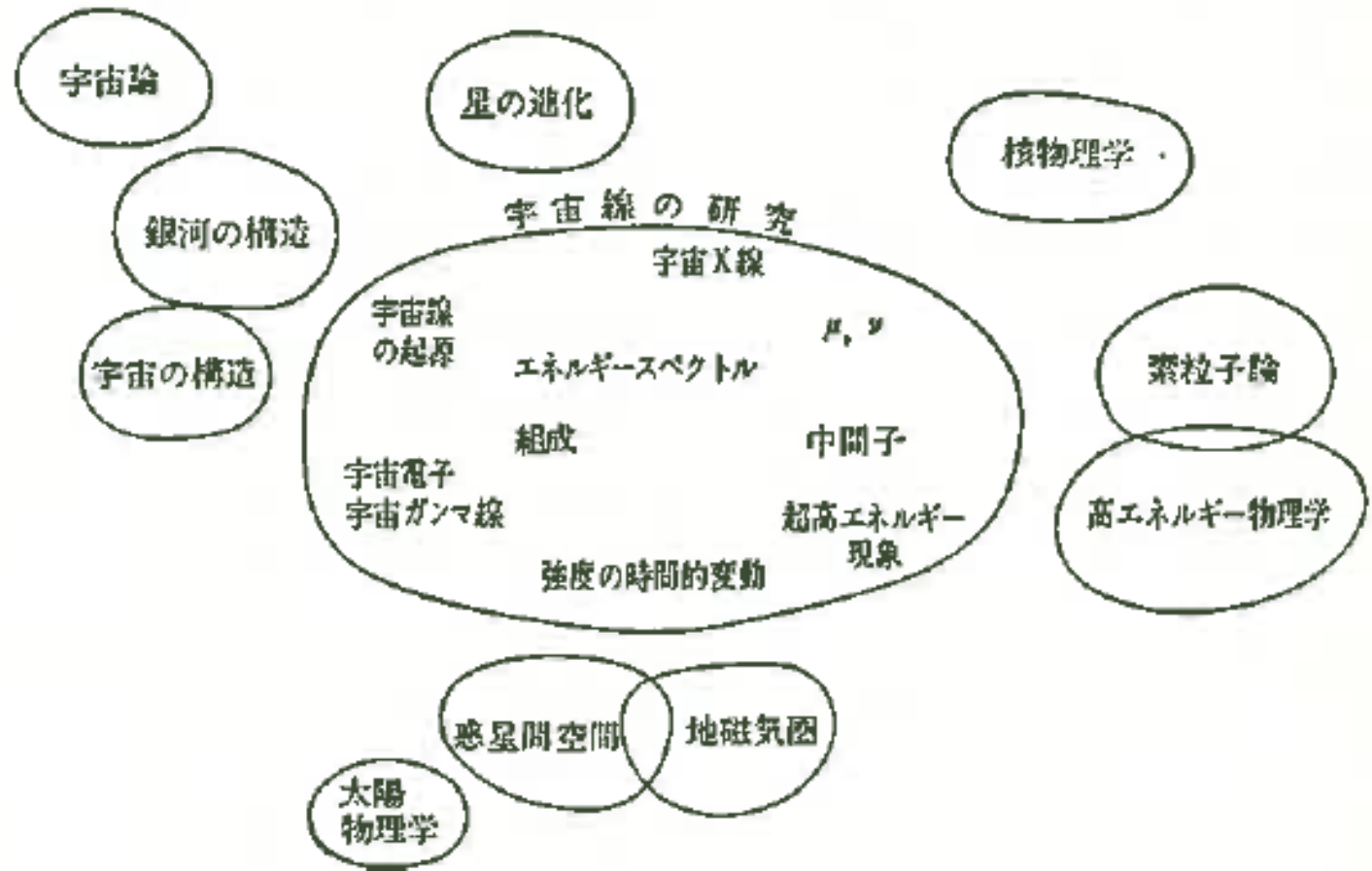
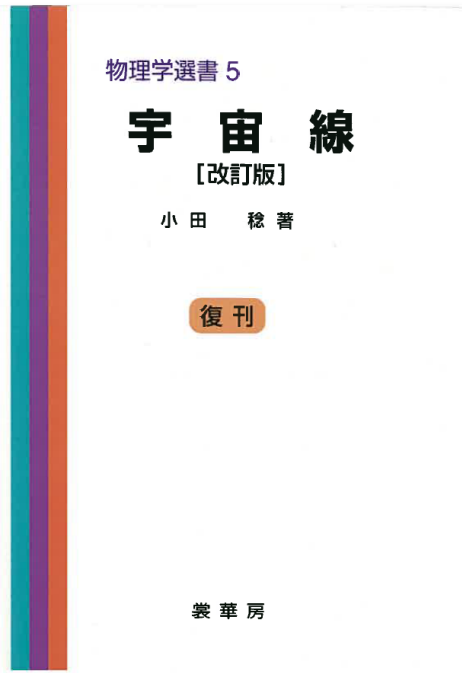


加速器実験から見える宇宙 ～急がば回れ～

名古屋大学太陽地球環境研究所/
素粒子宇宙起源研究機構

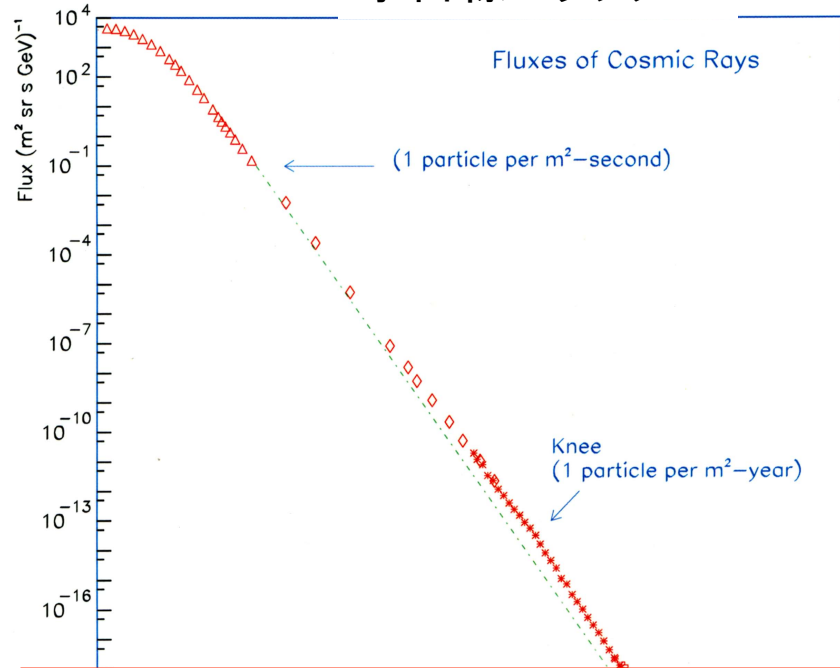
塔さこ隆志

小田稔 宇宙線(裳華房)

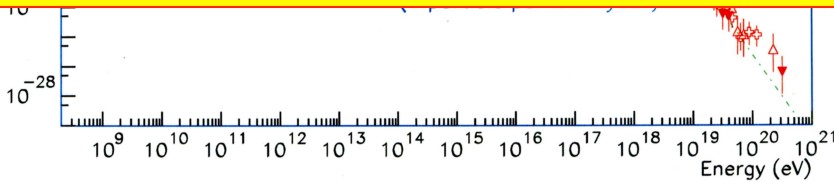


空気シャワー観測とは

宇宙線フラックス

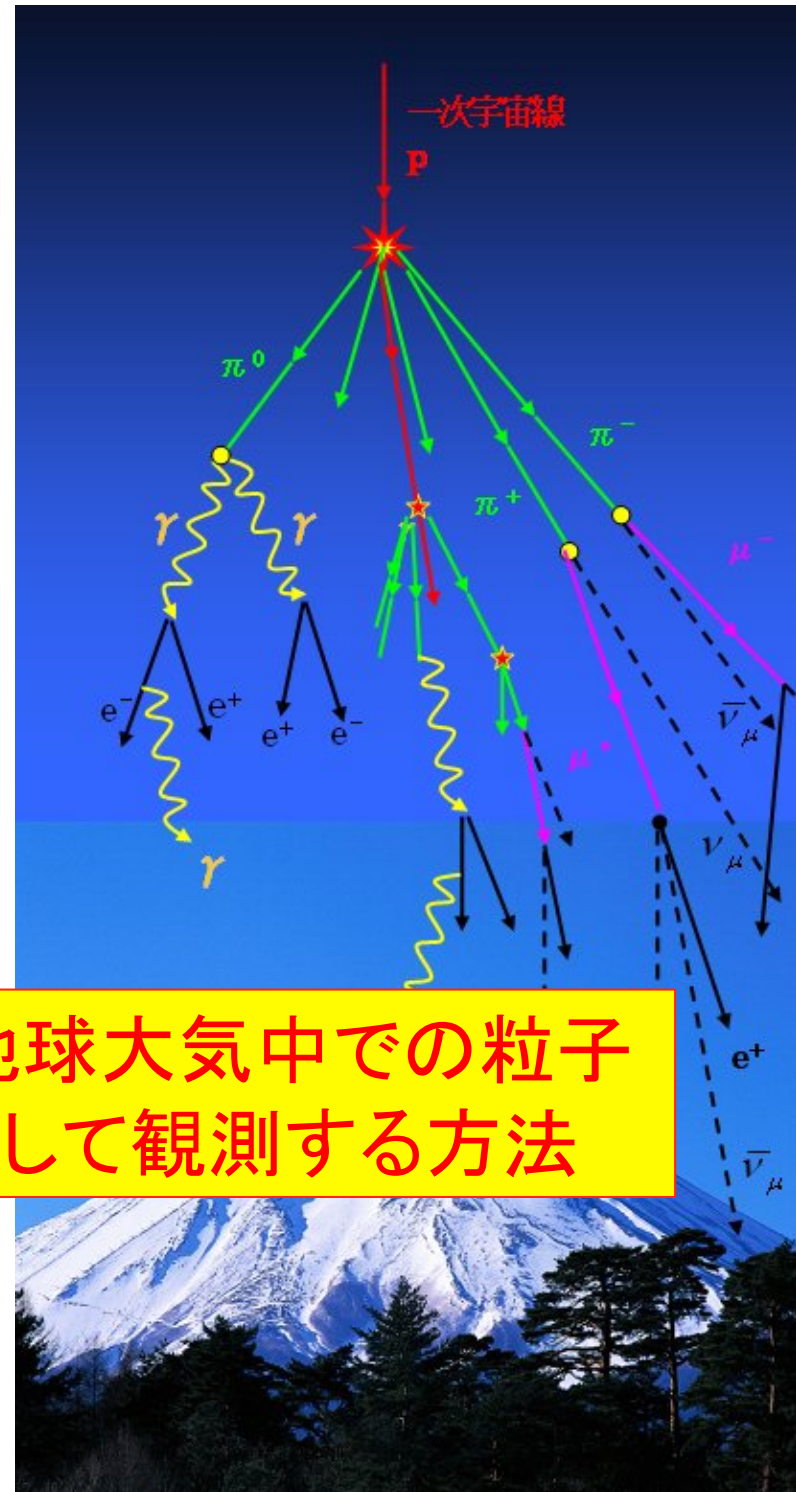


到来頻度の低い宇宙線を、地球大気中での粒子増殖反応(カスケード)を利用して観測する方法



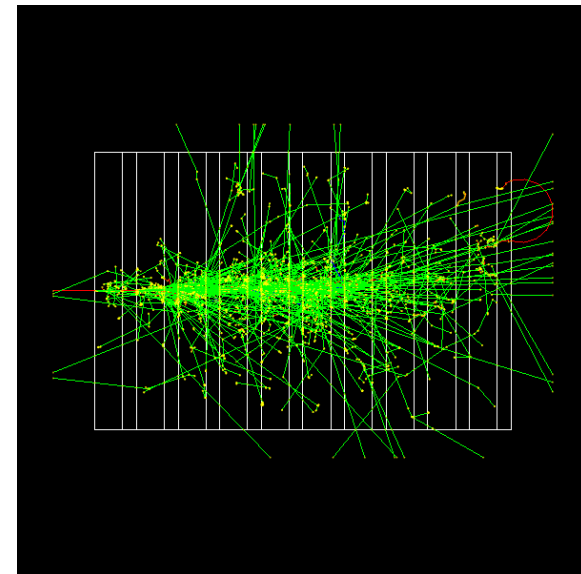
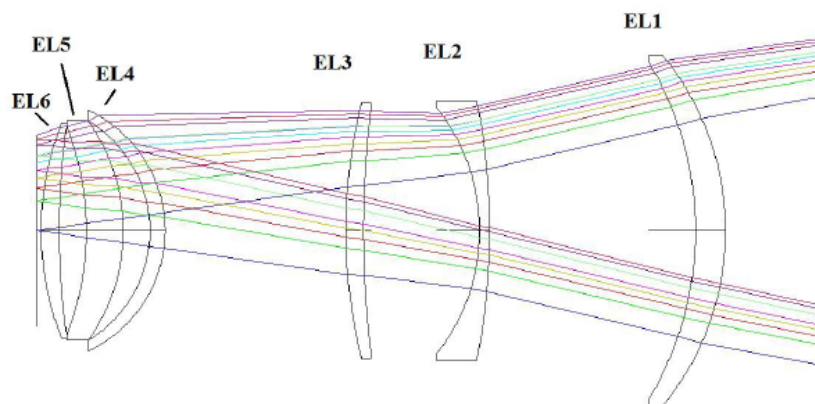
10^{10} eV

10^{20} eV



検出器の設計・較正

- RayTrace, Particle Simulation (GEANT4とか)を用いて設計する
- テスト観測、ビームテストで検証する
- よりどころは...
 - 光・粒子と物質の反応が正確に理解できていること
 - (ビーム)テストで修正できること



地球大気 = 全吸収型+サンプリングカロリメータ

1. 光・粒子と物質の反応が正確に理解できている？
2. (ビーム)テストで修正できる？

「地球」カロリメータによる 宇宙線の観測

1. 核(ハドロン)相互作用が支配
 - クォーク、グルーオンの関与する複雑な反応:量子色力学(QCD)で記述
 - 電磁相互作用(QED)と違い、全てを第一原理から計算することは不可能
 - これまでの加速器よりも高いエネルギーのため、素過程が検証されていなかった
2. $E_{CR} \sim 10^{15-20} \text{eV}$ (LHC $E_{\text{proton}} = 7 \times 10^{12} \text{eV}$)
 - エネルギー的にビームテストは不可能
 - 現実的にもビームテストは不可能

⇒ Introductionのまとめ:

2、の実現は不可能

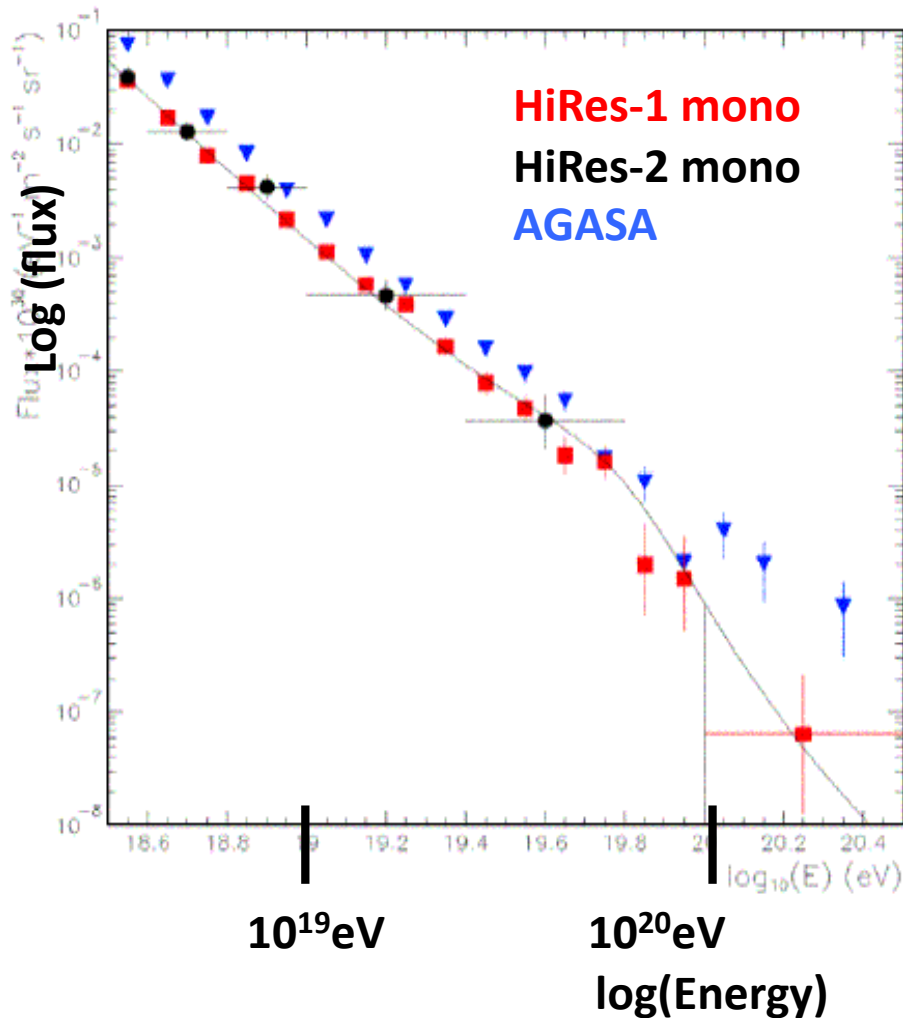
1、最新加速器で、「地球」カロリメータの理解(シミュレーション精度)を高めよう

内容

- そもそもなんで宇宙線を観測するのか？
 - 現在の宇宙線物理学の課題
 - 「地球」カロリメータ性能理解の影響
- 最新の加速器で何を測ればいいのか？
 - 加速器用語
 - 前方測定的重要性
- LHCf実験
- LHCでおわり？

宇宙線観測の現状と課題 (最高エネルギー領域に限って)

10年前の話



AGASA実験が $>10^{20}\text{eV}$ の宇宙線を観測

10^{20}eV の宇宙線はCMBとの衝突によって数10Mpcで急激に減衰する(GZK予想)

↓

$>10^{20}\text{eV}$ の super-GZK宇宙線は近傍からきている?

↓

到来方向に近傍の活動天体は対応しない

↓

解1: 宇宙線源は天体ではない

未知の超重粒子の崩壊?

解2: GZK予想が間違い

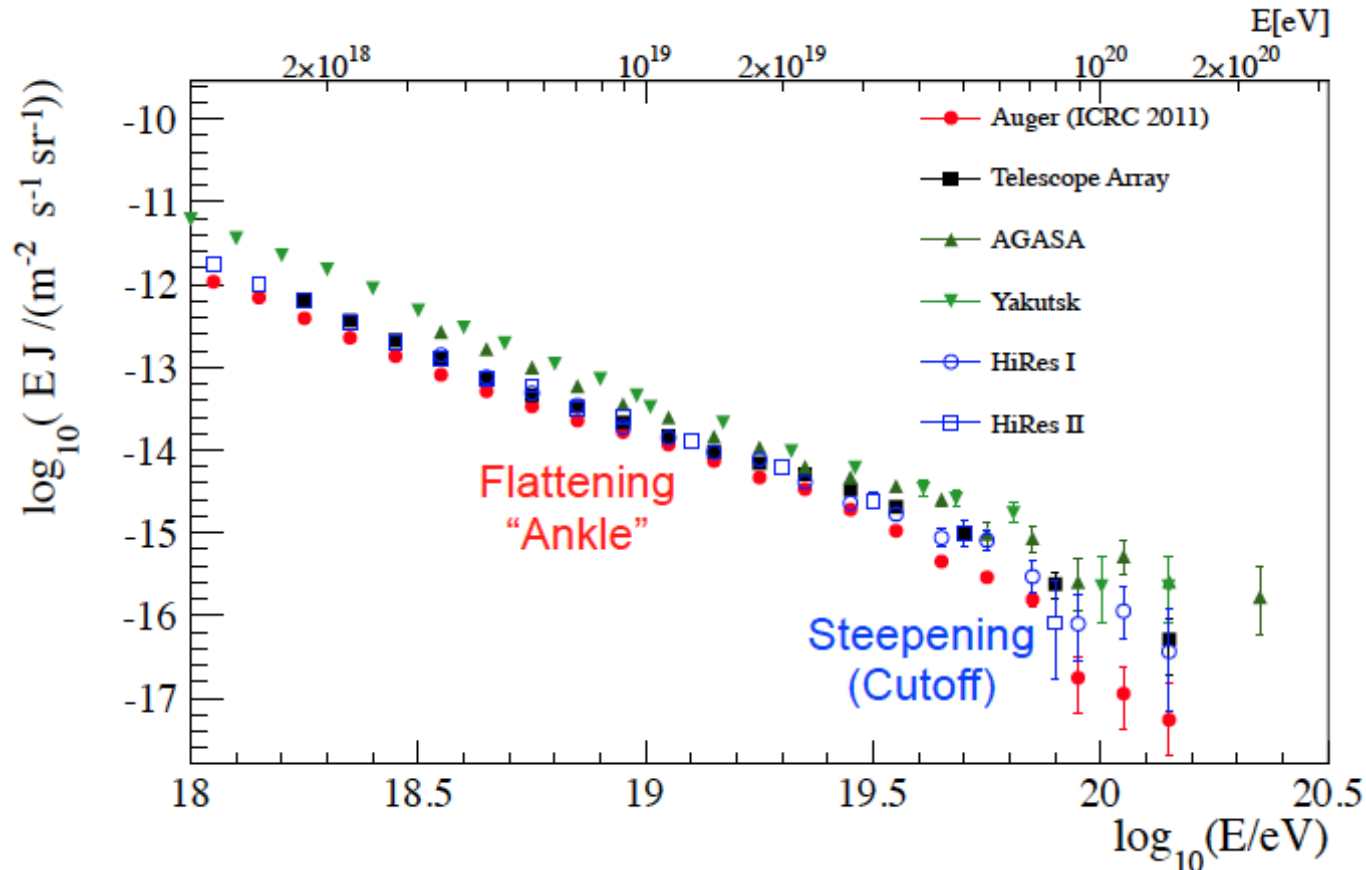
Lorentz不変性の破れ?

解3: GZKカットオフの回避?

ニュートリノで伝搬。銀河系近傍で背景ニュートリノと再衝突?

(注: HiRes実験の観測はGZK予想と一致)

現在

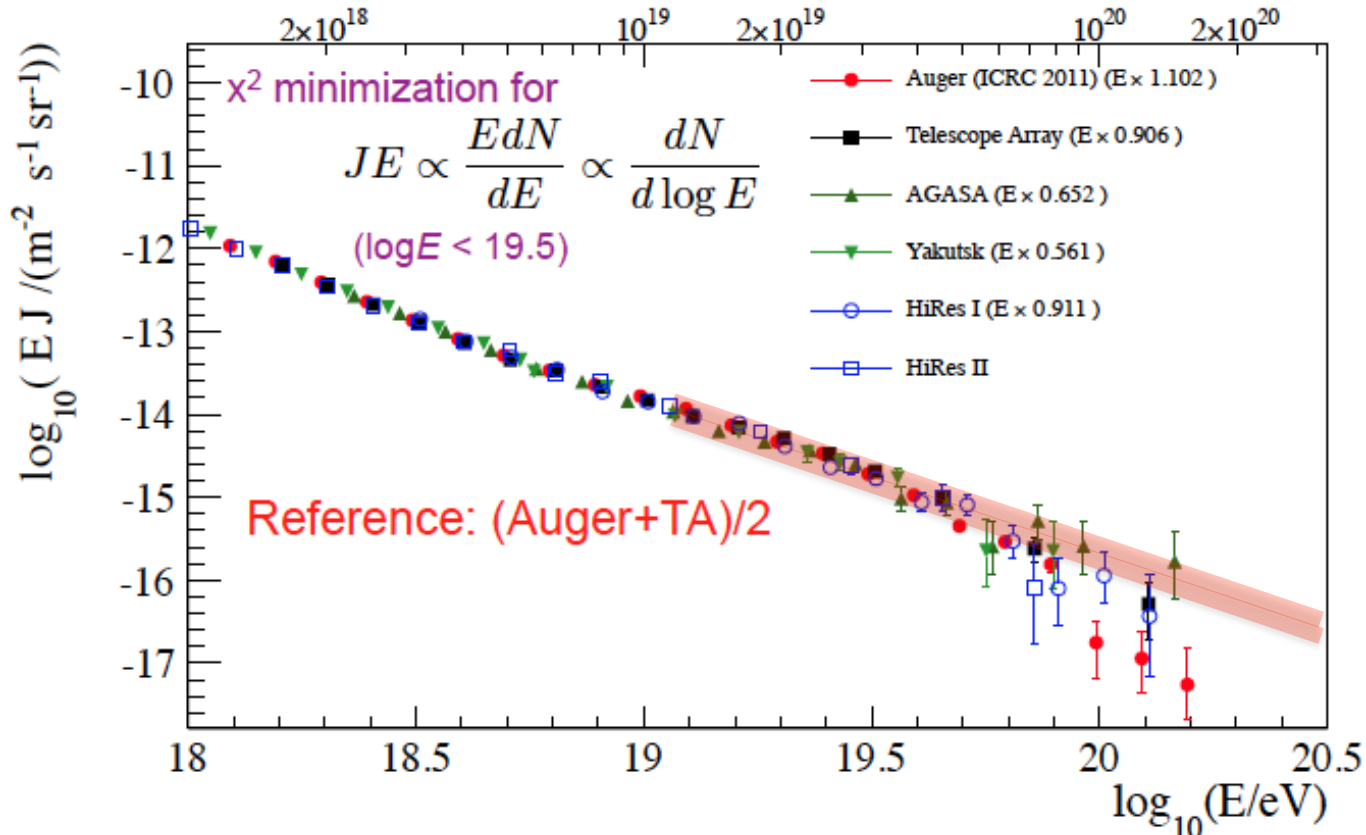


Tsunesada, presented at UHECR2012

統計を増やした実験 (HiRes, Yakutsk)、新しい実験 (PAO, TA) によって「カットオフの存在」が確認された
横軸 (エネルギースケール) がずれてる？

PAO (Pierre Auger Observatory), TA (Telescope Array): 現在進行中の2大観測グループ

現在(横軸のスケーリング後)



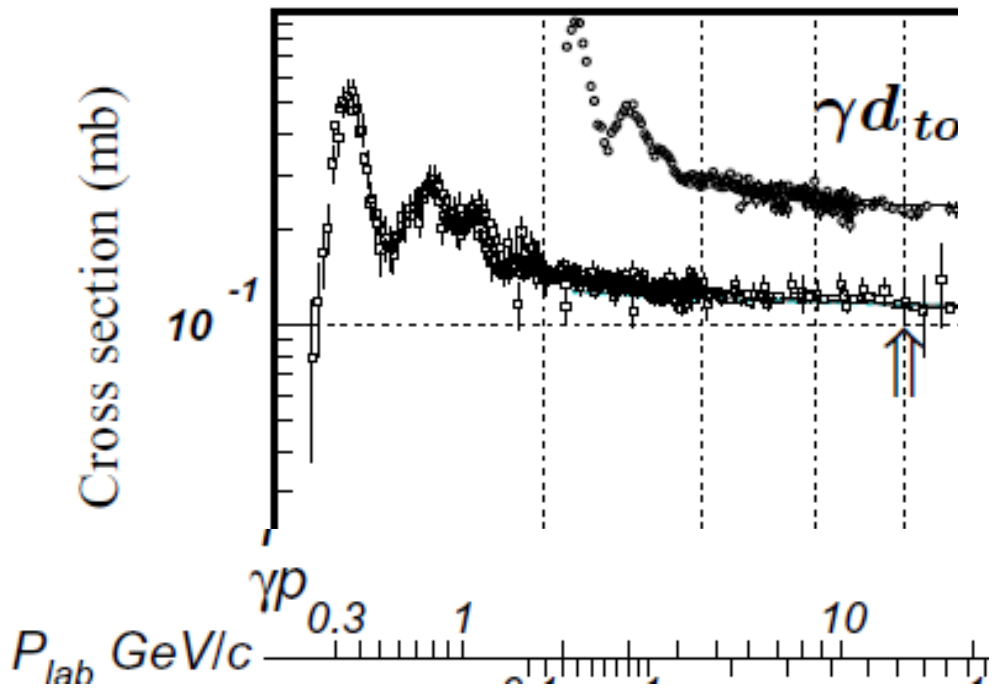
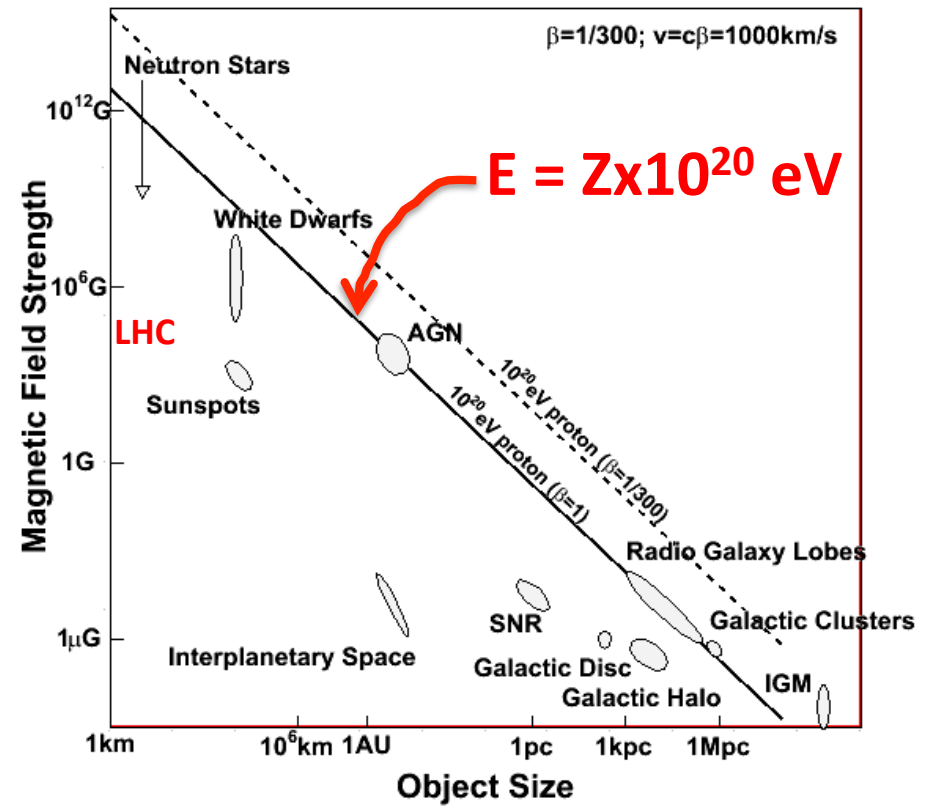
Tsunesada, presented at UHECR2012

統計を増やした実験(HiRes, Yakutsk)、新しい実験(PAO, TA)によって「カットオフの存在」が確認された

... おわり？

それってGZKカットオフですか？

Hillas Diagram

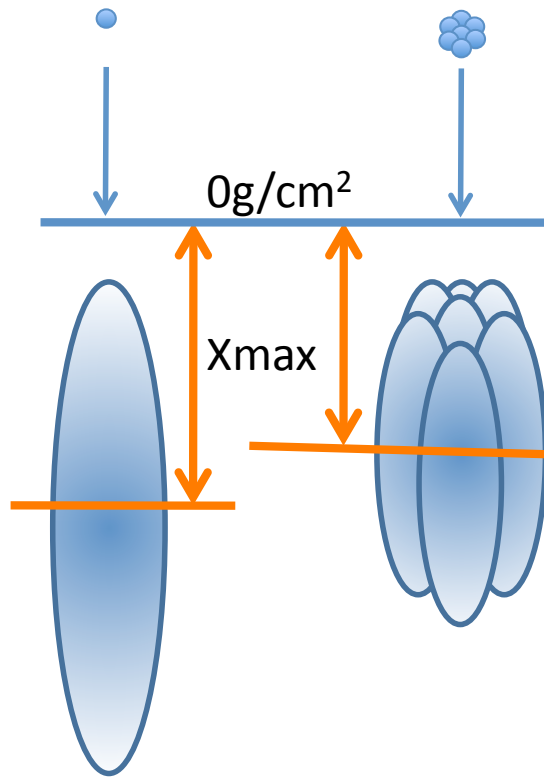


- 1) GZK機構:
 - 2-1: 宇宙線陽子CMBの Δ 共鳴(上図)
 - 2-2: 宇宙線原子核とCMBの光核反応

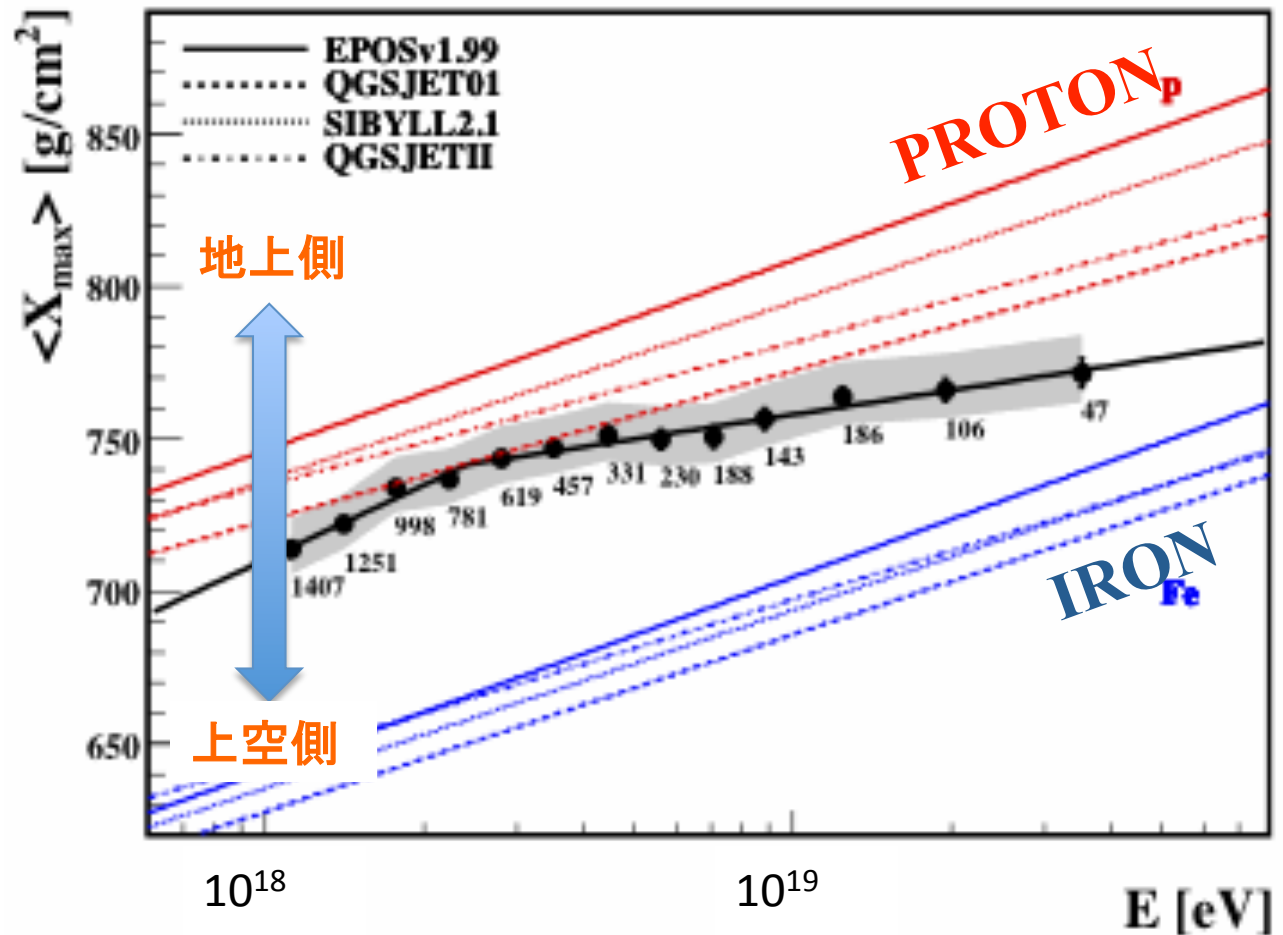
- 2) Hillas diagram: 宇宙線の加速限界は天体のサイズと磁場、宇宙線の電荷で決まる「閉じ込め」限界で決まる

どちらも、宇宙線粒子種(陽子、原子核(軽・重))に依存する

宇宙線粒子種の測定 (X_{\max})

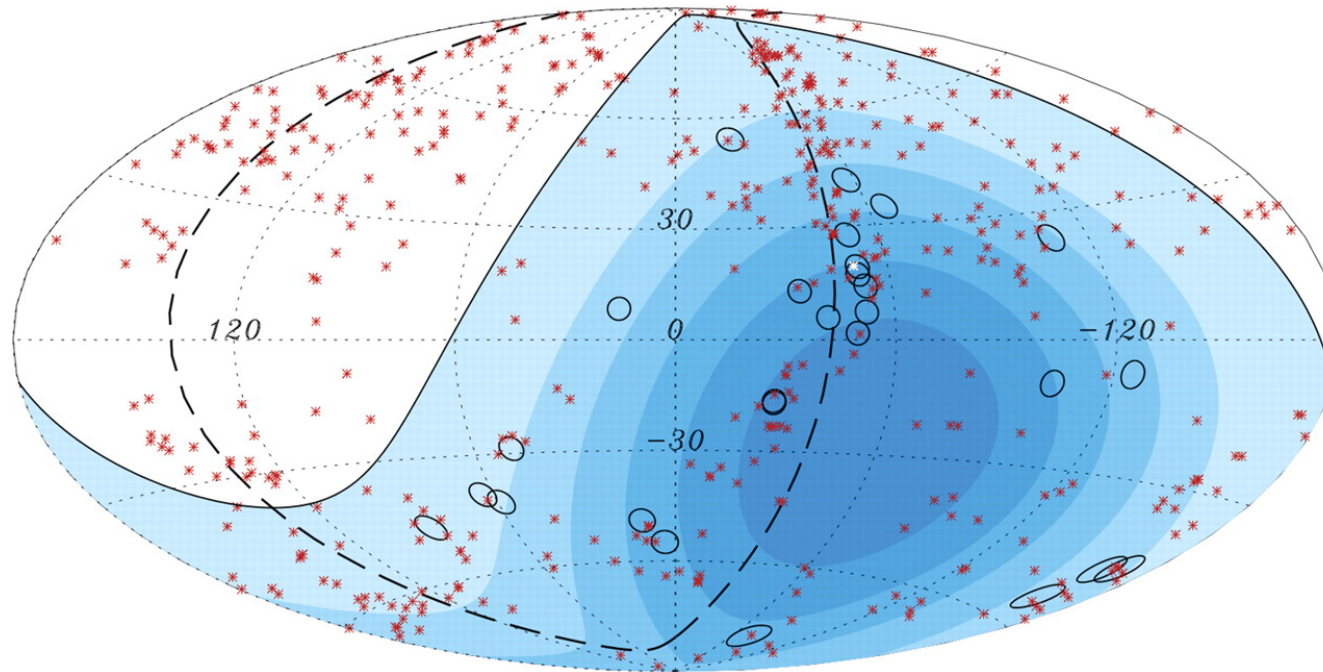


「全」エネルギーが同じ陽子シャワーと原子核シャワー



- PAO: エネルギーがあがるほど重くなる
- HiRes, TAは「すべて陽子」と一致する結果

到来方向分布



- PAOは近傍銀河と宇宙線の到来方向 (<3度) に相関を発見
- はて？宇宙線が重い (Z が大きい) 途中で曲がってしまうのでは？
- 銀河間磁場 ($O(1\text{nG})$) で、 $Z(L/3\text{Mpc})^\circ$

(最高エネルギー)宇宙線観測の現状

注) 異なるシナリオ組み合わせが可能な場合も多い(排他的ではない)

シナリオ	カットオフ	粒子種	天体との相関
GZK	あり	陽子	あり
		重原子核	ない、弱い
加速限界		陽子	あり
		重原子核	ない、弱い
近傍天体		陽子	あり
		重原子核	ない、弱い
Lorentz不変性の破れ	なし	陽子、重原子核	ない、弱い?
超重粒子		ガンマ線、ニュートリノ	ない
ニュートリノZバースト		陽子、ガンマ線	あり、遠くて難しい?

GZK: GZK限界距離を超えて、 10^{21} eVに達する宇宙線源が広く分布していること

Zバースト: 超高エネルギーニュートリノが銀河系近傍で背景ニュートリノと反応し、Z bosonを生成崩壊、photonと核子が生成される

(最高エネルギー)宇宙線観測の現状

PAOの結果

シナリオ	カットオフ	粒子種	天体との相関	
GZK	あり	陽子	あり	
		重原子核	ない、弱い	
加速限界		陽子	あり	
		重原子核	ない、弱い	
近傍天体		陽子	あり	
		重原子核	ない、弱い	
Lorentz不変性の破れ		なし	陽子、重原子核	ない、弱い?
超重粒子			ガンマ線、ニュートリノ	ない
ニュートリノZバースト	陽子、ガンマ線		あり、遠くて難しい?	

GZK: GZK限界距離を超えて、 10^{21} eVに達する宇宙線源が広く分布していること

Zバースト: 超高エネルギーニュートリノが銀河系近傍で背景ニュートリノと反応し、Z bosonを生成崩壊、photonと核子が生成される

(最高エネルギー)宇宙線観測の現状

	シナリオ	カットオフ	粒子種	天体との相関
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f4a460; margin-right: 5px;"></div> PAOの結果 </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #a4d4a4; margin-right: 5px;"></div> TA/HiResの結果 </div> </div>	GZK	あり	陽子	あり
			重原子核	ない、弱い
	加速限界		陽子	あり
			重原子核	ない、弱い
	近傍天体	なし	陽子	あり
			重原子核	ない、弱い
	Lorentz不変性の破れ		陽子、重原子核	ない、弱い?
	超重粒子		ガンマ線、ニュートリノ	ない
	ニュートリノZバースト		陽子、ガンマ線	あり、遠くて難しい?

GZK: GZK限界距離を超えて、 10^{21} eVに達する宇宙線源が広く分布していること

Zバースト: 超高エネルギーニュートリノが銀河系近傍で背景ニュートリノと反応し、Z bosonを生成崩壊、photonと核子が生成される

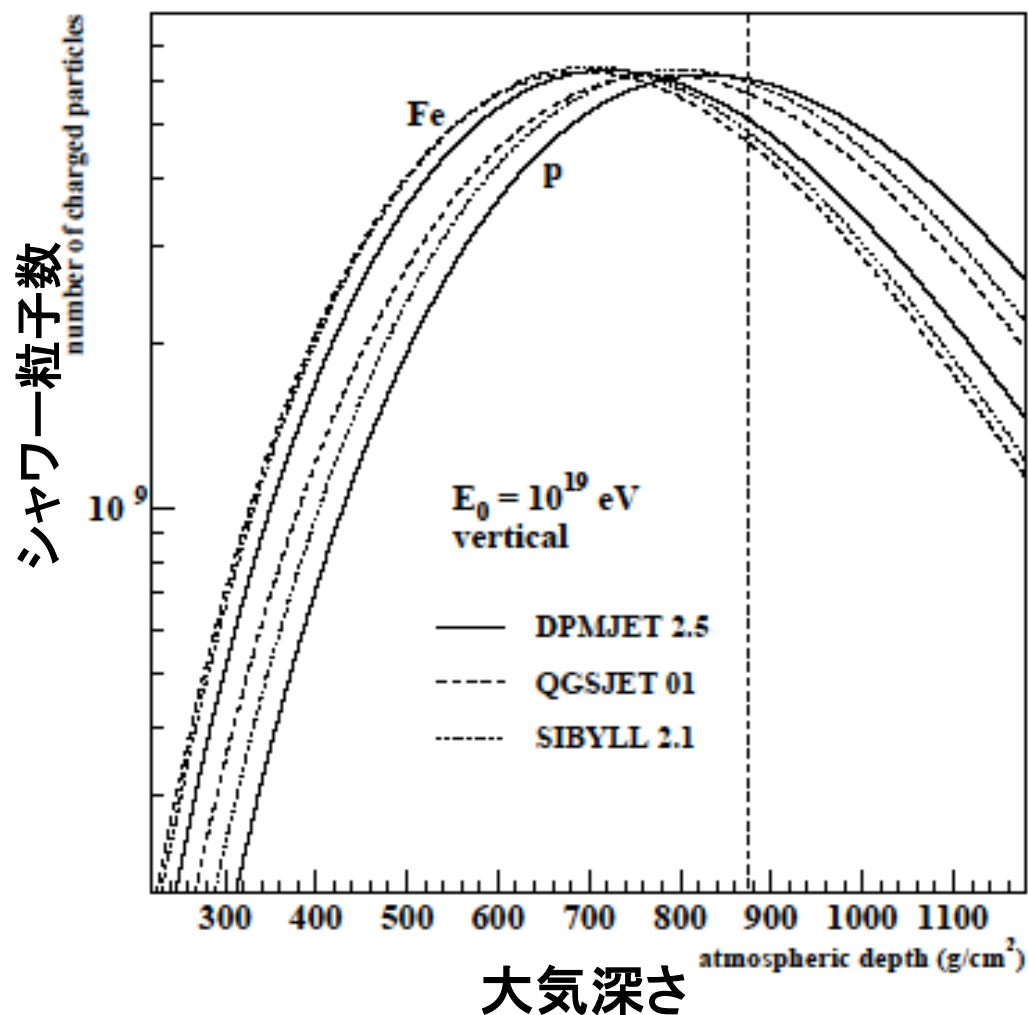
宇宙線観測現状のまとめ

- エネルギーカットオフ
 - 全実験がエラーの範囲内で一致
 - 絶対値の不一致はあるが、カットオフはあるだろう
- 粒子種
 - 実験間の違い => 解析・較正方法の議論
 - MC予想の不定性
- 天体との相関
 - 実験間の違い => 統計的には有意ではない
 - TAが統計を増やすことが本質的に重要
 - (HiRes実験はすでに終了)

宇宙線観測現状のまとめ

- エネルギーカットオフ
 - 全実験がエラーの範囲内で一致
 - 絶対値の不一致はあるが、カットオフはあるだろう
- 粒子種
 - 実験間の違い => 解析・較正方法の議論
 - MC予想の不定性
- 天体との相関
 - 実験間の違い => 統計的には有意ではない
 - TAが統計を増やすことが本質的に重要
 - (HiRes実験はすでに終了)

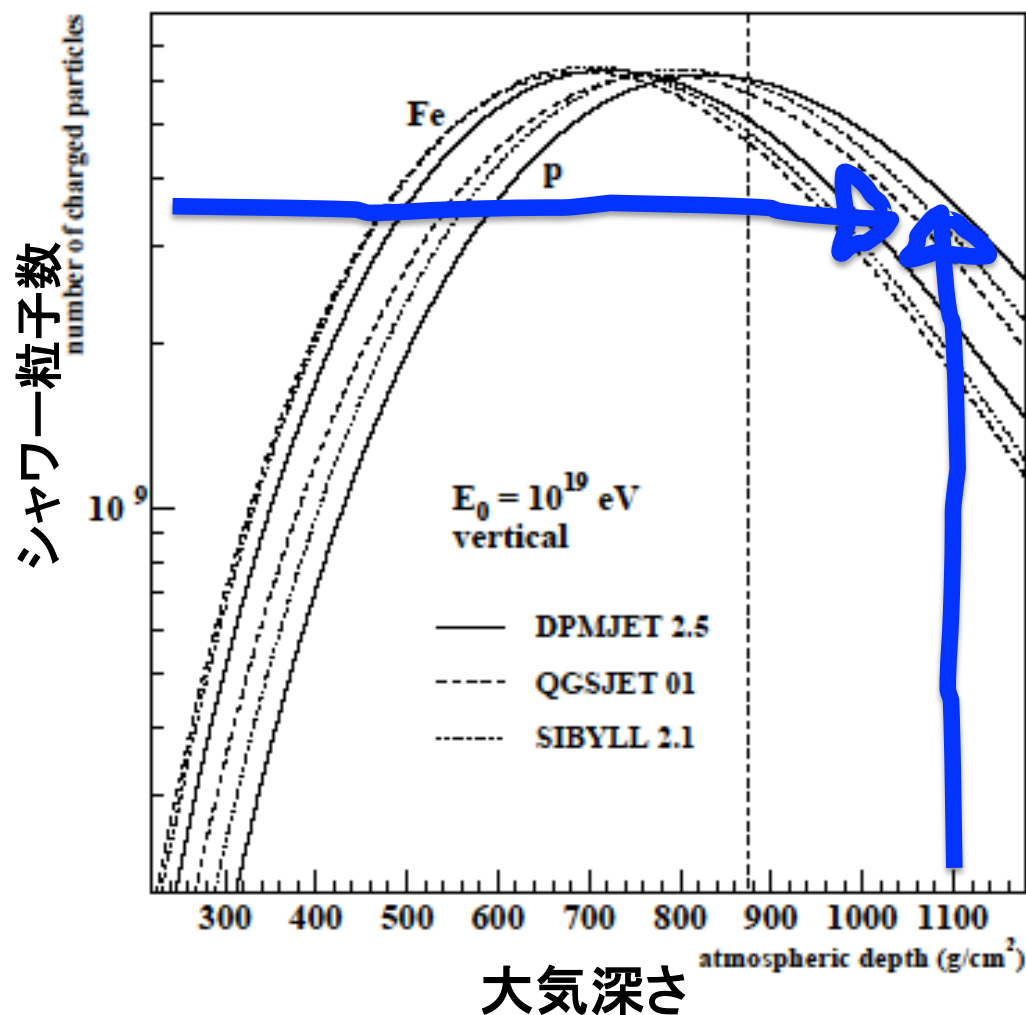
空気シャワーシミュレーション (つまり「地球」カロリーメータの理解)の影響



空気シャワー観測

1. ある高度で測定した粒子数から元のエネルギーに換算(MCと比較) (SD法)
 2. 最大発達高度から粒子種に換算(MCと比較)
 3. 全発光量から元のエネルギーに換算(発光効率キャリブレーションを利用) (FD法)
- 粒子種の決定と、SD法によるエネルギー決定はMCに依存している。
 - 複数のMC予想が存在

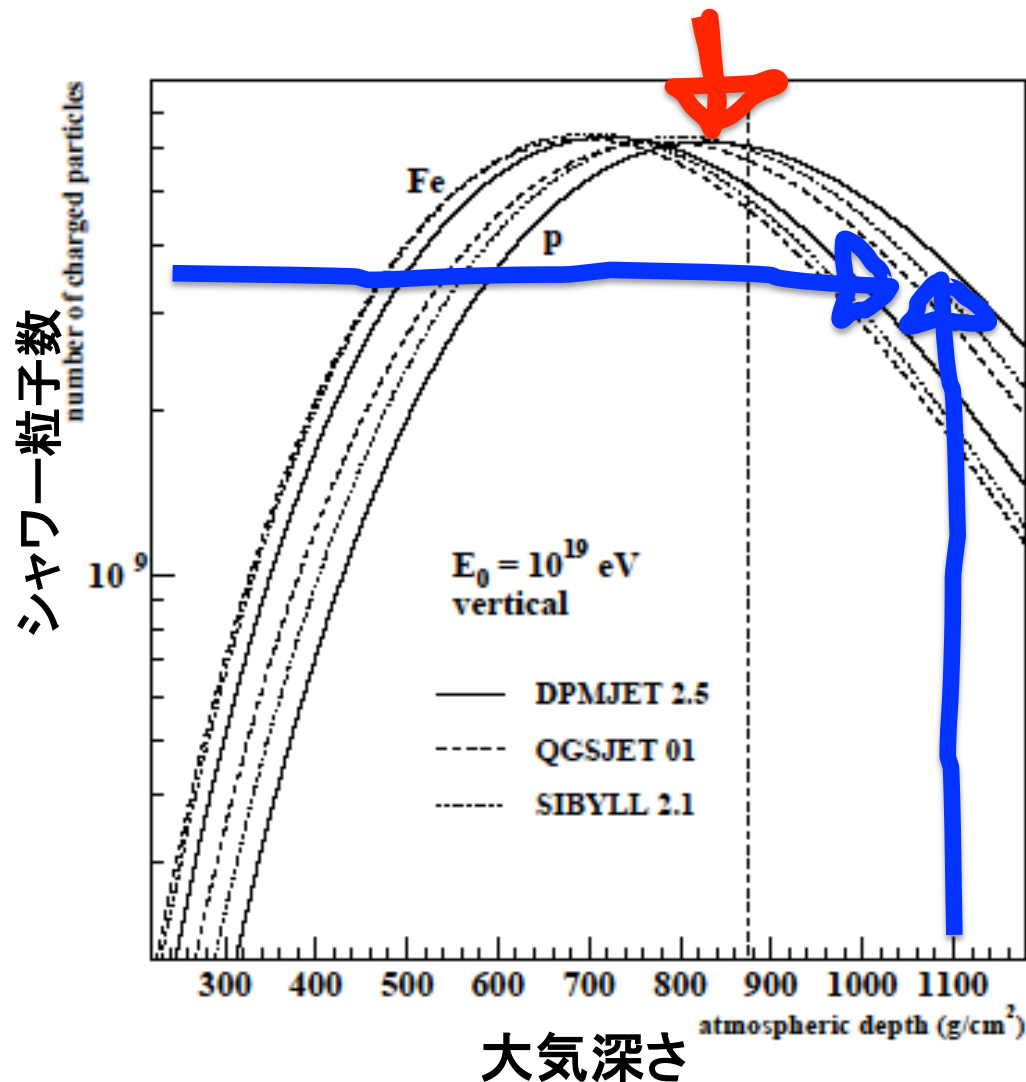
空気シャワーシミュレーション (つまり「地球」カロリーメータの理解)の影響



空気シャワー観測

1. ある高度で測定した粒子数から元のエネルギーに換算(MCと比較) (SD法)
 2. 最大発達高度から粒子種に換算(MCと比較)
 3. 全発光量から元のエネルギーに換算(発光効率キャリブレーションを利用) (FD法)
- 粒子種の決定と、SD法によるエネルギー決定はMCに依存している。
 - 複数のMC予想が存在

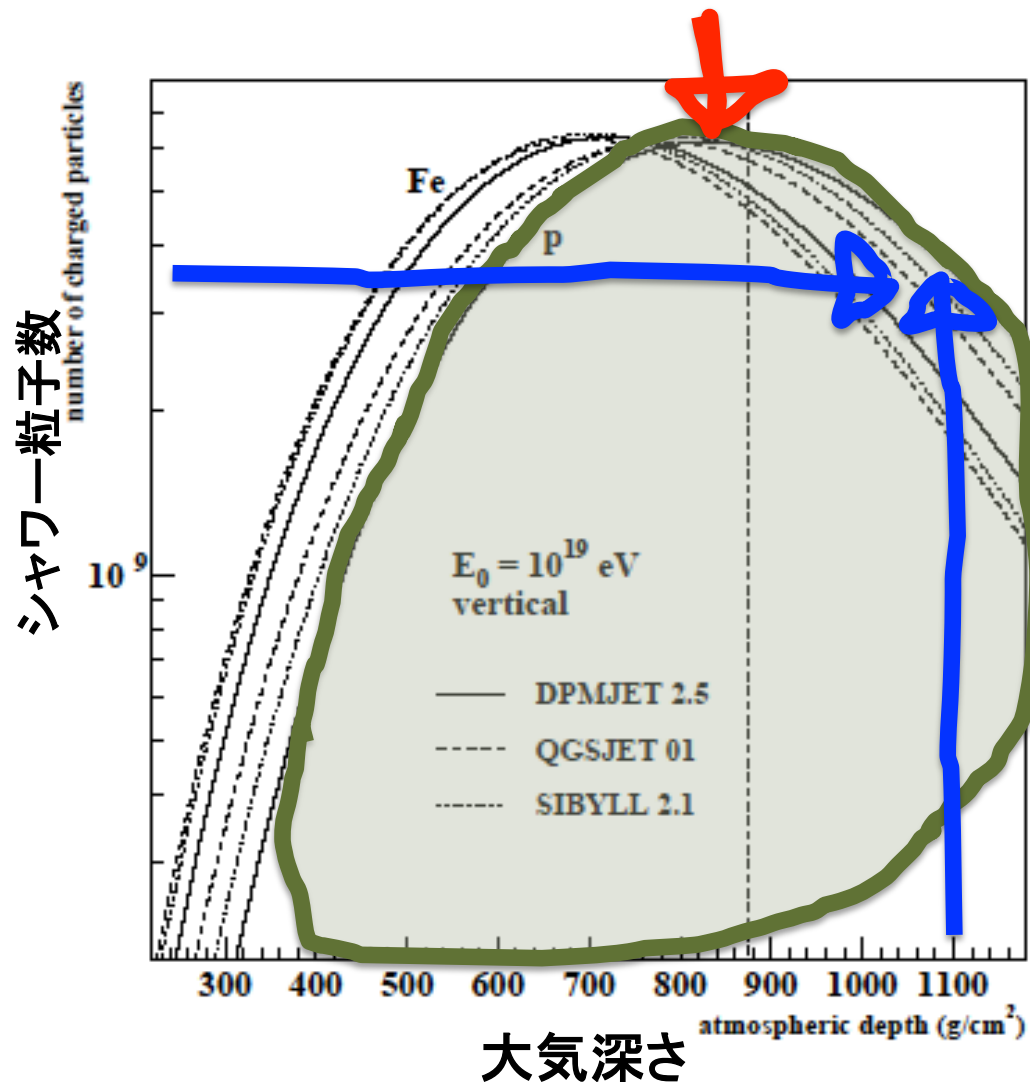
空気シャワーシミュレーション (つまり「地球」カロリーメータの理解)の影響



空気シャワー観測

1. ある高度で測定した粒子数から元のエネルギーに換算(MCと比較) (SD法)
 2. 最大発達高度から粒子種に換算(MCと比較)
 3. 全発光量から元のエネルギーに換算(発光効率キャリブレーションを利用) (FD法)
- 粒子種の決定と、SD法によるエネルギー決定はMCに依存している。
 - 複数のMC予想が存在

空気シャワーシミュレーション (つまり「地球」カロリーメータの理解)の影響



空気シャワー観測

1. ある高度で測定した粒子数から元のエネルギーに換算(MCと比較) (SD法)
2. 最大発達高度から粒子種に換算 (MCと比較)
3. 全発光量から元のエネルギーに換算(発光効率キャリブレーションを利用) (FD法)

- 粒子種の決定と、SD法によるエネルギー決定はMCに依存している。
- 複数のMC予想(モデル)が存在
- SDとFDで決定したエネルギーが異なる

非弾性 ハドロン衝突

陽子

なんでモデルが複数あるか？
何が理論でわからないのか？

1. 非弾性衝突断面積
(平均衝突距離)

2. 粒子生成

Leading baryon

スペクトル

π^+

中間子多重発生

非弾性度 ($E_{\text{meson}}/E_0 = 1 - \text{弾性度}$)
粒子多重度 (multiplicity)
Mesonスペクトル

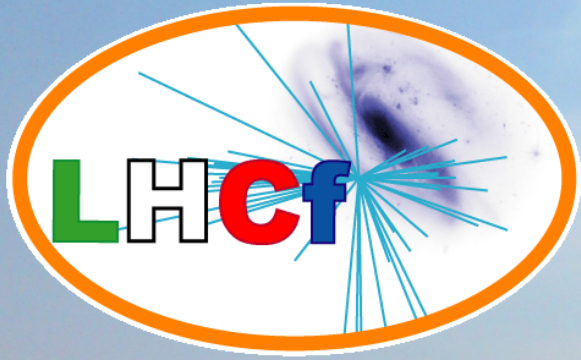
π^0

γ

3. 原子核効果

陽子 / 中性子

もーこれは加速器で調べるしかない！

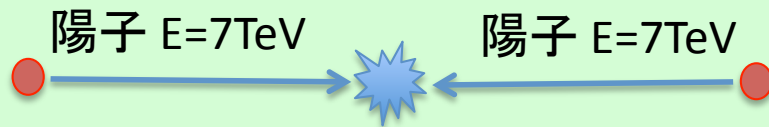


加速器実験で ハドロン衝突を理解しよう (LHCf実験)

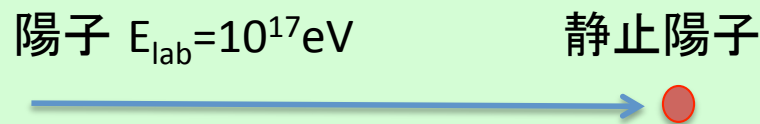
復習

$$\begin{pmatrix} E_{\text{lab}} \\ pc_{\text{lab}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \\ \beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ pc \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} \gamma E + \beta\gamma pc \\ \beta\gamma E + \gamma pc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\gamma E \\ 2\gamma E \end{pmatrix}$$

$\beta=1, E=pc$

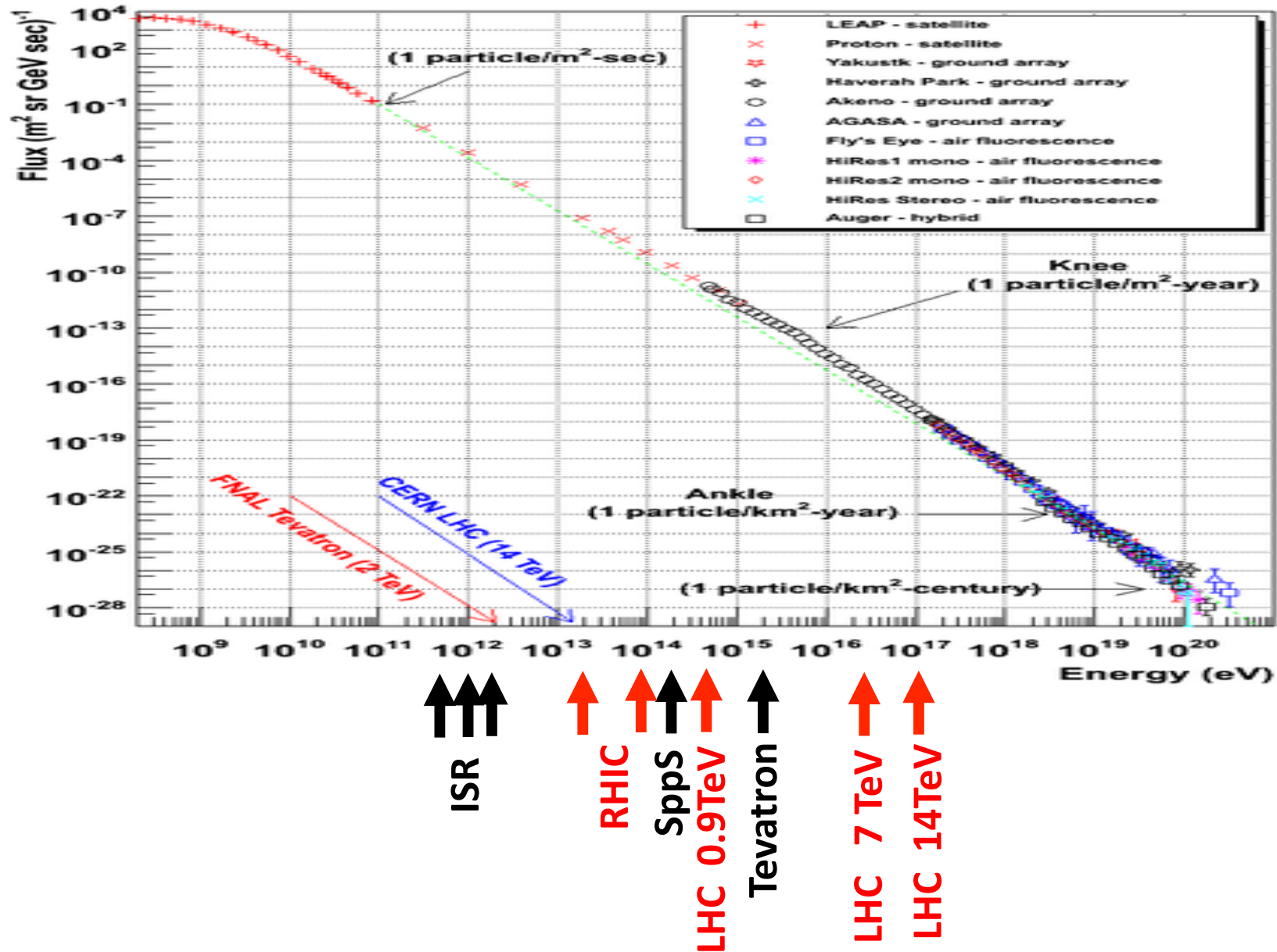


衝突型加速器の場合：
重心系エネルギー $\sqrt{s}=14\text{TeV}$

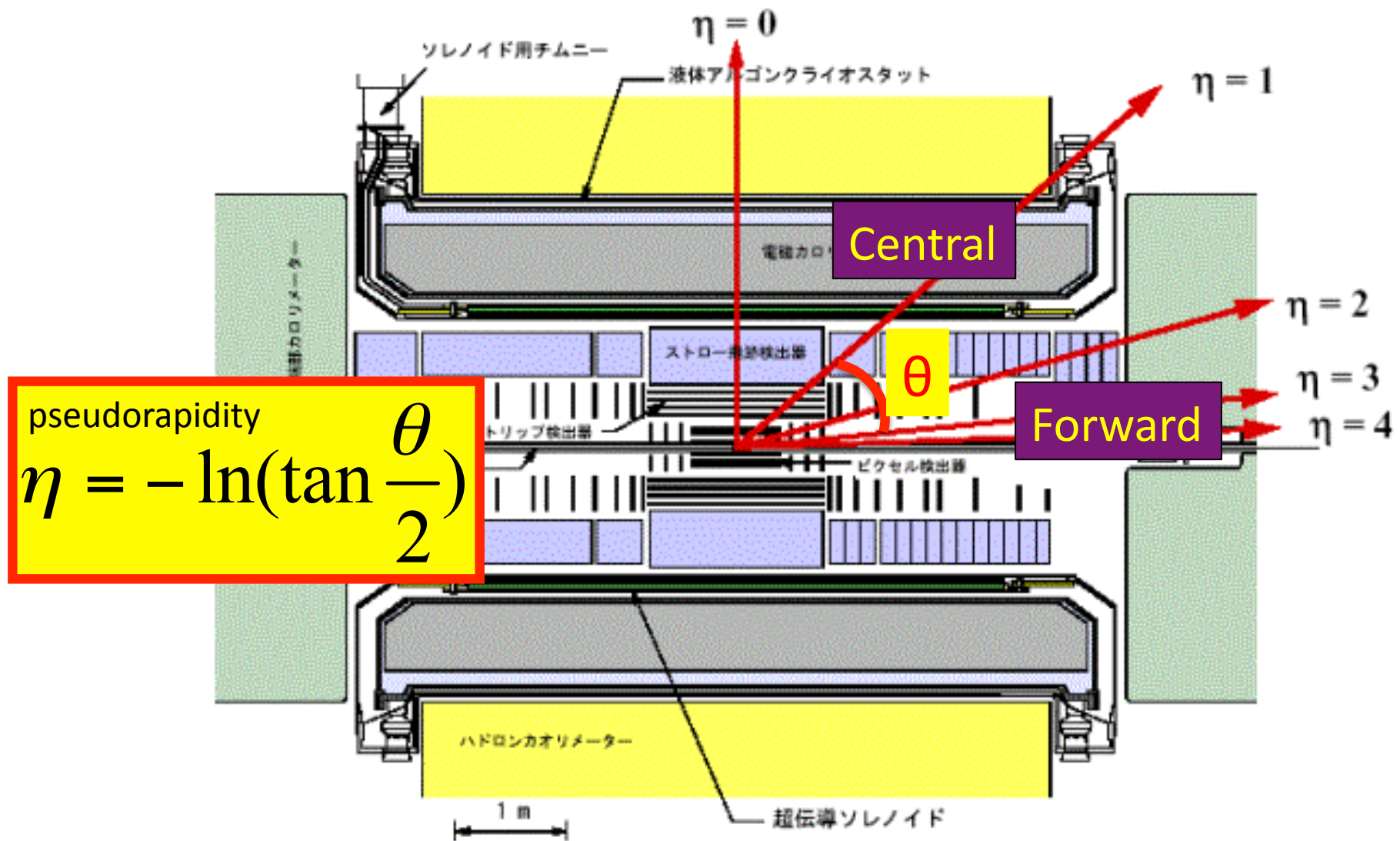


宇宙線と大気の実験室系エネルギー $E_{\text{lab}}=10^{17}\text{eV}$

宇宙線エネルギースペクトルと衝突型加速器 (Collider)の「実験室系」衝突エネルギー



Collider実験と pseudorapidity (η)



pseudorapidity

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$$

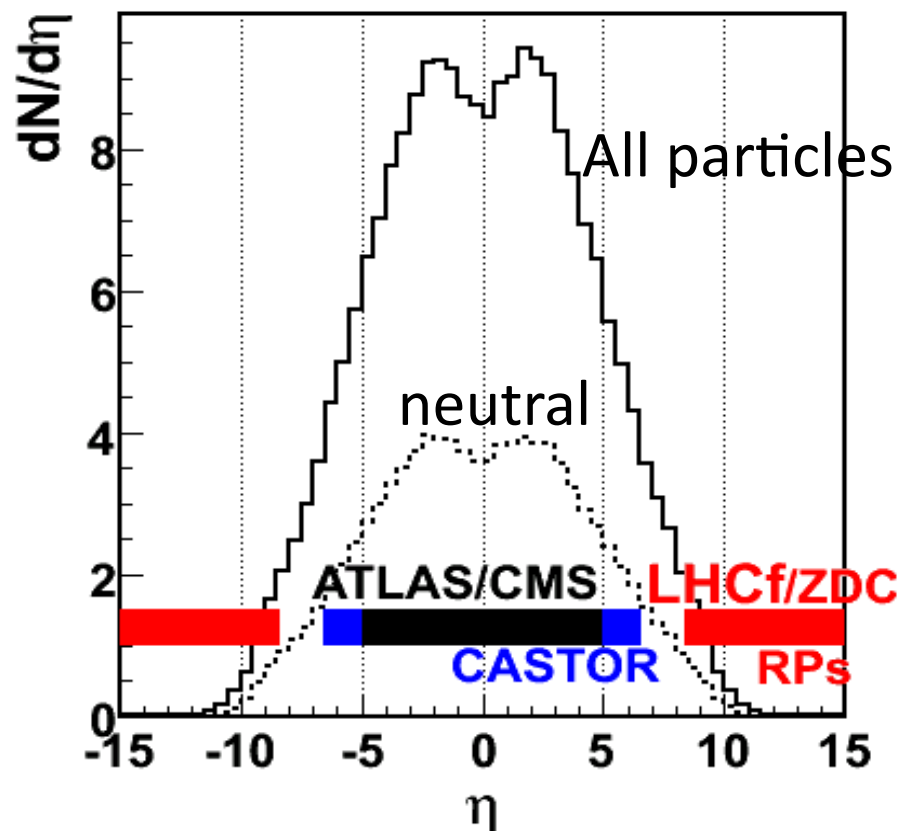
η : pseudorapidity $\sim y$: rapidity $y = (1/2) \times \ln((E+p_z)/(E-p_z))$
 Lorentz変換で、 $y \Rightarrow y + \text{const}$

衝突型加速器(Collider)のどこで測るか？

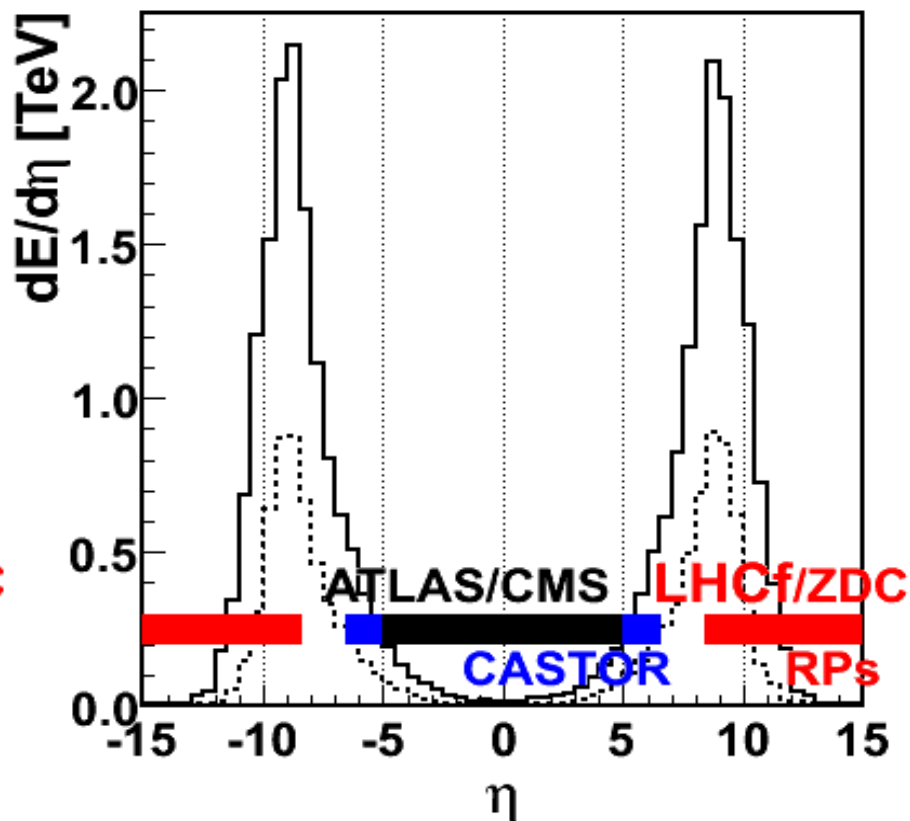
multiplicity and energy flux at LHC 14TeV collisions

pseudo-rapidity; $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$

粒子多重度



エネルギー流量



- ほとんどの粒子は中央へ
- ほとんどのエネルギー(空気シャワーに重要)は前方へ

LHC加速器

14TeVの陽子衝突型加速器
(現在は8TeVで運転中)

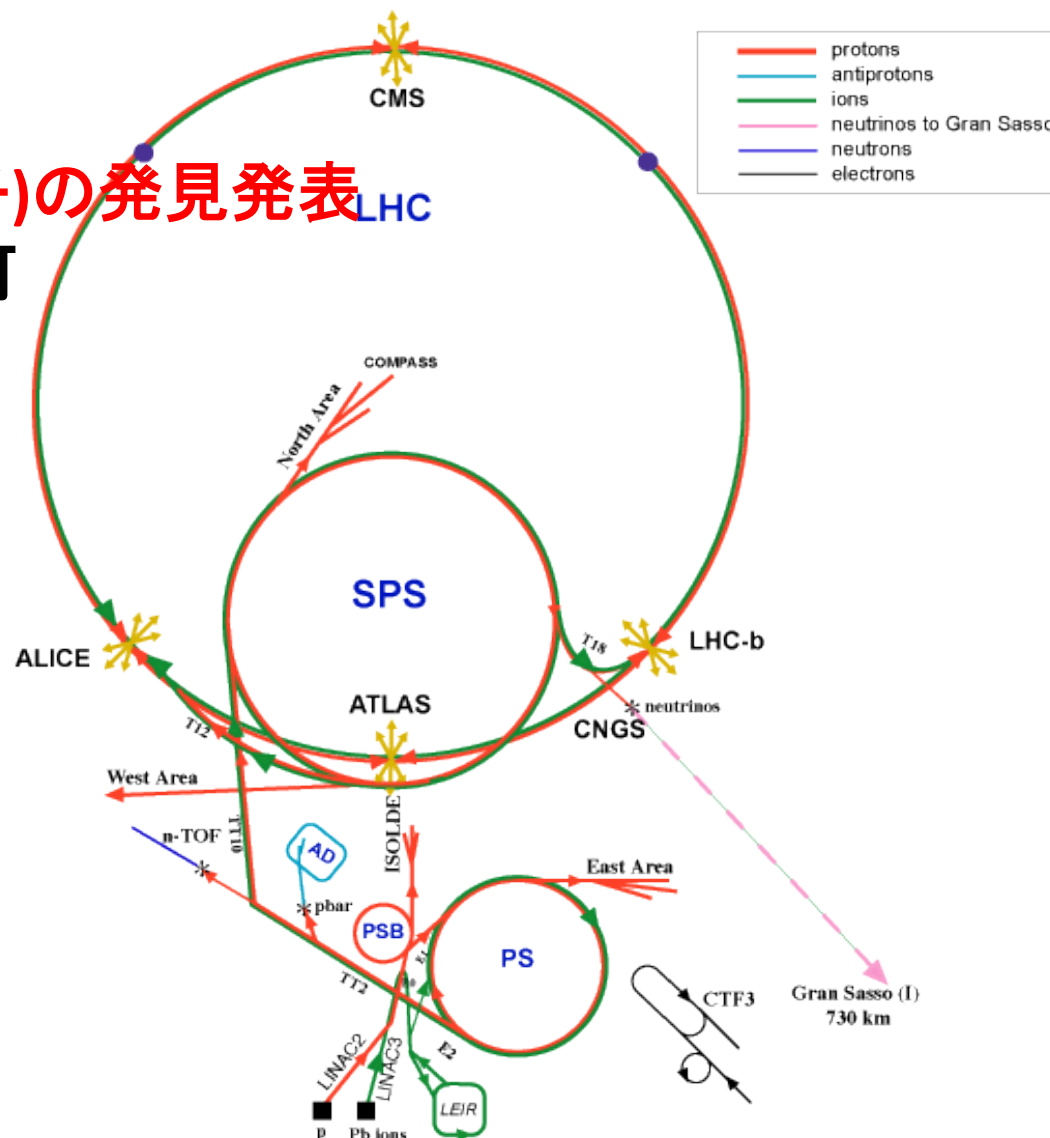
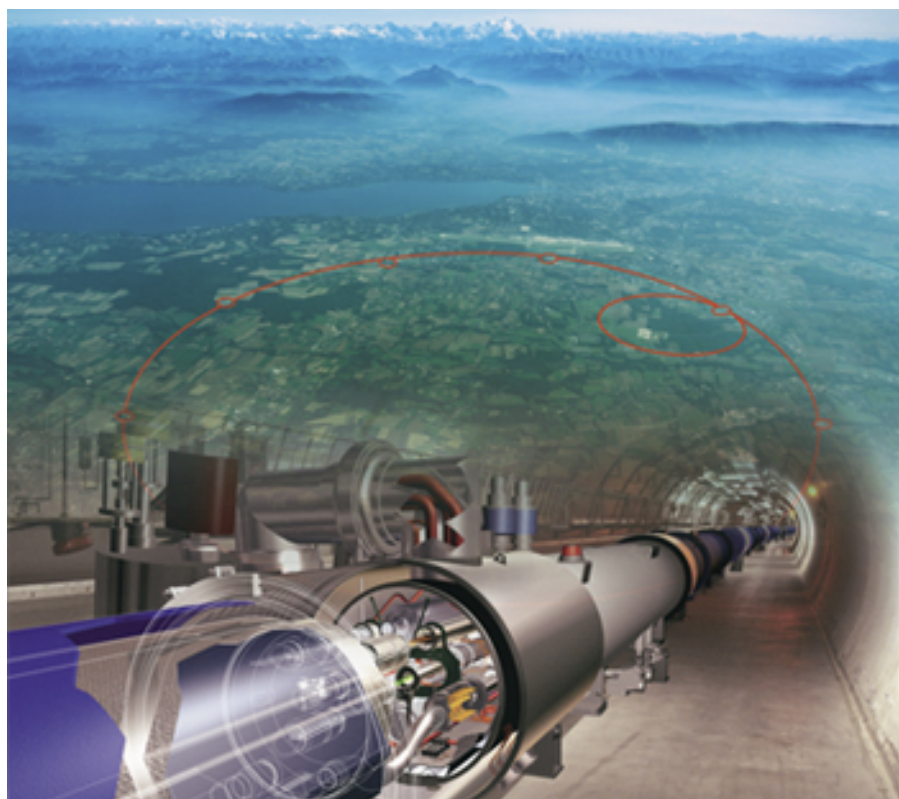
Higgs, SUSYなどの新粒子探索

=> 7/4に5 σ でHiggs(らしき新粒子)の発見発表

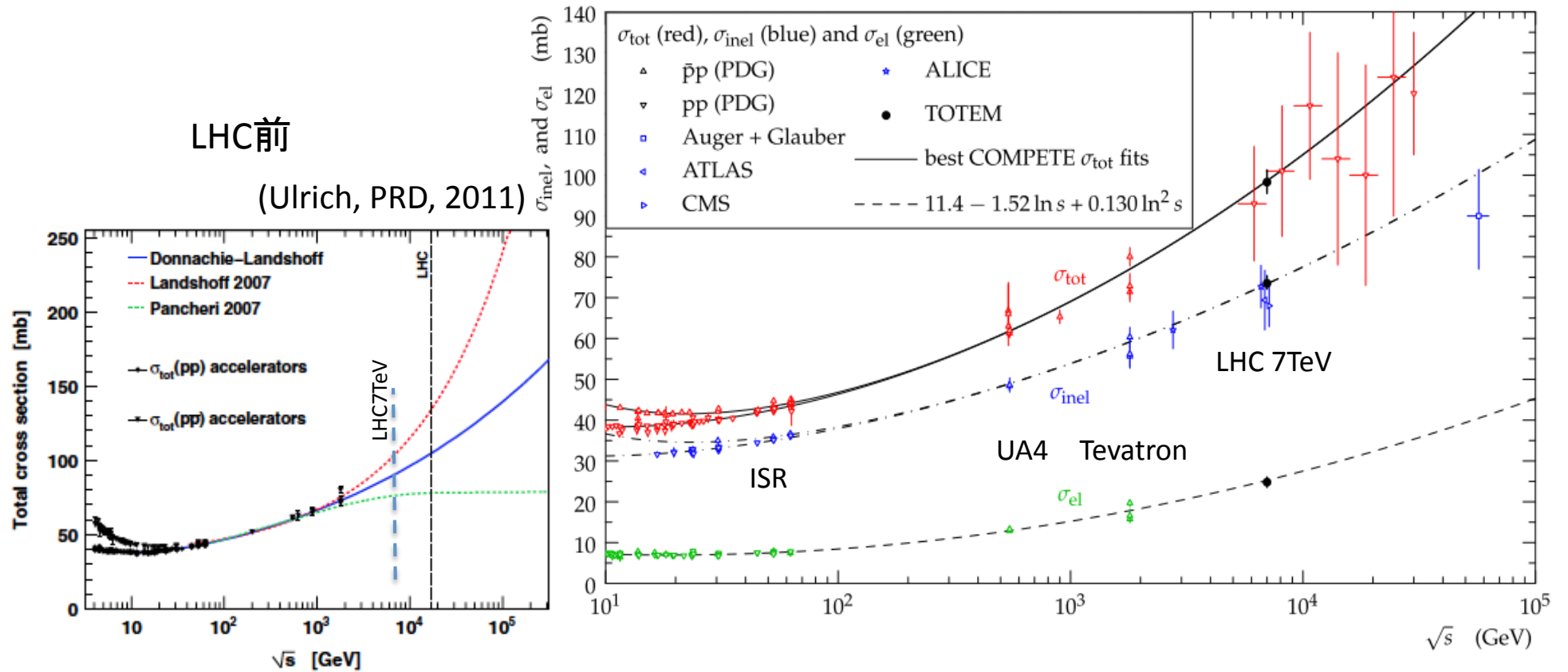
B中間子物理、重イオン衝突も可

一周 27km

(参考:名城線、一周26.4km)

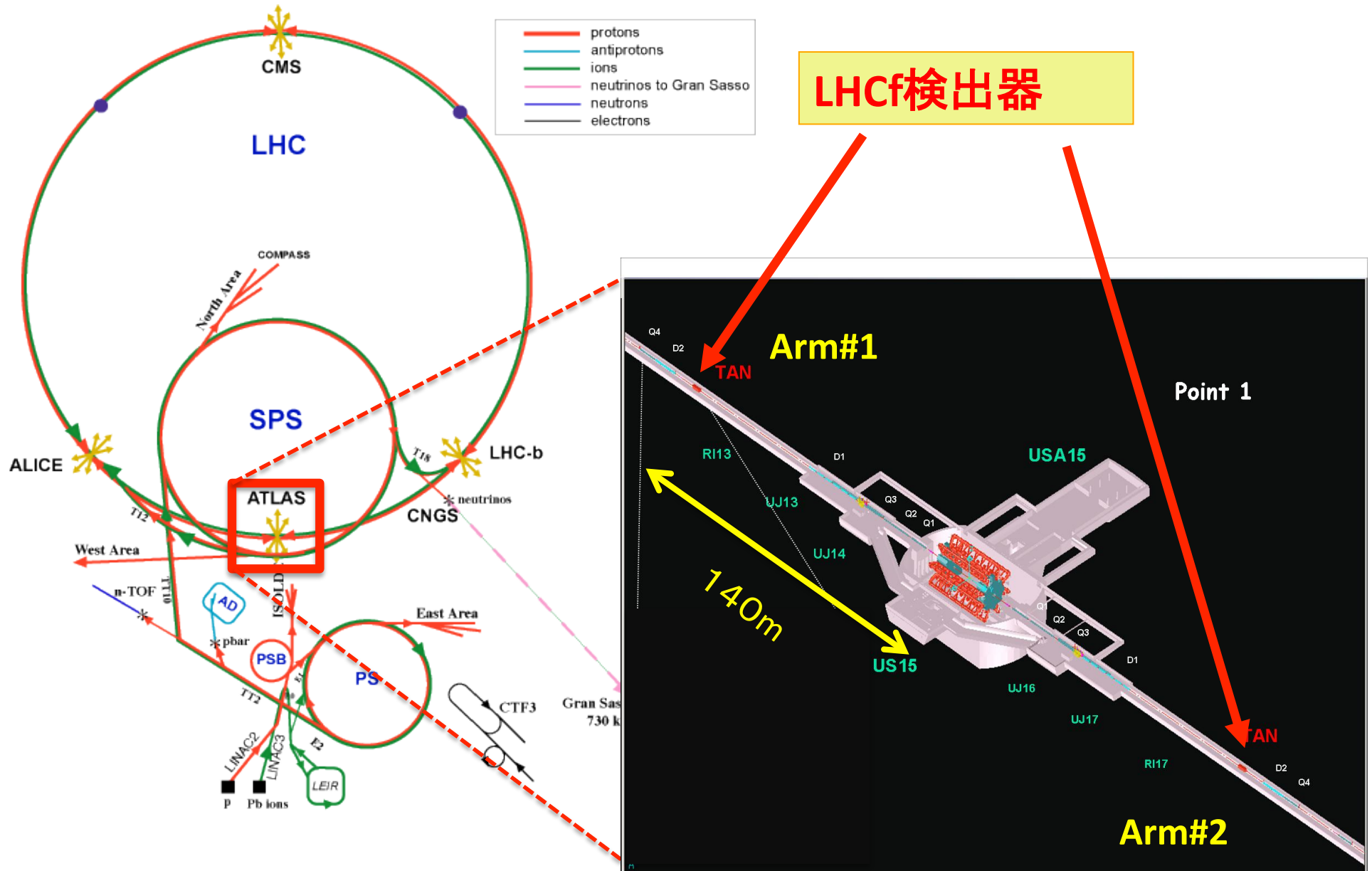


LHCにおける断面積測定 σ_{inel}

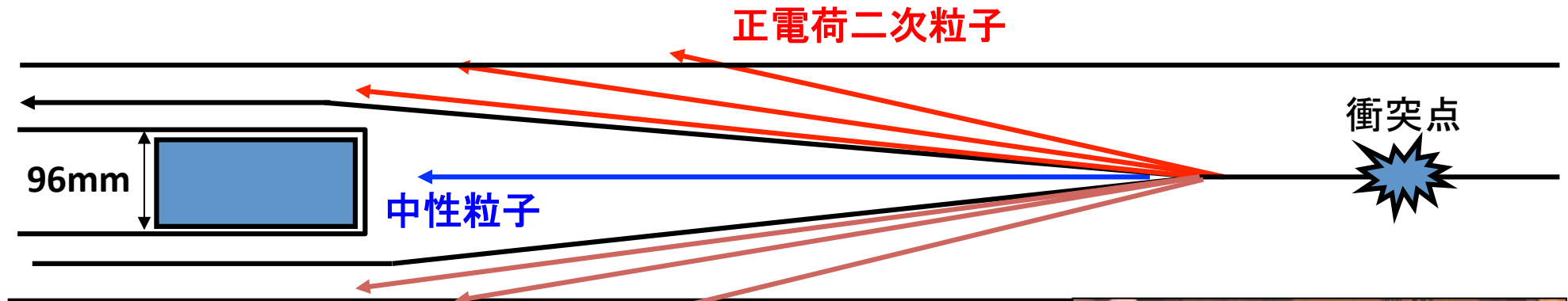


TOTEM	73.5 \pm 0.6 \pm 1.8 \pm 1.3 mb	$d\sigma/dt(t=0)$
ATLAS	69.4 \pm 2.4 \pm 6,9 mb	MBTS sample
CMS	68.0 \pm 2.0 \pm 2.4 \pm 4 mb	Ntrk sample
ALICE	72.7 \pm 1.1 \pm 5.1 mb	VZERO sample

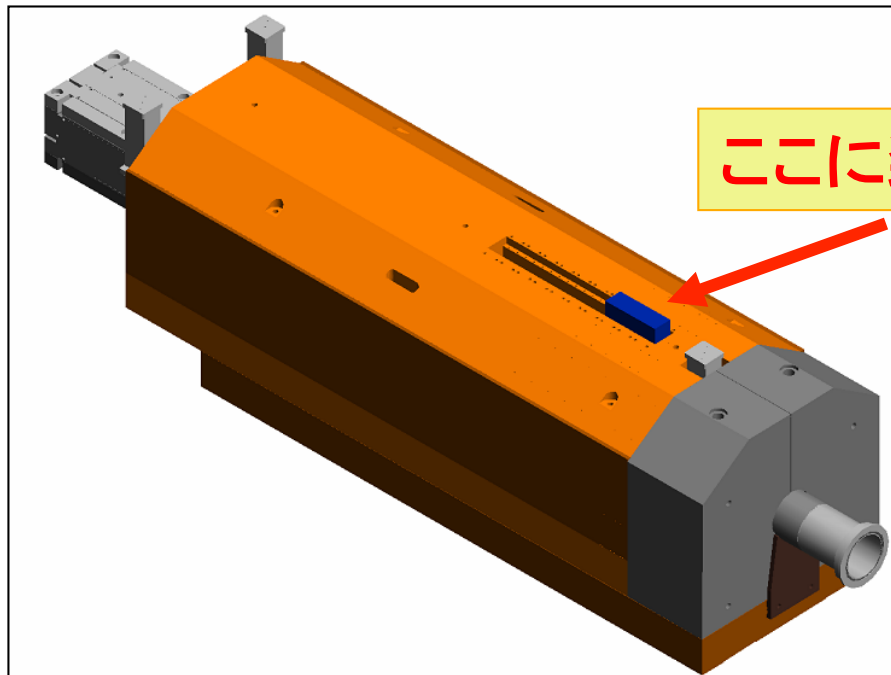
LHCにおける超前方生成粒子の測定



LHCにおける超前方生成粒子の測定



負電荷二次粒子

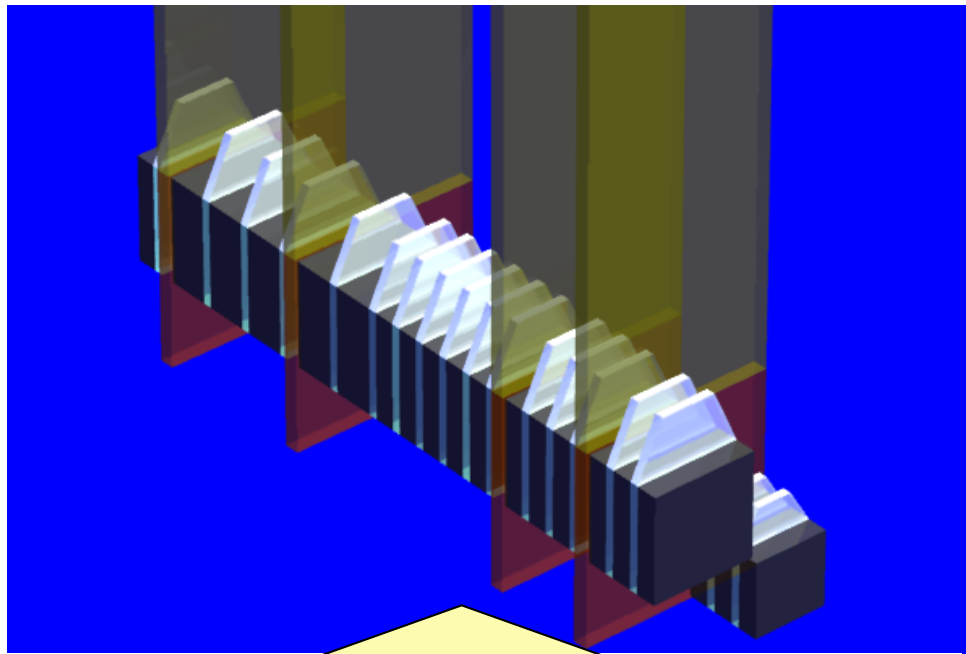


ここに装置を設置可能



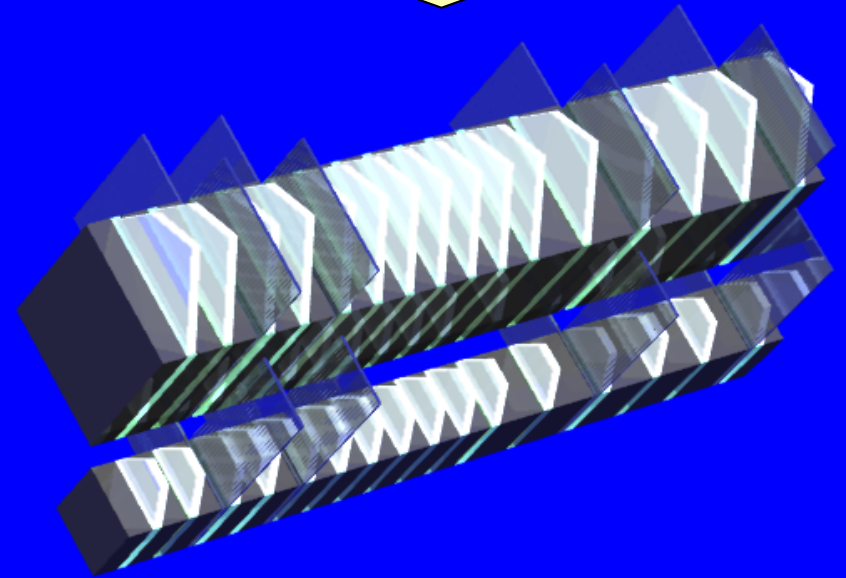
LHCf検出器

- * 衝突点両側に1台ずつの解像型サンプリングカロリメータ
- * それぞれに2つの独立なカロリメータ (タングステン44r.l., 1.7 λ 、プラスチックシンチレータでサンプリング)

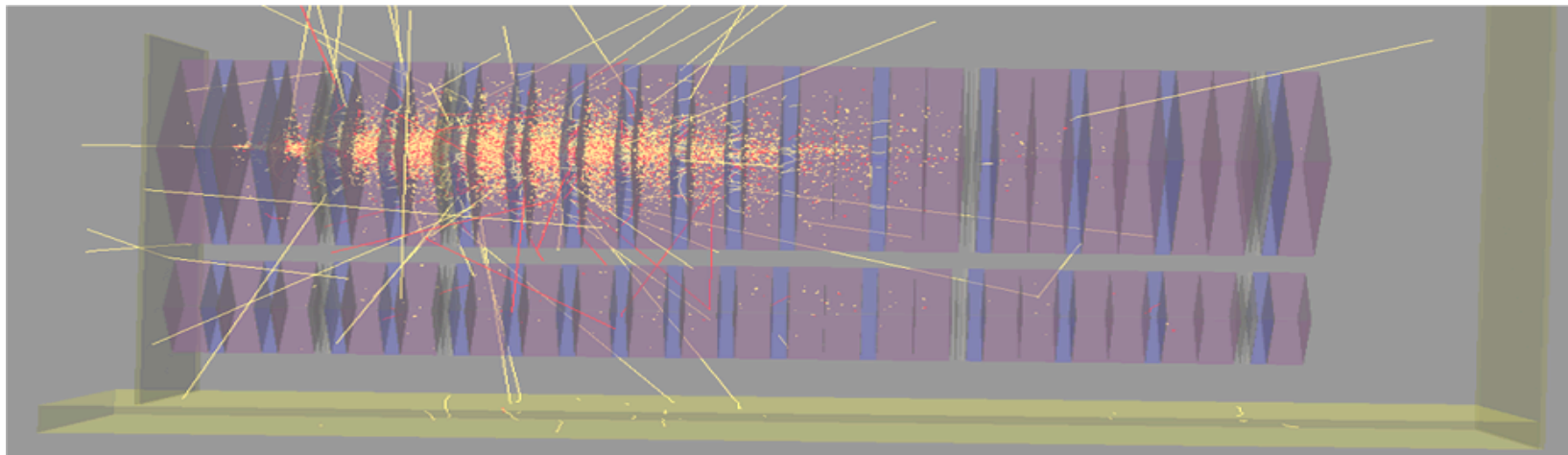
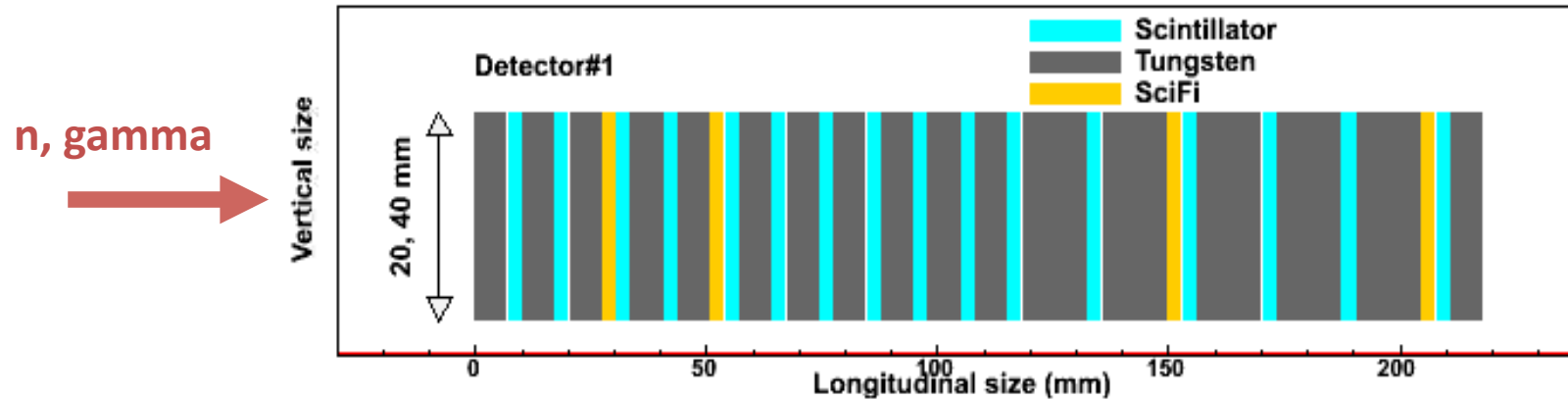


Arm#2 Detector
25mmx25mm+32mmx32mm
4 XY Silicon strip detectors

Arm#1 Detector
20mmx20mm+40mmx40mm
4 XY SciFi+MAPMT

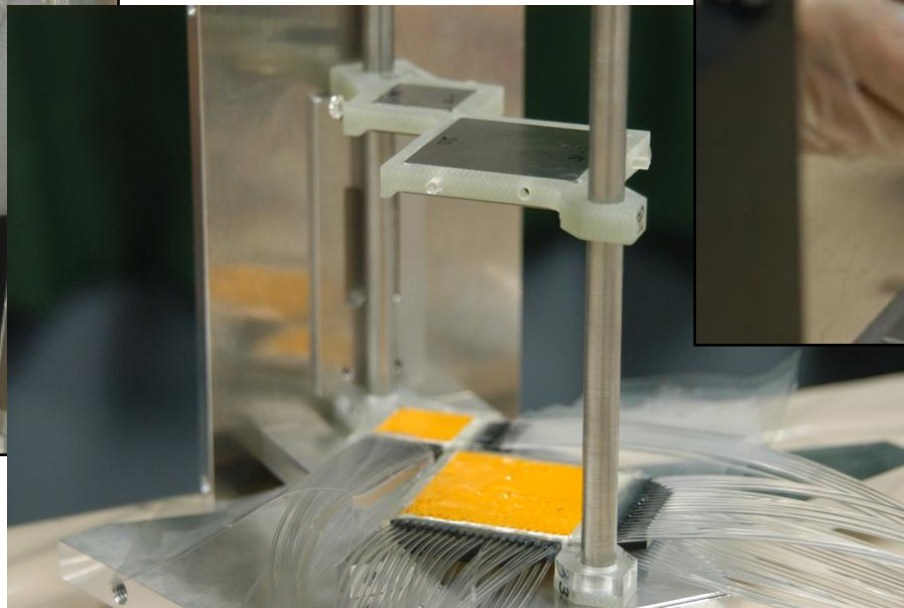
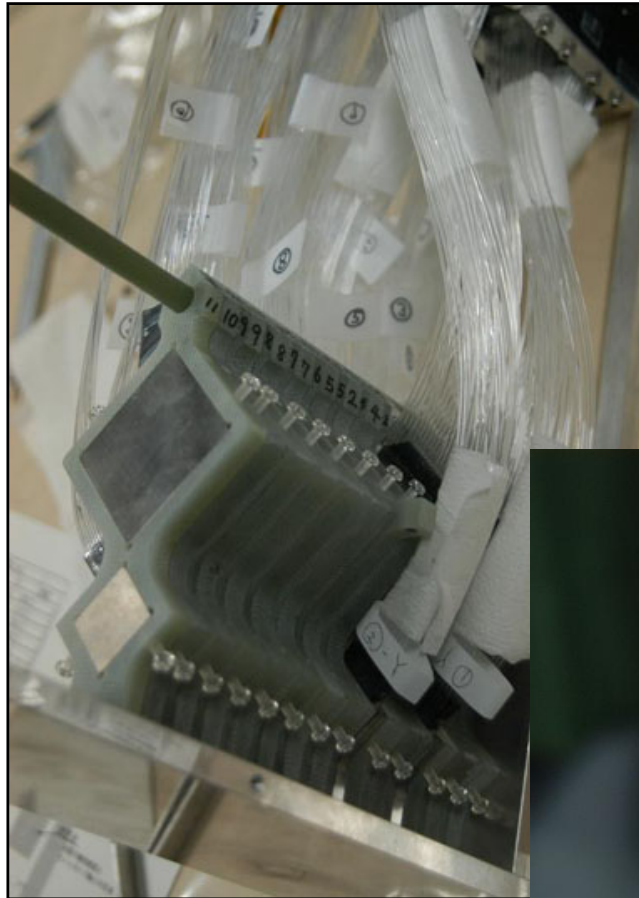


LHCfカロリメータ構造



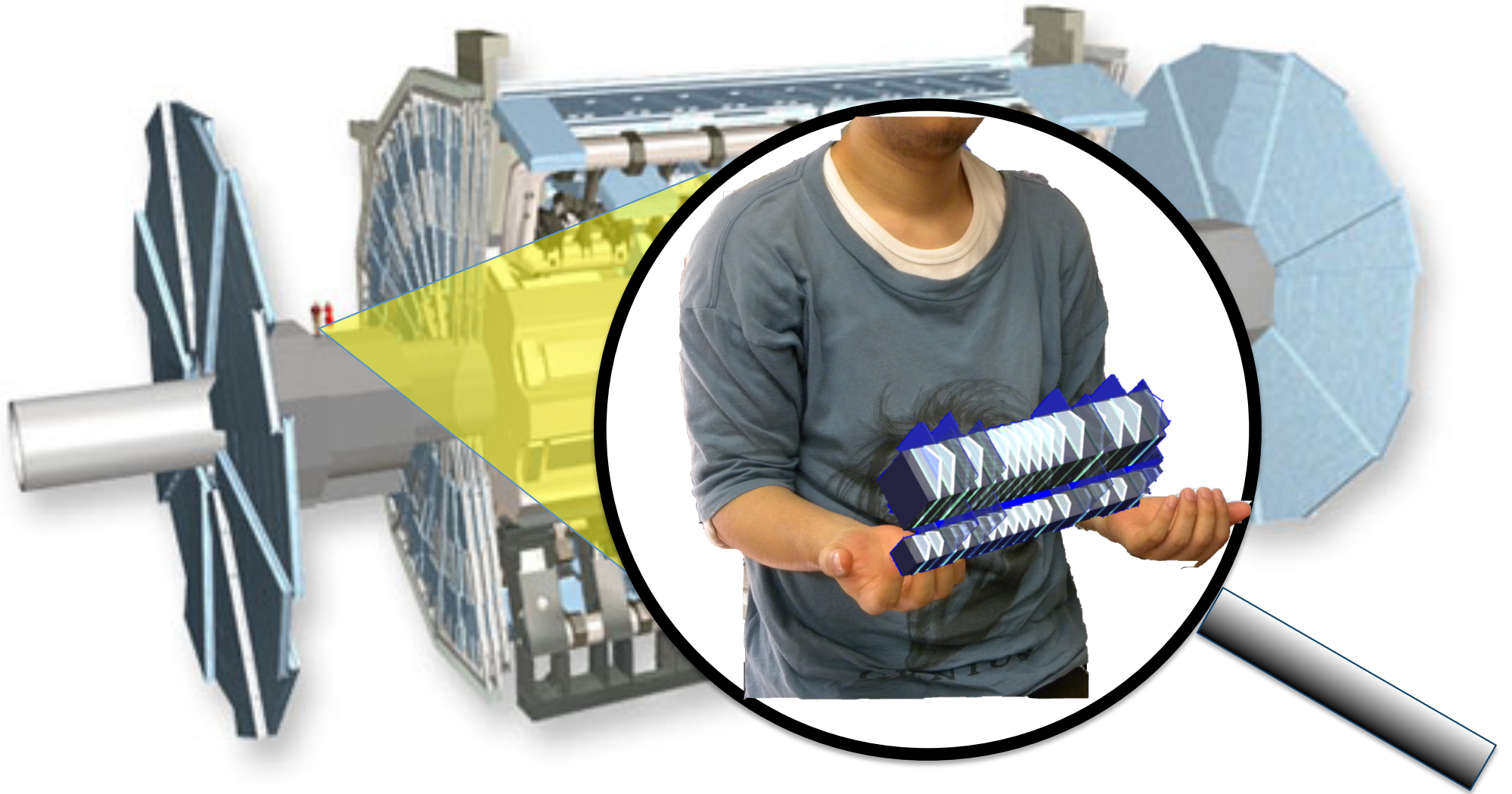
- 全発光量からエネルギーを、形状から粒子を判定
- <7TeVの入射粒子に対して、(特に電磁)シャワーは理解されている

LHCf装置の組み立て@名大





ATLAS & LHCf



Cherenkov Telescope Array 計画

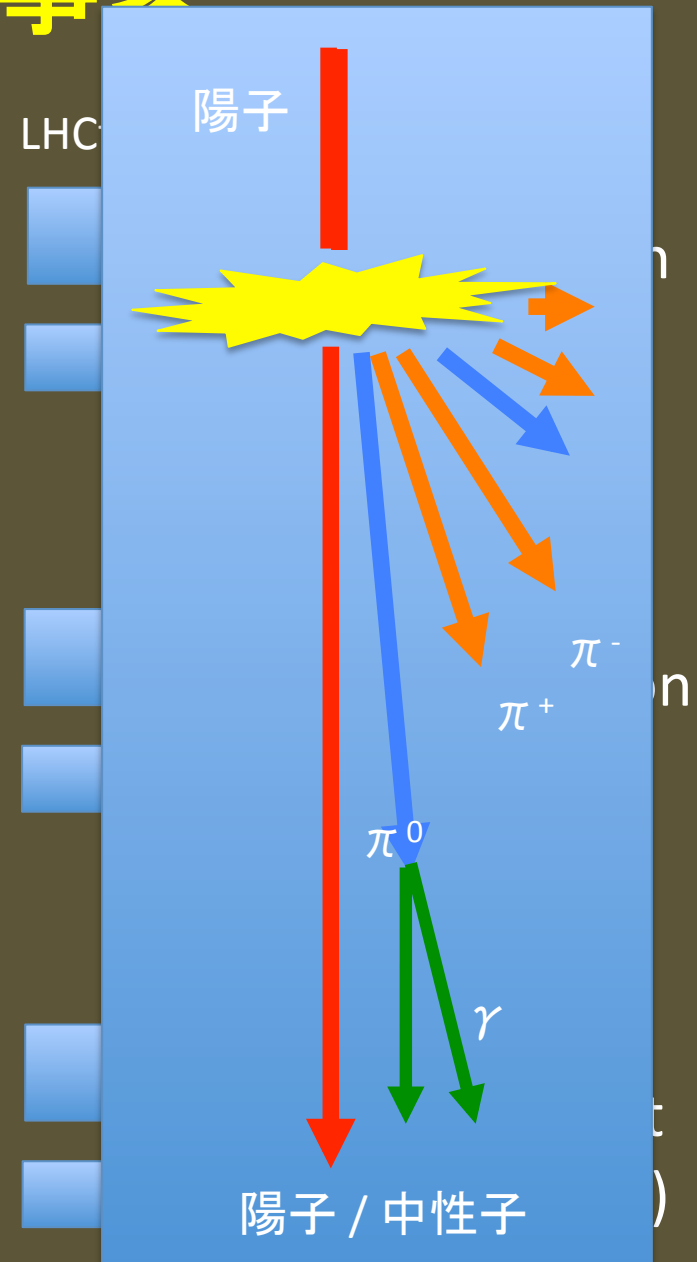
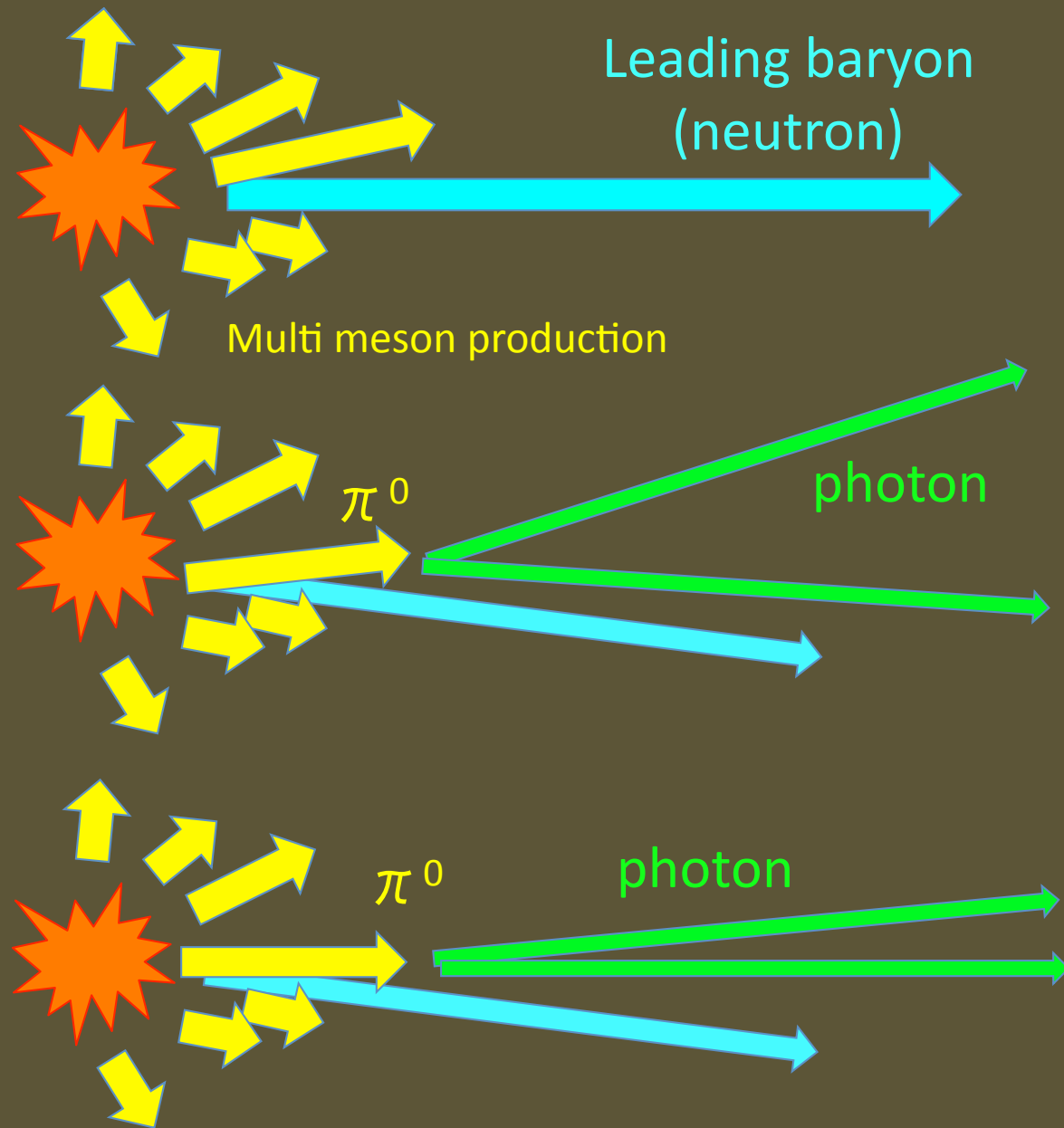
CTA-Japan コンソーシアム
2010年8月30日



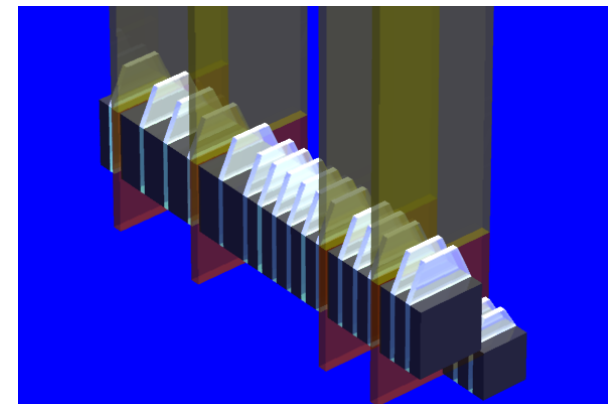
LHCfのあゆみ

- 2004年にCERNに提案
- 2006年に承認
- 2008年9月 LHCの最初のビームによるBGを測定したが、LHCの故障で延期
- 2009年11月 LHC初の陽子衝突：900GeVでのデータ取得
- 2010年3月 LHC 7TeV陽子衝突に成功
- 2010年7月 LHCf第一期測定終了

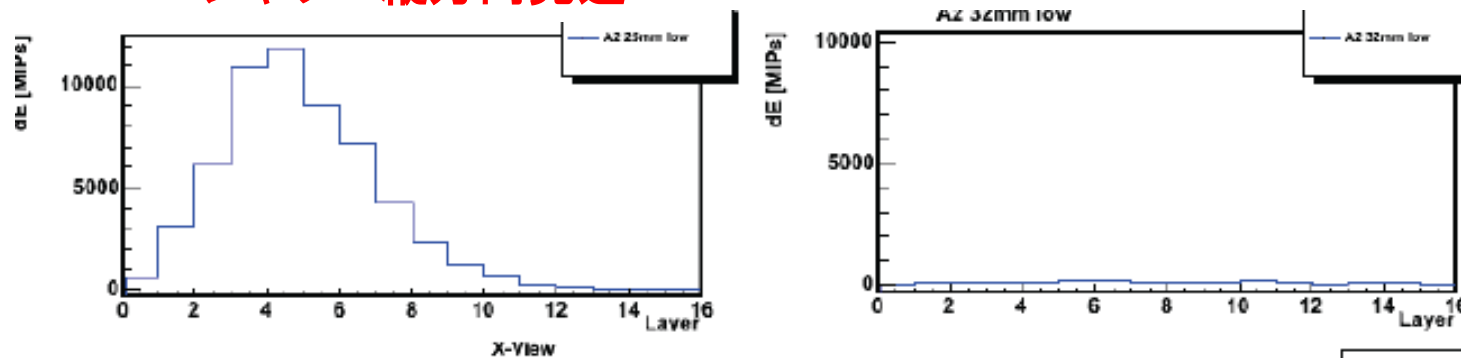
LHCfで観測される事象



LHCf観測イベント例

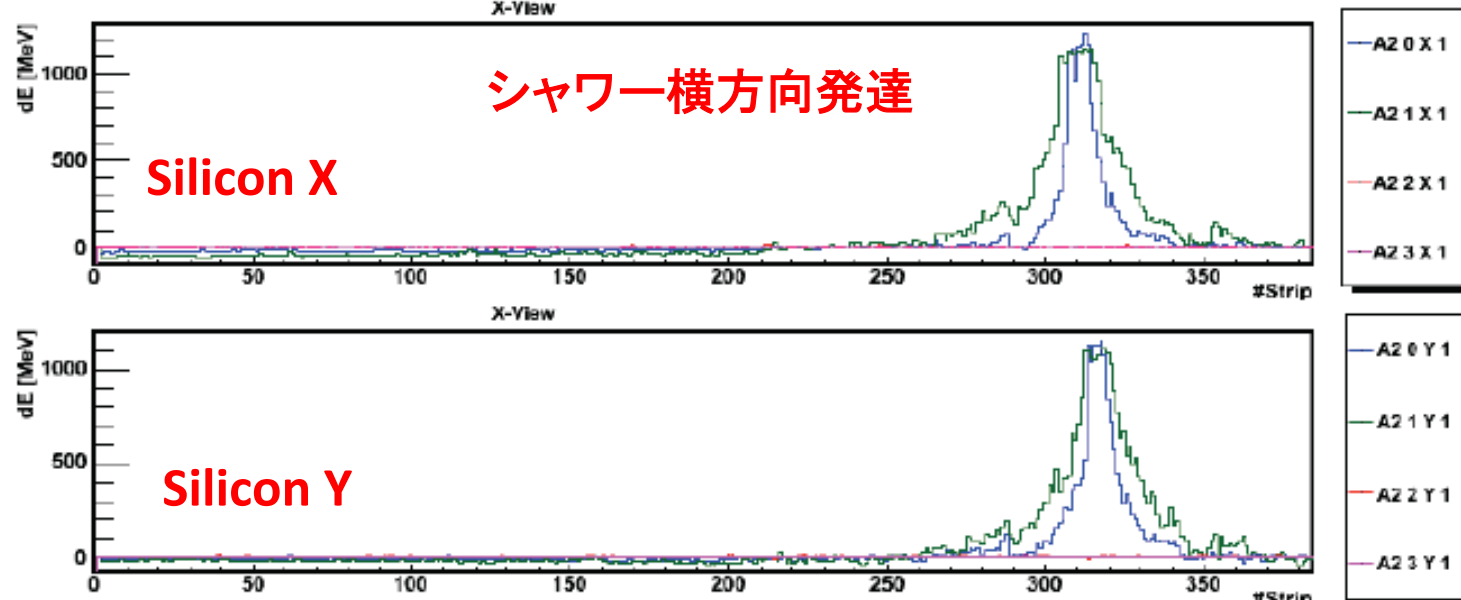


シャワー縦方向発達



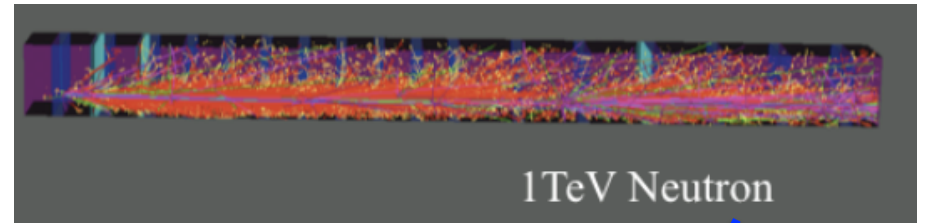
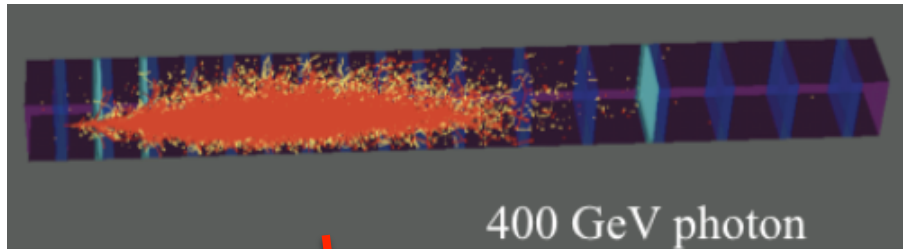
エネルギー・
粒子種決定

シャワー横方向発達

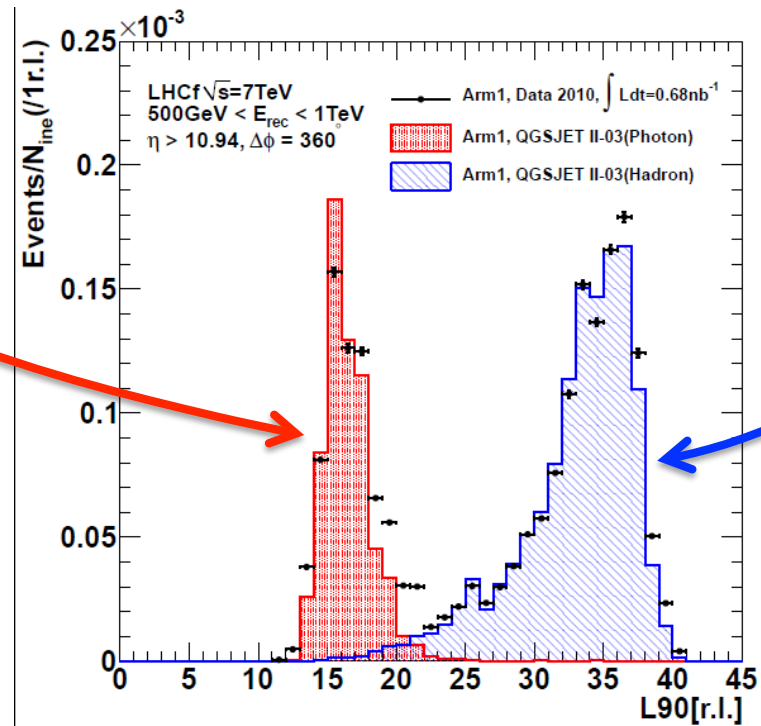


入射位置・
入射粒子数決定

入射粒子種の判定



ガンマ線イベント

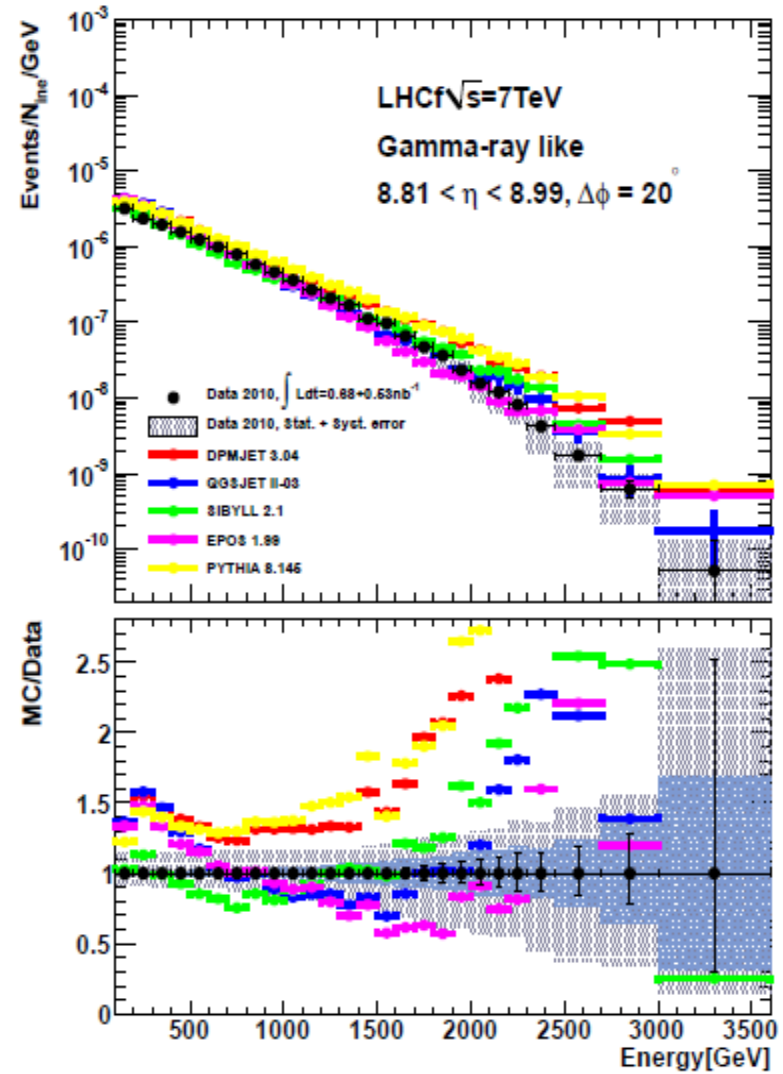
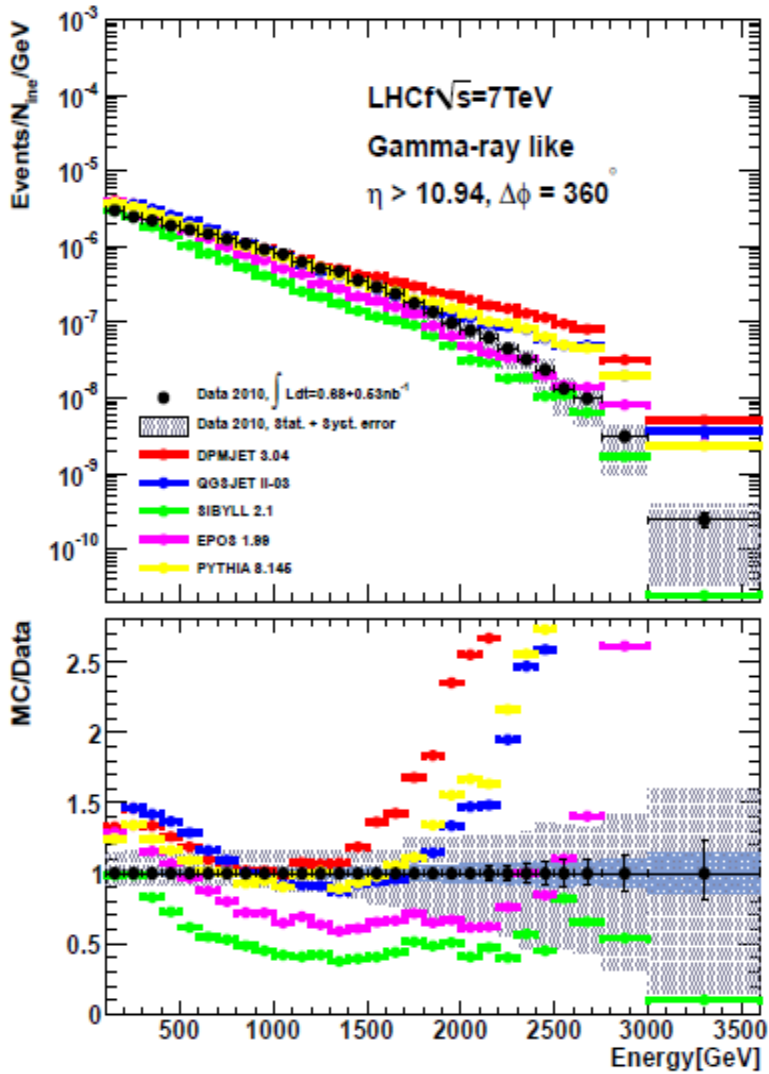


中性子イベント

シャワー発達深さパラメータ

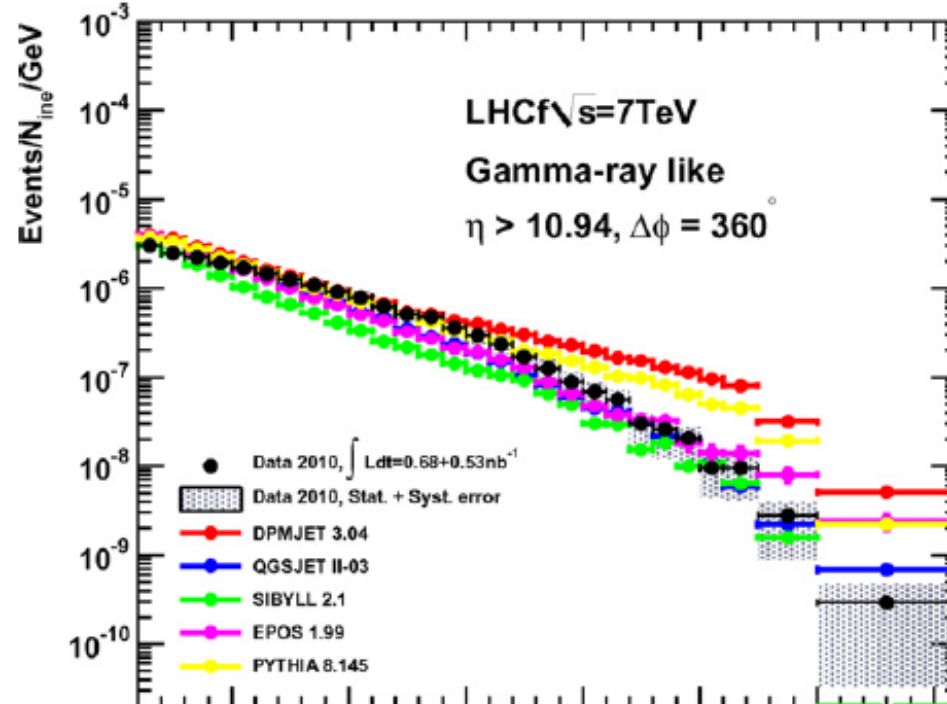
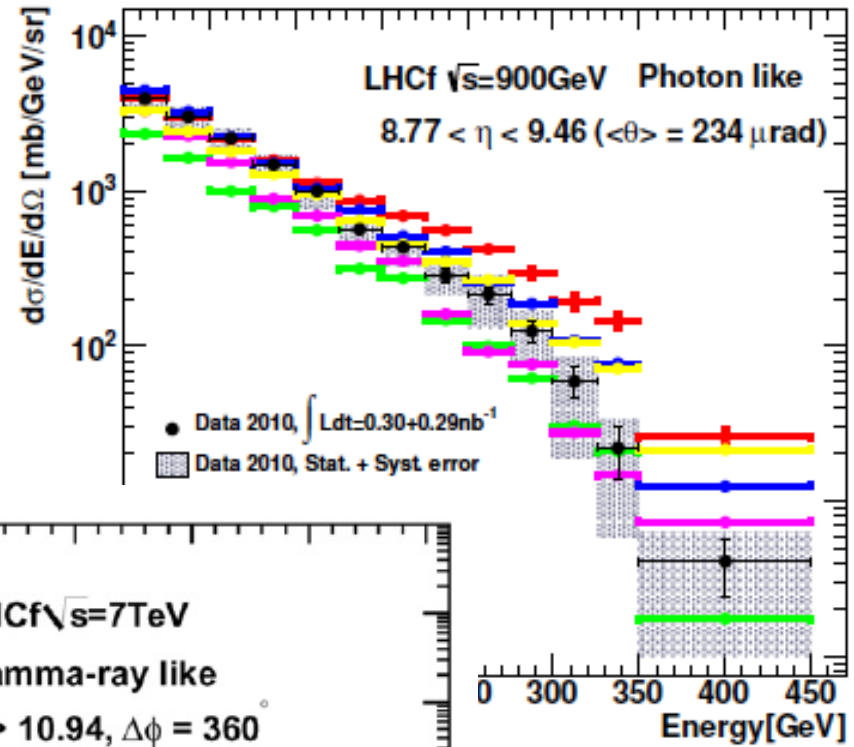
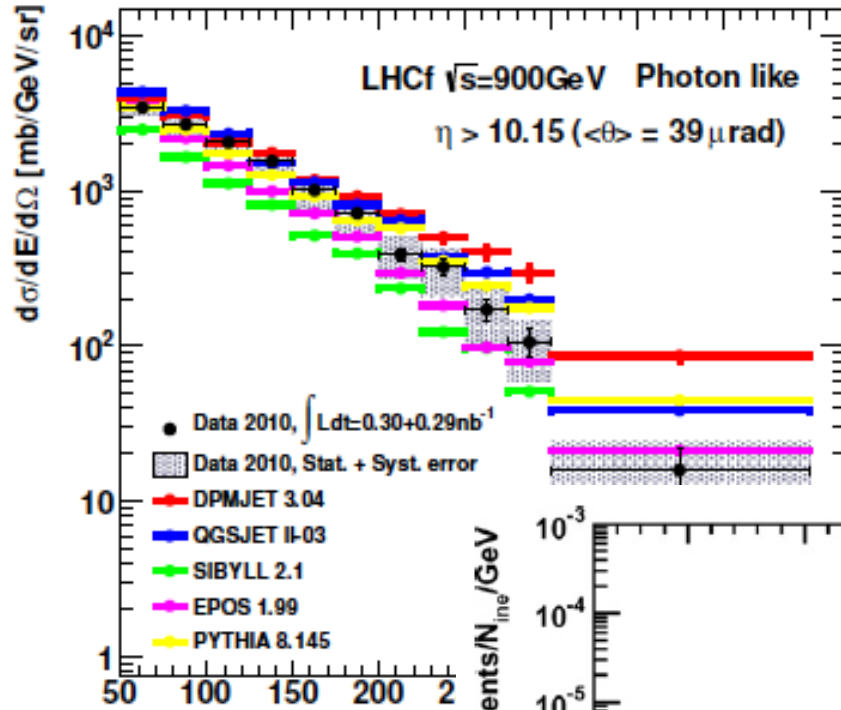
7TeV衝突、光子スペクトル 実験 VS. モデル

Adriani et al., PLB, 2011

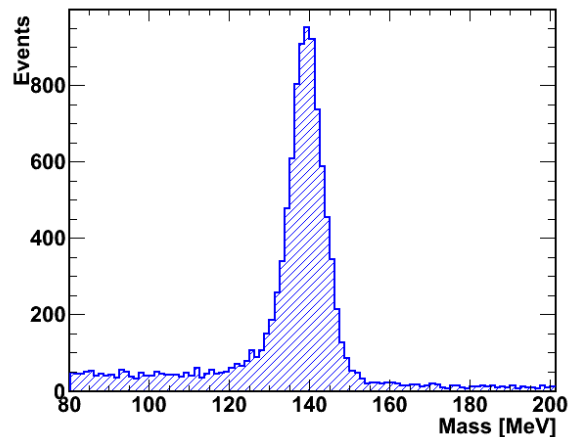
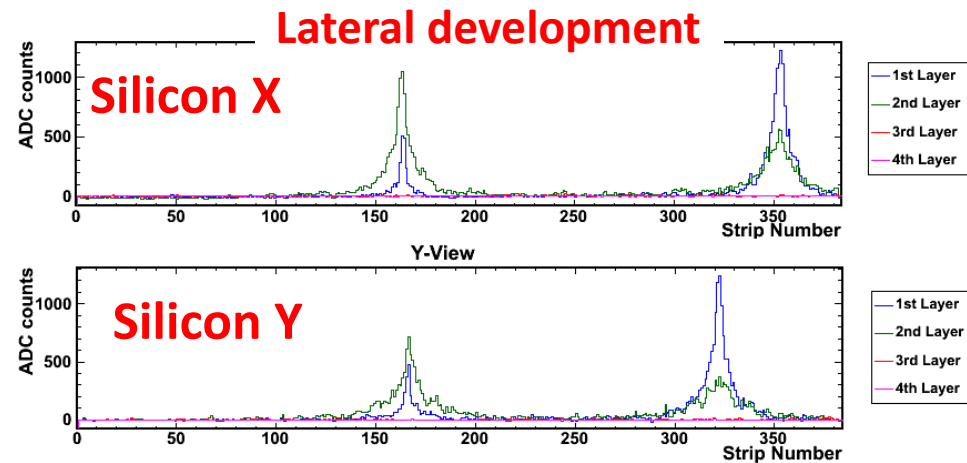
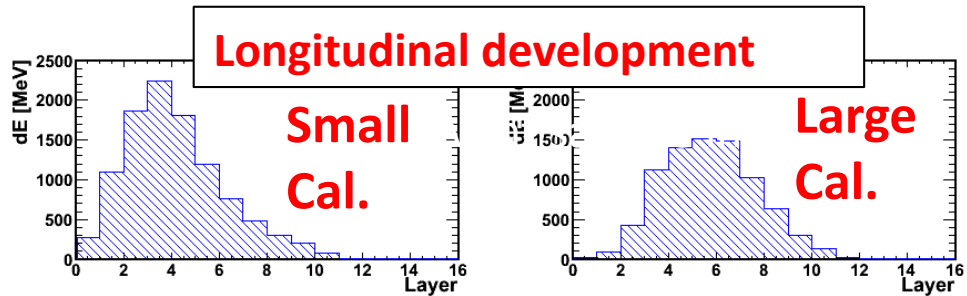


DPMJET 3.04 QGSJET II-03 SIBYLL 2.1 EPOS 1.99 PYTHIA 8.146

900GeV衝突の結果

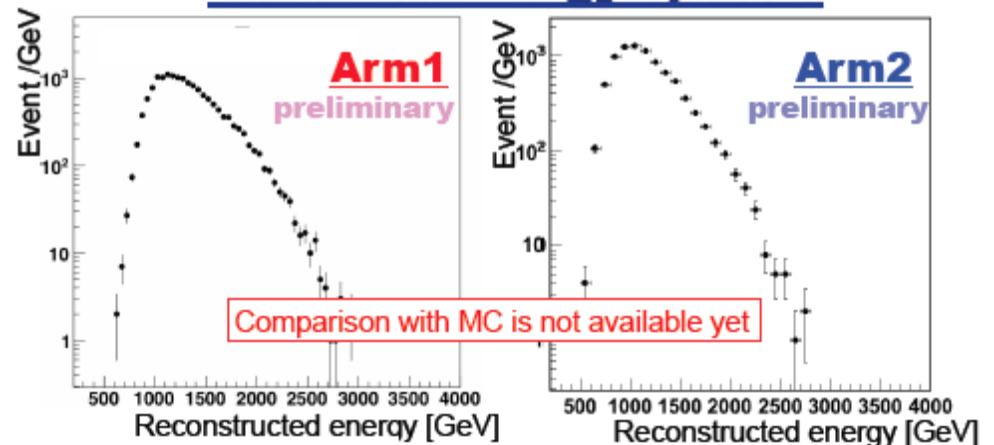
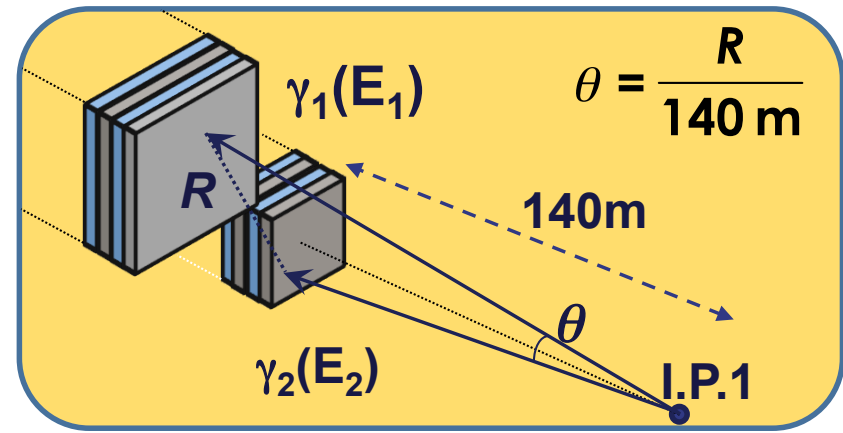


中性パイ中間子 (π^0) の解析

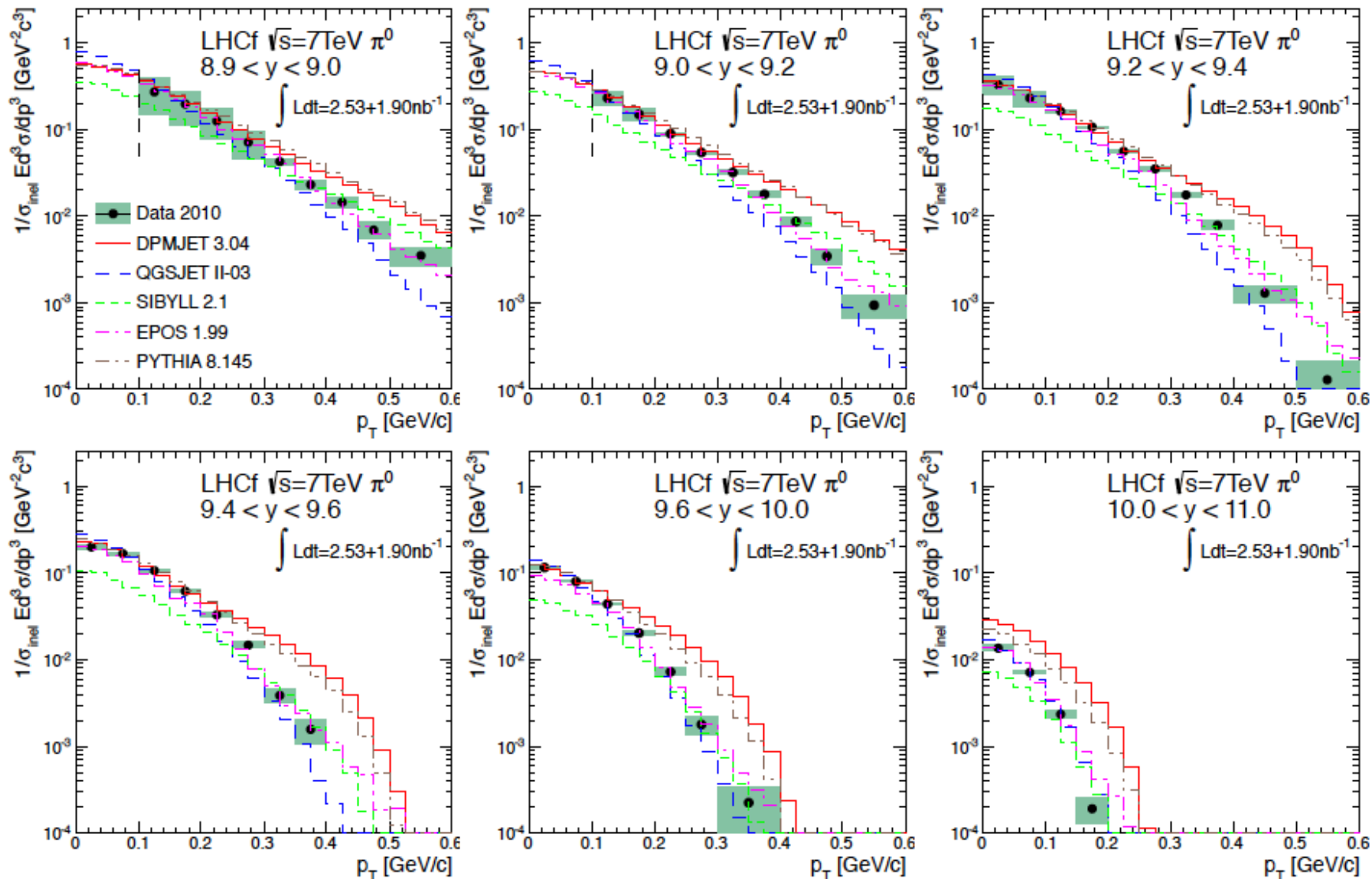


光子対不変質量分布

- π^0 候補イベント
- 599GeV & 419GeV photons in 25mm and 32mm tower, respectively
- $M = \theta\sqrt{E_1 \times E_2}$



π^0 P_T 分布 (η 別)



非弾性 ハドロン衝突

陽子

なんでモデルが複数あるか？
何が理論でわからないのか？

1. 非弾性衝突断面積
(平均衝突距離)

2. 粒子生成

Leading baryons

弾性度 (E_{baryon}/E_0)
Baryonスペクトル

3. 原子核効果

中間子多重発生

非弾性度 ($E_{\text{meson}}/E_0 = 1 - \text{弾性度}$)
粒子多重度 (multiplicity)
Mesonスペクトル

陽子 / 中性子

非弾性 ハドロン衝突

陽子

LHCで何が測られたか？

1. 非弾性衝突断面積
(平均衝突距離)

2. 粒子生成

Leading baryons

弾性度 (E_{baryon}/E_0)
Baryonスペクトル

3. 原子核効果

陽子 / 中性子

中間子多重発生

非弾性度 ($E_{\text{meson}}/E_0 = 1 - \text{弾性度}$)
粒子多重度 (multiplicity)
Mesonスペクトル



非弾性 ハドロン衝突

陽子

LHCで何が測られたか？

1. 非弾性衝突断面積
(平均衝突距離)

2. 粒子生成

Leading baryons

弾性度 (E_{baryon}/E_0)
Baryonスペクトル

3. 原子核効果

中間子多重発生

非弾性度 ($E_{\text{meson}}/E_0 = 1 - \text{弾性度}$)
粒子多重度 (multiplicity)
Mesonスペクトル

陽子 / 中性子 LHCfで現在解析中

LHCで終わり？

LHCが 2015年に 14TeV ($E_{\text{lab}}=1 \times 10^{17}$ eV)を達成したらそれ以上はないのでは？

LHCで終わり？

- エネルギー的にはYES
- 原子核衝突(特に前方測定)は未開拓
 - LHC p-Pb衝突 (2013年2月)
 - RHIC p-N衝突 (2016-)
 - LHC p-N, N-N衝突 (2023-)
- 宇宙線観測も 10^{17} eVを重視
 - 10^{17} eVはこれまで観測の「穴」
 - 10^{17} eVは銀河系内から銀河系外への遷移点
 - 10^{15} eV領域からの連続性
 - 10^{19} eV領域からの連続性



まとめ

- 最高エネルギー宇宙線の観測はこの10年で飛躍的に進歩した
 - => これから停滞を迎える？
- LHCは、エネルギーが高いだけではない。これまでの加速器よりも質の高いデータを供給している。
 - => 既存の宇宙線データの解釈の質を向上できる
- 将来
 - “ 10^{17} eV”の重要性：宇宙線とLHCのオーバーラップ。銀河内、銀河系外宇宙線の交差点。
 - 衝突型加速器を宇宙線・宇宙物理に応用する。窒素衝突。
 - 「地球」カロリーメータを完全理解した上で、本当の宇宙線天文学を確立

だから「急がば回れ」