

Zanstraの手法による惑星状星雲中心星の表面温度の推定

銀河学校2019 B班

大野 智洋(高3)【甲陽学院高等学校】 笹田 翔太(平成30年度卒業)【京都府立洛北高等学校】

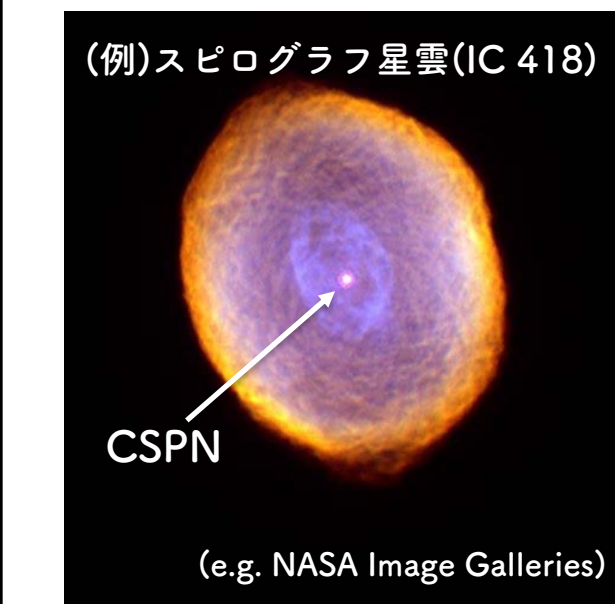
村田 響子(高2)【お茶の水女子大学附属高等学校】 菅沼 斗憇(高2)【栄光学園高等学校】

西内 月紅実(高2)【東京都立日比谷高等学校】 石本 貴昭(高2)【中央大学附属高等学校】 柴田 美羽(高1)【広島大学附属高等学校】

(e.g. NASA Image Galleries)

1. 研究の動機

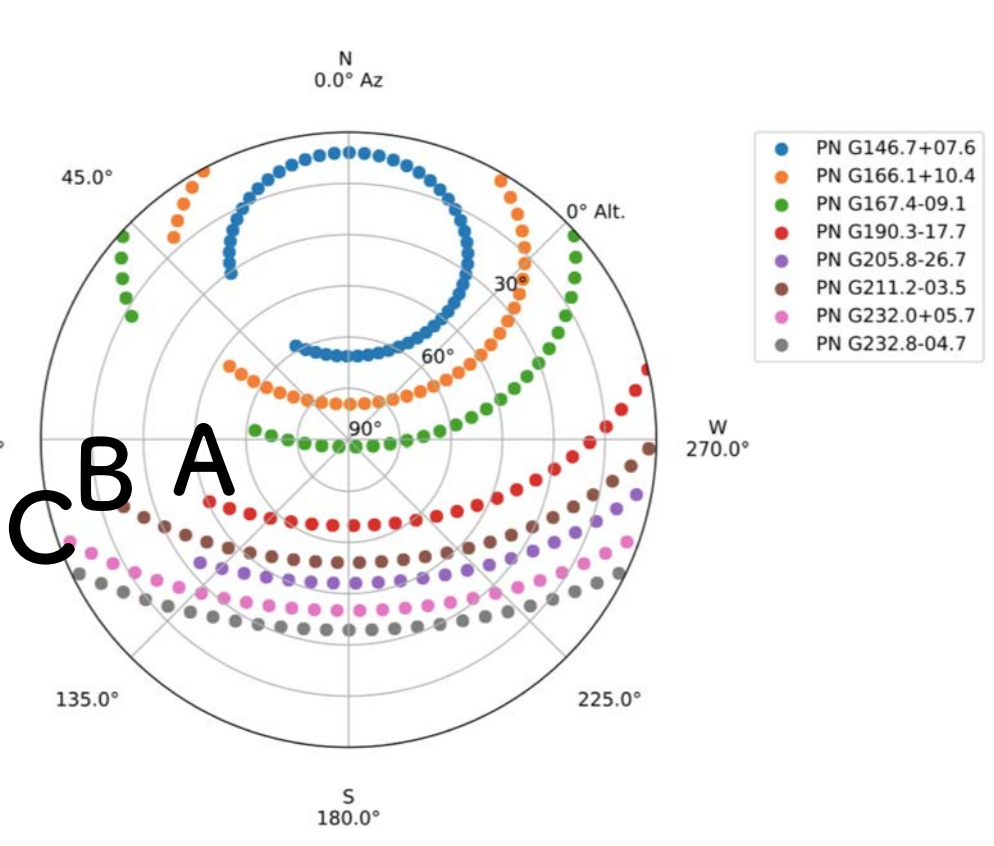
一般に天体の有効温度は、観測により判明した放射スペクトルをウィーンの変位則に当てはめて推測される。しかし、今回観測対象とした惑星状星雲(以下、目標天体:下図はその一例)は中心星(CSPN)周囲の水素原子が紫外光を吸収し、放射スペクトルのピークが不明瞭になる。そのため、**単純に一般的な手法を適用して有効温度を正確に知ることは困難**である。



そこで、本研究では、CSPN周囲に存在する電離水素原子の再結合によって放出されるH α 輝線(水素原子から出る特定の帯域の光)の強度と高温天体の有効温度に対応があることを示したZanstra Methodを利用して複数のCSPNの表面温度(以下、有効温度)を検討した。

2. 観測条件

- 日時: 2019年3月26日19時43分-20時29分 晴れ一時曇り
- 観測機器: 東京大学 木曾観測所
105cmシュミット望遠鏡
次期超広視野CMOSカメラ Tomo-e-Gozen
- 観測天体: PN G190.3-17.7 (天体A), PN G211.2-03.5 (天体B), PN G232.0+05.7 (天体C) (全て惑星状星雲)
→観測対象の3天体は、右図中の6つの惑星状星雲のうち、観測当夜高度が高く、撮影しやすい惑星状星雲とした。



4. 解析①: 光子数の算出

光子数の算出のために行った解析は、以下の通りである。
① 測光の結果判明した目標天体のAB等級を、**放射流束(単位時間・単位面積当たりの放射エネルギー)[J/m²/s²]**に変換する。
② 放射流束から**光子数(ある波長帯域内に含まれる光子の数)**を求める。
(※計算結果は天体Cについて行った解析の過程で求められた値である。他の2天体についても同じ解析を行ったが、計算過程の詳細な記述は割愛する。)

① AB等級→放射流束

天体CのAB等級: 11.96(H α -band) 13.53(r-band)
放射流束 F_{ν} は単位時間・単位面積当たりの放射エネルギーを示す物理量であることから、AB等級 m_{AB} を放射流束に変換することで、目標天体が放射する電磁波が、観測地点に到達するときの強度を知ることができる。
等級と放射流束には次の関係が成り立つことから、等級を放射流束に変換すると、
$$m_{AB} = -2.5 \log f_{\nu} - 48.60 \quad (f_{\nu} [\text{erg}/(\text{s cm}^2 \text{ Hz})])$$
$$F_{\nu} = 5.970 \times 10^{-22} [\text{J}/(\text{s m}^2 \text{ Hz})] (\text{H}\alpha\text{-band})$$
$$F_{\nu} = 1.406 \times 10^{-22} [\text{J}/(\text{s m}^2 \text{ Hz})] (\text{r-band})$$

② 放射流束→光子数

光子(Photon)は、電磁波を粒子と見たときの粒子の名称で、素粒子の一つである。光子は質量を持たず、真空中を光速で伝播する。放射流束 F_{ν} [J/m²/s²]を光子1個が持つ光エネルギーの値[J]で割ると、ある波長帯域での放射流束が、光子何個分のエネルギーに相当するかを知ることができる。(λは、H α -band・r-band各帯域の中心波長: 656nm・622.5nm)
$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\nu: \text{振動数} \quad c: \text{光速} \quad h: \text{プランク定数})$$
$$E = 3.028 \times 10^{-19} \dots (\text{H}\alpha\text{-bandにおける光子1個のエネルギー [J]})$$
$$E = 3.191 \times 10^{-19} \dots (\text{r-bandにおける光子1個のエネルギー [J]})$$
H α -bandの中心波長での光子数 $N_{\text{H}\alpha}$ 、r-bandの帯域全体での光子数を $N_{\text{r+H}\alpha}$ とすると、
求める光子数は、
$$N_{\text{H}\alpha} = \frac{5.970 \times 10^{-25}}{3.028 \times 10^{-19}} = 1.970 \times 10^{-6} \quad N_{\text{r+H}\alpha} = \frac{1.400 \times 10^{-25}}{3.163 \times 10^{-19}} = 4.426 \times 10^{-7}$$
したがって、求める光子数比は、
$$\frac{N_{\text{r+H}\alpha}}{N_{\text{H}\alpha}} = 4.4467$$

5. 結果・考察

以上の解析を経て得られた各天体の有効温度を右に示す。今回の解析の結果推定されたCSPNの有効温度は、いずれも先行研究で天体が電離水素原子の再吸収に伴ってH α 輝線を出すために必要とされる有効温度:20000K(W.A.Weidmann et al., 2011 参考文献[1])を上回っている。また、本研究の目標天体には、観測と測光を行いやすくするため、比較的近距离にあって視直径の小さいものを選んでいる。そのため、目標天体はガス拡散開始から比較的時間が経過していない、表面温度が低い傾向にある天体であると予想できる。以上から、本研究を通して、CSPNの有効温度に関してある程度妥当な推定を行えたと考えられる。
しかし、本研究で得た天体Cの有効温度は、先行研究で見積もられている28100±300K (Masaaki Otsuka, 2019 参考文献[2])を大きく下回っている。今回このような有効温度が見積もられた理由として、以下2点が考えられる。1点目に、本研究では[2]に示されるようなH α 以外の帯域で見られる輝線によるエネルギー放出、すなわち水素以外の元素によるエネルギー吸収と水素における他の輝線の影響を考慮しなかったこと、2点目に、実際にはガス(CSPN周囲の電離水素領域)がCSPNによる紫外線領域の放射を全て吸収していないことである。これらはともに解析②において $N_{\text{extraH}\alpha}$ の値を減少させ、光子数比(縦軸)-有効温度(横軸)ダイアグラムを縦軸方向に引き延ばす要因になりうる。解析①で得られた光子数比を引き伸ばされたダイアグラムに適用すると、同じ光子数比であっても、上記の結果よりも高い有効温度が得られることが期待される。
なお、我々は誤差が発生した原因の特定のため、H α -bandがr-bandに含まれることによる誤差と、ほとんどの帯域で波長にかかわらず放射強度を同じと仮定することによって生じる誤差にも注目した。しかし、これらの影響は結果に直結する光子数比に対して5%以下の範囲に収まり、ほぼ無視できるものと捉えて良いという結論に至った。

6. 結論

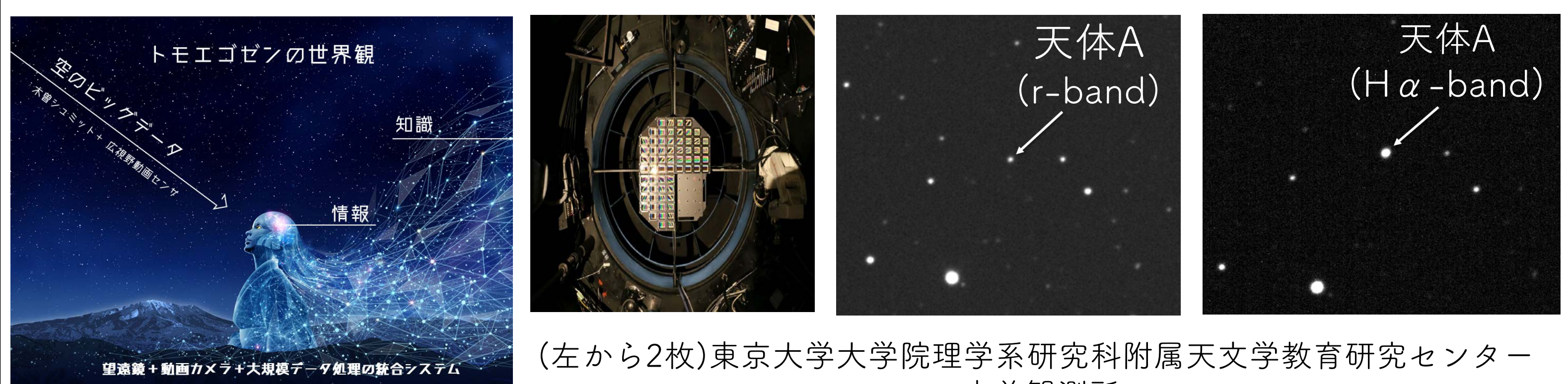
今回の研究から、分光観測を行わなくとも、2つの波長帯域の撮像画像を解析することで、先行研究に示された内容に大きく矛盾しない、CSPNの有効温度の有意な推定が可能であることが示唆された。考察で述べたとおり、星雲部が紫外線を全て吸収しないこと、他の輝線による放射の影響を考慮することで、推定の精度を高めることができると考えられる。改良を施したこの手法をより多くの高温天体に施すことで、その表面温度を比較的簡単に得ることができる。これはCSPNをはじめとした高温天体の分類の他、それらの形成年代の推定など、より発展的な研究を行う際の基礎を与える手法となりうる。

3. 方法

2019年3/26-29の期間に東京大学木曾観測所にて開催されたNPO法人Science Station主催・銀河学校2019において、東京大学天文学教育センター・大澤亮先生のご指導のもと、以下の手順を踏んで観測・解析を行った。その後、観測で得られた撮像画像を解析し直し、解析結果の精度を高め、目標天体の波長帯域ごとの放射量を光子数に変換したものと、CSPNの有効温度の関係を示すグラフを作成した。

① 観測

105cmシュミット望遠鏡と次期超広視野CMOSカメラTomo-e-Gozen(下図左から2枚目:2019年3月時点では未完成であった)を用いて3つの目標天体(「2.観測条件」を参照)をH α -band(656±2.5 nm:帯域の幅5nm)・r-band(550-695nm:帯域の幅145nm)の2種類の波長帯のフィルターを通して撮影した。ダーク・フラット処理後の画像の測光を行い、目標天体の等級を決定した。



② 解析

目標天体のカウント値(撮像画像内での明るさの相対値)から得られた等級を放射流束に変換し、単位時間・単位面積当たりの放射エネルギーから光子数(ある波長帯域での光の放射エネルギーを光子1個あたりのエネルギーで割ったもの)を求めた。H α -bandの光子数とr-bandの光子数を比較し、光子数比をZanstra Methodに当てはめ、CSPNの表面温度を推測した。

解析②: 光子数比-有効温度ダイアグラムの導出とその利用

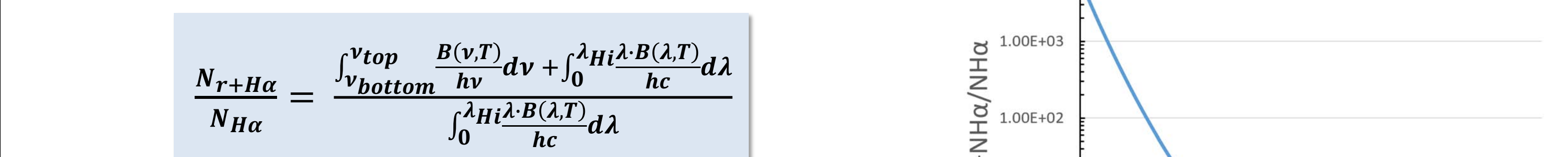
① 簡単で理想的な惑星状星雲モデルを仮定する。中心星は黒体放射をし、**星雲部中の水素のみが水素電離エネルギー以上のエネルギーを持つ光子を全て吸収して電離する**。それより長波長の電磁波は全て透過する。さらに星雲部は、**電離水素の再結合に際し、必ずH α 輝線光子を放出する**とする。

② 仮定から、惑星状星雲が定常状態にあるとき、星雲部において電離水素の数が一定であることから、以下の等式が成立する。
(赤丸部分で示される光子数) = (輝線成分の光子数) ... (1)

③ 赤丸部分で示される光子数は以下の式で与えられる。ただし、以下 $B(\lambda, T)$, $B(\nu, T)$ は黒体放射量、 λ は波長、 $\lambda_{\text{H}\alpha}$ は水素電離波長、 h はプランク定数、 c は光速、 ν は振動数、 T は有効温度である。
(赤丸部分で示される光子数) = $\int_0^{\lambda_{\text{H}\alpha}} \frac{B(\lambda, T)}{hc} d\lambda = \int_0^{\lambda_{\text{H}\alpha}} \frac{B(\nu, T)}{hc} d\nu$... (2)

④ ③と同じ要領でr-band内における中心星の黒体放射に由来する光子数 $N_{\text{blackbody}}$ を計算する。ただし、r-bandの周波数帯域を $\nu_{\text{bottom}} \sim \nu_{\text{top}}$ とする。
$$N_{\text{blackbody}} = \int_{\nu_{\text{bottom}}}^{\nu_{\text{top}}} \frac{B(\nu, T)}{hc} d\nu (= \text{const.}) \dots (3)$$

⑤ 以上の議論から、求める光子数比 $\frac{N_{\text{r+H}\alpha}}{N_{\text{H}\alpha}} = \frac{N_{\text{extraH}\alpha} + N_{\text{blackbody}}}{N_{\text{extraH}\alpha}}$ は以下のようになり、これはTの関数として表される。
$$\frac{N_{\text{r+H}\alpha}}{N_{\text{H}\alpha}} = \frac{\int_{\nu_{\text{bottom}}}^{\nu_{\text{top}}} \frac{B(\nu, T)}{hc} d\nu + \int_0^{\lambda_{\text{H}\alpha}} \frac{B(\lambda, T)}{hc} d\lambda}{\int_0^{\lambda_{\text{H}\alpha}} \frac{B(\lambda, T)}{hc} d\lambda}$$



⑥ 10000K ≤ T ≤ 100000Kをみたま多数のTに対して $\frac{N_{\text{extraH}\alpha}}{N_{\text{blackbody}}}$ を求めると右図のような関係が得られる。

⑦ 天体A, B, Cのそれぞれについて、得られた光子数比とダイアグラムを参照することで、これらの有効温度を決定することができる。(有効温度の推定値は「5.結果・考察」に記載)

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学天文学教育研究センター 大澤亮特任助教には、研究過程全般において多大なる助力をいただいた。さらに、お茶の水女子大学付属高等学校理科(物理科)教諭 朝倉彬先生にも、発表準備に際して専門的な見地から有益な助言をいただいた。

また、NPO法人 Science Station および 東京大学木曾観測所の皆様にはお忙しい中、中高生たる銀河学校参加者に、本格的な天文学研究に触れる機会を提供していただいた。本研究に関わった全ての皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献・資料

- [1] W.A.Weidmann and R.Gamen. Central stars of planetary nebulae. II. New OB-type and emission-line stars. AA, Vol. 531, p. A172, Jul 2011.
- [2] Masaaki Otsuka. Physical properties of the fullerene C60-containing planetary nebula SaSt2-3. MN-RAS, Vol. 482, No. 2, pp. 2354-2373, Jan 2019
- [3] 輻射再吸収とプラズマ分光診断, 門信 一郎他, 「J. Plasma Fusion Res. No.11」, 631-646, 2010
- [4] Identification of PN G232.0+05.7 as a new halo planetary nebula and of IRAS 19336-0400 as a new type III planetary nebula. C. B. Pereira and L. F. Miranda, "Astronomy & Astrophysics", 2011
- [5] An Application of the Quantum Theory to the Luminosity of Diffuse Nebulae, H. Zanstra, "The Astrophysical Journal", 65, 50, 1927
- [6] Physical properties of the fullerene C60-containing planetary nebula SaSt2-3, Masaaki Otsuka, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2354-2373, 2019
- [7] ATOMIC AND MOLECULAR EMISSION LINES FROM THE RED RECTANGLE. L. M. Hobbs, J. A. Thorburn, T. Oka, J. Barentine, T. P. Snow, and D. G. York, "The Astrophysical Journal", 947-957, 2004
- [8] Central stars of planetary nebulae II. New OB-type and emission-line stars, W. A. Weidmann, and R. Gamen, "Astronomy & Astrophysics", 2011
- [9] Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei, Donald E. Osterbrock, Gary J. Ferland, 2006(最終閲覧2020.4.21)
- [10] Université de Strasbourg, CNRS, "VizieR", http://vizier.u-strasbg.fr(最終閲覧2020.4.21)
- [11] 公益社団法人日本天文学会インターネット天文学辞典編集委員会編, 「天文学辞典」, https://astro-dic.jp(最終閲覧2020.4.30)
- [12] 信州大学理学部理学科化学コース 物理化学研究室, 「分布式の変数変換」, https://science.shinshu-u.ac.jp/~tiiyama/?page_id=11847(最終閲覧2019.8.5)
- [13] 伊藤信成, 山縣朋彦, 濱部 勝, 西浦慎悟, 三戸洋之, 「自主学習型天文解析体験プログラム」, https://astroexercise.wiki.fc2.com/wiki/星の温度(最終閲覧2020.4.21)