

学位申請論文公開講演会

日時：2025 年 2 月 5 日(水) 10:00~

申請者：古市 亜門 (E 研)

場所：物理会議室 (C207)

題目：論文題名

ジェットの解剖学 - コライダー物理における深層学習の利用と解釈性の向上

主論文の要旨

標準模型を超える新物理の探索は素粒子物理学の究極の目標であり、この目標に沿って粒子加速器を用いたコライダー実験が行われている。コライダー実験でクォークなど色荷を持つ高エネルギー粒子が生成されると、量子色力学(QCD)の色荷閉じ込めの効果により、QCD 相互作用によって生成される多数の共線的な粒子の束である「ジェット」が測定されることになる。大ハドロンコライダー(LHC)実験のような高エネルギー実験ではまた、新物理探索の鍵となる W 粒子やトップクォークといった重い素粒子も大きな運動量を持って生成されるため、これらの重い粒子が色荷を持つ粒子に崩壊する事象もひとつの「ジェット」として測定される。そのため、LHC 実験の測定結果から標準模型を超える新物理の兆候を探すには、測定されたジェットが、軽いクォークやグルオン由来のジェットなのか、それとも高エネルギーの重い素粒子の崩壊によるジェットなのかを高精度に選別するアルゴリズムが必要となる。この問題に対し、近年、深層学習に基づく選別アルゴリズムが用いられるようになり、著しい成果を収めた。しかし、従来の深層学習に基づくモデルは分類根拠が不透明であり、その解釈が困難である。

申請者は物理的な解釈が明確な高レベル特徴量に着目し、系統誤差を抑えつつ高精度なジェット識別を実現する新しい手法を提案した。具体的には、ジェットの質量、横運動量、サブジェット構造、カラー構造を反映する粒子分布などの特徴量を組み合わせ多層パーセプトロンと呼ばれる単純なニューラルネットワークを用いて、重い粒子（トップクォーク）を起源とするジェットと軽い粒子（軽いクォークやグルオン）が起源のジェットを識別する新しい深層学習モデルを構築した。申請者の提案する手法は、各特徴量が物理的に明確な意味を持つため、識別結果にどの特徴量がどれほど寄与しているかを分析することが容易である。

申請者はさらにこの手法を Particle Transformer (ParT) と呼ばれる最先端の深層学習モデルを用いた識別器とシミュレーションデータを用いて比較し、提案手法が ParT に匹敵する識別精度を達成することを示した。また、ブートストラップ法を用いて統計的有意性を検証することで、提案手法が ParT と同等の性能を維持しつつ、学習の不確実性を低減することを示した。これは、申請者が提案する手法が ParT よりも解釈性が高いのみならず、より安定した学習を可能にすることを示唆する結果である。

以上のように、申請者は高レベル特徴量に基づいたジェット識別器を作成し、その性能評価を行った。申請者の作成したジェット識別器は、最先端の深層学習モデルに匹敵する精度を達成し、学習の不確実性を低減し、解釈性が向上し、より安定した学習が可能となっており、新物理探索への系統誤差の抑制と物理的理解の深化に資するものである。