

ステラーコロナグラフを使った天文学

中 島 紀

<Dept. of Astronomy, 105-24, Caltech, Pasadena, CA 91125, USA>

e-mail: tn@astro.caltech.edu

明るい天体の周りの、暗い天体、或いは天体構造を検出するのがコロナグラフである。最近、アダプティブオプティクスとの組み合わせで、そのコロナグラフの用途が広がりつつある。現在我々が行っている褐色わい星 (brown dwarfs) の探索と、先主系列星 (pre-main-sequence stars) の周りの反射星雲のイメージングについて紹介した後、将来の太陽系外惑星の検出可能性について考察する。

1. ステラーコロナグラフの原理

可視赤外域では、望遠鏡の口径と波長の比は、100万対1もあり、光学系に入射する平面波の大きな角度の回折は、鏡の周縁部によるものに限られる。従って光学系を抜けた波面の大部分は、ほぼ平らで二次元的に広がっているが、主鏡縁、副鏡縁と、スパイダーに引きずられた境界部分は、一次元的に歪んでいる。この状況を焦点面でポイントスプレッドファンクション (PSF) としてとらえると、光のエネルギーの大部分は、PSFのコア (小さな回折) にあるが、一部は周辺部 (大きな回折) にも届いている。明るい星の近くの暗い天体を見る為に、明るい星の PSF をコアと周辺部の二段階に分けて減衰させるのがリオ (Lyot) 式のステラーコロナグラフである。

まず第一の焦点に PSF のコアを隠すようにマスク (焦点面マスク) をする。これで波面の大部分が減衰する。次に主鏡のイメージに、境界部を隠すマスク (瞳面マスク) を置くことで、第二の焦点面では、PSF のコアと周辺部 (瞳面マスクに対応) の両方が減衰する。焦点面マスクの外側を通った近傍の暗い天体 (例えば惑星) の光は、瞳面マスクの影響だけ受けるので、PSF のコアはほとんど減衰しない。こうして明るい星の近くの暗い天体をみるための大きなダイナミックレンジが

得られる。

地上観測では、PSFのコアを決めるのはシーイングと望遠鏡の追尾誤差である。このため通常のコロナグラフの焦点面マスクは直径6秒角もある。そこで星像の動きを10ミリ秒毎に補正するイメージスタビライザーと組み合わせると直径2秒角の小さな焦点面マスクが使える。イメージスタビライザーは、波面補正を行う光学系「アダプティブオプティクス」への第一歩である。以下、波面補正のついたコロナグラフを一般にアダプティブオプティクスコロナグラフ (AOC) と呼ぶことにする。

次に、我々がジョンスホプキンス大学のイメージスタビライザーのついた AOC を使ってパロマー山の 1.5 m 鏡で行っている二つのプロジェクトについて紹介する。

2. 褐色わい星の探索

我々の観測装置のダイナミックレンジは10万対1、すなわち太陽から10パーセクにある6等級の主星の周りに、絶対等級19等までの暗い伴星が検出できる。水素を定常的に燃やしてヘリウムに変える主系列星は、観測波長0.8ミクロン(Iバンド)では絶対等級15等より明るく、15等より暗い伴星は、恒星と惑星の中間的存在と考えられる褐色わい星である。従って褐色わい星の検出に関し

ては、4等のマージンがある。太陽近傍の恒星の伴星としての褐色わい星の探索には、従来、直接検出法として、近赤外イメージング、近赤外スペクトル干渉計、白色わい星の赤外超過の検出、間接検出法として、主星の固有運動や視線速度の周期的変化の検出があるが、それらと比べても感度の点で遜色はない。

太陽近傍の恒星の場合、その周りに検出された天体が、物理的伴星か、背景星かの区別は容易である。太陽近傍の天体は、数年で1秒角程の大きな固有運動を持っているので、主星と伴星の候補の固有運動が同じかどうかを1、2年の間隔をおいた二度の観測で調べればよい。

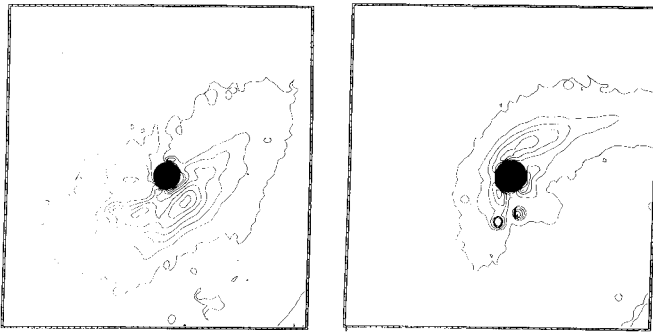
これまで約60個の近傍星を観測し、このうち伴星の候補のある星野について固有運動を調べた。この結果、連星系GL 105の主星GL 105 Aから3秒角(26 AU)の所に、主星より8等暗い、非常に低質量な伴星GL 105 Cを検出した(表紙の図左上)。この星の光度から推定される質量は、太陽質量の8.4パーセントで、恒星と褐色わい星の境界の8パーセントに近い。この伴星については、スペースステレスコープでも追試観測が行われ我々の結果は確認された。褐色わい星まであと一步のところまで来たことになる。

銀河円盤の恒星の平均年齢は50億年を越えると考えられているが、定常的核融合のない褐色わい星は、どんどん冷えて、10億年を過ぎると検出限界より暗くなってしまう。そこで検出可能性を上げるために若い近傍星を選んで伴星探しをするという戦略がたてられる。恒星のコロナ及び彩層の活動は、年齢と共に減少することが知られている。そこでコロナ活動の指標となるX線強度、彩層活動に関連した水素輝線強度から観測する主星を選ぶという新たな方針で褐色わい星探しを継続している。我々は、この比較的若い星のサンプルを〈10億年サンプル〉と呼びコロナグラフによる観測の他、赤外衛星天文台ISOによる中間赤外イメージングサーベイも予定している。

3. 先主系列星の周りの反射星雲

先主系列星(Pre-main-sequence stars)の中には、写真乾板やCCDイメージから、反射星雲を持つことが知られているものがある。しかし星からの角距離が小さい(10秒角以下)所では、星自体のPSFを被ってしまい過去において研究対象となったことはない。角距離1秒から10秒は、最寄りの星生成領域で150 AUから1500 AUにあたり、先主系列星の前の原始星の段階では、100 AU程度の降着円盤のすぐ外側の、エンベロープと呼ばれる領域に相当する。若い先主系列星の周りには、このエンベロープのなごりが、主星からの光のダスト散乱による反射星雲として見えている可能性がある。初めての試みとして先主系列星をAOCを使って観測すると、この反射星雲の有無を含めて表面輝度分布が求められた。観測波長は、0.64ミクロン(Rバンド)と0.8ミクロン(Iバンド)である。観測した11個の先主系列星の種類は雑多で、古典的Tタウリ星(水素輝線の強い太陽質量以下の先主系列星)、弱輝線Tタウリ星(水素輝線の弱い太陽質量以下の先主系列星)、ハービックのAe星(水素輝線のある太陽より少し重い先主系列星)、FUオリオニス星(質量降着で輝く非常に活発な先主系列星)が含まれている。

反射星雲が検出されたのはRY Tau, T Tau, DG Tau(古典的Tタウリ星), SU Aur(FUオリオニスの弱輝線Tタウリ星), AB Aur(ハービックのAe星), FU Ori, ZC Ma(FUオリオニス星)で、このうちT TauとSU Aurはコンパクトで明るい星雲をもっていた。表紙にはT Tau(右上), DG Tau(左下), SU Aur(右下)の疑似カラーマップが与えられている。マスクの半径は2秒角(280 AU)、視野は1分角四方(8600 AU)である。図1AはFU Oriのコントアマップで、マスクの半径は3秒角(1500 AU)、視野は1分角四方(30000 AU)、図1BはZC Maのコントアマップで、マスクの半径は3秒角(3500 AU)、視野は



左図 1A 先主系列星 FU Ori の周りの反射星雲。中心のマスクの半径は、3 秒角、視野は、1 分角四方である。1 秒角は、500AU に相当する。

右図 1B 先主系列星 Z CMa の周りの反射星雲。1 秒角は、1150AU に相当する。

1 分角四方 (69000 AU) である。検出されなかったのは GG Tau (古典的 T タウリ星), HBC 347, V 773 Tau, V 830 Tau (弱輝線 T タウリ星) であり, GG Tau を例外として古典的 T タウリ星, ハービックの Ae 星, FU オリオニス星に星雲が検出され, 弱輝線 T タウリ星には検出されなかったことになる。星の年齢にして 30 万年より若いと反射星雲がみられ, 50 万年を過ぎるとみられなかった。

光学的に薄い散乱を仮定して, 星と星雲の光度の比から星雲の光学的厚さの下限を求めると可視域で 0.1 程度である。星間空間のガス・ダスト比を仮定して星雲の質量と密度の下限をだすと, 古典的 T タウリ星では, 太陽質量の 100 万分の 1, 1 cc 当たり水素原子 10 万個となり, FU オリオニス星ではそれぞれ, 太陽質量の 10 万分の 1, 1 cc 当たり水素原子 1 万個である。星雲の密度は, 暗黒星雲全体の平均密度よりも, 少なくとも一桁は高いと思われる。

ダスト粒子に紫外線や可視の光子が当たると, ある時は反射され, ある時は吸収される。吸収されたエネルギーは, ダスト粒子を暖めて遠赤外熱輻射として再放出される。反射と吸収の確率は同程度なので, 反射星雲の可視域での光度と熱輻射の光度は, 熱源が星からの可視光だけなら, 同程度のはずである。赤外天文衛星 IRAS のビームサイズは, 1 分角程度で我々のコロナグラフの視野にほぼ一致する。そこでまず反射星雲の有無とアイラスの遠赤外フラックスの相関をみると, 100

マイクロンで 15 ミリジャンスキー以上の星で反射星雲が見られ 6 ミリジャンスキー以下の星では見られなかった。次に反射星雲の光度と 100 ミクロンでの熱輻射の光度の比べると, SU Aur と FU Ori で同程度, 他の星では熱輻射光度の方が一桁以上大きかった。SU Aur と FU Ori の 100 ミクロンフラックスに対し 100 ミクロンにピークを持つダスト熱輻射源の中心星からの角距離を見積もると 10-20 秒角となり, 反射星雲自体が 100 ミクロン ($T=30\text{ K}$) の輻射源となっているようだ。面白いことに 12 ミクロンから 100 ミクロンまでの広帯域スペクトルをみると SU Aur と FU Ori だけが 25 ミクロンと 100 ミクロンの間の 60 ミクロンバンドがへこんでいる。このへこみは, 中心星から 2-3 秒角の所にダスト雲の間隙があるとすれば説明されるが, 実際 FU Ori の反射星雲の表面輝度は, 中心星から 7 秒角離れてピークがあり, 中心星に向かって減少している。10 ミクロン ($T=300\text{ K}$) と 25 ミクロン ($T=120\text{ K}$) の熱輻射は焦点面マスクにかくれた星周円盤から, 100 ミクロンの熱輻射は反射星雲としても見える空間的に離れたエンベロープからでていると考えられる。内部のダスト雲が幾何学的に薄い円盤でないとも中心星の可視光がエンベロープまでとどかない。反射星雲の幾何学と遠赤外輻射を組み合わせるとダストの空間分布と光学的厚みについてかなりの制約が与えられる (なお, FU オリオニス星の可視光は質量降着によりでているが, 反射星雲に対する効果は星と変わらないのでここでは単に中心星の光と呼ぶ)。

反射星雲の光度より 100 ミクロンの熱輻射光度が一桁以上大きい星について 100 ミクロンを含めた遠赤外輻射の大部分は、焦点面マスクに隠れた星周円盤、及び星周円盤に直接つながるエンベロープからでていられる。大きなスケールでのエンベロープである反射星雲の形状とその星周円盤との幾何学的関係を見てみよう。まず反射星雲の形状は、わん曲した円盤状 (T Tau, SU Aur, Z CMa), または、弧状 (DG Tau, FU Ori) に見えるものが多い。円盤または弧に対しては、方向性が定義できる。一方ジェットをもつ天体 (T Tau, DG Tau, Z CMa) に対しては、星周円盤がジェットに垂直であるとの仮定のもとに星周円盤の方向を決められる。T Tau と Z CMa のわん曲した円盤状の反射星雲は、主星の付近で星周円盤に平行で、星周円盤を包んでいる。DG Tau の周りの弧状の反射星雲も、主星の付近で星周円盤に平行で、星周円盤に接触しているように見える。

星周円盤を包むように見える反射星雲は主星の進化と共にどのように生まれどのように消えて行くのだろうか。標準的シナリオによれば、星周円盤の赤道面近くのエンベロープのなごりは、なかなか原始星の星風に吹き飛ばされずに最後まで残る、或いは広い角度に吹き出す星風によって赤道面に掃きよせられる。この考え方だとエンベロープはいずれは吹き飛ばされて消える。一方最近の理論は磁場に貫かれた分子雲のコアの崩壊の結果として中心原始星の周りに〈擬似円盤〉とよばれる平らな非平衡のエンベロープができることを予言する。星周物質はこの擬似円盤を通して内部の星周降着円盤に達する。実際にエンベロープからの質量降着は HL Tau において観測されている。

T Tau, DG Tau, Z CMa において円盤或いは弧状の構造が、星風によるものか擬似円盤なのかは分からないが、反射星雲が外向きに吹き飛ばされつつあるとは考えにくい。仮に星周円盤への質量降着が進行中であるとして、反射星雲からの自由落下時間を評価すると、T Tau, DG Tau で 1

千から 1 万年、Z CMa では 10 万年となる。これらの数字は反射星雲の有無と主星の年齢から求めた反射星雲の寿命の上限、30 万年と矛盾しない。

反射星雲と遠赤外輻射とが想像以上に良い相関を見せたことから、今後はアイラスデータを指針としてターゲットを選択してゆく予定である。

4. AOC による太陽系外惑星の検出可能性

次に像運動の補正 (イメージスタビライザー) 以上の高次の波面補正を行う AOC による近傍星の周りの木星型惑星の検出可能性について考えてみる。

太陽系外惑星の検出が難しいのは、主星と惑星との明るさの比が大きく、また角距離が小さいからである。可視近赤外域では惑星は主星の光を反射することで輝き、一番大きな木星型惑星でも予想されるフラックス比は 10 億対 1 もある。惑星の明るさと角距離の大きさから近傍の非常に明るい星が、系外惑星探しのターゲットとなる。主星は 4 等級より明るく、惑星の角距離は 2 秒角より小さい。イメージスタビライザーとコロナグラフを組み合わせただけでは、焦点面マスクの大きさから、コントラストからも、太刀打ちできない。

波面補正は、大気の揺らぎの影響を受けたガイド星の波面を検出し、能動的に制御された形状が可変の鏡を使ってリアルタイムで波面の歪みを補正し、ガイド星とその周辺に対し、望遠鏡の回折限界の分解能でイメージングを行う技術である。明るいガイド星の必要性と補正可能な視野の小ささが波面補正の限界だが、こと惑星探しに関しては、二つとも問題にならない。主星はガイド星として十二分に明るく、主星と惑星の間の角距離は極めて小さい。波面補正を使った AOC は、二つの点で惑星探索に理想的である。まず、1 秒角より十分小さな焦点面マスクが使える。次に、波面補正は惑星の PSF の回折限界コアを鋭くし、主星の PSF の周辺部を抑えることで、惑星と背景とのコ

ントラストを増す。このように波面補正を使った AOC が惑星探索に向いていることは定性的にわかるのだが、現実には有用かどうかは、コントラスト、シグナルノイズ比を定量的に求めないとなんとも言えない。

そこで、標準的大気モデル、典型的光学系の損失、木星型惑星の大きさや反射率を仮定し、波面補正の程度、望遠鏡の口径、観測波長、焦点面マスクの大きさや減衰パターンなどのパラメータを変えて、シミュレーションを行い、主星と惑星の PSF を求め、シグナルノイズ比を具体的に計算してみる。

入射波面の揺らぎは、標準的モデル（コルモゴロフスペクトラム）に従うとして、位相を望遠鏡の主鏡面上で定義される直交関数系（ツェルニケ多項式）に展開して、展開係数を位相が揺らぎのモデルに従うような乱数として発生させる。乱数の代わりに、展開係数を低次の方からゼロにしていくことが、波面補正に相当する。波面補正は、現在の技術で十分達成可能な程度のものである。惑星は暗いので光学系の効率も問題となる。光学系の効率は、再結像光学系(reimaging optics)が、コロナグラフと波面補正のために最低二ついることから、20パーセント程度となる。計算結果をまとめてみると、

1) 惑星の PSF の回折限界のコアは大きくなるが、一方主星の PSF の周辺部は、比較的小さくならない。主星の PSF の周辺部を小さくするために、できるだけ大きな焦点面マスクを使う方が有利である。また、焦点面マスクの減衰パターンは、ガウシアンが望ましい。

2) 波面補正の程度と、望遠鏡の口径をバランスして、シグナルノイズ比を最適化する基準が存在する。光子統計と PSF の鋭さの妥協点は、波面補正後の残存位相分散が 1.2 ラジアン二乗となる時である。位相分散がこれより小さければより大きな望遠鏡が使えるが、分散がより大きければ口径を絞る方が有利である。この基準は観測波長

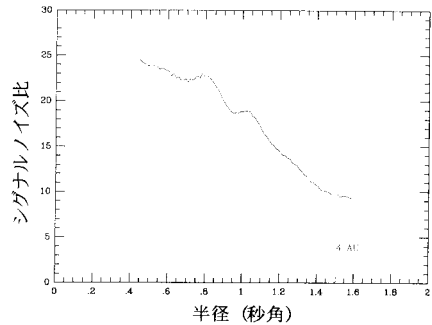


図 2A シリウスの周りの木星型惑星のシグナルノイズ比。積分時間は、1 万秒。

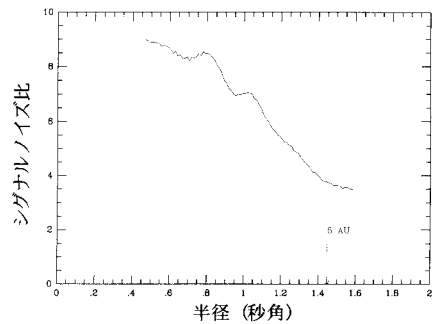


図 2B プロキオンの周りの木星型惑星のシグナルノイズ比。

の選択にも使える。

3) 現在の技術で、アルファケンタウリ、シリウス、プロキオンの周りの木星型惑星の検出が十分可能であろう。望遠鏡の口径を 5.8 m、観測波長を 1.2 ミクロン (J バンド)、観測時間を 1 万秒として、角距離の関数としてのシグナルノイズ比を、シリウスとプロキオンの場合に求めたのが、図 2 である。J バンドを選んだのは、メタンの吸収を避けた意味がある。我々の木星のように主星から、5 AU の所に木星型惑星があるなら、3 時間程の積分で検出できそうである。実際には惑星の軌道運動が見えてくるまでに 10 晩、観測時間は 50 時間以上あるはずで、3 時間という積分時間は控えめである。一方軌道運動は惑星の確認となる。先述の 3 個を含めて 10 個程の近傍星 (表 1) に対し

表1 目標となる近傍星

目標天体	赤道座標	年周視座	分光視差	V	R	I	J	H	K
α Cen	14-60	0.752"	G2V	0.0	-0.5	-0.9	-1.1	-1.4	-1.4
α CMa	06-16	0.375	A1V	-1.5	-1.4	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
α CMi	07+05	0.288	F5V1	0.3	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7
ϵ Eri	03-09	0.303	K2V	3.7	3.0	2.5	2.1	1.6	1.5
γ Cet	01-15	0.275	G8Vp	3.5	2.9	2.5	2.3	2.0	1.9
α Aql	19+18	0.198	A7V	0.8	0.6	0.5	0.2	0.0	-0.0
61 Cyg	04+38	0.296	K5V	5.2	2.96				2.5
GL 411	11+36	0.397	M2V	7.5					3.2
Barnard's star	17+04	0.552	M5V	9.5					4.3
ϵ Ind	21-56	0.291	K5V	4.7					1.9

表1 目標となる近星、星名、赤道座標、年周視差、分光分類、各バンドで等級がリストされている。

で木星型惑星の検出が可能と考えられる。

以上の議論は、安定なシーイングのもとシグナルノイズ比が光子統計で決まるという前提でなされている。実際にはシーイングは長時間観測の間に変化し、それに伴うシステムティックノイズをいかに除くかという問題を現在検討中である。

5. すばる AOC への期待

筆者の偏見によれば、世界の大型望遠鏡のアダプティブオプティクス計画は、レーザーガイド星に目を奪われて、ステラーコロナグラフという最も自然な、自然のガイド星の使い途を見落としているようである。筆者の知る限り AOC に正面から取り組んでいるのは、すばる、欧州南天天文台の VLT、一枚鏡となった MMT、パロマー山の 5m 鏡の四つである。ケック望遠鏡は、分割鏡という特殊性もあり、AOC はまだ本格的に考慮されていない。四つのうちでは 3 年後の稼働を目指したパロマーが一番早いかもしれない。しかし、集光力、分解能、シーイングの点で、すばる、VLT、に劣るパロマーの AOC の目標は、まず近赤外での褐色わい星の探索である。VLT はサイトの問題でいつ稼働するかわからない。MMT のアダプティブオプティクスが最も手がこんでいるが、シーイングでマウナケアに劣る。そこで国立天文台の高見、田村氏を中心とするグループが開発中のすばる用の AOC は、始動の時点で、世界一の性能を持つと予想される。先述の褐色わい星、先主系列星、系外惑星のほか、遠方のベガ型星の星周円盤、クエーサー、活動的銀河核の親銀河など、観測対象

は大きく広がっていくであろう。

参考文献

リオ式コロナグラフ
 Lyot B., 1939, MNRAS 99, 580
 イメージスタビライザーを使ったコロナグラフ
 Golimowski, D. A., Durrance, S. T., Clampin, M., Barkhauser, R. H. 1992, Appl. Opt. 31, 4405
 褐色わい星の探索
 Nakajima T., Durrance S. T., Golimowski D. A., Kulkarni S. R., 1994, ApJ 428, 797
 Golimowski D. A., Nakajima T., Kulkarni S. R., Oppenheimer B. R., 1995, ApJL, in press
 先主系列星のイメージング
 Nakajima T., Golimowski D. A., 1995, AJ 109, 1191
 擬似円盤
 Galli, D., Shu F. H., 1993, ApJ 417, 220, & 243
 HL Tau
 Hayashi M., Ohashi N., Miyama S., 1993, ApJ 418, L 71
 惑星検出可能性
 Nakajima T., 1994, ApJ 425, 348
 Angel R., 1994, Nature 368, 203

Astronomy with stellar coronagraphs

Tadashi NAKAJIMA

Dept. of Astronomy, 105-24, Caltech, Pasadena, CA 91125, USA

e-mail: tn@astro.caltech.edu

Abstract: Stellar coronagraphy is a technique to detect faint astronomical objects or object structure around a very bright star. Recently applicability of stellar coronagraphs has been broadened by their combination with adaptive optics. We introduce our on-going studies of a brown dwarf search around nearby stars and imaging of reflection nebulae around pre-main-sequence stars. We then discuss future detectability of extra-solar planets.