

赤外三色同時変光観測で前主系列星 KH 15D の 謎に迫る

日下部 展彦

〈総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1 光赤外研究部〉

e-mail: kusakabe@optik.mtk.nao.ac.jp

KH 15D は、NGC2264 星形成領域に存在するユニークな変光を示す若い天体です。48 日の周期と 4 等にも及ぶ深い減光（食）を起こすこの奇妙な天体を、南アフリカにある 1.4 m 望遠鏡 IRSF と近赤外カメラ SIRIUS でモニタリング（反復）観測を行いました。周期・振幅・食継続時間などが可視光の観測とほぼ一致していることから、食を引き起こしているダストサイズに制限を与えることができました。また、今回初めて近赤外線における食の最中に起こる「青化」を明確に捕らえ、これまでのモデルに加え $2\mu\text{m}$ 以下のダストによる散乱領域があることを示唆しました。

1. KH 15D とは？

いっかくじゅう座にある NGC2264 は、クリスマスツリー星団やコーン星雲という愛称がついているほど有名な星形成領域です。すでにさまざまな研究がこの領域でなされており、距離は約 760 pc、星団の年齢は約 5 百万年と見積もられ、領域内の赤外線源 IRS 1 の周囲に低質量天体の星団が存在することがわかっています。今回紹介する特徴的な天体 KH 15D はこの領域に存在します。KH 15D はユニークな変光特性を示す K7 型の前主系列星です。周期的な深い減光、また、明らかに『食』を起こしていると思われる変光曲線をもつこの天体は、正式なカタログ名としては「V582 Mon」という名前がついていますが、Kearns & Herbst 1998¹⁾ の変光星探査の論文より、D フィールドの 15 番星であることから、「KH 15D」として知られるようになりました。発見当初、星周円盤の構造が食の原因かと思われ、星周円盤の進化を研究するうえで重要であり、さらには惑星形成の現場を見ているのではないとも言われ、注目を集めていました。

この天体は 48.4 日の周期で、2002 年には可視光で 3.5 等もの深い食を起こしています²⁾。食を起こしている時間（食継続時間）は現在では周期の 50% を占めていますが、1995 年の食継続時間は周期の 30% しかありませんでした。食継続時間は変化していますが、食の減光と増光の期間は常に、それぞれ 2~3 日程度を占めています。また、1995 年には食の中心付近で大きく増光する現象（再増光）が見られましたが、時間とともに再増光の大きさは少なくなっていきました。現在ではわずかなふくらみが見える程度になっています（図 1 参照）。食の中心付近からくる光は、可視光において数%直線偏光をしています。過去の大量のアーカイブデータ解析³⁾⁻⁵⁾により、以前は食がもっと浅く、全体的に現在より明るい天体でした。さらには 1913 年から 1951 年の間では食が起きていません。つまり変光星ではありませんでした。最近のスペクトル観測⁶⁾によって、この天体が実は連星であることが観測的に証明されました。このように長い時間とともに変化する前主系列星の連星系であることがわかってから、当初予想されていたように簡単な星周円盤の構造だけでは説明する

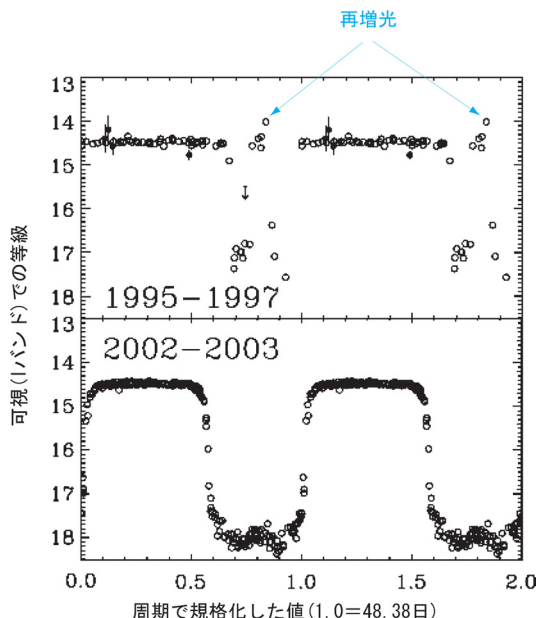


図1 KH 15D の可視光 (Iバンド) での光度曲線. 上の図は1995~1997年, 下の図は2002~2003年のもの. 周期自体は変わらないが, 食継続時間が広がり, 再増光が小さくなっている.

ことはできず, 現在では連星の周囲にある傾いてゆっくり連星系を隠していく円盤(周連星系円盤)⁷⁾ やリング⁸⁾ のモデルなどが考えられています.

このように注目されていた天体ですが, ほとんどが可視の観測で, 食を起している物質やダストの熱放射の寄与についての理解に必要不可欠な近赤外線での観測例はほとんどありません. そのため, 今回は2003年12月から2005年の3月までの長期にわたりモニターを行い, 近赤外において周期を完全にフォローしました.

2. 観 測

観測は2003年の12月から2005年5月まで, 数回に分けて南アフリカへ飛び, 南アフリカ天文台(SAAO)のサザーランド観測所で行いました. 観測装置は名古屋大学1.4m望遠鏡IRSFと名

大・国立天文台の近赤外三色同時カメラSIRIUSを用いました.

初めてIRSF/SIRIUSで観測したのは修士1年の8月, 装置の使い方の勉強も含め別の天体の観測でした. 当時, 海外自体は初めてではありませんでしたが, 乗り換えが必要なほど遠くへ行ったことはなく, たまたま飛行機の隣に座った休暇中のフライトアテンダントの女性にお世話になったり, ヨハネスブルクで国際線から国内線まで案内してくれた男性にチップを50ドルと言われてドルがなかったため千円札1枚を渡したりなど, エキサイティングな一人旅でした. 1回の観測につき, SAAOの観測所までのシャトルバスの関係上, 3週間の観測と往復含めて4週間の比較的長い旅になるので, もちろん現地でもさまざまなことがありましたが, 内容とは関係ないので割愛させていただきます.

この天体の周期自体は食が始まるときと終わるときは2~3日で急激な変化を示すため, なるべく観測効率のよい装置が必要です. SIRIUSは近赤外線の一つの波長帯Jバンド(1.25 μ m), Hバンド(1.63 μ m), Ksバンド(2.14 μ m)を同時に取れるということで, 時間精度のよいカラー(J-HやH-Ks)を得ることができます. また, 7.7'×7.7'という広い視野で多くの星を同時に観測できるため, 相対測光の基準にする天体を多くとることができました. さらに, 観測時間もSIRIUS専用1.4m望遠鏡IRSFのおかげで観測時間を豊富にもらうことができました. 深く, 広く, 効率よく観測できるこの装置は, モニター観測に最適でした. 観測装置自体については2005年3月号の天文月報に特集があるので, 詳しくはそちらを見ていただきたいと思います.

3. 結 果

図2(表紙)はKH 15Dが明るいとき(左)と「食」最中(右)の三色合成図です. この領域には有名な赤外線源で若い天体であるNGC2264 IRS

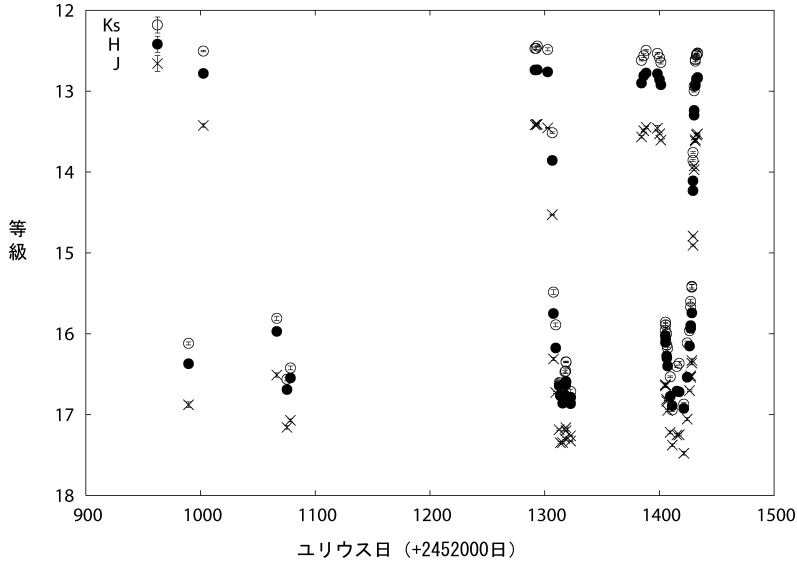


図3 観測した J, H, Ks すべてのデータ (54 点) をプロットしたもの. 近赤外でも可視光と同程度の減光が見られる.

1 と、コーンネビュラの一部 (画像下のネビュラ) が含まれています.

J, H, Ks バンドそれぞれの光度曲線は図3のようになります. 周期性はこの近赤外線領域でも明らかで, 周期は J, H, Ks ですべて等しく, 48.3 ± 0.2 日であり, 最新の可視光での周期と一致しました. 可視光での周期は 2002 年に 48.36 日と発表されたものを元に, 今回の観測結果を周期に規格化したものを (以下 ϕ で示す) 図4に示します. 光度曲線は全体的に可視光での観測結果と酷似しています. 具体的には以下の点です.

1) 光度曲線は全体的によく対称性もっているが $\phi = -0.25 \sim -0.15$ の傾きと $\phi = 0.15 \sim 0.25$ の傾きがわずかに非対称になっている (図4参照).

2) 変光の最大振幅は J, H, Ks とともに約 4.2 等であり, 1999 年から 2004 年の可視光における振幅 (約 4 等) とほぼ同等であり, 近赤外・可視の間で食の深さに対する波長依存性はあまりない.

3) 食中 (減光中) の明るさは一定ではなく食の中心付近 ($\phi \sim 0$) で明らかなふくらみ (再増光)

がある. このふくらみの大きさは J, H, Ks でそれぞれ 0.5 等程度の増光が 4 日ほど続き, これも可視光においても観測されている. このため, 極小値が $\phi = \pm 0.1$ 付近で二つ起こり $\phi = +0.1$ の極小が最も深くなっている.

4) 2003~2005 年の食継続時間は 2001~2002 年の可視光による継続時間より若干長く, 最近 (2003~2004) の可視光のものと同じ.

図5では ϕ に対する J-H, H-Ks を示しています. この図は, 星の『赤さ』や『青さ』の変化を示しています. 『J-H』というのは, 文字どおり J バンドでの等級から H バンドでの等級を引いたもので, この値が大きくなると, 波長の長いほうである H バンドの等級が小さい, つまり明るいことを示し, 『赤い』と表現します. 食を起こしていないときのそれぞれの値は一定で, J-H は 0.68 ± 0.01 等, H-Ks は 0.28 ± 0.02 等になりました. この値は K7 型の若い星 (T タウリ型星) が近赤外線でも 1 等程度赤化を受けた値となります. また, この領域では, 可視光で星間赤化を 10 等以上受けており, 可視での 10 等の赤化は近赤外線

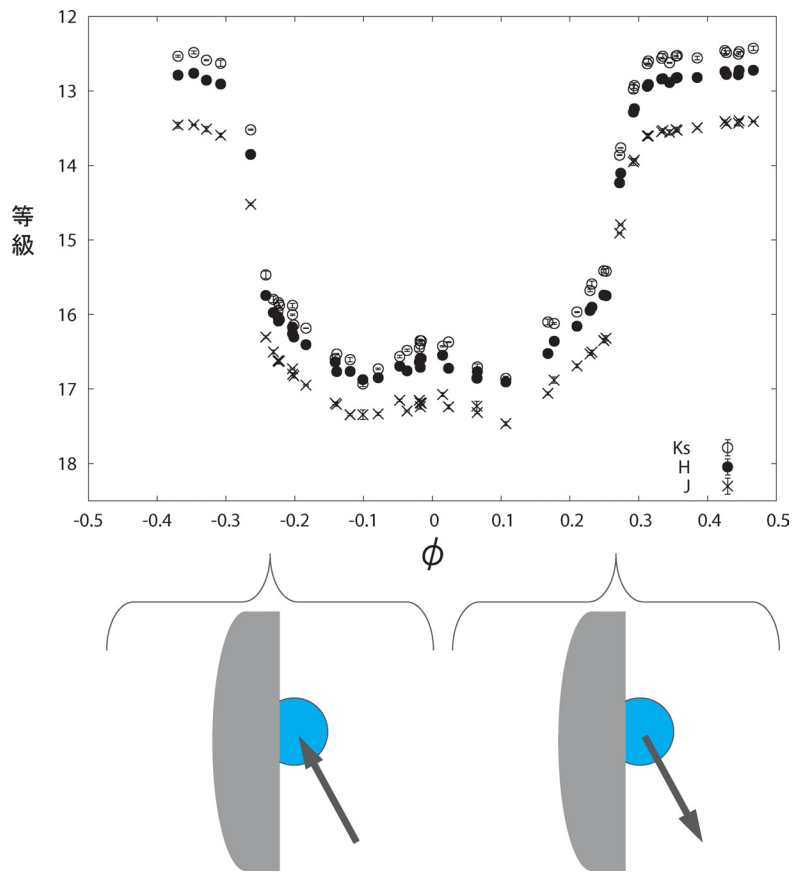


図4 近赤外線での光度曲線と、食の始まりと終わりのイメージ図。厚い星周物質に、星が少しずつ入っていく（出て行く）ために急激な減光を示す。

においては1等程度の赤化に相当するので、今回の結果は妥当なものです。

この図で最も印象的なのは、食を起こしている最中に起こる『青化』です。J-Hが食の最中に0.16等程度『青く』なっているが明らかにわかります。また、H-Ksにおいても、精度はJ-Hほど良くありませんが、同じように青くなる傾向が見られます。食の最中に若干青くなるというのは、最初は可視光でわずかに示されていますが、近赤外のデータはわずかです。私たちの論文より一足早く出た近赤外の論文⁹⁾でも少し示唆されていましたが、数回のモニタリングのデータしかなく、あまりはっきりとしたカラーの変動をとらえきれずにいました。それに対し、54回のモニタリング

でほぼ完全に周期をフォローし、明確に近赤外での『青化』を証明したのは今回が初めてでした。

4. 一体どんな天体？

このような奇妙な変光を示すこの天体はどのような天体なのでしょう？ 最近のモデルとしては、星を隠すスクリーンとして、互いに大きな離心率をもつ連星の周囲にある傾いた円盤（周連星系円盤）や、連星の周囲にある傾いたダストリングのモデルがありますが、連星であることを確認したスペクトル観測⁴⁾の結果では、連星の軌道要素をよく再現したのは傾いた周連星系円盤のWinnらによるモデルです。今回はこのモデルを紹介したいと思います。

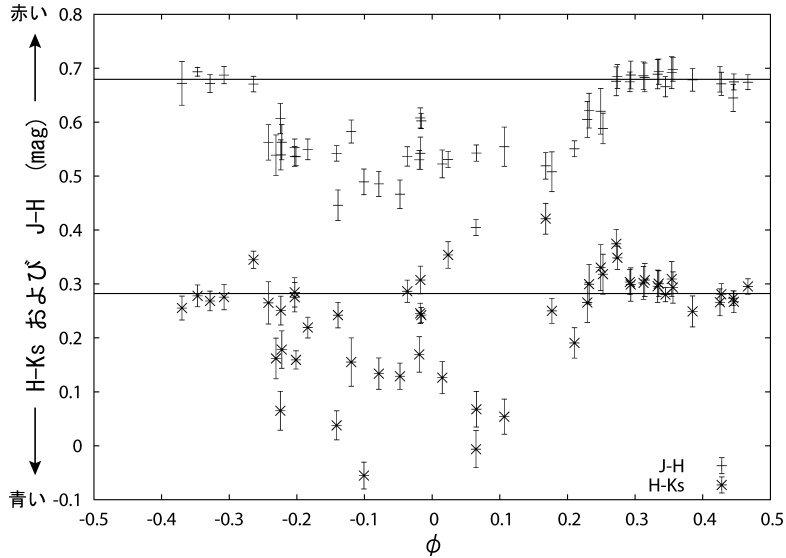


図5 J-H および H-Ks の食によるカラーの変化. 食の最中, J-H が 0.16 等程度青いほうへとシフトしている. H-Ks でも精度は悪いが同様の傾向がある.

図6に示すように、このモデルは、傾いた周連星系円盤の内側に連星が大きな離心率で互いに回っているというものです。その大きな離心率のため、現在ではすでに片方の星（星B）の軌道すべてが円盤に隠されており、もう片方の星（星A）が円盤に出たり入ったりすることによって、48日の変光周期を再現します（図4）。そして、円盤が歳差運動で少しずつ連星の軌道を隠していくことにより、長い期間でのライトカーブの変化を再現することができます。具体的には、1960年（図6左）のときはまだ円盤は連星を隠さず、食は起きていません。その後、1970年には円盤は星Bの軌道の半分ほどを隠しますが、まだ星Aを全く隠さないで、食は起きますがその食の深さは現在ほど深くありません。1995年（図6右）には星Bの軌道のほとんどを隠し、星Aの軌道も隠すようになります。そのため、深い食と、食の中心付近で星Bが少しだけ見え、再増光を示します。現在でも見えているわずかな再増光も星Bの寄与によるものだと考えられます。

このようなモデルを元に今回の観測結果を考え

てみると、可視と同等の減光を近赤外でも示したことから、天体を隠している物質のサイズは観測した波長より大きな物質（ $2\mu\text{m}$ 以上）であることがわかります。そのような比較的大きな物質（ダスト）で構成された円盤の内側エッジが天体を隠すことにより、『食』を起こすと考えられます。このモデルでは、対称性のよい周期を説明できますが、詳細な非対称性はまだ説明できるところまで完成されていないので、さらなるモデル化が必要とされます。細かいところではあるので、円盤の詳細な構造が起因しているのではないかと考えています。

また、『青化』については、円盤の吸収では逆の『赤化』になるはずなので、円盤の吸収では説明できません。しかし、円盤の周囲に分布している散乱領域があると仮定すると『青化』も含め、食の最中に起こる可視での直線偏光も説明できます。Agolら¹⁰⁾によるKH 15Dの偏光の検出結果は、食を起こすスクリーンが隠しきれていない散乱領域があることを示唆しています。この散乱領域による青化と偏光を再現するためのダストの大きさ

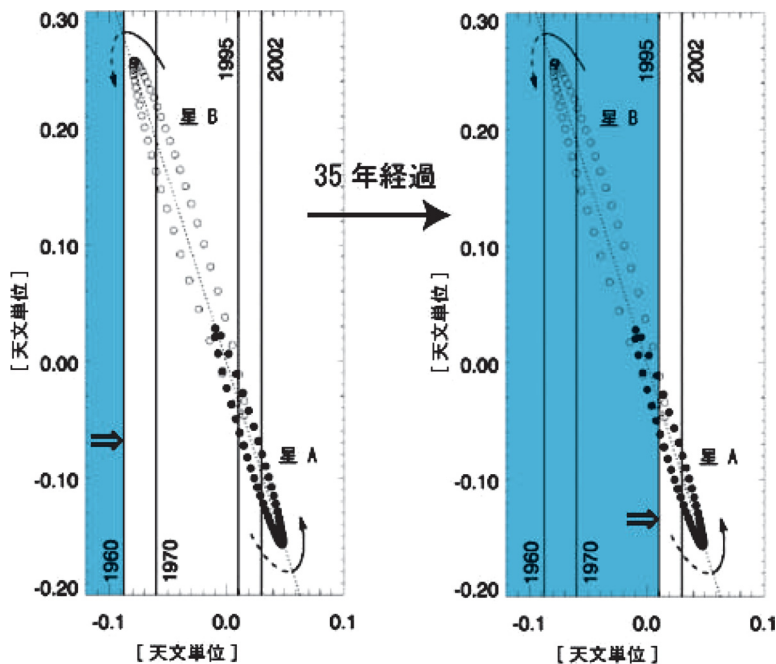


図6 Winnらによる周連星系円盤と連星のモデル. 縦の線はそれぞれの年における円盤の内側のエッジ. 時間がたつにつれ, 円盤が傾いていき, 星の軌道を少しずつ隠していく.

を簡単にモデル計算したところ, 0.5 nm から 5 μm のシリケートのダストがあればよいことがわかりました.

5. その 後

今回の結果は, これまでの観測とモデルをフォローし, さらなる詳細なモデルを示唆するものでした. ほかに例がないこの奇妙な天体は, 若い連星とその星周構造のダイナミックな振舞いを, 統計的な考察ではなく, 純粋に人が追うことのできるタイムスケールで私たちに見せてくれます. そういう意味でも, この天体は希有な存在です. まだモデルについても確証があるわけではありませんが, どのモデルであれ, そう遠くない未来, 連星の周囲の物質が完全に連星の軌道を覆い隠し, この天体が消える, もしくはほとんど見えなくなるときがくることは間違いなさそうです.

この論文¹¹⁾を出した直後, まだプレプリントができあがる前に昨年の 10 月末にハワイで行われ

た Protostars and Planets V (以下 PPV) という星・惑星形成関係の国際学会で KH 15D のポスター発表を行ってきました. 会場にいてポスターを貼ったときに, 自分のポスターの両隣のポスターも同じ KH 15D についてのポスターだったのは少し驚きました. 一つは H α での観測と もう一つは偏光とモデルについてのポスターでした. ちょうど内容もきれいに分担されていたので, 興味深く見させてもらいました. 偏光観測とのポスターでは, やはり散乱領域がどのように存在するかといったことについてモデルを考えており, より詳細なモデル化へ向かっていました. さらにそのポスターの著者や KH 15D の名づけ親である Herbest 博士, 今回紹介したモデルを作った Winn 博士など, KH 15D について研究している人たちが一同に会って現状や今後を話し合う場に同席することができたのは貴重な体験でした. この天体についての論文^{12), 13)}は 2002~2005 年の間に急速に増えたような印象がありますが, PPV

以降自分の論文を最後に論文が 2006 年 3 月現在まで、ほとんど増えていません。PPV において世界でどのような研究が行われているかを把握し、さらなる解明に向けて解析、研究をしているように思えます。実際、中間赤外の宇宙望遠鏡スピッツァーでも観測がなされていますが、報告はまだのようです。星周構造を解明するうえでこの波長での観測は不可欠ですので、中間赤外でどのように見えているのかは興味深いところです。

謝 辞

私が IRSF/SIRIUS というユニークな装置で観測できたことは、修士 1 年の春に受け入れ教官の先生から言われた、「日下部君、南アフリカ行ってこない?」という言葉が始まりでした。地理が苦手な私にとって、南アフリカが一瞬どこかわからなかったということはもちろん秘密です。そんなきっかけと、観測のため何度も南アフリカに行く機会をくださり、さらに今回紹介した内容の論文やこの記事を書くにあたり、お忙しい中多くの時間を割いて下さった田村元秀先生には本当に感謝しています。また佐藤修二先生、長田哲也先生には多くのことを教えてくださり、本当にありがとうございました。また神鳥 亮氏にも、この記事を書くにあたりさまざまな指摘をしていただき、感謝しています。そのほか、全員の名前は挙げられませんが、実際の観測や解析・装置の開発や保持にお世話になった IRSF/SIRIUS グループの方々には感謝しています。

また、PPV に参加するにあたり、天文学振興財団の補助を受け発表を行うことができ、国際的にこの天体についての研究をしている方々と知り合うことができたいへん感謝しています。最後に、この記事を書くにあたり、分野外からの視点で文章校正に明け方まで協力してくれた川越至桜氏にも感謝します。

参 考 文 献

- 1) Kearns K. E., Herbst W., 1998, AJ 116, 261
- 2) Herbst W., et al., 2002, PASP 114, 1167
- 3) Winn J. N., et al., 2003, ApJ 593, L121
- 4) Johnson J. A., Winn J. N., 2004, AJ 127, 2344
- 5) Johnson J. A., et al., 2005, AJ 129, 1978
- 6) Johnson J. A., et al., 2004, AJ 128, 1265
- 7) Winn J. N., et al., 2004, ApJ 603, L45
- 8) Chiang E. I., Murray-Clay R. A., 2004, AJ 607, 913
- 9) Knacke R., Fajardo-Acosta S., Tokunaga A. T., 2004, AJ 128, 2977
- 10) Agol E., et al., 2004, ApJ 600, 781
- 11) Kusakabe N., et al., 2005, ApJ 632L, 139K
- 12) Deming D., et al., 2004, ApJ 601, L87
- 13) Tokunaga A. T., et al., 2004, ApJ 601, L91
- 14) Hamilton C. M., et al., 2001, AJ 554, L201
- 15) Nakajima Y., et al., 2005, AJ 129, 776
- 16) Persson S. E., et al., 1998, AJ 116, 2475
- 17) Simon T., Dahm S. E., 2005, ApJ 618, 795

Near-Infrared Photometric Monitoring of a Pre-Main-Sequence Object KH 15D

Nobuhiko KUSAKABE

Department of Astronomical Science, Graduate University for Advanced Studies (Sokendai), Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: An extensive photometric monitoring of KH 15D has been conducted. The infrared variability is characterized by large-amplitude and long-lasting eclipse, as observed at optical. The blueing of the J-H color during the eclipse, which has been suggested before, is unambiguously confirmed. Most of these variability features of KH 15D observed at near-infrared wavelengths can be explained with the recent model employing an eclipse by the inclined, processing disk and an outer scattering region around a pre-main-sequence binary.