

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14464

研究課題名(和文) Combining Collective and Artificial Intelligence to Understand the Early Universe

研究課題名(英文) Combining Collective and Artificial Intelligence to Understand the Early Universe

研究代表者

HARTWIG Tilman (Hartwig, Tilman)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：00843434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：私たちは、次期スバルプライムフォーカス分光器の情報獲得を最大化するために、畳み込みニューラルネットワークに基づいた新しいスペクトル解析パイプラインを開発することを提案しました。私たちは、国際的な協力者チームと協力して、天の川銀河内の古い、金属の乏しい星の化学組成を分析することで、宇宙初期の星形成を理解するために、このようなツールの開発を開始しました。私たちは、人工知能(AI)に関する一連の公開講座に先立ち、市民科学プロジェクトとして畳み込みニューラルネットワークを最適化したいと考えていました。しかし、新型コロナウイルスの影響で計画を変更する必要がありました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

We made significant contributions to the data analysis pipeline of the Prime Focus Spectrograph on the Japanese Subaru Telescope. Despite delays caused by the Covid pandemic, we developed new tools, shared our data with the public, and prepared the scientific data analysis.

研究成果の概要(英文)：We proposed to develop a novel spectral analysis pipeline, based on convolutional neural networks, to maximize the information gain for the upcoming Subaru Prime Focus Spectrograph. With an international team of collaborators, we started the development of such a tool in order to understand star formation in the early Universe by analyzing the chemical composition of old, metal-poor stars in the Milky Way. We wanted to optimize the convolutional neural network as a citizen science project, preceded by a series of public lectures on Artificial Intelligence (AI). However, we had to adapt our plans due to Covid. The final pipeline will allow the community to extract stellar parameters, such as chemical composition, of thousands of stars in real time for upcoming observations.

研究分野：Astrophysics

キーワード：Artificial Intelligence Machine Learning Astronomy Data Science Stellar Parameters

### 1. 研究開始当初の背景

We have entered the era of big data astronomy, where telescopes obtain petabytes of data per day, too much for manual analysis. In order to maximize the scientific gain, we need to develop next-generation,

AI-based algorithms to optimize the data analysis. The Subaru telescope on Hawaii is a Japanese-owned telescope that has already contributed to several breakthrough discoveries in astronomy (Iye et al., 2006, *Nature*, 443, 186; Tanaka et al. 2009, *ApJL*, 505, 9; Sheppard et al., 2018, MPEC). In 2020, it will be equipped with the “Prime Focus Spectrograph” (PFS) that will out-perform other multi-fiber spectrographs by a large margin. The PFS is a spectrograph with a fiber positioner system to be mounted at the prime focus of the Subaru telescope. The instrument allows simultaneous spectral observation of up to 2400 astronomical targets in a wide field of view of 1.3 degree diameter at a time (Takada et al., 2014, *PASJ*, 66, 1).

### 2. 研究の目的

One prime scientific goal of PFS is to understand the early Universe and first galaxies by observing their present-day remnants in our cosmic neighborhood. The first galaxies are the building blocks of our present-day Universe and most questions of galaxy formation, stellar evolution, and the chemical composition of the Universe are causally connected to them. However, only a handful of galaxies have been observed at redshift  $z > 10$  (Bowens et al., 2011, *Nature*, 469, 504), due to their intrinsic faintness. Therefore, many fundamental questions related to the early Universe remain open: reionisation (Robertson et al., 2015, *ApJ*, 802, 19), the production of the first metals (Nomoto et al., 2013, *ARA&A*, 51, 457) and especially of r-process elements (Ji et al., 2016, *Nature*, 531, 610), the origin of supermassive black holes (Volonteri, 2010, *A&Arv*, 18, 279), and the UV luminosity function (Bowens et al., 2015, *ApJ*, 803, 34). Finding answers to these questions is crucial to understand the Universe: When do the first stars form and where are the first organic elements synthesized?

The PFS can answer these questions by obtaining thousands of spectra of old, metal-poor stars in the Local Group. These stars have preserved the chemical fingerprint of their birth environments and their analysis is called “Galactic Archaeology”. With the cutting-edge technology of Subaru PFS, this approach will allow to construct the chemical and dynamical history of the Milky Way and therefore to create a clearer picture of galaxy formation in the early Universe. However, the bottleneck of this approach remains the unprecedented amount and quality of spectroscopic data in the optical wavelength regime.

### 3. 研究の方法

We originally planned to combine public intelligence (citizen science) with artificial intelligence (machine learning) to analyse spectra of very metal-poor stars. For this purpose, we generated a large training set of such spectra.

#### 4. 研究成果

We were not able to complete this research project as intended for two main reasons: First, the Covid pandemic did not allow to hold any public lectures on AI, which delayed our plan to include the citizen science aspect of our project. Additionally, this also delayed the installation of the PFS spectrograph on the Subaru telescope. Second, I started a new job at the German Government Agency in 2023. If I had continued to work at the University of Tokyo, we could have extended the grant and finished the project in 2023.

However, we still made important contributions to the data pipeline of the PFS Galactic Archaeology working group: we created a large template of synthetic libraries, including a new linelist for the most relevant atomic transitions. We contributed to the PFS SSP document by developing further science cases and optimizing the upcoming observations. We established further collaborations between the USA, China, and Germany to share data and results.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Tang Shenli, et al.	4. 巻 922
2. 論文標題 Optical Spectroscopy of Dual Quasar Candidates from the Subaru HSC-SSP program	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1ff0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishigaki Miho N, Hartwig Tilman, Tarumi Yuta, Leung Shing-Chi, Tominaga Nozomu, Kobayashi Chiaki, Magg Mattis, Simionescu Aurora, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 506
2. 論文標題 Origin of metals in old Milky Way halo stars based on GALAH and Gaia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5410 ~ 5429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Rasmussen Kaitlin C., Zepeda Joseph, Beers Timothy C., Placco Vinicius M., Depagne Eric, Frebel Anna, Dietz Sarah, Hartwig Tilman	4. 巻 905
2. 論文標題 Metal-poor Stars Observed with the Southern African Large Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 20 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Silverman John D., Tang Shenli, Lee Khee-Gan, Hartwig Tilman, et al.	4. 巻 899
2. 論文標題 Dual Supermassive Black Holes at Close Separation Revealed by the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 154 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba4a3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tarumi Yuta, Hartwig Tilman, Magg Mattis	4. 巻 897
2. 論文標題 Implications of Inhomogeneous Metal Mixing for Stellar Archaeology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 58 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab960d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Whalen Daniel J., Mezcuca Mar, Meiksin Avery, Hartwig Tilman, Latif Muhammad A.	4. 巻 896
2. 論文標題 Radio Power from a Direct-collapse Black Hole in CR7	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L45 ~ L45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab9a30	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ziyin, Liu and Hartwig, Tilman and Ueda, Masahito	4. 巻 33
2. 論文標題 Neural Networks Fail to Learn Periodic Functions and How to Fix It	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings: Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 1583-1594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 Multiplicity of the first stars confirmed by supervised classification of extremely metal-poor stars
3. 学会等名 GALAH Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 Machine learning finds hint for multiplicity of the first stars in stellar archaeology data
3. 学会等名 Metal-Poor Universe ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 Machine learning finds hint for multiplicity of the first stars in stellar archaeology data
3. 学会等名 NIC-XVI ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 The First Stars
3. 学会等名 SAERAC ( 招待講演 )
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 AI-based constraints on the multiplicity of the first stars
3. 学会等名 First Stars Domestic Workshop
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 Public Release of A-SLOTH
3. 学会等名 ASJ Fall Meeting
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Tilman Hartwig
2. 発表標題 Neural Networks can learn periodic data
3. 学会等名 RESCEU Summer School
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関