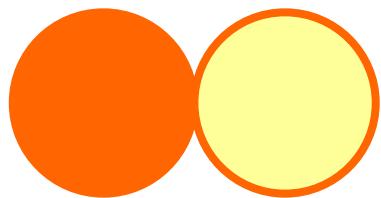


最近の銀河宇宙線の直接観測

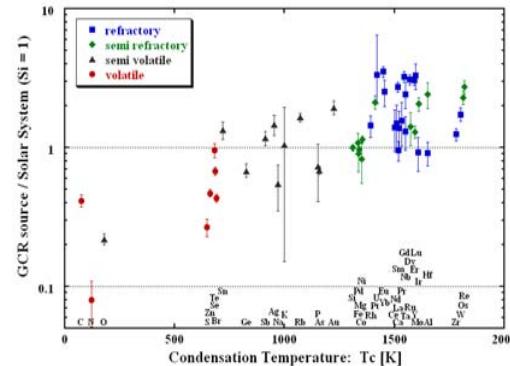
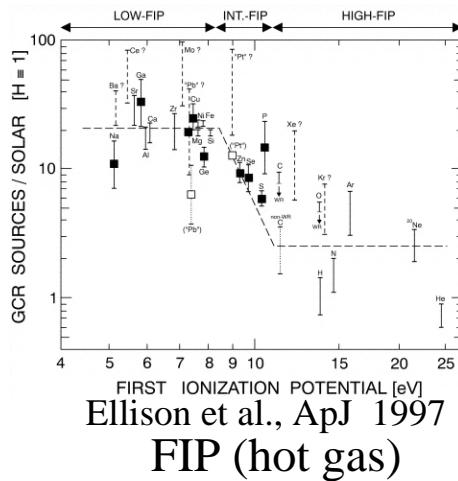


早稲田大学
晴山 慎

31 Aug. 2006
ICRR研究会

Acceleration of Galactic Cosmic Rays

➤ 初期加速(起源):



or

Volatility (dust · grain)

➤ 超新星衝撃波加速: フェルミ加速

$$\frac{dI}{dR} \propto R^{-\gamma}, \quad \gamma = \frac{3}{u_1/u_2 - 1} + 1$$

$$\frac{u_1: \text{上流の流速}}{u_2: \text{下流の流速}} < 4$$

➤ 加速限界(SN衝撃波による):

$$E_{\max} = 200 \cdot Z \left(\frac{0.3 \cdot B}{3 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{n_{\text{H}}}{\text{cm}^3} \right)^{-1/3} \left(\frac{E_{\text{snr}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/3} \left(\frac{V_{\text{sk}}}{10^3 \text{ km s}^{-1}} \right)^{1/3} \text{ TeV}$$

oblique shock, diffusive shock, multiple shocks, different SN types...

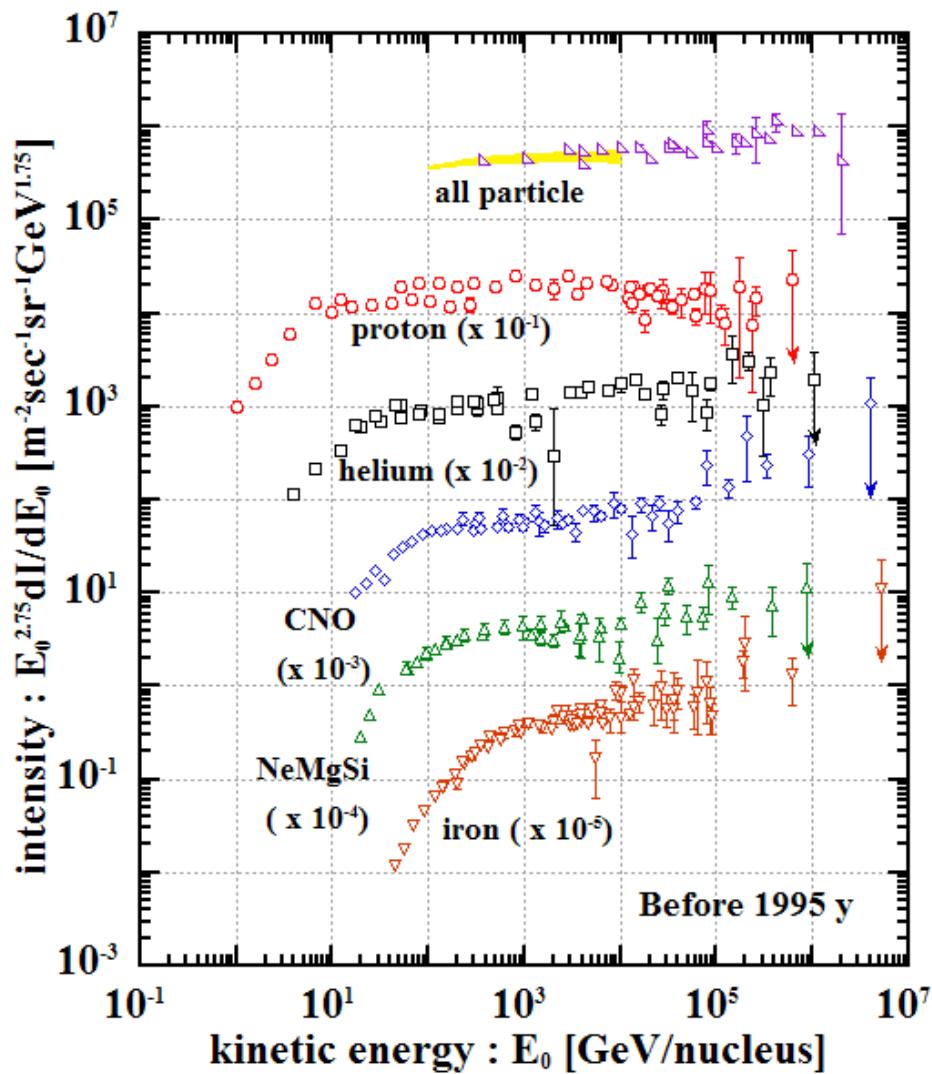
加速場所の環境の理解が重要

Observation results before 1995 yr

1995年以前のエネルギースペクトル：

1. 100TeV領域の観測は数グループのみ(JACEE, SOKOL)
2. 100TeV領域の統計は少ない
3. TeV以下の重粒子観測は数グループのみ(HEAO-3, CRN)
4. 陽子とヘリウムのスペクトルの幕が異なる。
5. 数10TeV領域から重粒子のスペクトルがハードになる(特にCNO)
6. kneeは見えていない
7. 超重核のエネルギースペクトルは測定されていない

1994年～ JACEEの南極長時間気球による観測



Recent observations since 1995 yr

- AMS-01 : 陽子・ヘリウム・反陽子,
数100MeV/n ~ 数100GeV/n, シャトル
- BESS : 陽子・ヘリウム・反陽子
数100MeV/n ~ 数100GeV/n, 気球
- CAPRICE : 陽子・ヘリウム・反陽子, 1~数100GeV/n, 気球
- ACE/CRIS : 重核同位体, 100 ~ 500MeV/n, 人工衛星
- TIGER : 超鉄核, 数100MeV/n ~ 数GeV/n, 長時間気球
- RUNJOB : 陽子 ~ 鉄核, 1TeV/n ~ 数100TeV/n, 長時間気球
- ATIC : 陽子 ~ 鉄核 数, 10GeV/n ~ 数10TeV/n, 長時間気球
- CREAM : 陽子 ~ 鉄核, 10GeV/n ~ 数100TeV/n, 長時間気球
- TRACER : 重核, 1GeV/n ~ 1TeV/n, 長時間気球

Recent observations 1: p and He in < 1TeV

➤ AMS, BESS, CAPRICE98 ...

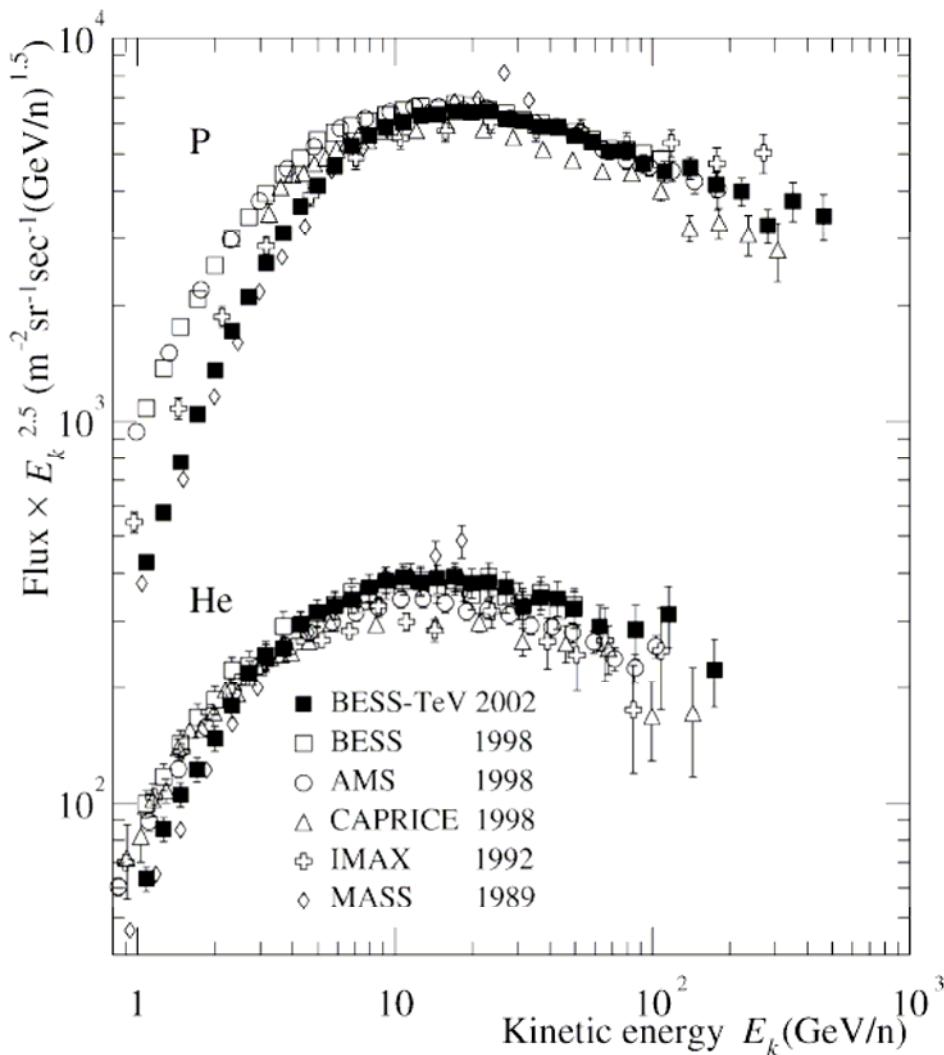
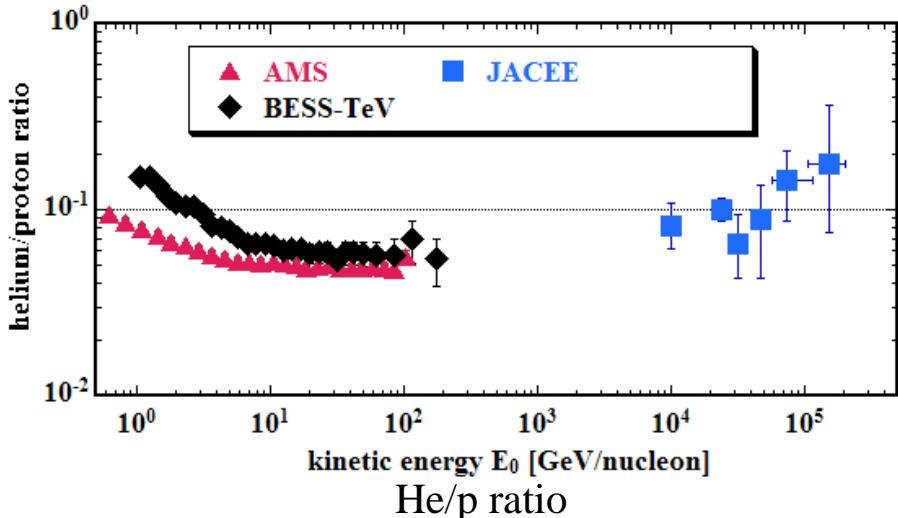
- ✓ Magnetic spectrometerによる精密観測
- ✓ いずれの観測でもよく一致
- ✓ 陽子の強度がRyan et al.より20%程度低い

Spectrum indices:

AMS : -2.780 for p and -2.740 for He

BESS: -2.732 for p and -2.699 for He

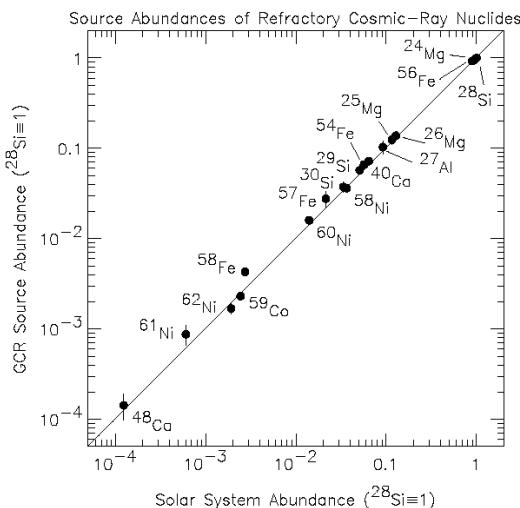
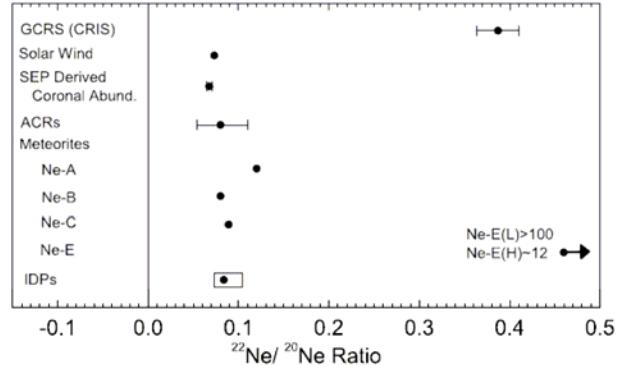
CAPRICE: -2.75 for p and -2.67 for He



Haino et al., Phys. Lett. 2004

Recent observations 2: heavy isotopes < 1GeV

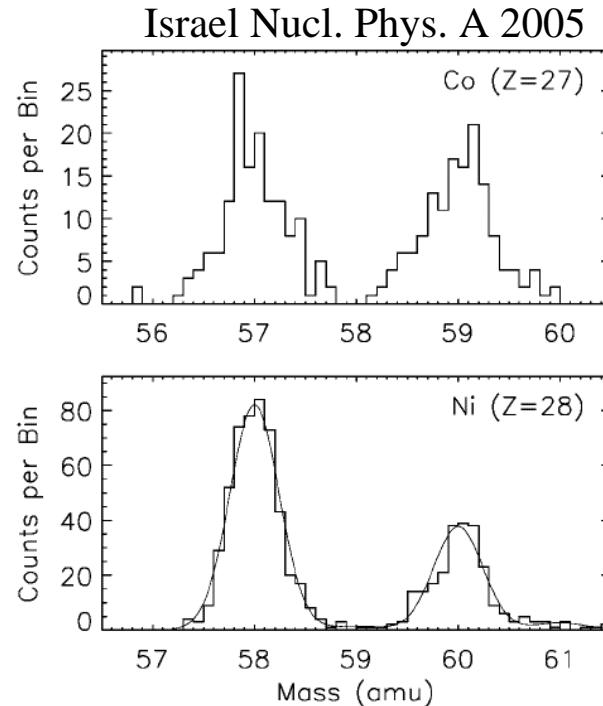
➤ ACE/CRIS @ L1 point since 1997
Scinti. fib. – Silicon(Li)



Israel Nucl. Phys. A 2005

太陽系組成に対して、
 $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ 比が5倍、
 $^{58}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ 比が1.2倍
大きい

→ OB-アソシエーション内の
WR星からの寄与



$^{59}\text{Co}, ^{59}\text{Ni}(\tau_{1/2} \sim 70\text{kyr by EC-decay})$
の解析
元素合成から宇宙線加速までの
時間は 10^5 年以上

→ ISMが宇宙線の種

Recent observations 3: Ultra-heavy < several GeV

➤ TIGER @ Antarctica (2000, 2002)

Trans-Iron Galactic Element Recorder

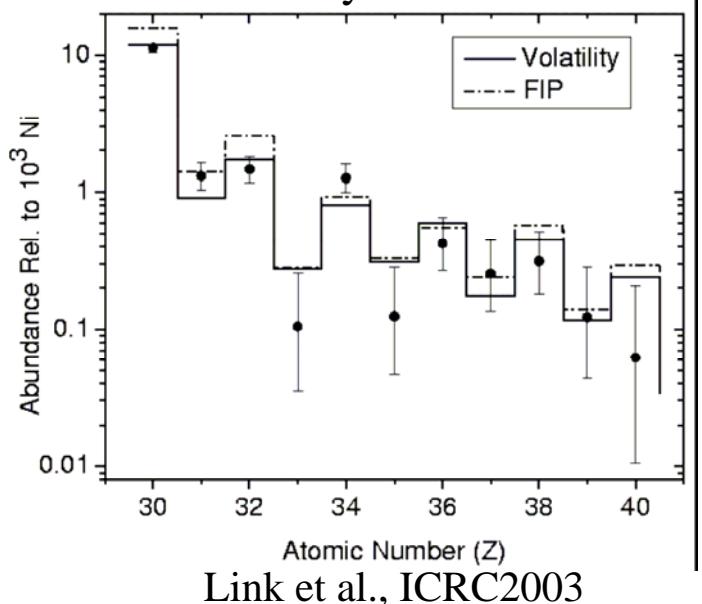
Total flight time : ~50 days/ 2flights

Total exposure factor : $96 \text{ m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{hour}$

$\text{Ca} \sim \text{Zr}$ in $0.3 \sim >2.5 \text{ GeV}$

Scintillator - Cerenkov

FIP or Volatility



Link et al., ICRC2003

ZnとGeはVolatility modelに近い

GaはFIPに近い(Volatility modelとは 1.5σ)

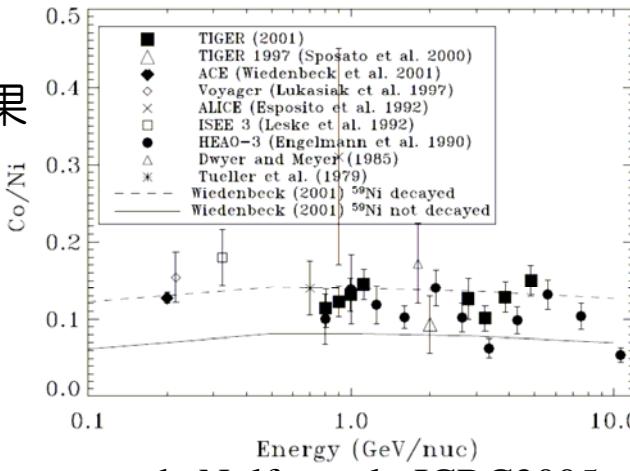
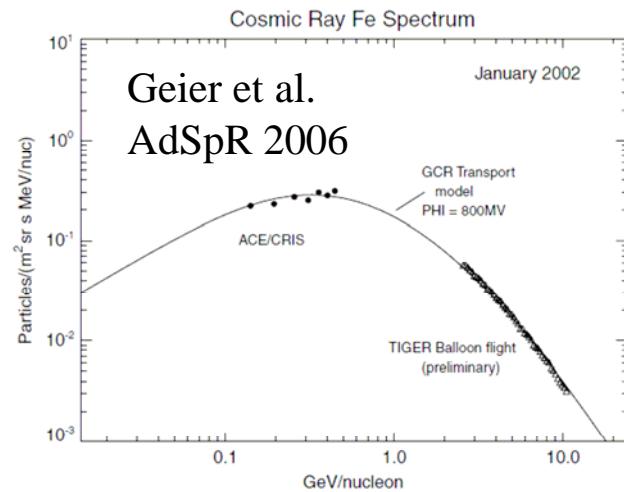
31 Aug. 2006

ICRR研究会

超鉄核のスペクトルも可能？

Co/Ni ratio
CRISと同様の結果

Iron spectrum
for Microquasars search



de Nolfo et al., ICRC2005

Recent observations 4-1: p,He and heavy > 1TeV

➤ RUNJOB @ Siberia (1995~1999)

Russia-Nippon JOint Balloon experiment

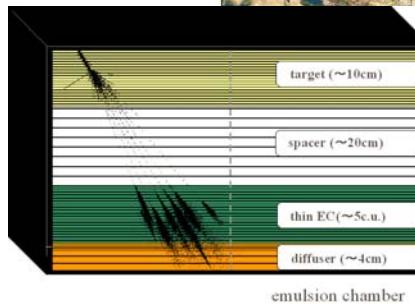
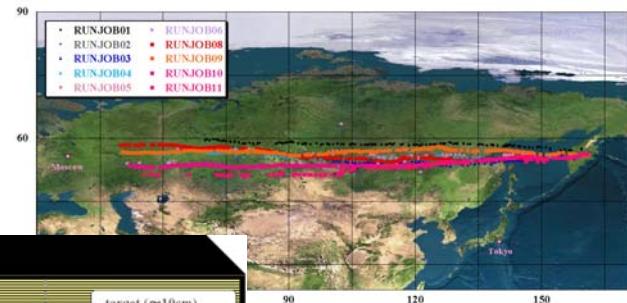
Total flight time : ~59.9 days/ 10flights

Total exposure factor : ~1200 m²·sr·hour

p ~ Fe in 10 ~ 1000 TeV

emulsion chamber

観測および解析は終了



➤ ATIC @ Antarctica (2000,2002)

Advanced Thin Ionization Calorimeter

Total flight : ~31days / 2flight

Total exposure : ~ 168m² sr hour

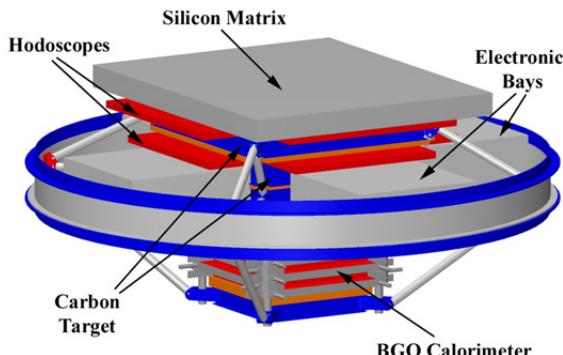
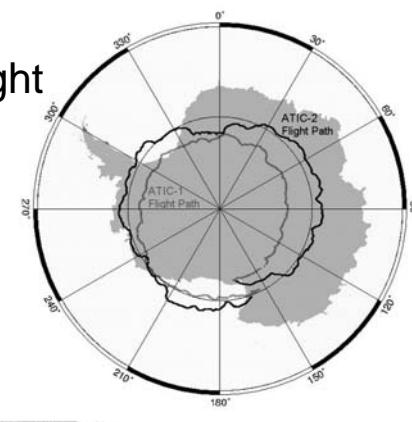
p ~ Fe in 10 GeV ~ 100 TeV

Silicon Matrix

- scintillator

- BGO calorimeter.

ATIC 1st flight



3回目(2005)の観測は失敗(中止?)

Recent observations 4-2: p,He and heavy > 1TeV

➤ CREAM @ Antarctica (2004,2006)

Cosmic Ray Energetics And Mass

Total flight time : ~69.9 days/ 2flights

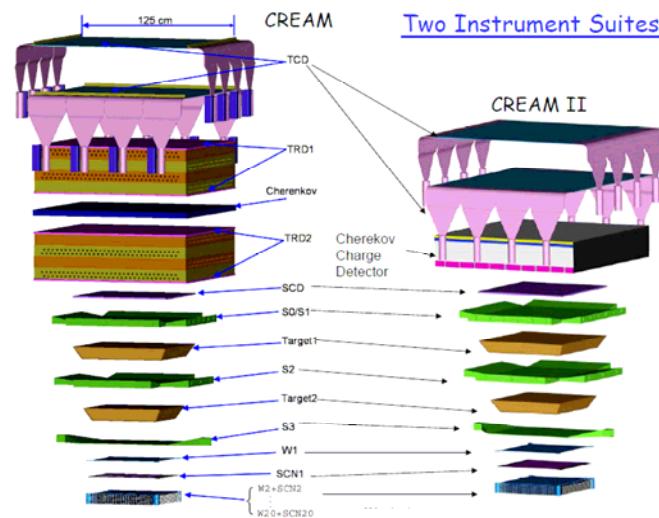
Total exposure factor : ~??? m²·sr·hour

p ~ Fe in 1 ~ 1000 TeV

Scintillator - TRD - Silicon

- W+sintillator calorimeter

観測結果は報告されていない



➤ TRACER @ Antarctica (2003) and

Sweden-Canada (2006)

Transition Radiation Array

for Cosmic Energetic Radiation

Total flight time : 14.5 days/ 2flights

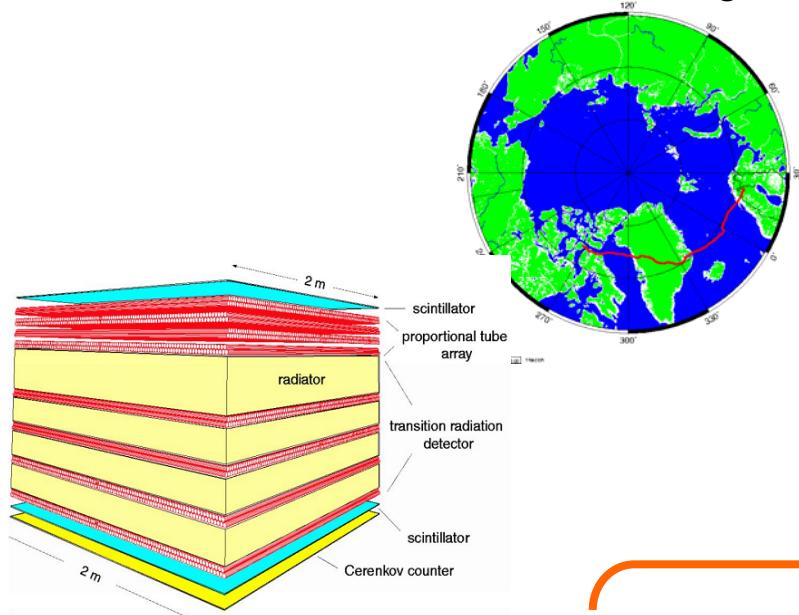
Total exposure factor : 1740 m²·sr·hour

B(O for 2003 flight) ~ Fe

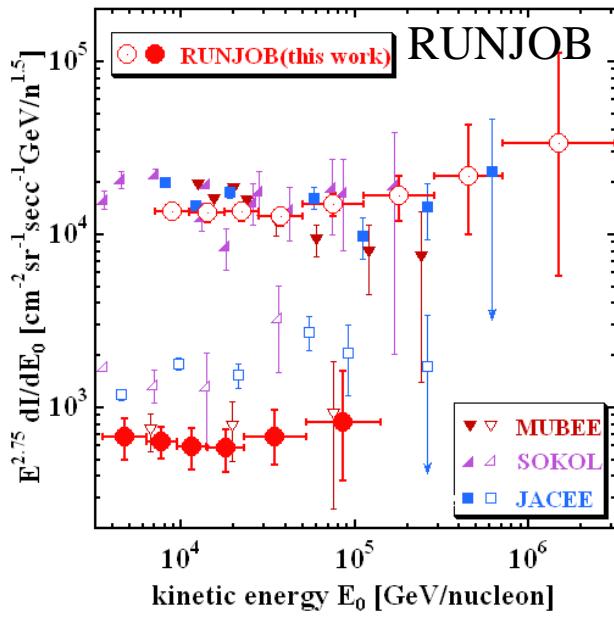
in 10 GeV ~ 100 TeV

Scintillator - Cerenkov - TRD

TRACER 2nd flight



Recent observations 4-3: p and He spectra



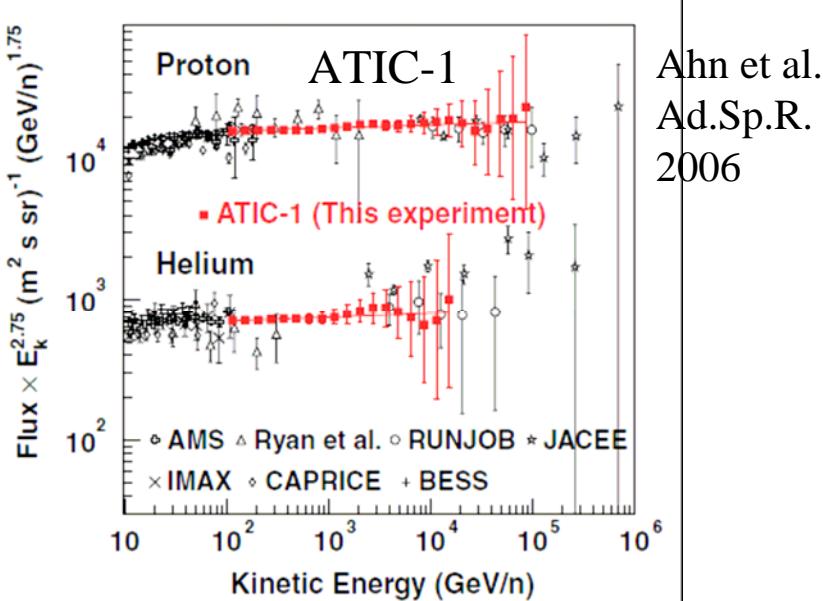
Derbina et al.
ApJL 2005

For RUNJOB,

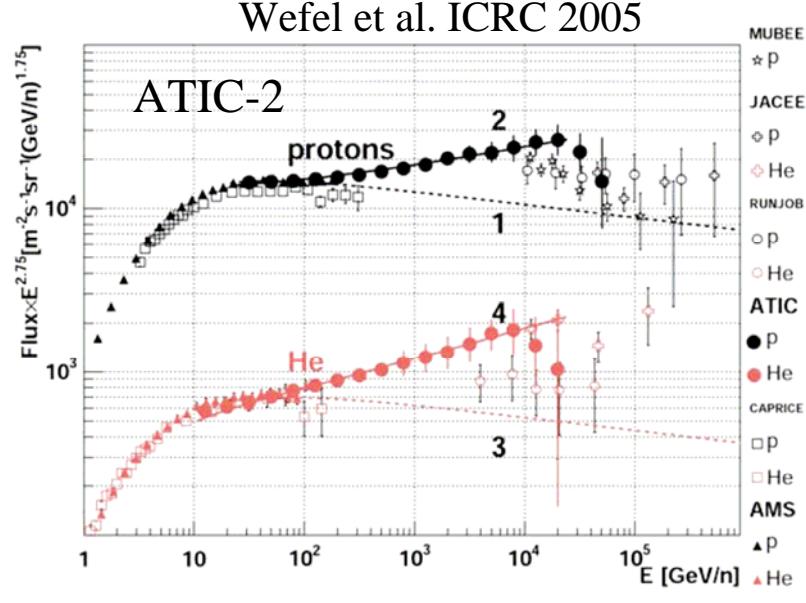
- ✓ ヘリウムの強度はJACEE,SOKOLの約半分
- ✓ 陽子とヘリウムのスペクトルはほぼ平行

For ATIC,

- ✓ ATIC-1と2でスペクトルが異なる
- ✓ BGO calorimeterのキャリブレーション中

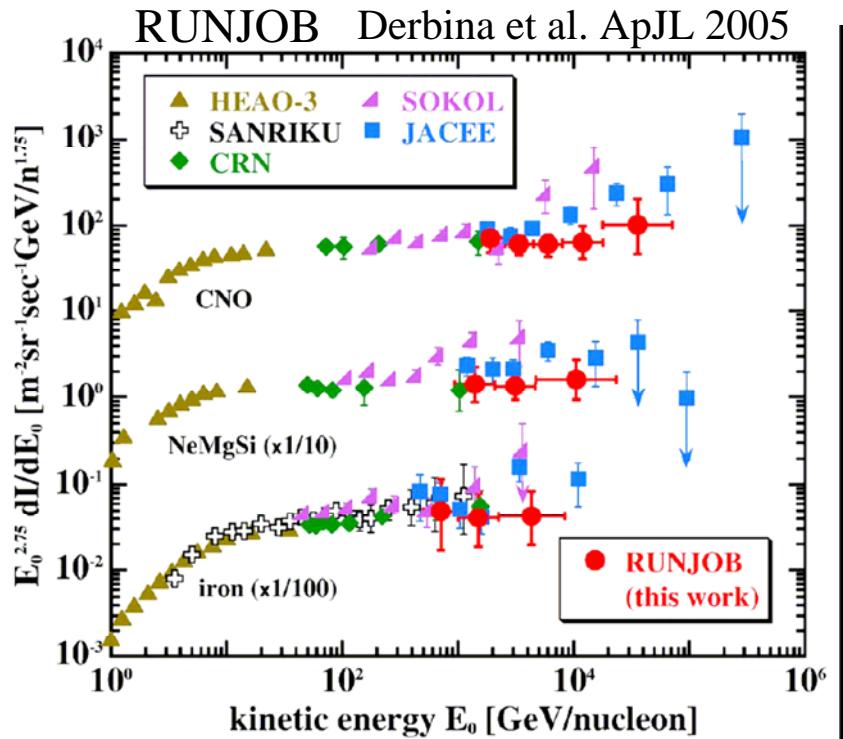


Ahn et al.
Ad.Sp.R.
2006

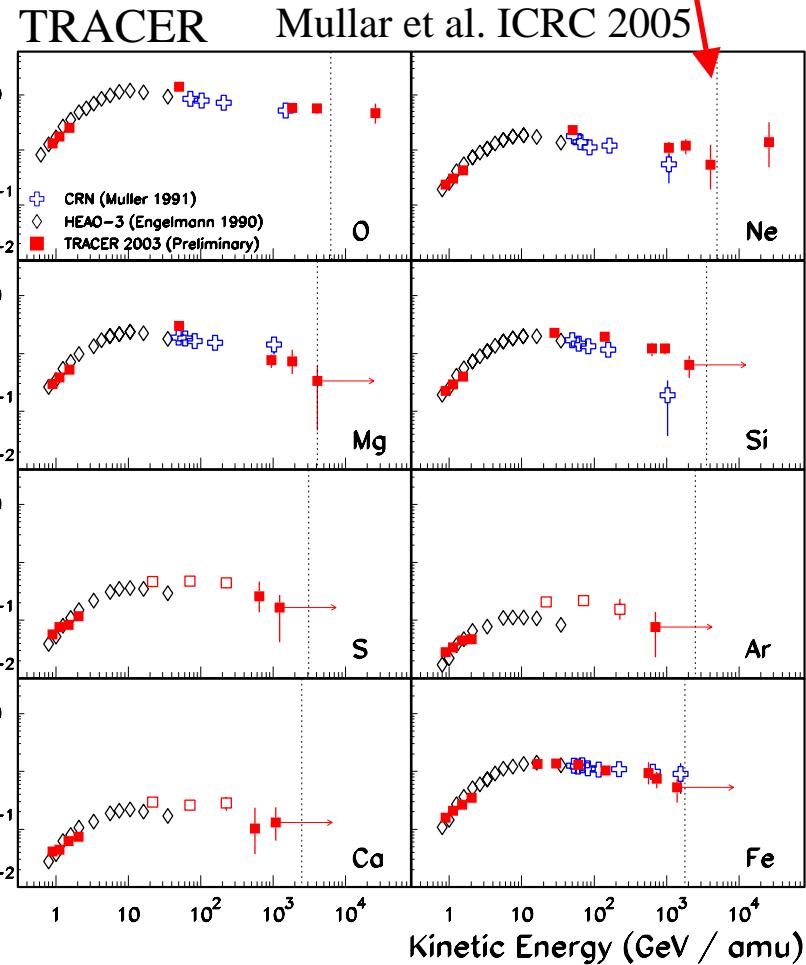
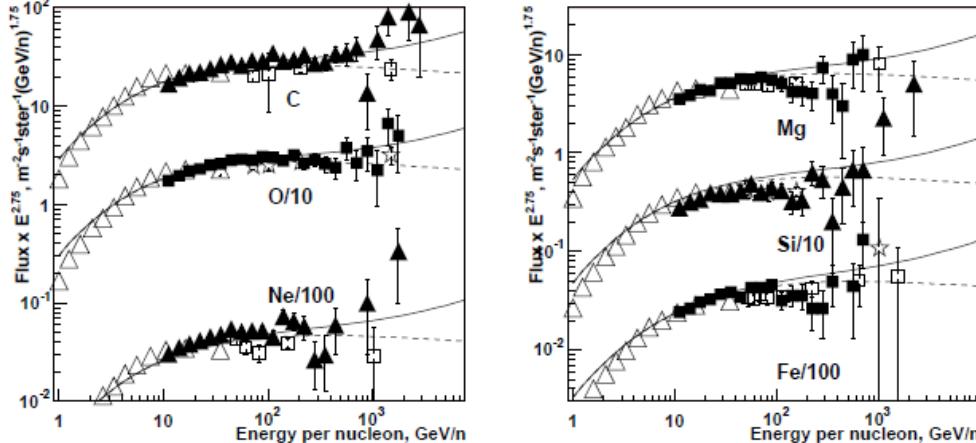


Recent observations 4-4: heavy elements

$E_{\text{tot}} = 10^{14} \text{ eV}$



ATIC-2 Panov et al. AdSpR 2006



- ✓ 数TeV/n領域以下ではよく一致
- ✓ 数TeV/n領域以下では統計が不十分

Discussion 1: Initial acceleration

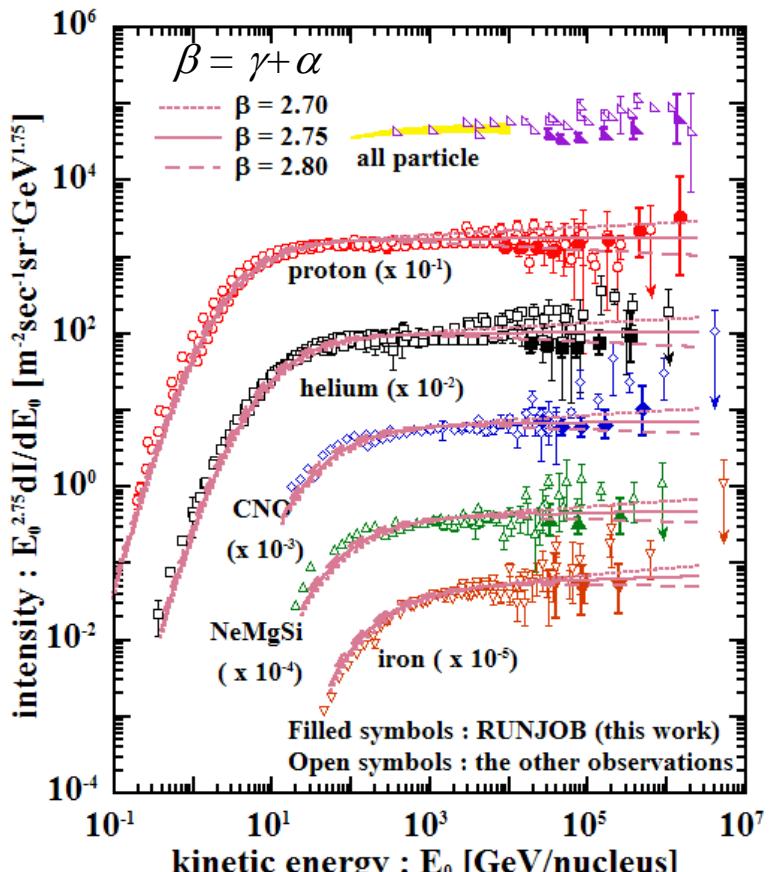
- ✓ 元素合成から加速までは10万年以上 (TIGER and CRIS)
- ✓ ^{22}Ne と ^{58}Fe 同位体異常は OB-アソシエーション内のWR星の寄与(CRIS)
- ✓ UHGCR 成分はVolatility modelに近いようである(TIGER)
- ✓ 銀河内SNeの約75%はOB-アソシエーション内で起こっていることが期待
(Higdon and Lingenfelter , ApJ 2005)
- ✓ SN1987Aの爆発の数カ月後にはSN ejectaによるdust · grainが形成
(Kozasa et al., ApJ 1989)

OB-アソシエーション：大質量星の集まり(type-II, type-Ib/c)

- GCRは、特に重核と超重核が、ISM or CSMのダストから OB-アソシエーション内で加速されている？
爆発のタイプによるスペクトルの違いはある？
スーパーバブル内での磁場と星間ガス密度は？
多重衝撃波加速は？

初期加速問題やスーパーバブル起源を明らかにするには、重核、超重核の化学組成、同位体組成、エネルギースペクトルの精密観測が必要

Discussion 2: SN shock acceleration



伝播モデルの仮定:
 源でのスペクトル $\propto R^{-\gamma}$
 拡散係数 $\propto R^\alpha$

- ✓ RUNJOB - ATIC-1 - BESS, HEAO-3
 for all element,

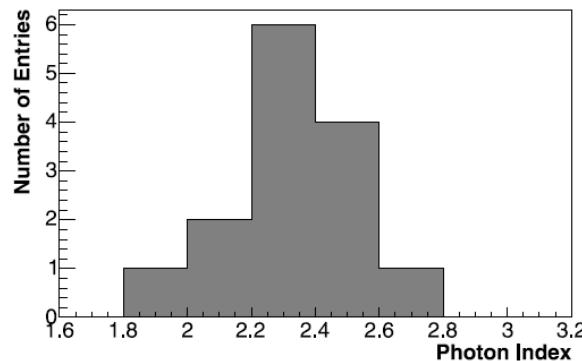
$$\beta = 2.75 \text{ and } \alpha = 1/3 \rightarrow \gamma \sim 2.4$$

$$\alpha = 1/2 \rightarrow \gamma \sim 2.25$$

→ 陽子から鉄核まで同じ加速源を示唆

- ✓ JACEE - ATIC-2 - BESS, HEAO-3
 for proton, $\beta = 2.75$
 for $>$ helium, $\beta < 2.7$

→ 陽子とそれ以上で異なる加速源を示唆
 Ex: Biermann et al., PR 1995



Photon index
 obtained by H.E.S.S.

Aharonian et al.
 ApJ 2006

FIG. 8.—Distributions of the photon index of the new sources. The mean photon index is 2.32 with an rms of 0.2.

Discussion 2 -2:SN shock acceleration

GCR spectrum ; $\frac{dI}{dR} \propto R^{-\beta}$

$$\frac{dI}{dE} = \frac{dR}{dE} \frac{dI}{dR}$$

$$\propto E^{-\frac{\beta+1}{2}} \left(1 + \frac{E}{m_p}\right) \left(1 + \frac{E}{2m_p}\right)^{-\frac{\beta+1}{2}}$$

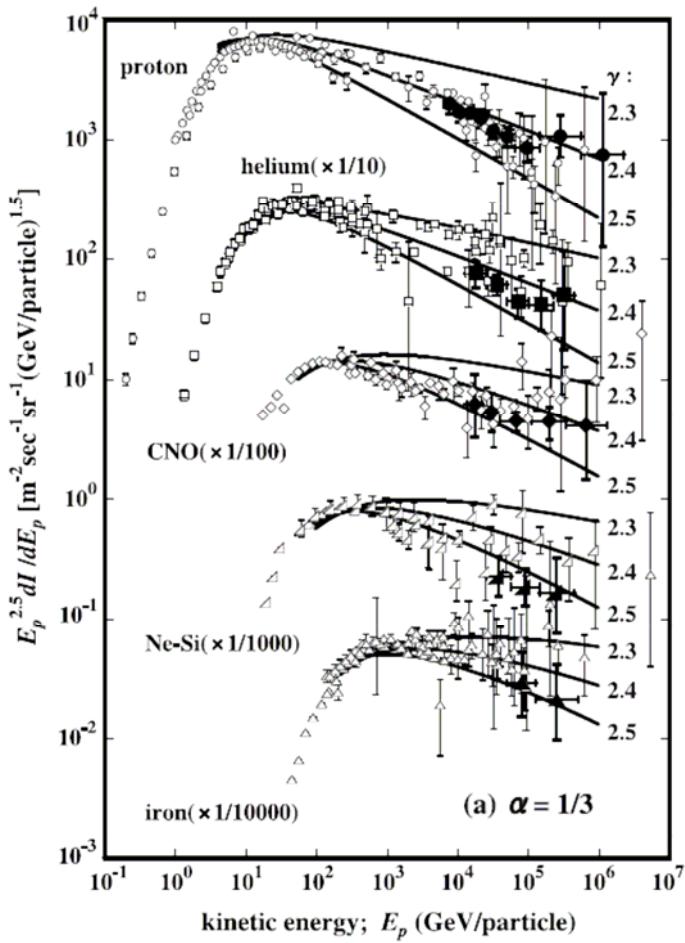
Case of $E \gg m_p$: $\frac{dI}{dE} \propto E^{-\beta}$

Case of $E \ll m_p$: $\frac{dI}{dE} \propto E^{-\frac{\beta+1}{2}}$

Maximum point $E_{B,0}$ in $E^b \frac{dI}{dE}$ spectrum

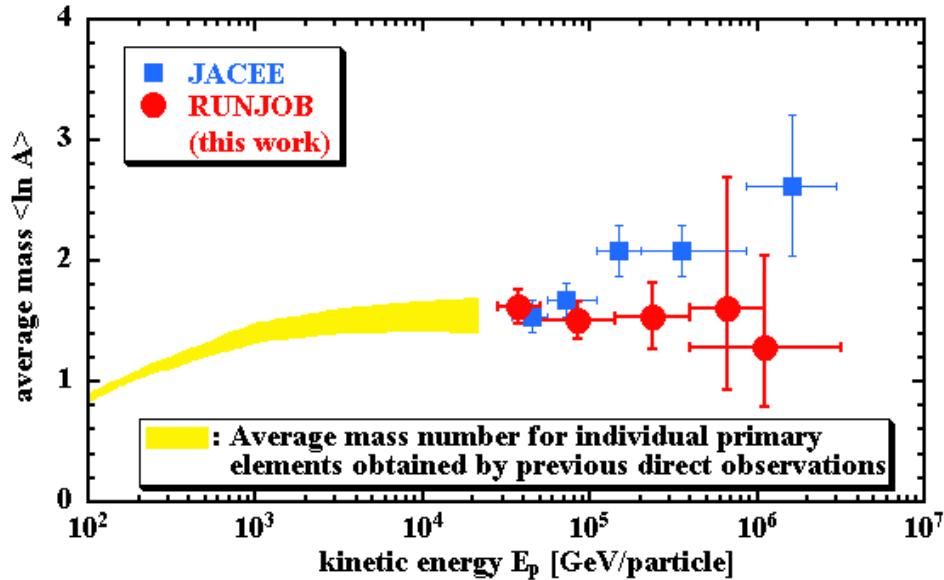
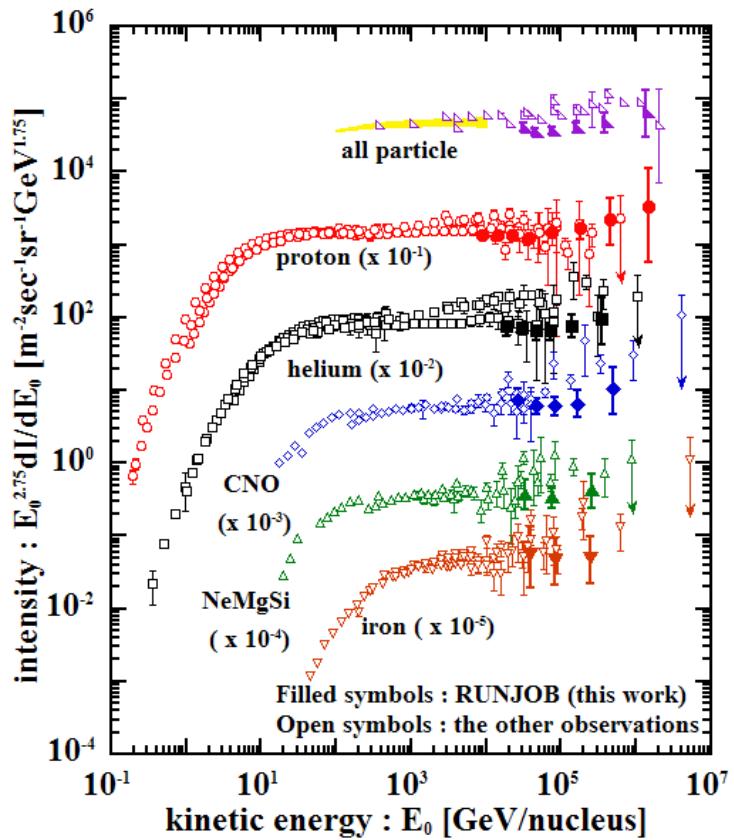
$$E_{B,0} \sim \frac{2b-\beta}{\beta-b} m_p \sim 9 \text{ GeV} \text{ at } \beta=2.75$$

($m_p=1 \text{ GeV}$, $b=2.5$)



- (a) $\alpha = 1/3$
- ✓ スペクトルが 10A GeV付近で折れ曲がっている
→ R依存の加速を示唆？

Discussion 3 : acceleration limitation by SN shock



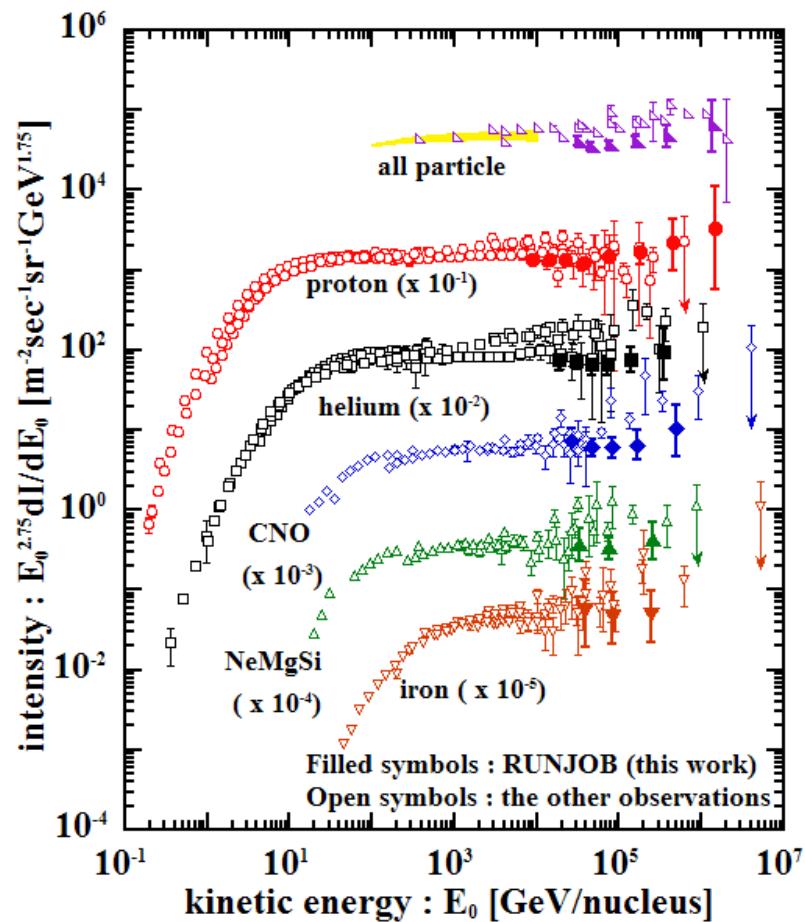
- ✓ 加速限界は見えていない
- ✓ 数100TeV以上の統計は少ない

✓ JACEEのエネルギーの増加とともに
ある平均質量数の増加は、加速限界
による陽子のカットオフのためでは
ない

Conclusion

- 1995年以降、新しい直接観測結果がGeV-PeV領域で報告されてきている
- TeV領域以下の観測結果は一致している
- TeV領域以上のエネルギースペクトルと化学組成の完全な決定には至っていない
- 直接観測でkneeはまだ見えていない
- 超重核領域の観測が不足

- TeV領域以上での各元素でのエネルギースペクトルの精密な決定が必要
- 超重核領域の元素・同位体組成とエネルギースペクトルの精密な決定が必要



長時間・大面積の直接観測が重要

