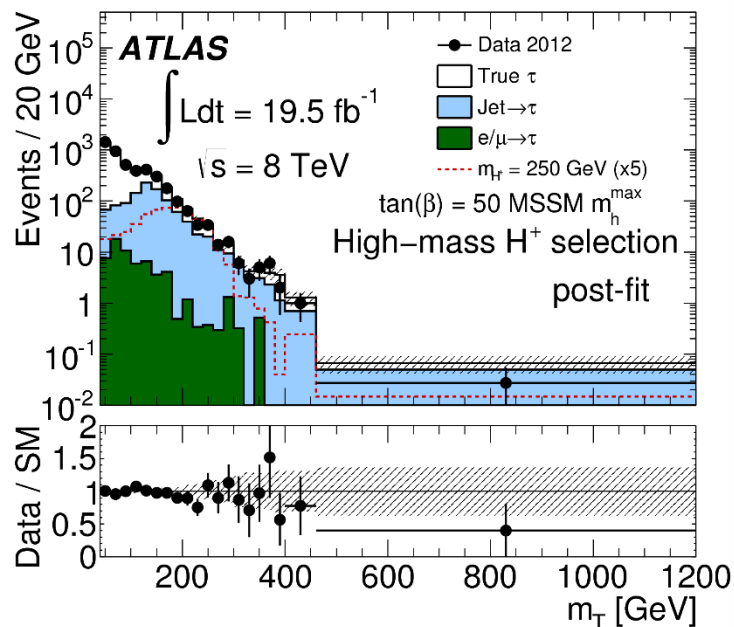
Local 3.4σ , global 1.6σ .

($m = 750 \text{ GeV}$, $\Gamma/m = 1.4 \times 10^{-4}$)

13 TeVデータだけだと、local 2.8 - 2.9σ だった

	Spin 0	Spin 2
Local Significance	2.1σ	1.2σ
Run2のエクセスをスケール	2.7σ	3.3σ

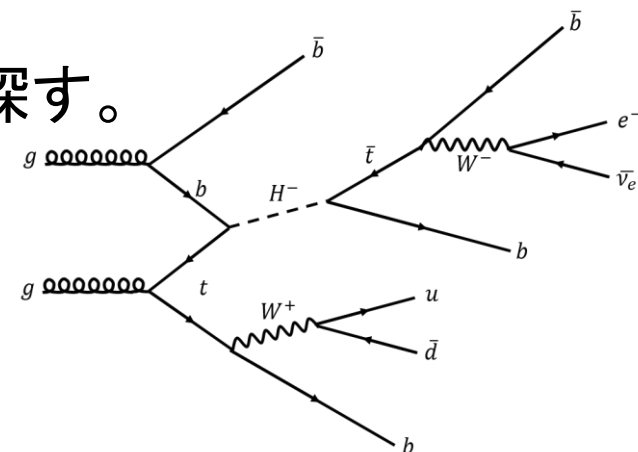
$H^+ \rightarrow \tau\nu$ の探索



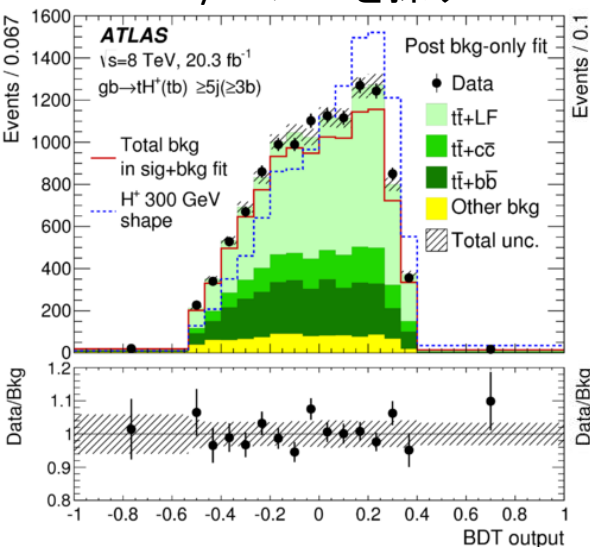
$H^\pm \rightarrow tb$ の探索

- 荷電ヒッグス粒子 $H^\pm$ は、超対称性理論を含め、多くの物理モデルで存在すべき粒子。
- 1レプトン+6ジェットの事象を解析して探す。

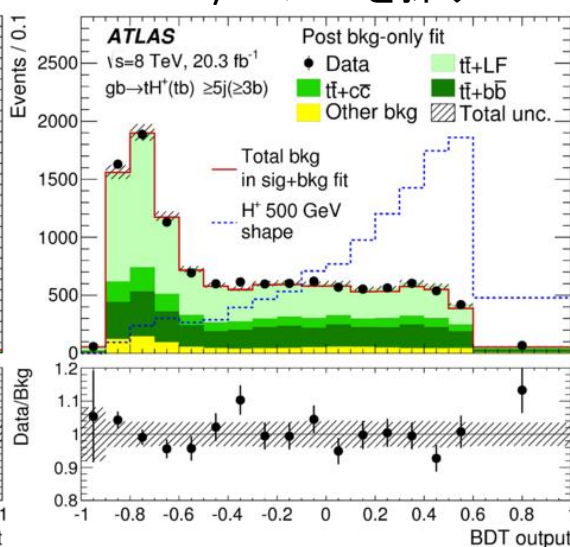
さまざまな $H^\pm$ 質量に対してMVA(他変数解析)によるdiscriminantをtrainingした。



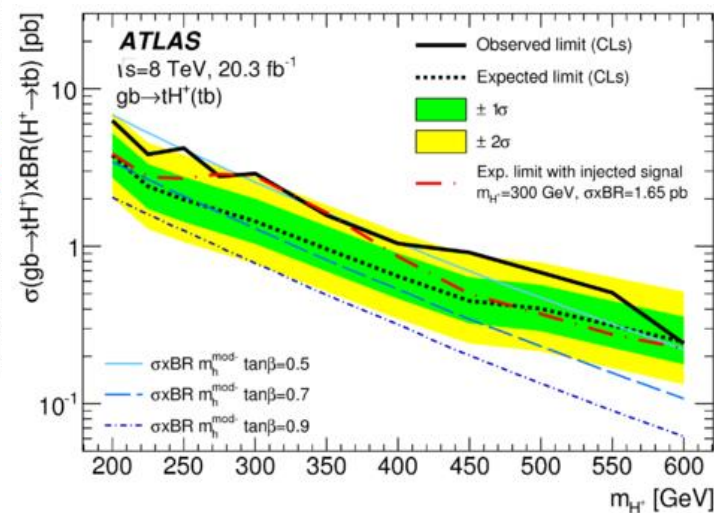
300 GeV/c²の $H^\pm$ を探す



500 GeV/c²の $H^\pm$ を探す



$H^\pm$ の生成頻度に対して制約



Run 2では、もっと良い感度で、もっと重い荷電ヒッグス粒子を探す。