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



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



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



# 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

<mark>大気 v フラックス計算</mark> (E > 10 GeV) にも必要





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



# 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 = 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 GV r = 3 m R = 1 TV r = 3,000 m (δ~80 μm)

MDR (Maximum Detectable Rigidity) 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



1 10 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> Kinetic Energy (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 $\mu$ 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

宇宙線 µ の測定

### 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 実験毎のばらつき大



10



### 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



気球(Lynn Lake)による約1日の観測 (2002.8) 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 JET/IDC

 $\rightarrow$  Rigidity

 $\rightarrow \beta$ , dE/dx

 $(\equiv Pc/Ze)$ 

Solenoid

**BESS-98** 

断面図

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

**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 spectrometer**



## JET/IDC

### 特徴

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



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







## 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絶対基準が必要



Square-shaped Fibers 1mm

# 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**





# 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 (つくば市) 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



# 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<mark>共通のパラメータ</mark> 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

 Voltage

 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0

**Drift isochrones** 



チェンバーアライメント

JET – IDC エンドプレートの<mark>共通化</mark>により高精度で決定





ラン毎の中心値ずれ < 20 μm R.M.S. キャリブレーションの誤差

## **Event example**

**1**/β:

dE:



# 性能評価

チェンバー位置分解能 目標値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** 設計値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<mark>原理的な限界</mark> 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







# 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 (N<sub>obs</sub>)

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>BG</sub>)



# Trigger



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



# Background 見積り

## 上空 p

 $e,\mu,\pi$  (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





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

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

 $S\Omega, T_{live}$   $S\Omega$  (立体角) M.C. で見積り  $T_{live}$ (live time) 1MHz クロックで測定

ε (efficiency)		見積	р	μ
E <sub>rec</sub>	Track reconstruction	Data	> 99 % (R<100 GV,	w/o ODC)
			> 90 % (R>100 GV,	w/ ODC)
$\epsilon_{single}$	Single track cut	M.C.	80 % (R=100GV)	>99 %
$\epsilon_{\rm PID}$	Particle ID	Data	> 97 %	>99 %
$\epsilon_{ m trig}$	Trigger (T0-CD)	Beam	>99 % (R<10GV)	>99 %
U	(AC)	Data	94 % (R>10GV)	
E <sub>acc</sub>	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<sup>2</sup> 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



 $F_{\text{TOA}} \cdot \mathrm{d}E = \frac{F_{\text{TOI}} \cdot \mathrm{d}E}{n + R_{\text{strain}}}$ 

# 運動量測定誤差の影響



#### 運動量のシフトの影響

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







統計/系統誤差 < 15% となる範囲で決定

**E** < 540 GeV



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</p>

## Results



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





### 運動量範囲 0.57 ~ 400 GeV/c

### **Flux 誤差** (μ<sup>+</sup>+μ<sup>-</sup> flux) 17% 以下

Momenum	$\Delta F_{Stat.}$	$\Delta F_{Syst.}$
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)



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



結果 (E<sub>0</sub>=100 GeV, syst.+stat. error) 10  $\Phi = (4.66 \pm 0.09) \times 10^{-2}$  (m<sup>2</sup> sr s GeV)<sup>-1</sup>  $\gamma = -2.715 \pm 0.025$ 

# 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 $E > 10^4 \text{ GeV}$ でEmulsion 実験 (RUNJOB など)の 結果とよく一致 10sr<sup>-1</sup>sec<sup>-1</sup>Ge 10 **BESS-TeV** $F = \Phi \cdot (E_{\nu}/100 \text{ GeV})^{\gamma}$ $\Phi = (4.66 \pm 0.09) \times 10^{-2}$ $Hux \times E_{L}^{2,2}$ $\gamma = 2.715 \pm 0.025$ **RUNJOB** 10 10 Kinetic Energy (GeV

## 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: ~ 40 % (@1 TeV)

#### 2000 Flight @ Antarctica Successful 16-days flight Preliminary result reported at ICRC 2003





artelia (construction)

# 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) 10 統計誤差のみ エネルギー絶対精度 sr-1sec-1 による系統誤差の  $10^{3}$ 評価必要 BESS-TeV BESS-TeV と相補的 • ATIC (Preliminary, 統計誤差のみ)  $10^{2}$  $10^{2}$ 10 Kinetic Energy (GeV)

# 過去の結果との比較 (μ)



# 過去の結果との比較 (Cosmo-LEP)



# 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  $\Phi = (4.66 \pm 0.09) \times 10^{-2}$  (m<sup>2</sup> sr s GeV)<sup>-1</sup>  $\gamma = -2.715 \pm 0.025$  (E<sub>0</sub>=100 GeV)  $F = \Phi \cdot \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^{\gamma}$ 

大気宇宙線 µ 0.6~400 GeV/c で 17 % 以下の精度で決定