

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05095

研究課題名(和文) CALET実験による宇宙線陽子・ヘリウム核及びB/C比の観測

研究課題名(英文) Observation of proton and helium cosmic-ray primaries and the ratio of boron relative to carbon by CALET experiment

研究代表者

市村 雅一 (ICHIMURA, Masakatsu)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20232415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：国際宇宙ステーションで進められている宇宙線観測実験(CALET実験)で得られた原子核成分観測データの初期解析を目的として、解析方法の開発や観測データの解析を行った。
まず、検出器に入射した原子核の飛跡再構成アルゴリズムの開発・改良と、検出器中に含まれるシンチファイバーの位置較正を行い、飛跡再構成の精度を向上することに成功した。次に、電荷決定、エネルギーの測定の方法を確立した上で、測定データの解析を行った。並行してシミュレーションを行い、検出効率を算出した。現在これらの成果に基づいて最終結果となる陽子・ヘリウム核の絶対強度、ホウ素核/炭素核比の算出を行っている。

研究成果の概要(英文)：The development of the analysis method and the data analysis have been performed for the purpose of the initial analysis of the cosmic ray nuclei which have been observed by the CALET detector onboard the International Space Station.
At first, the development and the improvement of the track reconstruction algorithm have been done as same as the alignment calibration of the scintillating fibers in the detector. These have successfully improved the accuracy of the track reconstruction. Then the analysis of the observed data has been done basing on the established charge determination and energy estimation procedures. The detection efficiencies have been calculated in parallel with simulation calculations.
The absolute fluxes of proton and helium, the ratio of boron relative to carbon are now under calculation basing of above results.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：高エネルギー宇宙線 原子核 CALET

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線の生成・加速機構のモデルとして「標準的」とされているのは、超新星爆発時に生じる衝撃波によって原子核が統計的に加速されるという理論である。この加速機構による加速限界は、電荷 Z の原子核に対して $Z \times 10^{14}$ eV とされている (Lagage & Cesarsky, A&A, 125, 249, 1983)。一方、地上での間接観測によって得られた宇宙線全粒子のエネルギースペクトルには、 3×10^{15} eV 付近に「knee」と呼ばれる折れ曲がりが存在している。この折れ曲がり が衝撃波加速の限界によるものであれば、その位置は標準理論の予想と約 1 ケタの違いがある。この違いを説明するべく様々な理論が提唱されているが、いまのところ決定的な理論は出ていない。また、最近では AMS02 の観測から 10^{12} eV 領域で陽子とヘリウム核のスペクトルのべき指数が異なることが指摘されている (例えば S.Haino et al., 33rd ICRC, 2013)。これは陽子とヘリウム核の加速機構が異なることを意味しており、現在議論となっている。

(2) 宇宙線の銀河内での伝播機構の解明も宇宙線物理学における大きなテーマの一つである。銀河磁場に閉じ込められて星間ガスの中を飛びまわっている原子核は、ある確率をもって核破砕反応を起こし、結果としてもとの宇宙線源には存在していなかった原子核 (2 次核) が生成される。よって、Li, Be, B や sub-Fe 核に代表されるような二次核の存在量がわかれば宇宙線が通過してきた星間ガスの量を推定できる。さらに、エネルギーの高い粒子ほど銀河系から逃げ出しやすいため、宇宙線中の 2 次核の存在割合はエネルギーとともに減少している。このエネルギー依存性を調べてやれば、宇宙線粒子の銀河内での拡散係数を知ることができる。

(3) これらの問題を解決するには、 $10^{12} \sim 10^{15}$ eV のエネルギー領域における宇宙線原子核の化学組成とそのエネルギー依存性を観測によって確定することが極めて重要である。図 1 は過去の直接観測で得られた核種別のエネルギースペクトルである (<http://pdg.lbl.gov/>)。これを見ると全体的にはすべての核成分が高エネルギー領域で単一のべきの形をしており、衝撃波による統計的加速機構ですべてうまく説明できそうに見える。しかし、最近になって行われた高精度観測、PAMERA 実験 (人工衛星) や CREAM 実験 (南極周回パルーン) は、 10^{12} eV 領域でヘリウム核のスペクトルが陽子に比べて緩やかであり、さらには数 100 GeV/核子の領域でスペクトルに折れ曲がりが存在するという観測結果を発表している。AMS02 の実験は宇宙ステーション上での長時間観測であり、圧倒的観測統計量をもって陽子、ヘリウム核のスペクトルやホウ素核と炭素核の存在比 (B/C ratio) を高精度で測定しているが、

スペクトロメータを使用しているため原子核成分については $1 \sim 2$ TeV/核子が観測限界となっている。

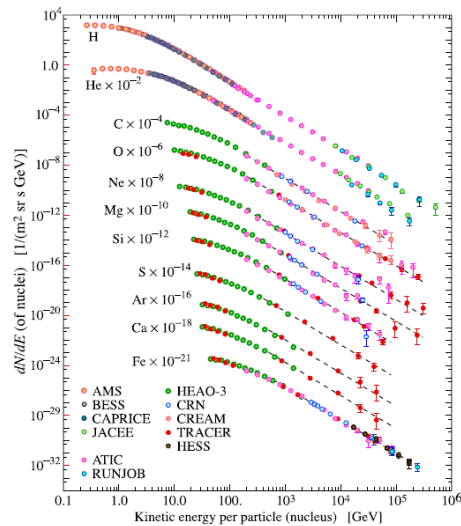


図 1 核種別のエネルギースペクトル

(4) 2015 年に国際宇宙ステーションで開始される CALET 実験は、宇宙線中の電子、陽電子、原子核、ガンマ線を一度に観測して、高エネルギー粒子による統一的な宇宙像を確立しようという野心的なものである。CALET 検出器は厚いカロリメータを有しており、AMS02 が観測したエネルギー領域よりも高い領域まで高精度観測することが可能となっている。CALET による観測は当面 5 年間、可能であればその後も国際宇宙ステーションが存続する間継続する予定であり、宇宙線原子核の成分別エネルギースペクトルは 10^{15} eV 領域まで高精度で確定できると期待されている。

2. 研究の目的

CALET 実験で得られた原子核成分観測データの初期解析を目的とする。具体的にはシミュレーションを用いて解析方法の改良・開発を行いつつ、それを実際の観測データに適用して解析を行う。結果として CALET 実験最初の 2 年間で得られた観測データをもとに、陽子・ヘリウム核の絶対強度スペクトルを 100 TeV/核子の領域まで、ホウ素核と炭素核の存在比を 1 TeV/核子の領域まで明らかにする。

3. 研究の方法

(1) CALET 検出器による宇宙線の観測：CALET 実験は日本の早稲田大学を中心に、日本、アメリカ、イタリアの 3 か国 28 機関から現時点で 86 名の研究者が参加しているプロジェクトである。2015 年 8 月に打ち上げられた検出器は、国際宇宙ステーションに設置され、2015 年 10 月から本格的に稼働し、現在も観測を継続中である。

CALET 検出器の構造は図 2 に示したように大きく分けて CHD、IMC、TASC の 3 つの部分から構成されている。CHD (CHarge Detector)

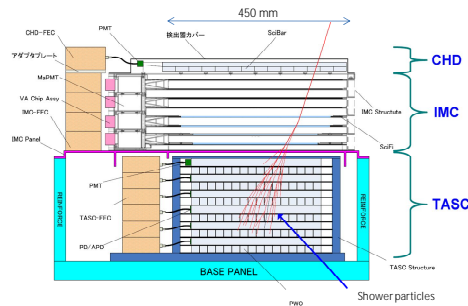


図2 CALET 検出器の構造

は、3.2cm × 45cm × 1cm に加工したプラスチックシンチレータを X Y 方向に格子状に並べて、入射粒子の電荷とおおまかな座標を測定するものである。IMC (IMaging Calorimeter) は、1mm × 1mm の正方形の断面を持つ、長さ 44.8cm のシンチレーティングファイバー 448 本からなるシートと、核衝突ターゲットとしてのタングステン板を交互に重ねて構成されており、カスケードシャワーの発達初期段階を詳細にイメージングして、衝突点の確定、電子と陽子の判別、電荷決定やエネルギー決定の補助などの役割を担う。TASC (Total Absorption Calorimeter) は、1.9cm × 2.0cm × 32.6cm の PWO ログ 16 本 × 12 層から成っており、電磁カスケードシャワーの発達を促して入射粒子のエネルギーを測定する。およそ 30 放射長の厚いカロリメータがこの検出器の大きな特徴である。

(2) 陽子の高精度飛跡再構成法の開発: まず、CALET 検出器の詳細構造をコンピュータ上に再現した上で、そこに 10GeV ~ 1000TeV のエネルギーを持つ陽子を入射させ、検出器内で起こるあらゆる相互作用を再現するモンテカルロシミュレーションを実行した。シミュレーションコードは EPICS+COSMOS を使用した。生成した模擬観測データを用いて、CALET 検出器における高精度な飛跡再構成法の開発を行った。高エネルギー宇宙線粒子の飛跡再構成としては、従来 TASC に記録されたカスケードシャワーのシグナルから荒い飛跡再構成を行い、その直線情報を元に 1 層ずつ上層へつないでいき、入射軸を決定する手法が検討されていた。この方法は電子に対しては極めて有効であることが確認されたが、高エネルギー陽子の場合には IMC 中に存在する後方散乱粒子のシグナルに影響されやすく、正しく飛跡再構成できる割合 (Tracking Efficiency) が低いという問題点があった。そこで、TASC シグナルで決めた直線を用いて IMC 内の検索範囲を定め、その範囲内にあるすべてのシグナルのあらゆる組み合わせで直線を作り、その多数の直線群の中から最もふさわしい直線の一つだけ選択する、という方法を考案した。

(3) シンチファイバーの座標較正: 検出器中 IMC に含まれているシンチファイバーは 1 層あたり 448 本であり、これが X Y 方向それぞれ

れに 8 層ずつあるので全部で $448 \times 8 \times 2 = 7168$ 本が使用されている。検出器に入射した宇宙線の飛跡はまずこれらのファイバーのシグナルを用いて再構成されるので、1 本 1 本の座標を正確に把握しておくことが重要である。そこで、検出器中に含まれている全てのシンチファイバーについてその位置較正を行った。位置較正には、CALET 検出器が宇宙ステーションへ打ち上げられる前 (2015 年 3 月) に地上で行われたミュオン観測のデータ約 2.1×10^6 イベントを用いた。ある 1 本のファイバーの位置ずれは、まずそのファイバーを通る飛跡を選び出し、注目ファイバーの層を除く 7 層で直線をフィットし、その直線と注目ファイバーの座標のずれを求めた。これを全ての飛跡について求め、その平均値をそのファイバーのずれと解釈した。この作業を逐次的に 5 回ほど繰り返し行い、ずれの値がほぼ 0 に収束することを確認した。こうして全てのファイバーについての座標較正を行った。

(4) 地磁気を用いた低エネルギー宇宙線強度の推定方法の検討: 低エネルギー領域 (1GeV 付近) での原子核の絶対強度スペクトルを求める目的で、地磁気を利用した方法を検討した。

地球上で宇宙線の観測を行う場合、低エネルギー宇宙線は地球磁場の影響を受けて進行方向が曲げられ、強度が減少する。これを地磁気効果という。この地磁気効果によって、ある緯度経度にある方向から入射できる宇宙線の Rigidity には下限が存在する。これは Cutoff Rigidity (R_c) と呼ばれており、運動エネルギーの下限値と 1 対 1 に対応する量である。つまり、地球磁場の構造がわかれば、ある緯度経度にある方向から入射してきた宇宙線の最低エネルギーがわかるのである。これを利用すれば、宇宙線粒子の入射方向ごとの個数を数えるだけで、積分型スペクトルを得ることができる。

まず始めに、地磁気モデルを仮定した上で、磁場中の荷電粒子の運動方程式を数値的に解き R_c を求めた。シュテルマーの手法に基づいて、高度 400km のある緯度経度から鉛直上方に反陽子を射出し、地球磁場中での軌跡を追跡した。この作業をエネルギーを変えながら行って、地球磁気圏を脱出するための最低エネルギーを算出した。これをあらゆる緯度経度について繰り返し行い、垂直入射の宇宙線荷電粒子に対する Cutoff rigidity の世界地図を作成した。

次に、過去の観測結果を再現し、かつ一次宇宙線と地球大気との相互作用で生じる二次宇宙線の存在量も考慮に入れた擬似観測データを作成し、これに上の世界地図を適用して宇宙線の強度推定を行った。

(5) 入射粒子の電荷・エネルギー決定: 実際の観測データについて、CHD でのエネルギー

損失を用いて入射粒子の電荷を決定した。CHD にはX方向Y方向それぞれ1層ずつ計2層のシンチレータが挿入されているが、再構成された飛跡情報を用いてCHDでの通過点を算出し、そこでのシグナルを用いて電荷判別を行い、陽子やヘリウム核を選別した。

入射粒子のエネルギー推定については、TASCでのエネルギー損失の総和から推定する方法について、シミュレーションを元に検討した。検出器の最上面と最下面を貫通していること、IMCの下層部とTASCの最上層で一定以上のエネルギー損失があること、などの条件を課しながら、TASCでのエネルギー損失と入射粒子のエネルギーの相関を確認した。

4. 研究成果

(1) 陽子の高精度飛跡再構成法の開発：シミュレーションデータを用いて飛跡再構成アルゴリズムの開発・改良を行った。結果として、100GeV~数10TeVのエネルギー領域で約250 μm 程度の位置分解能をもって飛跡を再構成することに成功した。図3はIMC1層目における真の位置と再構成された位置の差の分布である。

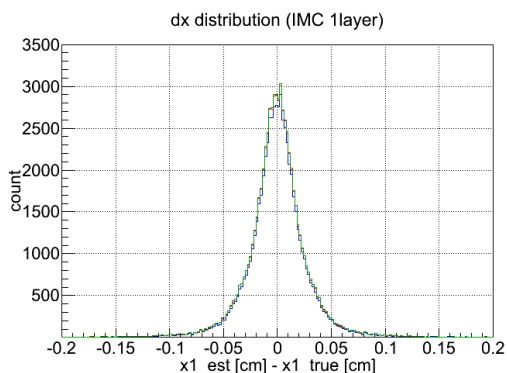


図3 IMC1層目での位置ずれ

IMC中のシンチファイバーの太さが1mmであるので、これは陽子が通過したファイバーを十分同定できる精度である。また角度分解能は約0.18度であった。高エネルギー陽子については、後方散乱粒子の影響でCHDシグナルを用いた電荷決定が困難であるという問題があったが、この飛跡再構成法により、シンチファイバーのシグナルを用いた電荷決定が可能となった。

(2) シンチファイバーの座標較正：ミュオンデータを用いて測定したシンチファイバー座標の一例を図4に示す。これはy方向4層目に挿入されている448本のファイバーのずれの平均値を示しており、横軸はファイバーの番号(1-448)である。これを見ると、各々の設計座標からのずれは最大で400 μm 程度であることがわかる。また、検出器製作時に32本のファイバーを1束にしたことを反映して、32本周期のパターンが見てとれた。これは、束と束の間に数100 μm の隙間があることを意味している。この結果を用いて座標較

正を行い、較正後の座標を用いた飛跡再構成の精度を評価したところ、較正前に比べて100 μm 程度改善されていることが確認できた。

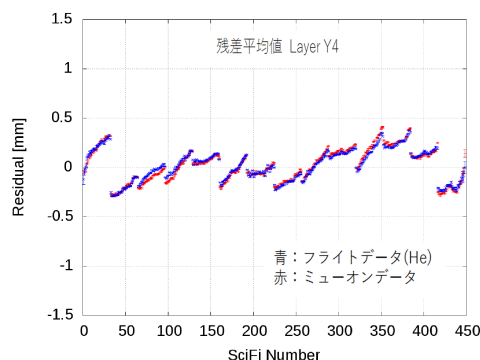


図4 シンチファイバーの設計座標からのずれ

(3) 地磁気を用いた低エネルギー宇宙線強度の推定方法の検討：磁場中の荷電粒子の運動方程式を解いて得られたCutoff Rigidityの世界地図を図5に示す。横軸が経度に対応する角度(0~360度)、縦軸が余緯度である。

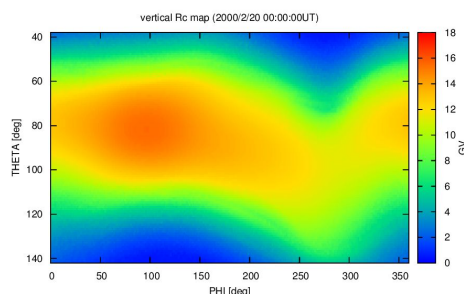


図5 Cutoff rigidity の Map

暖色はCutoff Rigidityが大きいことを表している。平均的に、緯度が高いところには低エネルギーの宇宙線が入射可能であり、低緯度ではエネルギーが高くないと入射できないという様子が見て取れる。また、地球の磁極に対応したところで低エネルギー粒子がより低緯度まで入り込めることがわかる。これを擬似観測データに適用して宇宙線スペクトルの再現を試みた結果を図6に示した。

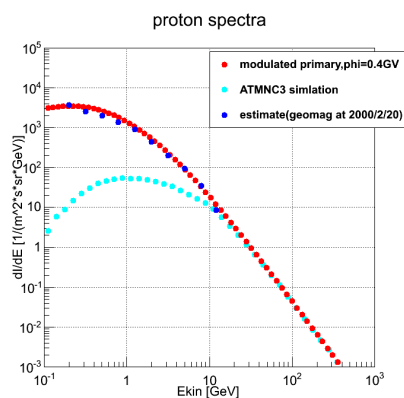


図6 陽子スペクトルの推定(シミュレーション)

赤の点はシミュレーションで仮定した真のスペクトル(地球磁場の外でのスペクトル)、水色の点は擬似観測データ(地球近傍でのスペクトル)である。青が擬似観測データに今回の手法を適用して求めたスペクトルであり、真の宇宙線強度スペクトルを精度よく再現することが出来た。

(4) 入射粒子の電荷・エネルギー決定：図7はCHDの1層目(X方向)と2層目(Y方向)の電離損失の値をプロットしたものであり、原子核の電荷に対応したグループが明らかに見てとれる。これを用いて入射粒子の中から陽子、ヘリウム核を選別することに成功した。

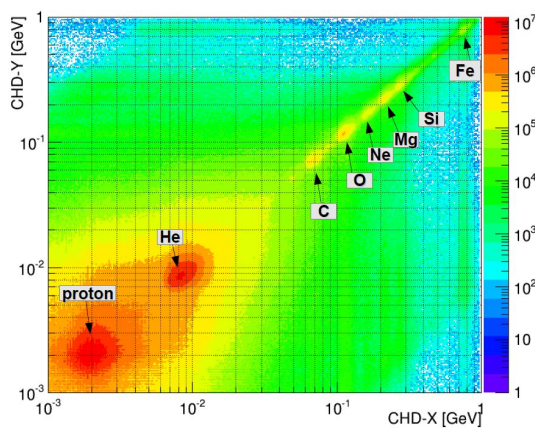


図7 CHD シグナルの分布

図8は陽子のシミュレーションデータについて、入射粒子の真のエネルギーとTASCでのエネルギー損失値の総和をプロットしたものである。非常に良い相関関係を確認できた。この結果からエネルギー較正曲線を作成し、TASCでのエネルギー損失の総和から入射粒子のエネルギーへ変換するための関係式を求めた。

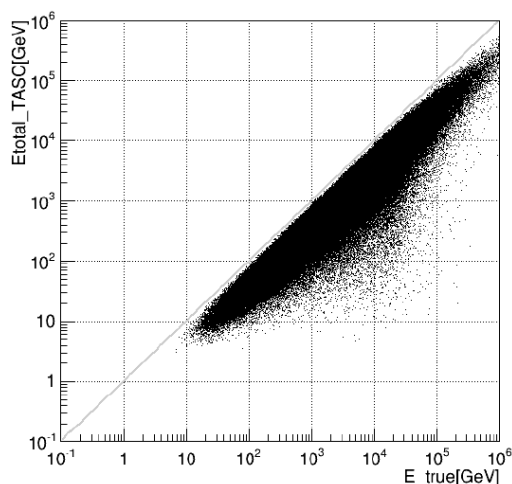


図8 TASC エネルギー損失の総和と真のエネルギー

(5) 絶対強度算出のための検出効率の算出、エネルギースペクトル再構成：モンテカルロシミュレーションを行い、その結果を用いてトリガー効率、飛跡再構成効率、電荷選別効

率、検出器の幾何学的な検出効率を算出した。現在これらの結果を観測データに適用して陽子・ヘリウム核の絶対強度とホウ素核/炭素核比の算出を行っている。最終的に絶対強度スペクトルを得るためにはエネルギー決定精度を考慮に入れたエネルギースペクトルの再構成(unfolding)を行う必要がある。現在複数の核反応モデルを用いたシミュレーションを用いてスペクトル再構成を行っており、その結果を検討中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Asaoka, Y., Ozawa, S., Torii, S., Adriani, O., Akaike, Y., Binns, W.R., Cherry, M.L., Guzik, T.G., Ichimura, M., Krizmanic, J.F., Mitchell, J.W., Mori, M., Nishimura, J., Ormes, J.F., Sakamoto, T., Shimizu, Y., Tamura, T., Wefel, J.P., Yoshida, A., Yoshida, K. 他71名, 27番目, On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS, *Astroparticle Physics*, 査読有, 100(2018)29-37, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2018.02.010

Adriani, O., Akaike, Y., Asaoka, Y., Binns, W.R., Cherry, M.L., Guzik, T.G., Ichimura, M., Krizmanic, J.F., Mitchell, J.W., Mori, M., Nishimura, J., Ormes, J.F., Ozawa, S., Sakamoto, T., Shimizu, Y., Tamura, T., Torii, S., Wefel, J.P., Yoshida, A., Yoshida, K. 他71名, 25番目, Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station *Physical Review Letters*, 査読有, 119(2017)181101, DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.181101

Y. Asaoka, Y. Akaike, Y. Komiya, R. Miyata, S. Torii, W.R. Binns, M.L. Cherry, T.G. Guzik, M. Ichimura, J.F. Ormes, S. Ozawa, T. Sakamoto, Y. Shimizu, T. Tamura, J.P. Wefel, A. Yoshida, K. Yoshida 他77名, 28番目, Energy Calibration of CALET Onboard the International Space Station *Astroparticle Physics*, 査読有, 91(2017)1-10, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2017.03.002

O. Adriani, Y. Akaike, Y. Asaoka, W.R. Binns, M.L. Cherry, T.G. Guzik, M. Ichimura, J.F. Krizmanic, J.W. Mitchell, M. Mori, J. Nishimura, J.F. Ormes, S. Ozawa, T. Sakamoto, Y. Shimizu, T. Tamura, S. Torii,

J.P.Wefel,A.Yoshida,K.Yoshida 他 72 名,
25 番目,
CALET UPPER LIMITS ON X-RAY AND GAMMA-RAY
COUNTERPARTS OF GW 151226
The Astrophysical Journal Letters,
査読有,829(2016)1-5,
DOI: 10.3847/2041-8205/829/1/L20

〔学会発表〕(計 5 件)

鳥居祥二,CALET による 2 年間の定常運用成
果報告,日本物理学会,2018 年

小澤俊介,CALET における原子核観測の軌
道上性能,日本物理学会,2017 年

O.Adriani, CALET UPPER LIMITS ON X-RAY
AND GAMMA-RAY COUNTERPARTS OF GW 151226,
the 8th Huntsville GRB conference,2016 年

市村雅一,CALET 検出器における入射粒子
の飛跡再構成,日本物理学会,2016 年

鳥居祥二,CALET 軌道上観測の初期運用報
告,日本物理学会,2016 年

6 . 研究組織

(1)研究代表者

市村 雅一 (ICHIMURA, Masakatsu)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 2 0 2 3 2 4 1 5