

集中講義 1 ハドロンコライダー

- 素粒子実験と加速器
- LHC加速器とATLAS実験
- なぜハドロンコライダーなのか？

素粒子実験と加速器

何を知らりたいのか？

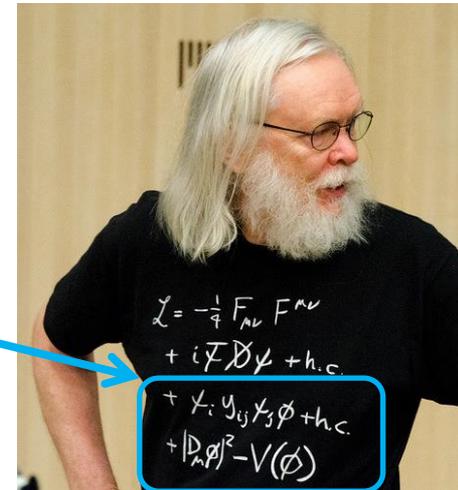
• 宇宙を構成する根本的な原理

– 素粒子標準理論の確立/検証

- ヒッグス粒子の発見で“知っている”ところまでは検証できた。

– でも、同時に“知っている”ことだけでは説明できない観測があることを知っている。

- 暗黒物質・暗黒エネルギーの存在
- 階層性問題
- 物質優勢の宇宙
- ニュートリノ質量
- 重力の量子化
などなど



これらをヒントに
理論屋さんと実験屋で協力して新物理探索

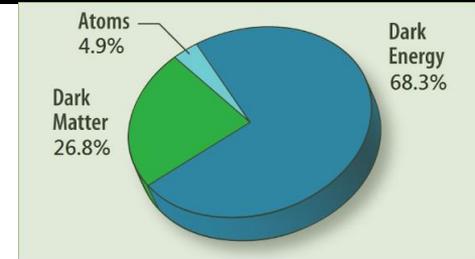
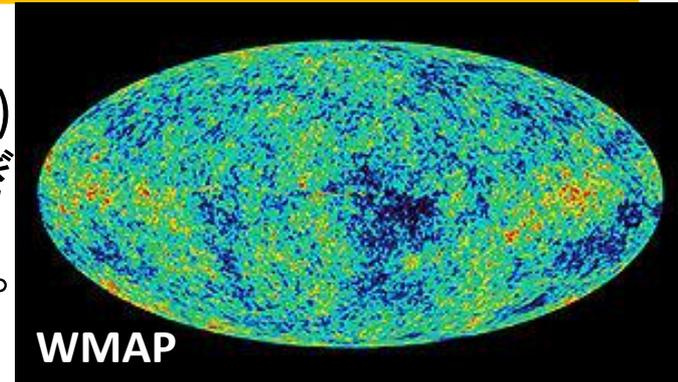


割と行き詰っている感があるのも事実で、
新しい実験や手法を考案、実現するよい機会

加速器実験にこだわる理由

非加速器実験における功績

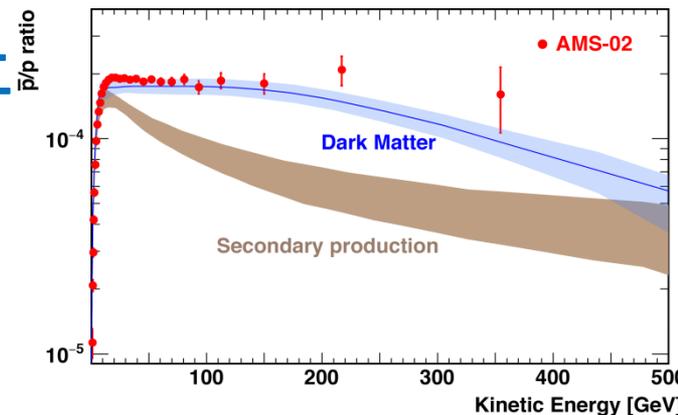
- 宇宙背景放射(Cosmic Microwave Background)
 - COBEやWMAPが行ったCMBの等方性や揺らぎの測定で宇宙の成り立ち、年齢(138億年)や暗黒物質、暗黒エネルギーの存在が示唆された。
- WIMPダークマター探索
 - XENON100, LUXなどの地下実験
 - Fermi-LAT, AMS-02 などの衛星やISSでの観測実験



加速器実験

- より正確に観測対象をコントロールするには、観測対象を生成する必要がある。
- 作り出すことに成功したら徹底的に調べることができる。
- とはいえ、 \sim GeV-TeVスケールは簡単ではない \rightarrow 大きな加速器が必要。

どのくらい?



加速器の基本原理

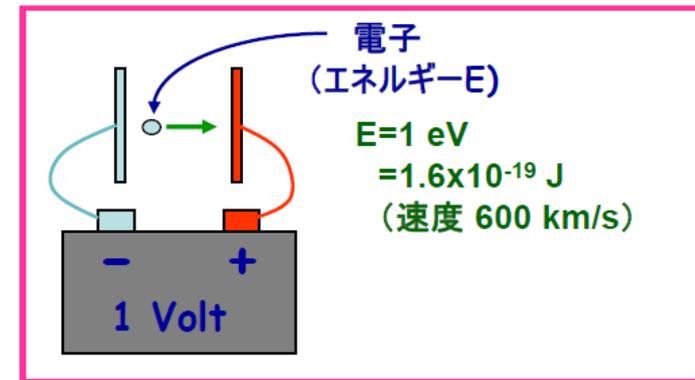
- 基本原理はローレンツ力

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

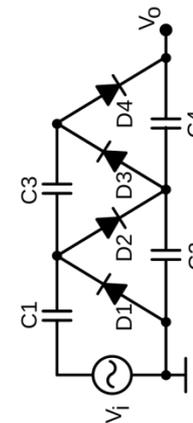
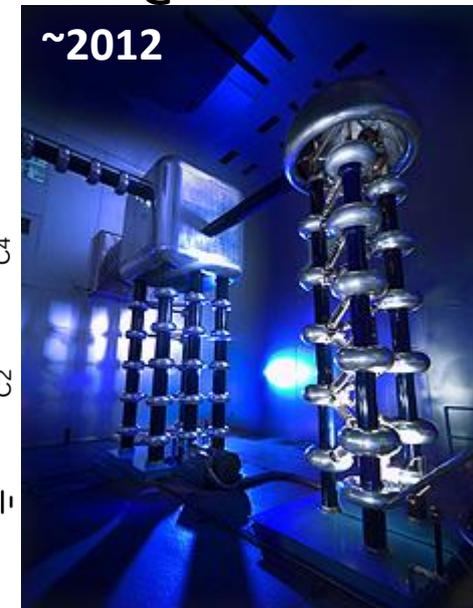
- 荷電粒子(電荷 q)に電場 \vec{E} をかけると力を受けて加速する。
- 速度 \vec{v} を持つ粒子は磁場 \vec{B} をつかって方向を変えたりビームを収束させることができる。

- 静電型加速器(1930-)の限界

- 乾燥空気の絶縁耐圧は $\sim 3\text{MeV/m}$
 - 1m で 3MeV ?! $\rightarrow 30\text{km}$ で 90GeV
- 高電圧整流回路と放電抑制がカギで、
 - コッククロフト・ウォルトン型加速器
 - 1951年ノーベル賞： $\sim 1\text{MeV}$
 - ヴァンデグラフ型加速器
 - 油漬けで $\sim 20\text{MeV}$ (2千万ボルト！)
- 加速空洞を用いて $>30\text{MeV/m}$ を実現
 - 線形コライダー $\rightarrow 30\text{km}$ で 1TeV



コッククロフトウォルトン
@Fermilab



サイクロトロンとシンクロトロン

サイクロトロン

- 一様磁場中に設置された二つの半円型電極(D)で繰り返し加速が可能。

$$qvB = mr\omega^2 = mr \left(\frac{v}{r}\right)^2, r = \frac{mv}{qB}$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- 古典論では周波数が変化しないが、相対論では $1/\gamma$ で振動数が変化。つまり、すぐに β が1に近づく電子の加速には向かない。→主に陽子加速器。(～500MeV)
- 高エネルギー化=巨大化
- 収束が非常に難しい。

シンクロトロン

- 粒子の軌道($r = \frac{mv}{qB}$)を一定に保つために粒子運動量の増加に伴い磁場Bを大きくする必要がある。周波数 ω も増大する。
- 繰り返し加速できる。
- 基本的に加速空洞(加速)と偏向電磁石(曲げる)および収束磁石(しぼる)からなる。

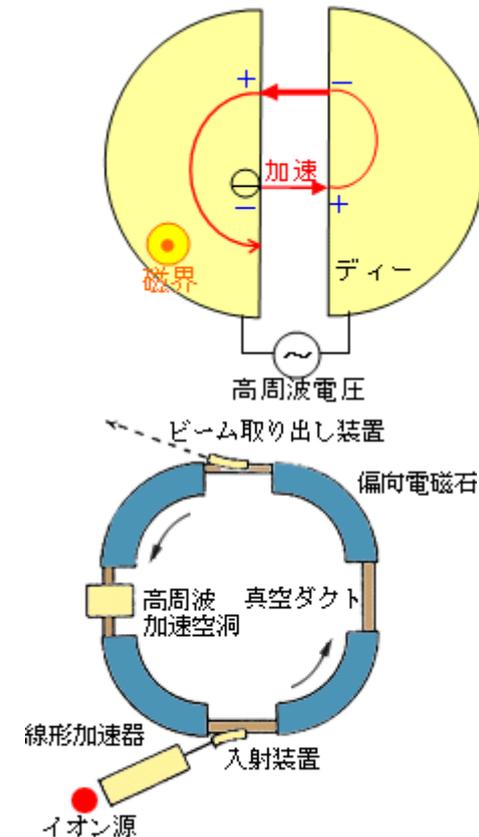
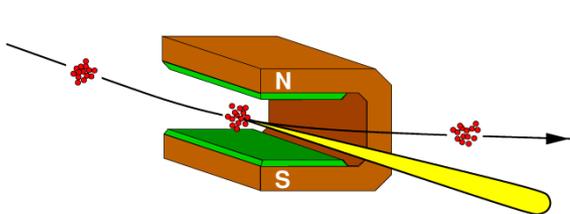


図1.シンクロトロンの構成

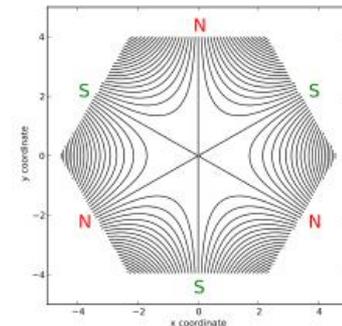
電磁石の種類

- 偏向(双極)電磁石

- 一方向の磁場で粒子を曲げる(Bending Magnet)

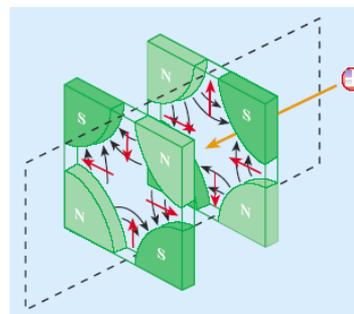
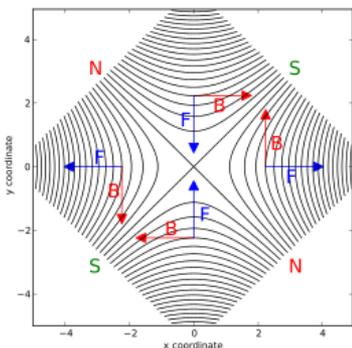


c.f. 6極電磁石
軌道のずれの補正



- 四重極電磁石

- 4つの磁極を持っていて一方向にビームを絞る
- 四重極電磁石は90度回転した二層セットで使う。



シンクロトロンエネルギー限界

• シンクロトン放射

- 荷電粒子が加速されると光を出してエネルギーを失う

$$\Delta E \propto \frac{(E/m)^4}{\rho} \quad (\text{電子と陽子では} 1.5 \times 10^{13} \text{倍違う!})$$

$$\text{電子加速の時: } \Delta E [\text{keV}] \approx 88.5 \frac{(E[\text{GeV}])^4}{\rho[\text{m}]}$$

- **特に電子シンクロトロンはエネルギーを上げることが非常に困難** : LHCリングで、 $E=100\text{GeV}$ $\rho=5\text{km}$ で 2GeV/周 のエネルギー損失... 13TeV 加速器にすると $5 \times 10^5 \text{TeV}$ の損失?! → 不可能...

• 偏向電磁石(Bending Magnet)

- 陽子加速器なら 1.5×10^{13} 倍低いシンクロトン放射 → 100GeV 電子加速器が可能なら 10^{12}TeV くらいまでいける? → 残念ながらダメ

- 荷電粒子の磁場中での運動量と曲率半径の関係は、

- $P[\text{GeV}] = 0.3B[\text{T}]\rho[\text{m}]$

- **現在のところ量産できる超伝導電磁石は8Tくらいが限界...**

- LHCのリングに 50TeV の加速器を作るには $\sim 35\text{T}$ の磁石が必要...

最後に少し話します。

結論: 電子加速器も陽子加速器も半径を大きくする必要がある。

加速器とコライダー

- Fixed target experiment
 - 加速した粒子を静止した標的に衝突させる実験
- Collider experiment
 - 加速した粒子同士を衝突させる実験

重心系エネルギー

Fixed target : $\sqrt{s} = \sqrt{2mE}$

Collider : $\sqrt{s} = 2\sqrt{E_1E_2}$

- LHC : $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ をFixed targetで実現するには、 $m=1\text{GeV}$ として85PeV (85000TeV) : **コライダーがお得**

- Belleのエネルギー

$$E_1=8\text{GeV} \quad E_2=3.5\text{GeV} \rightarrow \sqrt{s}=10.58\text{GeV}$$

$$\approx \Upsilon(4s) \text{の質量} \sim 10.5794 \pm 0.0012 \text{GeV}$$

- ただし、加速した粒子を衝突させるには高度な技術が必要。

4元運動量

$$p = (\vec{p}, E)$$

$$m = \sqrt{E^2 - |\vec{p}|^2}$$

$$(0,0,E,E) + (0,0,0,m) = (0,0,E,E+m)$$

$$s = m^2 = (E+m)^2 - E^2 \sim 2mE \quad (m \ll E \text{の時})$$

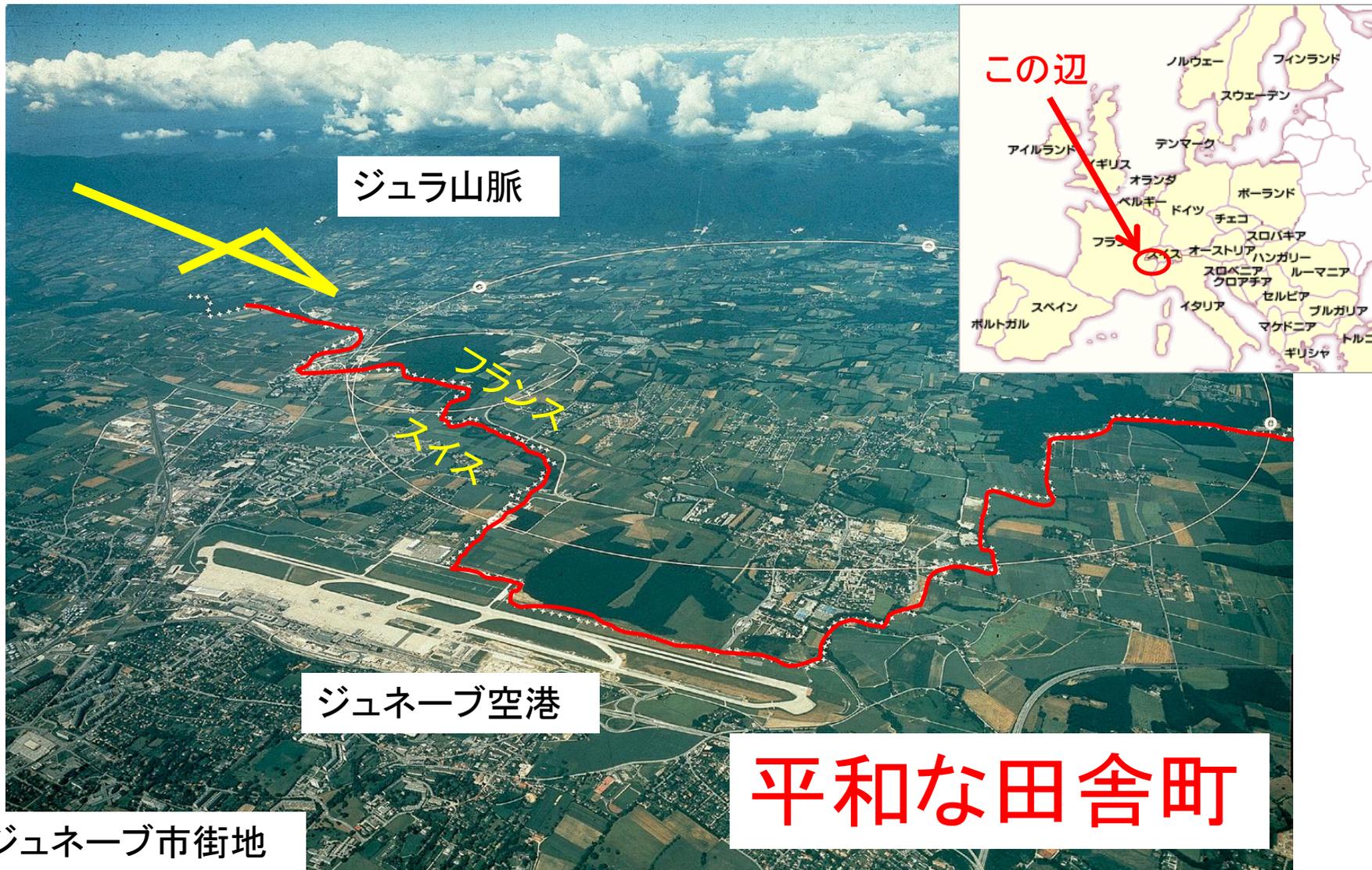
$$(0,0,E_1,E_1) + (0,0,-E_2,E_2)$$

$$= (0,0,E_1-E_2,E_1+E_2)$$

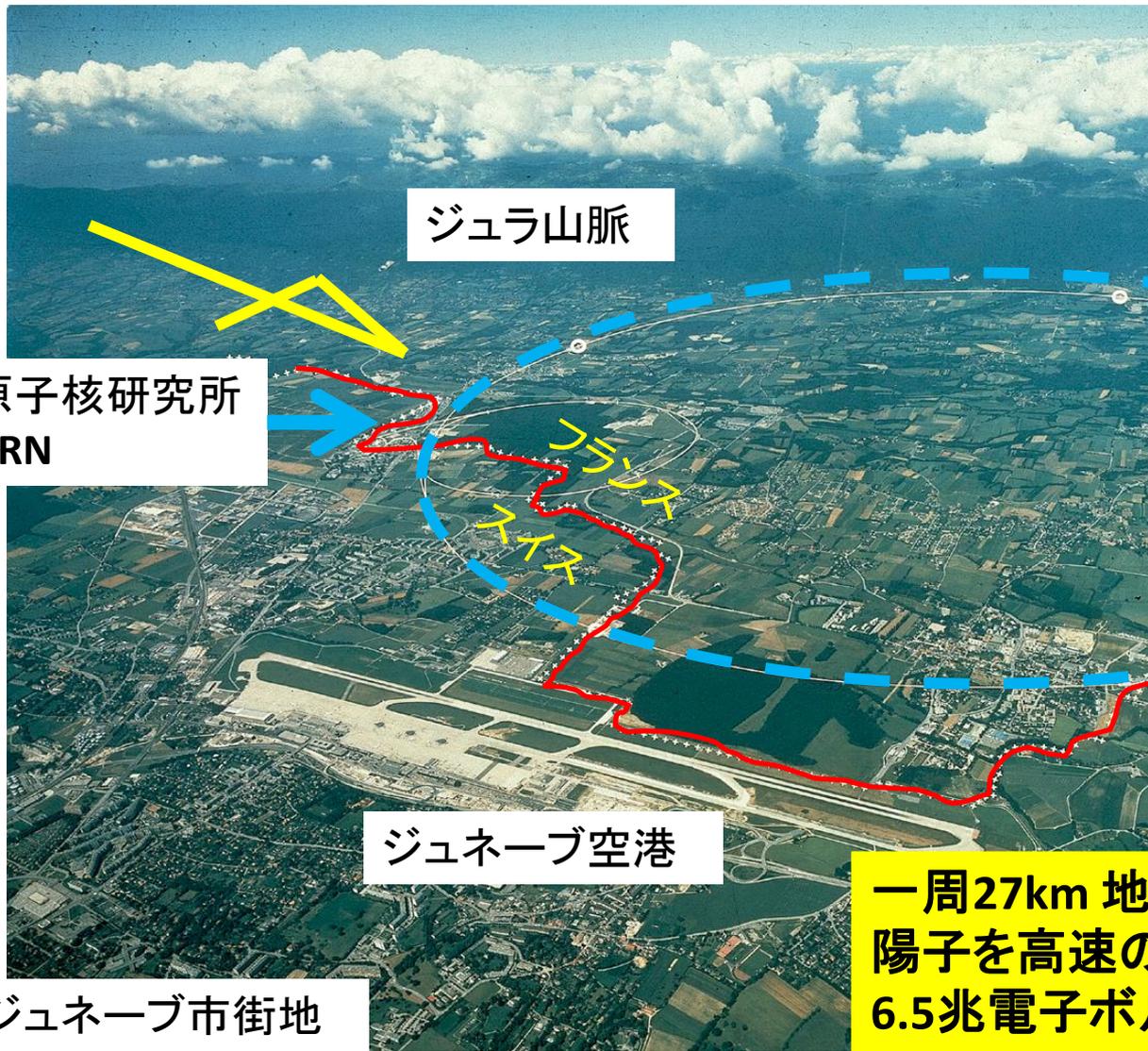
$$s = m^2 = (E_1+E_2)^2 - (E_1-E_2)^2 \sim 2E_1E_2$$

LHC加速器とアトラス実験

世界最大の加速器 LHC

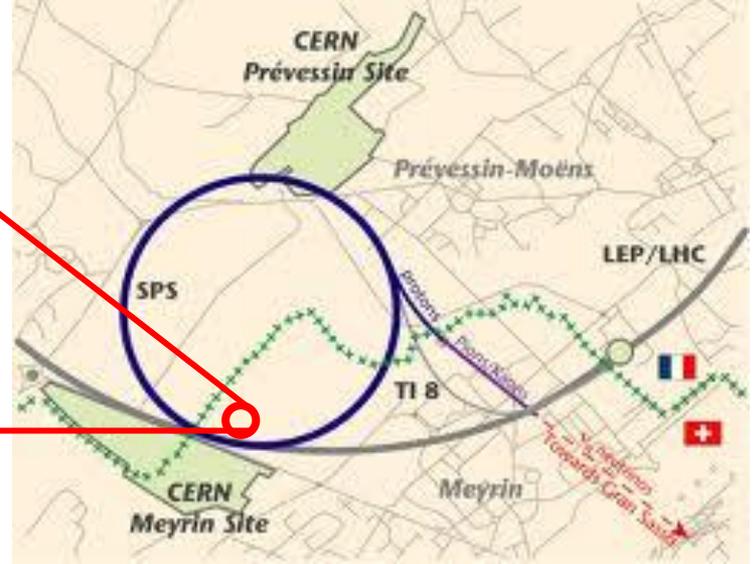


世界最大の加速器 LHC



一周27km 地下100mのトンネル
陽子を高速の99.9999988%まで加速
6.5兆電子ボルト(TeV)

余談(CERNの生活編)



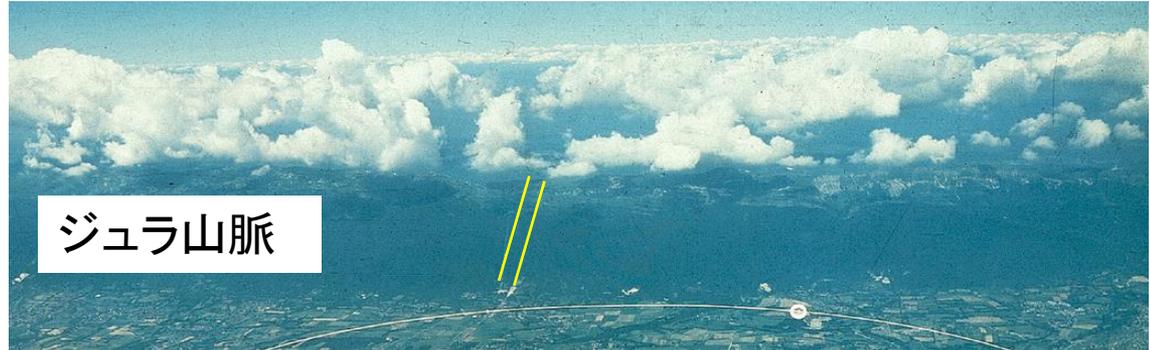
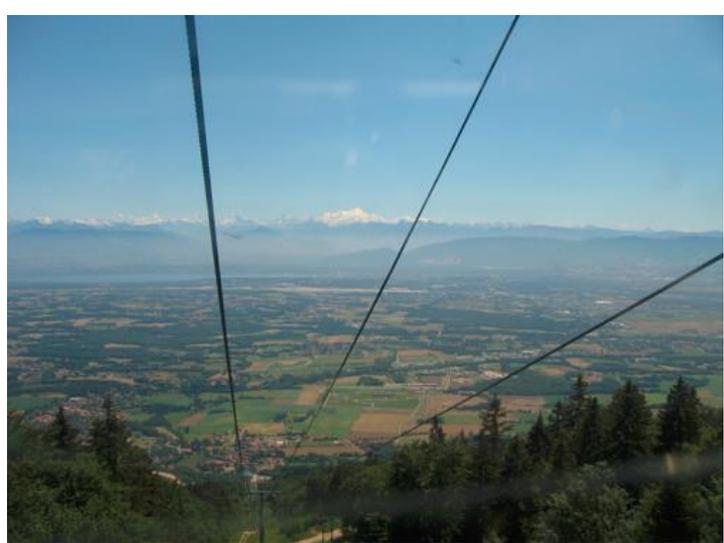
ダン・ブラウン 天使と悪魔の舞台



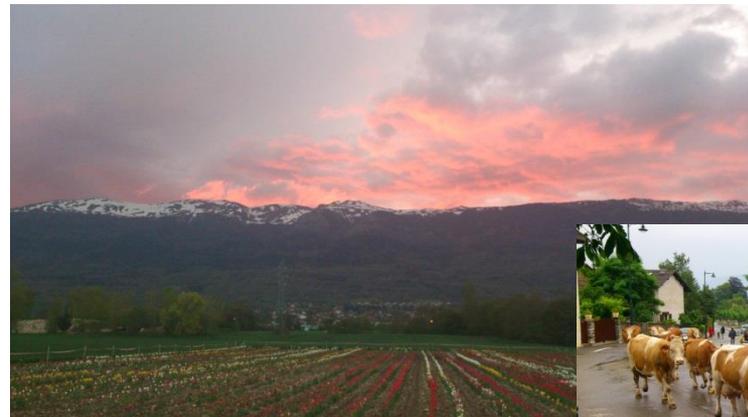
最近、路面電車もCERNまで開通！



余談(CERNの生活編)



ロープウェーを上がると、
夏はハイキング冬はスキー場
アンモナイトなどの化石がごろごろしてます。



ふもとの村



ちょっと休憩(CERNの生活編)

CERNから車で一時間くらい

モン・ブラン(ヨーロッパ最高峰)

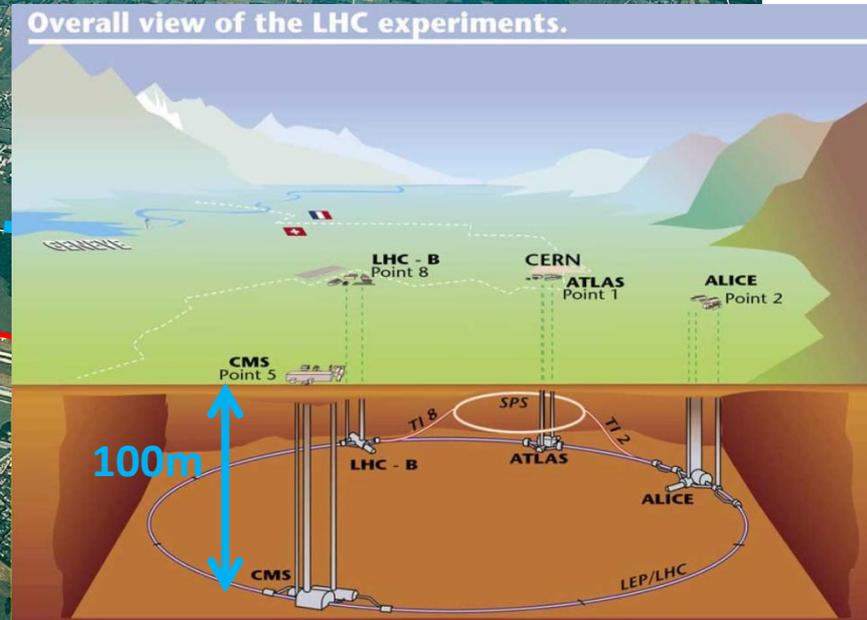
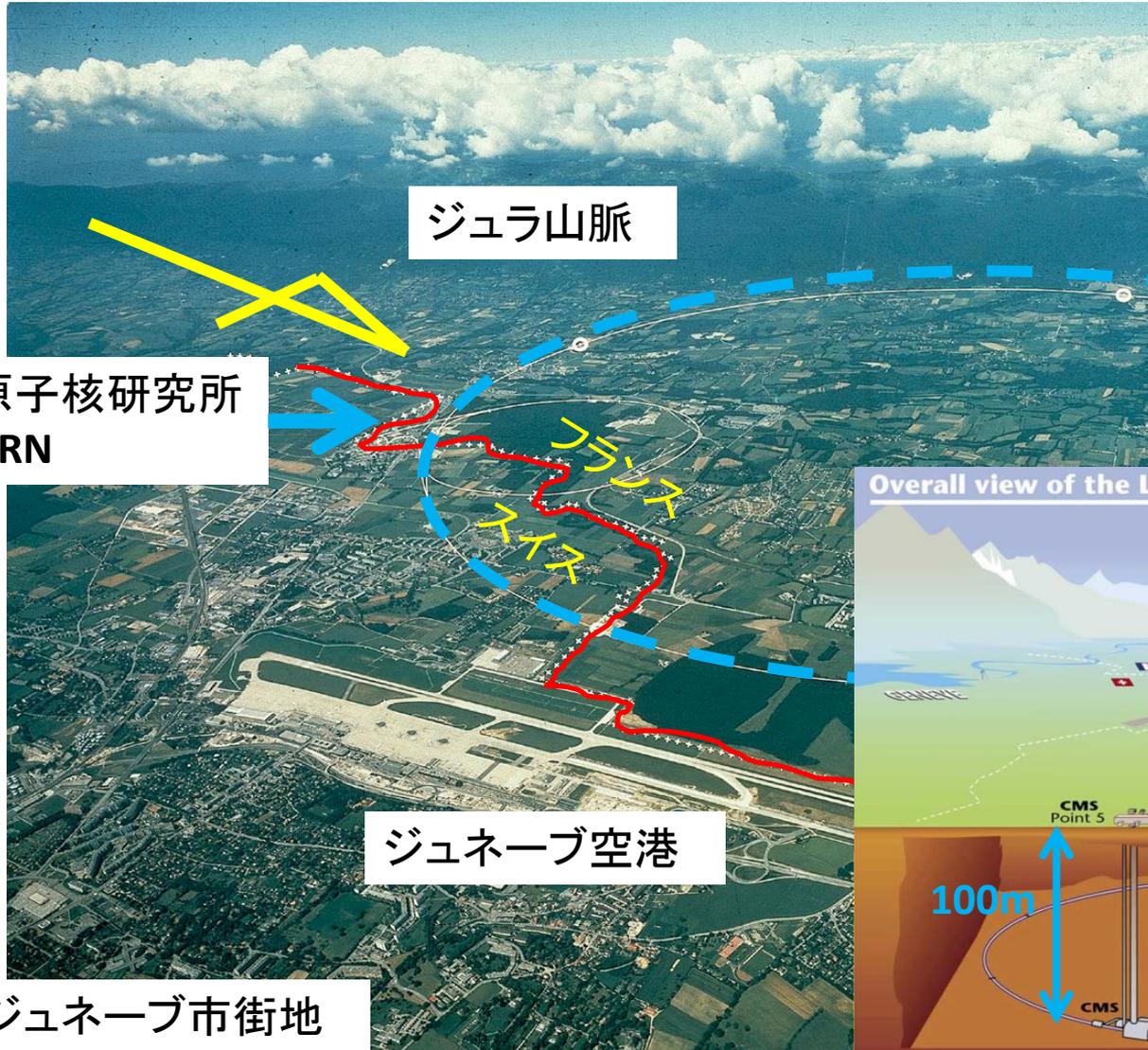


CERNから車で2-3時間くらい

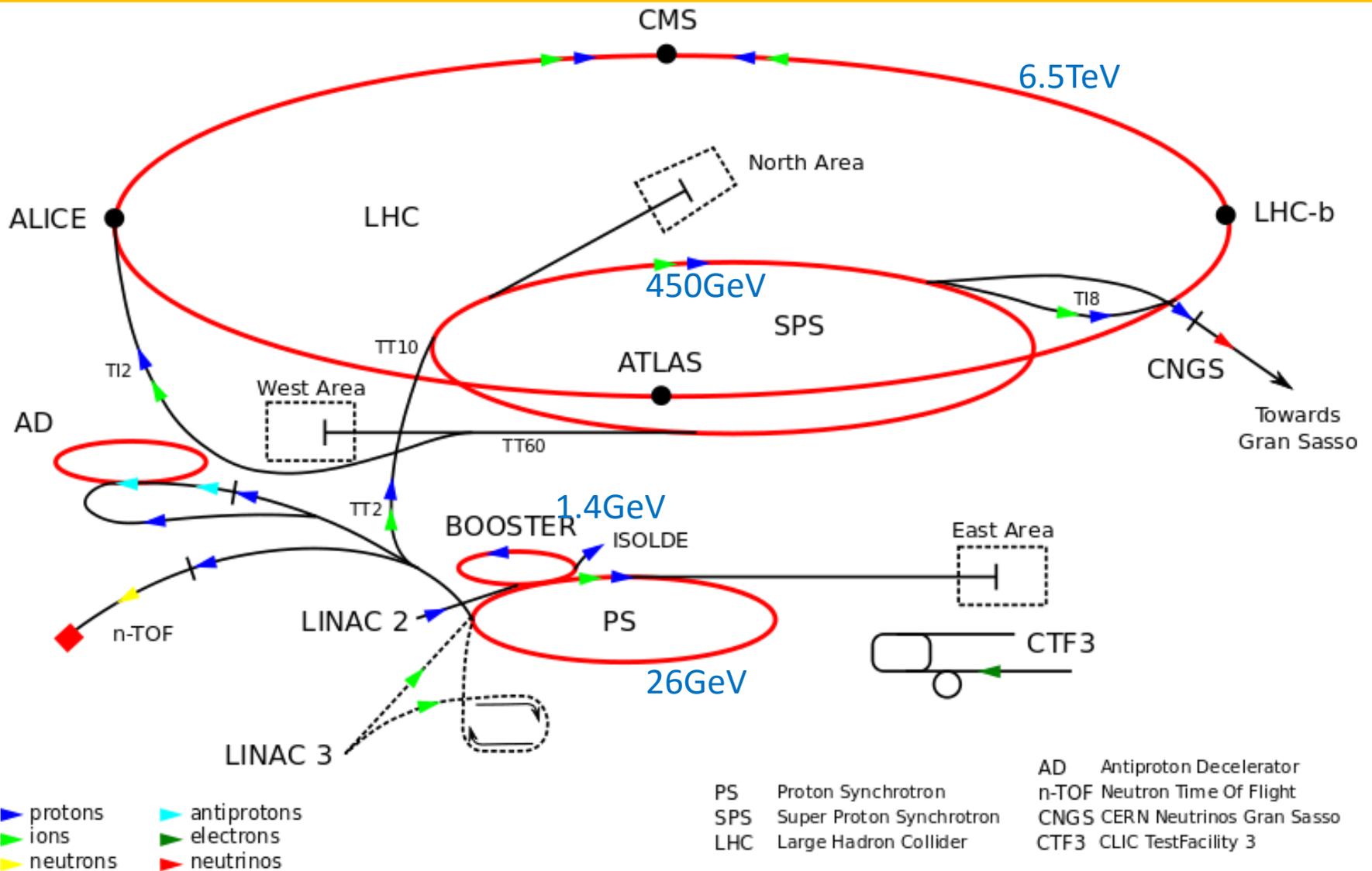
インターラーケンからの眺め



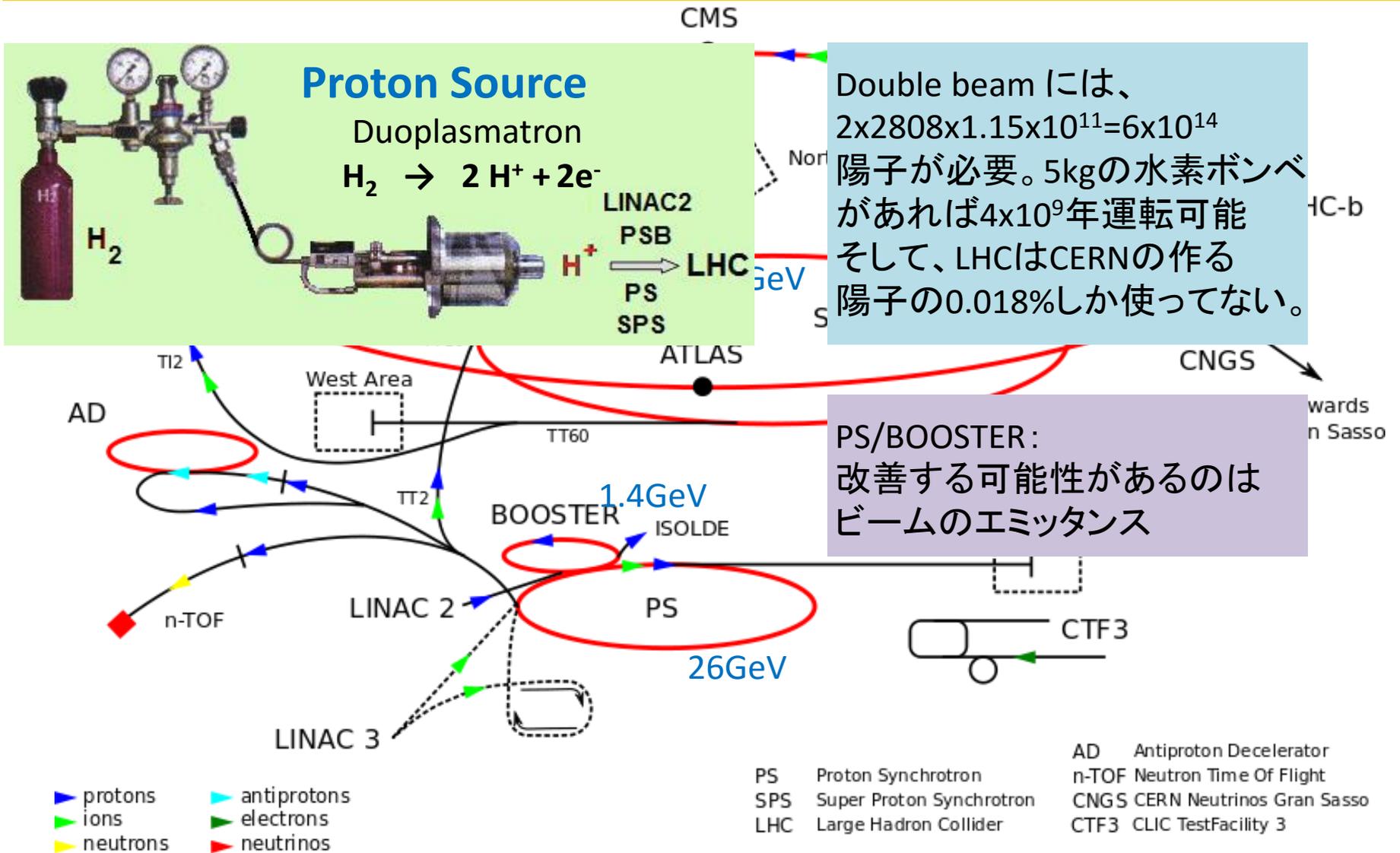
世界最大の加速器 LHC



LHCと前段加速器



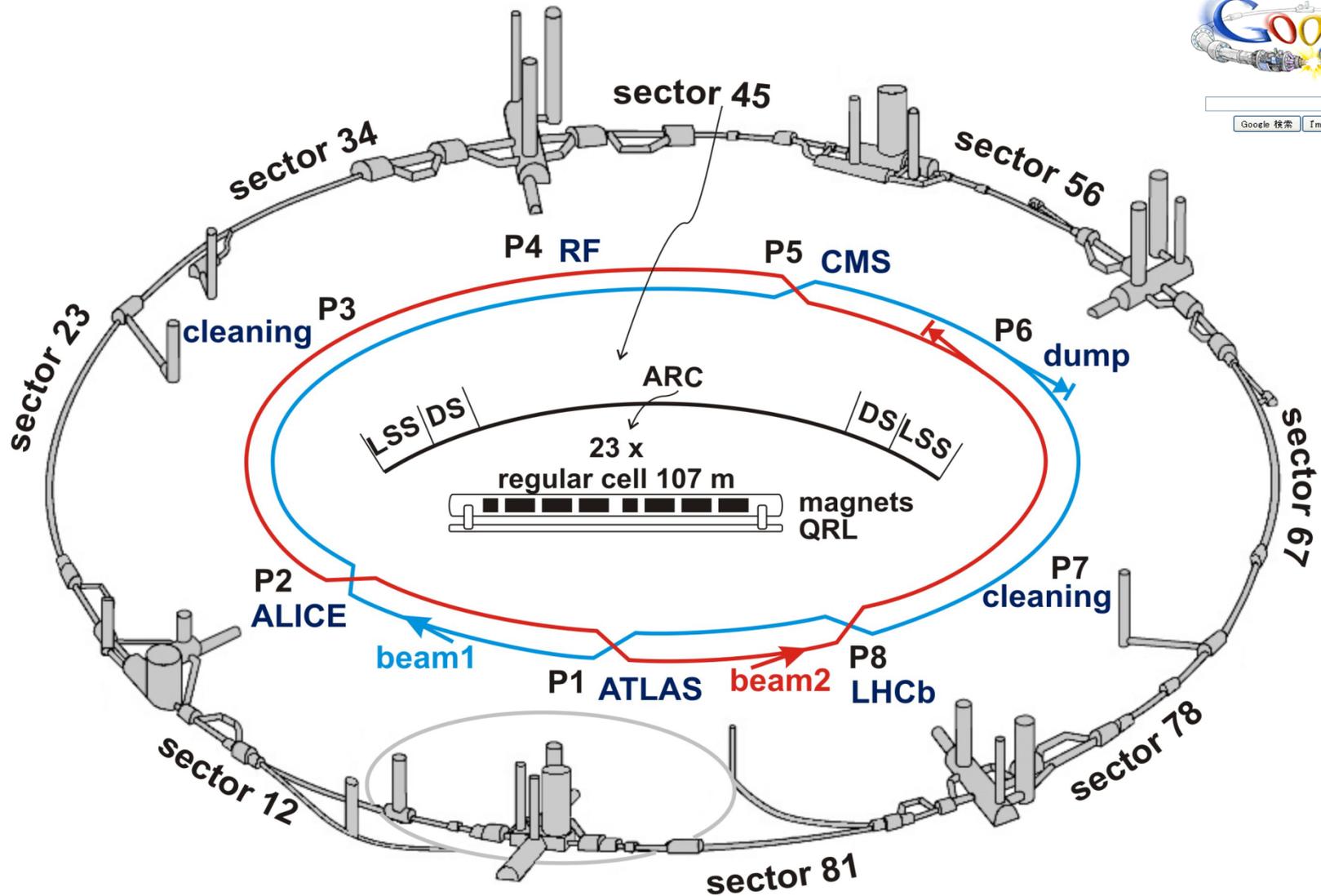
LHCと前段加速器



Large Hadron Collider



Google 検索 Im Feeling Lucky



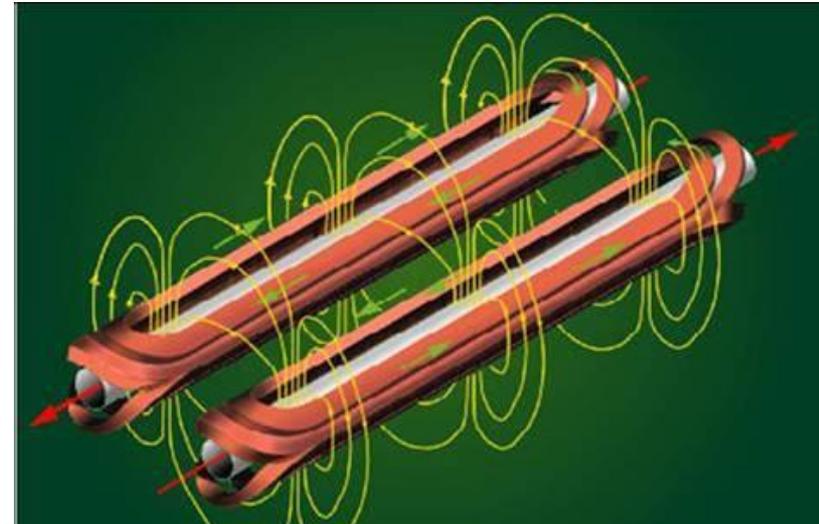
LHCのマグネット

- 2MV(5MeV/m)の加速勾配を持つ超伝導加速空洞が8箇所設置されている。
 - $2 \times 8 [\text{MeV}] = 16 [\text{MV/lap}]$
 - $16 [\text{MeV/lap}] \times 11245 [\text{laps/s}] = 0.18 [\text{TeV/s}]$
 - $7 \text{TeV} (-450 \text{GeV}) / 0.18 [\text{TeV/s}] = 36 \text{s}$
 - 実際は20minくらいかけてあげる。Dipoleの磁場を上げるスピードが制限?? (TBC)
- 加速空洞はまったく問題にならない
- 8.3Tの超伝導dipole magnet
 - この磁場の強さがエネルギーを決めている。
 - 14.3mx1232台(リングの66%)
 - 超流動ヘリウム1.9Kで運転

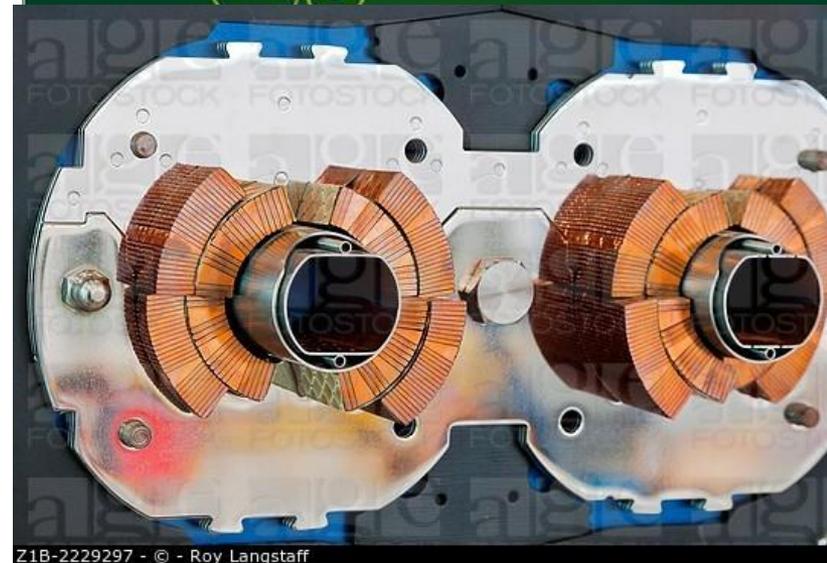
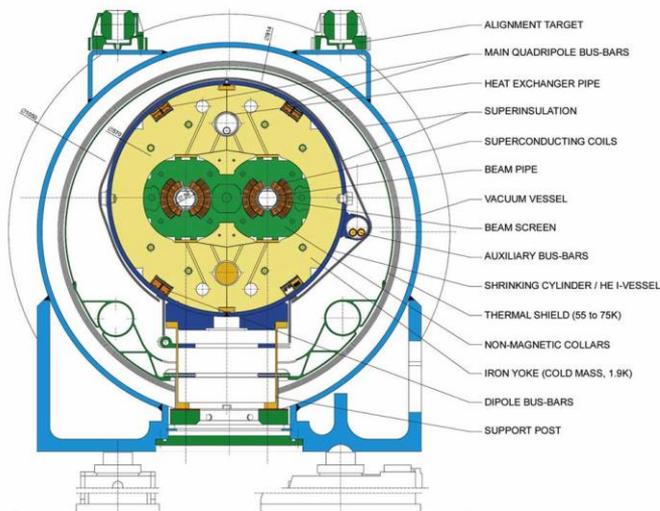


超伝導双極電磁石(dipole)

- 最も大事なマグネット
 - 超伝導の線材(NbTi)を15mの領域に巻いていく(長い線材が必要。NbTiは合金だから可能)
 - p-p コライダーなのでビームは二本必要で逆向きに磁場がかかるしくみを作った。2-in-1 dipole magnet.
- 7TeVには8.33Tの磁場が必要
 - $P_{\text{beam}} = 0.3 B \rho \times 0.66$ ($\rho=4242\text{m}$ で **7TeV**)
- 9Tまで可能らしい... 7.56TeV ($v_s=15\text{TeV}$)

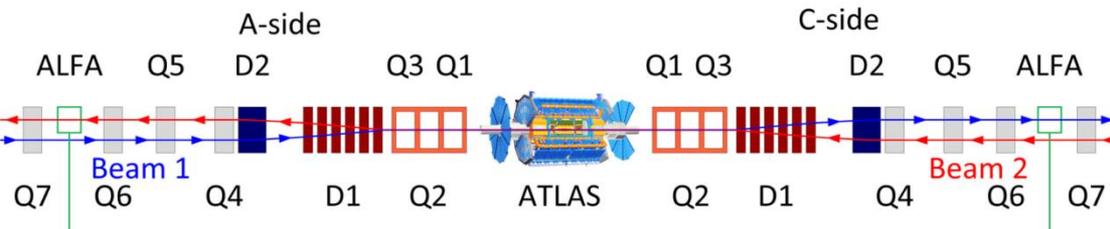


LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

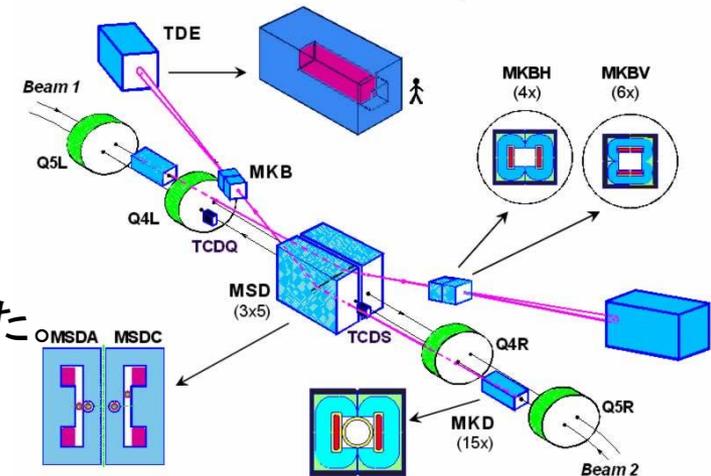


Z1B-2229297 - © - Roy Langstaff

収束とダンプ



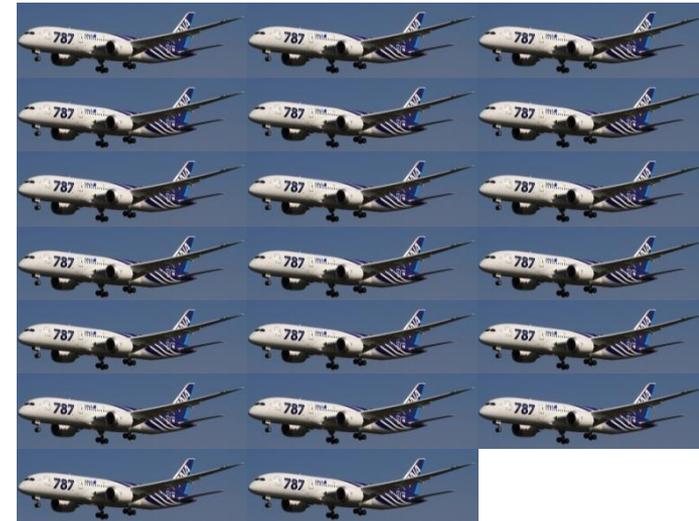
ビームダンプには早いkicker magnetが必要
軌道をずらしてビームをそらせてアボート。



386台の4重極マグネットでビームを絞る
レンズみたいなイメージで焦点距離に相当する長さを β^*
と呼ぶ。短い方が絞っている。LHCのデザインは55cmだった
現在では40cm (すでにデザインを超えた)

余談(LHCのエネルギー)

- LHCにためられているProtonの総エネルギーは極めて大きい。
 - 6×10^{14} 陽子が7TeVのエネルギーを持っているので $6 \times 10^{14} \times 7 \times 10^{12} \text{eV} = 6.7 \times 10^8 \text{J}$
 - B787の飛行機がM0.85で巡行中のエネルギーで換算すると:
 $0.5 \times 219,540 \text{kg} \times 340 \times 0.85 \text{m/s} = 3.2 \times 10^7 \text{J}$
つまりB787が20機分？！
 - 同様の計算をすると、
 - 1トンの銅がすべて溶ける。
 - 新幹線が300km/hで走る。
 - 150kgのTNT火薬の爆発エネルギー
 - 35kgのチョコレート
 - このカロリーを使うのに2000km走らなければ...
に相当する。



参考までに当初のデザイン

Circumference	26659 m
Dipole operating temperature	1,9 K
Lattice type	FODO 2-in-1
Number of arcs (2450 m long)	8
Number of lattice cells per arc	23
Number of straight sections (545 m long)	8
Main RF System	400.8 MHz
Voltage of 400 MHz RF system at 7 TeV	16 MV
Number of magnets (dipoles, quadrupoles ... dodecapoles)	9300
Number of dipoles	1232
Number of quadrupoles	858
Number of RF cavities	8 per beam
Nominal energy, protons	7 TeV
Momentum at collision	7 TeV/c
Momentum at injection	450 GeV/c
Nominal energy, ions	2,76 TeV/nucleon

Peak magnetic dipole field	8,33 T
Current in main dipole	11800 A
Energy density of the LHC magnets	500 kJ/m
Main dipole coil inner diameter	56 mm
Distance between aperture axes (1.9 K)	194,00 mm
Distance between aperture axes (293 K)	194,52 mm
Main Dipole Length	14.3 m
Horizontal force at 8,33 T (inner and outer layer)	1,7 MN/m
Composition of the superconducting alloy	Ni_Ti (47Wt% Ti)
Maximum current with NO resistance (1,9 K e 8,33 T)	17000 A
Maximum current with NO resistance (1,9 K e 0 T)	50000 A
Number de strands per cable	36
Number de Ni-Ti filaments in each strand	6500
Bending radius	2803.95 m
Minimum distance between bunches	~7 m
Bunch spacing	25 ns
Design Luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam	2808
No. of protons per bunch (at start)	$1,15 \cdot 10^{11}$
Circulating current / beam	0,54 A
Number of turns per second	11245
Stored beam energy	360 MJ
Stored energy in magnets	11 GJ
Beam lifetime	10 h
Average crossing rate	31,6 MHz
Number of collisions per second	600 millions
Radiated Power per beam (synchrotron radiation)	~ 6 KW
Total crossing angle (collision point)	300 μrad
Emittance ϵ_n	3,75 μrad
Beta function β^*	0,55 m

ビームの構造

- コライダーでは衝突確率を上げるためたくさんの粒子を詰め込んで加速する。
- ビームの構造は一般的にバンチ構造になっている。

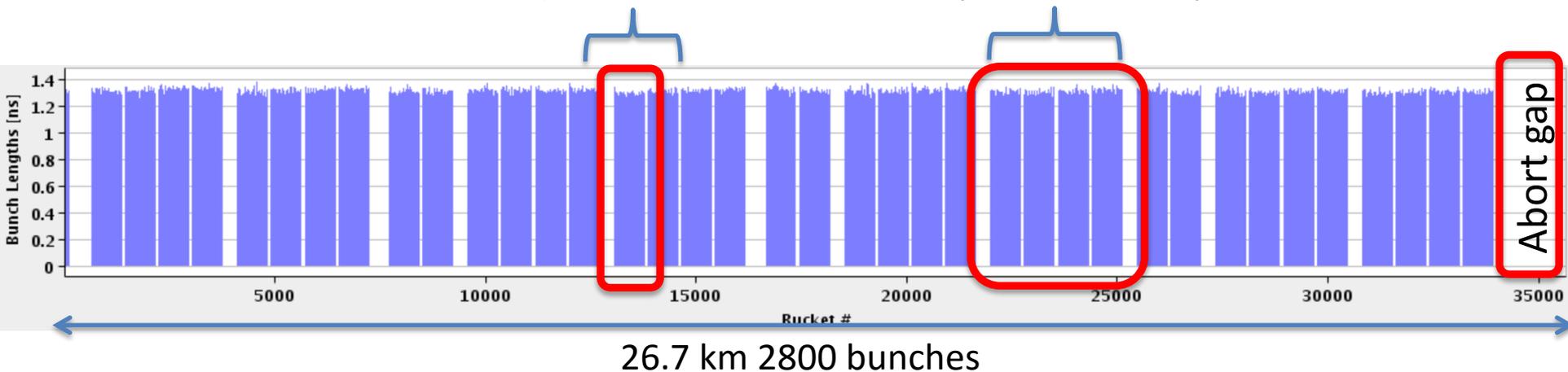
例 LHC 2015

	E	N bunch	N_p/bch	Bunch spacing	
LHC2015	14TeV	2800	1.15×10^{11}	25ns	

1 PS batch
(72 bunches)

1 SPS batch
(288 bunches)

$\beta=1$ として、
26.7kmは $8 \times 10^4 \text{ns}$
 $25 \text{ns} \times 2800 = 7 \times 10^4 \text{ns}$
13%くらい少ない??



断面積

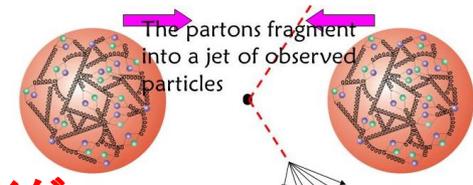
断面積: 粒子と粒子が衝突する頻度を表す量

- 粒子と粒子がどのくらい近いと反応するか? → 反応する領域の大きさ(面積)が散乱断面積。
 - 単位は cm^2 でもよいが、ウランの反応断面積を用いたバーン[b]が用いられる。
 $1\text{b}=10^{-24}\text{cm}^2$
- 電子コライダーはプロセスが単純なので断面積は計算可能。
- 陽子コライダーは非摂動QCDが利くので基本的に計算するのは至難の業。
 → データから測定。

$$\sigma_{\text{inel}}(\xi > 10^{-6}) = \frac{N - N_{\text{BC}}}{\epsilon_{\text{trig}} \times L} \times \frac{1 - f_{\xi < 10^{-6}}}{\epsilon_{\text{sel}}}$$

観測事象数

アクセプタンス

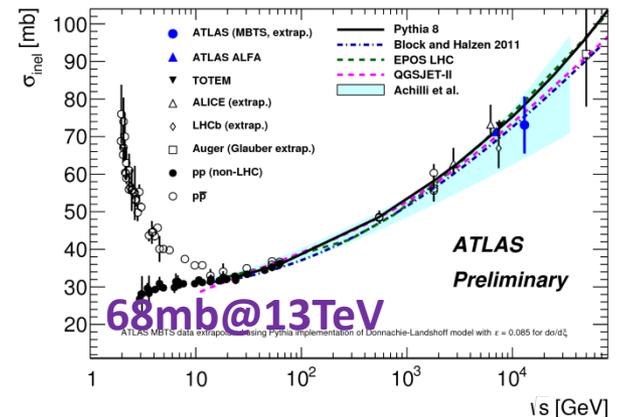
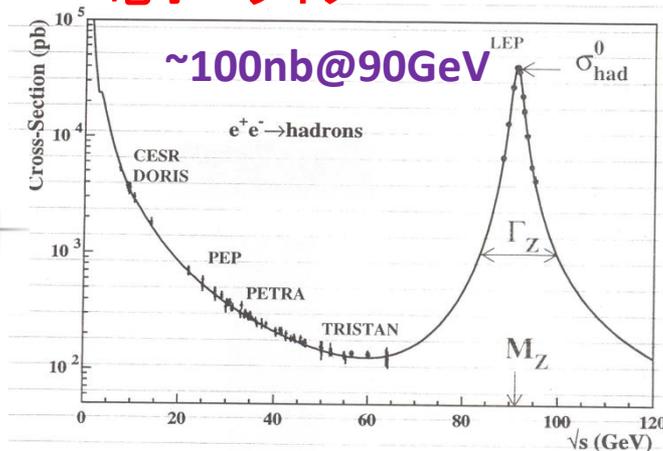


データ量

積分ルミノシティ

陽子コライダー

電子コライダー



瞬間ルミノシティ

- 断面積 σ を持つ現象が起こる頻度(毎秒) R としたとき、瞬間ルミノシティは $L = R/\sigma_{tot}$ で定義される。単位は $[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$

- 単純に考えて、 σ_{tot} が同じとき $L(R)$ を大きくするには**加速するprotonを増やす**か、**ビームを絞る**かの二通りがある。

$$L = f \frac{N_1 N_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \approx \frac{40 \times 10^6 \cdot (10^{11})^2}{4\pi(16\mu\text{m})^2} \approx 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

f : 一秒当たりのバンチ衝突回数
 N : バンチの中の粒子数
 σ : ビームの広がり

- 実際はもう少し複雑(特にビームの形)で、

$$L \text{ (luminosity)} = \frac{N_b^2 \cdot n_b \cdot f_{rev} \cdot \gamma_r \cdot F}{4\pi \cdot \epsilon_n \cdot \beta^*}$$

N_b : number of particles per bunch = 1.15×10^{11}

n_b : number of bunches = 2808

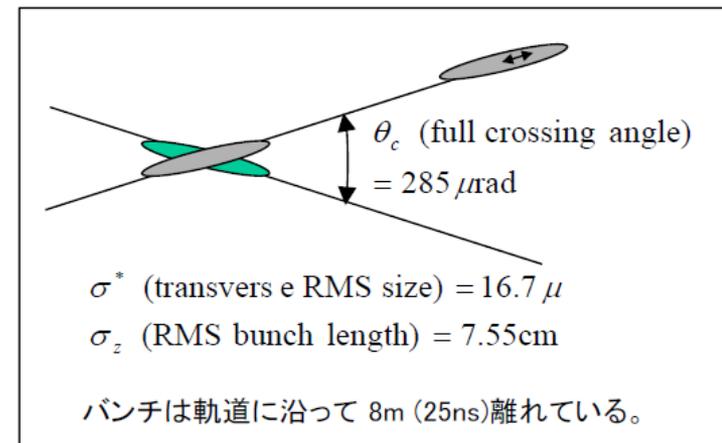
f_{rev} : revolution frequency = $\frac{c}{l_{ring}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{26659 \text{ m}} = 11253 \text{ Hz}$

γ_r : relativistic gamma factor = $7000 / 0.938 = 7462.7$

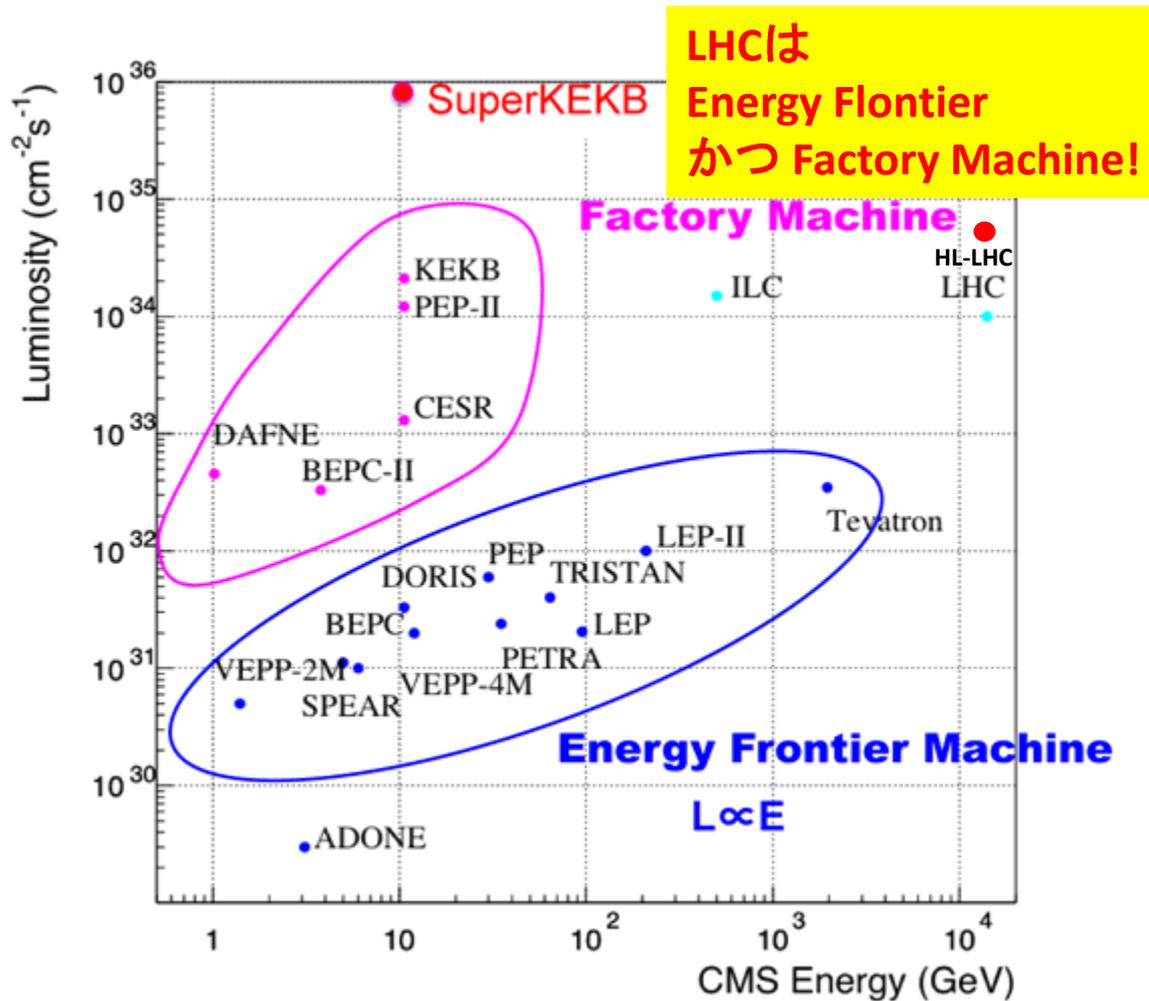
ϵ_n : normalized transverse beam emittance = $3.75 \mu\text{m} \cdot \text{rad}$

β^* : beta function at IP = 0.55 m

F : crossing angleによるgeometric luminosity reduction factor



最近の加速器の瞬間ルミノシティ



積分ルミノシティ

- 瞬間ルミノシティはビーム衝突やbeam-gas等で次第に減少する。 $L_0=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の時、時定数 τ_L は約15時間。

- 2016年5月PS故障修理前の最後のFillで35hのデータ
 - 低いルミノシティの時は時定数がもう少し長い?
- Fillの積分ルミノシティは、

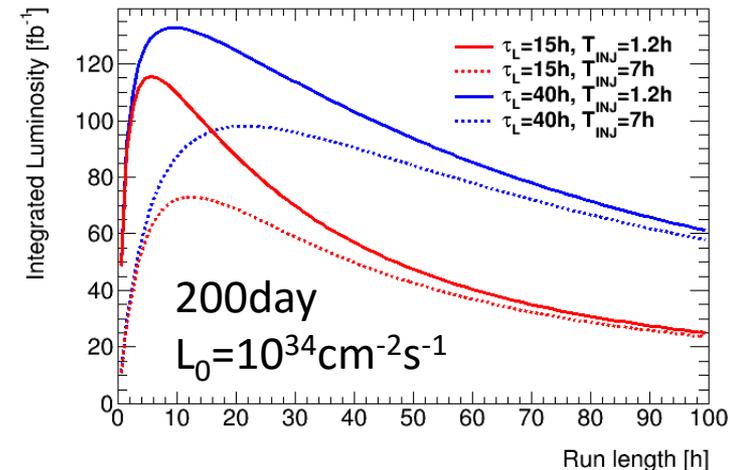
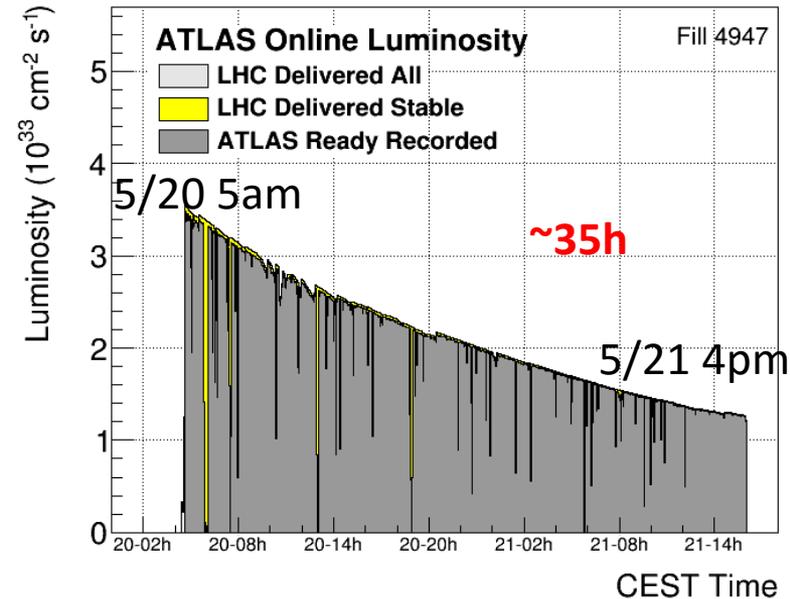
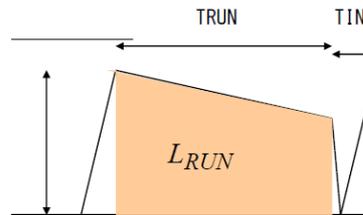
$$\int L_{run} dt = L_0 \tau_L (1 - e^{-T_{run}/\tau_L})$$

$$L_0=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}=3.5 \times 10^{-2}\text{fb}^{-1}/\text{h}$$

- 一年(200day)の積分ルミノシティ

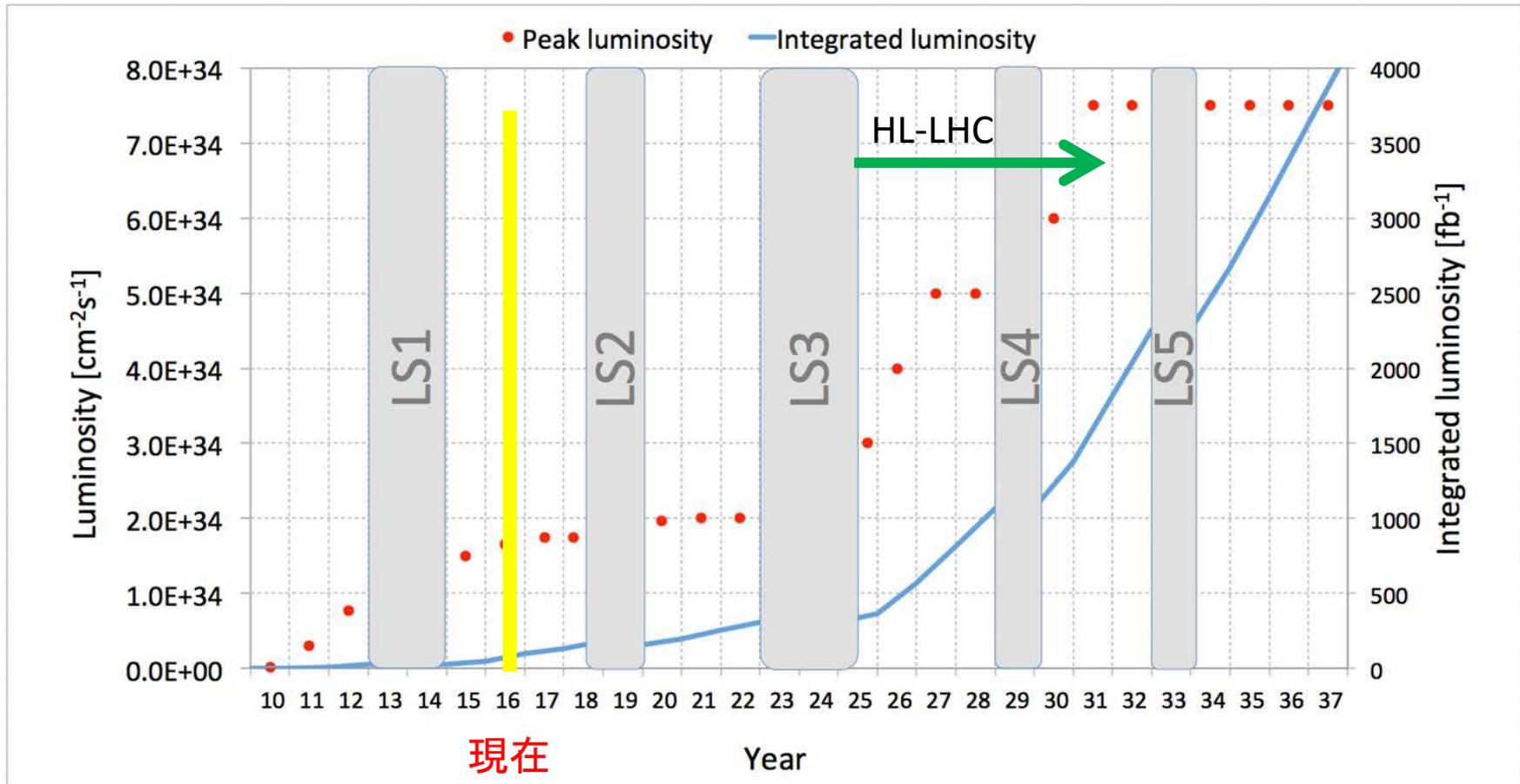
$$\int L dt = \frac{200\text{day} \times 24}{T_{run} + T_{ING}} \int L_{run} dt$$

- Runの長さは5-10時間が最適
 - $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で年間最大 100fb^{-1} (かなりアグレッシブな数字)



LHCのルミノシティープラン

- もちろん瞬間ルミノシティーが上がると時定数は下がるので単純ではないですが、..



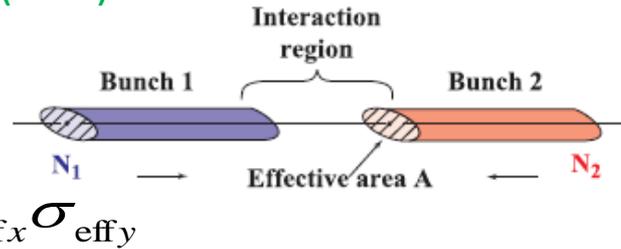
ルミノシティの絶対値



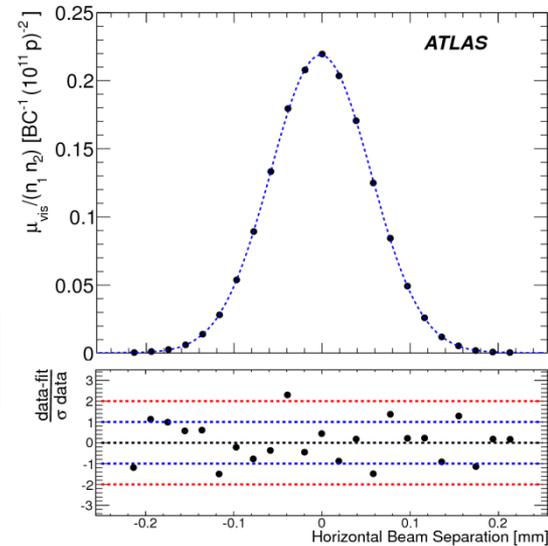
- 瞬間ルミノシティは加速器のパラメータで決まるが... 実際のLuminosityは測定する必要がある。
 - ただし、通常の運転中に測定可能なのは事象数Rだけ
 - ルミノシティの測定: $L = R/\sigma_{tot}$
 - 生成断面積の測定: $\sigma_{tot} = R/L$
- そこで考えられたのが Van Der Meer Scanという方法

加速器で測定可(<1%)

$$L_0 = \frac{N_1 N_2 n_b f}{A_{eff}}$$



$$A_{eff} = 2\pi\sigma_{effx}\sigma_{effy}$$



The effective overlap area can be determined by scans in separation:

$L(\delta x, \delta y) = L_0 F(\delta x, \delta y)$ Double Gaussian

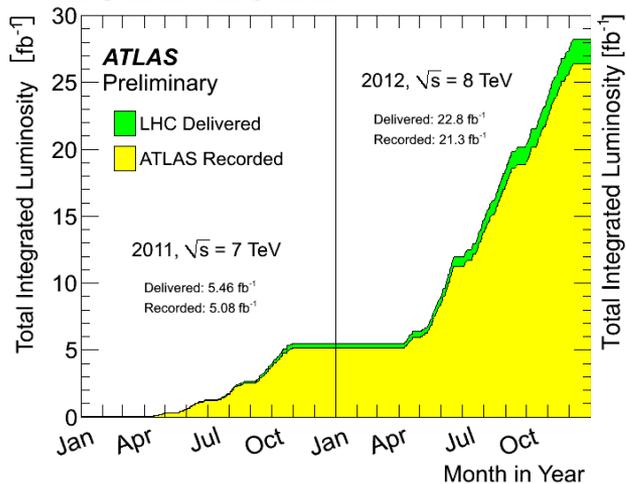
$$F(\delta u) = A_{u1} \exp\left[-\frac{\delta u^2}{2\sigma_{u1}^2}\right] + A_{u2} \exp\left[-\frac{\delta u^2}{2\sigma_{u2}^2}\right]$$

$$A_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} F(\delta x, 0) d\delta x \int_{-\infty}^{+\infty} F(0, \delta y) d\delta y}{F(0, 0)}$$

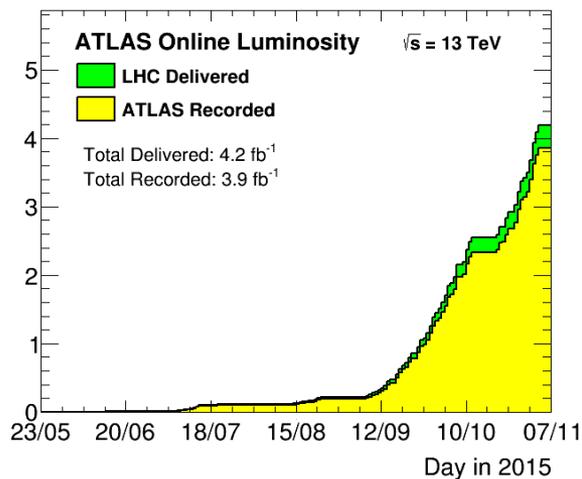
$$\sigma_{effu} = \frac{A_{1u}\sigma_{1u} + A_{2u}\sigma_{2u}}{A_{1u} + A_{2u}}$$

現在までのルミノシティ

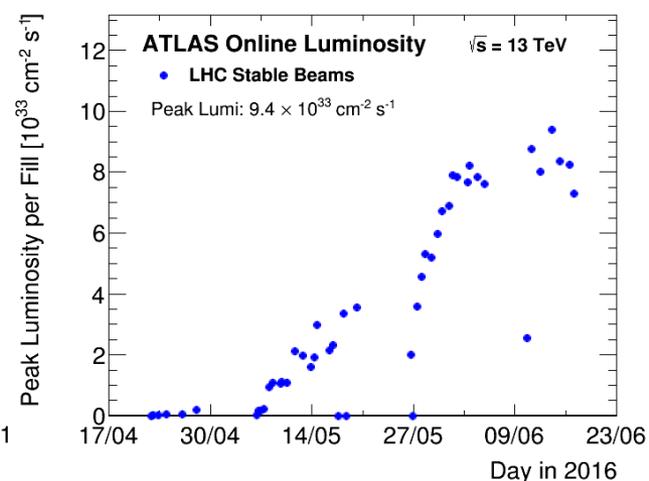
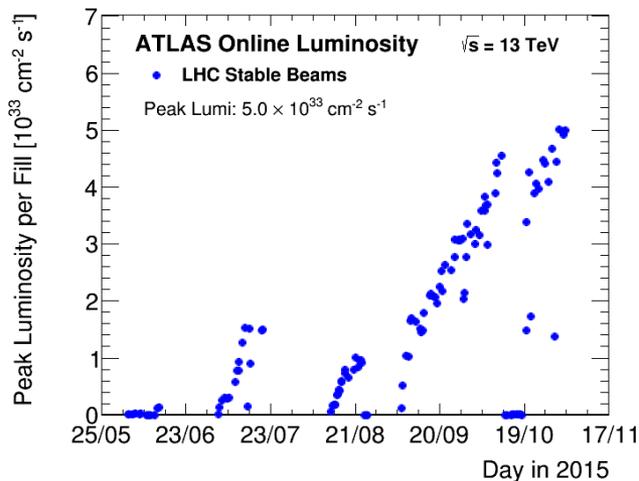
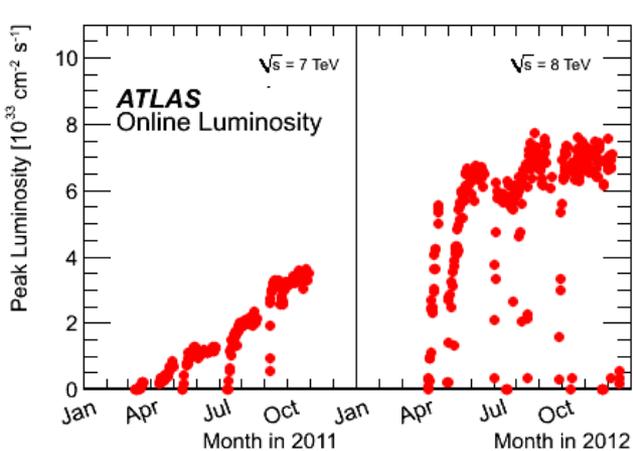
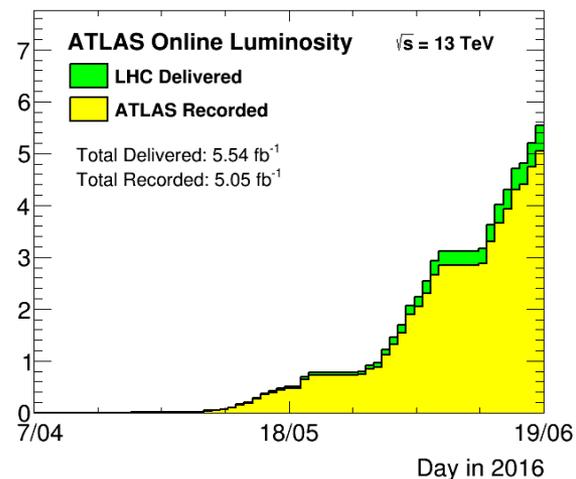
2011-2012



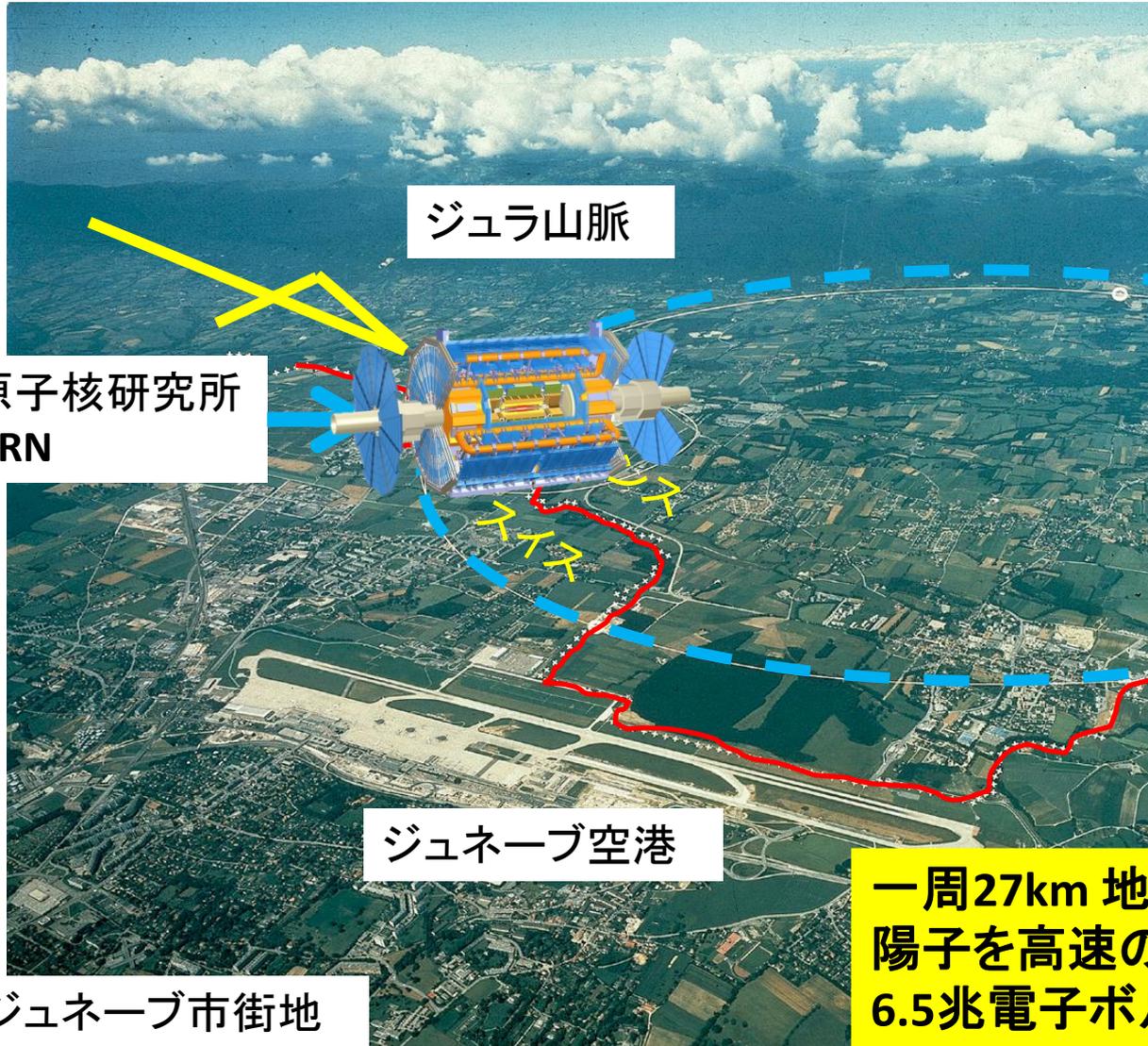
2015



2016

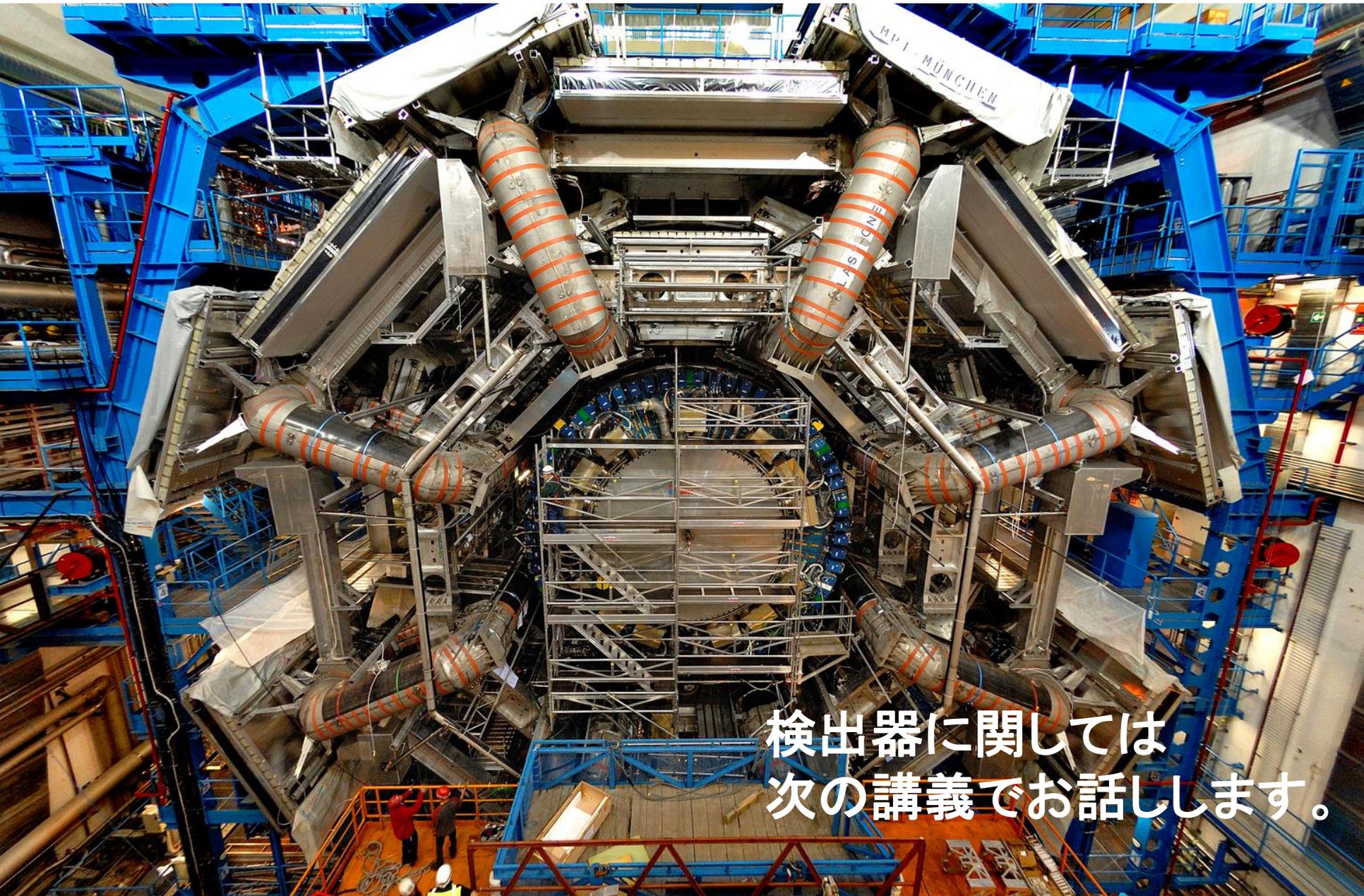


ATLAS検出器



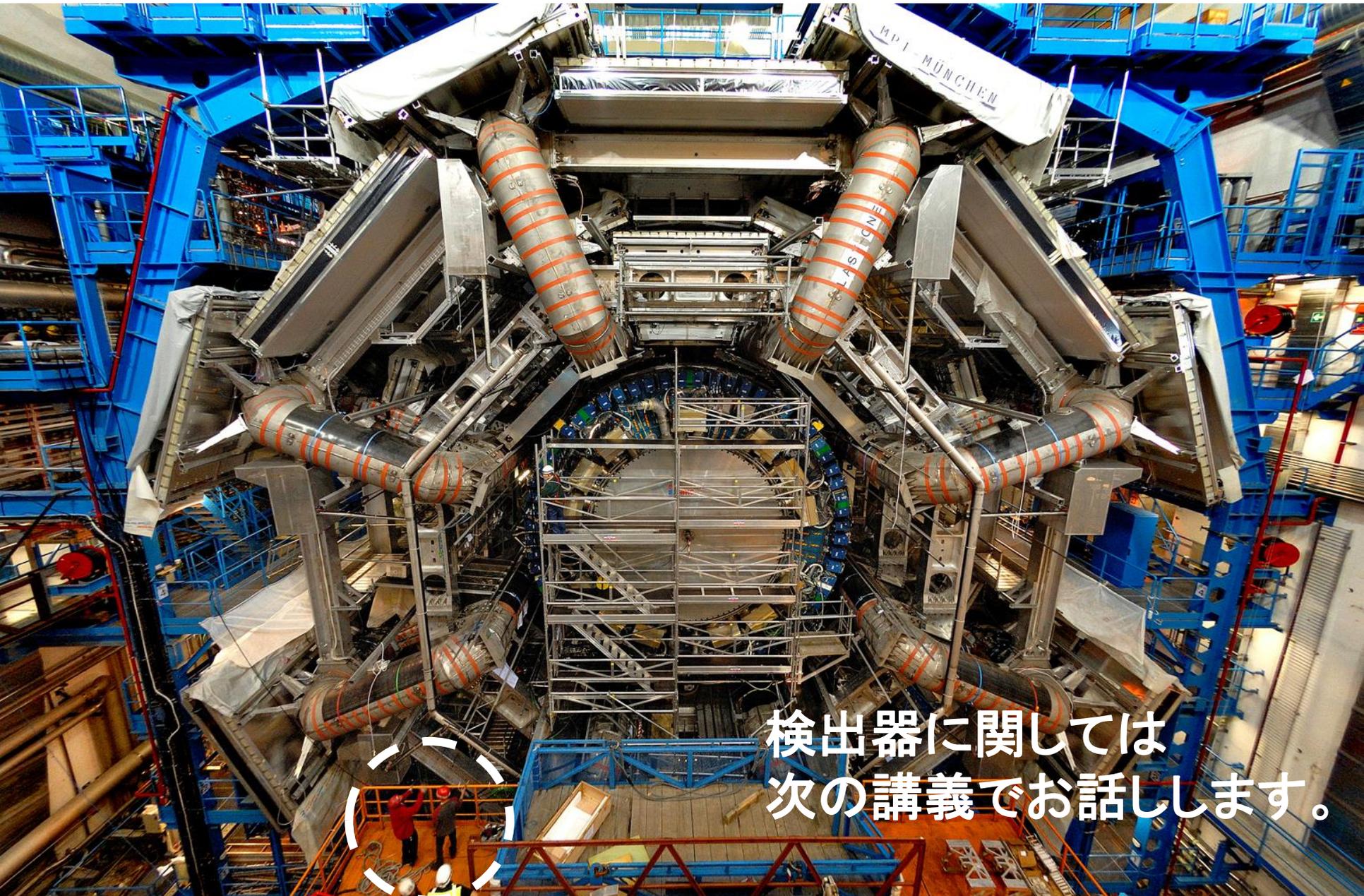
一周27km 地下100mのトンネル
陽子を高速の99.999997%まで加速
6.5兆電子ボルト(TeV)

ATLAS 検出器



検出器に関しては、
次の講義でお話しします。

ATLAS 検出器



検出器に関しては、
次の講義でお話しします。

海外の国際協力実験

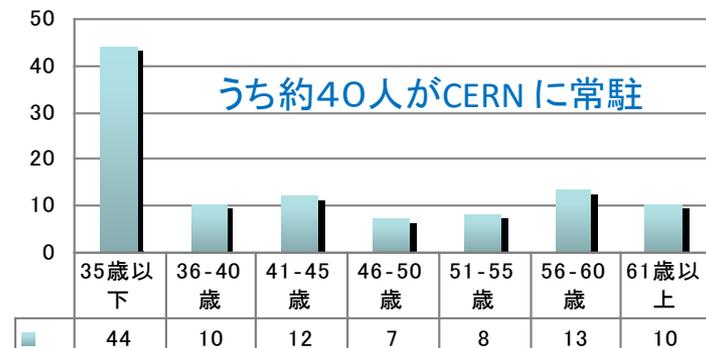
- LHC、アトラス実験
 - 約3000人のコラボレーション
 - 日本所属の研究者120人
- たった4%の人でどれだけ貢献できているのか？
 - 現検出器の生産・運転
 - 物理解析の主導
 - アップグレード検出器のR&D

Number of authors

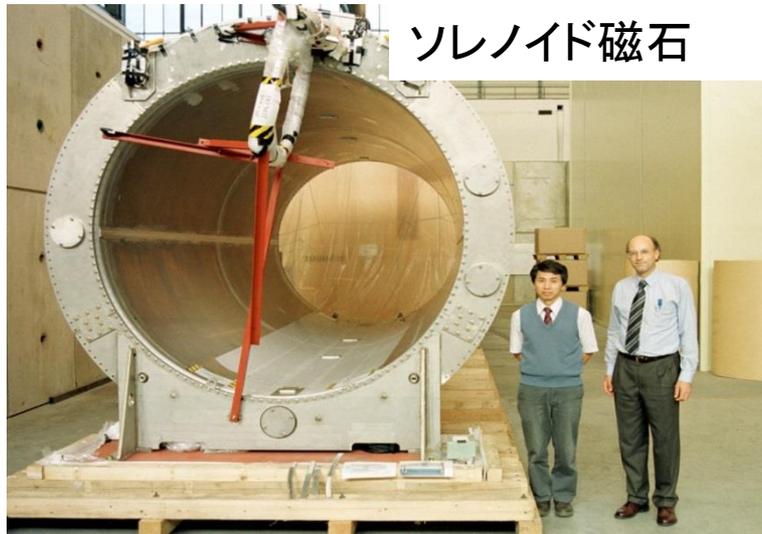
	Authors	M&O	ActQual
Hiroshima IT	1	1	1
KEK	26	19	20
Kobe	12	7	12
Kyoto	4	2	6
Kyoto UE	1	1	1
Kyushu	4	4	4
Nagasaki	1	2	2
Nagoya	6	3	7
Okayama	1	1	1
Osaka	7	4	7
Shinshu	2	2	2
Tokyo ICEPP	24	17	30
Tokyo MU	2	2	2
Tokyo Tech	9	4	11
Tsukuba	8	5	10
Waseda	4	1	5
Japan	113	75	121
Total	2816	1875	3034



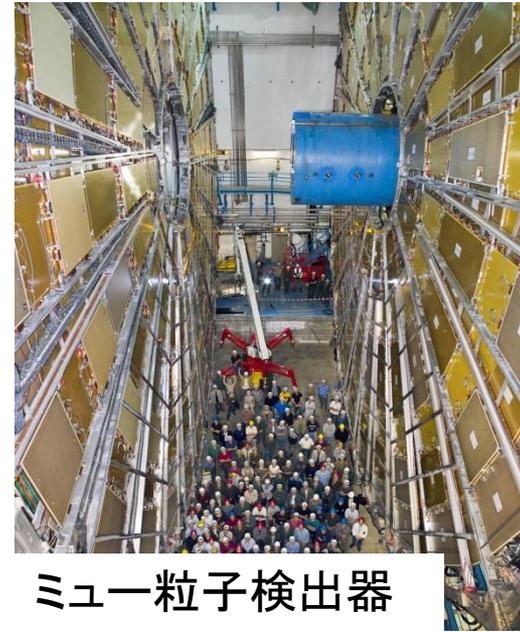
アトラス実験に参加する日本人研究者の年齢分布



日本が大きく貢献した3つの現検出器

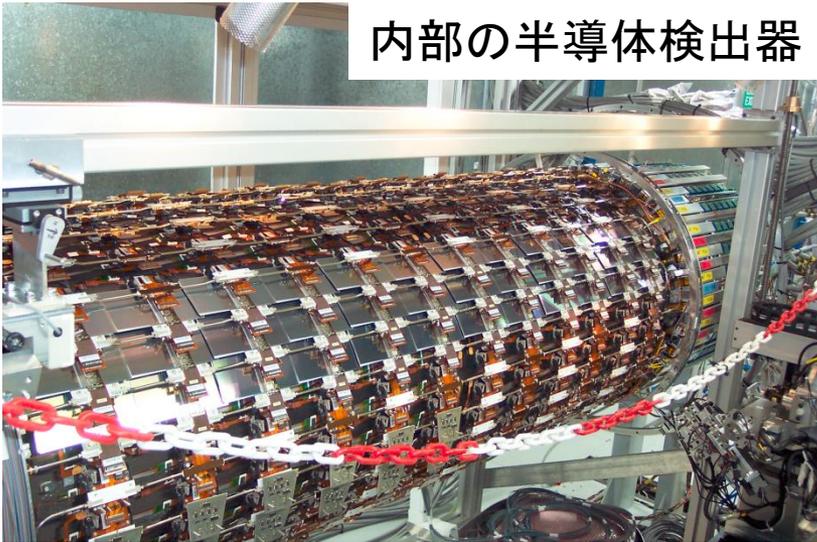


ソレノイド磁石



ミュー粒子検出器

内部の半導体検出器



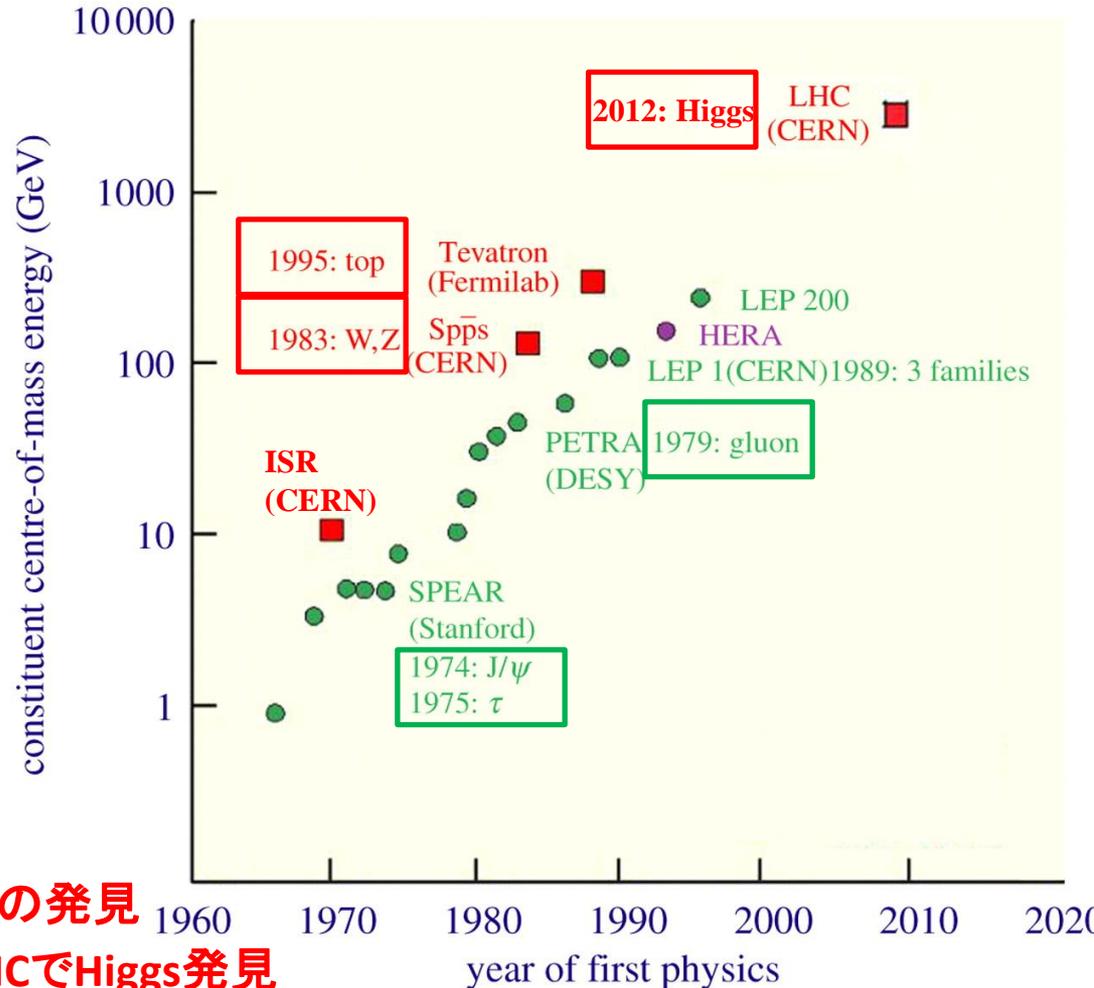
- ソレノイド：日本製
- SCT(ストリップ型飛跡検出器)
 - 90%のセンサーと30%のモジュール組み立て
- TGC(muon トリガーチェンバー)
 - 約80%のチェンバーを製作
 - エレキの開発
- Muon検出器用TDC

なぜハドロンコライダーなのか？
ハドロンコライダーの難しさ。

電子コライダーと陽子コライダー

• まずはコライダーの歴史から学ぶ

- 1980年以前
 - 電子コライダーで低質量の粒子の発見
 - 1974 J/ ψ
 - 1975 τ
 - 1979 gluon
- 1980年以降
 - 陽子コライダーで重い新粒子の発見
 - 1983 W,Z
 - 1995 top
 - 2012 Higgs
 - 電子コライダーで精密測定
 - 1989 : neutrino 3世代
 - LEP Electroweak 測定



いままで相補的にやってきた :
SppS でW、Zの発見 → LEPで精密測定

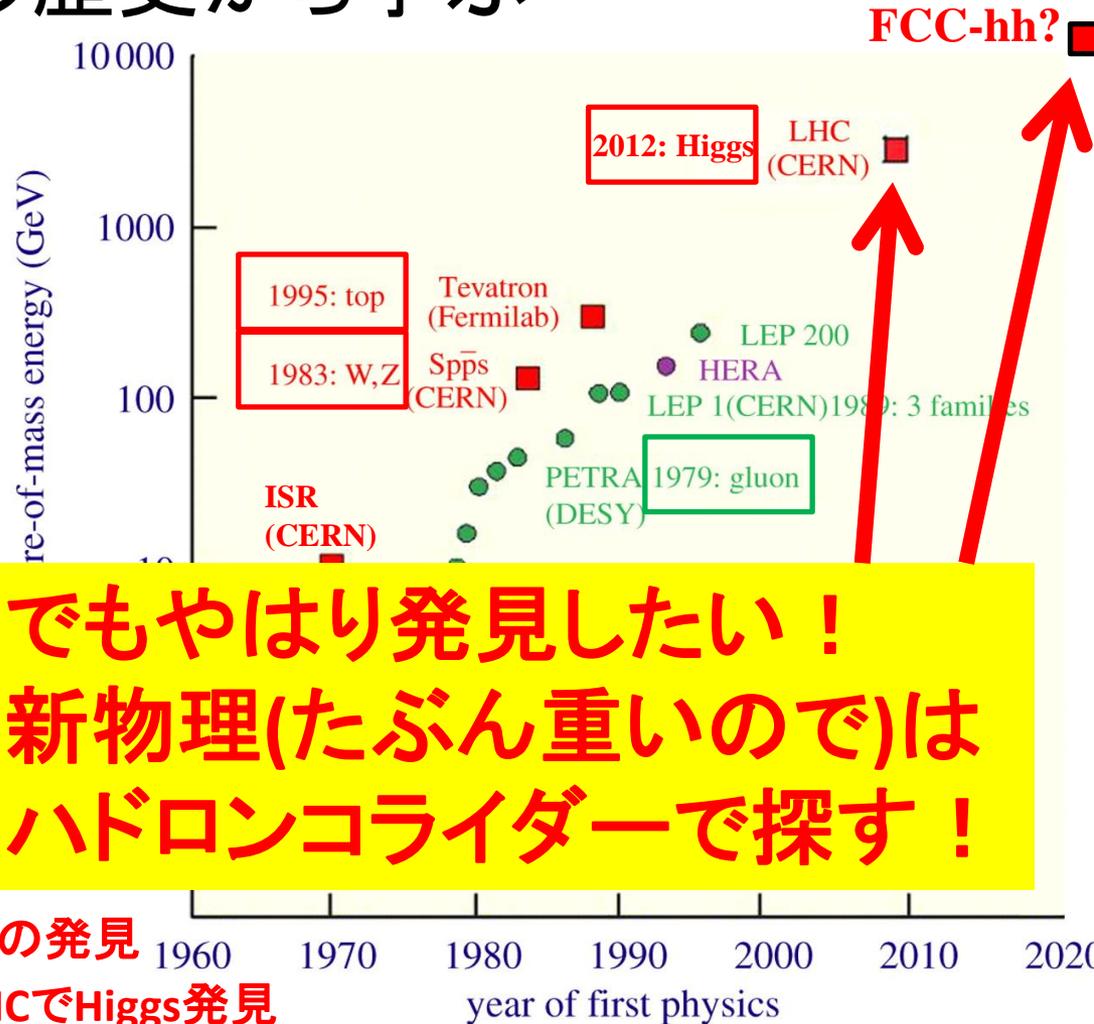
LEPでtop massの予言 → Tevatron でTopの発見

LEPのEW測定+TevatronのTop質量 → LHCでHiggs発見

電子コライダーと陽子コライダー

まずはコライダーの歴史から学ぶ

- 1980年以前
 - 電子コライダーで低質量の粒子の発見
 - 1974 J/ ψ
 - 1975 τ
 - 1979 gluon
- 1980年以降
 - 陽子コライダーで重い新粒子の発見
 - 1983 W,Z
 - 1995 top
 - 2012 Higgs
 - 電子コライダーで精密測定
 - 1989 : neutrino 3世代
 - LEP Electroweak 測定



いままで相補的にやってきた :
 SppS でW、Zの発見 → LEPで精密測定

LEPでtop massの予言 → Tevatron でTopの発見
 LEPのEW測定+TevatronのTop質量 → LHCでHiggs発見

電子コライダーと陽子コライダー

なぜ、

- 陽子コライダーで重い新粒子の発見
- 電子コライダーで精密測定

となったのか？

1. シンクロトン放射の問題で電子加速器のエネルギーに限界が来た

→重い粒子はそもそも作れない

2. 陽子コライダーはイベントが非常に汚い

→精密測定が難しい

[どのくらい大変か？]

- 重心系エネルギーと反応に使われるエネルギーの違い
 - Parton Distribution Function (PDF)
- 陽子は複雑な複合粒子で衝突に際してたくさんのごみが出る。
 - 断面積の非常に大きな背景事象
 - 反応のスペクテータ
 - Underlying event
 - 同じバンチの異なる陽子の衝突
 - パイルアップ

シンクロトンのエネルギー限界

• シンクロトン放射

- 荷電粒子が加速されると光を出してエネルギーを失う

$$\Delta E \propto \frac{(E/m)^4}{\rho} \quad (\text{電子と陽子では } 1.5 \times 10^{13} \text{ 倍違う!})$$

$$\text{電子加速の時: } \Delta E [\text{keV}] \approx 88.5 \frac{(E[\text{GeV}])^4}{\rho[\text{m}]}$$

- 特に電子シンクロトロンはエネルギーを上げることが非常に困難: LHC リングで、 $E=100\text{GeV}$ $\rho=5\text{km}$ で 2GeV/周 のエネルギー損失... 13TeV 加速器にすると $5 \times 10^5 \text{TeV}$ の損失?! → 不可能...

• 偏向電磁石(Bending Magnet)

- 陽子加速器なら 1.5×10^{13} 倍低いシンクロトン放射 → 100GeV 電子加速器が可能なら 10^4TeV くらいまでいける? → 残念ながらダメ

- 荷電粒子の磁場中での運動量と曲率半径の関係は、

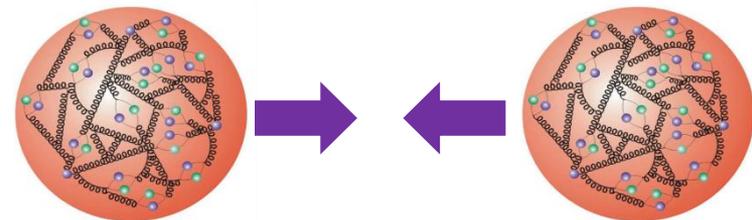
$$P[\text{GeV}] = 0.3B[\text{T}]p[\text{m}]$$

- 現在のところ量産できる超伝導電磁石は 8T くらいが限界...

- LHCのリングに 50TeV の加速器を作るには $\sim 35\text{T}$ の磁石が必要...

結論: 電子加速器も陽子加速器も半径を大きくする必要がある。

最後に少し話します。



反応に使われるエネルギー

- 陽子同士の衝突は実際は陽子の中のクォークやグルーオン(パートン)の衝突。
 - 当然パートンひとつのエネルギーは陽子のエネルギーよりだいぶ低い。
 - 反応に使われるパートンのエネルギーの陽子のエネルギーに対する割合 x の分布をParton Distribution Function(PDF)という。

事象の重心系エネルギー

- 反応に使われたエネルギーがそれぞれの陽子で $x_1 \times x_2$ だったとき、事象の重心系エネルギー $\sqrt{\hat{s}}$ は、

$$\sqrt{\hat{s}} = 2\sqrt{x_1 E_1 \times x_2 E_2} = 2\sqrt{x_1 x_2} \sqrt{E_1 E_2}$$

Rapidity と pseudo-rapidity

- x, y 平面(ビームに垂直)は運動量が保存
- z 軸方向はほとんどの場合 $x_1 \neq x_2$ なので前後方に出やすい。→角度 θ を使うとほとんどの粒子は $|\cos\theta|=1$ の近くに集まる。
- z 方向のRapidityという量を使う

$$y \equiv \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z} = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z} \frac{E + p_z}{E + p_z} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{m_T} \right)^2 = \ln \frac{E + p_z}{m_T}$$

$$m_T^2 = m^2 + p_x^2 + p_y^2, E^2 = m_T^2 + p_z^2$$

- 実際質量は運動量に対して十分小さいので、

- $m=0$ ($m_T=p_T$)として $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$ ($\tan\theta = p_T/p_Z$)

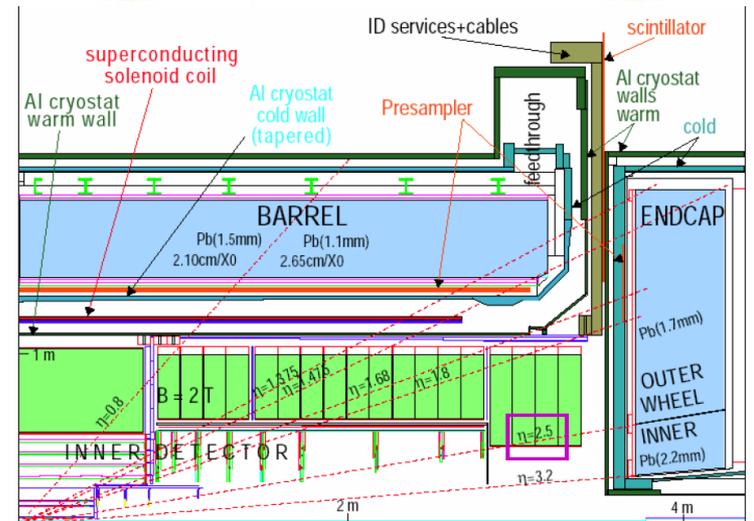
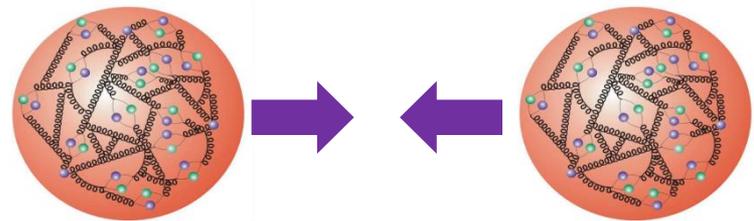
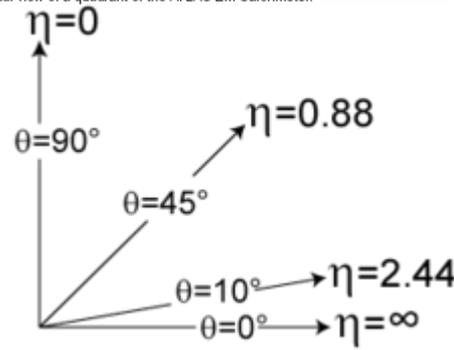
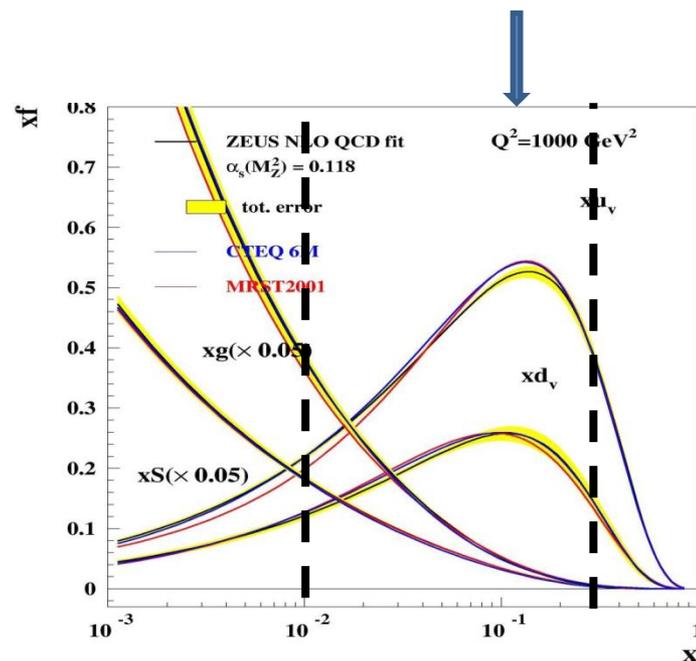


Figure 4-1 Longitudinal view of a quadrant of the ATLAS EM Calorimeter.



Parton Distribution Function

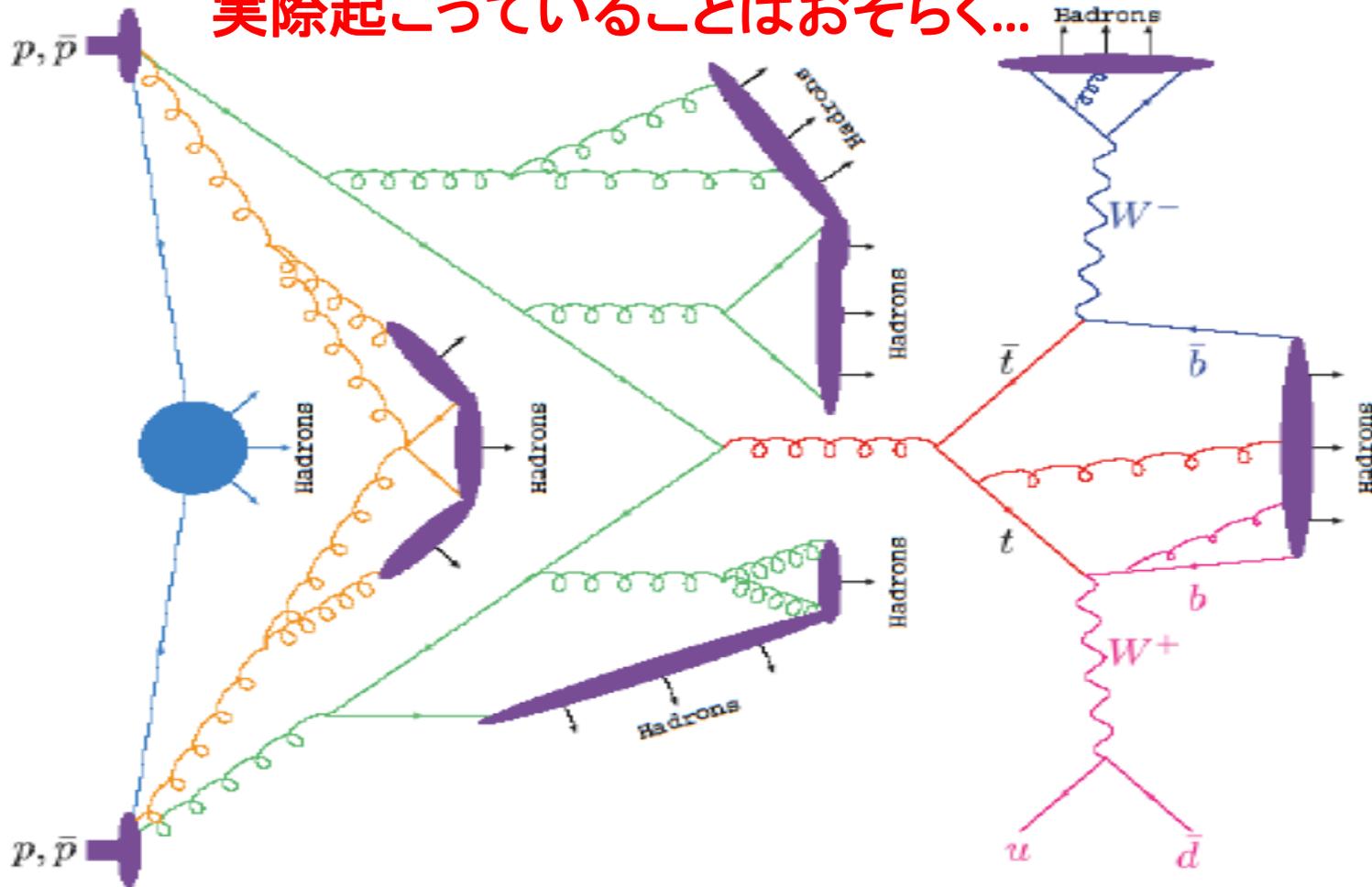
- パートの種類
 - Valence quark
 - 陽子を構成するuud quark
 - 陽子のエネルギーの約1/6くらいにピークを持つ
 - Sea quark
 - $g \rightarrow u\bar{u}$ のように対生成消滅を繰り返すquark
 - 低いxを持つ
 - Gluon
 - これが反応することもある
 - ごく低いxを持つ
- 分布は Q^2 に依存
 - 大きな Q^2 だとvalence quarkの影響が小さくなる。
- 例えば125GeVのHiggsを作るには、
 - $125/13000=0.0096 \rightarrow$ 完全にgluon 支配的
- 例えば2TeVのSUSYなら(pairで4TeV)
 - $4/13=0.31 \rightarrow$ Valence quarkの寄与が大きい



PDFとハードプロセスの境界

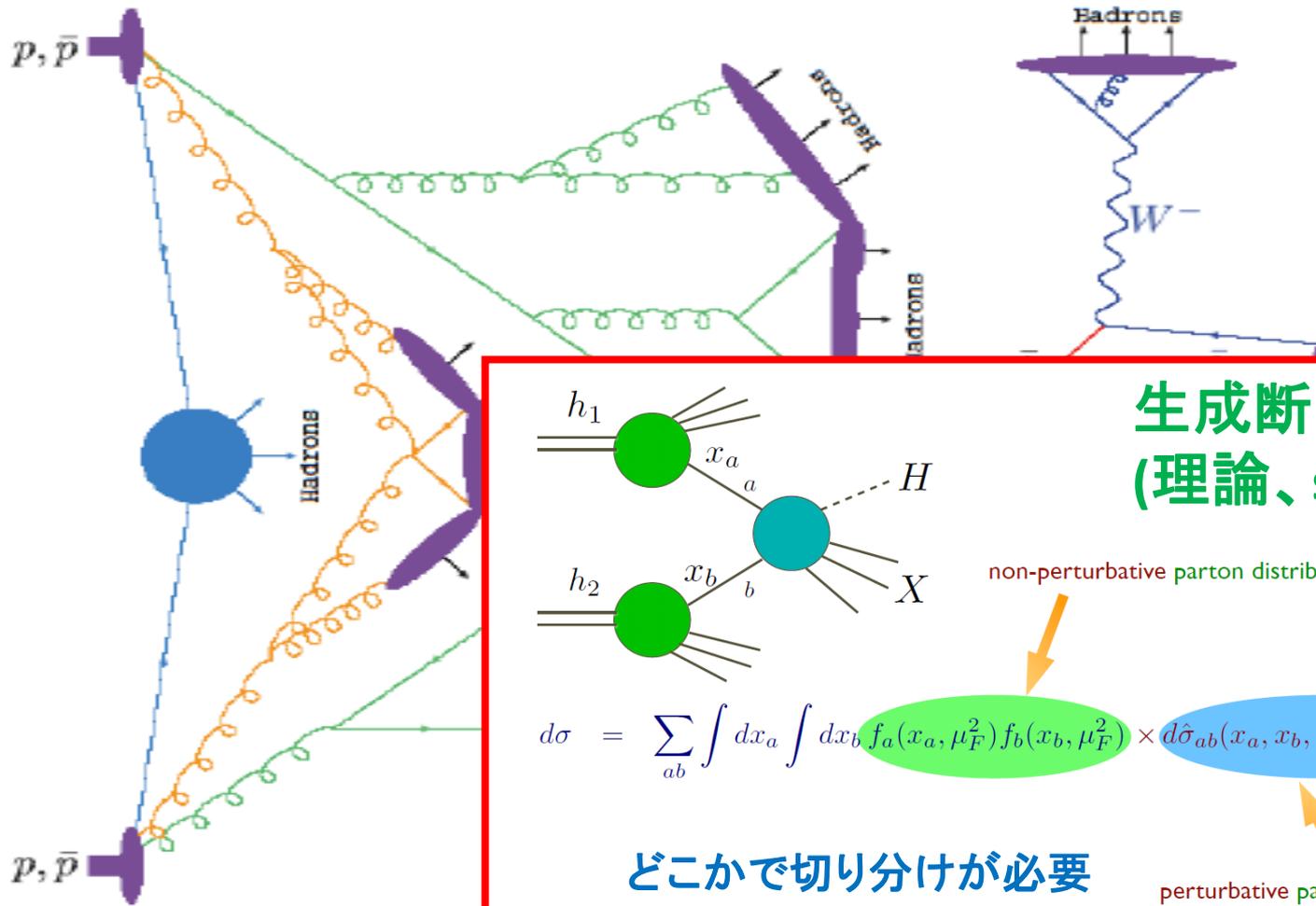
例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$

実際起きていることはおそらく...



PDFとハードプロセスの境界

例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$



**生成断面積を計算
(理論、simulation)**

non-perturbative parton distributions

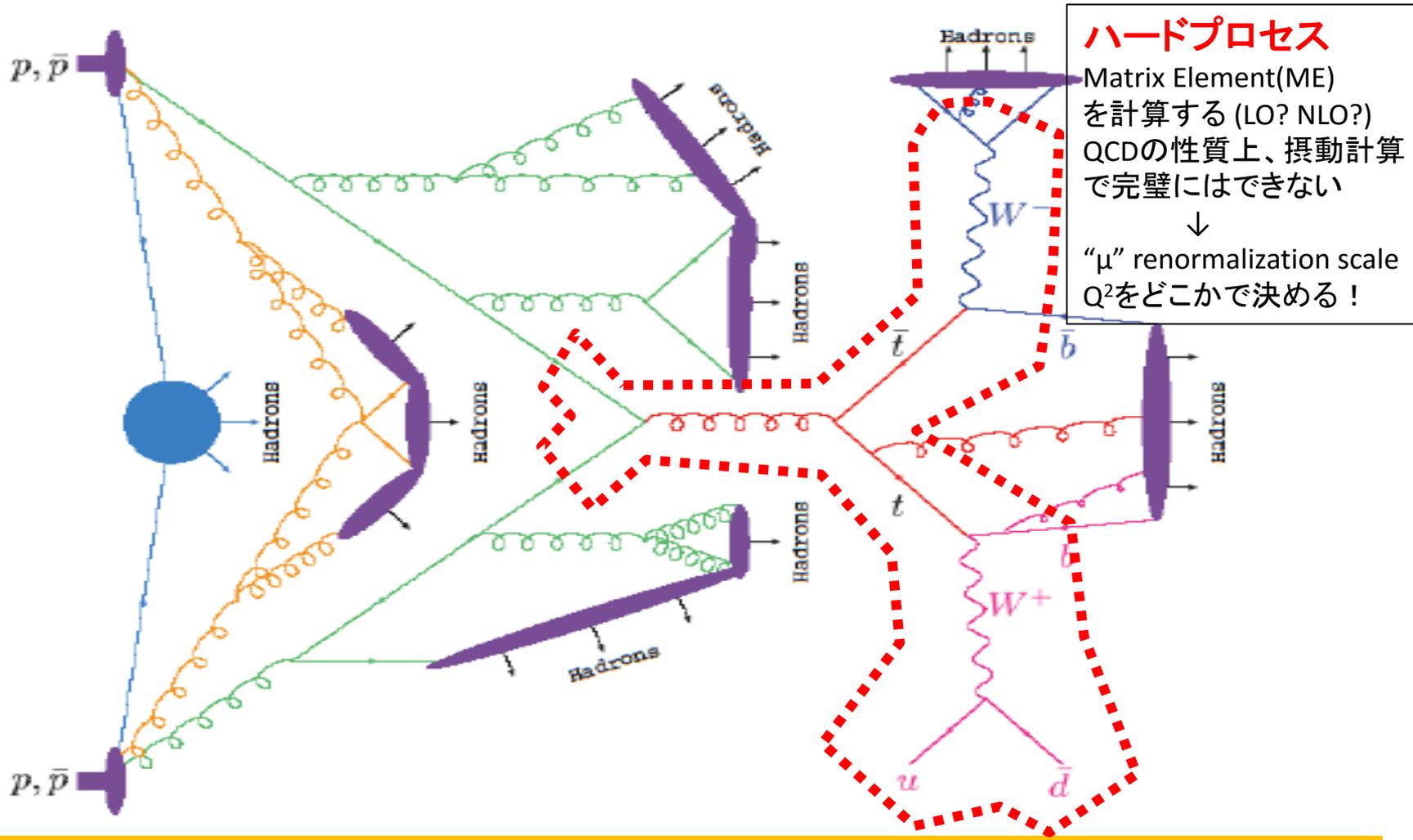
$$d\sigma = \sum_{ab} \int dx_a \int dx_b f_a(x_a, \mu_F^2) f_b(x_b, \mu_F^2) \times d\hat{\sigma}_{ab}(x_a, x_b, Q^2, \alpha_s(\mu_R^2)) + \mathcal{O}(1/Q^2)$$

perturbative partonic cross-section

どこかで切り分けが必要

PDFとハードプロセスの境界

例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$

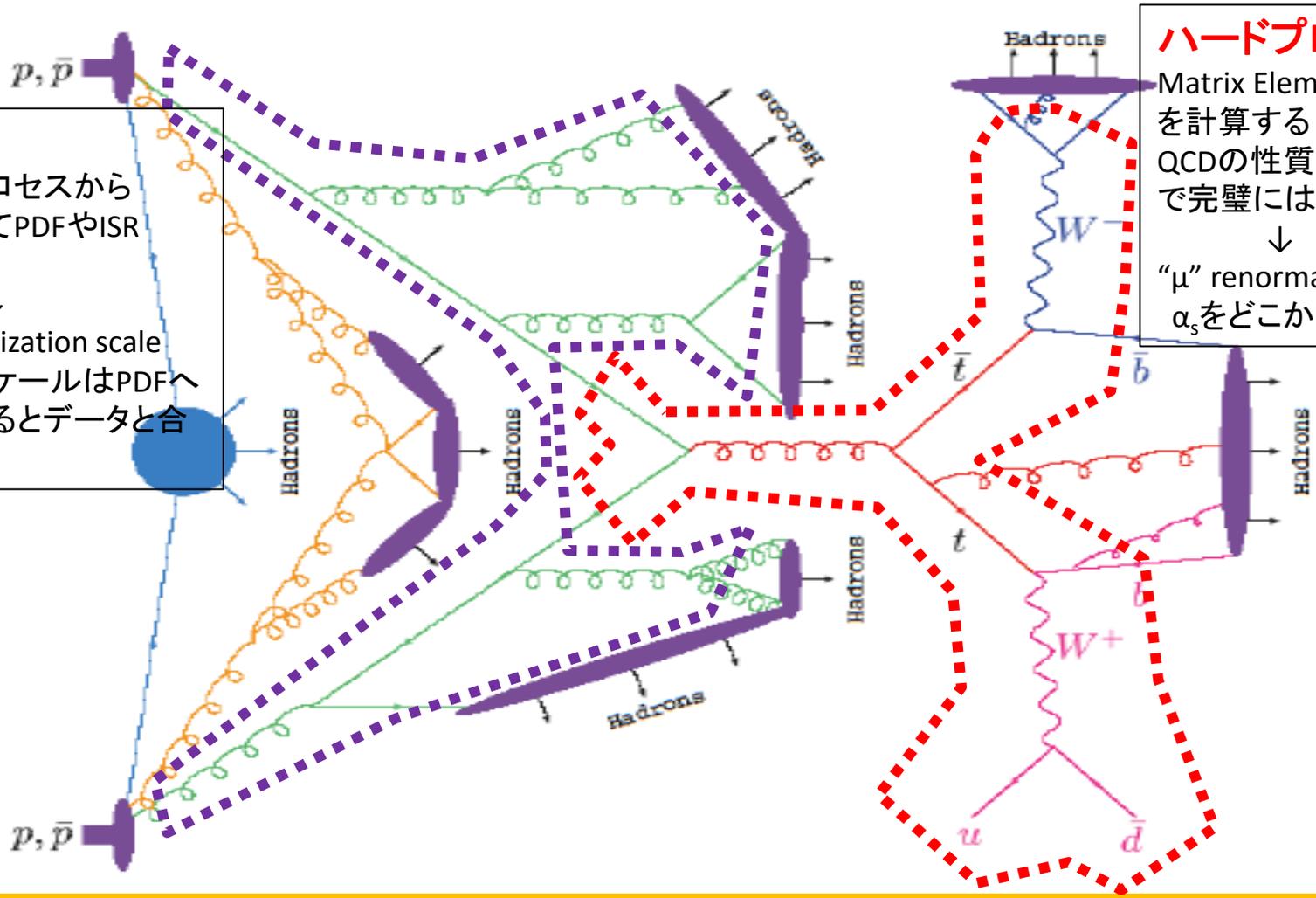


ハードプロセス
 Matrix Element (ME)
 を計算する (LO? NLO?)
 QCDの性質上、摂動計算
 で完璧にはできない
 ↓
 “ μ ” renormalization scale
 Q^2 をどこかで決める！

PDFとハードプロセスの境界

例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$

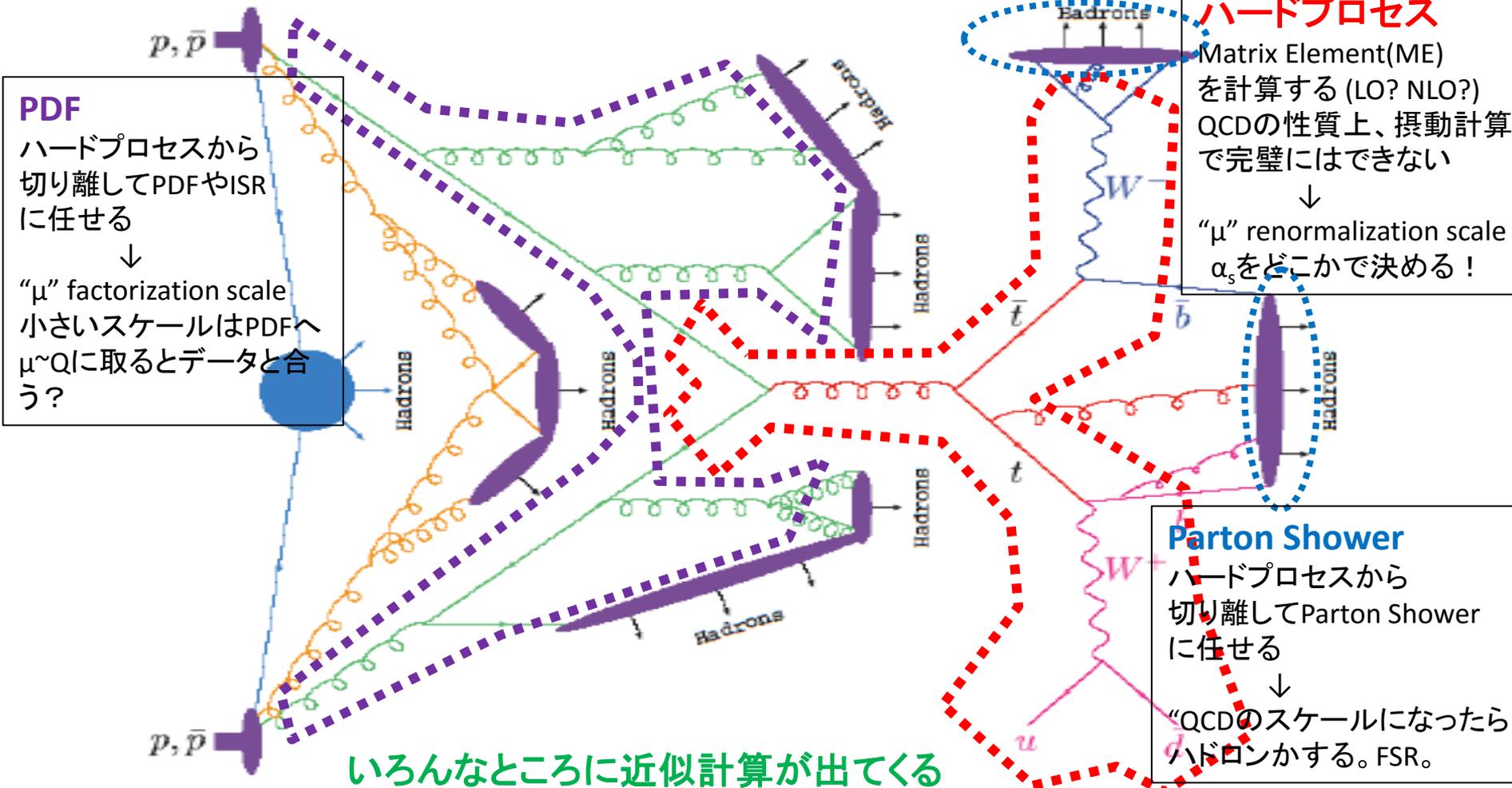
PDF
 ハードプロセスから切り離してPDFやISRに任せる
 ↓
 “μ” factorization scale
 小さいスケールはPDFへ μ~Qにとるとデータと合う？



ハードプロセス
 Matrix Element (ME) を計算する (LO? NLO?)
 QCDの性質上、摂動計算で完璧にはできない
 ↓
 “μ” renormalization scale
 α_sをどこかで決める！

PDFとハードプロセスの境界

例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$



PDF
 ハードプロセスから切り離してPDFやISRに任せる
 ↓
 “μ” factorization scale
 小さいスケールはPDFへ μ~Qにとるとデータと合う?

ハードプロセス
 Matrix Element (ME) を計算する (LO? NLO?)
 QCDの性質上、摂動計算で完璧にはできない
 ↓
 “μ” renormalization scale α_sをどこかで決める!

Parton Shower
 ハードプロセスから切り離してParton Showerに任せる
 ↓
 “QCDのスケールになったらハドロン化する。FSR。”

いろんなところに近似計算が出てくる

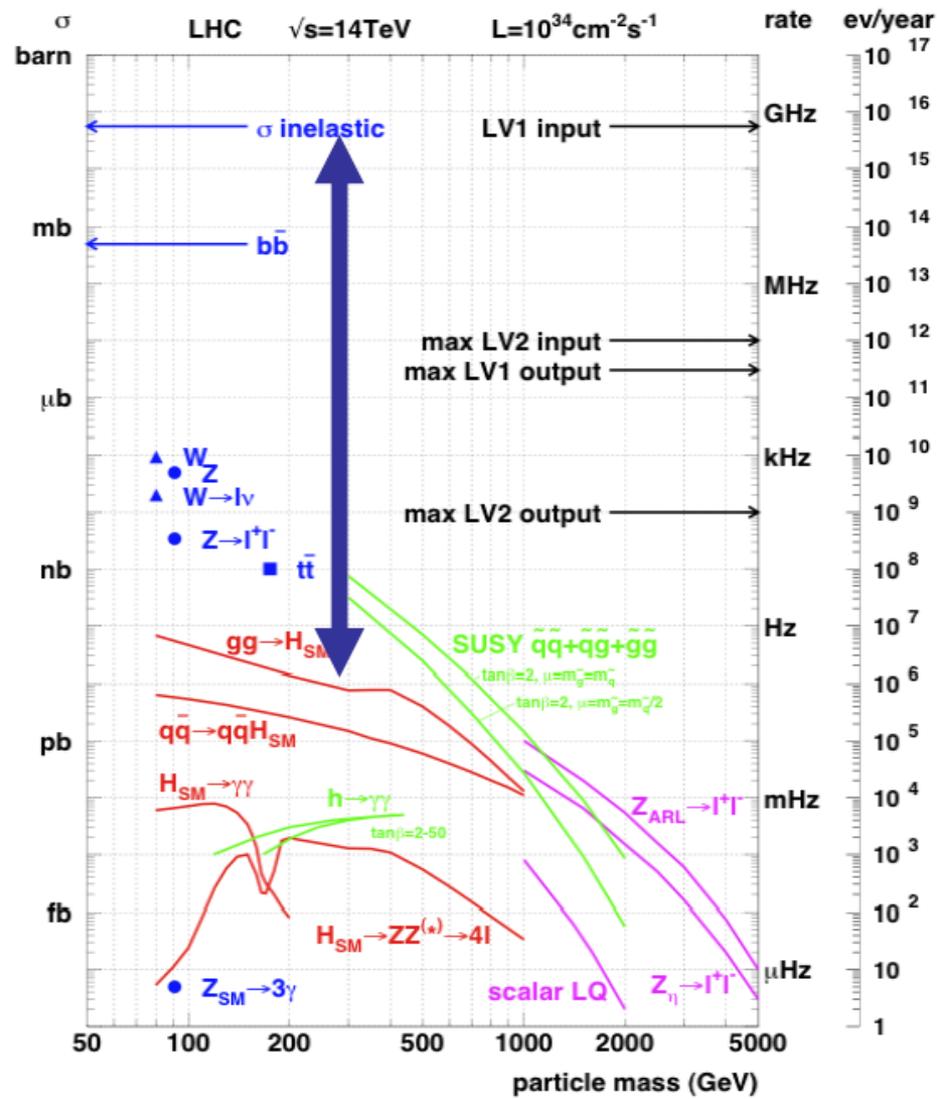
断面積の非常に大きな背景事象

見たいプロセスと陽子の非弾性散乱断面積の間に10桁以上の違いがある。

- つまり、Higgs粒子1事象に対して 10^{10} 事象の背景事象
- 当然、データを取得することも不可能 \rightarrow trigger (最終的には500Hzくらい)

本物っぽい事象だけ記録して後で解析

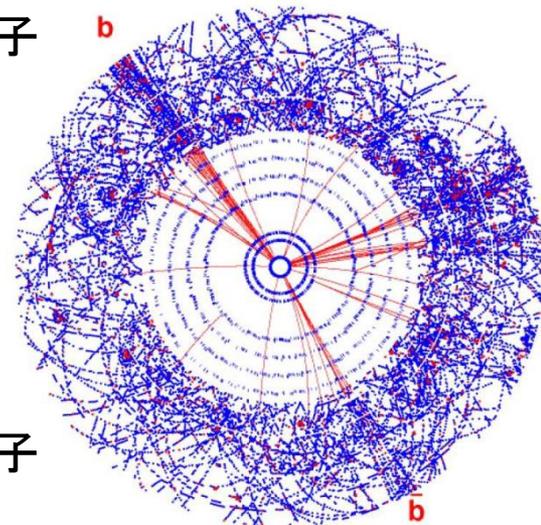
- それでも、割と似ている(fake)プロセス(W+jets, Z+jets, トップ対など)は3-5桁以上多くある。
- 検出器の情報を酷使したり、シミュレーション(モンテカルロ)の助けを借りて信号を探す作業が解析そのもの。



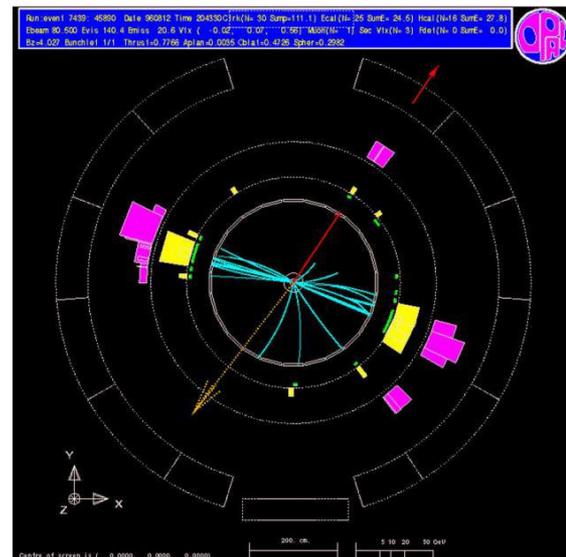
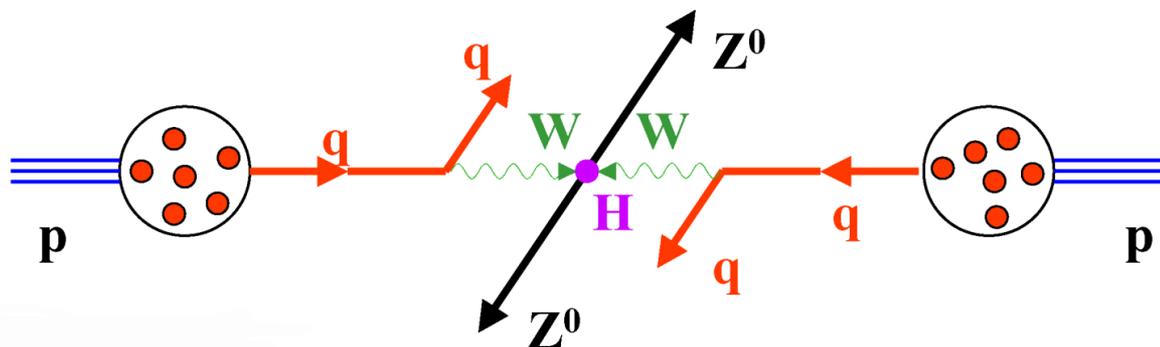
反応のスペクテータ

- 主要なプロセスはひとつのパートン同士の衝突
 - 例 $qq \rightarrow qqH \rightarrow qqZZ$
- 陽子は複合粒子なので主要衝突に寄与しないパートンがたくさんいる(スペクテータ)
- これらの反応が多数の(主に)ハドロンを生成

陽子-陽子
(LHC)

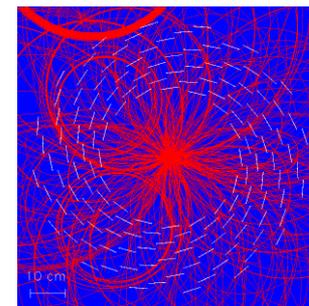
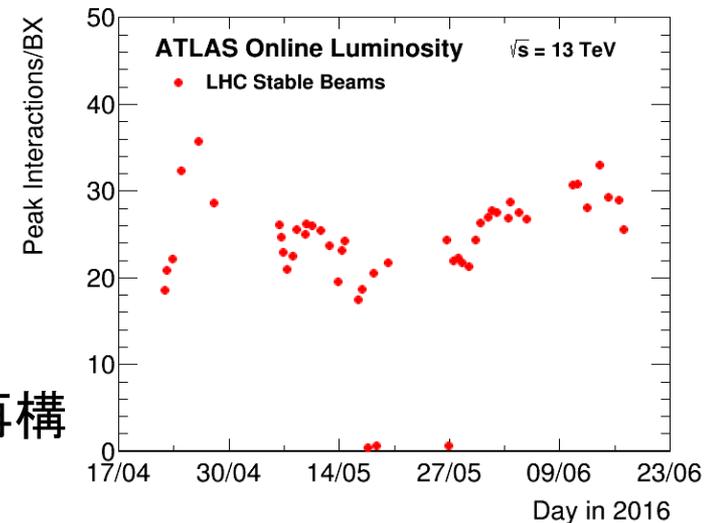


電子-電子
(LEP-2)

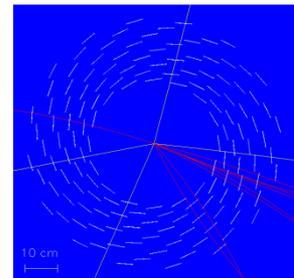


同じバンチの異なる陽子の衝突

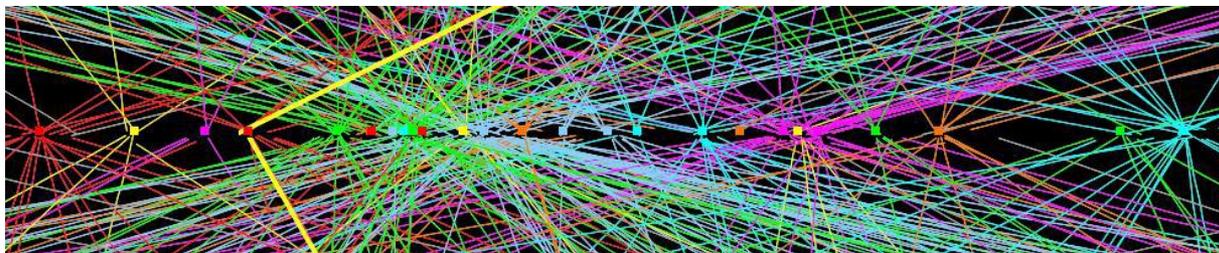
- Pileup
 - 陽子の非弾性散乱断面積は68mb
 - Luminosity $0.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
 - 衝突頻度 $25 \text{ns} = 40 \text{MHz}$ (実際は13%少ない)
 - $68 \text{mb} \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} / 40 \text{MHz} / 0.87 = 20 \text{回/衝突}$
- Pileupを除く方法
 - Objectに随伴したTrackがpointする衝突点を再構成
 - メインのバーテックス以外からの粒子を除去
 - Z方向に分解能のある飛跡検出器がカギ
 - Trackの運動量の低いものを除去
 - $p_T > 2 \text{GeV}$ のカットでほぼ落ちる。



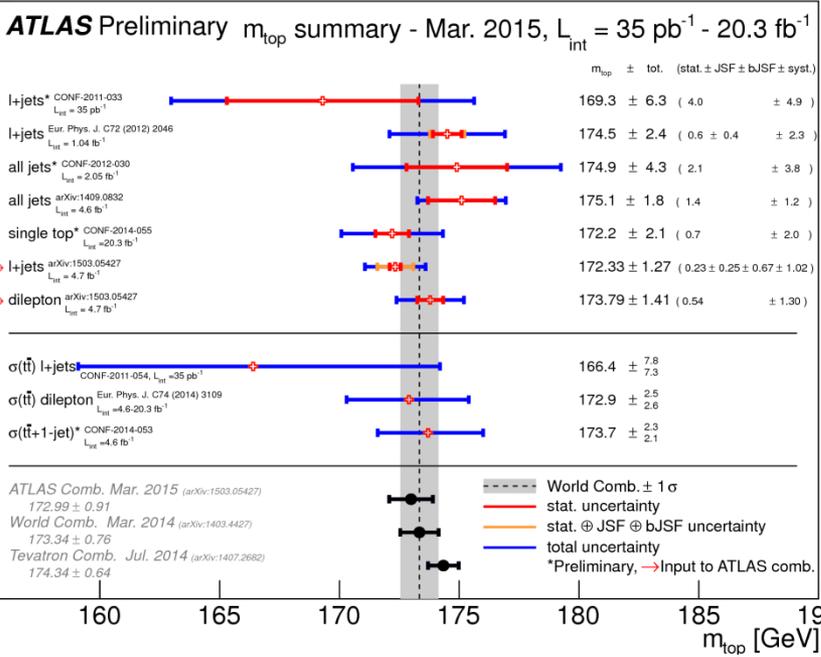
$p_T > 2 \text{ GeV}$



Z \rightarrow $\mu\mu$ candidate with 25 pileup

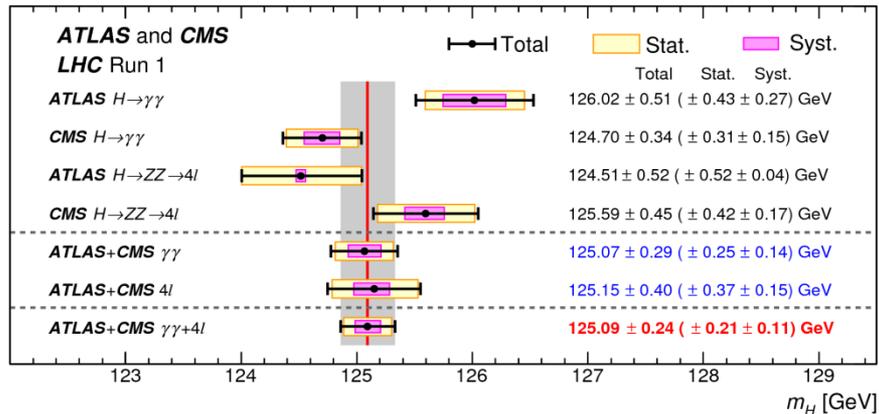
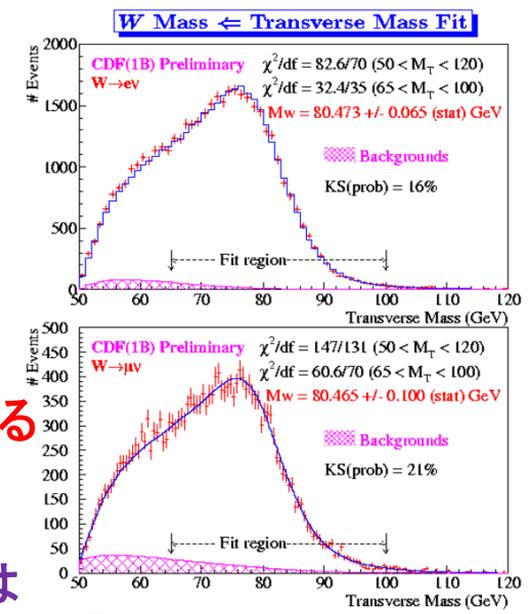


陽子コライダーでの精密測定

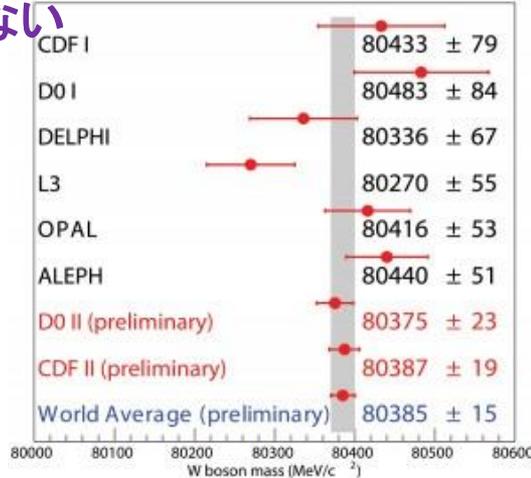


精密測定でも
圧倒的な事象数で
電子コライダーを上回る
(時もある) 特に質量

さすがに生成断面積は
電子コライダーにかなわない



世の中の人々が、
ILC(線形加速器)
をやろうとする理由



Backup
