

1mクラス望遠鏡での赤外分光観測

田中培生¹⁾

¹⁾ 東大天文センター

Infrared Spectroscopy with 1m-class Telescopes

Masuo TANAKA¹⁾

Abstract

I present examples of infrared spectroscopic observations carried out by using the 1.5 m infrared telescope equipped with the infrared echelle spectrograph, NICE. The main targets are evolved stars with loosing mass; Wolf-Rayet stars, yellow hypergiants, and AGB stars (carbon stars and S-type stars).

Key Words: Infrared, Spectroscopy, Stars

1 はじめに

1mクラス望遠鏡では、その機動性を生かして、特定のプロジェクトに特化した観測や、サーベイ観測が行われてきた。現状では、撮像（測光・偏光）観測が主である。例えば、名大南アフリカ1.4m望遠鏡は、高性能赤外3色同時カメラを搭載して、多くの成果を生み出している。また、広大1.5m望遠鏡でも、特色のある結果が出始めている。昔のことになるが、京大上松1m望遠鏡は赤外線観測の時代を切り開いてきた。

一方で、分光観測においても、長期にわたってのスペクトル変化を捉えたい場合や、系統的に天体のスペクトルを取得したい場合には、このクラスの望遠鏡にも分光装置が常備されていることが望ましい。特に、赤外線分光器は、検出器アレイが高価なために必ずしも容易に製作はできないが、赤外線中分散分光器の潜在的な需要は大きい。本講演では、我々が開発した赤外線エシェル分光器を用いて、旧国立天文台三鷹1.5m望遠鏡（現広大かなた望遠鏡）で行った観測について紹介する。

2 ウォルフライエ星(Wolf-Rayet)の クランピーな星風と質量放出率

Wolf-Rayet星は、高温で、幅広い輝線を特徴とする大質量星であり、核崩壊型超新星の母天体と考えられている。大量のガスを放出しており、その質量放出率は恒星進化の最終段階を決める鍵となるが、まだ謎が多い。特に、種々の観測から得られた質量放出率が一致しないことが問題となっていた。この主な原因は、星風ガスのクランピングによると考えられている。我々は、近赤外スペクトル（図1）から自由—自由放射成分を抽出し（図2）、これを5GHz強度（自由—自由放射）と比較することによって、このクランプ構造を考察した（図3）。その結果、多くのWolf-Rayet星で、クランピングの程度が星からの距離のルートに反比例して小さくなっている（つまり、十分遠方では、ほぼ一様と考えても良い）と仮定するとSEDが良く説明できることを示した（図4）。さらに、星表面近傍でのクランピング因子~10で、これは今までの観測結果と矛盾しない。詳しくは、Nishimaki+ 2008¹⁾を参照。

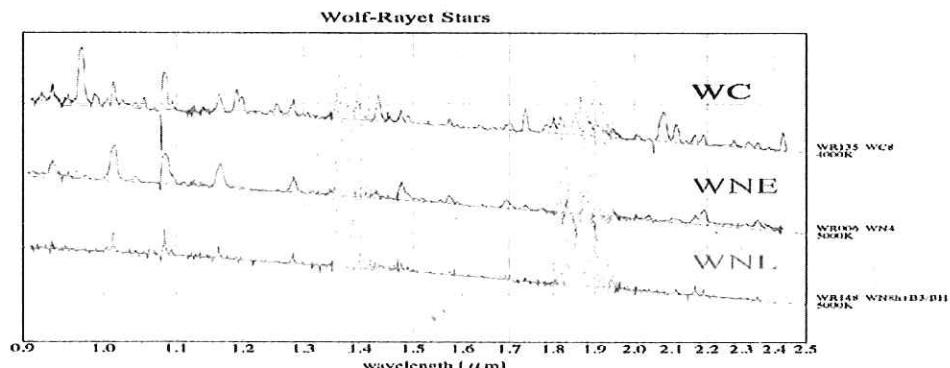


図1 WR星の近赤外スペクトル

1 mクラス望遠鏡での赤外線分光観測

free-free radiation from clumpy wind

Clumpy Stellar Wind からの free-free 放射スペクトルをもとめるために、optical depth に r の関数 (2つのパラメタ) として次の形の Enhancement Factor (つまり、Clumping Factor) を導入する

$$EF(r) = a(r/R_*)^{-\omega} + 1 \quad (\omega > 0)$$

optical depth は

$$\tau_r(\xi) = \frac{\dot{M}^2 \gamma K_r(T_e)}{(4\pi \mu m_H V_\infty)^2} \int_{\xi}^{\infty} \frac{dEF(r) dr}{r^3 \sqrt{r^2 - \xi^2}} = \frac{\xi^3}{\xi^3} \left(1 + \frac{4}{\pi} a \phi_\omega R_*^2 \xi^{-\omega} \right) \quad \phi_\omega = \int_0^{r/2} (\cos \theta)^{2+\omega} d\theta$$

Clumpy Stellar Wind からの free-free 放射スペクトルは

$$F_\nu = \frac{B_\nu(T_e)}{D^2} \int_0^\infty (1 - e^{-\tau_r(\xi)}) 2\pi \xi d\xi \approx \frac{2.67\pi B_\nu(T_e)}{D^2} \left(\frac{\pi \dot{M}^2 \gamma K_r(T_e)}{2(4\pi \mu m_H V_\infty)^2} \right)^{2/3} \left[1 + \frac{8}{2.67\pi} \frac{a \phi_\omega R_*^2}{1+\omega} \left(\frac{\pi \dot{M}^2 \gamma K_r(T_e)}{2(4\pi \mu m_H V_\infty)^2} \right)^{-\omega/3} \right]$$

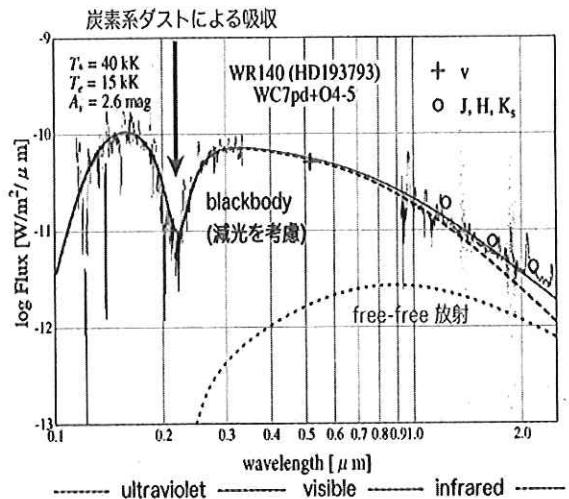


図2 WR星の紫外-近赤外スペクトル

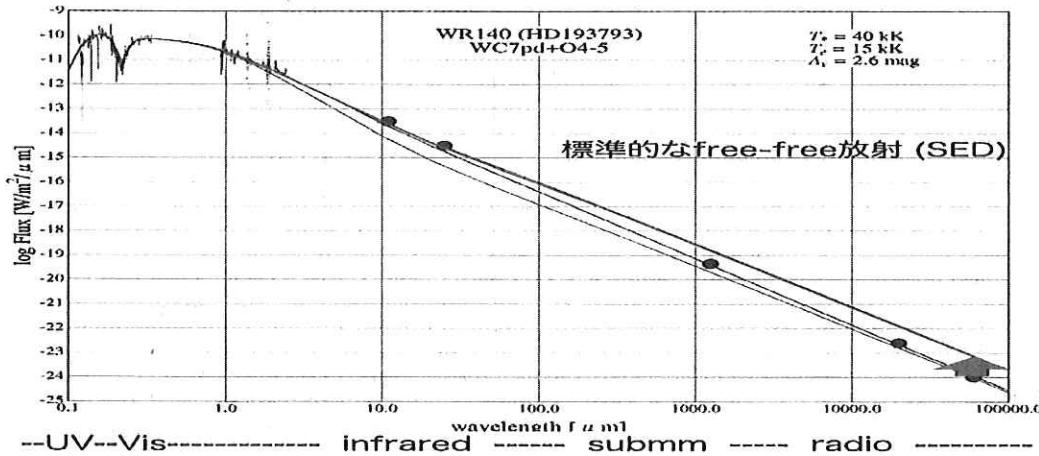


図3 電波に比べて赤外が超過している

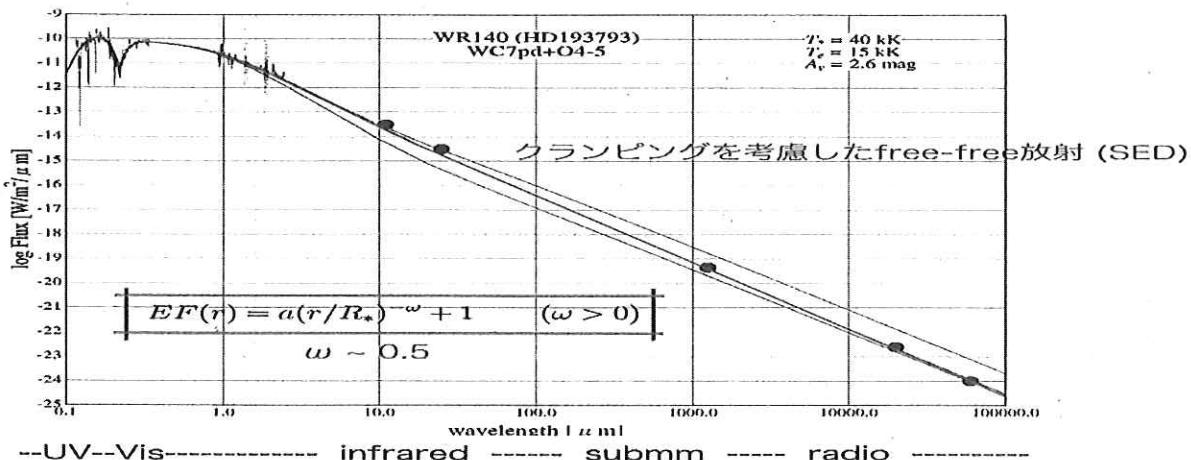


図4 クランピングを考慮したフィッティング

3 黄色超巨星(Yellow Hypergiant)の

COスペクトル変動

黄色超巨星(YHG; Yellow hypergiant)は、大質量星が主系列を離れ、赤色超巨星に進化し、再び青側(高温側)に戻って来る途中の不安定な段階の星であると考えられている(図5)。非定常的な質量放出が予想されるが、実際に、規則的ではない変光が観測されており、スペクトル線の変化も報告されていた。

今回、我々は、1年以上の期間に渡って、赤外スペクトルをモニターした結果、一つの天体(ρ Cas)において、一酸化炭素バンドの特徴的な変動を検出した。つまり、最初はスペクトルが見えなかつたが、あるとき輝線となり、しばらくすると吸収線に変わった。それぞれの時点でのスペクトルは単一励起温度でフィットすることができ、かつ、温度は単調に下がつていった(図6)。

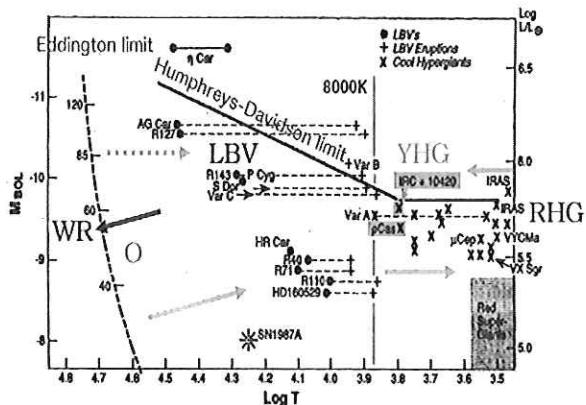


図5 YHGのHR図上での進化

ある時点で星表面より大量のガスが吹き出し、それが温度を下げつつシェル状に拡がつていったと仮定して、ガスの放出量を求めたところ、 $1/1000$ 太陽質量が得られた(図7)。このような現象の起こる頻度などはわからないが、この種の天体での一連のガス放出現象を示した初めての観測である。詳しくはYamamoto+ 2007a²⁾を参照。

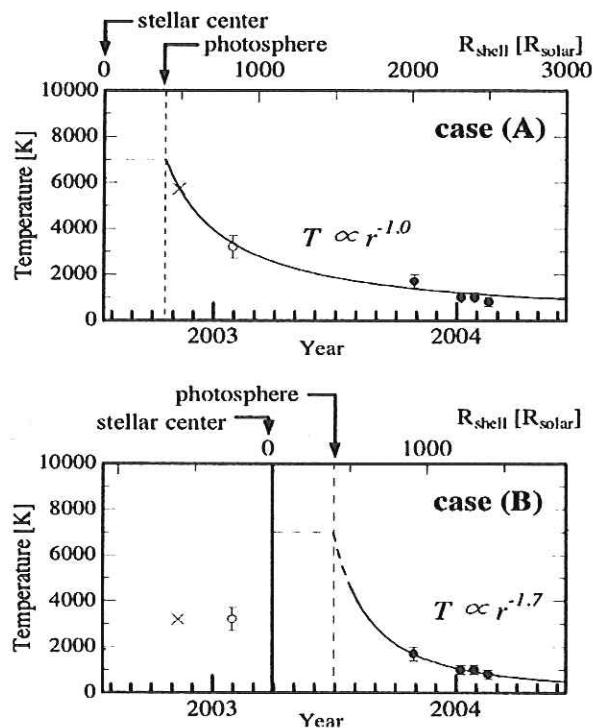


図7 膨張するガスシェルのモデルフィッティング
輝線成分は同一シェル起因(A)か別のガス起因(B)か?

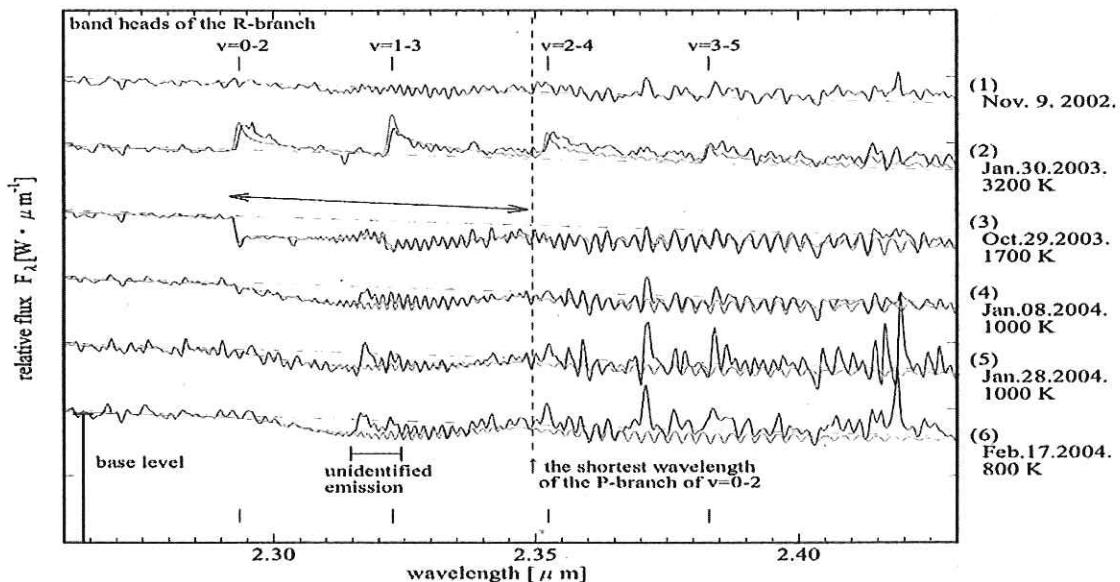


図6 COスペクトルの時間変化

1 mクラス望遠鏡での赤外線分光観測

4 炭素星・S型星の有効温度

中質量星が主系列を離れた後、赤色巨星（M型巨星）を経て、中心核でHe核反応が起こると、漸近巨星枝星（AGB ; Asymptotic Giant Branch）へと進化する。この時、外層の対流層によって、He核反応の生成物である炭素が表面に現れる。つまり、M型巨星からS型星を経て炭素星に進化すると考えられており、表面のC/O比は0.5（M型巨星） \rightarrow 0.9-1.0（S型星） \rightarrow >1.1（炭素星）と変化する。この進化をHR図上で理解するためにはそれぞれの進化段階での有効温度を知ることが必要であるが、これらの星は分子による吸収が大きく、スペクトルが大変複雑なため、有効温度は容易に決定できない。いろいろな方法が試みられてきたが、まだ謎が多い。

そこで我々は、比較的分子による吸収の小さい近赤外領域のスペクトルを、簡単なモデルと比較することによって、様々なクラスの炭素星（図8）とS型星（図9）について有効温度を評価した（図10）。炭素星は、クラスによって異なるが、特に、C-N型については~2900K、S型星については~3200K（図11）という結果が得られた。詳しくはTanaka+ 2007³⁾を参照。

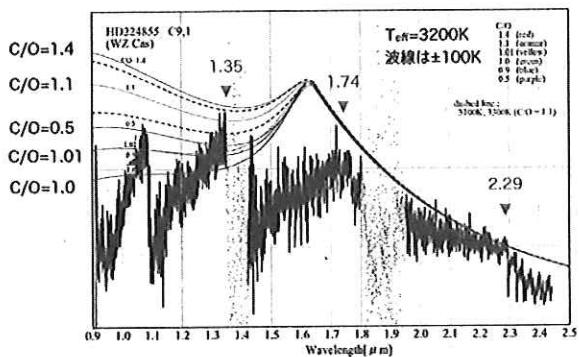


図10 有効温度評価の方法

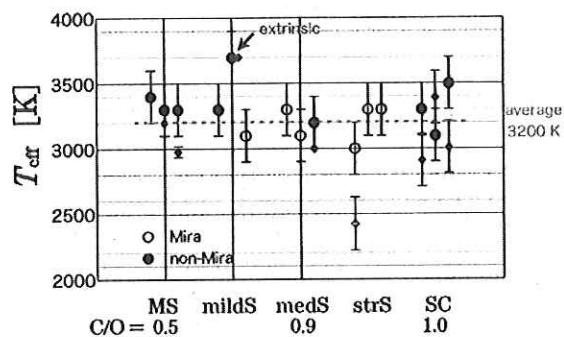


図11 S型星の各クラスの有効温度

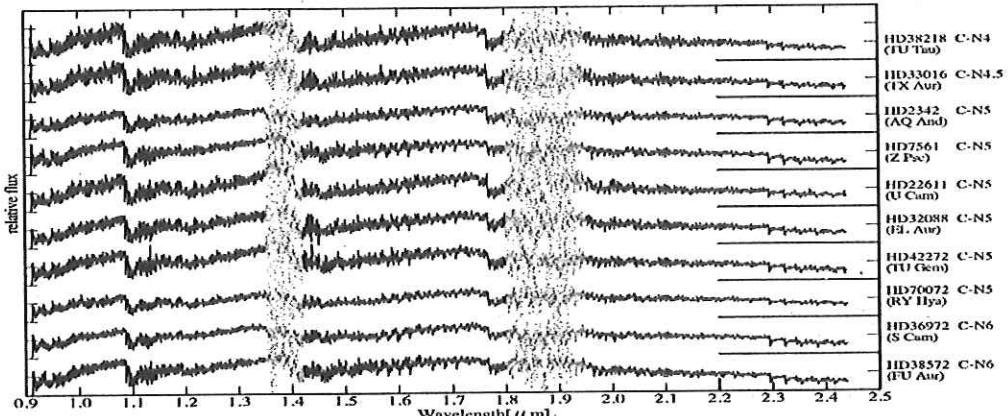


図8 炭素星の近赤外スペクトル

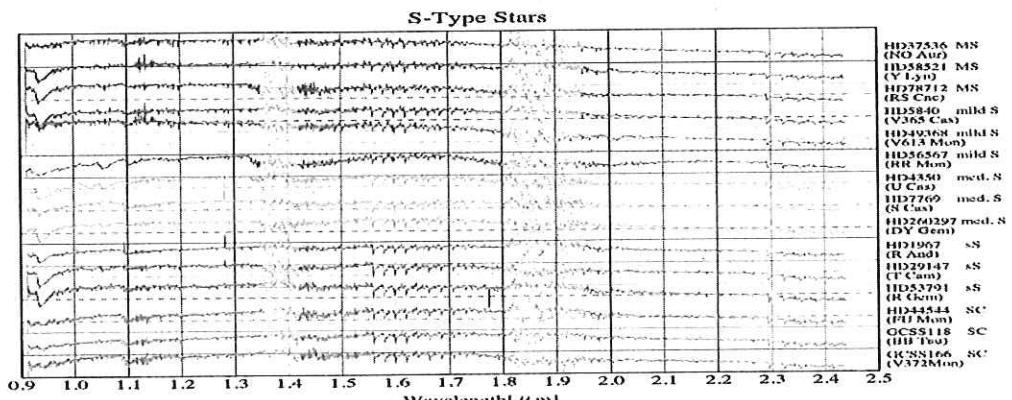


図9 S型星の近赤外スペクトル

5 赤外線エシェル分光器；NICE(Near-Infrared Cross-dispersed Echelle spectrograph)

NICEは波長分解能2600(2秒角スリット)で、0.9-2.4 μm の波長範囲をカバーする。望遠鏡に取り付けられたNICE(図12)、およびNICEの内部構造(図13)の写真を示す。また、エシェルフォーマット(図14)と全体の構造図(図15)も示す。詳しくは、Yamamoto+ 2007b⁴⁾ 参照

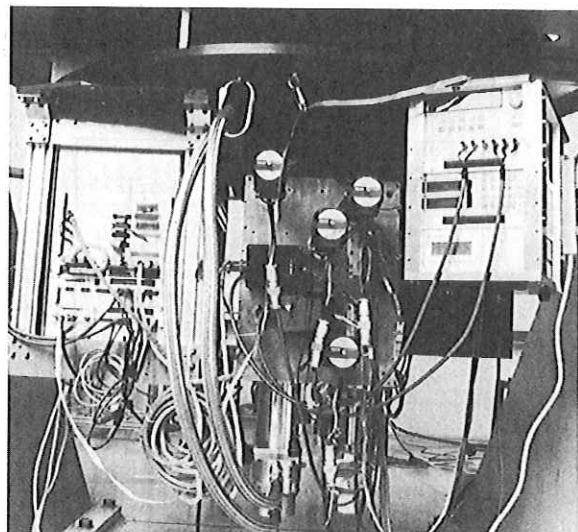


図12 カセグレン焦点部に取り付けられたNICE

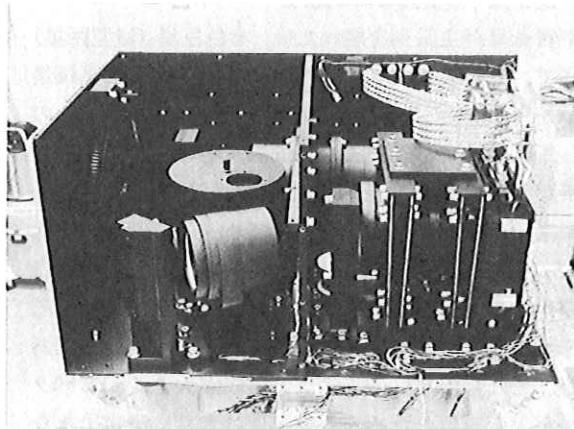


図13 NICEの内部構造

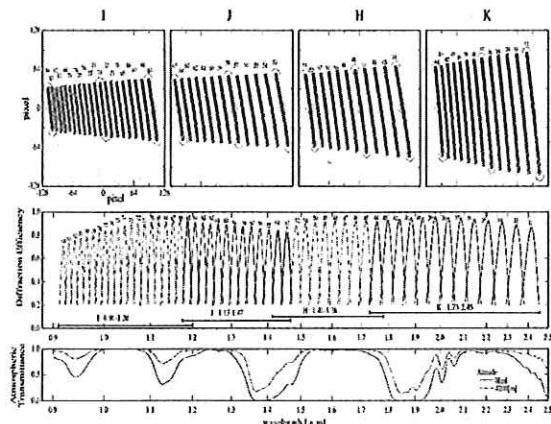


図14 NICEエシェルフォーマット

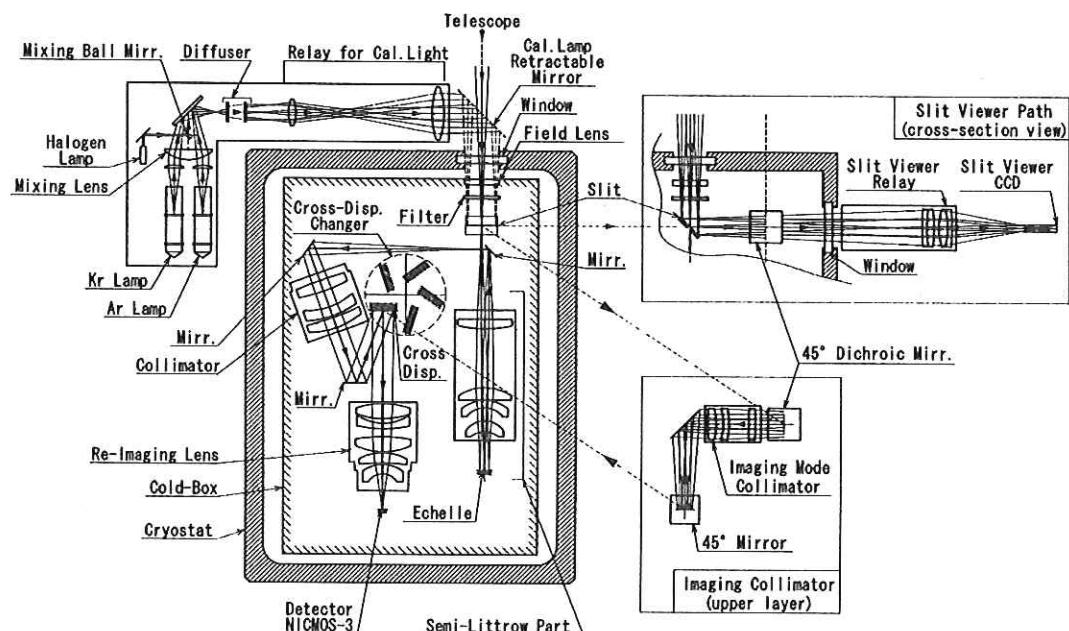


図15 NICE構造図

6 おわりに

ここで紹介した赤外線分光装置NICEは、現在建設中の北大名寄1.6m望遠鏡に設置予定である。この望遠鏡は、2010年夏に打ち上げが予定されている金星探査衛星「あかつき(Planet-C)」と連携して、金星大気の詳細な観測を地上から行うことを目的としており、NICEで赤外分光観測を行う。金星観測以外の時間には、様々な天体の赤外スペクトル観測を行う予定であり、特色ある観測提案を基に広範な共同研究を期待している。2010年末よりの観測開始を目指して準備を進めている。

参考文献

- 1) Nishimaki, et al. PASJ, 60, pp.191-208, 2008.
- 2) Yamamuro, et al. PASJ, 59, pp.973-982, 2007a.
- 3) Tanaka, et al. PASJ, 59, pp.939-953, 2007.
- 4) Yamamuro, et al. PASJ, 59, pp.387-395 2007b.

(2009年12月22日受付, 2010年1月15日受理)