

深層学習を用いた

ガンマ線/原子核宇宙線空気シャワー選別手法の研究

日大生産工 ○塩見 昌司 横国大理工(院) 奥川 創介
 東大宇宙線研 大西 宗博 横国大理工 片寄 祐作
 東大宇宙線研 川田 和正 東大宇宙線研 佐古 崇志
 日大生産工 原 一之 神奈川大工 日比野 欣也

1. はじめに

チベット AS γ 実験は、宇宙線の起源・加速機構解明のために超高エネルギーガンマ線(宇宙ガンマ線)の観測を行っている。目的達成において最も重要な課題の一つに、観測にあたりノイズとなる原子核宇宙線との選別がある。本研究では深層学習を用いた宇宙ガンマ線と原子核宇宙線が作る空気シャワーの選別手法の研究結果について報告する。

2. 研究背景

宇宙線とは宇宙からほぼ等方的に地球に絶え間なく降り注ぐ高エネルギー放射線のことであり。その約 90%は陽子であり、他に軽い原子核や鉄のような重い原子核も含まれる。観測される宇宙線のエネルギースペクトルは、 $10^8 \sim 10^{20}$ eV と何桁にもわたっており、エネルギー E に対する頻度 $N(E)$ は $dN(E)/dE \propto E^\beta$ とべき関数で表され、knee (膝) と呼ばれる $10^{15} \sim 10^{16}$ eV の領域において、そのべき指数 β は -2.7 から -3.1 へと変わっている。このような特徴を持つ宇宙線(原子核宇宙線)が、どこで生まれ、どのようにして加速されるのか? 1912年に Hess によって宇宙線が発見されて以来 100 年以上経つが未だ謎が多く、宇宙線研究者にとって、最も重要な課題の一つである。

宇宙線の多くを占めるknee以下の宇宙線は「銀河宇宙線」と呼ばれ、銀河系内の超新星残骸(SNR)起源と考えられている。加速源探査にあたり、宇宙線の到来方向イコール加速現場と考えたいところであるが、原子核宇宙線は電荷を持ったため星間磁場により曲げられ、地球到来時には方向の情報を失う。そこで、加速源特定には原子核宇宙線が加速現場付近の分子雲等と相互作用し生まれる π^0 中間子の崩壊で作られる、電荷を持たない宇宙ガンマ線の探索

が有効な手段となる。また、銀河宇宙線の加速限界に関連する100 TeV (100×10^{12} eV) 領域ガンマ線の観測は、宇宙線の起源、加速機構の解明に特に重要な領域となる。

3. チベット AS γ 実験

10^{12} eV 以上の宇宙線は頻度が少ないため、宇宙での観測は難しく、通常は地上で観測を行う。地上で観測する際は、空気シャワーと呼ばれる、宇宙線(一次宇宙線)が大気と衝突し、相互作用を起こし、主に電子、陽電子、ガンマ線といった二次粒子(二次宇宙線)を次々と作りながら地上へと到達する粒子から得られる情報を元に、一次宇宙線の到来方向やエネルギーを測定する。

チベット AS γ 実験は、1990年より標高4,300 mのチベット高原に 0.5 m^2 のシンチレーション検出器を基盤目上に展開した空気シャワー観測装置を主装置とする宇宙線観測実験である(Fig.1)。数 TeV 以上の宇宙線を約1700 Hzで観測する。角度分解能は5 TeVで1度程度、100 TeVで0.2度である。実験の特徴として、昼夜問わず約2 srと広視野連続観測が可能なのが挙げられる。



Fig.1 チベット AS γ 実験の空気シャワー観測装置(Tibet-III)。白い四角は 0.5 m^2 シンチレーション検出器。

Study of Gamma-Ray/Cosmic-Ray Air Shower Separation Method
 With Deep Learning Algorithm

Atsushi SHIOMI, Sousuke OKUKAWA, Munehiro OHNISHI, Yusaku KATAYOSE,
 Kazumasa KAWATA, Takashi SAKO, Kazuyuki HARA, Kinya HIBINO

空気シャワー観測装置は、通常、一次宇宙線が宇宙ガンマ線であるかどうかの判定は難しく、宇宙線の到来方向分布のゆらぎ以上の有意な超過方向、及び超過分が宇宙ガンマ線の発生源、及び頻度とする手法が用いられてきた。本実験グループは、宇宙ガンマ線起源の空気シャワー中ミューオン数が原子核宇宙線起源のものと同数、数 10 分の 1 と少ない事に着目し、2014年に Tibet-III の地下に巨大水チェレンコフ光検出型ミューオン検出器 (MD) を設置し、地表の空気シャワー観測装置との連動実験を開始した。この新手法により、宇宙ガンマ線の背景ノイズとなる原子核宇宙線を、ミューオン数情報により 99.9%以上除去することに成功した。これにより、2019 年、100 TeV ガンマ線天文学の幕開けとなる世界で初めてカニ星雲からの高エネルギー電子起源と思われる >100 TeV ガンマ線の検出 (5.4σ) に成功し、さらに超新星残骸から原子核起源由来の >100 TeV ガンマ線の観測に成功した^{1),2)}。

このように選別に成功し感度向上を達成した装置であるが、2014 年以前のデータには MD は無い。Tibet-III のみで取得された観測データは約 15 年分蓄積されているが、これらのデータに対しては、原子核宇宙線、宇宙ガンマ線空気シャワーの特徴を利用した選別は行われていない。地上で検出された空気シャワーの密度広がり分布は、Fig.2 のように、ガンマ線と原子核宇宙線空気シャワーの発達過程の違いから異なると考えられる。本研究では、Tibet-III のみによるガンマ線測定感度の向上を目指し、シミュレーションによる二次粒子数分布画像に対して CNN 型の深層学習アルゴリズムを適用してガンマ線選別を試みた。

4. 使用データと選別手法

CNN を用いた分類実験を行うにあたり、2 種類のシミュレーションデータ

Sim.1 : 天頂から装置中心付近に単一エネルギー (10 TeV, 100 TeV) の宇宙ガンマ線と高エネルギー陽子を入射させた単純な条件のイベントを元に作成されたデータ

Sim.2 : カニ星雲の観測に対応する軌道、現実的なガンマ線、及び原子核宇宙線のエネルギースペクトル、装置に一樣に入射させる等現実的な条件により作成されたデータを用意した。

まず単純な (自由度が低い) Sim.1 を用い、シミュレーションデータが学習データの質・量

として CNN のような複雑なネットワーク構造にとって適切かどうかを以下の 2 手法による選別割合から確認した。

手法 1 : 既知の空気シャワーの特徴パラメータを用いたネットワーク構造が単純な多層パーセプトロンによる分類

手法 2 : 二次粒子数分布画像データを用いたネットワーク構造が複雑な CNN による分類
次に Sim.2 を用い、手法 2 による分類を行った。

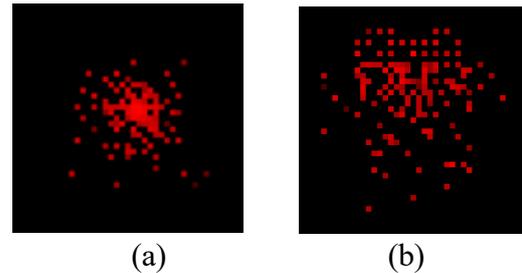


Fig.2 Tibet-III を仮定したモンテカルロシミュレーションで得られた二次粒子数分布画像の例。(a) 29 TeV ガンマ線空気シャワー、(b) 76 TeV 原子核宇宙線空気シャワーの画像。赤色が濃いほど観測二次粒子数密度が多い場所を示している。原子核宇宙線空気シャワーによる二次粒子数は、ガンマ線空気シャワーによるものに比べ、散らばった分布をしている。

5. 実験結果および検討

Sim.1 を用いた正解率は 2 手法によらず 10, 100 TeV データに対し、それぞれ 6, 7 割とほぼ同じ割合となり、使用データの質と量が学習に際し一定のレベルにあること、CNN を学習に使用する正当性が確認できた。次に現実的な Sim.2 を用い、CNN による選別割合を求め、装置性能評価をした結果、感度が約 1.5 倍向上することがわかり、過去のデータの再解析に有効であることが分かった。(論文投稿予定のため詳細は割愛します)

参考文献

- 1) M. Amenomori et al, "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source", *Physical Review Letters*, 123, 051101, (2019).
- 2) M. Amenomori et al, "Potential PeVatron supernova remnant G106.3+2.7", *Nature Astronomy Letters*, 5, 460-464, (2021).