

2013年9月4日
高エネルギーガンマ線でみる
極限宇宙²⁰¹³

ECCによる高エネルギー宇宙線 電子スペクトル



吉田健二
芝浦工業大学

はじめに

エマルションチェンバー（ECC）による気球観測：

- + 高エネルギー宇宙線電子の観測を目的
 - + 宇宙線加速機構の解明、近傍の宇宙線加速源の同定
 - + 14回の気球フライト(1968-2001)、 $S\Omega_e T=8.19\text{m}^2\text{sraday}$
=> 高エネルギー宇宙線電子スペクトル
- + By-product
 - + 大気ガンマ線エネルギースペクトル
=> 宇宙線陽子エネルギースペクトルの導出
 - + LPM効果の検証

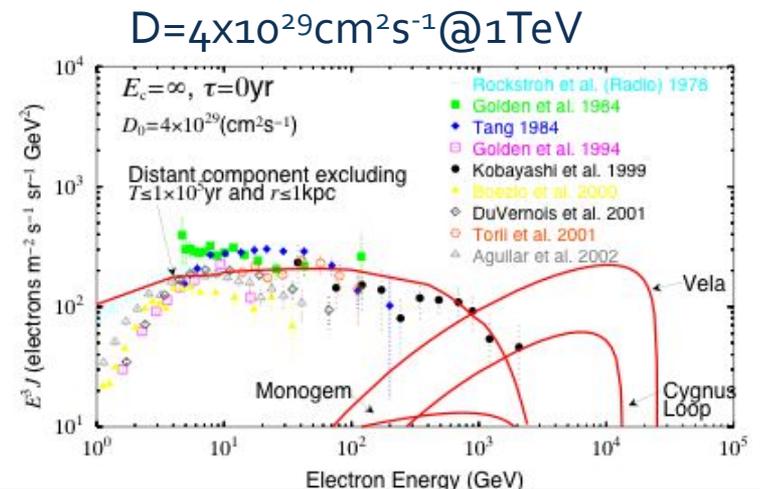
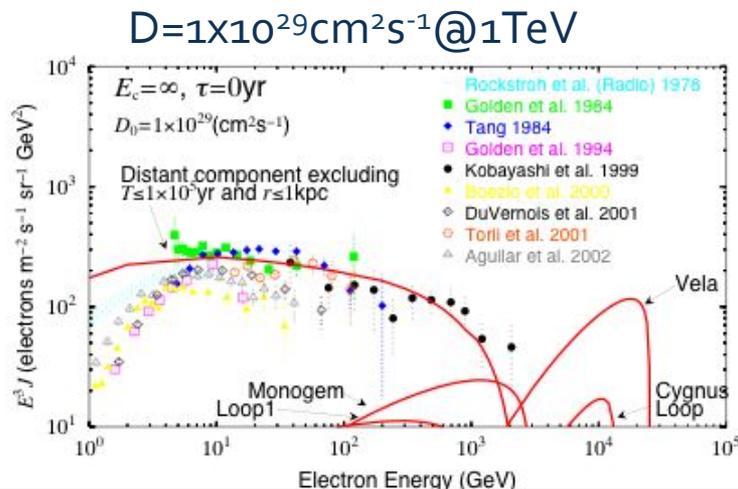
高エネルギー宇宙線電子の特徴

- + 宇宙線中の高エネルギー電子
 - + 低質量で、核相互作用なし
 - + 銀河系内伝播中のエネルギー損失：
 - + シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱過程
$$dE/dt = -bE^2$$
 - + 銀河系内の電子の伝播：
 - + 原子核成分に比べて取り扱いやすい伝播過程
- + 高エネルギー宇宙線電子観測
 - => 宇宙線の起源、加速、伝播機構の解明へ

数100GeV-数TeV領域の電子観測

- + 近傍の加速源の同定
- + WIMP暗黒物質起源の電子+陽電子シグナルの検出

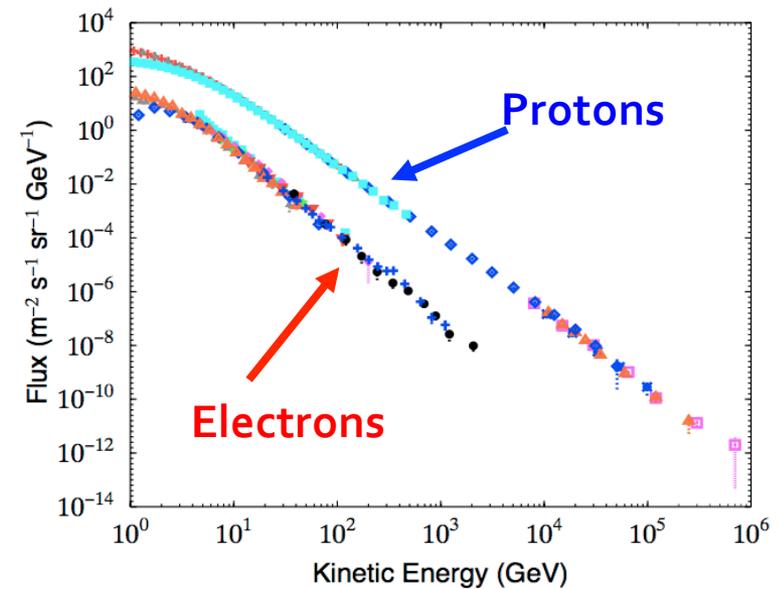
SNRsモデルによる宇宙線電子スペクトルの計算例 Kobayashi et al. 2004



=> ECCによる高エネルギー電子観測

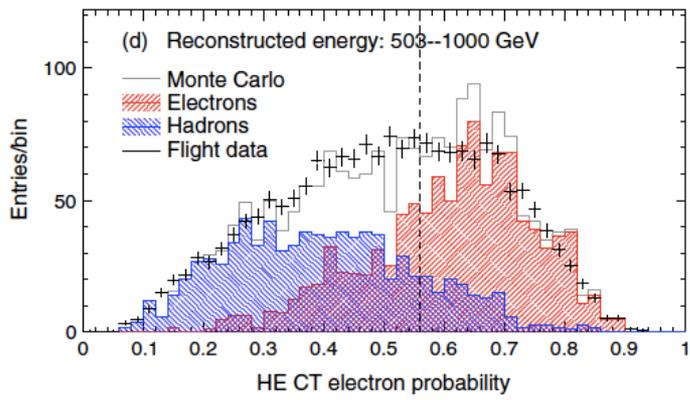
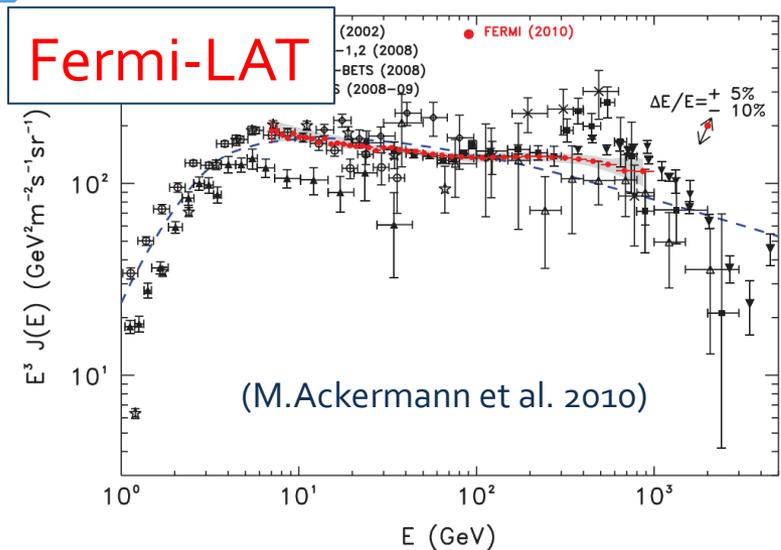
高エネルギー電子観測

- + 電子フラックス：陽子の~1%
@10GeV
- + 電子スペクトル：陽子より急なべき
 - + Index: ~-3.0 for e, -2.7 for p
- + 高エネルギーの電子観測
 - + 電子フラックスの急激な減少 (べき ~-3.0)
 - + 陽子バックグラウンドの増加
- + 観測装置に要求される性能
 - + 大きな幾何学的因子 ($S\Omega$)
 - + 長時間の観測
 - + 高い陽子バックグラウンド除去能力

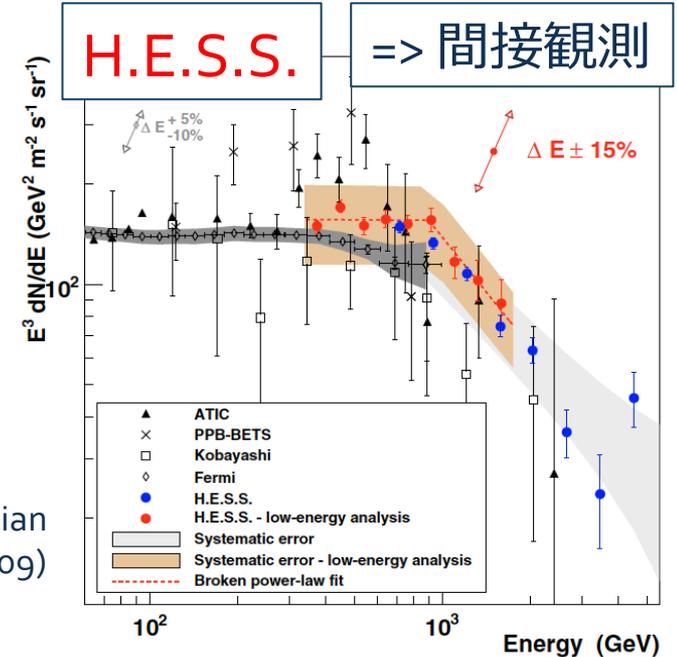
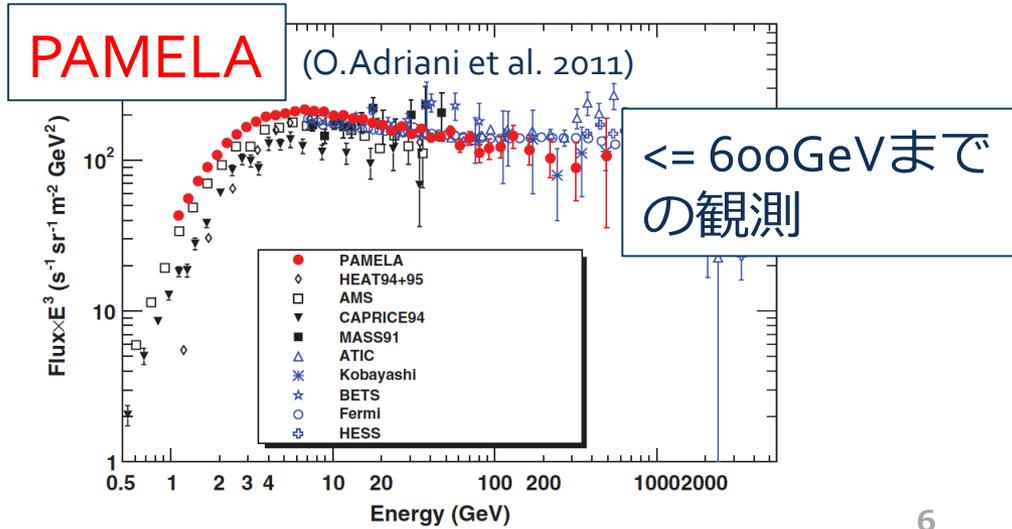


宇宙線電子と陽子のエネルギースペクトルの比較

最近の電子スペクトル観測結果 1



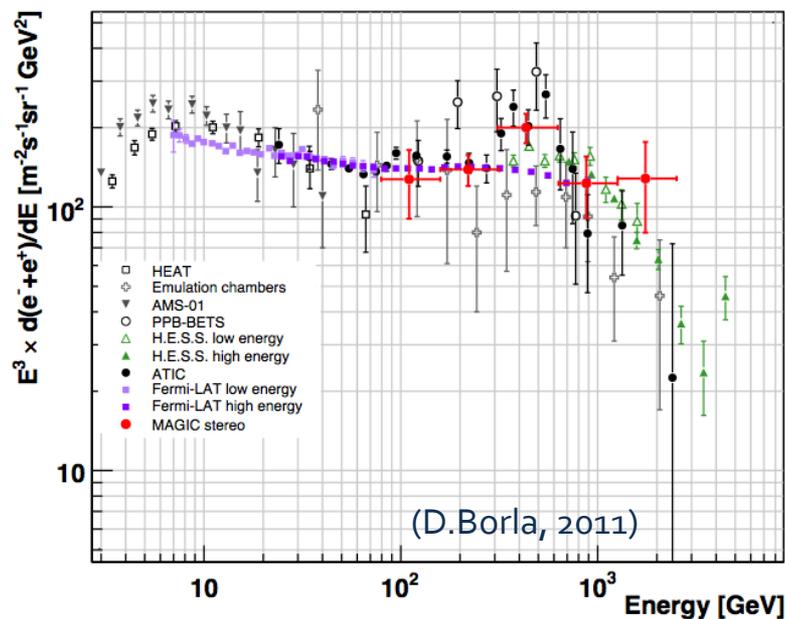
Fermi-LAT :
電子とハド
ロンの識別



最近の電子スペクトル観測結果 2

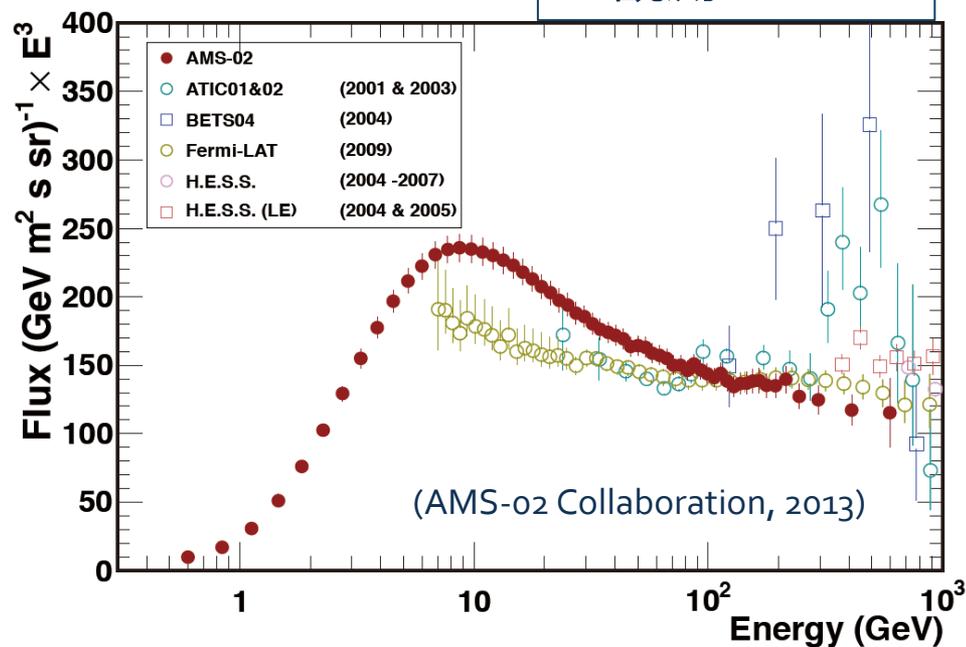
MAGIC

=> 間接観測



AMS-02

<= 600GeVまでの観測

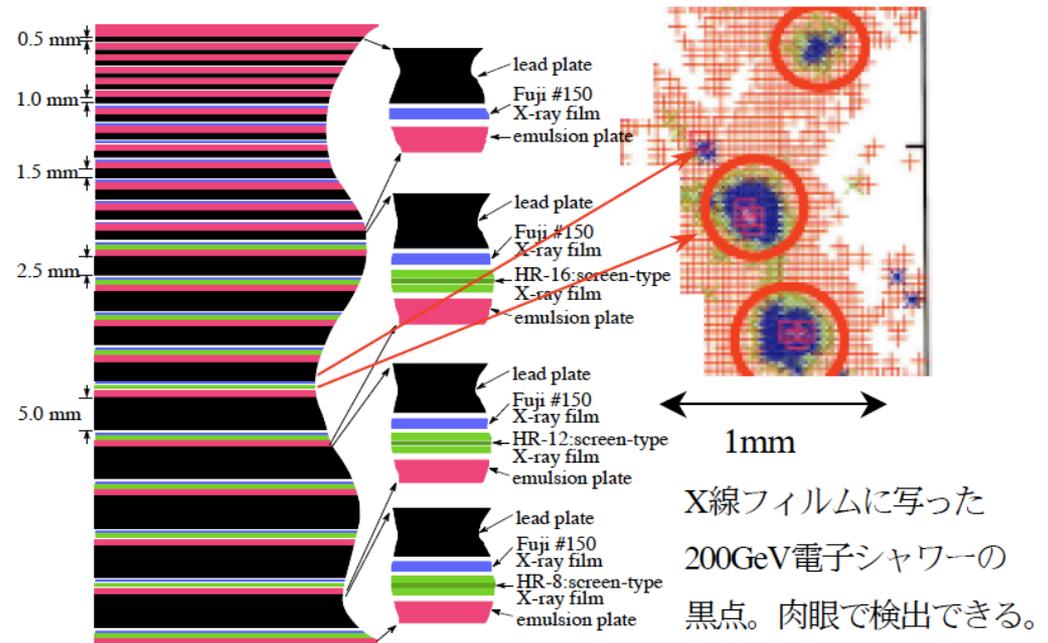


気球観測用エマルジョンチェンバー(ECC)

ECC:原子核乾板、鉛板、
X線フィルムの積層構造

- 典型的サイズ：
40cm×50cm
- 厚さ：8cm (gr.l.)
- 重量：約120kg

“サンプリング・イメージ
ングカロリメータ”



ECC検出器断面図

粒子飛跡の位置決定精度：1 μ m

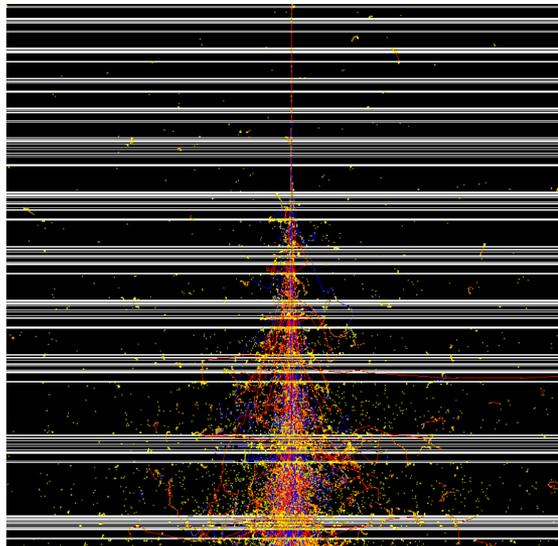
=> 高い粒子識別能力($e/p=10^5$)

=> 薄い検出器、大きな $S\Omega_e=0.39\text{m}^2\text{sr}$ で数TeVまで観測

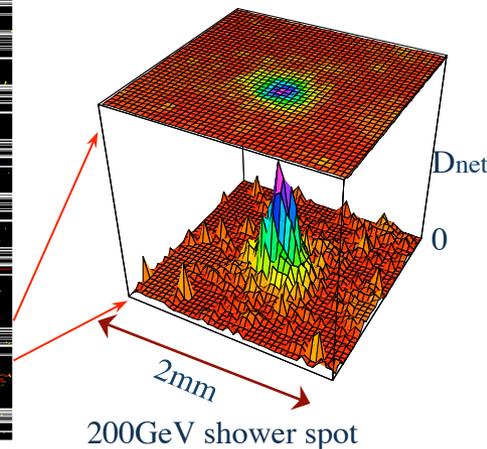
X線フィルムによる電子シャワー検出

X線フィルム上でのシャワースポット

=> 対応する場所の原子核乾板の解析



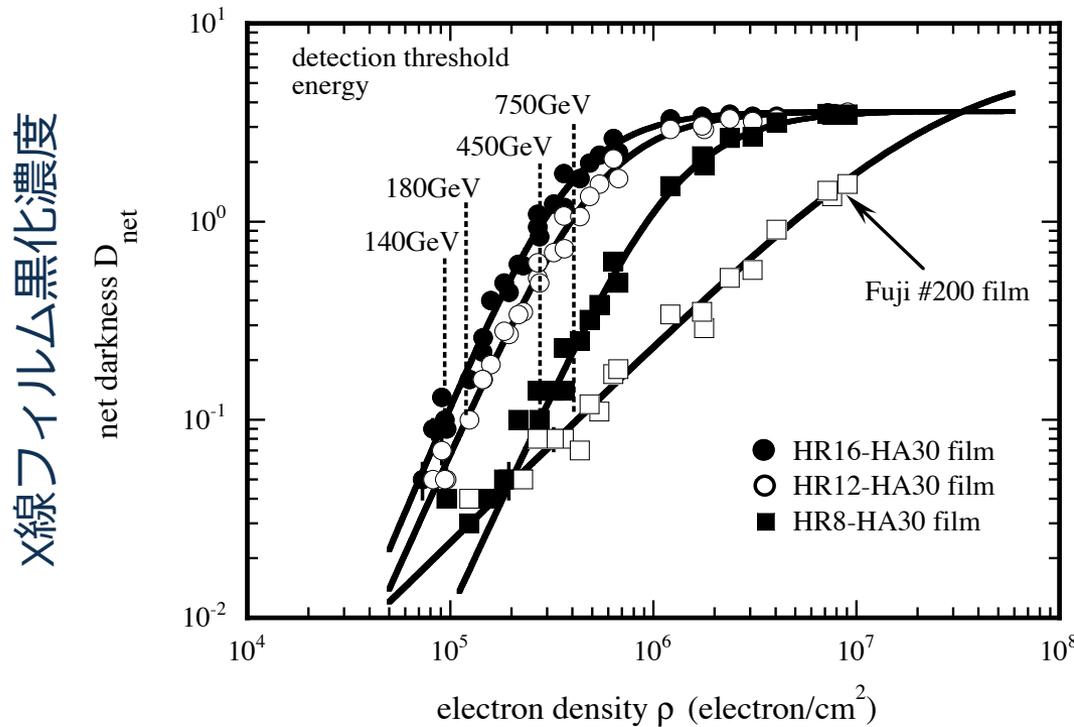
ECC構造の断面図
(ECCに電子が入射した場合
のシミュレーション)



CERN-SPS電子200GeV
ビーム照射：
X線フィルム上での黒化
スポット例

X線フィルムによる検出下限エネルギー

LNS Tohoku-u : 200MeV electron beam



東北大LNS 200MeV電子
ビーム照射：
X線フィルム特性曲線

原子核乾板での電子トラック数密度

=> Shower maximumの対応する入射電子エネルギー

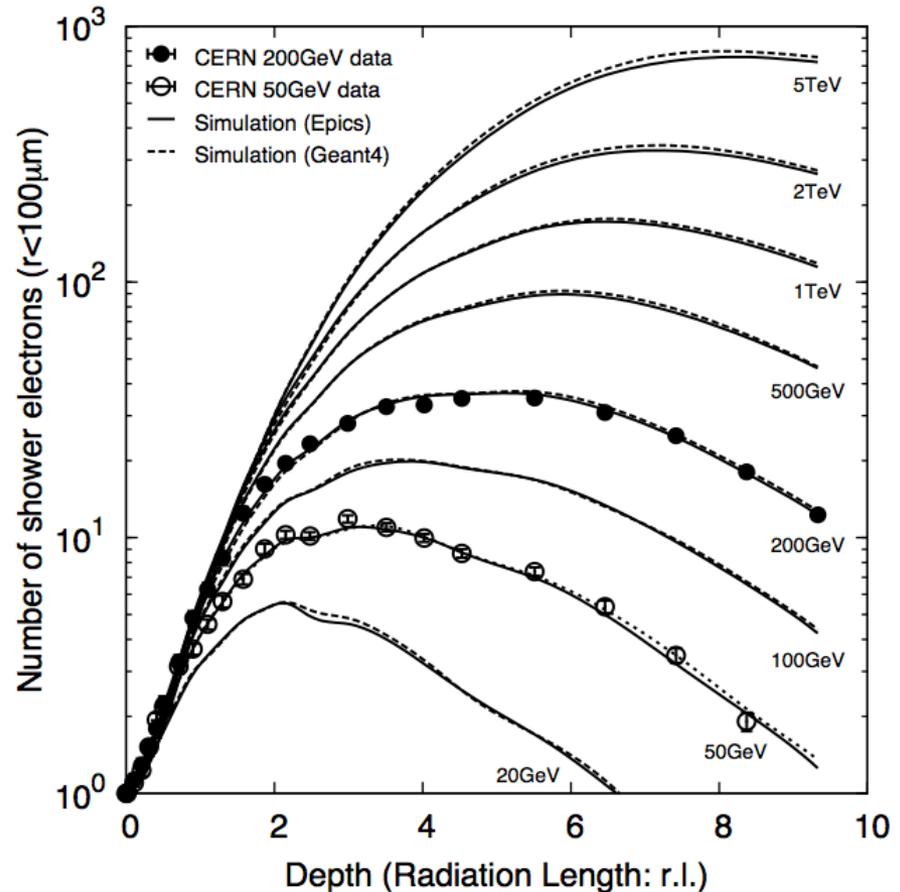
=> 検出下限エネルギーの決定

宇宙線電子のエネルギー決定

1 μm の位置分解能
=> シャワー軸から半径100 μm
以内の電子トラックを各層毎
にカウント
=> 電子の遷移曲線

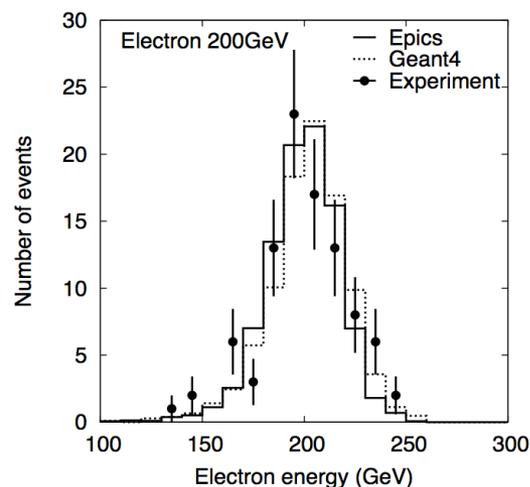
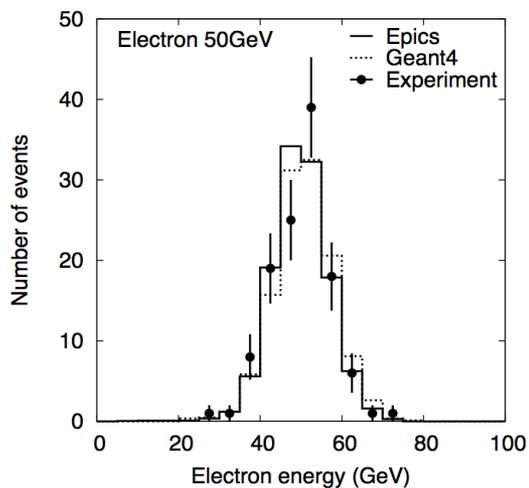
電子シャワー最大値が1TeV電
子でも6r.l.程度

=> gr.l.の厚さで、TeV領域の
電子エネルギーの決定が可能

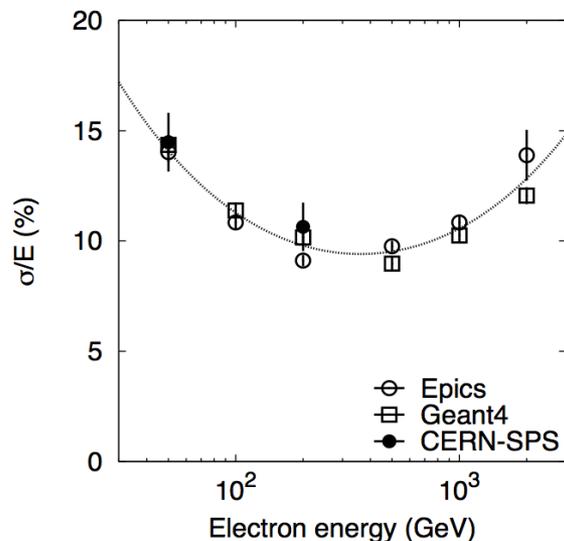


CERN-SPSでの電子ビーム照射実験の
結果とMCシミュレーションの比較

エネルギー分解能



CERN-SPSでの電子
ビーム照射実験とMC
シミュレーション結
果の比較



エネルギー分解能：
10～15%

電子選別の基準

- + Single track exists at the top emulsion plate
- + produce a e^+e^- pair at the starting point
 - + within 1 r.l. : 90 % probability
 - + double pairs : 5 % probability above 1 TeV
- + A pure electromagnetic shower
 - + not single or multi core structure
 - + the number simply increase to max

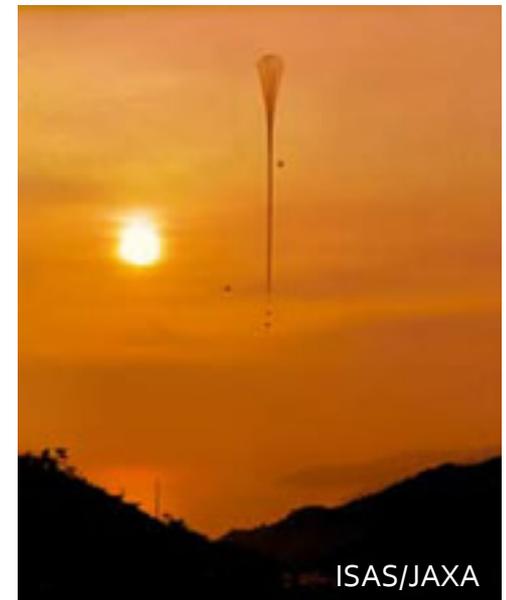
=> 陽子除去能力 $> 1 \times 10^5$

エマルションチェンバーによる気球観測

+ 14回の気球フライト(1968-2001)、 $S\Omega_e T = 8.19 \text{ m}^2 \text{ sr day}$

Flight	Area (m^2)	Time (min)	Average Altitude (g cm^{-2})	$S\Omega_e T$ * ($\text{m}^2 \text{ sr s}$)	Launch Site
1968	0.05	380	6.1	1.826×10^3	Harunomachi, Japan
1969	0.05	267	7.1	1.283×10^3	Harunomachi, Japan
1970	0.05	1136	6.1	5.460×10^3	Sanriku, Japan
1973	0.20	833	8.2	1.934×10^4	Sanriku, Japan
1976	0.40	1526	4.0	7.084×10^4	Palestine, USA
1977	0.78	1760	4.5	1.2772×10^5	Palestine, USA
1979	0.80	1680	4.9	1.5389×10^5	Palestine, USA
1980	0.80	2029	7.8	1.8838×10^5	Palestine, USA
1984	0.20	576	9.2	5.330×10^3	Sanriku, Japan
1985	0.40	940	9.4	9.930×10^3	Sanriku, Japan
1988	0.20	647	7.1	2.948×10^3	Uchinoura, Japan
1996	0.20	2092	4.6	4.874×10^4	Sanriku, Japan
1998	0.20	1178	5.6	2.729×10^4	Sanriku, Japan
1999	0.20	891	5.6	2.005×10^4	Sanriku, Japan
2001	0.20	1108	5.5	2.494×10^4	Sanriku, Japan

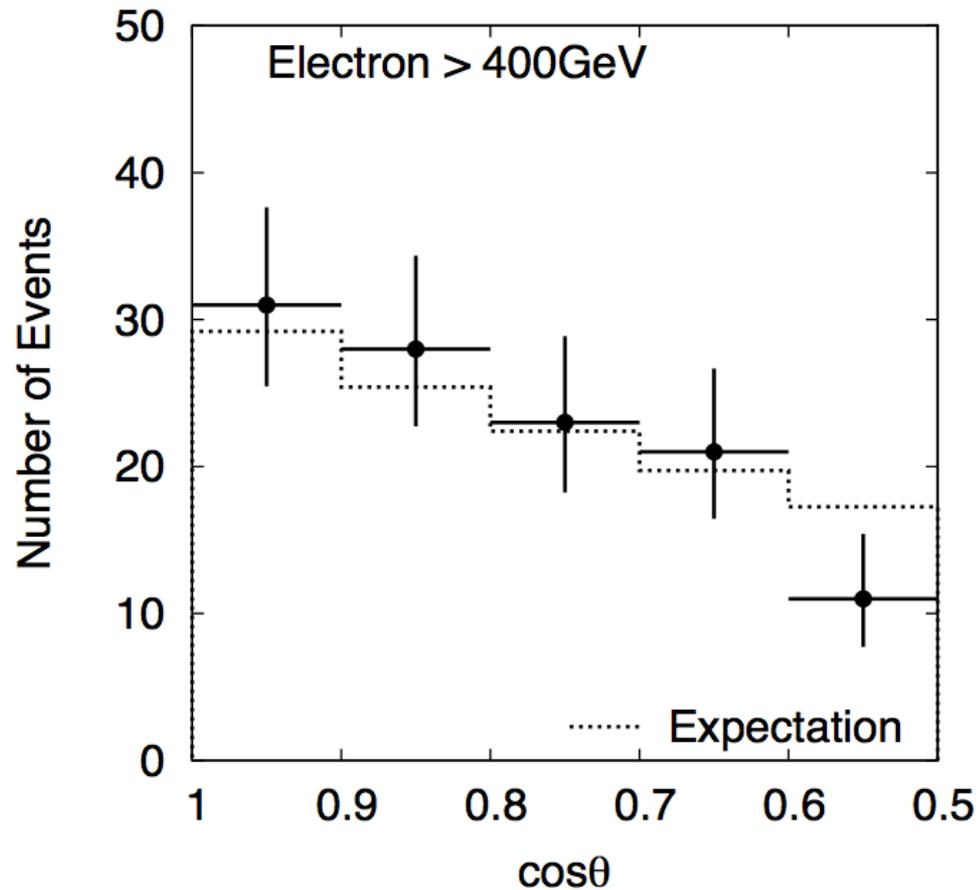
全観測時間：11.8日



IAS/JAXA

* Effective $S\Omega_e T$ for primary electron observations.

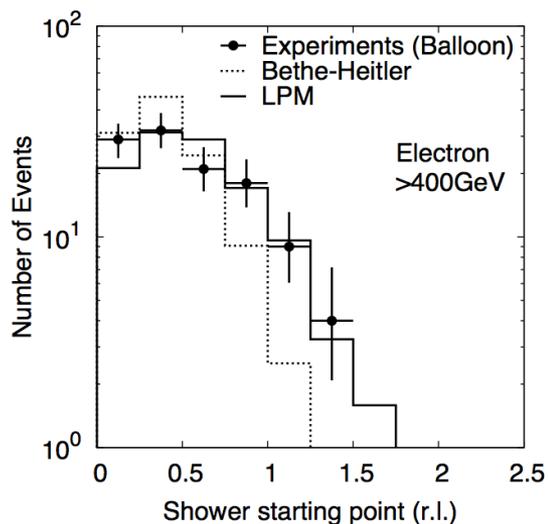
ECC気球観測の電子 ($>400\text{GeV}$) 天頂角分布



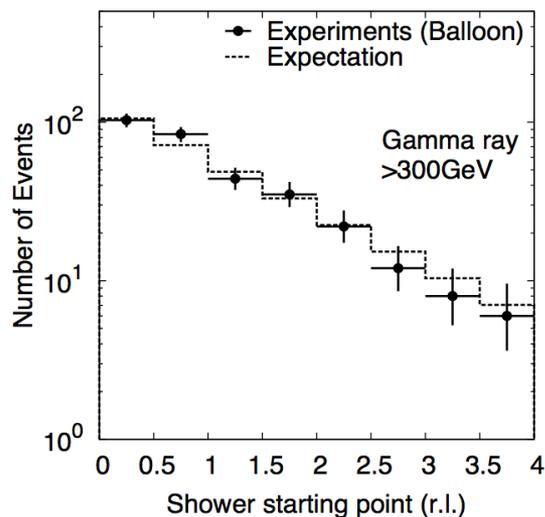
天頂角分布：期待値と一致

ECC気球観測によるシャワー発生点分布

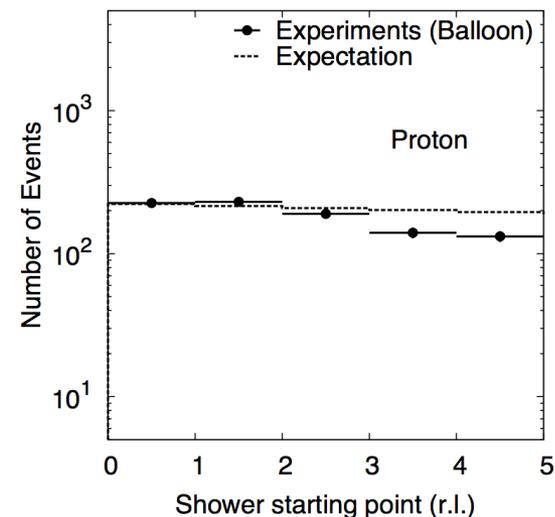
電子 $>400\text{GeV}$



ガンマ線 $>300\text{GeV}$



陽子



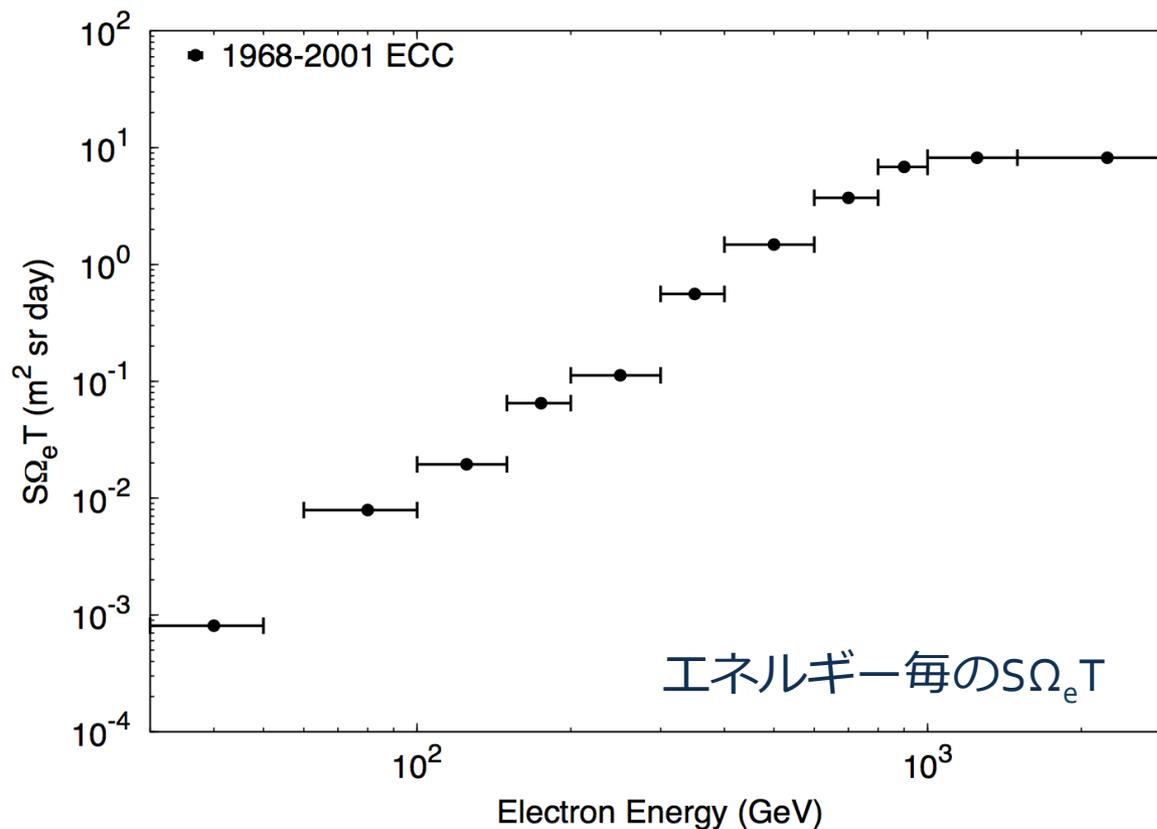
シャワー発生点分布の期待値との比較
=> 粒子識別の検証

宇宙線電子エネルギースペクトルの導出

$$J_e(E) = \frac{N_e - N_{2nd}}{S\Omega_e T \Delta E C_{eff} C_{enh}} (\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV}^{-1}).$$

- + 残留大気での制動放射によるエネルギー損失の補正
- + 大気電子バックグラウンド数： N_{2nd}
- + 電子検出効率： $C_{eff} = 1.0$
- + エネルギー分解能によるフラックス増加の補正： $C_{enh} = 1.01 \sim 1.09$

ECCの $S\Omega_e T$



エネルギーとともに $S\Omega_e T$ が増加
 $S\Omega_e T (>1\text{TeV}) = 8.19 \text{ m}^2\text{srday}$

大気電子バックグラウンドスペクトルの導出

Cascade Shower Theory

電子対生成

電子 :

$$\frac{\partial \pi(E, t)}{\partial t} = -A' \pi(E, t) + B' \gamma(E, t) + \pi_{ex}(E, t)$$

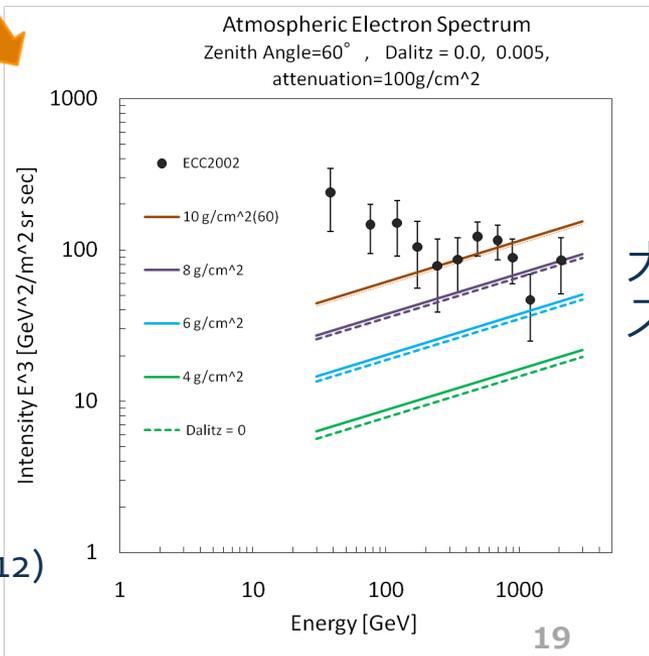
γ線 :

$$\frac{\partial \gamma(E, t)}{\partial t} = C' \pi(E, t) - \sigma_0 \gamma(E, t) + \gamma_{ex}(E, t)$$

Dalitz decay
($\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$)
による電子発生

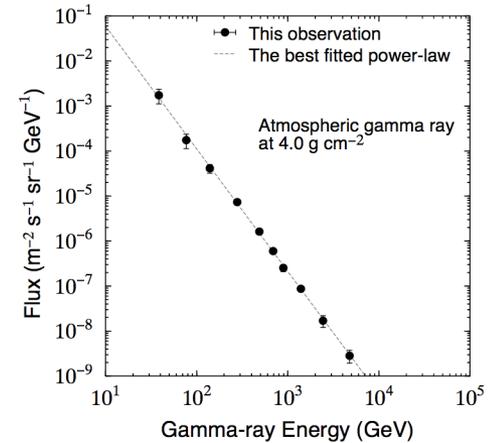
核相互作用による
大気ガンマ線発生

制動放射



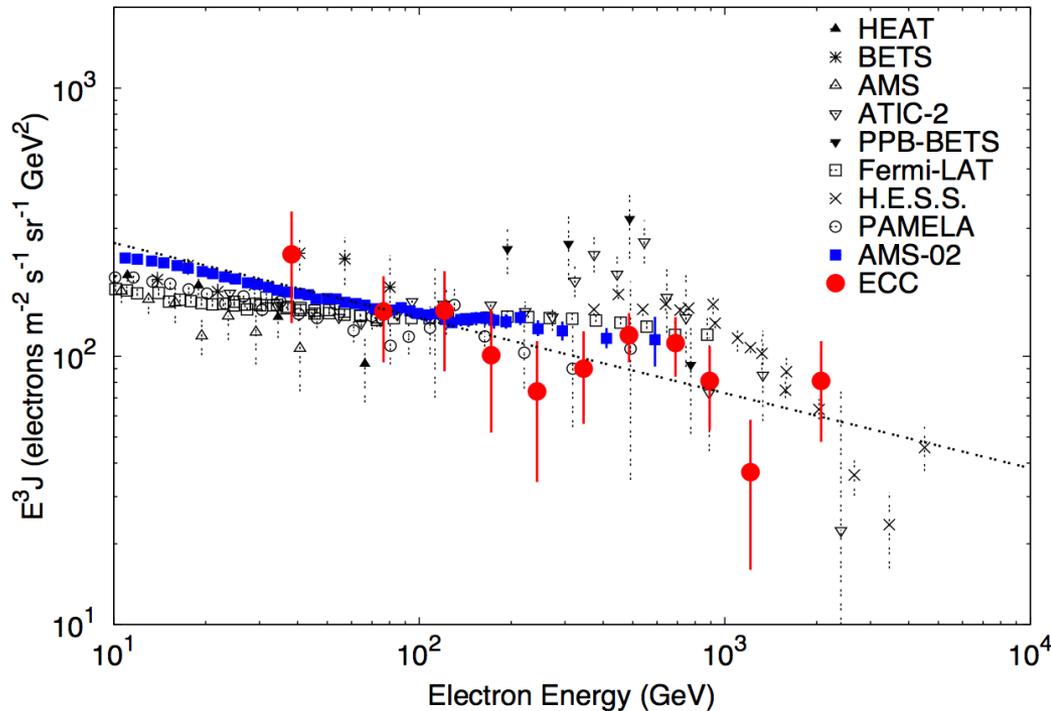
大気電子
スペクトル

ECC大気ガンマ線
スペクトル



(Y.Komori et al. 2012)

ECC気球観測による宇宙線電子エネルギー スペクトル



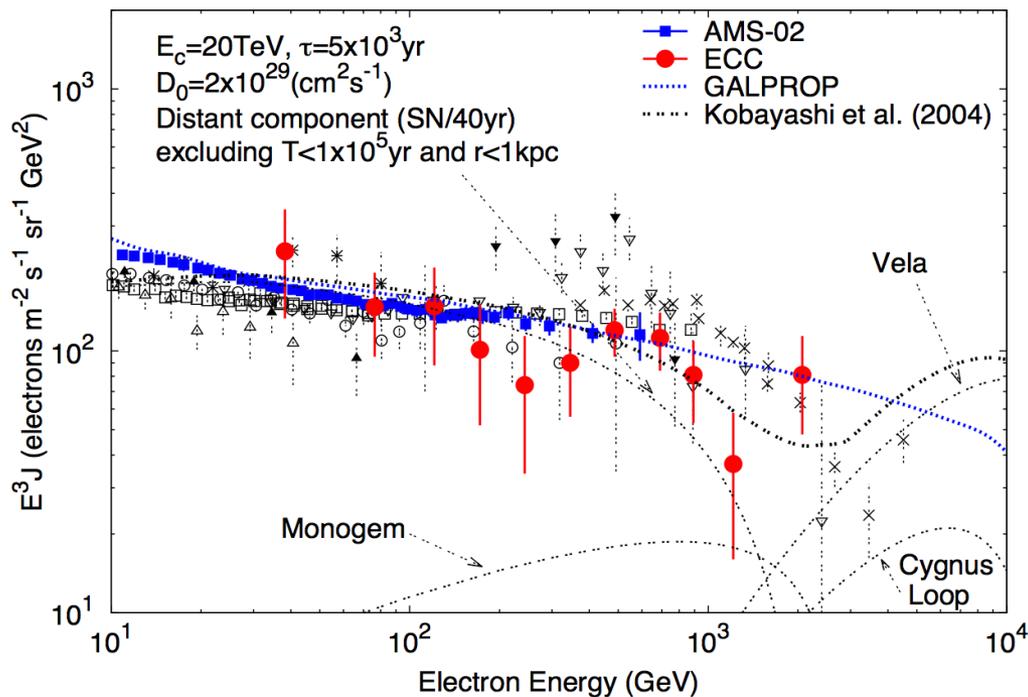
エマルションチェンバー
(ECC) 電子観測：

- 30GeV – 3TeV
- 14フライト
(1968-2001)
- $S\Omega T = 8.19m^2\text{-sr-day}$

$$J_e(E) = (1.39 \pm 0.23) \times 10^{-4} (E/100\text{GeV})^{-3.28 \pm 0.10} (\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV}^{-1})$$

(T.Kobayashi et al. 2012)

宇宙線電子エネルギースペクトルのモデルとの比較



SNRs起源の電子スペクトルモデルとの比較



$$W_e = 1 \times 10^{48} \text{ erg/SN}$$

$$\text{SN rate} = 1/40 \text{ yr}$$

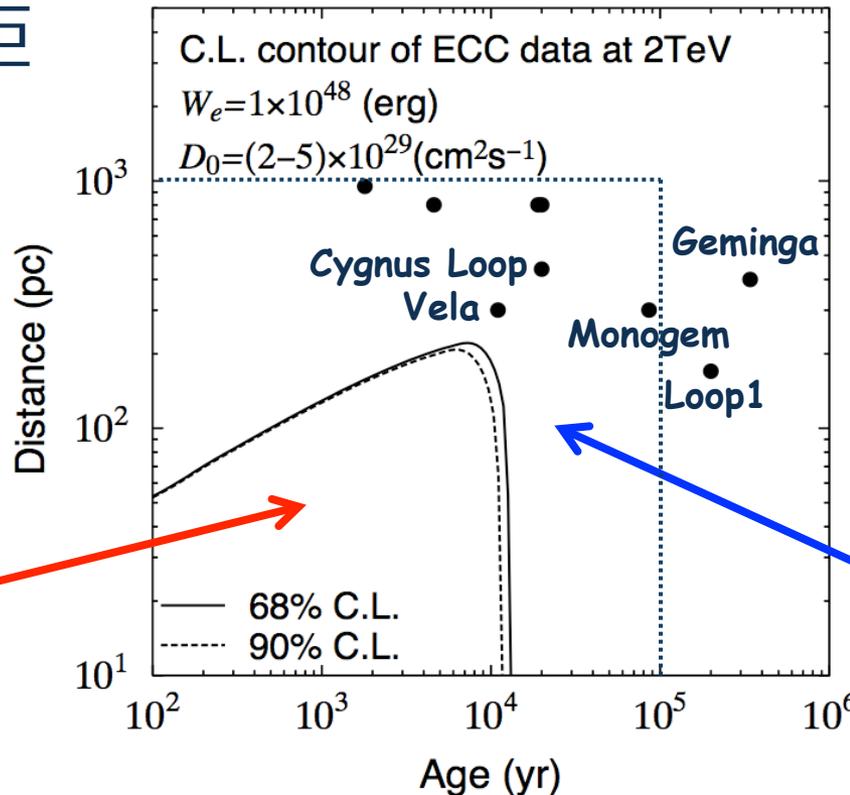
TeV電子スペクトル => 近傍の電子加速源
($< 1 \text{ kpc}$, $< 1 \times 10^5 \text{ yr}$) が存在

ECC電子観測による加速源(SNRs)への制限

SNRsの年齢と距離のコントアマップ

$$W_e = 1 \times 10^{48} \text{ erg/SN}$$

Rejected Region

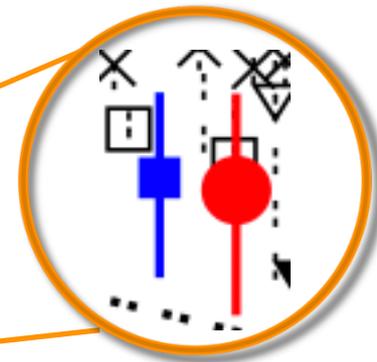
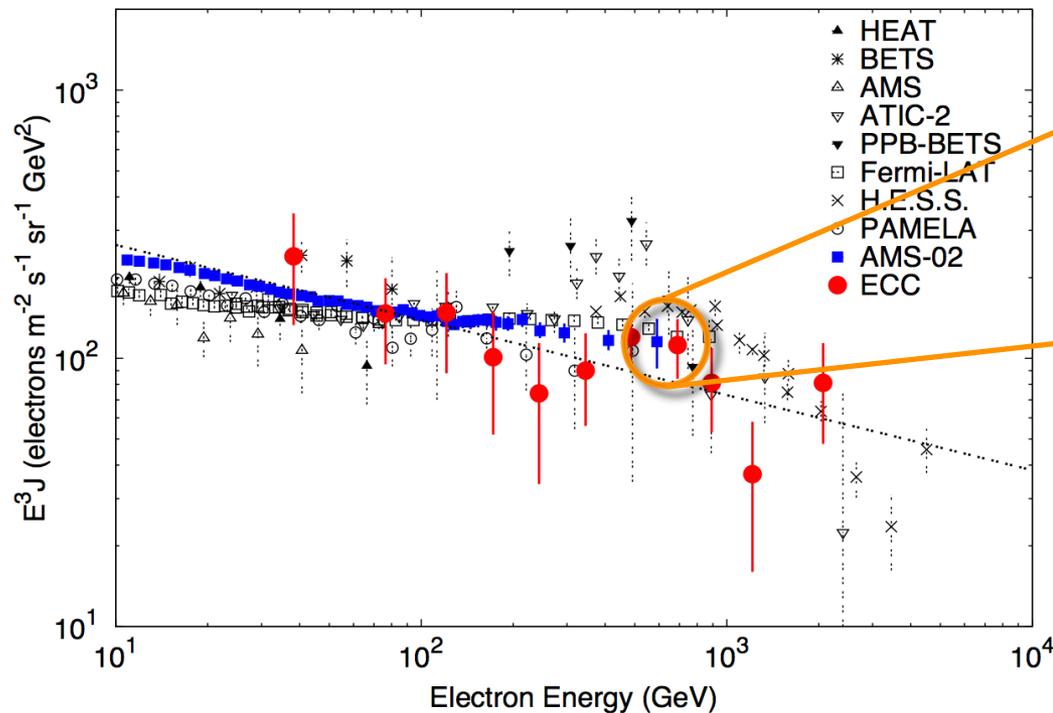


($E_c = 20 \text{ TeV}$)

Acceptable Region

1TeV以上のECC電子フラックス
 => 近傍のSNRsの年齢、距離に制限

ECCとAMS-02の $S\Omega_e T$ の比較



600GeVと700GeVビンで、
誤差棒が同じ程度

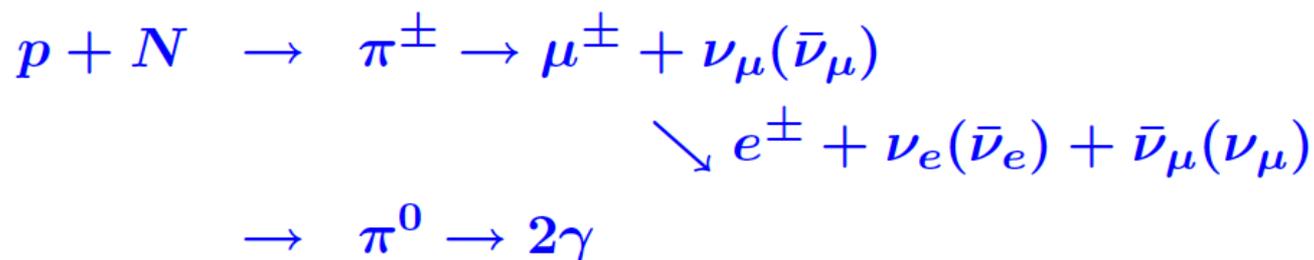
sub-TeV領域では、ECCの $S\Omega_e T=8.19 \text{ m}^2 \text{srday}$ と
AMS-02の2年間の $S\Omega_e T$ が実質的にほぼ同じ

ECCによる宇宙線電子スペクトルのまとめ

- + ECCによる高エネルギー電子の気球観測
 - + 優れた位置分解能 ($1\mu\text{m}$) により、TeV領域の電子観測を実現
- + 30GeV-3TeVの宇宙線電子エネルギースペクトル
 - + べき -3.28 ± 0.10 のpower-lawスペクトル
 - + AMS-02の600GeVまでの電子スペクトルと良く一致
 - + 近傍の高エネルギー電子加速源 ($<1\text{kpc}$, $<1\times 10^5\text{yr}$) の存在

By-product : 大気ガンマ線の観測

- ⑥ Atmospheric gamma rays at high altitude of several g/cm²:
⇐ a single interaction of primary cosmic rays



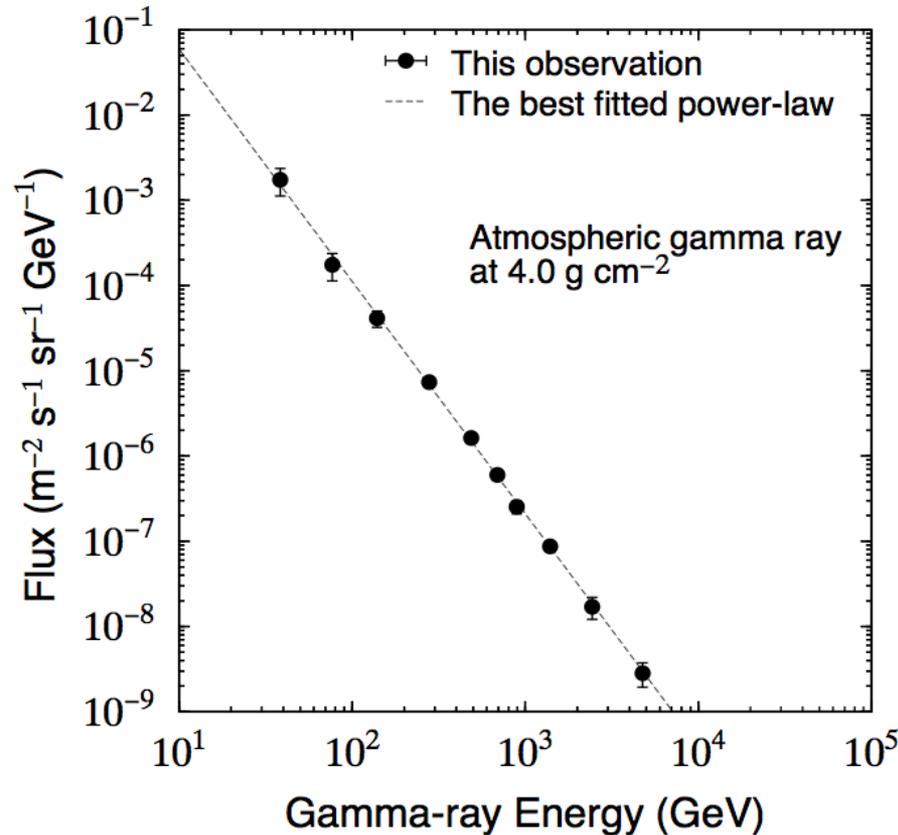
- ⑥ Estimation of primary proton spectrum

- △ $\gamma \Rightarrow \pi^0 \Rightarrow$ Scaling law $\Rightarrow p$
- △ Taking into account of minor contribution of η, K^0

- ⑥ Estimation of muon spectrum

- △ $\gamma \Rightarrow \pi^0 \Rightarrow \pi^\pm \Rightarrow \mu^\pm$
- △ Without referring to primary cosmic rays

大気ガンマ線エネルギースペクトル@4.0g/cm²



(K.Yoshida et al. 2006)

$$J_{\gamma}(E) = (1.12 \pm 0.13) \times 10^{-4} (E/100\text{GeV})^{-2.73 \pm 0.06} (\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV}^{-1})$$

大気ガンマ線スペクトルから陽子スペクトルの導出

Gamma rays \Rightarrow Scaling law \Rightarrow Primary proton spectrum

$$J_p = \frac{\gamma}{2} \frac{1}{\sigma_p} \lambda_p \frac{0.7733/X_0 - 1/\Lambda_p}{\exp(-x/\Lambda_p) - \exp(0.7733x/X_0)} J_\gamma$$

- ⑥ Interaction length: $\lambda_p \simeq 80\text{g/cm}^2 @ 1\text{TeV}$
- ⑥ Attenuation length: $\Lambda_p \simeq 110\text{g/cm}^2$
- ⑥ Radiation length: $X_0 := 36.7\text{g/cm}^2$
- ⑥ Altitude: $x = 4.0\text{g/cm}^2$
- ⑥ $\sigma_p \simeq 0.037 (p \rightarrow \pi^0) \Leftarrow$ hadronic interaction model Dpmjet3

$$\sigma_p = \int_0^1 x^{\gamma-1} \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dx} dx, \left(x = \frac{E_{\pi^0}}{E_p}\right)$$

陽子スペクトル導出での補正項

⑥ Flux correction for heavier primary, η , K^0 :

△ He, C, N, O contribution:

.. $\simeq 0.31$ for $p \rightarrow \gamma$

△ $\eta \rightarrow \gamma$ contribution:

.. $\simeq 0.16$ for $\pi^0 \rightarrow \gamma$

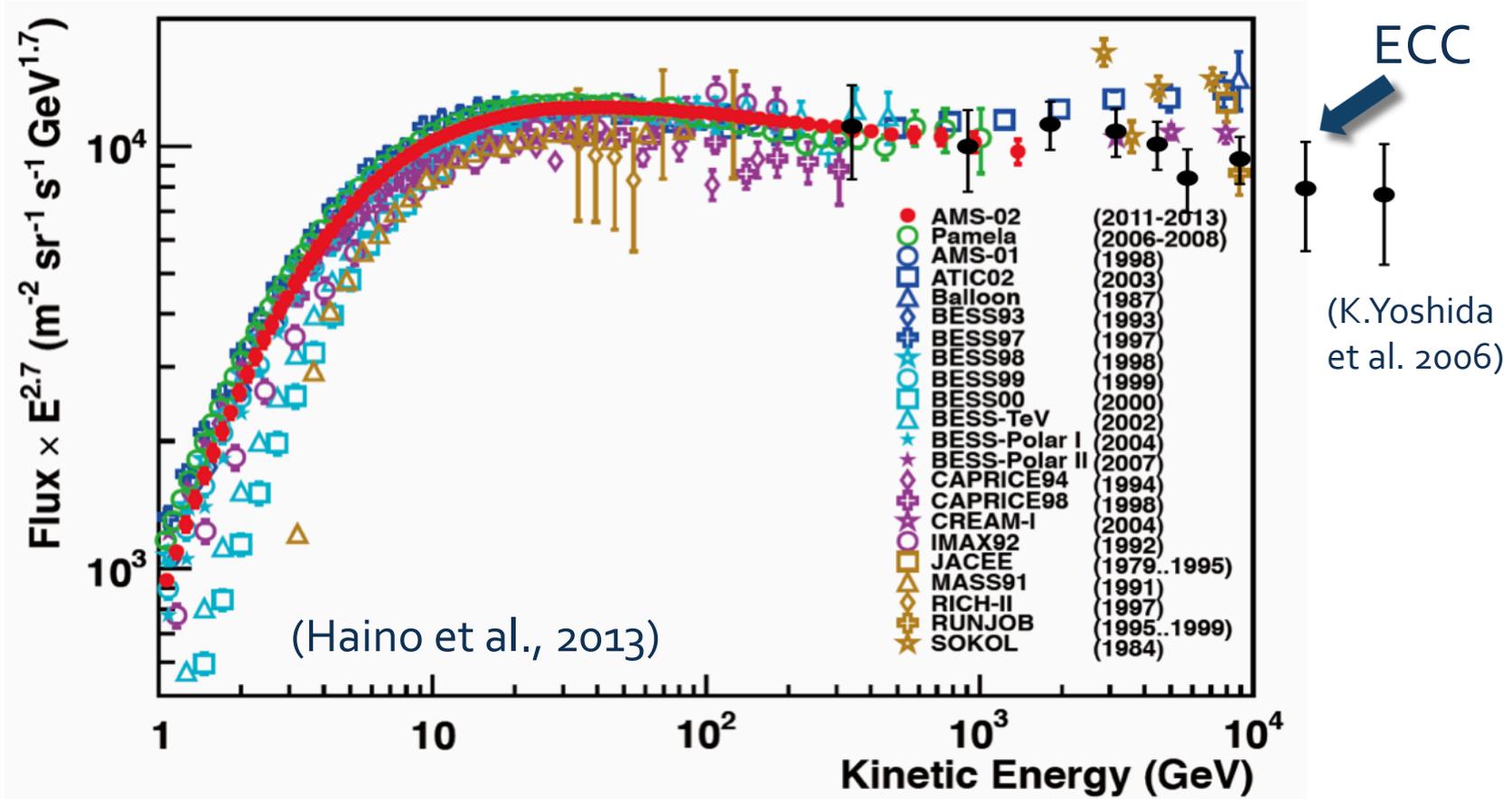
△ $K^0 \rightarrow \gamma$ contribution:

.. $\simeq 0.03$ for $\pi^0 \rightarrow \gamma$

⑥ Energy Shift from gamma rays to protons:

$$\left(\frac{2}{\gamma}\sigma_p\right)^{1/(\gamma-1)} \simeq 7.2$$

導出した宇宙線陽子エネルギースペクトル



Pamela, AMS-02の1TeV以下の陽子スペクトルと良く一致

大気ガンマ線スペクトルから μ 粒子スペクトルの導出

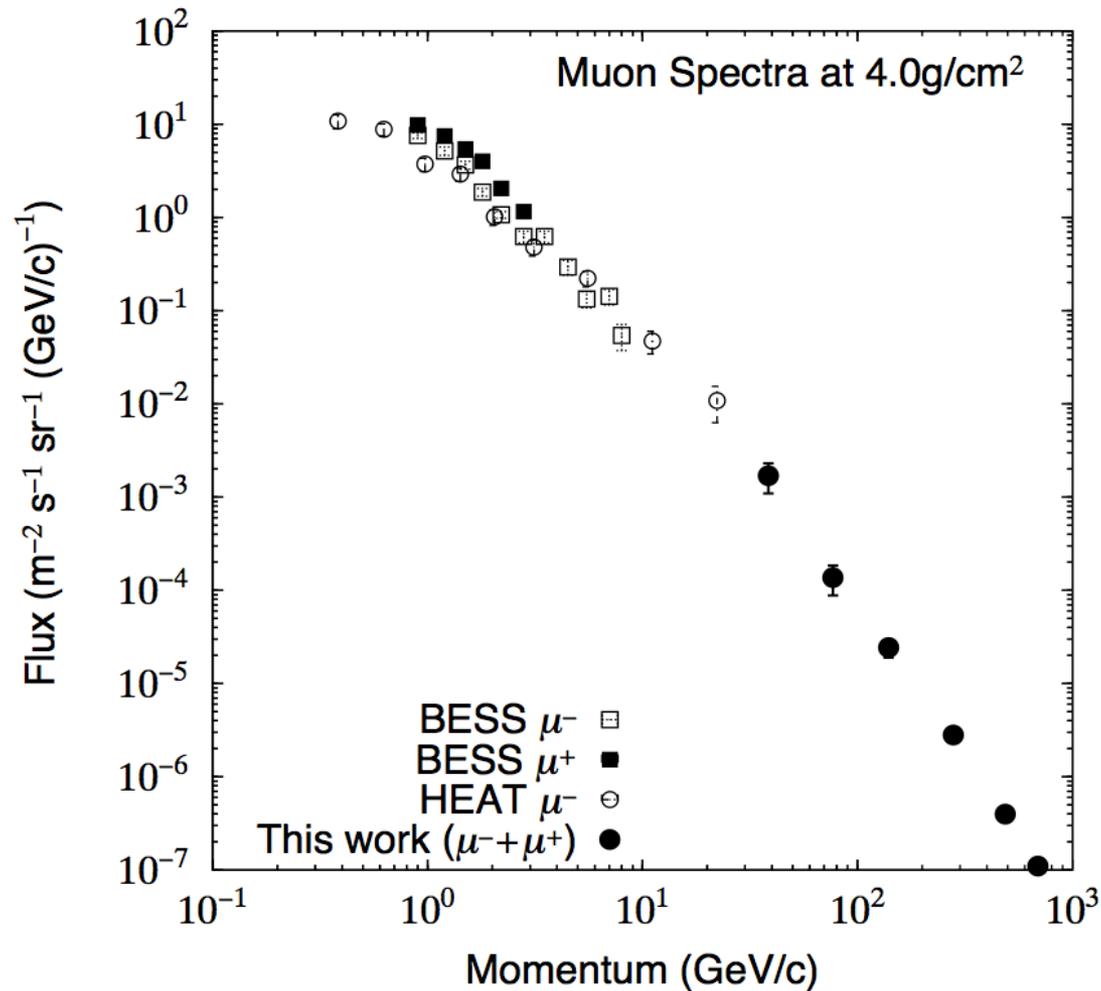
Estimation of muon spectrum without referring to primary cosmic rays

Atmospheric gamma rays $\Rightarrow \pi^0 \Rightarrow \pi^\pm \Rightarrow \mu^\pm$

$$J_\mu = f_\mu \times (f_{\pi^\pm} + f_K) \times J_{\pi^0 \rightarrow \gamma}$$

- ⑥ $J_{\pi^0 \rightarrow \gamma}$: gamma-ray flux from π^0
- ⑥ f_μ : muon surviving rate without decay $\simeq 0.99@100\text{GeV}$
- ⑥ f_{π^\pm} : $J_{\pi^\pm \rightarrow \mu} / J_{\pi^0 \rightarrow \gamma} \simeq 0.88@100\text{GeV}$
- ⑥ f_K : $J_{K \rightarrow \mu} / J_{\pi^0 \rightarrow \gamma} \simeq 0.83@100\text{GeV}$

導出した μ 粒子スペクトル

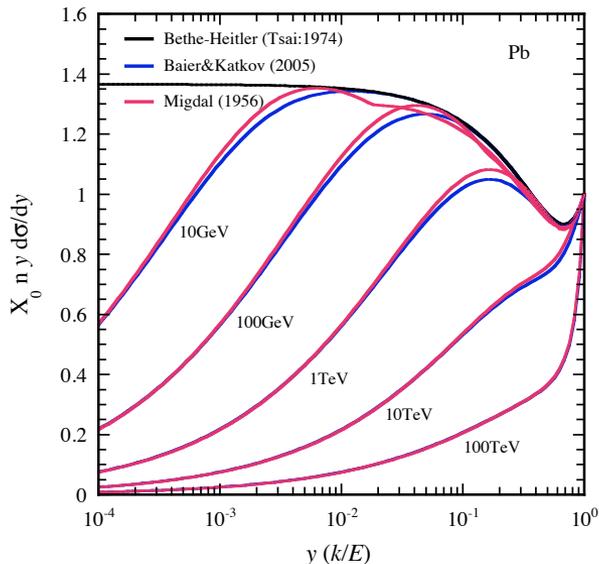


By-product:

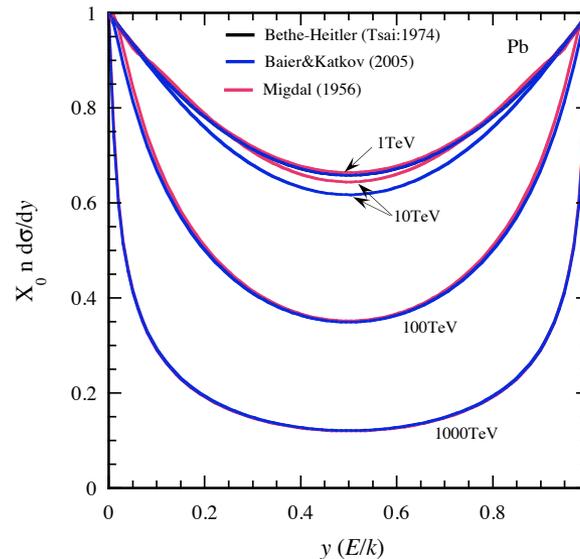
Landau-Pomeranchuk-Migdal (LPM)効果の検証

- + 制動放射と電子対生成の断面積：Bethe-Heitler断面積
- + 多重クーロン散乱による制動放射・電子対生成の抑制 => LPM効果
 - + 数10GeV以上で、制動放射の抑制
 - + 数TeV以上で、電子対生成の抑制

制動放射の断面積



電子対生成の断面積



k : ガンマ線エネルギー
E : 電子エネルギー

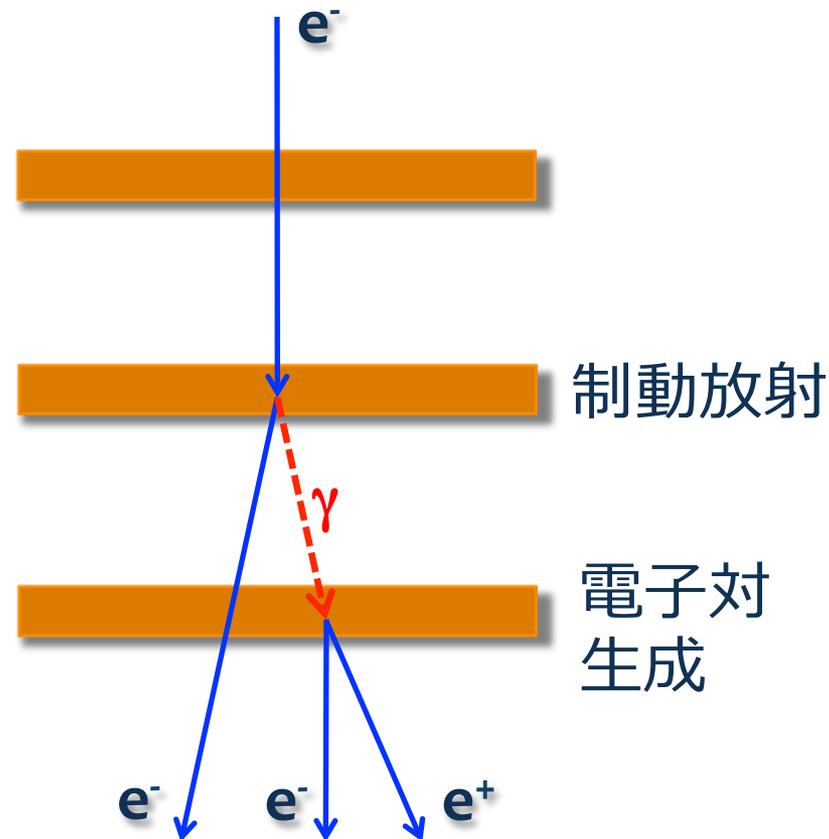
ECC電子観測によるLPM効果の検証

ECCによる電子トラックの
位置分解能： $1\mu\text{m}$



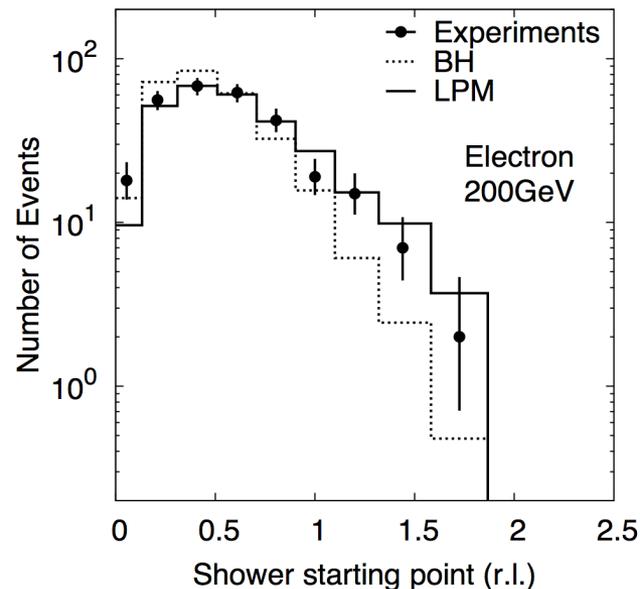
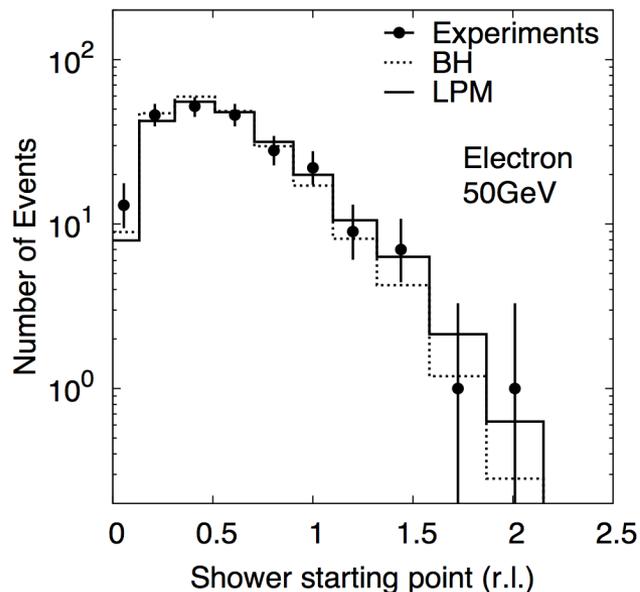
シャワー発生点の測定

LPM効果：
制動放射断面積の減少



=> Bethe-Heitlerによる期待値よりも深いシャワー発生点

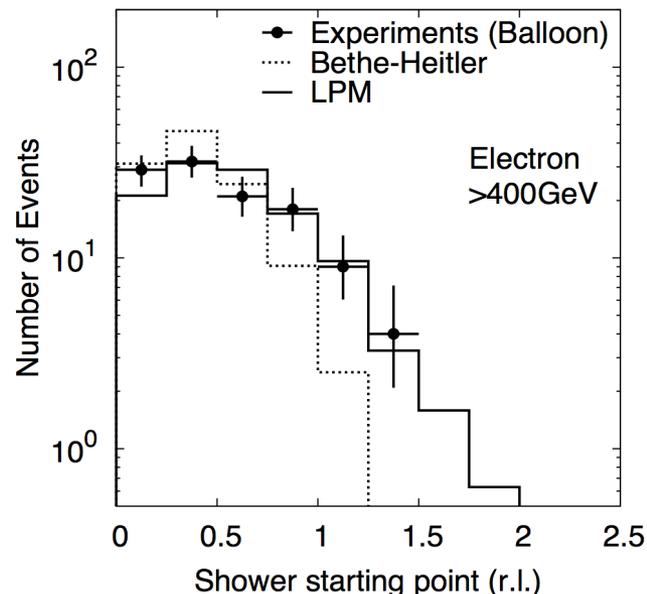
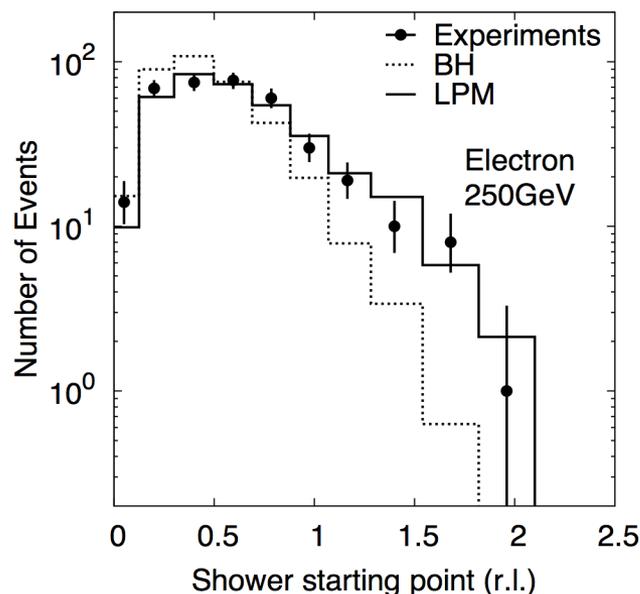
LPM効果の検証：シャワー発生点の頻度分布 (CERN-SPS 電子50GeV, 200GeV)



Electron Energy	The number of events	d.o.f.	Bethe-Heitler χ^2_{ν} (Prob.)	LPM χ^2_{ν} (Prob.)
50 GeV	225	9	0.63 (77%)	0.42 (93%)
200 GeV	289	8	2.77 (0.50%)	0.96 (46%)

- e 50GeV : BHとLPMにほとんど差が無く、両者と一致
- e 200GeV : BHをreject、LPMと一致

LPM効果の検証：シャワー発生点の頻度分布 (CERN-SPS 電子250GeV, 気球観測)



Electron Energy	The number of events	d.o.f.	Bethe-Heitler χ^2_{ν} (Prob.)	LPM χ^2_{ν} (Prob.)
250 GeV	363	9	5.46 ($2 \times 10^{-5}\%$)	0.79 (63%)
> 400 GeV	113	5	2.73 (1.8%)	1.05 (38%)

e 250GeV, 400GeV以上：BHをreject、LPMと一致

まとめ

- + ECCによる高エネルギー電子の気球観測
 - + 優れた位置分解能 ($1\mu\text{m}$) により、TeV領域の電子観測を実現
 - + 30GeV-3TeVの電子エネルギースペクトル
 - + べき -3.28 ± 0.10 のpower-lawスペクトル
 - + 近傍の高エネルギー電子加速源 ($<1\text{kpc}$, $<1\times 10^5\text{yr}$) の存在
- + 大気ガンマ線スペクトルから300GeV-30TeVの宇宙線陽子スペクトルを導出
 - + Pamela, AMS-02の1TeV以下のスペクトルと一致
- + 400GeV以上の高エネルギー電子領域で、制動放射のLPM効果を確認