



電子(+陽電子)の高精度観測による加速源の解明



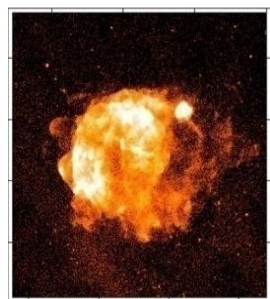
早稲田大学
理工学術院総合研究所
研究招聘教授、名誉教授
鳥居祥二



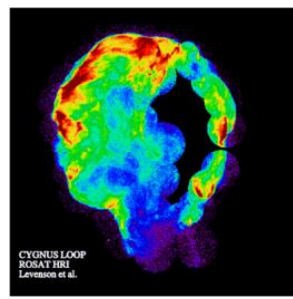
WASEDA University

CALET提案時の主要目的 —電子近傍加速源の直接検出—

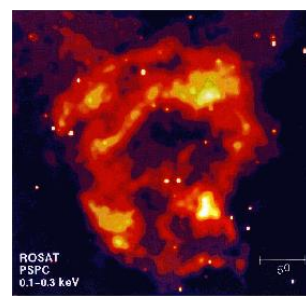
1TeV以上の電子の天体の加速源は、近傍にある(< 1kpc), 若い(10万年以内) 超新星残骸に限られ、そのような候補は下に示す3つしかない。



Vela

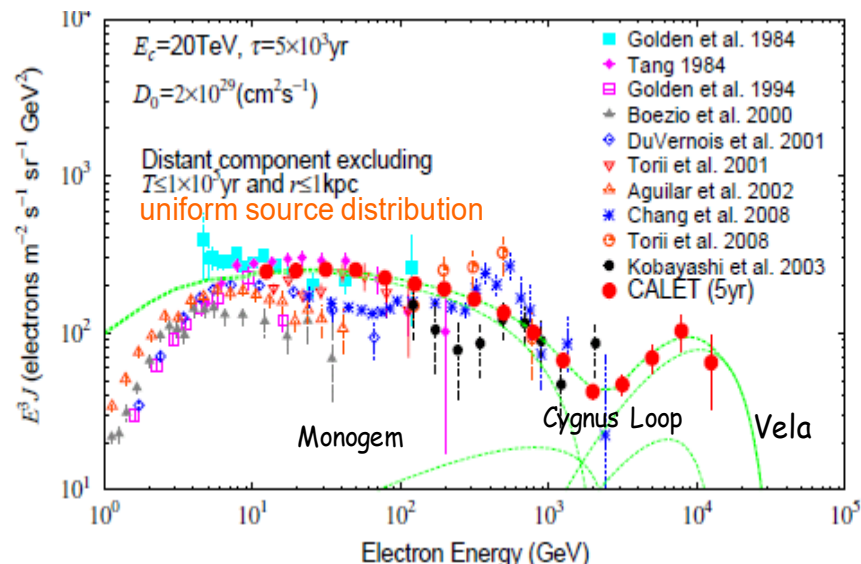


Cygnus Loop



Monogem

CALETによる長期間観測による予測
これらの近傍加速源の検出が期待される



ポート占有
実験装置
共同研究検討
結果サマリ
(2009.9.8)

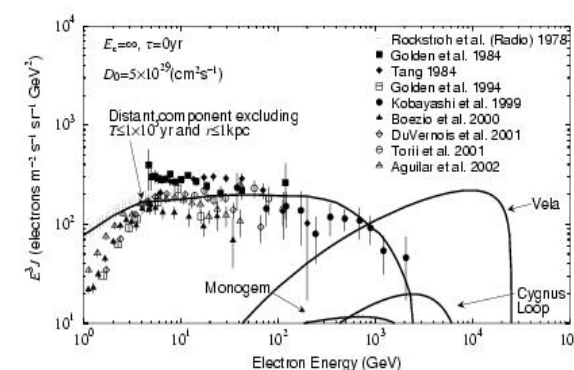
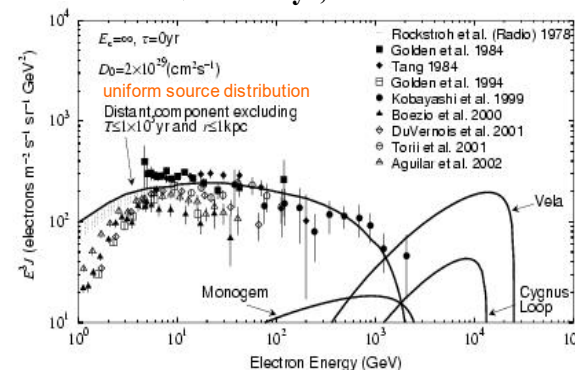
CALET: CALorimetric **Electron** Telescopeという名称の由来

近傍加速源から期待される電子スペクトルの観測により、宇宙物理学にとって重要な、加速上限エネルギー(E_c)、加速期間 (ΔT)、銀河内拡散係数(D_0)の情報がえられる。以下に、モデル計算の例を示す。

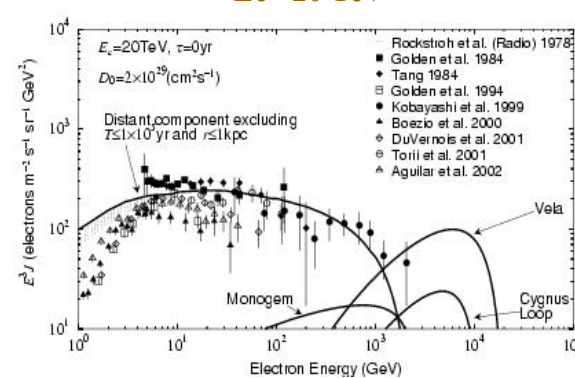
Kobayashi et al. ApJ (2004)

$E_c = \infty, \Delta T = 0 \text{ yr}, D_0 = 2 \times 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$

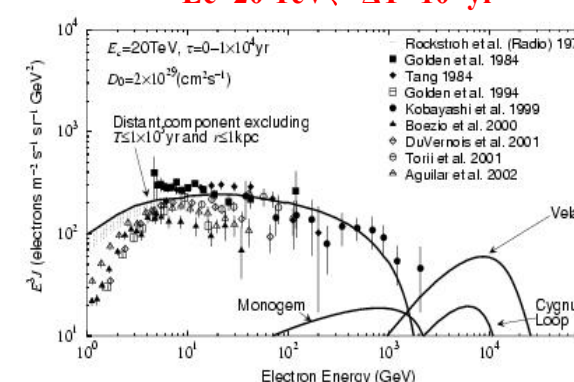
$D_0 = 5 \times 10^{29} \text{ cm}^2/\text{s}$



$E_c = 20 \text{ TeV}$



$E_c = 20 \text{ TeV}, \Delta T = 10^4 \text{ yr}$



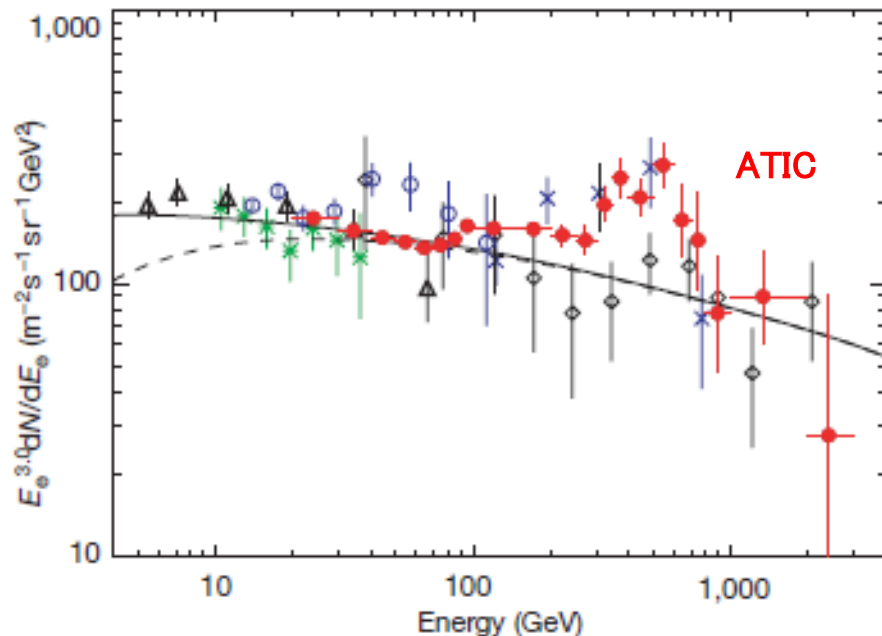
提案時以降の電子観測における新たな展開

選定時以降に、**電子・陽電子観測にあらたな展開**があり、300–800 GeVにおける観測結果から新たなソースとして、**近傍パルサーや暗黒物質を示唆する観測結果**が公表された。この結果、**観測結果の解釈をめぐって多くの理論的解釈に関する論文が出版**されている。このため、このエネルギー領域での精密観測が非常に重要になっている。

Nature Vol. 456 2008.11.20

An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV

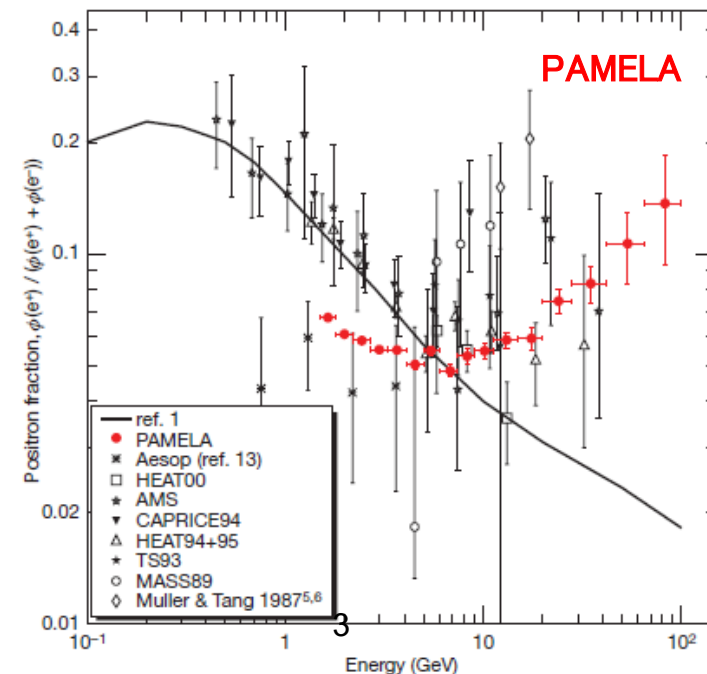
電子・陽電子エネルギースペクトル



Nature Vol. 458 2009.4.2

An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV

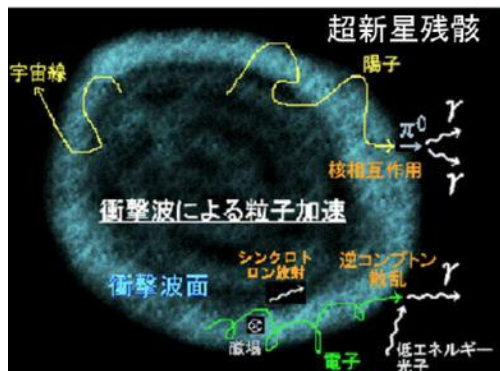
陽電子の電子・陽電子に占める割合



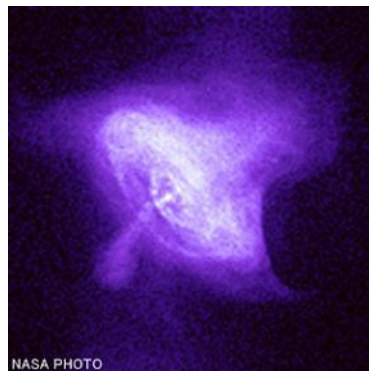
電子の起源：天体 vs. 暗黒物質

宇宙物理的起源

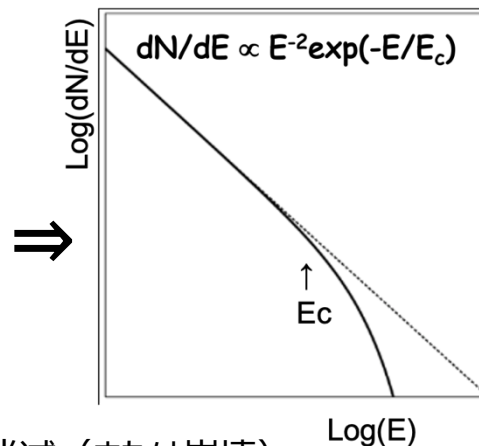
超新星残骸における衝撃波加速(電子)



パルサー風星雲における加速
高速回転 + 強力な表面磁場により電子・陽電子プラズマを誘導



生成スペクトル
(冪関数 + カットオフ)



銀河内伝播機構

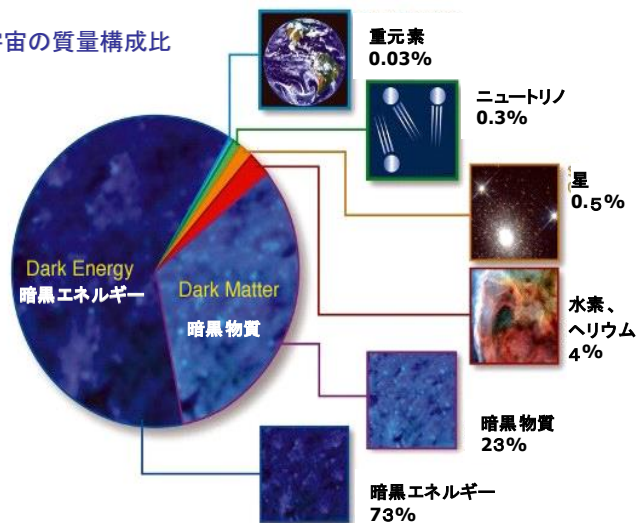
- 拡散過程 ($B \sim 3 \mu\text{G}$)
- エネルギー損失
 $dE/dt = -bE^2$
(シンクロトロン放射 + 逆コンプトン散乱)

TeV領域の電子・陽電子は近傍加速源
($T < 10$ 万年, $R < 1 \text{ kpc}$) のみで生成され、
候補となる超新星残骸は数例に限られる

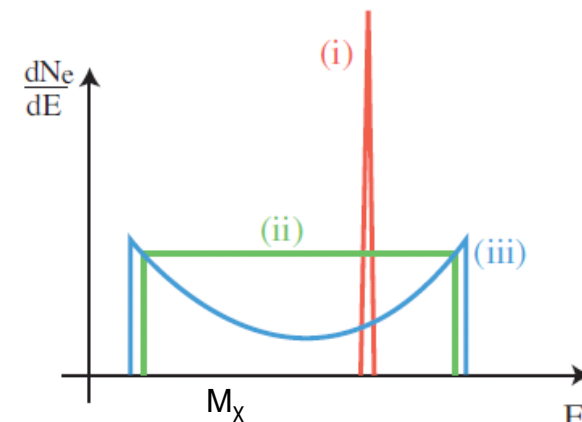
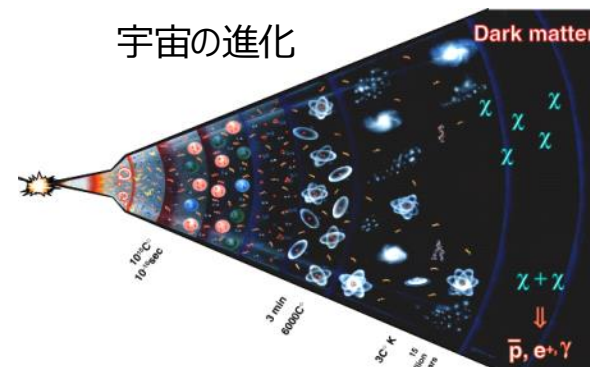
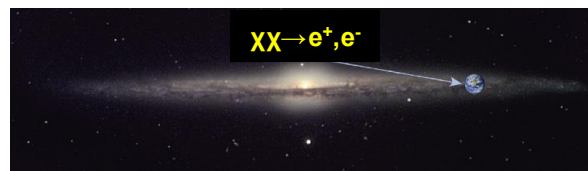
素粒子物理的起源

宇宙論観測による暗黒物質の割合

宇宙の質量構成比



暗黒物質 (WIMP) の対消滅 (または崩壊)



生成スペクトル (WIMPの種類に依存)

- (i) 単一エネルギー：電子・陽電子対直接生成(LKP)
- (ii) 一様分布：一様分布で崩壊する中間粒子を経由
- (iii) ダブルピーク：双極的分布で崩壊する中間粒子を経由(SUSY)

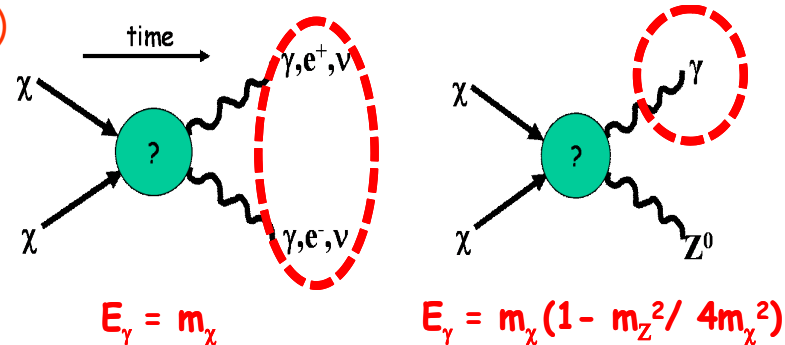
暗黒物質の検出原理（間接測定）

暗黒物質の最有力候補は、宇宙初期に生成された
Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

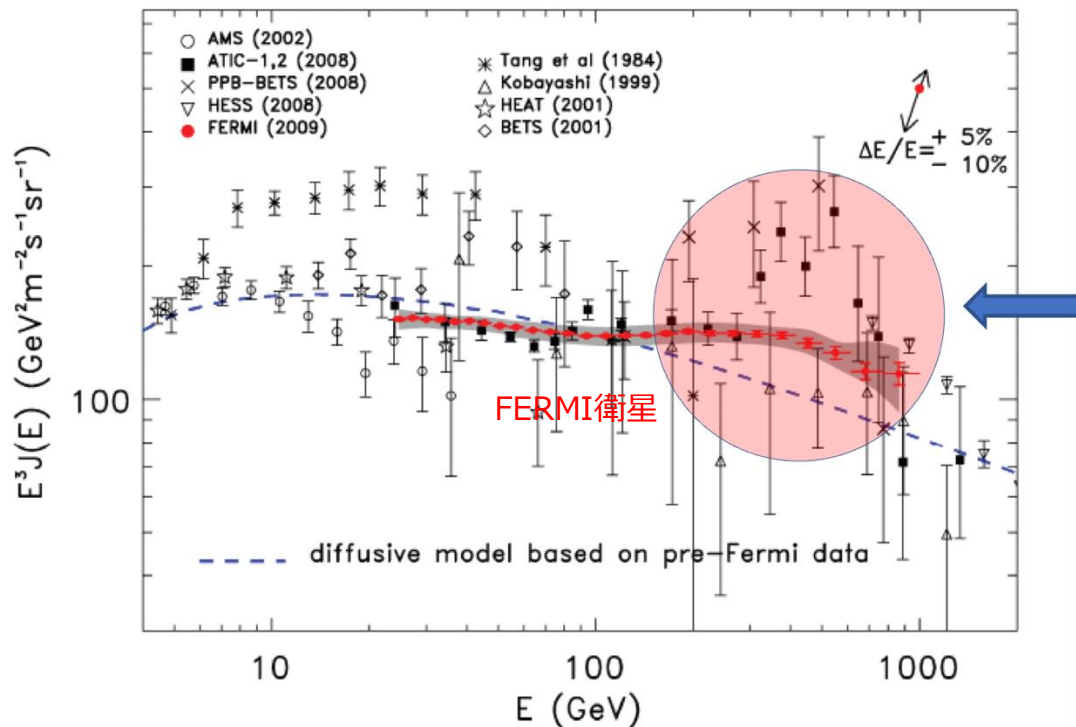
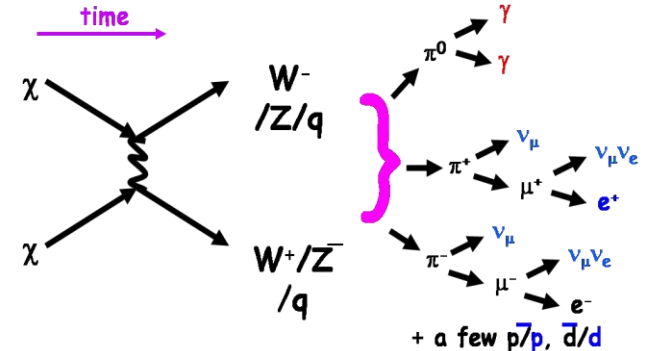
宇宙空間での（間接的）検出方法：

WIMPの質量は数10GeV~TeVであると考えられる
ので、それらの対消滅や崩壊で生じる陽電子やγ線の
検出が可能な高精度な大型観測装置が必要である

(1) WIMP が単一エネルギーの粒子を生成



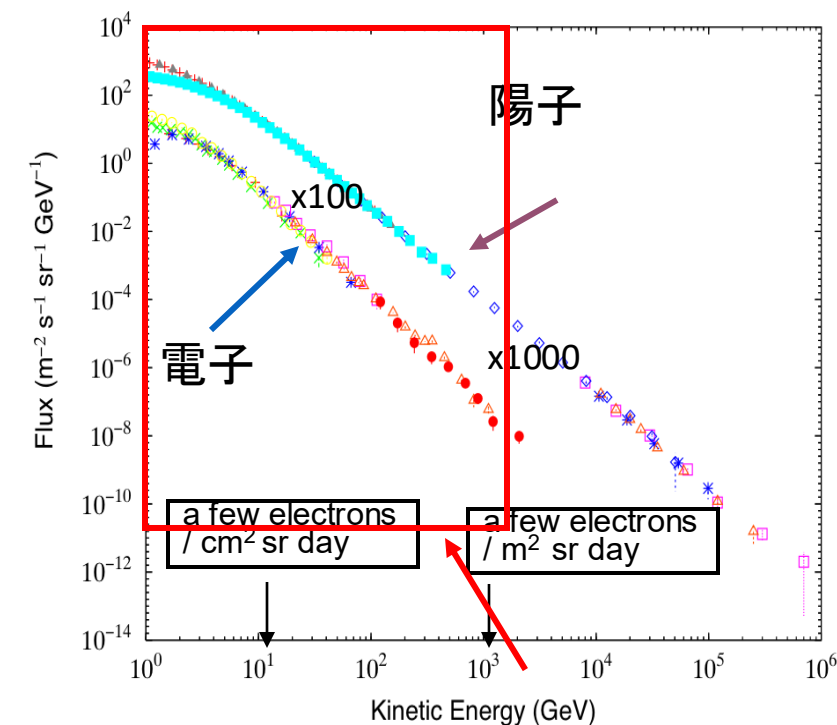
(2) WIMP が連続的エネルギーを持つ粒子を生成



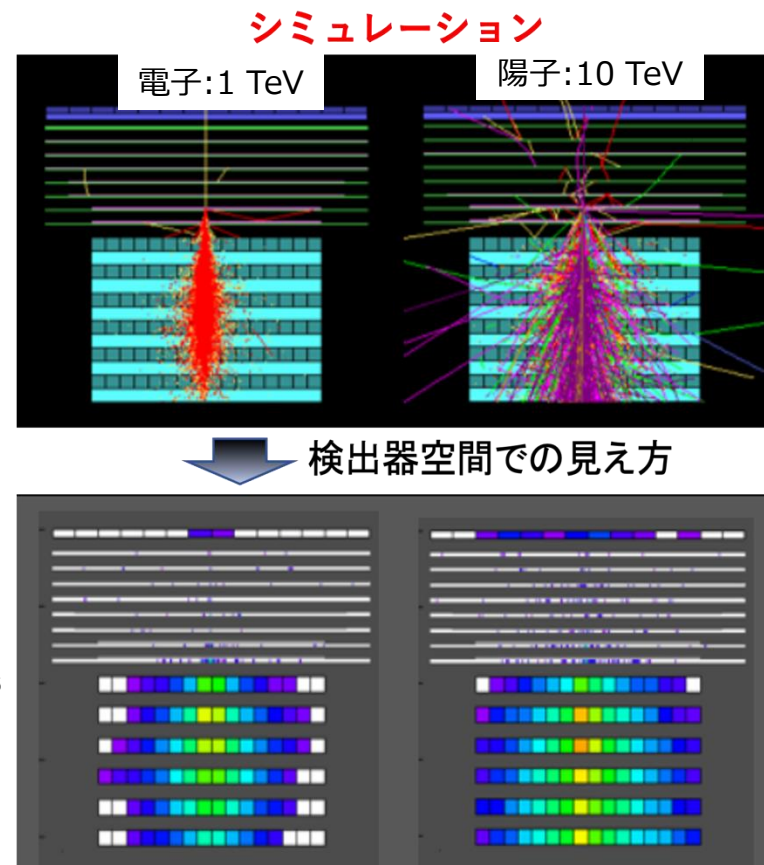
CALET提案時(～2010年)の電子(+陽電子)の観測結果
(気球実験、FERMI衛星など)では、宇宙物理的な起源では
説明が困難な、（単一冪からの予測に対して）**フラックスの**
“過剰”が600ギガ電子ボルト近辺に見られていた。

これが暗黒物質の寄与によるものかどうかを確かめるためには、
高精度な大型観測装置による**長期観測**が**不可欠**である。

電子/陽子（電荷の絶対値が同じ） 識別の必要性

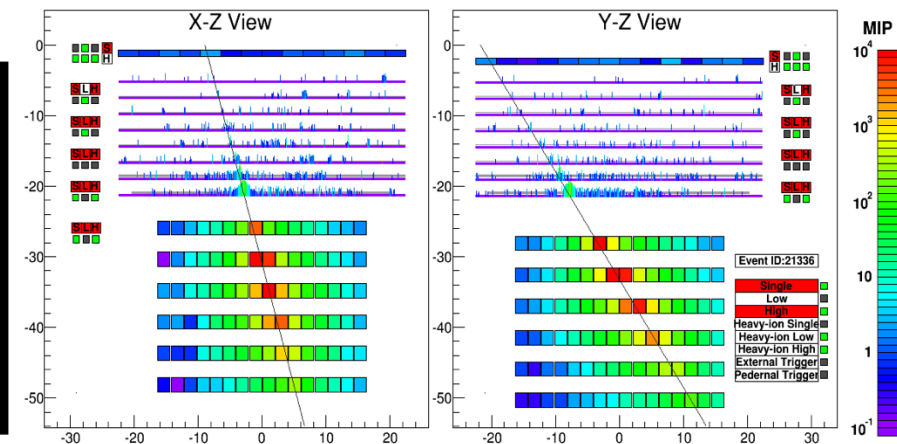


電子成分は陽子の $1/100 \sim 1/1000$
 $\Rightarrow$ 高性能粒子識別必須

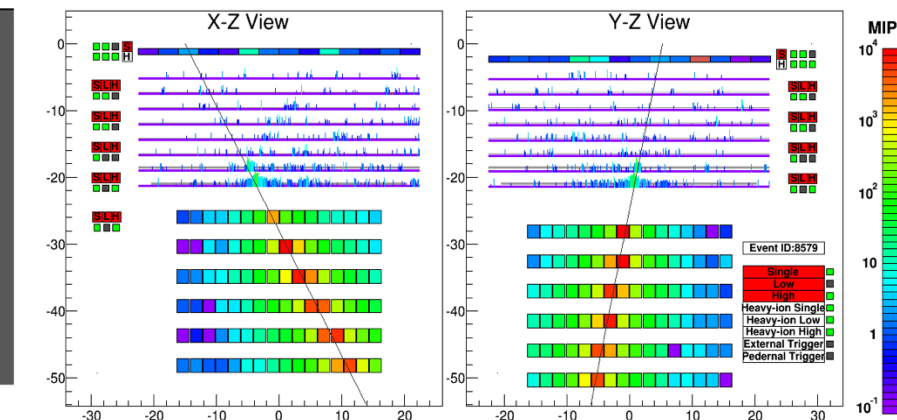


実際の観測イベント

電子: $E = 3.05 \text{ TeV}$



陽子: $\Delta E = 2.89 \text{ TeV}$: $E = \sim 10 \text{ TeV}$



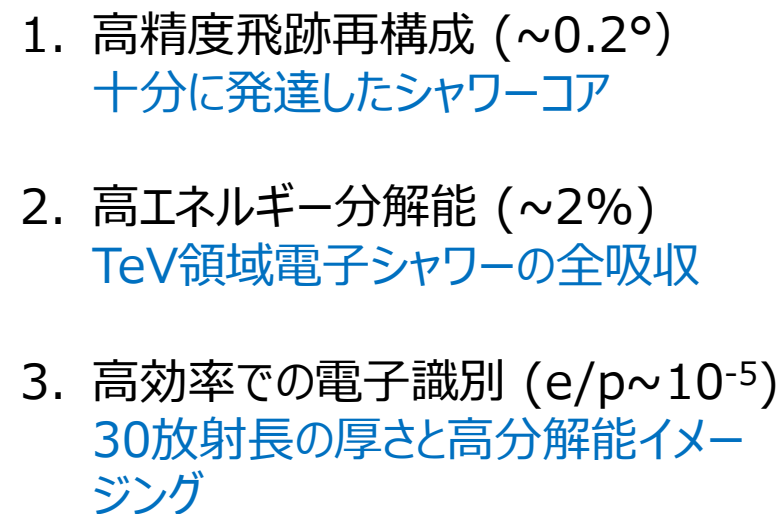
□ シャワー形状の違いを用いて、電子観測における陽子数を $\sim 10^{-5}$ に削減可能

□ ガンマ線、陽子原子核をCHD, IMCでの電荷測定により識別可能

*) CHDは電荷の正負は判別できないので、CHD, IMCでの電荷測定では陽子、電子の識別はできない



対応する陽子 バックグラウンド



(軌道上データ; 検出器のサイズ: 単位 cm)

CALETは全電子の観測に最適化された検出器

⇒ TeV領域を含む全電子スペクトルの微細構造観測

2組の測定値 (F_E , R_E)による選別 (<476 GeV)

- 100-1000倍の陽子の中から電子を識別
- シャワー形状の違いを用いて電子/陽子を識別
- $K = \log_{10}(F_E) + 0.5 R_E$ (/cm)

データ解析で用いたパラメータの定義

$$R_E = \sqrt{\frac{\sum_i \{ \sum_j \Delta E_{i,j} \times R^2_{i,j} \}}{\sum_i \sum_j \Delta E_{i,j}}} \quad F_E = \frac{\sum_j \Delta E_{12,j}}{\sum_i \sum_j \Delta E_{i,j}}$$

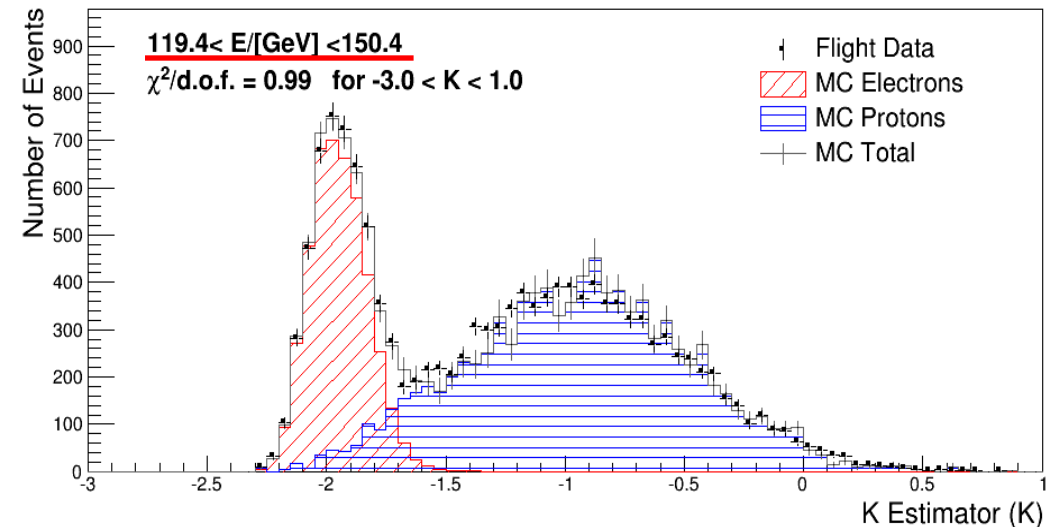
(シャワー横広がり) (シャワー発達)

機械学習(Boosted Decision Trees) による選別

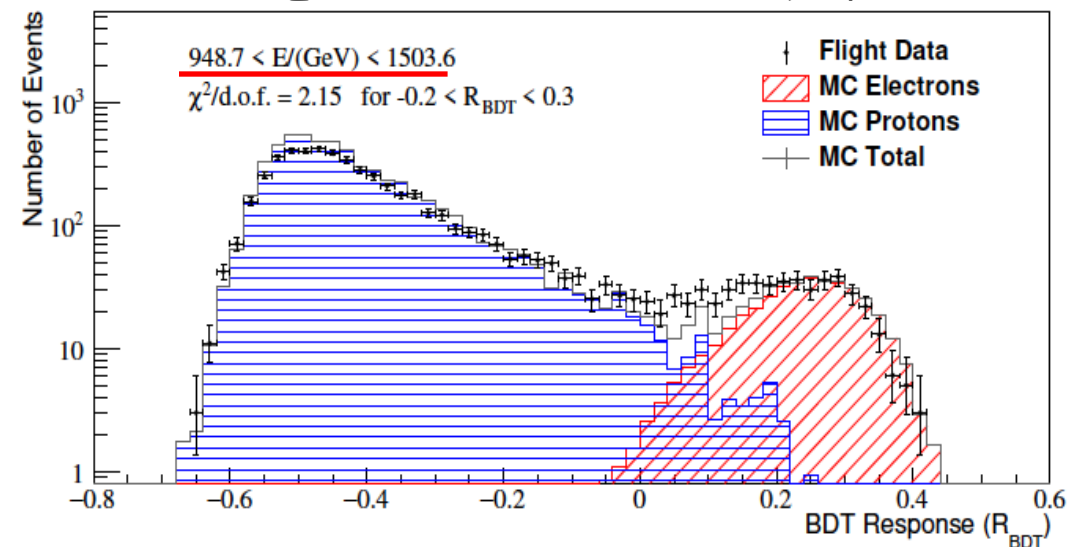
高エネルギー領域での識別性能向上のため、選別に使用するパラメータを増やし、機械学習により選別条件を最適化。

陽子混入割合
 10 GeV-1 TeV <5%
 1-7.5 TeV ≤10%

電子と陽子のK パラメータの分布

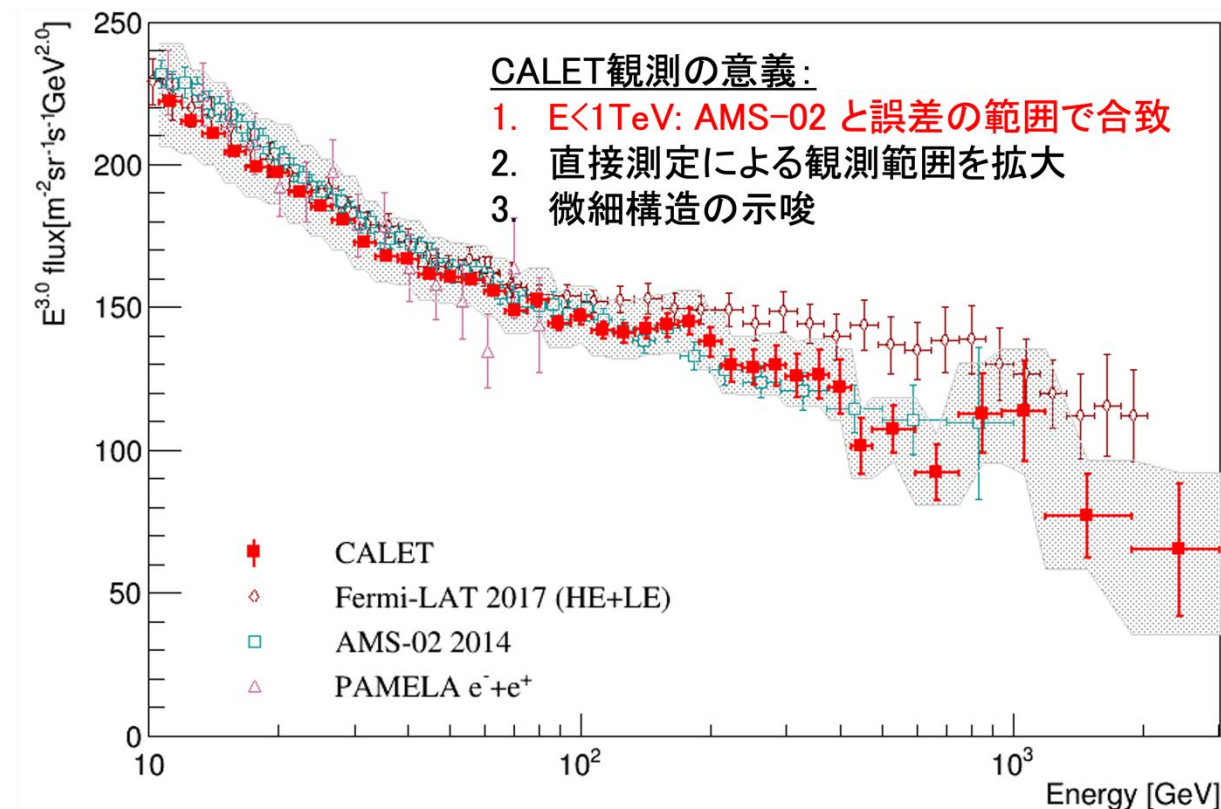


電子と陽子のBDTパラメータの分布



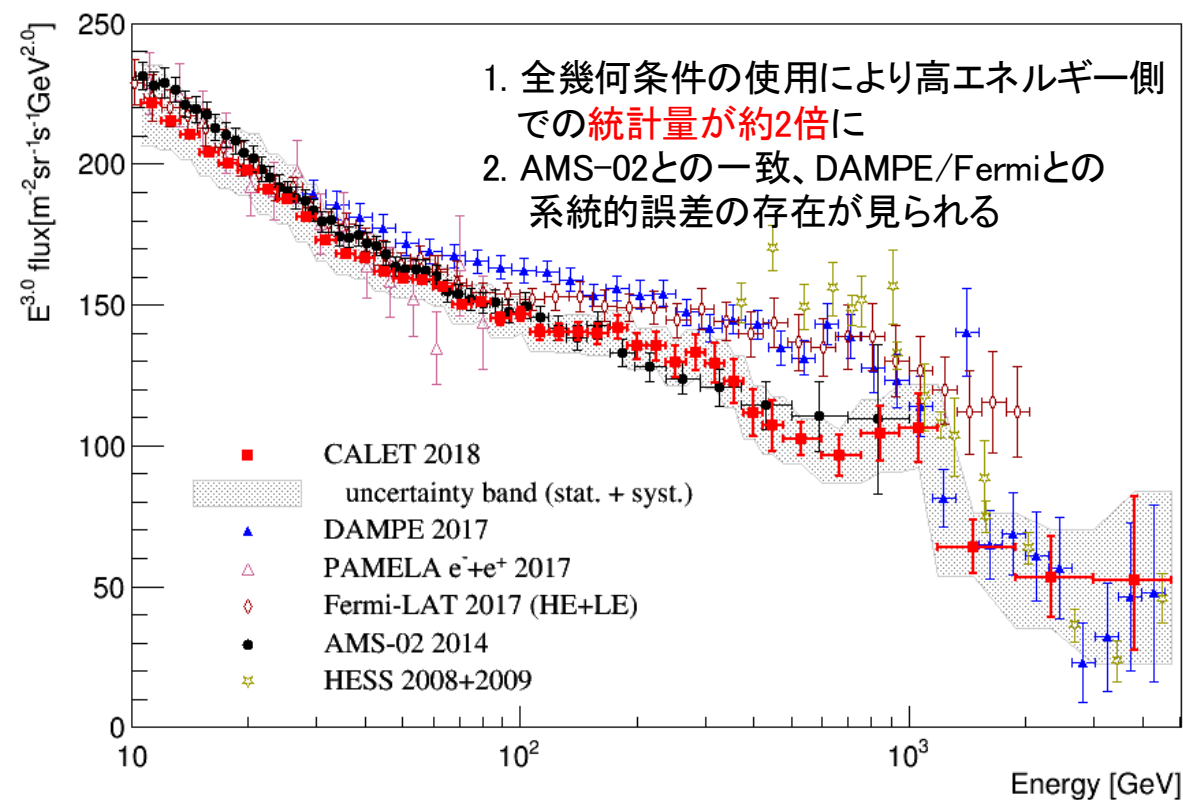
PHYSICAL REVIEW LETTERS 119, 181101(2017)

宇宙での直接観測で3テラ電子ボルトまでの
高精度電子観測に世界で初めて成功



PHYSICAL REVIEW LETTERS 120, 261102 (2018)

2年間のデータ蓄積により観測領域を拡張、
4.8テラ電子ボルトまでの高精度電子識別に成功



CALETの電子観測に関する受賞(2018年までの観測)

Compelling Results in Physical Sciences and Materials Development

Direct Measurement of High Energy Cosmic-Ray
Electron and Positron to the TeV Region

Shoji Torii and the CALET Team
Waseda University/Louisiana State
University/University of Siena and INFN

July 2018

AAS,CASIS,NASA



宇宙科学研究所賞 特別賞

鳥居祥二

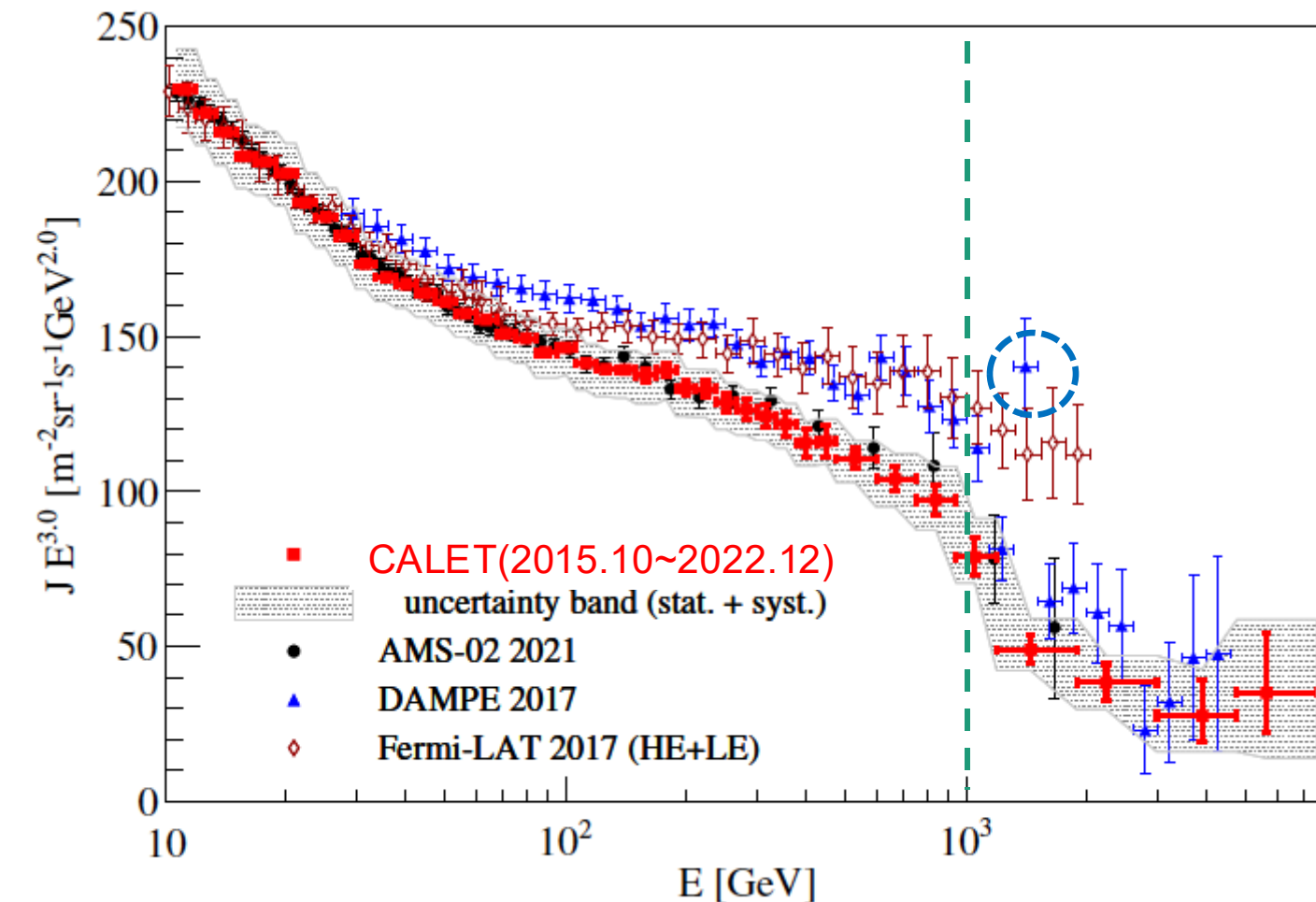
CALETによる高エネルギー宇宙線電子の観測
2019年1月9日

国立研究開発研究法人 宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所所長 國中 均



PHYSICAL REVIEW LETTERS 131, 191001 (2023)

7年間のデータ蓄積(× 3.4 倍) により観測領域を拡張、
7.5テラ電子ボルトまでの高精度電子識別に成功

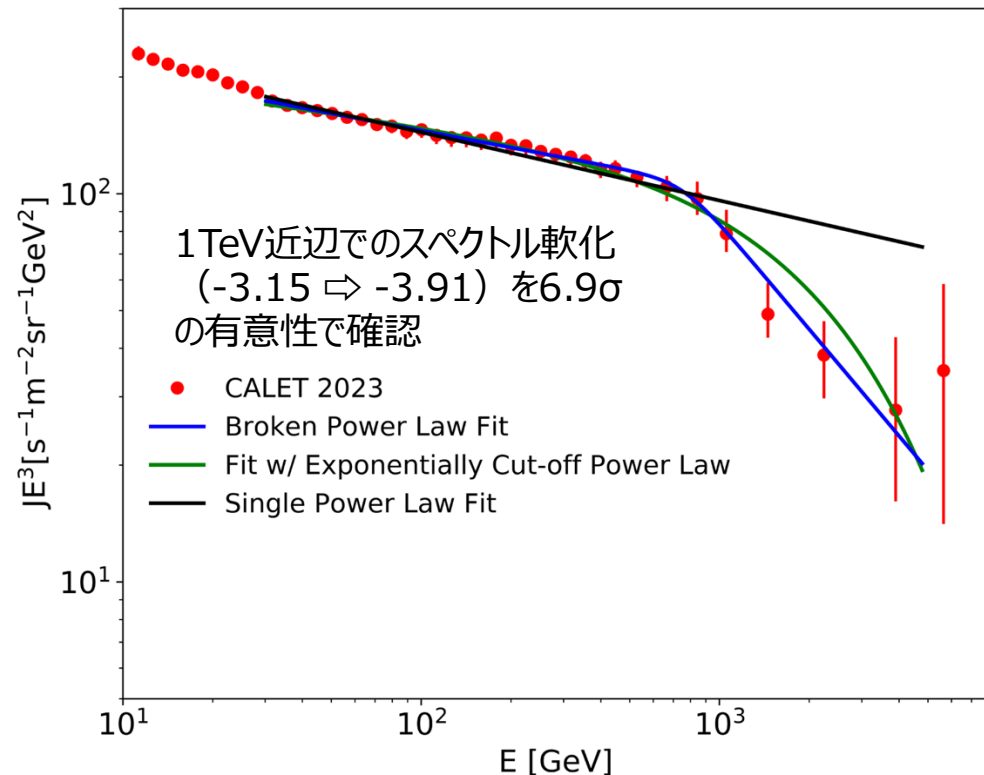


他観測との比較による観測結果の検討

1. CALETのスペクトルは1TeV以下の領域で結果を発表しているAMS-02とよく一致している。
2. 全電子スペクトルはCALET + AMS-02 対 DAMPE + Fermi-LAT という2グループに分かれており、未知の系統誤差の存在を示している。
3. CALETは1TeV以上での電子流速が、単一幂のスペクトルに対して急速に減少をすることを検出した。この結果は、誤差の範囲でDAMPEと合致する。
4. エネルギービンの取り方によらず、DAMPEによる1.4TeVのピークはCALETの観測結果には存在しない。

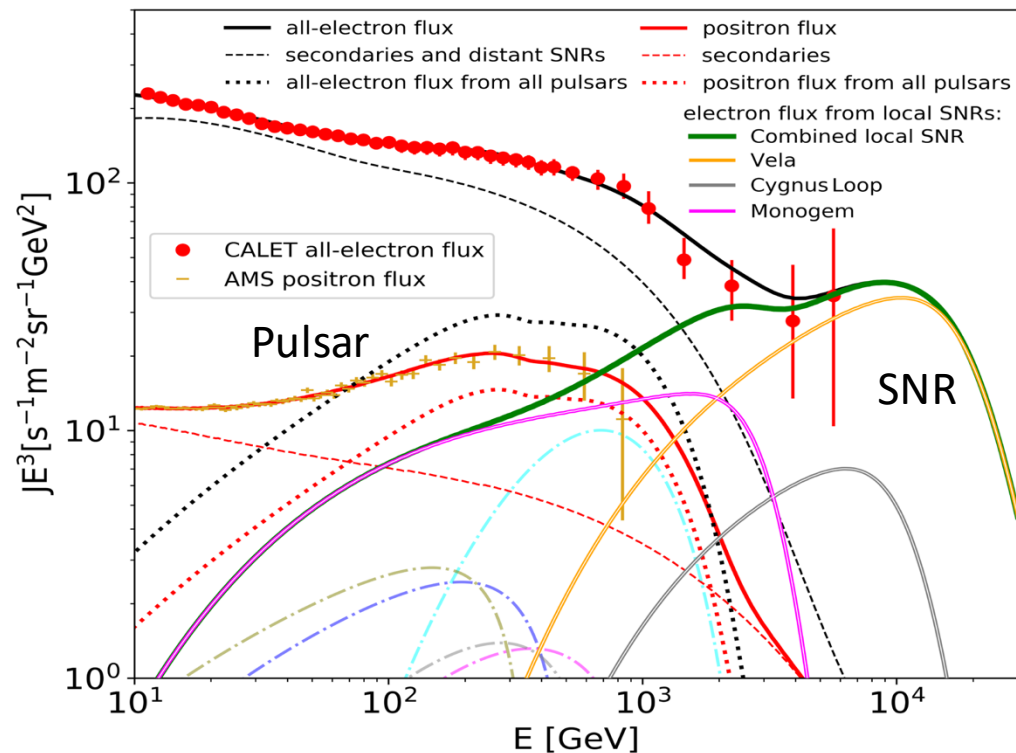
TeV領域を含むCALET観測結果の意義

単一冪と冪が変化する場合のフィッティング



電子が銀河内を伝播するときに、銀河磁場によるシンクロトン放射と、光子場との逆コンプトン散乱によるエネルギー損失 ($dE/dt = -bE^2$) を受けることにより、**1TeV以上の領域では電子スペクトルが単一冪に対して急速に減少するという理論的予測を十分な有意性 (6.9 σ) で確認した。**

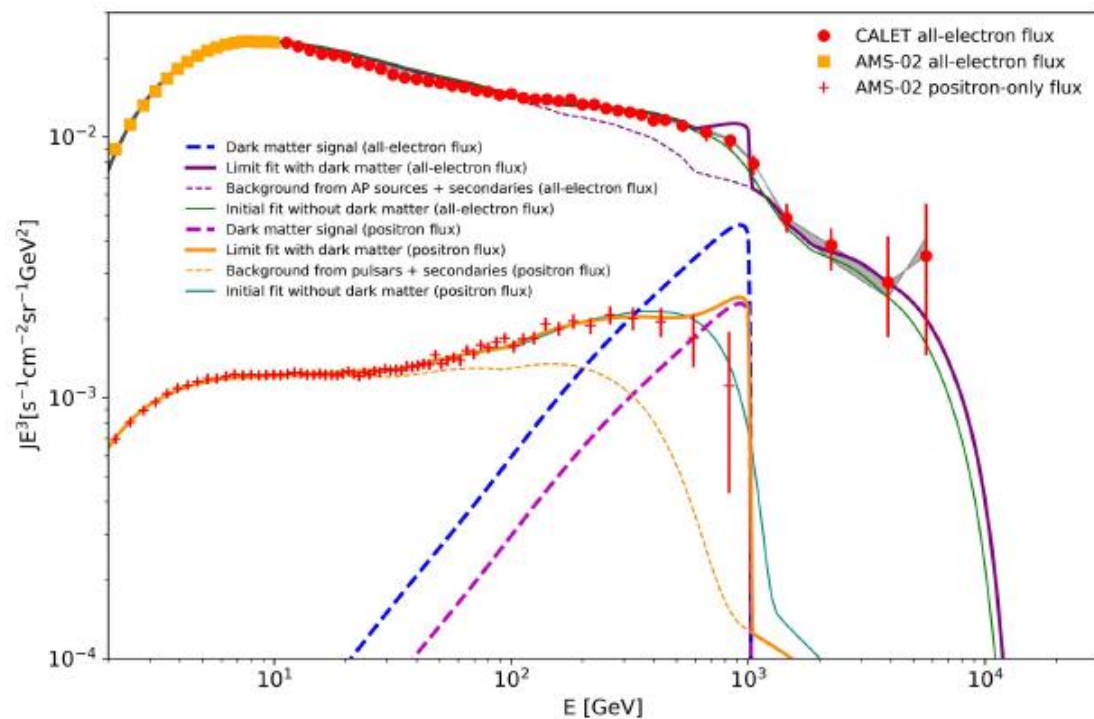
陽電子(AMS-02)と電子+陽電子(CALET)のモデルを仮定したフィッティング



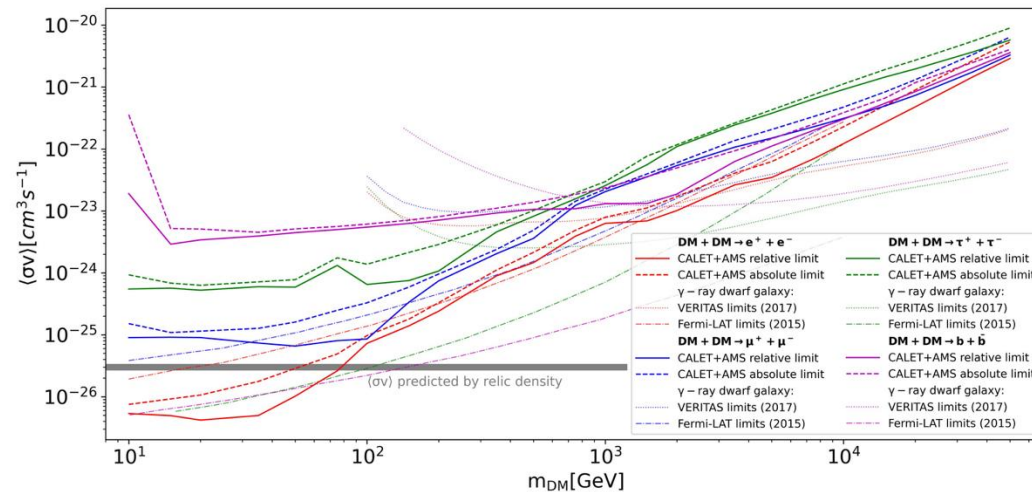
陽電子の起源をパルサー(Pulsar)とし、TeV領域の電子は近傍にある超新星残骸(SNR) -Vela, Cygnus Loop, Monogem - と仮定した場合の理論的予測と矛盾しない。Velaからの電子フラックスへの寄与 ($0.8 \times 10^{48} \text{erg}$) は、SNRの標準的モデルでえられる 10^{48}erg とほぼ一致する。

暗黒物質の探索：存在量上限値の検証

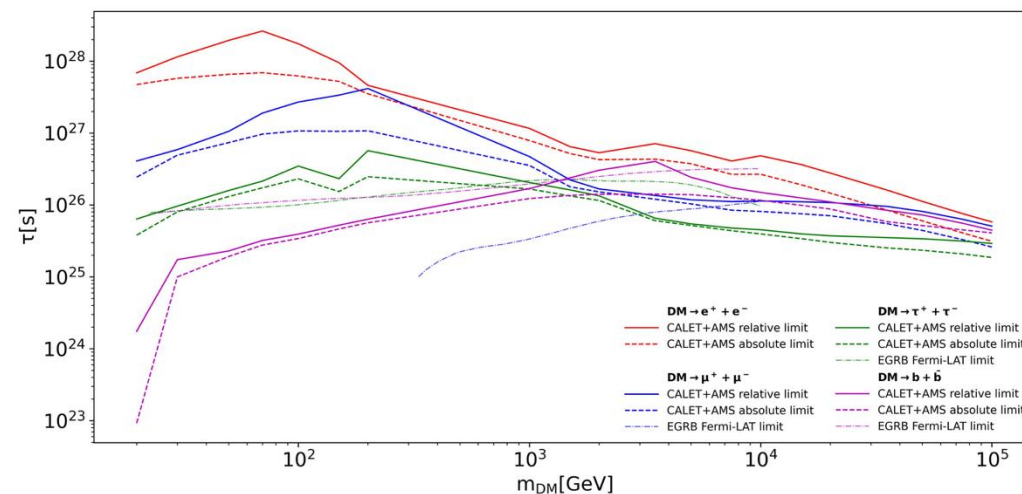
同じようにパルサーによる陽電子の寄与に加えて、暗黒物質による寄与（点線）を加えて、CALETの全電子とAMS-02の陽電子スペクトルから、暗黒物質の寄与の上限値を求めるフィットの例(実線)



この手法により得られた暗黒物質の対消滅に対する $\langle\sigma v\rangle$ （反応断面積 $\times$ 速度）の上限値の質量依存性。



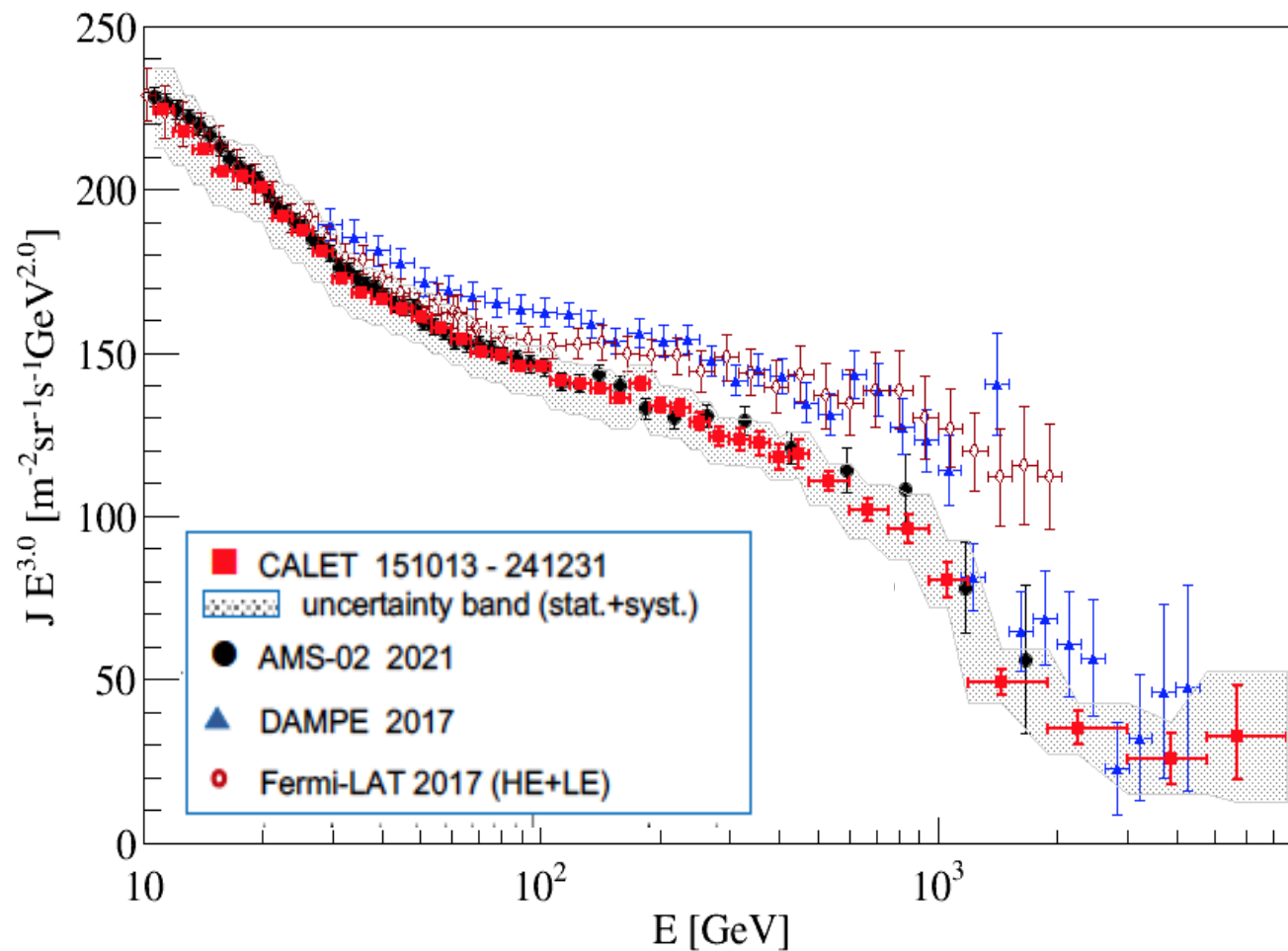
同じ手法により得られた暗黒物質の崩壊に対する寿命の上限値の質量依存性。



CALETによる電子観測の最新成果 (2025年)

Proceeding of Science (ICRC2025) ID:145

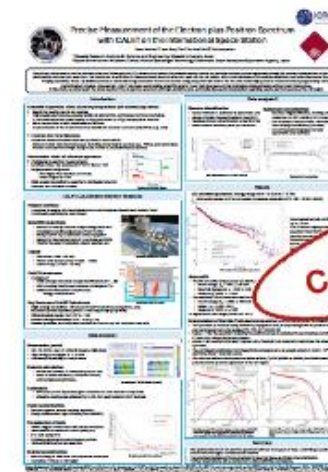
9年間の観測によりデータ量を増大して、
7.5テラ電子ボルトまでのエネルギースペクトルをより高精度化



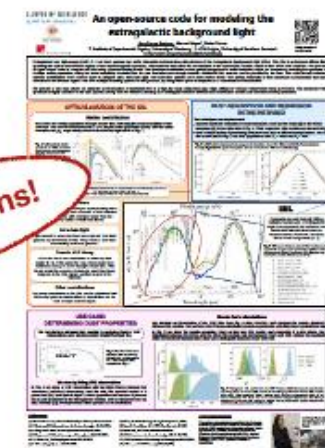
赤池さんのポスター
発表が604編の内
の2編の一つとして
Poster Prize を
受賞しました。



Winners of ICRC Poster Prize 2025



Yosui Akaike



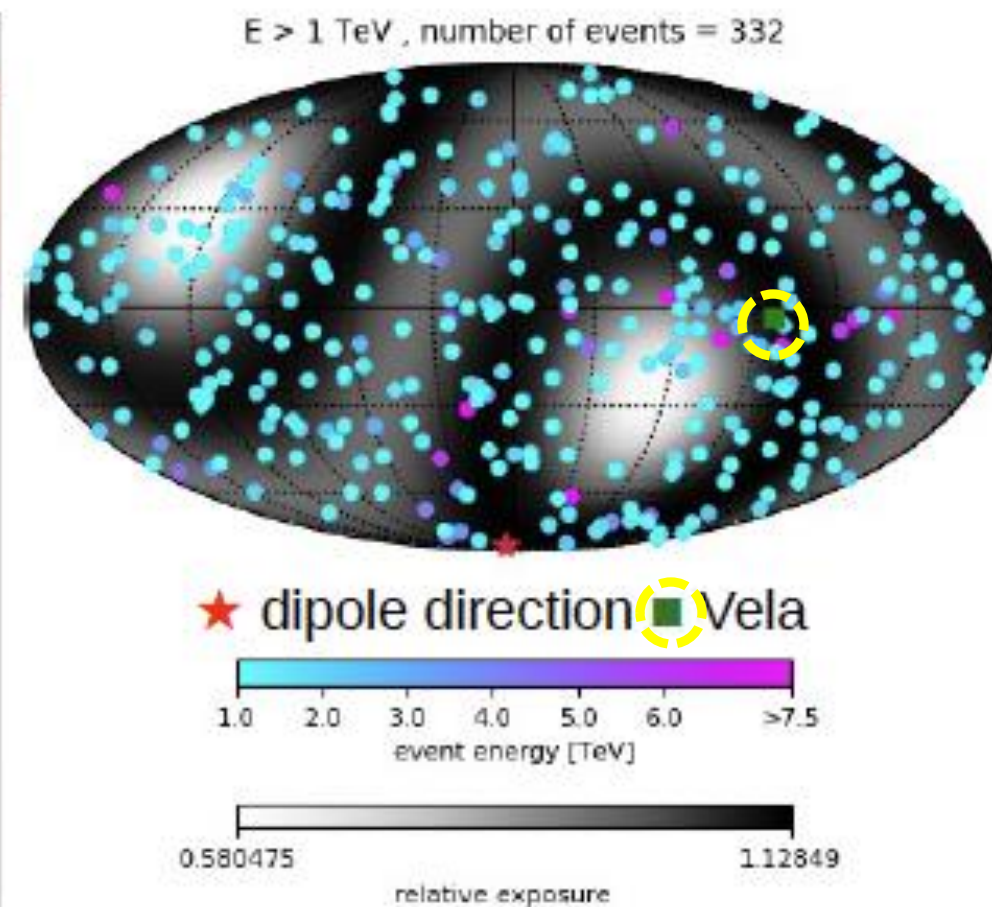
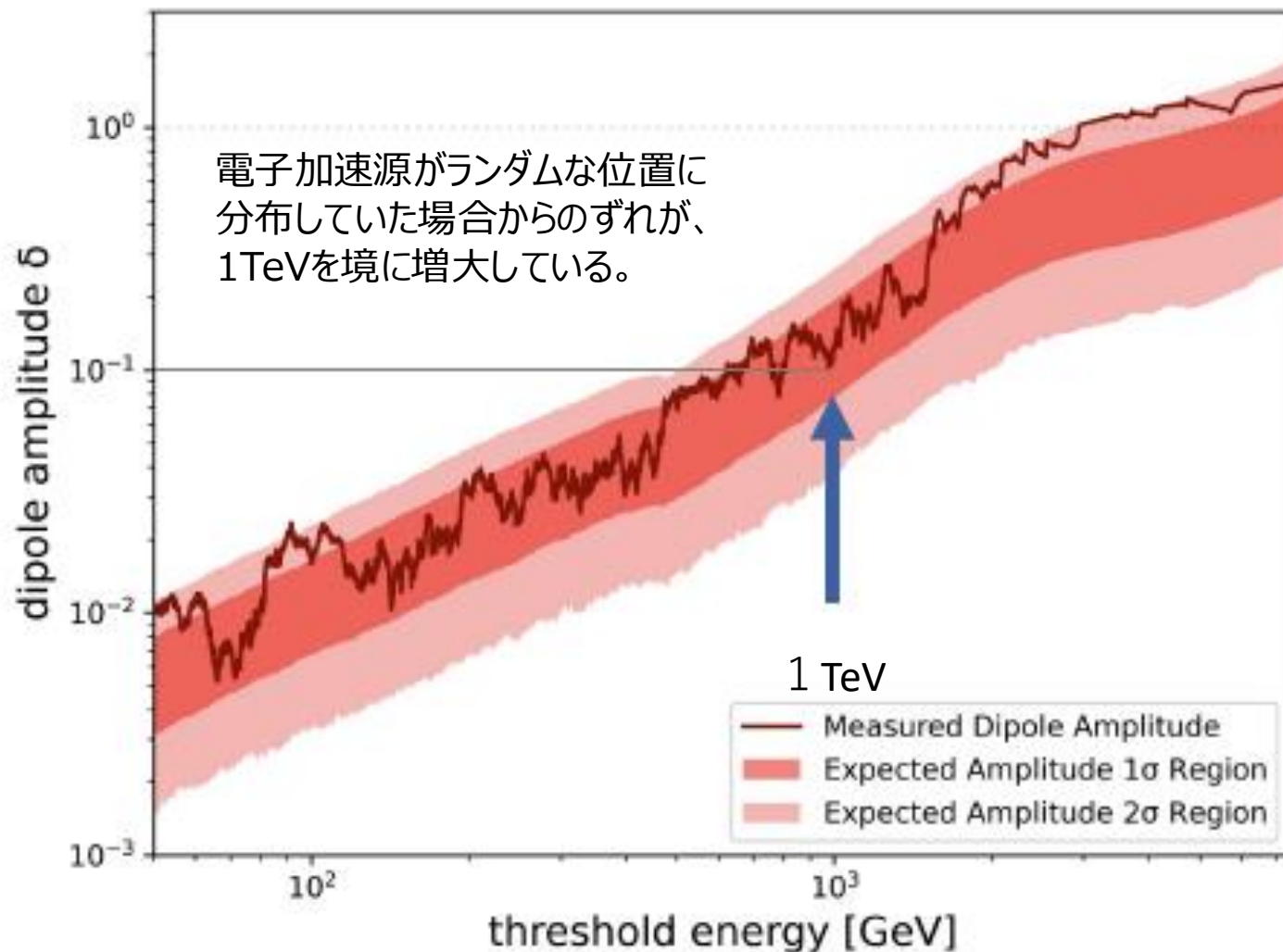
Sara Porras Bedmar

Congratulations!

新たな展開：到来方向の異方性

Dipole Amplitudeの測定結果とランダムな分布の予測値の比較

1 TeV以上の電子(332イベント) 到来方向の分布



高エネルギー(> 5 TeV)のイベントはVela方向に近い領域に分布している傾向が見られる！
(ガンマ線との誤認の可能性は排除されている)

まとめと今後の展望

これまで10年間の軌道上運用で電子（+陽電子）の観測は期待通りの成果を挙げており、直接観測としては世界で最大のエネルギー(7.5 TeV)までの高精度な観測結果を発表している。そして、CALETの当初目的である1TeV以上での電子観測により、以下を達成している。

1. 銀河内伝播におけるエネルギー損失による1TeV以上のスペクトルの急激な軟化の確証
2. TeV領域の電子の起源となりうる近傍加速源からの寄与の示唆
3. 暗黒物質の存在に対する制限（上限値）

2030年までの15年間の観測により、2023年のPRLに発表した結果の約2倍の統計量を得ることにより、特に近傍加速源の存在を検証し、宇宙線の新たな加速・伝播機構の解明に挑戦する。

電子スペクトルの理論的解釈の他の試みとして：

宇宙物理学的起源 ⇨ 浅野さん発表

暗黒物質起源 ⇨ 郡さん発表

2030年までの観測で期待される電子観測(赤領域)

