

BESS実験

高エネルギー加速器研究機構

吉村浩司

@総研大短期スクール 2009.9.29

内容

イントロダクション（素粒子物理学と宇宙線）

BESS気球実験

南極へ BESS-Polar実験

究極の実験 BESS-Polar II

おまけ（プロモーションビデオ）

イントロダクション

宇宙線とは

宇宙空間から地球に入射する高エネルギーの放射線のことである。1912年以降、V.F. ヘス (Victor Franz Hess)は、気球を用いた放射線の計測実験を繰り返し、地球外から飛来する放射線を発見した。彼は、この業績により、1936年にノーベル物理学賞を受賞している。

(ウィキペディアより)

HESSによる気球実験

気球に自ら乗り込んで17,500フィートまで上昇し、高度と放射線の強度を測定(1912)

上空に行くほど放射線強度が増加

放射線が**宇宙起源**であることを突き止めた



宇宙線と素粒子の発見

初期の素粒子の発見は宇宙線によりなされた

陽電子の発見 1912 Dirac理論の検証

ミュー粒子 1937 重い電子

パイ粒子 1947 湯川の中間子論

その後、素粒子研究の主流は、加速器によりエネルギーを上げた粒子を用いて衝突反応を調べる方向に移っていく

加速器の限界

人類が作り出すことができるエネルギー

10^{14}eV



14桁も足りない

力の統一が行われるのは

10^{28}eV

どうすればいいか？

宇宙初期の高エネルギー状態の痕跡を観測

ビッグバン（火の玉）宇宙

ビッグバンと初期宇宙

宇宙には初期宇宙の痕跡が残っている可能性がある

3K輻射

物質・反物質の対称性

ダークマター

初期宇宙のなごり ミニブラックホール？

観測による初期宇宙の解明

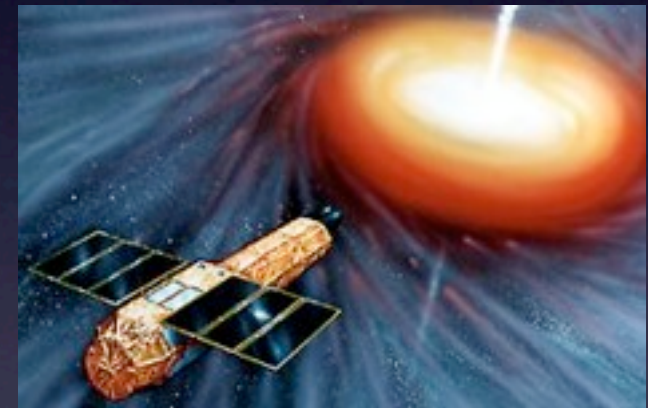
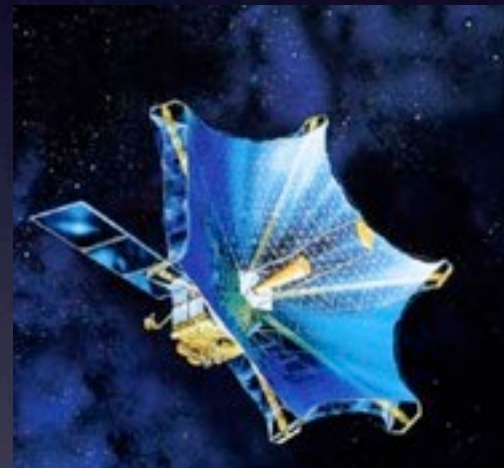
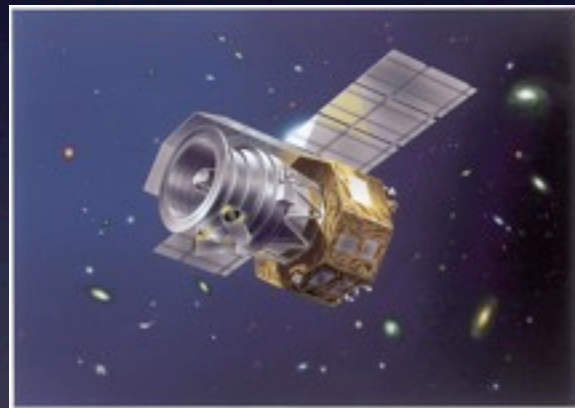
様々な波長の光での観測

可視光

赤外線

電波

γ 線, X線



光では30万年より遡ることができない

初期宇宙は不透明

初期宇宙を知るには素粒子物理が不可欠



反粒子望遠鏡で探る初期宇宙の姿

- 反粒子消滅?の謎を探る

- 反ヘリウムの探索

- 宇宙初期に消滅したはず。
 - もし観測されると局所的な反物質宇宙(反銀河)の存在を示唆?

- 宇宙初期起源反陽子を探る

- 原始ブラックホールの蒸発
 - 初期宇宙の密度揺らぎ?
 - 超対称性ダークマター粒子の対消滅
 - 超高温状態で生成?

- 反粒子の探索を通して

- 宇宙の初期過程を探る

現在

超対称性粒子の生成?

粒子と反粒子のアンバランス?

原始ブラックホールの生成?

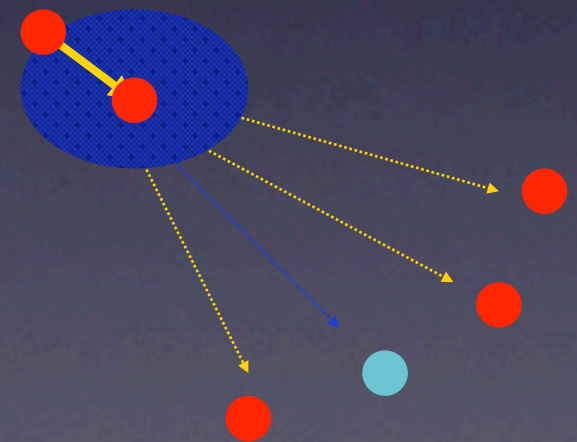
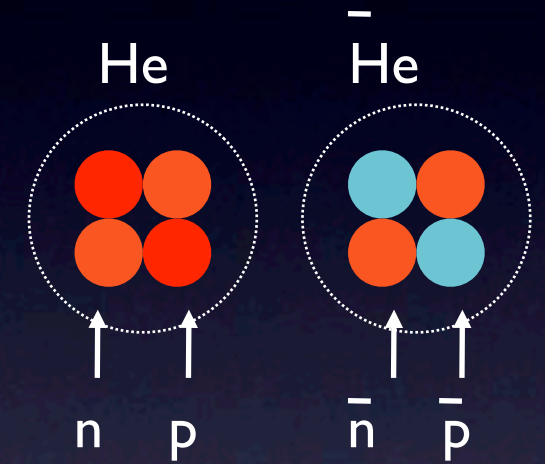
ビッグバン宇宙の始まり



宇宙線反粒子

初期宇宙を探るプローブ(望遠鏡)

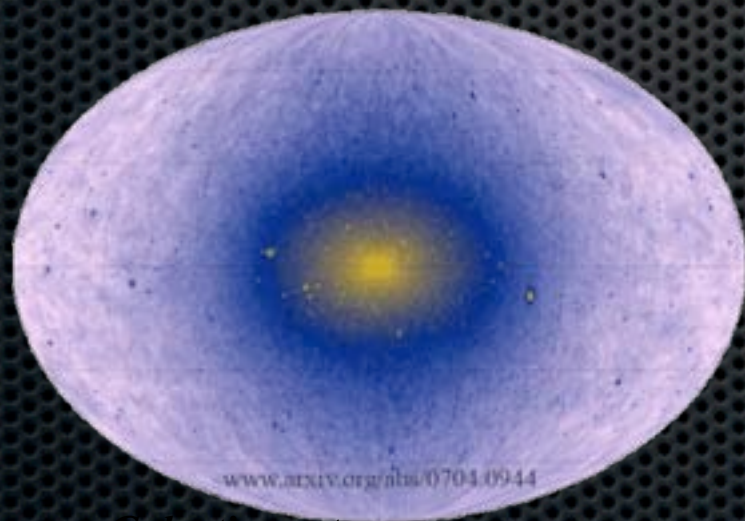
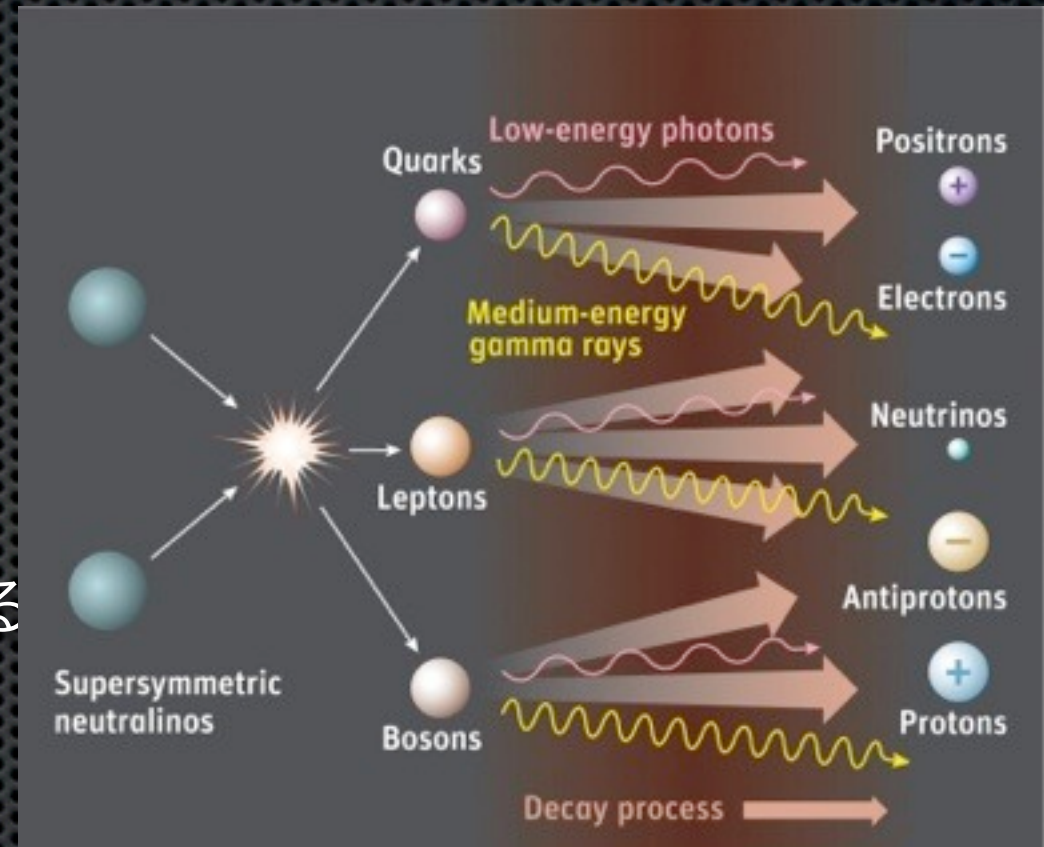
- 反粒子: 質量は同じだが、電荷の符号が反対の粒子
陽子(+) → 反陽子(-)、ヘリウム(++) → 反ヘリウム(--)
- 反粒子でできた反物質は天然には存在しない
反ヘリウム: まだ、誰も見たことがない
 - ・宇宙構成物質・反物質の非対称性は未解決の謎。
- 反陽子は微量ながら観測
反陽子: $\bar{p}/p \sim 10^{-5}$ @ 1 GeV
 - ・陽子と星間ガス(陽子)の衝突で二次的に生成。
 - ・初期宇宙(一次)起源・反陽子は?



ダークマターの間接探索

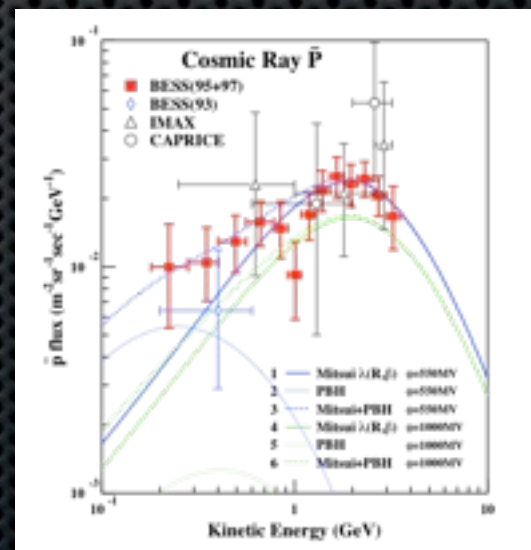
反陽子の特長

- バックグラウンドがよく理解できている
- 他の宇宙線観測により強く制限
 - 原子核であり、宇宙線と同様の伝播をする
- 測定精度が高い
- 特徴的な信号ない、方向性がない

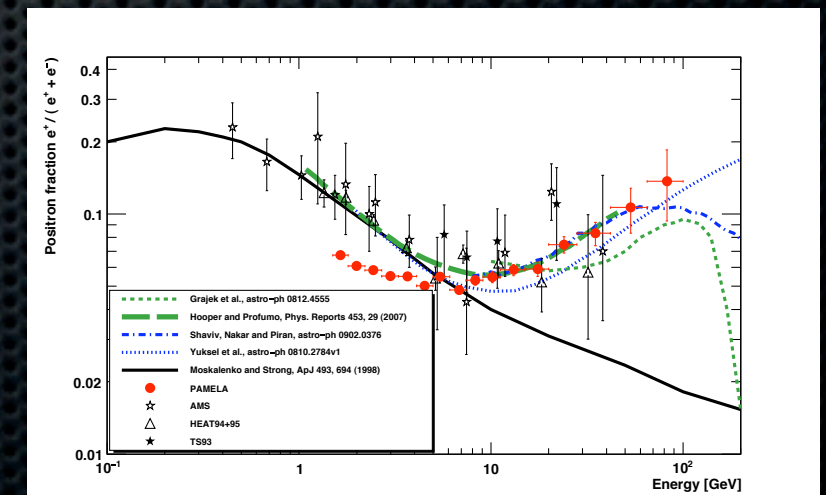


Galactic centre

ガンマ線：銀河中心



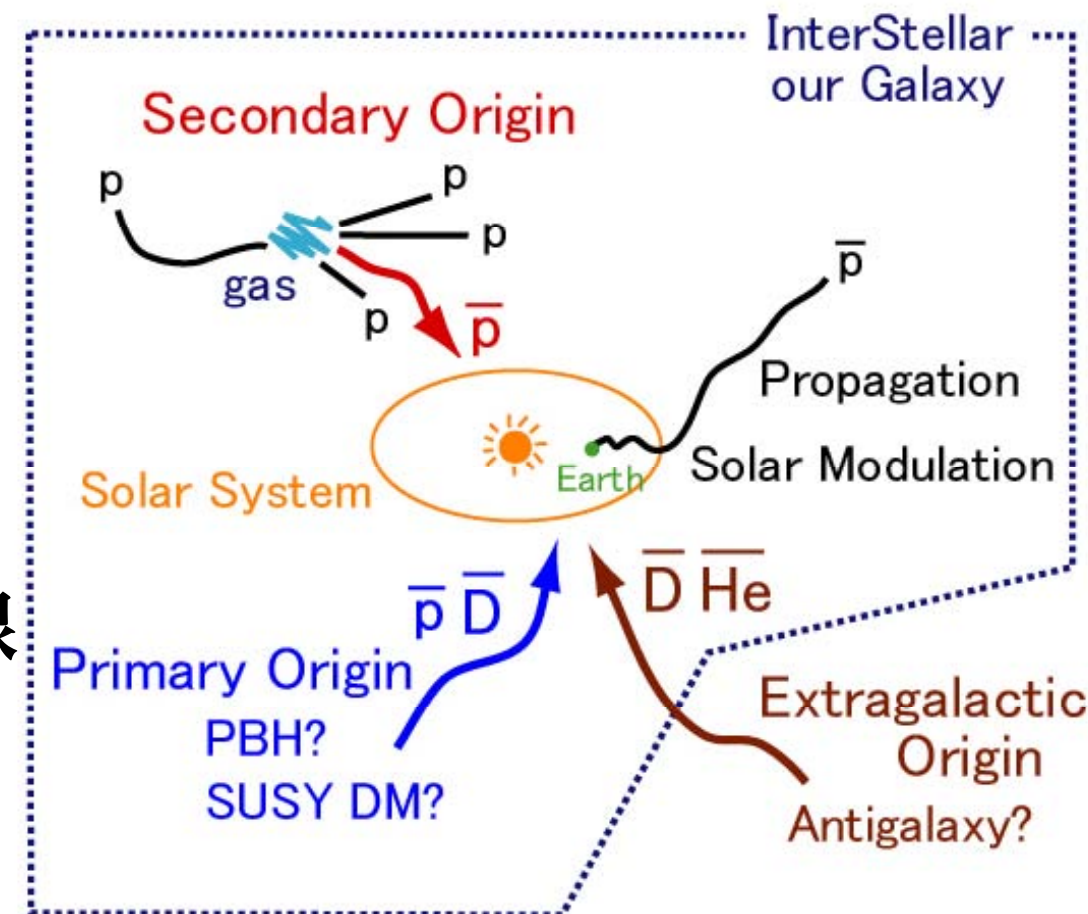
反陽子：銀河平均



電子：近傍~kpc

宇宙線反粒子の観測

- 初期宇宙の素粒子現象の探求
 - 反粒子を用いて痕跡をとらえる
- 宇宙線の基礎物理
 - 銀河内宇宙線の生成と伝播
 - 太陽風による太陽系内での宇宙線の振舞
 - 大気中での宇宙線の生成、消滅



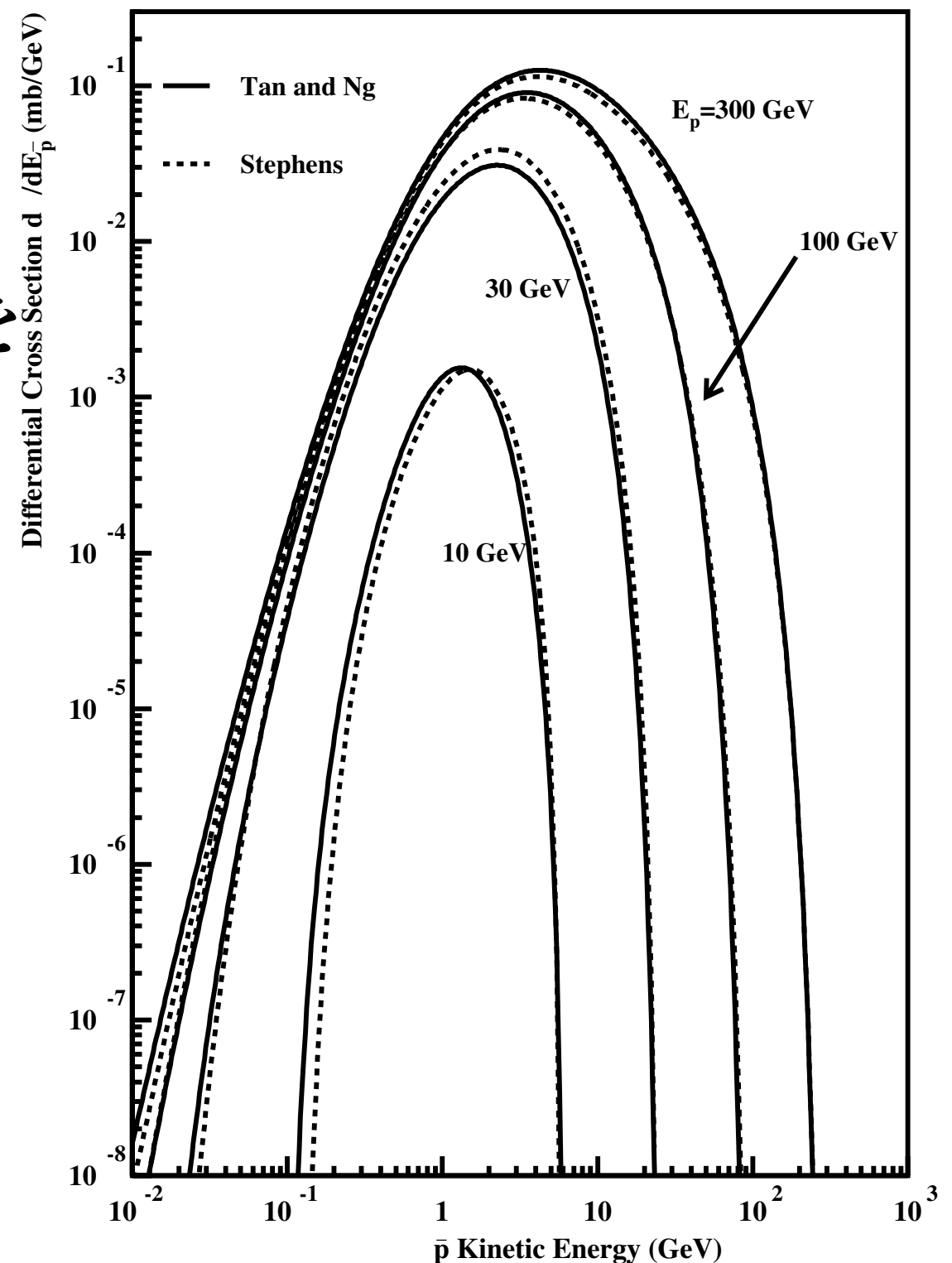
反陽子流束の理解

- 実際に観測される反陽子流束
 - いかに生成されたか？
 - 生成プロセスの理解、分布
 - 銀河内の伝播
 - 伝播モデルの違い (Standard Leaky box model or Diffusion box model)
 - Diffusive reacceleration
 - 反陽子がinelastic scatteringをしてエネルギーを損失 (Tertiary Interaction)
 - 太陽風による変調
 - 球対称モデルから、太陽磁極を考慮したモデルへ
 - 大気中での反応
 - 二次生成

衝突起源反陽子 ー生成プロセスー

- 生成断面積

- Tan and Ng, Stephens
- 12 ~400 GeVの実験データをよくフィット



衝突起源反陽子

ー伝播モデルー

Standard Leaky Box Model

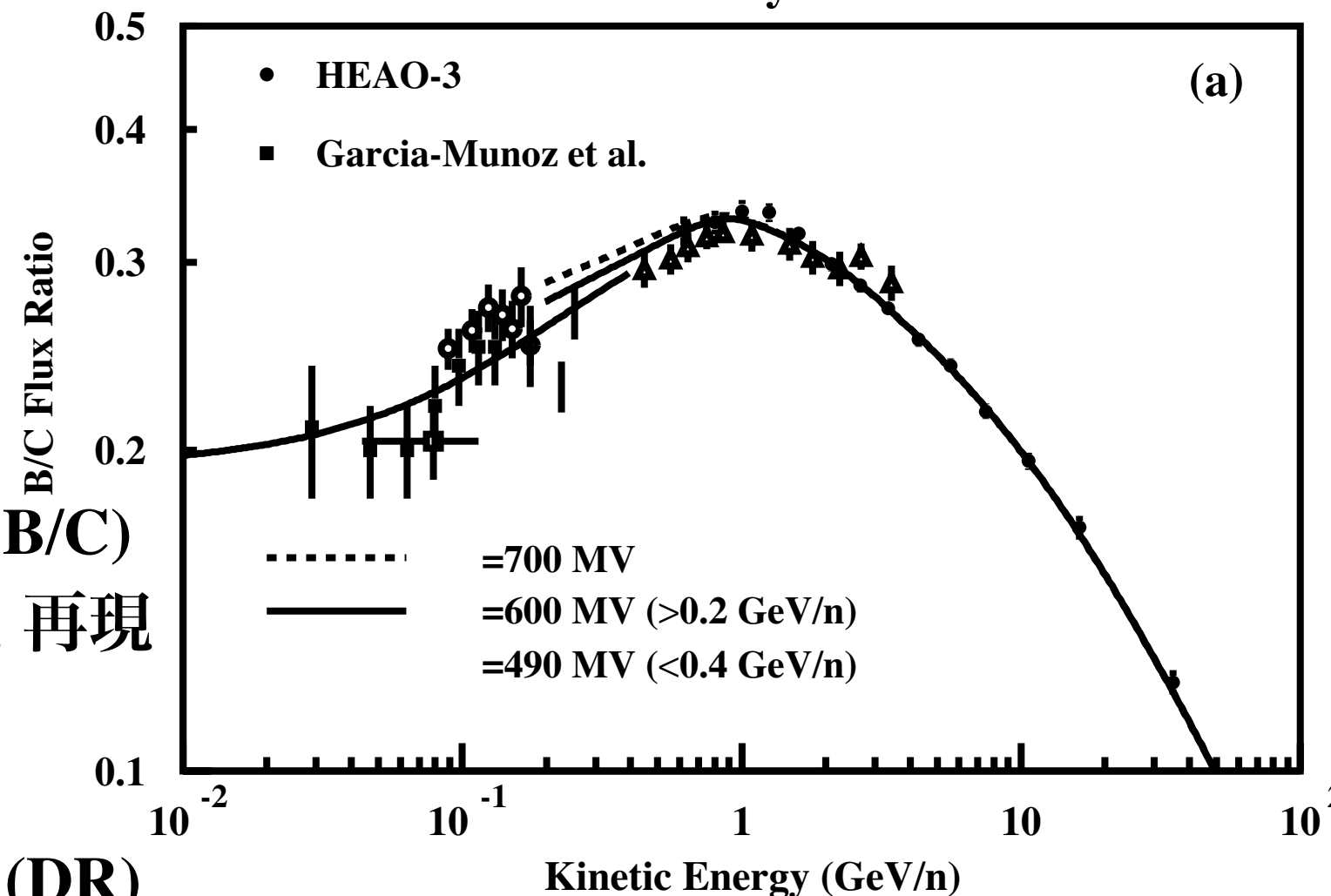
- 宇宙線伝播モデル

- 標準的な伝播モデル

- Leaky Box Model (SLB)
- Diffusion Model
- λ_{esc} をパラメトライズ (B/C)
- 宇宙線観測データをよく再現

- 再加速を考えたモデル

- Diffusive Reacceleration (DR)
- 二次のフェルミ加速による再加速

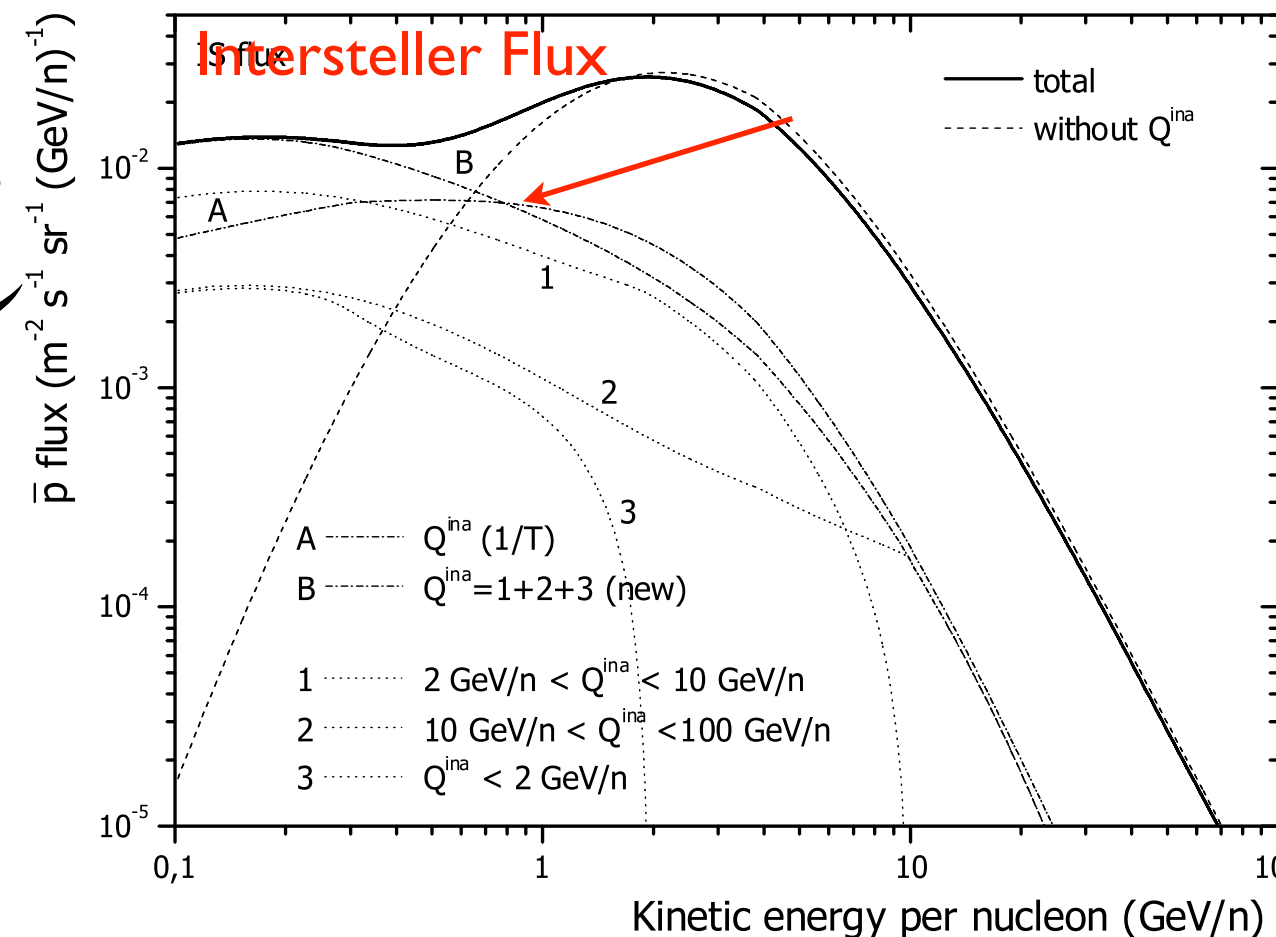


衝突起源反陽子

ー反陽子の非弾性散乱ー

● Tertiary Interaction $\bar{p}p \rightarrow \bar{p}X$

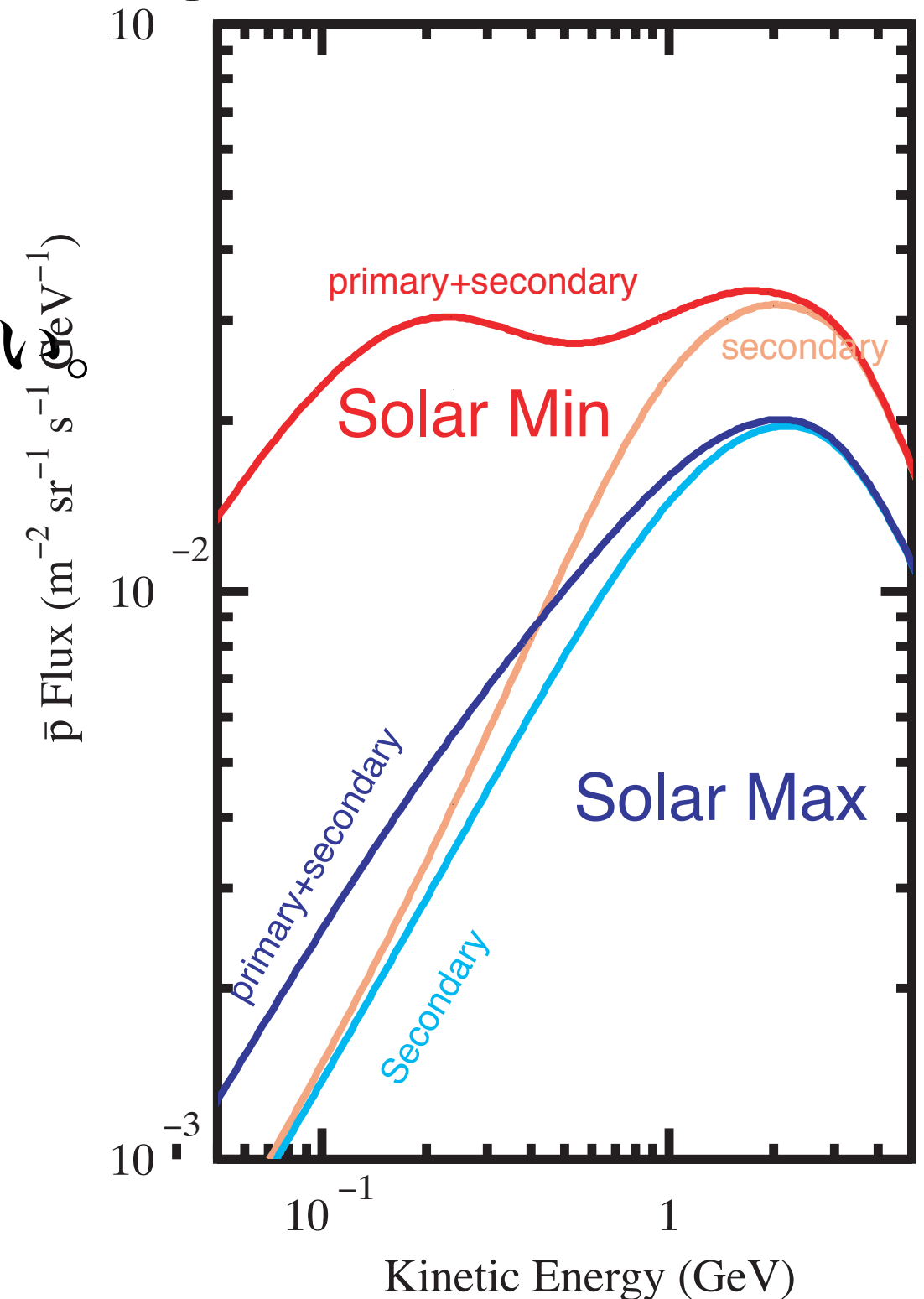
- 反陽子が伝播途中で星間物質と衝突し、非弾性散乱を起こしてエネルギーを損失する
- 結果として、反陽子スペクトルが低エネルギー側にテールを引く
- 詳細な実験データはない
 - 陽子のデータを利用



太陽風による変調

—反陽子流束への影響—

- 太陽風により変調を受ける
 - 低エネルギーほど変化が大きい。
 - ピーク領域はあまり変化を受けない
- 太陽変調モデル
 - Force-field近似
 - Fisk
 - 太陽磁極の反転を考慮したモデル
 - 22年周期
 - 電荷の違う粒子について異なる寄与



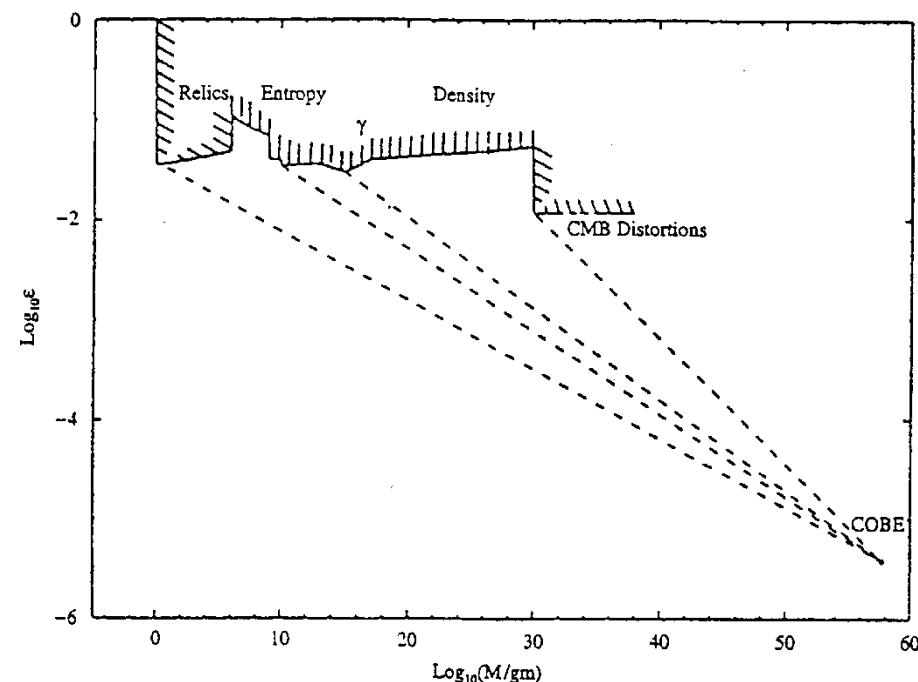
初期宇宙起源反陽子

ー原始ブラックホール(PBH)ー

- 宇宙初期の密度揺らぎで生成

$$M_H(t) \sim \frac{c^3 t}{G} \sim 10^{15} \left(\frac{t}{10^{-23} s} \right) g$$

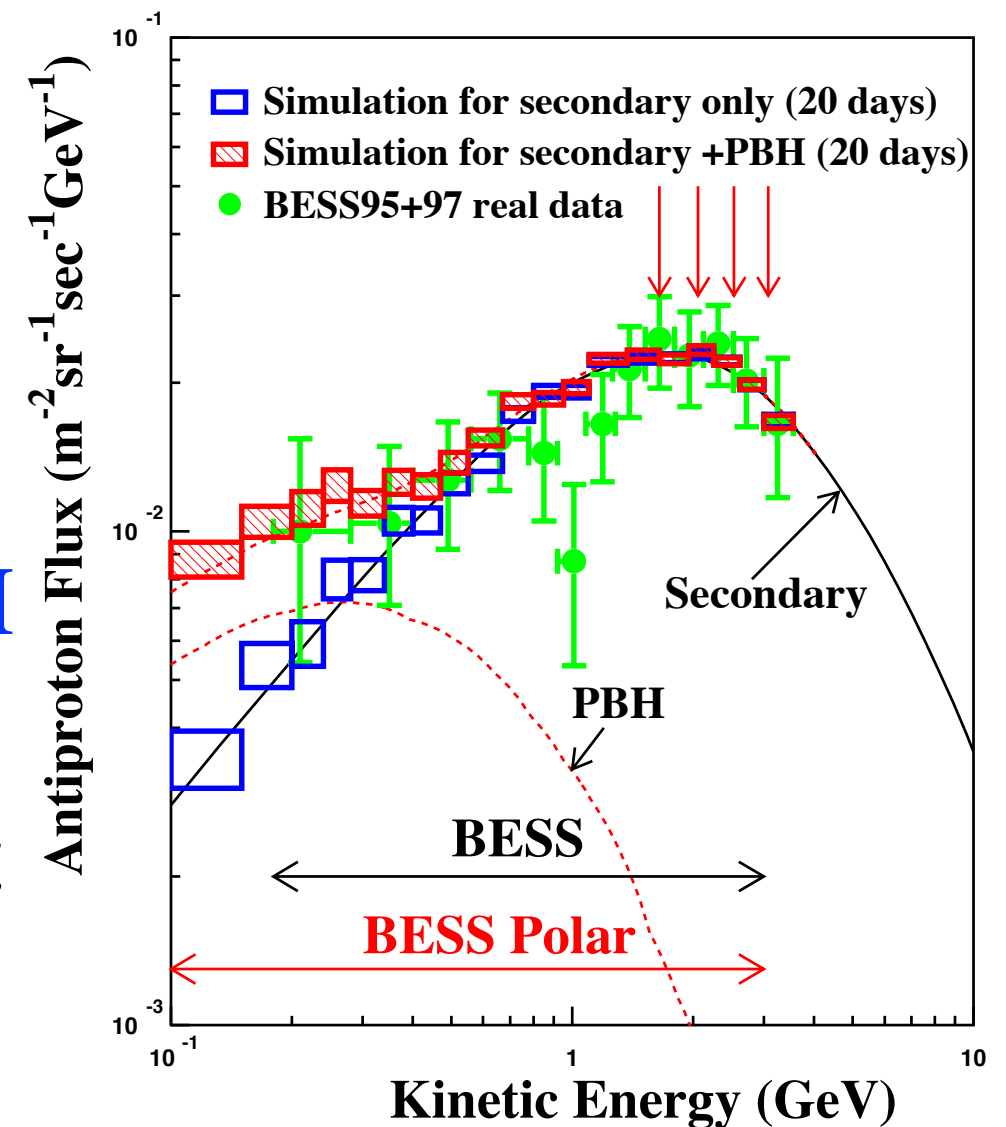
- 現在まさに蒸発しようとしている $\sim 10^{15}g$ のブラックホールはビッグバン $\sim 10^{-23}$ 秒後に作られた。
- PBHを観測することにより、生成時の密度揺らぎのスケールを知ることができる。



PBH探索

—BESS, BESS-Polar II—

- **BESS'93の反陽子**
 - 蒸発率の上限値
 - $R=1.7 \times 10^{-2} \text{ (pc}^{-3}\text{y}^{-1}\text{)}$
 - $\Omega_{\text{pbh}} < 6 \times 10^{-9} \text{ h}^{-2}$
- **スペクトルの形からPBHの信号を識別できる。**
 - **BESS-Polar IIで探索可能**



PBH探索

ー他のプローブとの比較ー

- γ 線

- 100 MeVあたりピークを持つスペクトル
- Diffuse γ のバックグラウンドに埋もれる
- 上限値 $\Omega_{\text{pbh}} < 5.1 \times 10^{-9} h^{-2}$

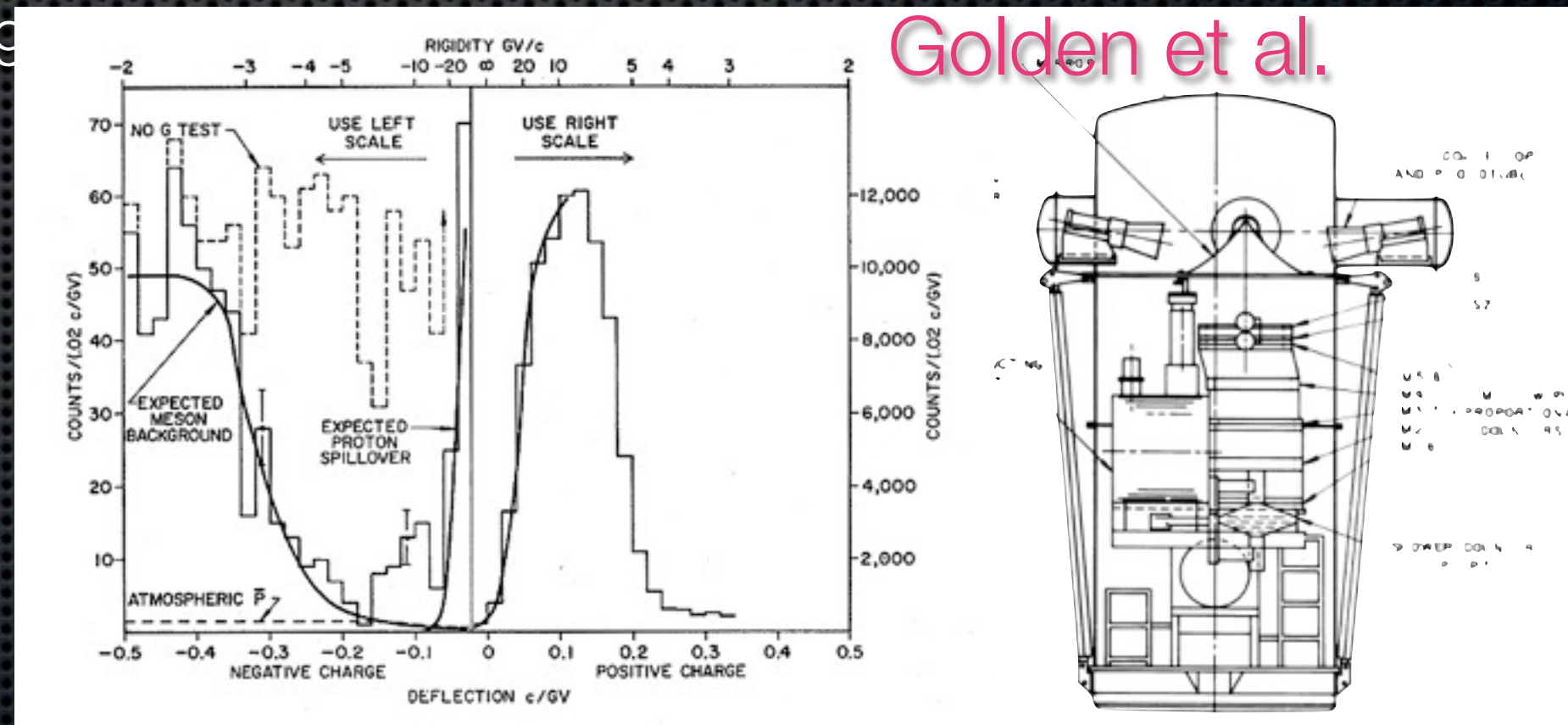
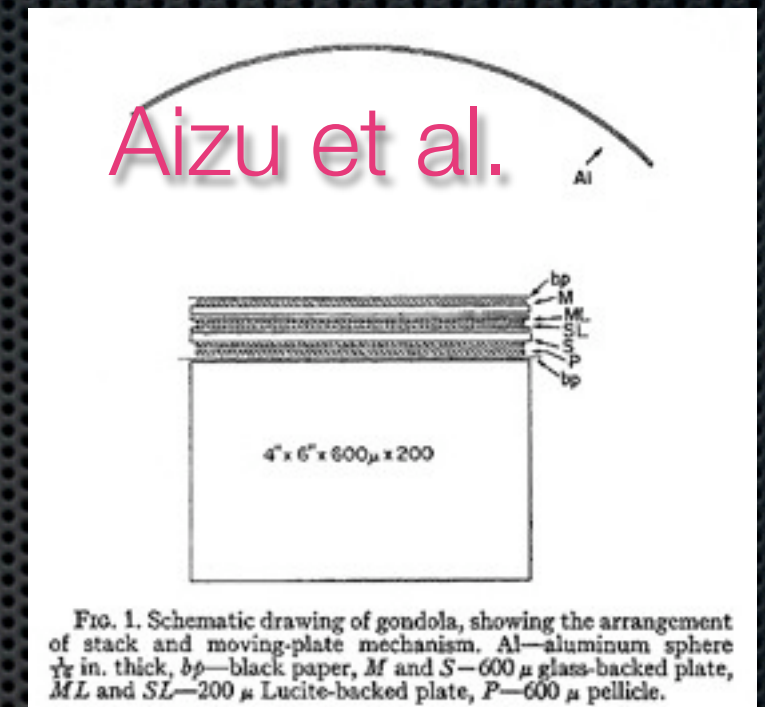
- γ 線バースト

- まさに蒸発する直前に爆発的に γ 線を放出する
- 通常のシナリオ
 - 上限値 $R < 5 \times 10^8 \text{ pc}^{-3} \text{ y}^{-1}$
- Hagedornのシナリオ
 - ハドロン自由度が指数関数的に増える
 - 上限値 $R < 5 \times 10^{-2} \text{ pc}^{-3} \text{ y}^{-1}$

PBHを見るには反陽子、反重陽子の方が優れている

宇宙線反粒子観測の歴史

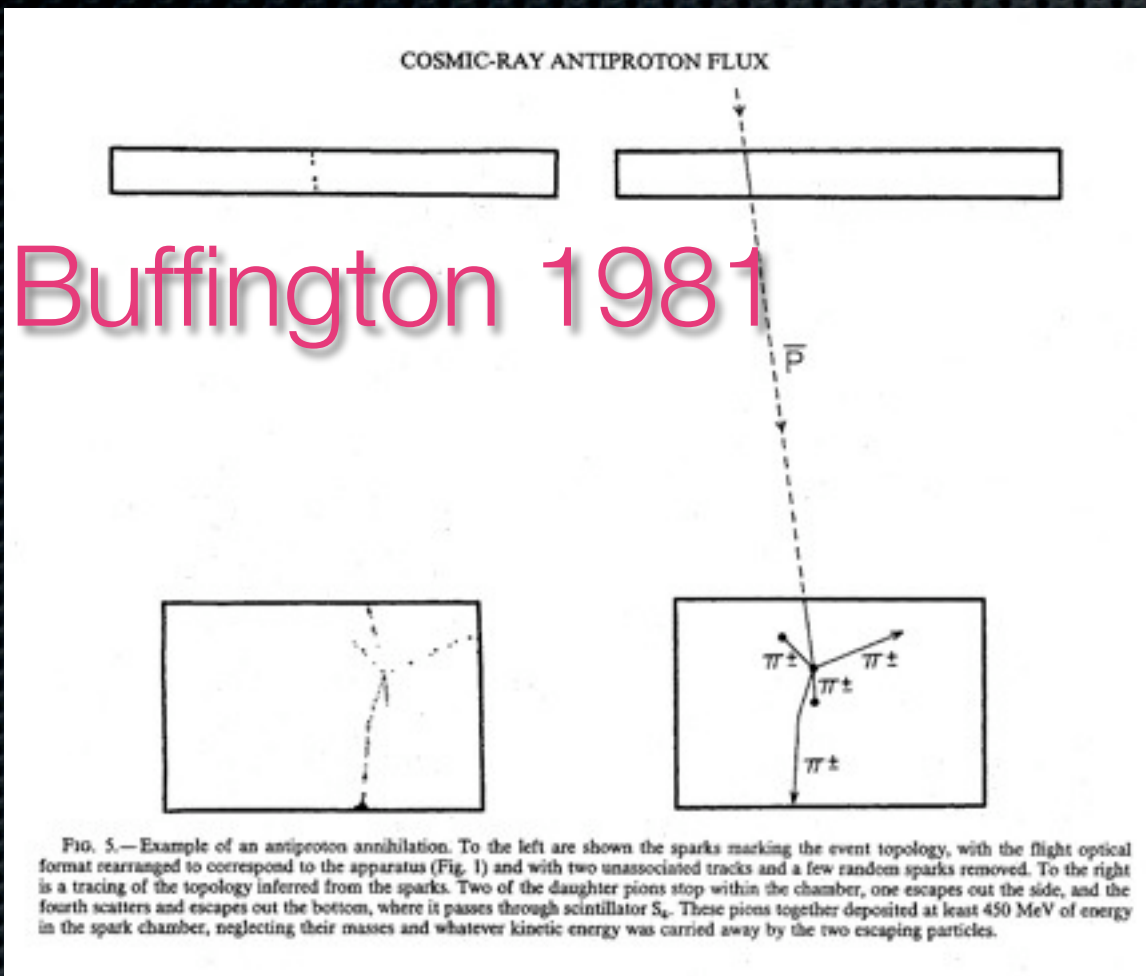
- ❖ 1955年反陽子が加速器で作られてから程なく、初めての探索が行われた。
 - ❖ Aizu et al. 1961
- ❖ 初めての反陽子の報告
 - ❖ Golden et al. 1979
 - ❖ Bogolomov et al.



反陽子の過剰

ダークマターの発見か？

Buffington 1981

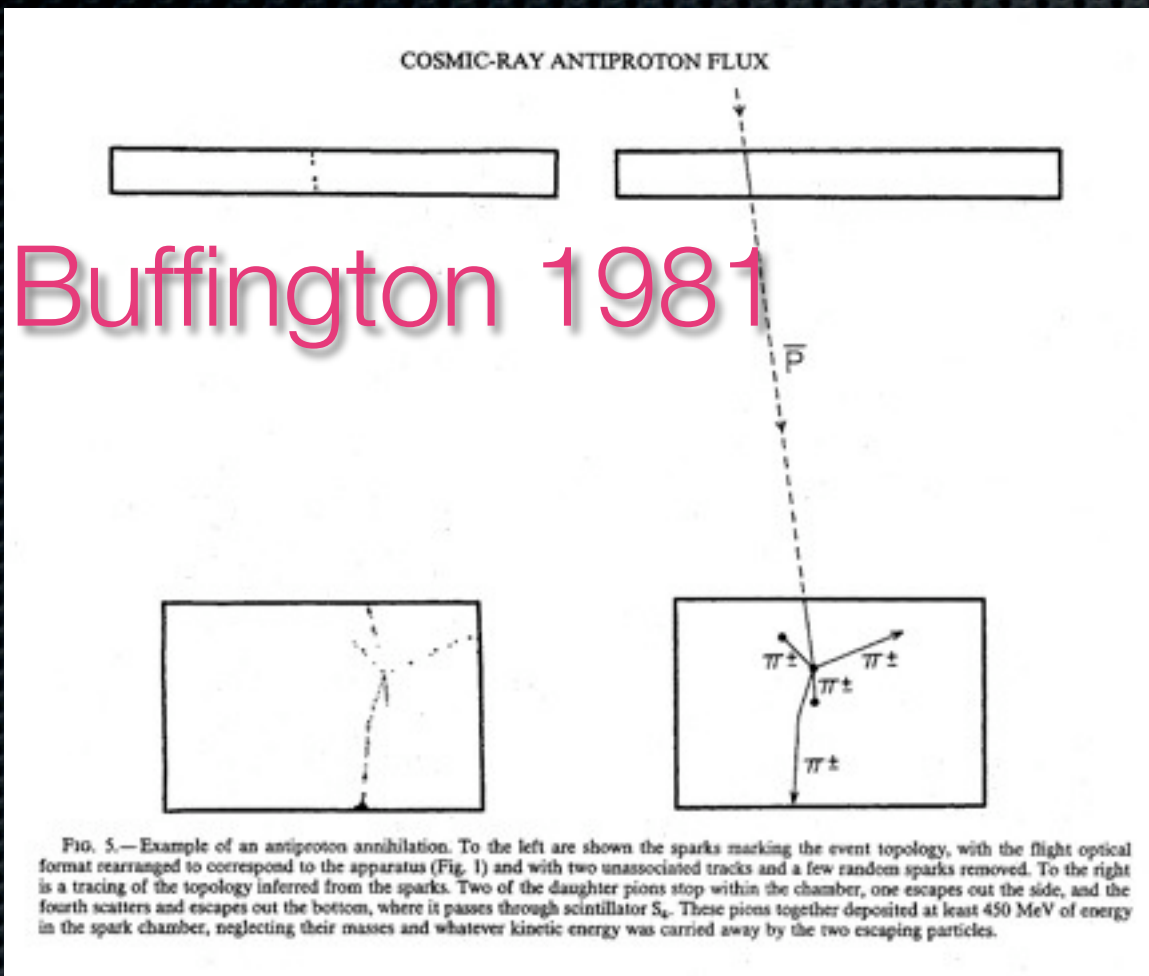


Buffington, Schindler and Pennypacker, ApJ 248 (1981) 1179

反陽子の過剰

ダークマターの発見か？

Buffington 1981



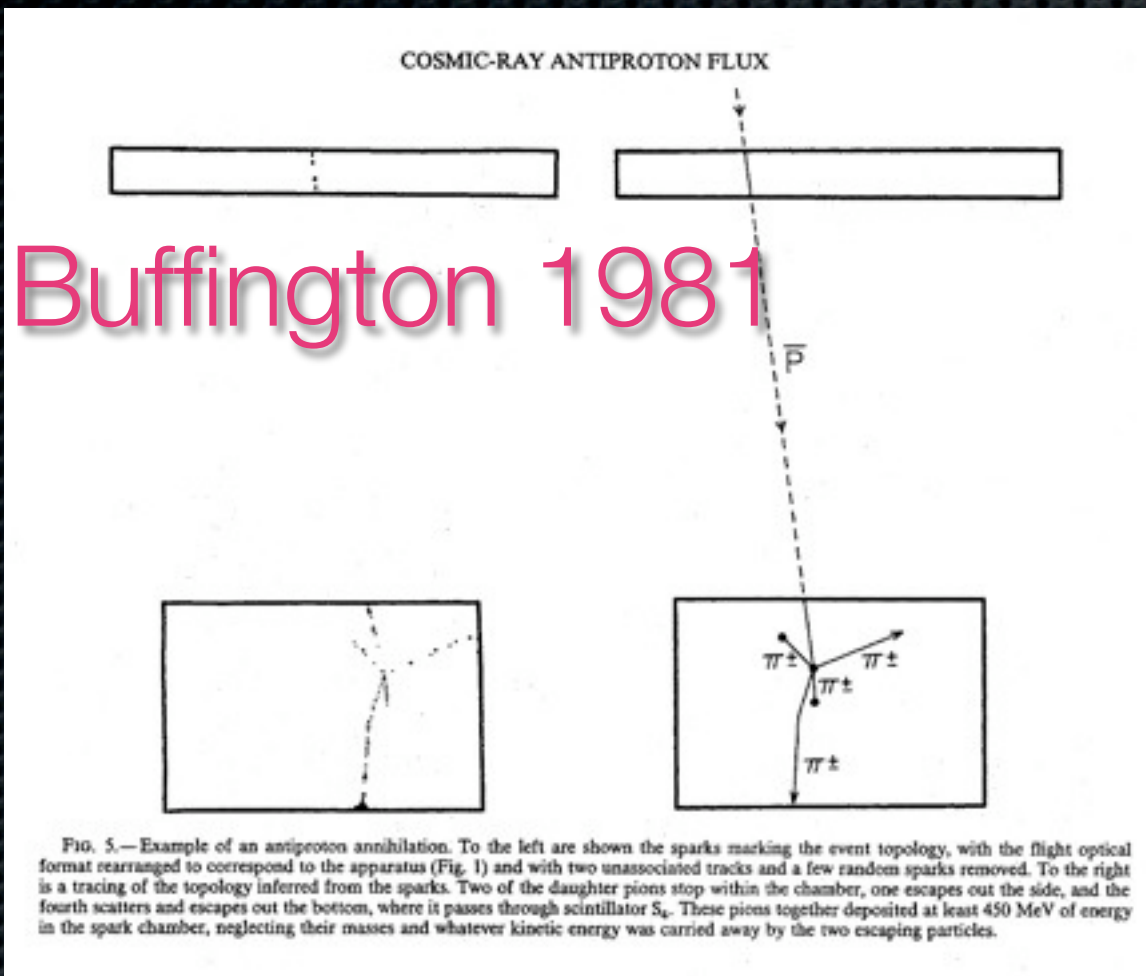
Buffington, Schindler and Pennypacker, ApJ 248 (1981) 1179

- ✦ 反陽子の対消滅の信号のトポロジーで同定した

反陽子の過剰

ダークマターの発見か？

Buffington 1981



Buffington, Schindler and Pennypacker, ApJ 248 (1981) 1179

- ✦ 反陽子の対消滅の信号のトポロジーで同定した
- ✦ 15 GeVのPhotinoのダークマター？ Stecker et al. PRL

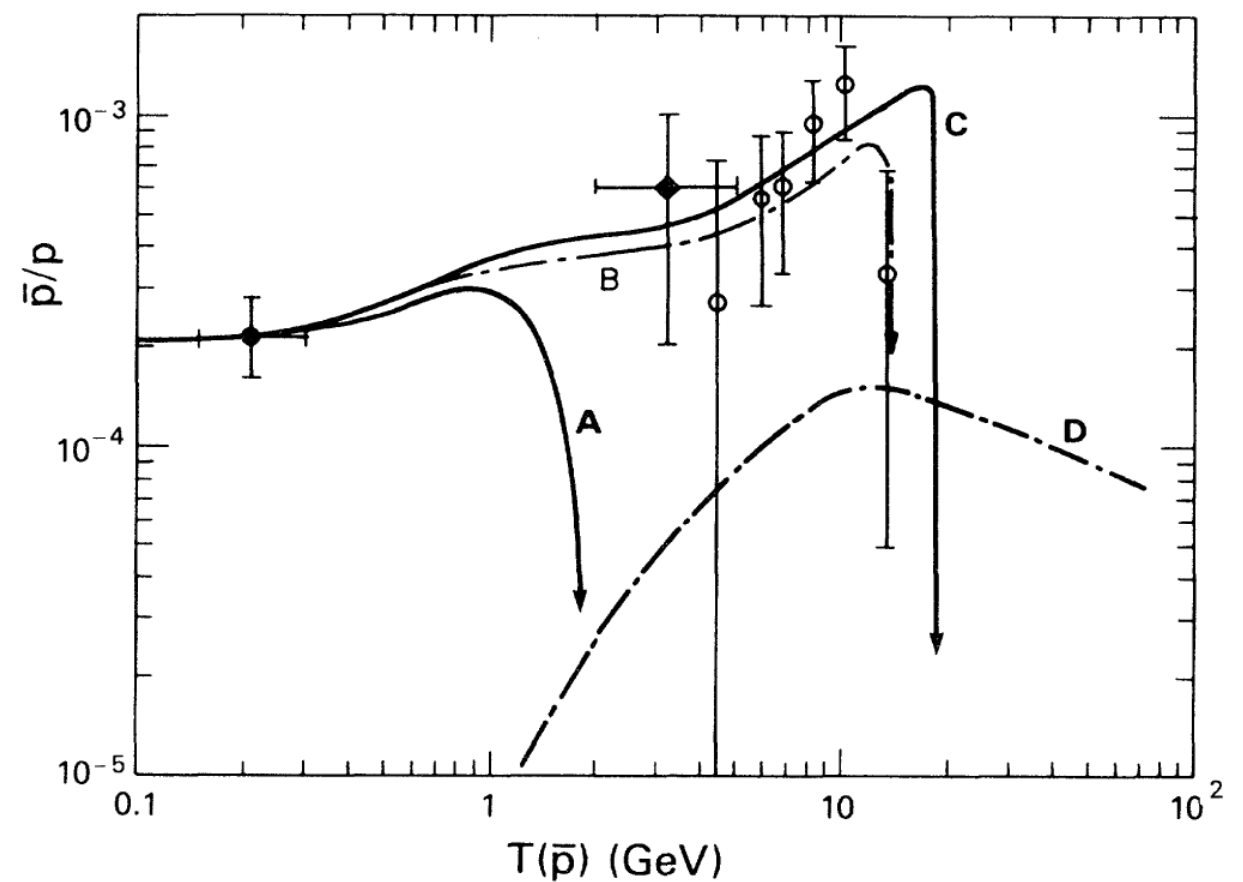
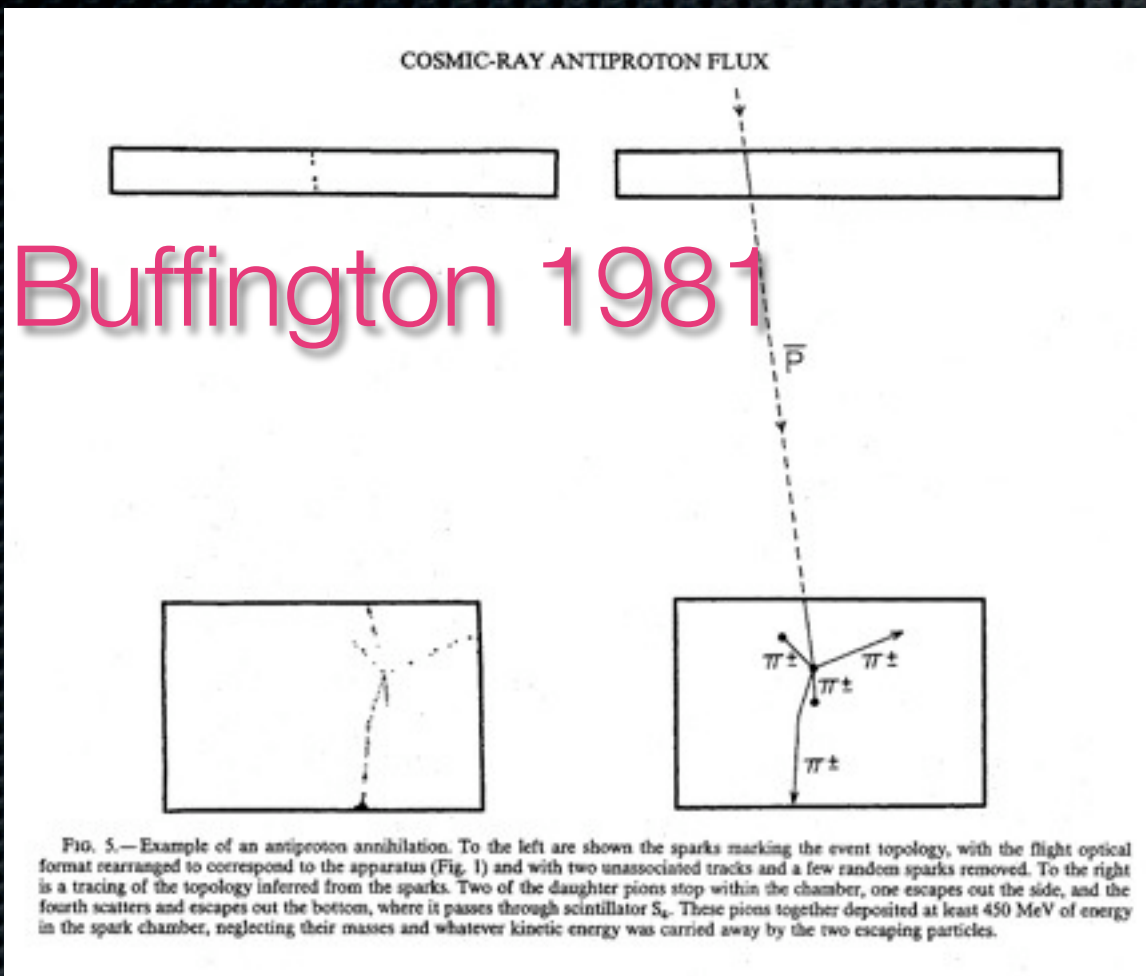


FIG. 2. Antiproton-proton ratio as a function of kinetic energy from photinos of mass (a) 3, (b) 15, and (c) 20 GeV. (d) is for cosmic-ray secondaries.

反陽子の過剰

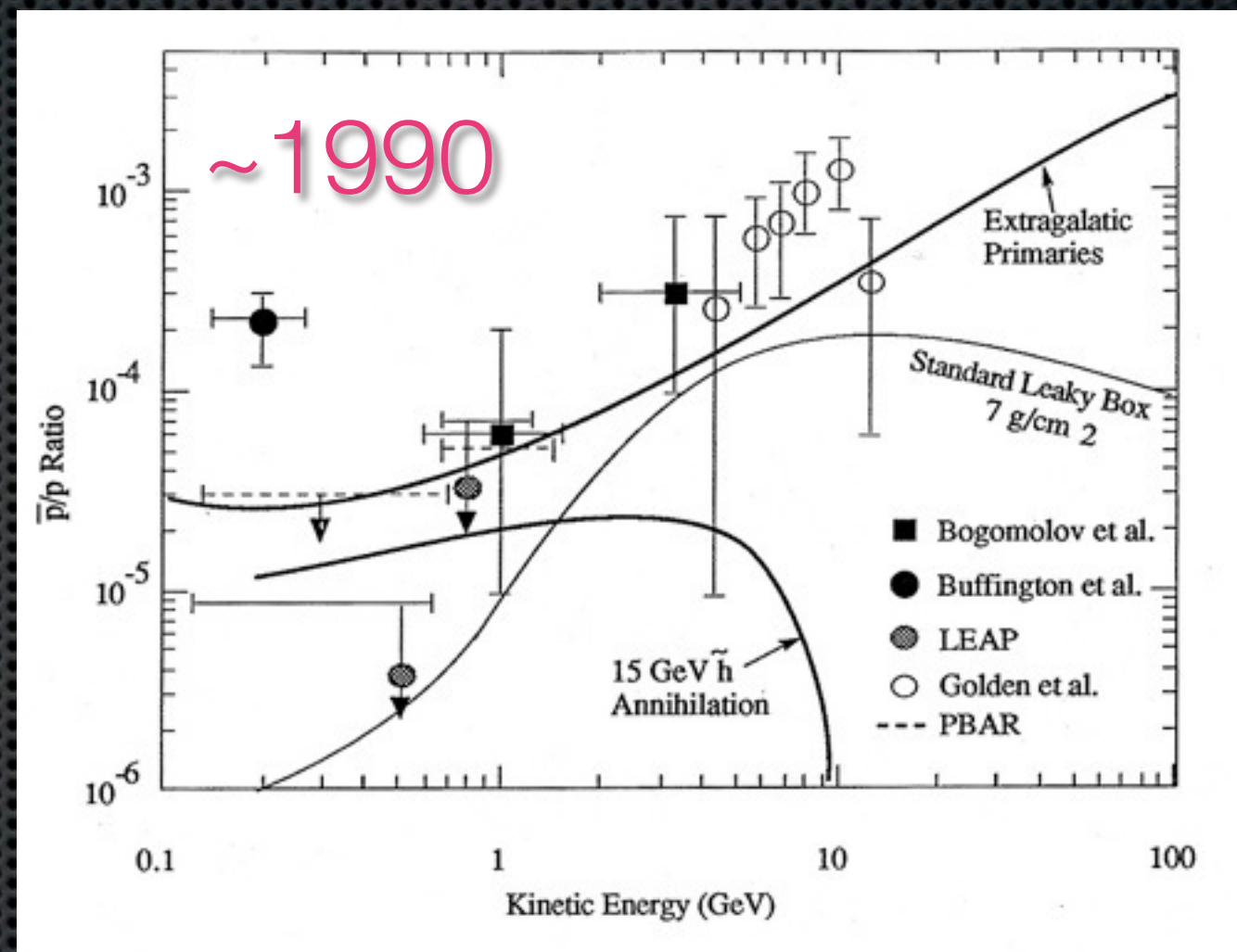
ダークマターの発見か？

Buffington 1981



Buffington, Schindler and Pennypacker, ApJ 248 (1981) 1179

- 反陽子の対消滅の信号のトポロジーで同定した
- 15 GeVのPhotinoのダークマター? Stecker et al. PRL
- 磁気スペクトロメータの測定により徐々に否定



ASTROMAG時代 1985~

- ISS に超伝導スペクトロメータを搭載する計画
- 残念ながらキャンセルされたが、気球実験としてSpin offを果たし、数々の成果を出した。

Isotopes

SMILI

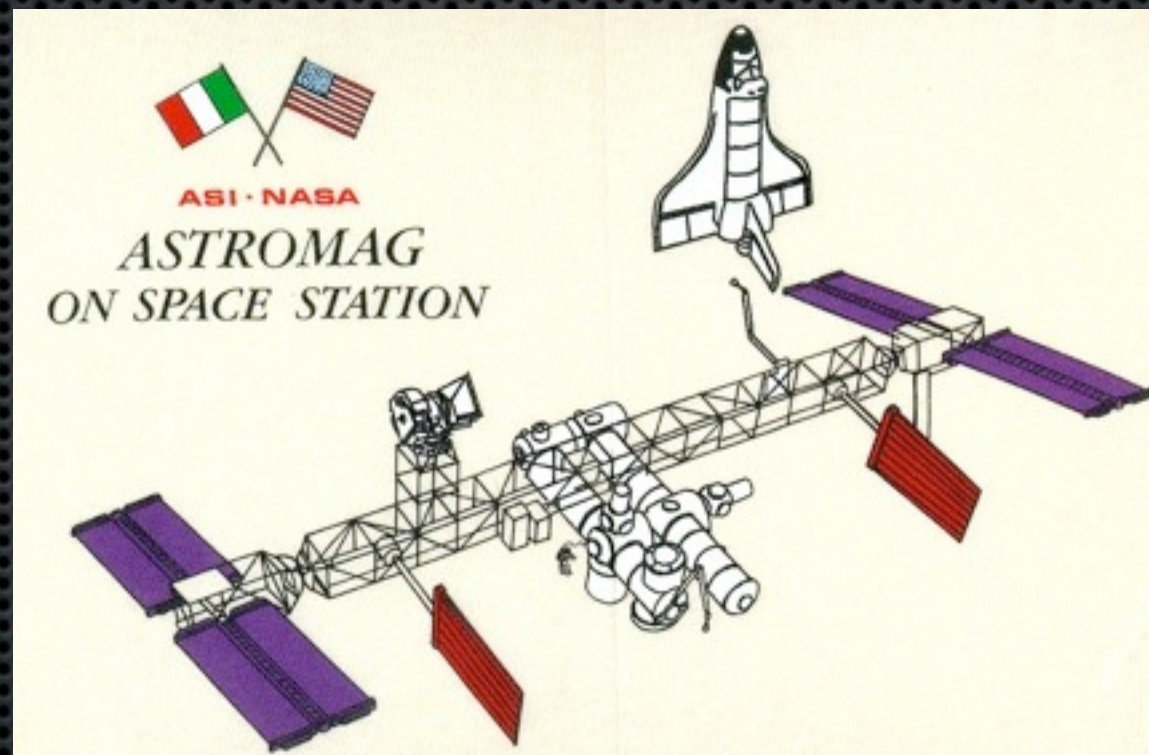
MASS

IMAX

BESS

CAPRICE

ISOMAX



Antimatter

LEAP

PBAR

MASS

IMAX

BESS

CAPRICE

HEAT



BESSの誕生

—折戸、山本、運命の出会い—

- 故折戸周治氏がAstromag Workshop 1987で山本明氏の薄肉ソレノイド技術に目を着け、Collaborationがスタート



故折戸周治教授

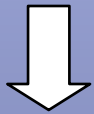


山本明教授

気球実験BESS

Low Energy Cosmic-ray Spectra Precisely Measured by BESS

Rigidity Measurement



Precise spectra

proton (0.2~500 GeV)

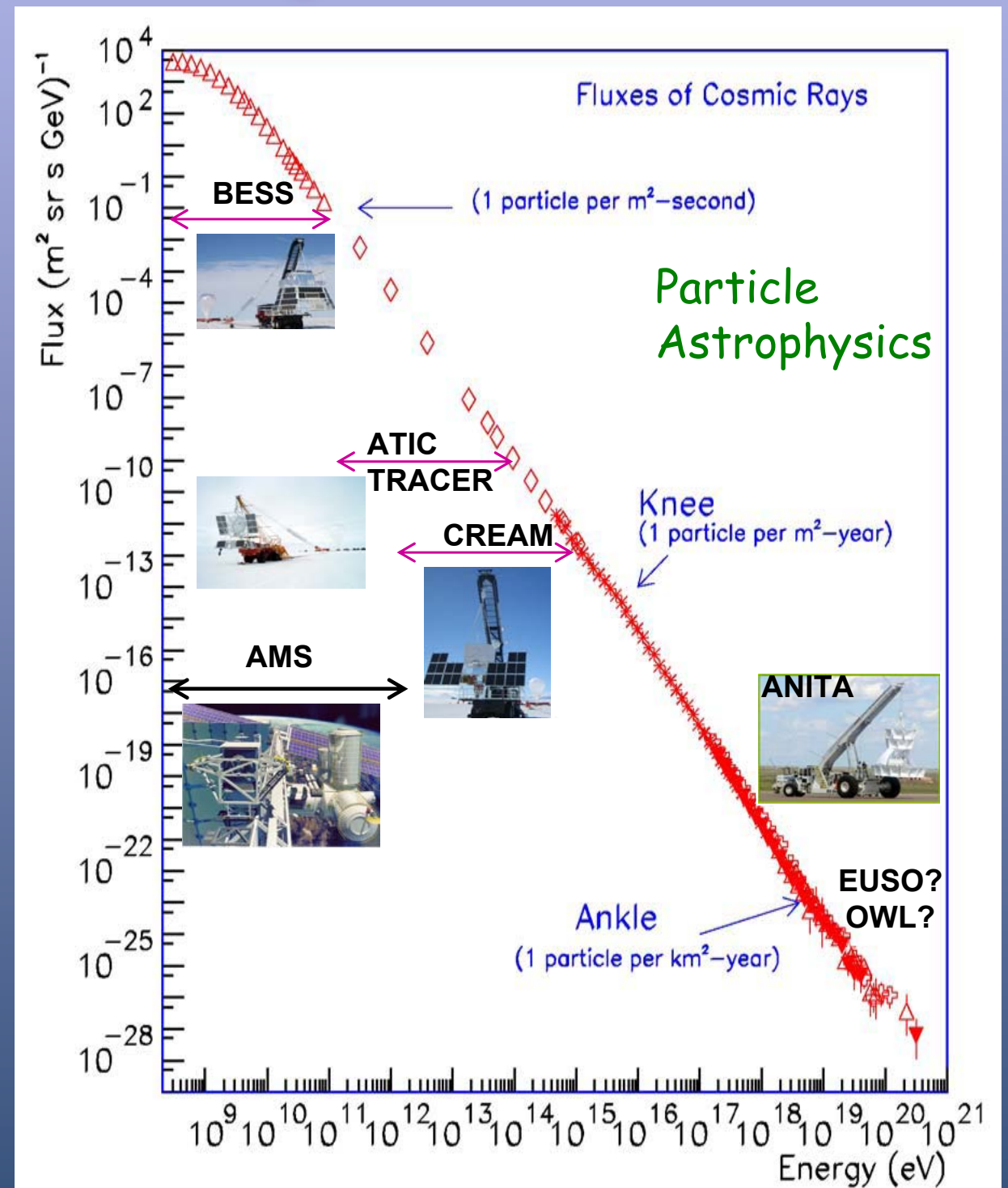
helium (0.2~250 GeV/n)

antiproton (0.2~ 4 GeV)



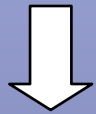
Anchor the spectrum

in the lowest energy region.



Low Energy Cosmic-ray Spectra Precisely Measured by BESS

Rigidity Measurement



Precise spectra

proton (0.2~500 GeV)

helium (0.2~250 GeV/n)

antiproton (0.2~ 4 GeV)



Anchor the spectrum

in the lowest energy region.

BESS

*Balloon-borne
Experiment with a
Superconducting
Spectrometer*



気球観測

厚い大気 (1000g/cm^2) による遮蔽

気球高度 (37km, 1/200気圧) へ打ち上げ

直径150mの大気球

高地磁気緯度

低エネルギー粒子は地磁気で跳ね返される

リンレーク：カナダ北部の小さな町

なぜ気球を使うのか？

大気の影響を避ける

パイオニア

先鞭をつける。後に衛星

Boomerang => WMAP

ゲリラ戦 <=> 正規軍

短期決戦

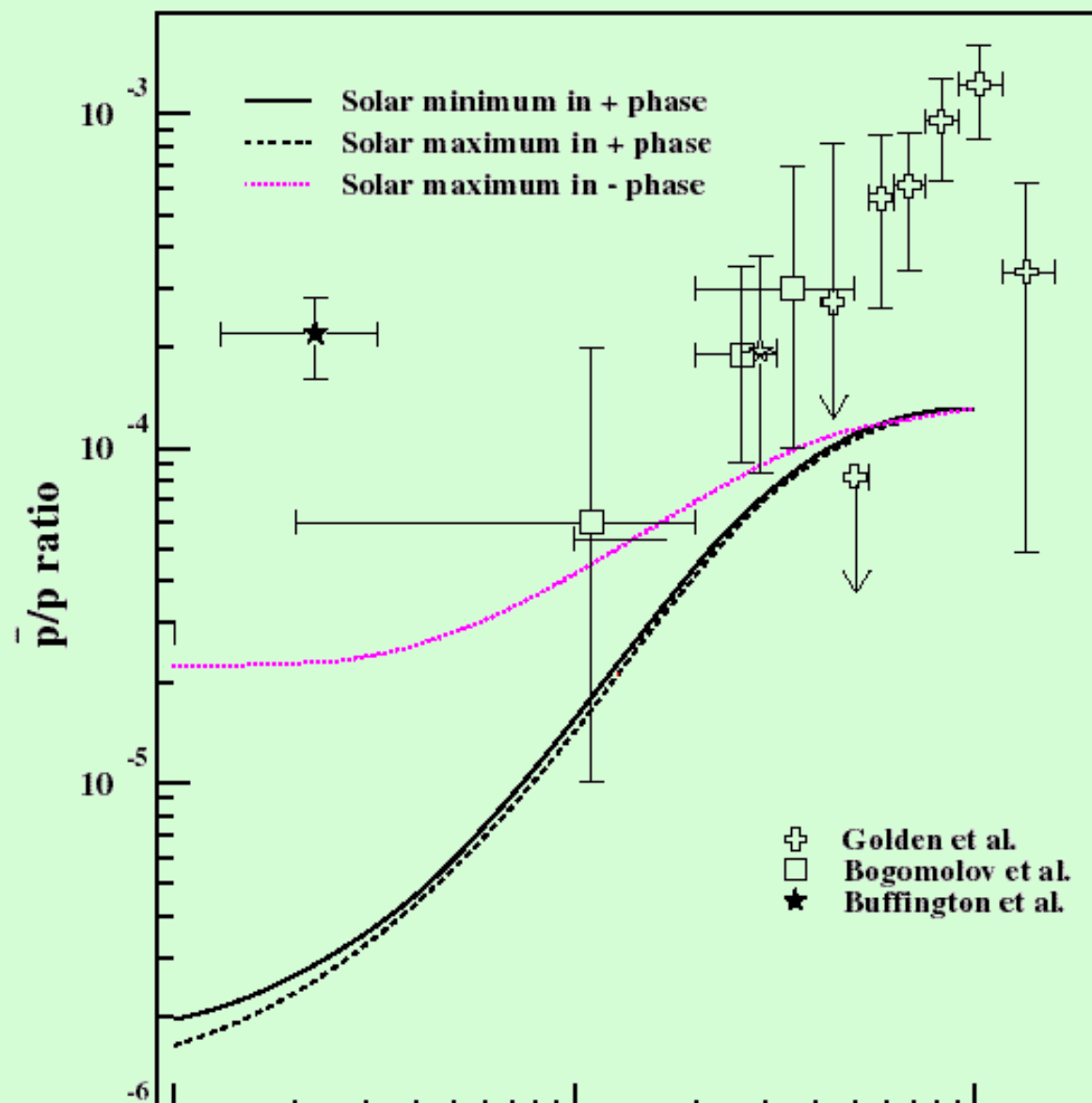
開発サイクル

～宇宙空間

BESS実験の始まる前

Buffingtonによる過剰な反陽子フラックス

Goldenによる超伝導スペクトロメータによる
運動量の測定



Golden et al, 1979

First observation

Gas cherenkov VETO

Buffington et al, 1982

Low energy excess

Annihilation topology

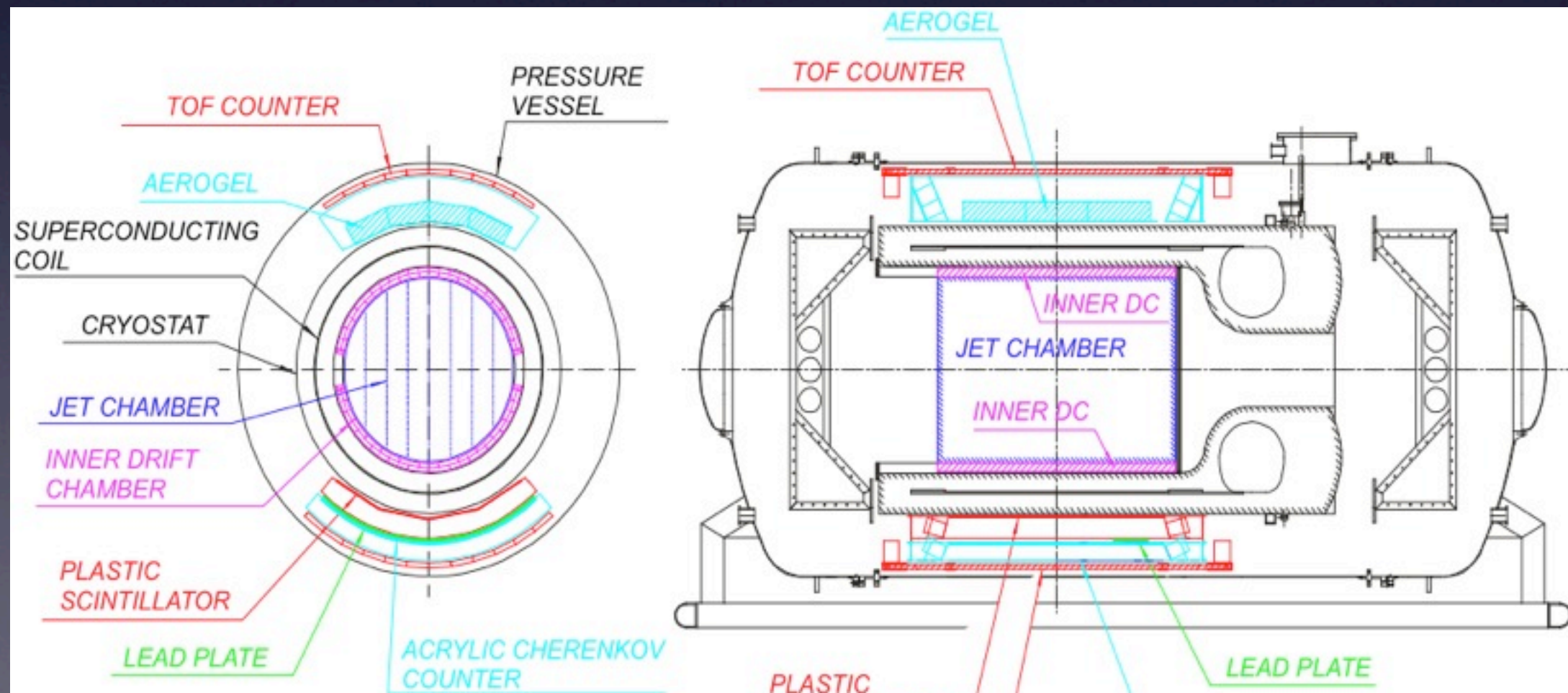
Their results stimulated
theoretical conjectures

BESS測定器の特長

超伝導ソレノイドを同心軸状に配置

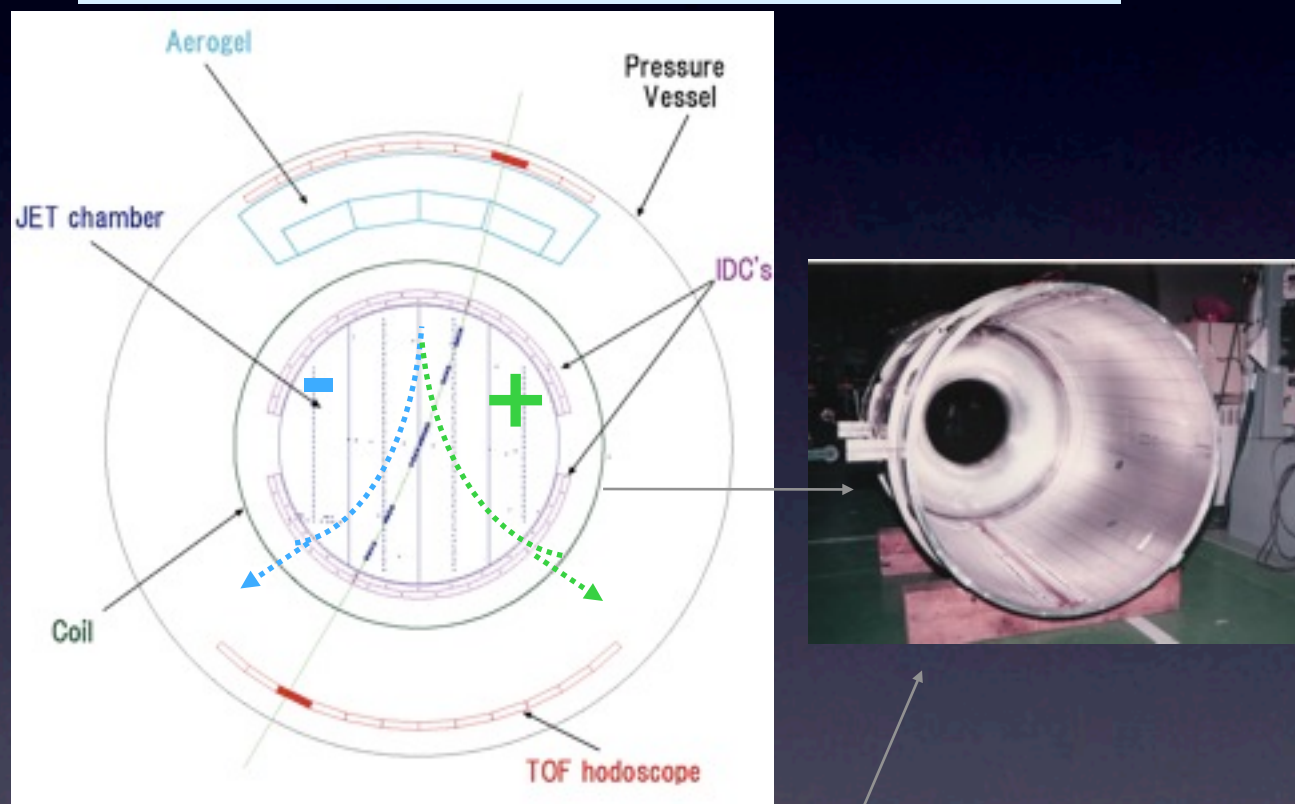
大きな飛跡検出器

高性能な粒子識別装置

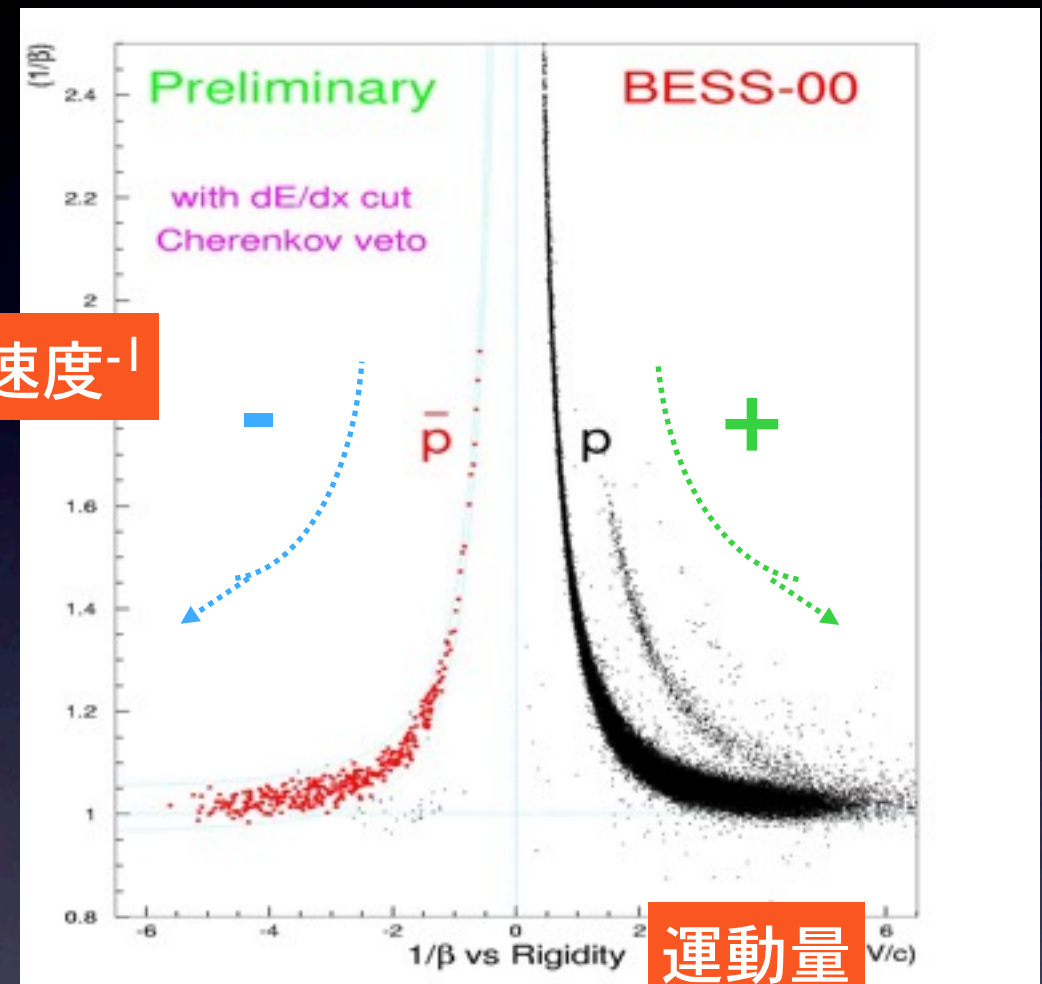


超伝導マグネット・スペクトロメーターによる 宇宙線反粒子の精密観測

強力な磁場で**粒子(+)**と**反粒子(-)**
を明確に振り分け



速度⁻¹



運動量

薄肉超伝導ソレノイド磁石:

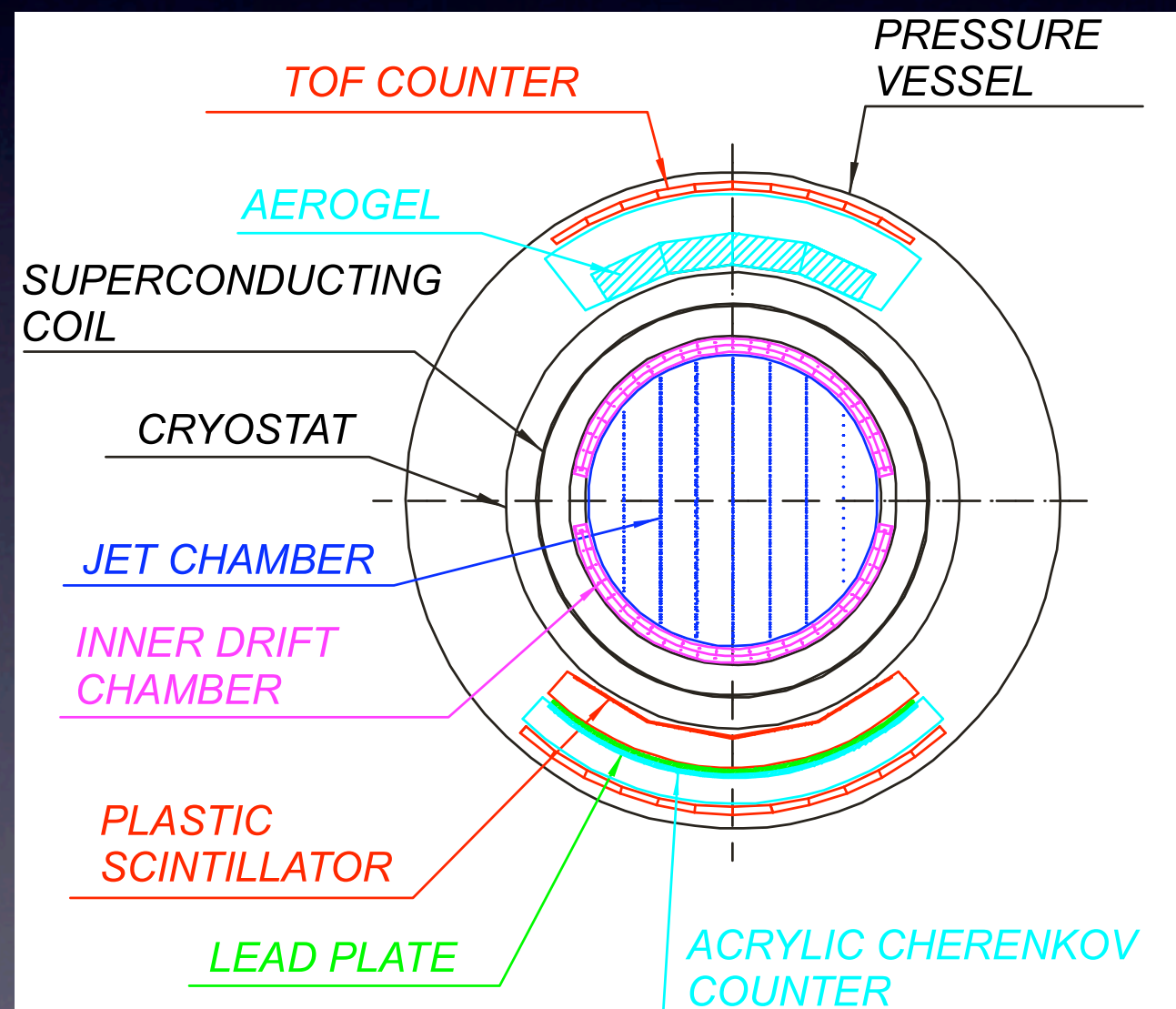
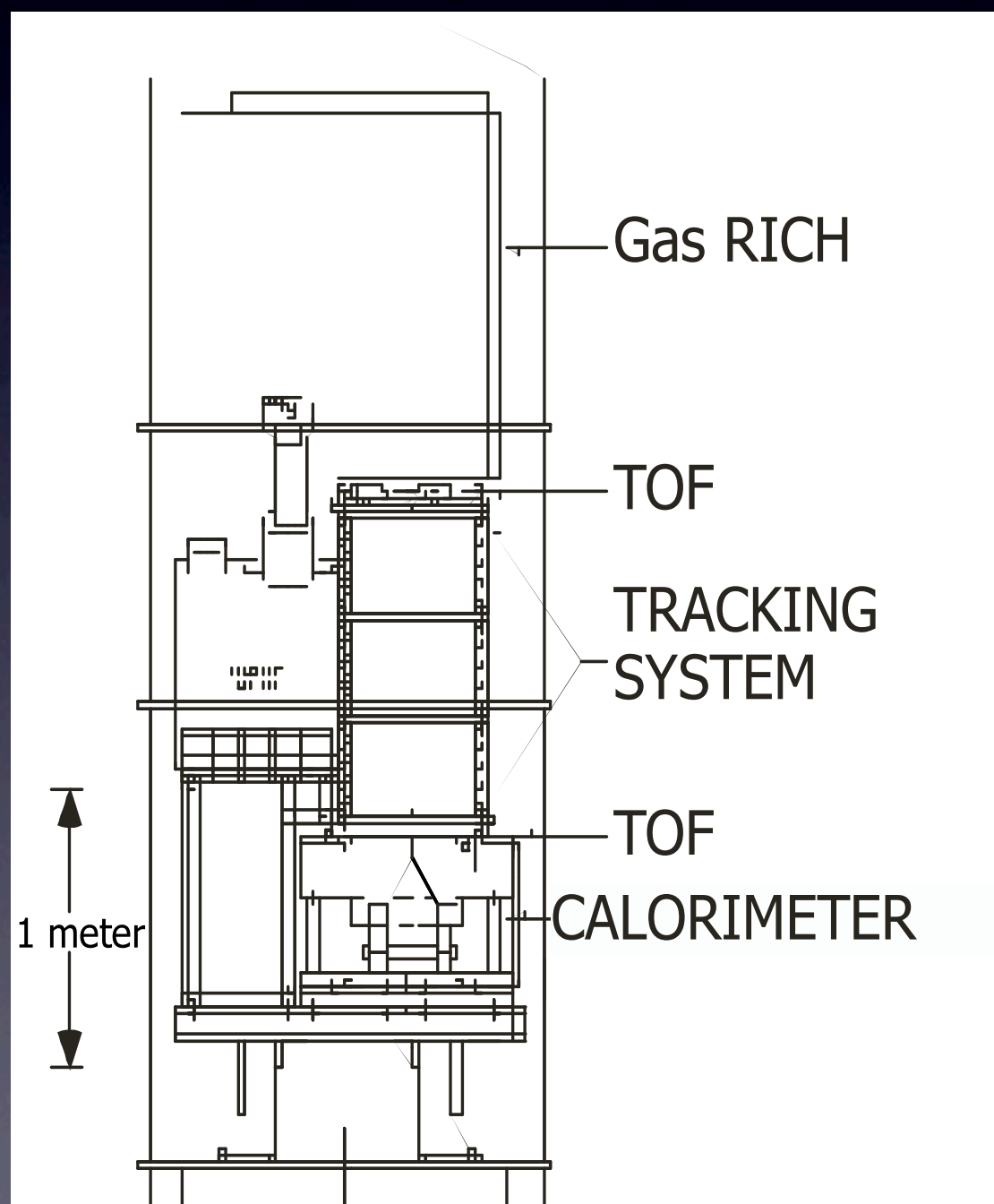
- 横型・粒子貫通型 → 大立体角・高統計
- 均質な磁場 → 高分解能・精密測定

$$m^2 = R^2 e^2 Z^2 (\beta^{-2} - 1)$$

質量同定による確実な反陽子観測

BESS測定器 (III)

- Comparison between CAPRICE and BESS



運動量分解能

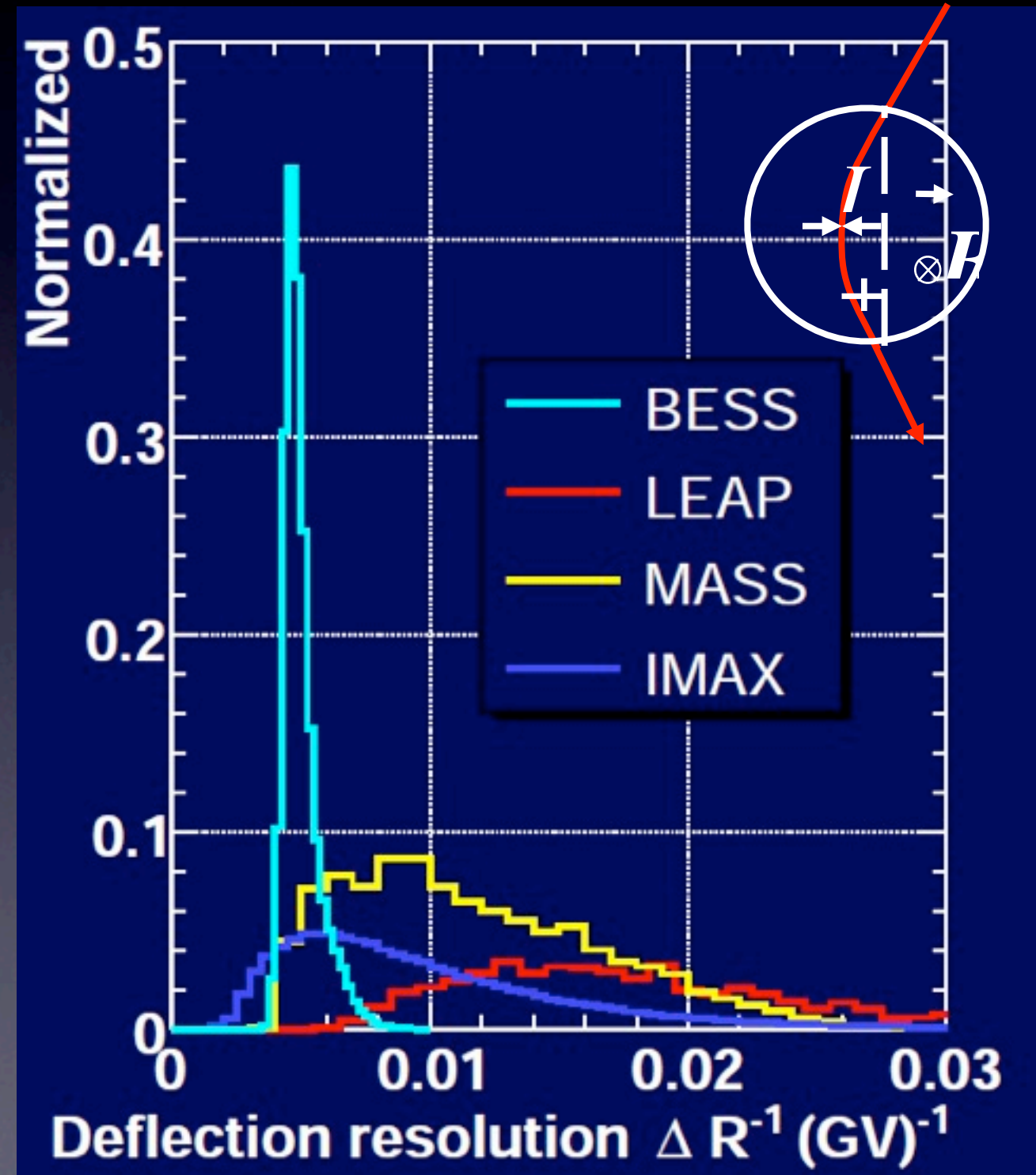
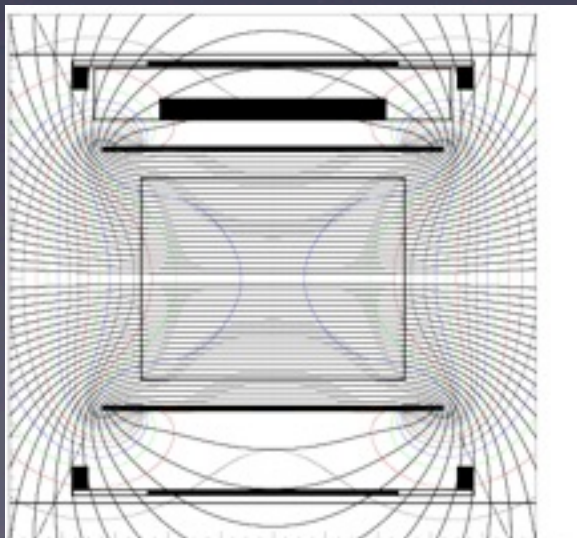
一様な強い磁場の実現



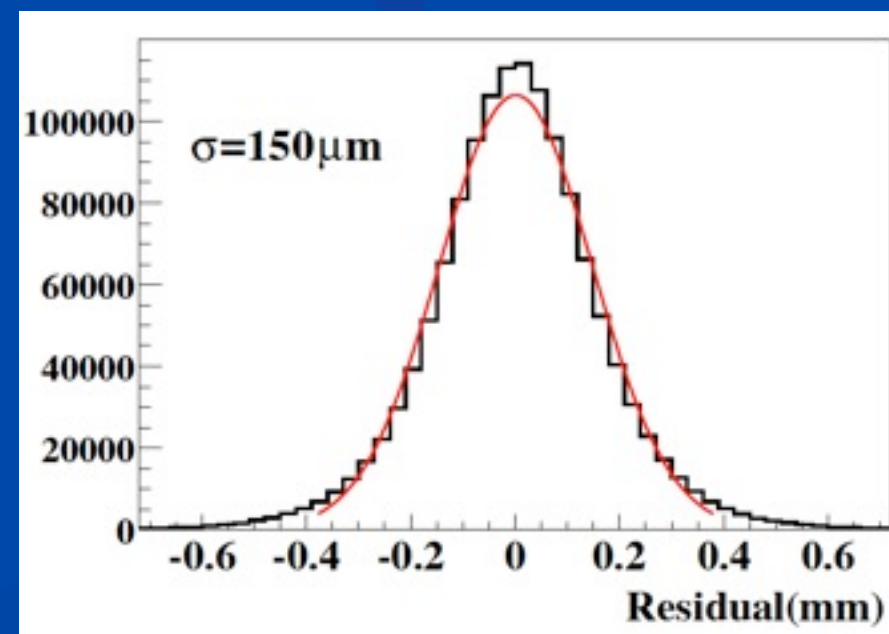
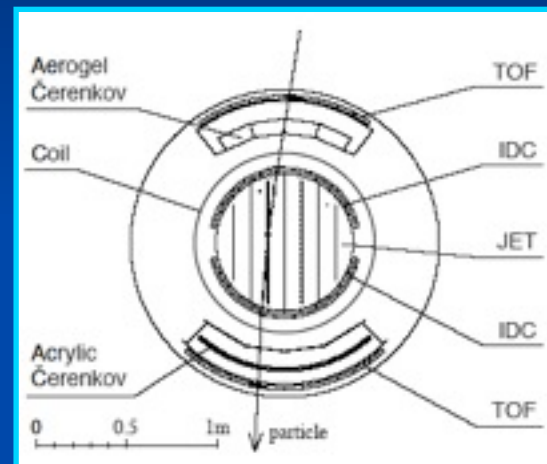
場所によらない運動量分解能



MDR=200 GV



JET/IDC Development for BESS-TeV & -Polar



Spatial
resolution

気球搭載型測定器の要請

軽量

低物質質量

低消費電力

過酷な環境

BESS測定器



開発の歴史

1989 計画がスタート

1991 カナダへ発送前日、ガス事故！

1992 カナダへ行くも、協定不調のため

1993 初フライト

1994~2002 合計9回の飛翔実験

打ち上げ準備



早朝の打ち上げに向けて徹夜で準備作業

打ち上げ



着地&回収



時には林の中や沼地に着地することもある・・・

泳ぎも得意？



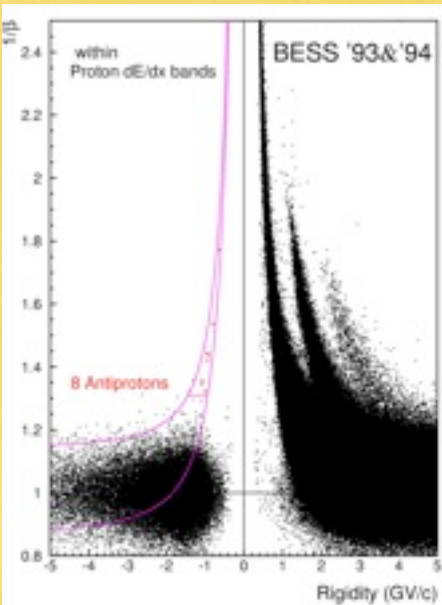
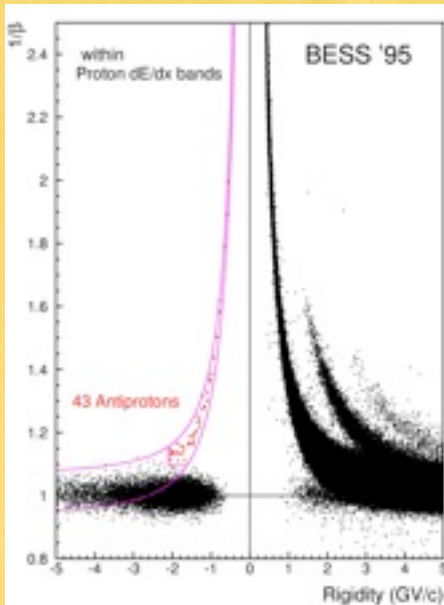
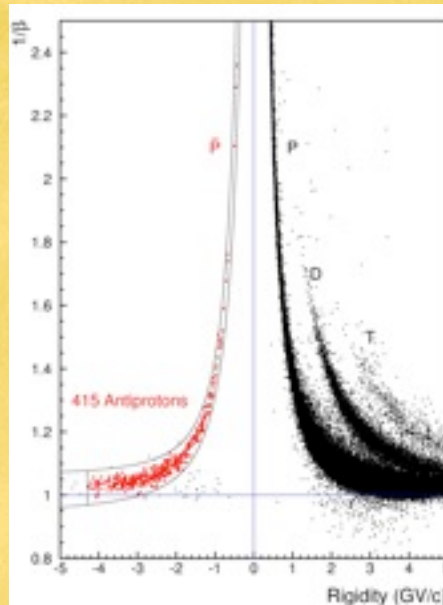
風を待つ間・・・



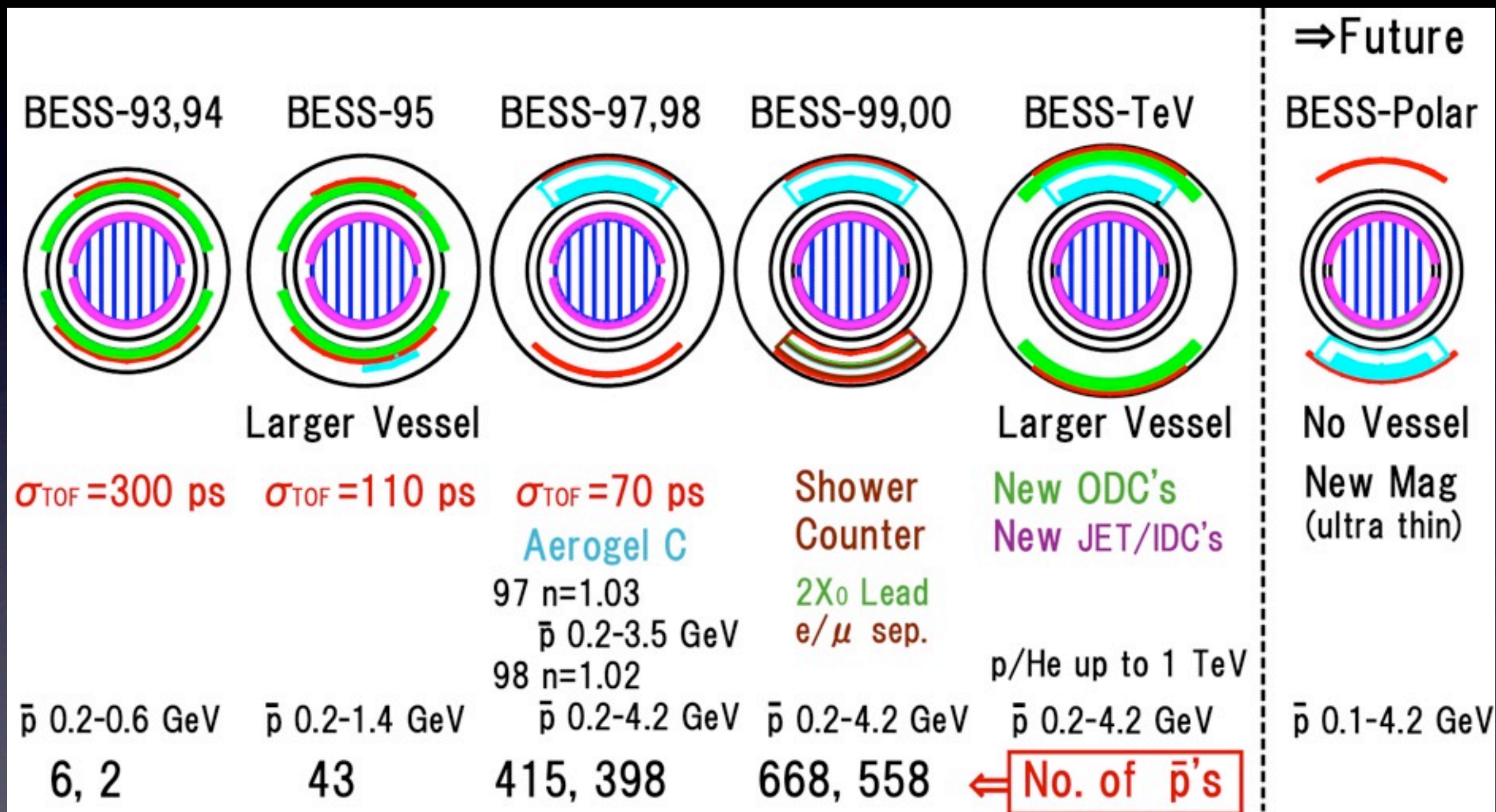
とりたてのブルーベリーの味は格別



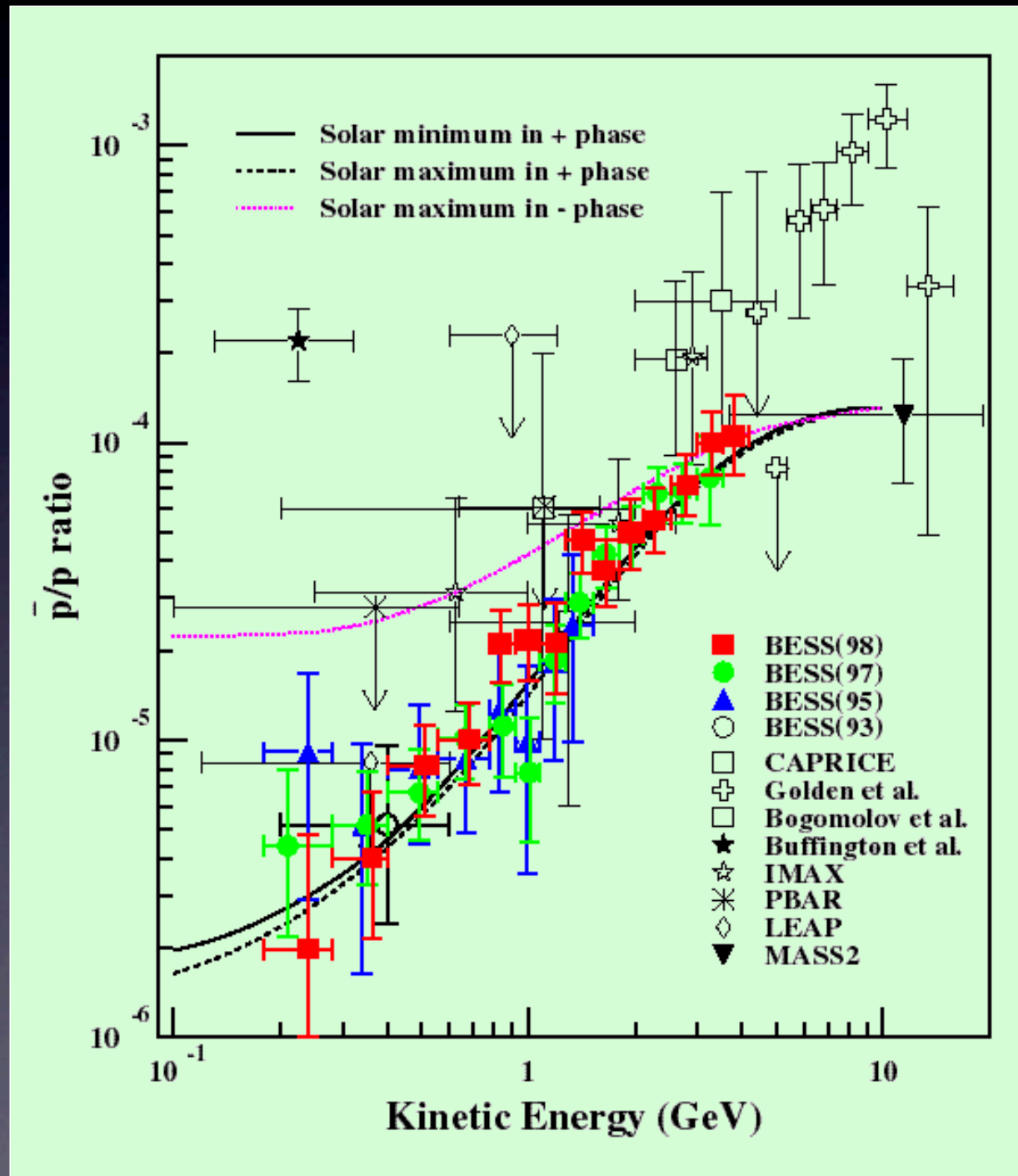
反陽子の観測

	1993 + 94	1995	1997 ~
β^{-1} vs. Rigidity			
σ_{TOF}	300 ps	100 ps	70 ps
N_{obs}	8	43	400~650/year
E_p	0.18~0.5 GeV	0.18~1.5 GeV	0.18~4.2 GeV
	First mass ID	New TOF	Cherenkov veto

測定器の改良



BESS以後の反陽子観測



BESSの物理

反陽子エネルギースペクトル

1~2 GeVあたりのピーク

衝突起源反陽子がほとんど！

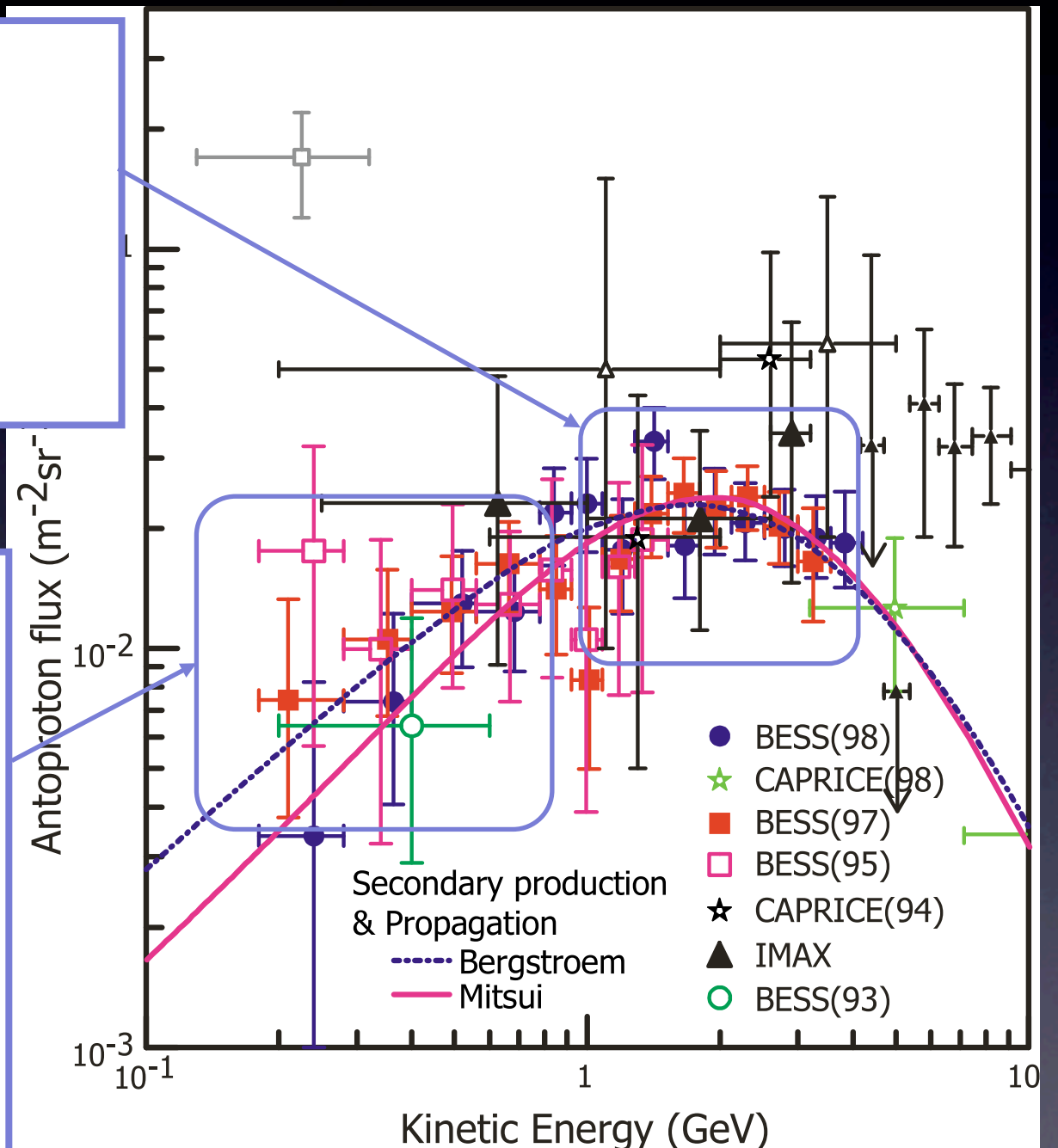
宇宙線伝播モデルも基本的にはOK！

1 GeV以下の領域で平坦？

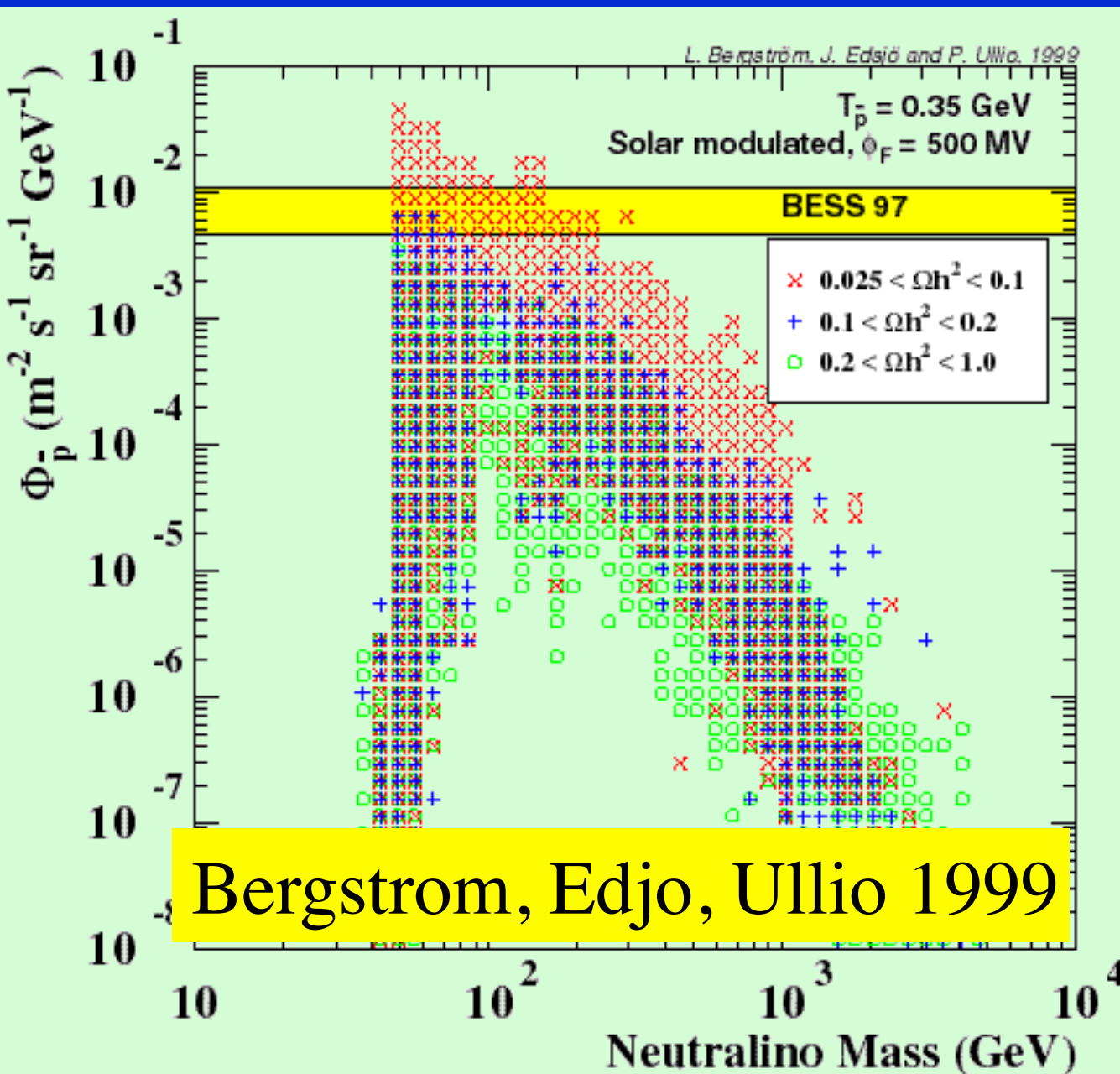
モデルの不定性

観測データの統計不足

興味深い1次起源反陽子の存在を
棄却することはできない

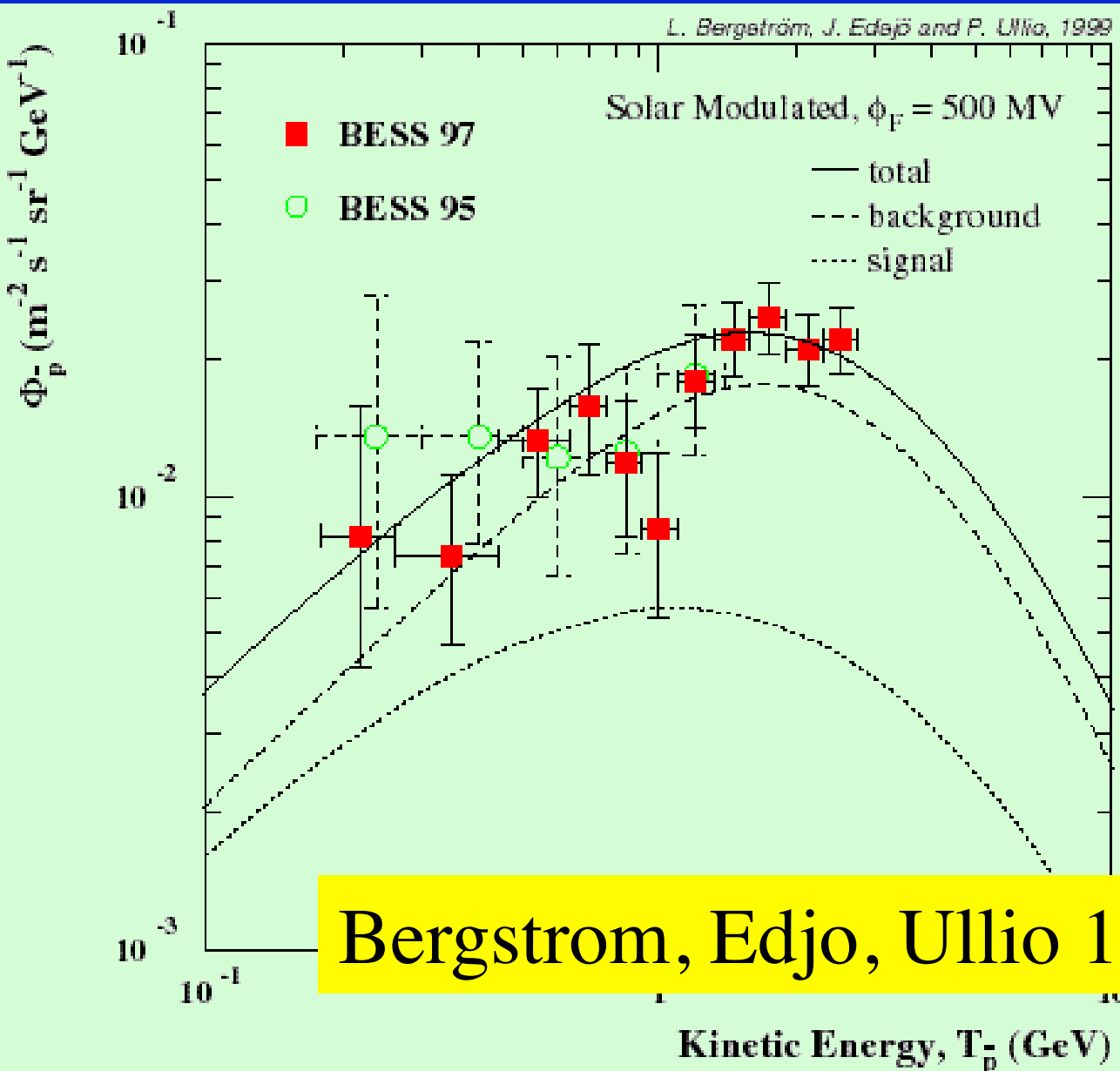


Limit on parameter for SUSY DM



- BESS data has limited parameter space for SUSY.
 - Bottino, Donato, Fornego, Salati 1998
 - Bergstrom, Edsjo, Ullio 1999

Indirect search for Dark matter



- Low energy window is now filing
 - Secondary background is larger at low energies than we expected
 - Bergstrom, Edjo, Ullio, 19999
 - Gaisser et al., 1999
- Room for primary component?
 - Higher energy (>10 GeV) Bump ?
 - Ullio, 1999
 - Outside the heliosphere to avoid solar modulation
 - Wells, Moiseev, Ormes 1998
 - Precise measurement and calculation

原始ブラックホールの蒸発

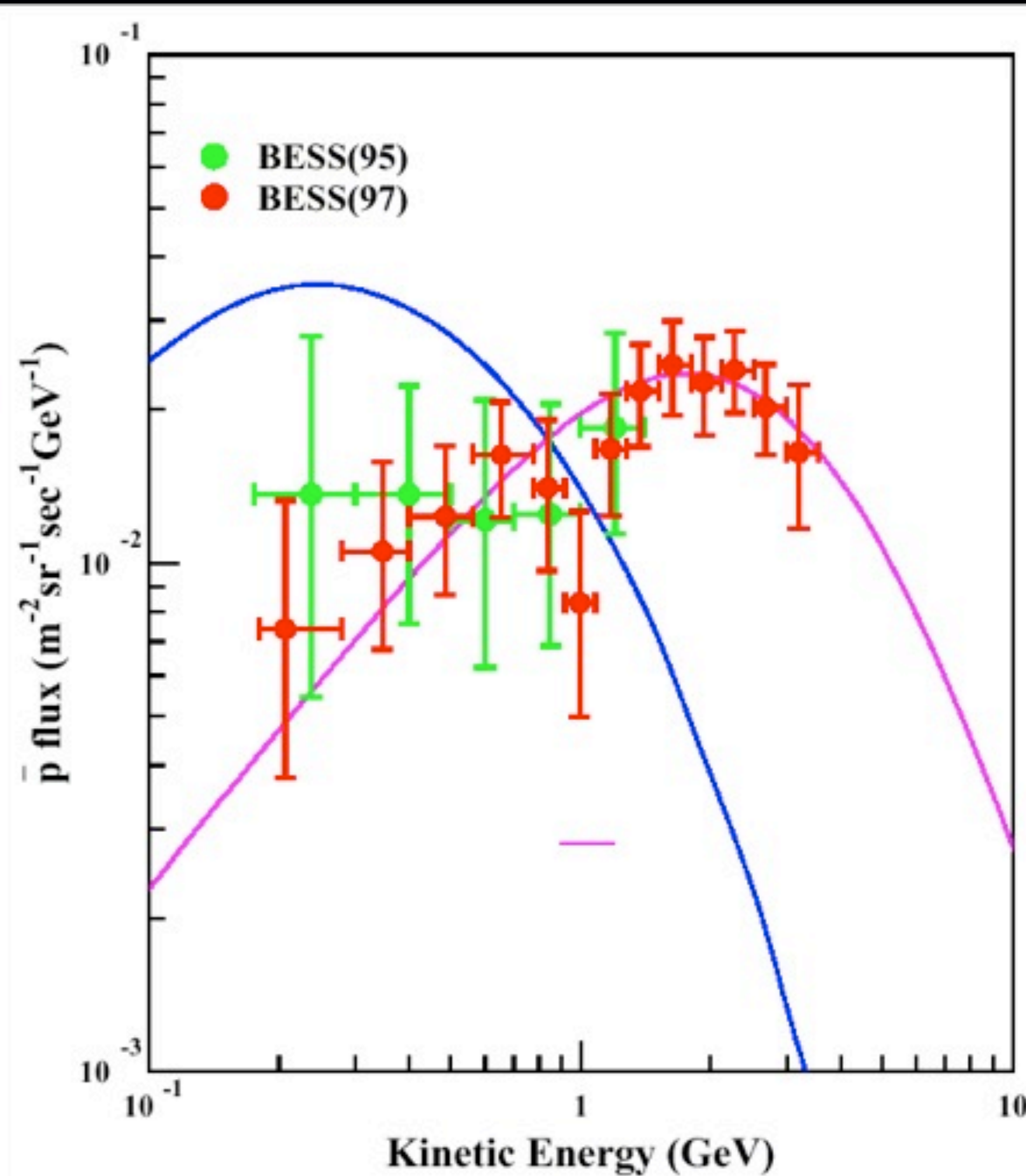
PBH蒸発頻度

(BESS95のデータから)

$$R < 1.7 \times 10^{-2} \text{ pc}^3 \text{ yr}^{-1} \text{ (90\% C.L.)}$$

K. Maki, et al.

PRL 76 (1996) 3474



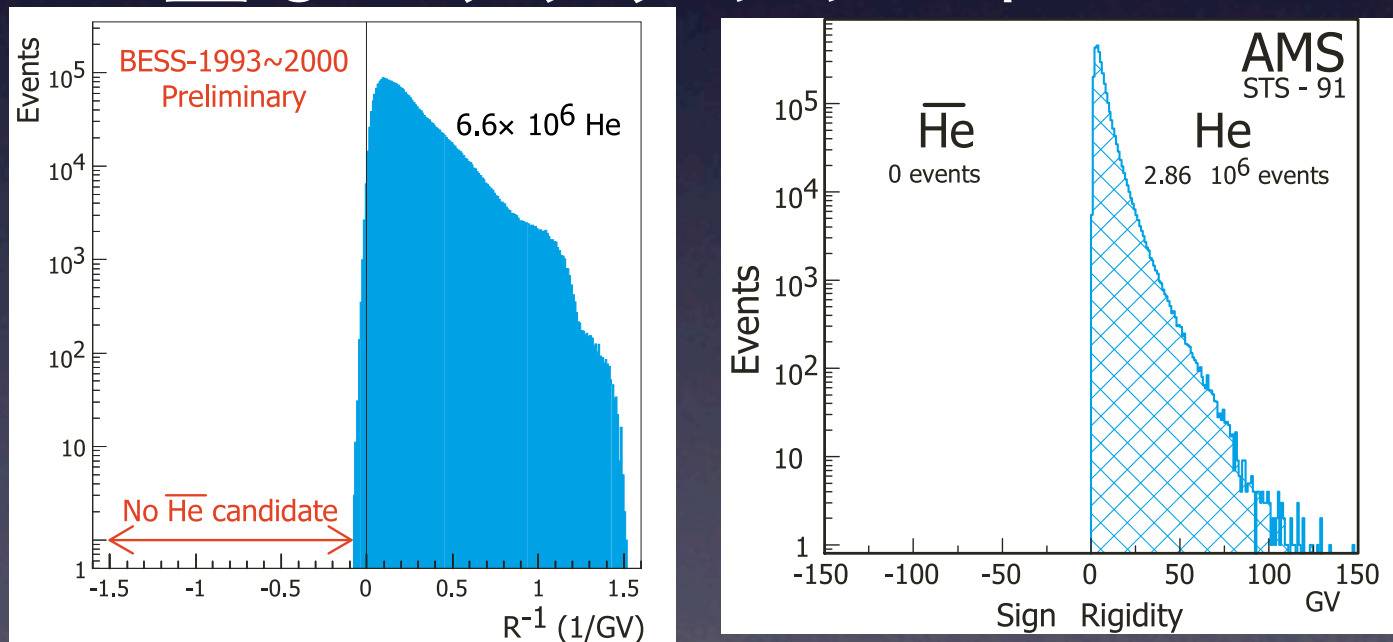
太陽系近傍での蒸発頻度

反物質探索

- 反ヘリウム核識別

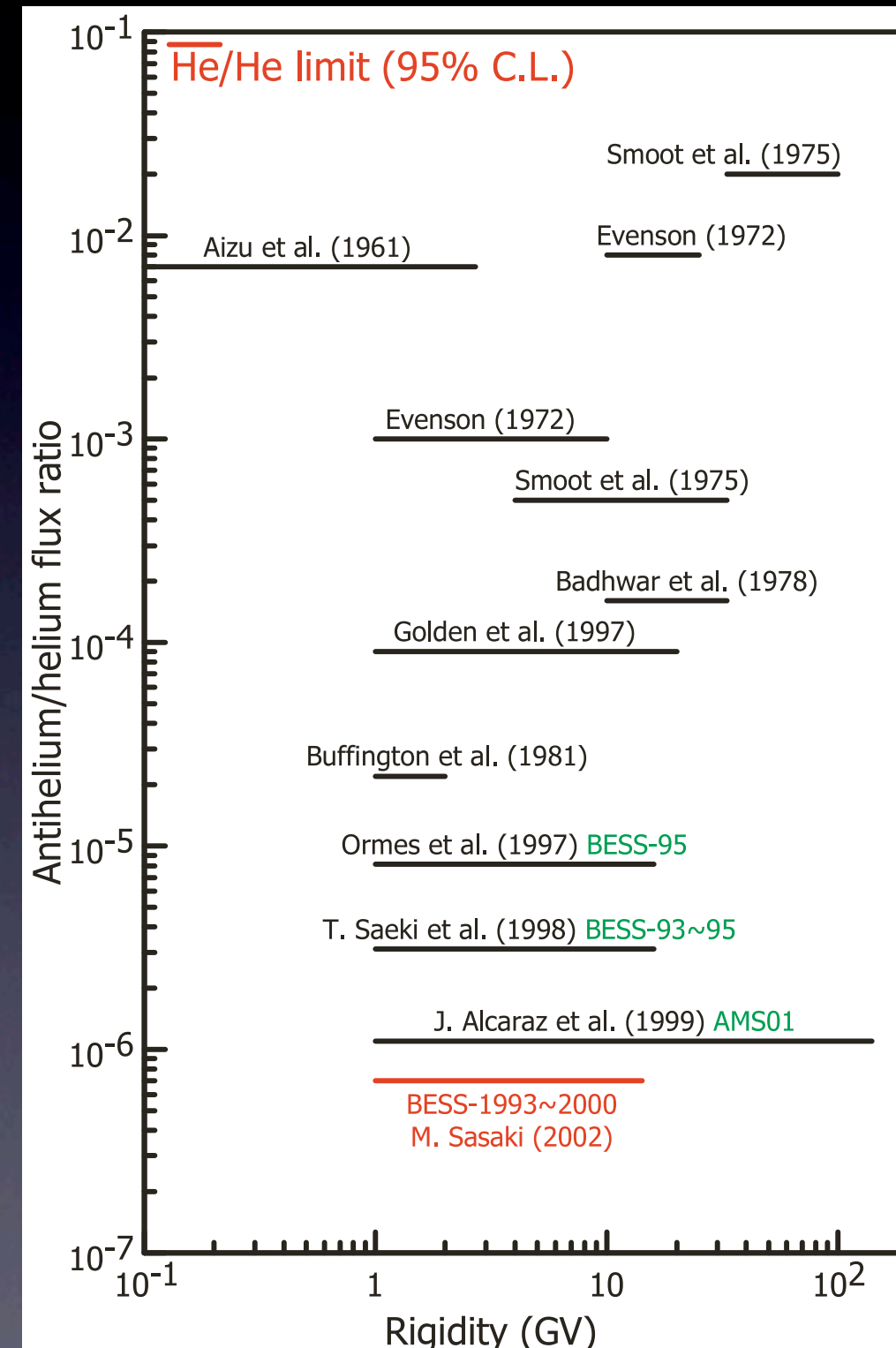
- エネルギー損失から電荷2を判断
- 磁場内での曲がりから
負電荷粒子を選択

- 主なバックグラウンド



- 反物質の直接探索

- $\bar{\text{He}}/\text{He} < 6.7 \times 10^{-7}$ (1~14GV)



反重陽子探索

I 次宇宙線反重陽子の起源

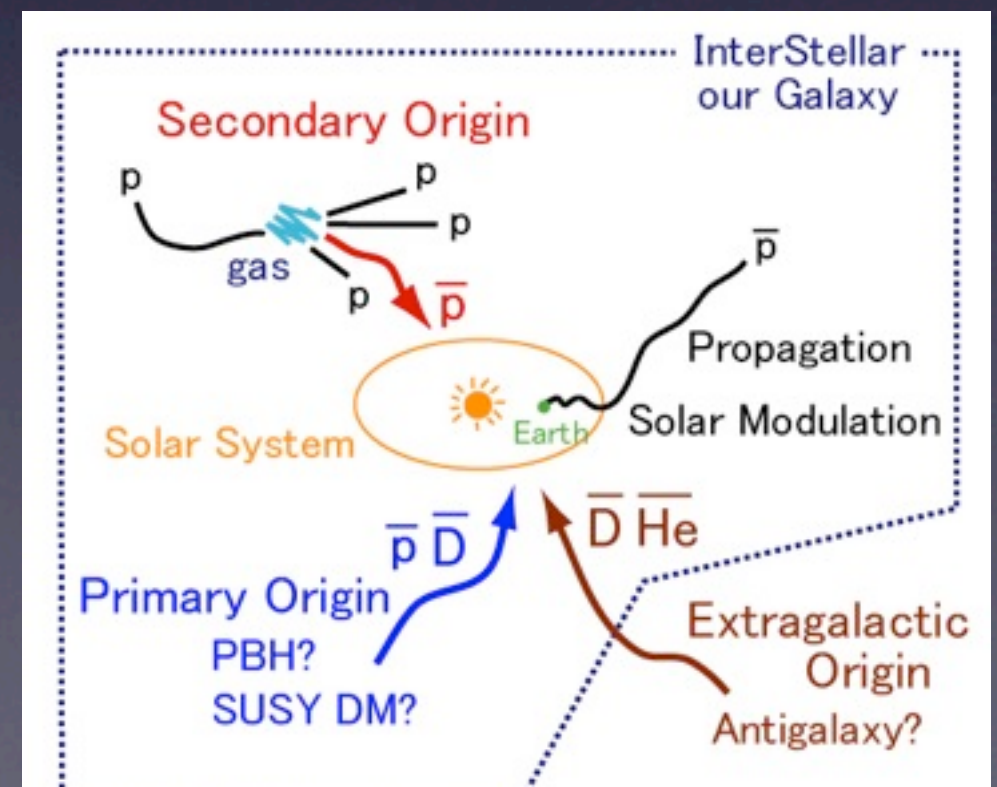
高エネルギー宇宙線と星間物質の衝突

興味深いその他のプロセス (PBH, SUSY...)

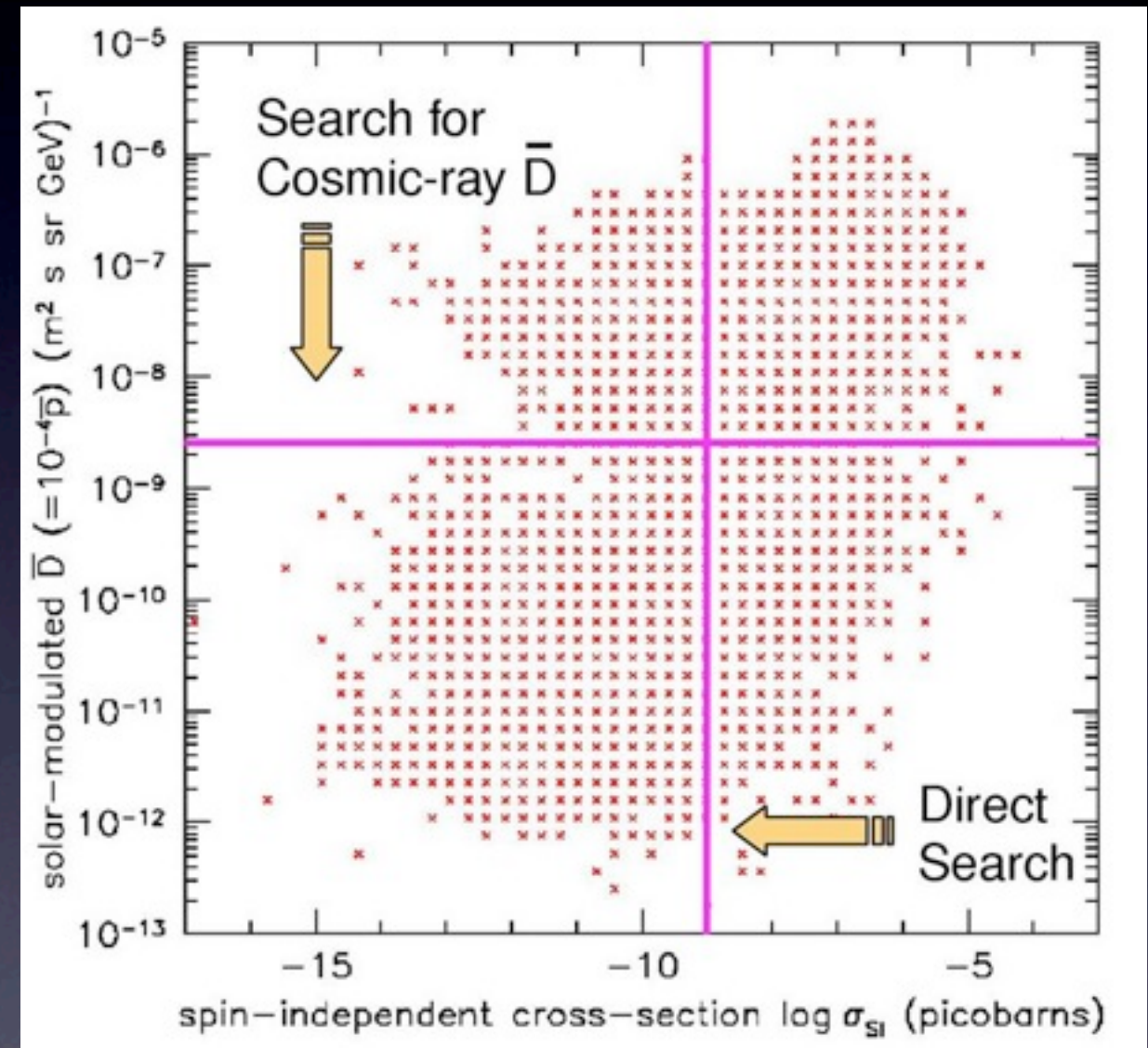
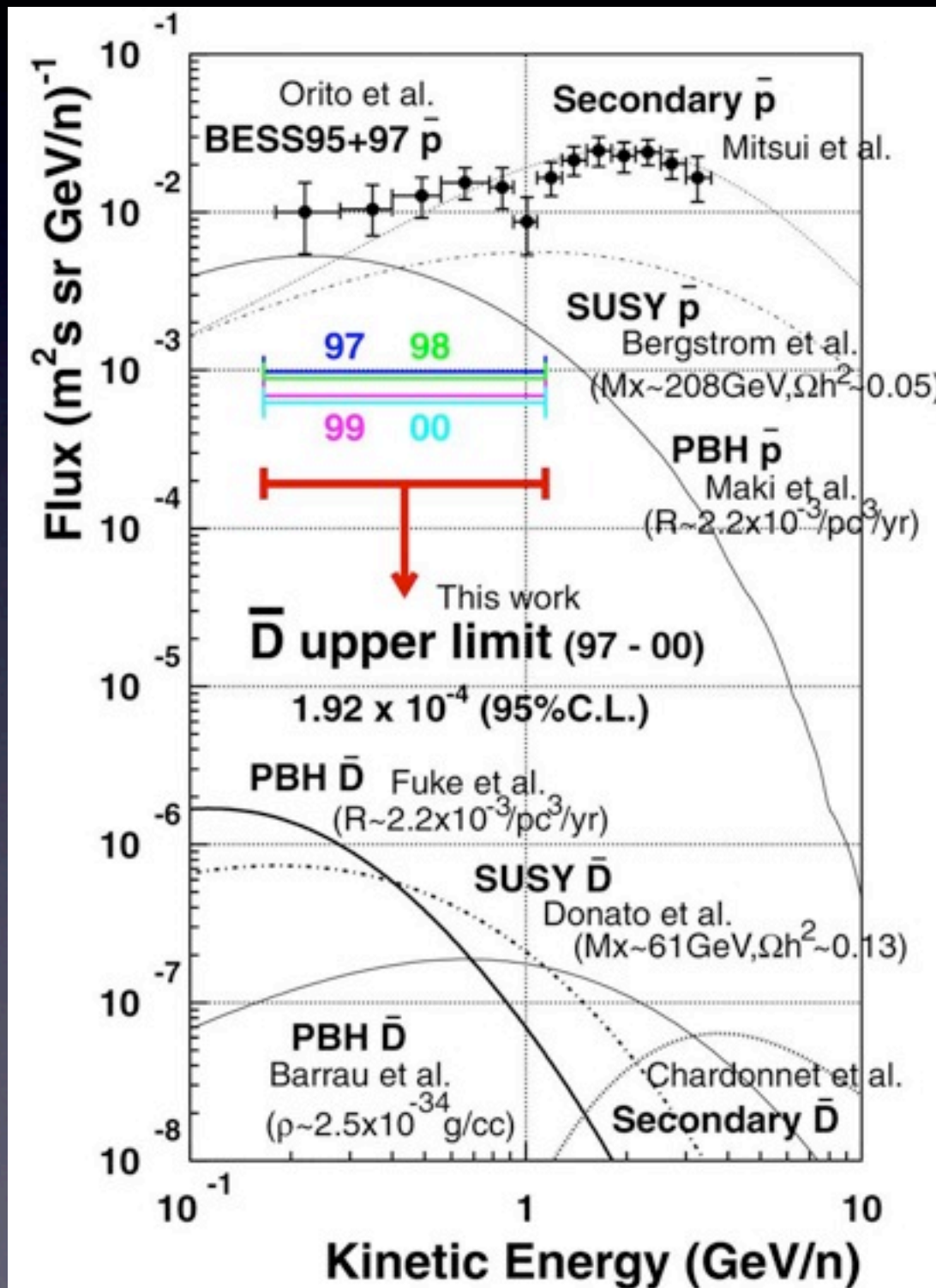
運動学的制限より反陽子よりもっと
低エネルギー反重陽子は生成されにくい

もし低エネルギー反重陽子が
観測されればI次起源！

しかし予想される流束は極微量



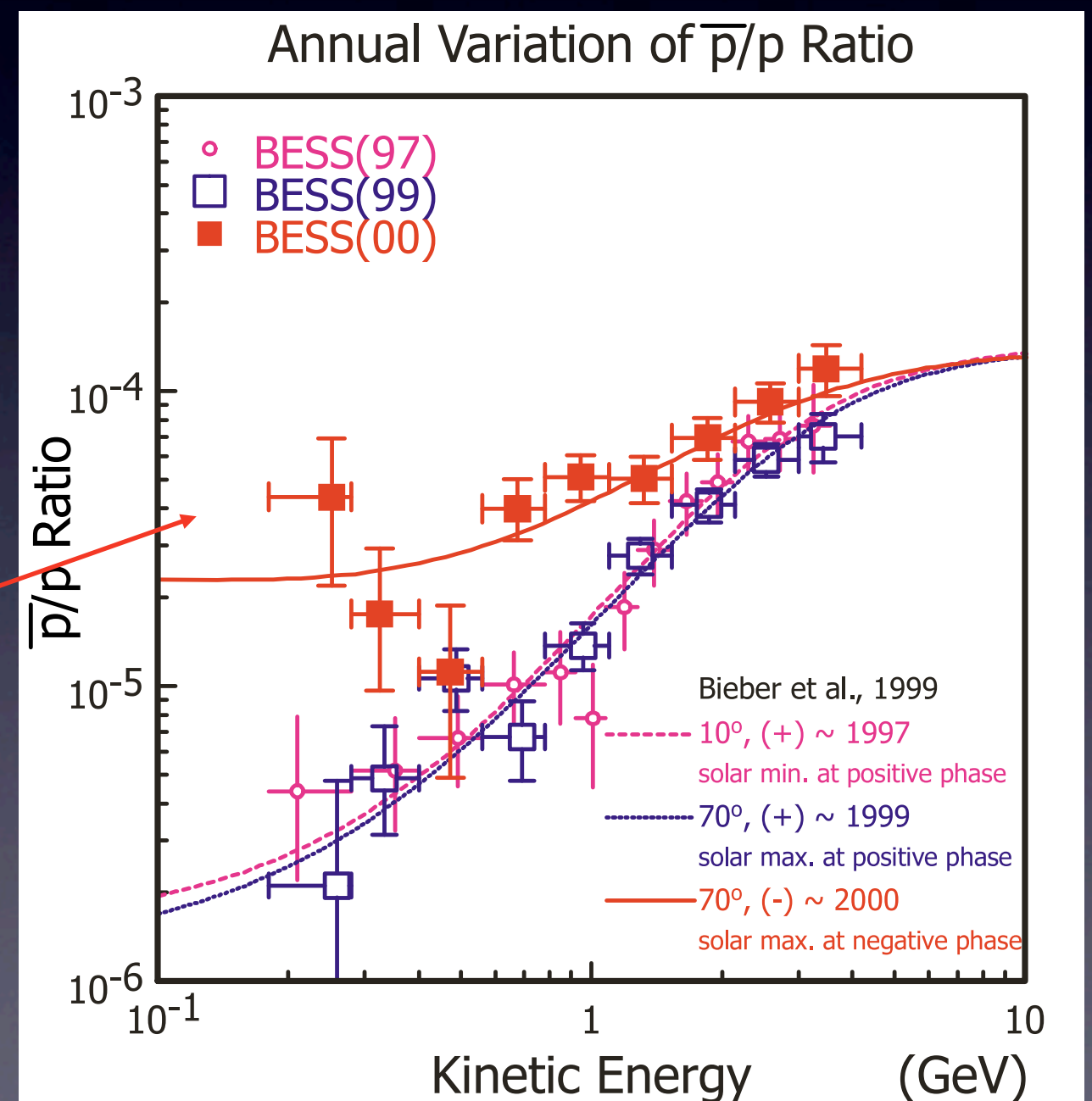
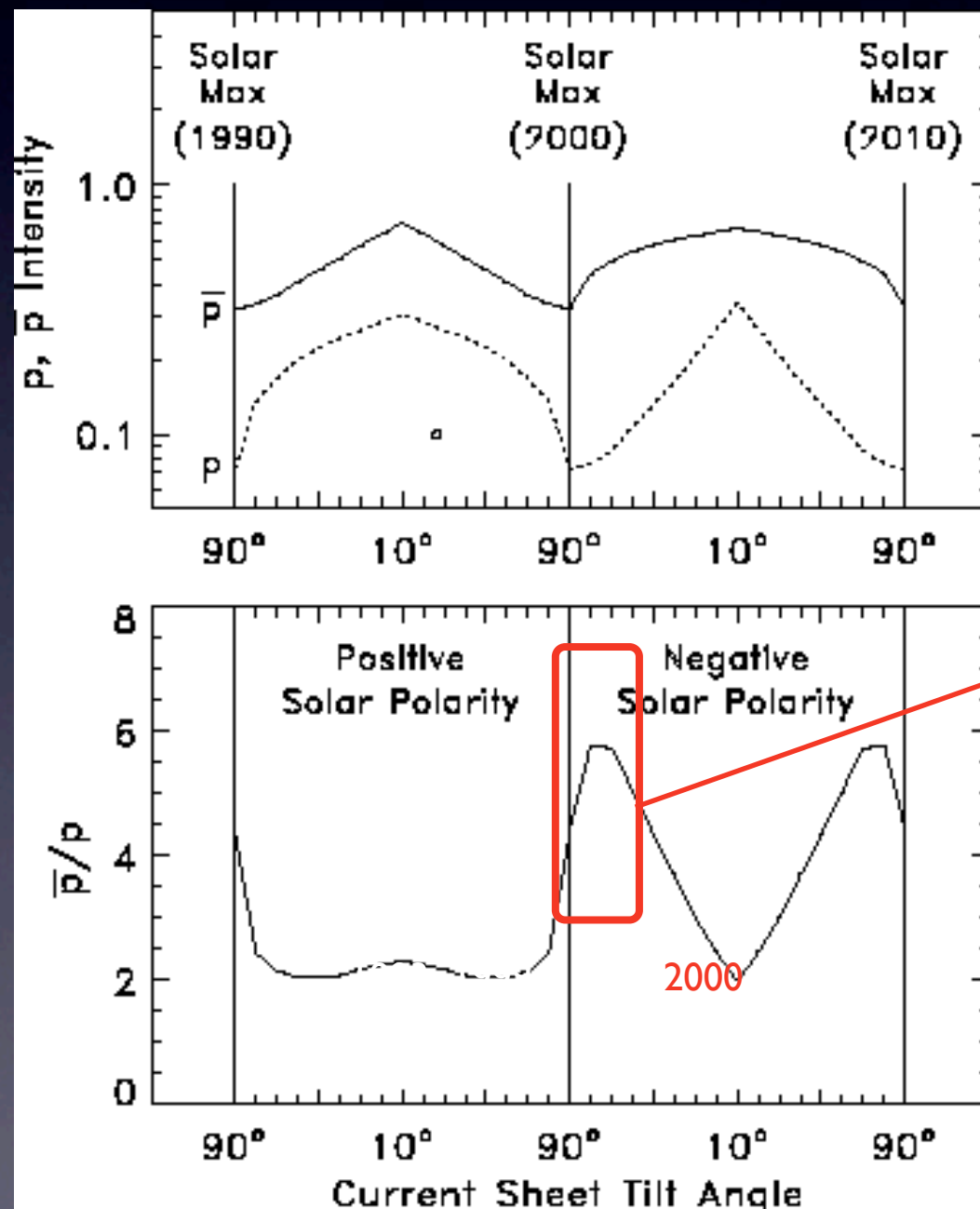
世界初の反重陽子探索



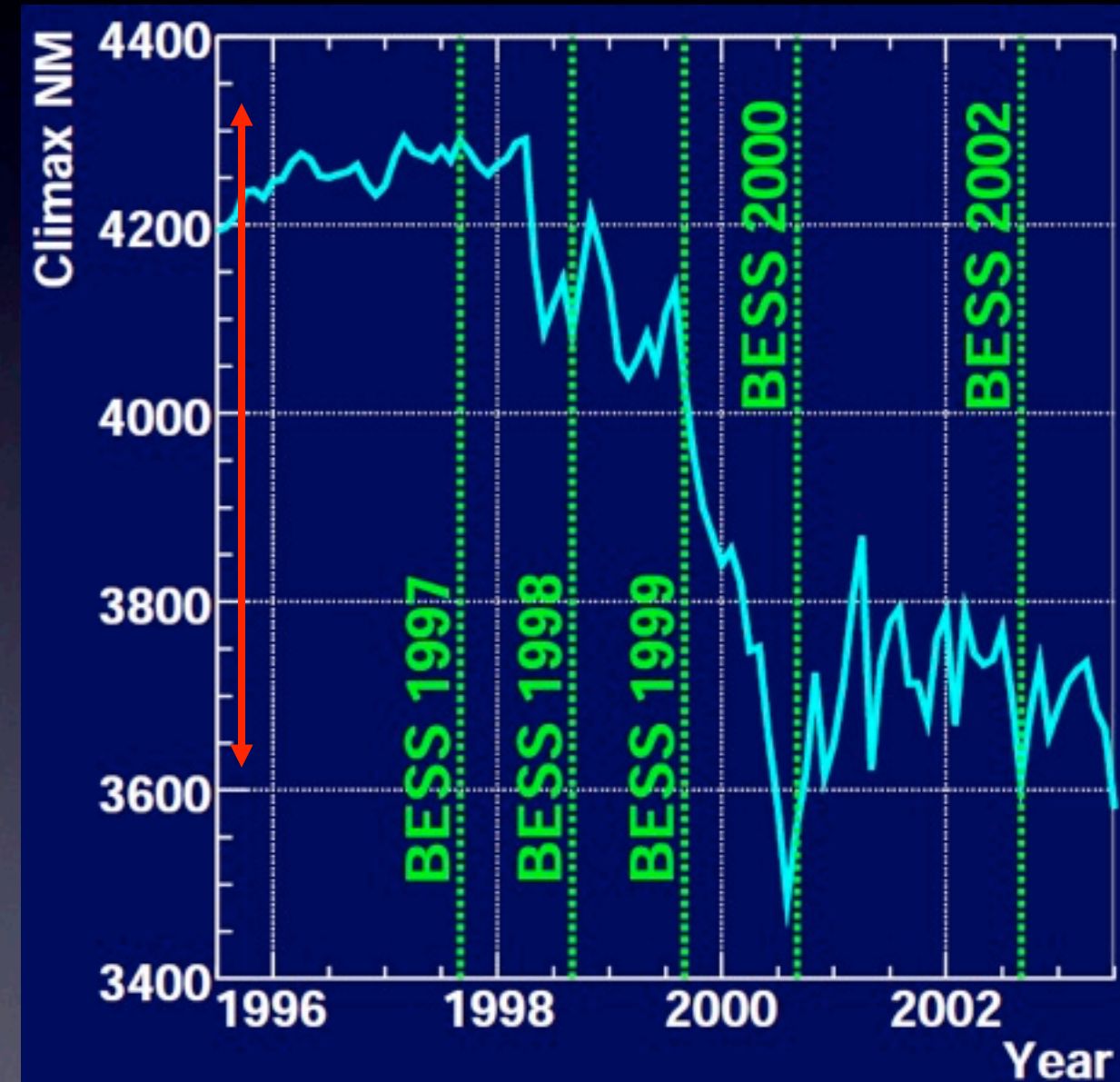
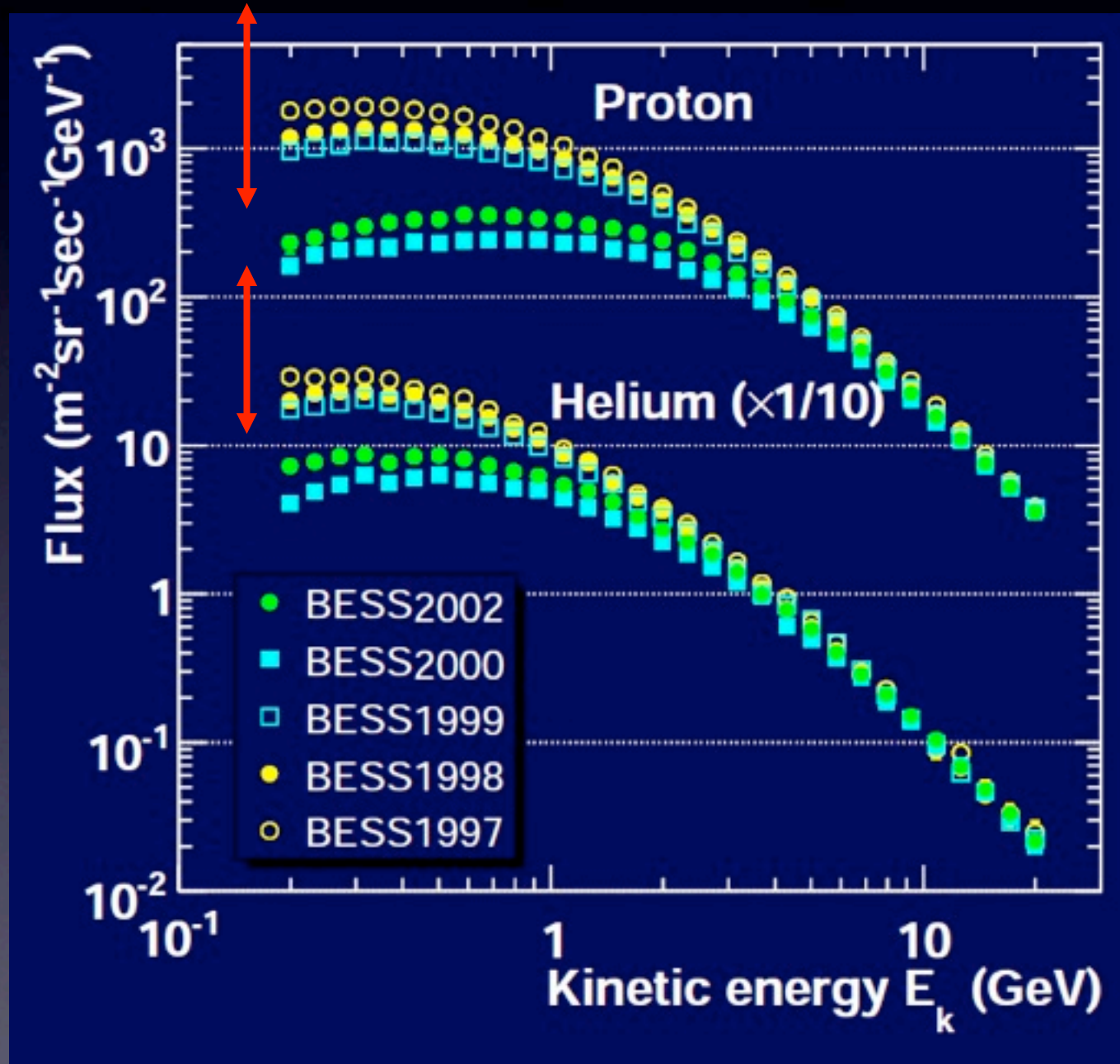
K.Mori et al, ApJ 566 (2002) 604

太陽活動依存性

太陽風による変調の電荷依存性 \bar{p}/p ratio



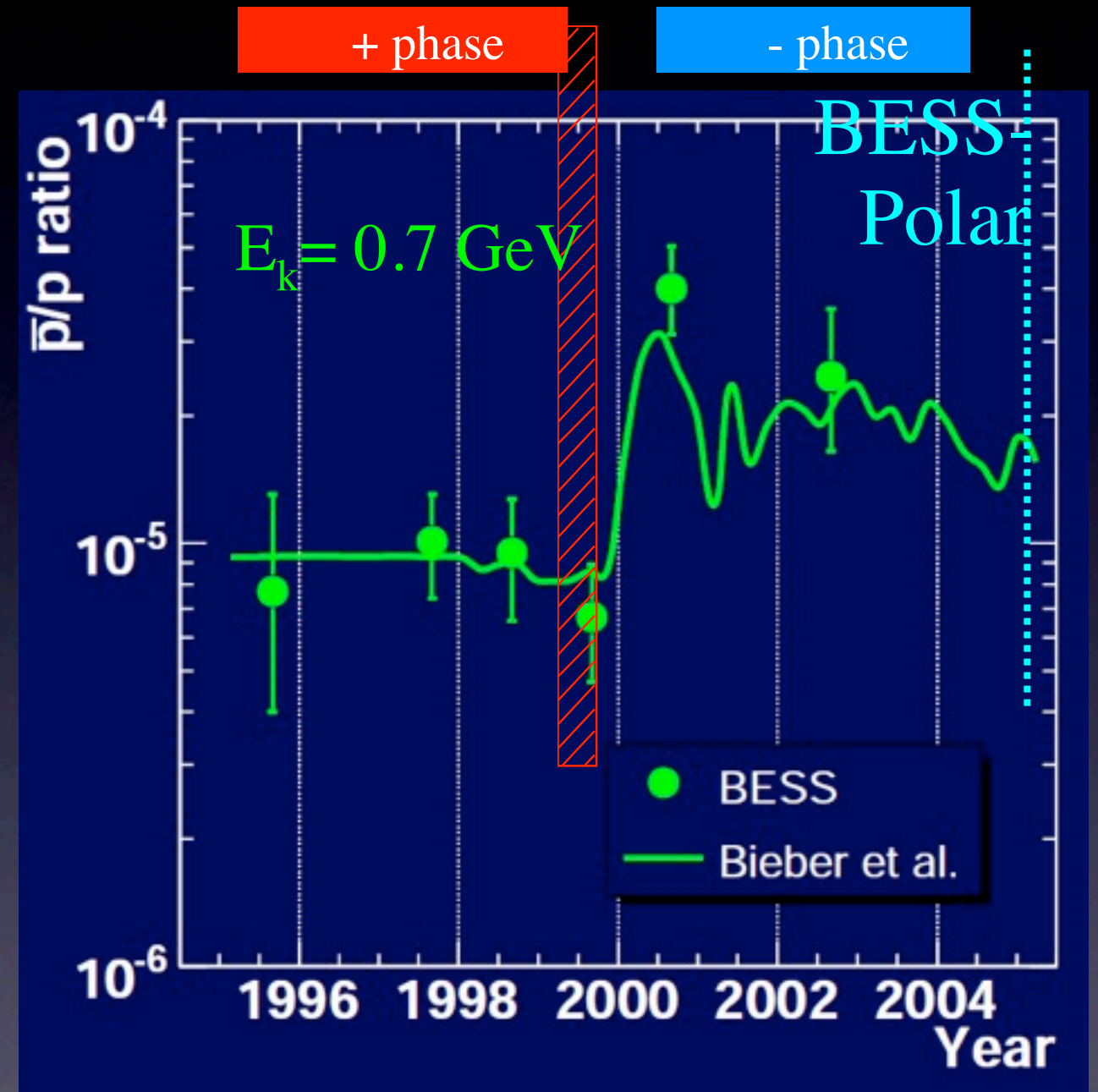
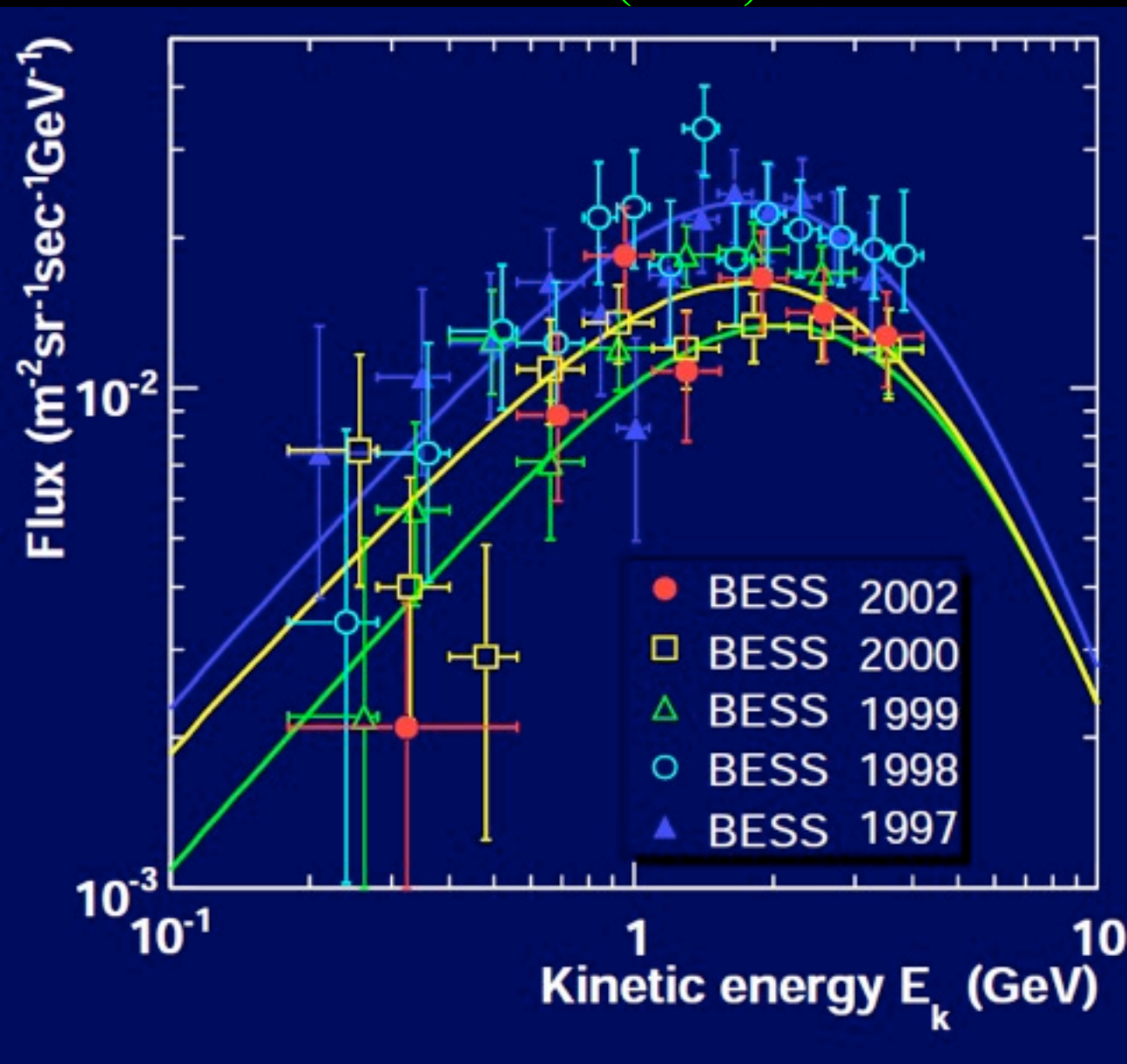
太陽活動による一次宇宙線スペクトル変動



p-bar/p ratioの太陽活動による影響

Maeno et al. AP 16 (2001) 121

Asaoka et al. PRL 88 (2002) 051101



\bar{p}/p ratio: 磁極の反転の際に急激に
変動 電荷依存性の確認

Haino et al. ICRC 2005

I次宇宙線 (陽子、ヘリウム核成分)

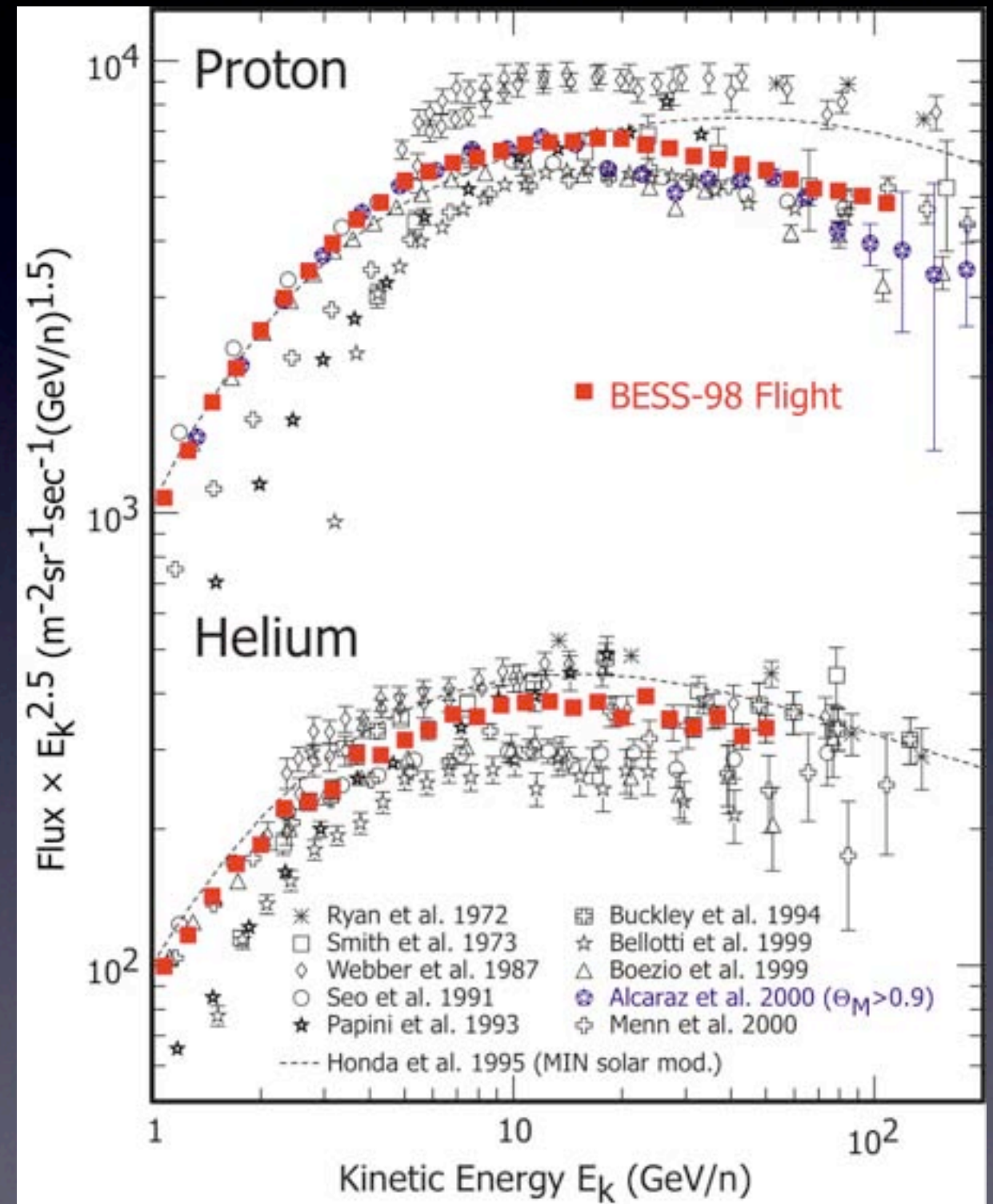
宇宙線の基礎データ

大気ニュートリノ流束の
計算

大気中で生成される
反陽子スペクトルの
計算

1~100GeVの領域で
5% の精度で測定

BESS/AMS



BESS-TeV (2001~2002)

Super KAMIOKANDEによる大気ニュートリノ振動現象の発見
振動現象のより精密な議論のために

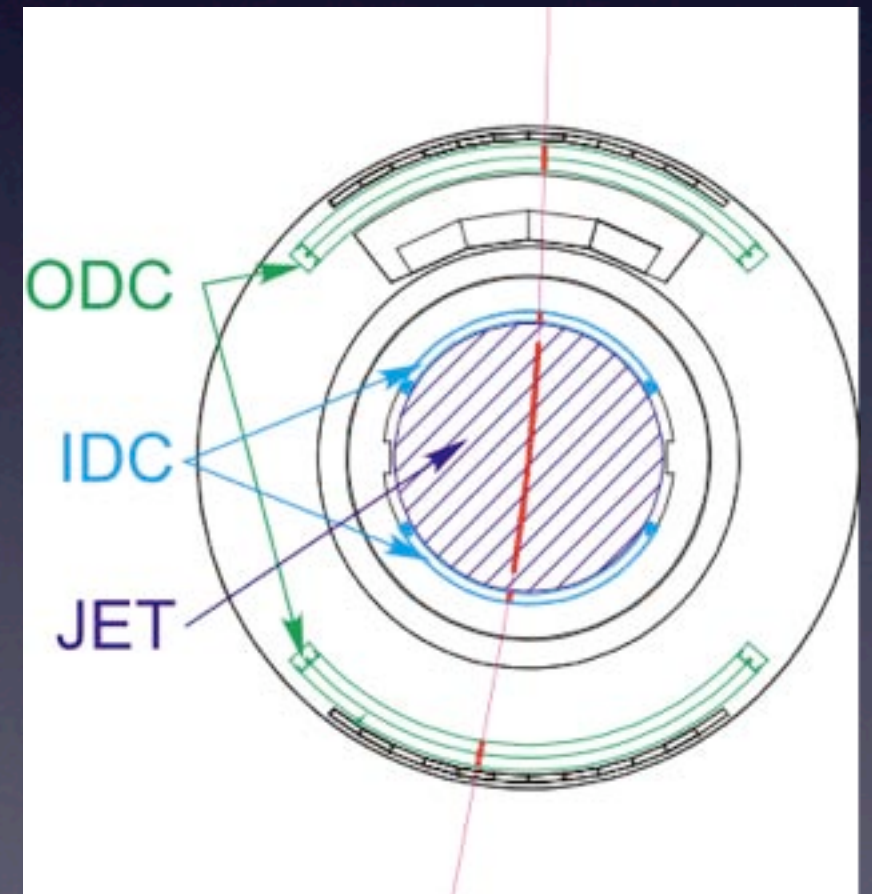
大気ニュートリノの生成スペクトルを精密に導出する必要性
計算の入力

TeV領域までの陽子・ヘリウムの
1次宇宙線スペクトル

大気と宇宙線の相互作用

測定器の最外殻に
新しく飛跡検出器を導入

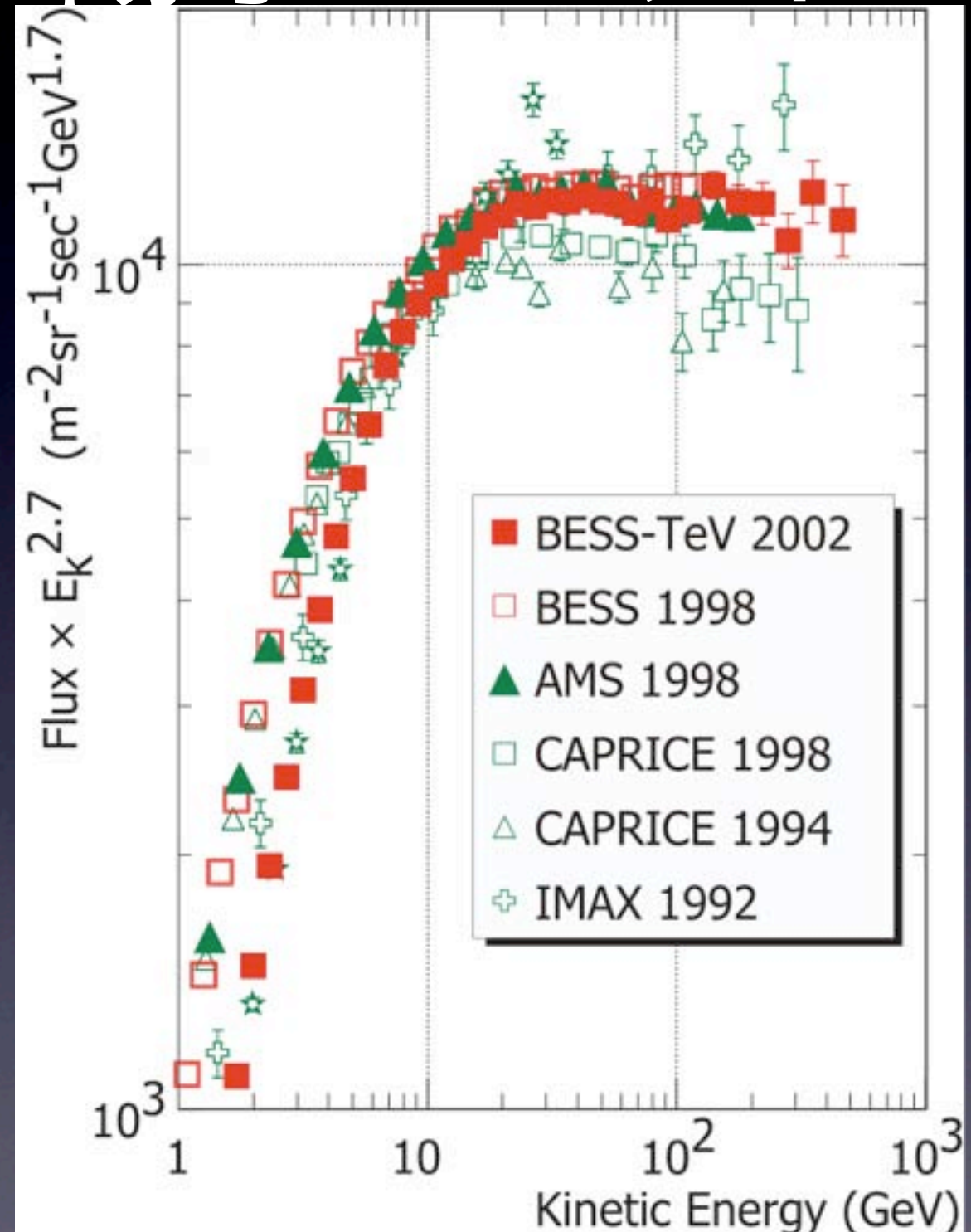
運動量分解能~1.4 TVで100%



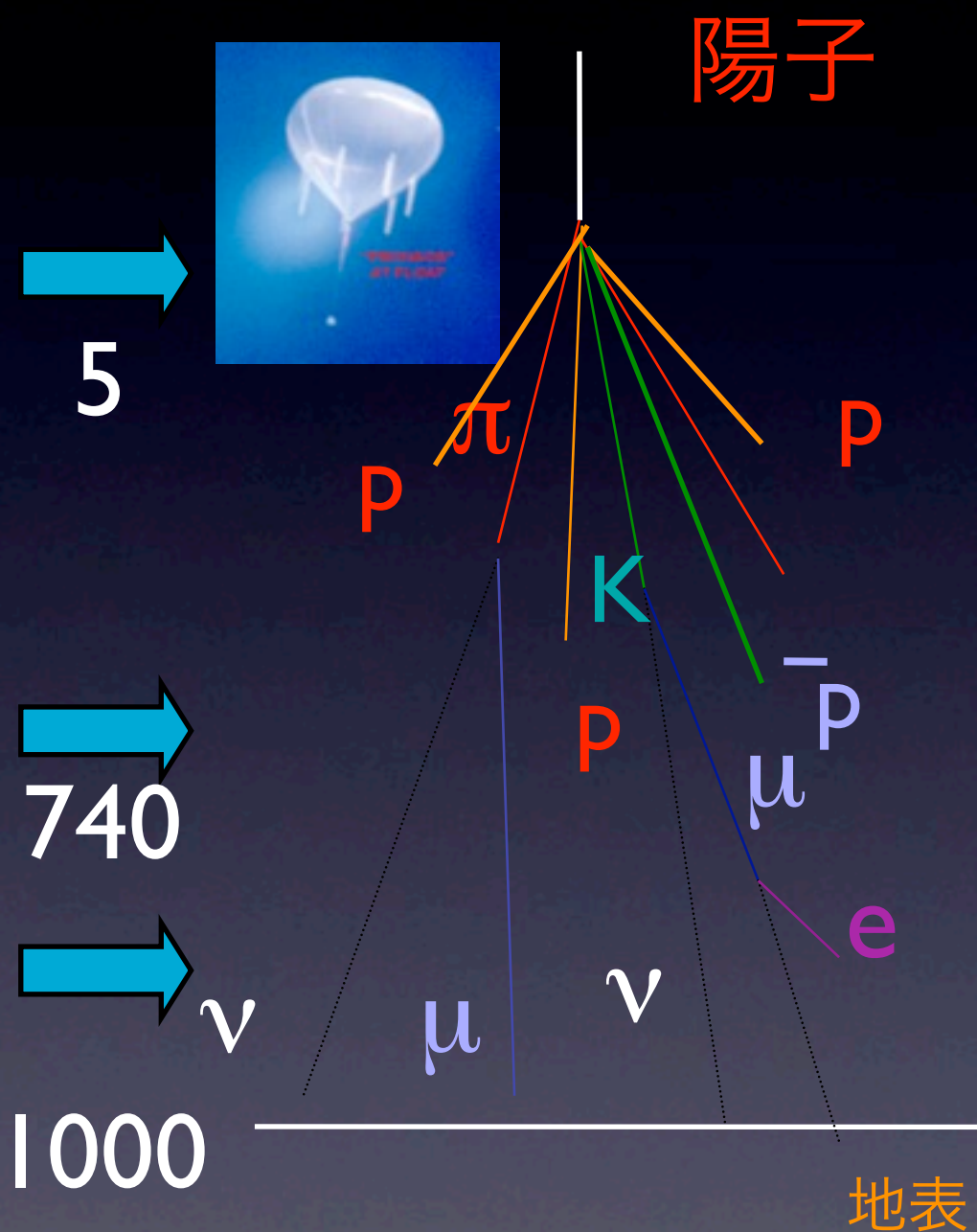
500GeVまでの陽子スペクトル

BESS-98, AMS-Iの結果と
100 GeV領域まで一致

ATICの結果と
100GeV以上で一致



宇宙線の大気中での発展



大気深度 (g/cm²)

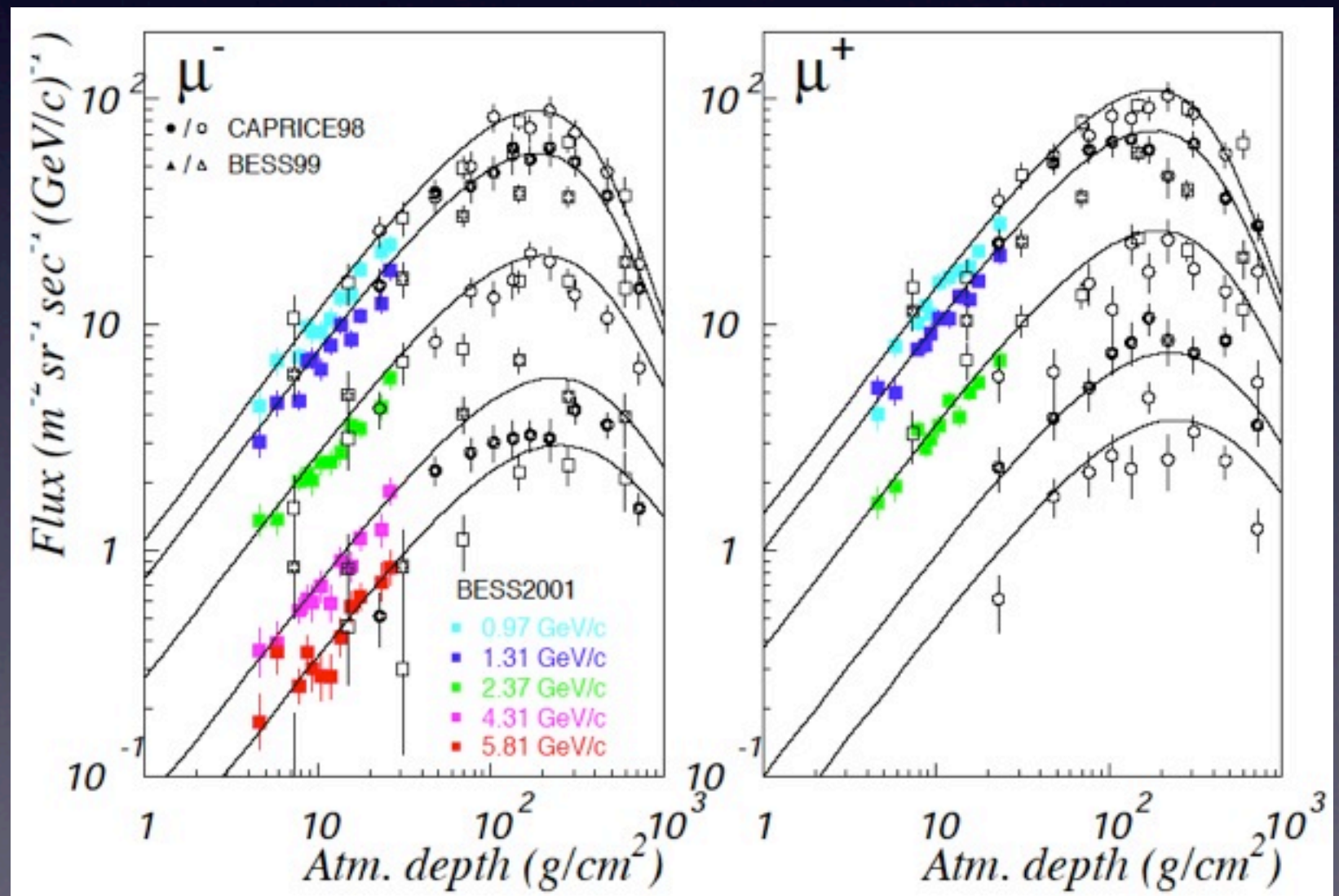
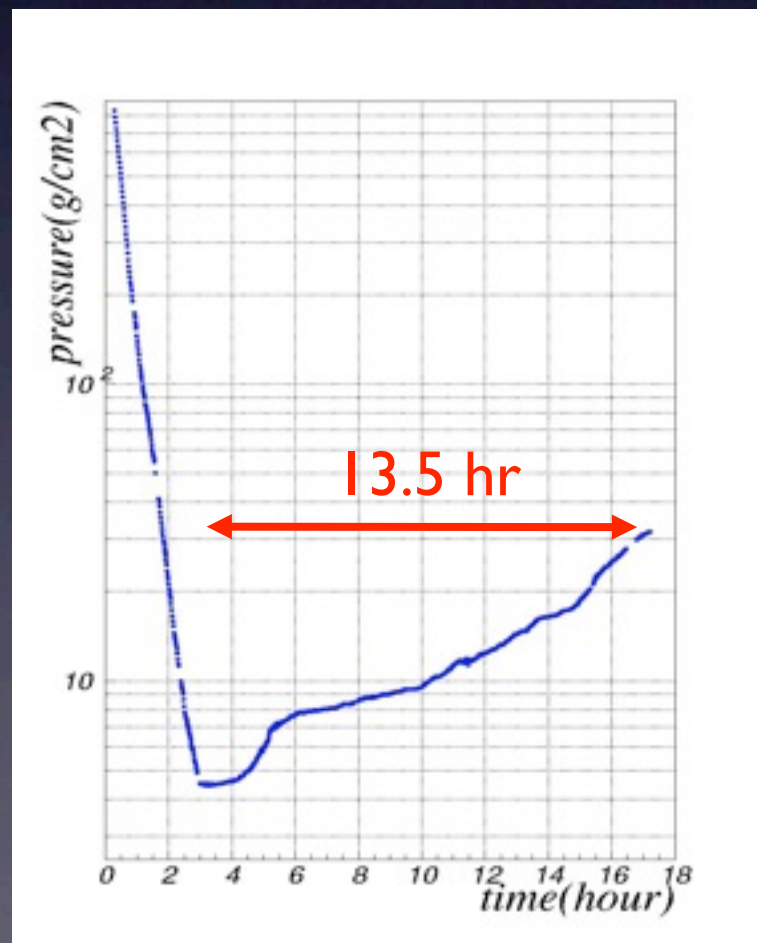
	大気深度	観測時間
浮遊中 (93~02)	5 g/cm ²	~1 d/yr
緩降下中 (01)	5~30	~10 hr
乗鞍山上 (99)	740	~ 3 days
地表 (95~02)	1000	~ 3 days
上昇中 (99~02)	5~1000	~3 hr/yr

大気で生成された μ 粒子 (5~26 g/cm²)

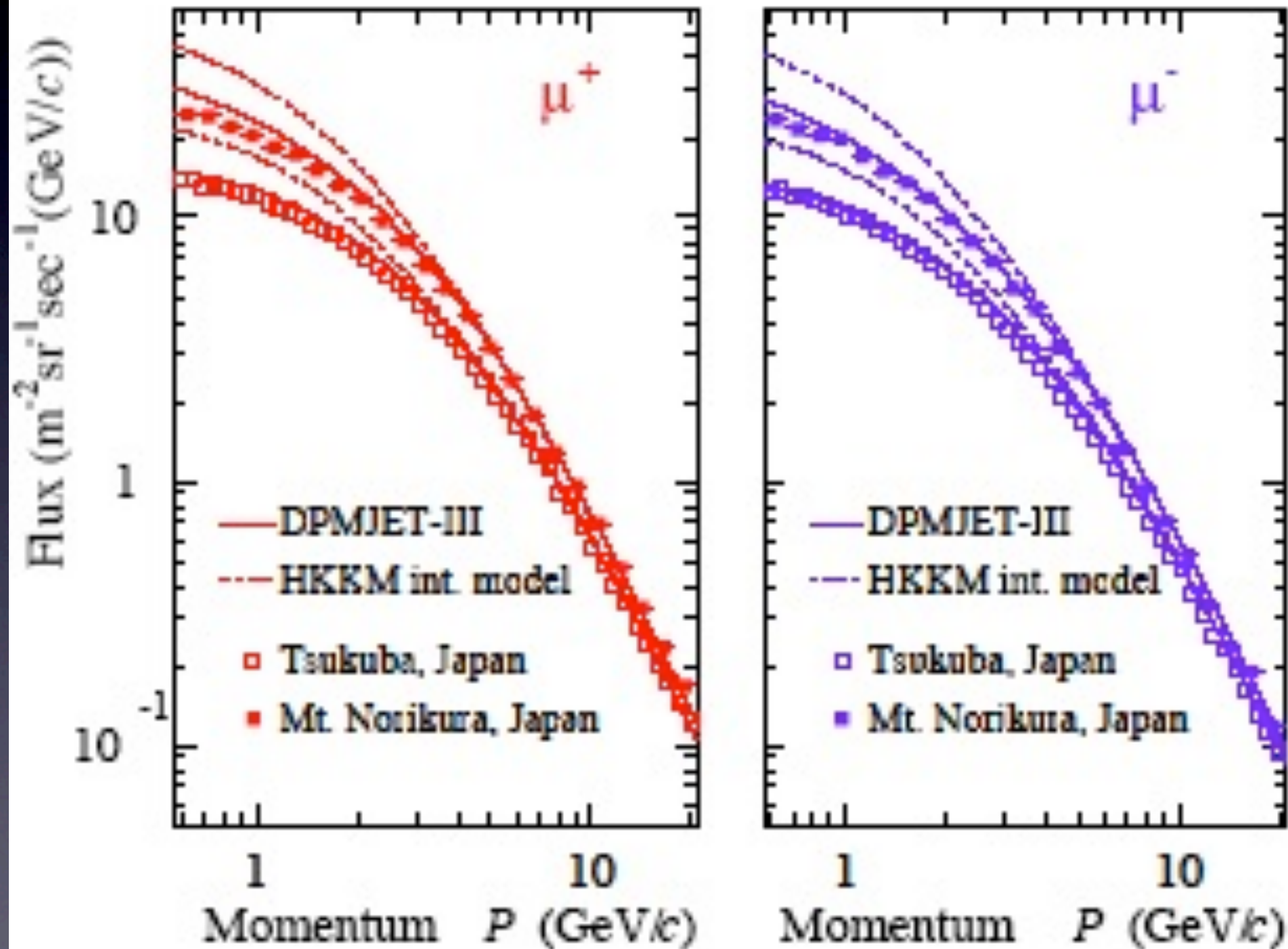
BESS-200I に気球のトラブルで浮遊高度を保てず緩降下

Hadronic interaction modelのチェックによいプローブ

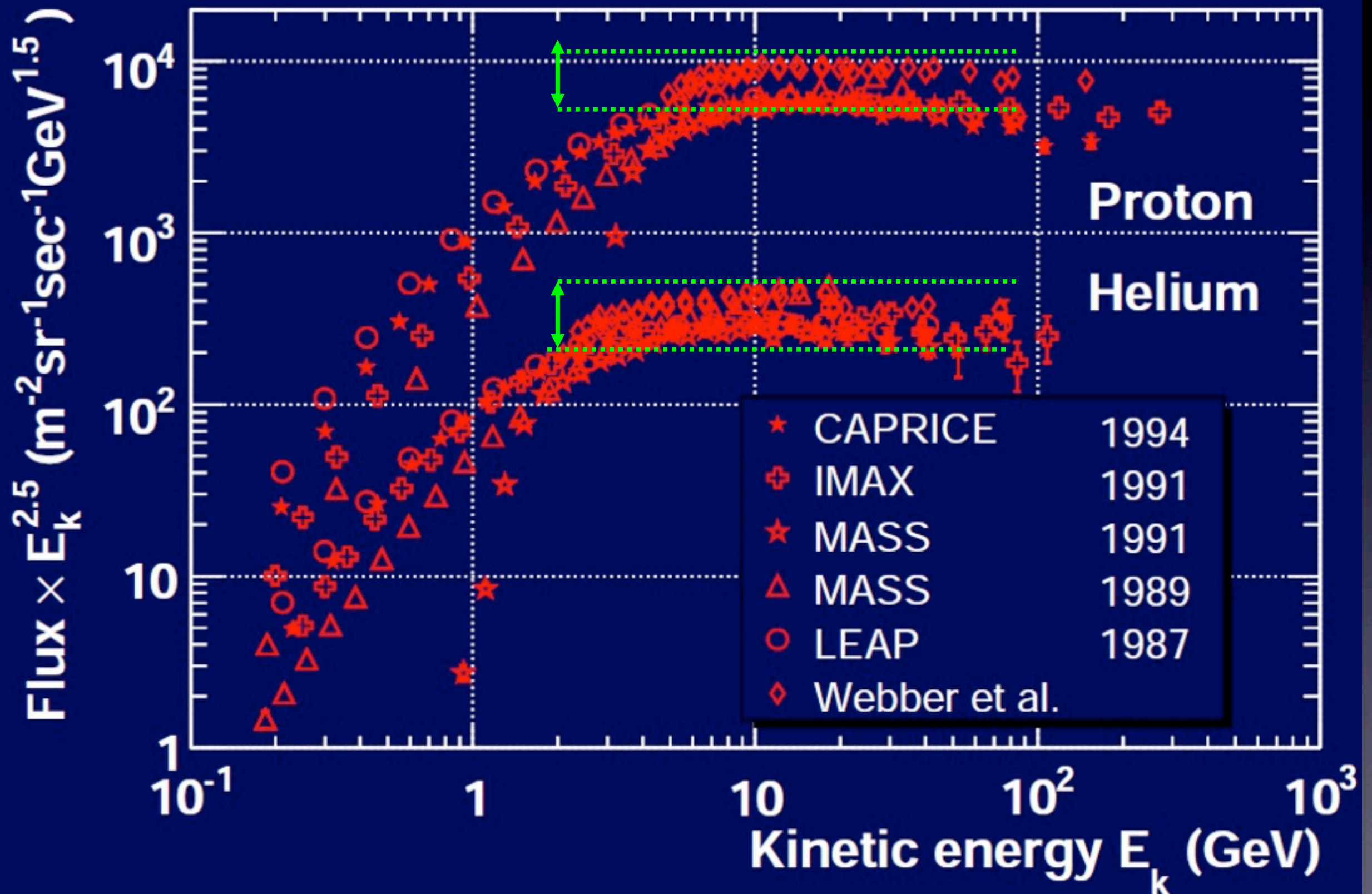
大気深度の浅い部分ではI次宇宙線と大気最初の反応が寄与



乗鞍観測所、KEKでの μ 粒子観測

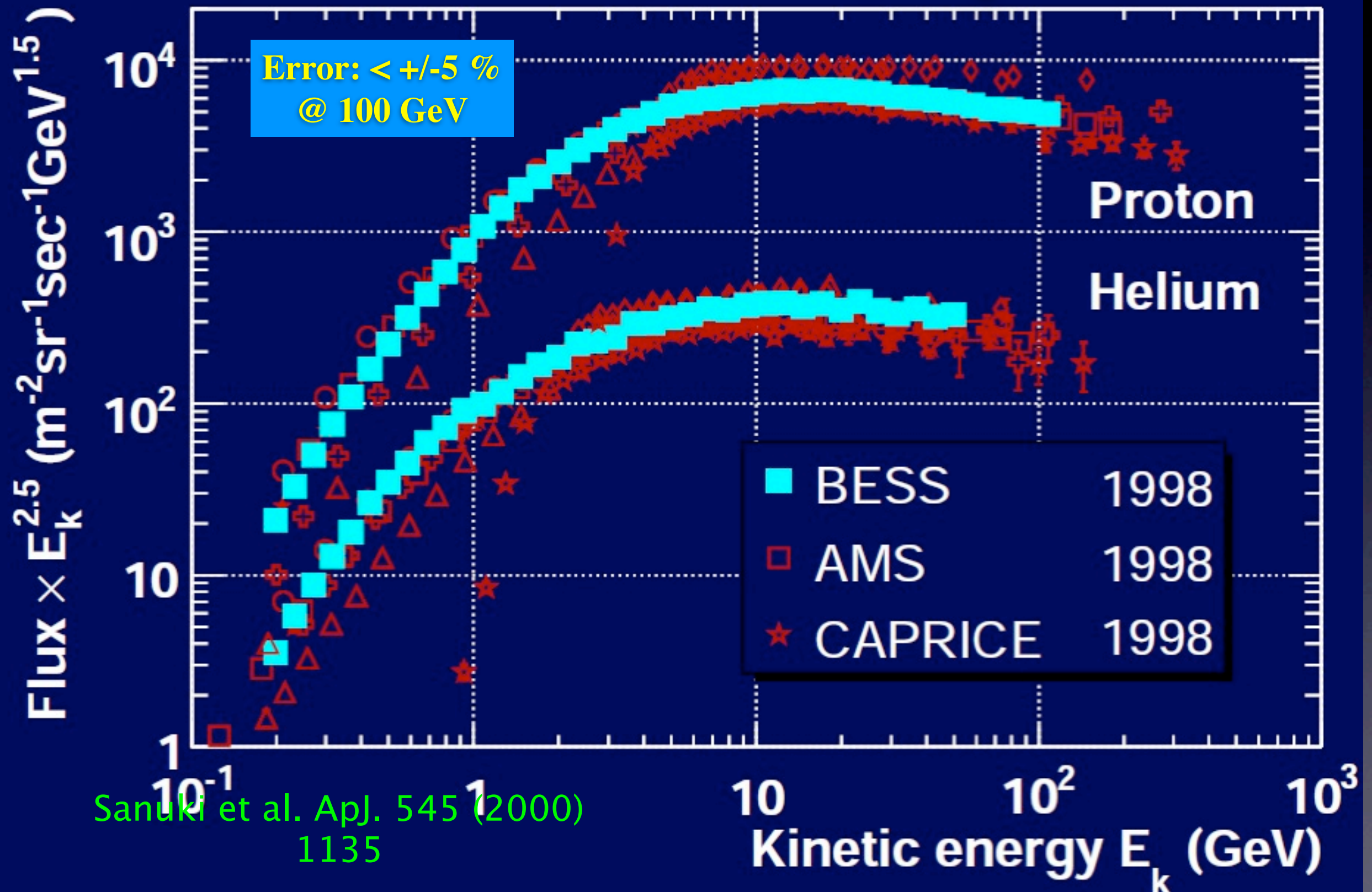


一次宇宙線 (~1990)

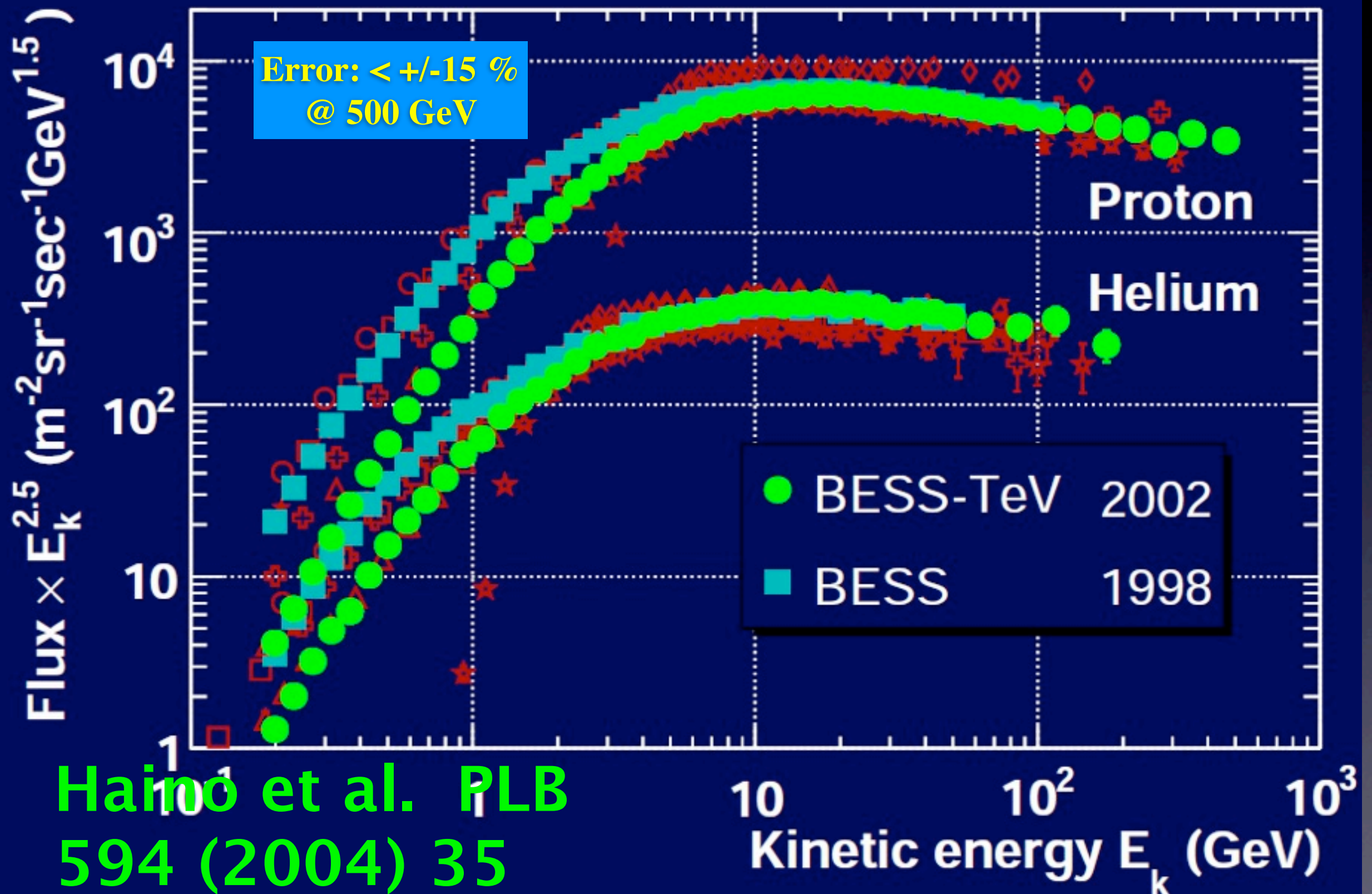


一次宇宙線

(1998: Bess-98, AMS-I, Caprice)



一次宇宙線(BESS-TeV)



BESS-TeV の結果のインパクト

$$F = \phi E_k^{-\gamma}$$

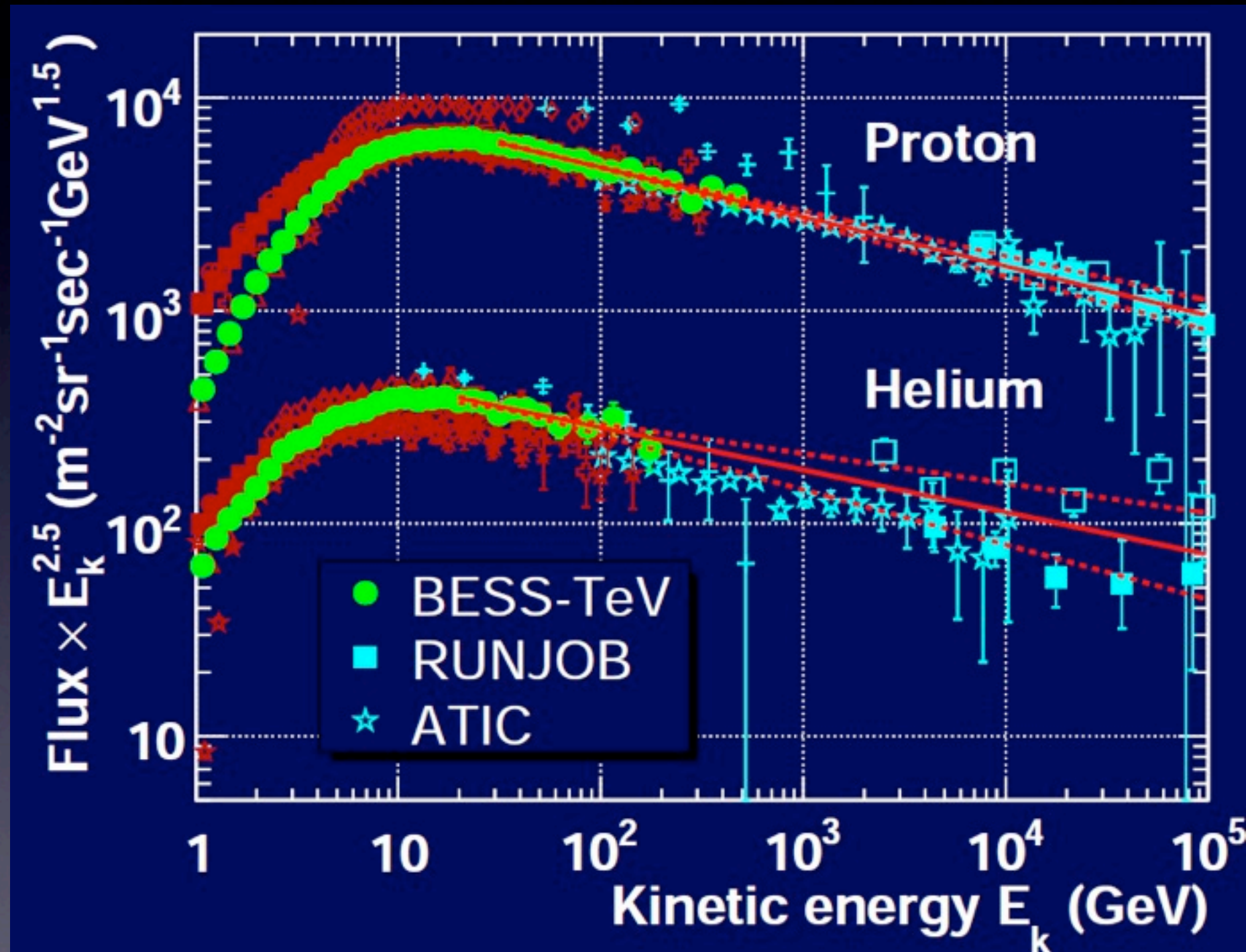
Proton ($E_k > 30$ GeV)

$$\phi = (1.37 \pm 0.12) \times 10^4$$

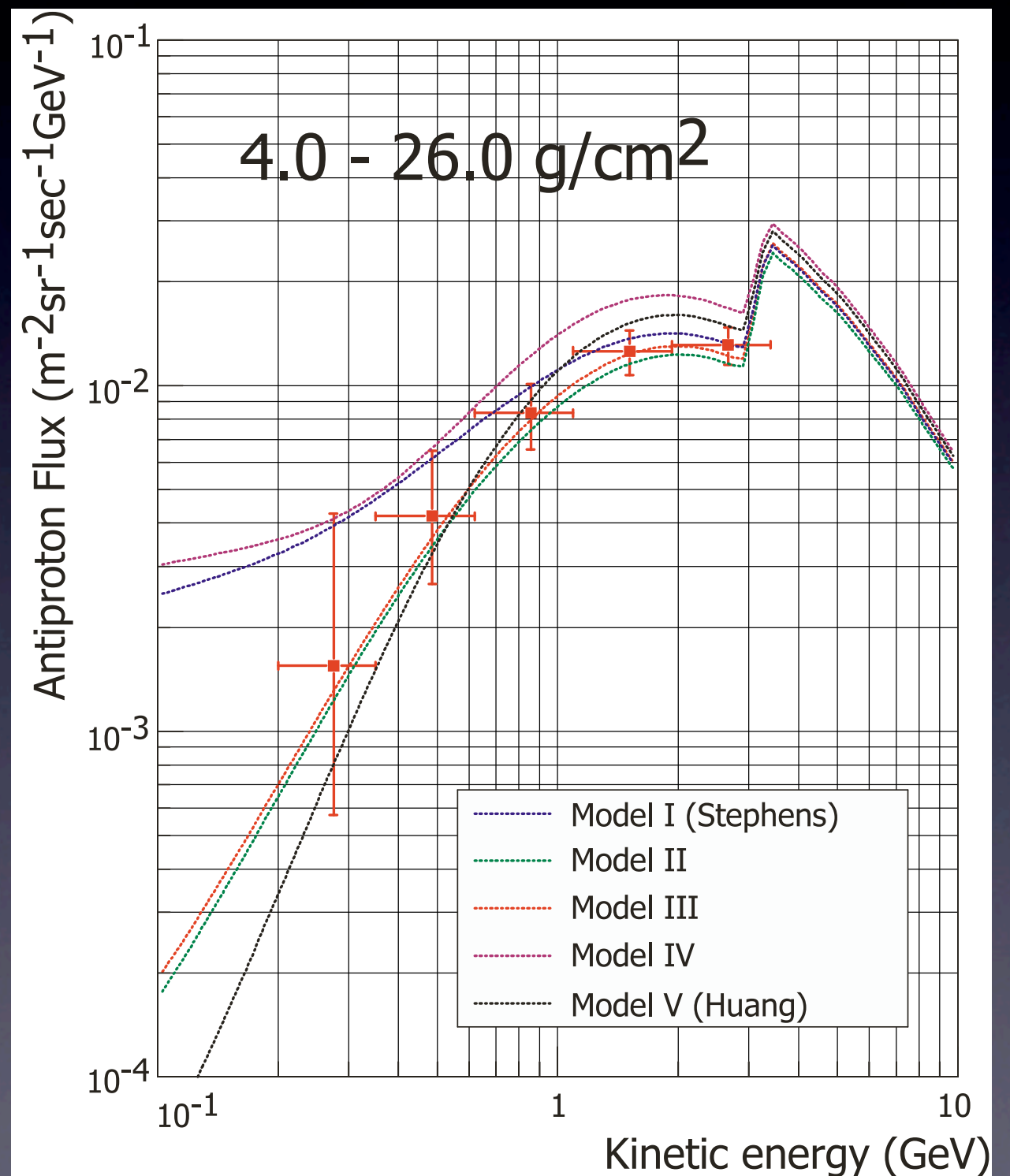
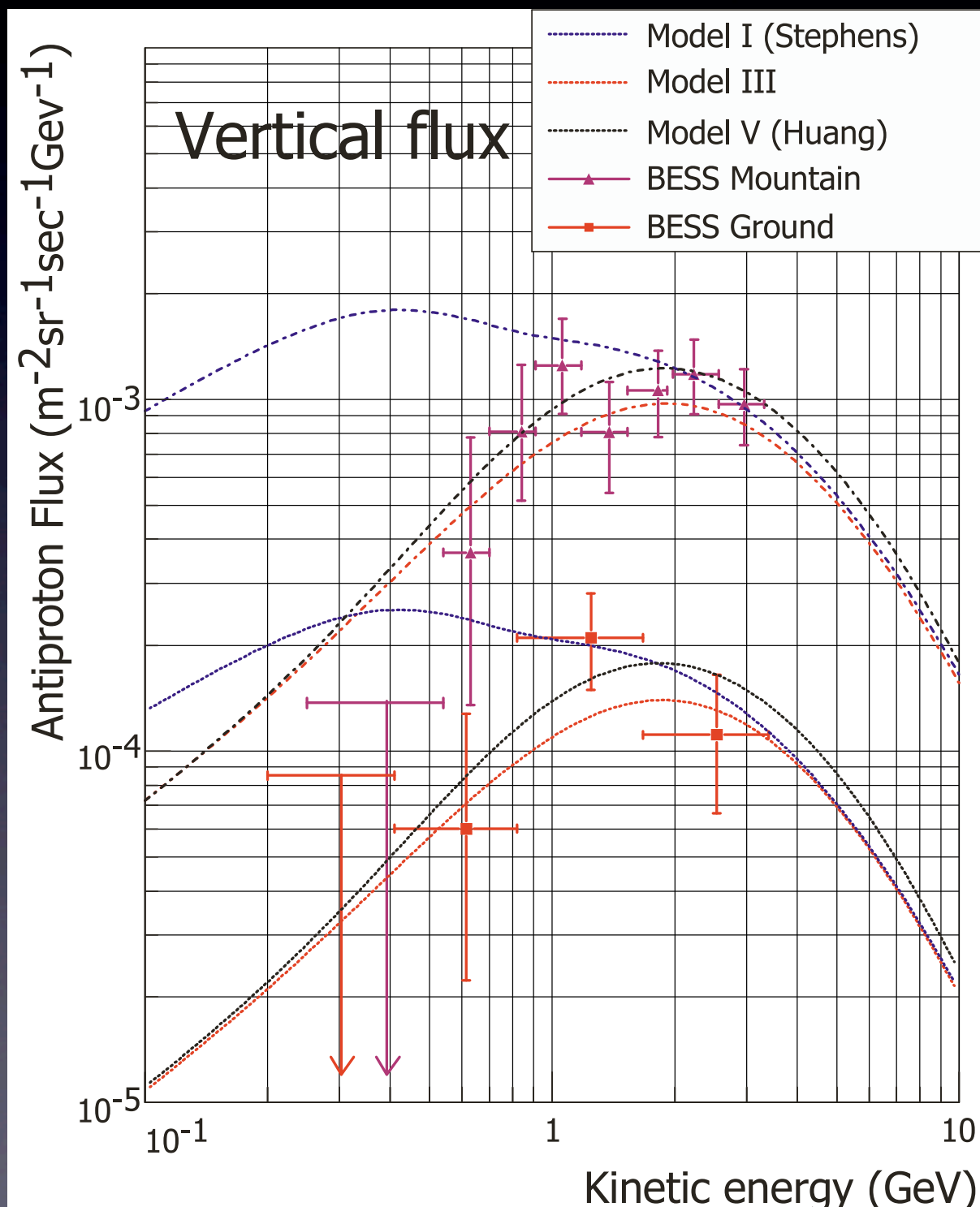
$$\gamma = 2.732 \pm 0.022$$

Helium ($E_k > 20$ GeV)

$$\phi = (7.06 \pm 1.15) \times 10^2$$



大気で生成された反陽子



BESS実験のまとめ

	1993	1994	1995	1997	1998	1999	2000
データ収集 (時間)	14.0	15.0	17.5	18.3	20.0	2.8+31.3	2.5+32.5
記録事象数 (M Events)	4.0	4.2	4.5	16.2	19.0	2.3+16.8	2+15
反陽子数	6	2	43	415	384	668	558
反陽子識別 エネルギー範囲 (GeV)	0.18~0.5		0.18~1.5	0.18~3.6	0.18~4.2		
He/He	2.2×10^{-5}	4.3×10^{-6}	2.4×10^{-6}	1.4×10^{-6}	8.8×10^{-7}		6.7×10^{-7}

実験ごとに測定器性能やデータの質の向上

宇宙空間での実験に比べての気球実験の有利さ



南極へ

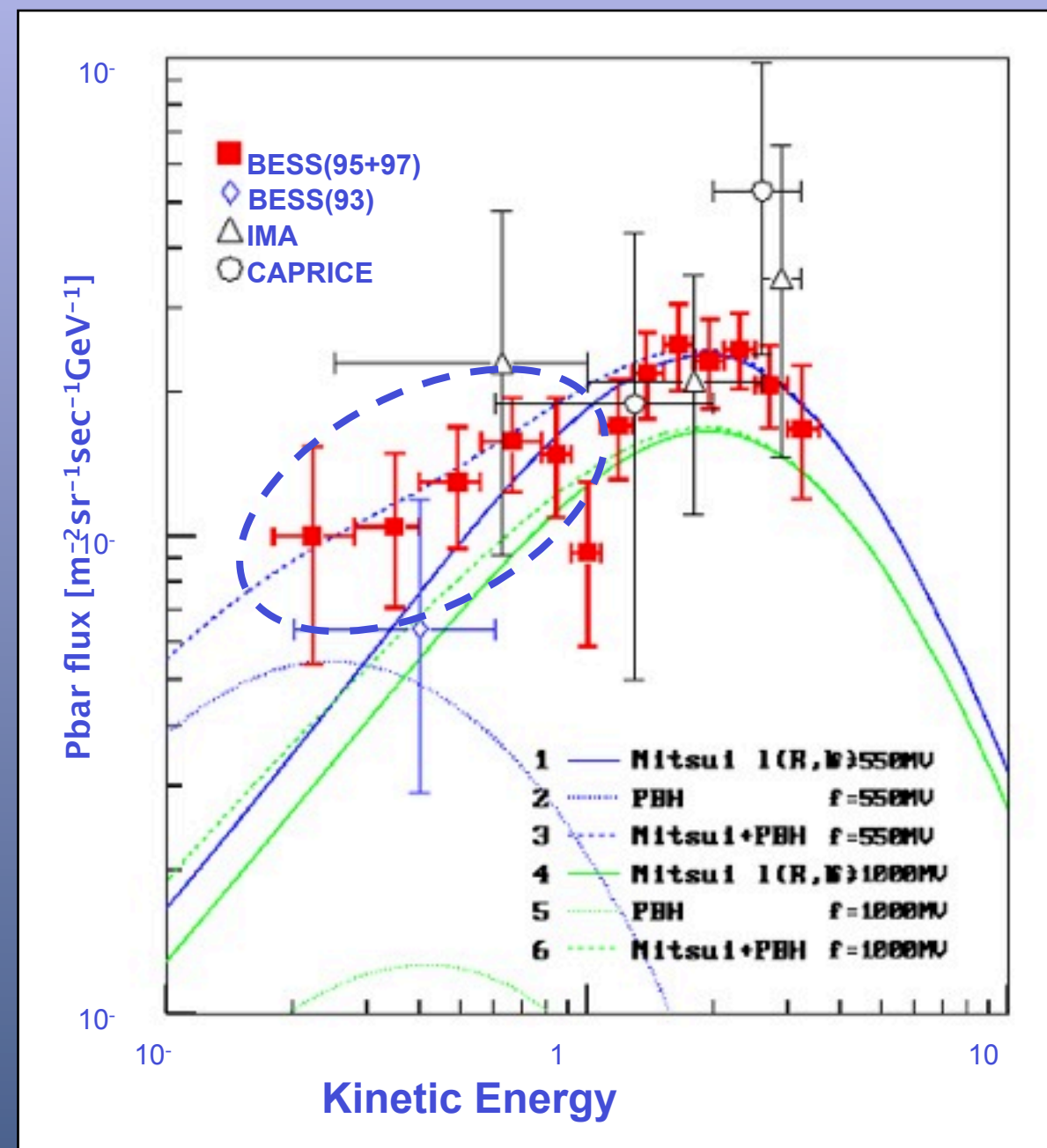


究極の測定をめざして

低エネルギー領域で平坦に見える

一次起源反陽子？

超対称性ダークマター
原始ブラックホール



統計量が必要 → 長時間フライト 71

BESS-Polar 実験

低エネルギー反陽子の超精密測定

南極周回飛行による

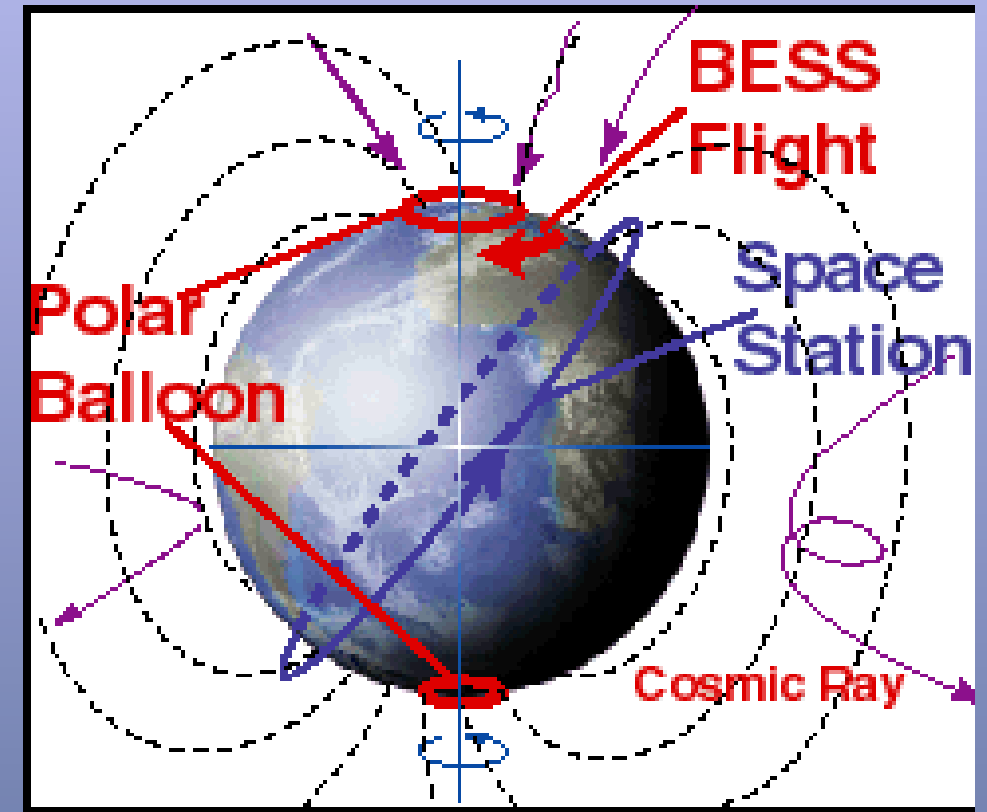
長時間観測

高緯度

太陽活動極小期

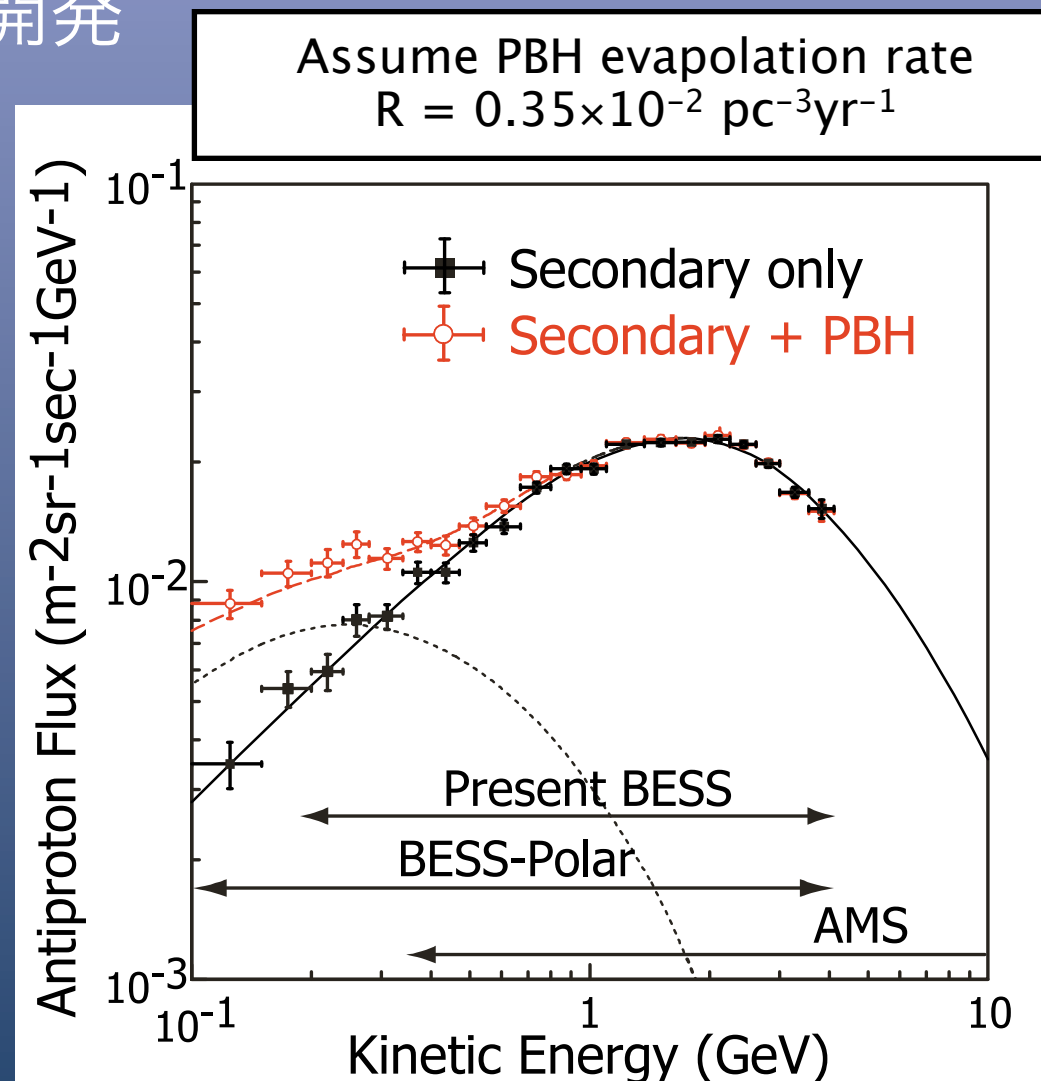
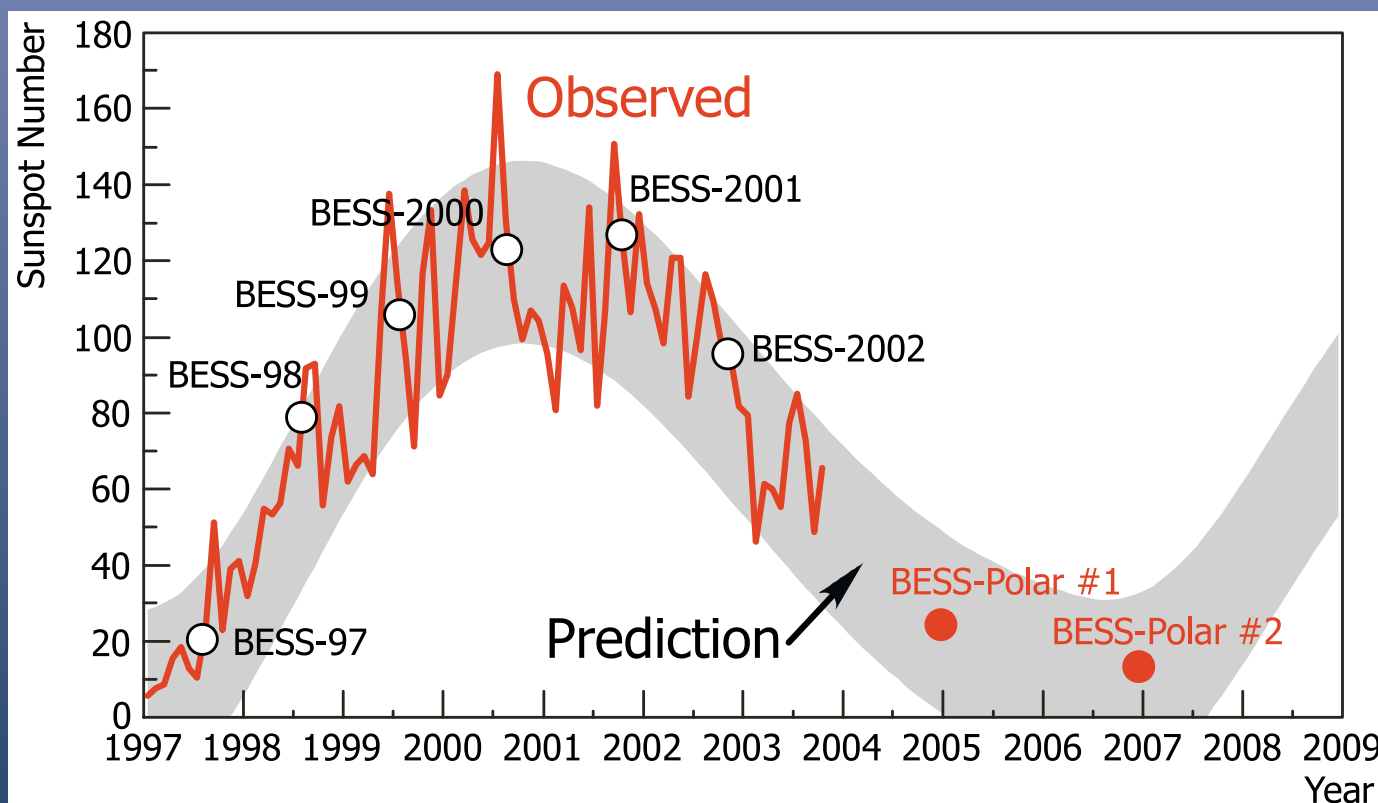
新しい測定器の開発

超薄型マグネット、太陽電池

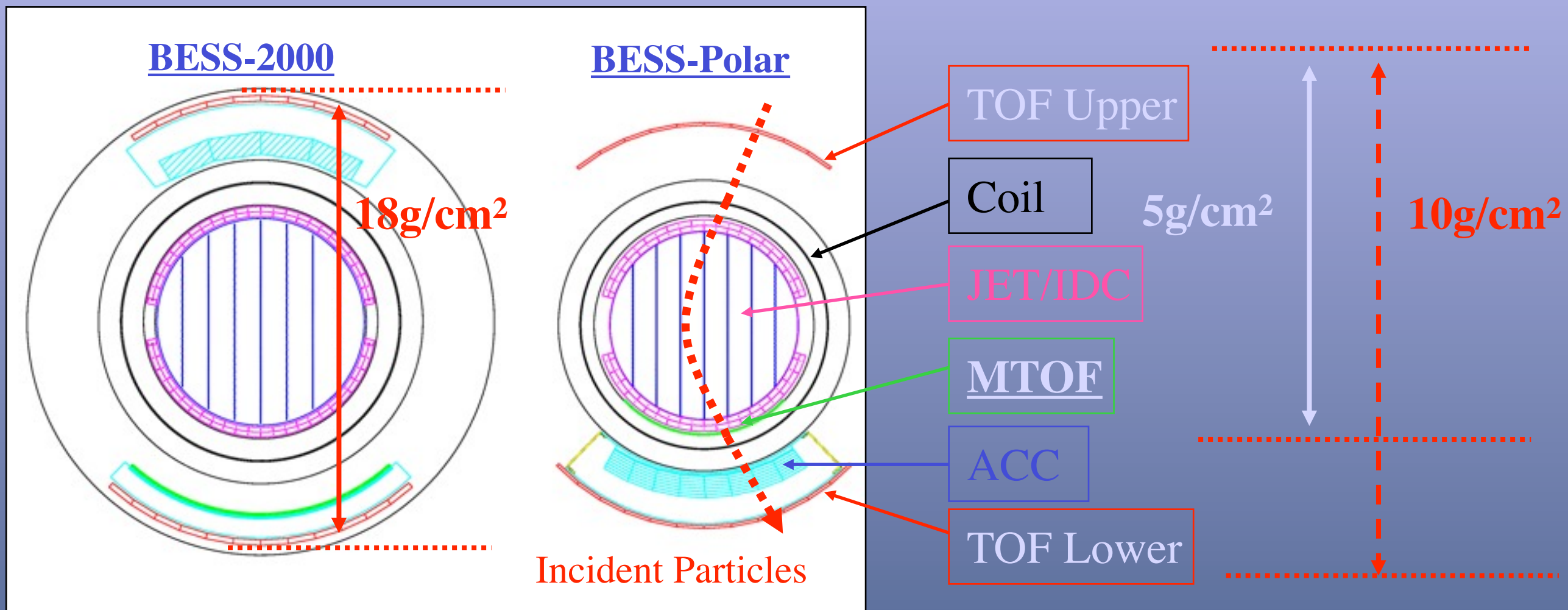


BESS-Polar実験の戦略

- 太陽活動極小期に宇宙線反陽子の高統計観測を行う
 - 可能な限り低エネルギー反陽子を高統計で観測するため、
大面積立体角を有し物質量を徹底的に減らした
新しい超伝導スペクトロメータを開発
 - 2006~2007年に次の太陽活動極小期



BESS-Polar 測定器の特長



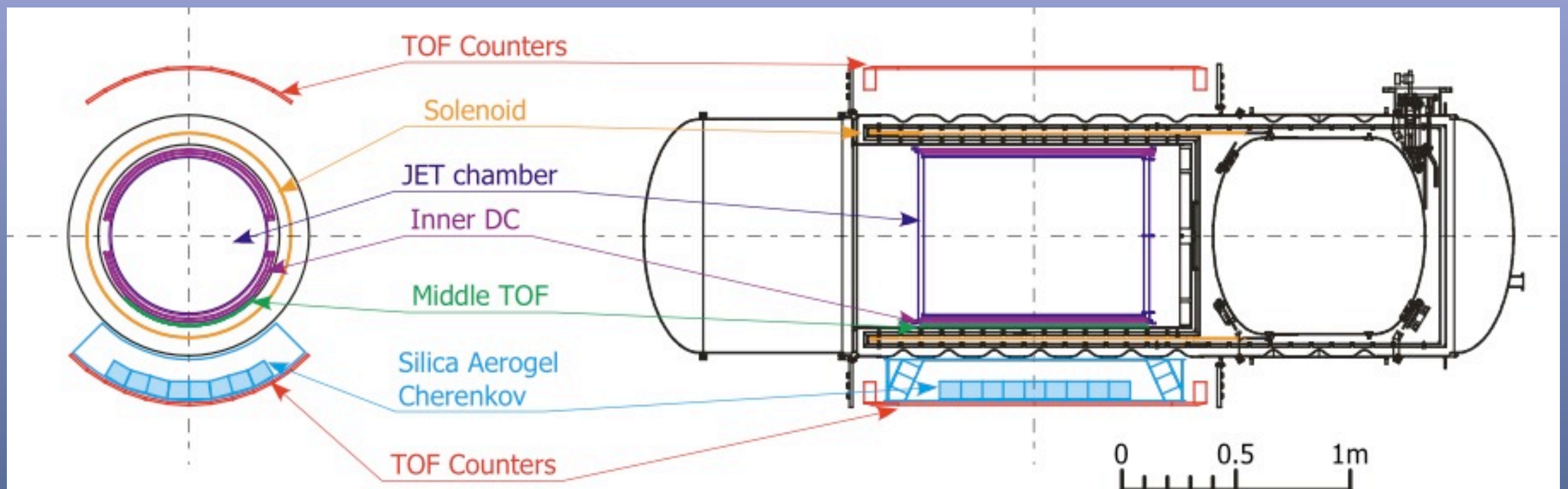
物質量を少なく (Middle TOF)

0.1 GeVまでの測定が可能に

低消費電力データ収集システム
太陽電池、長時間飛行用クライオスタット

長時間フライト

BESS-Polar測定器(III)



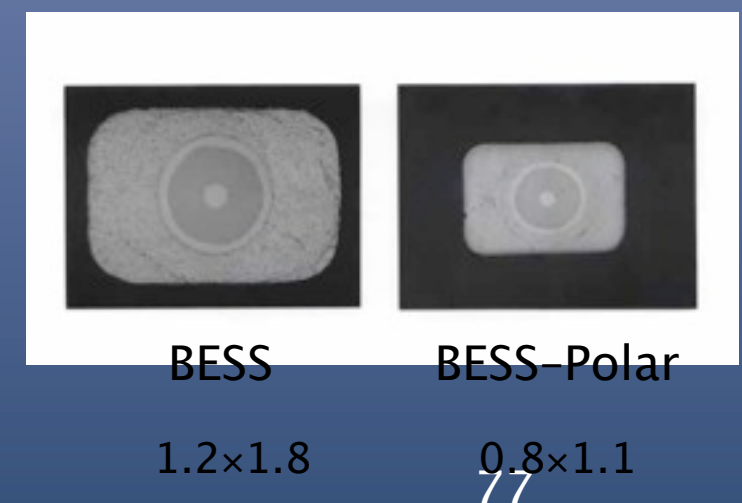
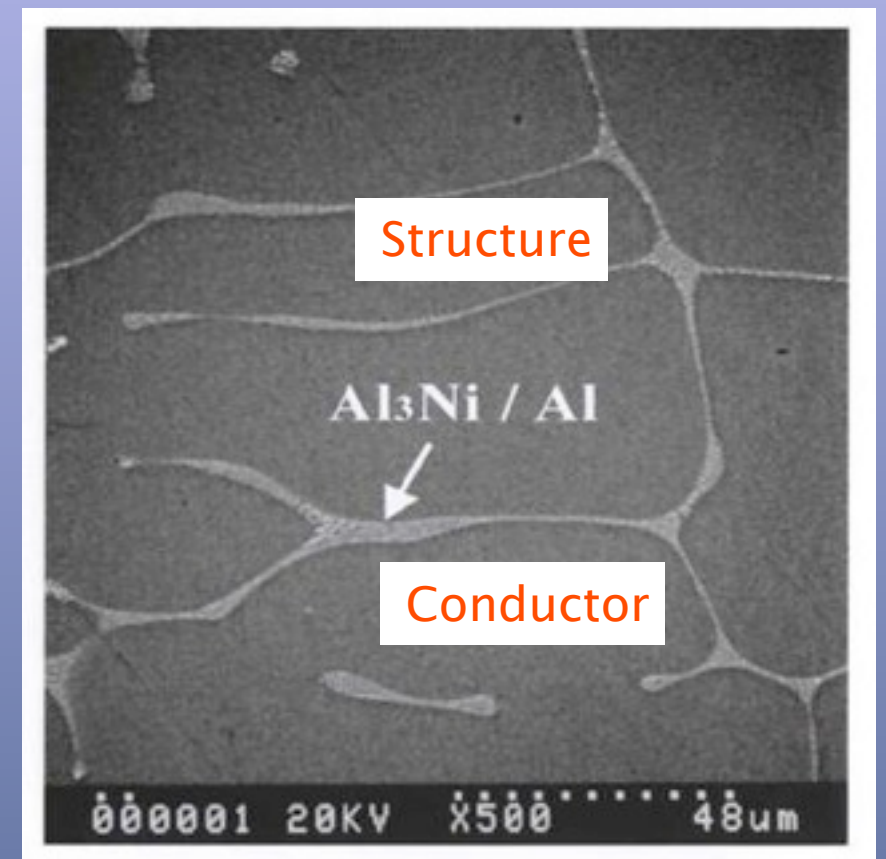
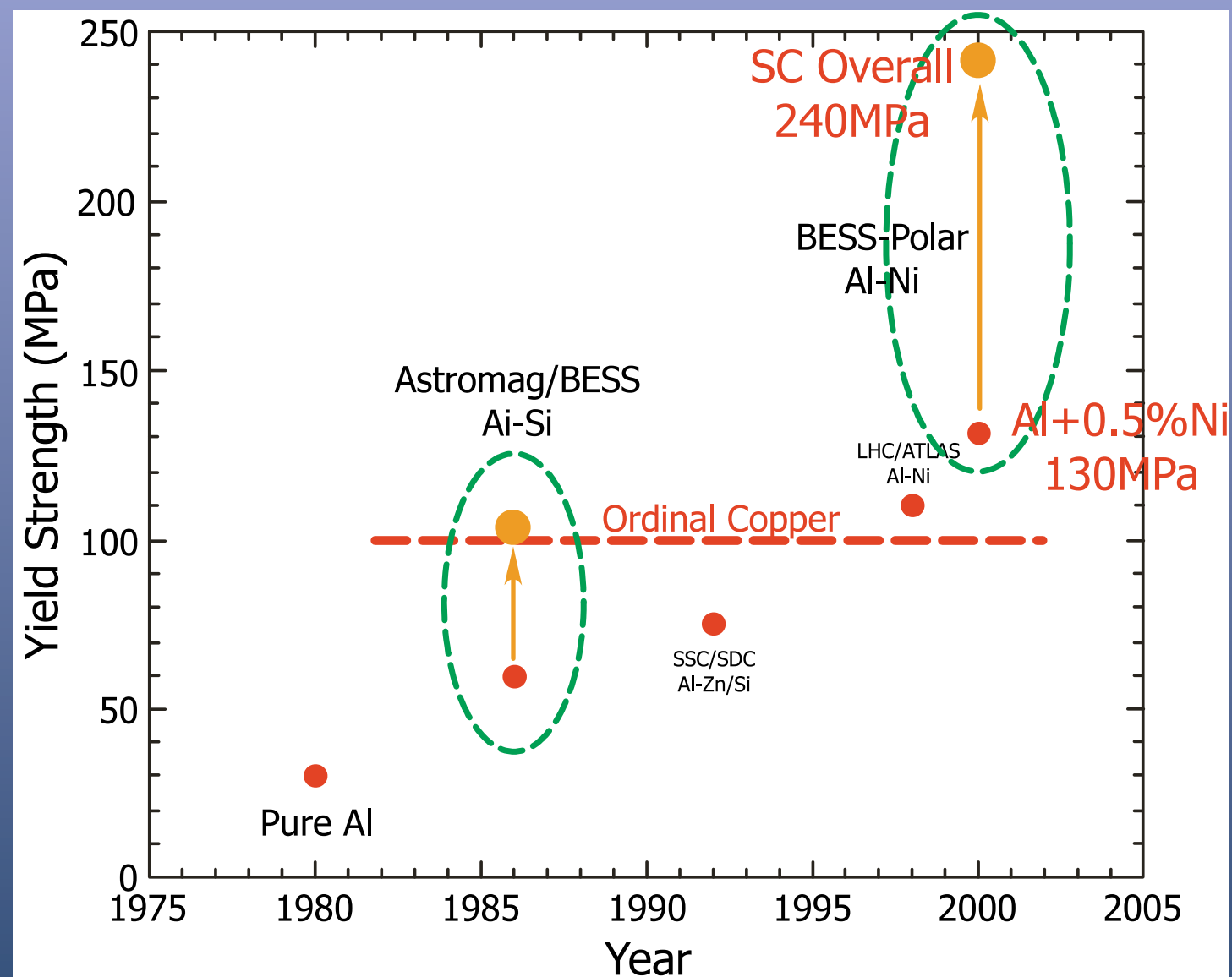
超薄肉超伝導ソレノイド(I)

- 低物質質量 (Coil: 1 g/cm², Total: 2 g/cm²)
- 0.85 Teslaまで通常励磁可能
- 5 Gの衝撃が加わってもクエンチしない



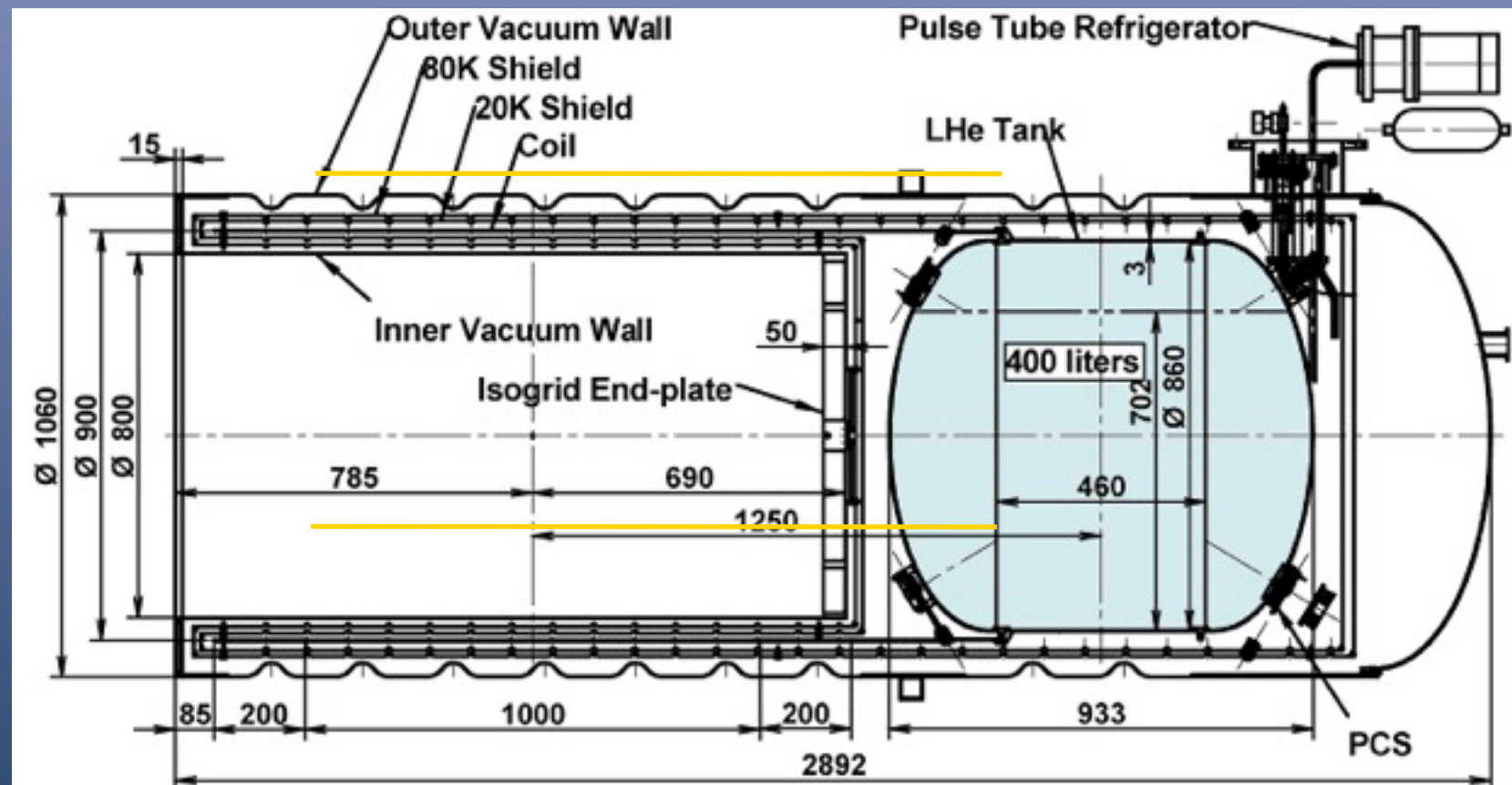
高耐力超伝導線

- Micro alloying Al+Ni 0.5%
- Cold-work hardening 15%



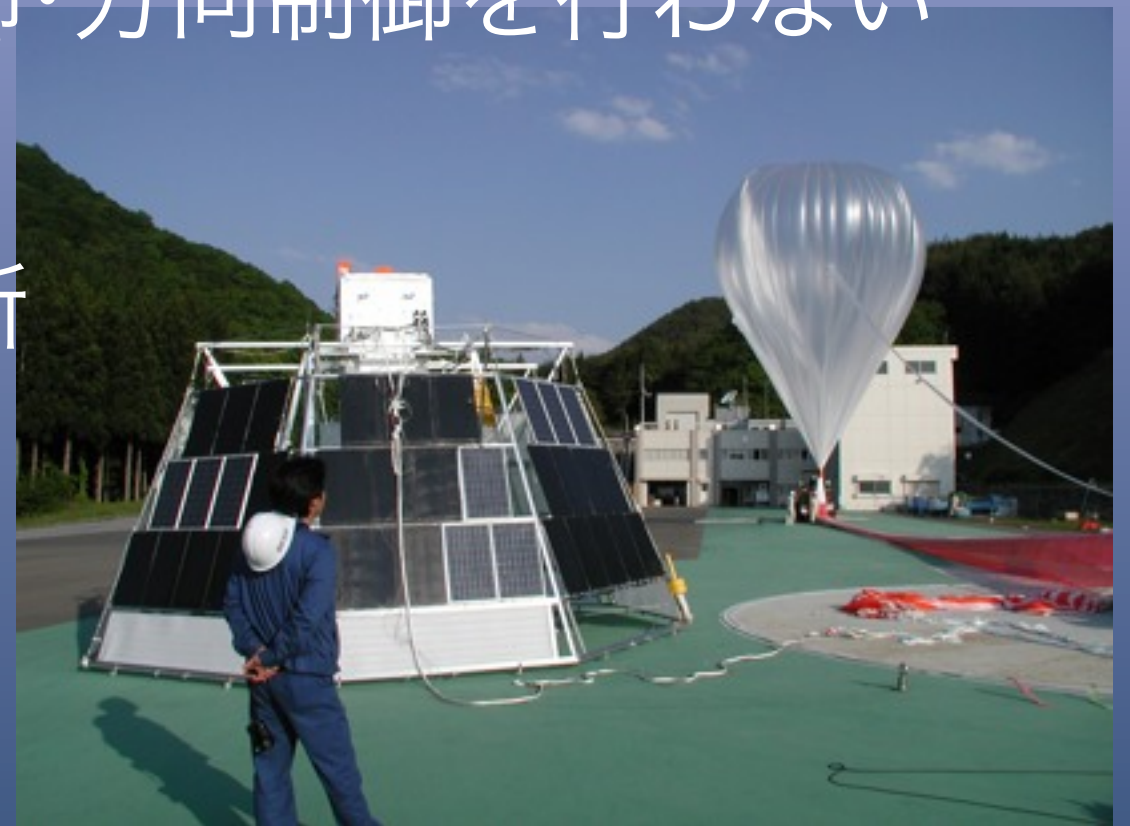
超薄肉超伝導ソレノイド(II)

- 入射粒子に対する物質量を減らすために
 - 高耐力超伝導線を用いた
自立型超伝導ソレノイドの開発
- 大型液体ヘリウムタンクの搭載による長寿命化
 - 400リットルの液体ヘリウムを搭載し10日間以上の寿命



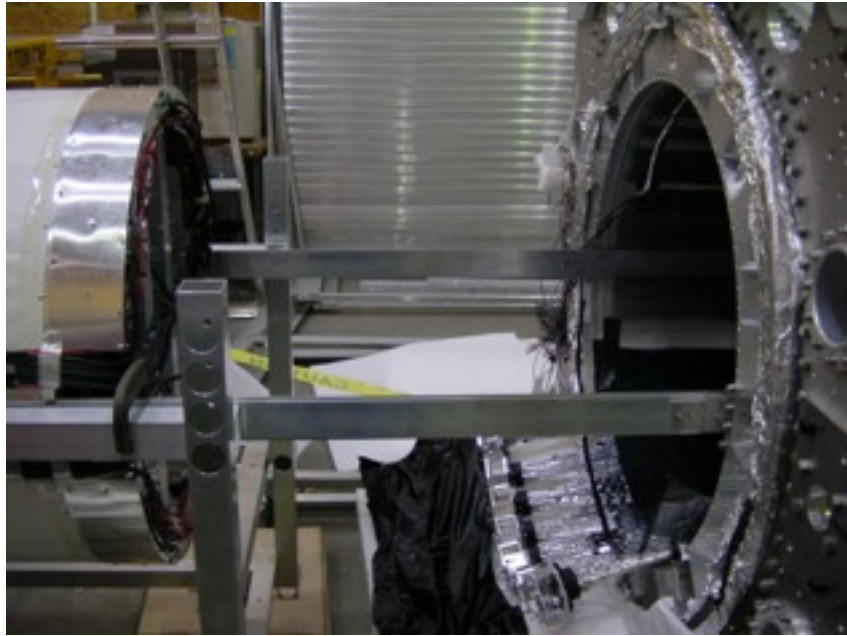
太陽電池電源システム

- 20日間に及ぶ長時間気球実験
 - 太陽電池を用いた新しい電源システムの開発
 - 900W常時発電 (白夜なので充放電システムなし)
 - 重量 < 300 kg
 - 高信頼性を追及して姿勢制御・方向制御を行わない
- 工学試験 (2002年5月30日)
 - 宇宙科学研三陸大気球観測所
 - 発電能力と温度分布を測定
 - 基本設計が正当化された



NASA/GSFCでの組み上げ

2003 Oct - 2004 Aug



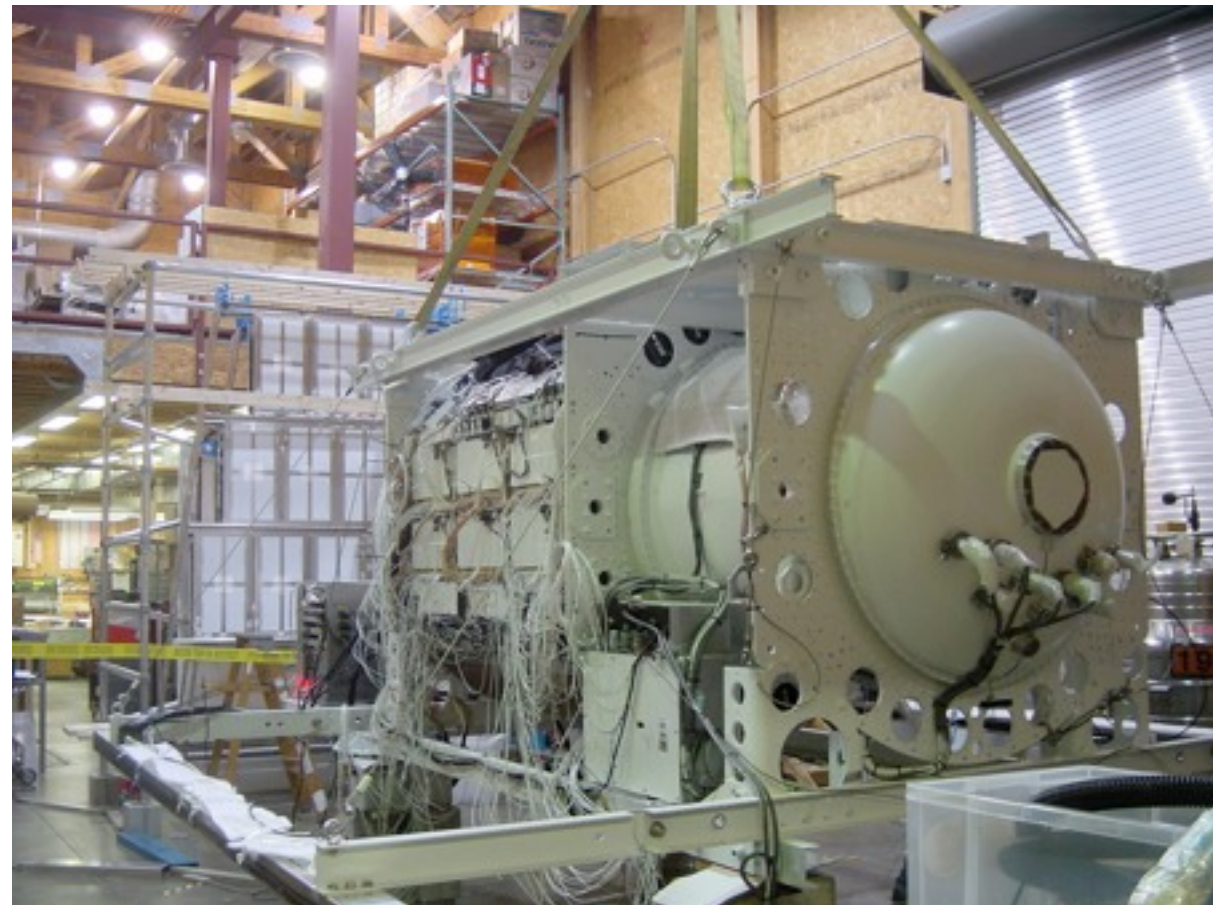
JET/IDC & MTOF



Upper TOF



Aerogel Cherenkov Counter



Integration complete!

かみ合わせテスト *with NSBF*

2004 Aug

最終かみ合わせテストがテキサス州パ
レスティンにおいてNSBFと行われ
た。



機構・強度のチェック

磁場中での動作、通信チェック

BESS-Polar Campaign 2004

Oct 27

スタッフが南極マクマード基地に到着

準備開始 @ Williams Fields

Dec 3

準備終了

最終かみ合わせテスト with NASA/NSBF

飛翔実験レディ

Dec
13

打ち上げに成功!

21

8.5日間 飛翔観測後着地

23

回収作業開始

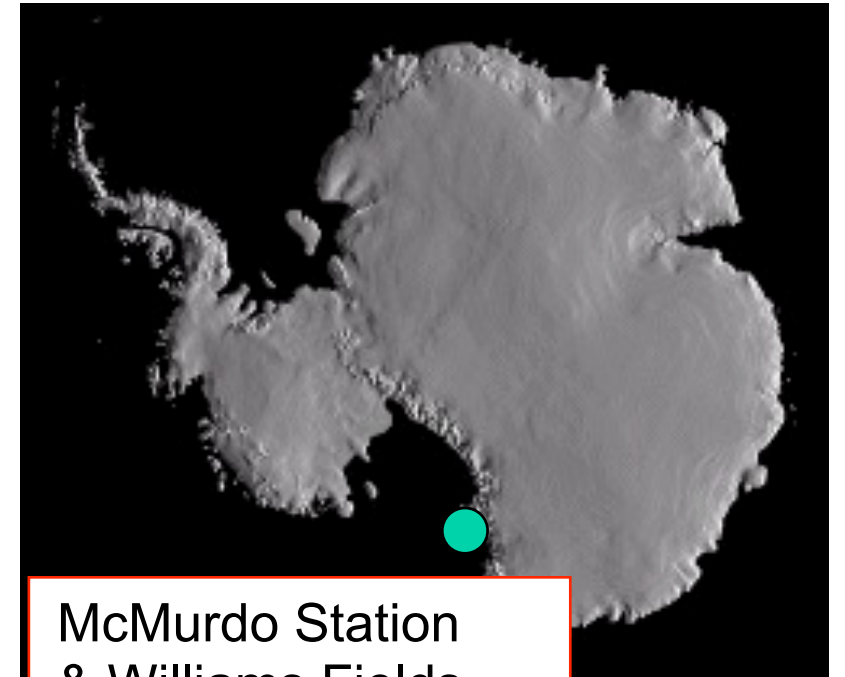
29

回収終了

2005

Jan 4

BESS-Polar 2004 実験終了



McMurdo Station
& Williams Fields



マクマード基地 *USA*

McMurdo Station



Crary Lab.



Airport



Church



Williams Fieldでの準備作業

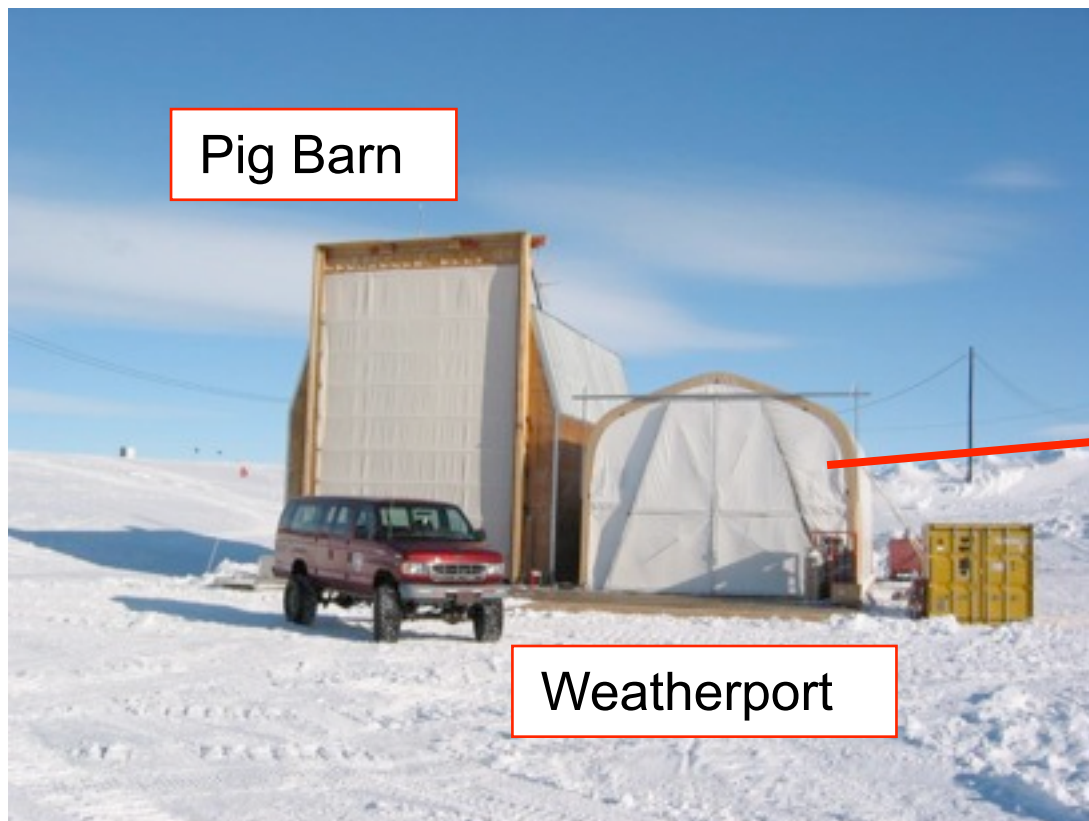
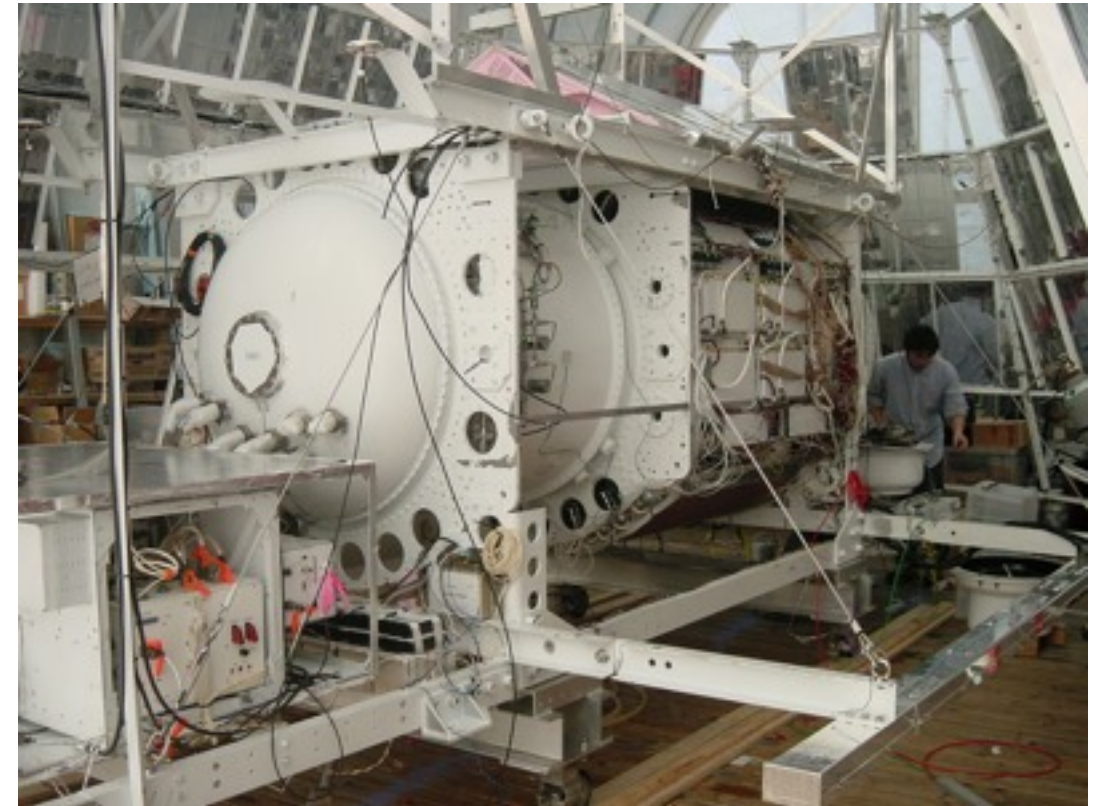
BESS-Polar実験の最終準備は
‘Weatherport’と呼ばれる建屋で行
われた

測定器ちっけう

太陽電池システム の組み立て

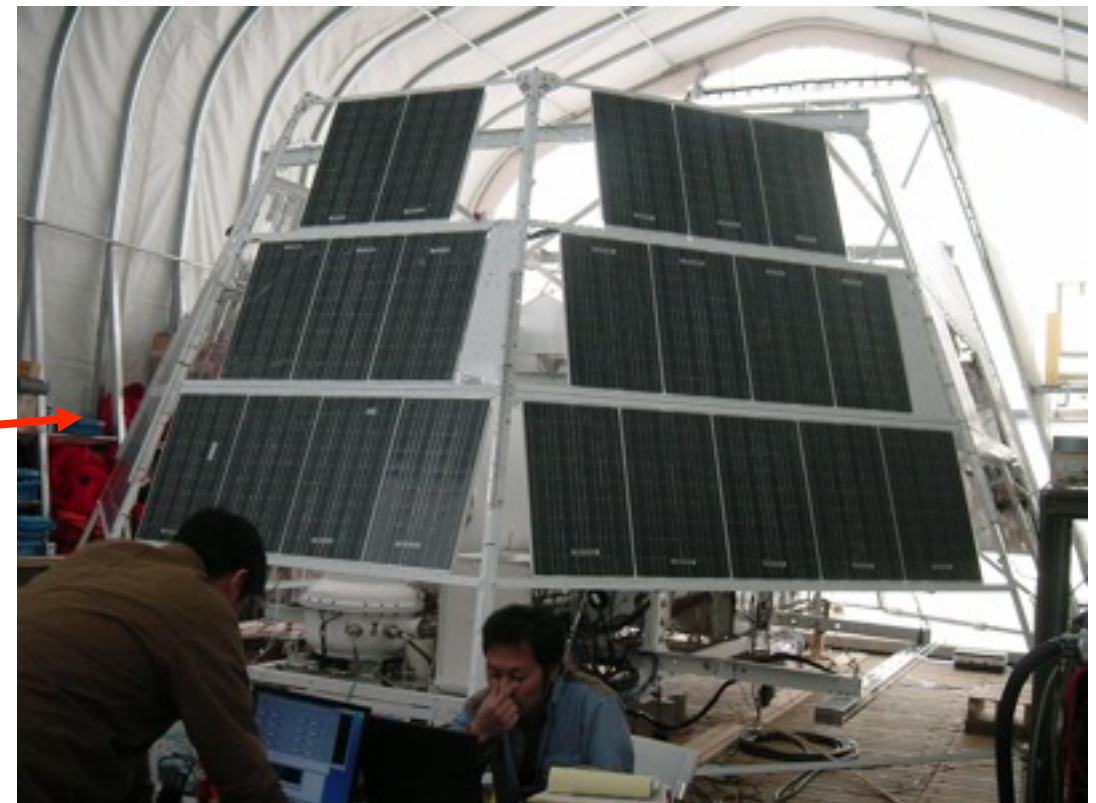
SIP 設置

熱遮蔽



Pig Barn

Weatherport



南極の天気

南極では天候は急激に変化する

準備は南極の過酷な環境ですめられた



フライトレディ

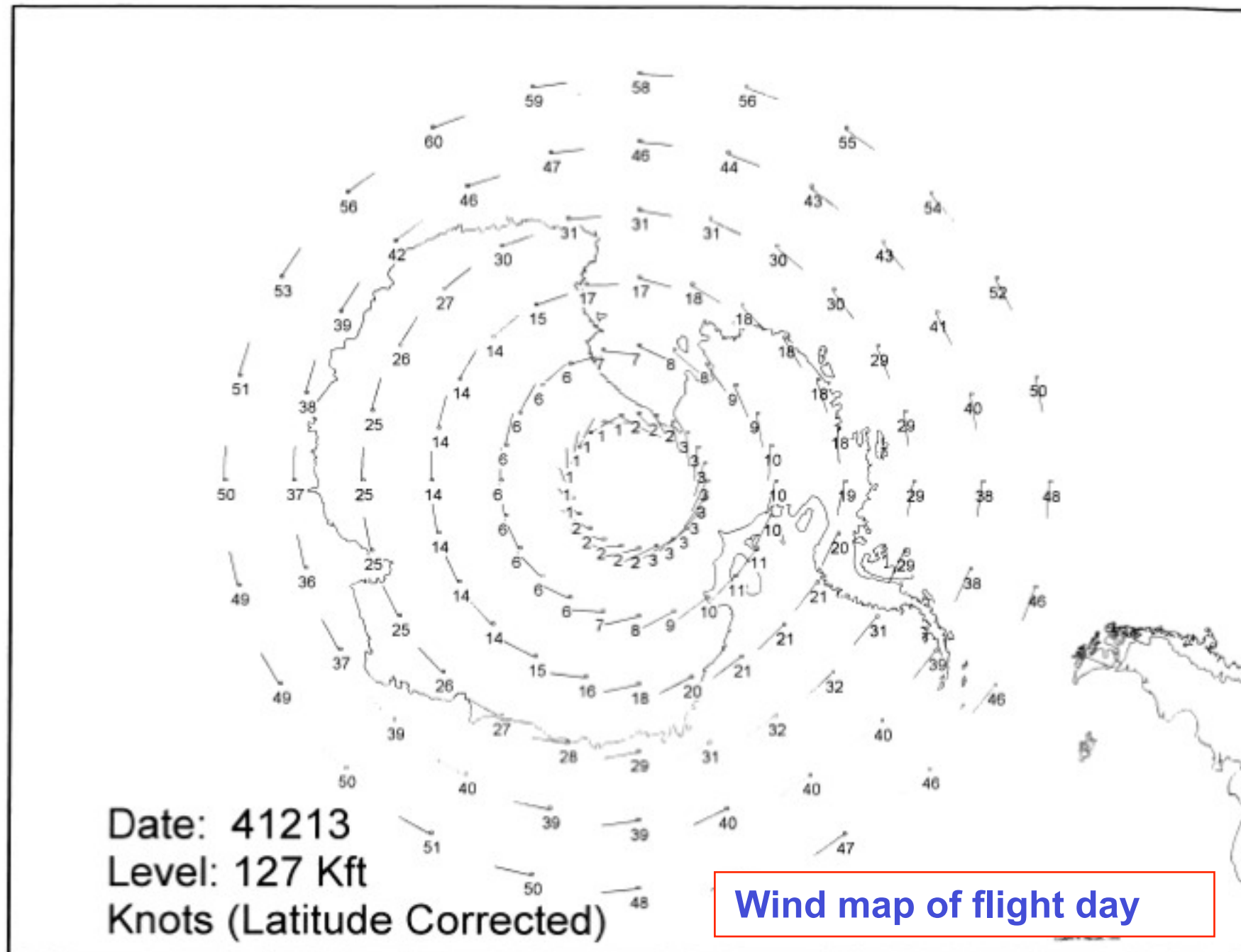
最終かみ合わせチェックOK！



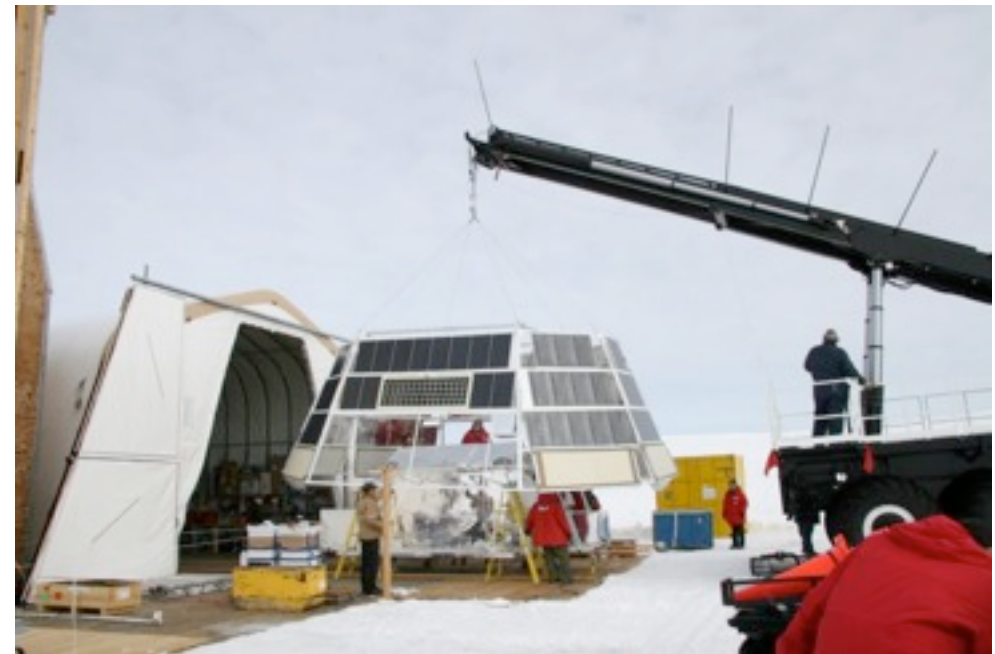
飛翔実験準備完了

風および天候待ち

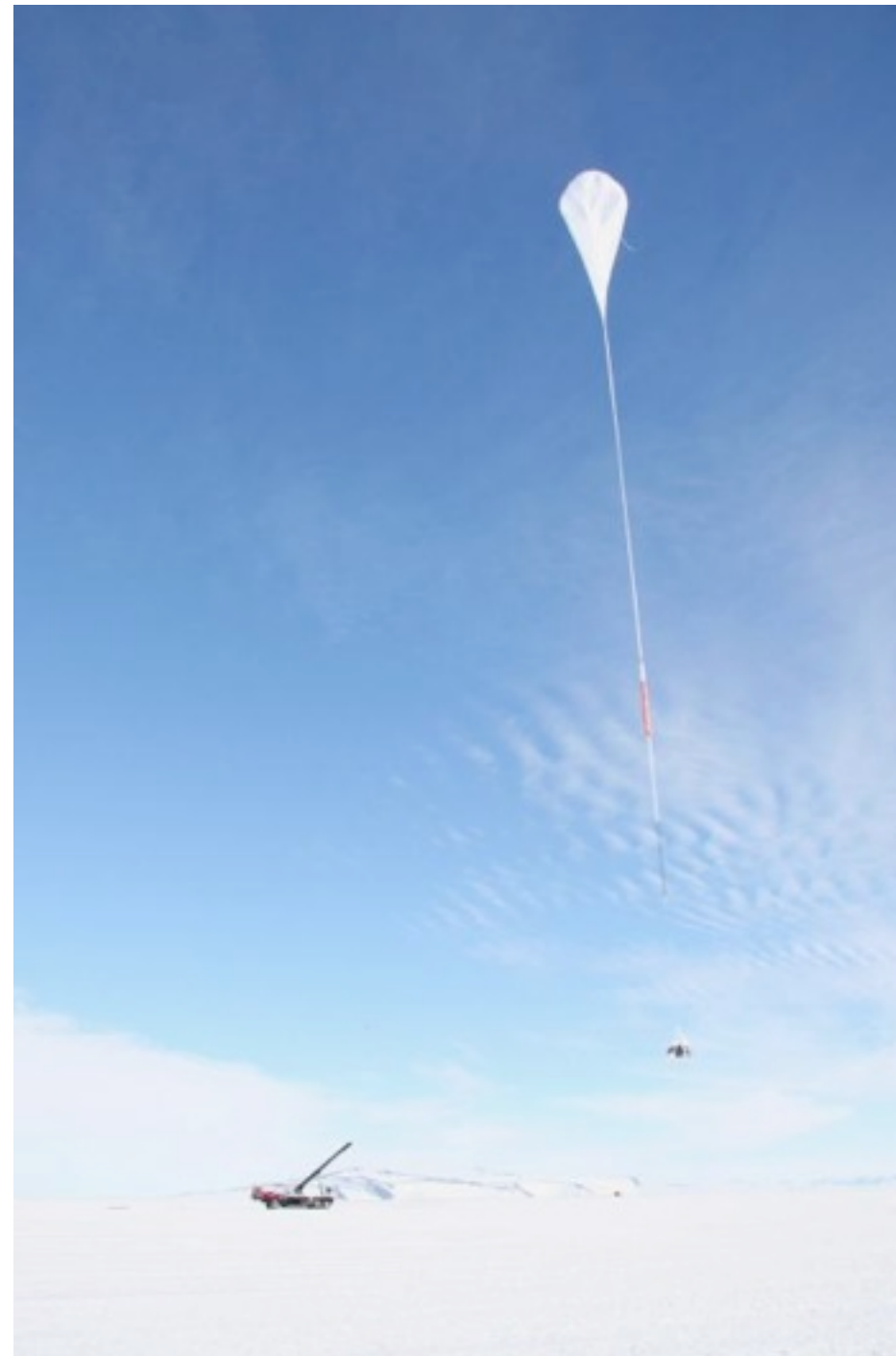
- 準備完了から10日後に三度めの飛翔チャンスが訪れた
(一度目と二度目は天候不良のためキャンセル)



打ち上げ当日(搬出 & 調整)



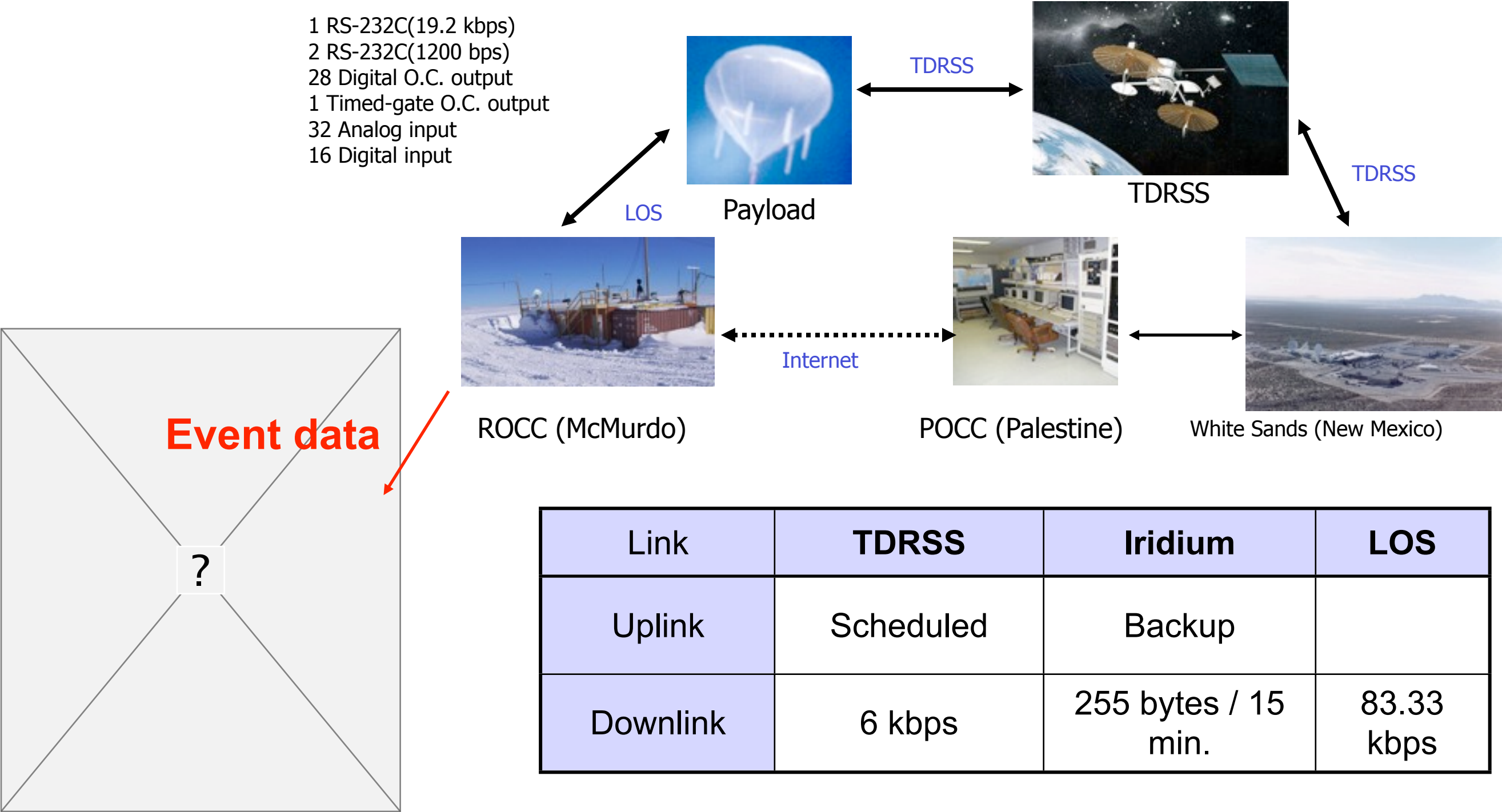
打ち上げ



**Williams Field, McMurdo, in Antarctica,
(S77-51, E-166-40), 5:56(UTC), Dec. 13, 2004**

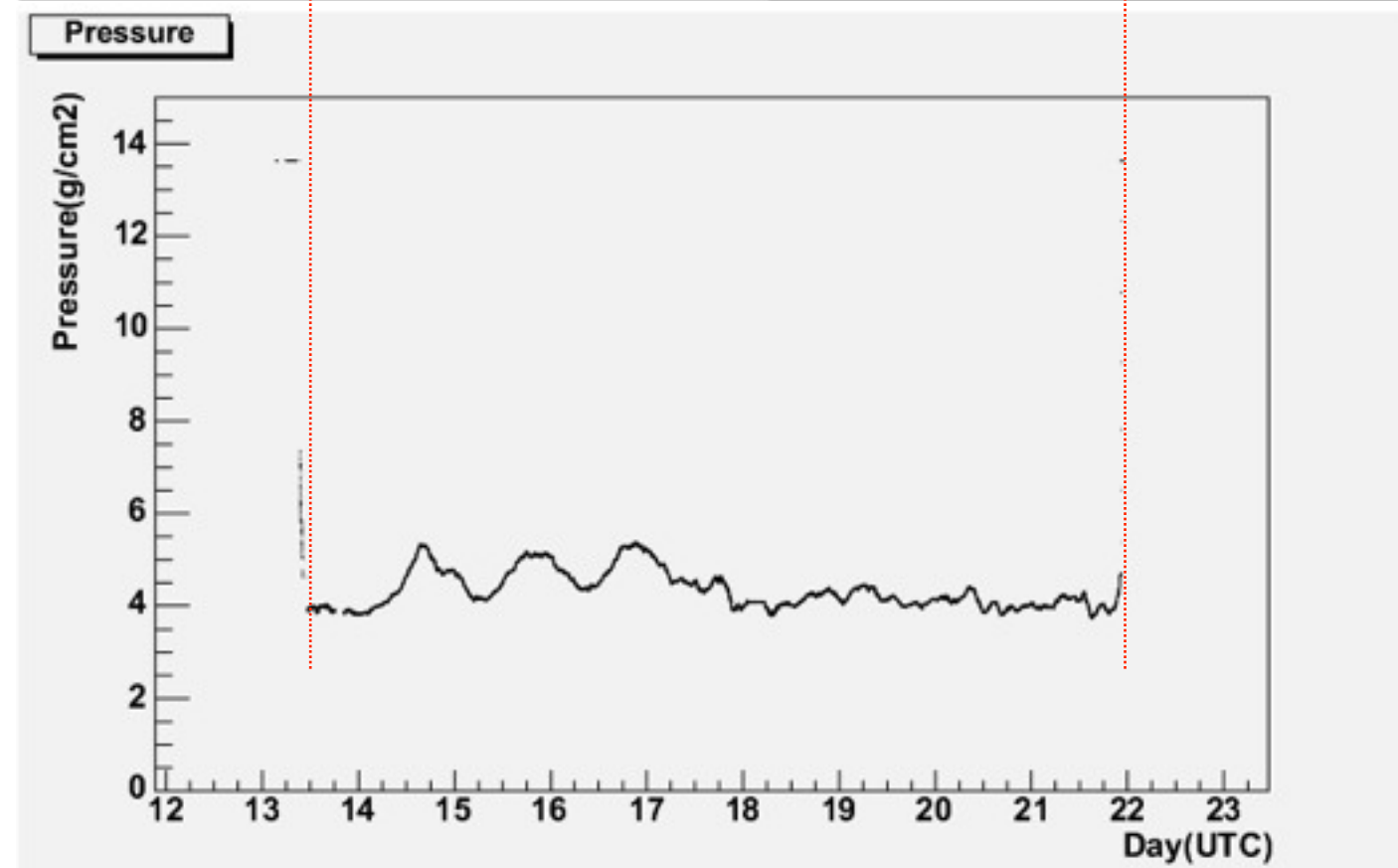
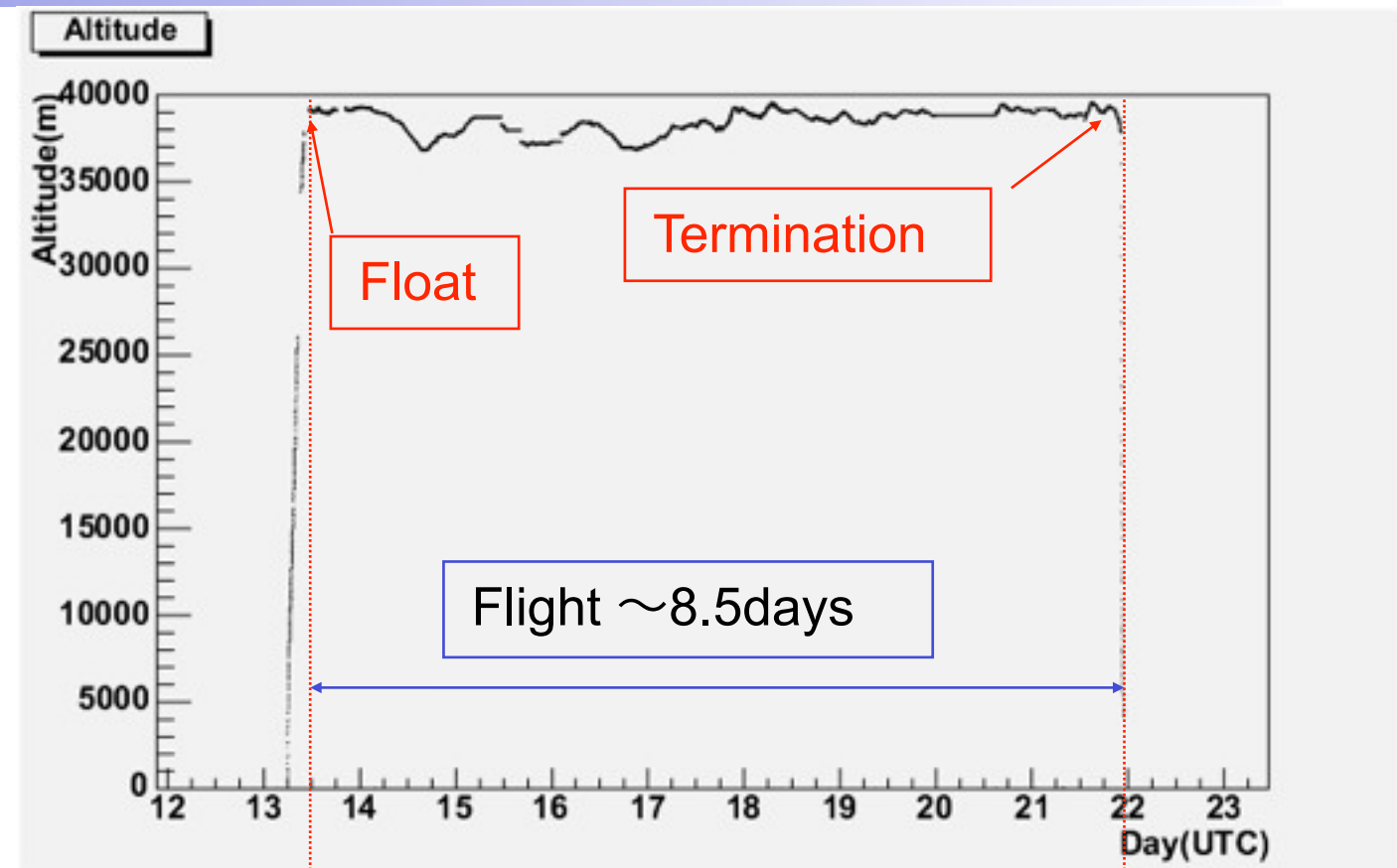
実験中のデータ転送

- 1 RS-232C(19.2 kbps)
- 2 RS-232C(1200 bps)
- 28 Digital O.C. output
- 1 Timed-gate O.C. output
- 32 Analog input
- 16 Digital input

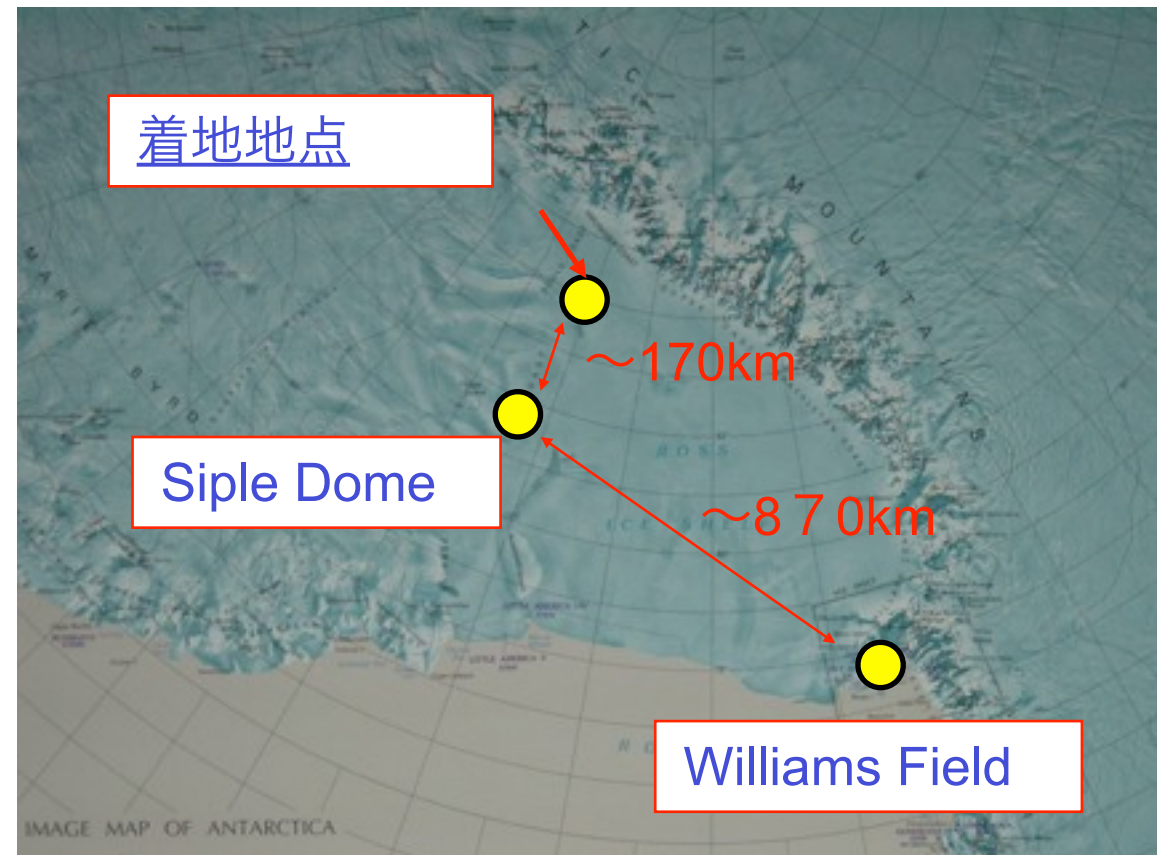


Link	TDRSS	Iridium	LOS
Uplink	Scheduled	Backup	
Downlink	6 kbps	255 bytes / 15 min.	83.33 kbps

飛翔経路



着地

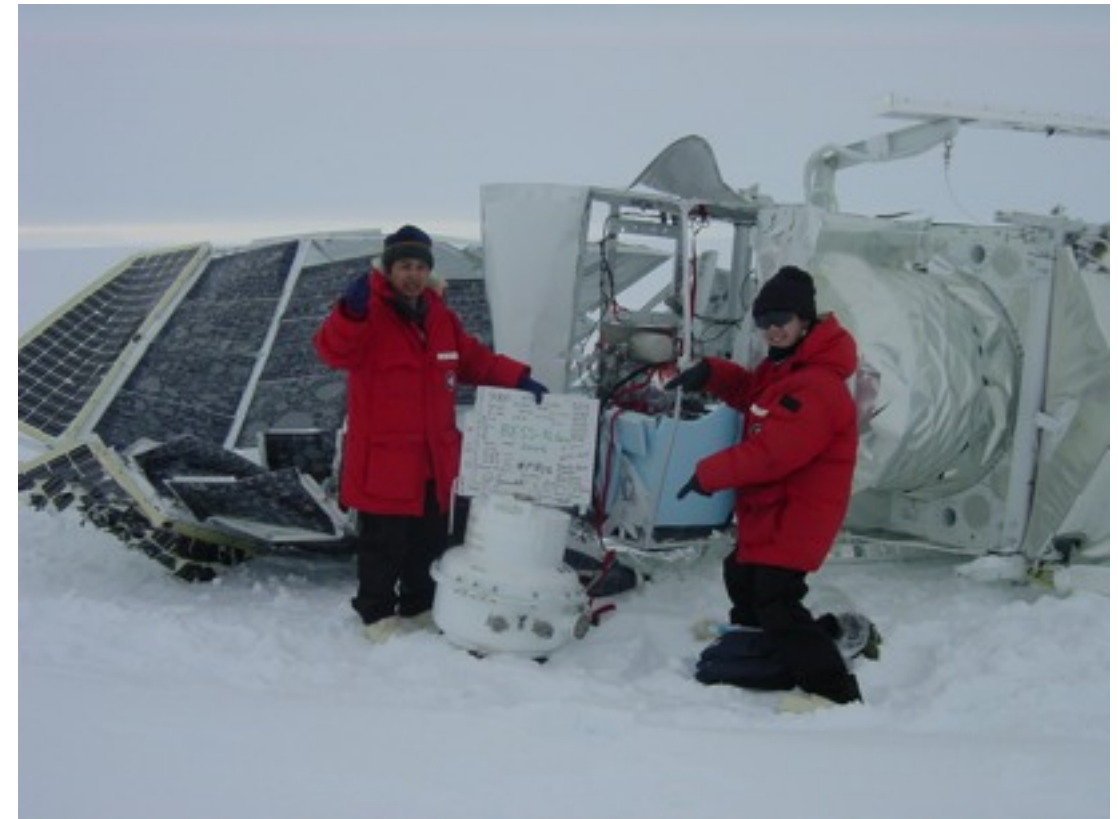


Impacted the ground at (S-83-06, W-155-35),
at 22:56(UTC), Dec. 21

回収作業(1)

まず最も重要なデータベッセルを回収

データベッセルは回収後ベースキャンプに送られる。



回収作業(2)

回収用飛行機の容量が小さいため、

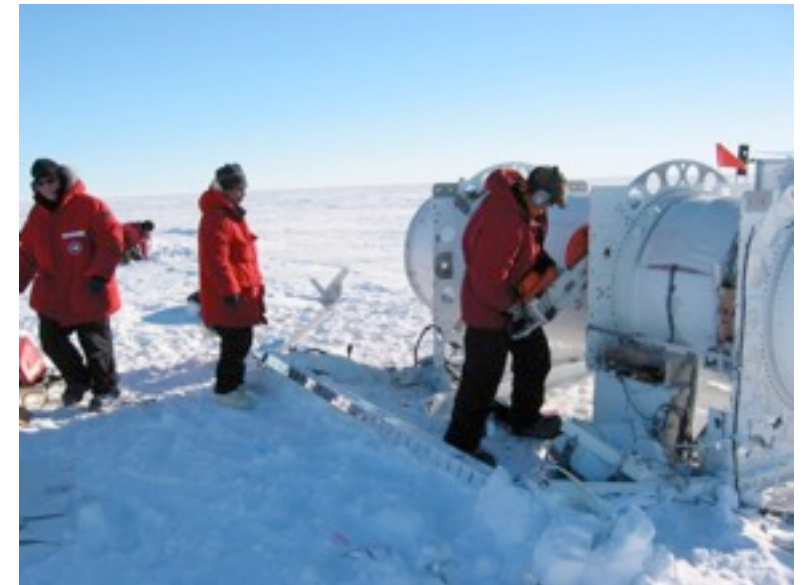
すべての測定器を分解する必要がある

マグネットと筐体は小さいパーツに切断

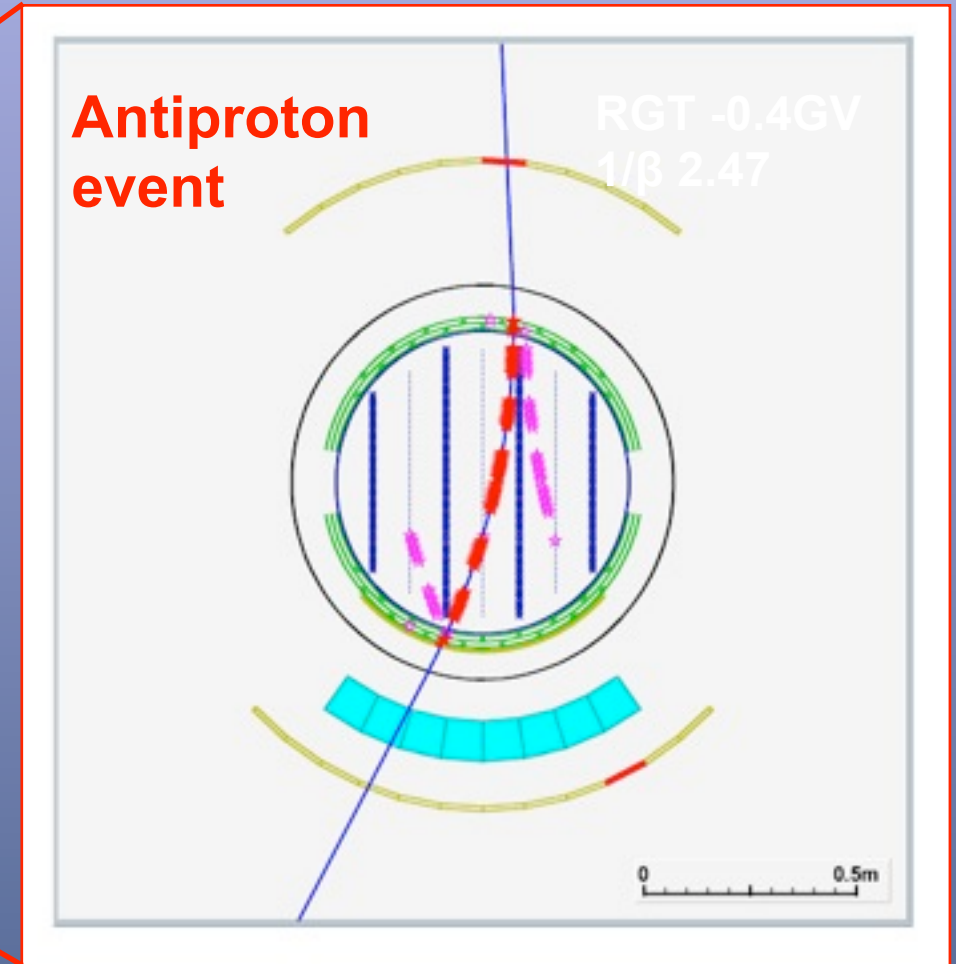
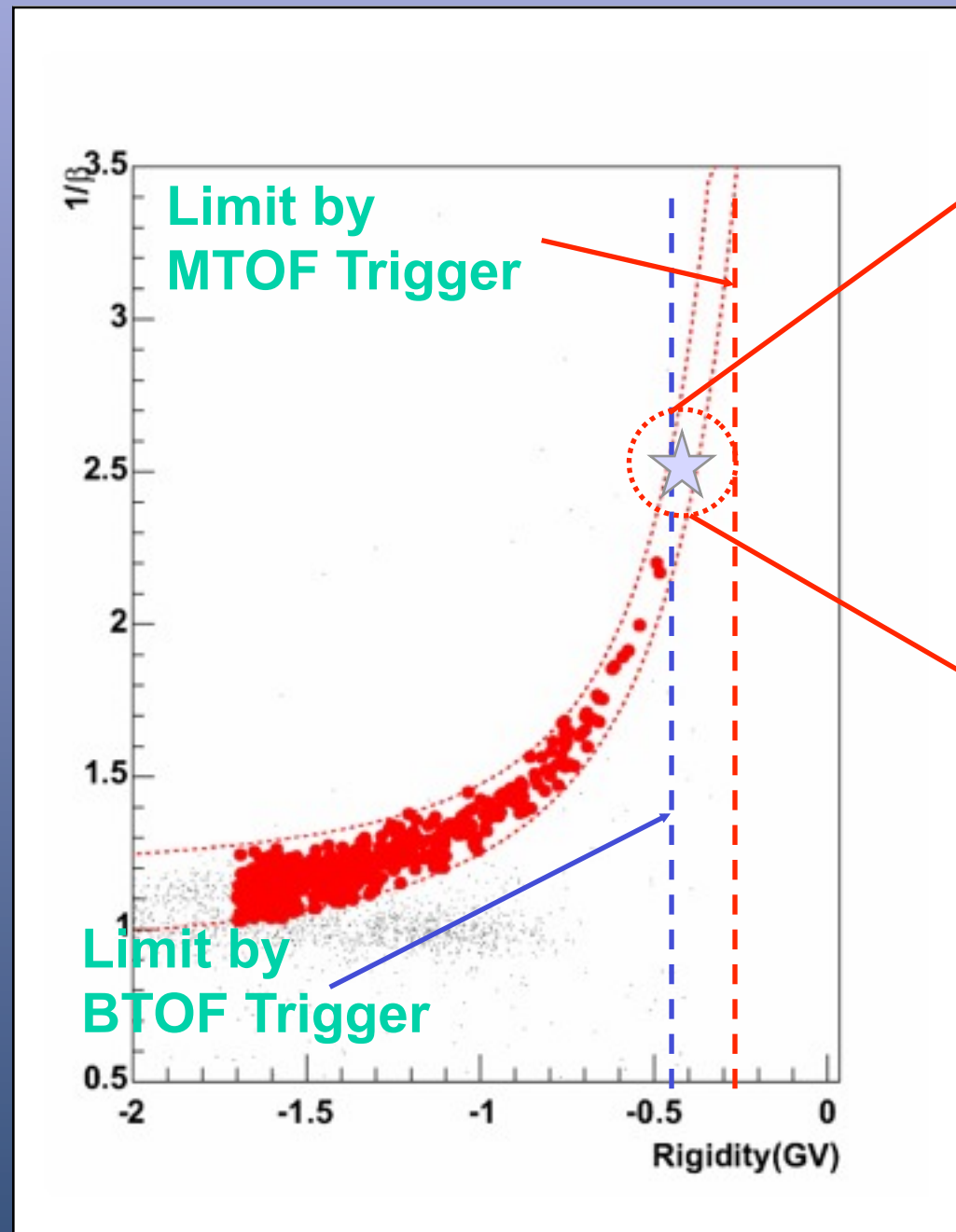
一週間の作業の結果、**すべての測定器を回収できた。**

回収された測定器には致命的な損傷はなかった

測定器は4月にアメリカに向けて搬送される

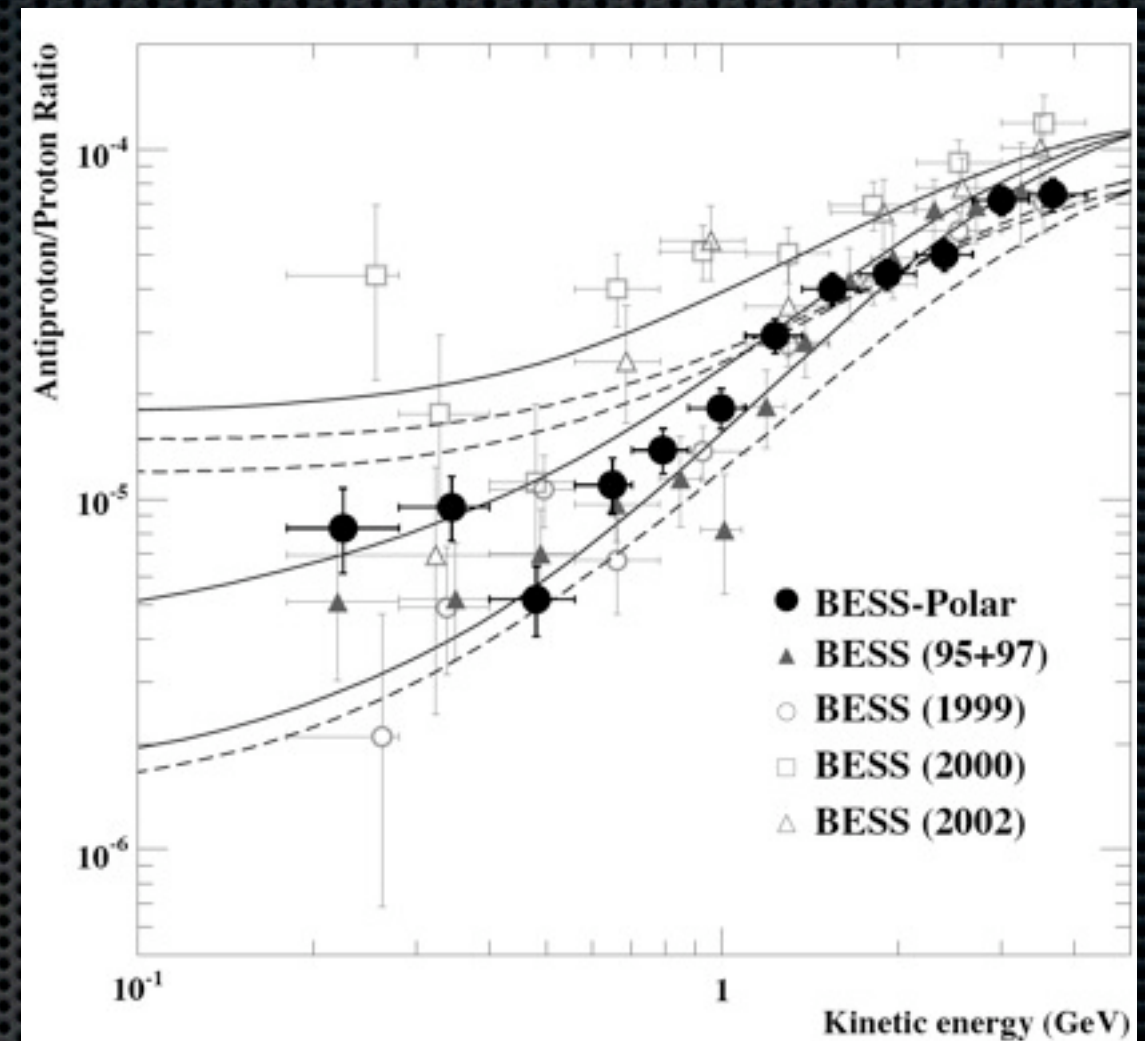
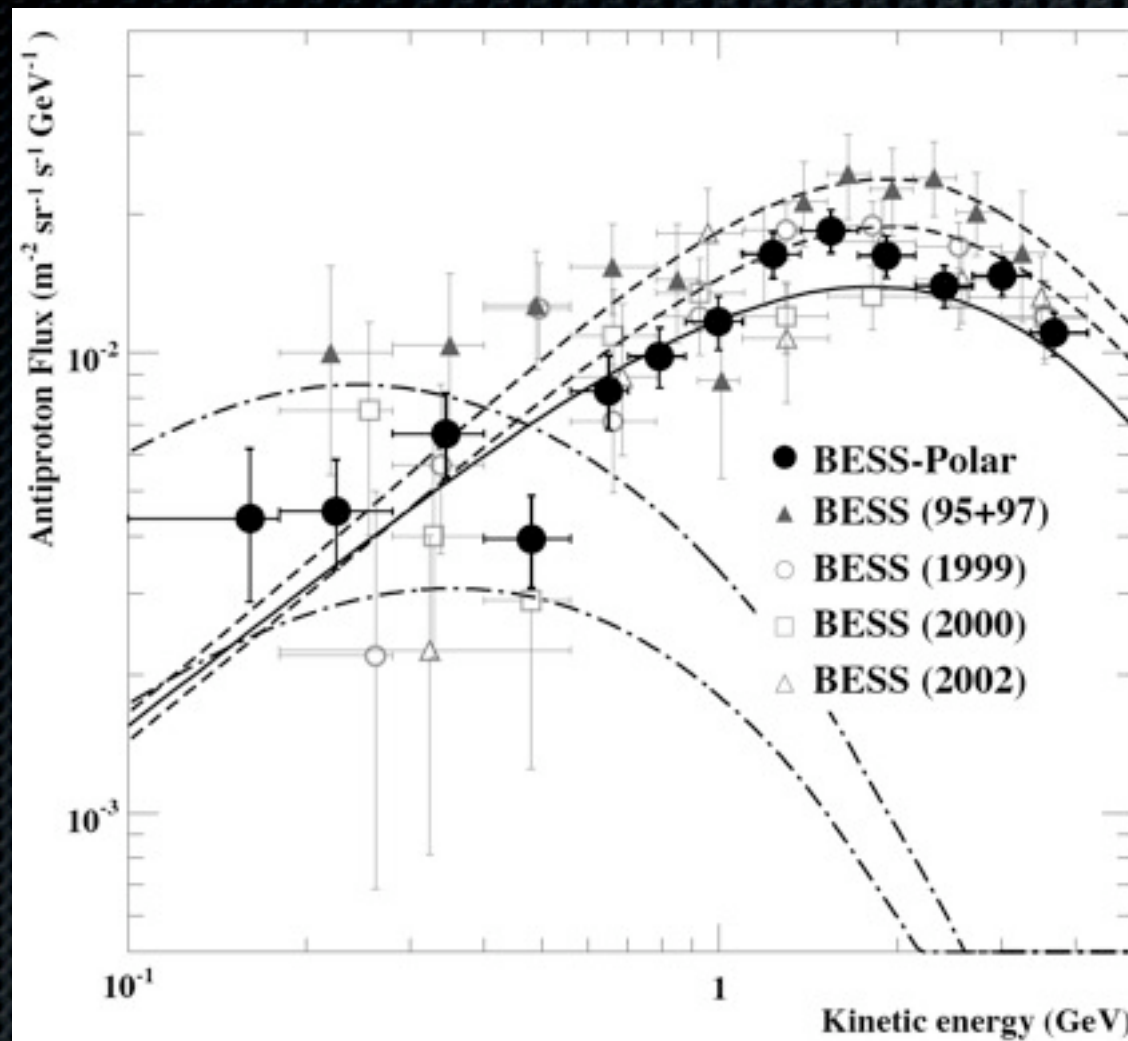


極低エネルギーの反陽子



★ Kinetic Energy $\sim 0.11\text{GeV}$ (@ TOA)

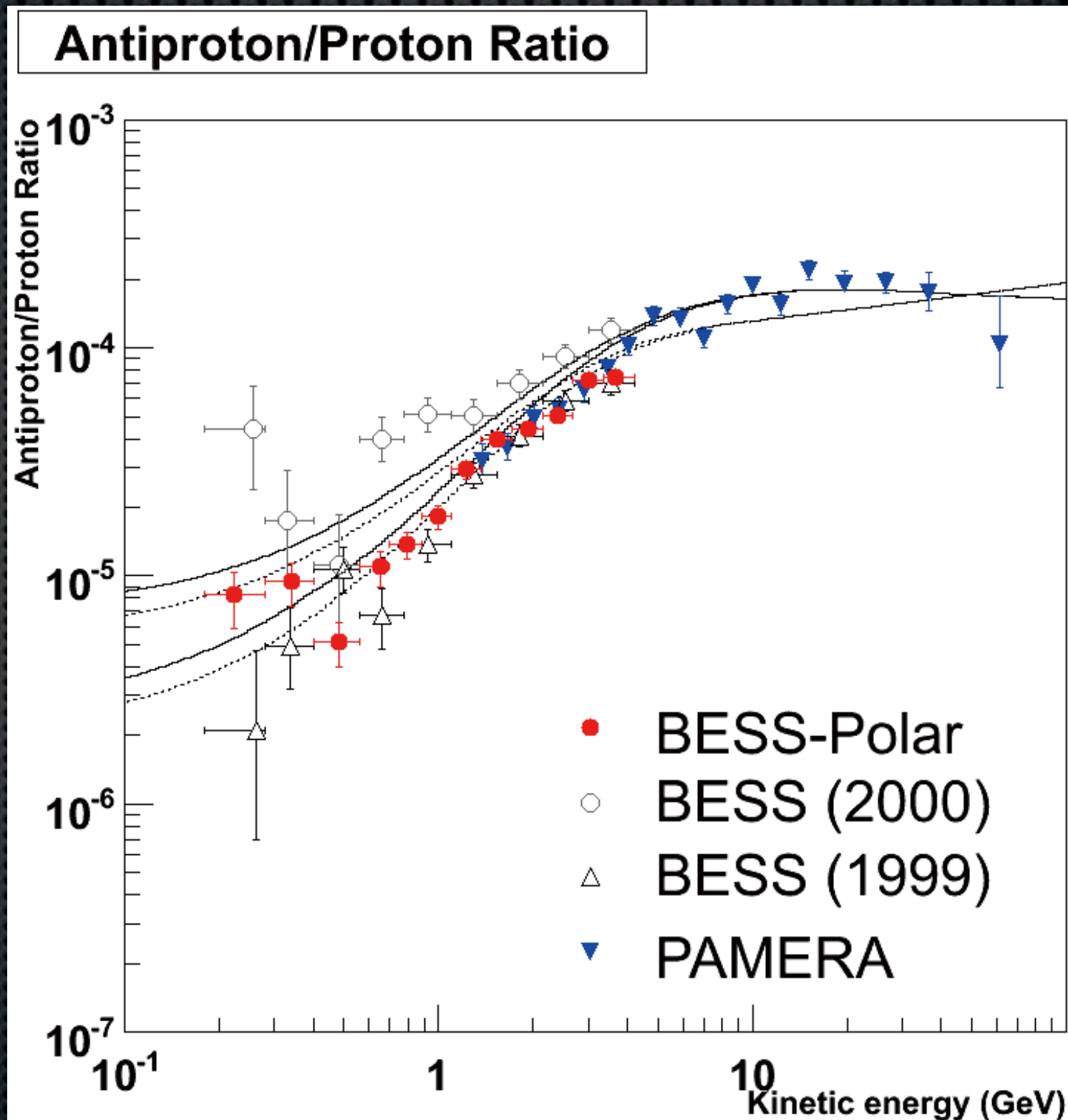
BESS-Polar I 反陽子観測結果



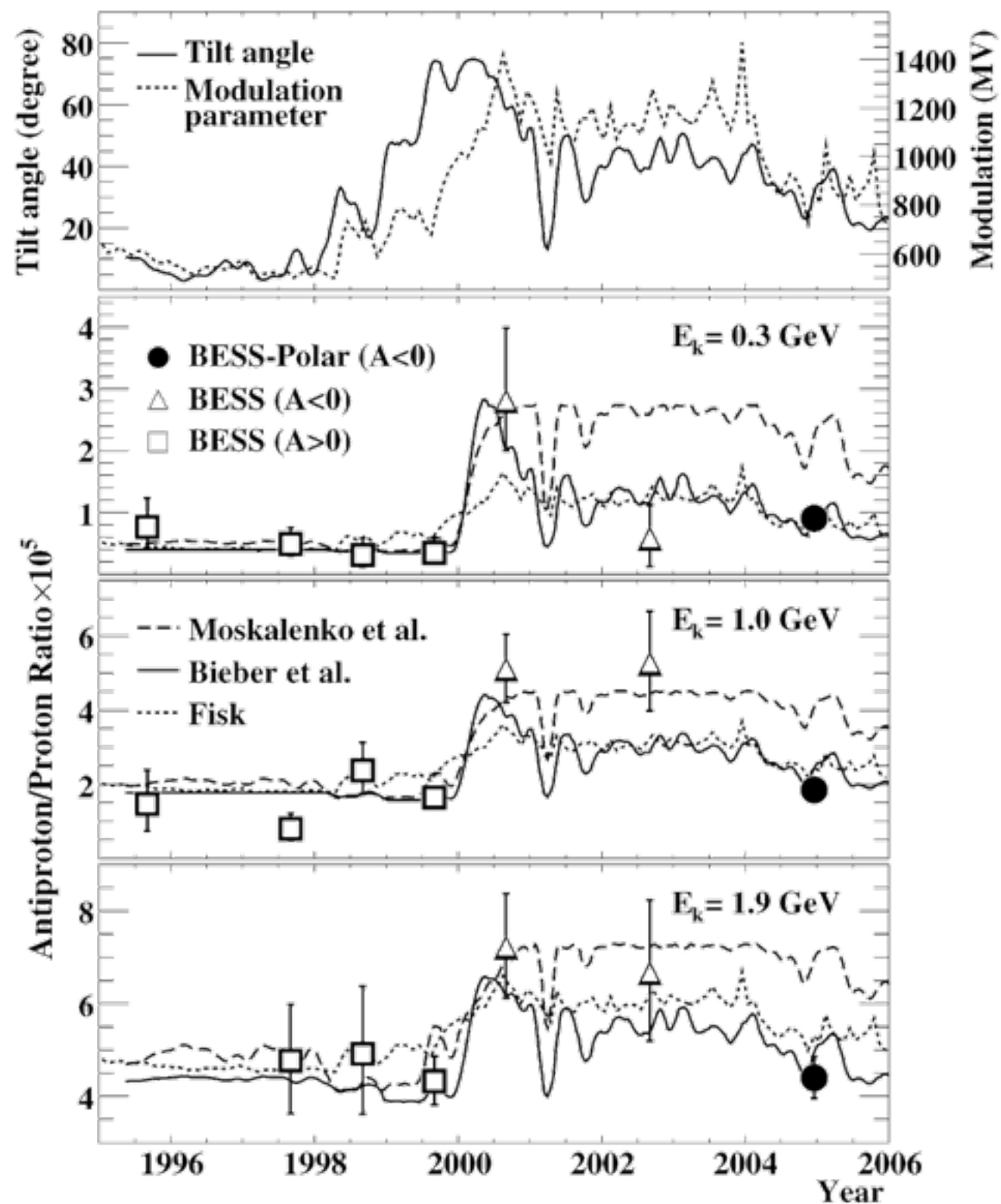
- BESS (95+97) 太陽活動極小期のデータ (550 MV)
 - 低エネルギーでフラットに見える
- BESS-Polar I 太陽活動極大期から極小期への移行期のデータ (851 MV)
 - 一次起源の低エネルギー反陽子は太陽変調によりサプレスされている

PAMELAとの比較

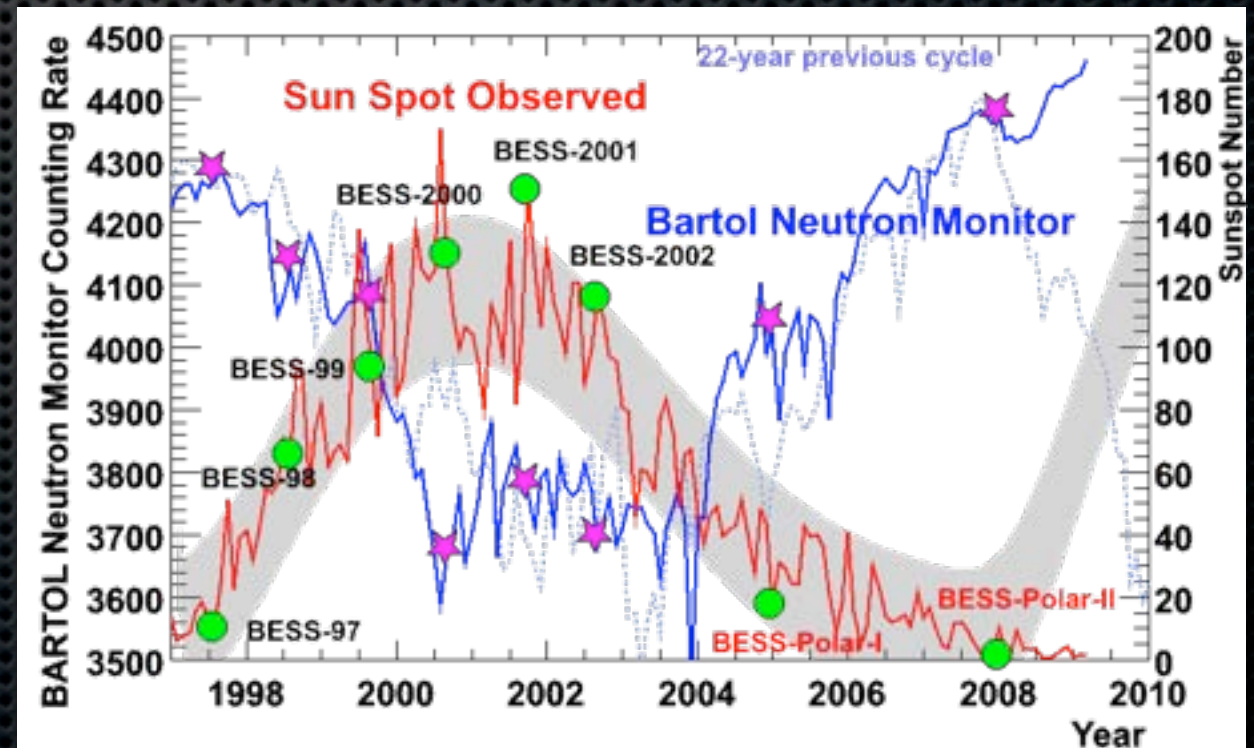
- PAMELAのデータはオーバーラップしている1~5 GeVにおいてBESS-Polar Iのデータとよく一致している。



反陽子/陽子比 — 太陽変調の研究



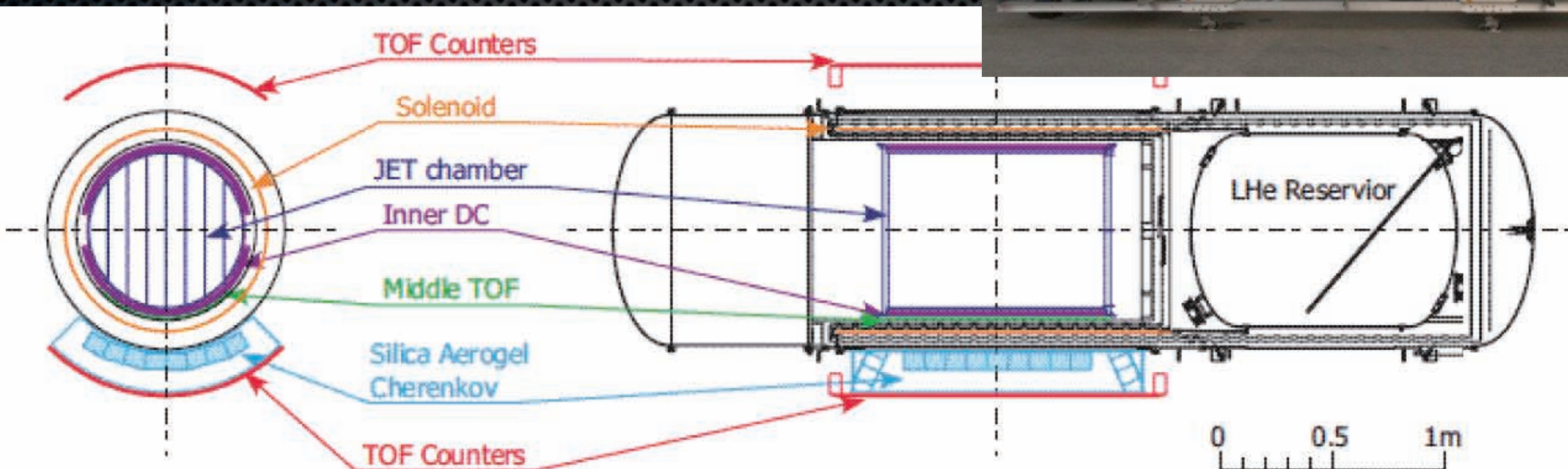
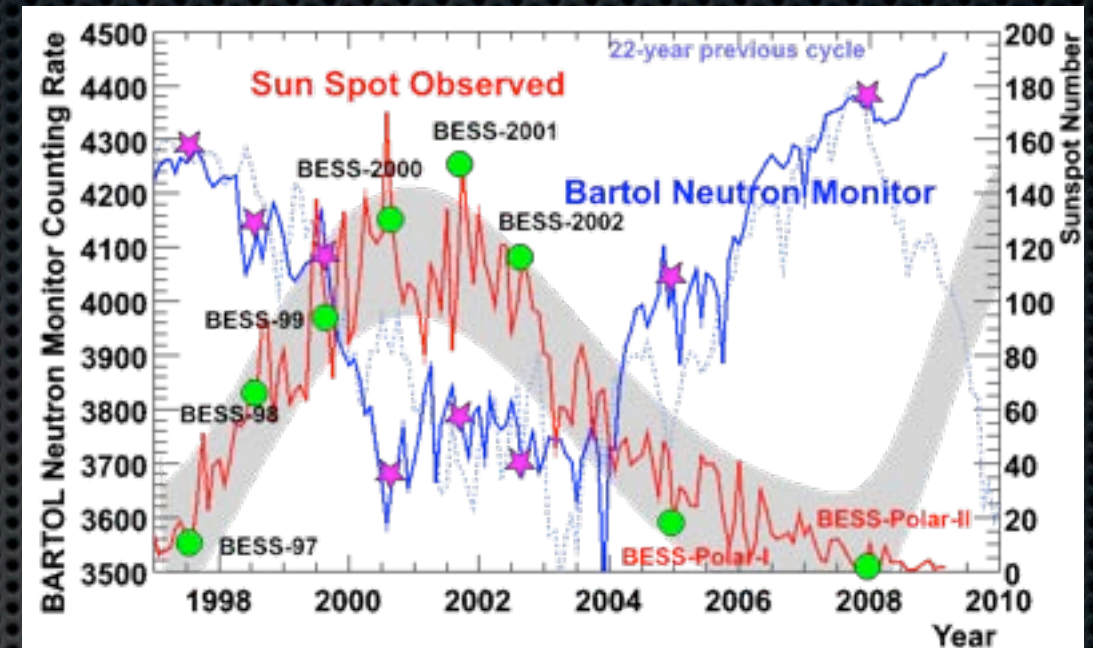
- 反陽子は陽子に比べ電荷のみ異なるため、電荷の違いによる太陽変調の違いを調べる上で非常に有用である
- これまでに蓄積してきたBESSデータと併せて、太陽変調を理解する。



BESS-Polar II

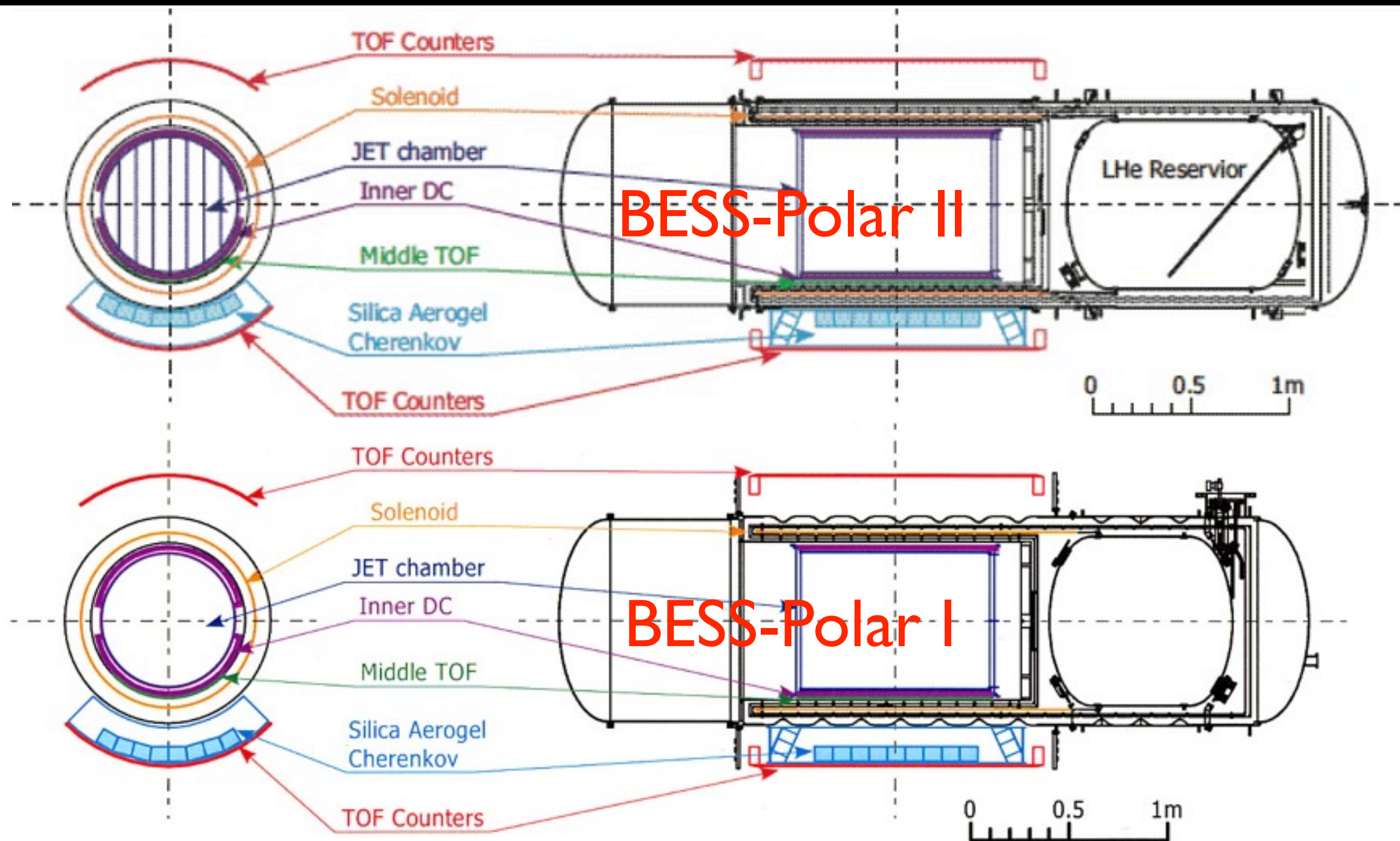
- ❖ 太陽活動極小期2007~2008
- ❖ 20日以上の観測

前回の太陽活動極小期の10倍以上の統計で反陽子を観測する。



BESS-Polar II

- Cross section -



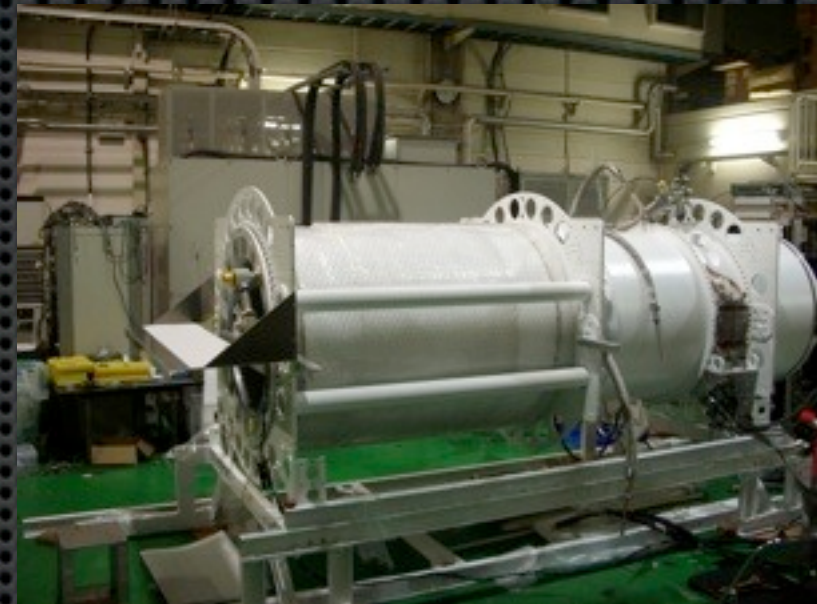
BESS-Polar IIにむけた改良

項目	(BESS-Polar I)	(BESS-Polar II)
超伝導磁石のLife	~ 11 days	> 22 days
飛跡検出器のガス	~ 10 days	> 20 days
TOF-PMT の気密対策	ポッテング	気密容器
エアロジェルチェレンコフカウンタの開発	Rejection ~ 630	>> 1000
太陽電池パネルの改良	4 stage 900 W	3 stage 675 W
アクセプタンス	0.2 m2sr	0.3 m2sr
観測時間	8.5 days	> 20 days
統計量 データ量	4 x BESS97 2 of 3.6 TB (recorded)	20 x BESS97 12 ~ 16 TB

Detector Improvement

BESS-Polar I → BESS-Polar II

- ✦ Longer life (10 days → >20 days)
 - ✦ New magnet with new cryostat
 - ✦ Larger tank, third radiation shield
 - ✦ Increase gas bottle for chamber gas
- ✦ Detector improvement
 - ✦ TOF PMT HV leak
 - ✦ ACC rejection
 - ✦ MTOF will be read from both end
 - ✦ Fast DAQ system
- ✦ Maintain weight balance
 - ✦ Solar panel will be compactified
 - ✦ fit in the new staging area
 - ✦ optimize mechanical structure

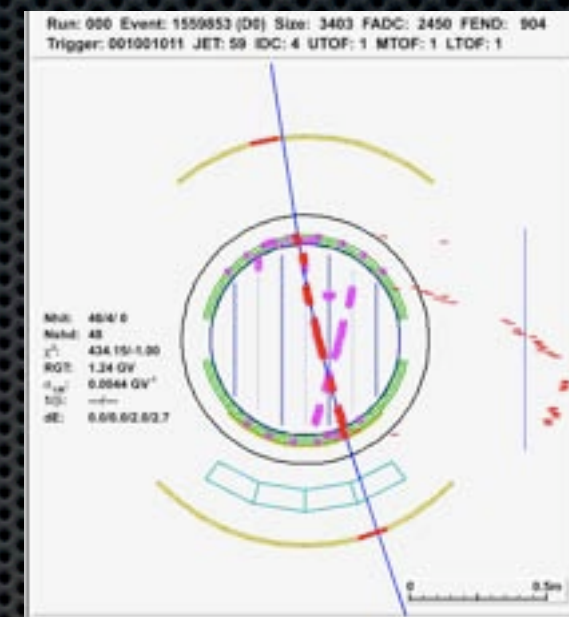
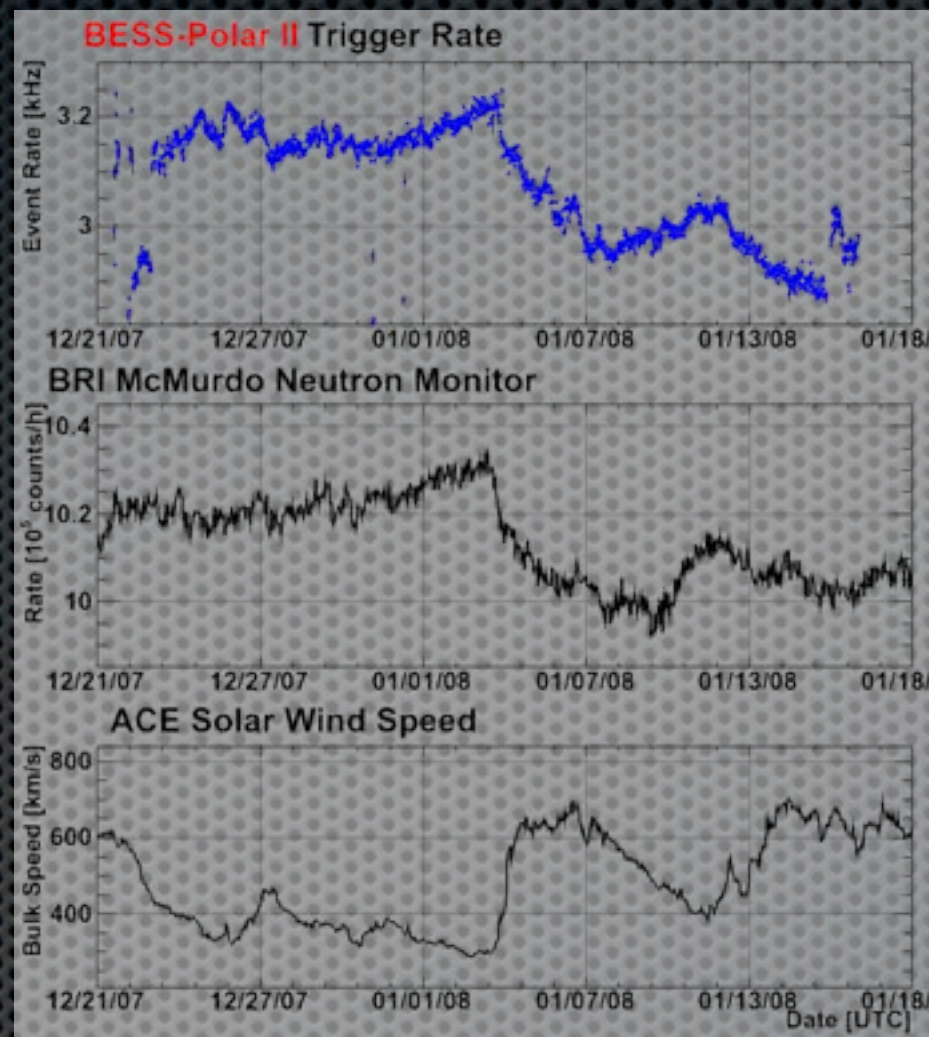
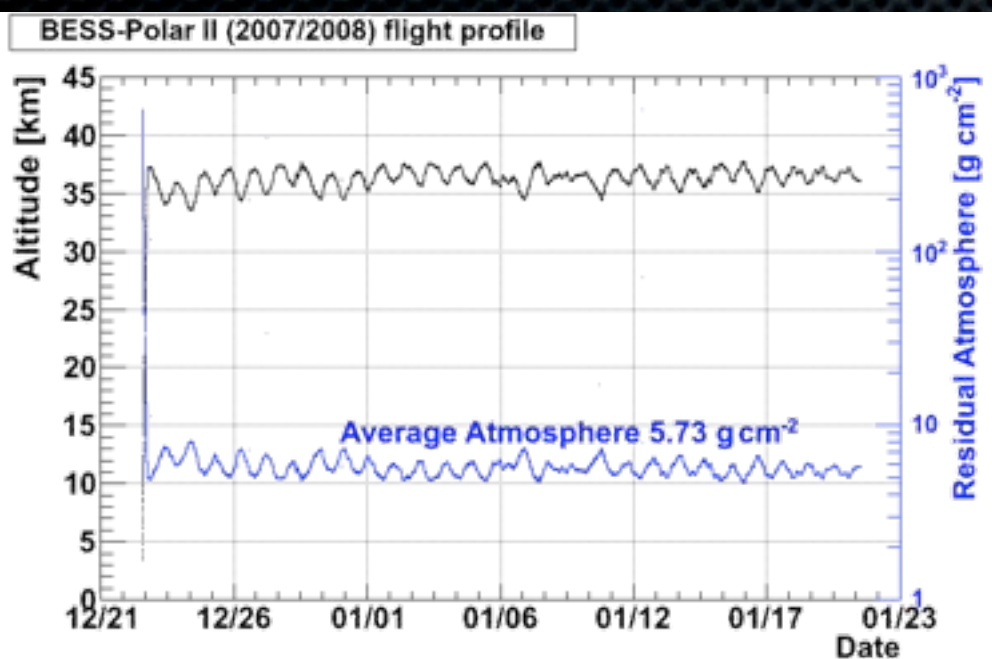


BESS-Polar II

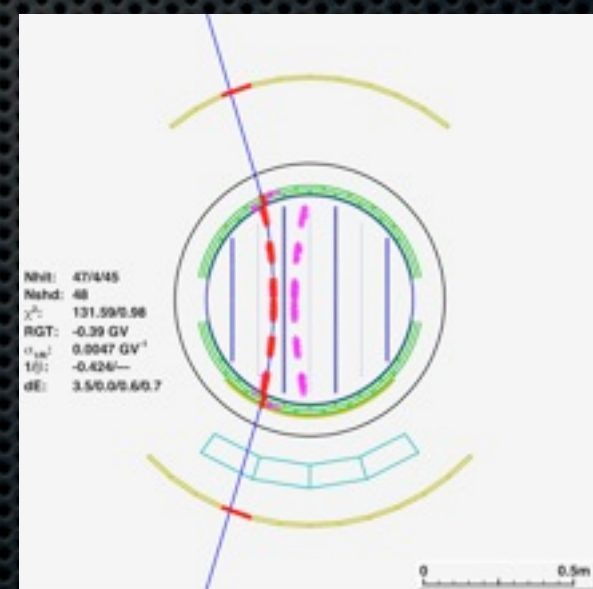
- Launch Dec 23, 2007-



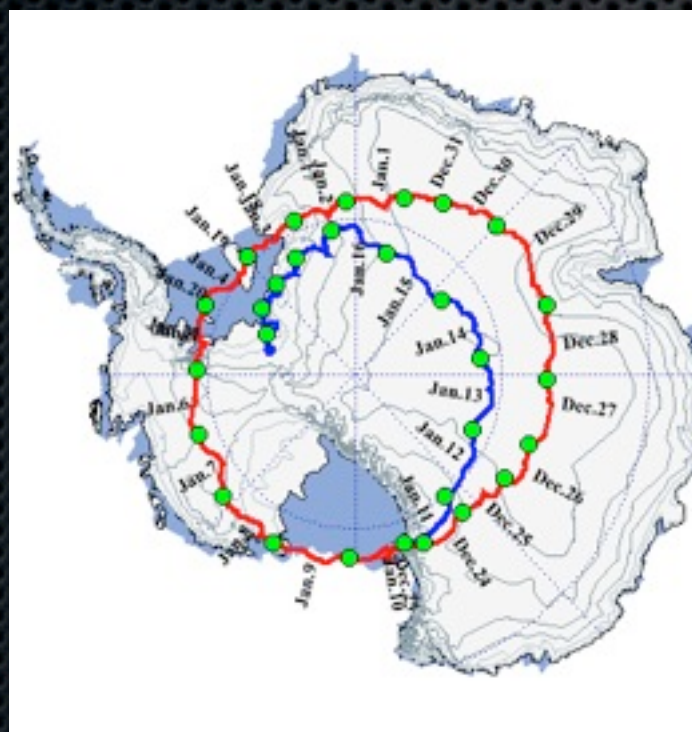
BESS-Polar II Flight



Positive Event



Negative Event



Launch 12/22/07 17:30 UTC

Science Termination 1/16/08 2:00 UTC

Magnet-on at float - 24 days 10 hours

Average altitude ~36 km (118,000 ft)

Latitude 77.9° - 83° South

End of BESS-Polar II Flight

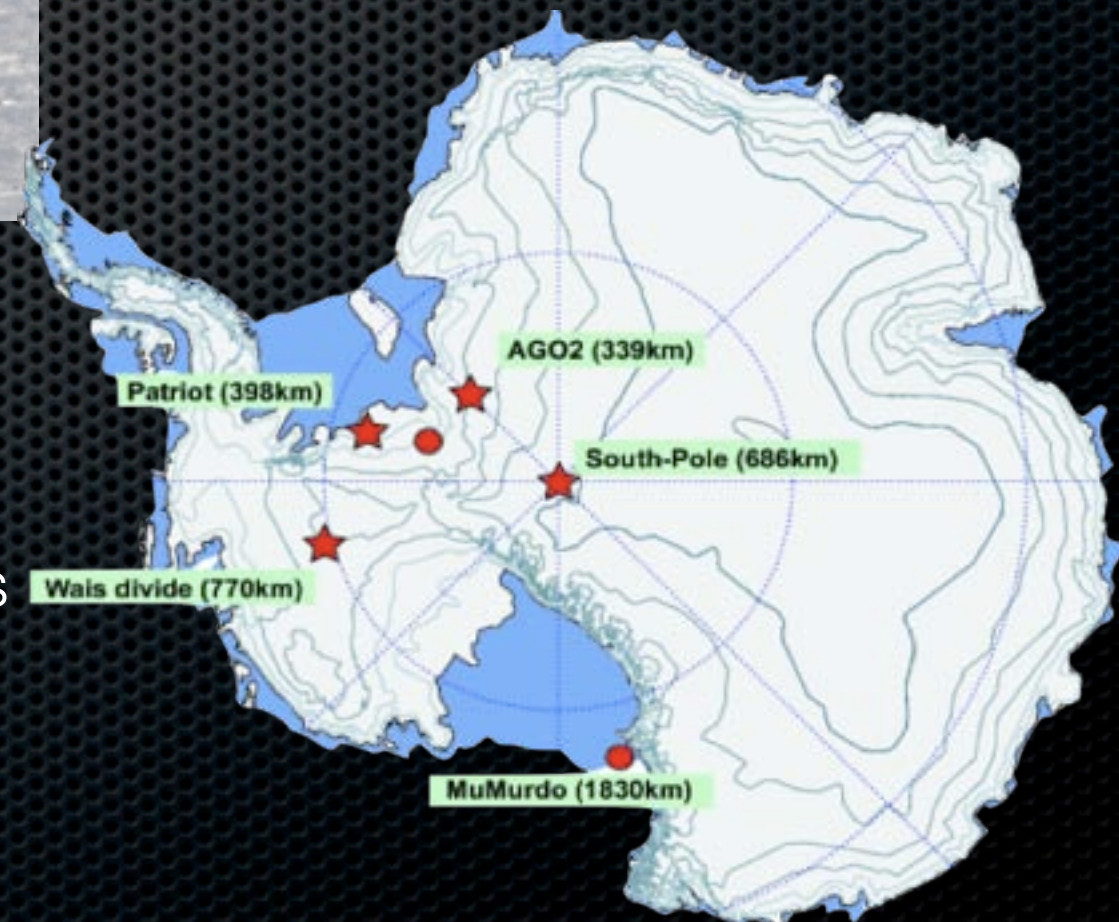


Flight termination January 20, 2008 ~30 days

Location $83^{\circ} 51.23' \text{ S}$, $73^{\circ} 5.47' \text{ W}$

On West Antarctic ice sheet - 225 nm from Patriot Hills
Camp, 185 nm from AGO-2, 357 nm from South Pole

Data successfully recovered February 3, 2008!



End of BESS-Polar II Flight



Flight termination January 20, 2008 ~30 days

Location $83^{\circ} 51.23' \text{ S}$, $73^{\circ} 5.47' \text{ W}$

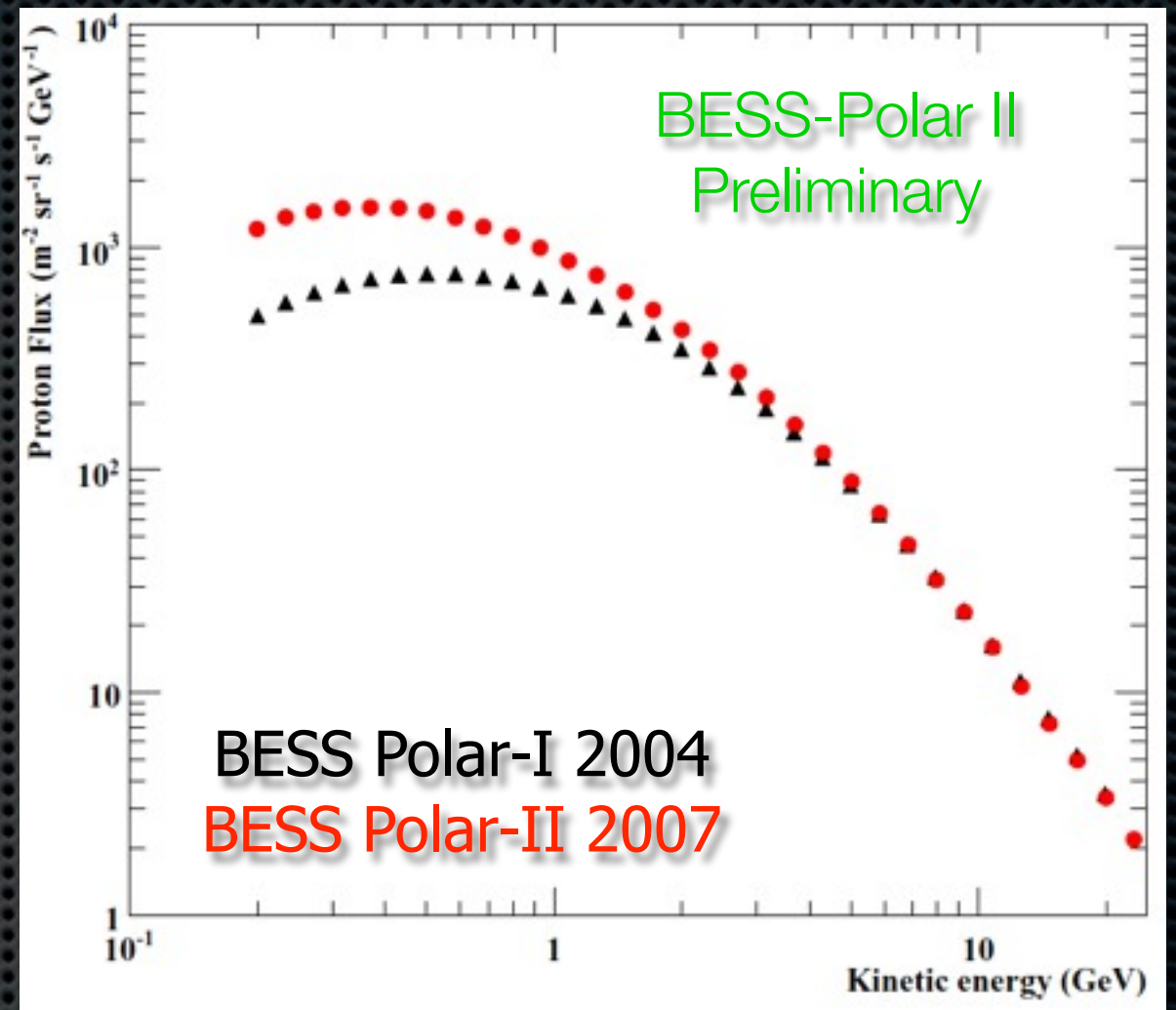
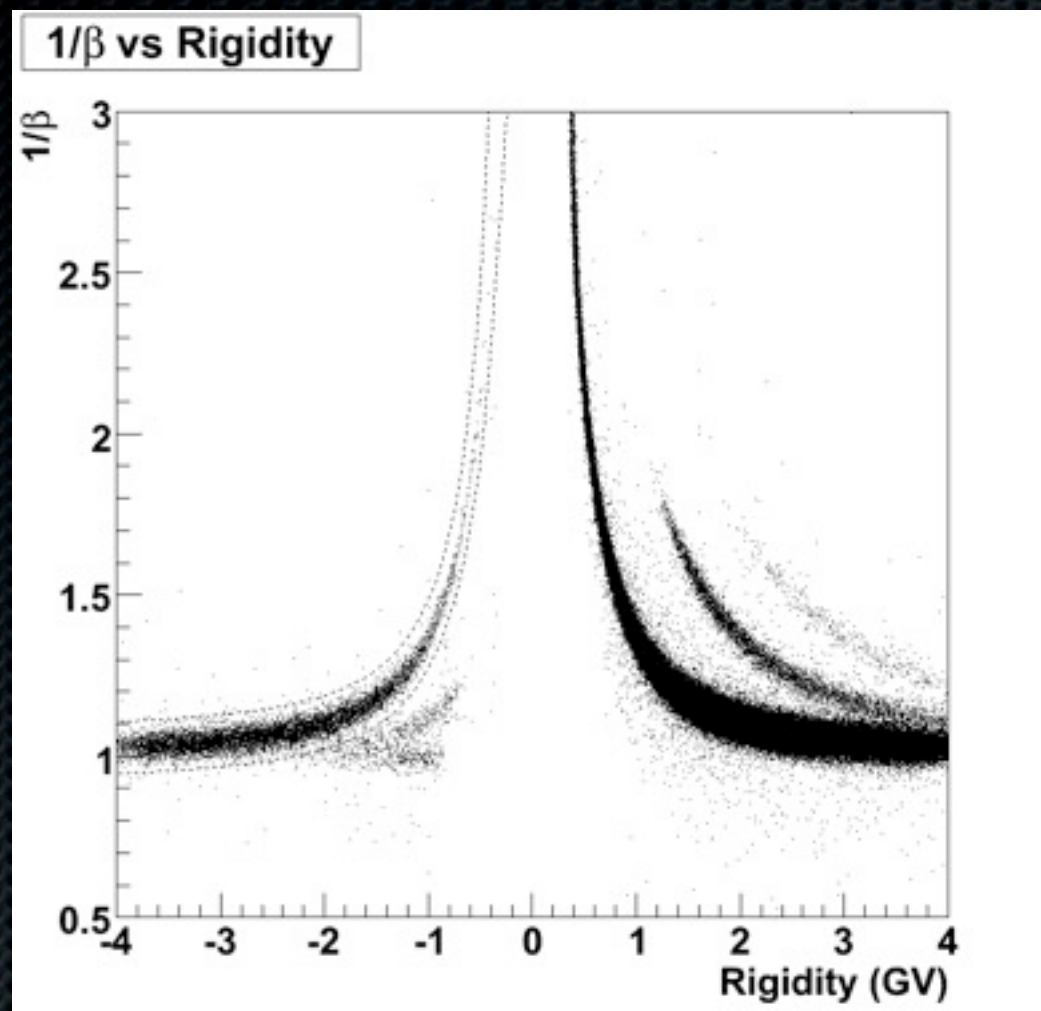
On West Antarctic ice sheet - 225 nm from Patriot Hills
Camp, 185 nm from AGO-2, 357 nm from South Pole

Data successfully recovered February 3, 2008!

BESS-Polar II Flight summary

	BESS-Polar I	BESS-Polar II
Total Float Time	8.5 days	29.5 days
Observation Time	8.5 days	24.5 days
Recorded Event	900 M	4700 M
Recorded Data Size	2.1 TB	13.5 TB
Trigger Rate	1.4 kHz	2.4 ~ 2.6 kHz
Live Time Fraction	0.8	0.77
Altitude	37 ~ 39 km	34 ~ 38 km
Air Pressure	4 ~ 5 g/cm ²	4.5 ~ 8 g/cm ²

BESS-Polar II Performance



Spectrometer - <130 μm resolution, MDR 266 - 281 GV

Outer TOF - 120 ps

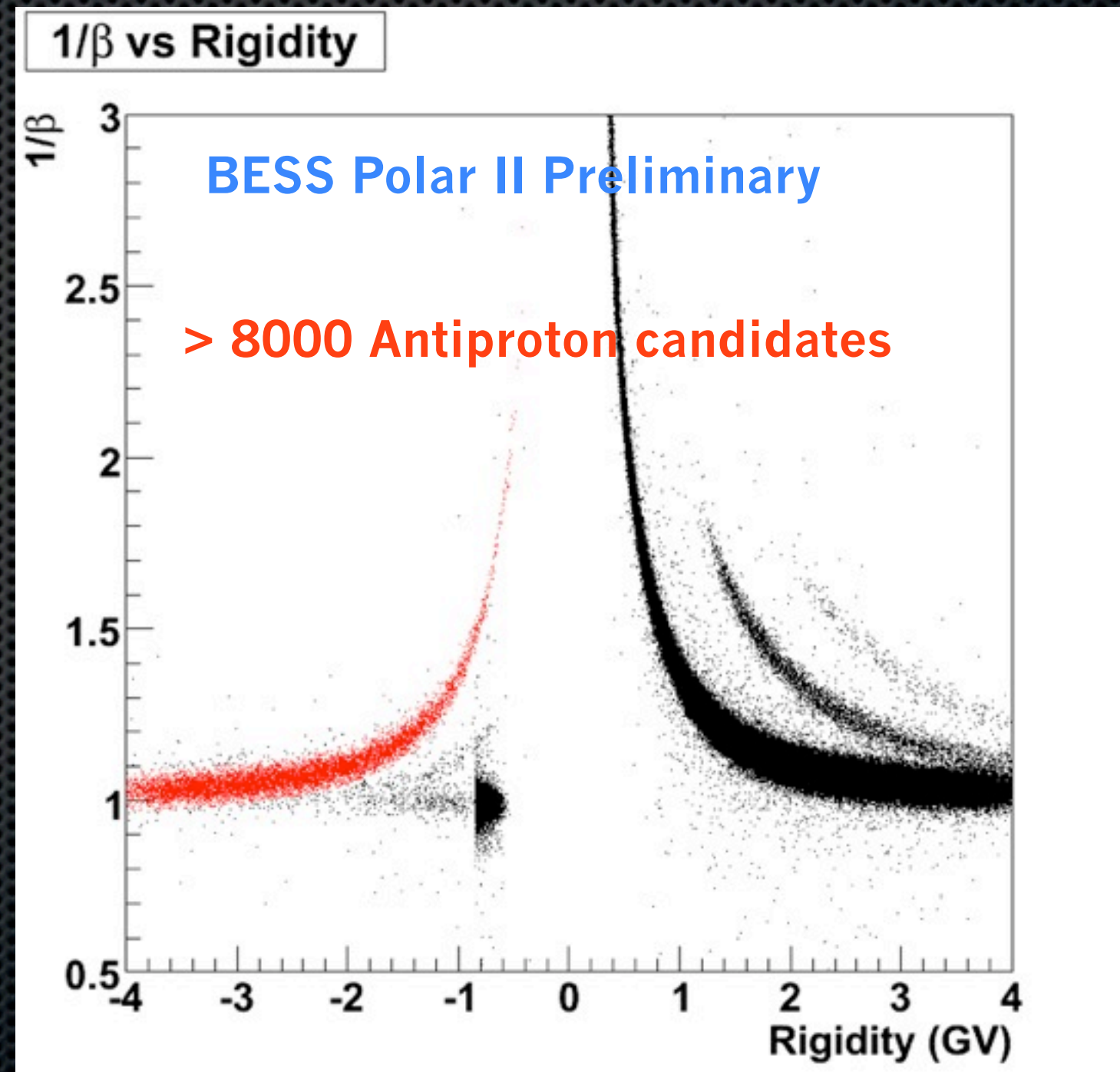
Middle TOF - 280-380 ps

Aerogel Cherenkov - 11.3 pe, 6800 background rejection factor

Data Acquisition - 2.5 kHz event rate, no onboard event selection, 82% live

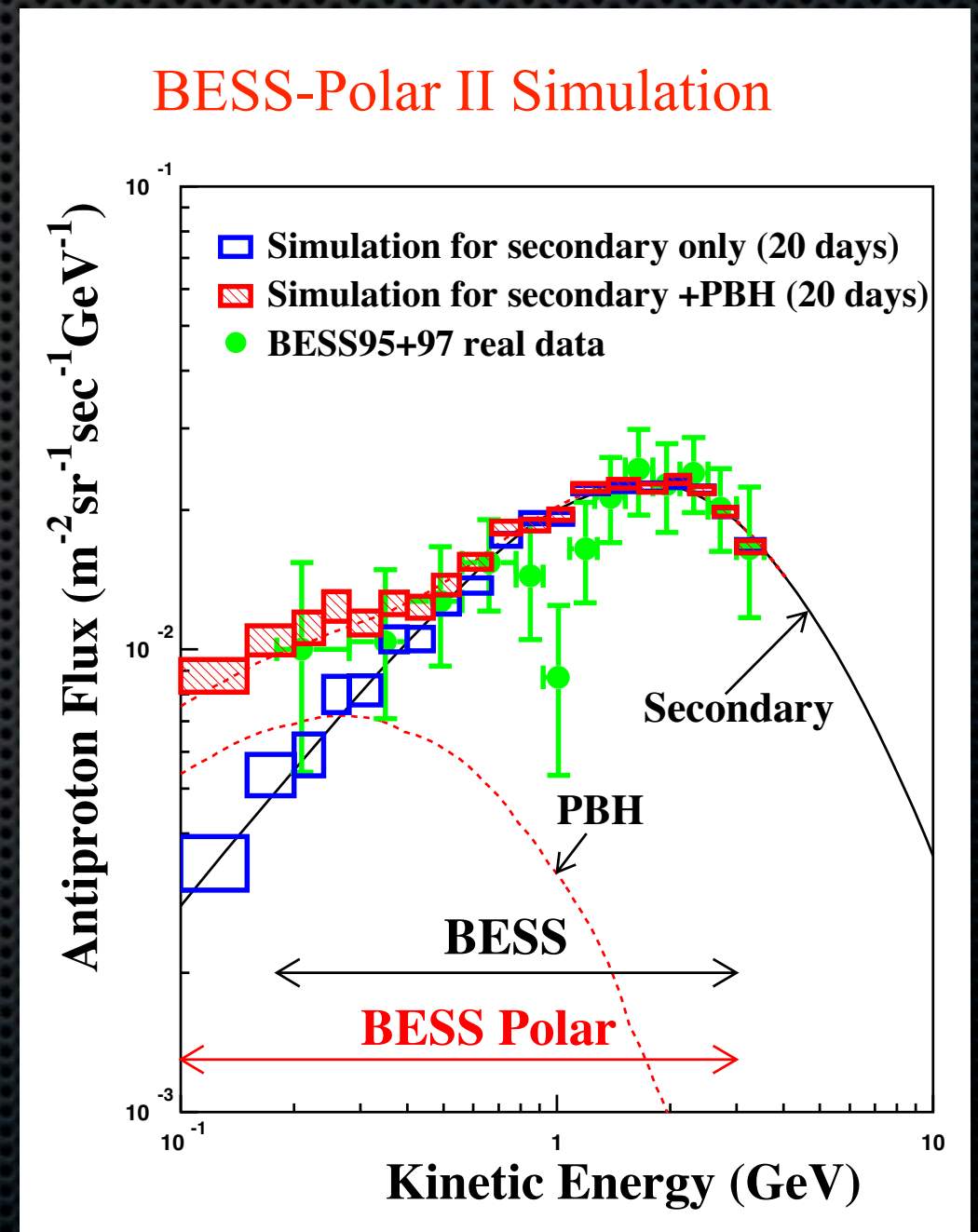
BESS-Polar II の反陽子測定

- ❖ データ解析
 - ❖ 測定器校正
 - ❖ 全ての測定器において
BESS-Polar Iを上回る性能



BESS-Polar II の反陽子測定

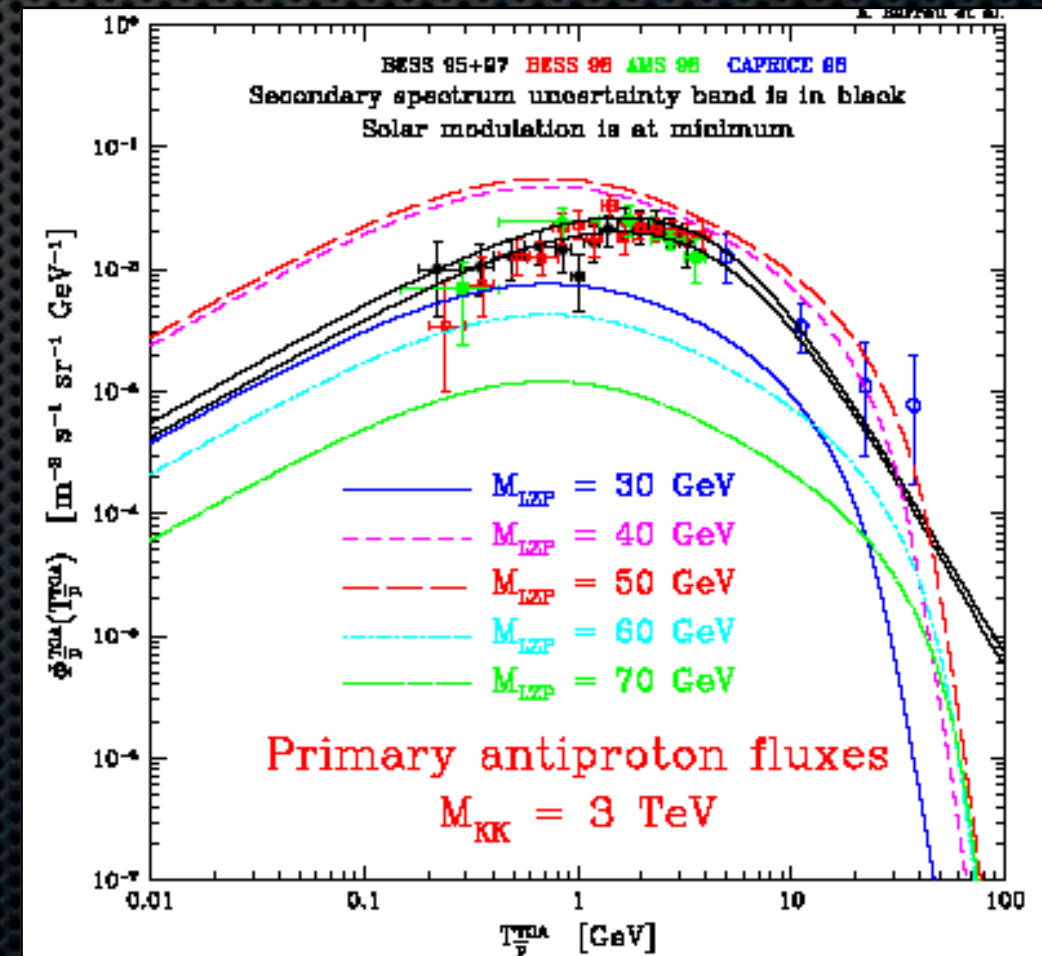
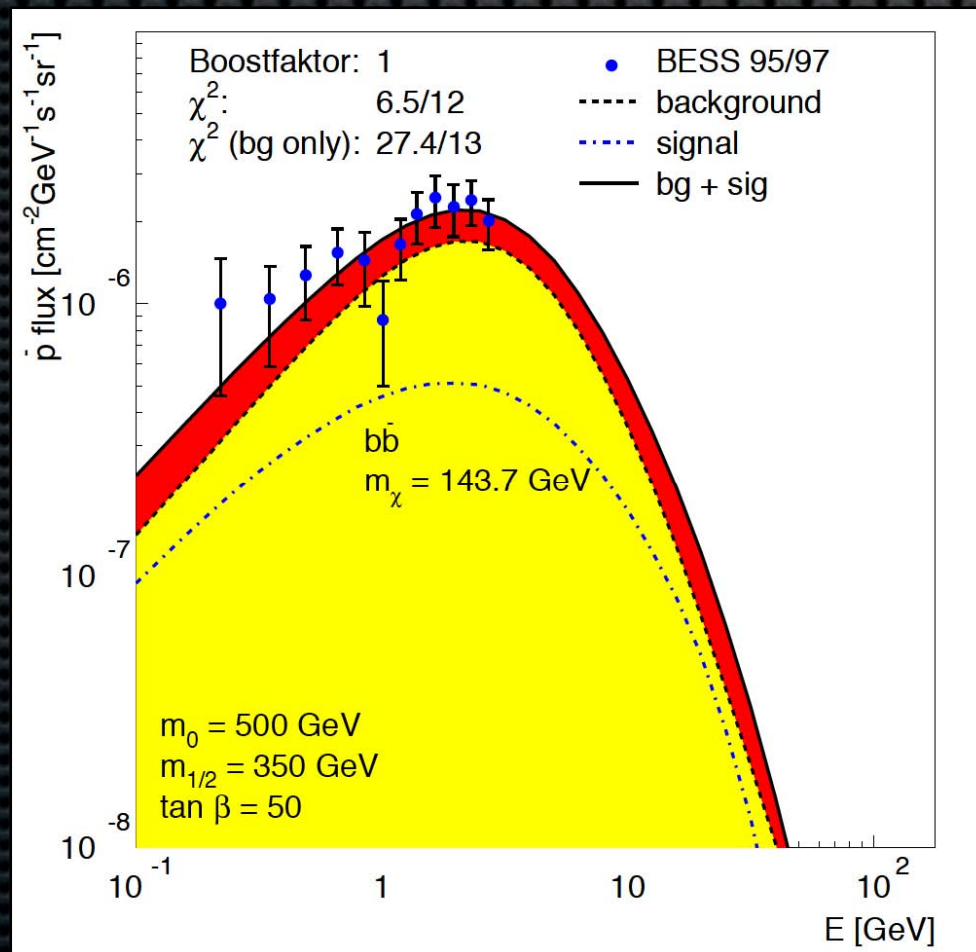
- ❖ データ解析
 - ❖ 測定器校正
 - ❖ 全ての測定器において
BESS-Polar Iを上回る性能



反陽子によるダークマター間接探索

- ✧ WMAPによる予測
 - ✧ 23 %がダークマター
- ✧ CDM 候補
 - ✧ SUSY粒子／Kaluza-Klein粒子

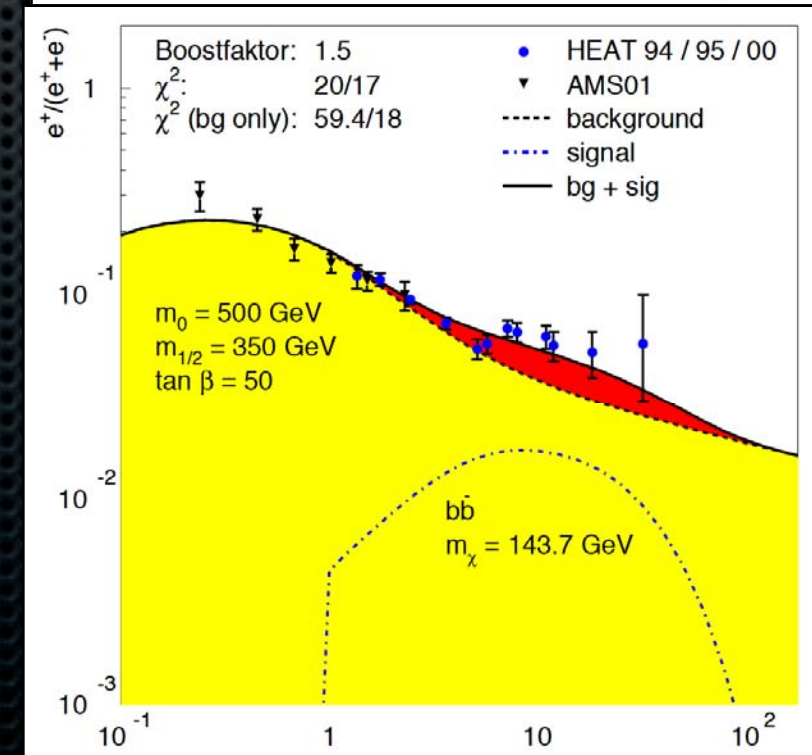
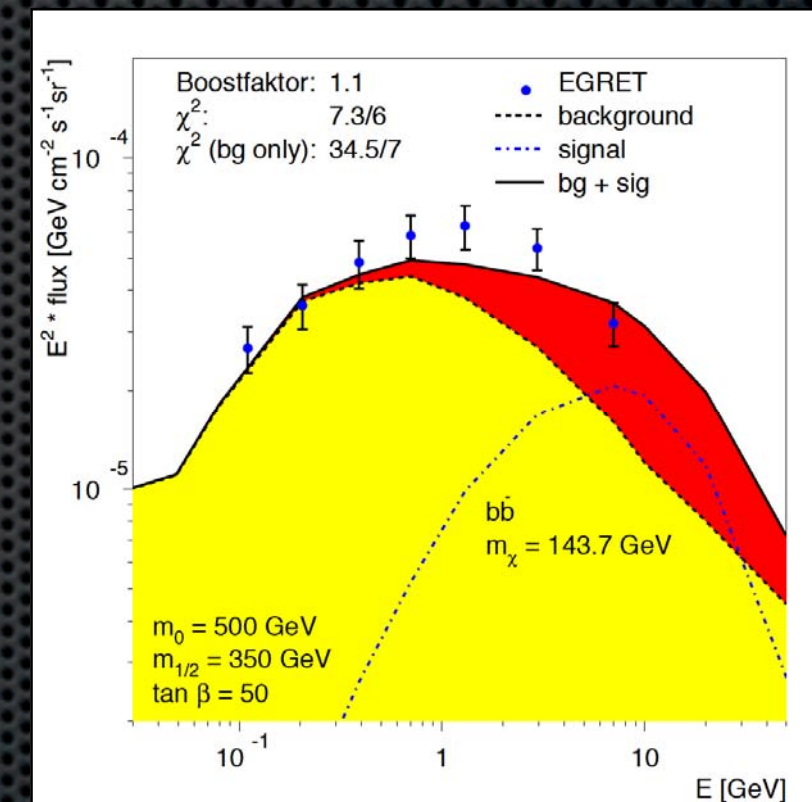
シグナルとバックグラウンドの
スペクトルが似ている



ダークマター探索

—他のプローブとの比較—

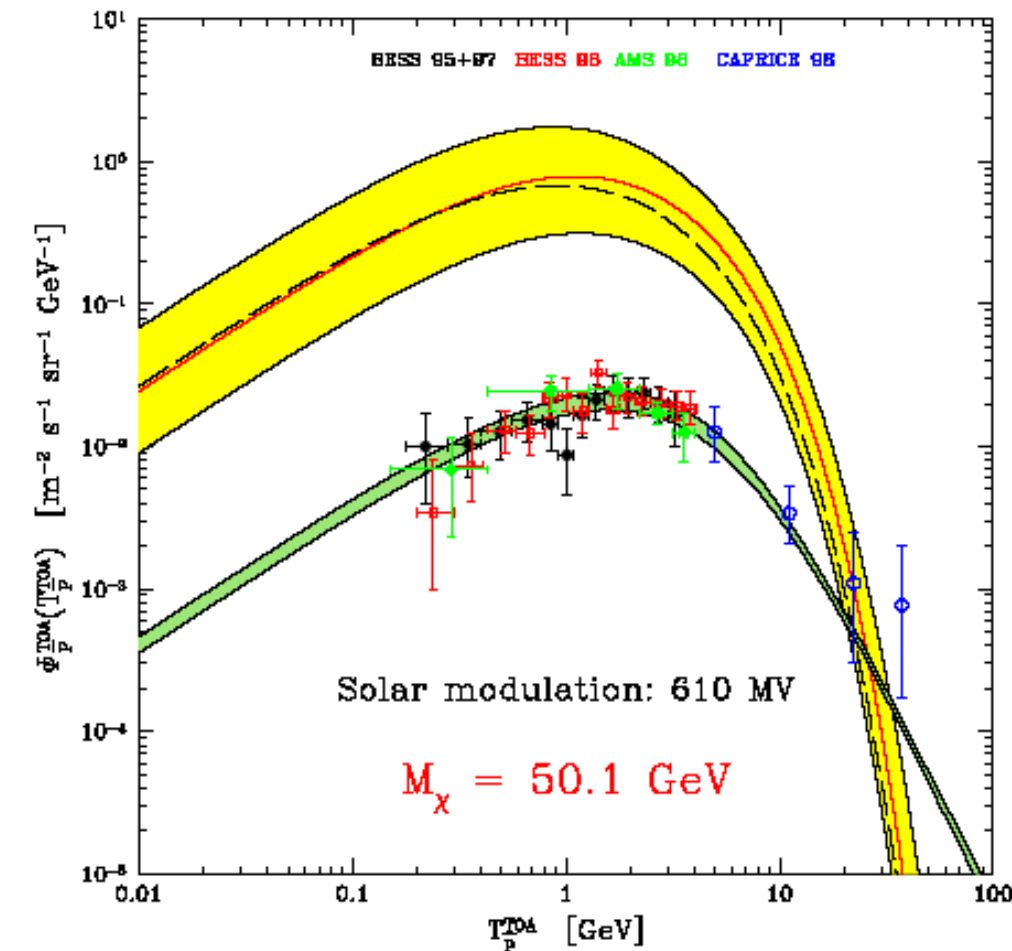
- γ
 - Diffuse γ の過剰
 - 方向を調べることができる
 - Fermiで感度が飛躍的に向上
- 陽電子/電子
 - 高エネルギーの信号
 - 鋭いカットオフが見える可能性
 - 太陽系の近くの分布



ダークマター探索

－他のプローブとの協調－

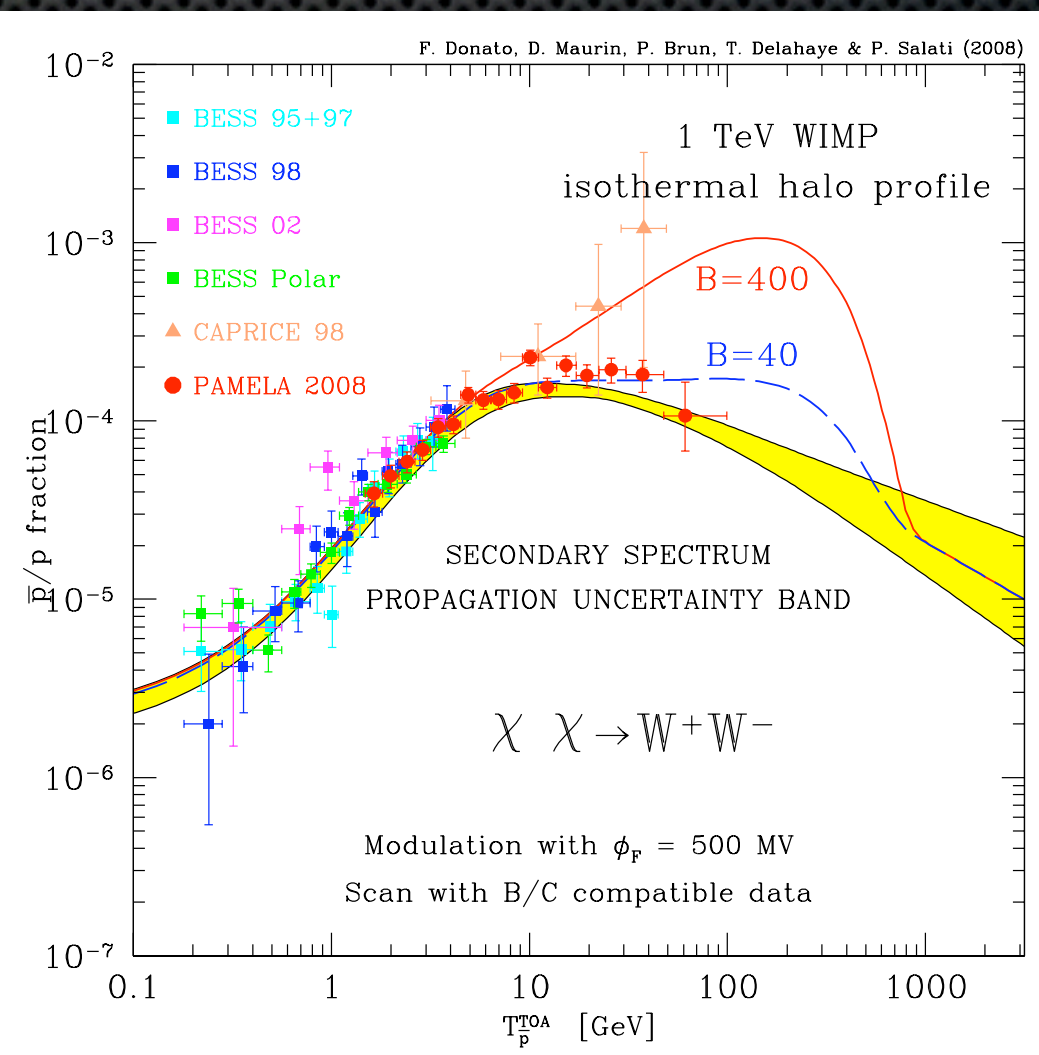
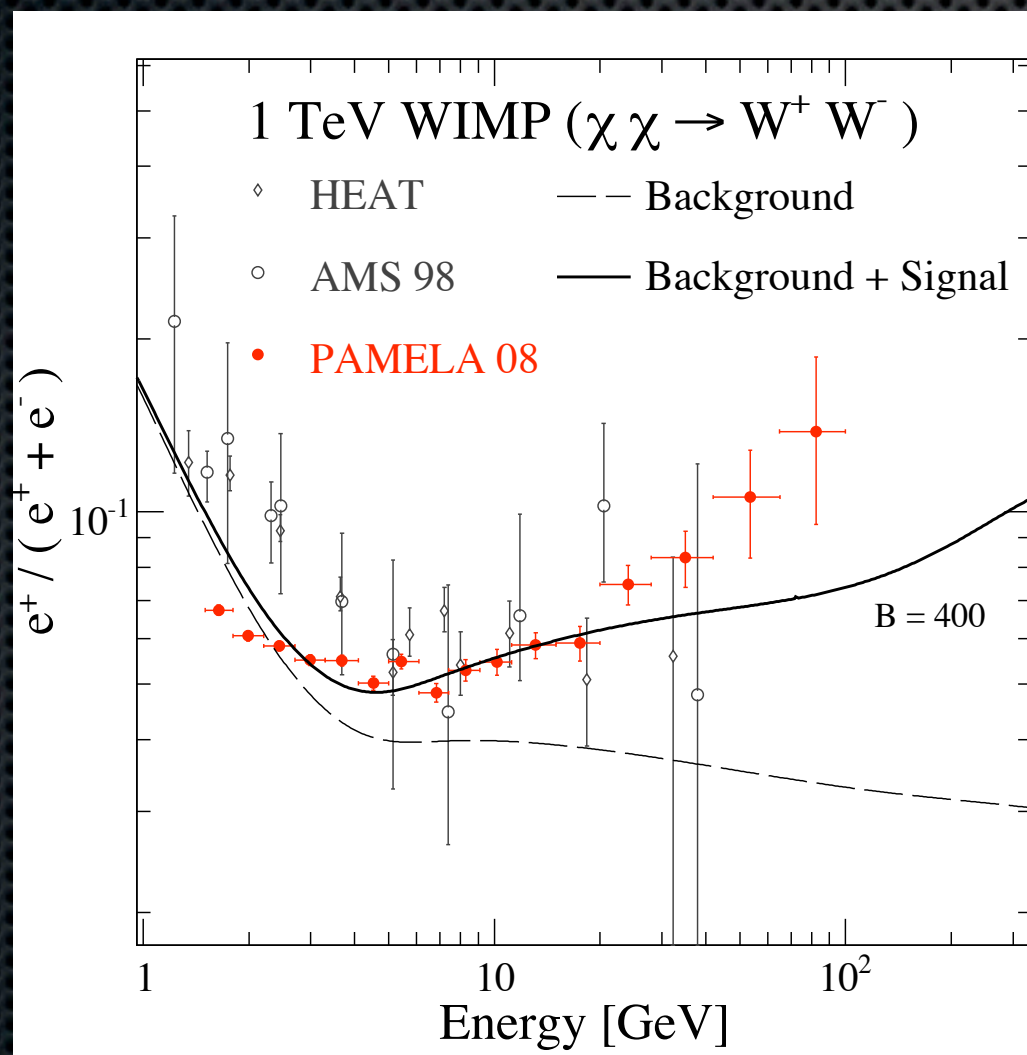
- 他のプローブあるいは直接探索での結果との協調でパラメータを制限
- 例：EGRETのDiffuse γ の過剰の原因を低い質量のニュートラリーノとすると、反陽子にも大きなシグナルが現れるはずである。



ダークマター探索

—他のプローブとの協調—

- 他のプローブあるいは直接探索での結果との協調でパラメータを制限
 - 例：PAMELAの陽電子過剰が1 TeVのWIMPとすると高いBoost factorで矛盾

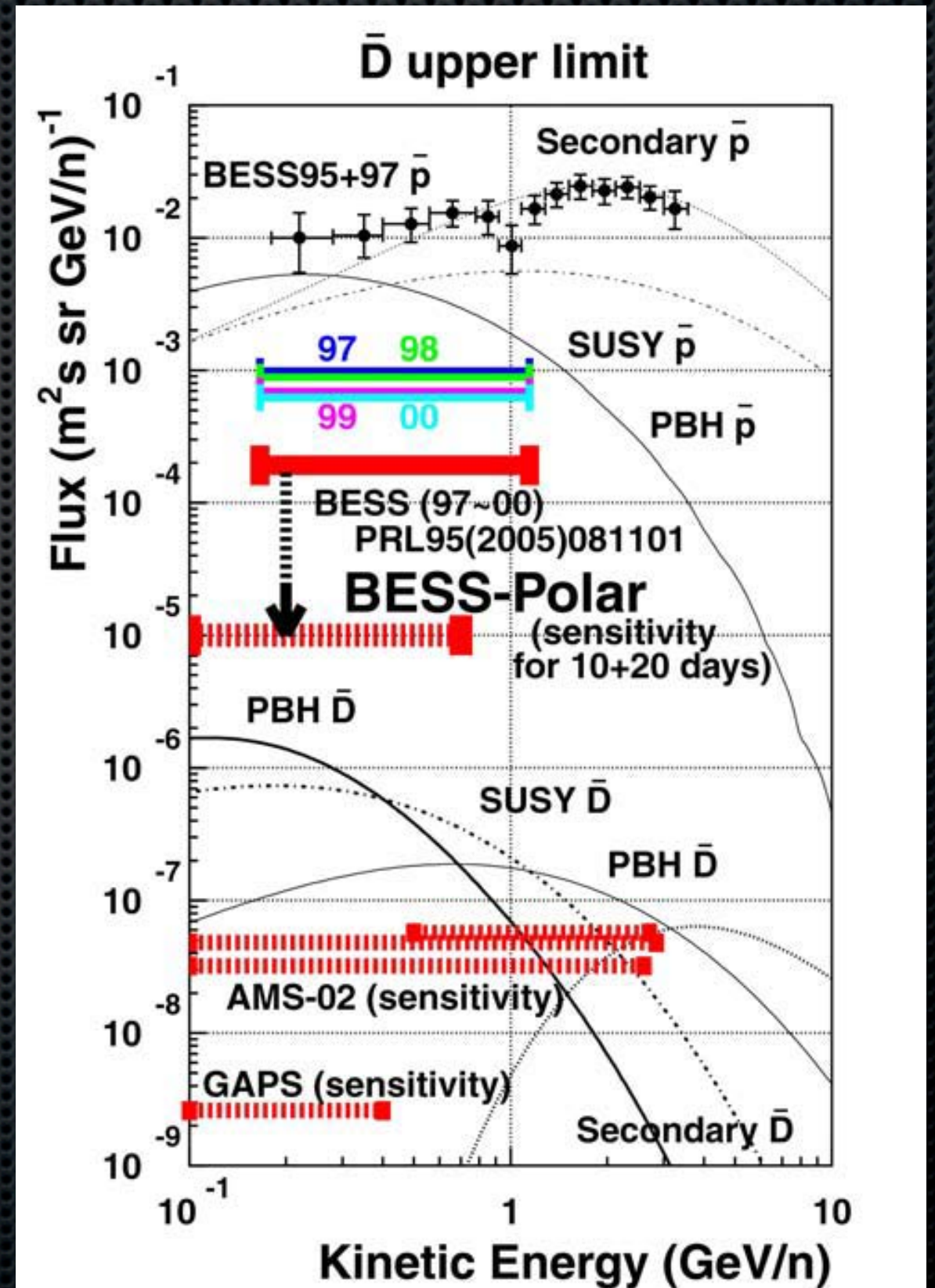


Donato et al.

反重陽子

—BESS-Polar IIでの探索—

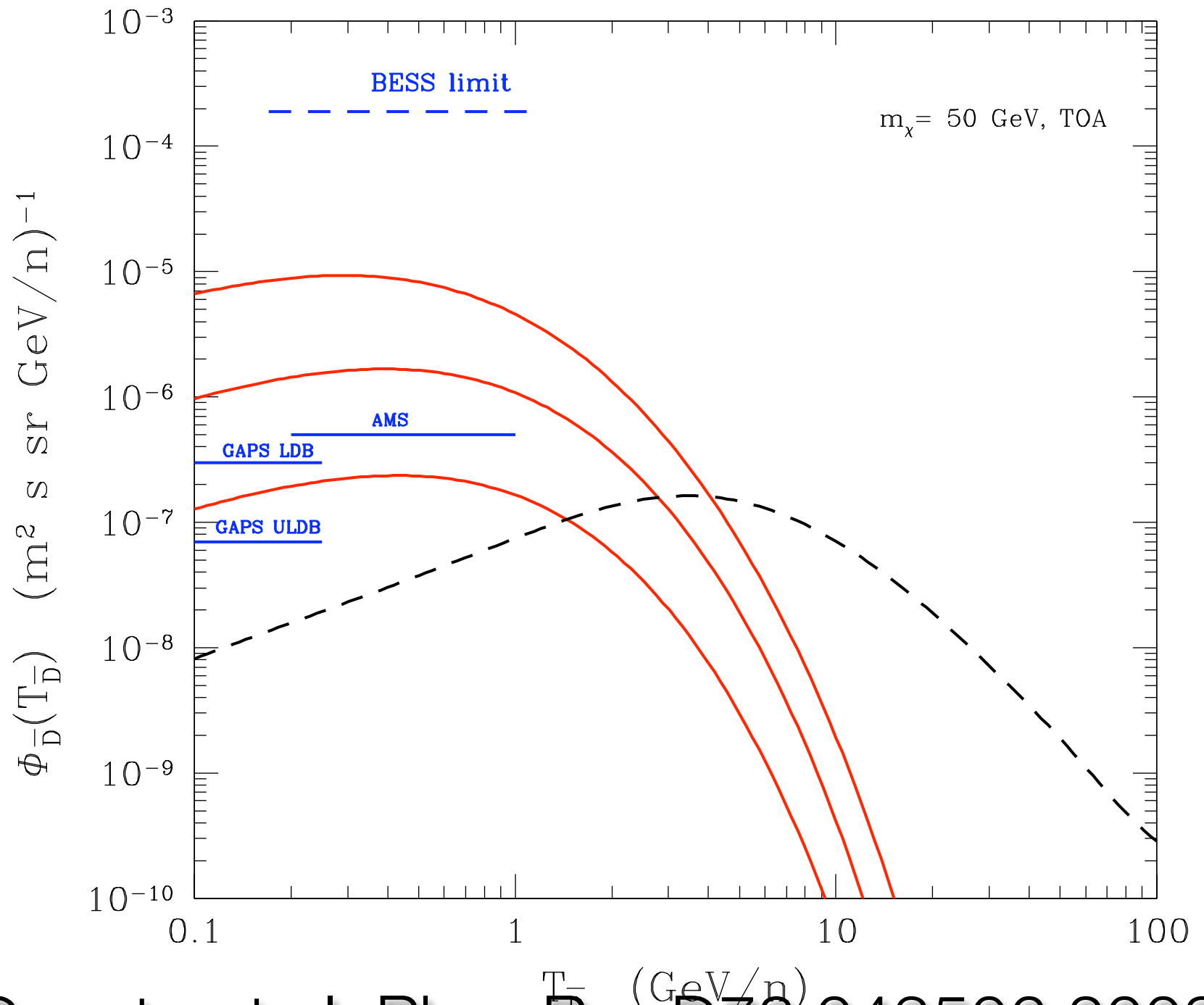
- ✧ 衝突起源反重陽子
 - ✧ 反陽子よりさらに抑制
 - ✧ Tertiaryも抑制
- ✧ 一例でも見つければ
 - ✧ 一次起源の可能性が高い
- ✧ 実験的には
 - ✧ 反陽子がバックグラウンド
 - ✧ 粒子識別の向上が必要



反重陽子

—BESS-Polar IIでの探索—

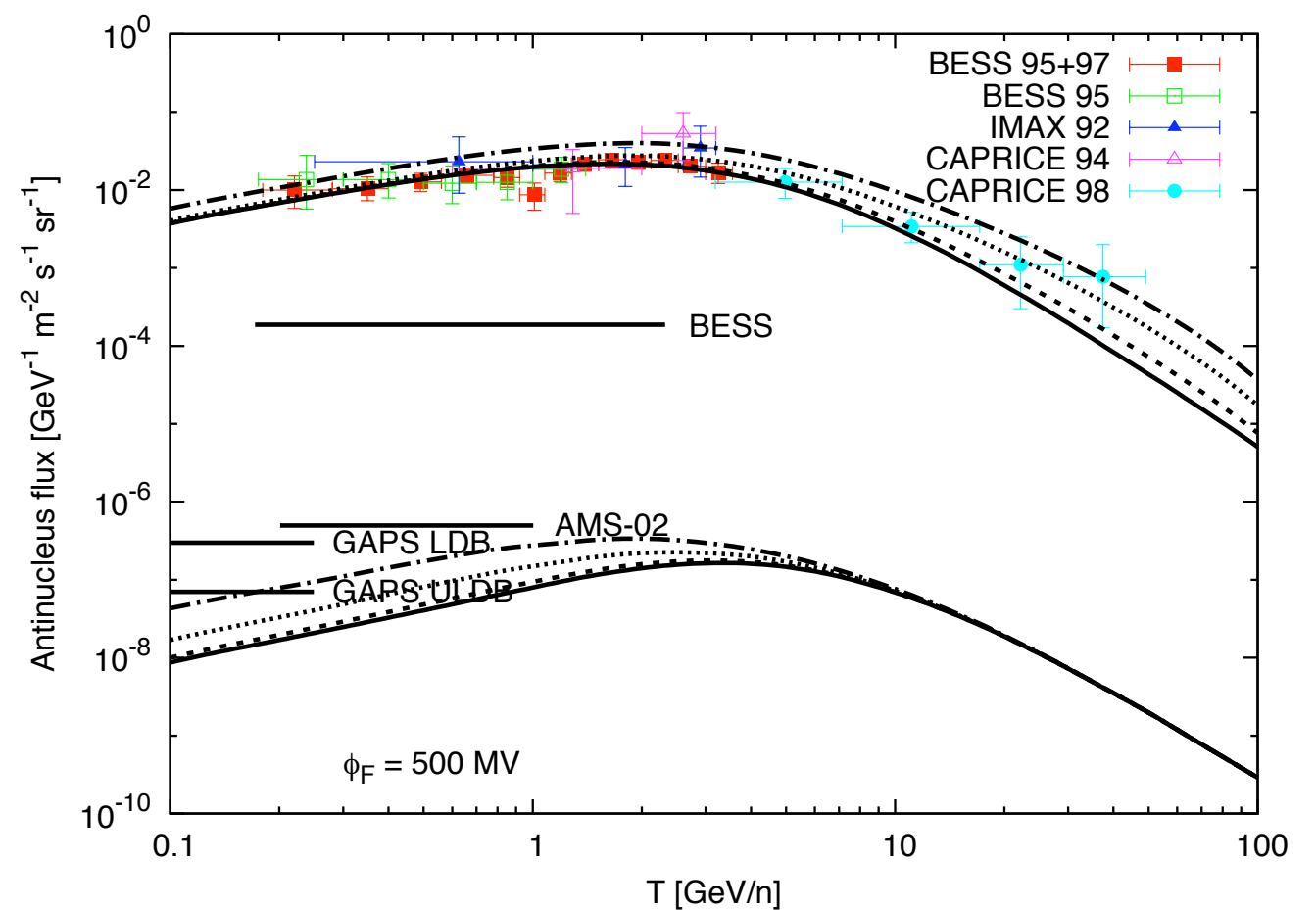
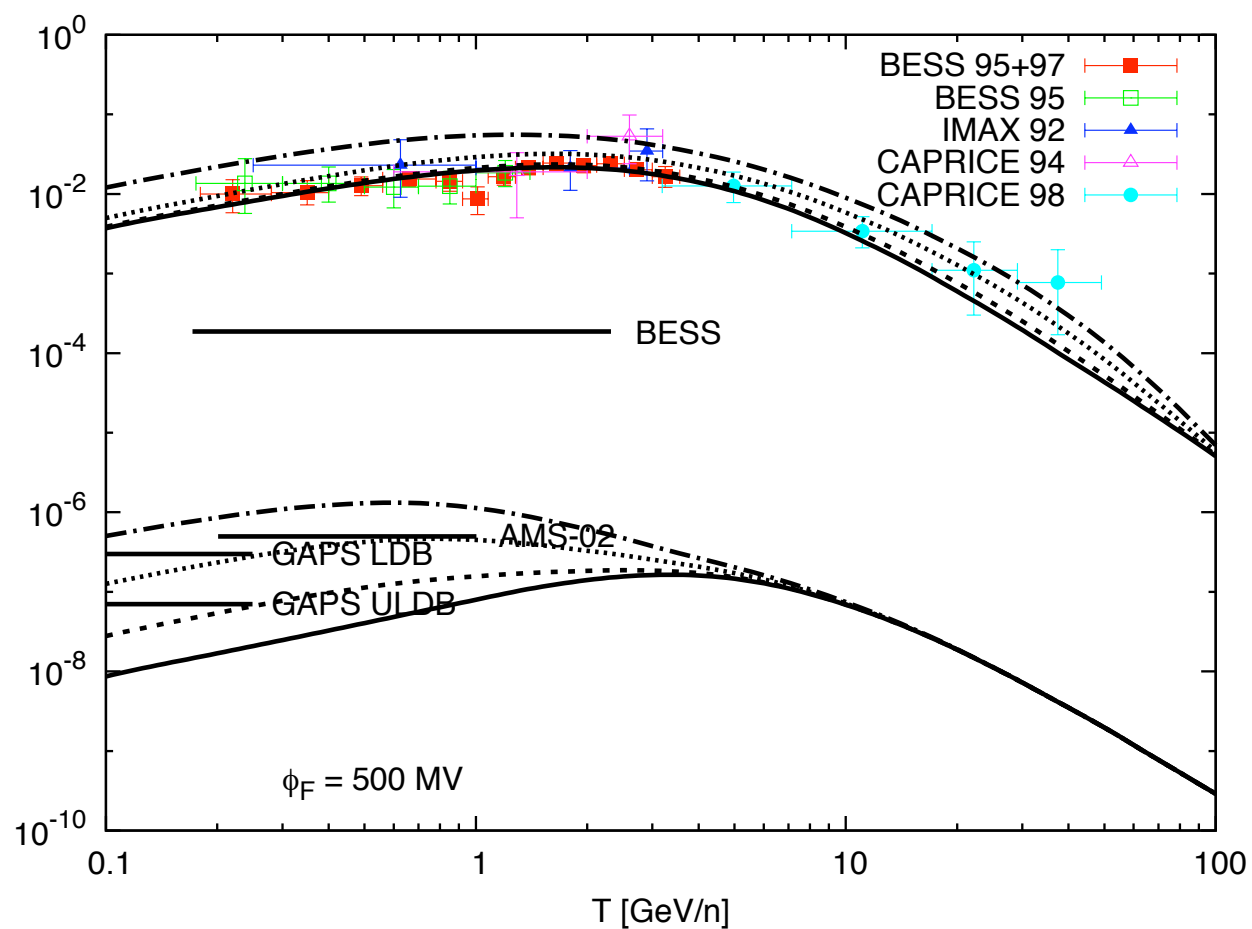
- ✧ 衝突起源反重陽子
 - ✧ 反陽子よりさらに抑制
 - ✧ Tertiaryも抑制
- ✧ 一例でも見つければ
- ✧ 一次起源の可能性が
- ✧ 実験的には
 - ✧ 反陽子がバックグラウンド
 - ✧ 粒子識別の向上が必要



Donato et al. Phys.Rev.D78:043506,2008

反重陽子

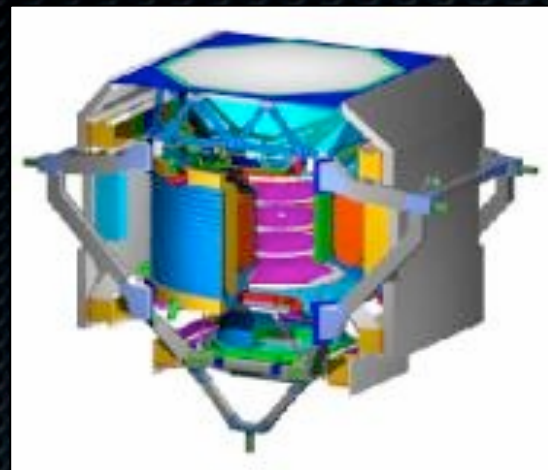
-ダークマターの崩壊からのシグナル



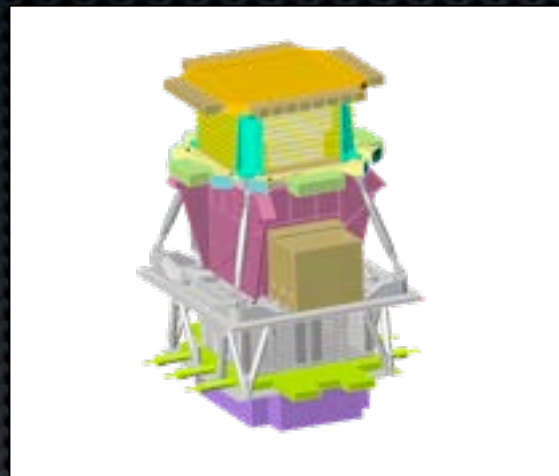
反陽子観測の今後

- 高エネルギー反陽子
 - すでにHEAT, PAMELAが報告
 - AMS IIが順調に動作すれば、圧倒的な精度で高エネルギー反陽子のスペクトルが決定する
- 低エネルギー反陽子
 - BESS-Polar IIの結果待ち
 - 新しい測定は次の太陽活動極小期まで待たなくてはならない。
- 低エネルギー反重陽子
 - AMS II やGAPSで信号が見える可能性がある。

BESS-PolarとAMS, PAMELAの比較

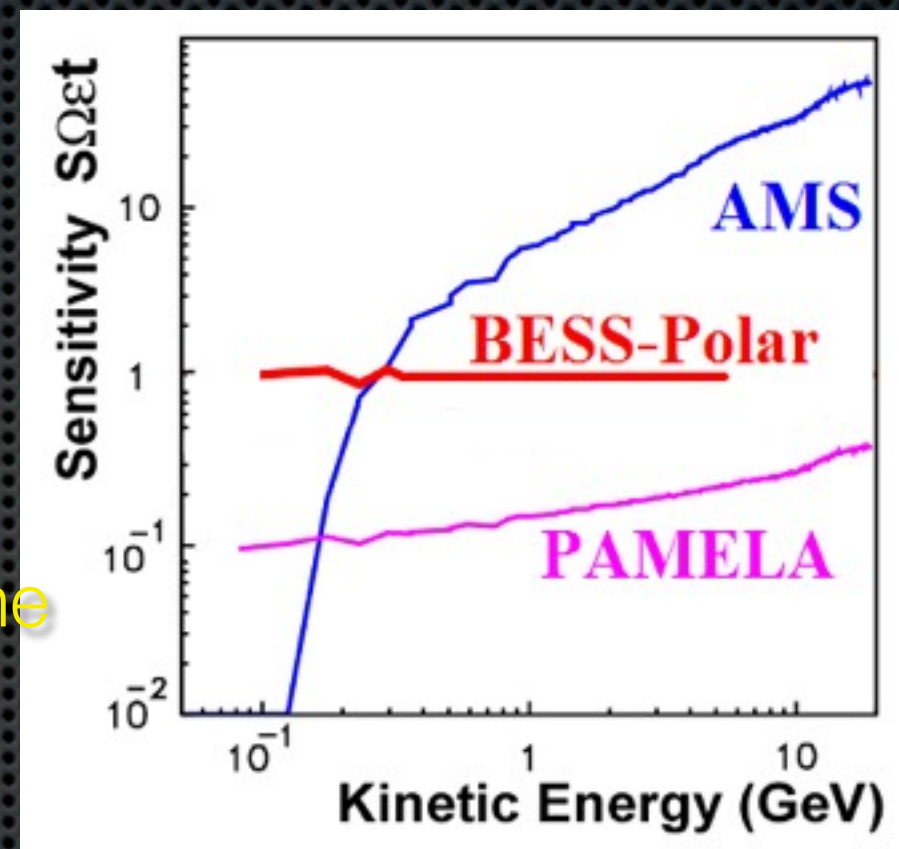


AMS-02



PAMELA

- BESS-Polar II is the most sensitive balloon-borne magnetic rigidity spectrometer to ~ 4 GeV
- Higher sensitivity than PAMELA (3 yrs shown)
- Exceeds AMS-02 at low energy due to orbit



	Acceptance (m ² sr)	Flight Time	Latitude	Altitude (km)	Launch
AMS	0.5	3 years	< 51.7	280~500	~2010
PAMELA	0.0021	3-6 years	<70.4	350-600	2006
BESS-Polar II	0.3	24.5 days	> 75	36	2007

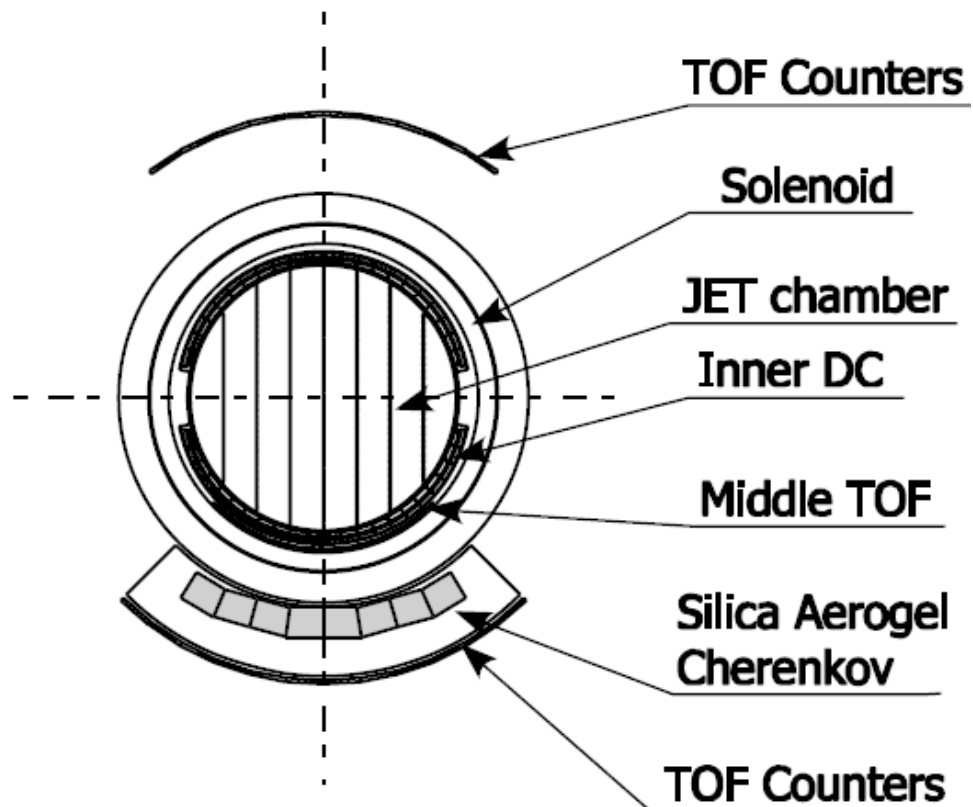
まとめ

- 宇宙線反粒子はダークマターを初めとする、宇宙での素粒子現象を探するためのよいプローブである。
- 同時に宇宙線の総合的な理解に欠くことのできない基礎データを提供した。
- PAMELA, BESS-Polar Iの結果が報告され通常の銀河伝播モデルからの予測と一致している。
- BESS-Polar II の結果は間もなく報告される。乞うご期待！
- AMS IIがうまく飛べば、BESS-Polar IIの低エネルギーデータと併せて、究極の精度での反陽子スペクトルが確定する。

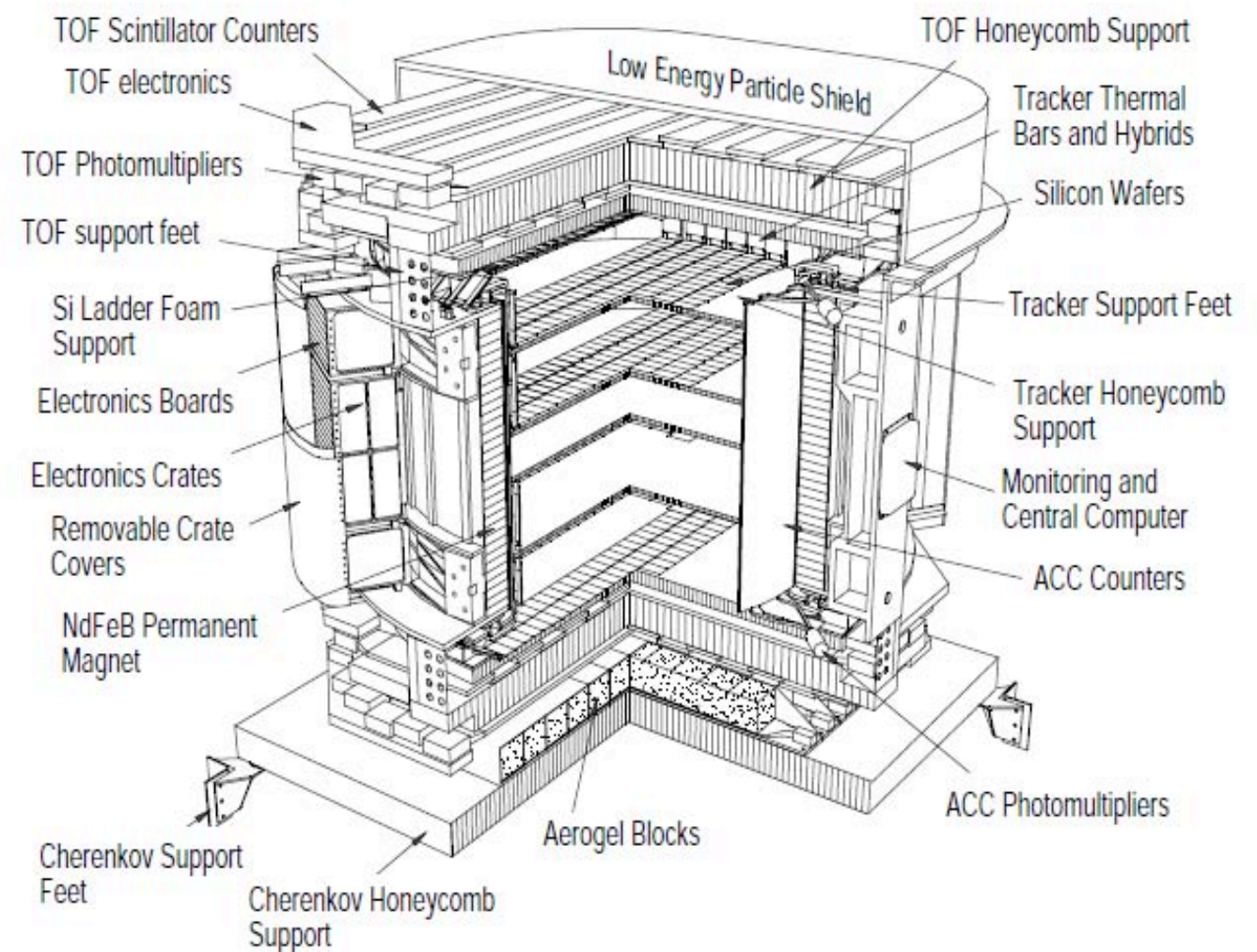
Backup

Comment of e^+/e^- detection possibility

BESS-Polar

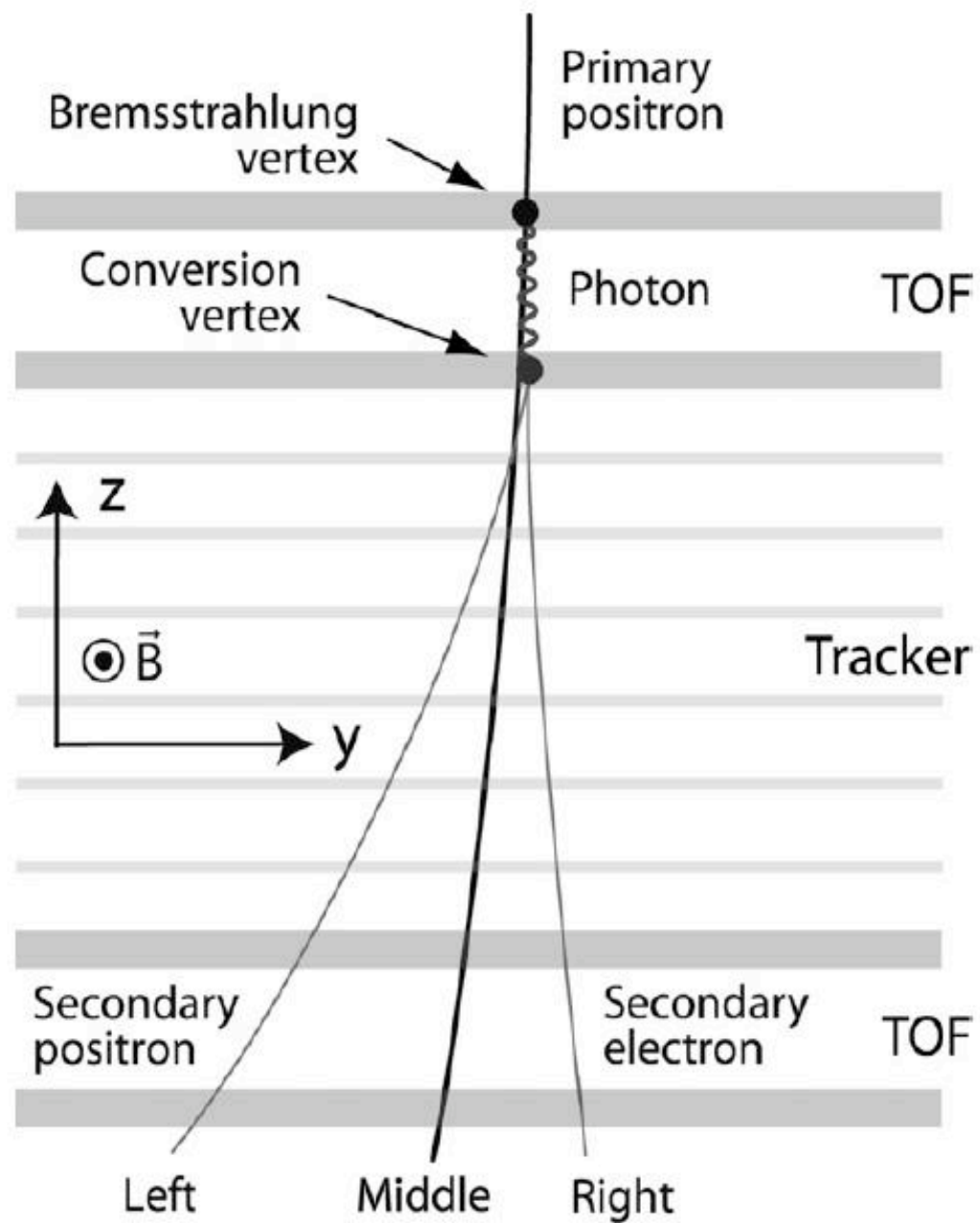


AMS-01



BESS-Polar and AMS-01 have no detector for e/m separation except Aerogel Cherenkov Counter (up to only a few GeV).

e^+/e^- detection of AMS-01



AMS-01 has demonstrated positron detection with 3-track events by bremsstrahlung+conversion pair up to 50 GeV.

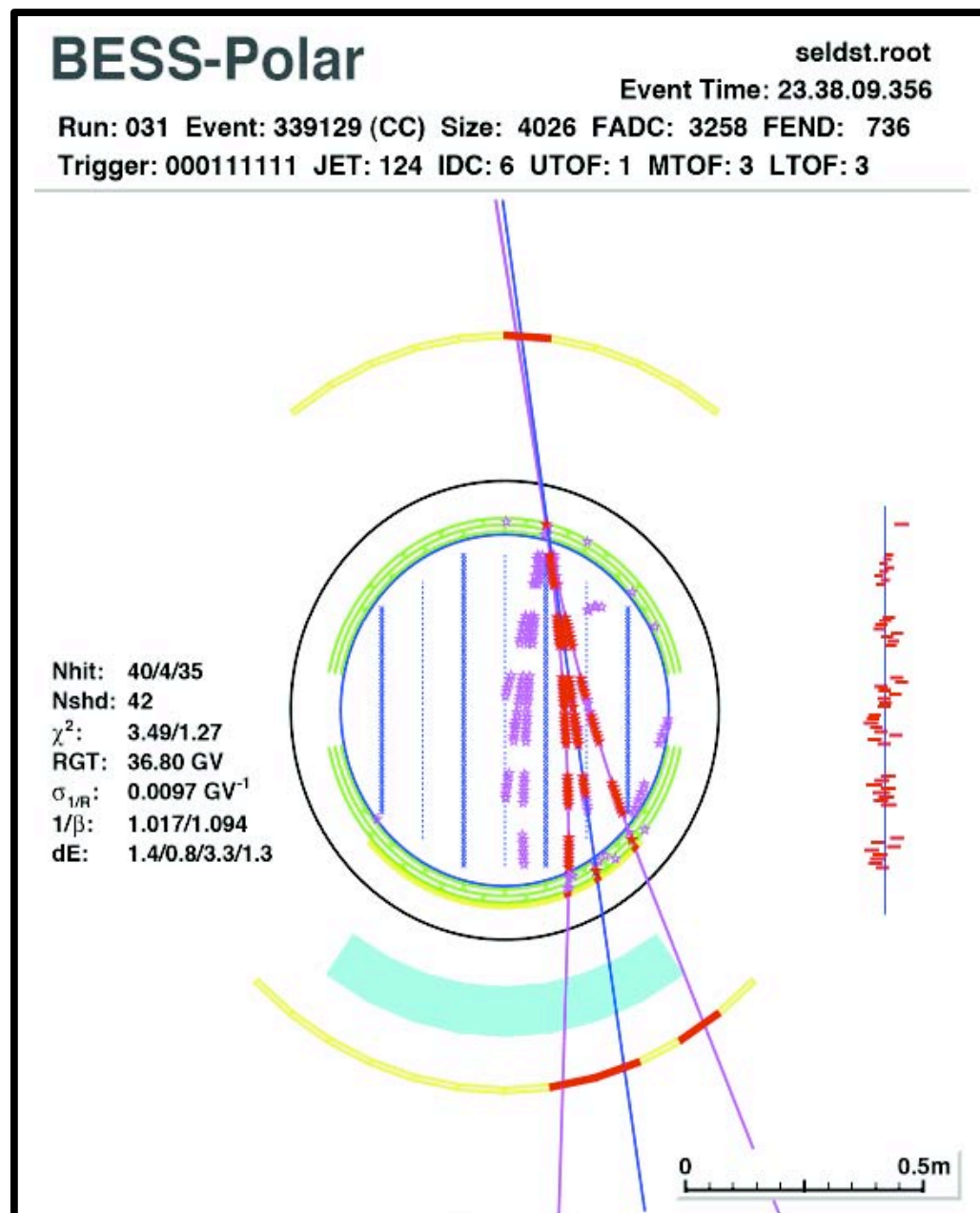
[PLB 646(2007) 145]

In principle BESS-Polar can separate e^+/e^- from m/p backgrounds with the same method.

3 track event in Polar-I data

Low energy region : e/m separation with Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

High energy region : e⁺- pair creation from brems γ



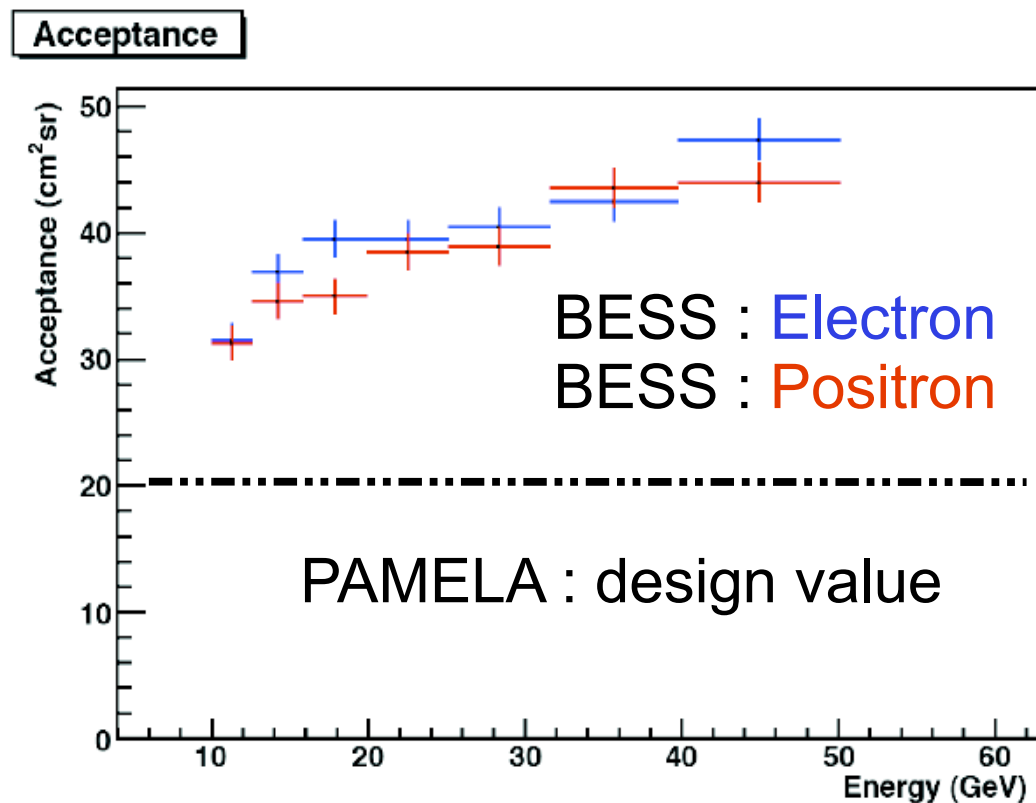
Event with 3-track by S.Haino

Pre-selection	UL
Number of long track	$N_{\text{longTK}} \geq 1$
Expected hits in JET	$N_{\text{expect}} \geq 32$
X hit position in TOF	$ X_{\text{TKU,L}} < 75\text{mm}$
Z hit position in TOF	$ Z_{\text{TKU,L}} < 450\text{mm}$
Hits in UTOF	$N_{\text{UTOF}} = 1$
Hits in LTOF	$N_{\text{LTOF}} \geq 1$
Zenith angle	$\cos\theta_{\text{zenith}} > 0.9$

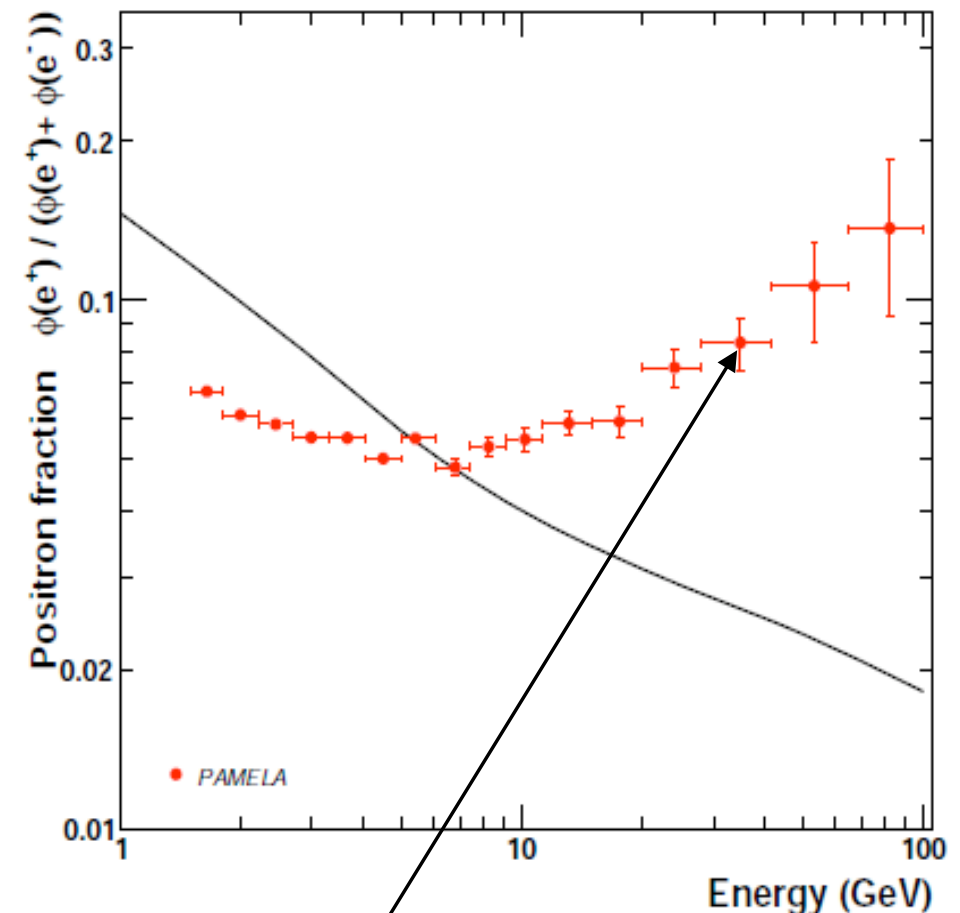
Estimation of atmospheric secondaries is very Important. To select the event observed in same residual atmosphere, zenith angle cut is performed.

Expected Positron events with Polar-2

Acceptance estimated by Polar1 MC



PAMELA positron fraction (as Reference)

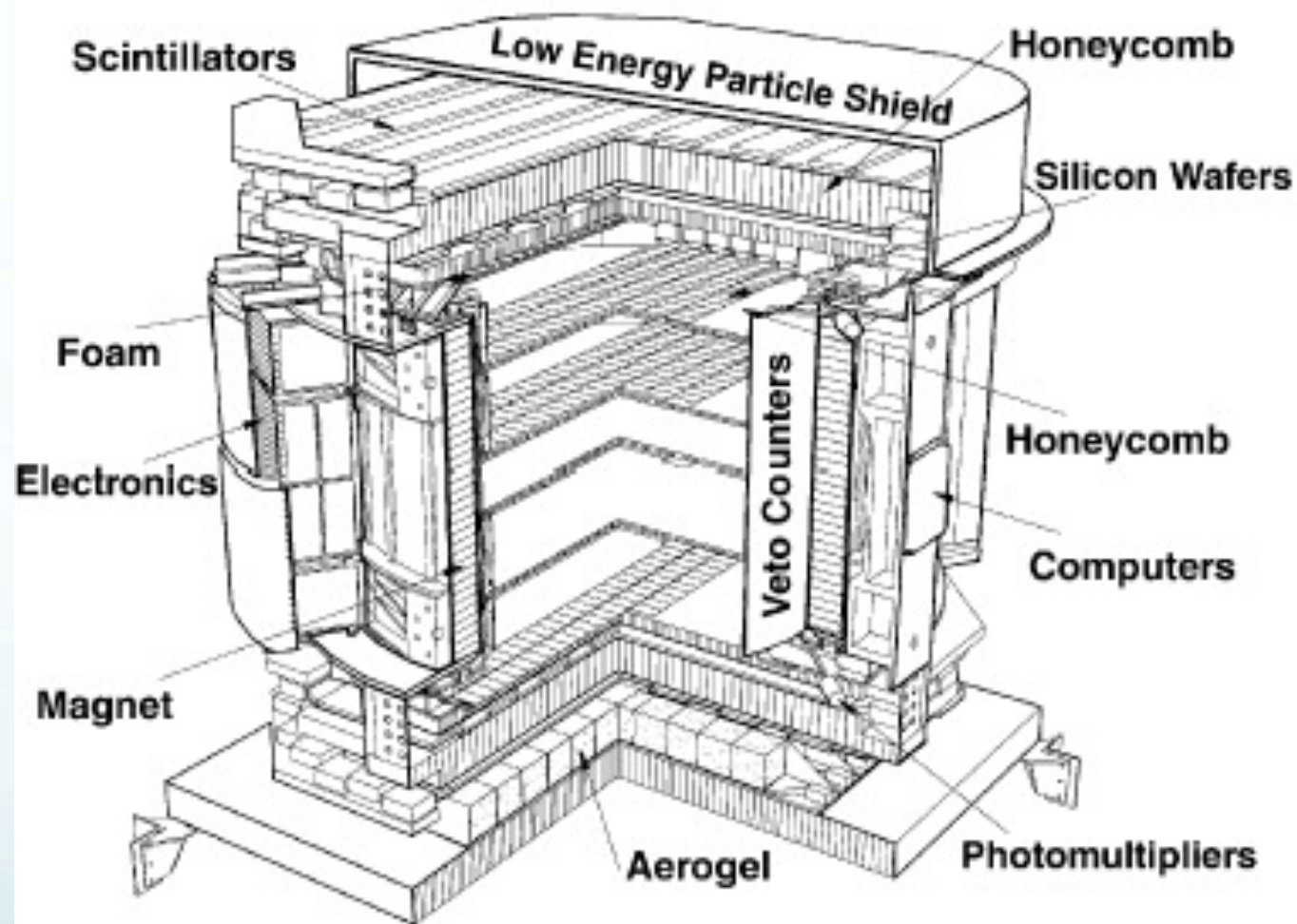


Expected positron events with Polar-2
(1.6×10^6 sec live time)

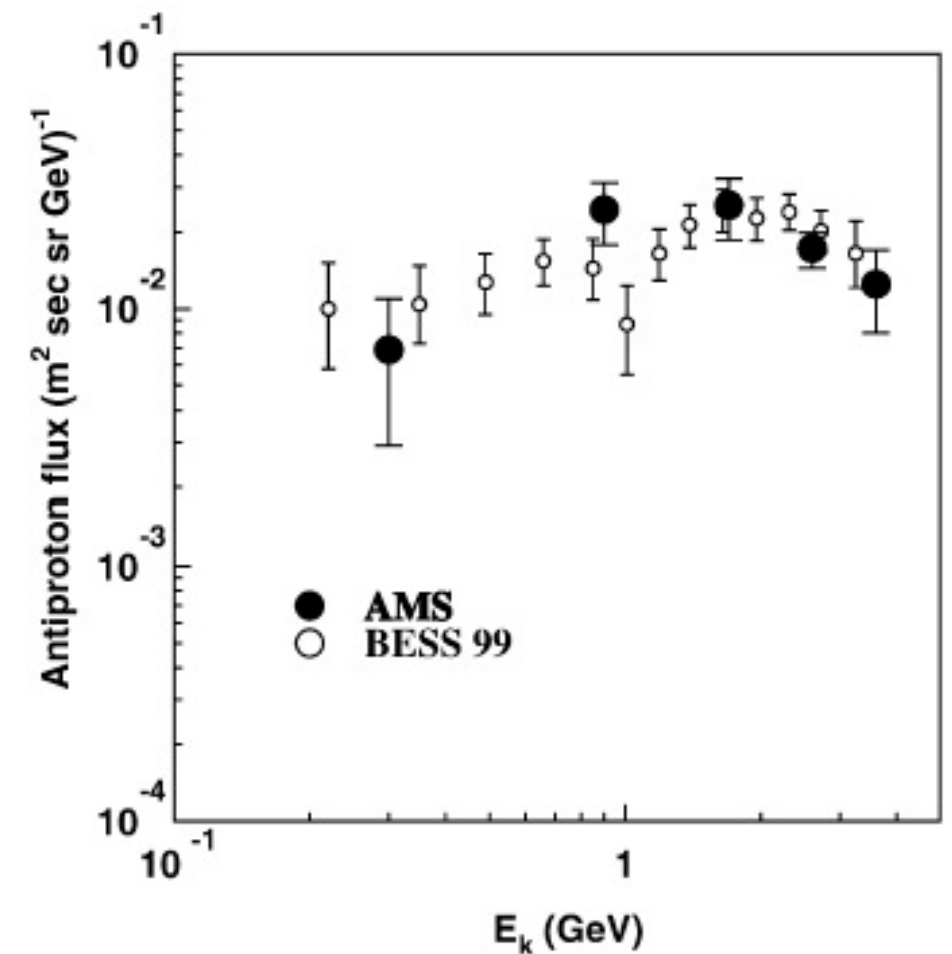
10-20 GeV (Flux $\sim 3 \times 10^{-3} [\text{m}^2\text{sr sec GeV}]^{-1}$) : ~160 events
20-50 GeV (Flux $\sim 2 \times 10^{-4} [\text{m}^2\text{sr sec GeV}]^{-1}$) : ~40 events

28-42GeV : ~60 events

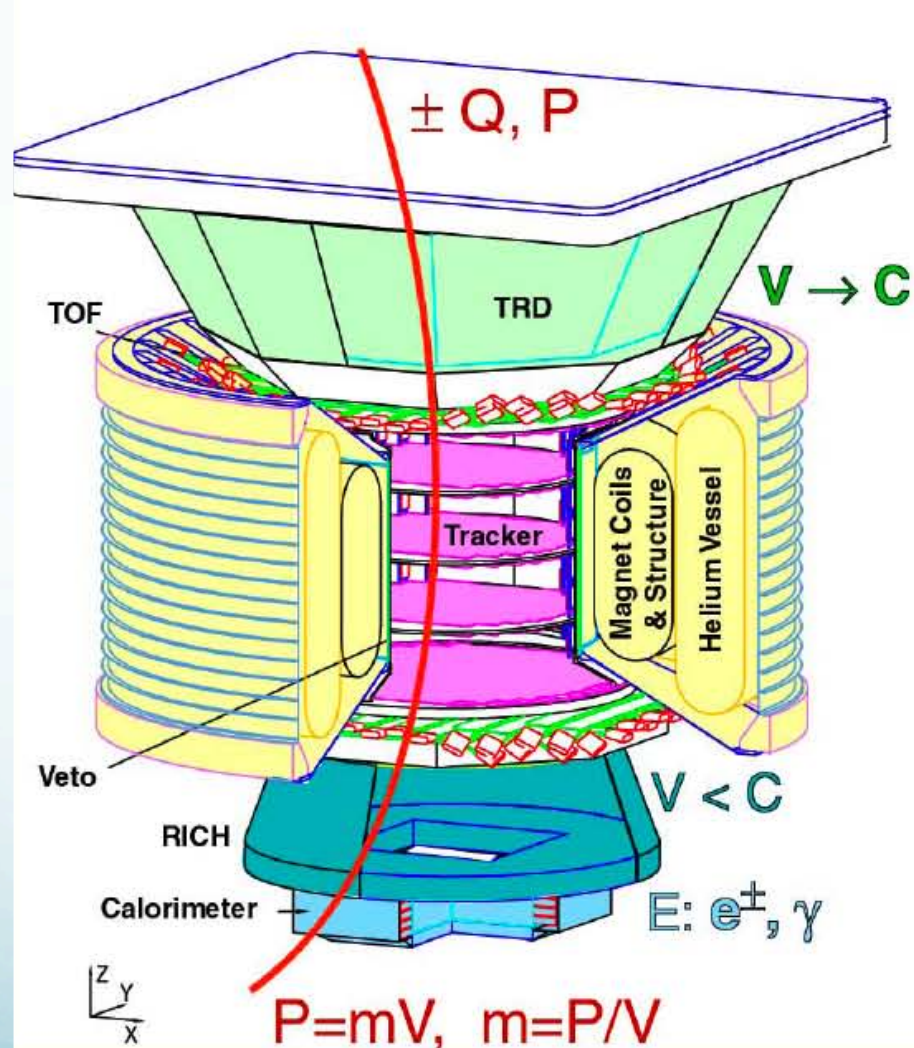
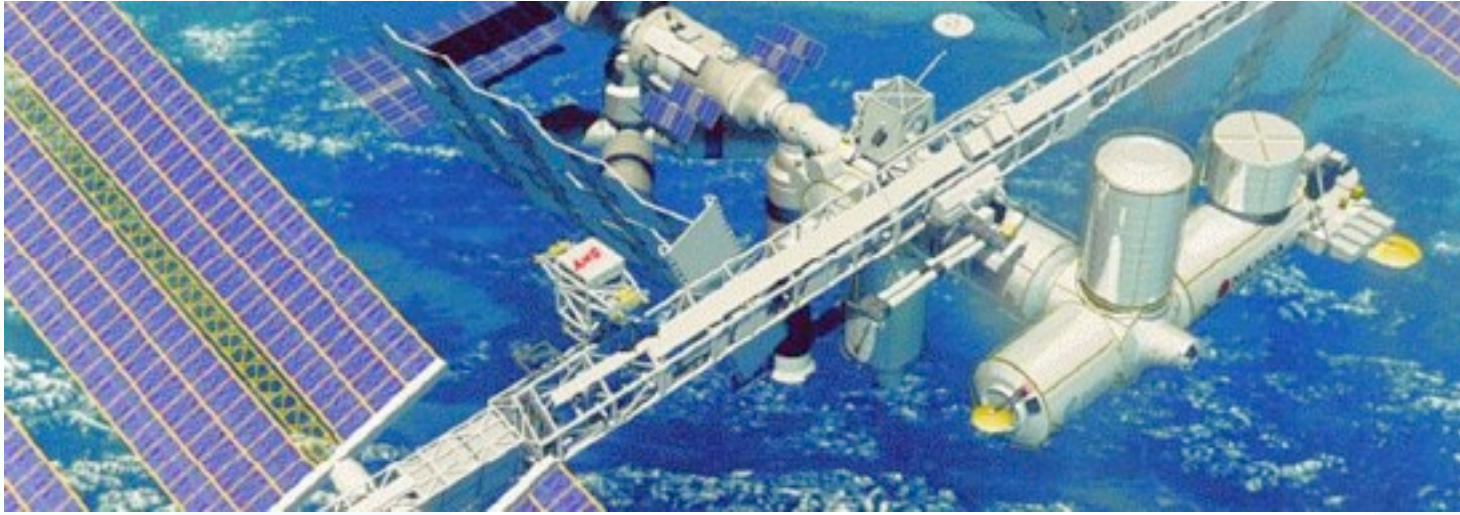
AMS-01



- Flew on Shuttle-91 in June 1998
- Antihelium/helium limit in rigidity range 1-140 GV/c: 1.1×10^{-6}



AMS-02



300 GeV	e^-	e^+	P	\bar{He}	γ	γ
TRD						
TOF						
Tracker						
RICH						
Calorimeter						

- Accettanza: $\sim 0.5 \text{ m}^2\text{sr}$
- Bending power $\sim 0.8 \text{ Tm}^2$
- TOF : trigger , β , dE/dx (Z)
- Tracker: $\pm Q$, R , dE/dx (Z<26)
- RICH : β , Z
- ECAL : E, e/p
- TRD: e/p



For detailed flow operations refer to Preliminary Manifest Option 07B-10A

Flight Assignment Working Group (FAWG) Planning Manifest

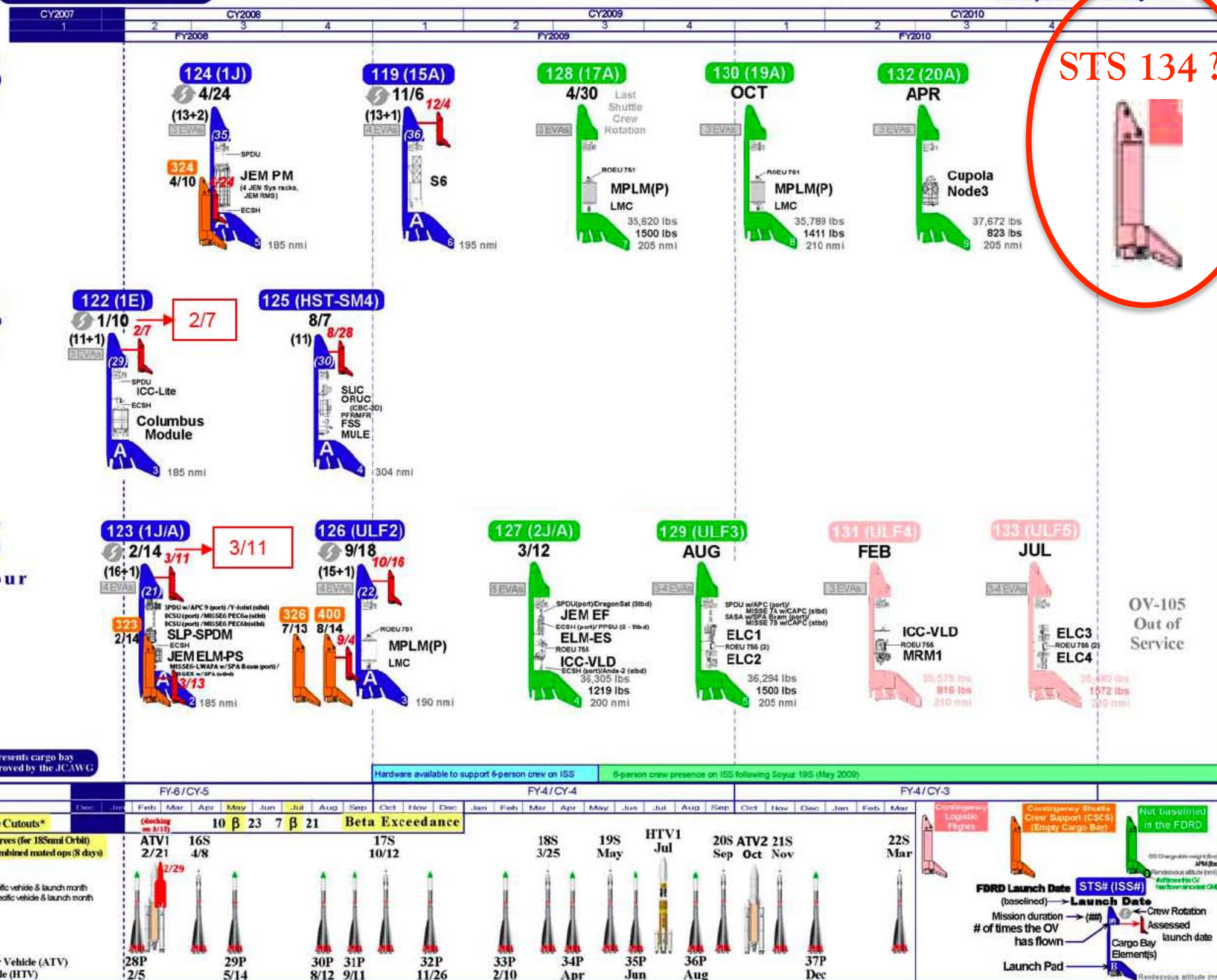
NASA Official: John Coggeshall
Prepared by: USF700C / [unclear]
Chart updated: 2 January 2008



103
Discovery

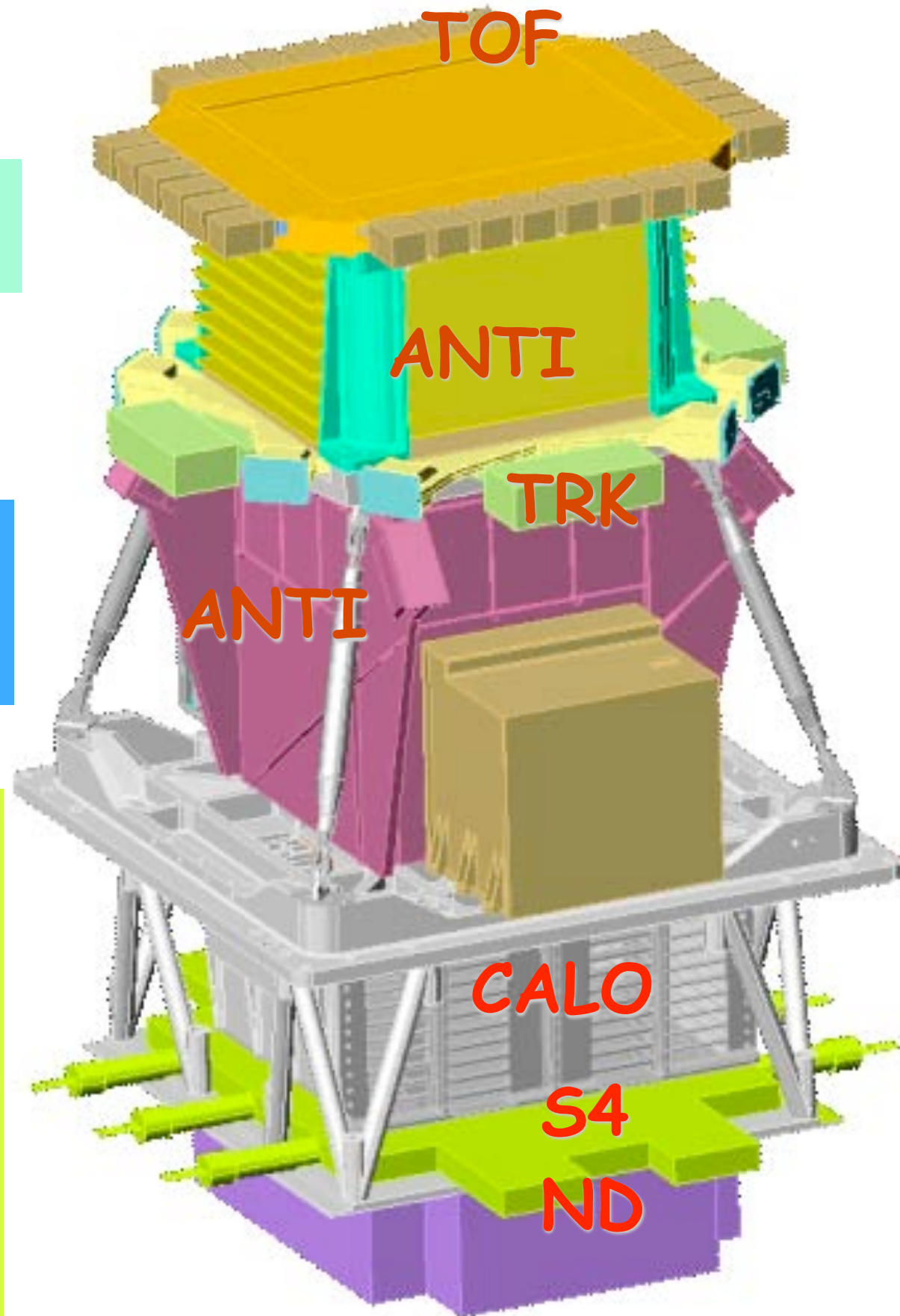
104
Atlantis

105
Endeavour



STS 134 ?

PAMELA DETECTOR



Anticoncidence system

Multiple particles rejection

Anticoincidence system

- Defines tracker acceptance
- Plastic scintillator + PMT

Si-W Calorimeter

- Imaging Calorimeter : reconstructs shower profile discriminating e^+/p and p/e^- at level of $10^{-4} \sim 10^{-5}$
- Energy Resolution for e^\pm
 $\Delta E/E = 15\% / E^{1/2}$.
- Si-X / W / Si-Y structure
22 W planes
- $16.3 X_0 / 0.6 I_0$

Time-of-flight

- Level 1 trigger
- particle identification (up to $1\text{GeV}/c$)
- dE/dx
- Plastic scintillator + PMT
- Time Resolution ~ 70 ps

Si Tracker + magnet

- Permanent magnet $B=0.4\text{T}$
- 6 planes double sided Si strips $300 \mu\text{m}$ thick
- Spatial resolution $\sim 3\mu\text{m}$
- MDR = $740 \text{ GV}/c$

S4 and Neutron detectors

- Extend the energy range for primary protons and electrons up to 10 TeV
- Plastic Scintillator
- 36 ^3He counters in a polyetilen moderator

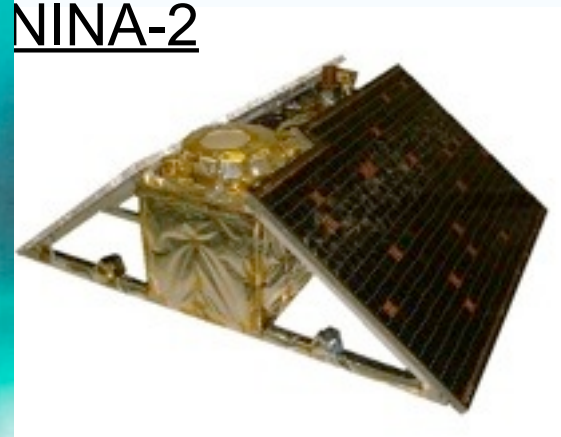
Past, present and future experiment

MASS-89, 91, TS-93,
CAPRICE 94-97-98



NINA-1

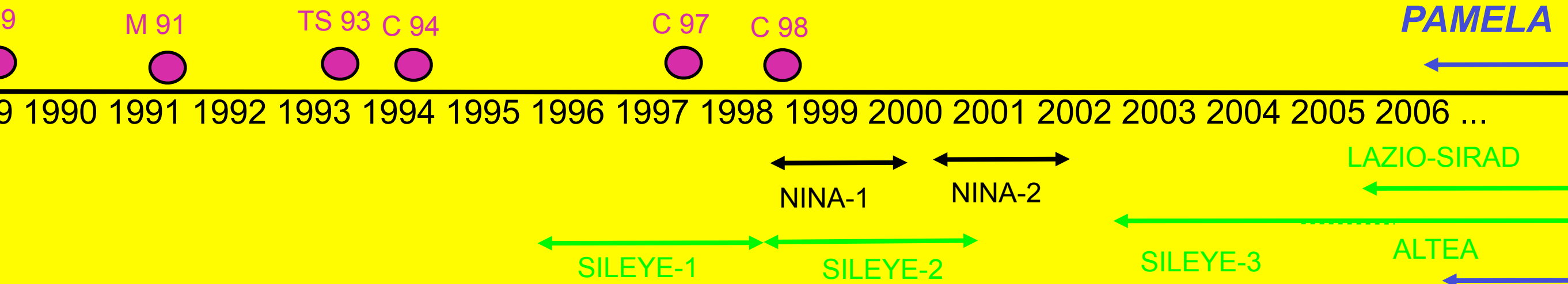
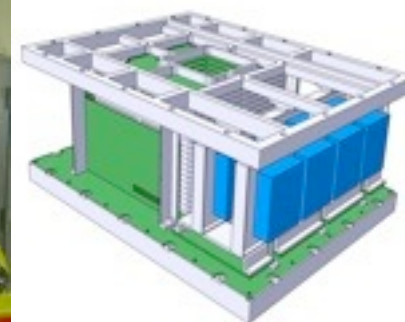
NINA-2



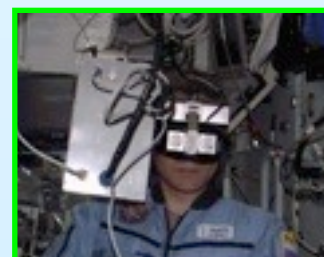
PAMELA



SIRAD



SILEYE-1



SILEYE-2



SILEYE-3/ALTEINO:



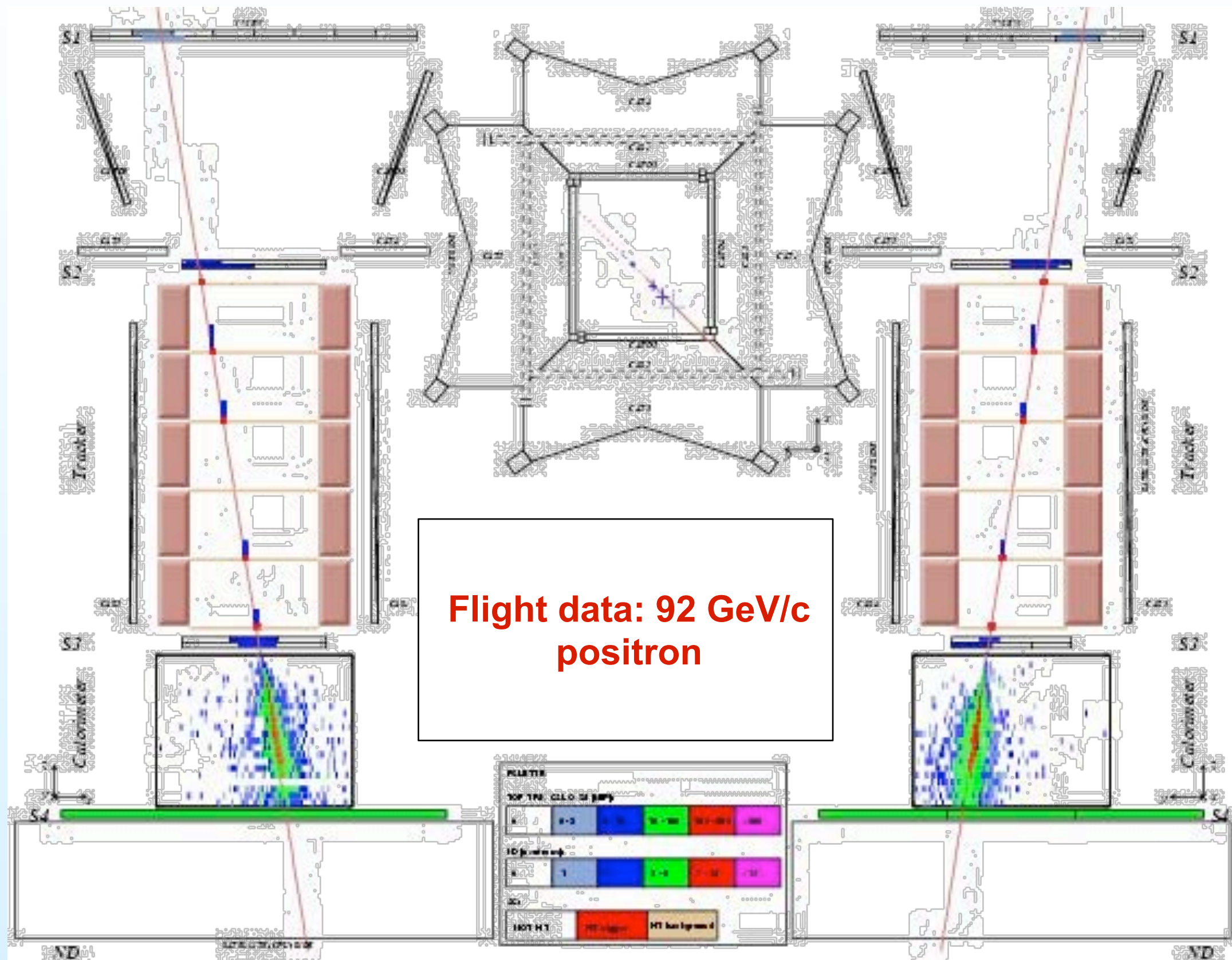
LAZIO-SIRAD

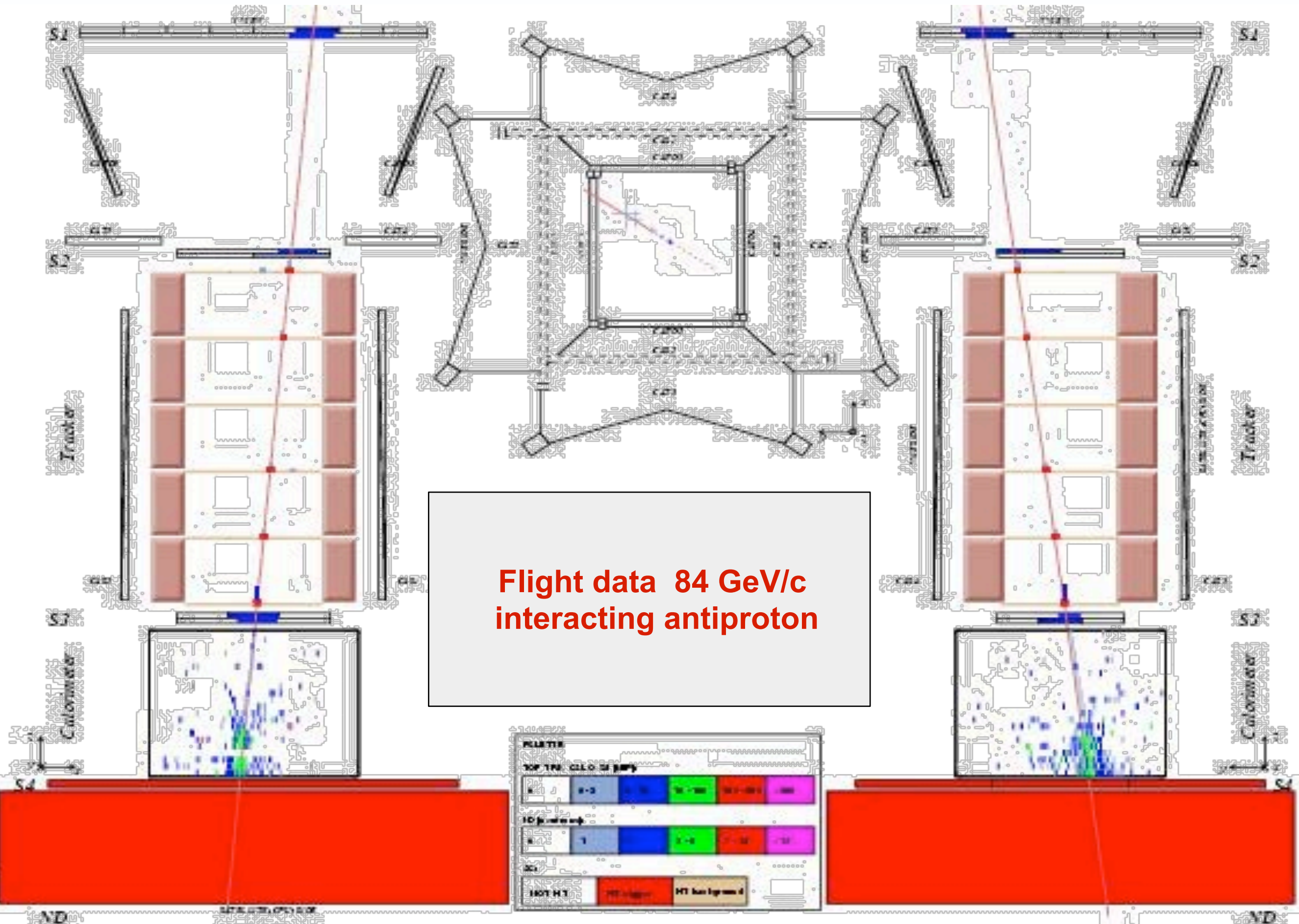


SILEYE-4/ALTEA

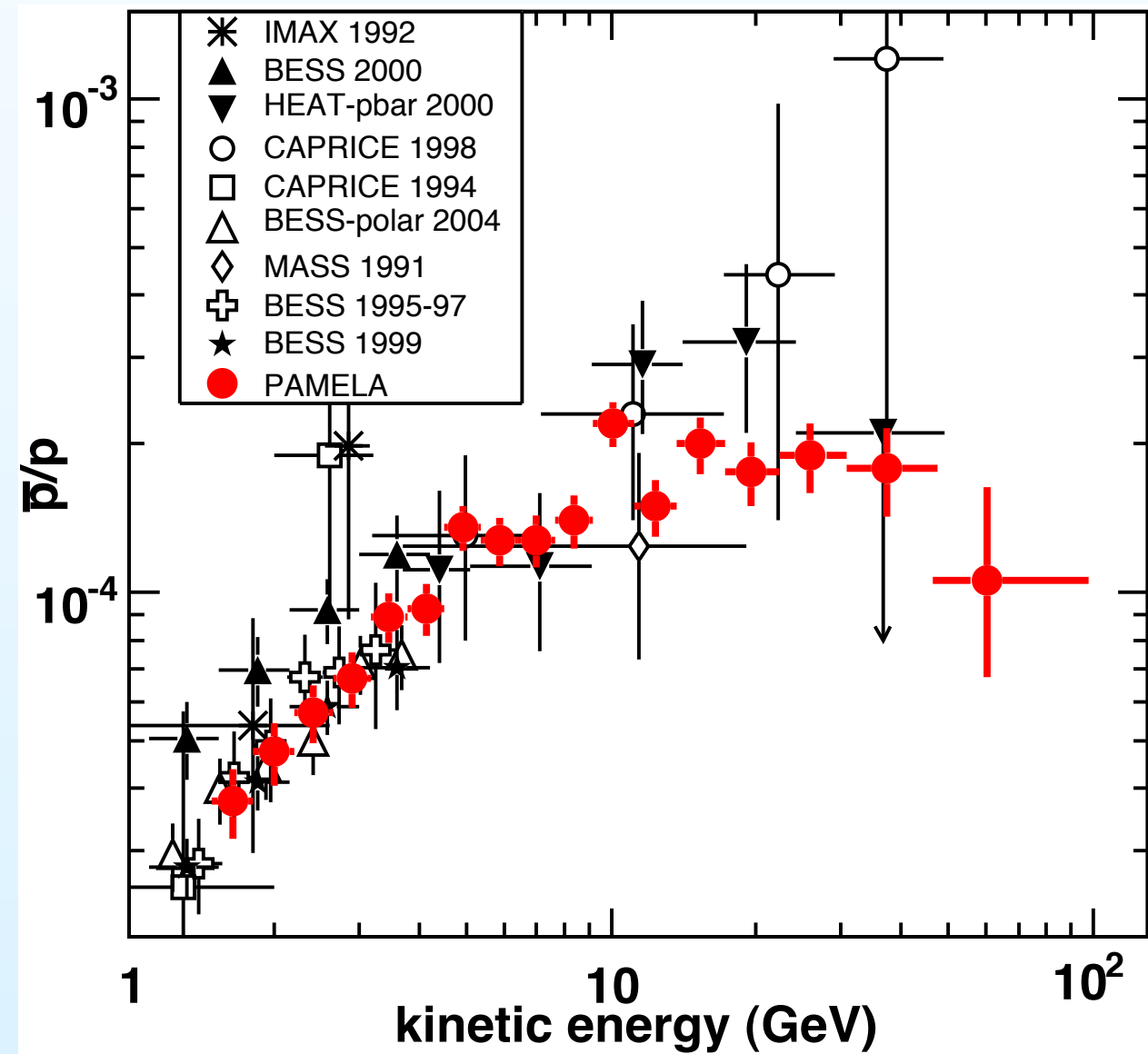
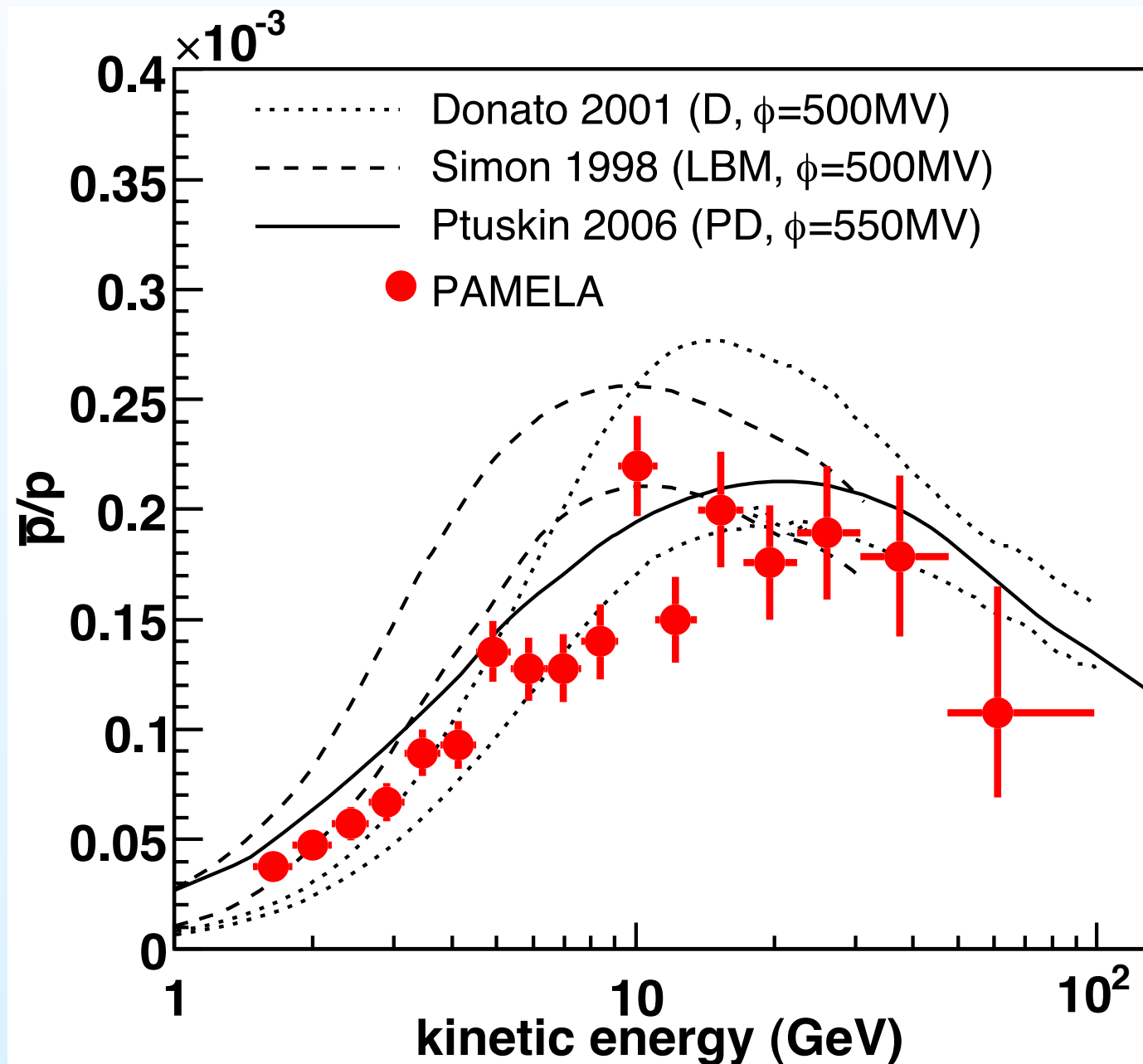


- PAMELA flight model before delivery to Samara, March 2005
- PAMELA launched into orbit June 15, 2006 from Baikonur, rides on a Russian Resurs satellite.
- 71 degree near-polar elliptic orbit, 300 to 600 km. Expected minimum 3 years lifetime.
- Normal Operation, taking data.



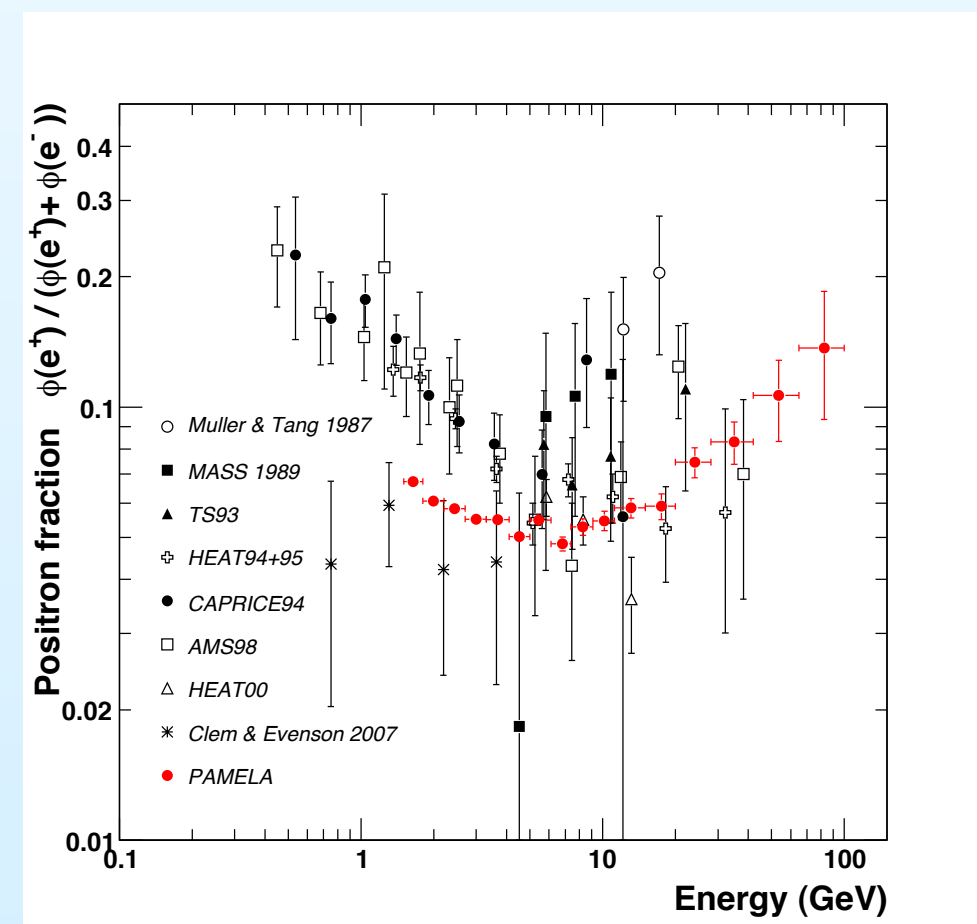
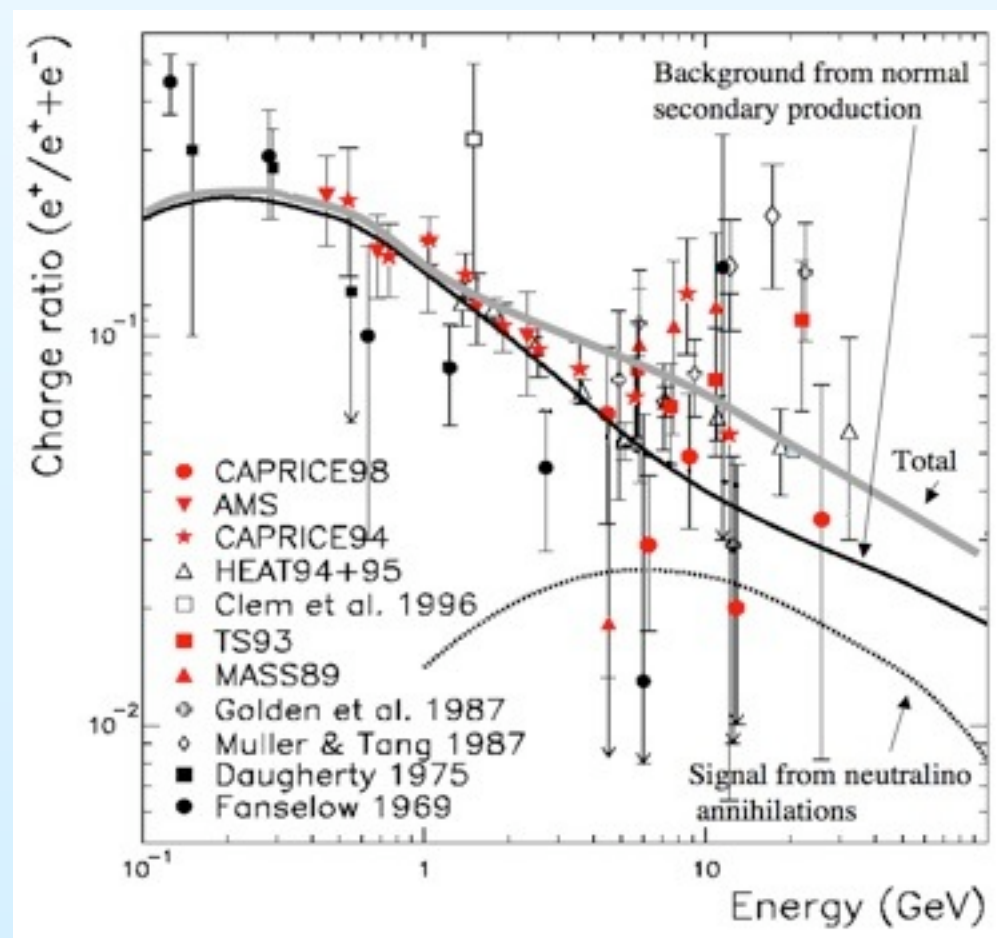


Current status of Antiproton-Proton Ratio



Pamela Positrons

- Till August 30th about 20000 positrons from 200 MeV up to 200 GeV have been analyzed
- More than 15000 positrons over 1 GeV
- Other eight months data to be analyzed



- Supersymmetric neutralino cannot explain the data. (Majorana particle) no hard positrons directly (helicity suppression of light fermions in the annihilation process)
- Better a Dirac particle, or a spin-1 particle like Kaluza-Klein dark matter
- Photons radiated from charged virtual particles (“virtual” internal bremsstrahlung (IB), or direct emission) can have a significant impact on the resulting gamma-ray spectrum, leading not only to an even more pronounced cutoff, but also to clearly observable bump-like features at slightly lower energies
- very large boost factors are needed.
- a strong enhancement can also be expected in the gamma-ray flux at photon energies close to m_{neutral}

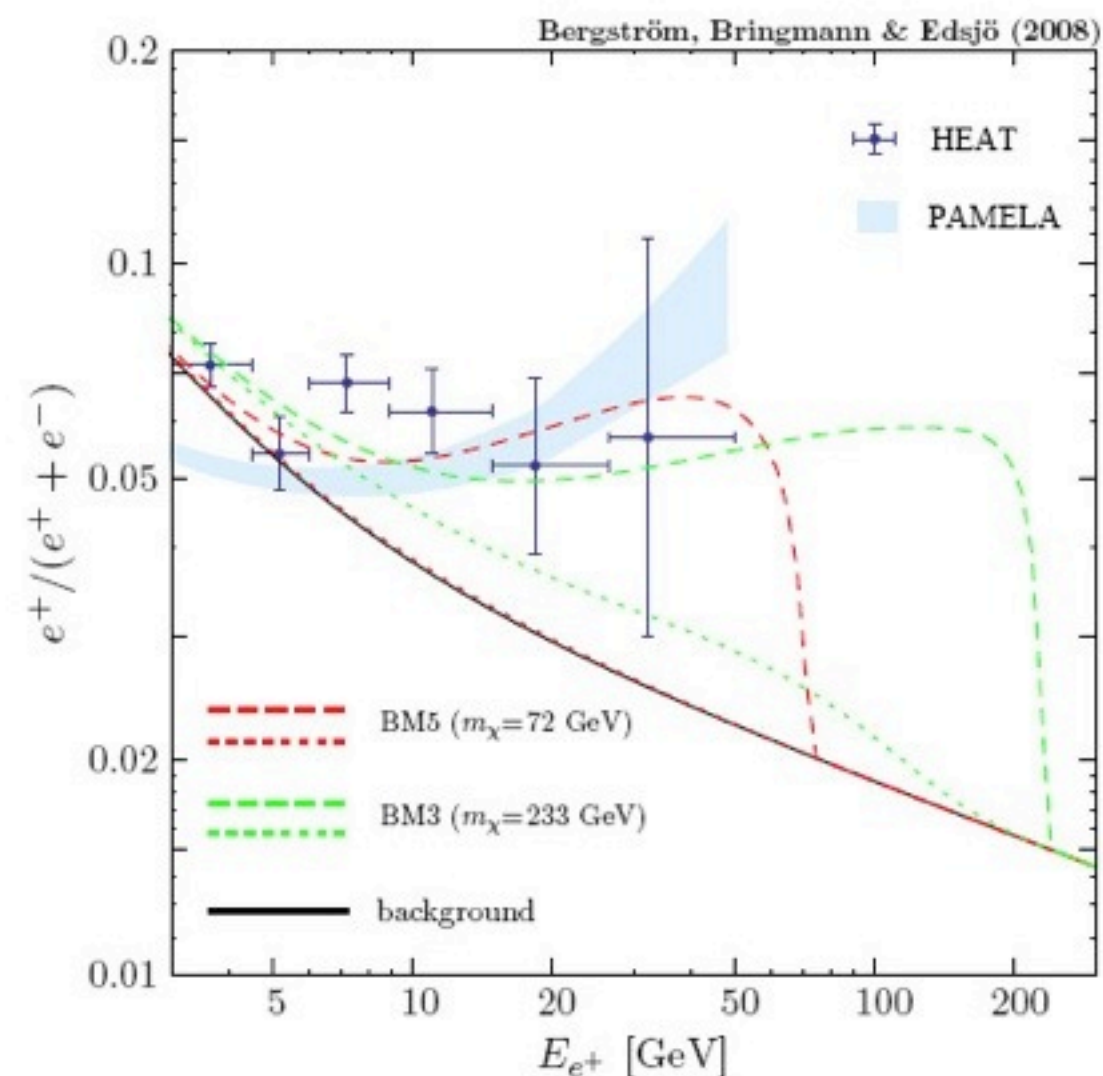


FIG. 3: The solid line is the expected flux ratio $e^+/(e^+ + e^-)$ as calculated following [32]. The data points are the combined HEAT data [33] and the light shaded area roughly corresponds to the (so far unpublished) PAMELA data [5]. Furthermore, the expected flux ratio for our benchmark models is shown without (dotted lines) and after taking into account radiative corrections (dashed lines). See text for further details.