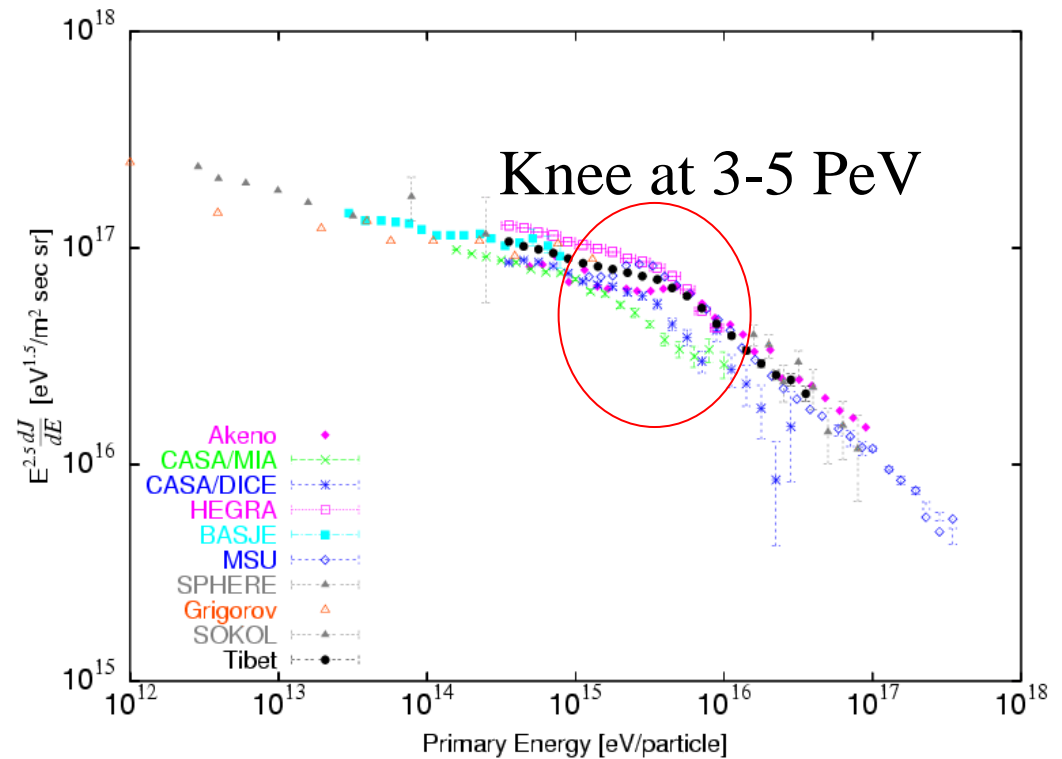
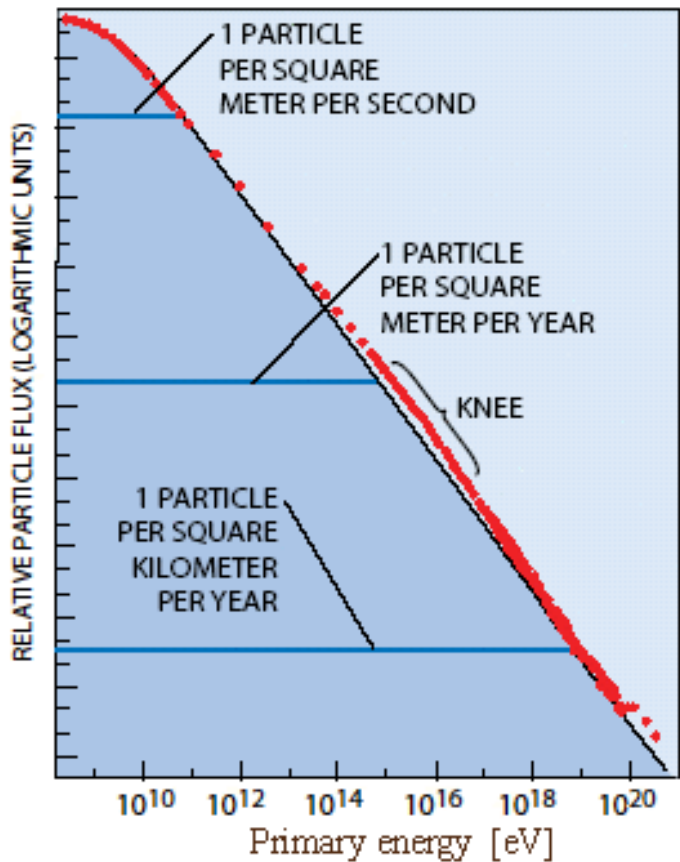


空気シャワーコア観測による Knee起源の解明

横浜国大 工 柴田 槇雄
他、Tibet As γ Collaboration

2006.1.13 太陽圏シンポジウム・STE研究集会

全粒子エネルギースペクトルの折れ曲がり (Knee)



Kneeの物理と種々の観測

加速機構：超新星衝撃波によるフェルミ一次加速モデル

加速限界 $Z \times 10^{14}$ eV (Z:原子番号)

→化学組成

$< 10^{14}$ eV: 直接観測

$> 10^{14}$ eV: 地上での観測

Knee以上のエネルギー領域

Oblique accel.、New Source、

Extra galactic source (AGN, GRB)

→最高エネルギー宇宙線 (GZK)

宇宙線の起源：宇宙線を生み出す天体・注入される元素

γ 線点源探索—チェレンコフ望遠鏡

空気シャワーアレイ

超重核—固体検出器

伝播：1次核・2次核比 (B/C, sub-Fe/Fe)

一次電子スペクトル

化学組成観測の現状

- 直接観測 (Kneeは到達不可能 Low flux)

BESS, AMS <1TeV (high statistics)

気球・衛星(counter) <数10TeV

気球ECC (JACEE, RUNJOB) < 100 TeV (low stat.)

ATIC, CREAM, TRACER(南極バルーン)

< 100TeV (high stat.)

CALET計画(ISS) < 1000TeV

- 地上観測 ($\sigma_{\text{inel}} \propto A^{2/3}$) 10^{14} - 10^{17} eV

Xmax : Fluorescence, Cherenkov, equi-intensity-cut

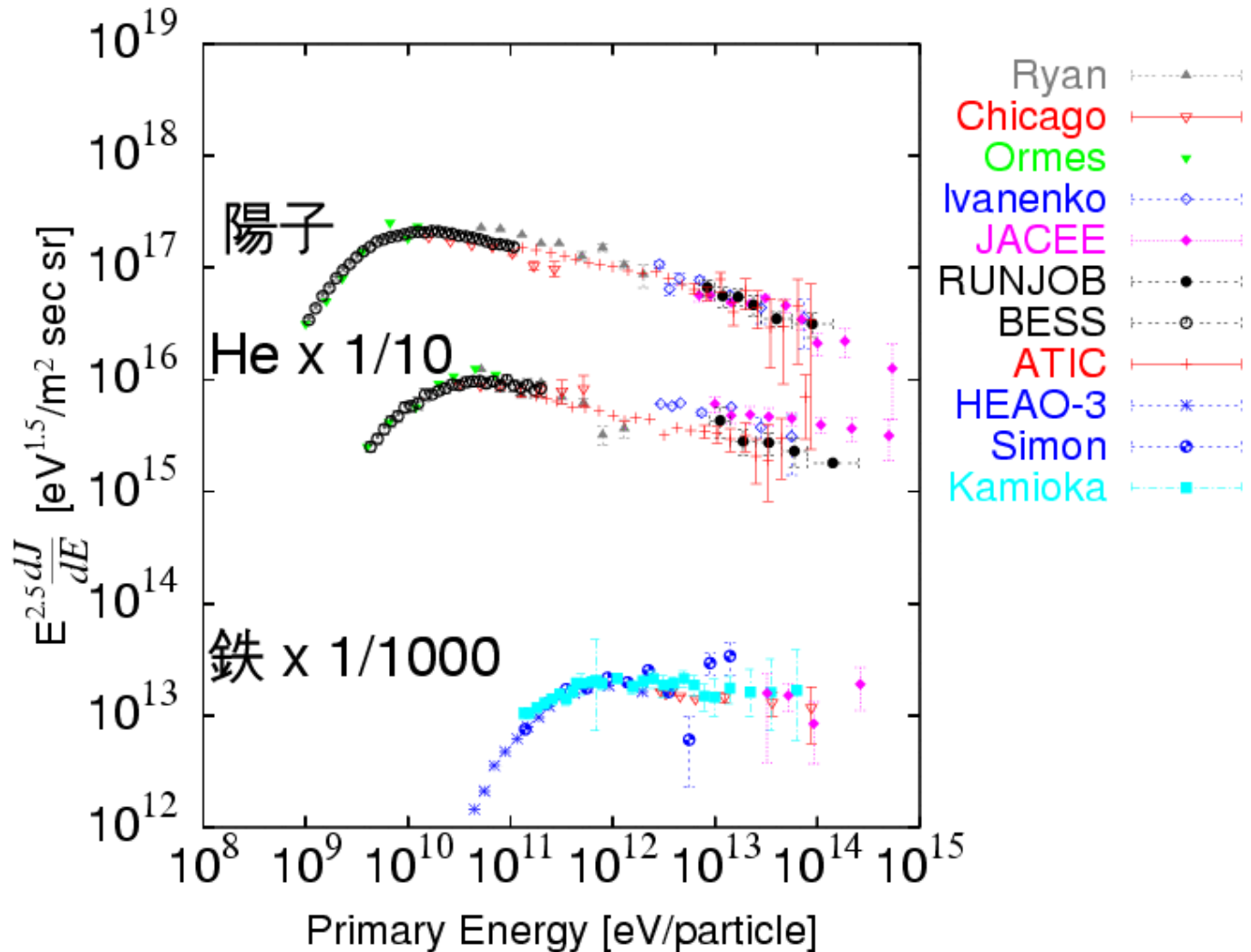
e- μ ratio : 核:発生高度と空気密度の違いによるK, $\pi \rightarrow \mu$ 増加

lateral structure of e, μ , hadrons

time structure of Cherenkov

AS core のエネルギー分布(Tibet)

直接観測の結果



間接測定

2つの困難:

1.シミュレーション

- 高エネルギーハドロン相互作用モデル依存が避けられない。
QGSJET,SIBYLL,DPMJET,NEXSUS,VENUS,.....
→LHC(Elab $\sim 10^{17}$ eV)による最前方の測定
 - 低エネルギー相互作用、Nucleus-Nucleus effect etc.
→シミュレーションコードの精密化の努力
- ## 2.低地での観測はcomposition依存と大きな揺らぎのためエネルギー決定精度が悪い。
- 高山での観測が有利

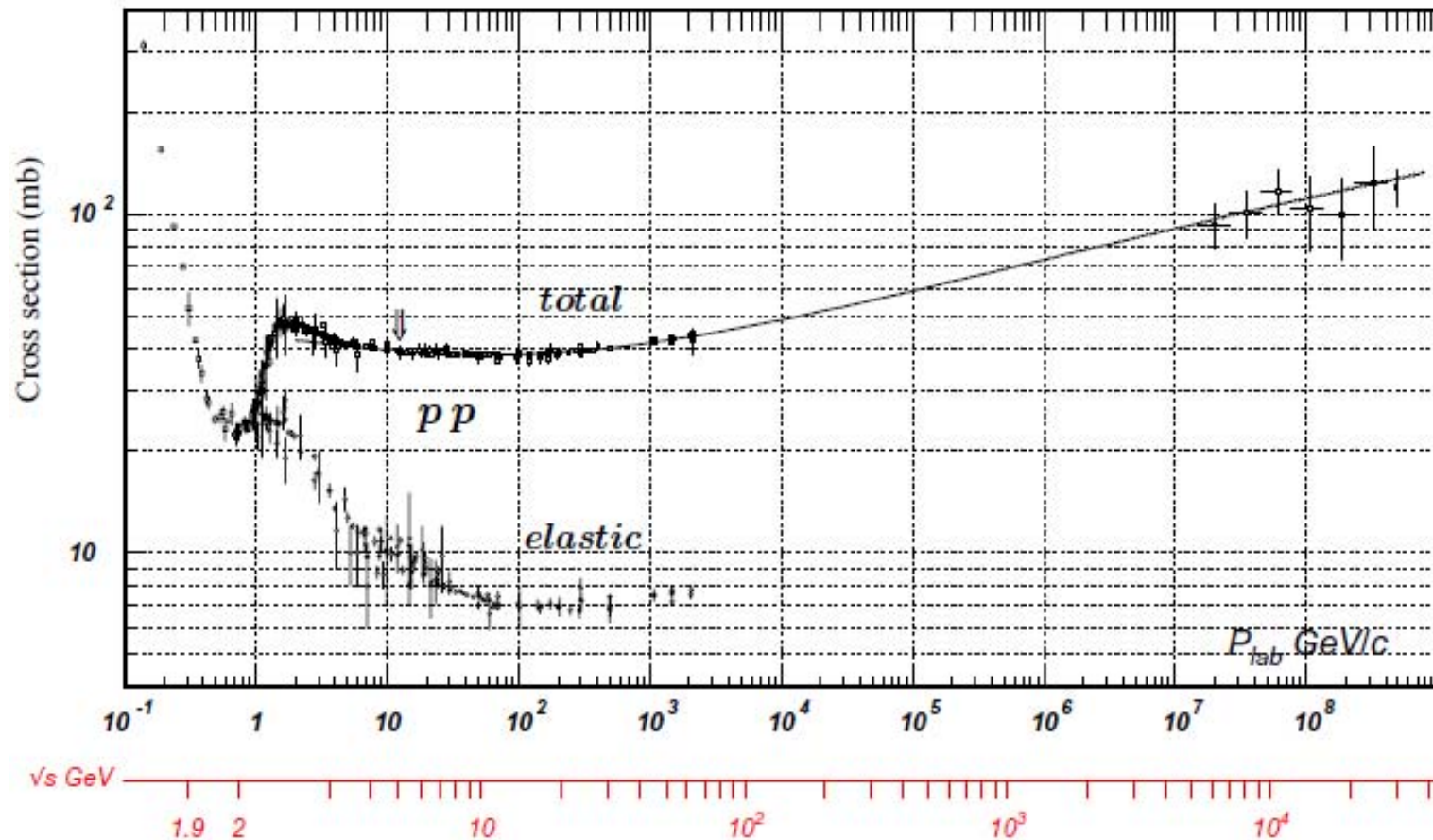
これまでの多くの実験ではイベント毎の入射粒子を弁別する精度は無く、“平均質量”のような描像が議論されてきた。

Hadronic Interactions at High Energies

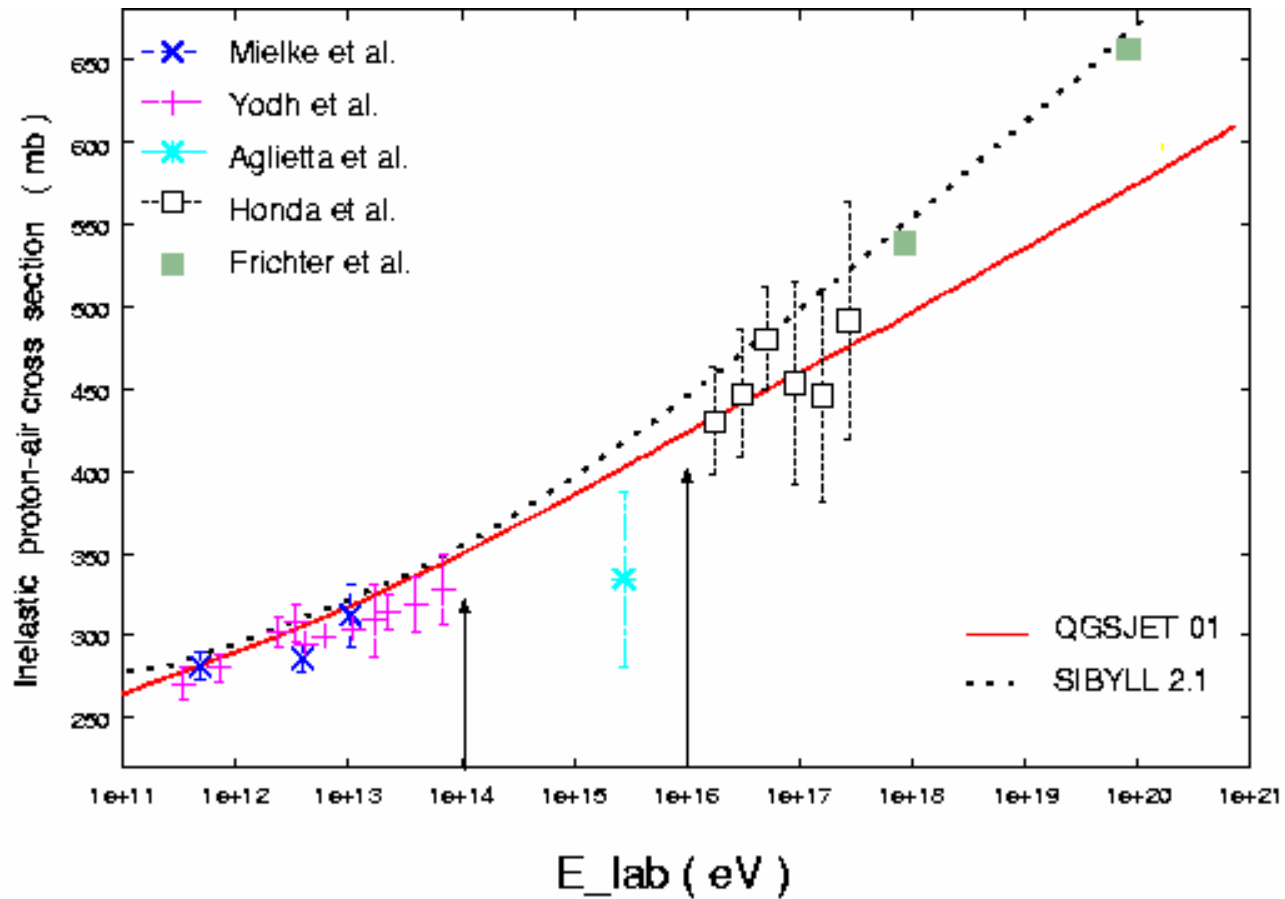
- Inelastic cross section
- Multiplicity
- Rapidity
- Feynman scaling
- Target effect

Simulation model: QGSJET01 SIBYLL2.1

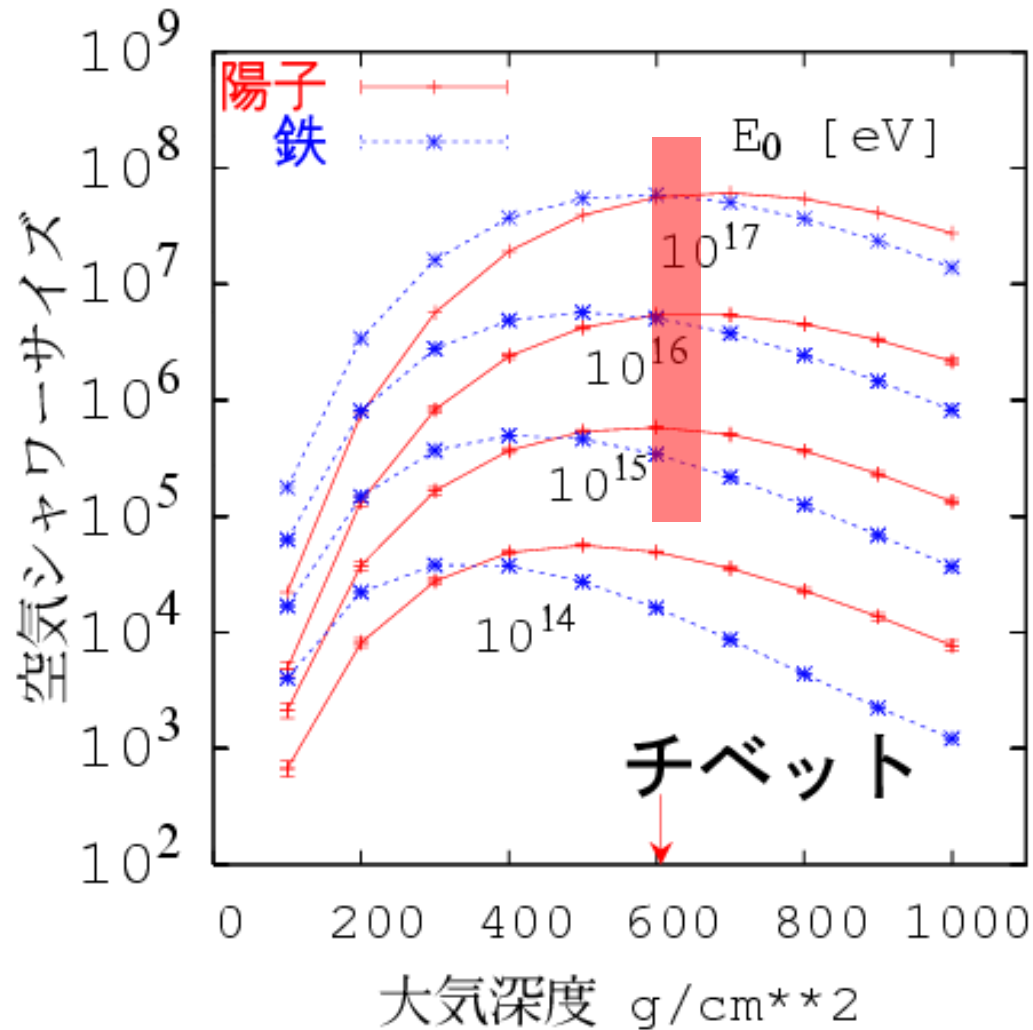
P-P cross section



P-Air inelastic cross section

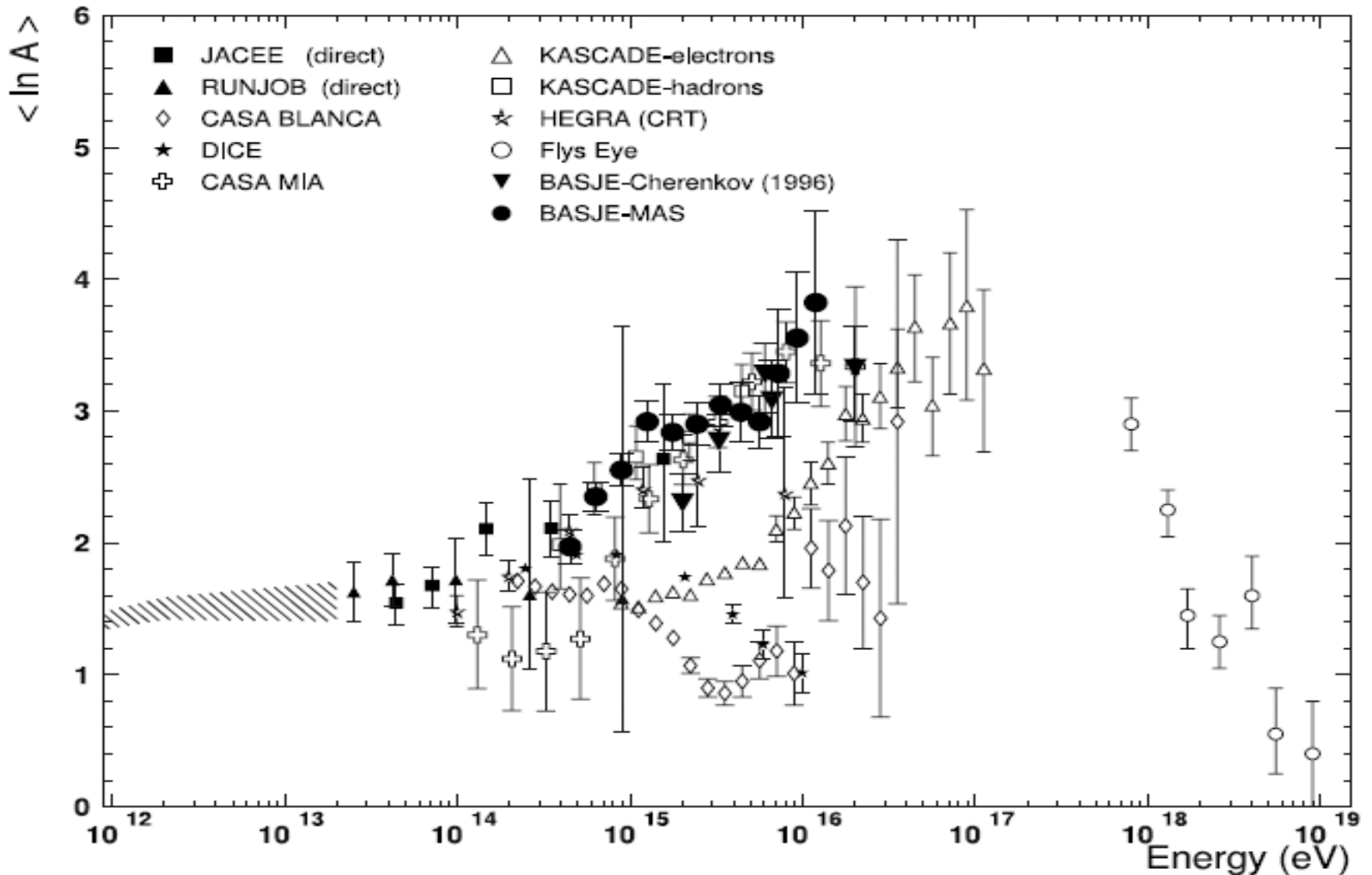


高山での空気シャワー観測



高山では核種によらずほぼShower maximum付近を観測することによりエネルギー決定精度が良い。

平均質量数



間接測定で入射粒子を弁別

実験グループ

測定器

解析手法

Tibet

AS+EC+BD

Artificial Neural Network

high thresholdによりP,He-originのeventの割合を高め、ANNによりheavy componentの除去を行う。

Protonの Purity > 85%, Selection efficiency >70%

Kascade

AS+ μ 検出器

2D-Unfolding Method

ASサイズビン毎に μ サイズ分布を再現するように各成分の混合比を決める

(deconvolution by 4 components P,He,CNO,Si-Fe)

BASJE計画 高山でAS+大気蛍光観測

ASのstarting pointを決める

チベット連動実験

Tibet As_γ Collaboration

Phase1:1996—1999 AS+EC+BD

～200例→陽子・ヘリウムスペクトル

Phys. Lett. B **632** 58-64 (2006)

Phase2:2002—2005 AS+BD

Light component(P+He)を高統計測定

～3000例

Phase3:次期計画 AS+BD grid array

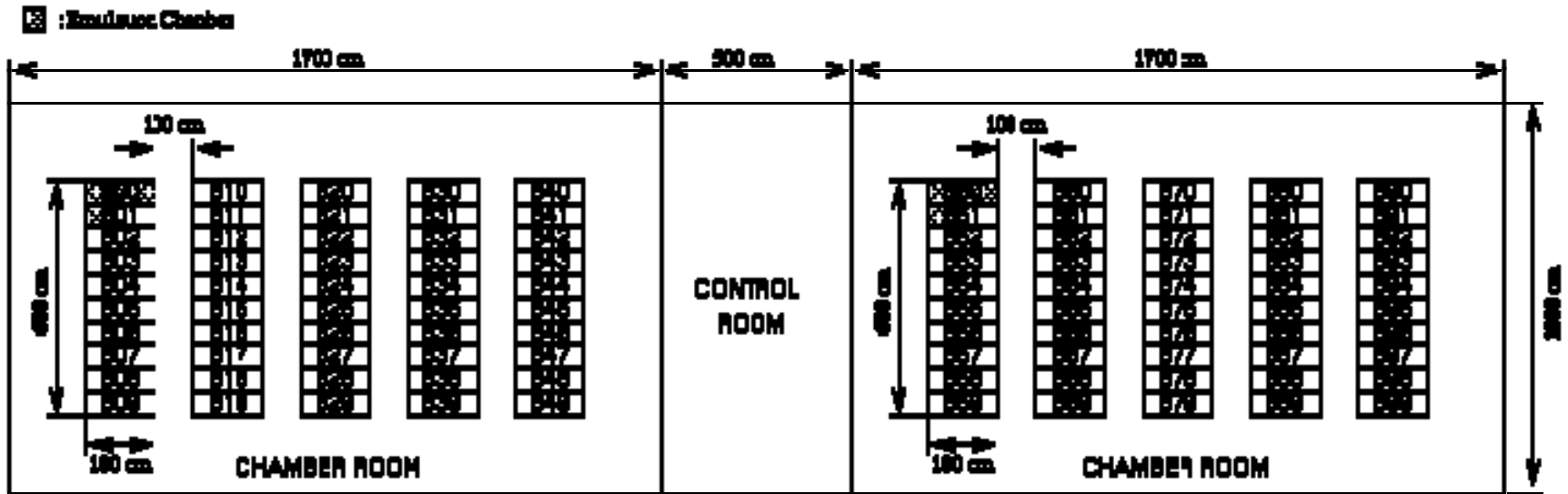
Knee の主成分観測(鉄?)



Emulsion Chambers and BDs



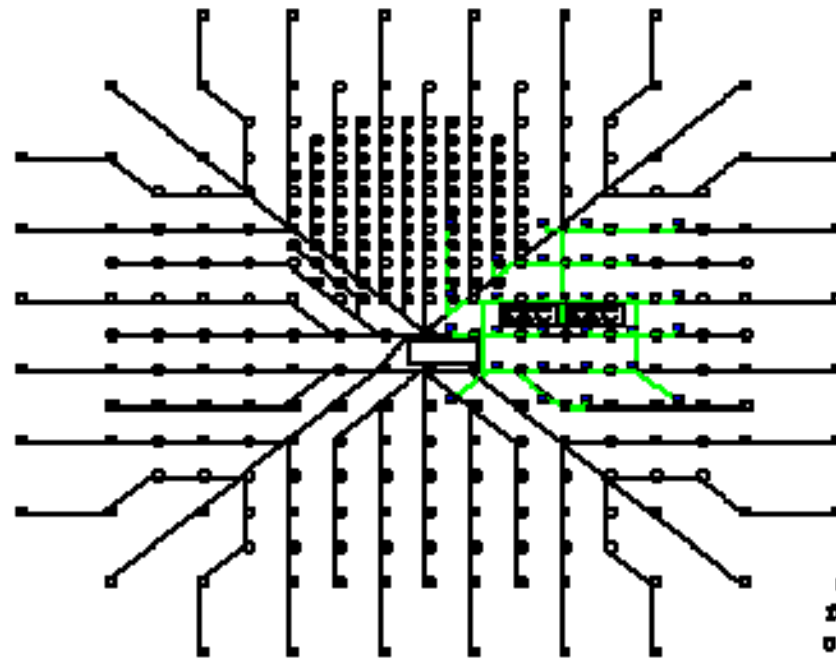
Burst detectors



Tibet II/HD array

Tibet II/HD Array

Feb. 19. 1999
 H. Chhabhi
 Arrangement
 by A. Chhabhi
 (Feb. 17. 1999)



15 m

0.5 m² FT-detector ■
 for burst exp. 12 ch
 0.25 m² FT-detector -
 for burst exp. 12 ch

0.5 m² FT-detector ○ ● ■
 110 ch

0.5 m² FT-detector ○ ●
 W/D-FMT 22 ch

0.5 m² D-detector □
 20 ch



Shop & Restaurant

Hospital

Post Office

Emulsion Chamber と Burst Detector

ガンマファミリーとは

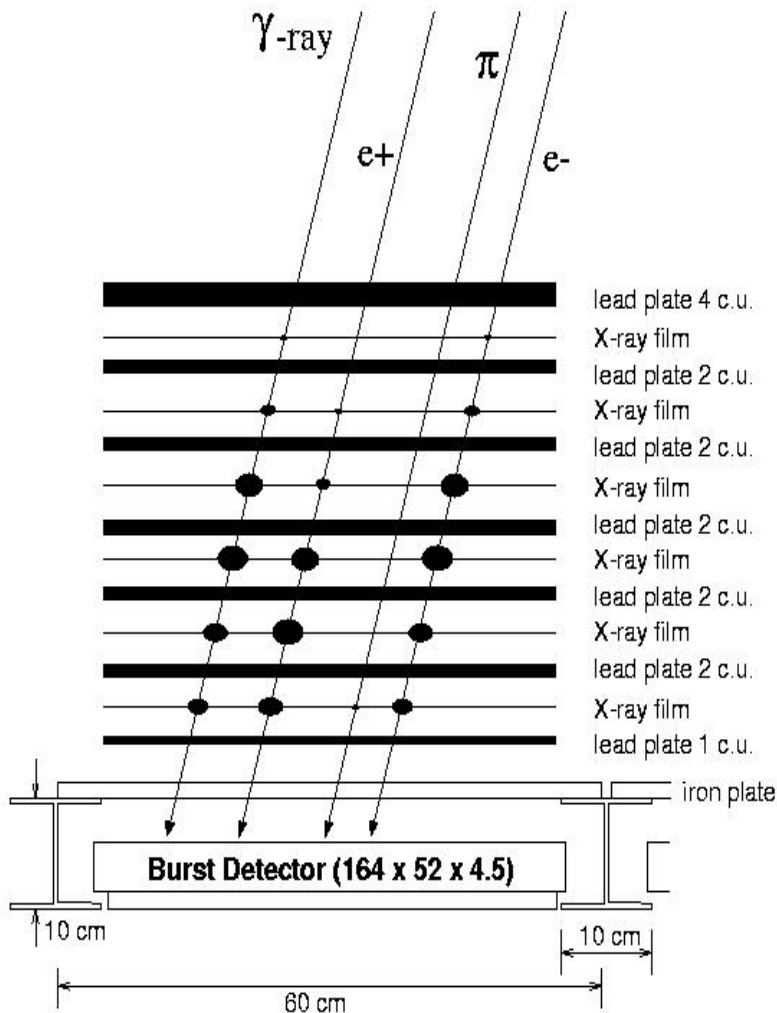
AS中心のTeV以上の γ 線・電子群が数cmの広がりで見入射する。



鉛中でカスケードシャワーに発達し、6層のX線フィルムにシャワースポットを残す。

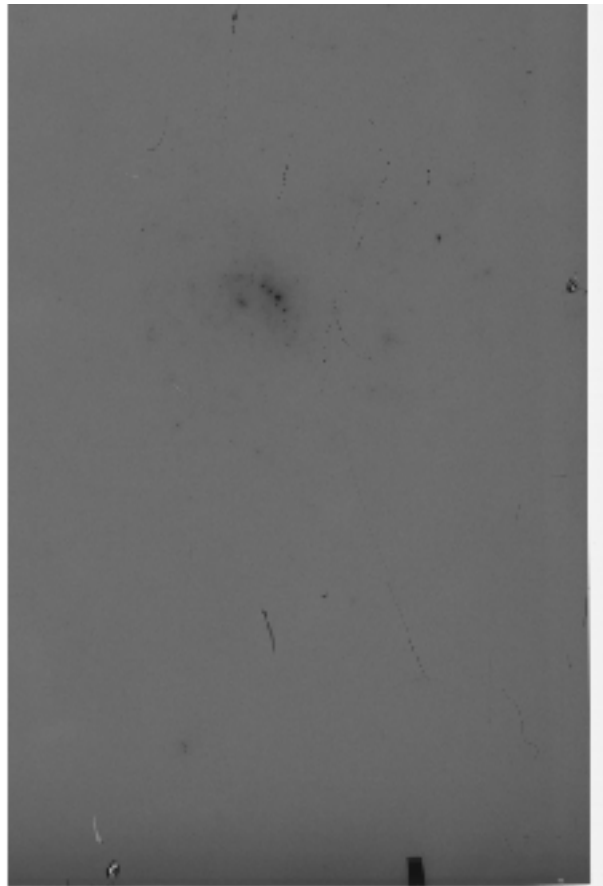


カスケードシャワーは更に下のBurst Detectorを鳴らし時間情報を与える。(N_b>10⁵)



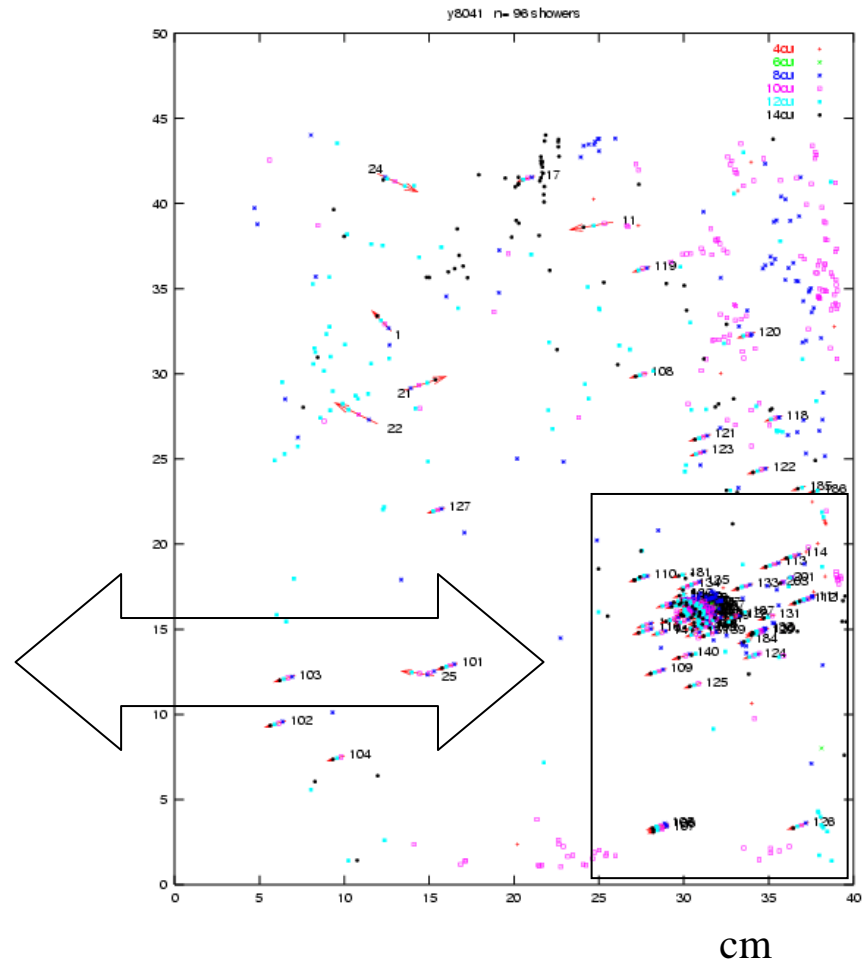
イメージスキャナーを用いた γ ファミリー解析

S.Ozawa et al. NIM A, **523**,193-205 (2004)



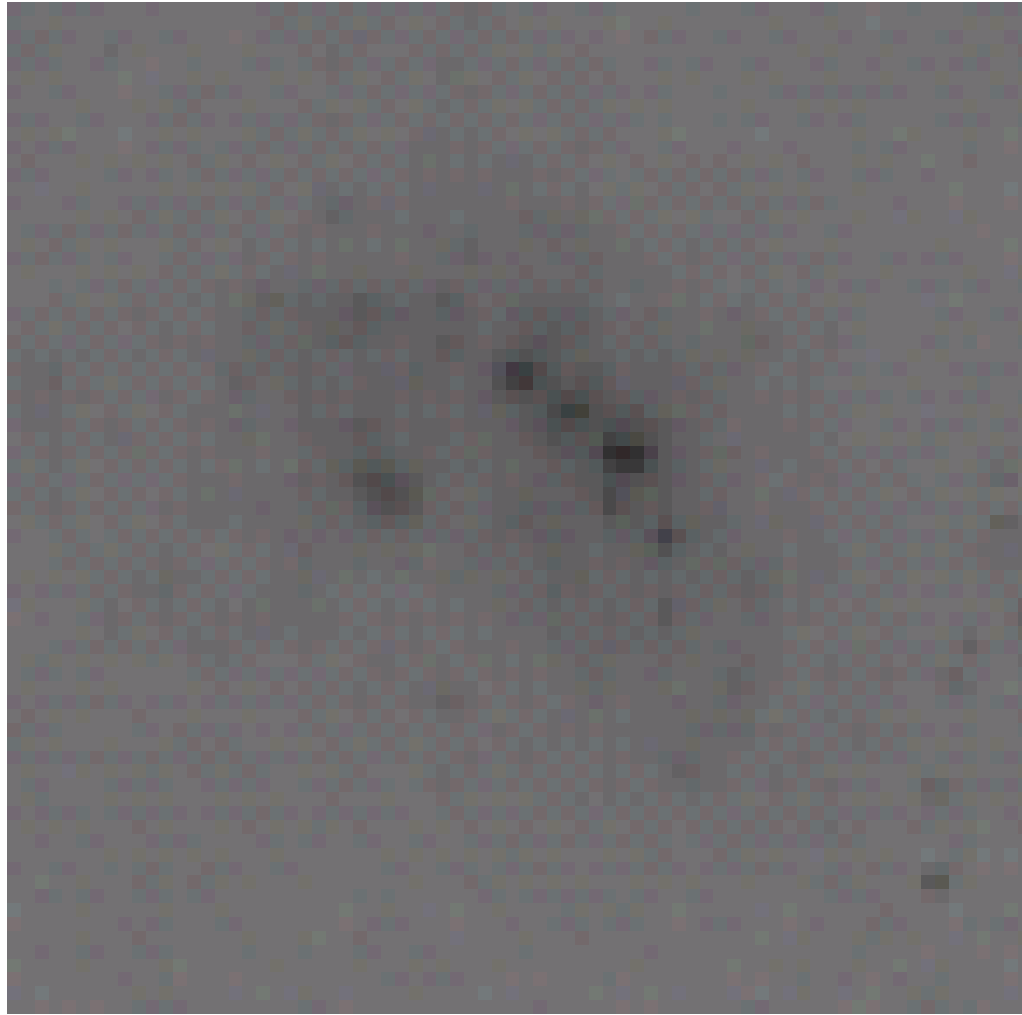
← 15cm →

X線フィルムイメージ
600DPI (42.3 μ m resol.)



6枚のフィルムから再構成
したシャワーマップ(40cm x 50cm)

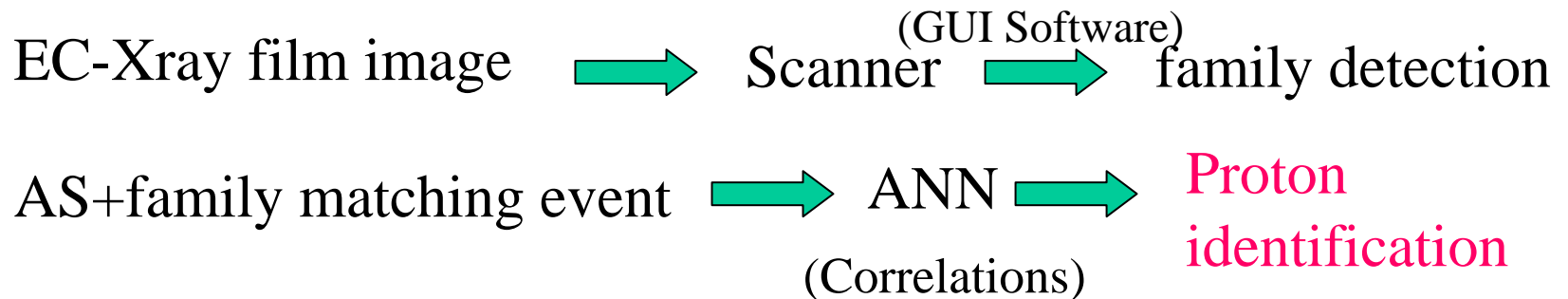
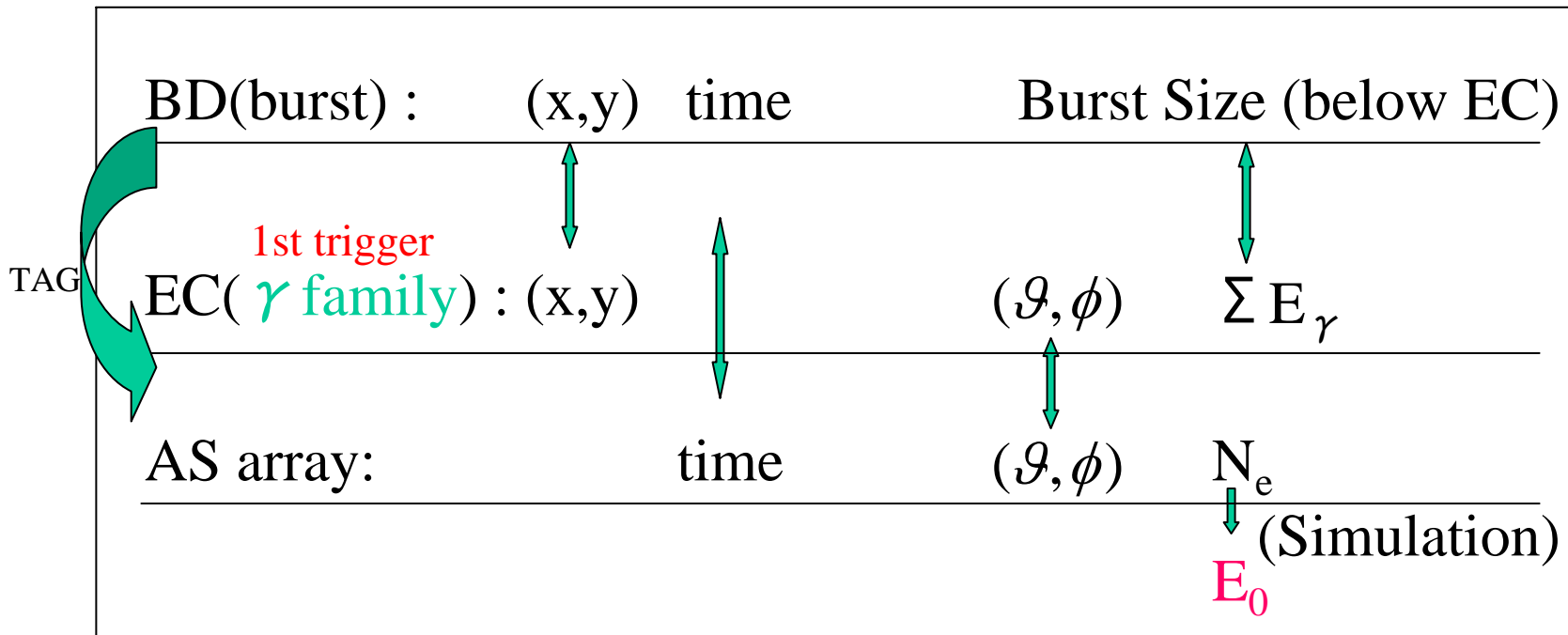
ガンマファミリーの中心部



2cm

How to obtain proton spectrum?

Hybrid system



Simulation

Corsika

QGSJET,SIBYLL (high energy int. model)

x

Heavy Dominant Composition (HD)

Proton Dominant Composition (PD)

= 4通りのモデルを用いた解析

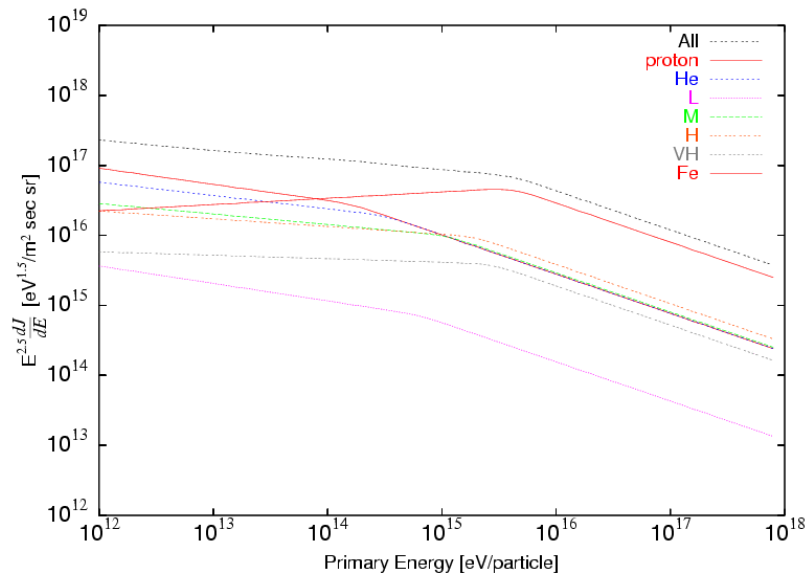
Event Selection:

$N_e > 2 \times 10^5$ の空気シャワーに

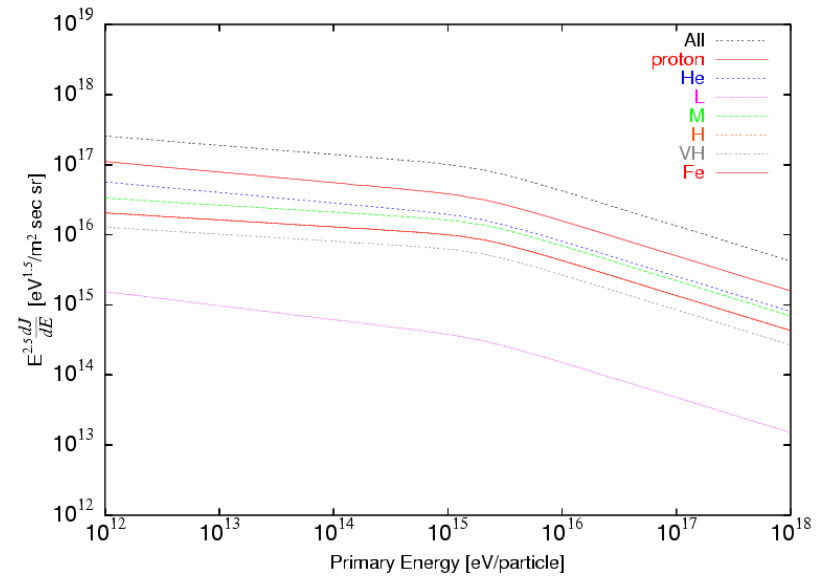
$E_\gamma > 4\text{TeV}$, $n_\gamma \geq 4$ を満たす γ ファミリーを伴う

Primary composition model

HD model



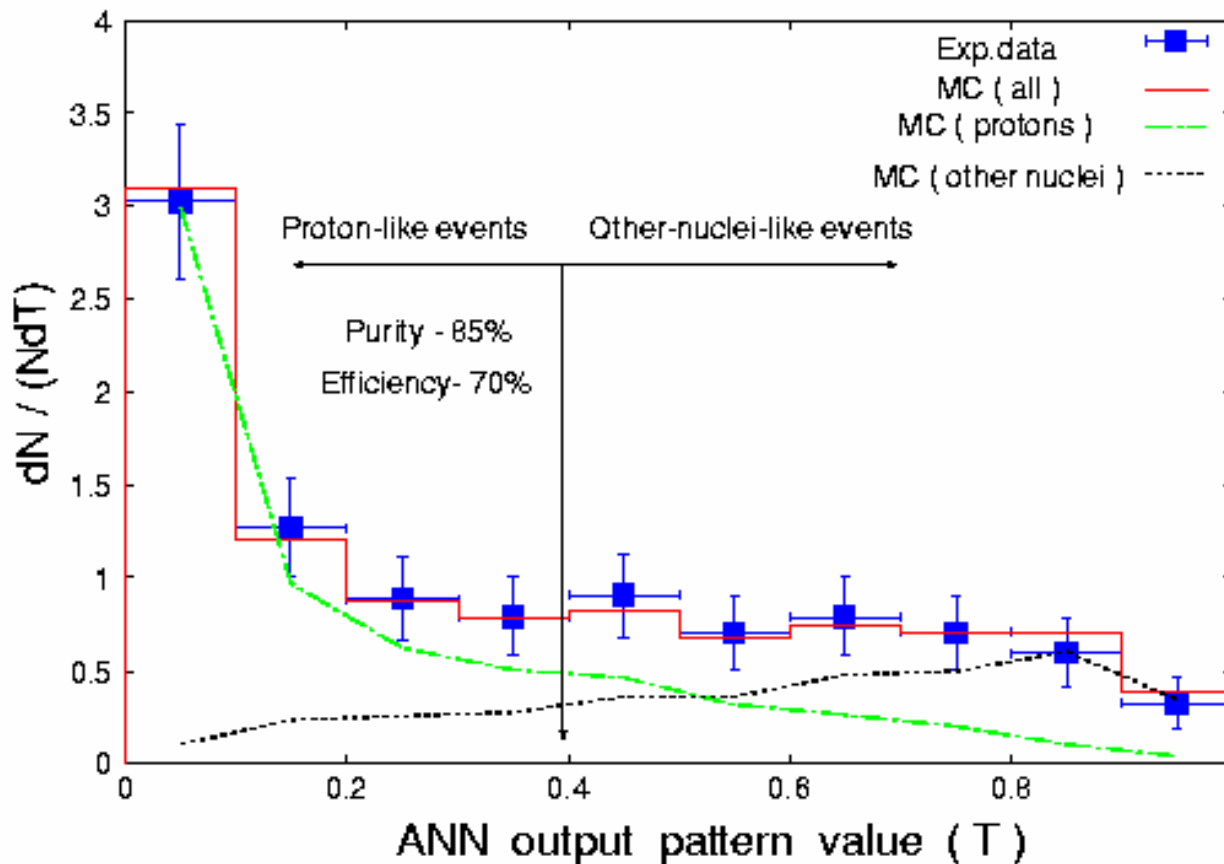
PD model



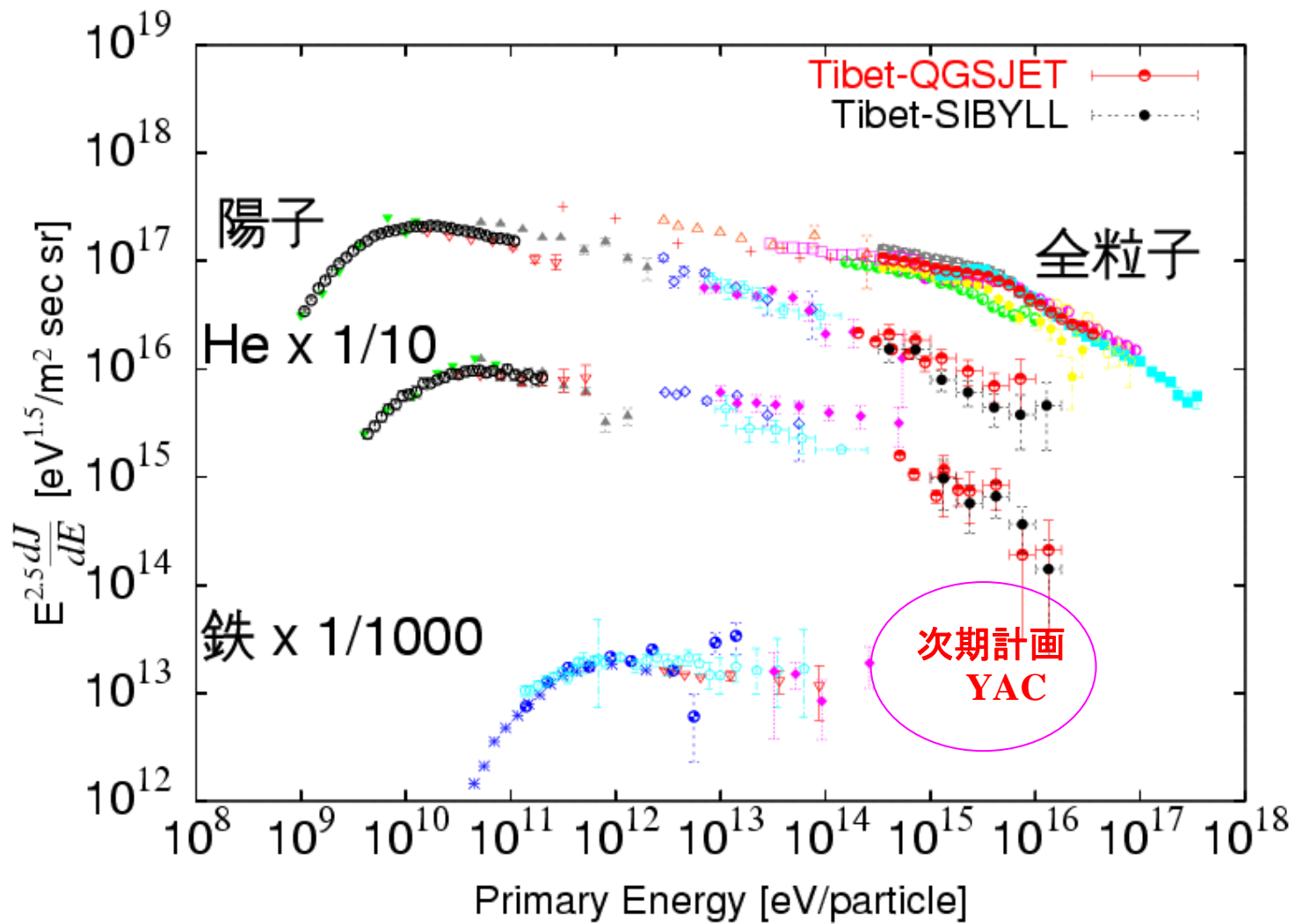
Artificial Neural Network

JETNET 3.5

Parameters for training: N_γ , ΣE_γ , $\langle R_\gamma \rangle$, $\langle ER_\gamma \rangle$, N_e , θ

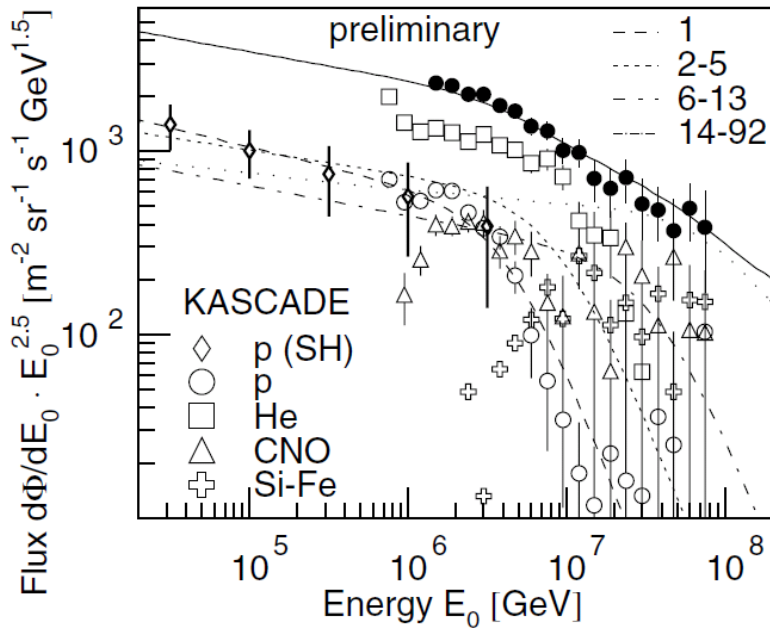


Result of Tibet Hybrid Exp.

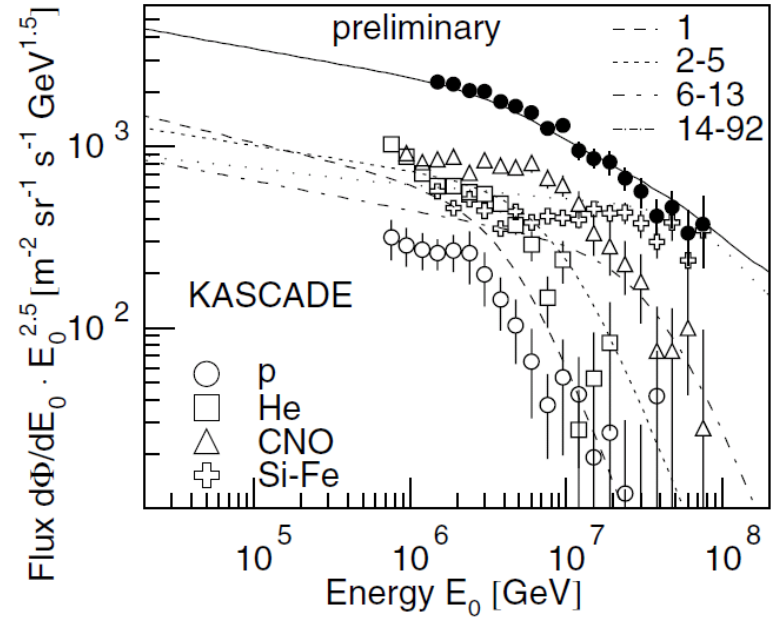


KASCADE

QGSJET

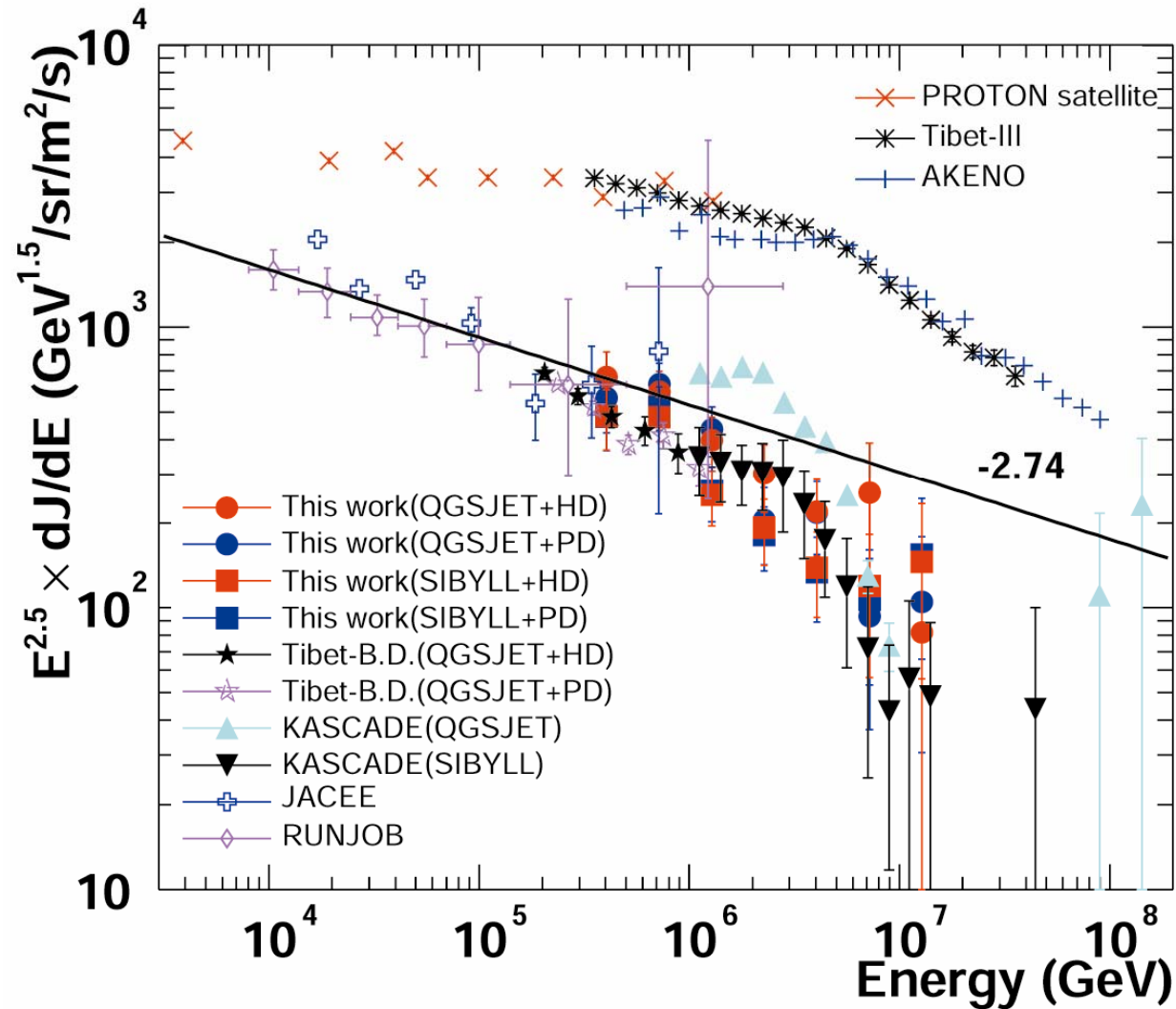


SIBYLL

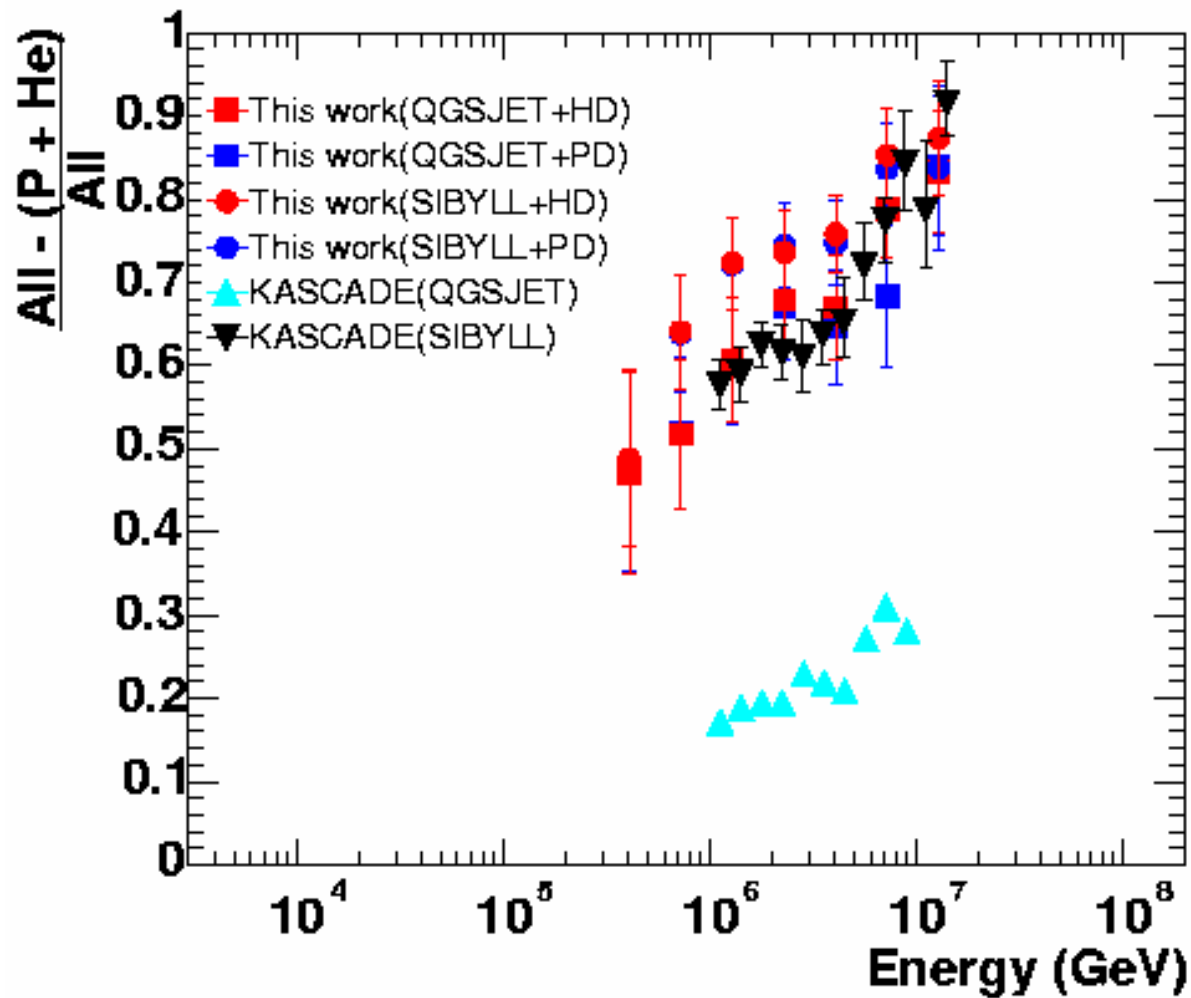


J.R.Hoerandel, Astroparticle Phys. 21,241-265(2004)

Kascadeとの比較(陽子)



Knee領域の重原子核の割合



Interaction model dependence between QGSJET01 and SIBYLL2.1

Tibet:高山でASコア観測→30%

KneeではP,Heより重い核が優勢

次期計画で重核成分をexplicitに観測 → YAC

KASCADE:Sea level で e, μ 観測→ 300%

QGSJET : P,HeがKneeを形成

SIBYLL : CNOがKneeを形成

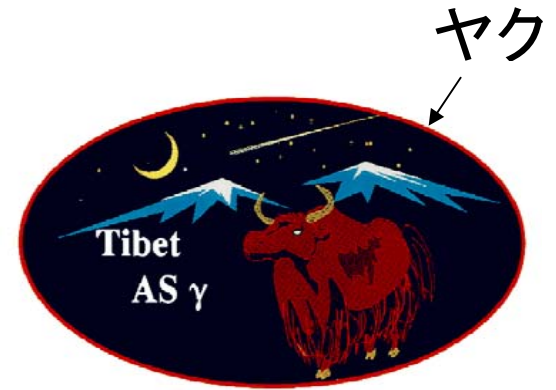
cf)Hoerandel:Poli-Goniat model,

Knee by Light component, 2nd knee by Fe at 10^{17} eV,

U up to 10^{18} eV →KASCADE GRANDE

次期計画 YAC

Yangbajing Air shower Core detector



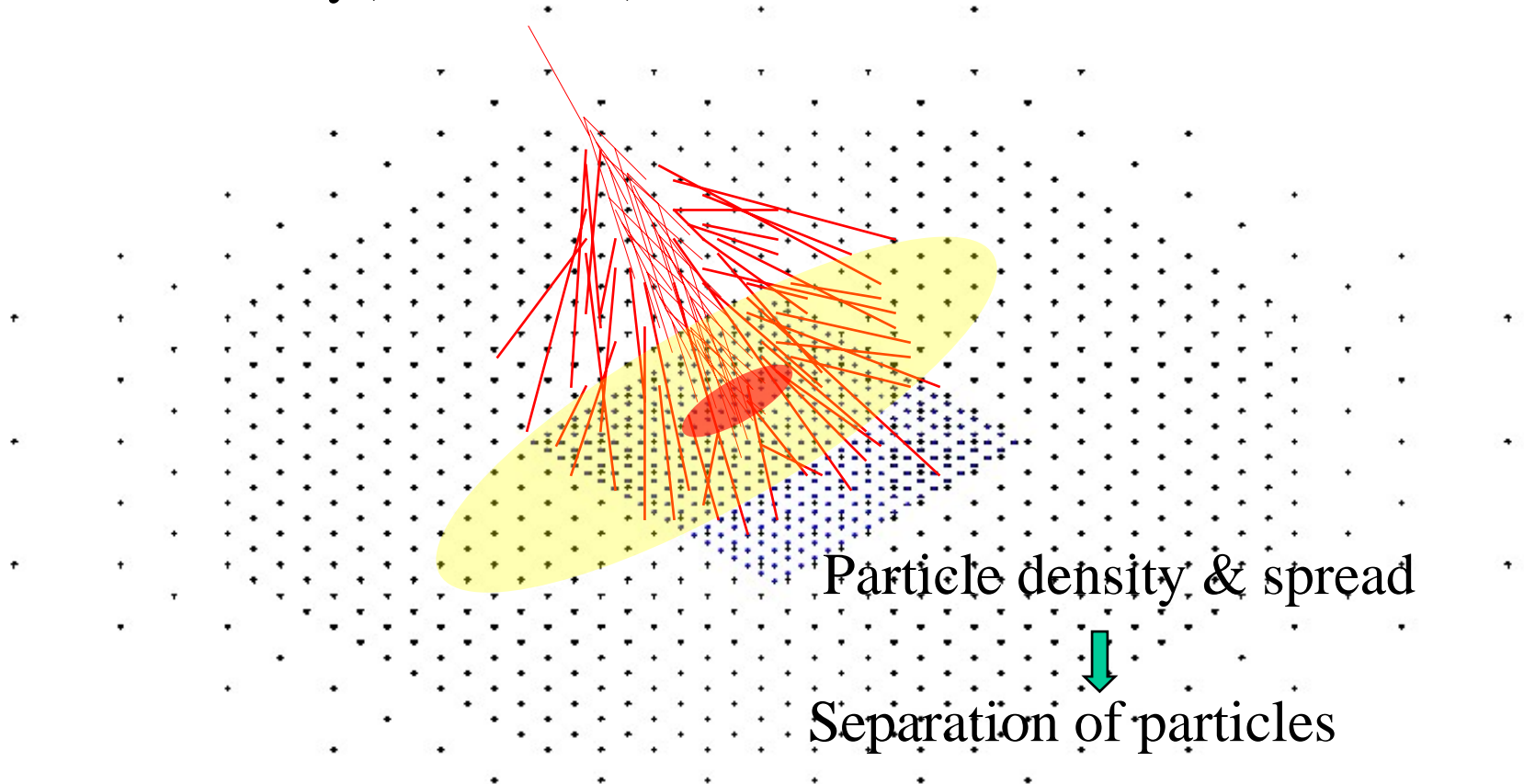
目的: Knee領域の主成分(鉄?)のエネルギースペクトルを測定する。

検出器: 重原子核にも感度を持つバースト検出器 + ASアレイ。
バースト検出器のthresholdを下げて、AS軸から半径数10m以内の領域のenergy flowを測定する。

一次粒子判別: ASサイズ + Burstのエネルギー分布をANNにinput

YAC アレイ

Cosmic ray(P,He,Fe...)



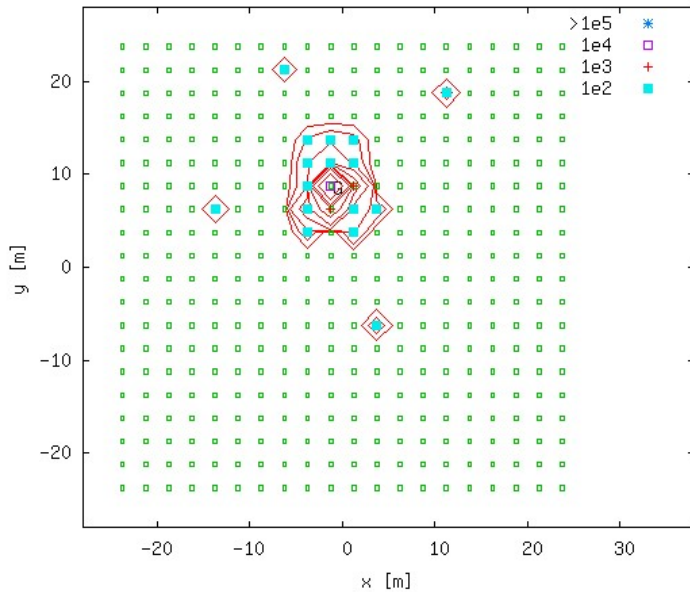
Tibet III: Energy and direction of air shower

Design of YAC

40cm x 50cm, 20x20 channels

面積5000m²

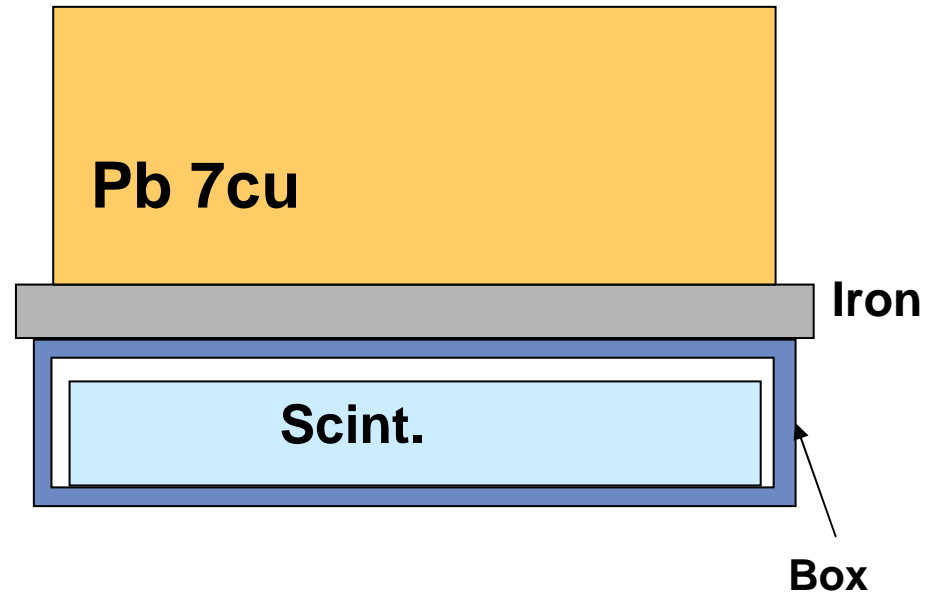
Q= 2 E0=1.5E+06 Ne=9.6E+05 s= 1.18 Z= 0.91 Nb=5.0E+04 Top=4.2E+04



3.75m spacing 400ch

$N_b > 100$, any 5

(>30GeV)



Wave length shifting fiber

+ 2 PMTs

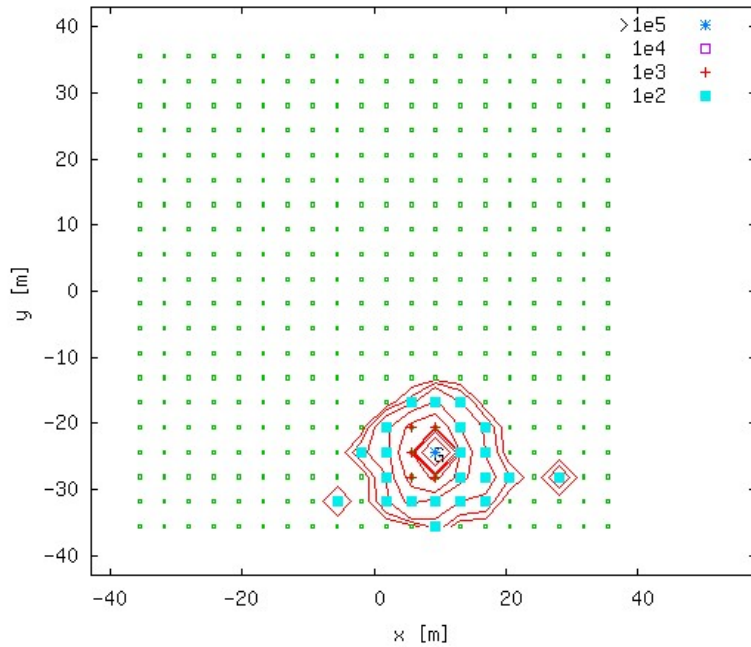
(Low gain & High gain)

$10^2 < N_b < 10^6$

MC Event Map

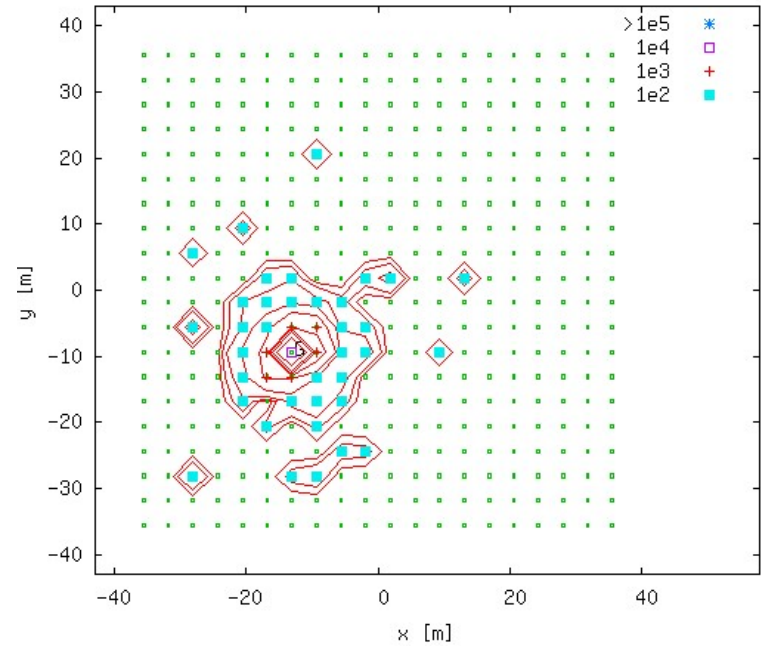
Proton

Q= 1 E0=4.4E+06 Ne=2.8E+06 s= 1.13 Z= 0.86 Nb=1.3E+05 Top=1.1E+05



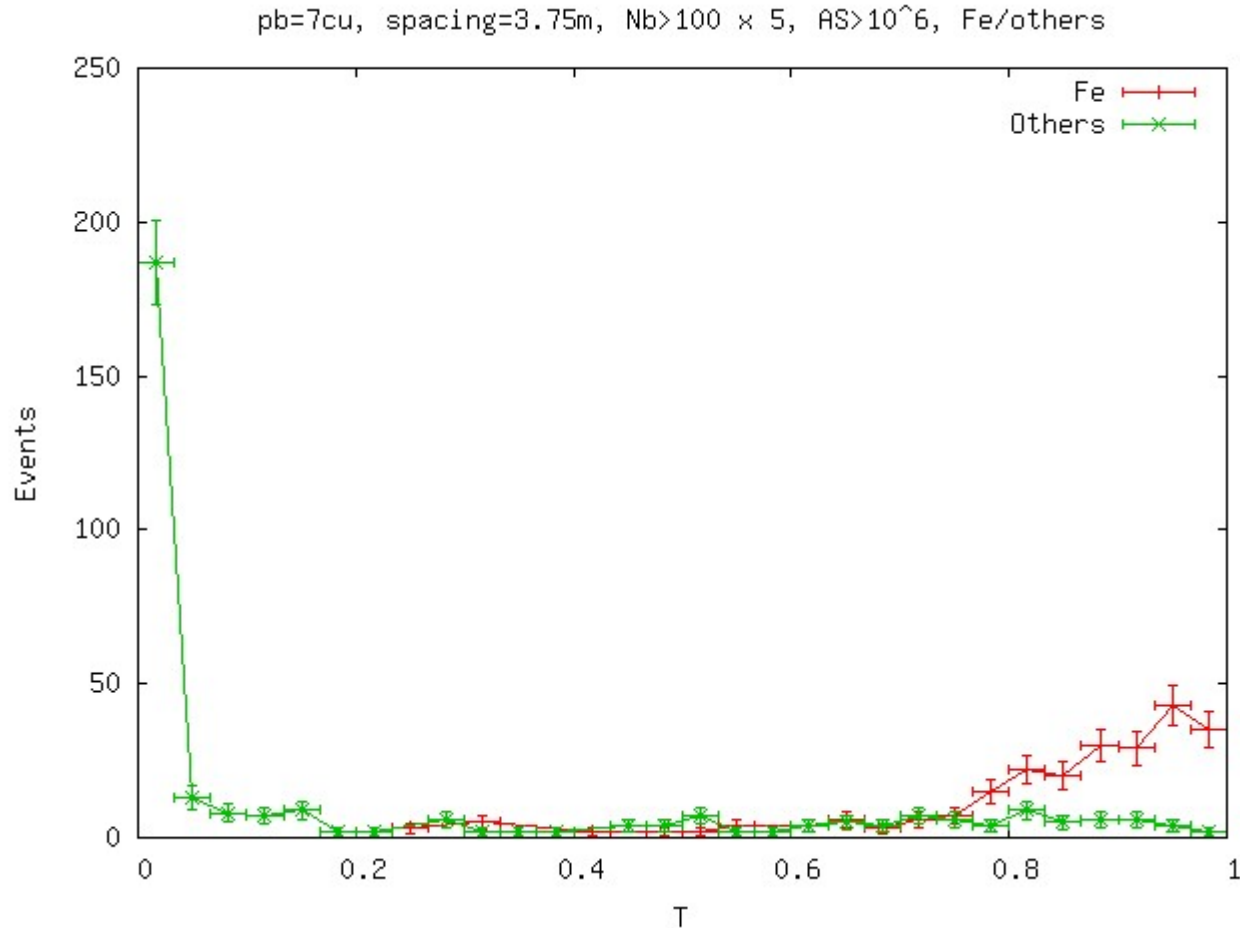
Fe

Q=26 E0=6.4E+06 Ne=2.8E+06 s= 1.19 Z= 0.95 Nb=6.4E+04 Top=4.5E+04

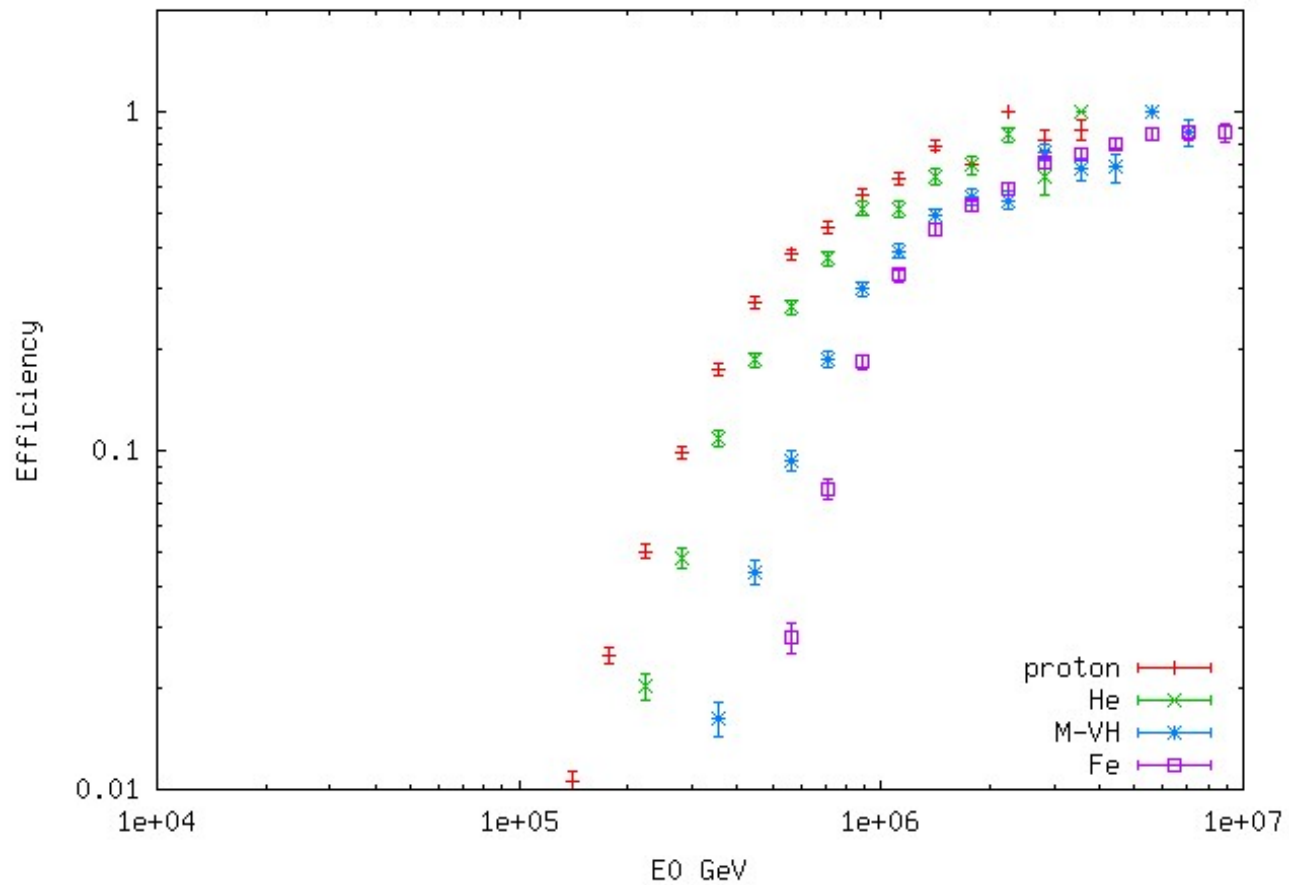


YACによる粒子選別 (ANN)

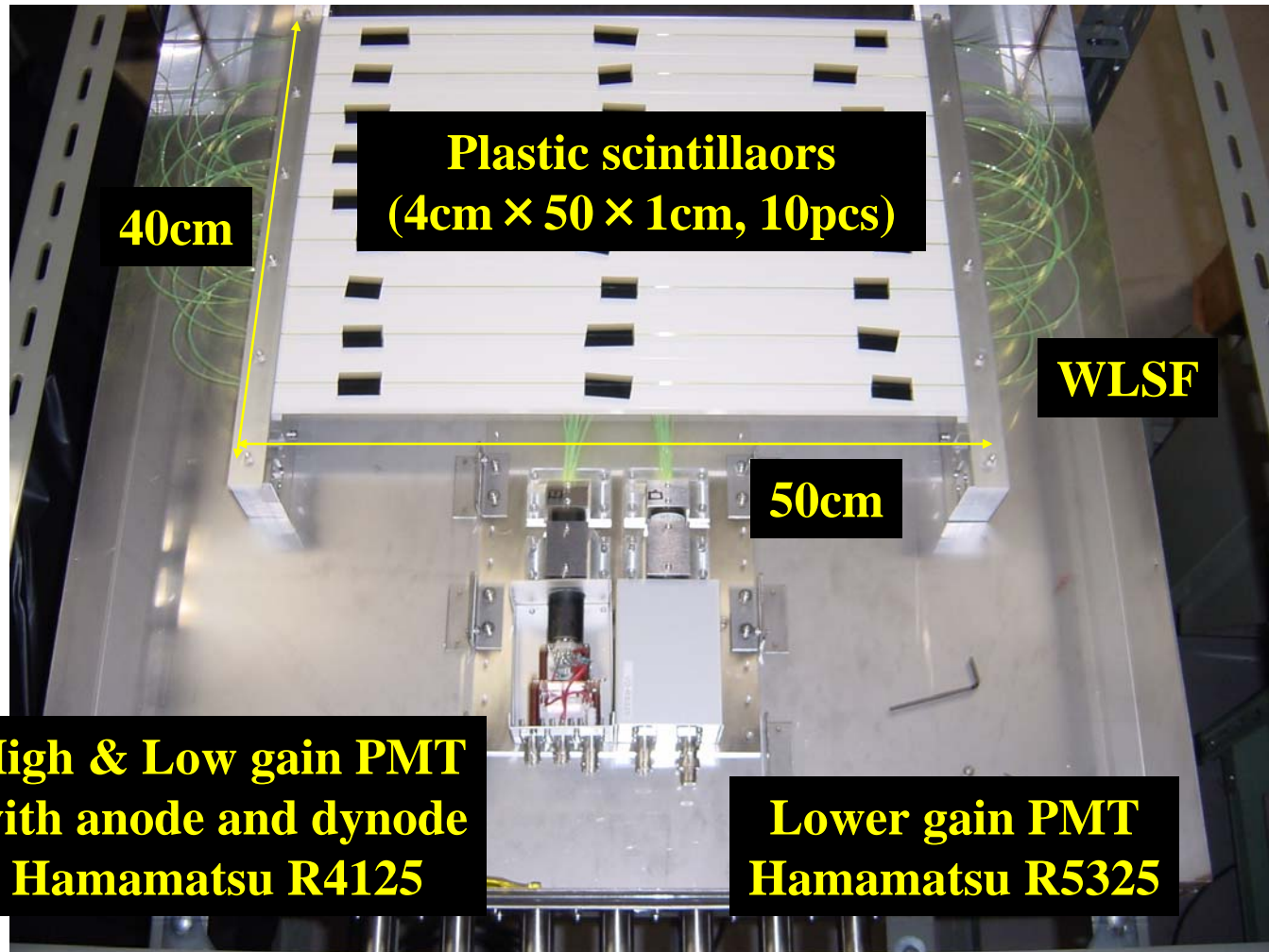
Iron and others



Detection efficiency

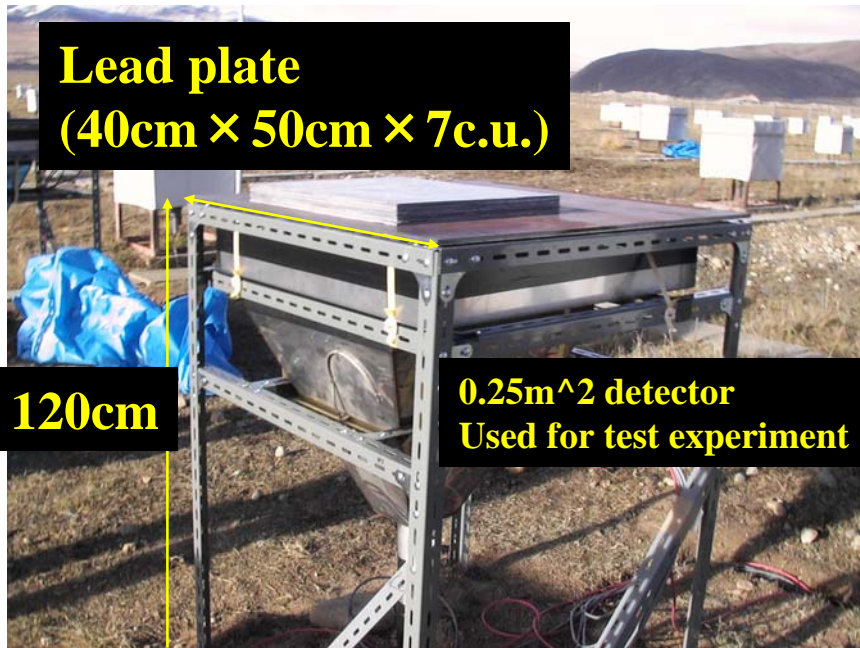


Test detector

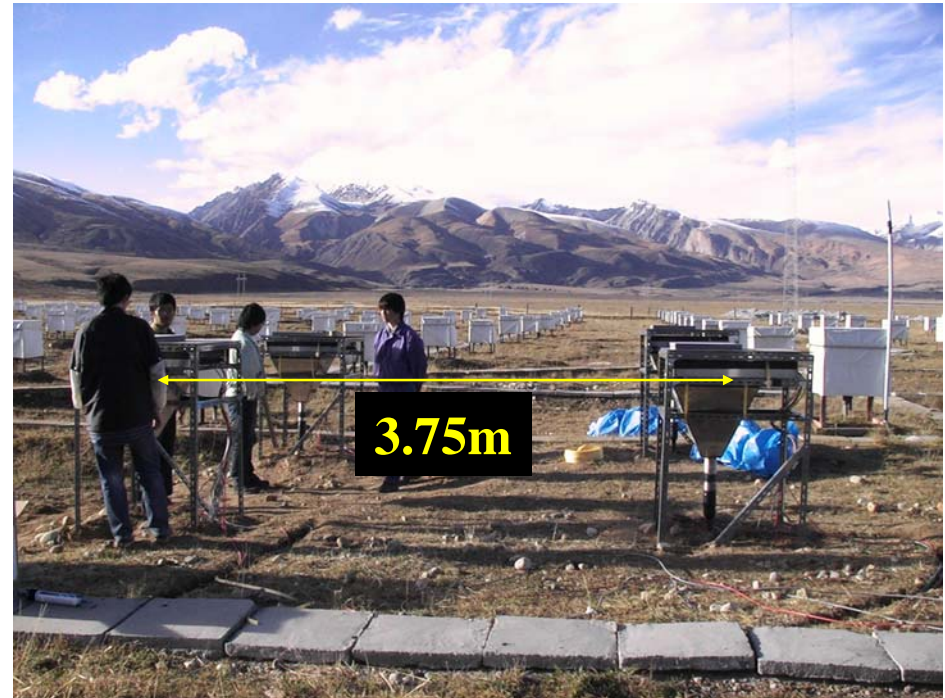


Test experiment at Tibet Yangbajing

2004.11 ~

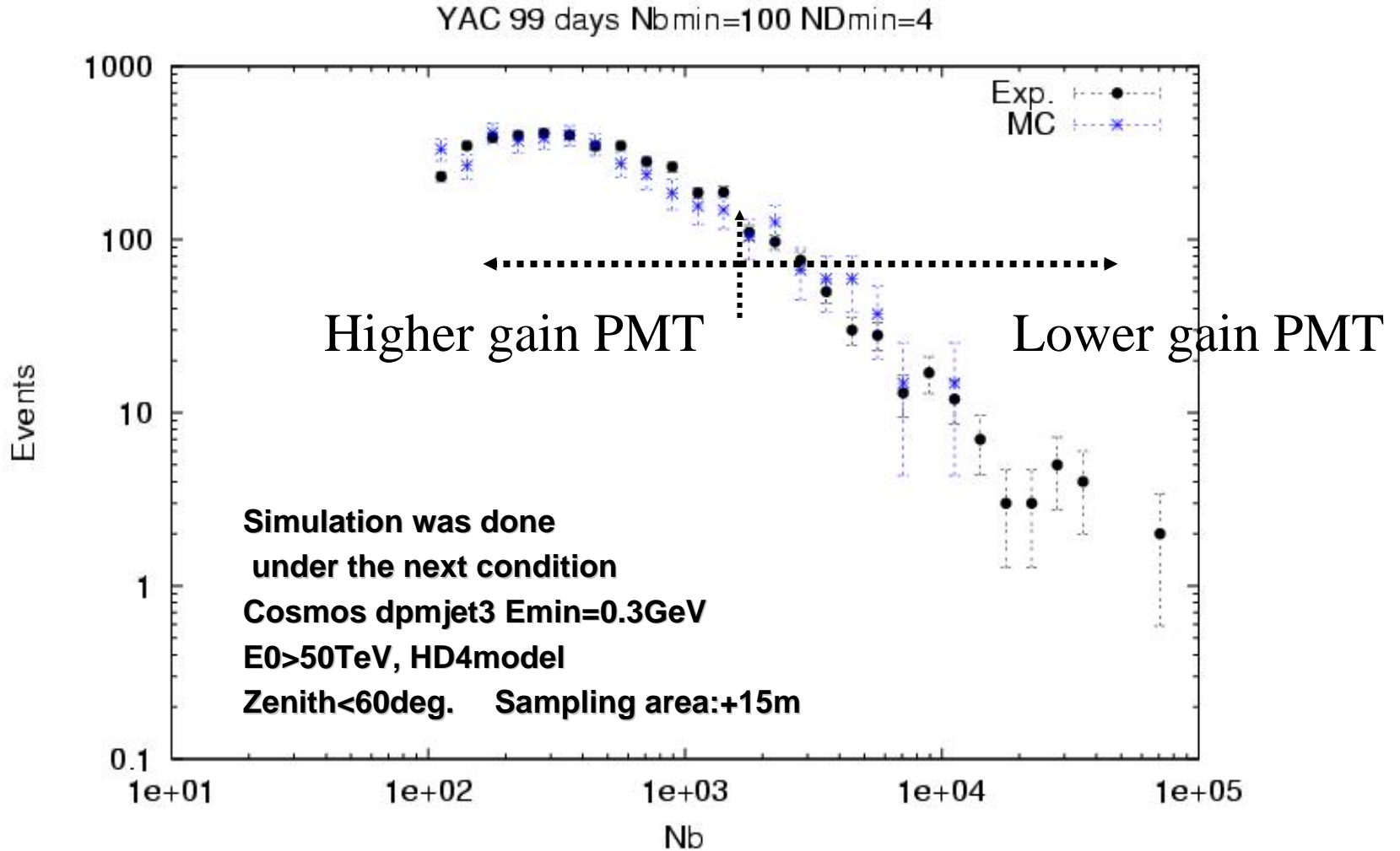


YAC

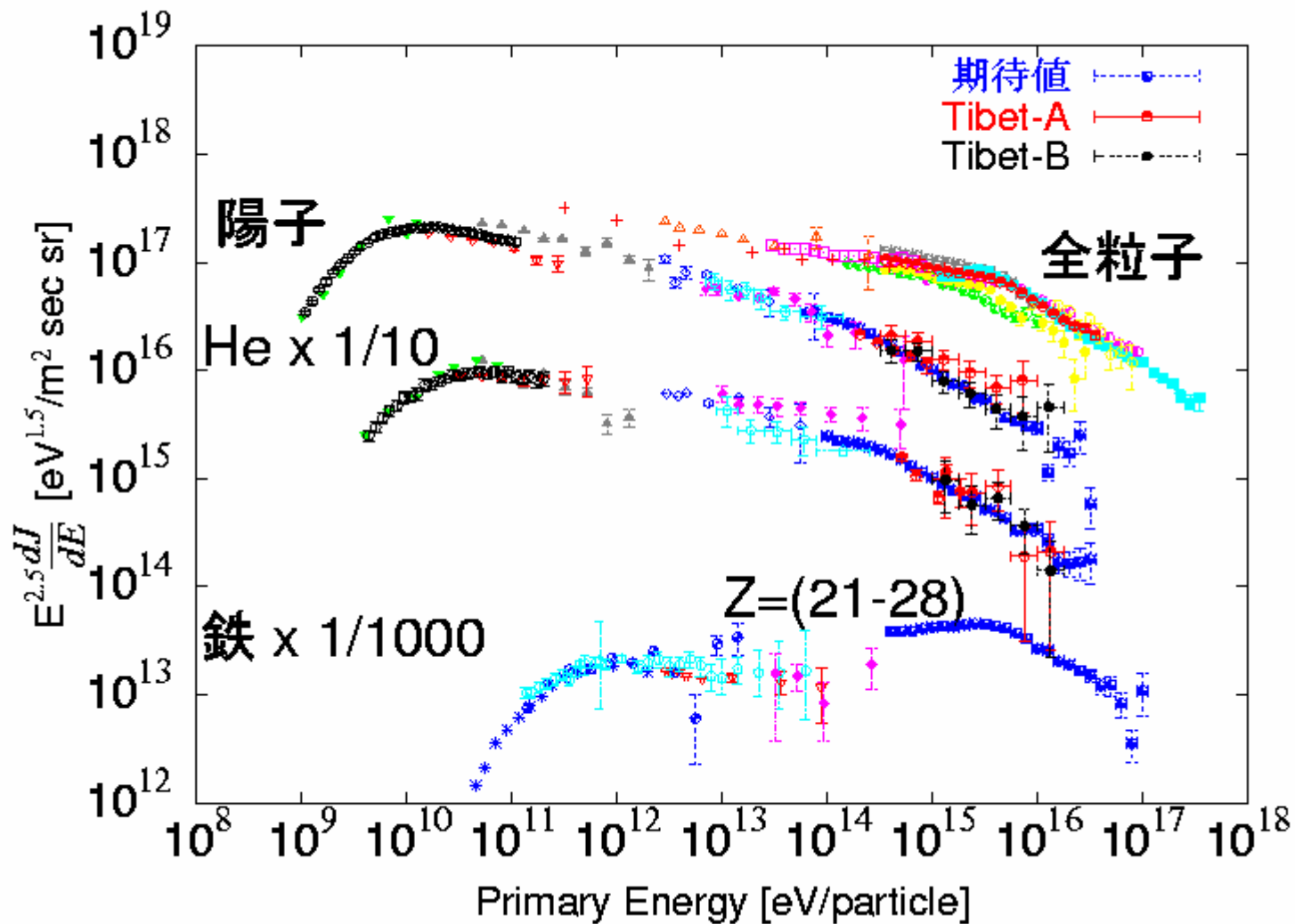


Trigger condition: $N_b > 40$ particles ($\sim 150\text{mV}$) Any 1
Trigger rate: $\sim 0.15\text{Hz}$

Observed spectrum of the burst size (Nb)



Expected results by YAC



まとめ: ASコア観測 (YAC)により 期待される成果

- 4成分のエネルギースペクトル
陽子・ヘリウム・M・鉄グループ
→ Knee 領域の主成分の解明
- それぞれの成分のbreak point (加速限界)
→ 超新星衝撃波加速モデルの検証
- 10^{16} eVまでのCompositionを確立
低エネルギー側への寄与 → ν 物理, γ 線源探索 (AS, Cherenkov B.G.)
高エネルギー側への寄与 → 10^{16} eV以上の観測に対する基礎データ、
最高エネルギー宇宙線 (GZK問題)