ISS搭載CALETによる9年間の 観測成果ハイライトと今後の展望

CALET

Calorimetric Electron Telescope

on the International Space Station

鳥居祥二 早稲田大学理工総研 他CALET国際研究チーム



日本物理学会第79回年次大会(2024年)

2024年9月18日

18aC310-7

NASA

Partne



CALET Payload







Launched on Aug. 19th, 2015 by the Japanese H2-B rocket

Emplaced on JEM-EF port #9 on Aug. 25th, 2015











Overview of the CALET Calorimeter





CALET軌道上運用システム







Duration [hr]

CALET Orbital Operations

Energy deposit (in TASC) spectrum: 1 GeV-1 PeV High-energy trigger (> 10 GeV) statistics: Orbital operations : 3123 days (~8.6 years) Number of Events as of April 30, 2024 15.10.13-24.04.30 Observation time : 2.65×10^8 sec HE (>10 GeV) triggers Live time fraction: $\sim 86\%$ \sim 2.07 billions Exposure of HE trigger : \sim 270 m² sr day LE(> 1 GeV) triggers 1 GeV 10⁶ \sim 4.55 billion Time duration of observation (day by day) 20.6 hours per dayon average 10⁵ HE Trigger Rate : ~ 8.7 Hz 10⁴ 1 PeV 10³ 10² 10 ALET 150 300 350 1 [All] $T_{\text{tim}} = 2.2849 \times 10^8 \text{sec} (63470.7 \text{hr}, 2644 \text{days})$ 巪... 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 10^{3} 10⁵ 10^{6} 10² 10^{4} 10 10'20208 220524 220906 221220 230404 230718 231101 40212 TASC Energy Deposit Sum [GeV] Date [yymmdd]

日本物理学会第79回年次大会(2024年) 北海道大学



電子+陽電子観測の成果

- 直接観測の最高エネルギーである7.5 TeVまで観測を達成
- 宇宙線研究に従来の理解を検証し新たな理解をもたらす以下の成果を挙げる。





陽子・原子核のスペクトル観測の成果

■ 陽子・ヘリウム・ホウ素・炭素・酸素についてこれまでの最高エネルギー領域での直接観測を達成
 ■ 従来の宇宙線の概念を変えるエネルギースペクトルの構造(硬化、軟化)の高精度観測に成功



今後の観測課題

■ さらに高精度かつ高エネルギー領域での世界最高レベルの観測を実施
 ■ 今後の観測により以下のスペクトル構造に関わる問題を解決

Kneeの起源
 陽子、ヘリウムの数100TeV領域への観測進展により、加速限界はどこに存在するのか?
 軟化、硬化の原因
 スペクトルの硬化や軟化のエネルギーは、Rigidityに依存するのか核子数に依存するのか?
 硬化の電荷依存性
 スペクトルの硬化は、酸素より重い鉄までの全ての原子核で観測されるのか?
 軟化の電荷依存性
 スペクトルの軟化は、陽子、ヘリウム以外の原子核でも観測されるのか?



太陽変調とREP現象の観測成果



- 太陽磁場の極性が正から負に反転する次の太陽半周期での観測 を継続により、電荷依存性を解明するドリフトモデルの確立し、20 GeV/Z以下の銀河宇宙線への影響を理解
- 太陽活動の極大期を含む長期観測によりEMIC 波動以外を含む REP の成因を統計的に明らかにし、宇宙天気予報の高精度化に 多大に貢献



これまでの成果と期待されるサイエンス

観測対象	これまでの成果(2019-2023)	期待される観測成果(~2030)	物理的意義
電子 (+陽電子)	[PRL2023] 10 GeV-7.5 TeVスペクトル測定 • 世界最高エネルギー(7.5 TeV)まで観測 • 1TeV以上でのスペクトル軟化を確認 • 近傍加速源の探査(存在の示唆)	10 GeV-20 TeVのスペクトル ⇒ スペクトル微細構造(<1 TeV) ⇒ 近傍加速源(>1 TeV) 電子到来方向の異方性(>300 GeV)	加速・伝播機構のモデル化による陽電子源の解明 ・陽電子源はパルサーか暗黒物質か? 近傍加速源の発見と加速機構の定量化 ・Velaは近傍加速源か?
陽子	 [PRL2022] 50 GeV-60 TeVスペクトル測定 (ハイライト: Editor's Suggestion) ・スペクトル硬化(~600 GeV)を確認 ・スペクトルの軟化 (~9.3 TeV)を検出 	40 GeV-数100 TeV領域のスペクトル ⇒スペクトル硬化の電荷依存性 (重原子核との相互比較)	衝撃波加速の限界エネルギーの決定とKnee の原因解明 • スペクトル軟化は電荷に依存するか(衝撃波加速検証)? • Kneeの理解に新たな加速源必要か? • 電子観測による近傍加速源の加速機構とスペクトル軟化 の関係は?
ヘリウム	[PRL2023] 40 GeV-250 TeVスペクトル測定 • スペクトル硬化(~1.3 TeV)を確認 • スペクトル軟化(~33 TeV)を検出	⇒スペクトル軟化の電荷依存性 ⇒衝撃波加速における上限エネルギー	
重原子核	スペクトル測定 [PRL2022] B,C,O: 8.4 GeV/n-3.8 TeV/n ~200 GeV/nにスペクトル硬化を検出 [PRL2021] Fe: 10 GeV/n-2 TeV/n [PRL2022] Ni: 8.8 GeV/n-240 GeV/n • Fe,Niは有意なスペクトル硬化を未検出	主要一次核のTeV/n領域までのスペクトル ⇒スペクトル硬化の電荷依存性 C,O,Feの100 TeV(粒子)以上のスペクトル ⇒スペクトル軟化の検証(p, Heと比較)	スペクトル硬化の原因解明 • 硬化は全ての原子核で存在するか? • 硬化は電荷か質量数のいずれに依存するのか?
	[PRL2022] B/C: 8.4 GeV/n-3.8 TeV/n • TeV領域で単一冪からのズレを検出	B.C比の1 TeV/n 領域でのスペクトル ⇒ 冪型スペクトルの変化 subFe/Fe比のスペクトル ⇒B/C比との相違の有無を検証	Leaky Box Modelと加速領域物質量(滞在時間)の検証
	[ApJ 投稿準備中] Z=13~44の成分比 超重核 (Z>28)の成分比の観測	超重核の奇数核をふくむ成分比	宇宙線源、初期加速機構、元素合成の解明
太陽変調 REP現象	[PRL2023] 電子・陽子の太陽変調の観測 ・太陽変調の荷電依存性を検出しモデル化試行 [GRL2022] EMIC波によるREP現象の検出	太陽磁場の極性が正から負に反転する次の 太陽半周期の電子・陽子の太陽変調	太陽変調を説明するドリフトモデルの確立 太陽変調の影響をうける宇宙線スペクトルの正確な理解 (20 GeV/Z以下のスペクトル)
		太陽活動の極大期を含むREPの長期観測	EMIC波以外のREP成因の解明と宇宙天気予報の高精度化



これまでの経緯と今後の観測計画

JAXAによるCALET観測の承認プロセスと審査会の経緯

2015年8月: こうのとり5号機によって打ち上げ、きぼう船外実験プラットフォーム#9に設置

2015年11月: 定常運用	(2015年12月~2018年3月)	2017年11月: 定常運用終了審査及び後期運用移行審査		
2018年 4月 : 後期運用(1)	(2018年4月~2019年3月)	2019年 3月:後期運用(1)終了審査及び再延長可否審査 2019年 4月: CALETプロジェクト終了審査		
2019年 4月 : 後期運用(2)	(2019年4月~2021年3月)	2020年12月:後期運用(2)ISAS理学委員会科学成果評価 2021年 3月:後期運用(2)終了審査及び再延長可否審査		
2021年 4月 : 後期運用(3)	(2021年4月~2024年3月)	2022年 3月:後期運用(3)中間確認会(その1) 2023年 3月:後期運用(3)中間確認会(その2) 2023年11月:後期運用(3)ISAS理学委員会科学成果評価 2024年 3月:後期運用(3)終了審査/後期運用(4)計画審査【本審査】		
2024年 4月 : 後期運用(4)	(2024年4月~2030年12月)	2024年 3月: 2030年までの延長観測の承認!		



✓ つくば宇宙センター(TKSC)におけるCALET運用への 完璧なサポートについて、JAXA運用担当のスタッフの皆 さんに心より感謝します。

✓ 本研究は科学研究費基盤(S)24H00025
 (2024-2028年度)の支援を受けて実施されています。

JAXA