



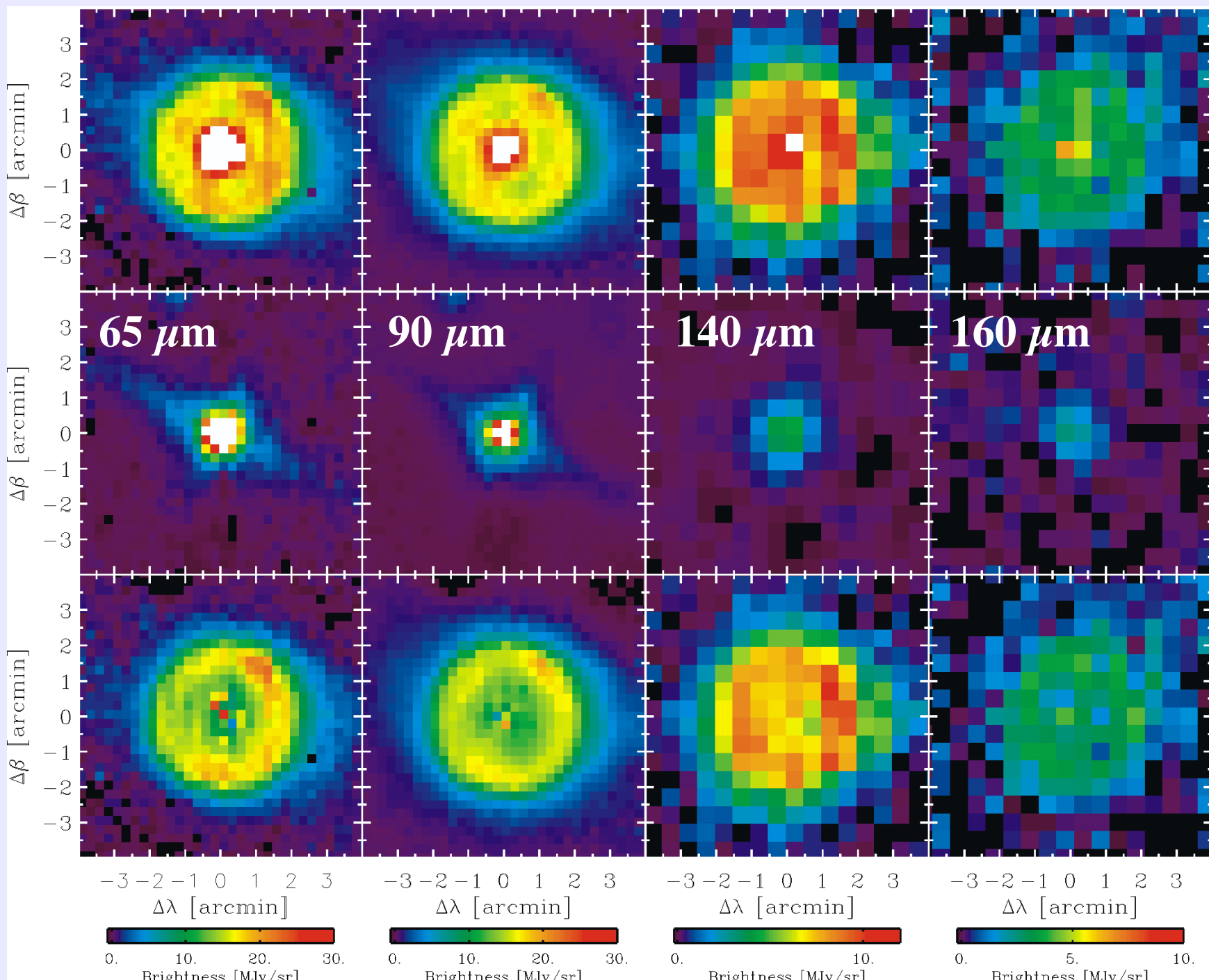
「あかり」による低温度星研究の進展

山村一誠（宇宙研）、泉浦秀行（国立天文台）、有松亘、下西隆、尾中敬、松永典之、三戸洋之、
福士比奈子、辻隆、中田好一、田辺俊彦（東大理）、空華智子（宇宙研/東大理）、
植田稔也（デンバー大）、板由房（東北大）、松浦美香子（ロンドン大）

我々は「あかり」を用いて、表面温度が太陽に比べてずっと低い（おおよそ3000度以下）星の研究を進めている。我々の研究対象は大きく分けて二つある。一つは進化末期の星で、これらは赤色巨星・あるいは赤色超巨星となり、表面から物質を星間空間に放出する、**質量放出**を行っている。質量放出は、**宇宙の物質循環・化学進化**の重要なプロセスの一つである。我々は「あかり」によって、質量放出が星の進化段階のどこで起き、放出された物質がどのように宇宙空間に還元され、宇宙の化学進化にどのような影響を与えているのかを明らかにしようとしている。もう一つの研究対象は、質量が小さすぎて恒星になれず、惑星との中間の状態にある**褐色矮星**という特殊な天体である。「あかり」による分光観測から、我々はこれらの天体の大気**の物理・化学構造**の詳細を明らかにしようとしている。

うみへび座U星のダストシェル解析

Izumiura et al., A&A, in press

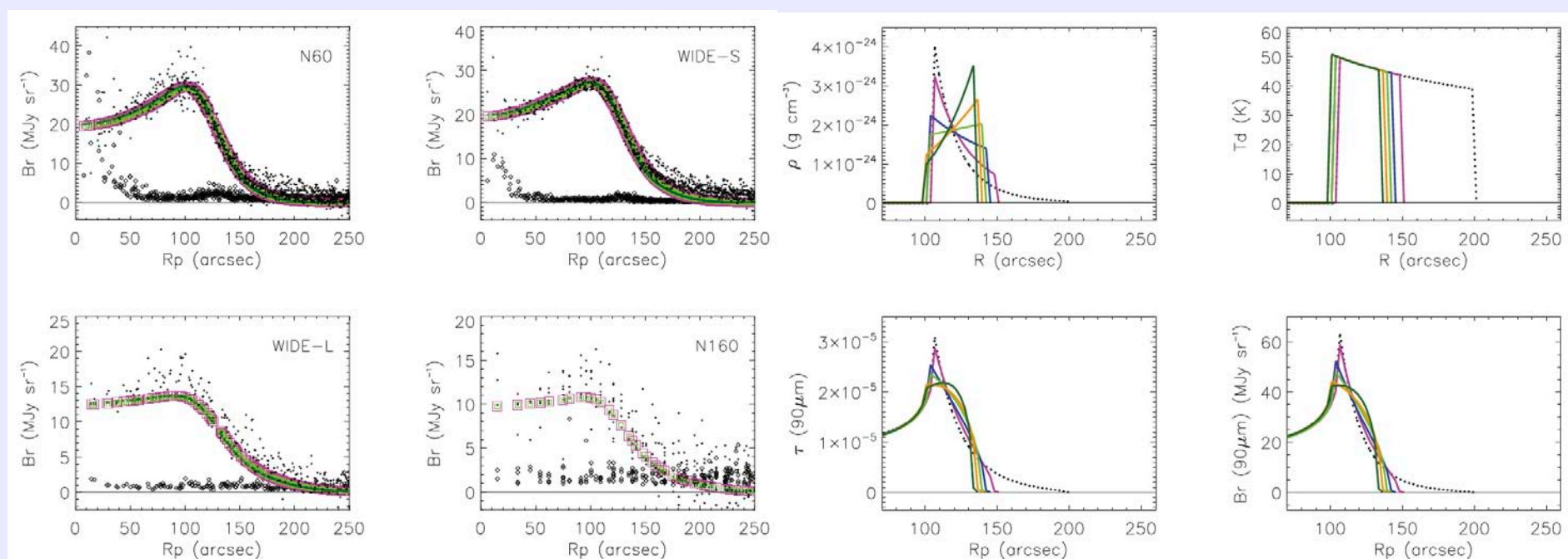


うみへび座U星の「あかり」遠赤外線観測画像。65-160 μm の4つの波長で観測を行った。上段は観測結果、中段は点源と見なせる比較星のイメージ、下段は中心星の成分を差し引いた、うみへび座U星のダストシェル成分。

我々は、「あかり」の遠赤外線観測装置(FIS)を用いて、質量放出によって星の回りに形成されたダストシェルの系統的な観測を行い、数十天体から広がったシェルを検出した。これは、世界最大のデータセットである。

このプロジェクトで得られたうみへび座U星の周りに広がるダストシェルの画像を左に示す。太陽から約500光年離れたこの星のダストシェルは、約1万年の間に半径約1/4光年に広がっている。

4つの波長帯のデータの解析(下図)から、ダストシェルの温度・質量などを見積もり、この星の質量放出の履歴について議論した。



左: 動径方向の輝度分布をダストシェルモデルによって解析した。(・: 観測データ、□: モデル、◇: 観測データのエラー)

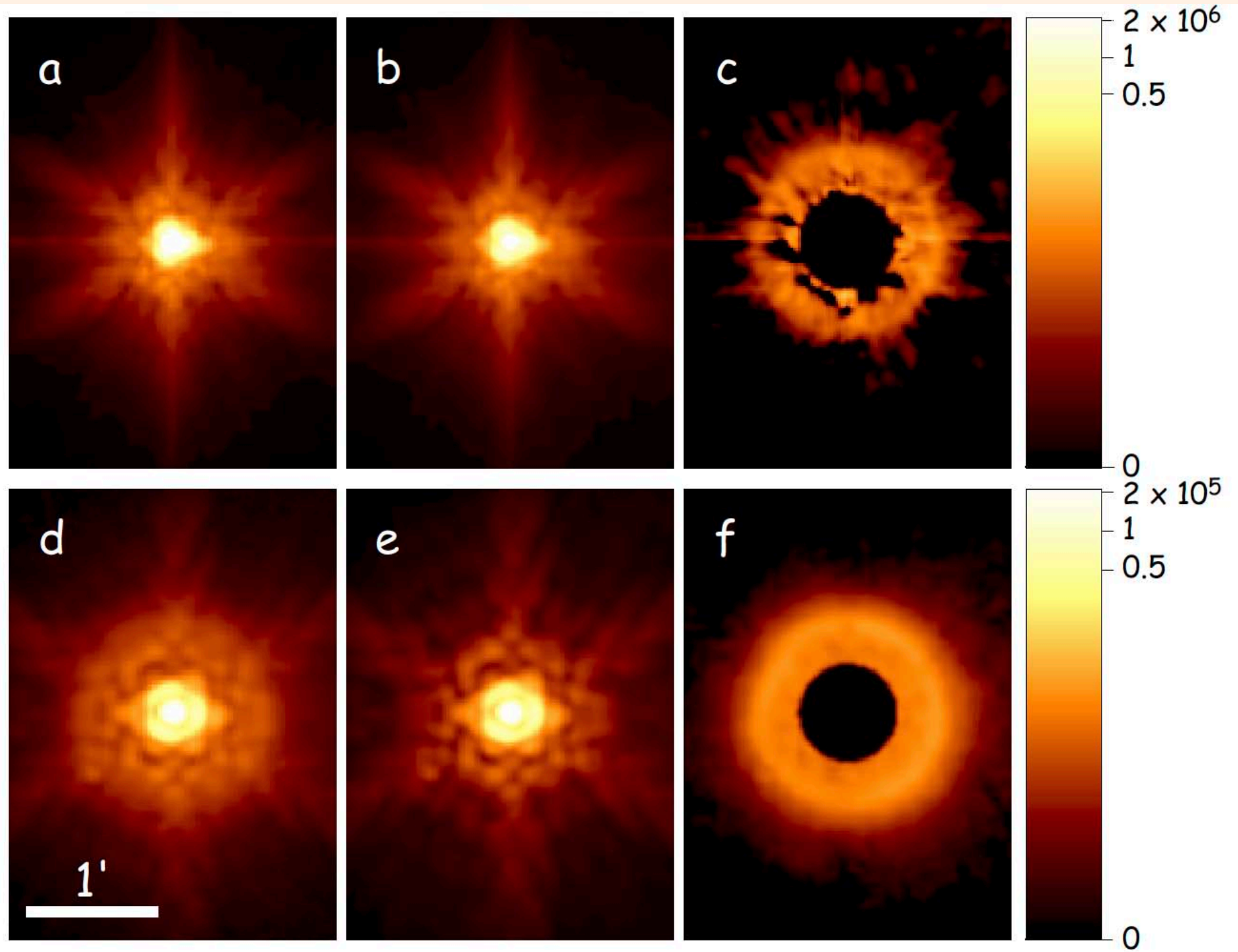
ダスト温度およそ50K, ダスト質量およそ $1 \times 10^{-4} M_{\text{sun}}$

右: モデルとして適用したダスト密度分布(左上)とダスト温度分布(右上)。色の違いは様々な質量放出のパターンを表す。

ポンプ座U星のダストシェル解析

Arimatsu et al., ApJL, submitted

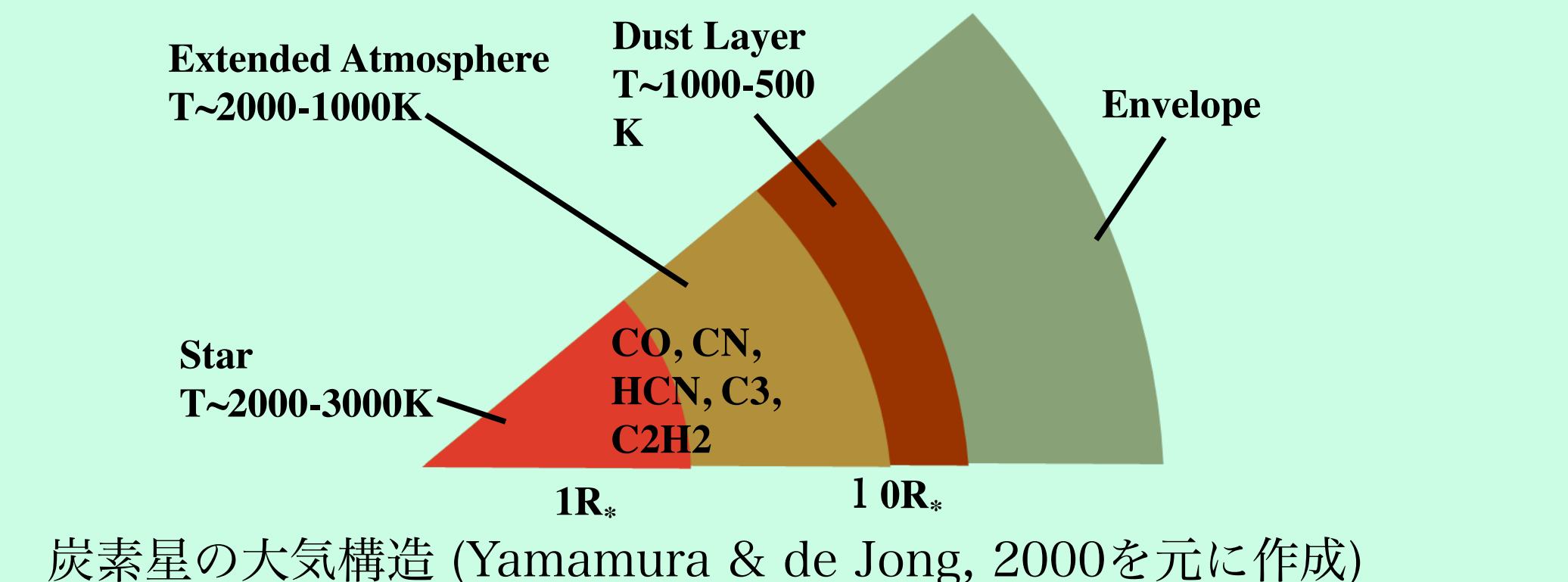
我々は、広がったダストシェルを持つことが知られている星の一つポンプ座U星を、「あかり」赤外線カメラ(IRC)によって高精度の中間赤外線観測を行い、詳細なデータ解析から、ダストシェルの成分を抽出することに成功した。遠赤外線データに加え、より空間分解能の高い、またダスト温度に感度の高い中間赤外線データを合わせて解析することで、ダストシェルの詳しい物理的構造を得ることができた。



「あかり」赤外線カメラ(IRC)によるポンプ座U星の中間赤外線画像。(a) 15 μm 撮像データから、(b) 点源参照天体(星)の成分を差し引くことで、(c) ダストシェル成分を抽出した。(d)~(f) は同様の処理を 24 μm の画像について行ったもの。解析技術の発展に従って、これまで見えなかった情報を引き出すことが出来るようになった。

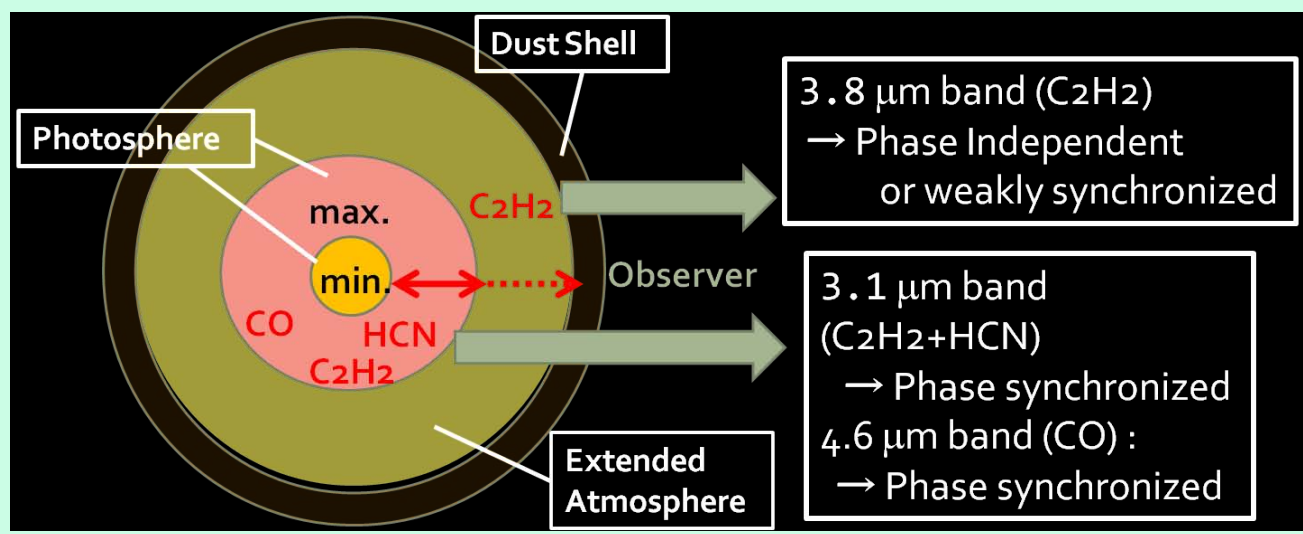
「あかり」で探る炭素星赤外線スペクトルの時間変動

我々は「あかり」を用いて、炭素星の赤外スペクトルの時間変動を観測した。炭素星は、宇宙空間における炭素系物質の主要な供給源と考えられている。「あかり」の大マゼラン雲サーベイとフォローアップ観測により得られたこれまでにない規模の時間変動データは、炭素星における分子・ダスト生成〜質量放出を理解する上で重要な手掛かりとなる。



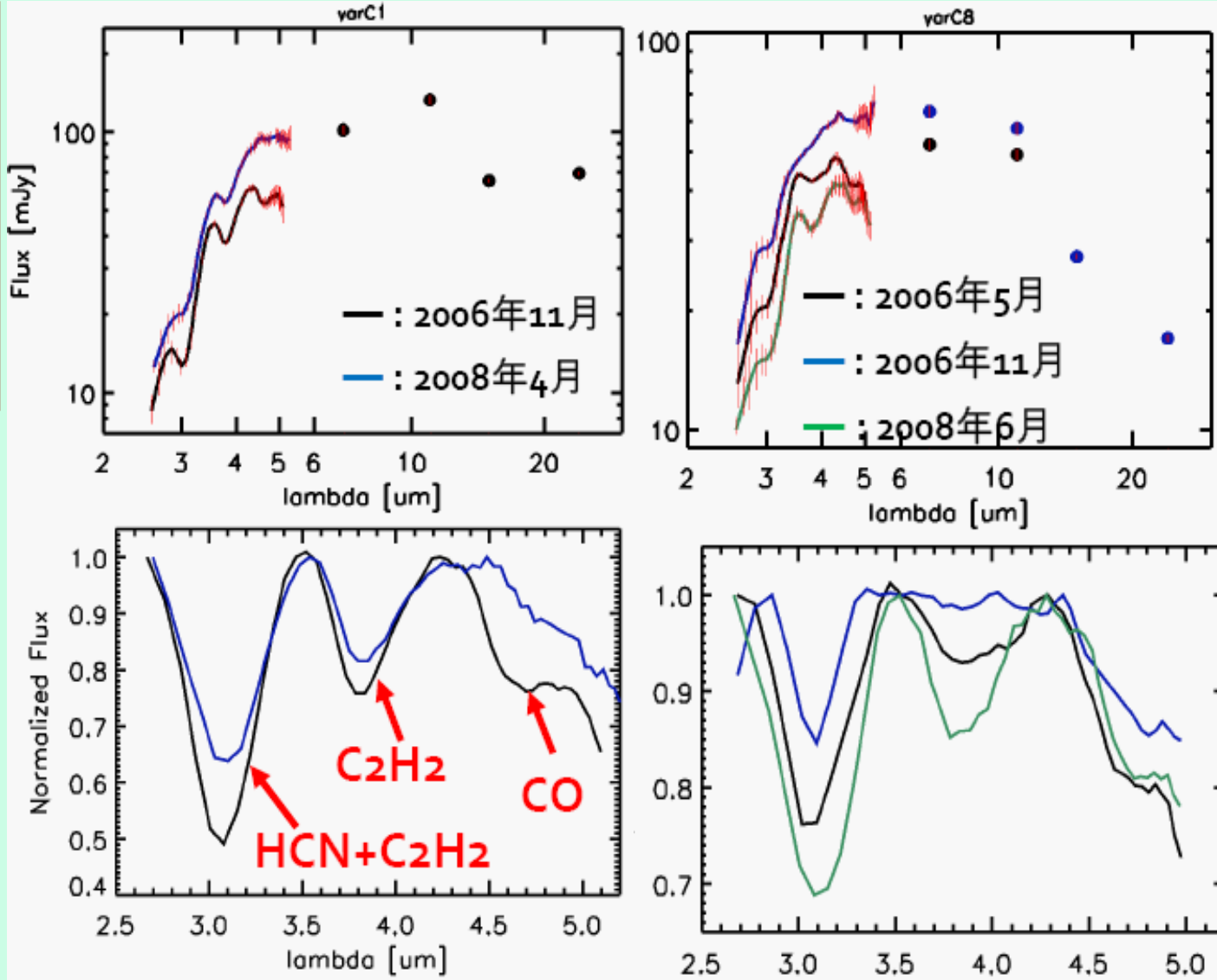
炭素星の大気構造 (Yamamura & de Jong, 2000を元に作成)

CO, C_2H_2 , HCNといった主要な炭素系分子が恒星大気のどの領域で作られ、それがどう時間変動するかを表した概念図



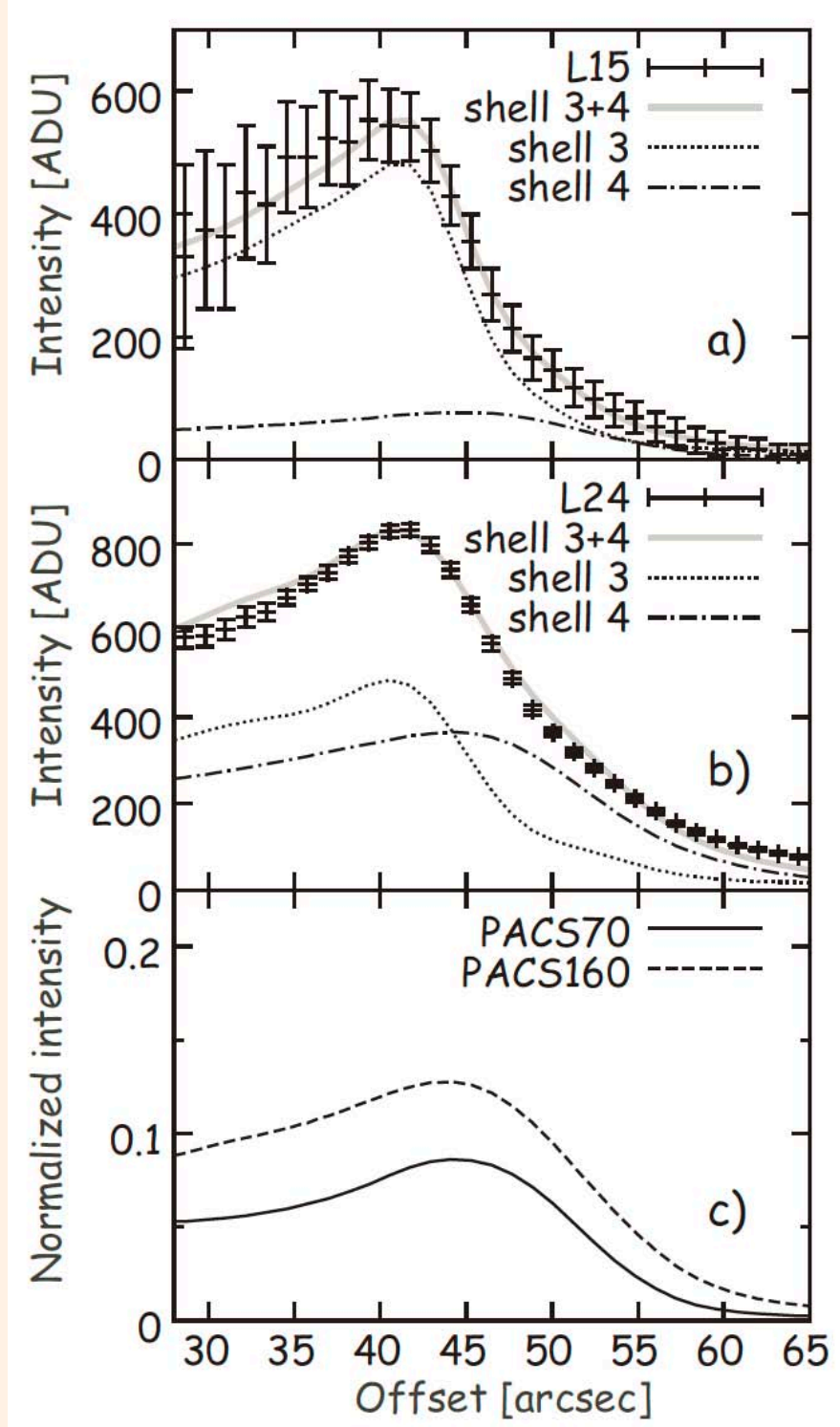
「あかり」により観測された炭素星の赤外線スペクトルの時間変動。HCNのような比較的高温でも生成される分子については、星の変光フェーズとよく同期した変動パターンを示すことから、恒星大気表面に近い部分で作られていると考えられる。一方、 C_2H_2 のような生成に低温の環境が必要な分子は、変光フェーズと同期しない変動パターンを示し、そのため大気表面から離れた領域で生成されていると考えられる。

Shimonishi et al., in prep.



(a)15 μm 、(b) 24 μm 動径方向の輝度分布は、二重のダストシェル構造を仮定したモデルで良く説明出来ることがわかった。二つのシェルはそれぞれ半径 43 arcsec, 50 arcsec で、前者はガス成分が多く、後者はダストの割合が多いことが示唆される。

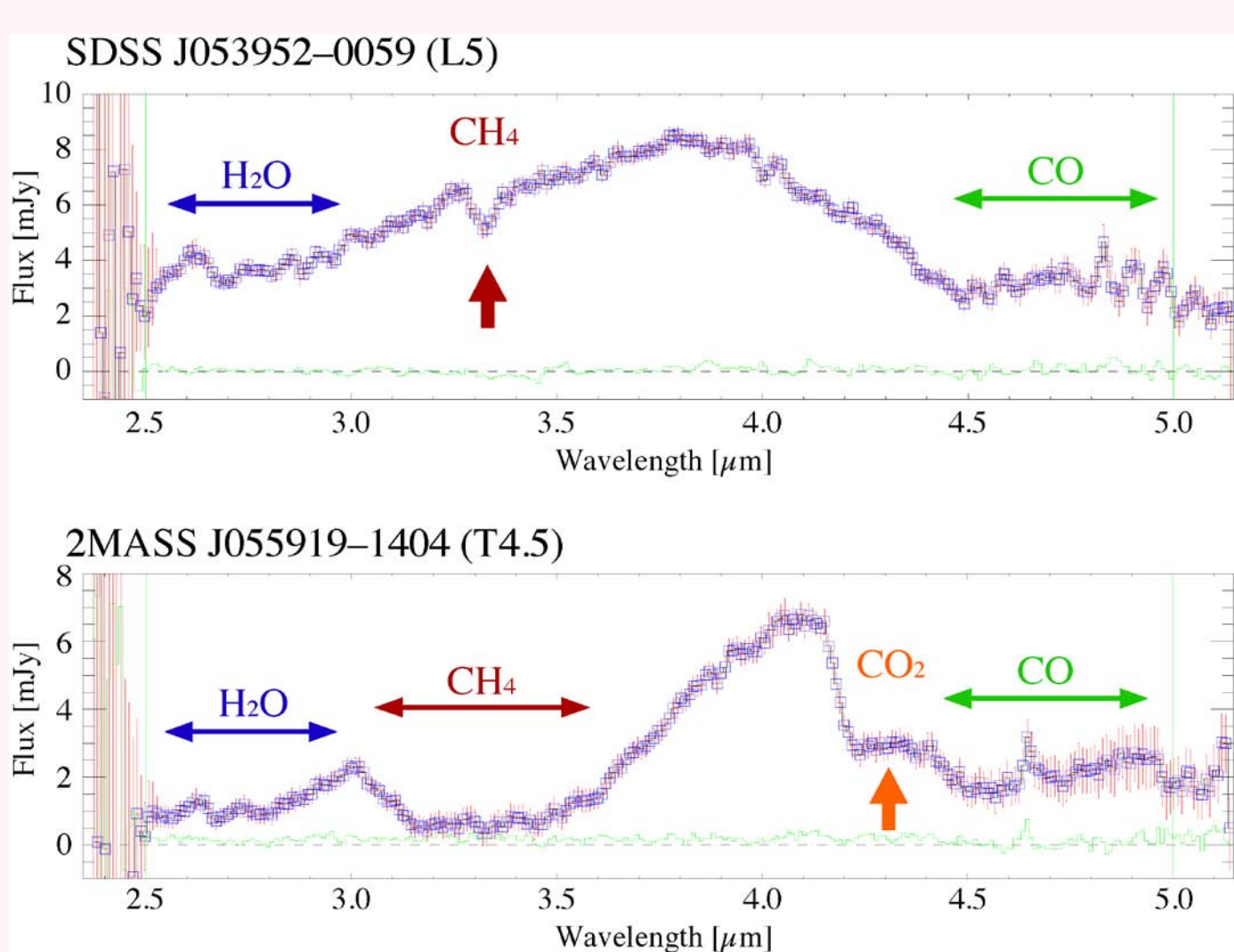
(c) は Herschel Space Observatory による遠赤外線観測のデータで、我々と同様の結果を示す。



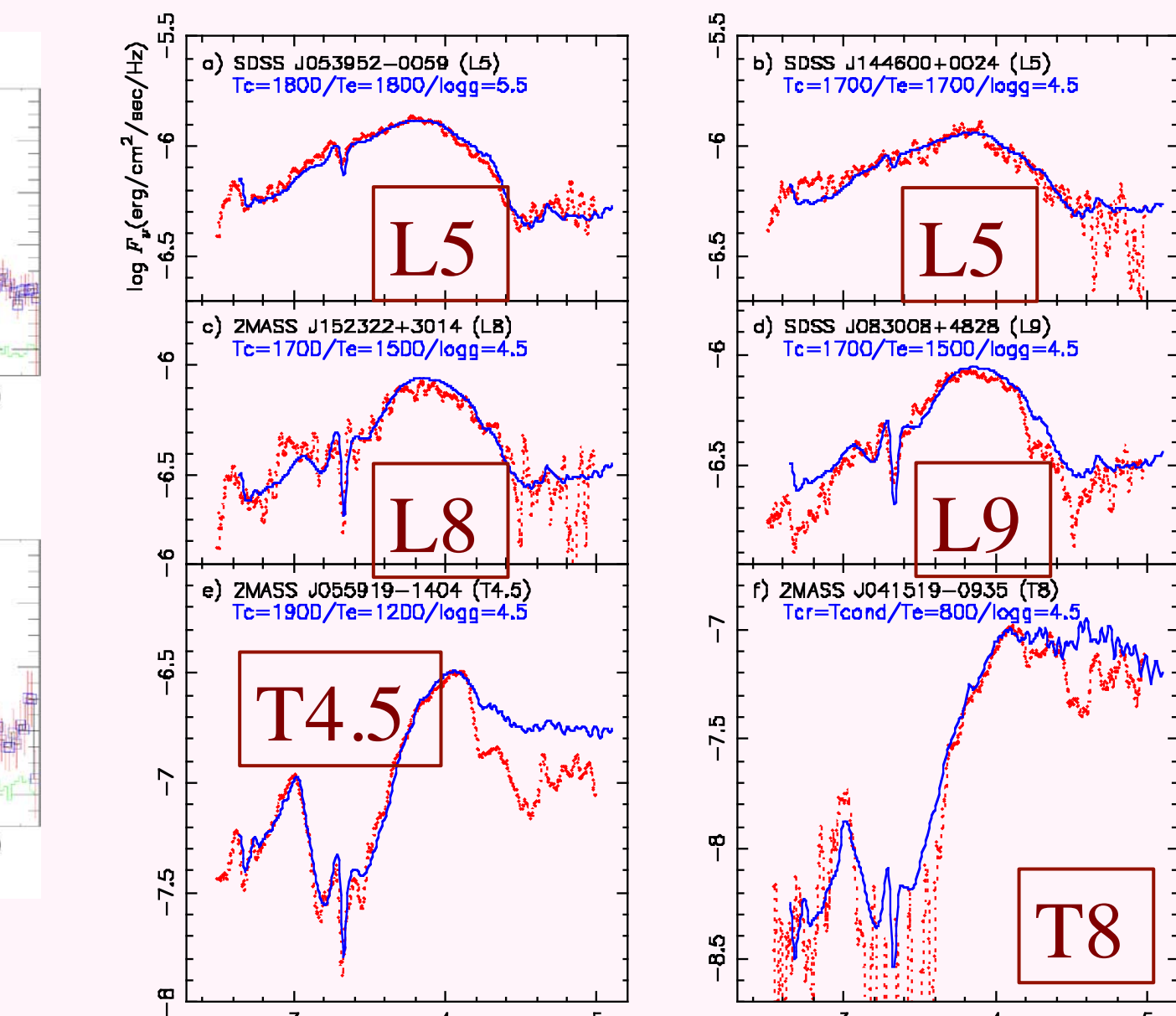
褐色矮星の近赤外線分光観測

Yamamura et al., 2010, ApJ, 722, 682, Tsuji et al., ApJ submitted, Sorahana et al., in prep.

低温度星の大気には様々な分子が存在し、赤外線波長域にある振動励起遷移バンドを観測することで、大気**の物理的・化学的構造**についての知見を得ることが出来る。褐色矮星は、初期質量が小さいために水素の定常的な核融合を起こすことが出来ず、生成後冷え続けていく天体である。その表面温度は約 2200 K 以下であり、惑星と恒星の中間に位置している。我々は、このような低温極限にある「星」の特有な大気構造を探る目的で、「あかり」によって**世界で初めて**、地球大気の影響を受けない波長 2.5-5 μm の連続的なスペクトルを得ることに成功した。このデータから我々は、(1) CO_2 分子を**世界で初めて検出**、(2) CO, CO_2 分子の存在量が**熱化学平衡から逸脱**していること、(3) CH_4 分子の生成が、有効温度以外の星のパラメータに依存すること、などの結果を得ている。

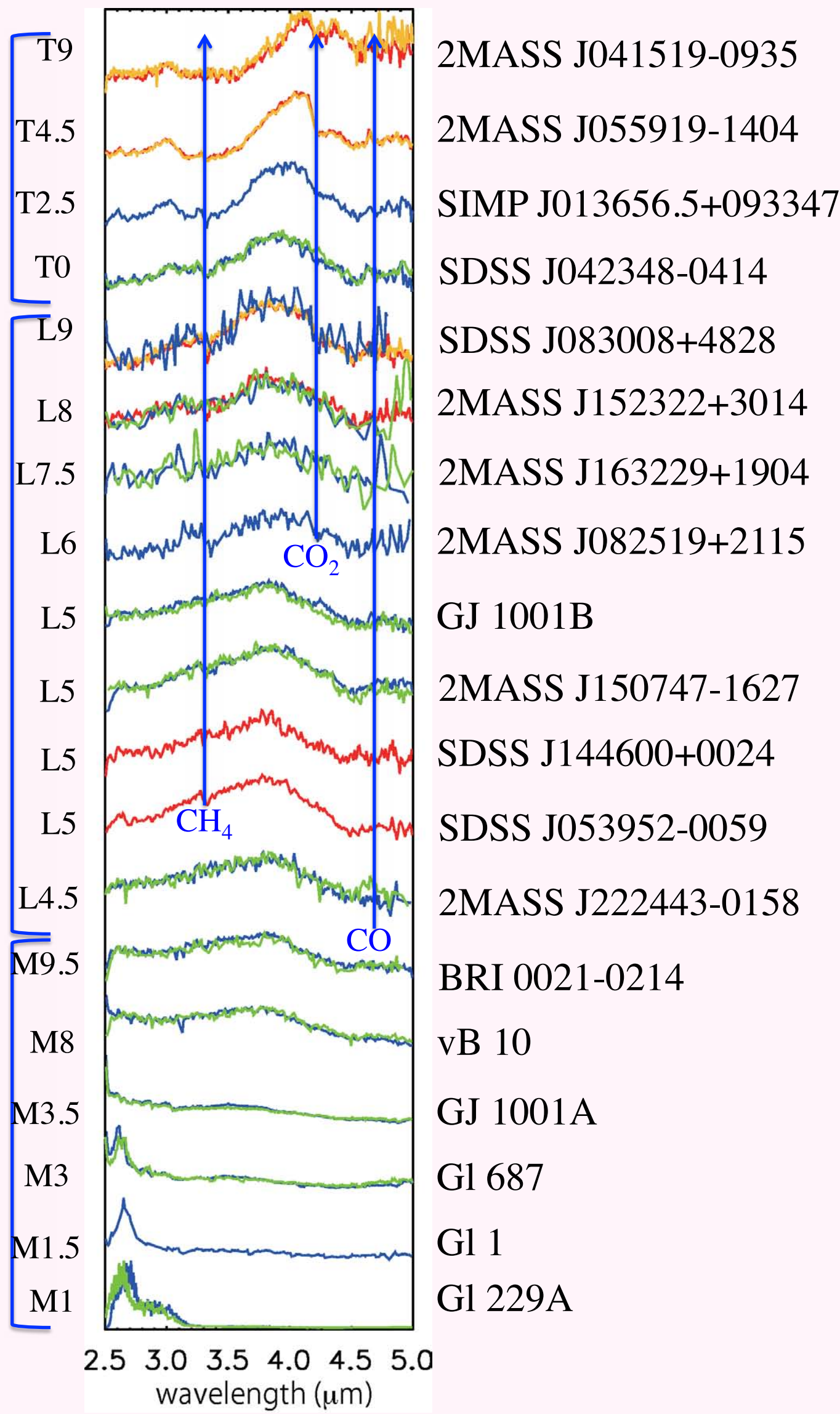
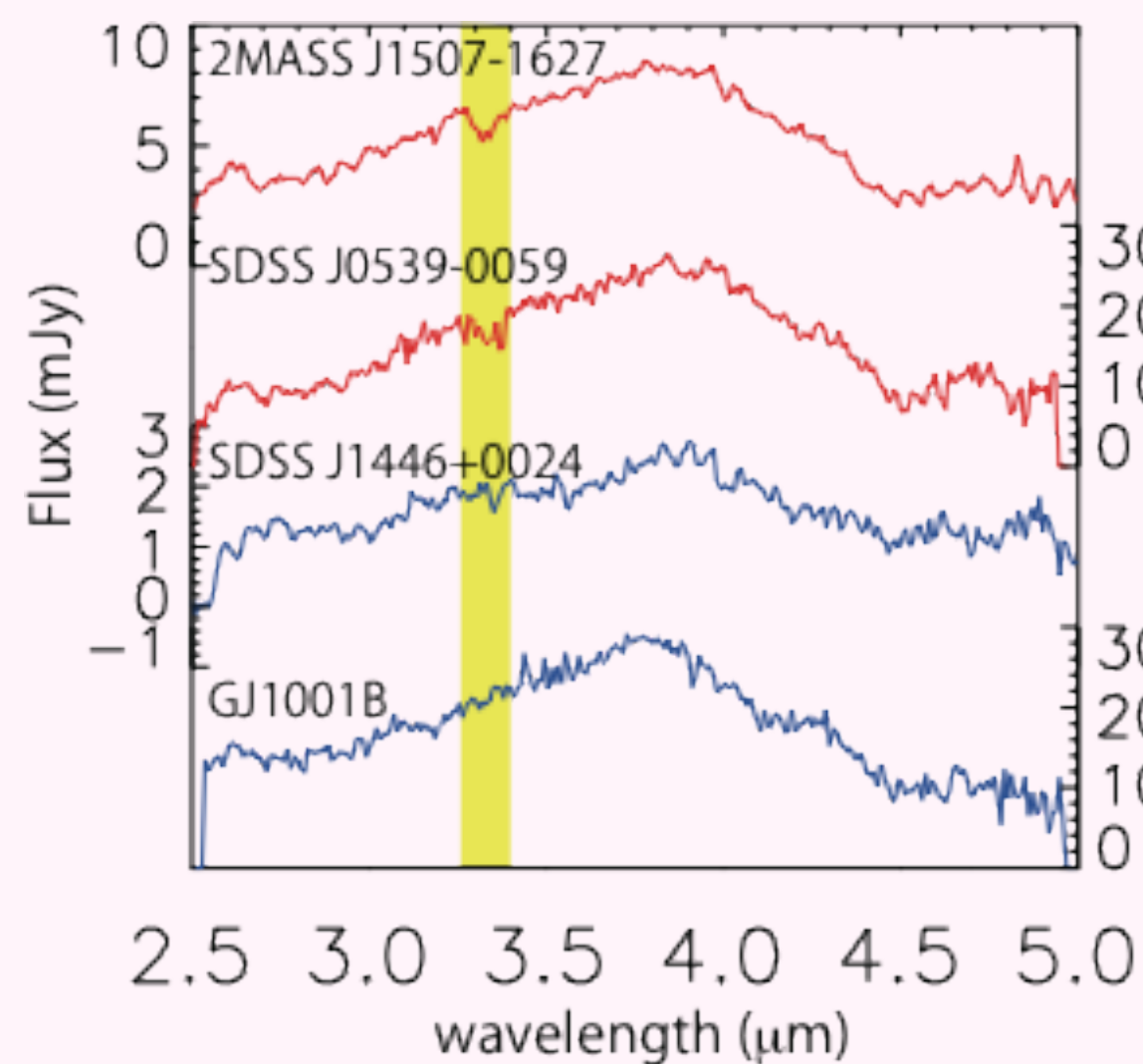


「あかり」による褐色矮星の典型的な近赤外線スペクトル。上は、有効温度約1800 K のL型、下は有効温度約1300 K のT型褐色矮星である。二酸化炭素 (CO_2) が、褐色矮星大気中に初めて確認された。



比較的温度が高く、ダストが支配するL型褐色矮星のスペクトルは、大気モデルUCMによっておおむね再現されている。一方、より低温で分子の吸収が卓越しているT型褐色矮星では、SED は再現するが、分子バンドの強度をきちんと再現できないことが分かった。すなわち、CO 及び CO_2 の超過が見られ、**熱化学平衡から逸脱**していることが明らかになった。

低温の大気中で、炭素原子を含む分子はCOから CH_4 に急激に転換する。 CH_4 分子は、有効温度1800K前後で生成が始まる**ことが知られていたが**、我々は「あかり」による近赤外線スペクトルを元に、 CH_4 の出現を系統的に解析し、ほぼ同じ有効温度(約1800 K)の天体でも CH_4 吸収バンド(黄色の帯の部分)が存在する天体(上二つ)としない天体(下二つ)があることを明らかにした。我々は褐色矮星の大気モデルを用いて各天体の物理量を導出し、有効温度以外に**表面重力(=質量)**や、大気中のダストの状態の違いが、 CH_4 分子吸収バンドの有無に寄与している可能性を示した。



得られた褐色矮星(と赤色矮星)のスペクトル。下から上に、有効温度が下がるにつれ、CO, CO_2 , CH_4 といった分子バンドが顕著に見えていくのが分かる。