

氏名	岩崎 啓克
学位の種類	博士 (理学)
報告番号	甲第531号
学位授与年月日	2020年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	X-Ray Spectral Study of Supernova Remnants Using Unsupervised Deep Learning 教師なし深層学習を用いた超新星残骸のX線分光研究
審査委員	(主査) 北本 俊二(立教大学大学院教授) 内山 泰伸(立教大学大学院教授) 村田 次郎(立教大学大学院教授)

I. 論文の内容の要旨

(1) 論文の構成

本論文は、最近大きく発展した機械学習を超新星残骸の X 線データの解析に初めて適用し、その有効性を示した。機械学習を実際のデータ解析に適用するにあたり、光子計測での統計誤差、特に光子数が少ない場合、ポアソン統計誤差の取り扱いが必要である。本論文では、具体的にポアソン統計による尤度関数を適用した機械学習による解析手法を考案した。

本論文は次のように構成されている。

第 1 章では序論として、最近の天文学の観測データがビッグデータ化していることと、著者が興味ある超新星残骸のデータ解析の重要性と解析の困難さを述べ、機械学習の手法が有望であることに言及する。第 2 章では機械学習、特に深層学習について、いくつかの技法の説明と分類を示す。また、これまで天文学のデータ解析に用いられた例を示す。第 3 章では超新星残骸の一般的説明と X 線放射の説明、用いたデータを取得したチャンドラ衛星と搭載されている望遠鏡の説明をする。第 4 章では本論文で使用した機械学習の手法をまとめる。また、本論文で初めて導入した、ポアソン統計に従うデータを適切に扱い機械学習に適用する方法を説明する。第 5 章、第 6 章、第 7 章では、それぞれ、テイコの超新星残骸、ケプラーの超新星残骸、1006 年の超新星の残骸の観測データに機械学習を適用し、興味ある特徴を機械学習により抽出できたことを示してその有効性を示す。第 8 章では本論文の結果をまとめる。

(2) 論文の内容要旨

最近の天文学の観測データは、画像情報、エネルギー情報、時間情報と多くの次元からなるビッグデータであり、その中から有用な物理情報を引き出すことが大変煩雑になっている。著者が興味を持つ超新星残骸のデータ解析は宇宙物理的に非常に重要である。この種の天体は空間的に広がった複雑な形状と場所により異なるエネルギースペクトルを示す。そこでは多くの現象が含まれているが、その中から、空間的構造やエネルギースペクトルの特徴を抽出し、重要と考える物理過程を引き出す必要がある。これまではエキスパートが空間構造やエネルギースペクトルの特徴を人為的に抽出して解析することで、物理過程の解釈を行ってきた。しかしながら、ビッグデータとなった現代、あるいは今後さらに巨大化するデータに、これまで通り人為的に特徴の抽出を行うことは大変困難である。したがって、機械学習を超新星残骸の解析に用いることは有望である。また、機械学習では人為的バイアスを小さくでき、予期せぬ特

徴が抽出され、その特徴を解析することで、人間による気づきが困難な新たな物理現象を見出すことができる可能性もある。

すでに、天文学一般のデータ解析には、機械学習、特に深層学習のいくつかの技法が使われつつある。しかし、超新星残骸の解析では、これまで主成分解析等も行われているものの、機械学習を適用した例はなく、本論文がはじめて機械学習、深層学習を適用した例である。

本論文で使用した手法は、変分オートエンコーダ (Variational Auto-encoder : VAE) による次元の削減、および、混合ガウスモデル (Gaussian Mixture Model : GMM) による自動分類という、堅実な教師無し機械学習の方法である。また、本論文では、初めてポアソン統計を考慮した損失関数を導入し、実際の解析に適用した。そして、三つの超新星残骸 (ティコの超新星残骸, ケプラーの超新星残骸, 1006 年の超新星の残骸) の観測データに適用した例を示す。その結果、ティコの超新星残骸では、鉄ノットと呼ばれる構造と北東領域での逆行衝撃波を含むと考えられる同心円上の構造を自動的に抽出した。ケプラーの超新星残骸では、赤外線で明るいダスト領域を自動的に抽出した。そして、自動的に抽出した分類は、先行研究で報告されているエキスパートがデータを直接検討しながら人為的に抽出した特徴を再現していることを示した。さらには、それ以外の機械学習が抽出した特徴を、実データと見比べることで物理過程と関連付けた。

II. 論文審査の結果の要旨

(1) 論文の特徴

本論文は、最近大きく発展した機械学習を天文学のデータ解析、特に超新星残骸の X 線データの解析に世界で初めて適用し、その有用性を示した。ここでは、VAE による次元の削減、そして、GMM によるデータの分類を行なう一連の手法を、初めて作り上げた。特に筆者は、データに付随するポアソン統計を正しく評価するために、ポアソン統計を適用した損失関数を初めて導入した。超新星残骸は、宇宙の元素合成に決定的に重要な役割を果たしており、また、高エネルギー宇宙線の加速現場として非常に興味ある宇宙の実験場である。観測データには、複雑な形状とエネルギースペクトル、そして、膨張をはじめとした時間的変化まで情報が含まれている。これら情報は近年の観測装置の進化に伴い、数メガピクセルの画素それぞれが数万チャンネルのスペクトル情報を持つまでとなった。その中から重要な物理情報を引き出すためには、どのような構造の場所でどのようなエネルギースペクトルを放射しているかを分類抽出することが鍵となる。これまで、その構造やエネルギースペクトルの特徴を見出すためにエキスパートによる試行錯誤が行われてきた。しかし、さらに詳細で大

量の情報が手にはいる今後は、機械学習の手助けが必須であろう。しかも、人間の主観的バイアスになるべく入らない環境で、構造やエネルギースペクトルの特徴を抽出するためには機械学習は非常に適している。特に教師なし学習による抽出プロセスの研究はますます重要となろう。本論文は、タイムリーにこの課題に取り組み、実際にデータに適用して、その有用性を示した。

(2) 論文の評価

本研究では、機械学習を超新星残骸の観測データ、あるいは、一般に拡散した天体に適用した初めての例である。申請者は、既存のアルゴリズムにうまく適用できる解析スキームを確立するとともに、ポアソン統計を初めて扱うことで、実際のデータを適切に処理することを可能にした。

3個の超新星残骸に適用した結果、エネルギースペクトル形状から、プラズマ状態の異なる場所を明確に抽出することができることを示し、抽出された場所に注目して、スペクトルモデルフィッティングや輝線パラメータの変化を調べることで、物理状態の場所による違い、例えばイオン化状態の変化や逆行衝撃波の位置、あるいは、加熱された星周物質を特定することに成功した。

このように、申請者は、すでにビッグデータとなった、超新星残骸の観測データに機械学習の手法を初めて取り入れ、その有効性を示した。拡散した天体の観測データは、今後ますます膨大な情報を含むようになり、本論文で示したような機械学習を用いた解析手法がますます必要になる。このように、将来の動向を見据えた、先駆的な研究である本論文は、博士論文の価値があると判断する。