

南極周回気球による電子加速源の探索

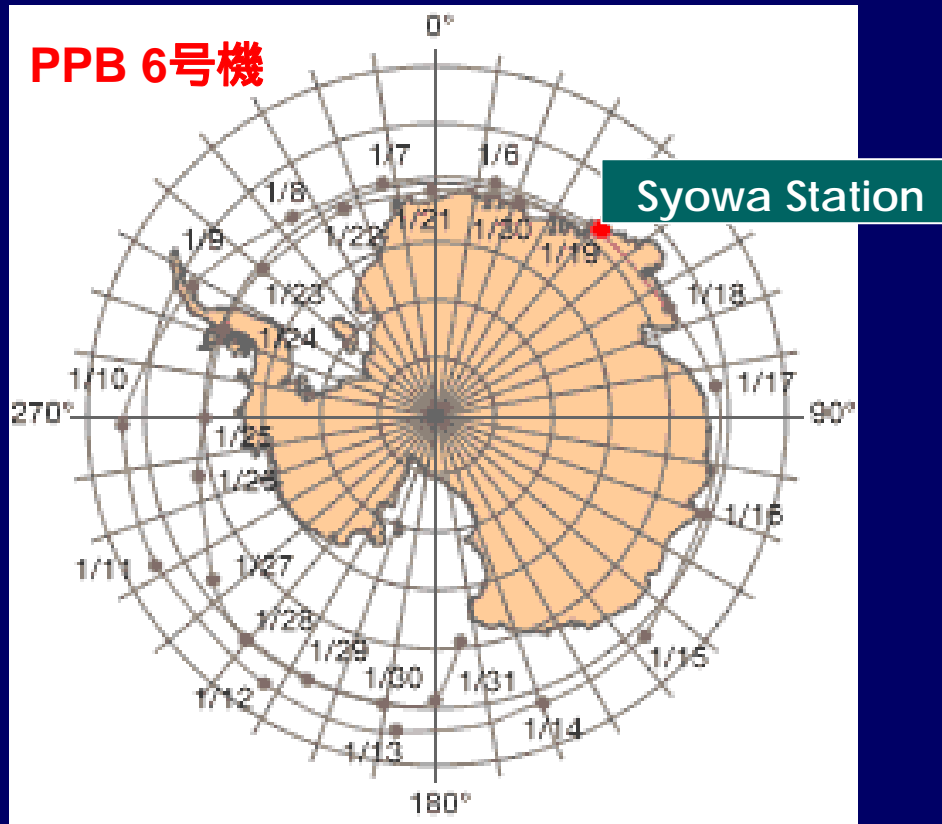
神奈川大学 田村忠久



昭和基地におけるPPB (Polar Patrol Balloon) の例

放球 : 1993年1月 5日 8時55分 (UT)

最終 : 1993年1月31日 22時45分



PPB-BETSの足跡

- 2000年3月 南極地域観測第V期 5ヶ年計画：第2次PPB実験計画公募
宇宙物理学的観測の分野でPPB-BETSが採択される
- 2000年 PPB-BETS検出装置の製作開始
- 2001年 テスト用トリガーシステムの製作
- 2001年8月 三陸でのトリガーシステムのテストフライト
- 2001年 PPB-BETS検出装置の調整
- 2001年10月 CERNでの電子・陽子ビーム照射実験
- 2002年 環境試験、調整、キャリブレーション
- 2002年12月 第44次隊 昭和基地での放球、装置浮上せず、回収
- 2003年 熱対策強化、充電システム改良、環境試験
- 2004年1月 第45次隊 昭和基地から放球

高エネルギー一次宇宙線生成機構の解明

南極地域観測第V期5ヶ年計画
第2次PPB実験計画の宇宙物理学的観測

南極周回気球 P P B 7号機

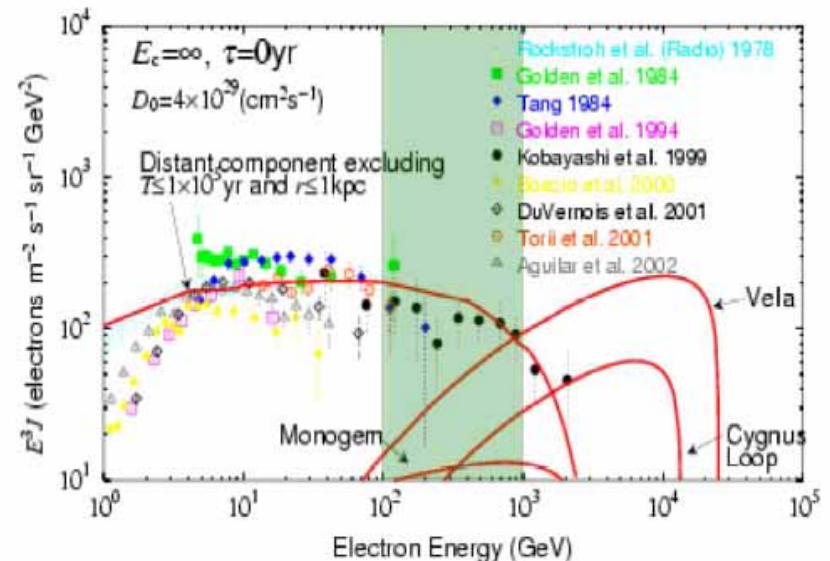
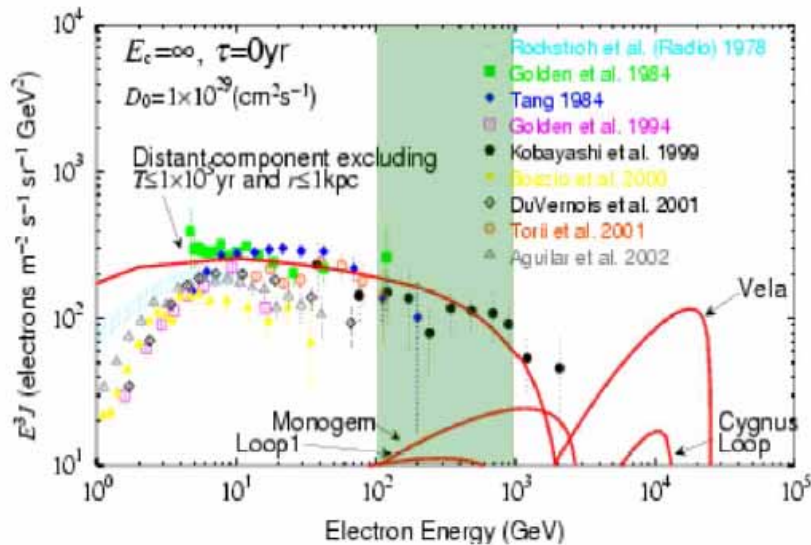
研究者代表 神奈川大 鳥居祥二

田村忠久、立山暢人、吉田健二、安楽和明、山下太郎、西村 純、山上隆正、
斎藤芳隆、太田茂雄、並木道義、松坂幸彦、山岸久雄、門倉 昭、笠原克昌、
小河哲之、藤井 森、柴田槇雄、片寄祐作、井上 武、北村 尚、村上浩之、
小林 正、古森良志子、水谷興平、平井勇佑、常 進

神奈川大学、宇宙科学研究本部、国立極地研、
芝浦工業大学、横浜国立大学、
放射線医学総合研究所、立教大学、
青山学院大学、神奈川県立保健福祉大学、
埼玉大学、紫金山天文台

PPB-BETSの観測目的

- 近傍加速源の同定
エネルギースペクトルと到来方向異方性
- 銀河内での宇宙線の拡散係数の決定

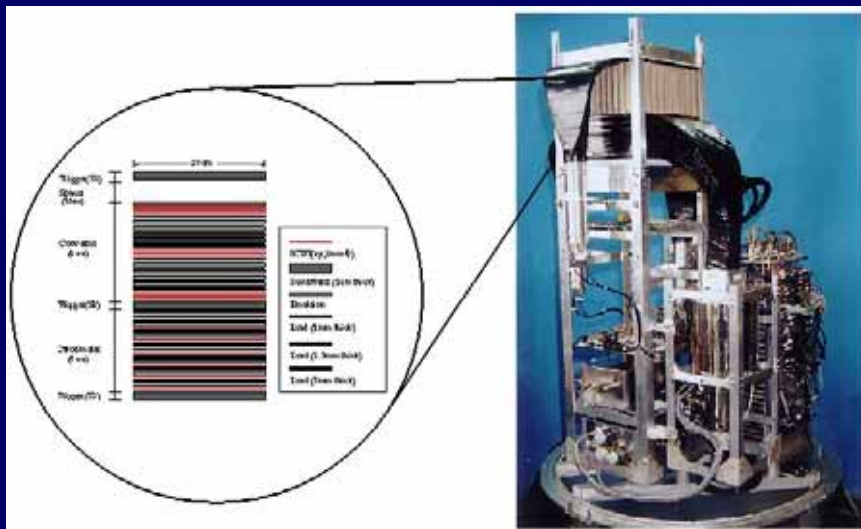


(Kobayashi et al. ApJ (2004))

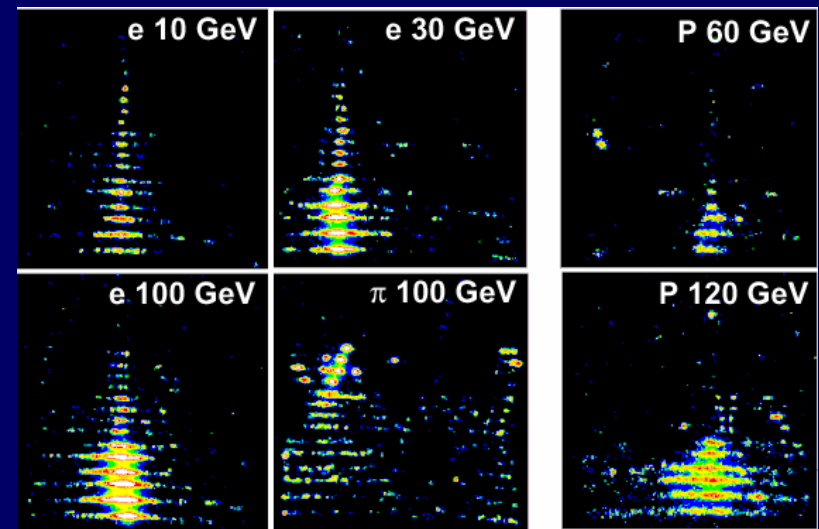
BETSによる電子・ガンマ線観測

BETS: **B**alloon-borne **E**lectron **T**elescope with **S**cintillating fibers

- 電子観測のためのSciFi / Lead イメージング・カロリメータの開発
NIM 457, 499-508 (2001)
- 三陸における電子観測 10 ~ 100 GeV
ApJ 559, 973-984 (2001)
- BETSの改良による大気ガンマ線強度観測
Phys Rev D 66, 052004(1-9) (2002)



BETS 検出器



CERNビーム実験によるシャワー画像例

BETS から PPB-BETS へ

	BETS	PPB-BETS
エネルギー領域	10 ~ 100 GeV	10 GeV ~ 1 TeV
気球フライト	三陸ブーメラン 4.5時間(1997) 8.3時間(1998)	南極周回 30日間
バラスト	100 ~ 150 kg コマンドコントロール	240 kg オートレベルコントロール
装置重量	380 kg	200 kg
真空対策	耐圧容器	部分的に耐圧容器、熱対策、放電対策
電力供給	リチウム電池	太陽電池 + 充電池
データ記録	テレメトリ(32 kbps) 磁気テープ(5 GB)	テレメトリ(64 kbps) イリジウム衛星電話(2.4 kbps) シリコンディスク(1 GB)
回収	海上回収	昭和基地に戻ってきたときのみ

PPB-BETSイメージングカロリメータ

BETS

PPB-BETS

鉛板厚

7.1 r.l

9 r.l

トリガーシンチレータ枚数

3 枚

9 枚

CCDのダイナミックレンジ

100 GeV

1000 GeV

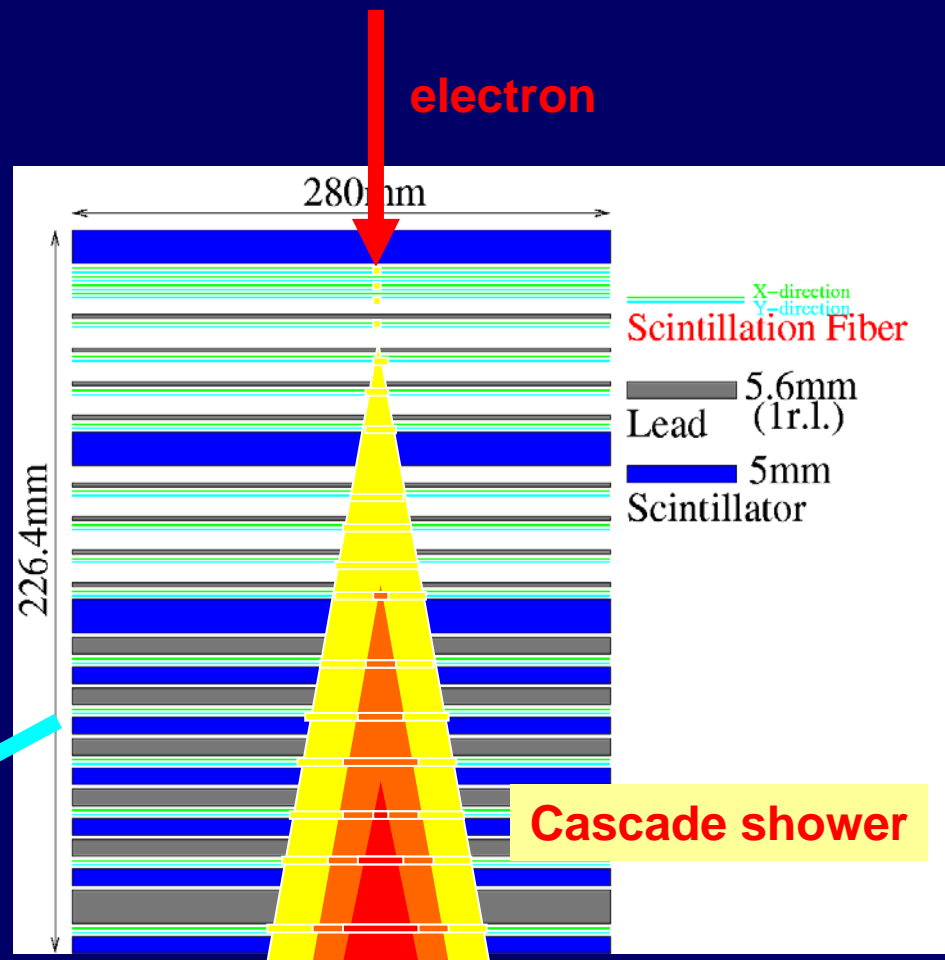
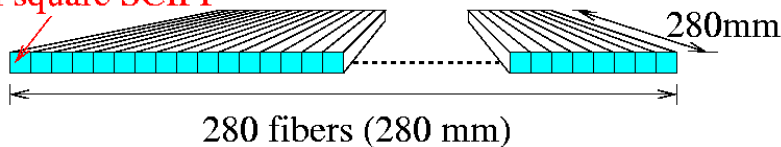
I.I. の体積 1/2

SciFi

36 層

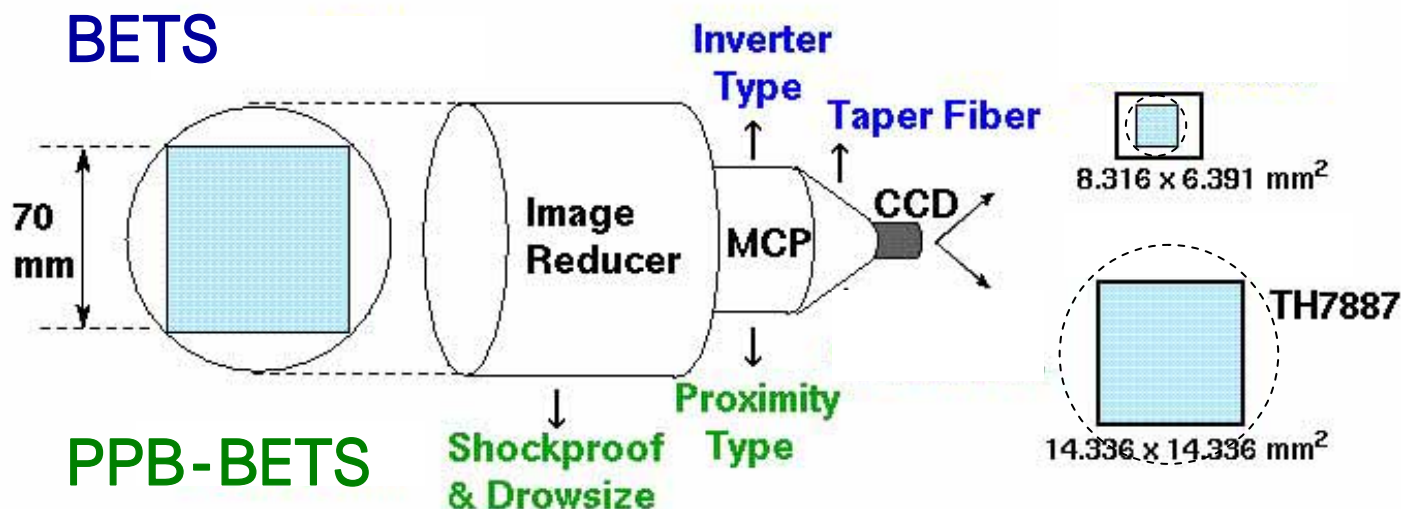
36 層 配置を変更

1mm square SCIFI



Side view of the detector

BETS から PPB-BETS への II-CCD の改良



CCD	S/N	Pixel Num.	Pixel size	Reduction	Size on CCD to 1mm
BETS	54dB	756 x 581	11 μ m x 2	1 / 12	83 μ m ~ 3.7 pix
PPB-BETS	70dB	1024 x 1024	14 μ m	1 / 5	200 μ m ~ 14.3 pix

CCD Dynamic Range
6.3 times

X

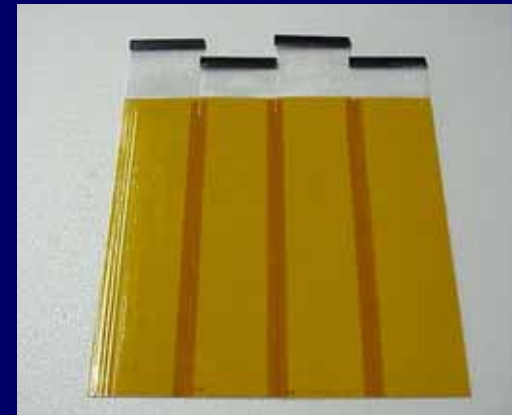
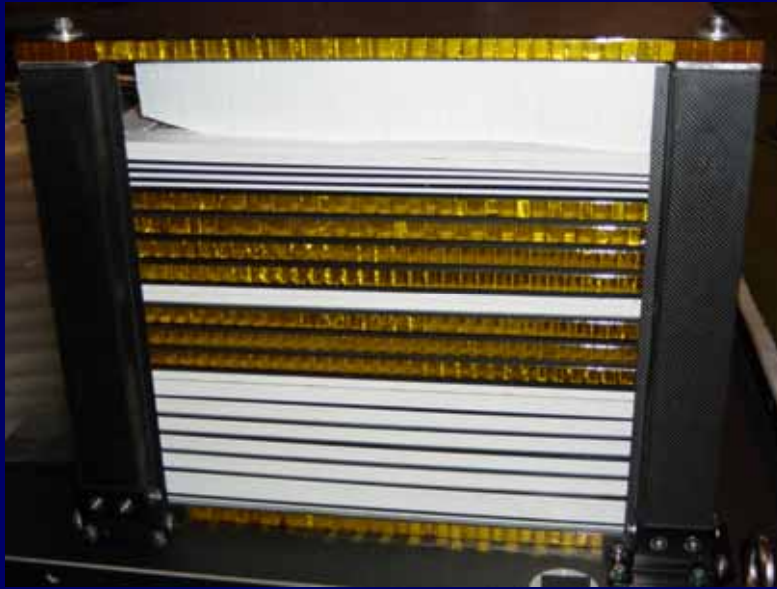
Pixel Num. for 1 SciFi
15 times

=

Dynamic Range for
1 SciFi increases by
2 orders of magnitude

BETSに比べると、ファイバ当たりのCCD画素が15倍、S/Nが6倍、合わせて100倍のダイナミックレンジを得られた。体積は半分になった。

PPB-BETS SciFi/Lead 検出器



シンチファイバーベルト



ファイバー読み出し型
トリガーシンチレータ

高エネルギートリガー

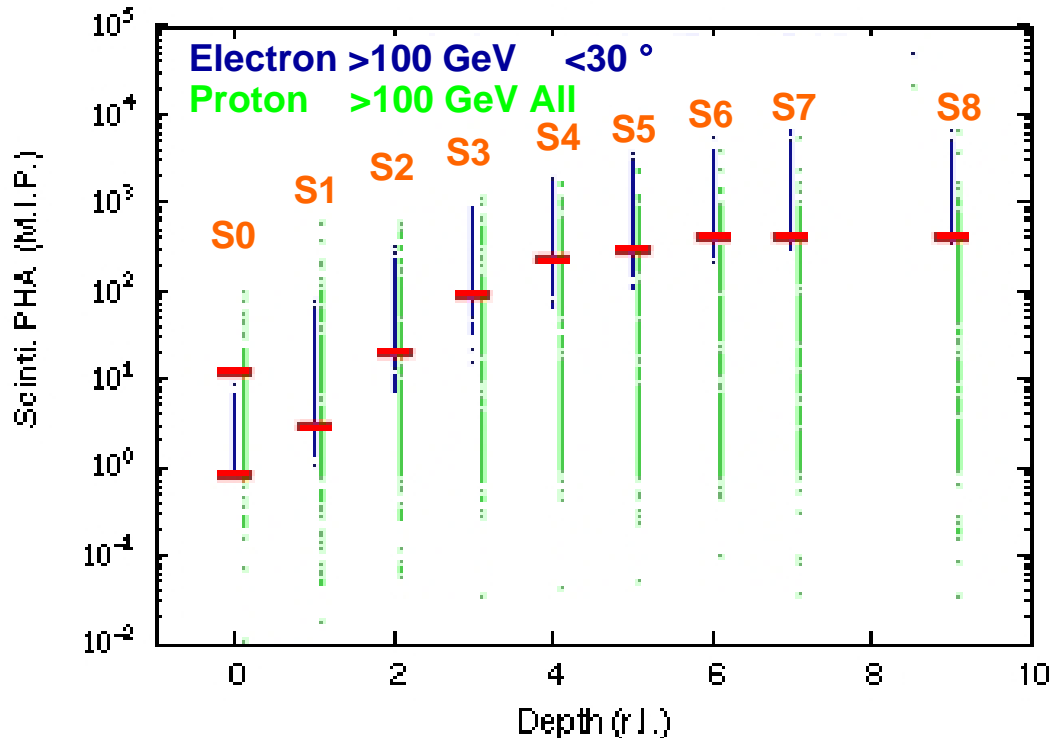
100GeV以上の高エネルギーイベントをイリジウム（2.4kbps）で転送するために...

1st トリガー: エネルギー閾値

2nd トリガー: シャワーカーブ

1st トリガー条件

Simulation



2nd トリガー条件

$S0/S2 < 0.15$ $S4/S6 < 0.80$
 $S1/S3 < 0.25$ $S6/S8 < 1.50$
 $S2/S4 < 0.40$

検出効率 (1st & 2nd) の
シミュレーション

Electron (100GeV)	86.3 %
Proton (>100GeV)	0.67 %
He	0.53 %
Carbon	0.51 %

トリガーシステムの三陸におけるテストフライト



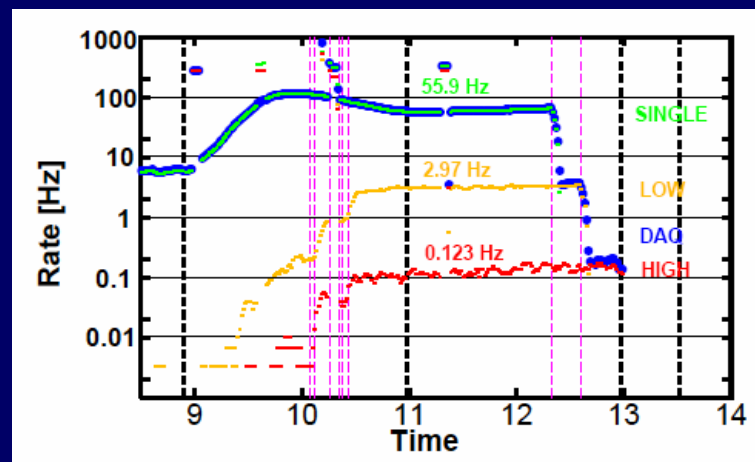
BETS-1の耐圧容器

目的

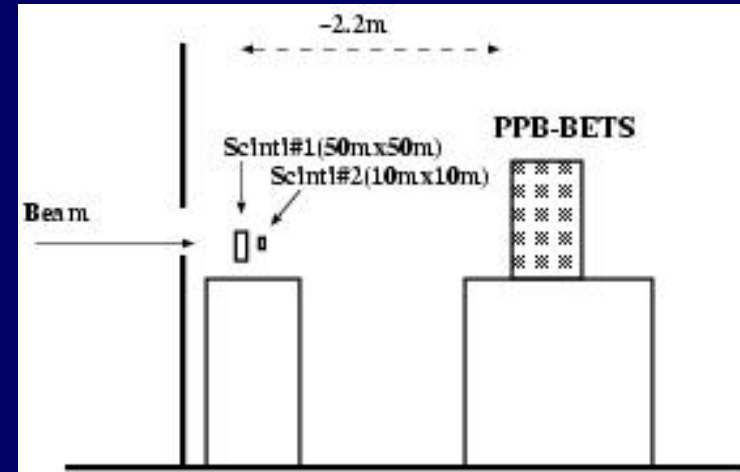
データ転送レートに限られるため、トリガーシステムをアップグレードした全データ転送が可能なることを検証

- ・BETSから推定されるPPB-BETSのトリガーレート 0.04 Hz (>100GeV)
- ・2ndトリガー (シャワーカーブ判定) で 0.02 Hz にする
- ・推定を超えるとイリジウム電話の転送レート 2 kbps に収まらない

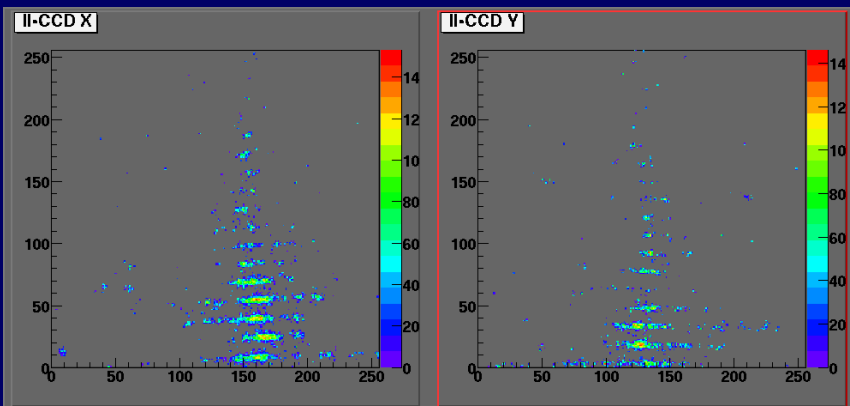
放球日	2001年9月3日8時54分
気球	B50-47
観測器	308 kg
バラスト	126 kg
レベル	32 km (2時間)
回収	ヘリコプター



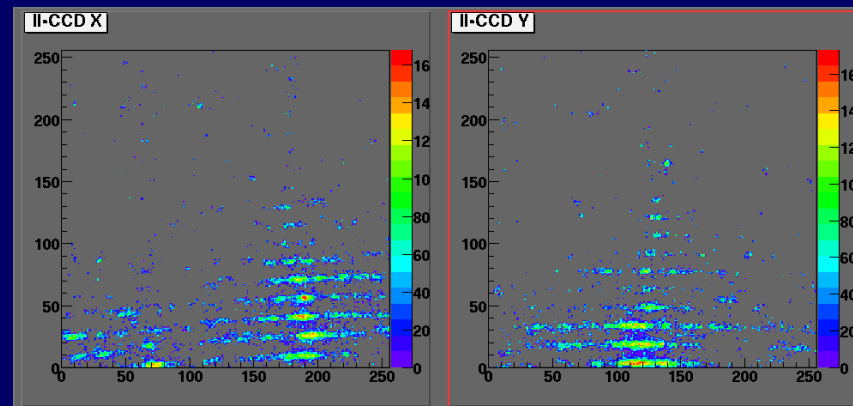
CERN-SPSにおける電子・陽子ビーム実験



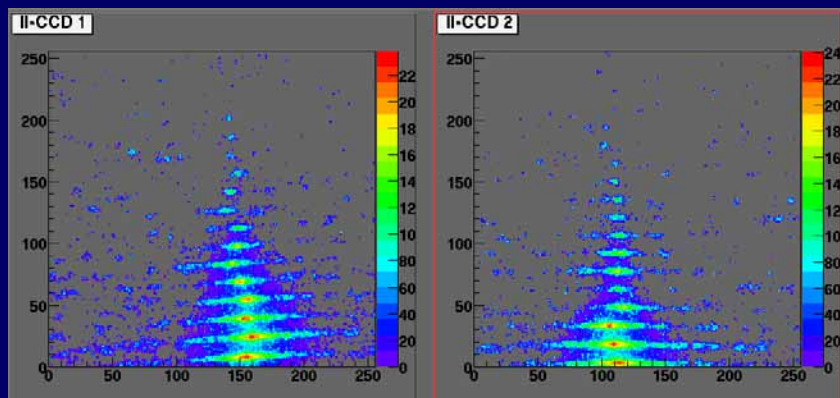
ビーム実験結果： CCD画像例



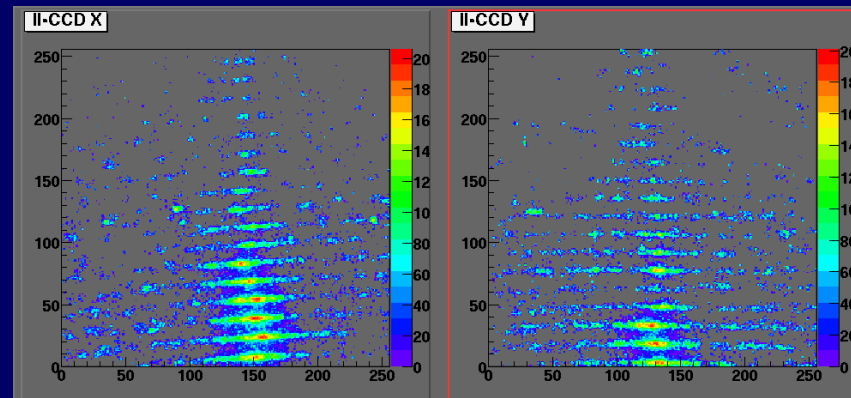
50 GeV electron



150 GeV proton

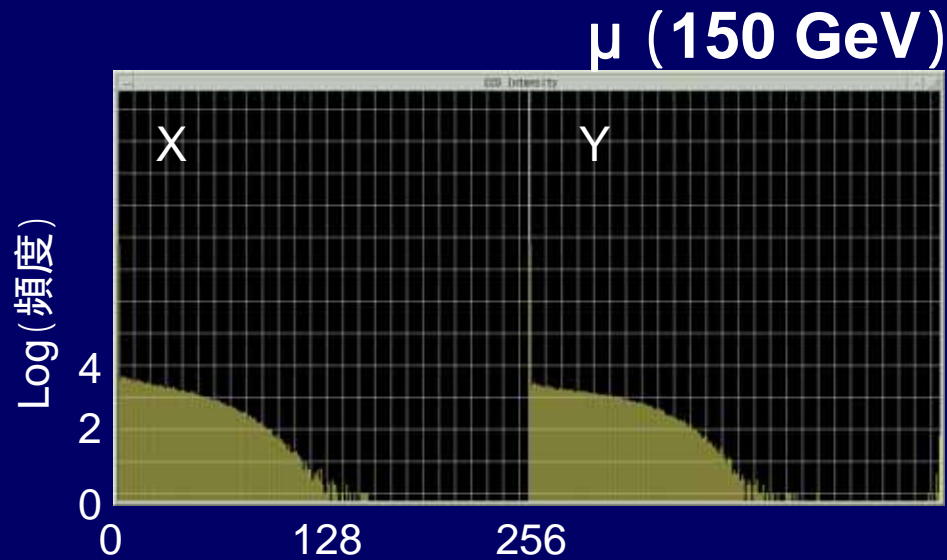


200 GeV electron



350 GeV proton

ビーム実験結果： CCD画像輝度分布



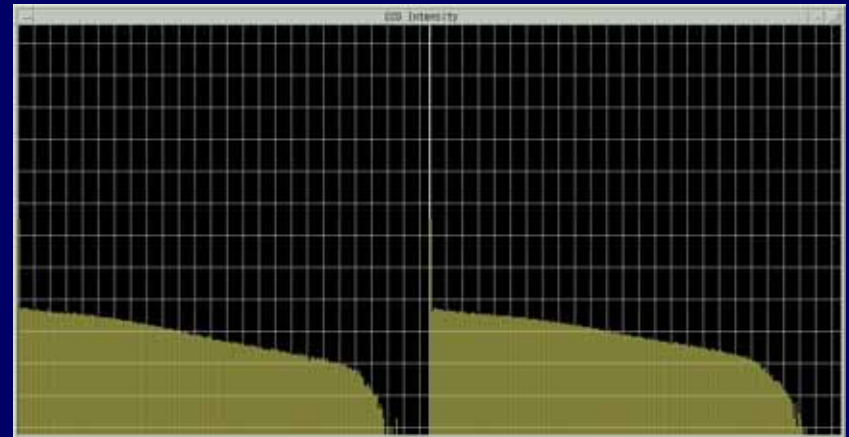
CCD輝度変換値

CCD輝度 : 16 bits

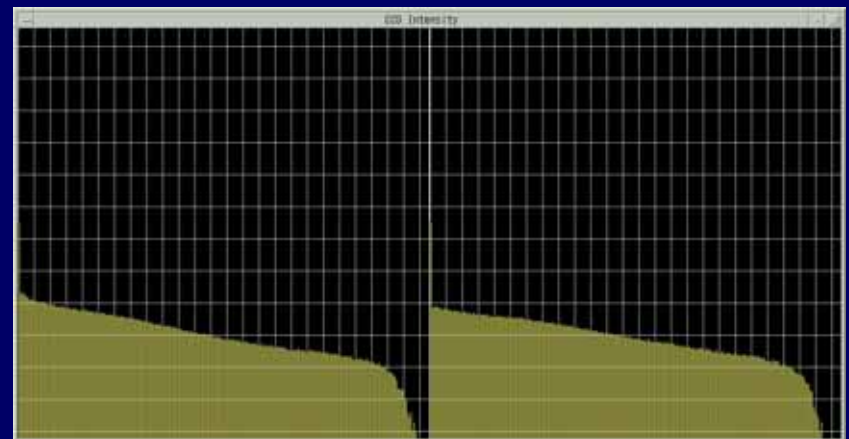
LOG変換 : 16 bits 8 bits

圧縮 : Zero-Length, Hafman

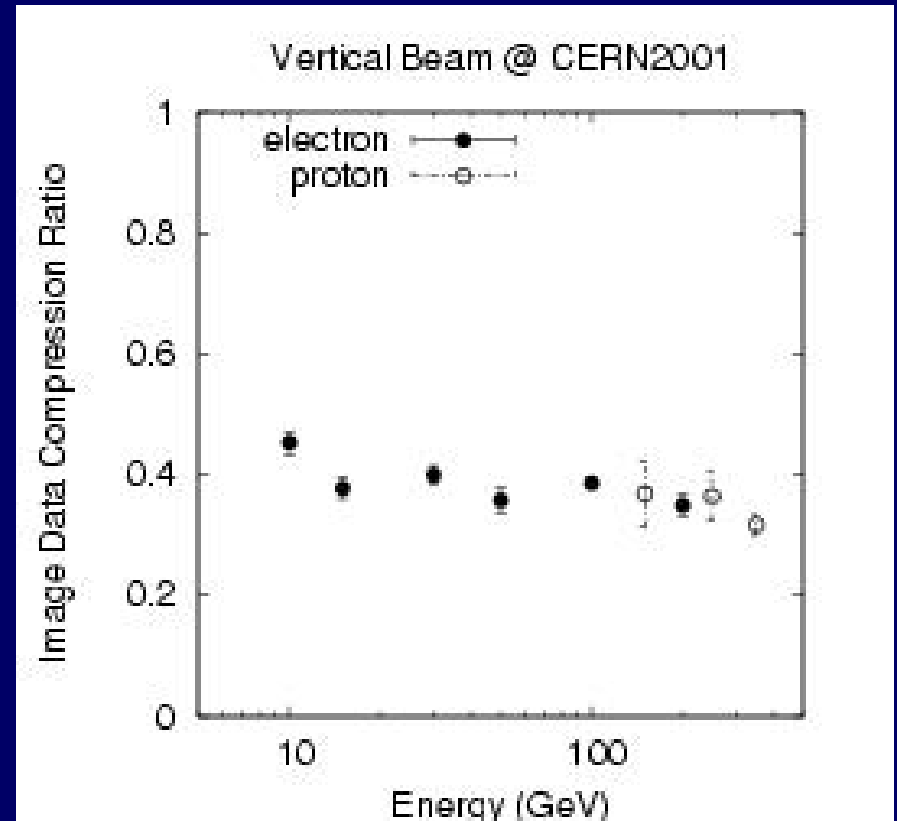
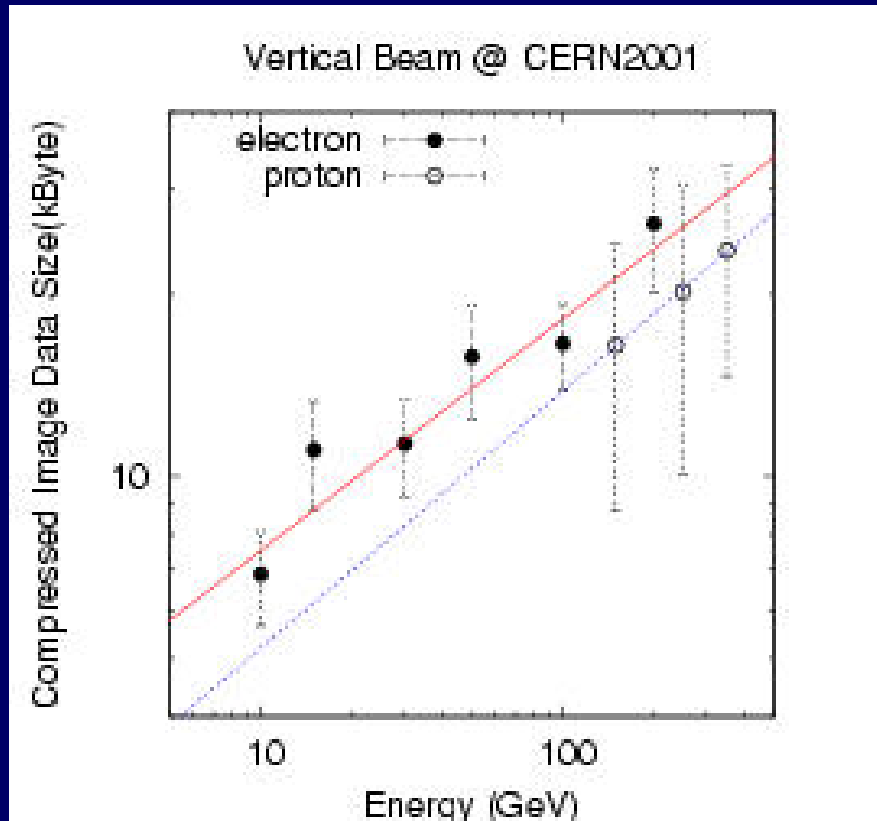
100 GeV electron



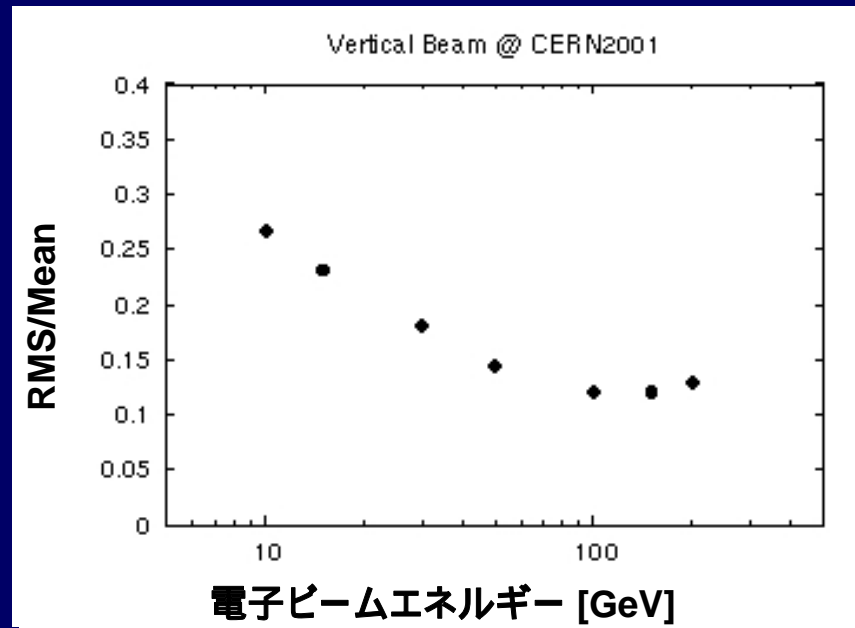
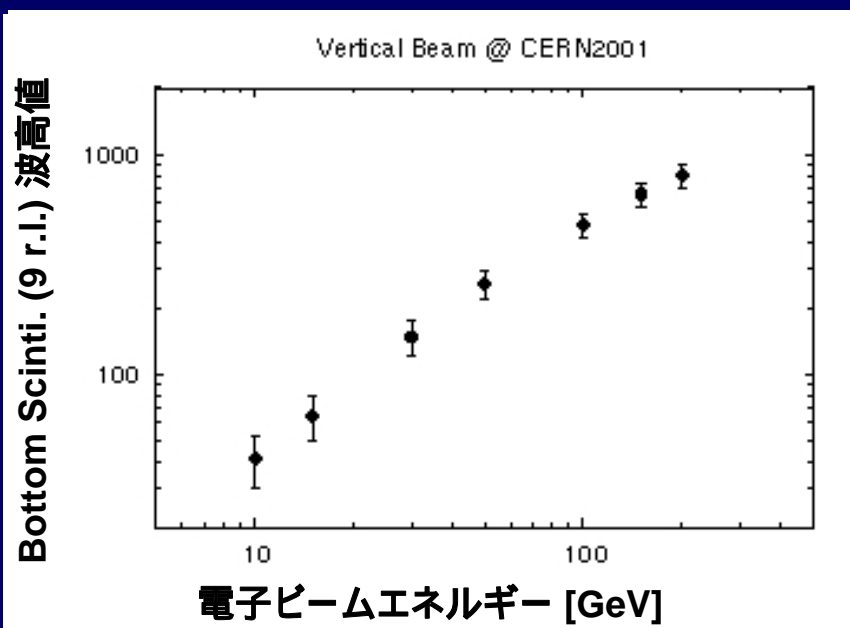
200 GeV electron



ビーム実験結果： 画像データ量



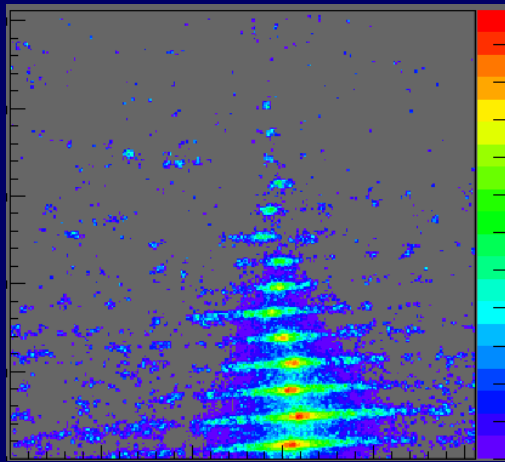
ビーム実験結果：エネルギー分解能



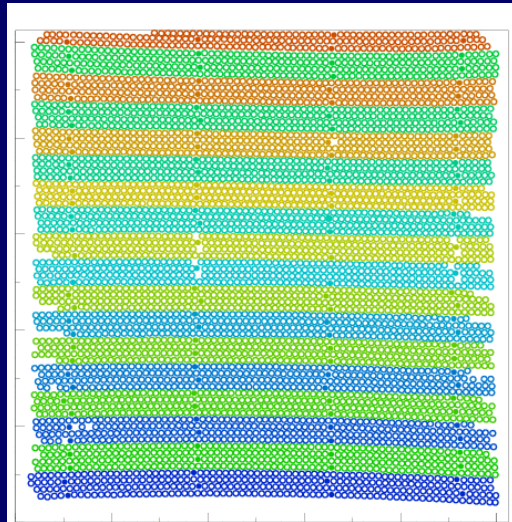
エネルギー分解能
~ 12% @ 100 GeV

シャワー再構成、画像解析

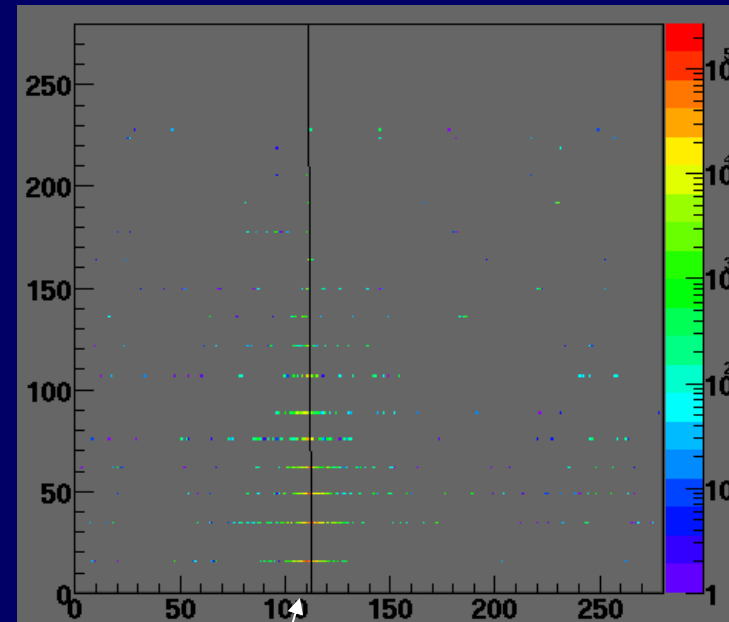
CCD イメージ



μ データで求めたSciFi位置

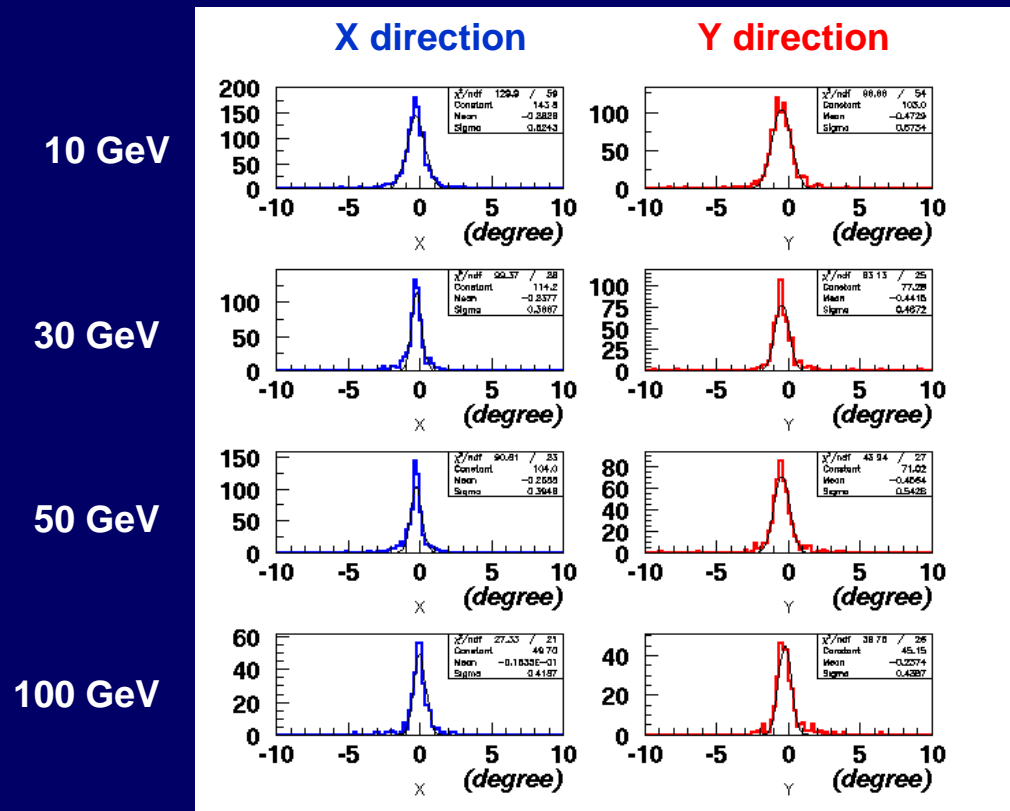


再構成シャワー画像



フィッティングで得られたシャワー軸

Angular Resolution

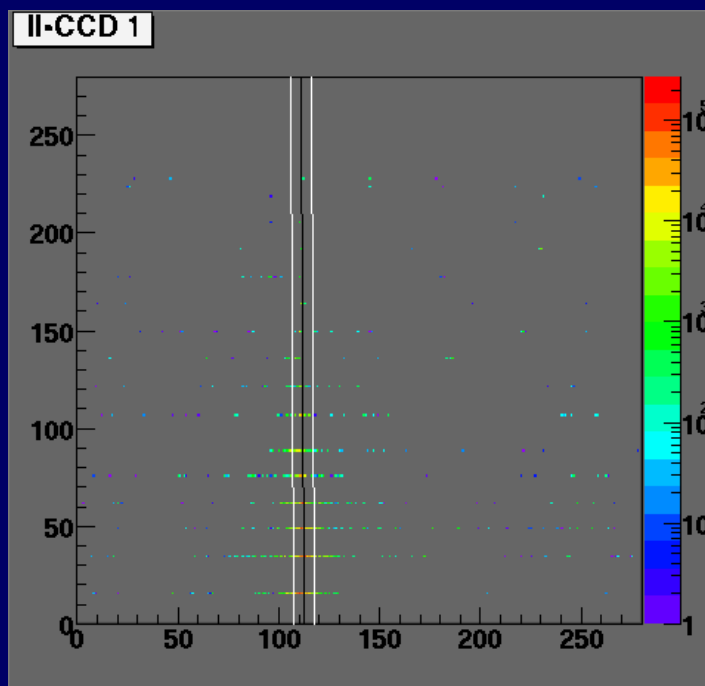


Distributions of shower axis for vertical electron beams with different energies.

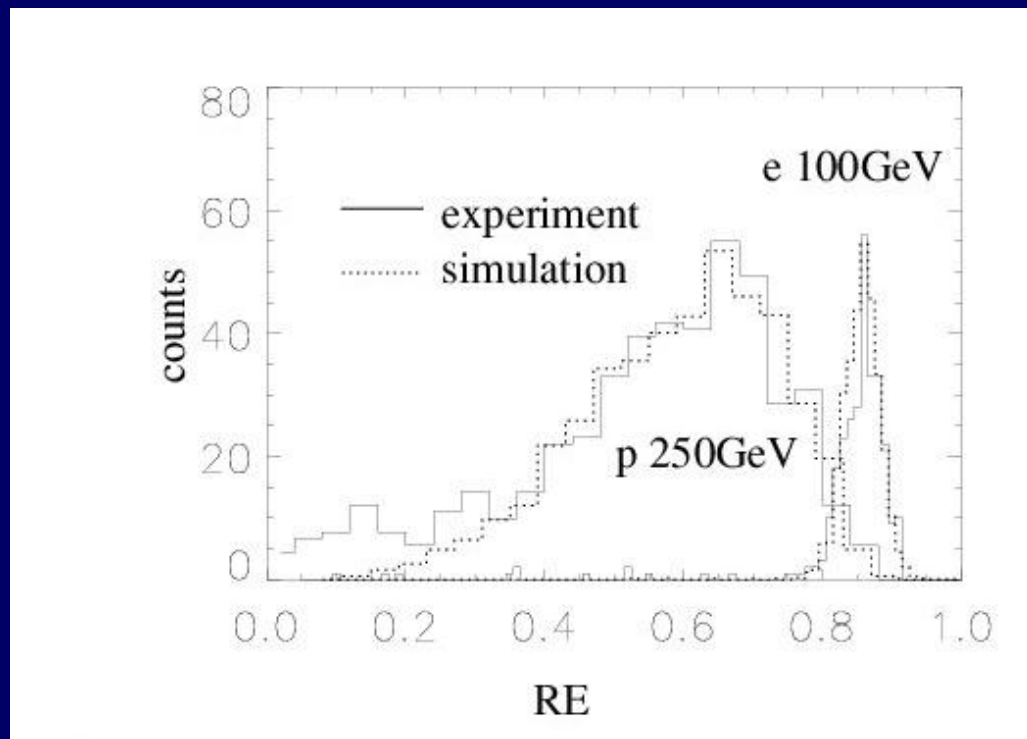
The resolution is **<0.6 degree** for vertical electron beams with energy from 10 GeV to 200 GeV. It will be improved by correction of SciFi positions.

電子・陽子選別

Energy Concentration



$$RE = \frac{\text{between white lines}}{\text{Total}}$$

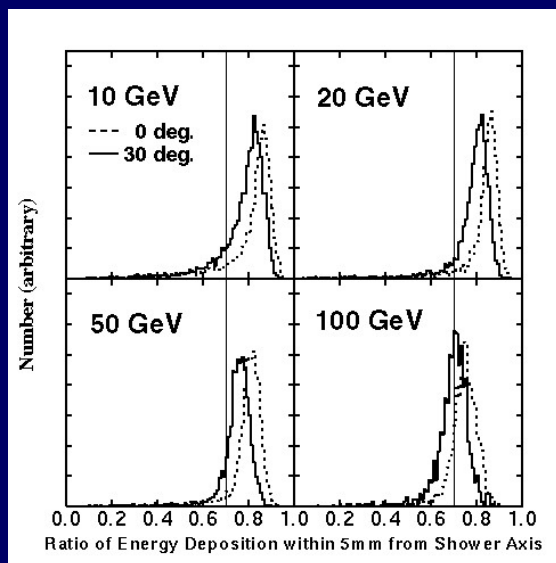


RE distributions of vertical beam.
(normalized by number of events)

The REs for electrons concentrate around **0.85**, but those for protons distribute widely.

Energy Concentration

BETS



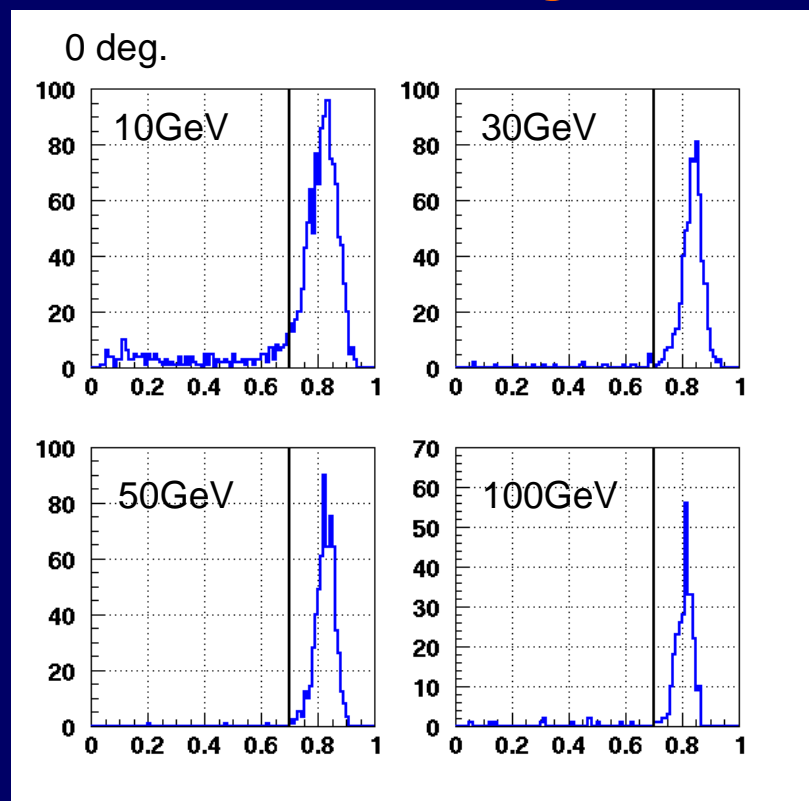
Improve

RE distribution with different energy beam for BETS-2. The peaks shifted to left as beam energies increased.



Saturations of CCD ?

PPB-BETS



For PPB-BETS, the shifts of peaks disappeared because of improvement of I.I and CCD system.

PPB-BETSの基本性能

Detector Weight	200 kg	including un-pressurized gondola
(Total Weight including ballast for 30 days		500 kg)
Power Consumption	70 W	supplied by solar batteries
Observation Altitude	~35 km	controlled by auto-level system
Data Transfer Rate	2.4 kbps	by the Iridium telephone line
	(64 kbps	by the telemetry to the stations)

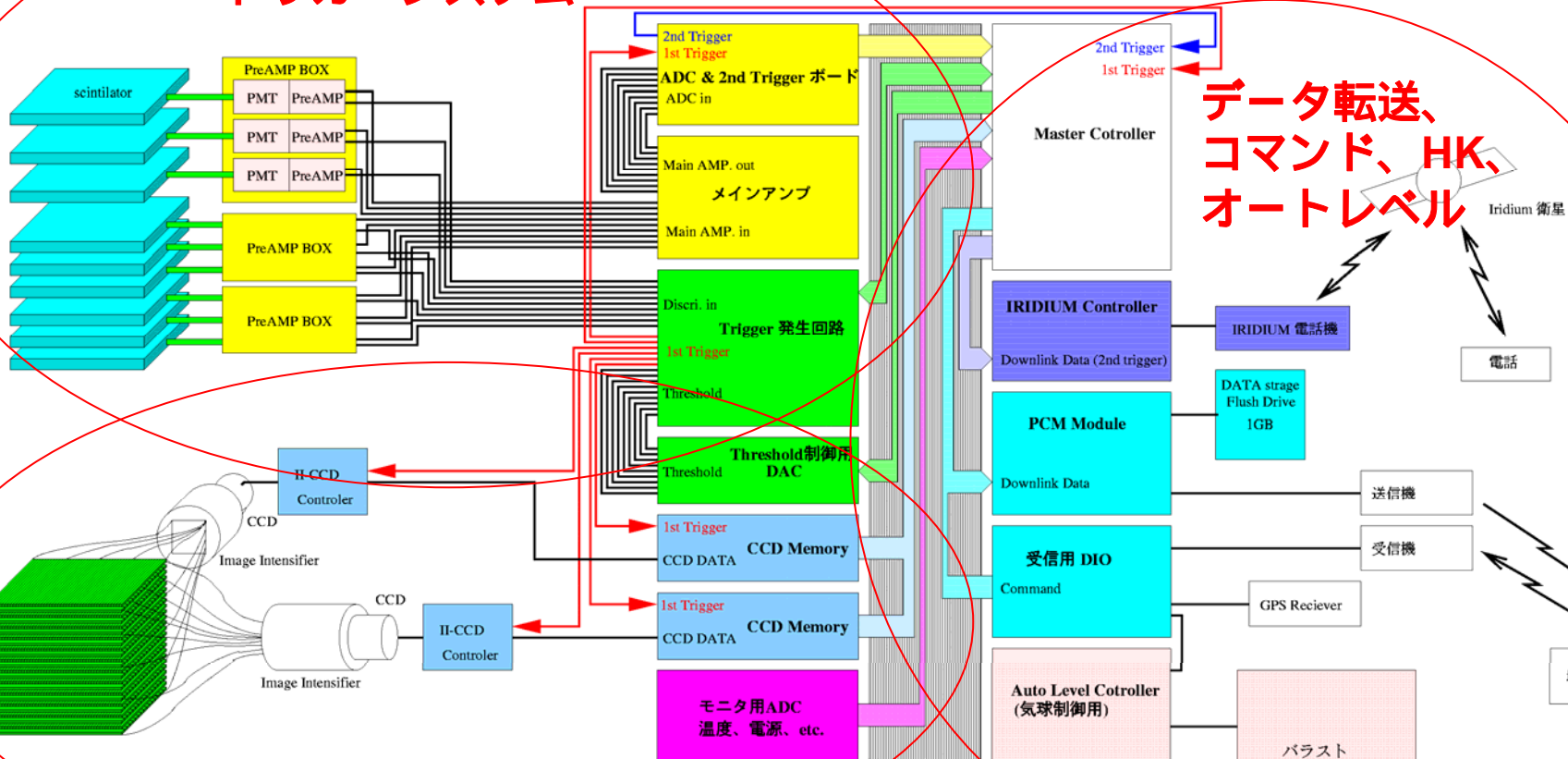
Energy Range	10 ~1000 GeV	by two modes of trigger
Geometrical Factor	550~600 cm ² sr	by simulation (> 100 GeV)
Energy Resolution	12~ 16 %	by plastic scintillators
Angular Resolution	0.35~ 0.6 °	by shower image of SciFis

荷出し直前のPPB-BETS 観測装置



データ収集系ブロック図

トリガーシステム



画像データ

太陽電池と充電電池による電力供給システム

太陽電池パネル 22 V 100 W × 4面
Sharp NT3436 変換効率 16%

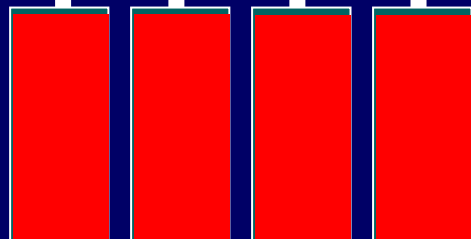
放球前

外部電源



DAQシステム 70 W

電力供給・充電システム



充電電池(ニッケル水素)
満充電 > 14 V
67.5 W × 4パック = 270 W

太陽電池と充電電池による電力供給システム



太陽電池パネル 22 V 100 W × 4面
Sharp NT3436 変換効率 16%

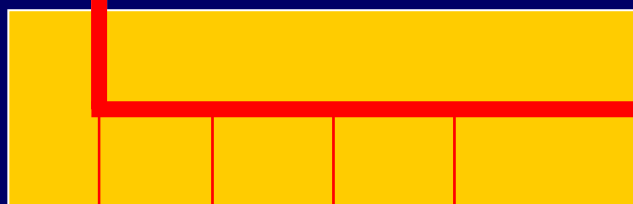


フライト中

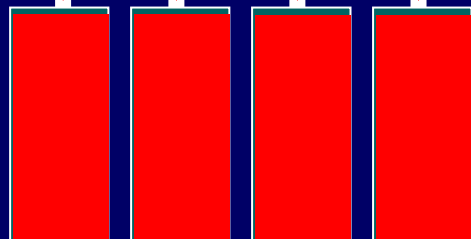
DAQシステム 70 W

> 14V

電力供給・充電システム



トリクル充電
160 mA



充電電池(ニッケル水素)
満充電 > 14 V
67.5 W × 4パック = 270 W

太陽電池と充電電池による電力供給システム

太陽電池パネル 22 V 100 W × 4面
Sharp NT3436 変換効率 16%

日没時

DAQシステム 70 W

11.0Vでシャットダウン

< 14V

電力供給・充電システム

放電 約4時間

充電電池(ニッケル水素)
満充電 > 14 V
67.5 W × 4パック = 270 W

太陽電池と充電電池による電力供給システム

太陽電池パネル 22 V 100 W × 4面
Sharp NT3436 変換効率 16%

日の出



DAQシステム 70 W
13.5Vで起動
11.0Vでシャットダウン

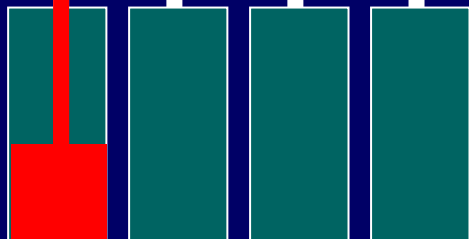
電力供給・充電システム



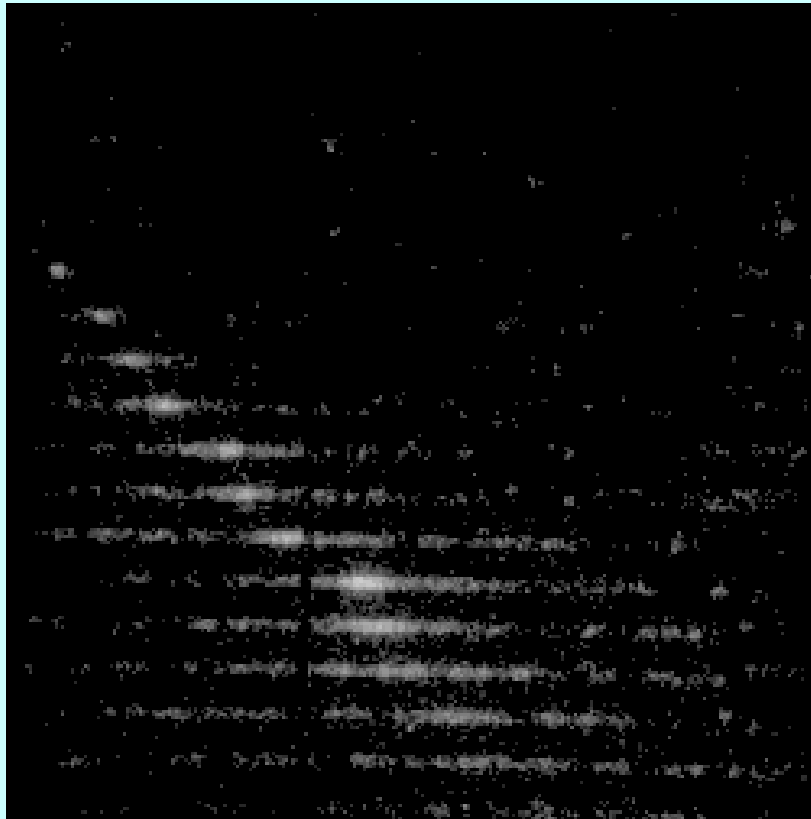
13.5V

標準充電
1~1.5 A

14.3 V 又は
5時間後に
トリクル充電
~ 160 mA



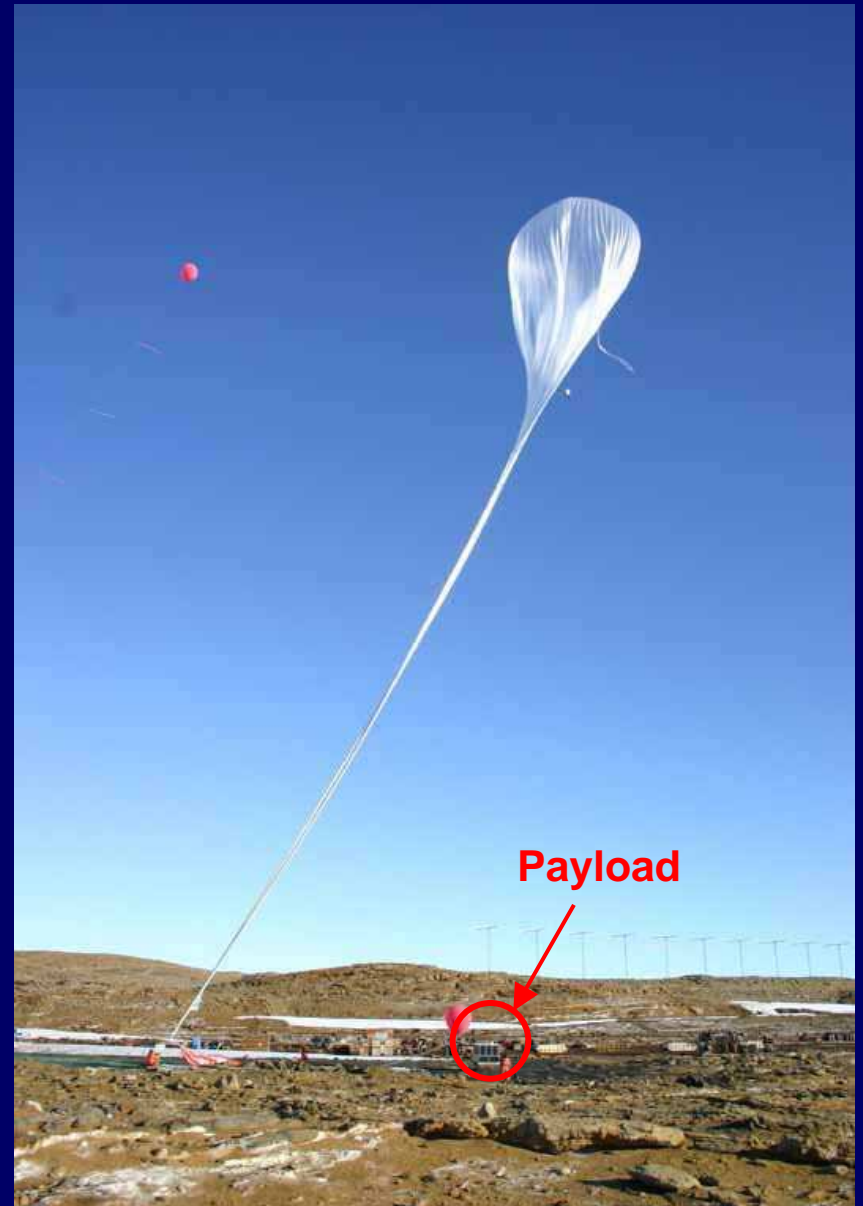
充電電池(ニッケル水素)
満充電 > 14 V
67.5 W × 4パック = 270 W



衛星電話で転送された
昭和基地で得られた
シャワー画像の例

2002年12月30日放球
検出器浮上せず、回収

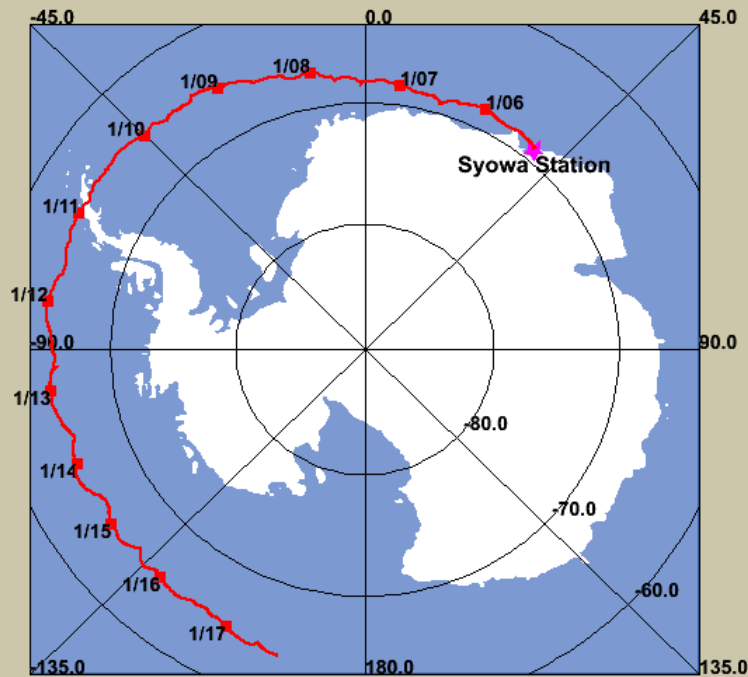
PPB-BETS 放球 2004年1月5日 (第45次隊)



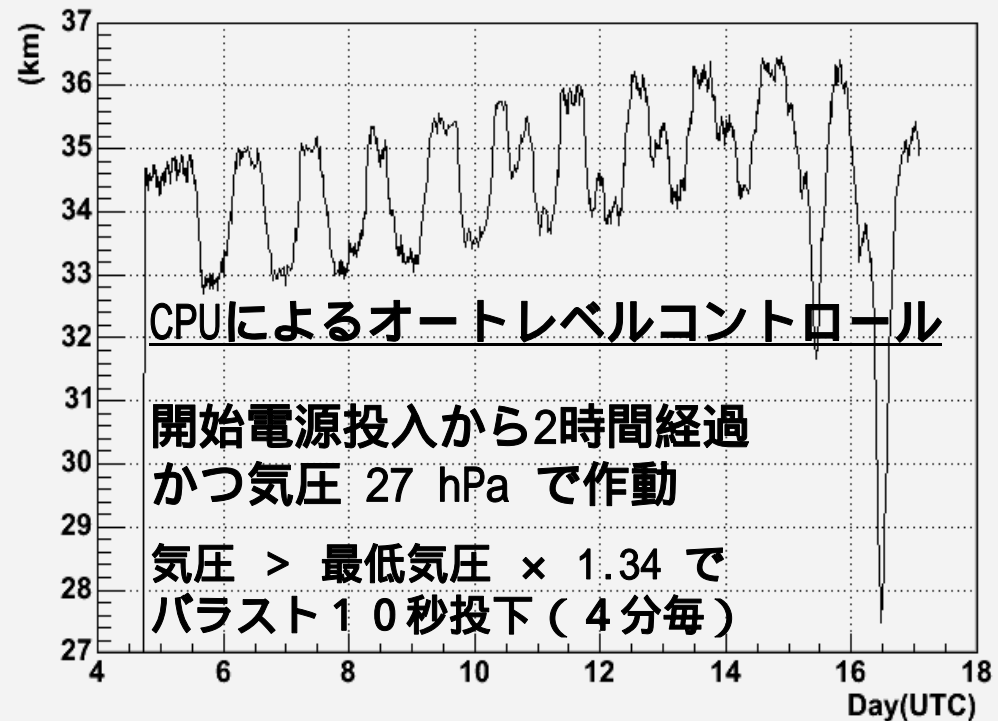
PPB-BETS 2004 フライト

- 昭和基地より2004年1月4日放球
 - 現地時間 18時57分 (日本時間 5日0時57分)
 - 放球時 地上風 4 m/s (瞬間風速 6 m/s)
 - 平均水平浮遊高度 34.6 km (7.3 g/cm^2)
 - 1月4日から17日までの13日間のフライト
- HE ~ 5700イベント
LE ~ 22000イベント

PPB-BETS Postion

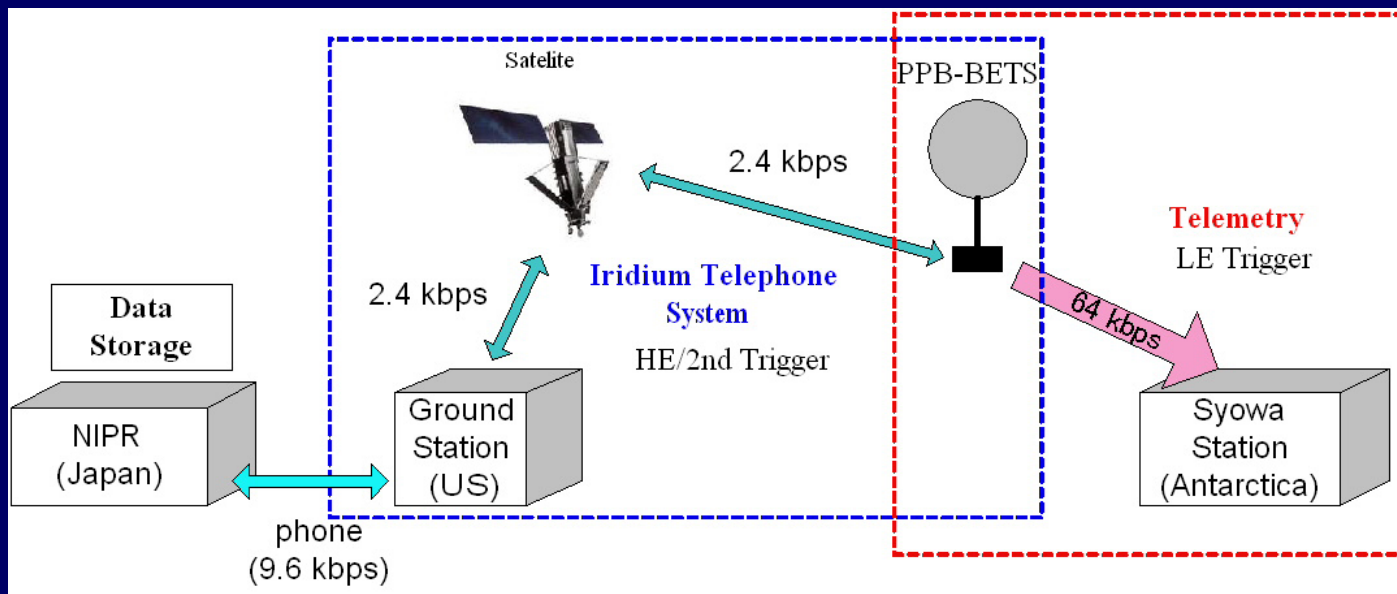


Altitude



トリガーシステムとデータ転送システム

- **Low Energy (LE) Trigger**
 - 10 GeV – 100 GeV
 - 10 hours from launching
 - **High Energy (HE) Trigger**
 - 100 GeV – 1 TeV
 - **2nd Trigger**
 - Software trigger for HE
- Direct telemetry to Syowa Station
- Storage to on-board disk
- Iridium satellite telephone



イリジウム衛星電話によるデータ転送システム

イリジウム衛星電話 2.4 kbps

- 1) 画像データ 5 ファイル
- 2) コマンド送信
- 3) HKデータ 1 ファイル (254 byte)

- データ転送

1ファイル = 1 イベント
エラー確認、再転送

- コマンド

1stトリガーのディスクリ値 14ch (HE 9, LE 3, SINGLE 2)
Page 1 ~ 8 (予め設定値を用意)

個別チャンネル設定

ディスクリ14chのマスク設定

トリガーモード (HE, LE, SINGLE, LED)

2ndトリガーの設定・解除

(I.I.ゲイン変更)

(テレメトリモード切替え)



イリジウム : 66衛星
(6軌道面 × 11衛星)



Motorola 9505 : 7W

WEBによるモニター

HK - Microsoft Internet Explorer

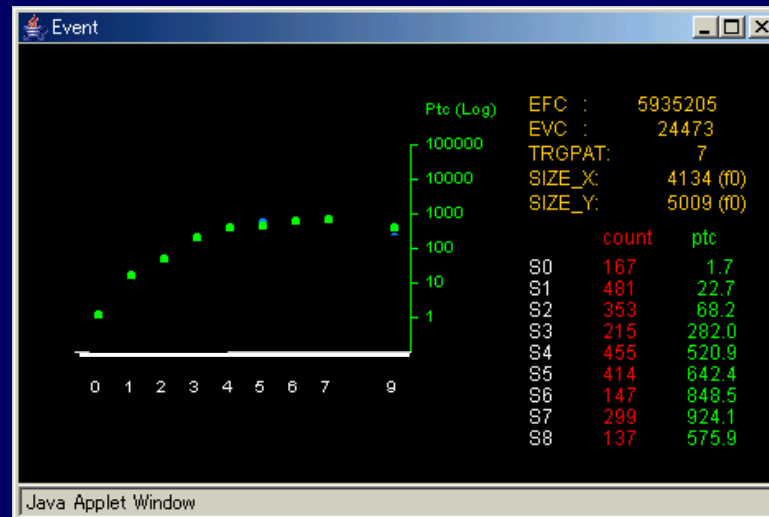
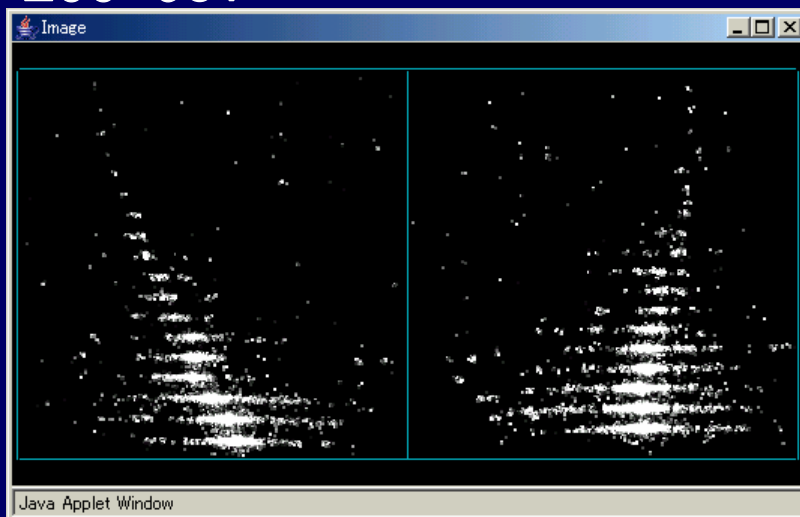
Filename HK07464 Mod. Jan 17 10:44:08 JST
Newest file HK07464

get Auto Specify send input next prev 5 40

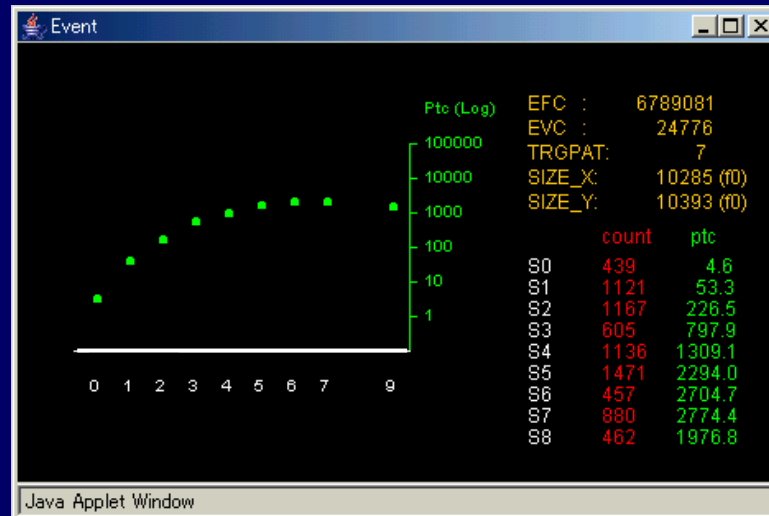
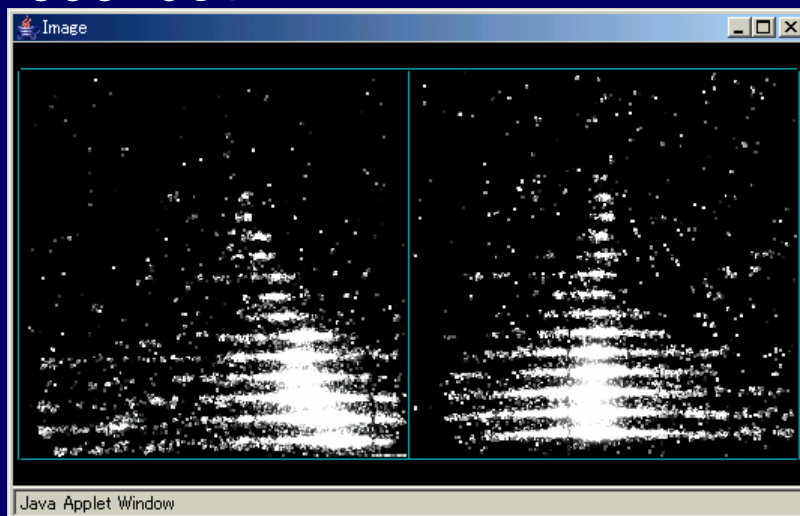
Scinti S0 UP 61960 --- [Hz] S0 56729 --- [Hz] S1 27053 --- [Hz] S2 64756 --- [Hz] S3 35091 --- [Hz] S4 38707 --- [Hz] S5 53391 --- [Hz] S6 28301 --- [Hz] S7 49889 --- [Hz] S8 40334 --- [Hz] DAQ DAQ 52116 --- [Hz] TRIG SINGL 36855 --- [Hz] LOW 51825 --- [Hz] HIGH 34025 --- [Hz] LIVE LIVE 55356 --- [%]	HV HV1 763.07 [M]	BAT.V V2 13.535 [M]	DISCR 1:0LL 243 0.24 [M]
	HV HV2 573.33 [M]	I.I. I.I. 1 7.61 [M]	MON 2:0LU 743 0.74 [M]
	HV HV3 452.82 [M]	I.I. I.I. 2 7.48 [M]	3:1HL 678 0.67 [M]
	DIREC DIR1 0.03 []	PI PIV1 11.879 [M]	4:0HU 1274 1.27 [M]
	DIR2 0.04 []	PIV2 -12.07 [M]	5:2LL 276 0.27 [M]
	DIR3 0.08 []	PIV3 5.10 [M]	6:2HL 1546 1.54 [M]
	DIR4 0.0 []	PIV4 4.98 [M]	7:3HL 2042 2.04 [M]
	DIR5 2.26 []	PIV5 -5.049 [M]	8:2SL 241 0.24 [M]
	DIR6 1.50 []	PIV6 15.009 [M]	9:4HL 1022 1.02 [M]
	DIR7 0.07 []	BAT.I Norm 2/4 0.01 [A]	10:5HL 1972 1.97 [M]
DIR8 0.08 []	BAT.V V3 13.511 [M]	11:6HL 445 0.44 [M]	
GA GA1 3.24 []	AUTOB FC-LM 3171050. [counts]	12:7HL 402 0.4 [M]	
GA2 0.07 []	FC-H ST 16.0 [status]	13:7LL 337 0.33 [M]	
TMP THM1 44.908 [degC]	PRS-L 6.60 [hPa]	14:8HL 3796 3.79 [M]	
THM2 41.440 [degC]	PRS-H 6.62 [hPa]	15: 4072 4.07 [M]	
THM3 51.404 [degC]	BL-NUM 35.587 [times]	TRIG MASK 0x0	
THM4 51.990 [degC]	ENB/DSB 0.0 [ch]	DISCR 1:0LL 245 0.84 [ptc]	
THM5 46.764 [degC]	GPS GPS-ALT 34900. [m]	SET 2:0LU 751 4.99 [ptc]	
THM6 48.962 [degC]	AUTOB BL-DRP-T 4190.0 [s]	3:1HL 690 7.99 [ptc]	
THM7 57.460 [degC]	BL-DRP-P 7.29 [hPa]	4:0HU 1290 11.99 [ptc]	
THM8 53.064 [degC]	GPS GPS-LAT 63.5079 [DDMM.]	5:2LL 284 10.01 [ptc]	
SOL-T THM1 39.291 [degC]	GPS GPS-LONG 164.4948 [DDDMM.]	6:2HL 1566 25.0 [ptc]	
THM2 51.306 [degC]	DAY-HR 17.01 [DD.HH.]	7:3HL 2062 250.01 [ptc]	
THM3 33.821 [degC]	MIN-SEC 46.15 [MM.SS.]	8:2SL 251 0.69 [ptc]	
THM4 28.84 [degC]	Pres. I.I.1 1.80 [M]	9:4HL 1034 399.79 [ptc]	
BAT-T THM1 63.614 [degC]	I.I.2 1.96 [M]	10:5HL 1994 400.07 [ptc]	
THM2 61.367 [degC]	SDisk Avail-H 778332 [KB]	11:6HL 451 650.52 [ptc]	
THM3 64.297 [degC]	Avail-L 760.08 [MB]	12:7HL 408 650.0 [ptc]	
THM4 64.151 [degC]	CNT 2nd-TRG 16241. [counts]	13:7LL 338 39.92 [ptc]	
SOLAR VOLT 18.480 [M]	DUMMY PRS.1000 7.48 [hPa]	14:8HL 3840 8118.46 [ptc]	
Elec.I 4.48 [A]		15: 4095 4.09 [M]	
BAT.V V1 13.546 [M]		TRIG MODE 0x0c	
BAT.I Norm 1/3 0.00 [A]			

電子と思われるシャワー画像例

200 GeV

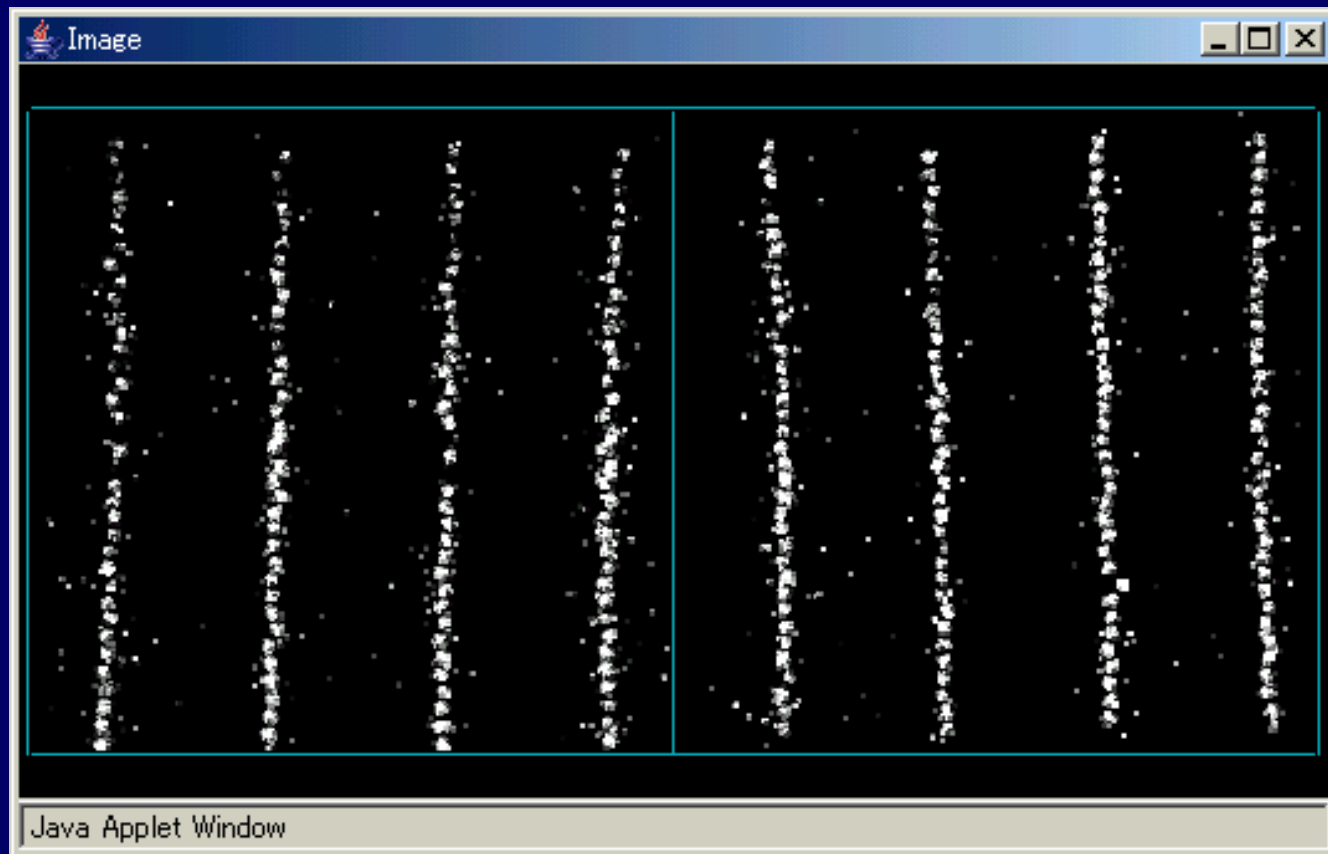


600 GeV



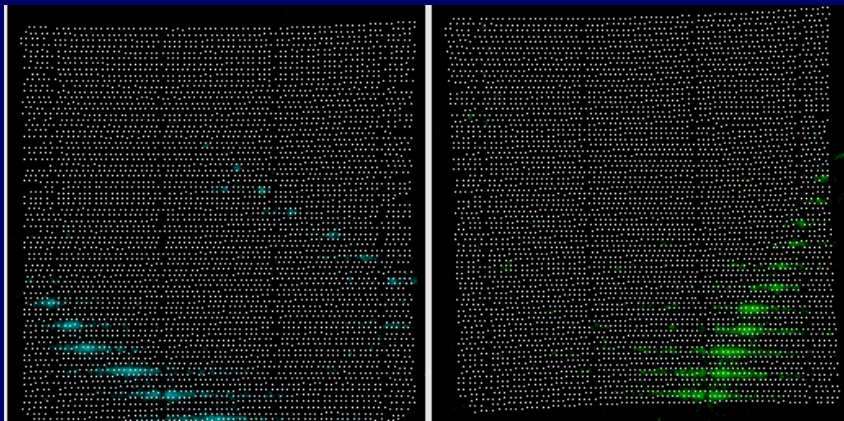
LED画像データ

タイマーによるトリガーで約1時間に1回LED画像を取得
LEDで144本のクリアファイバーを光らせる
フライト中のファイバー位置補正用

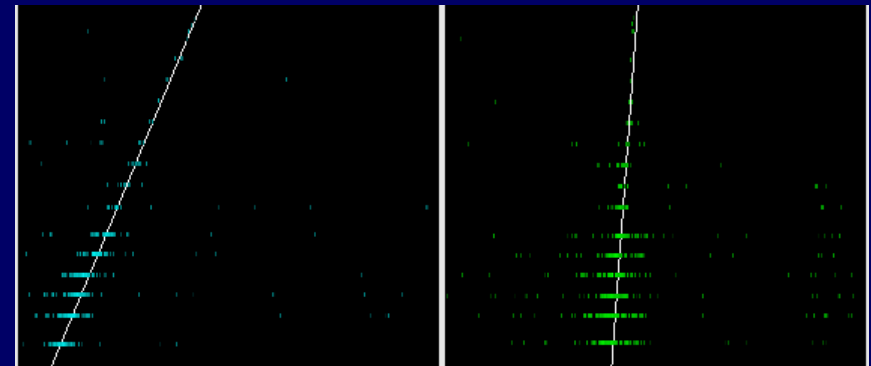


CCD画像から検出器でのSciFi配置へ再構成

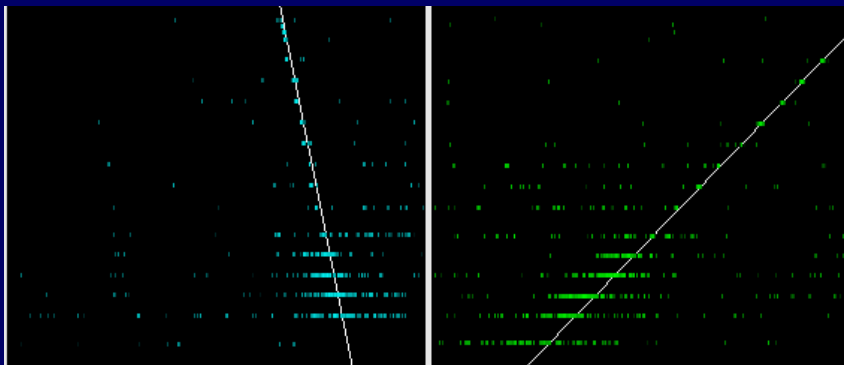
CCD画像



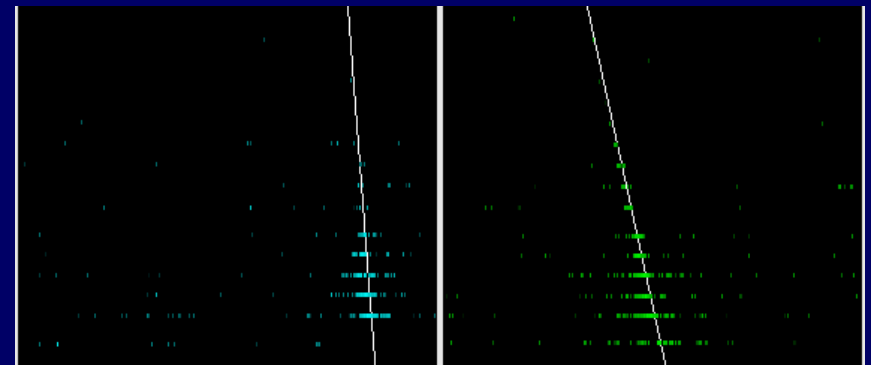
SciFi に対応する点



電子候補

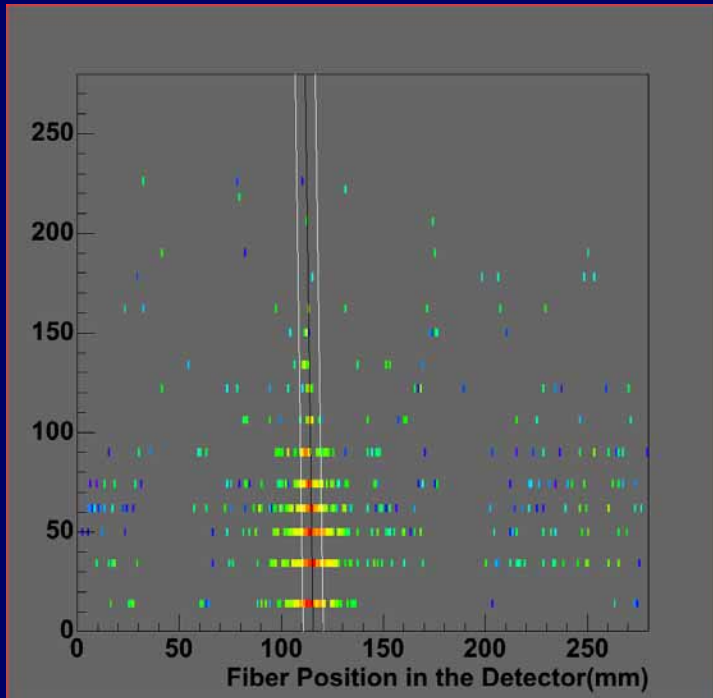


陽子候補

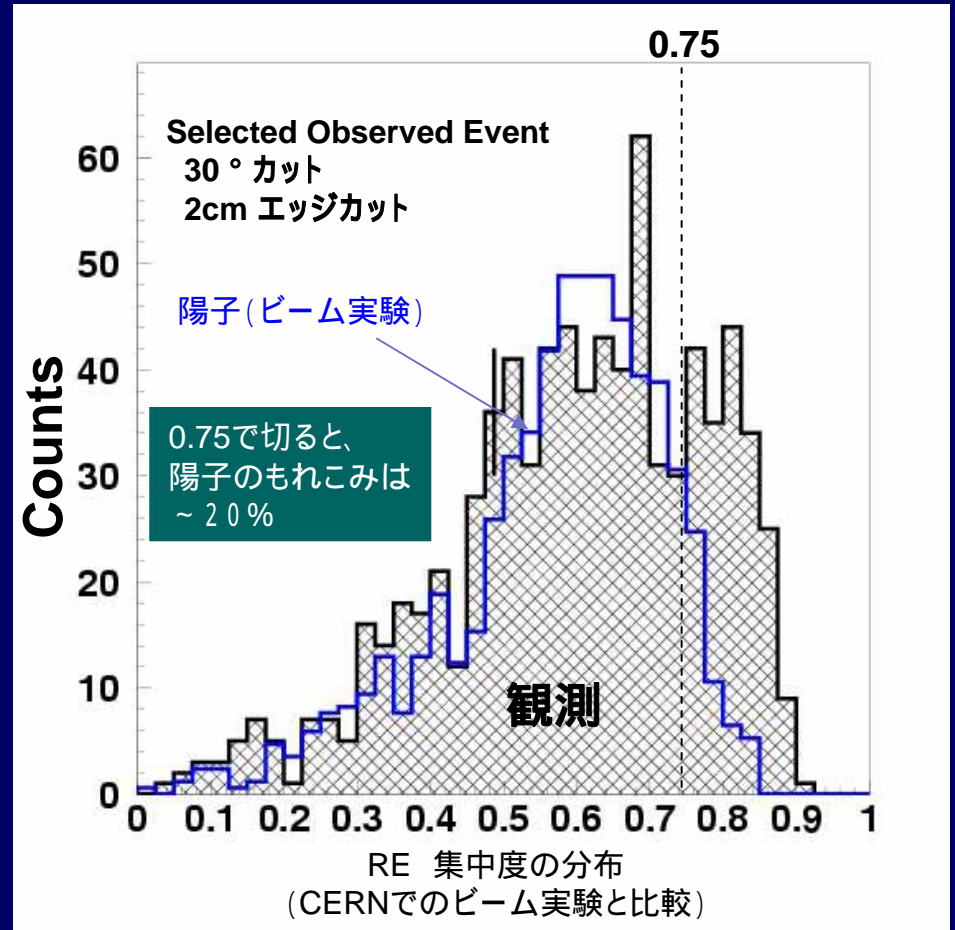


ガンマ線候補

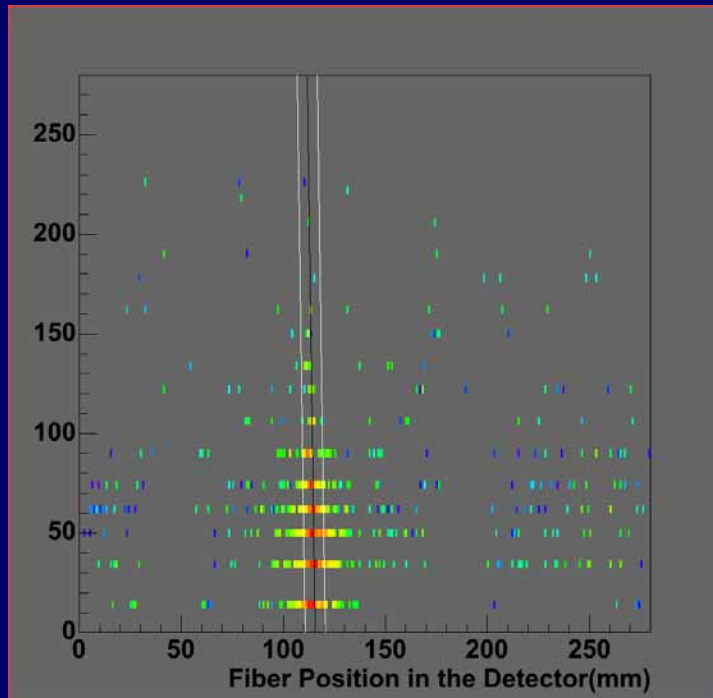
電子・ガンマ線と陽子の弁別



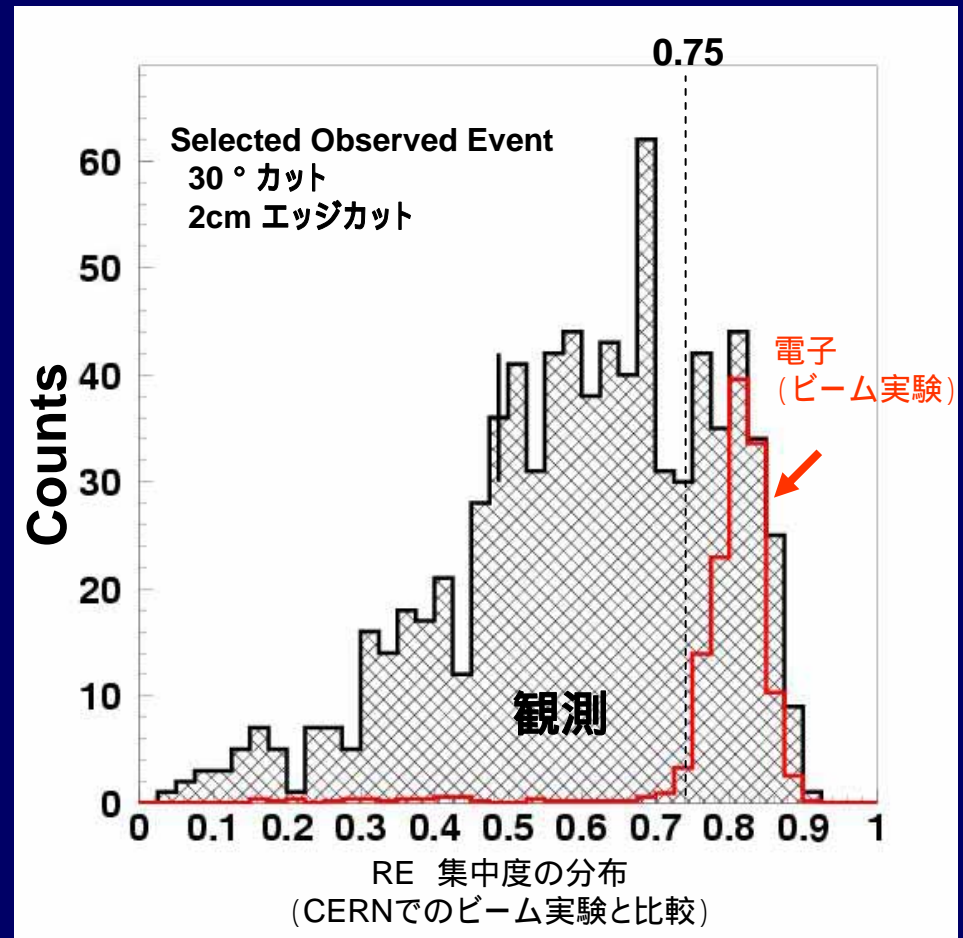
$$\text{集中度} = \frac{\text{白線に囲まれた部分の輝度}}{\text{全輝度}}$$



電子・ガンマ線と陽子の弁別

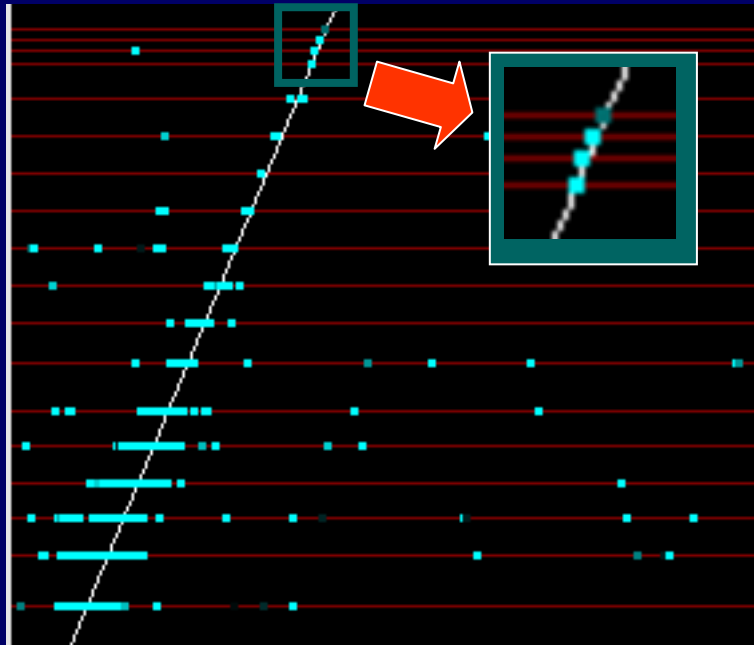


$$\text{集中度} = \frac{\text{白線に囲まれた部分の輝度}}{\text{全輝度}}$$

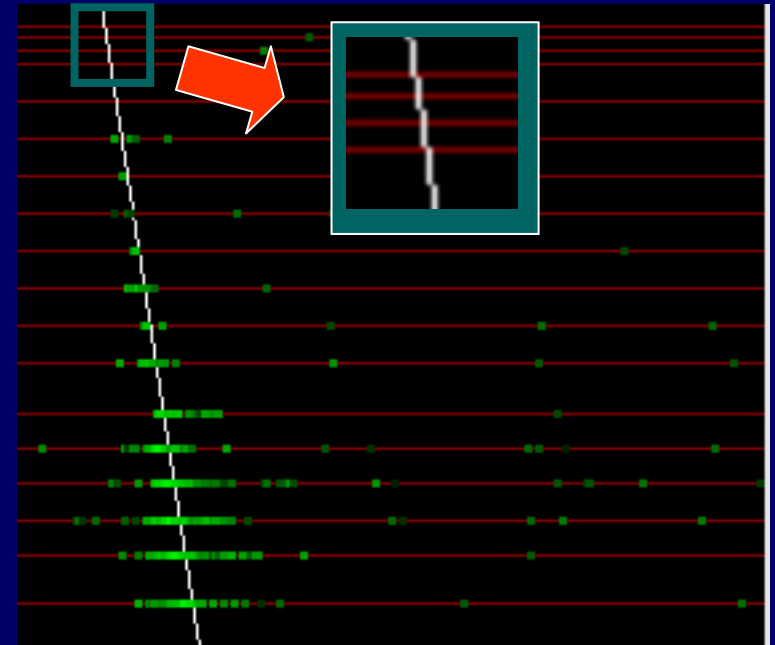


電子・ガンマ 選別

シャワー上部 (0 r.l.) でシャワー軸上に
SCIFIにヒットしているか

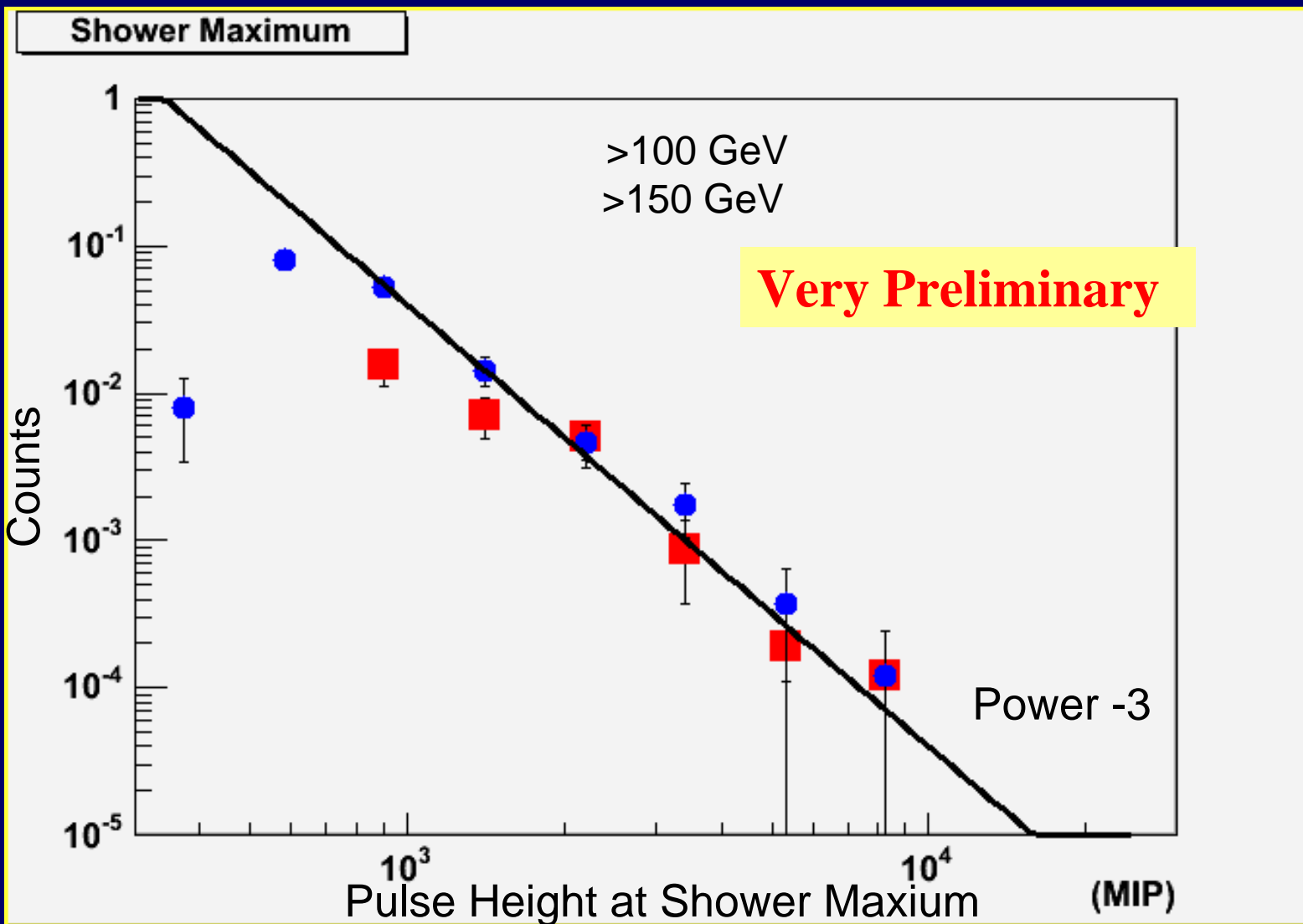


電子候補



ガンマ線候補

Preliminary Results



まとめ

- 南極周回気球によってPPB-BETS (PPB-7号機) は13日間の観測を実現した。これは三陸でのBETSによる観測時間合計の10倍以上の長時間観測である。
- 取得されたデータは、エネルギー10GeV以上で22000イベント、100GeV以上で5700イベントとなった。このうち100GeV以上の電子の期待数は100例程度で、これは三陸でのBETSによる観測数の数十倍である。
- 現在、取得データの半分ほどを解析し、100GeV以上ではほぼ予測される数の電子を検出している。残りのデータも解析を続けている。
- 第2次PPB実験のためにイリジウム衛星電話によるデータ転送、コマンド送受信のシステムが開発され、気球観測の通信技術の革新となった。
- 太陽電池 + 充電池による電力供給システムが確立され、安定した長期間気球観測への対応が可能となった。
- オートバラストシステムによって高高度でのレベルフライトが可能になった。
- 極地研と宇宙研の共同プロジェクトによって、大型観測装置による長時間気球観測の道が開かれた。特に44次および45次の隊員の皆さんの厳しい現地での活躍が貴重なデータの取得に結びついた。
- さらなる長期間観測 (~ 100日間) を目指したスーパープレッシャー気球などの気球技術の発展に期待。