

東北-広島-名古屋 惑星スペクトル ライブラリー：系外惑星の分類への応用



ラムゼイ ランドック

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA〉

e-mail: lundock@naoj.org

われわれは2008年に東広島天文台「かなた」望遠鏡と観測装置 TRISPEC を使って、太陽系のすべての惑星と多くの衛星を複数回観測した。これらの結果は東北-広島-名古屋惑星スペクトルライブラリー (THN-PSL) として公表した¹⁾。この観測により、可視光-近赤外線域のカラー (色) のみに基づいて、惑星や衛星を岩石型、氷型、ガス型に分類可能であることがわかった。最近発見された系外惑星と褐色矮星にこの方式を適用することにより、特異な低温の T 型矮星 ULAS J1416+13 と GJ 758B は、メタンを伴う低温のガス天体であると「正しく」同定することができた。このことは、THN-PSL に基づく分類方式が褐色矮星や系外惑星についても適用できることを示している。

1. イントロダクション

東北-広島-名古屋惑星スペクトルライブラリーは、単一の望遠鏡と観測装置の組み合わせで撮られた、すべての太陽系惑星のデータを含む、初の完全なライブラリーである。いくつかの衛星や、準惑星であるセレスと冥王星のデータも含んでいる。これまでも、太陽系内の惑星や小天体の観測は数十、もしくは数百の別々の研究グループによって多数行われてきたが、それらのほとんどは、さまざまな時期に、異なる波長域、波長分解能で行われたものである。単独の観測装置によるライブラリーでは、最大でも四つの惑星しか含まれていない (例えば、波長 0.8-5.5 μm で IRTF/SPEX を使って撮られた木星、土星、天王星、海王星のライブラリーがある²⁾)。そのため、最新の研究においても、1970年代から1980年代に撮られたデータを参考にせざるをえない状況が散見される。過去文献からスペクトルを集めて、ライブラリー化するのは難しい。研究グループごとに観測手法が異なっており、波長分解能、波長領域、

感度がばらばらであるからである。データ処理の方法もそれぞれで微妙に異なっている。例えば、あるグループは通常のスเปクトルを公表しているが、別のグループは反射率のデータに加工して公表、さらに別のグループは特定のスペクトル特性を強調するために連続光で正規化して公表、といった具合である。一つの観測グループであっても、観測手法は長い間に変わることも多い。また惑星は、自転によって見える部分が変わり、その天候によってもスペクトルが変化する複雑な天体である。したがって、異なる時刻に撮られたデータを組み合わせて広い波長帯でのスペクトルを得る、ということは適切ではない。こういった事情から、過去に出版された文献から広帯域のライブラリーを構成することは実質上できないといっ

よい。
われわれは今回、単一の望遠鏡と装置で、新たにすべての惑星といくつかの小天体を観測した。そして、可視光から近赤外線にかけての色の情報だけから、よく知られた三つの組成グループ、すなわち、ガス惑星、氷惑星、岩石惑星に分類する

ことができることを見いだした。THN-PSL が真価を発揮するのは系外惑星への応用だろう。THN-PSL が出版された後にも、多くの系外惑星、そして二つの極低温の褐色矮星が観測され、そのデータが利用できるようになった。本記事の2章では、われわれの観測について述べる。3章では色データと、THN-PSL から導かれたガス・岩石・氷の分類手法について手短かに議論する。4章では観測と理論スペクトル・色を比較する。5章では THN-PSL に照らし合わせて、系外惑星や低温褐色矮星の新しいデータを解析する。

2. 観 測

THN-PSL の観測は広島大学東広島天文台で行った。使用した望遠鏡は 1.5 m かなた望遠鏡³⁾、観測装置は TRISPEC (Triple Range Imager and SPECtrometer with Polarimetry) である。TRISPEC は可視光と近赤外線と同時に撮像、分光、偏光観測ができる装置である⁴⁾。TRISPEC は入射光を三つのビーム、すなわち可視光チャンネル (0.45–0.90 μm) と二つの近赤外線チャンネル (IR1: 0.90–1.85 μm , IR2: 1.85–2.5 μm) に分けて、全チャンネルで同時に分光をする能力がある。われわれは 300 μm 幅のスリットを使った。このスリットを使うと、波長分解能 ($R = \lambda/\Delta\lambda$) は、可視光で $R = 138$, IR1 で $R = 142$, IR2 で $R = 360$ になる。名古屋大学 Z 研で設計・開発された TRISPEC を用いて、広島大学の望遠鏡を利用し、東北大学でデータ解析を行った、という事情から、完成したライブラリーは東北-広島-名古屋惑星スペクトルライブラリー (The Tohoku Hiroshima Nagoya Planet Spectra Library: THN-PSL) と名づけられた。

観測は 2008 年の 5 月 2–13 日と 11 月 19–27 日に行った。観測した天体は、水星、金星、地球 (月面への地球照を観測⁵⁾)、火星、セレス、木星、土星、天王星、海王星、冥王星、月、イオ (J1)、エウロパ (J2)、ガニメデ (J3)、カリスト (J4)、ディ

オネ (S4)、レア (S5)、タイタン (S6)、土星の環である。また、相対感度の波長依存性の補正や大気吸収の補正のため、標準星も観測した。データ解析は IRAF を用いて行った。観測とデータ解析の詳細は THN-PSL の発表論文を参照していただきたい。

3. 色-色分布

図 1 に、太陽系惑星や月の J-Ks 対 Rc-J の色-色分布をプロットしている。THN-PSL における測定精度は、 $\Delta(V-Rc) = 0.13$ 等、 $\Delta(Rc-Ic) = 0.09$ 等、 $\Delta(Rc-J) = 0.22$ 等、 $\Delta(J-Ks) = 0.28$ 等、 $\Delta(H-Ks) = 0.30$ 等である。惑星のスペクトルは時刻とともに変わるので、図 1 では同じ天体に対する複数回の観測結果を示してある。データのばらつきには、測光誤差に加え、天体ごとの時間変化も含まれている。例えば、海王星に対する J, K バンドの長期測光データでは、自転によって J-K カラーが 1 日の間に 3 等級も変化する様子が捕らえられている⁶⁾。これまで多数の惑星の測光観測が行われてきたが、そのほとんどは可視と赤外とで別々の時期に行われたものである。よって、図 1 に示した色-色図は、これまで行われてきた研究よりも、よ

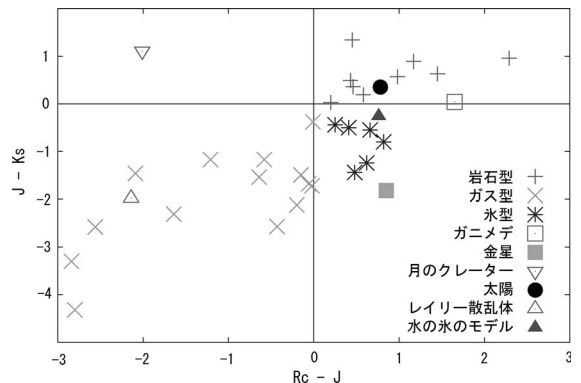


図 1 THN-PSL で測定された J-Ks 対 Rc-J の色-色分布。同じ天体に対する複数回の観測結果は別々の点として示している。典型的な測定精度は、 $\Delta(J-Ks) = 0.28$ 等、 $(Rc-J) = 0.22$ 等である。岩石型、ガス型、氷型が占める領域がそれぞれ明瞭に異なっていることがわかる。

り正確に惑星本来の性質を反映しているといえる。この色-色図において、惑星のタイプ別の違いがはっきりと見てとれることに注目して欲しい。われわれはまず、スペクトルに基づく三つの惑星の型（岩石、氷、ガス）⁷⁾を見いだした。惑星の型による差は明瞭で、この色-色図上で別々の領域に区分される。岩石型は、 $Rc-J > 0$ と $J-Ks > 0$ の、太陽の色に近い領域に分布している。氷型は、 $Rc-J > 0$ で $J-Ks < 0$ の領域に分布し、ガス型は $Rc-J < 0$, $J-Ks < 0$ の領域に分布している。ただし、いくつかの天体（金星、ガニメデ、および5月に観測した月）は各々が属する領域には分布していない。これら三つの天体について以下で議論する。

3.1 ガニメデと汚れた氷

われわれは、ガニメデのスペクトルが氷の衛星よりも月のスペクトルに似ていることから、ガニメデを岩石型と同定した。図2および図3を見ていただきたい。図2は、THN-PSLで「氷型」と同定されたすべての天体のスペクトルを平均したものを示している。ガニメデと金星（以下を参照）のスペクトルも比較のため載せている。図3は、月の「海」とガニメデのスペクトルを示している（クレーターについては後述）。図2と図3からわかるように、ガニメデのスペクトルは、氷型のものよりも、月のスペクトルに近い。

ガニメデは岩石質のコアをもつが、表面は主に氷質である。ガニメデ表面に分布する氷の見積もり量は、ここ数年、更新され続けている。現在は、黒っぽい粒子—おそらく鉄を多く含む原料からなる—が入り混じった、汚れた氷が検討されている⁷⁾。黒っぽい粒子は、火山活動⁸⁾により、ガニメデの巨大な岩石質コアから掘り起こされたと考えることができる。われわれの観測でガニメデが岩石質と同定されることや、岩石惑星と氷惑星との差がさほど大きくなかったことは、このガニメデの特性により正当化されよう。汚れた氷に含まれる成分の割合が変わることによって、色-色図上

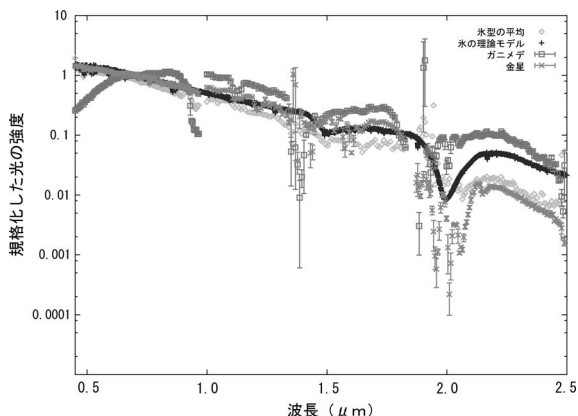


図2 氷型惑星のスペクトル。波長 $0.5 \mu\text{m}$ から $2.5 \mu\text{m}$ にかけてのフラックス分布を、比較しやすくするため、波長 $0.7 \mu\text{m}$ 付近で1となるように規格化して示している。観測データが波長 $0.95 \mu\text{m}$ 付近、 $1.4 \mu\text{m}$ 付近、 $2 \mu\text{m}$ 付近でデータがばらついているのは、主に TRISPEC のダイクロイック・ミラーの分離波長付近における低効率や、地球大気の吸収による低効率が影響しているためである。THN-PSL で氷型と同定されたすべての天体のスペクトルを平均したもの（ひし型）と、純粋な氷の理論モデル（十字）とに加え、比較のためガニメデ（四角）と金星（×印）を示している。

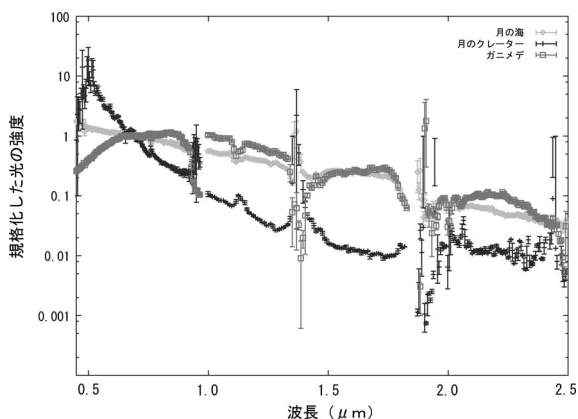


図3 岩石惑星のスペクトルとして、月の海の部分（ひし型）、月のクレーター（十字）、ガニメデを示している。縦軸、横軸については図2と同様である。この図や図2からわかるように、ガニメデの連続光スペクトルは、氷型のものよりも、月のスペクトルに近い。

での分布が徐々に遷移すると考えられる。

彗星はよく知られた「汚れた雪玉」である。彗星の色は岩石惑星の領域に分布し、J-Ks カラーにおいては岩石惑星よりもわずかに赤い¹⁾。水の氷霜に付着した鉱物に関する実験により、ケイ酸塩によるわずかな汚染が、近赤外域のスペクトルを劇的に変化させることがわかっている⁹⁾。とりわけ、J-Ks カラーにおいて劇的な赤化を及ぼす⁷⁾。

3.2 金星

金星は典型的な岩石惑星のスペクトルには合わない。これは、固体表面が厚い雲の層の下に隠されていることから、予想されることではある。金星は、ほかのどの岩石惑星よりも青いJ-Ks カラーを示す。この色は、金星の厚い大気中におけるレイリー散乱で引き起こされている¹⁰⁾。このため、図1上で金星は氷惑星の領域に分布していると考えられる。金星は、H₂Oの代わりにCO₂のスペクトル線を示すことから、実際の氷惑星とは分光学的に区別できる¹⁾。しかし、色では区別できない。金星と氷惑星との縮退を色のみで解くためには、おそらく可視波長や紫外域におけるさらなる研究が要求されるだろう¹¹⁾。

3.3 月

月は30分角の角直径をもつが、TRISPECの分光器スリットは3.3秒角幅で7分角の長さしかもたない。このため、単一の観測においてはごく一部の領域だけを観測することになる。7分角幅の二次元スペクトル像から、一次元のスペクトルをどう抽出するかは、月表面のどの領域を測定するかということにかかわる。5月に観測した、月および地球照の観測データからのスペクトル抽出には、IRAFのapallコマンドを利用した。apallコマンドは二次元スペクトル画像のスリット長方向の断面における最も明るい場所を、スペクトル中心としてトレースする。この場合、抽出する（すなわち測定する）領域が、月表面の明るい部分へ偏ってしまう傾向がある。実際、われわれが抽出

したスペクトルを過去の研究で得られたものと比べると、月表面の大部分を占める海のスペクトルではなく、明るいクレーターのものとよく合っていた¹²⁾。そこで、11月の観測データの解析では、標準星の連続光スペクトルをトレースしてスペクトルの測定領域を決め、月のスペクトル抽出に用いた。これにより、抽出領域が月の明るい部分に偏ってしまうことなく、月表面の任意の狭い領域のスペクトルを得ることができた。

月のクレーターの色は、図1において左上に分布している。惑星間空間から月表面へ物質が降着し、堆積することによって、クレーターの若く地表にさらされたばかりの岩がしだいに赤くなると考えられる¹³⁾。色が赤くなるにつれて、クレーターの点は図1において、岩石惑星の領域である右のほうへ動いていくだろう。われわれはそもそも、彗星や月、火星といった岩石惑星を調べ、地球型惑星のサンプルを得ることを目的としていた。しかし、彗星や月のクレーターのRc-JやJ-Ksという色の分布は、必ずしもそれらが岩石質であることを指し示すものではなく、本体が固体微粒子や砂、土で覆われていることを示すものであった。

4. 理論的スペクトルとの比較

惑星のスペクトルや色に隠された科学的な理由をより理解するために、われわれは純粋なレイリー散乱体と純粋な水の氷という、二つの理論的スペクトルを用意した。レイリー散乱はガス惑星における散乱過程において支配的であるため、理想的なレイリー散乱体は、ガス惑星のスペクトルが（強い吸収線は除いて）どう見えるかを教えてくれる。

まず最初にわれわれは λ^{-4} 乗則を用いてアルベド（反射率）のスペクトルを求めた。そして、太陽スペクトルとこのスペクトルを掛け合わせて、太陽系における純粋なレイリー散乱体のスペクトルを求めた。図4から、純粋なレイリー散乱

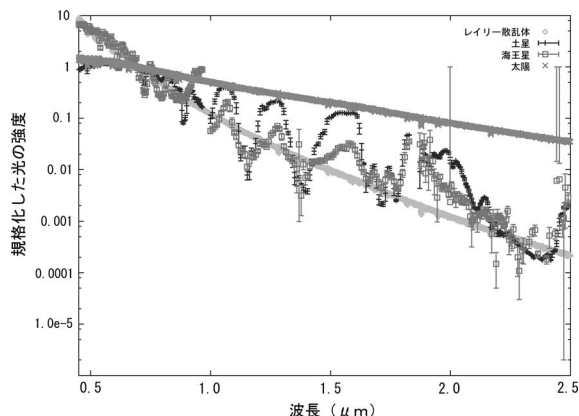


図4 ガス惑星のスペクトルとして、純粋なレイリー散乱体による理論モデル（ひし型）、土星（十字）、海王星（四角）、および比較のためすべての光源である太陽のスペクトル（×印）を示している。縦軸、横軸については図2と同様である。近赤外線から可視域にかけて大きく盛り上がるような海王星のスペクトルの大まかな波長分布（スペクトル線の特徴は除く）は、純粋なレイリー散乱体のものと近いことがわかる。

体は、メタンの吸収フィーチャーを除いて、海王星に似たスペクトルを示すことがわかる。

われわれはまた、ある確立された方法に従い、純粋な水の氷による理論スペクトルを用意した¹⁴⁾。図2で、このスペクトルと、TNH-PSLで水型と同定したすべての天体の平均スペクトルとを比較している。理論モデルのスペクトルは、2.2 μm より短い波長においては観測とよく合っている。Kバンドにおけるずれは、氷質の惑星本体はこのモデルのような純粋な水の氷ではなくて、おそらく CO_2 や CH_4 といった別の吸収体が効いていることによるのであろう。

次にわれわれは、観測データと同じ方法を適用して、これら理論的スペクトルの色を計算した。レイリー散乱体のスペクトルが示す色 ($\text{Rc-J} = -2.14$, $\text{J-Ks} = -1.98$) はガス惑星のものと合っており、われわれが提唱する色分類の手法によっても、正しく同定されることがわかる。この非常に青い色は、海王星の11月20日のスペクトルと極

めてよく合っているが、木星や土星、タイタンはいずれも **Rc-J** カラーにおいてこれよりも赤い。

木星や土星は、可視光は反射するが赤外線は透過する雲を有する¹⁵⁾。タイタンではエアロゾルが可視光を吸収する¹⁵⁾。これらの特性により、可視光は、大気中で散乱され得るほど深くには入り込めない。このため、これらの惑星の可視スペクトルはレイリー散乱モデルとは合わないと考えられる。図4に、土星と太陽のスペクトルを比較のため示してある。この図からわかるように、波長0.8 μm 以下の可視域においては、土星のスペクトルは、海王星やレイリー散乱体のものよりも、太陽のスペクトルによく合っている。氷の理論モデルの色 ($\text{Rc-J} = 0.76$, $\text{J-Ks} = 0.26$) は、氷惑星の **Rc-J** カラーと合っているが、**J-Ks** カラーは氷惑星と岩石惑星との中間に分布している。それでも、 $\text{J-Ks} < 0$ であることから、**THN-PSL** の分類手法に従えば、氷型と正しく分類される。

この **THN-PSL** の分類方式は観測的に導かれたものであるが、これら理論モデルと比較することで、観測されるパターンがある程度説明できることがわかった。岩石惑星は不透明であり、波長依存性はほとんどないことから、色は太陽の色に近い。ガス惑星では、惑星大気の深い領域でのレイリー散乱が、**Rc-J** と **J-Ks** 両方の青い色に効いている。氷惑星では、青い **J-Ks** カラーは水の吸収によるものであるが、水以外の別の吸収体も効いているはずである。

5. 系外惑星カラーとの比較

THN-PSL が出版されてから、系外惑星と冷たい褐色矮星に関する新たなデータが発表された。図5は、**THN-PSL** と五つの系外惑星：**HR8799b**, **c**, **d**¹⁶⁾, **1RXS J160929.1-210524b**¹⁷⁾, **2MASS 1207-3932b**¹⁸⁾ の **J-H** 対 **J-Ks** の色-色関係である。これらの系外惑星において観測された光の大部分は、いまだ若く、惑星自身が放った放射成分を主に見ているものと考えられるが、中心星の光の反射成

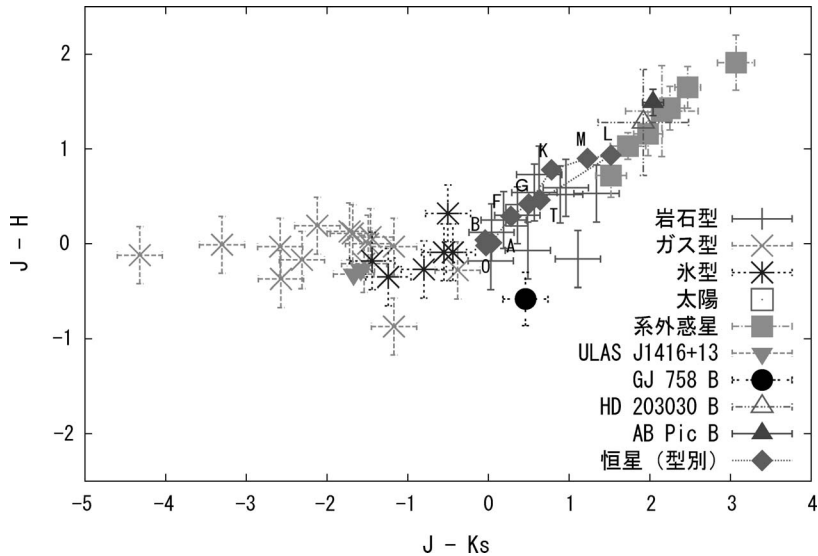


図5 太陽系内の惑星と、系外惑星や褐色矮星をた色-色図上で比較した図。横軸にJ-Ks、縦軸にJ-Hをとり、より効率的に分類できるように工夫してある(85参照)。系外惑星は太陽系天体に比べて系統的に右上に分布することから、中心星からの光の反射だけではなく、自己放射成分が効いている可能性がある。褐色矮星については個性があるが、特に冷たい矮星であるULAS J1416+13の色は、ガス型に近いものとなっている。

分も多少は含まれるであろう。われわれの得たTHN-PSLのスペクトルは反射スペクトルであるから、自己放射スペクトルと比較して何らかの結論を得ることは難しい。THN-PSLの真の値は、将来、明瞭な反射スペクトルが得られたときに、それを解析することにある。しかし、系外惑星のデータはまだ限られるため、現実的な研究の第一歩として、THN-PSLをこれらの放射スペクトルと比較してみよう。

HR 8799bの測光カラーは、二番目の論文によって報告され¹⁹⁾、HR8799を周る惑星すべてについてのデータは三番目の論文によって再計算されている²⁰⁾。これらのデータを第一論文であるMaroisらのデータに追加したものを図5にプロットしてある。ULAS J1416+13は30 M_J (1 M_J は木星の質量)をもつ特異なT7.5型の褐色矮星である。この天体を特異たらしめているのは、その低温度であり、実に500 Kしかなく、太陽系外で見つかった準恒星天体のうちで最も低温である。例えば、水星の表面温度は620 Kであり、地

球は295 Kであることと比較されたい。また、三つの他の褐色矮星のデータもプロットした。GJ 758BとHD203030Bについても、その低い温度が特徴的であり、それぞれ600 K²¹⁾と1206 K²²⁾である。AB Pic Bの質量は13-14 M_J であり、褐色矮星と「超」木星型惑星の境界にある²³⁾。質量の決定には不定性があるため、これら三つの褐色矮星はもしかすると惑星と考えてもいいぐらいに軽いかもしれない。

これら九つの系外惑星候補すべてについてデータが得られているバンドは、J, H, Ksだけである。さまざまな著者が色-色関係を用いて、系外惑星に対する分類手法を提案してきた^{1), 20), 24), 25)}が、われわれの知る限り、J, H, Ksカラープロットを系外惑星の分類手法として発表したグループはこれまでない。THN-PSLは広い波長範囲をカバーしているので、これらのカラーを計算し、データと比較することは簡単である。こういった事情が、惑星スペクトルライブラリーの価値を示している。

THN-PSLにより、岩石惑星が、氷惑星やガス惑星とは異なる **J-Ks** カラーを有することが示されたので、新たな色-色図では、横軸に **J-Ks** を用いるのが良いであろう。また、試行錯誤を重ねた結果、**J-H** カラーは **H-Ks** に比べて広い範囲に分布し、良いコントラストを得やすいことがわかったので、縦軸には **J-H** を取ってみよう。こうして得られた図5を見ると、系外惑星は太陽系天体に比べて系統的に右上に分布することがわかる。このことから、系外惑星の多くは、中心星の反射ではなく、おそらく自ら光を放っている新しいクラスの天体なのかもしれない。ただし、岩石惑星と重なる部分もある。これらの系外惑星のすべてが若く、重力収縮エネルギーで今も暖められているとすれば、実効温度は 800 から 2,000 K となるであろう。これらの天体は惑星（褐色惑星境界の 13 M_J より軽い天体）と分類されてはいるが、それでも自己放射しているのである。THN-PSL スペクトルは反射スペクトルであるので、これら熱い天体の放射スペクトルと比較するのは適当ではない。そのため、この図においてこれらの天体が正しく分類されないのは驚くに当たらない。褐色矮星は、これら自己放射惑星と太陽系の岩石惑星の領域にあり、分類を複雑にしている。

図5で驚くべきは、冷たい矮星 ULAS J1416+13 がガス惑星と同じ領域にあることである。この図5ではガス惑星と氷惑星が同じ領域を占めているため、厳密に言えば、ほかのデータなしにこの天体が氷惑星である可能性を排除することはできないが、幸いにも、ULAS J1416+13 は赤外スペクトルが取得されており²⁰⁾、幅広く深い CH_4 吸収帯をもつことがわかっている。このメタン吸収帯は、図4のガス惑星のスペクトルにも見える。対照的に、氷惑星は図2に示したように **J, H** バンドで特徴のないのっぺりとしたスペクトルを示す。冥王星は厚い CH_4 の氷で覆われているが、その冥王星でさえ、スペクトルにガス惑星ほど明瞭な CH_4 吸収帯は見られない¹⁾。このように、冷た

い矮星 ULAS J1416+13 は、ガス惑星（の反射スペクトル）とよく似たスペクトルを示し、近赤外域の色もよく似たものとなっている。

2番目に冷たい天体である GJ 758B（温度 600 K）は図5でうまく定義されない領域 ($\text{J-Ks} > 0$ および $\text{J-H} < -0.5$) にある。**J-Ks** カラーに基づくと、この天体は岩石惑星に分類されるであろう。しかし、**J-H** カラーに基づけば、ガス惑星のほうが適当となる。こういったケースでは、褐色矮星の CH_4 の検出に特殊化されたフィルターによる観測によって、状況が明らかとなっており、図4に示したガス惑星スペクトルとは一致するが、図5に示した固体惑星スペクトルには見られない、**H** バンドにおけるスペクトルの急な勾配があることがわかっている。

このような比較がすぐにできることも THN-PSL の有用性の一つである。自己放射型の系外惑星は図5の右上の象限に位置する。この領域は岩石惑星だけではなく太陽、恒星、褐色惑星をも含む。冷たい矮星 ULAS J1416+13 は左下のガス惑星の領域に位置し、GJ 758B はガス惑星からは少し離れているが、やはりガス惑星からあまり遠くないところに位置する。データ点が少ないので確かな結論を得ることは難しいが、図5によれば、少なくとも測光学的には、冷たい矮星は褐色矮星や自己放射する超木星型惑星よりも、太陽系のガス惑星に似ているということが示唆される。

6. 結 論

THN-PSL は、初の包括的な惑星スペクトルライブラリーである。この結果をもとに、われわれはガス惑星、岩石惑星、氷惑星の三つのクラスの色による分類方式を確立した。ただし、金星と月のクレーターのように、この方式によってすべての天体が正しく分類されるわけではないことに留意する必要がある。得られたスペクトルと単純化した理論スペクトルを比較することで、ガス巨大惑星の青い色の主たる原因は、その大気中でのレ

イリー散乱によるものであることがわかった。これに対して、氷惑星の色を決めているものは主として氷の吸収である。さらに最近報告された系外惑星と冷たい褐色矮星について、THN-PSLと比較することで、若い自己放射惑星は総じてこの方式では正しく同定されないものの、冷たくてメタンが豊富な褐色矮星はガス惑星として「正しく」同定されることがわかった。太陽系惑星と同じくらいの温度 (< 600 K) をもつ系外惑星のスペクトルが将来手に入れば、それらを THN-PSL と比較することで、より直接的に正しく分類できると期待される。

本稿は筆者の博士論文（東北大学大学院理学研究科天文学専攻）と共著論文に基づいてまとめたものです。この研究を進めるうえで、TRISPEC 開発チームと東広島天文台チーム、そして指導教員である市川 隆氏にはたいへんお世話になりました。最後にこの文章を翻訳してくださった川端弘治、吉田道利、植村 誠の諸氏に感謝したいと思います。

参考文献

- 1) Lundock R. G., et al., 2009, A&A 507, 1649
- 2) Rayner T. J., Cushing M. C., Vacca W. D., 2009, ApJS 185(2), 289
- 3) 大杉ほか, 2011, 天文月報 104, 531
- 4) Watanabe M. N., et al., 2005, PASP 117, 870
- 5) Woolf N. J., et al., 2002, ApJ 1, 430
- 6) Belton M. J. S., Wallace L., Howard S., 1981, Icarus 46, 263
- 7) Clark R. N., 1980, Luna Planet Sci. XI, 157
- 8) Showman A.P., Mosqueira I., Head J.W., 2004, Icarus 172, 625
- 9) Clark R. N., 1981, JGR 86B4, 2074
- 10) Anderson R. C., et al., 1969, J. Atm. Sci. 26, 874
- 11) Lundock R. G., 2011, Ph.D. thesis (Tohoku University)
- 12) McCord T. B., Clark R. N., 1981, JGR 86B11, 10883
- 13) Pieters C. M., 1986, R. Geophys. 24, 557
- 14) Roush T. L., 1994, Icarus 108, 243
- 15) Fink U., Larson H. P., 1979, ApJ 233, 1021
- 16) Marois C., et al., 2008, Science 322, 1348
- 17) Lafrenier D., Jayawardhana R., Kerkwijk M. H., 2008, ApJ 689, L153
- 18) Mohanty S., et al., 2007, ApJ 657, 1064
- 19) Lafrenier D., et al., 2009, ApJ 694, L148
- 20) Currie T., et al., 2011, ApJ 729, 138
- 21) Janson M., et al., 2011, ApJ 728, 85
- 22) Metchev S. A., Hillenbrand L. A., 2006, ApJ 651, 1166
- 23) Chauvin G., Lagrange A. M., Zuckerman B., 2005, A&A 438, L29
- 24) Traub W. A., 2003, ESA SP-539 Oct.
- 25) Crow C. A., et al., 2011, ApJ 729, 130
- 26) Burningham B., et al., 2010, MNRAS R. Astron. Soc. 404, 1952

Tohoku-Hiroshima-Nagoya Planet Spectra Library: Application to Exo-Planet Classification

Ramsey LUNDOCK

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA

Abstract: We observed all of the solar system planets and a number of moons with an optical and near IR spectrograph, TRISPEC, attached to Kanata 1.5-m telescope at Higashi-Hiroshima Observatory. These results have been published as the Tohoku-Hiroshima-Nagoya Planet Spectra Library (THN-PSL).¹⁾ Using this library, we show it is possible to distinguish three groups of planets based on their visible to near-IR colors. Additionally, we analyzed recently-obtained data for exoplanets and cool brown dwarfs in the context of the THN-PSL. The peculiar, cool T dwarves ULAS J1416+13 and GJ758B can be correctly identified as cool gaseous bodies with methane. This demonstrates the possibility of using our data to analyze and classify extrasolar bodies.