# Measurements of Galactic and Atmospheric Cosmic-Ray Absolute Fluxes

# 銀河及び大気宇宙線絶対流束の測定

宇宙線研セミナー

東京大学大学院 理学系研究科

灰野 禎一

# 概要と内容

## 概要

BESS測定器を改良し、運動量分解能を大幅に向上させ、 銀河及び大気宇宙線絶対流束を広いエネルギー範囲で 精密測定した。

Introduction 研究の目的、方法

Detector BESSの改良 (BESS-TeVspectrometer)

Experimetns 気球高度及び地表での宇宙線観測

Data analysis (1) イベント再構成 (2) 絶対流束の決定

Results 過去の実験との比較

**Summary** 

その他

# Introduction

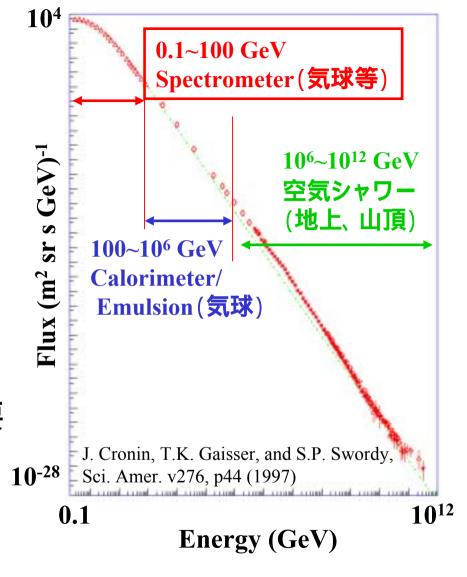
# 銀河宇宙線

## 銀河宇宙線

陽子(90%), ヘリウム原子核(9%), その他原子核,電子等

宇宙線のデータ自身が、起源と伝播を知る上で重要

Spectrometer は 5~10% の 高精度で絶対流束を直接測定



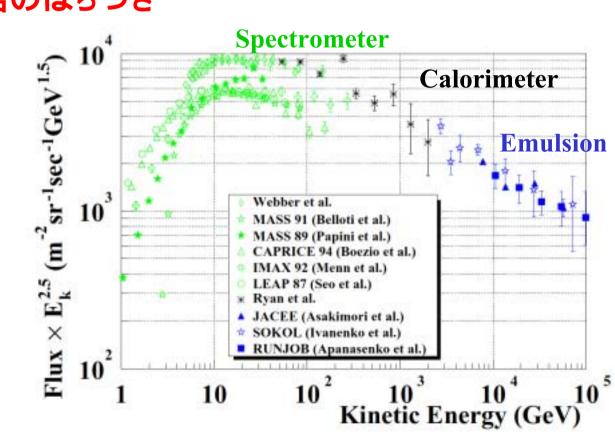
# 陽子スペクトル (90年代前半)

#### **Spectrometer**

E < ~100 GeV **測定ごとに最大2倍のばらつき** 

# **Calorimeter/ Emulsion**

E > ~100 GeV **絶対値に不定性** 

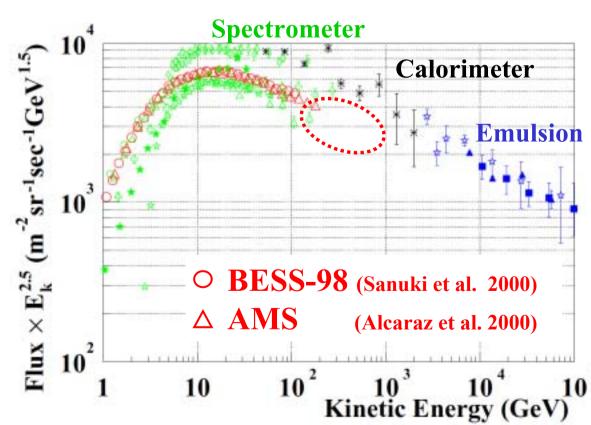


# 陽子スペクトル (~2000年)

BESS-98, AMS

~5%**の**精度で 100 GeV まで決定

100 GeV~1 TeV では 依然、データの少ない。 空白領域



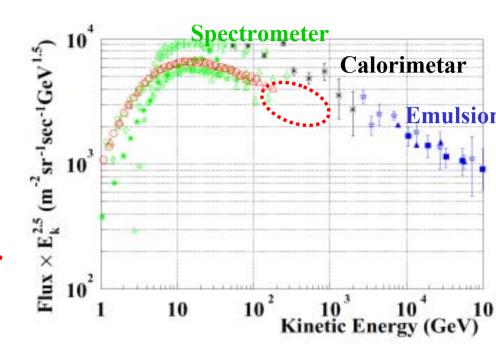
# 絶対流束 @ 100 GeV~1 TeV

#### 重要性

Spectrometer 領域と Emulsion 領域をつなげる

Calorimeter 実験に対する 絶対値のアンカーポイント

大気 v フラックス計算 (E > 10 GeV) にも必要



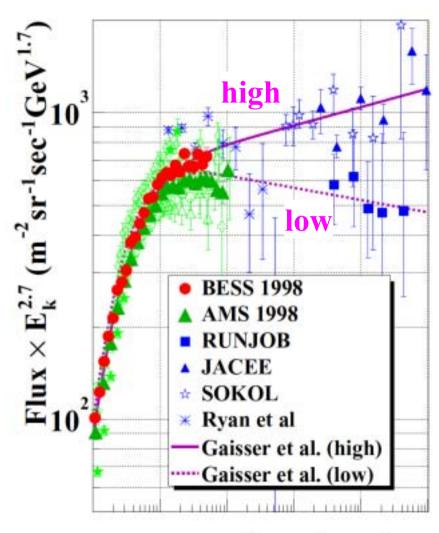
#### 課題

Spectrometer の大幅な分解能向上が必要

# ヘリウムスペクトル

E < 50 GeV/n BESS の結果が AMS より ~15 % 大きい

E > 1 TeV/n JACEE と RUNJOBで 約2倍の食い違い



1 10 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>4</sup> 10 Kinetic Energy (GeV/n)

# Spectrometer の分解能

## 運動量測定

磁場中での曲率を飛跡検出器等で測定

Rigidity 
$$(R \equiv Pc/Ze) = 0.3 B r$$

磁場強度の限界 (~1 Tesla) と

測定器の大きさ (~1 m) で分解能が制限

$$R = 1 \text{ GV}$$
  $r = 3 \text{ m}$ 

$$R = 1 \text{ TV}$$
  $r = 3,000 \text{ m}$ 

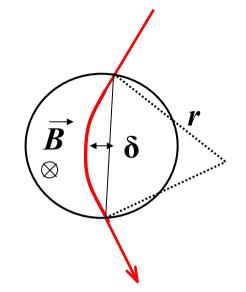
 $(\delta \sim 80 \mu m)$ 



Spectrometer の分解能を表す指標

$$\Delta R/R = 100$$
 % となる Rigidity

BESS-98 MDR = 200 GV



# MDR > 1 TV の spectrometer開発

**BESS-TeV** 

# 精密測定範囲の拡張

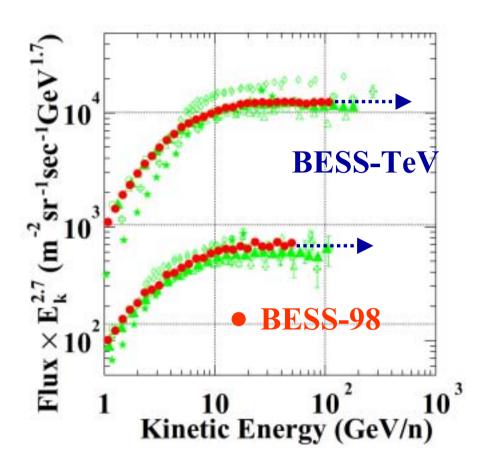
#### 測定エネルギー上限値

Proton up to 100 GeV

 $\rightarrow$  > 500 GeV

Helium up to 50 GeV/n

 $\rightarrow$  > 200 GeV/n



# 大気ニュートリノ計算

## 計算値の不定性

一次宇宙線の絶対流束の不定性 大気原子核との hadronic interaction model の不定性

# Up-going μイベント @ SK

E > 10 GeV

E<sub>p</sub> > 100 GeV の 精度の高い絶対流束が必要

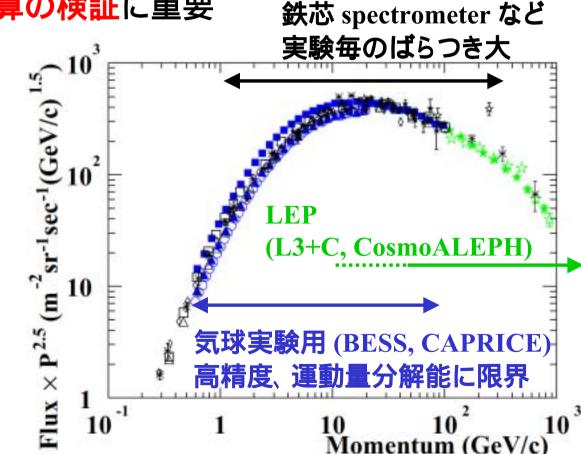
# 大気宇宙線

## 二次宇宙線(μ)

多くの測定が行われた

大気ニュートリノ計算の検証に重要

宇宙線 μ の測定



# 研究の目標

## 銀河宇宙線の測定

Spectrometer による高精度の測定エネルギー領域を 100 GeV 500 GeV に拡大 空白領域である 100 GeV ~ 1 TeV のエネルギー領域で 精密な絶対流束を決定

#### 大気宇宙線の測定

0.5 ~ 500 GeV/c の広い運動量領域を一度に測定 大気ニュートリノ計算の間接的な検証のためにも重要

# 研究の方法

#### BESS測定器の改良

大面積立体角、高い粒子識別能力などの特色運動量分解能を大幅に向上させ、測定領域を拡大

#### BESS-TeV 測定器

ドリフトチェンバーなどを新規開発し、 運動量分解能を向上させる MDR 200 GV 1 TV 以上

## 実験

銀河宇宙線 気球(Lynn Lake)による約1日の観測 (2002. 8) 大気宇宙線 地上(KEK,つくば)での約1週間の観測 (2002.10)

# **Detector**

# BESS測定器の特徴

## 超伝導ソレノイド

大面積立体角、単純シリンダー構造 薄肉コイル開発による低物質量化

# ドリフトチェンバーによる飛跡測定

物質量を増やさずに多点測定可能 測定器中での interaction event を 明確に識別

# (≡Pc/Ze)

 $\rightarrow \beta$ , dE/dx

JET/IDC

→ Rigidity

BESS-98 断面図

Solenoid

## 質量の同定による粒子識別

粒子の速度( $\beta$ ) と Rigidity(R)、電荷(Z)

 $m = ZeR\sqrt{1/\beta^2-1}$ 

**BESS-TeV** 

BESS-98 **BESS-TeV** Solenoid JET/ID **ODC** 

## 測定点数 $N(\sim 2$ 倍)

New JET/IDC

New FADC

**52** N = 28

500 ch 1000 ch

#### 位置分解能 $\sigma$ (~1.3倍)

New JET/IDC

 $\sigma = 200 \ \mu \text{m}$  < 150  $\mu \text{m}$ 

新キャリブレーション

# 飛跡長

L (~2倍)

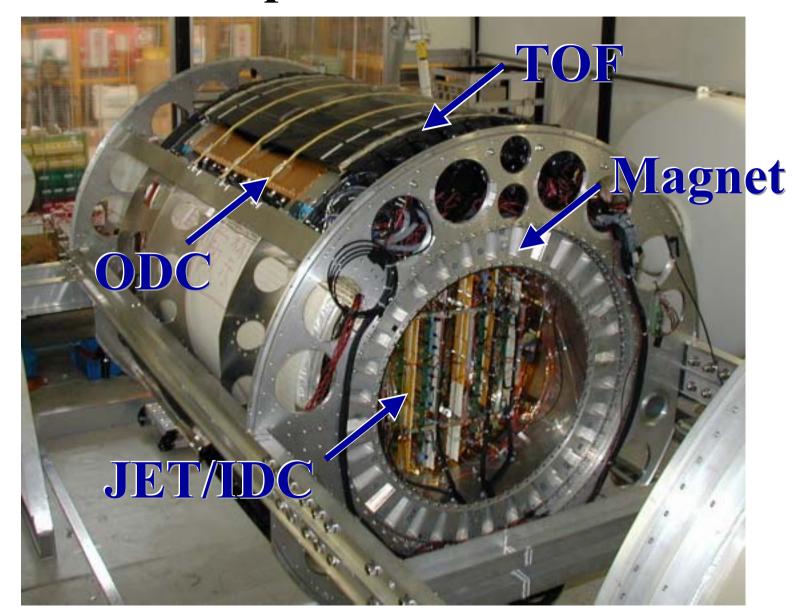
ODC

L = 0.8 m 1.6 m

# 運動量分解能 $\delta p/p$

MDR 200 GV 1.4 TV

# **BESS-TeV** spectrometer



# JET/IDC

## 特徴

JET 読み出し点数2倍 JET/IDCの<mark>端板共通化</mark> アライメント不定性解消

#### 構造

JET 8 領域 × 48 points max

ドリフト長 86.3 mm

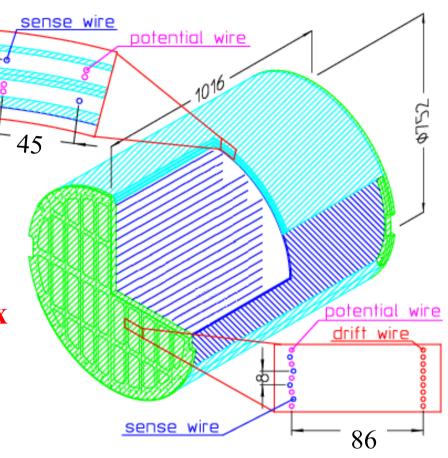
IDC 2層の測定面 ドリフト長 45 mm

ガス CO<sub>2</sub>90 %+Ar10 %

位置分解能 < 150 μm

構造体の低密度化

低エネルギー反陽子



**Outer Drift Chamber (ODC)** 

# 特徴

圧力容器最外の上下に配置 2倍のトラック長 運動量分解能向上に 最も貢献

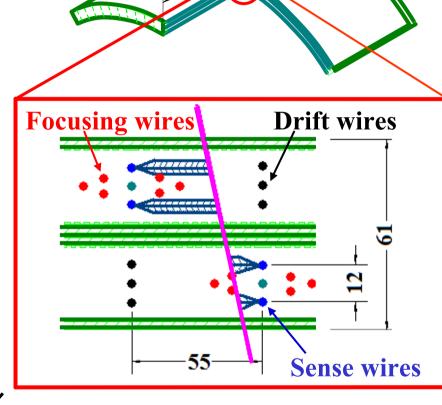
## 構造

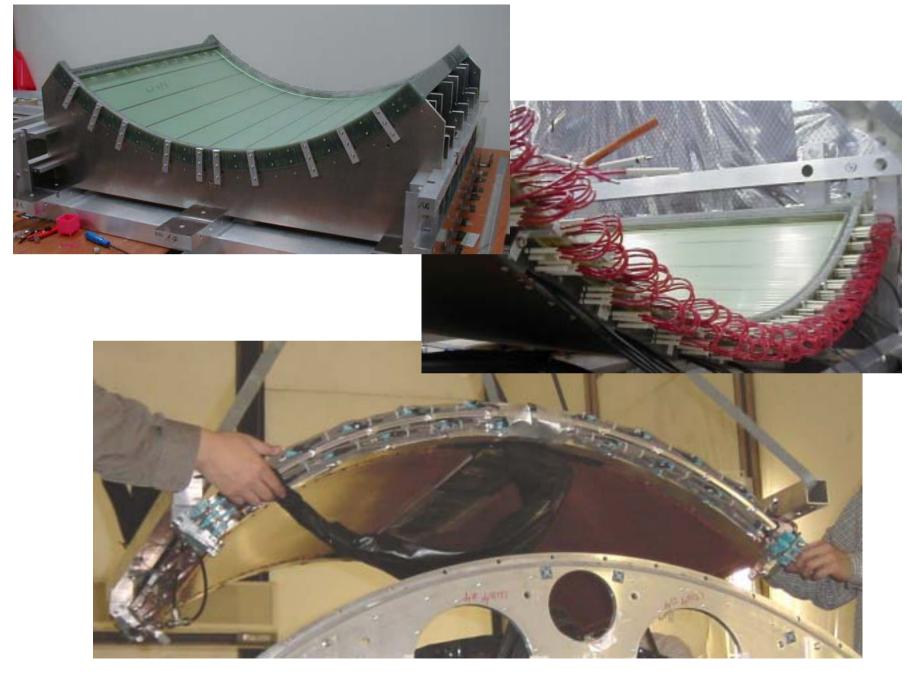
4 層の測定面 ガス CO<sub>2</sub> 90 %+Ar 10 % ドリフト長 ~ 55 mm 位置分解能 < **150** μm

Focusing wire T

ドリフト電子の収束力強化

テストチェンバー、電場計算(シミュレーション)で最適化





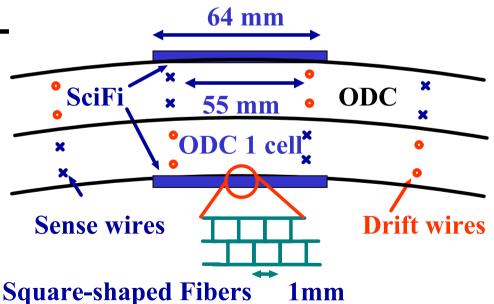
# Scintillation fiber counters (SciFi)

#### **ODC** calibration

単体(4層)ではCalibrationの拘束条件少ない 温度、圧力変動によらない粒子の<mark>絶対基準が</mark>必要

#### デザイン

1×1 mm<sup>2</sup> 角型ファイバー 64本×2層構造 ODC上下に配置 1セルをカバー 16ch multi-anode PMTで 読み出し



# ODC/SciFi ビームテスト

# 2002年2月 @KEK PS

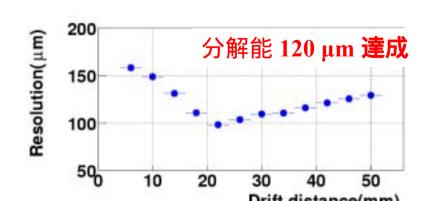
2GeV/c p/π<sup>+</sup> ビーム

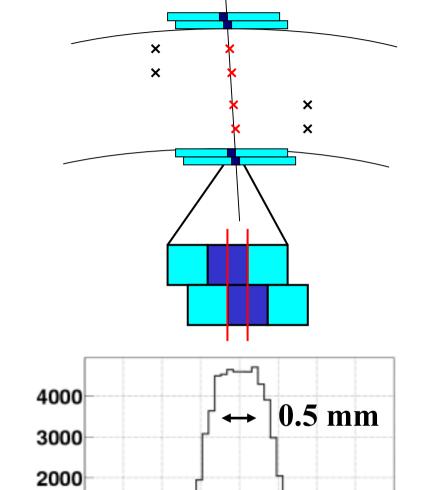
#### Scifi を使った calibration

ODCトラックと、SciFi hit の residual分布の中心値を指標

→ 統計精度を高めることで 数10 µmの精度を実現

#### ODCの性能評価





-1.5 -1 -0.5 0

Residual(mm)

1000

# **Experiments**

# BESS-02 気球実験

#### 打ち上げ

Lynn Lake (カナダ北部) Aug. 7, 20:58 CST

#### 着地

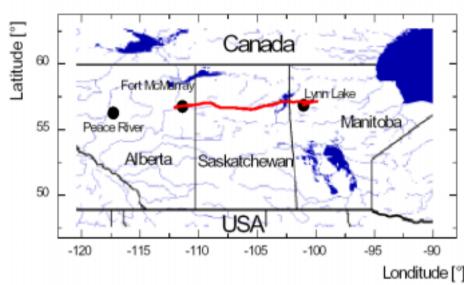
Ft. McMurray (西へ600km) Aug. 8, 17:46 CST

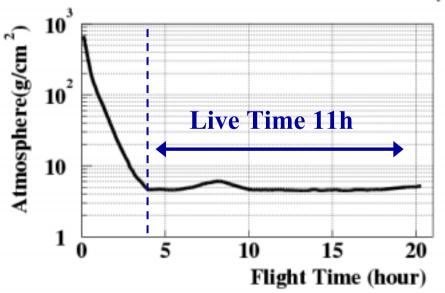
# 高度/残留大気圧

37km / 4.7 g/cm<sup>2</sup> (水平飛行での平均)

飛行時間 16.5 hours

Live time 11.3 hours





# 地上での宇宙線μ観測

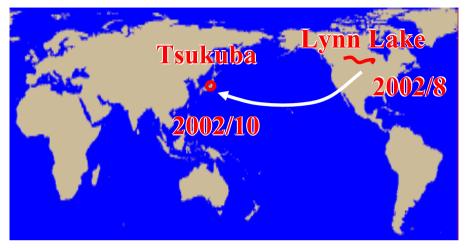
#### 場所

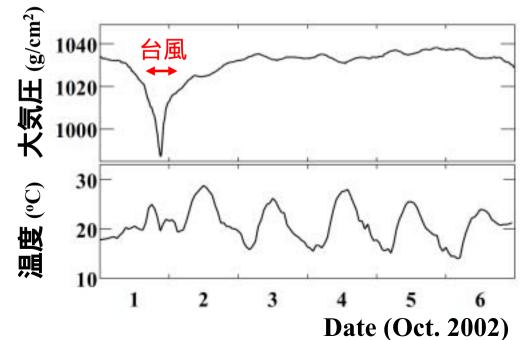
KEK (つ(ば市)

#### 期間

2002/10/1 ~ 10/6 (100時間)

カナダでの実験から 帰国後、測定器の 状態を変えずに観測





# Data Analysis (1) イベント再構成

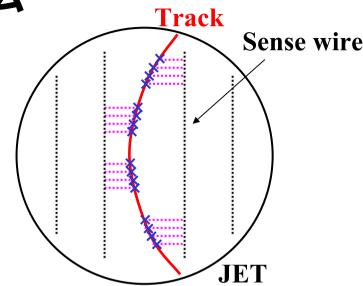
# Rigidity 再構成

#### Raw data プロセス Raw data (チェンバー信号) から **Template** チェンバー内の粒子の飛跡再構成 **Parameter** 飛跡から Rigidity を計算 キャリブレーション **Template** 粒子の飛跡 理想条件での変換式(モデル) チェンバー内の電場計算などから求める **Parameter Rigidity** 現実の測定器に対する調整

温度、圧力の変動 有限の製作精度の影響 (ワイヤー位置のずれ、電場の乱れなど) データ自身を使ってキャリブレーション キャリブレーション方法

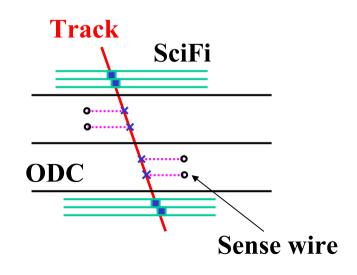
#### **JET/IDC**

均一な磁場中で飛跡が円弧となる 飛跡上の~50の測定点に対する 整合性の要求



#### **ODC**

4層の測定点の整合性の要求 SciFi のヒットとの整合性の要求



# 新しいキャリブレーション

# 以前まで (BESS-98 など)

Parameter の自由度が大きい 100 GV 以上の信頼性の高い Rigidity 再構成には限界

#### 改良点

Paramter の自由度を大きく制限 チェンバーごと、ランごとでの Parameter 共通化

# Parameter の共通化

#### ワイヤー共通のパラメータ (BESS-98 はワイヤーごとに独立)

FADC 時間オフセット ドリフト速度 ローレンツ角度補正 全チェンバー共通 チェンバーごとに共通 チェンバーごとに共通

#### ラン共通のパラメータ

センスワイヤー位置

電場の歪みの影響

(BESS-98 はランごとに独立)

地上での磁場無しのランで キャリブレーション 地上 μ 観測データで キャリブレーション

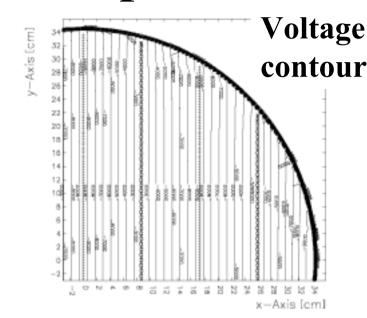
キャリブレーションの信頼性が向上

# Garfield による詳細な template

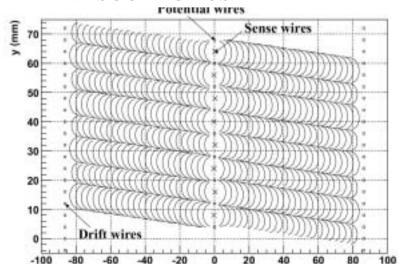
#### x-t relation

チェンバーを 200 μm の grid に分け 全領域から sense wire までの drift time を計算

任意の入射角度のトラックに対して 正確なドリフト距離が得られる



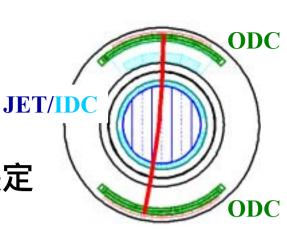
#### **Drift** isochrones



# チェンバーアライメント

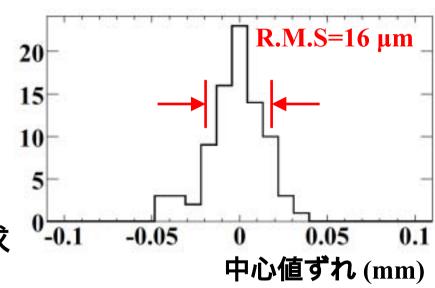
#### JET - IDC

エンドプレートの共通化により高精度で決定



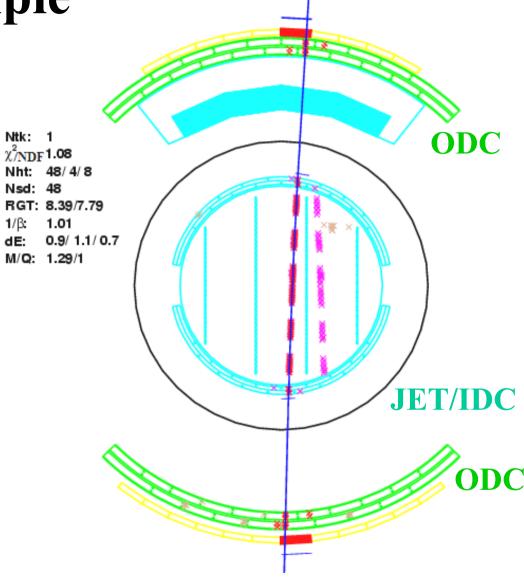
#### JET – ODC

測定データ自身を使って ラン毎にキャリブレーション JET での飛跡の外挿と ODC での飛跡の整合性要求



ラン毎の中心値ずれ <  $20 \mu m R.M.S.$  キャリブレーションの誤差

Event example



# 性能評価

# チェンバー位置分解能

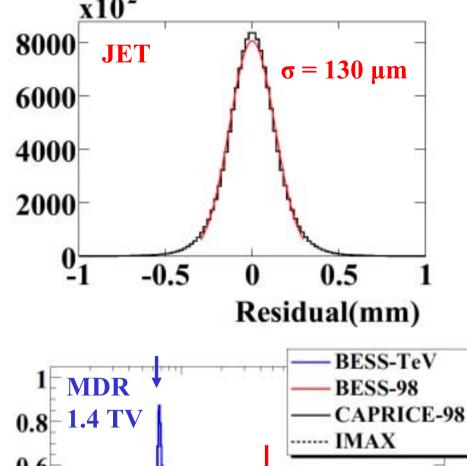
# 目標值150 µm 以下達成

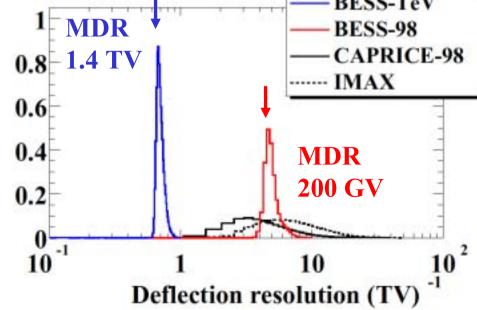
JET 130 μm IDC 129 μm ODC 123 μm (地上 μ, P > 10 GeV/c)

# 運動量分解能

#### 設計值MDR 1.4 TV達成

BESS-98 他の気球実験に 比べて 1 桁近い向上

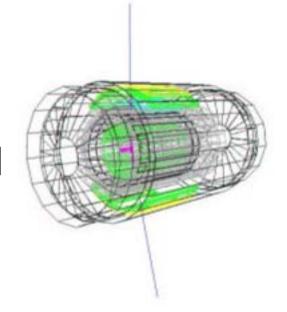




# M.C.による性能の評価

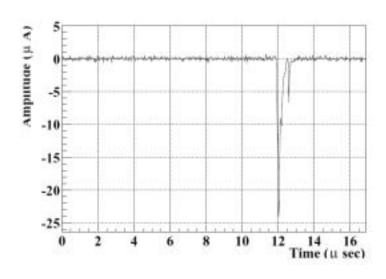
#### 目的

チェンバーの位置測定誤差に様々な要因 M.C. で詳細に再現 実験での位置測定性能が原理的な限界 近くまで達成できているか評価



#### チェンバーの応答の詳細な実装

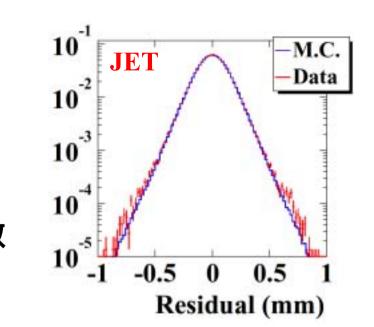
入射粒子によるガスのイオン化電子のドリフト、拡散アノードワイヤーでのなだれ増幅 FADCでのデジタル化シグナルの生成 測定器のジオメトリ



### M.C. とデータ比較

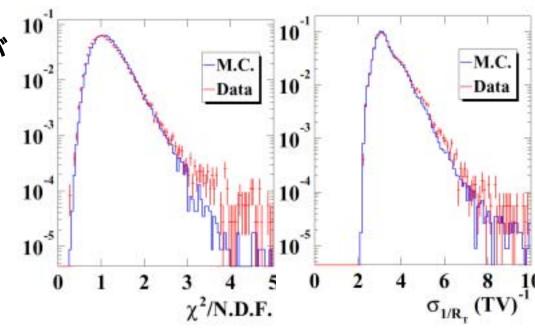
### 位置分解能

ガウス分布の中央部分と 指数分布のテール部共に一致



### Track quality パラメータ

フィッティングの  $\chi^2$  分布、 曲率誤差  $\sigma_{1/R}$ 分布などが よ $\langle$ 一致



# Data Analysis (2) 絶対流束の決定

### 絶対流束計算

### イベントセレクション (Nobs)

Trigger, Fiducual volume 測定器中での interaction event を排除 (Single track カット) Particle ID

### B.G.見積り (N<sub>RC</sub>)

上空 p e,  $\mu$ ,  $\pi$ , d 地上  $\mu$  e, p

#### 規格化

$$Selection/trigger efficiency \\ F_{\text{TOA,p}} \cdot \text{d}E = (N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}) \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{S\Omega \cdot T_{\text{live}}} \cdot \frac{1}{\eta + R_{\text{air}}}$$
 大気補正

$$F_{\text{TOI},\mu} \cdot \text{d}P = (N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}) \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{S\Omega \cdot T_{\text{live}}}$$
 Live time 立体角

proton flux μ flux

kinetic energy

momentum

### **Trigger**

#### **Unbiased trigger (T0-CD)**

Efficiency 93% (R>10 GV)

上下 TOF の coincidence (T0 trigger) レートを下げるためサンプリング (Count Down) 上空(1 kHz) 1/10 **TOF** 地上(30 Hz) 1/1 **T0** 1/10 T0-CD Aeroger Aerogel trigger (AC) AC 93% 高エネルギーイベントを選択 **Efficiency** Aerogel Cherenkov counter O 出力信号を使用

**TOF** 

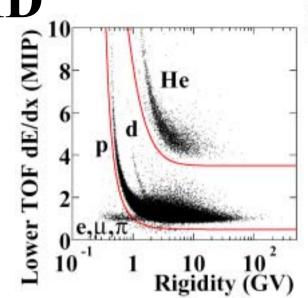
**5GV 20GV** 

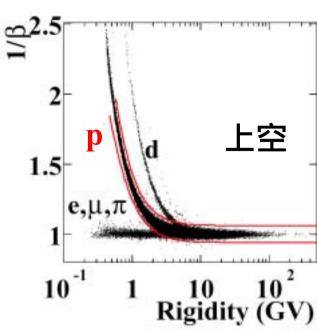
上空 proton T0-CD (E <10 GeV) + AC (E >10 GeV) 地上 μ T0-CD のみ

### **Particle ID**

### 上空 p

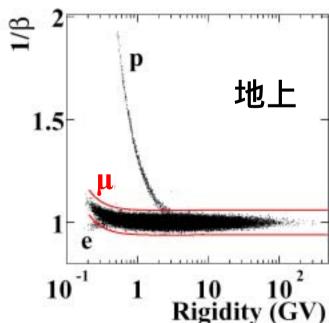
dE/dx カット z = 1 を選択 β バンドカット 質量の同定





# 地上μ

β バンドカット 質量の同定



# Background 見積り

### 上空 p

```
e,μ,π (E > 1 GeV, < 2%)

1 GeV 以下の ratio を外挿

エネルギーと共に減少

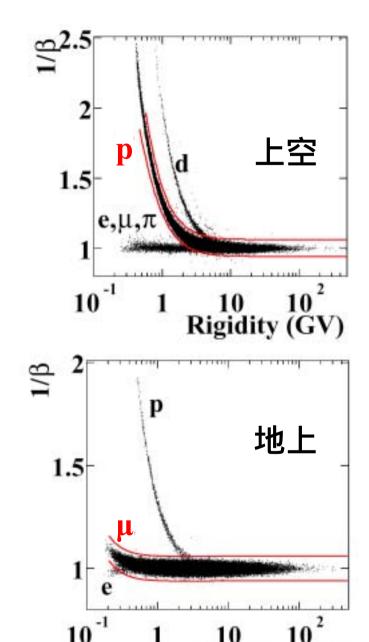
d (E > 3 GeV, < 2%)

Flux 計算に含める
```

### 地上 μ

e (P > 0.5 GeV/c, < 1.5 %) 運動量とともに急速に減少 無視できる (0.3% @1 GeV/c)

p (P > 2.5 GeV/c ,< 2 %) 2.5 GeV/c 以下の ratio を外挿 運動量とともに減少



### 規格化

$$F_{\text{TOA,p}} \cdot dE = (N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}) \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{S\Omega \cdot T_{\text{live}}} \cdot \frac{1}{\eta + R_{\text{air}}}$$

$$F_{\text{TOI},\mu} \cdot dP = (N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}) \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{S\Omega \cdot T_{\text{live}}}$$

### $S\Omega$ , $T_{live}$

SΩ (立体角) M.C. で見積り

 $T_{\text{live}}$ (live time) 1MHz クロックで測定

ε (efficiency)		見積	p	μ
$\epsilon_{ m rec}$	Track reconstruction	Data	> 99 % (R<100 GV, w/o ODC)	
			> 90 % (R>100 GV,	w/ ODC)
$\epsilon_{ m single}$	Single track cut	M.C.	80 % (R=100GV)	> 99 %
$arepsilon_{ ext{PID}}$	Particle ID	Data	> 97 %	> 99 %
$\mathcal{E}_{ ext{trig}}$	Trigger (T0-CD)	Beam	> 99 % (R<10GV)	> 99 %
C	(AC)	Data	94 % (R>10GV)	
$\epsilon_{ m acc}$	Accidental events	Data	0.01 %	0 %

### 大気補正 (proton のみ)

### 大気補正

測定器頂上 $Flux(F_{TOI})$  大気頂上 $Flux(F_{TOA})$  約  $5 g/cm^2$  の残留大気の影響を補正

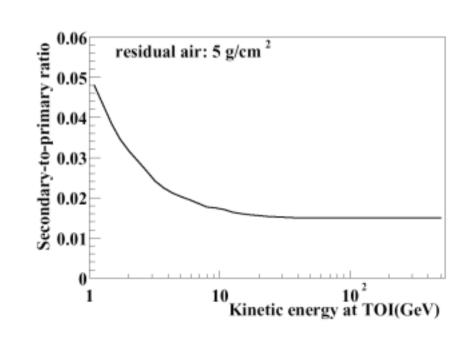
### η (Air survival efficiency)

M.C. で見積り 約 93 %

### R<sub>air</sub> (大気二次陽子)

Secondary/Primary ratio Papini et al. の 数値計算から見積り 10 GeV 以上で 2% 以下

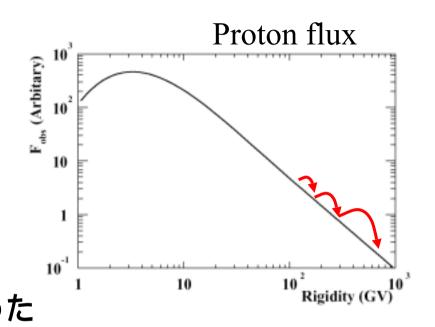
$$F_{\text{TOA}} \cdot dE = \frac{F_{\text{TOI}} \cdot dE}{\eta + R_{\text{air}}}$$



### 運動量測定誤差の影響

### 有限な分解能の影響

スペクトルが急峻なため 低運動量のイベントが 高運動量側になだれ込む 運動量が高い程、影響大 スペクトルをモデル化し M.C. を使って影響を見積った



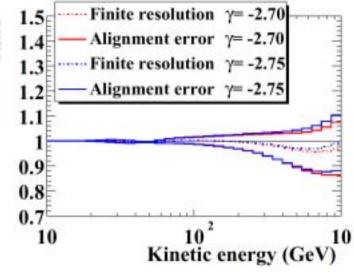
### 運動量のシフトの影響

ODC-JET の alignment の誤差の影響で  $P^{-1}$  がシフト Alignment 誤差  $20 \mu m$   $\Delta P^{-1} = 0.2$  (TeV/c) $^{-1}$  M.C. で見積り

### 運動量測定誤差の影響見積り

#### **Proton**

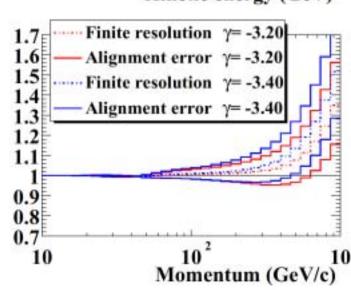
べき -2.7 と -2.75 のスペクトル仮定 運動量分解能の影響は 5% 以下 Alignment 誤差の影響は 500 GeV で 10%



μ

べき -3.2 と -3.4 のスペクトル仮定 べきが proton より急峻 影響大 Alignment 誤差の影響は 500 GeV/c で 20%

Deconvolution は行わない



# 誤差の見積り (proton)

Error (%)

Trigger

Single track-

Deformation

Alignment

-Syst. total

Stat. error

### 統計誤差

E < 100 GeV で < 3 %

E > 200 GeV で

dominant (> 5 %)

### 系統誤差

 $\Delta \epsilon_{\text{single}}$  E < 200 GeV

dominant (2 ~ 3%)

 $\Delta \varepsilon_{\text{trig}}$  10 < E < 100 GeV  $\overline{C}$ 

dominant (3%)

**Alignment**  $E > 300 \text{ GeV } \mathbf{C} \text{ dominant } (> 5\%)$ 

### 絶対流束のエネルギー上限値

統計/系統誤差 < 15% となる範囲で決定

**E** < **540 GeV** 

Kinetic energy (Ge

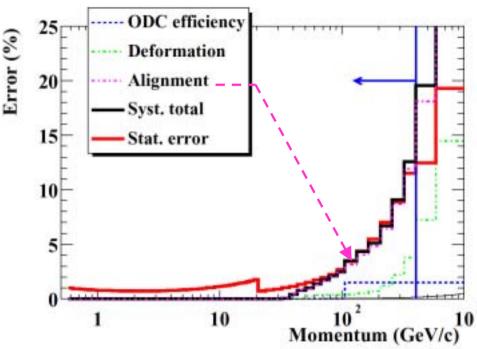
# 誤差の見積リ(μ)

### 統計誤差

全運動量領域で dominant

P < 20 GeV/c で 1 ~ 2 %

P > 100 GeV/c で > 5 %



### 系統誤差

**Alignment error** 

 $P > 100 \text{ GeV/c } \mathcal{C} \text{ dominant } (> 5\%)$ 

### 絶対流束のエネルギー上限値

統計/系統誤差 < 15% となる範囲で決定

P < 400 GeV/c

### Results

# 結果 (Proton)

### エネルギー範囲

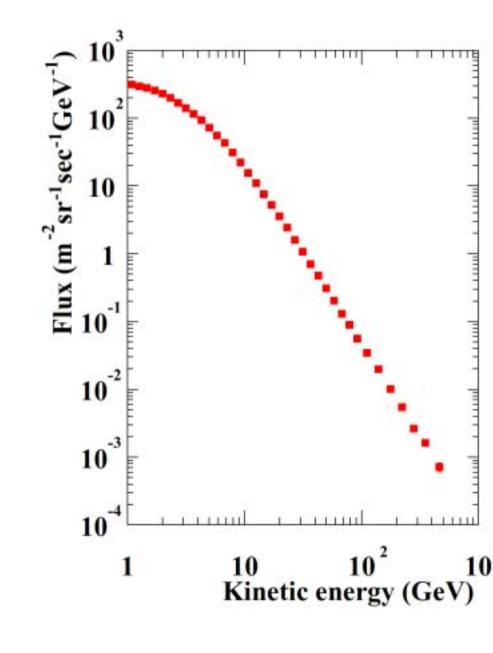
1 ~ 540 GeV

**約6桁にわたる**flux

### Flux 誤差

15%以下

Energy	$\Delta F_{Stat.}$	$\Delta F_{Syst.}$
1 GeV	1.0 %	2.6 %
10 GeV	0.7 %	3.9 %
100 GeV	3.2 %	5.6 %
500 GeV	10. %	11. %



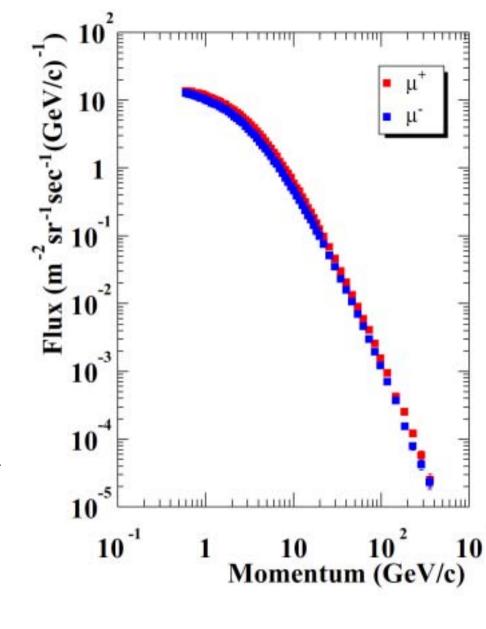
# 結果 (µ)

### 運動量範囲

 $0.57 \sim 400 \text{ GeV/c}$ 

# Flux 誤差 (μ++μ- flux) 17% 以下

Momenum	ΔF <sub>Stat.</sub>	$\Delta F_{Syst.}$
0.6 GeV/c	0.8 %	1.2 %
10 GeV/c	1.1 %	1.0 %
100 GeV/c	2.7 %	2.6 %
400 GeV/c	12. %	12. %



# べき関数によるフィット (proton)

### べき関数

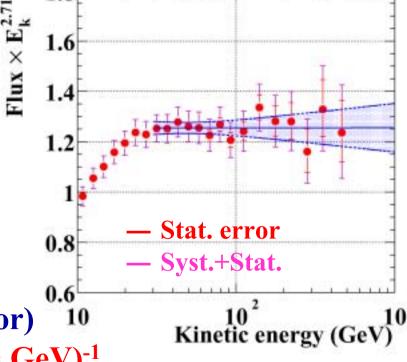
Solar modulation の影響の無い

高エネルギーでは、 べき法則によく従う 観測結果をべき関数でフィット

### フィッティング領域の選択

結果の安定している領域 30 GeV < E<sub>k</sub> < 500 GeV

$$F = \Phi \cdot \left(\frac{E_{\mathbf{k}}}{E_0}\right)^{\gamma}$$



結果 (
$$E_0$$
=100 GeV, syst.+stat. error)

$$\Phi = (4.66 \pm 0.09) \times 10^{-2} \text{ (m}^2 \text{ sr s GeV)}^{-1}$$

$$\gamma = -2.715 \pm 0.025$$

# 他実験との比較 (Spectrometer)

### 測定エネルギー領域

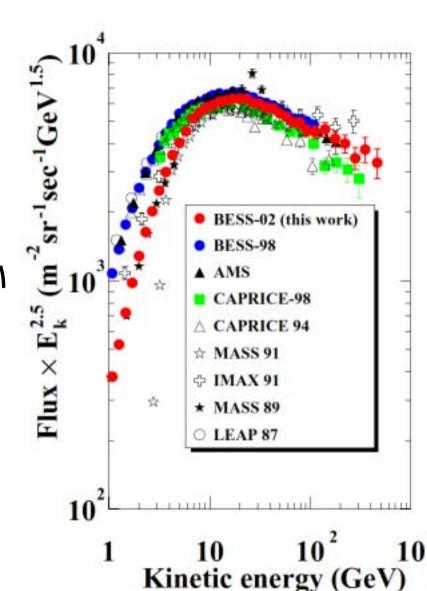
Spectrometer 実験として 初めて500 GeV まで測定

### BESS(1998), AMS-01(1998)

Solar modulation の影響の無い E > 30 GeV では 誤差 (~5%) の範囲で一致

### **CAPRICE(1998)**

10~15%の食い違い



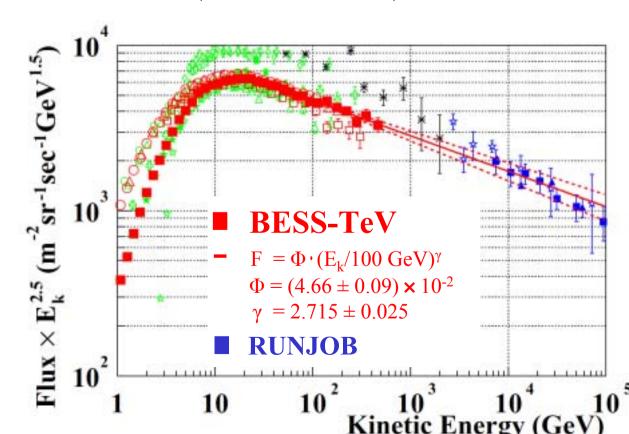
# 他実験との比較 (Emulsion)

### 高エネルギー領域への外挿

べき法則を仮定して外挿

E > 10<sup>4</sup> GeV でEmulsion 実験 (RUNJOB など) の

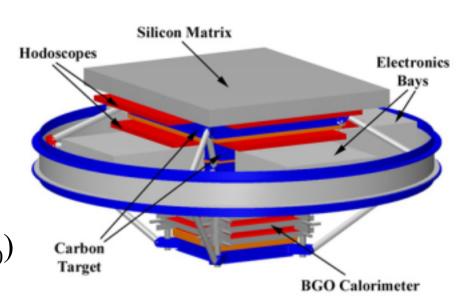
結果とよく一致



### **ATIC**

#### **Balloon-borne calorimeter**

Si Matrix Carbon target ( $\sim 0.75\lambda_0$ ) BGO calorimeter ( $\sim 20X_0$ ,  $\sim 1\lambda_0$ )



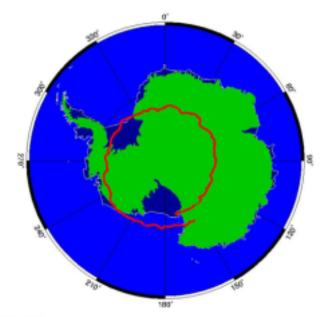
Mean deposited energy: 36%

Energy resolution:  $\sim 40 \%$  (@1 TeV)

### 2000 Flight @ Antarctica

Successful 16-days flight

Preliminary result reported at ICRC 2003



# 他実験との比較 (Calorimeter)

#### **ATIC**

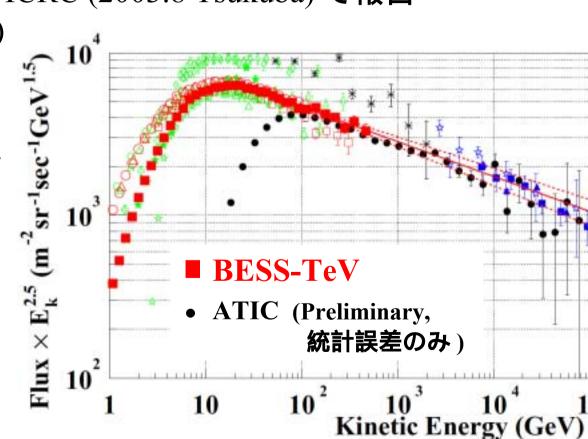
気球搭載型 Calorimeter, 2000年に南極で実験

Preliminary result が ICRC (2003.8 Tsukuba) で報告

(BESS-TeV と同時) 統計誤差のみ

エネルギー絶対精度 による系統誤差の 評価必要

BESS-TeV と相補的



# 過去の結果との比較 (µ)

### 測定運動量領域

0.6 ~ 400 GeV/c という広い 領域に渡る高精度の測定は 過去に例が無い

P < 100 GeV/c

BESS, CAPRICE などの 結果と一致 (5% 以内)

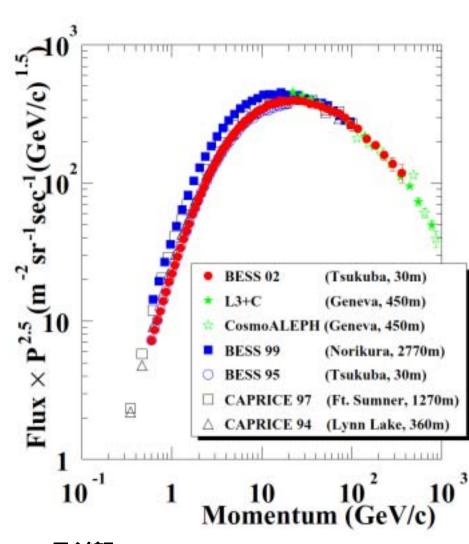
BESS-95 0.6-30 GeV/c

@KEK

BESS-99 0.6-100 GeV/c

@乗鞍岳(2770m)

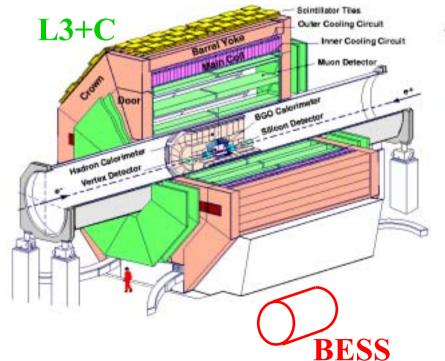
30 GeV/c 以下では標高の違いの影響

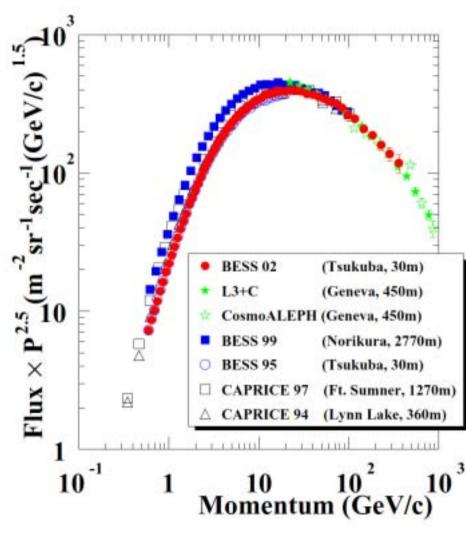


# 過去の結果との比較 (Cosmo-LEP)

#### P > 100 GeV/c

LEP 測定器を使った 実験結果と一致 (10% 以内)





### まとめ

#### **BESS-TeV** spectrometer

新しいドリフトチェンバー開発によりBESS測定器の 運動量分解能を大幅に向上 MDR 200 GV 1.4 TV

### 銀河宇宙線 p, 大気宇宙線 μ の観測

2002年に気球高度および地表にて観測

### 絶対流束

銀河宇宙線 p 1~540 GeV で 15 % 以下の精度で決定 spectrometer 実験としては最高エネルギー

$$\begin{split} & \Phi = (4.66 \pm 0.09) \times 10^{-2} & \text{ (m}^2 \text{ sr s GeV)}^{-1} \\ & \gamma = -2.715 \pm 0.025 & \text{ (E}_0 = 100 \text{ GeV)} \end{split} \quad F = \Phi \cdot \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{\gamma} \end{split}$$

大気宇宙線 μ 0.6~400 GeV/c で 17 % 以下の精度で決定