

B型輝線星のパッシェン α 輝線観測

田 辺 俊 彦

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: ttanabe@ioa.s.u-tokyo.ac.jp



miniTAO 1-m望遠鏡が設置された標高5,640 mの高度では、地球大気中の水分子の吸収が弱まり、波長1.8751 μm の水素原子のパッシェン α ($\text{Pa}\alpha$) 線が観測可能となることが期待される。可視域水素バルマー線が輝線となっているB型輝線星では近赤外 $\text{Pa}\alpha$ 線も輝線となると考えられ、B型輝線星を多く含む小マゼラン雲にある若い星団NGC 330領域を観測した。 $\text{Pa}\alpha$ 線を通す狭帯域フィルターによる撮像観測から、1-m望遠鏡で受けることができるB型輝線星のほぼすべてから $\text{Pa}\alpha$ 輝線を検出することができた。この結果は、TAOサイトが赤外線において優れた透明度をもつことを示すものである。

1. はじめに

TAO特集号で再三触れられているように、mini-TAO 1-m望遠鏡が設置された5,640 mの高地 (TAOサイト) では、地球大気の水分子による吸収が弱まり、標高の低いサイトでは観測できない波長帯が観測できるようになる。近赤外域では特に波長1.9 μm 付近の水分子の Ω バンドの窓が開け、波長1.8751 μm の水素原子のパッシェン α 線 (以後 $\text{Pa}\alpha$) が観測可能となることが期待される。そこで $\text{Pa}\alpha$ 輝線を確実に出している天体を観測し、5,640 mの高地で実際にどの程度 $\text{Pa}\alpha$ 輝線を受けることができるのかを知るための観測を行うことにした。

高温のB型主系列星や巨星では通常、可視域にある水素のバルマー系列が吸収線として観測されるが、これが幅の広い輝線となっている星があり、古典的B型輝線星 (以後Be星) と呼ばれる。Be星は、非常に高速で自転しており、そのため

に赤道部分にディスクが形成され、そこで水素の電離、再結合が起こって輝線が発せられると考えられている星である¹⁾。B型主系列星のうち10–20%がBe星と推定されている²⁾。オスターブロックの有名な教科書³⁾ や詳しい計算⁴⁾ によると、温度が1–3万度、電子密度が 10^6 – 10^{10} cm^{-3} の電離領域から発せられるバルマー線 $\text{H}\alpha$ ($n=3-2$) と $\text{Pa}\alpha$ ($n=4-3$) の輝線の強度比は0.1程度とほぼ一定であり、Be星の輝線が発せられる領域はこの範囲にあり、 $\text{H}\alpha$ 輝線を出している天体は $\text{Pa}\alpha$ 輝線を出していると期待される。そこでBe星をターゲットに選び観測を行った。これまでBe星からの $\text{Pa}\alpha$ 輝線観測の報告がなされていない^{*1}ことも観測を行った動機の一つである。

小マゼラン雲 (SMC) に属する若い星団NGC 330領域にはBe星が多いことが知られており^{7)–10)}、1回の観測で多くのBe星が観測できることが期待され、この星団を観測することにした。

^{*1} Observational Astrophysics⁵⁾ の第2章にChalabaevらの論文⁶⁾ からの引用としてBe星カシオペア座 γ 星の近赤外スペクトルが載っており、 $\text{Pa}\alpha$ 輝線が描かれているが、元論文 (引用年が間違っている) にその図はなく、また $\text{Pa}\alpha$ 輝線についての記述もない。

2. 観測およびキャリブレーション

miniTAO 1-m望遠鏡に搭載された近赤外カメラANIRには通常の J , H , K_s フィルターのほかに $\text{Pa}\alpha$ 輝線を観測するための二つの狭帯域フィルター $\text{Pa}\alpha$ フィルター ($1.875\ \mu\text{m}$, $\Delta\lambda=0.0079\ \mu\text{m}$) および $\text{Pa}\alpha$ -offフィルター ($1.910\ \mu\text{m}$, $\Delta\lambda=0.033\ \mu\text{m}$) が取り付けられている¹¹⁾. これら五つのフィルターを用い2009年10月にNGC 330領域の撮像観測を行った.

二つのフィルターはANIR用に特別に作られたものであるため、独自のキャリブレーションが必要となる. さらに大気中の水蒸気量は時々刻々変化すること, そのため透過率も時間とともに変化すると予想されるため, 画像に写っている星を用いたキャリブレーションが望ましい. そこで以下のように2ミクロン全天サーベイ (以後2MASS) の等級に準拠して等級を決定した. 画像に写っており2MASSカタログに入っている星々では, 測光の結果から得られる J , H , K_s の機械等級と2MASSの等級との差は, 変光していない限りどの星でもほぼ等しい値となる. ここで機械等級とは, 天体の明るさに応じた検出器のカウント数を露出時間で割り, その常用対数をとって -2.5 をかけたものである. 素性の良い星々からこの差を決定し, 受かった星の機械等級にこの差を加えることで, まず J , H , K_s の等級を決定した. この差はいわゆる等級の原点 Z_{mag} に相当する. 狭帯域フィルターに関しては, この二つの波長域に吸収線も輝線もない星は H と K_s の間が等級において直線であると仮定して, 内挿によりこの波長における等級を計算し, この等級が2MASS等級に相当するものとして, あとは J , H , K_s の等級を決めたのと同様に $\text{Pa}\alpha$, $\text{Pa}\alpha$ -off等級 (以後 $m_{\text{Pa}\alpha}$, $m_{\text{Pa}\alpha\text{-off}}$) を決定した. 高温の星では $\text{Pa}\alpha$ 線がバルマー線と同様吸収線になっており, また低温の星では二つの狭帯域フィルターの波長にわたって水分子による吸収が考えられる. したがってこの作業において

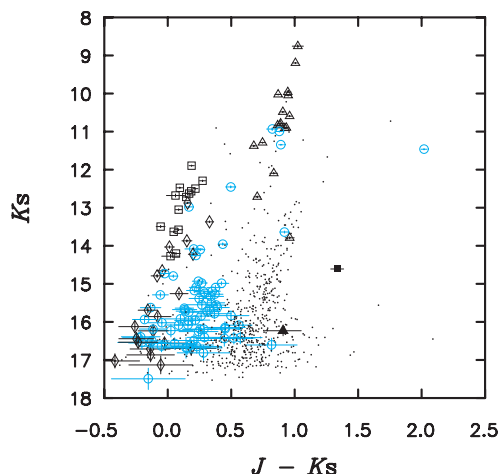


図1 NGC 330方向の星の近赤外色・等級図. シンボルになっているものはスペクトル型がわかっており, 視線速度からSMCのメンバーであると思われるもの. シンボル: ○は既知の輝線星/天体, △は赤色超巨星, □は青色超巨星, ダイヤモンドはO, B, A主系列星. 点はスペクトル型のわからない星. エラーバーはシンボル天体のみにつけてある. ▲と■は非常に輝線の強い天体であるが, 本稿では関係ないので言及せず.

は, $J-K_s$ のカラーからそのような星を除き, 吸収線も輝線もない星のみを使って Z_{mag} を決定した.

ここでは二つの狭帯域フィルターに関しては, 機械等級に一定の値を加えて実際の等級としてるので, 原理的には機械等級をそのまま用いても以下の議論は成り立つが, このようにすることでカラーの値の目安がつけやすくなることや日々異なる大気の透過率を見積もることができるというメリットがある.

3. 結 果

3.1 NGC 330方向の輝線天体

文献9, 10, 12-17を調べたところ, ANIRが観測した約 $5' \times 5'$ の視野内に94のBe星を含む輝線天体があること, またそれ以外の多数の天体についてもスペクトル型や視線速度などが得られていることがわかった. ANIRで受かった天体の近赤

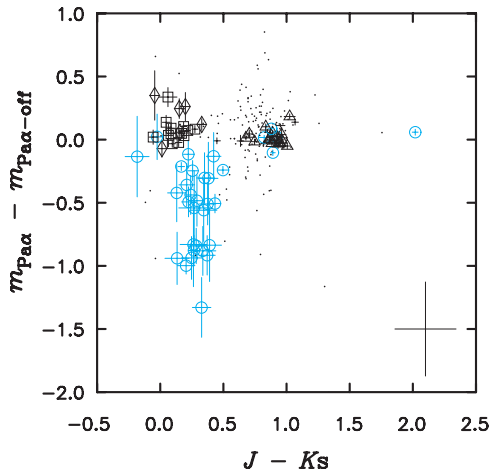


図2 $m_{\text{Pa}\alpha} - m_{\text{Pa}\alpha\text{-off}}$ vs. $J - K_s$ の2色図。シンボルは図1と同じ。エラーバーはシンボル天体のみ。それ以外の天体のエラーの最大を右下の十字で示す。

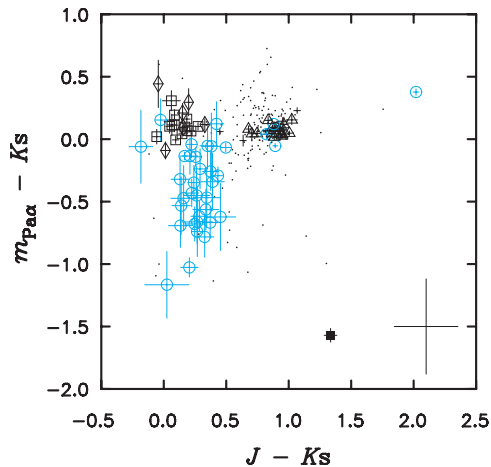


図3 図2と同様の2色図，ただし縦軸は $m_{\text{Pa}\alpha} - K_s$ カラー。

外色・等級図を図1に示す。シンボルになっている天体はスペクトル型がわかっており、視線速度からSMCのメンバーであると思われるもので、ほぼ等距離にあると考えることができる。赤色超巨星、青色超巨星さらにその下にO, B, Aの主系列星の系列が見取れるが、Be星は主系列星より赤い側に位置していることがわかる。(Be星は超巨星ではないので、比較的暗いということに注

意していただきたい。)

3.2 Paα輝線の検出

既知の輝線天体94のうち、Paα狭帯域フィルターで受かった天体は38であった。そのうち4天体はPaα-off狭帯域フィルターで受からなかった。Paαが輝線となっているかどうかは、 $m_{\text{Pa}\alpha} - m_{\text{Pa}\alpha\text{-off}}$ カラーの値で知ることができる。ここではこのカラーをPaαインデックスと呼ぶ。 $J, H, K_s, \text{Pa}\alpha, \text{Pa}\alpha\text{-off}$ フィルターすべてで受かった天体のPaαインデックスを $J - K_s$ カラーに対してプロットしたものを図2に示す。高温のBe星は $J - K_s$ カラーの狭い領域に集中し、Paαインデックスが皆、負の値を示しているのに対し、輝線天体ではない天体はほとんどがPaαインデックスが0付近にあることがわかる。 $J - K_s$ カラーがBe星とは異なる既知の輝線天体でこのインデックスが負でないものがあるが、詳しく調べたところ輝線天体でないか、少なくとも現在は輝線を出していないようである。したがってわれわれは、バルマー線が輝線となっている天体のうち1-m望遠鏡+Paα狭帯域フィルターで受かった天体のほとんどすべてからPaα輝線を検出できたと考えている。さらにPaα-offフィルターで受からなかった4天体が輝線を出しているかを調べるために、ほとんど同様の図ではあるが $m_{\text{Pa}\alpha} - K_s$ (こちらもPaαインデックス)を $J - K_s$ カラーに対してプロットしたものを図3に示す。四つの天体の($J - K_s, m_{\text{Pa}\alpha} - K_s$)は(0.025, -1.166), (0.159, -0.473), (0.139, -0.532), (0.453, -0.473)であり、いずれもBe星が占める領域に位置していることからPaαは輝線となっていると結論できる。

PaαインデックスがPaα輝線の強度を表すとして、Paαインデックスに対してHα輝線の強度をプロットしたのが図4と図5である。ばらつきは大きいですが、Hα輝線が強ければPaα輝線も強いという相関が見てとれる。この相関は、Paα輝線が確実に受かったことの証拠となると同時に、強い輝線のみならず弱い輝線も検出できたことを意味

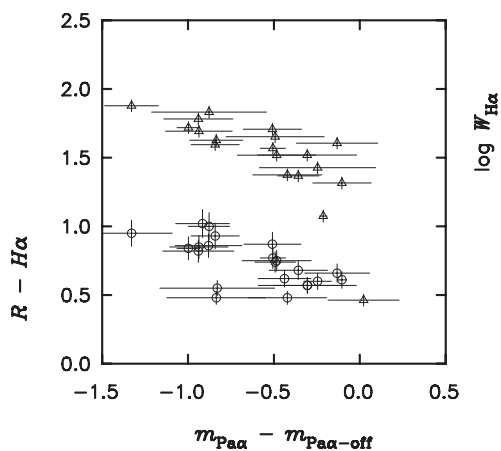


図4 Be星のPα強度に対するHαの強度. 下方HαはHα狭帯域フィルターにおける等級でKellerらによる観測⁹⁾. R-Hαが大きいほどHα輝線が強い. 上方 $W_{H\alpha}$ はHα輝線等価幅で, Martayanらによる観測¹⁰⁾.

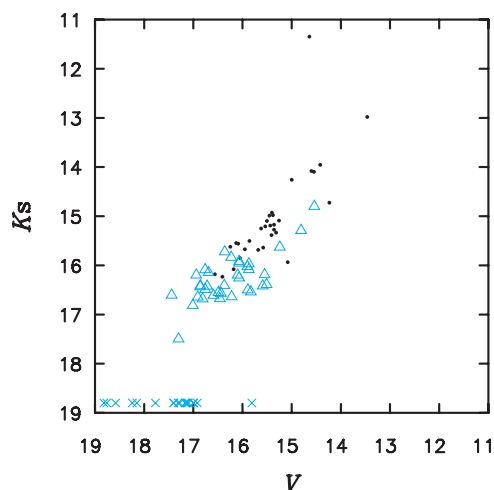


図6 Be星の K_s 等級に対するV等級. 黒点はPαフィルターで受かった天体, \triangle はPαフィルターで受からなかった天体. 横軸のすぐ上の \times は K_s でも受からなかったもの.

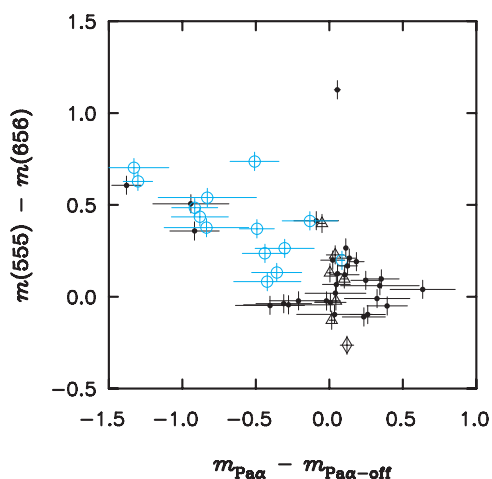


図5 Pα強度に対するHαの強度. $m(555)$ と $m(656)$ はハッブル宇宙望遠鏡(HST)によるF555WとHα狭帯域F656Nフィルターによって観測され, Kellerら¹⁸⁾によって得られた等級. $m(555)-m(656)$ が大きい程Hα輝線が強い. シンボルは図1と同じ.

する.

miniTAO 1-m望遠鏡および狭帯域フィルターでどこまで深くBe星のPα輝線が検出できたかを調べるために, Pαフィルターで受かった天

体, 受からなかった天体の K_s 等級をV等級に対してプロットしてみた(図6). この図から, K_s で16等程度までのBe星からPα輝線が検出できたことがわかる. この図で, K_s で比較的明るいのに検出できなかった天体が三つあるが, 詳しく調べた結果, それらはHα輝線が非常に弱いか輝線天体ではないようである. したがってminiTAO望遠鏡およびANIRで検出できたBe星のほぼすべてからPα輝線が検出できたと言える.

3.3 新たな輝線天体の候補

図2と図3を見ると, シンボルが付けられていなくてPαインデックスが負のものが存在することが見て取れる. これらは以前には知られていなかった輝線天体の候補であると考えられる. インデックスが0付近の星の分散を考慮し, $m_{P\alpha}-K_s$ のカラーで-0.3を輝線天体のリミットとして探したところ11の候補天体が見つかった. これらの発見は撮像観測ならではの成果である.

4. 今後への期待

本研究では、 $\text{Pa}\alpha$ 線を通す狭帯域フィルターによる撮像観測から、1-m望遠鏡で受けることのできる範囲内で $\text{Pa}\alpha$ 輝線を出している天体のほぼすべてから $\text{Pa}\alpha$ 輝線を検出することができた。このことは、TAOサイトが赤外線において優れた透明度をもつことを示すものである。電磁波は一般に星間空間に存在する塵（固体微粒子）によって吸収・散乱され減光される。その減光の度合いは波長が短いほど大きいため、塵の背後にある天体の観測は、可視域バルマー線より近赤外域にある $\text{Pa}\alpha$ 線のほうが有利となる（1月号の館内氏の記事¹⁹⁾参照）。中間赤外線によるサーベイ²⁰⁾などで最近次々と銀河面内の塵に埋もれた星団が発見されているが、それらのうち若く、高温の星を含む星団の輝線天体の観測には、TAOサイトからの $\text{Pa}\alpha$ 線観測が威力を発揮すると期待される。

本研究の結果は、本原顕太郎、館内 謙、松永典之、利川興司、小西真広、加藤夏子、吉井 讓（東京大学）、板 由房（東北大学）との共著論文としてPASJ誌に投稿した。

参考文献

- 1) Porter J. M., Rivinius T., 2003, PASP 115, 1153
- 2) Zorec J., Briot D., 1997, A&A 318, 443
- 3) Osterbrock D. E., 1982, *Astrophysics of Gaseous Nebulae* (W. H. Freeman and Company, San Francisco)
- 4) Hummer D. G., Storey P. J., 1987, MNRAS 224, 801
- 5) Léna P., Rouan D., Lebrun F., Mignard F., Pelat D., 2011, *Observational Astrophysics, Third Edition* (Springer)
- 6) Chalabaev A. A., Maillard J. P., 1985, ApJ 294, 640
- 7) Feast M. W., 1972, MNRAS 159, 113
- 8) Grebel E. K., Richtler T., de Boer K. S., 1992, A&A 254, L5
- 9) Keller S. C., Wood P. R., Bessell M. S., 1999, A&AS 134, 489
- 10) Martayan C., et al., 2007, A&A 462, 683
- 11) Motohara K., et al., 2008, SPIE 7014, 70142T-70142T-10
- 12) Meyssonnier N., Azzopardi M., 1993, A&AS 102, 451
- 13) Lennon D. J., et al., 1994, Space Sci. Rev. 66, 169
- 14) Grebel E. K., Roberts W. J., Brandner W., 1996, A&A 311, 470
- 15) Mazzali P. A., et al., 1996, A&A 316, 173
- 16) Hummel W., et al., 1999, A&A 352, L31
- 17) Evans C. J., Lennon D. J., Smartt S. J., Trundle C., 2006, A&A 456, 623
- 18) Keller S. C., Bessell M. S., Da Costa, G. S., 2000, AJ 119, 1748
- 19) 館内 謙, 2013, 天文月報 106, 23
- 20) Benjamin R. A., et al., 2003, PASP 115, 953

Paschen α Observations of Be Stars toward SMC Cluster NGC 330

Toshihiko TANABÉ

*Institute of Astronomy, University of Tokyo,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: We made imaging observations of young SMC cluster NGC 330 in the near-infrared J , H , K_s as well as two narrow-band Paschen α ($\text{Pa}\alpha$) and $\text{Pa}\alpha$ -off filters. The observations were carried out at a high-altitude site, 5,640 m, where the atmospheric extinction is small enough to make the spectral range around $\text{Pa}\alpha$ transparent. We have successfully detected $\text{Pa}\alpha$ emission from almost all Be stars within the detection limit of the small telescope and the narrowband filters. This work demonstrates that the photometric colors including the $\text{Pa}\alpha$ band can be used to detect the $\text{Pa}\alpha$ line when observed from high altitude sites.