重イオンビーム実験によるCALET-CHDの電荷分解能

小澤俊介¹, 笠原克昌¹, 片平亮¹, 金子翔伍¹, 鳥居祥二¹, 仁井田多絵¹, 村田彬¹, 渡辺仁規¹, 片寄祐作², 荻田竜平², 清水雄輝³, 内堀幸夫⁴, 北村尚⁴ 1: 早稲田大学, 2: 横浜国大, 3: JAXA/SEUC, 4: 放医研

ISS搭載予定のCALET観測において、数10GeV-1000TeVの宇宙線原子核成分のエネルギースペクトルの測定が計画されている. この観測計画において、原子核組成の弁別を行うために、プラスチックシンチレータを用いた電荷弁別型検出装置(CHD)を設置す る.本発表では、CALET-CHDの特性及び性能検証を目的としたHIMAC加速器による重イオンビーム照射実験について報告する.

CALET-CHD(電荷弁別型検出器)による宇宙線原子核成分の観測

CALET宇宙線電子、ガンマ線望遠鏡は、宇宙線近傍加速源の同定及び銀河系内の宇宙線伝播機構の解明の ため、国際宇宙ステーション日本実験モジュール(きぼう)の船外曝露部に設置し、5年間の観測を計画している. 検出装置は解像型カロリーメータ(IMC), 全吸収型カロリーメータ(TASC)で構成され, これらの検出器の最上段に 入射粒子の電荷を弁別するための検出器 - Charge Detector(CHD) - を配置する. CHDはプラスチックシンチレー タと光電子増倍管(PMT)からなるシンチレーション検出器で、通過する粒子の電荷量の2乗に比例した出力信号が 得られることから、入射した宇宙線の原子番号を同定することが可能である.この検出装置により、銀河系内宇宙 線のKneeと呼ばれる冪の変化について各原子核成分ごとの精密測定を行い、宇宙線の加速機構についての知見 を得る、また、超新星爆発で合成される核子成分と星間物質との相互作用によって生じる二次的な核子成分との 存在比を明らかにし、宇宙線の伝播過程の解明を目指す、鉄核よりも重い原子核にも感度を持つようにデザインさ れており、これまで高統計量での観測がなされていなかった原子番号40程度までの超重原子核についての観測も 可能となる.





宇宙線各原子核成分のCALETで5年間観測した場合の予想観測強度(左・中図中の赤丸)と、これまでなされてい る観測を比較したもの。100TeVを超える領域までの高統計での観測が可能である。右図は同じくCALETで5年間 観測した場合のB/C比の予測(黒丸)とこれまでの観測結果

CALET-CHD概要

CHDはCALETの最上部に設置され、450mm x 32mm x 10mm の短冊状のシンチレータを14本平行に並べたも のを、X-Yに2層積層して構成される、各短冊状のシンチレータはアクリル製のライトガイドによってPMTに接続し、 各シンチレータごとに信号を検出することにより、粒子の多重入射、下方の検出器からの後方散乱による影響を

少なくし、精度の良い入射核種弁別が可能になるようデザインされている.

右写真は性能検証用に製作したCHD. EJ-200(ELJEN社製プラスチックシ ンチレータ)とアクリル製ライトガイドを光学接着し、浜松ホトニクス社製の R11823型光電子増倍管(PMT)で読み出す. PMTは, 耐振動補強されてお り, 高量子効率のものを用いている. これらを反射材(Vikuiti ESR,3M社製) で包装し、収集光量の入射位置による依存性を抑えている.



HIMACにおける重イオン照射実験

CHDの電荷弁別性能を評価するため、放射線医学総合研究所のHIMAC加速器からの重イオンビームの照射実験を行った. 照射イオン種には ⁶C, ¹⁴Si, ²⁶Fe, ³⁶Kr を用い, 各イオン種の直接入射及びターゲット設置による破砕核通過時の信号測定を 行った. CHDの後方にシリコン半導体検出器群(ピクセルアレイ/ストリップ)を配置し同時測定することで, 多重入射イベントの除 去を行い、CHDの検出信号の特性について、高精度な検証を行うことが可能である.

実施したビーム照射

2012年11月21日-24日(10時間×5シフト)のマシンタイムを使用し、データを取得した. 破砕核によ る測定とは別に、ターゲットなしのイベントをそれぞれ10⁴イベント取得した.

	⁶ C	¹⁴ Si	²⁶ Fe	³⁶ Kr	<u>照射ビームプロファイル</u> (C: 430MeV/n)
エネルギー [MeV/n]	430	800	500	500	ターケット挿入前に直径「cm程度の領域」、 集中的に照射されるよう調整している。

Kr



SIA CHD Trig1 Trig2 Target Beam Line 7 cm 8 cm 20 cm 60 cm 95cm

検出器のセットアップ(写真,下左図)

ビーム上流方向には破砕核生成用のアクリルターゲット(1.0cm厚)を配置し、 CHD後方にはピクセルタイプとストリップタイプを積層したシリコン検出器(SIA) を配置している.

データ収集システム(下右図)

CHDからの信号の読み出しには、CALETで用いる前置増幅器と同仕様の ものを用いている.本実験で使用したADCのダイナミックレンジの制約により, 波形整形増幅器の出力レンジを2系統に分岐している.







破砕核によるCHDの信号分布 (Kr: 500MeV/n) アクリルターゲットを挿入し、破砕 核を生成しているため、CHDへの多 重入射のイベントが発生するが、シリ コンストリップ検出器を用いて除去可 能である. 図中黒線は多重イベント 除去前,赤線は除去後.

CALET-CHDの電荷弁別性能及び発光特性の検証

破砕核によるCHDの出力分布のピークを各イオン種に対応させ、電荷分解能及び発光特性の見積りを行った. 各核種におけるCHD中のエネルギー損失量はシミュレーションコードPHITSによって計算した.



発光特性の検証

シンチレータ内でのエネルギー損失量はその通過物質厚に比例しているが、電荷の集中度が高い重イオンが入 射した場合に、単位長さあたりのエネルギー損失量が大きくなると、発光として出力されるエネルギーよりも発熱に 遷移するエネルギーの割合が増加し、損失エネルギーΔEと発光量ΔLの相関の線形性が失われるクエンチング (消光)効果が現れる、実観測においては、この効果を考慮し、原子核入射時の出力信号を補正する必要がある.

1600

6000 8000 10000 12000 14000 16000

Tarleらによると、この消光効果は

10

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A(1-f_h)dE/dx}{1+B_a(1-f_h)dE/dx} + Af_h\frac{dE}{dx}$$

Quenching Effect

3000

3500



各入射核種による出力分布の算出 多重入射イベント除去後のCHDによる出力信 号の分布について、両隣のピークと合わせ、3連 のガウス分布の中央のピークについて、中心値 (μ_z)と分散値(σ)を算出する.

入射核種の同定と測定誤差の見積り

隣り合うイオンとの電荷分解能を



 $M_{\mathcal{N}} = 1 + D_{\mathcal{S}} (1 + J_{h}) M_{\mathcal{L}} + M_{\mathcal{N}}$ **|400**∣ A: 蛍光効率, B_s : Birks の定数 Preliminary f_h : 飽和していなZいエネルギー損失に関する係数 200 のように近似できる. <u>a</u>1000 各イオン種の破砕核測定で得られた各ピーク 800 をもとに、Tarleの式にあてはめ、上記の近似式 を用いて発光特性の検証を行った.現在詳細 7 600 黒:2012HIMAC(EJ-200) な解析を進めており、PHITSモンテカルロシミュ 400 赤:2011HIMAC(EJ-204) レーションを用いた検証等を行っている. 青線 青:GSI(EJ-204) はMarrocchesi^{*)}らの測定により得られた結果, 200 赤線は昨年度実施したHIMACでの測定による 結果. どちらもELJEN社製の同系列のシンチ 2000 2500 500 1000 *⊿E* [MeV] レータ(EJ-204)を用いた測定の結果である。

*) Nucl. Instr. and Meth. A, 649, 1, 477

HIMACによる重イオン照射実験により、CALET搭載のCHDの電荷弁別性能、原子核入射時 の電荷測定特性に関する検討を行った結果、CHDの基本的な性能がCALETでの観測要求 を満たすものであることが明らかになった、今後より詳細な解析・シミュレーション計算等を実 施し、現在解析中の測定結果も含め、観測運用時における測定性能・特性に関する詳細な検 証を行う

と定義し、それぞれのZについて電荷分解能を評価した。それぞれの照射エネルギーでのZ~35において、デー タ精度の悪いSiを除き、0.3e以下の電荷分解能が得られている.ただし、実観測と比較して入射エネルギーが低 く、得られる光量が大きいため、分解能を30%程度よく見積もっている可能性があり、CERN-SPS加速器によるよ り高い入射エネルギーでの電荷分解能の検証を計画している.

Charge Resolution $R_z = \frac{O}{\mu_{Z+1} - \mu_Z}$

第13回宇宙科学シンポジウム(2013.01.08-09)