

# 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？

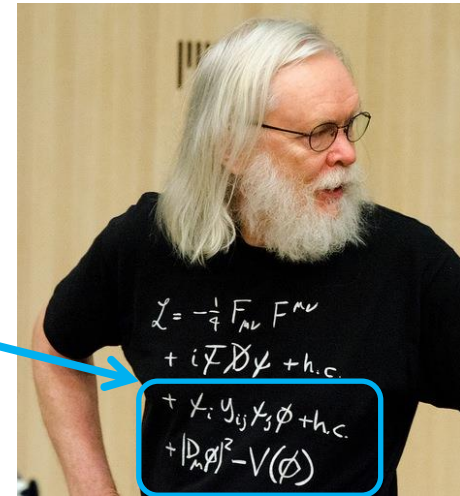
## • 宇宙を構成する根本的な原理

### – 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

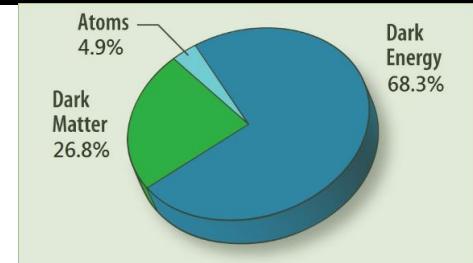
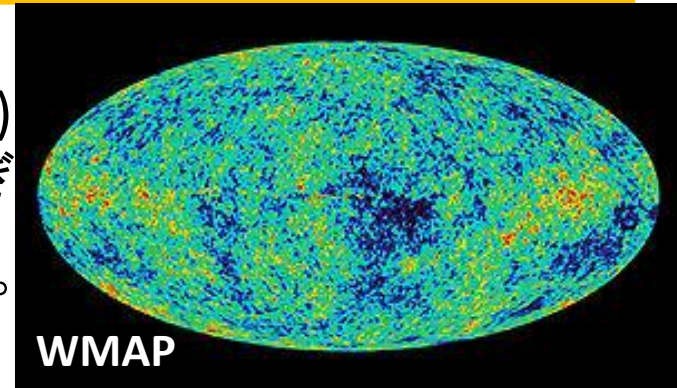


割と行き詰っている感があるのも事実で、  
新しい実験や手法を考案、実現するよい機会

# 加速器実験にこだわる理由

## 非加速器実験における功績

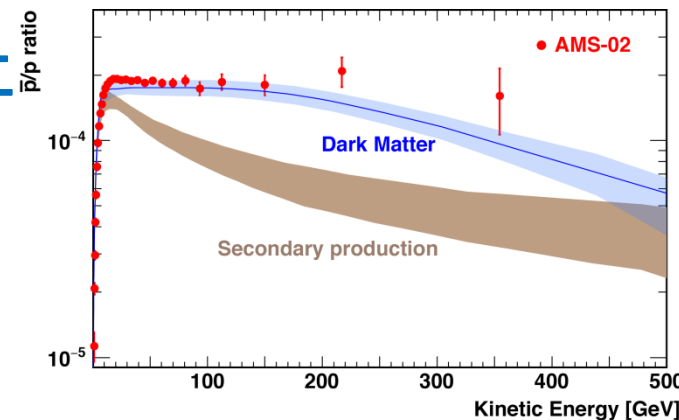
- 宇宙背景放射(Cosmic Microwave Background)
  - COBEやWMAPが行ったCMBの等方性や揺らぎの測定で宇宙の成り立ち、年齢(138億年)や暗黒物質、暗黒エネルギーの存在が示唆された。
- WIMPダークマター探索
  - XENON100, LUXなどの地下実験
  - Fermi-LAT, AMS-02 などの衛星やISSでの観測実験



## 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、~GeV-TeVスケールは簡単ではない→大きな加速器が必要。

どのくらい?



# 加速器の基本原理

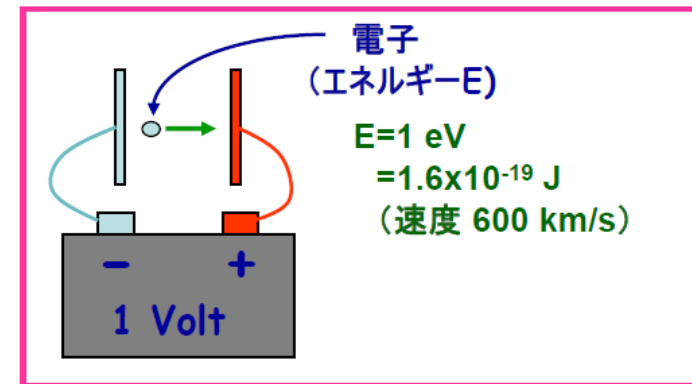
- 基本原理はローレンツ力

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

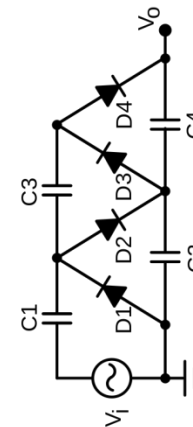
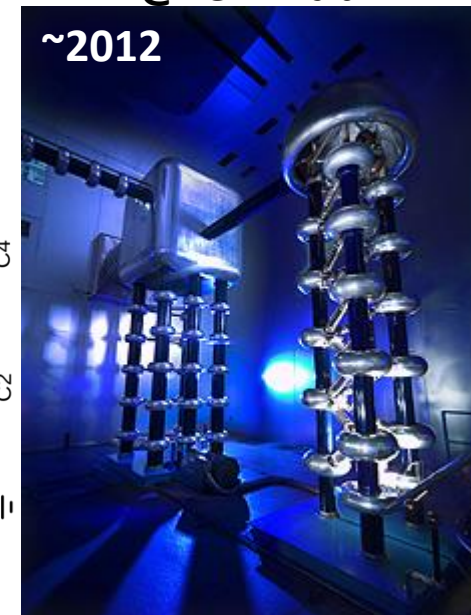
- 荷電粒子(電荷 $q$ )に電場 $\vec{E}$ をかけると力を受けて加速する。
- 速度 $\vec{v}$ を持つ粒子は磁場 $\vec{B}$ をつかって方向を変えたりビームを収束させることができる。

- 静電型加速器(1930-)の限界

- 乾燥空気の絶縁耐圧は $\sim 3\text{MeV/m}$ 
  - $1\text{m}$ で $3\text{MeV}$ ?!  $\rightarrow 30\text{km}$ で $90\text{GeV}$
- 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 $1\text{TeV}$



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 $\beta$ 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 $\omega$ 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。

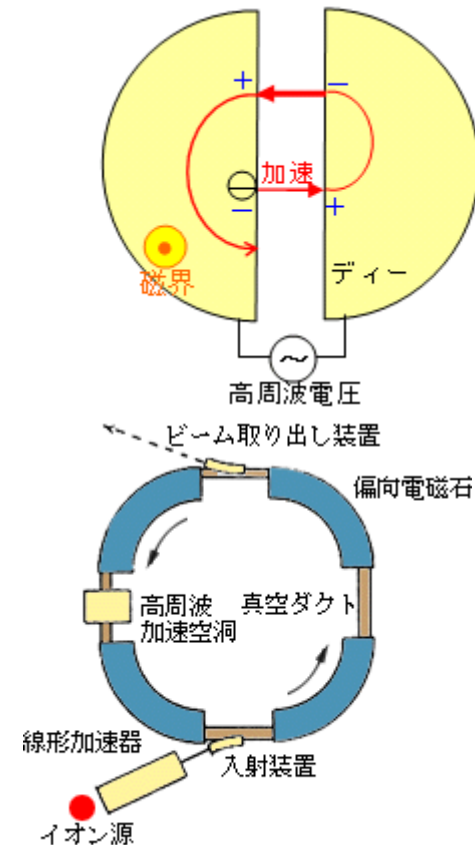
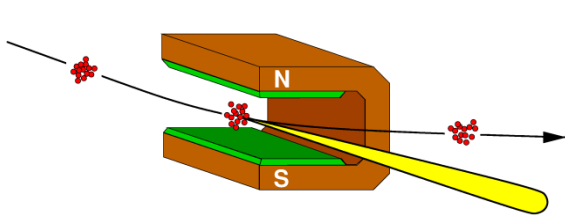


図1.シンクロトロンの構成

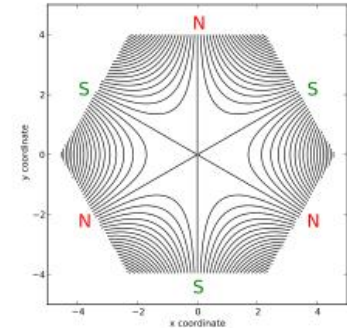
# 電磁石の種類

- 偏向(双極)電磁石

- 一方向の磁場で粒子を曲げる(Bending Magnet)

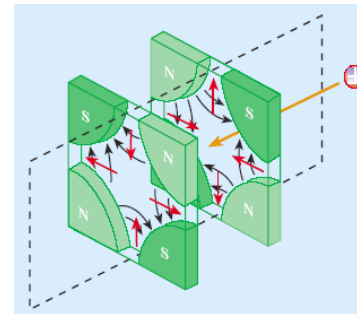
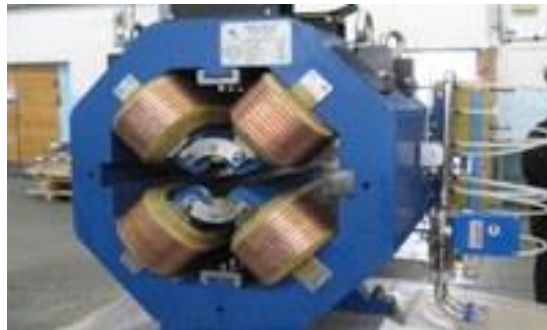
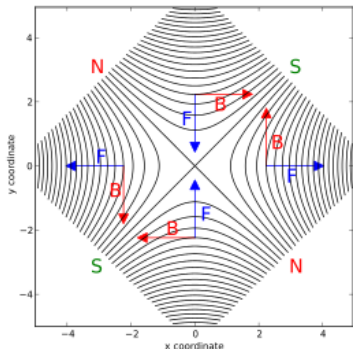


c.f. 6極電磁石  
軌道のずれの補正



- 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

## • シンクロトロン放射

- 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 $2\text{GeV/周}$ のエネルギー損失...  $13\text{TeV}$ 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 $1.5 \times 10^{13}$ 倍低いシンクロトロン放射 →  $100\text{GeV}$ 電子加速器が可能なら $10^{12}\text{TeV}$ 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、

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

- **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 $50\text{TeV}$ 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

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

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

- 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

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

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

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

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

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

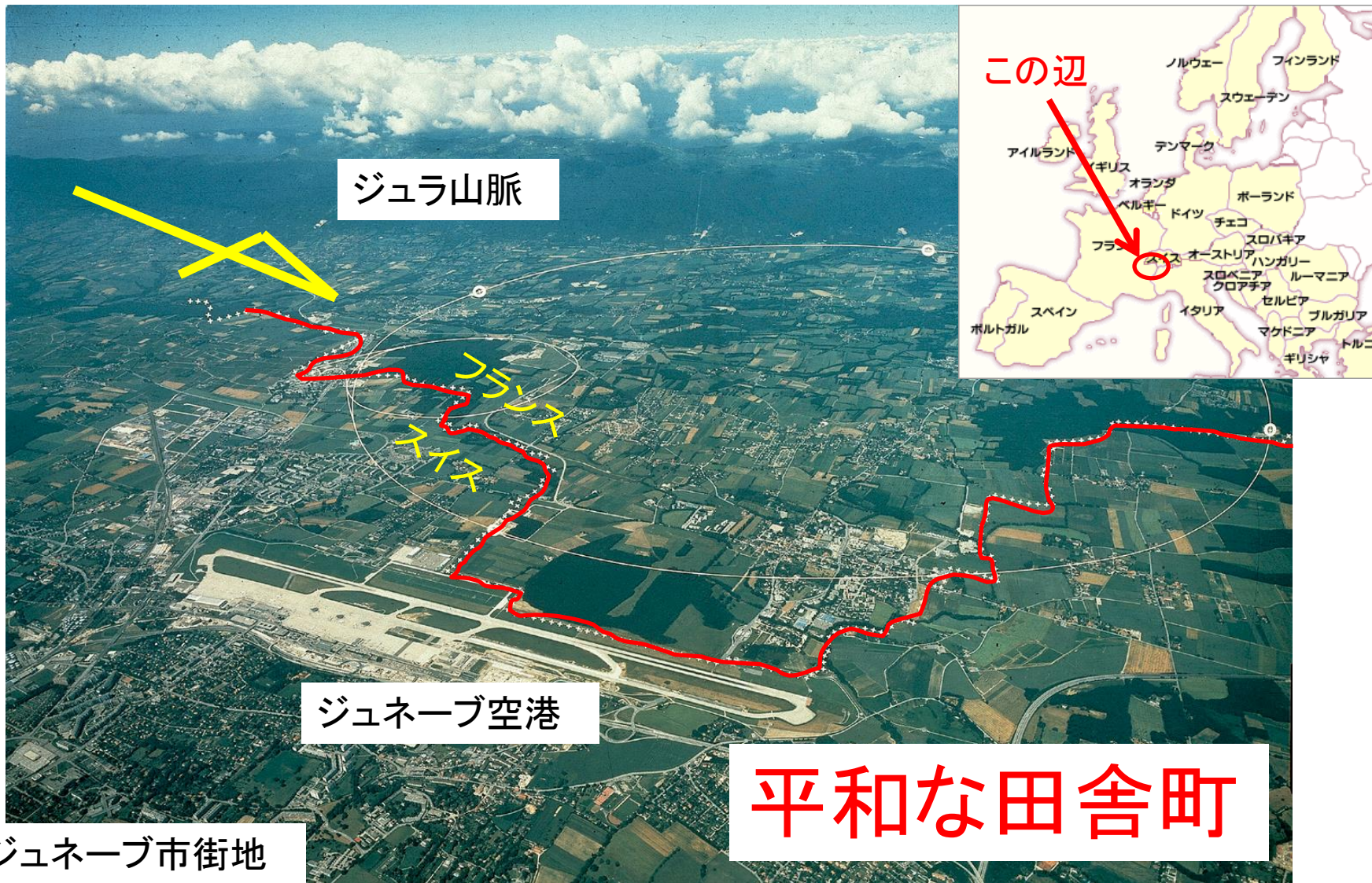
$$= (0,0,E_1-E_2,E_1+E_2)$$

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

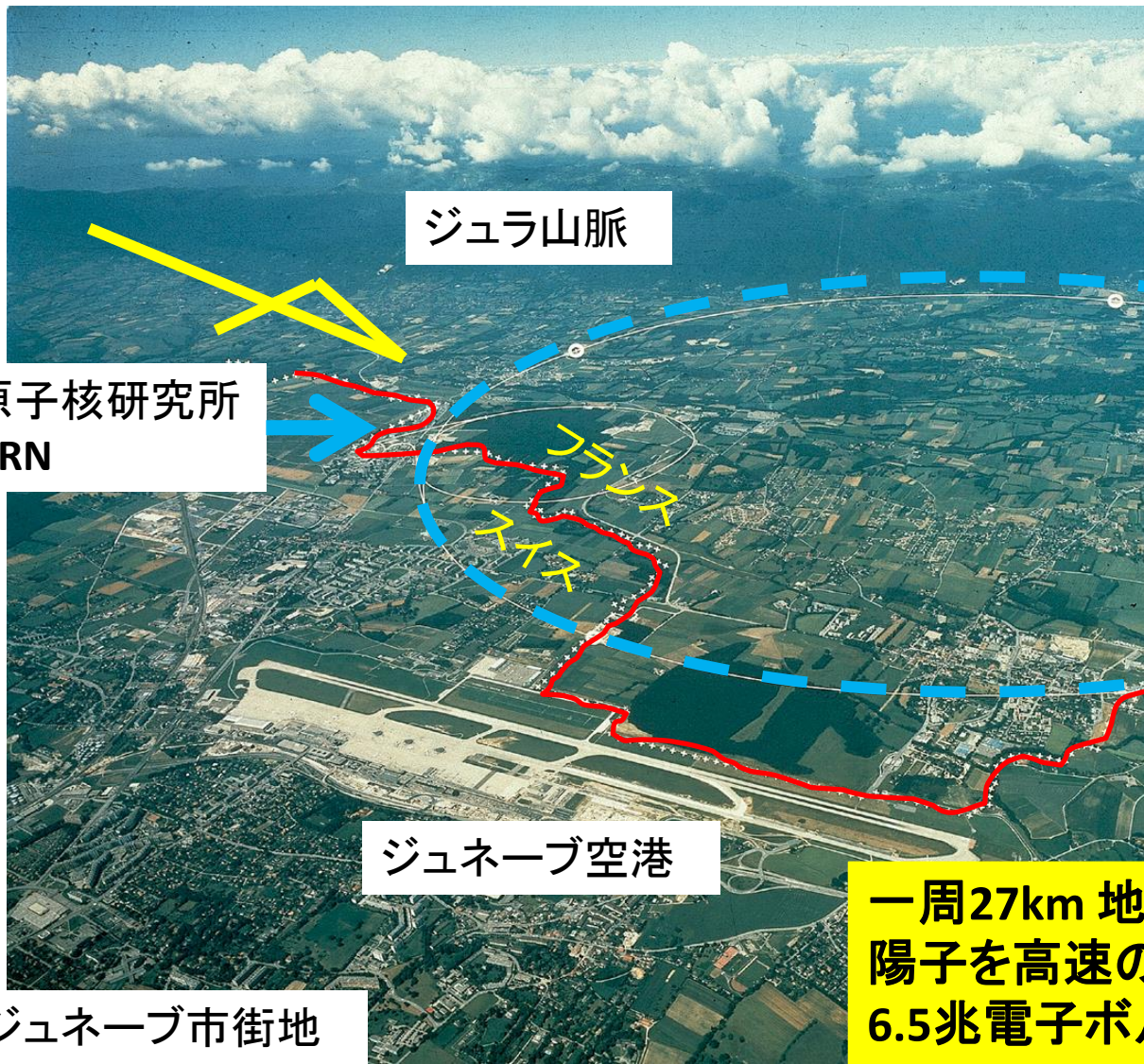
---

# LHC加速器とアトラス実験

# 世界最大の加速器 LHC

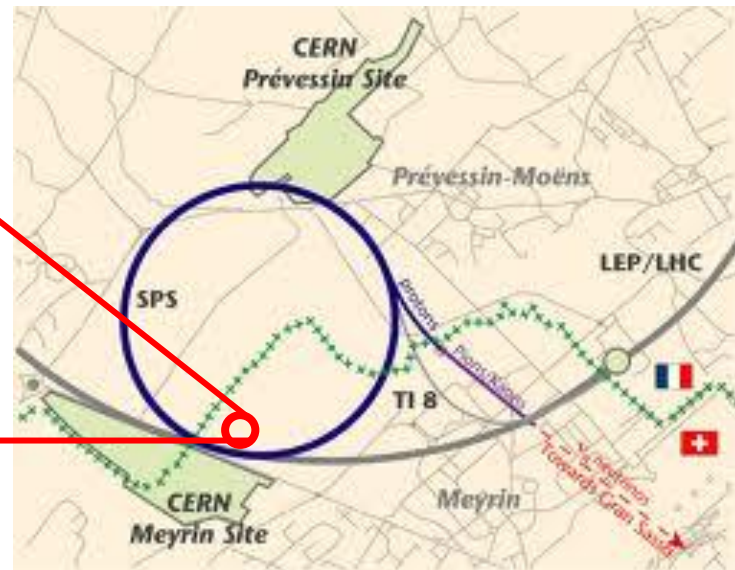


# 世界最大の加速器 LHC



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)



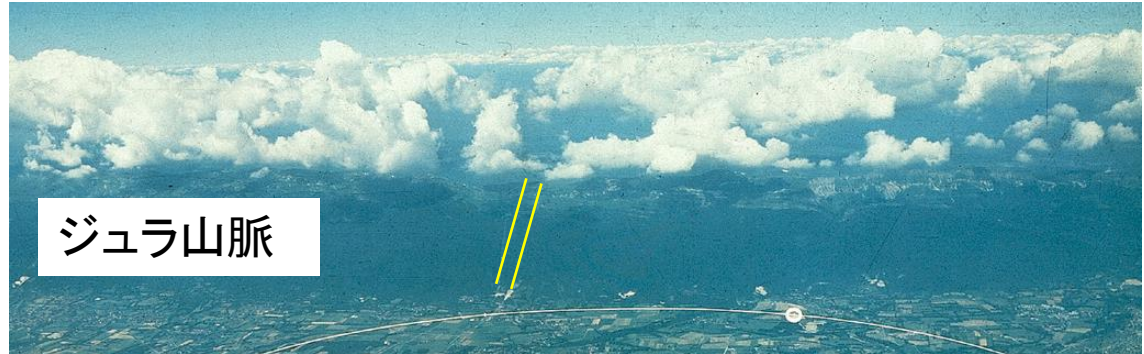
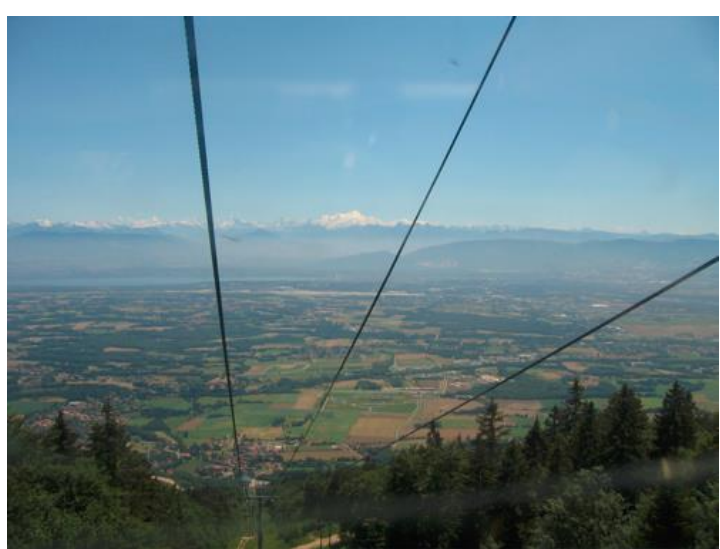
ダン・ブラウン 天使と悪魔の舞台



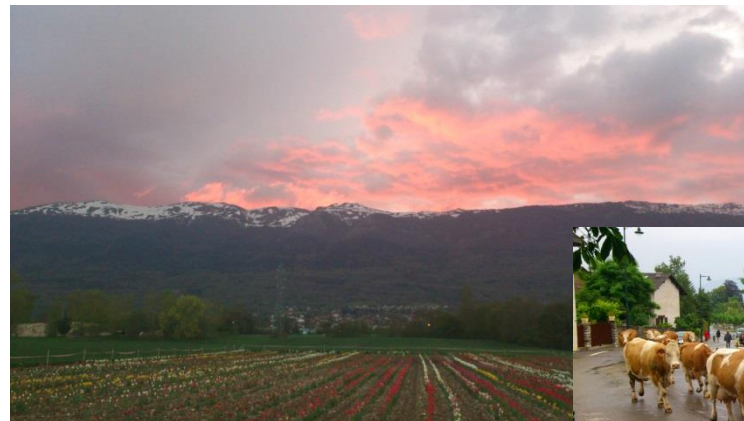
最近、路面電車もCERNまで開通！



# 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)

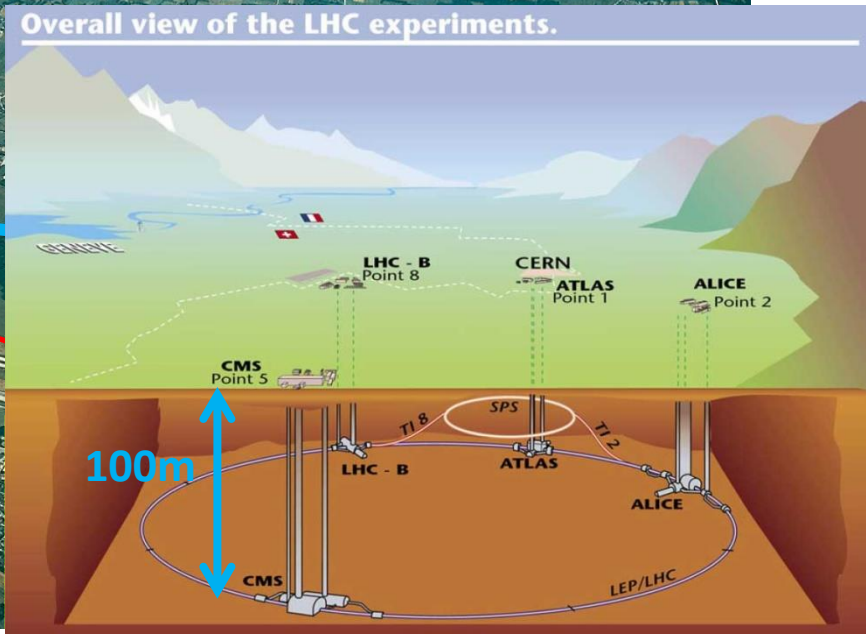
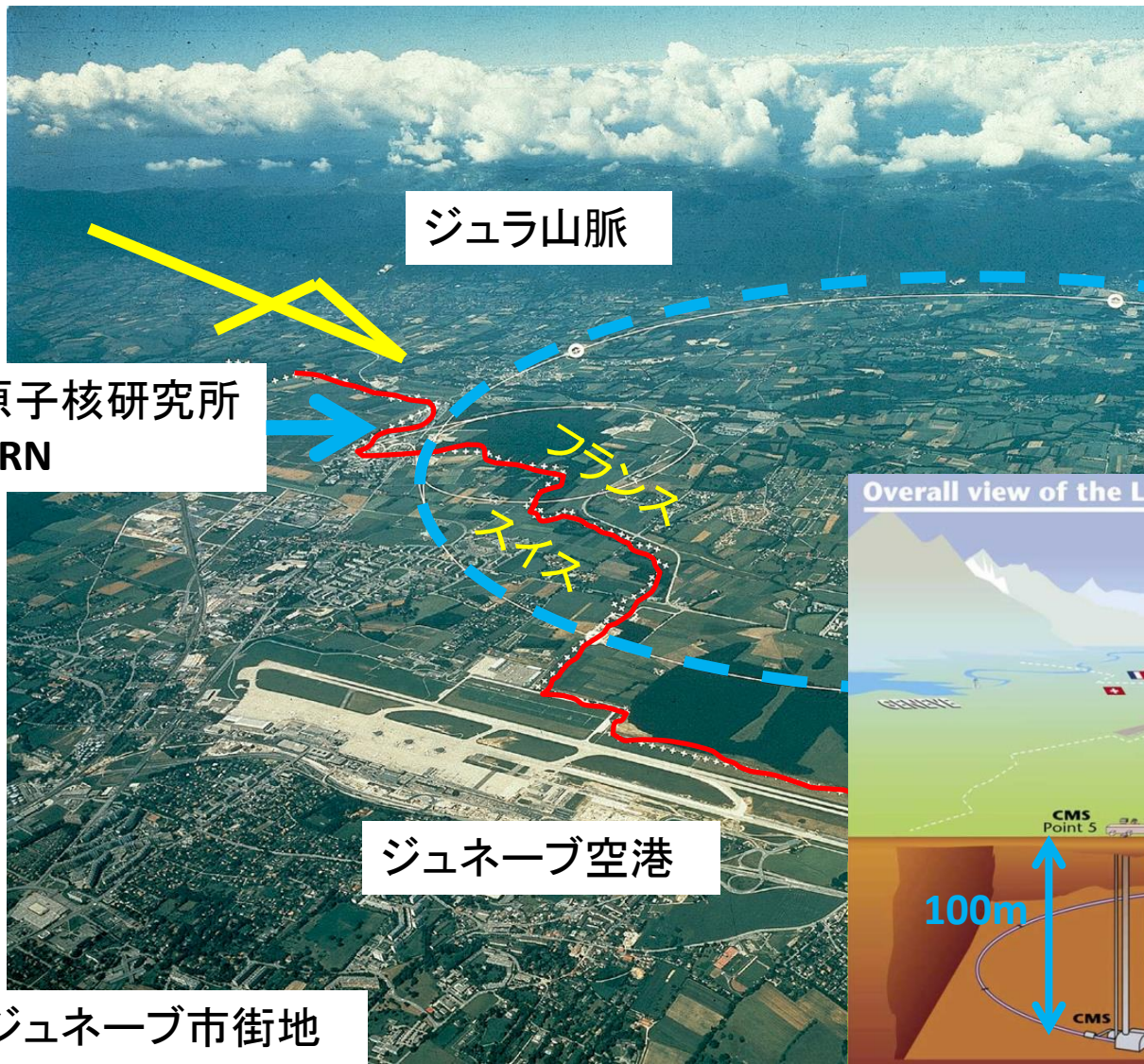


CERNから車で2-3時間くらい

インターラーケンからの眺め

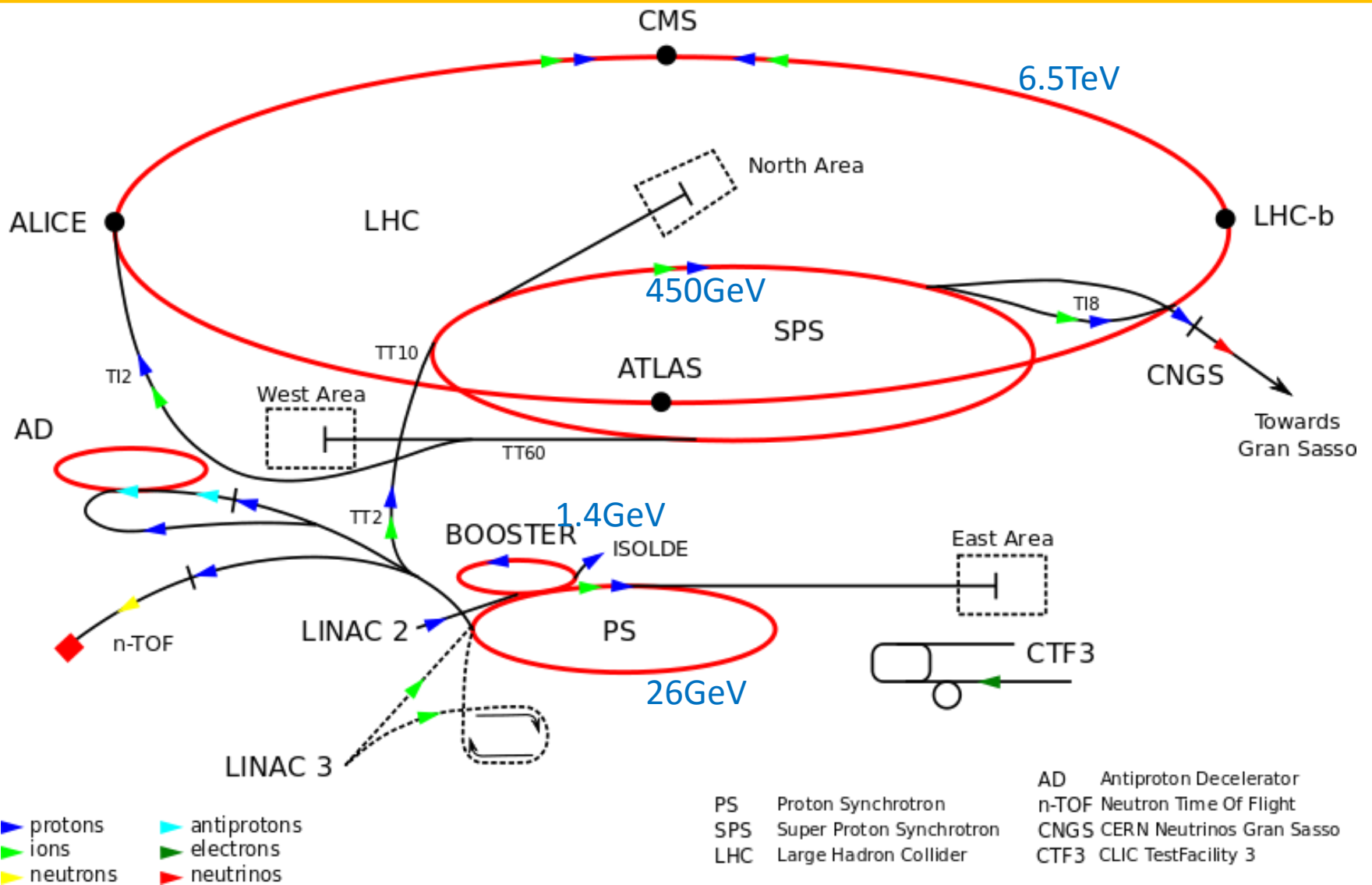


# 世界最大の加速器 LHC

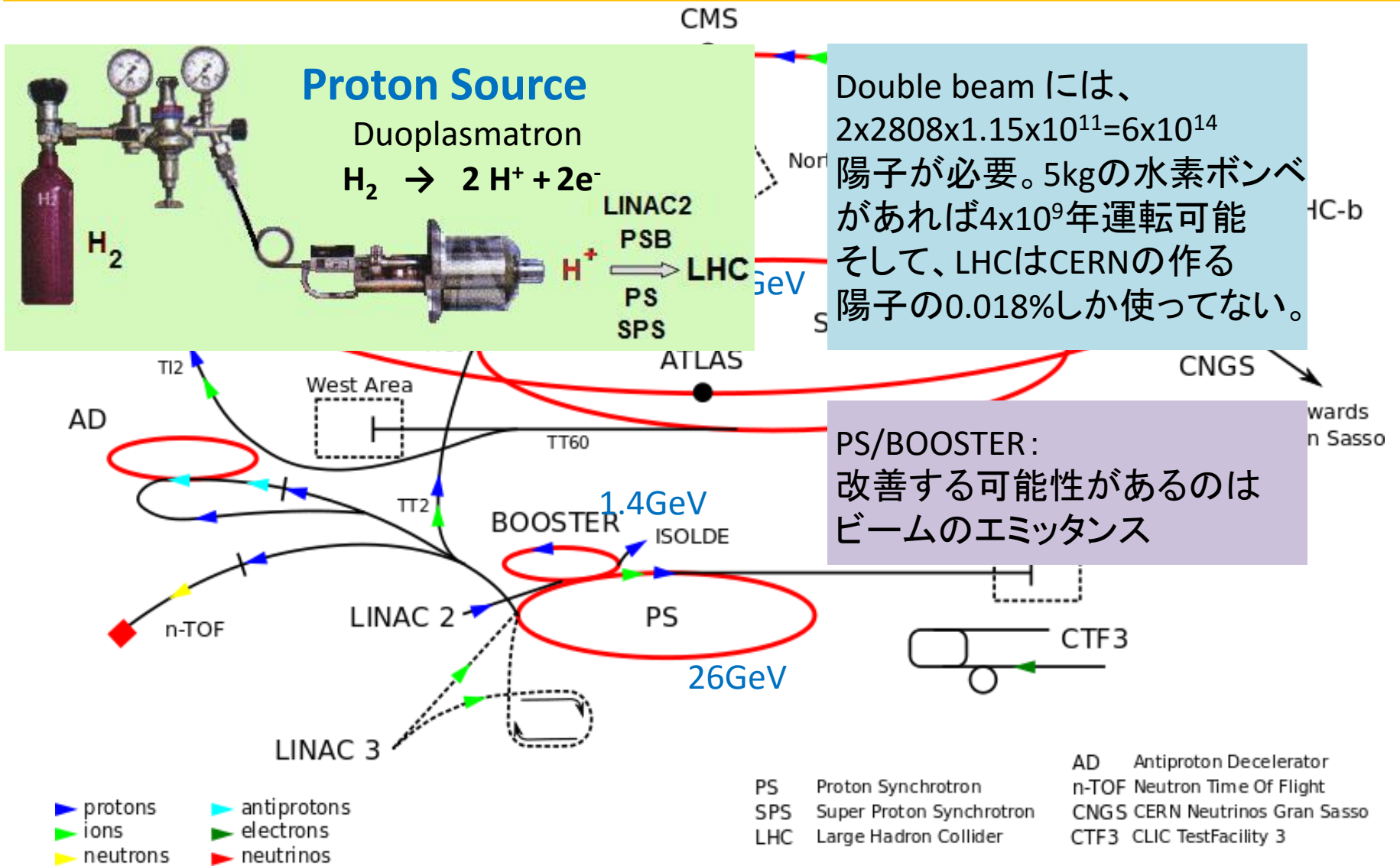




# LHCと前段加速器



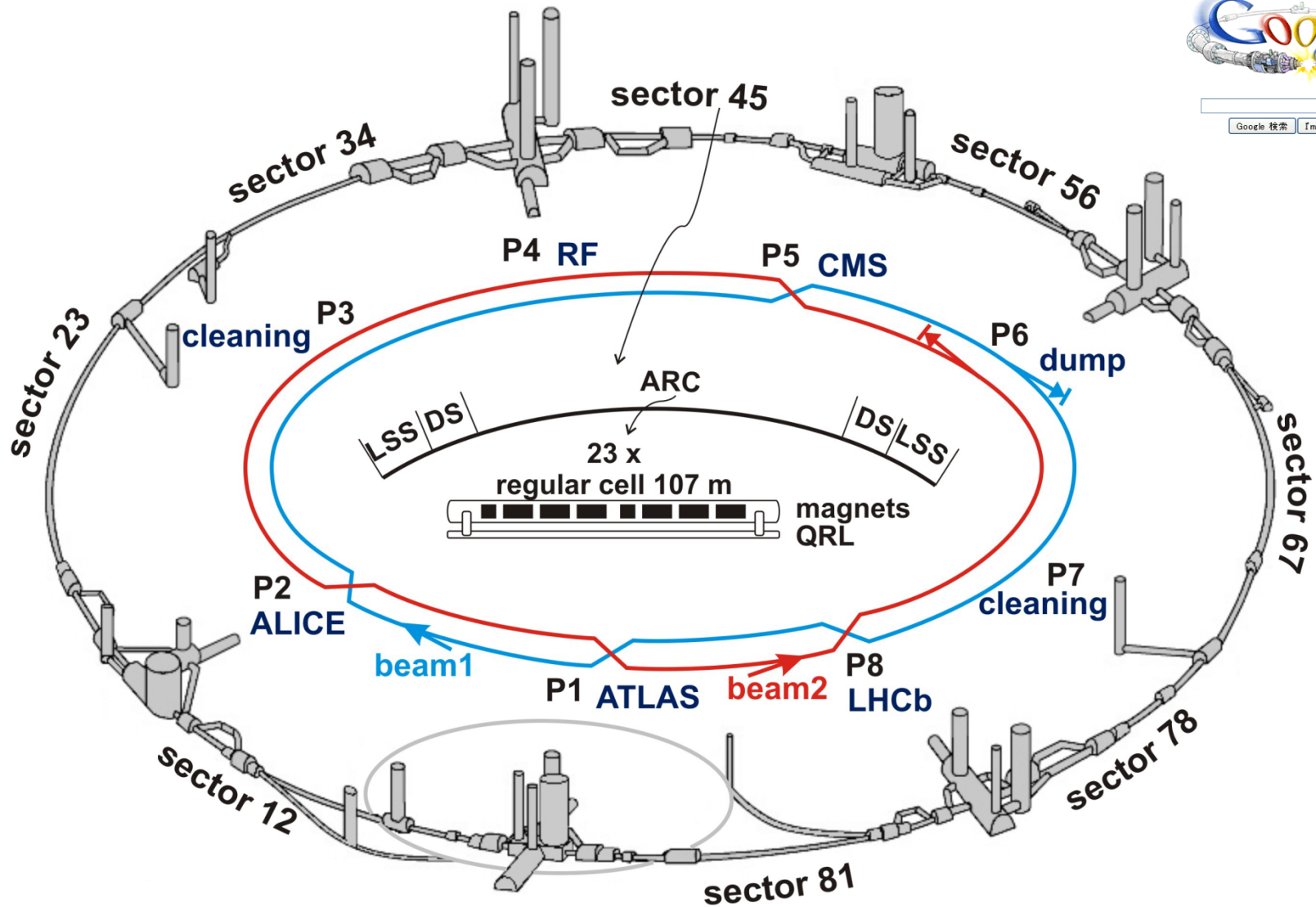
# LHCと前段加速器



# Large Hadron Collider



Google 検索 Im Feeling Lucky



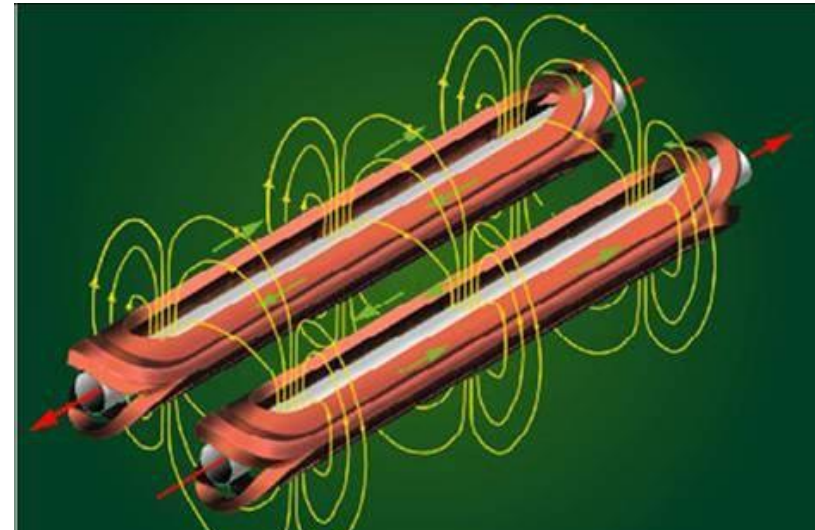
# LHCのマグネット

- 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

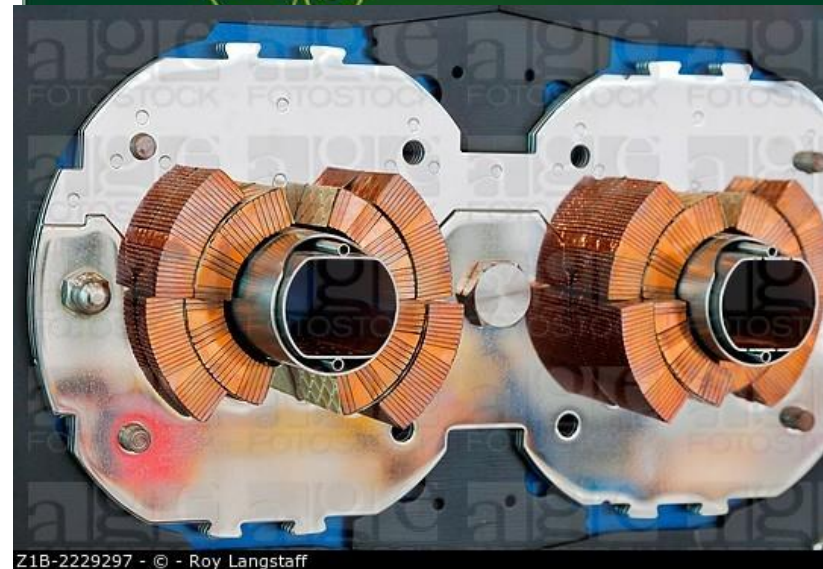
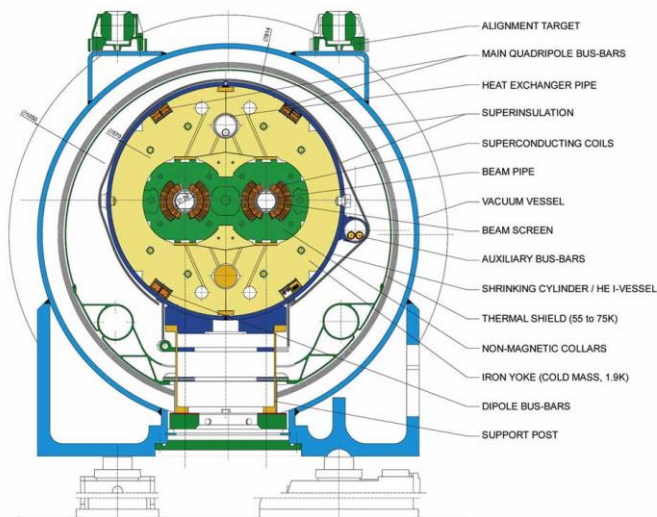


# 超伝導双極電磁石(dipole)

- 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 ( $v_s = 15\text{TeV}$ )

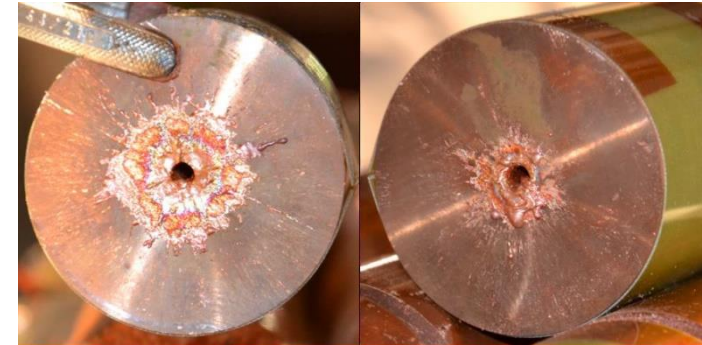
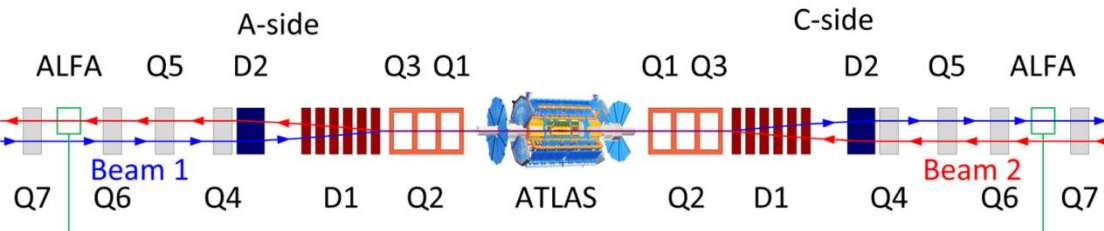


LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

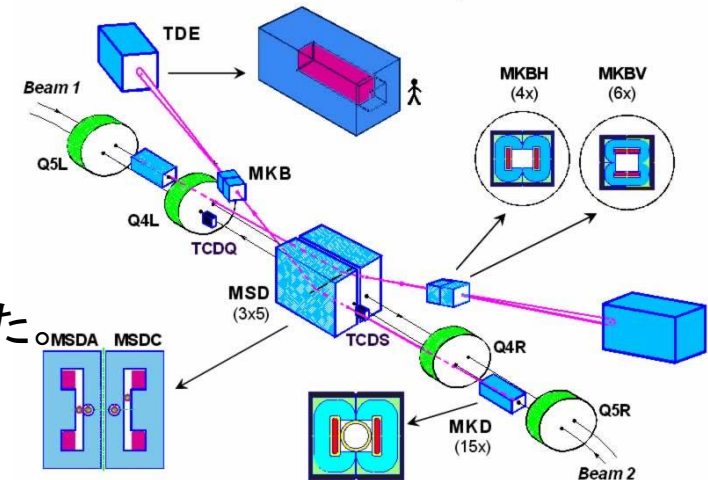


Z1B-2229297 - © - Roy Langstaff

# 収束とダンプ



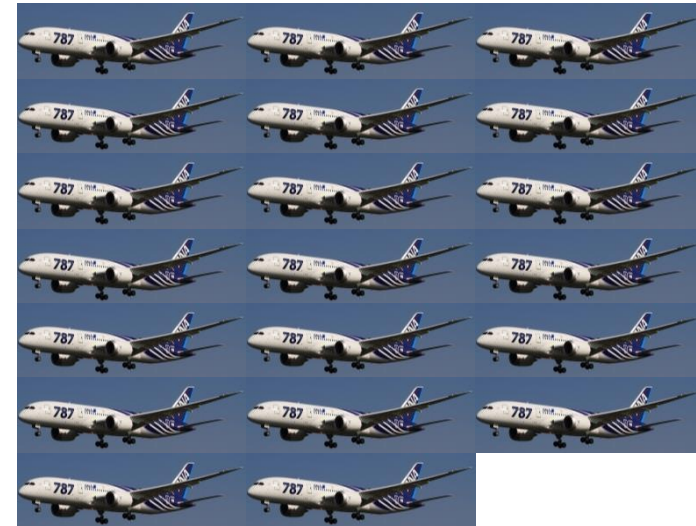
ビームダンプには早いkicker magnetが必要  
軌道をずらしてビームをそらせてアボート。



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 $\beta^*$   
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。
  - $6 \times 10^{14}$ 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 $\mu\text{rad}$
Emittance $\epsilon_n$	3,75 $\mu\text{rad}$
Beta function $\beta^*$	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。

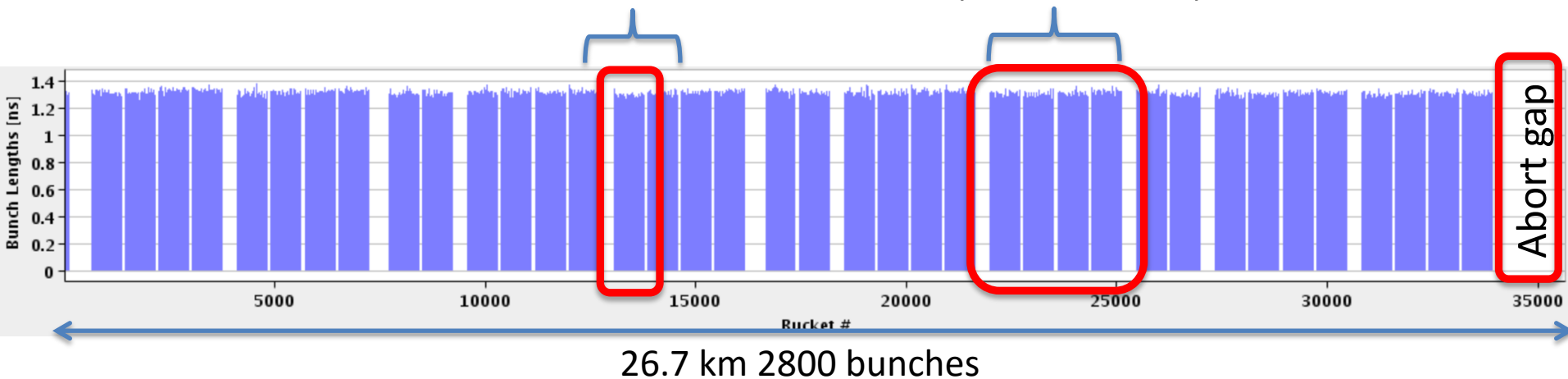
例 LHC 2015

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

$\beta=1$ 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??

1 PS batch  
(72 bunches)

1 SPS batch  
(288 bunches)



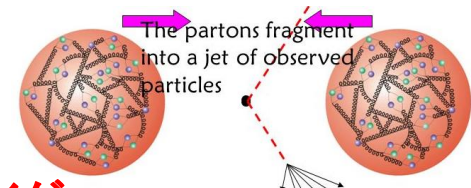
# 断面積

断面積: 粒子と粒子が衝突する頻度を表す量

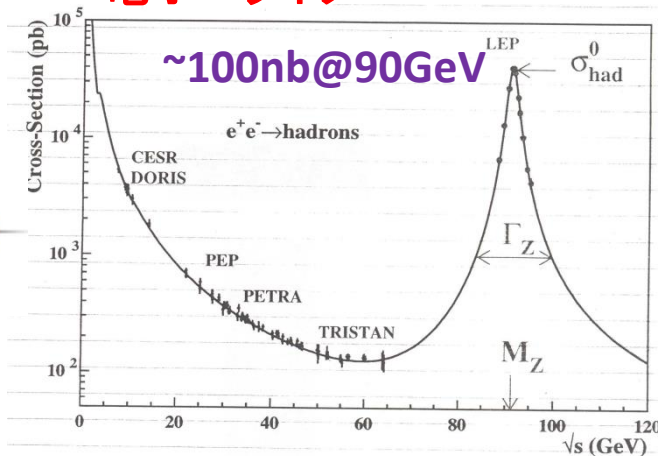
- 粒子と粒子がどのくらい近いと反応するか? → 反応する領域の大きさ(面積)が散乱断面積。
  - 単位は $\text{cm}^2$ でもよいが、ウランの反応断面積を用いたバーン[b]が用いられる。  
 $1\text{b}=10^{-24}\text{cm}^2$
- 電子コライダーはプロセスが単純なので断面積は計算可能。
- 陽子コライダーは非摂動QCDが利くので基本的に計算するのは至難の業。  
 → データから測定。

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

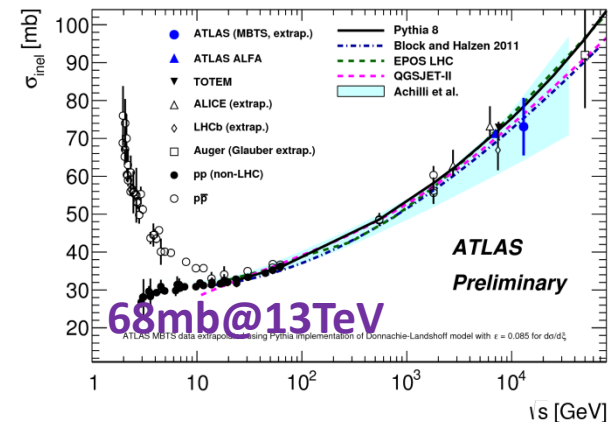
観測事象数 (N - N<sub>BC</sub>)  
 アクセプタンス (1 - f<sub>ξ < 10<sup>-6</sup></sub>)  
 データ量 (ε<sub>trig</sub> × L)  
 積分ルミノシティ (ε<sub>sel</sub>)



## 電子コライダー



## 陽子コライダー



# 瞬間ルミノシティ

- 断面積 $\sigma$ 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、 $\sigma_{tot}$ 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  
 $\sigma$ : 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 =  $1.15 \times 10^{11}$

$n_b$ : number of bunches = 2808

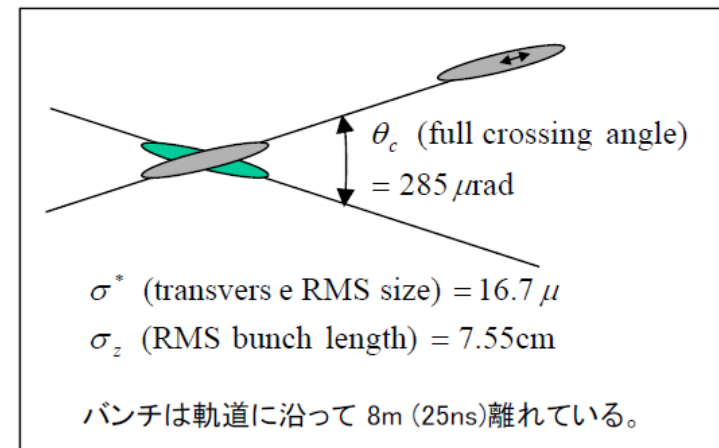
$f_{rev}$ : revolution frequency =  $\frac{c}{l_{ring}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{26659 \text{ m}} = 11253 \text{ Hz}$

$\gamma_r$ : relativistic gamma factor =  $7000 / 0.938 = 7462.7$

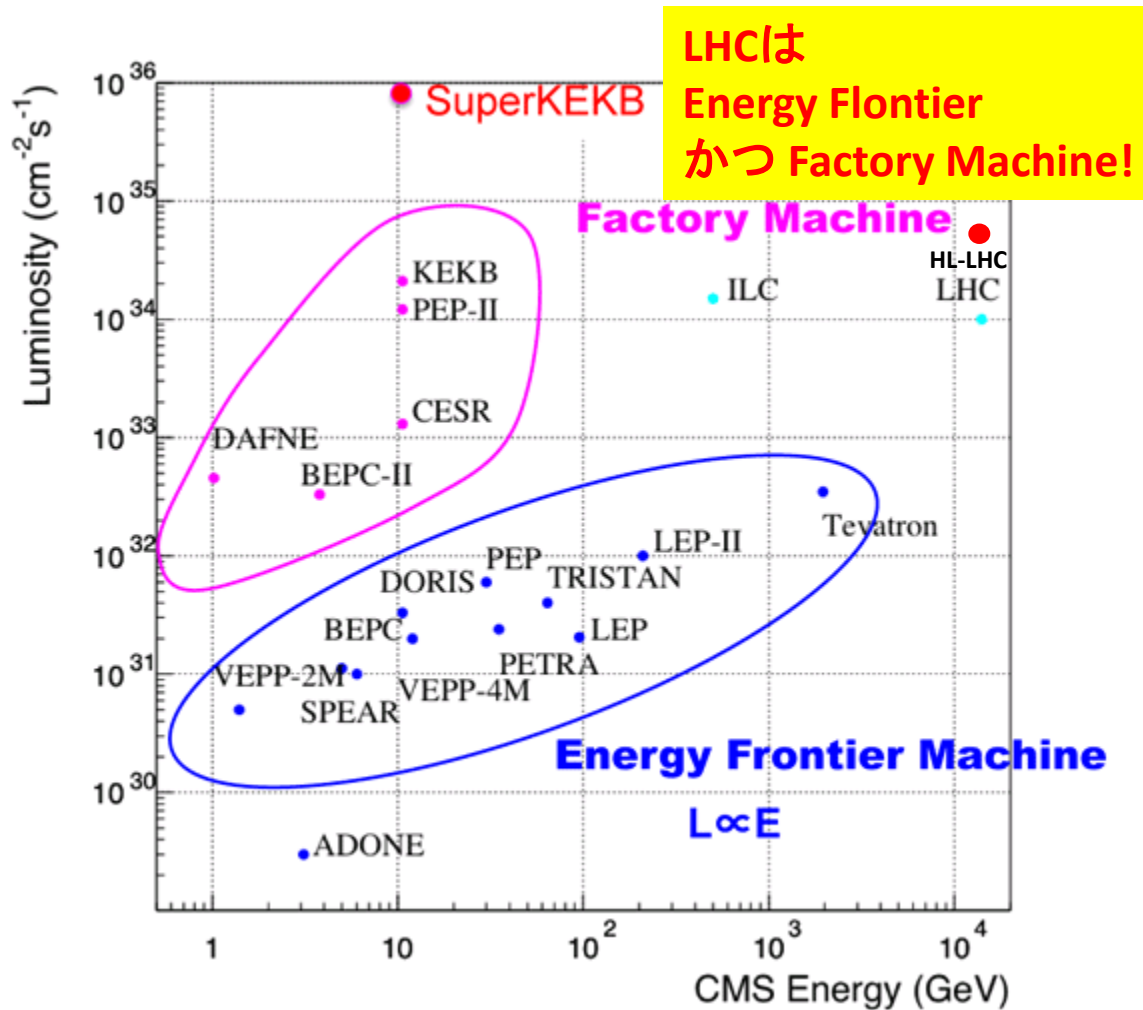
$\epsilon_n$ : normalized transverse beam emittance =  $3.75 \mu\text{m} \cdot \text{rad}$

$\beta^*$ : beta function at IP =  $0.55 \text{ m}$

$F$ : 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 $\tau_L$ 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、

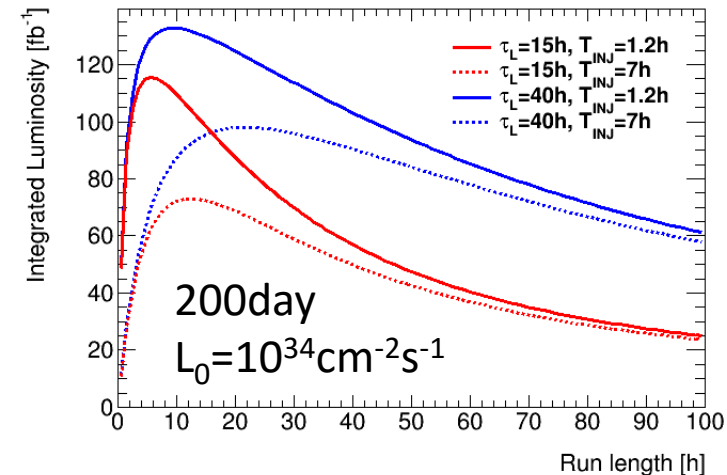
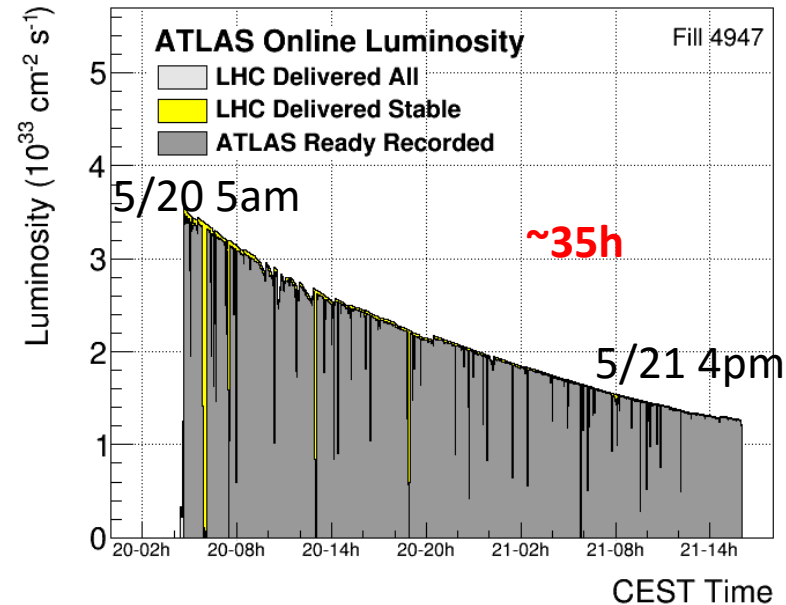
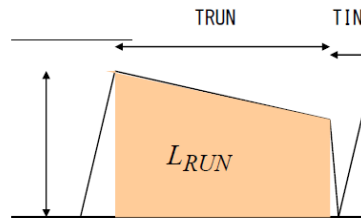
$$\int L_{run} dt = L_0 \tau_L (1 - e^{-T_{run}/\tau_L})$$

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

- 一年(200day)の積分ルミノシティ

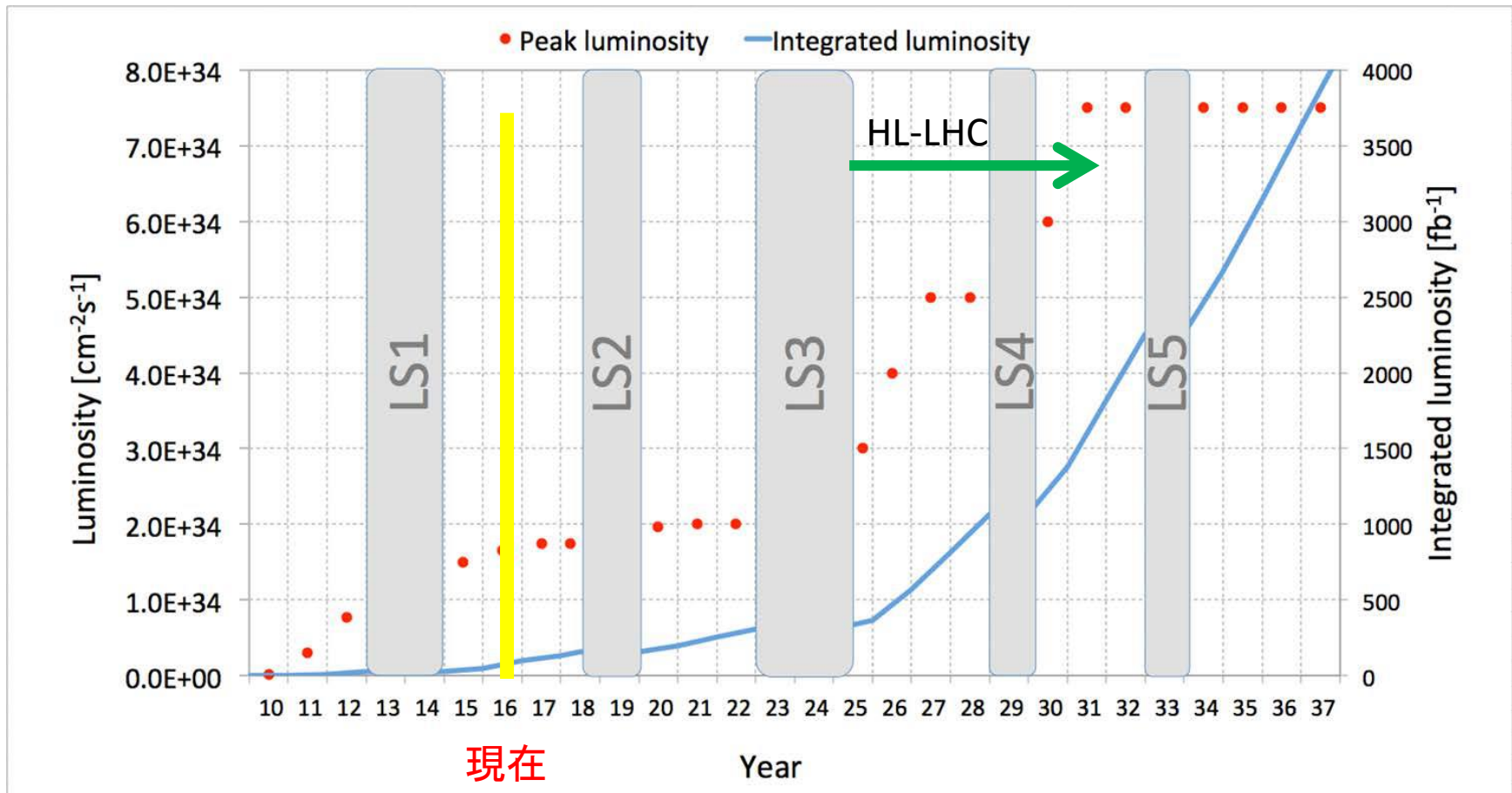
$$\int L dt = \frac{200\text{day} \times 24}{T_{run} + T_{ING}} \int L_{run} dt$$

- 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 $100\text{fb}^{-1}$  (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、..



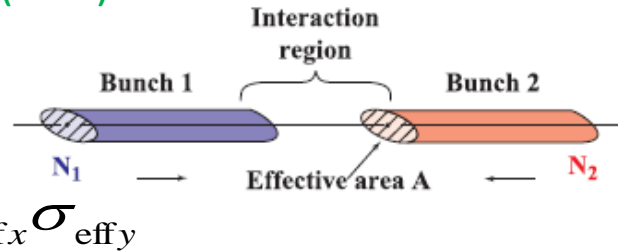
# ルミノシティの絶対値



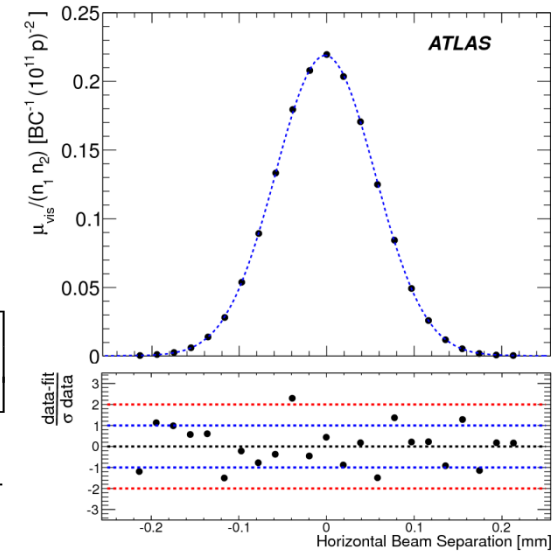
- 瞬間ルミノシティは加速器のパラメータで決まるが... 実際のLuminosityは測定する必要がある。
  - ただし、通常の運転中に測定可能なのは事象数Rだけ
    - ルミノシティの測定:  $L = R/\sigma_{tot}$
    - 生成断面積の測定:  $\sigma_{tot} = R/L$
- そこで考えられたのが Van Der Meer Scanという方法

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:

$$L(\delta x, \delta y) = L_0 F(\delta x, \delta y) \quad \text{Double Gaussian}$$

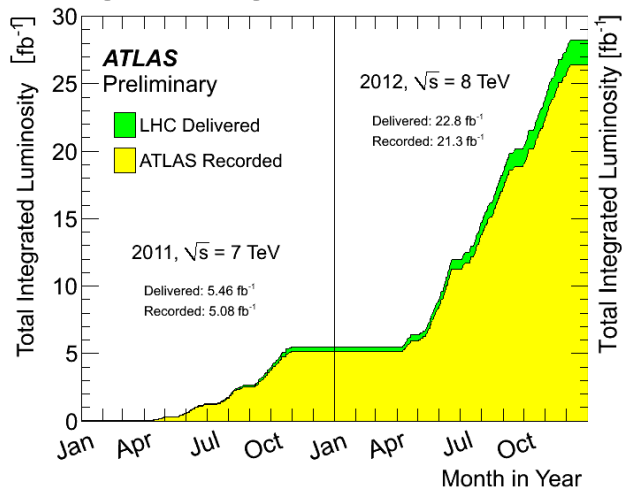
$$F(\delta u) = A_{u1} \exp\left[-\frac{\delta u^2}{2\sigma_{u1}^2}\right] + A_{u2} \exp\left[-\frac{\delta u^2}{2\sigma_{u2}^2}\right]$$

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

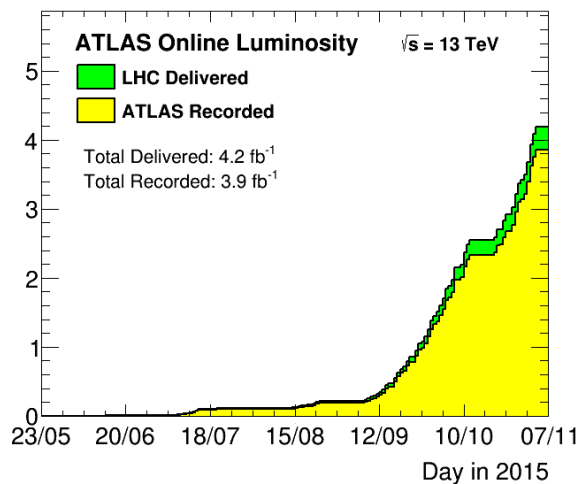
$$\sigma_{effu} = \frac{A_{1u}\sigma_{1u} + A_{2u}\sigma_{2u}}{A_{1u} + A_{2u}}$$

# 現在までのルミノシティ

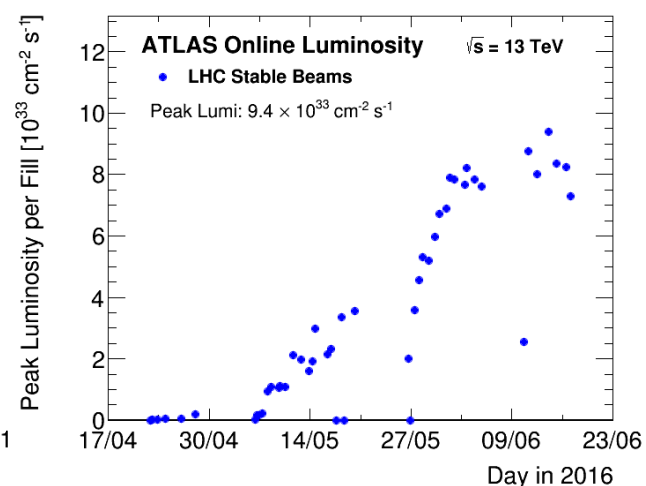
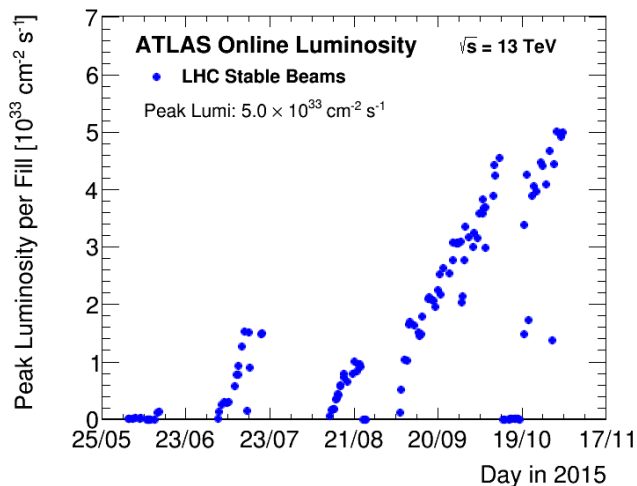
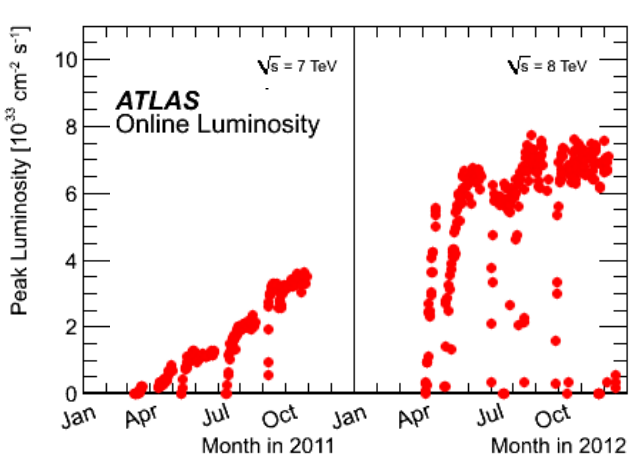
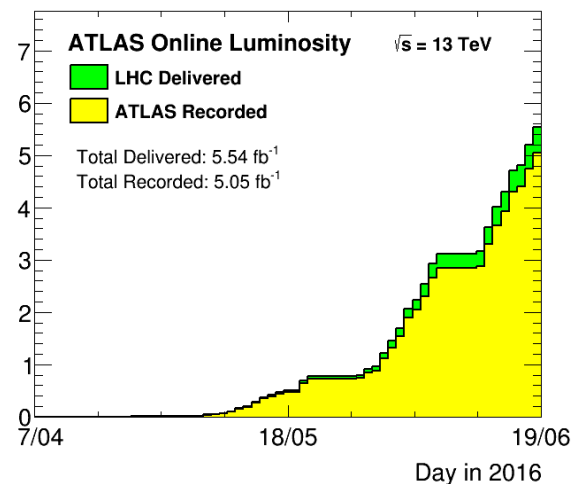
## 2011-2012



## 2015

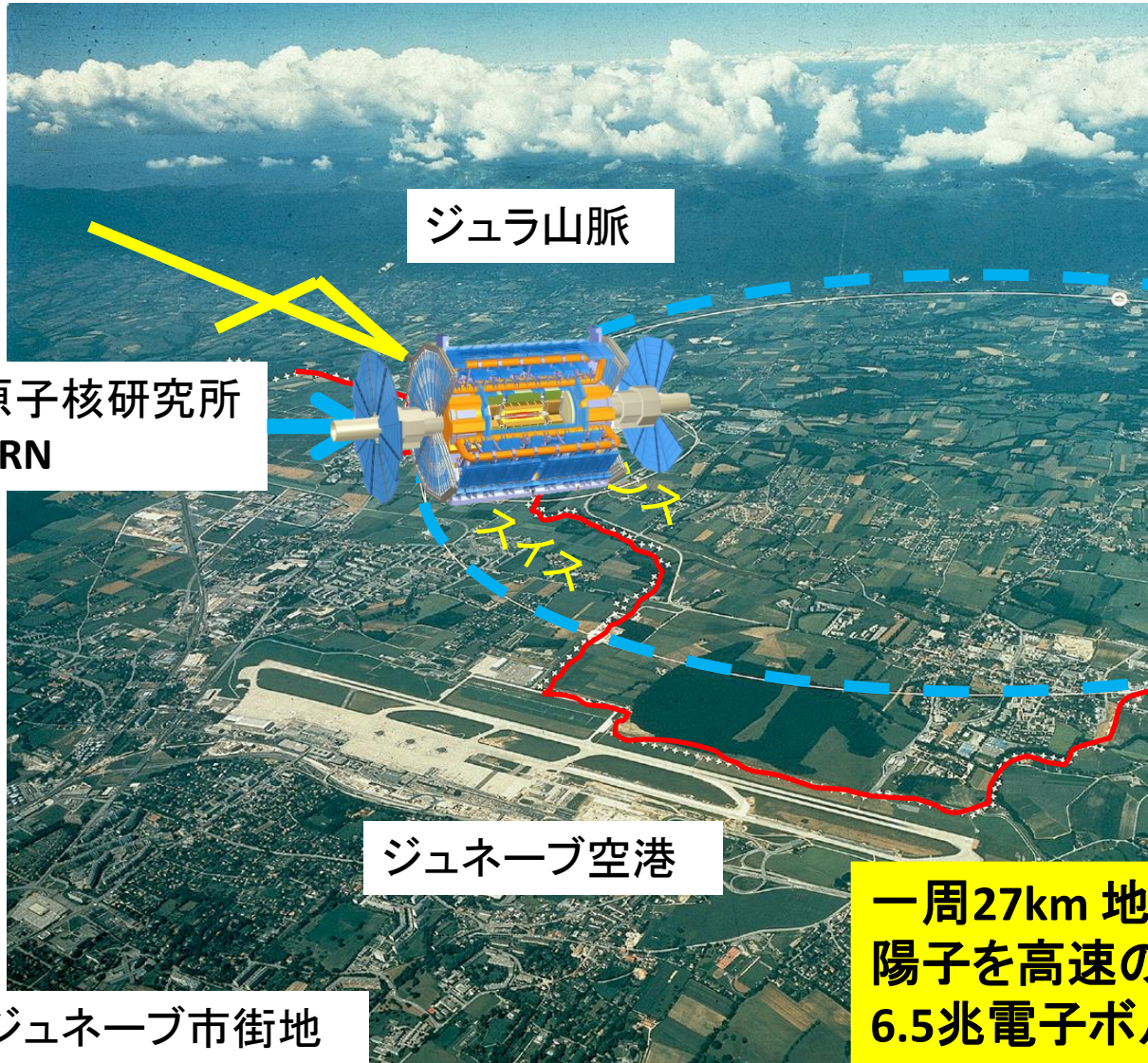


## 2016



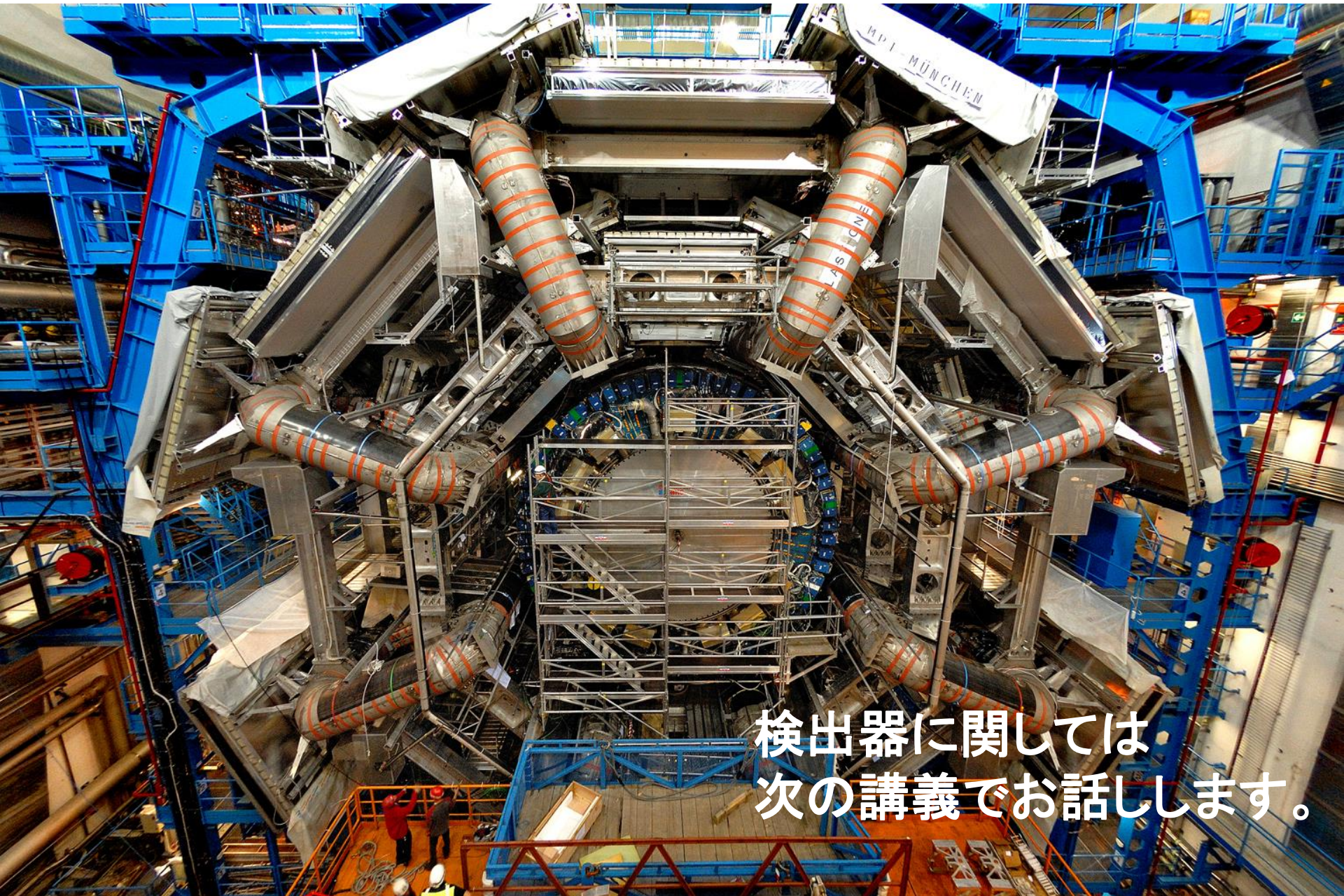


# ATLAS検出器



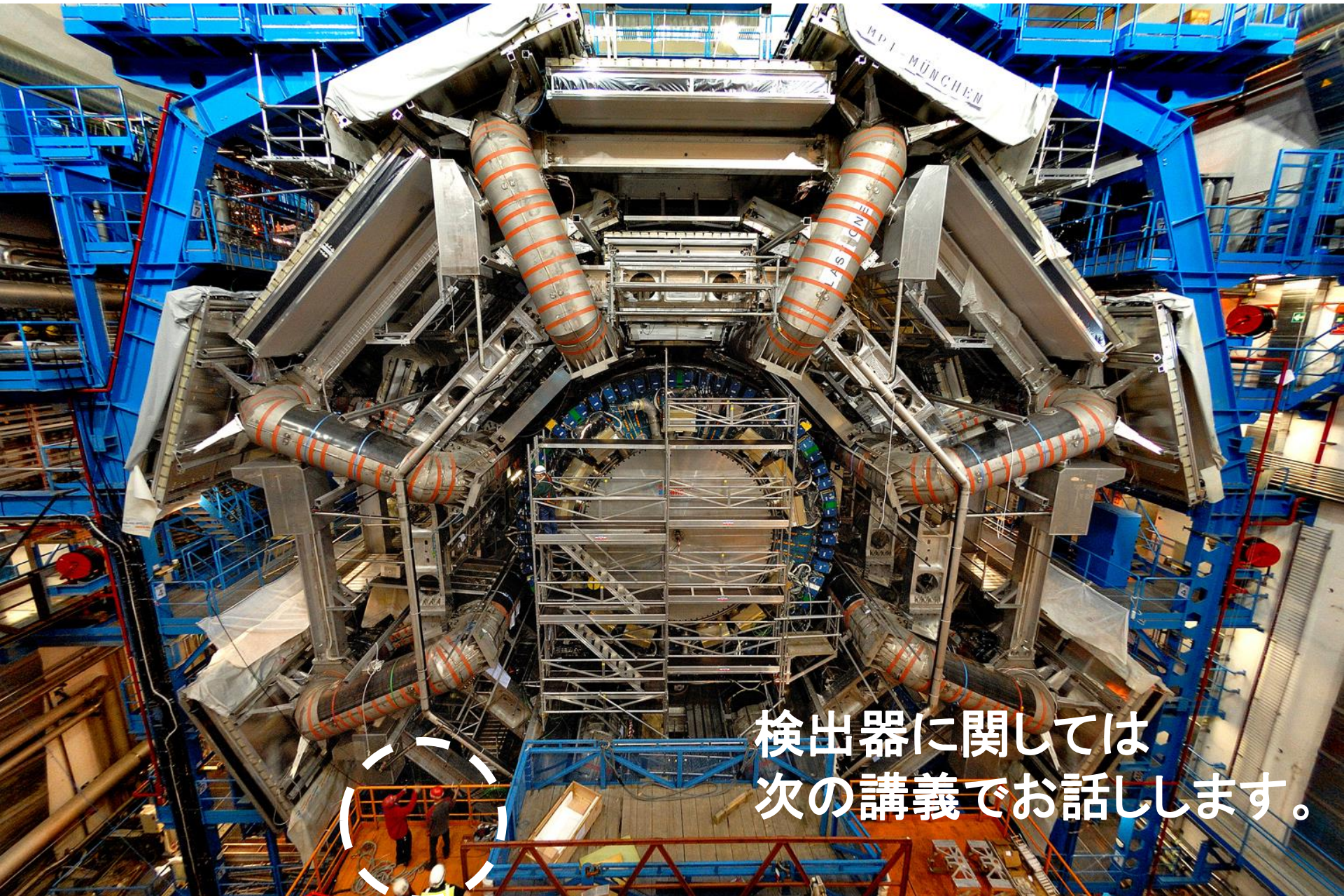
一周27km 地下100mのトンネル  
陽子を高速の99.999997%まで加速  
6.5兆電子ボルト(TeV)

# 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

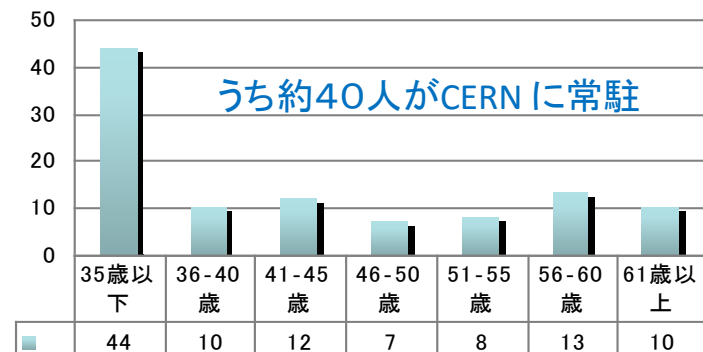
- LHC、アトラス実験
  - 約3000人のコラボレーション
  - 日本所属の研究者120人
- たった4%の人でどれだけ貢献できているのか？
  - 現検出器の生産・運転
  - 物理解析の主導
  - アップグレード検出器のR&D

Number of authors

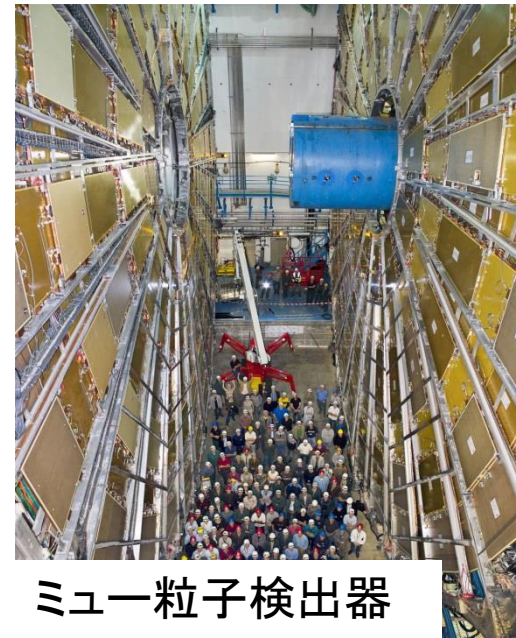
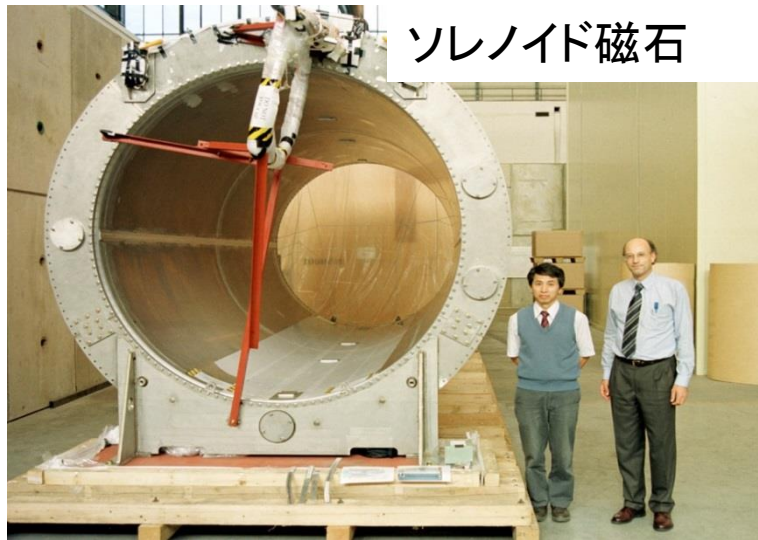
	Authors	M&O	ActQual
Hiroshima IT	1	1	1
KEK	26	19	20
Kobe	12	7	12
Kyoto	4	2	6
Kyoto UE	1	1	1
Kyushu	4	4	4
Nagasaki	1	2	2
Nagoya	6	3	7
Okayama	1	1	1
Osaka	7	4	7
Shinshu	2	2	2
Tokyo ICEPP	24	17	30
Tokyo MU	2	2	2
Tokyo Tech	9	4	11
Tsukuba	8	5	10
Waseda	4	1	5
Japan	113	75	121
Total	2816	1875	3034



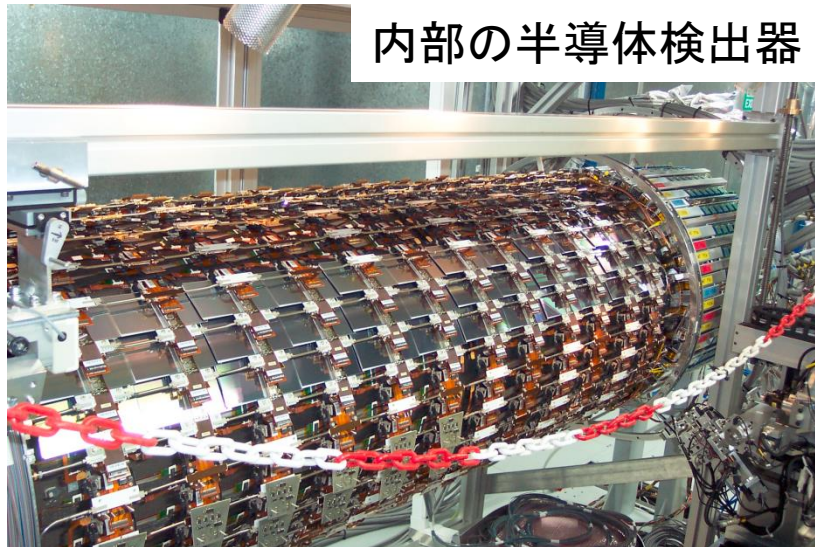
アトラス実験に参加する日本人研究者の年齢分布



# 日本が大きく貢献した3つの現検出器



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

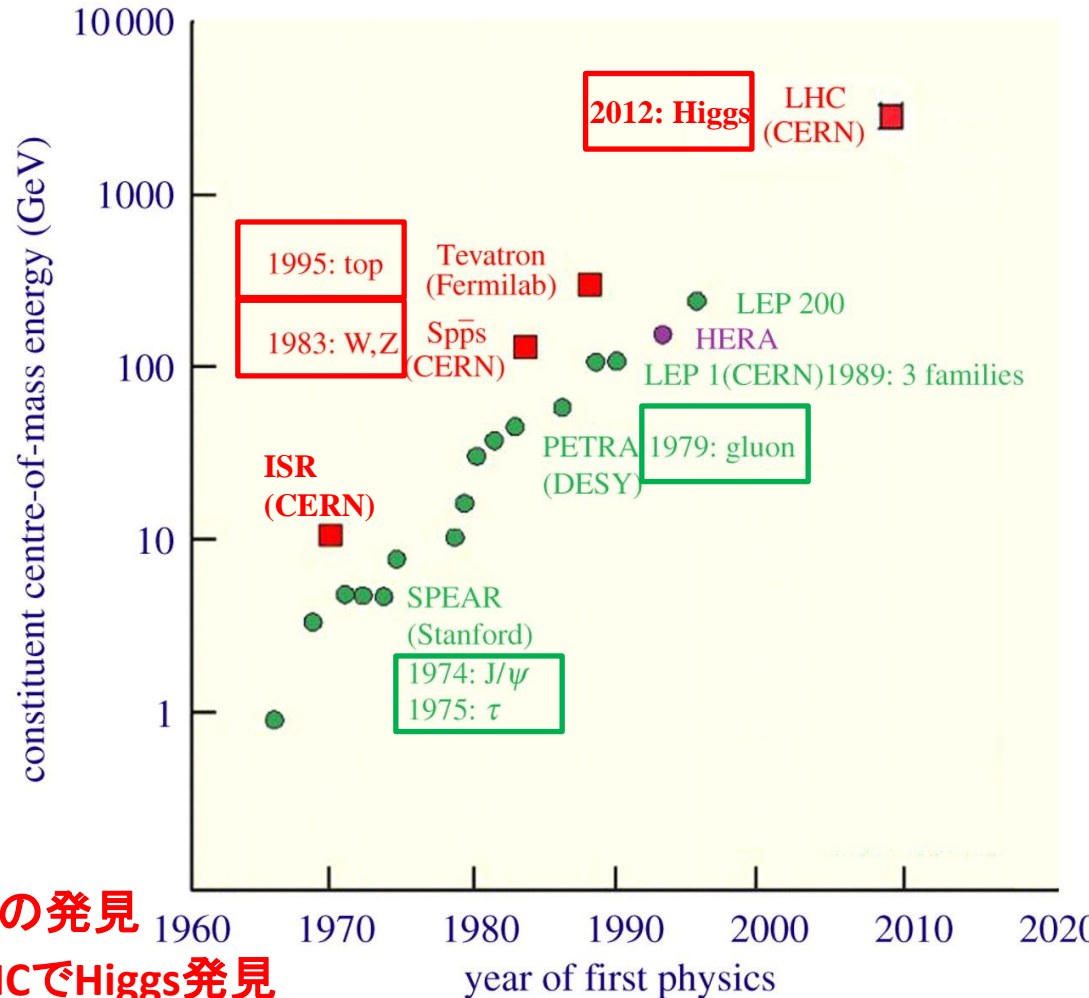
---

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/ $\psi$
    - 1975  $\tau$
    - 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

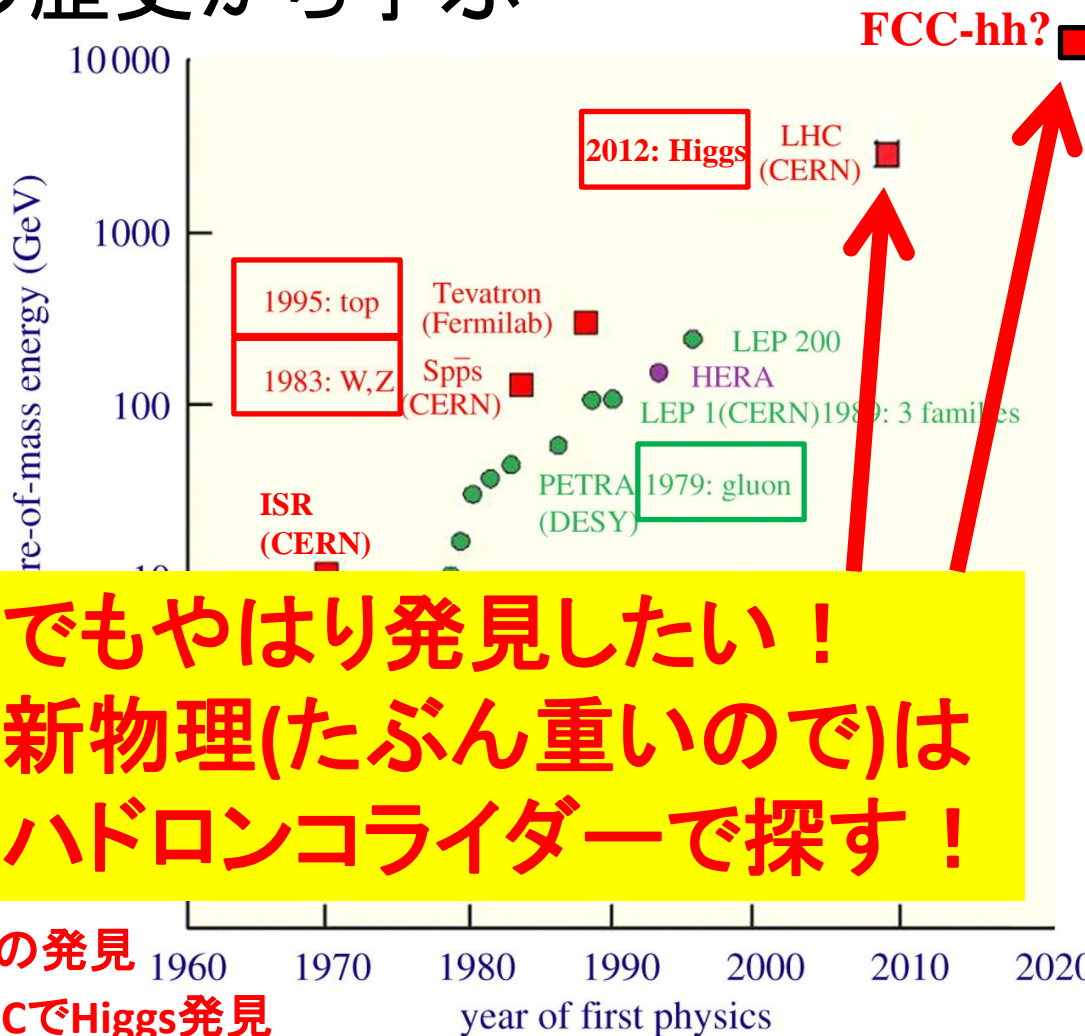
LEPでtop massの予言 → TevatronでTopの発見

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/ $\psi$
    - 1975  $\tau$
    - 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

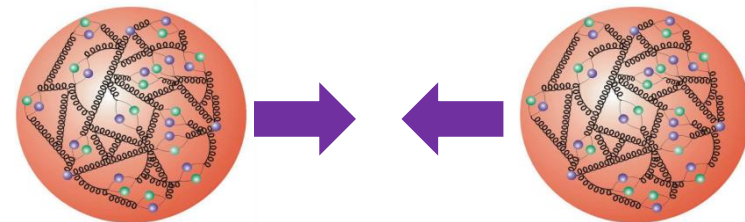
→精密測定が難しい

[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
      - $\Delta E \propto \frac{(E/m)^4}{\rho}$  (電子と陽子では $1.5 \times 10^{13}$ 倍違う！)
      - 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  $2 \text{ GeV/周}$  のエネルギー損失... 13 TeV 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  $1.5 \times 10^{13}$  倍低いシンクロトン放射 → 100 GeV 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、
      - $P [\text{GeV}] = 0.3 B [\text{T}] \rho [\text{m}]$
    - 現在のところ量産できる超伝導電磁石は 8 T くらいが限界...
      - LHC のリングに 50 TeV の加速器を作るには ~35 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。



# 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 $x_1 x_2$ 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 $\theta$ 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

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

$$(\tan\theta = p_T/p_Z)$$

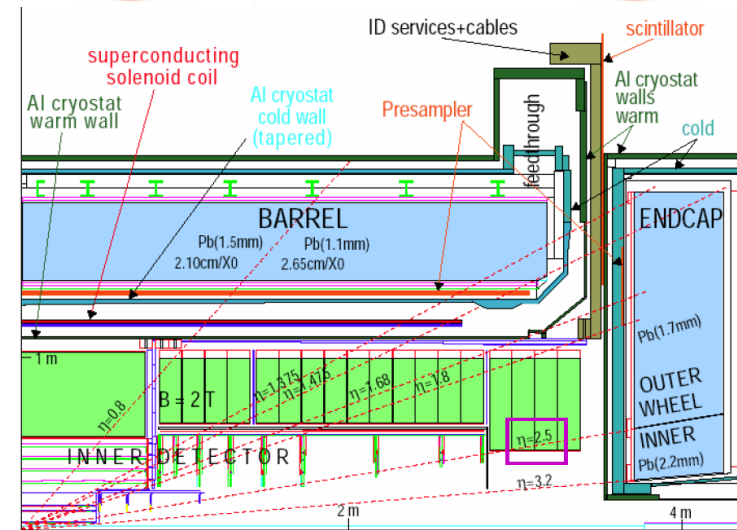
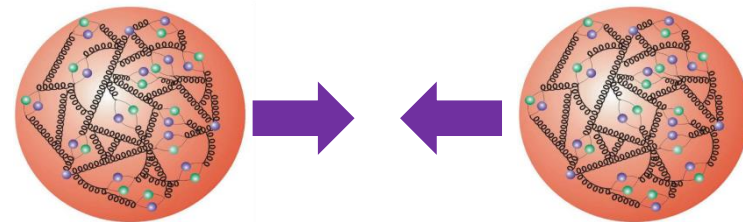
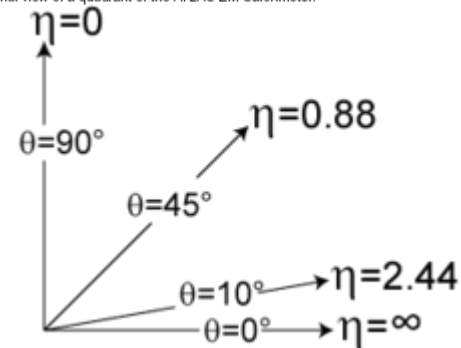
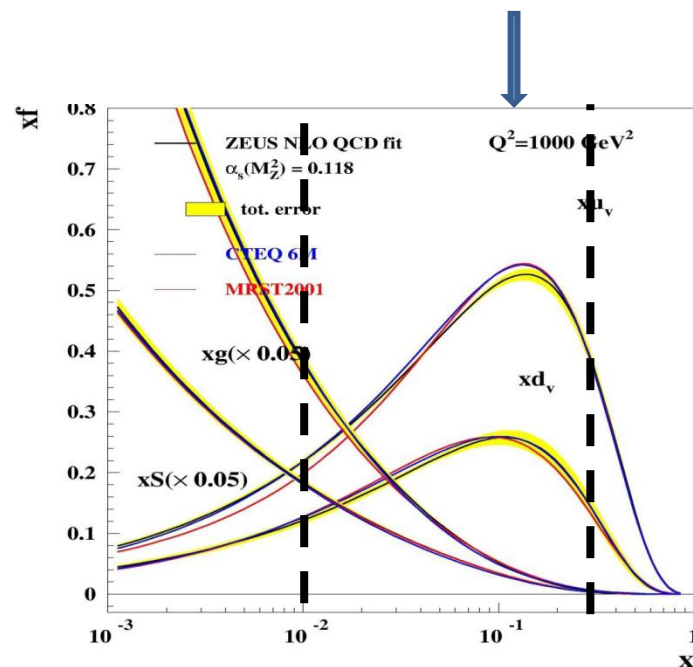


Figure 4-1 Longitudinal view of a quadrant of the ATLAS EM Calorimeter.



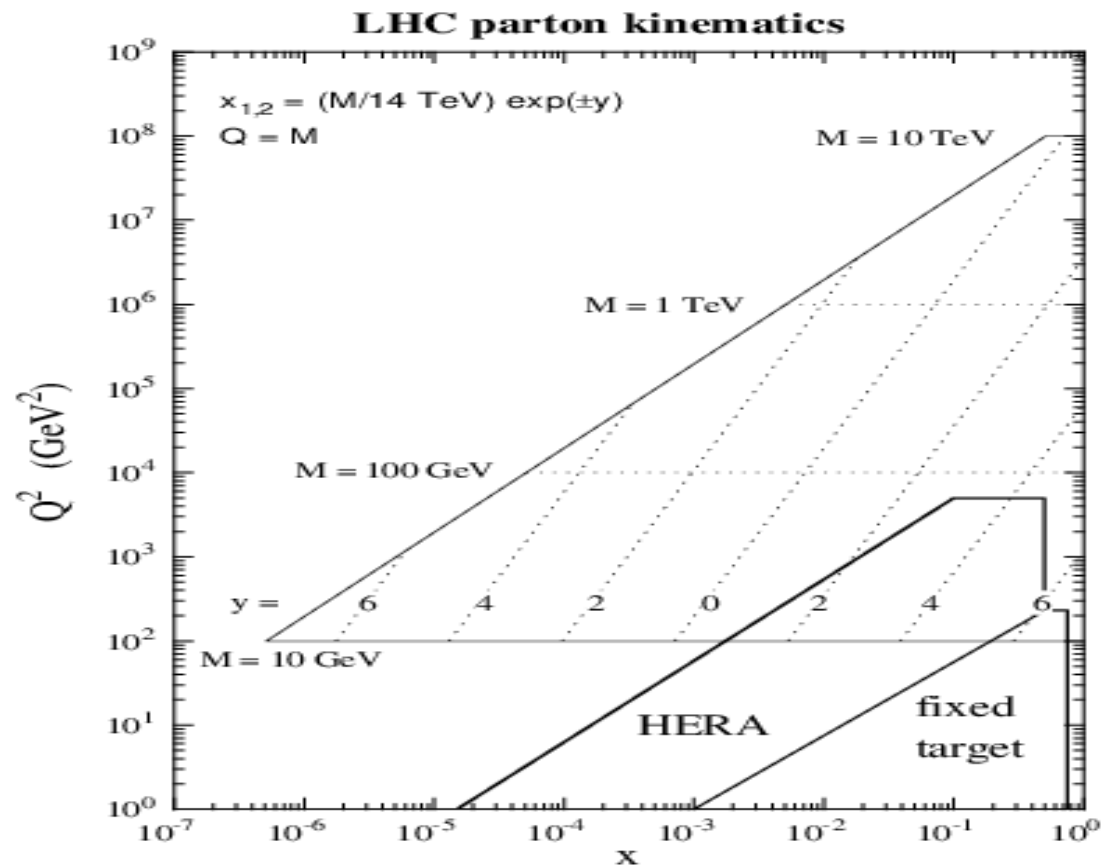
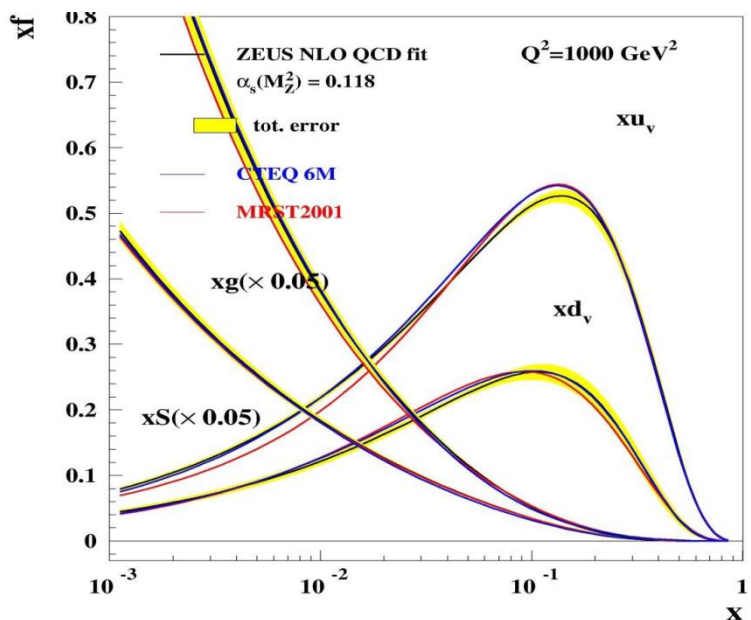
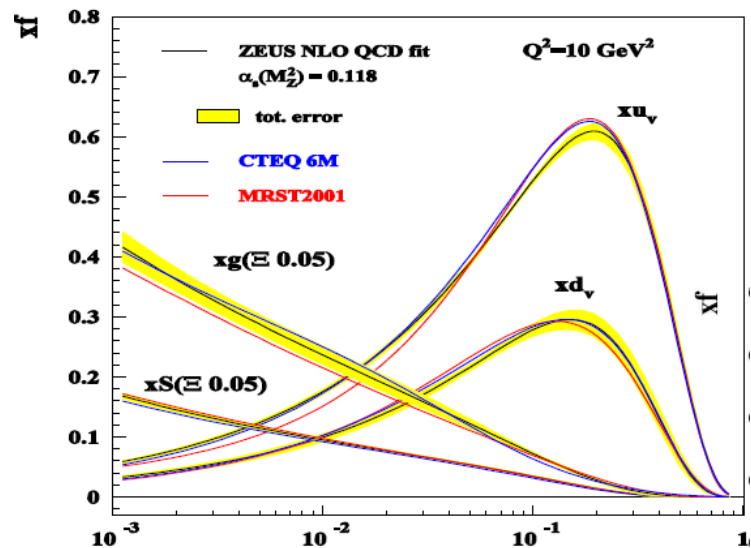
# Parton Distribution Function

- 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



# Parton Distribution Function

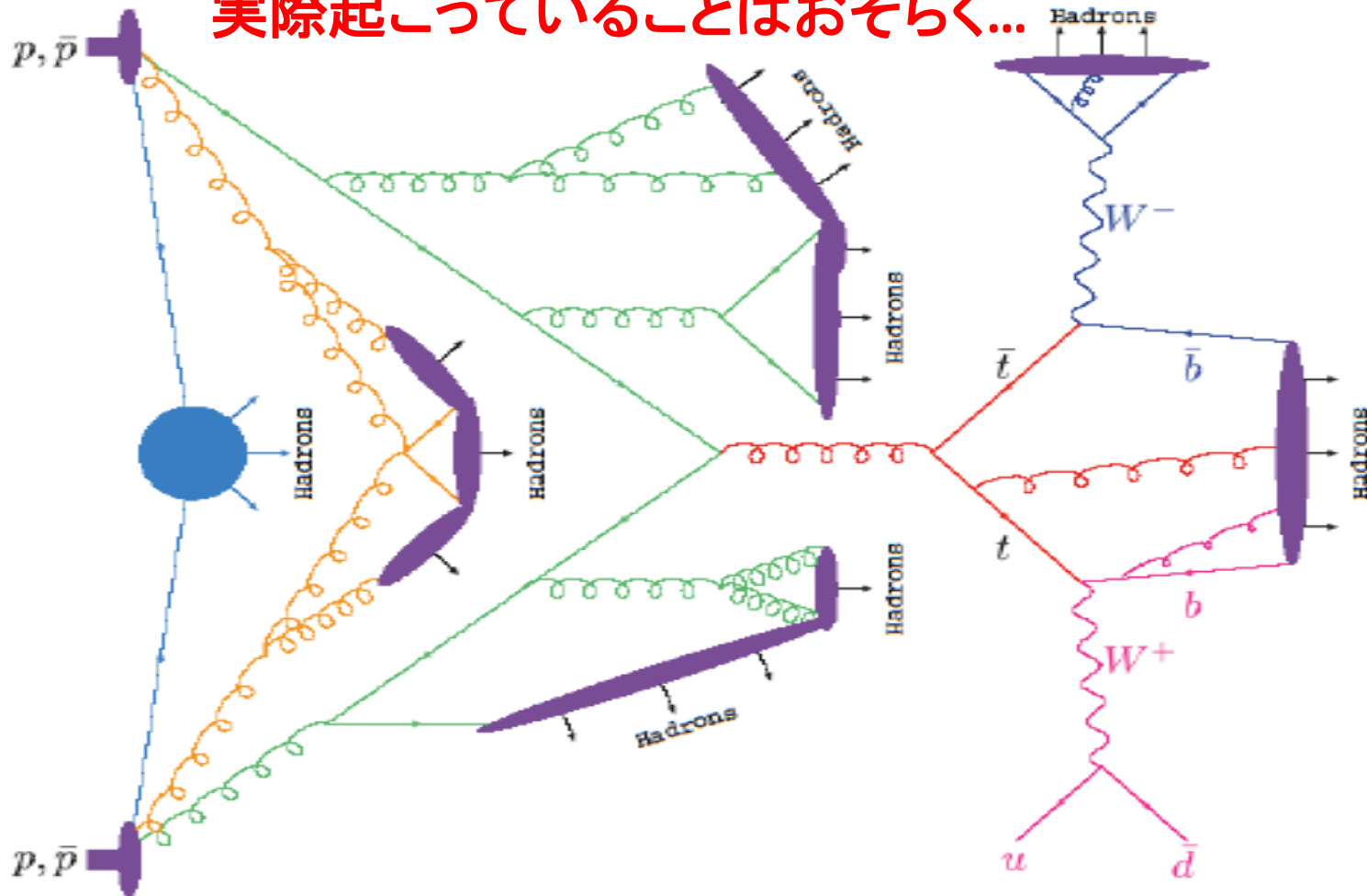
- $Q^2=1\text{TeV}$  のPDFなんて測れないので...
  - DGLAP方式を使ってHERAの測定をLHCの領域まで発展させている。



# PDFとハードプロセスの境界

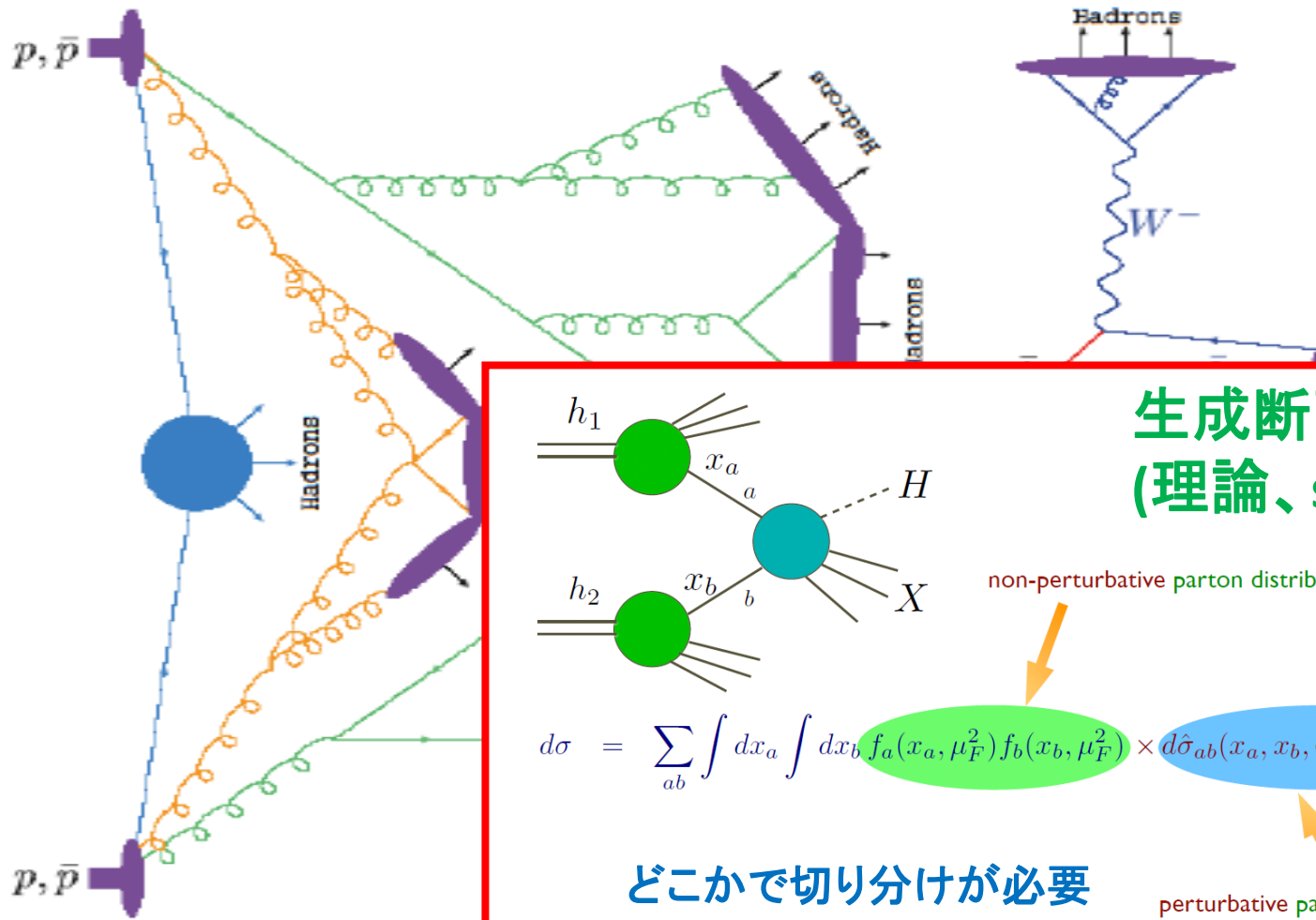
例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$

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

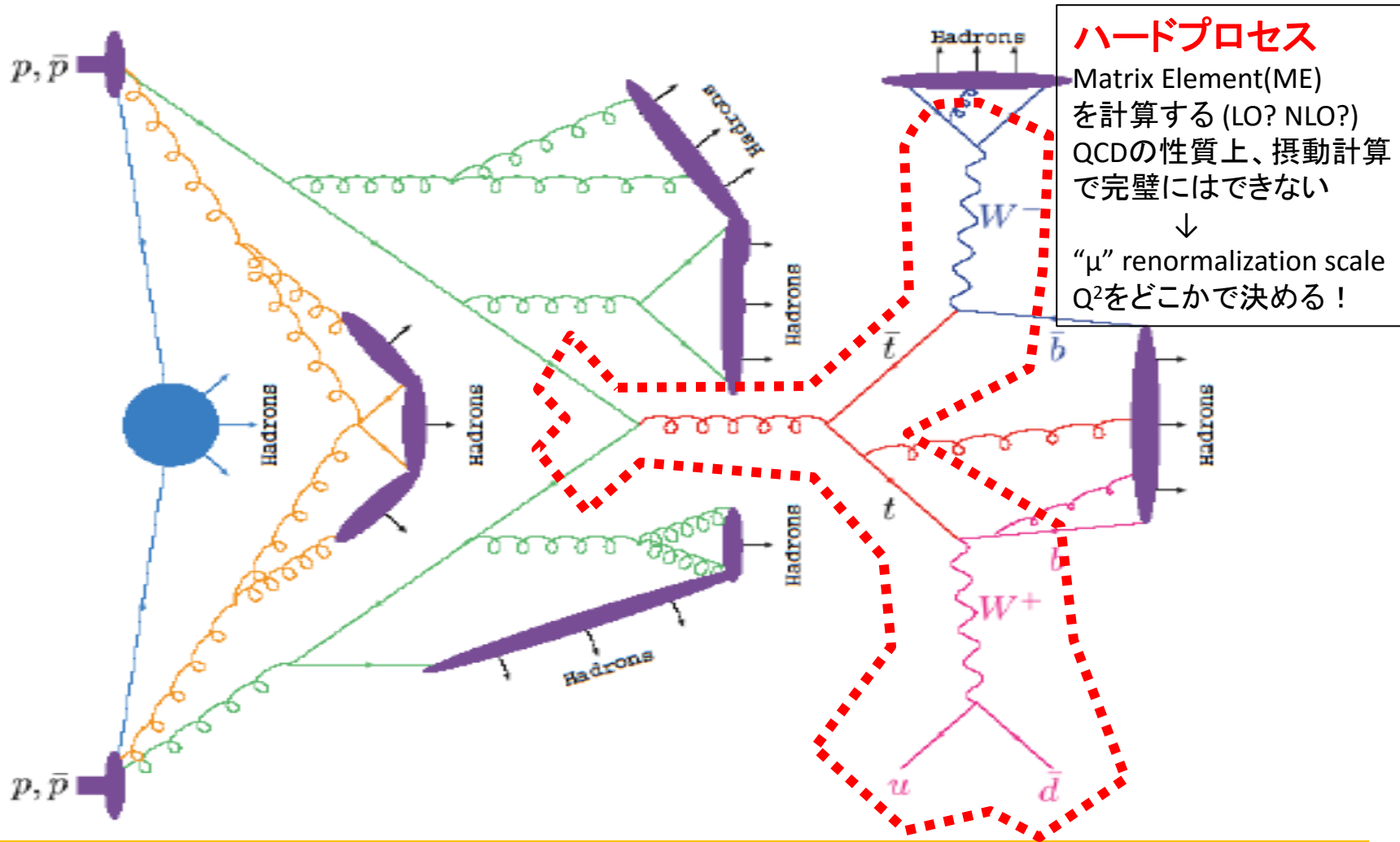
$$d\sigma = \sum_{ab} \int dx_a \int dx_b f_a(x_a, \mu_F^2) f_b(x_b, \mu_F^2) \times d\hat{\sigma}_{ab}(x_a, x_b, Q^2, \alpha_s(\mu_R^2)) + \mathcal{O}(1/Q^2)$$

どこかで切り分けが必要

perturbative partonic cross-section

# PDFとハードプロセスの境界

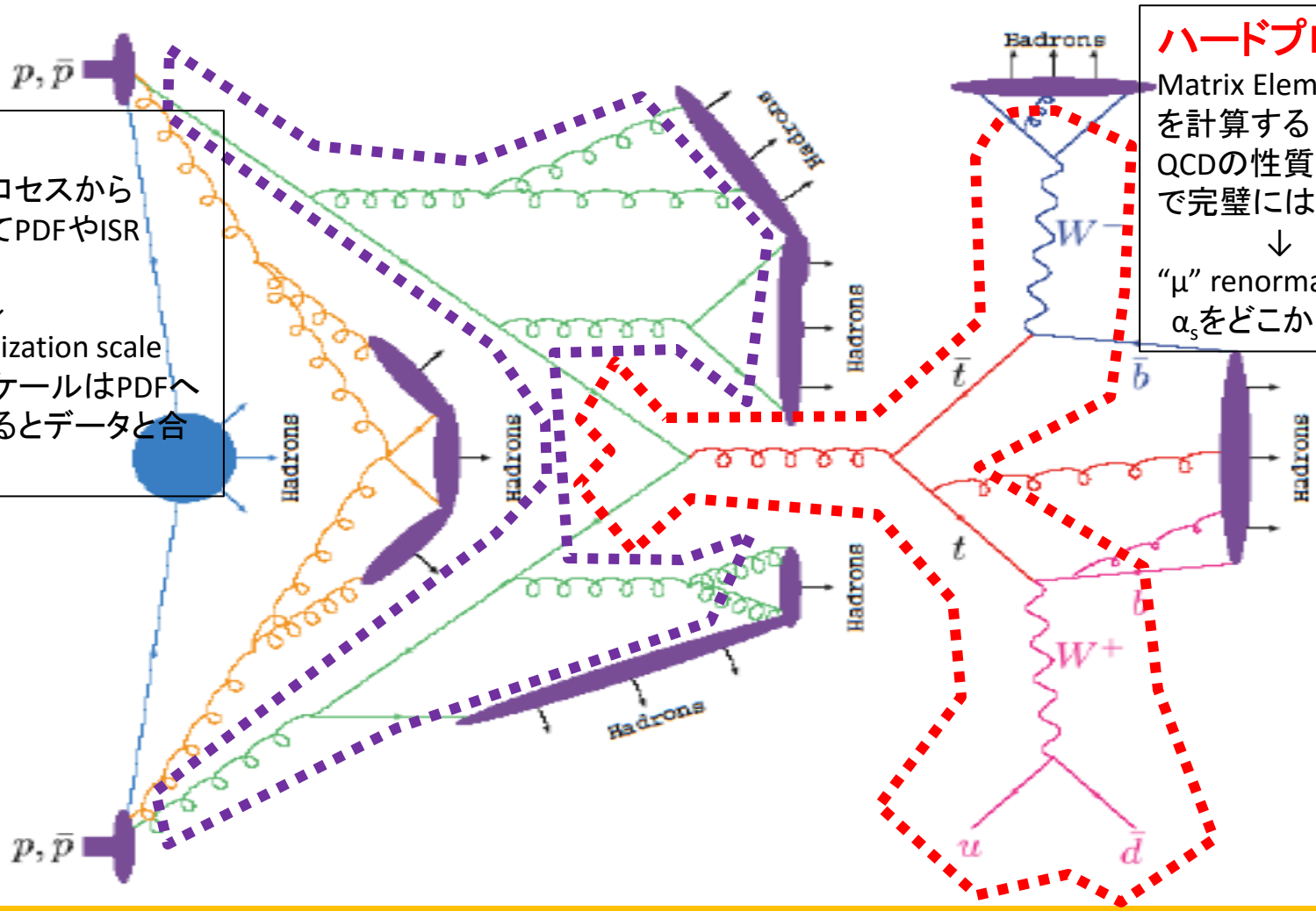
例、 $q\bar{q} \rightarrow g \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow qqbqqb$



# 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？

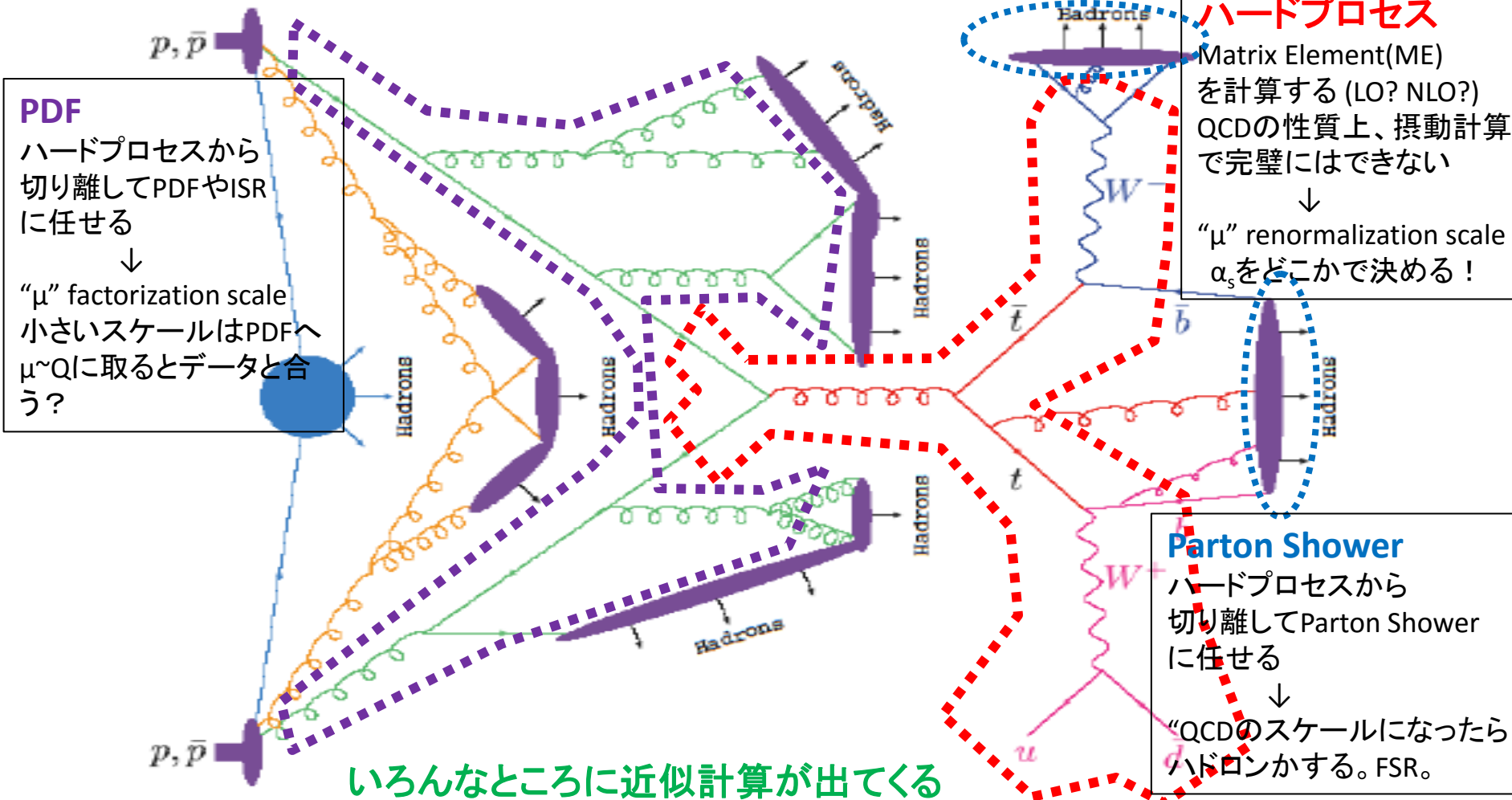


**ハードプロセス**  
 Matrix Element (ME) を計算する (LO? NLO?)  
 QCDの性質上、摂動計算で完璧にはできない  
 ↓  
 “μ” renormalization scale  $\alpha_s$ をどこかで決める！



# 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<sub>s</sub>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

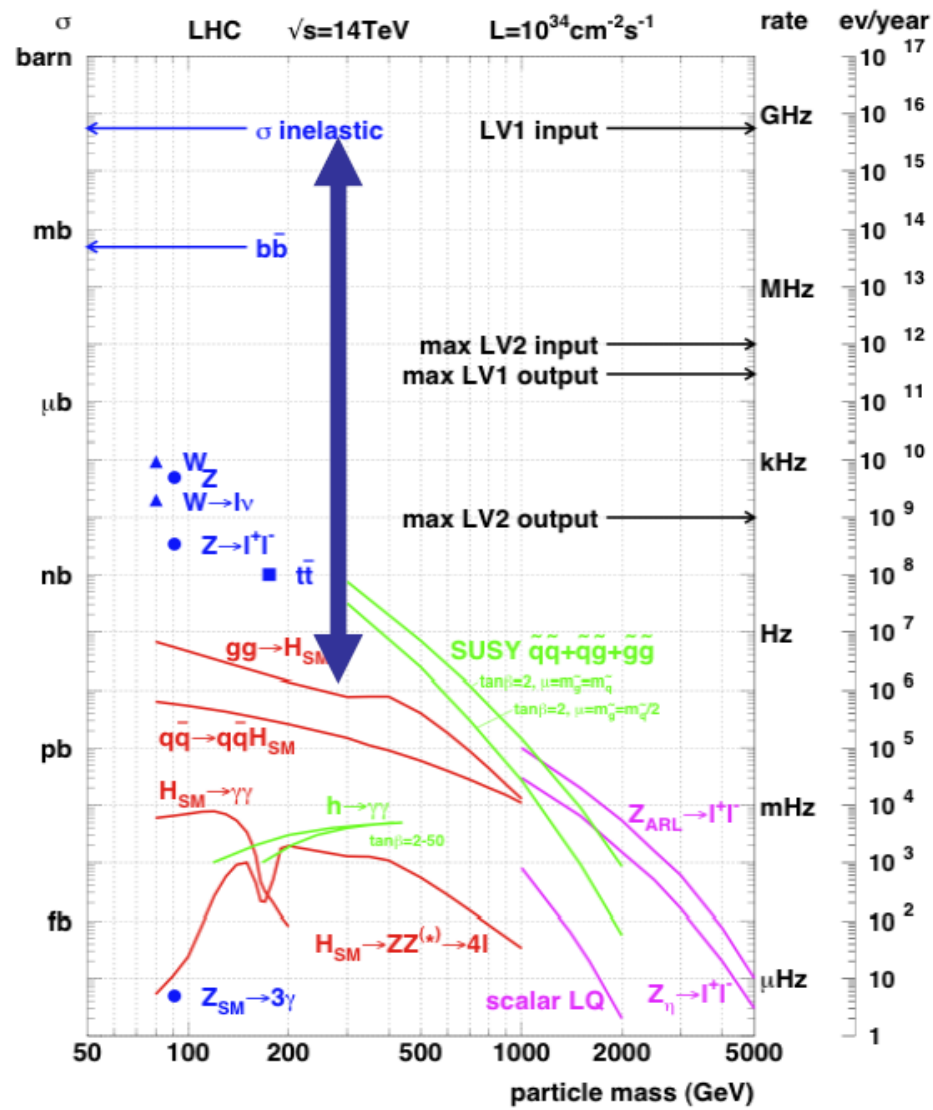
# 断面積の非常に大きな背景事象

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

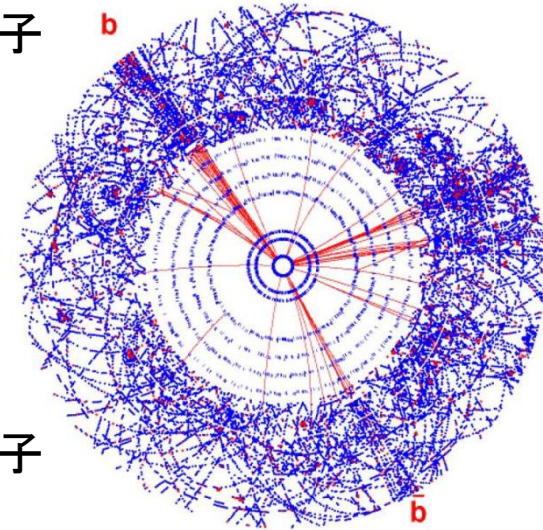
- それでも、割と似ている(fake)プロセス(W+jets, Z+jets, トップ対など)は3-5桁以上多くある。
- 検出器の情報を酷使したり、シミュレーション(モンテカルロ)の助けを借りて信号を探す作業が解析そのもの。



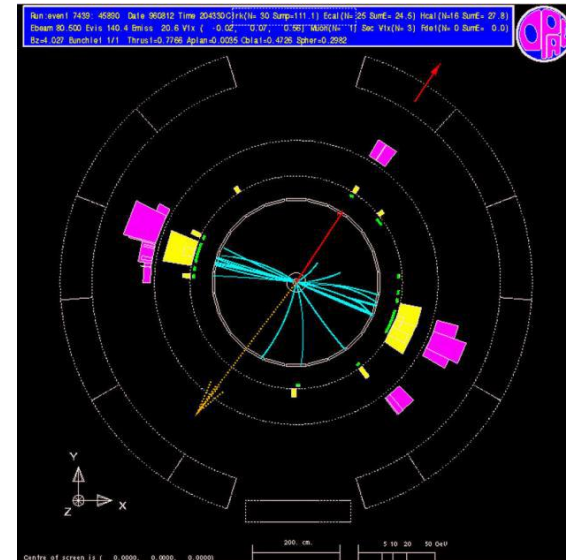
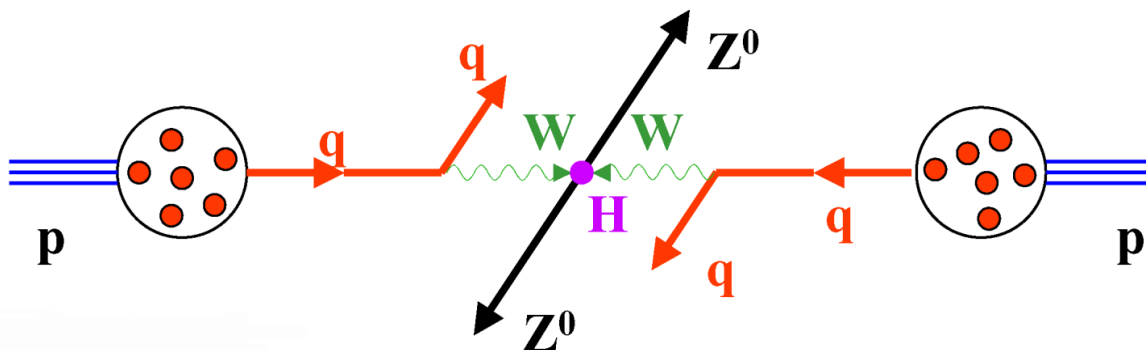
# 反応のスペクテータ

- 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)

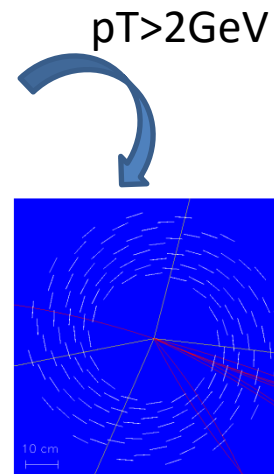
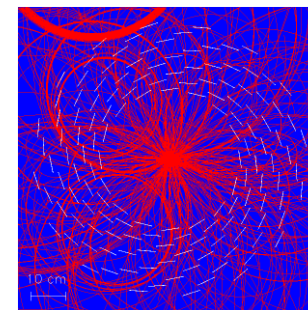
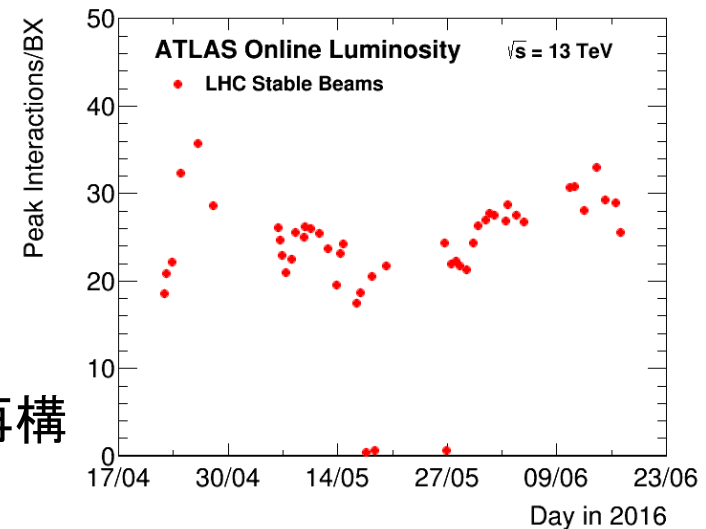


電子-電子  
(LEP-2)

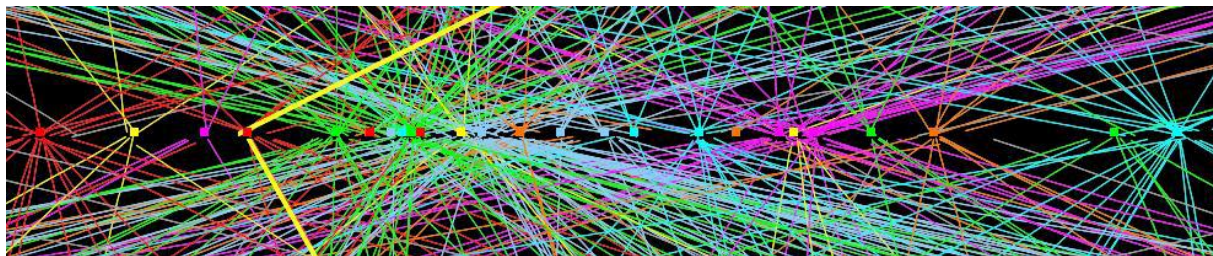


# 同じバンチの異なる陽子の衝突

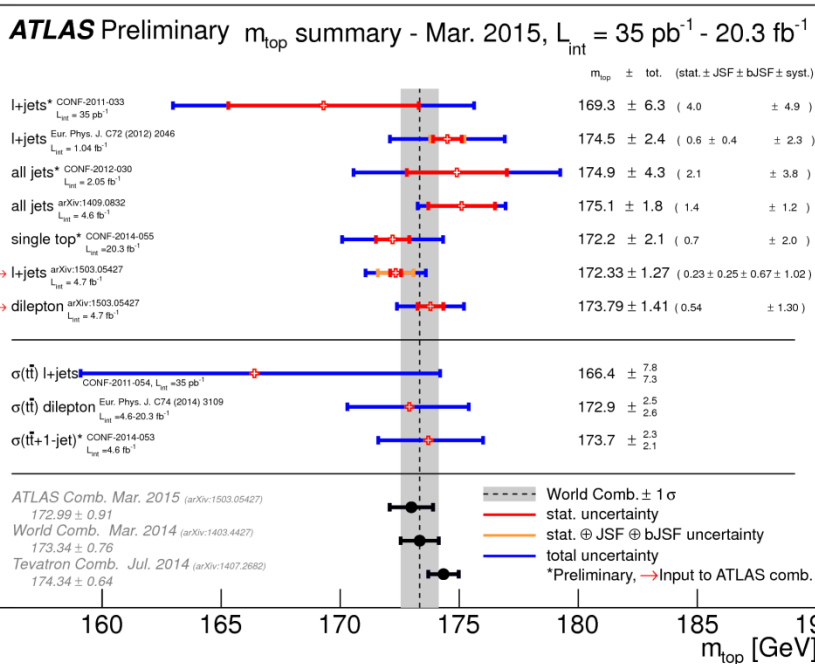
- Pileup
  - 陽子の非弾性散乱断面積は68mb
  - Luminosity  $0.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
  - 衝突頻度  $25 \text{ns} = 40 \text{MHz}$  (実際は13%少ない)
  - $68 \text{mb} \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} / 40 \text{MHz} / 0.87 = 20 \text{回/衝突}$
- Pileupを除く方法
  - Objectに随伴したTrackがpointする衝突点を再構成
    - 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。



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

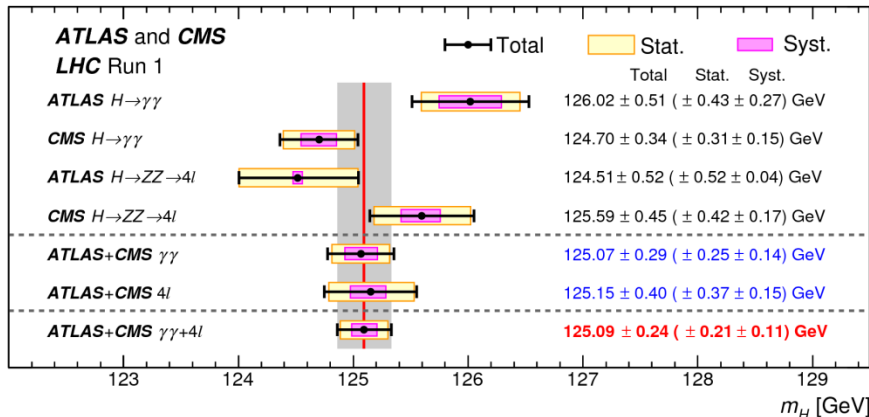
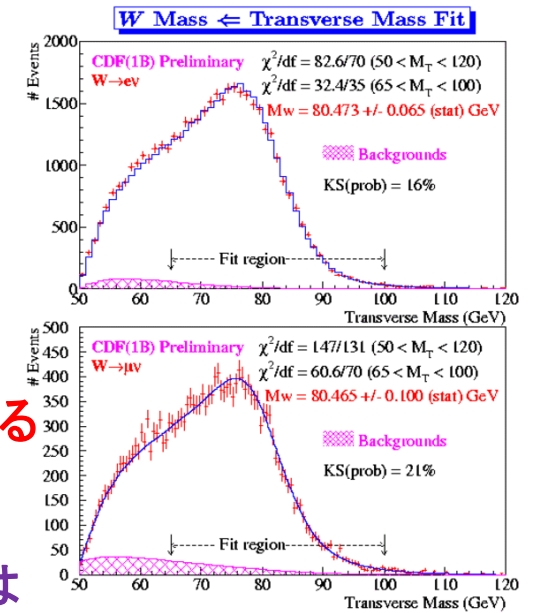


# 陽子コライダーでの精密測定

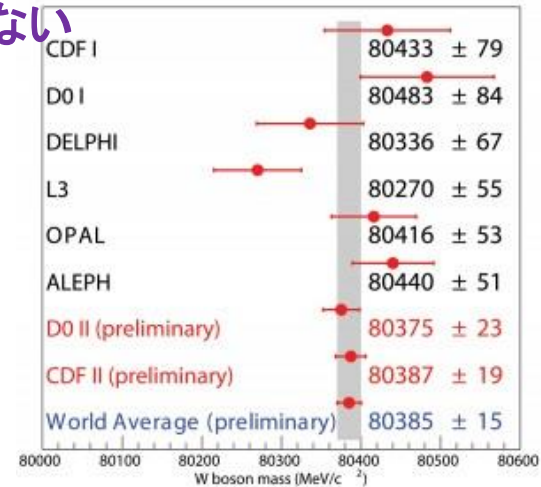


精密測定でも  
圧倒的な事象数で  
電子コライダーを上回る  
(時もある) 特に質量

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

---