

可視光超補償光学の発展—すばる望遠鏡における直接撮像とTMTの展望



鵜山 太智^{1,2}

〈¹ 国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈² Infrared Processing and Analysis Center/NASA Exoplanet Science Institute, California Institute of Technology, 1200 E California Blvd, 100-22, Pasadena, CA 91125, USA〉

e-mail: tuyama@ipac.caltech.edu

系外惑星の存在を直接画像として観測する直接撮像法は非常にユニークな手法である一方、技術的な難しさが伴う。特に地上望遠鏡においては地球大気の影響による星像の歪みが恒星近くにある非常に暗い惑星のシグナルを隠してしまう。この歪みをリアルタイムで補正する技術、補償光学技術が発展することで系外惑星の直接撮像はこの20年で大きな進歩を遂げてきた。その中でも特に可視光領域は補正が効きづらいが、サイエンスという意味で将来的な第二の地球の直接撮像に繋がる重要な技術である。すばる望遠鏡における補償光学の発展から系外惑星の直接撮像観測、さらにTMT望遠鏡における将来的な系外惑星観測の展望までを今回簡単に紹介する。

1. はじめに

1995年に初めて太陽とは異なる恒星（主系列星）を周回する惑星（太陽系外惑星，系外惑星）が発見 [1]*¹されて以降，現在までに5千を超える系外惑星が確認されている [2]。銀河など他の天文分野と比べて最初の発見が平成時代に入ってからという非常に歴史の浅い観測分野ではあるが，ここから系外惑星の観測は現在にかけて大きく飛躍を遂げてきた。発見された系外惑星の特徴を調べていくと，驚くべきことに太陽系の惑星と大きく異なる性質を持つものが沢山見つかった。例えば，水星より中心の恒星に近い木星型惑星（通称ホットジュピターと呼ばれる）や，公転軌道が大きくひしゃげた楕円になっているもの（エキセントリックプラネットと呼ばれる）などが知られている。これらの惑星系は太陽系と比べて大きく異なっており，どのような惑星形成・進化の

メカニズムを経たのか，太陽系の惑星を調べるだけではわからない。そのため宇宙に広がる様々な惑星系における形成・進化過程を統一的に理解することは未だに現在の系外惑星天文学における大きな科学目標の一つである。さらに天文学の謎だけに留まらない人類としての謎—地球，ひいては地球上の生命は宇宙に唯一のものなのか，それとも普遍的なものなのか—を解き明かすうえで，系外惑星天文学は第二の地球，生命活動の痕跡を観測から探査することでこの人類の謎にアプローチすることが可能だ。

系外惑星の観測はいくつか手法があり，大まかに分けて視線速度，トランジット，マイクロレンズ，直接撮像がある。直接撮像は名前の通り惑星の存在を直接的に画像として検出することを目指す手法であるが，他の観測手法は惑星が存在することによって恒星の観測量に影響を受ける現象に着目した間接的な手法である。これらの観測手法

*¹ この発見論文の著者であるミシェル・マイヨール，ディディエ・ケロー両博士は2019年にノーベル物理学賞を受賞。

それぞれによって感度の高い惑星軌道や質量が異なっているため、相補的に異なる性質の惑星を探索することが可能となっている。

今回はその中でも直接撮像がどのように行われているか、さらに日本が所有する世界有数の大型望遠鏡—すばる望遠鏡—における最新装置における系外惑星の観測成果と、次世代の観測装置を用いた第二の地球探しまでを見据えた展望を紹介しようと思う。

2. 補償光学技術

直接撮像法は恒星と惑星を空間的に分解して惑星の存在を直接画像として得る手法であるが、他の観測手法に比べて1) 暗い惑星を検出できる感度、2) 恒星と惑星を十分に分解できる高空間分解能、が前提として必要になる。高感度・高分解能を満たす望遠鏡は単純に言うところ口径の大きな望遠鏡だ。さらに問題になってくるのが3) 惑星に比べて数万倍以上も明るい恒星の光を効率的に取り除く高コントラスト技術、ここが一番問題になってくる。大口径の望遠鏡となると基本的に地上望遠鏡になるが、地上望遠鏡の観測性能は望遠鏡の性能だけではなく、天気や風などの気象条件にも左右される。この観測条件はフリードパラメータ（フリード長）やシーイングといったものでパラメータ化されている。フリードパラメータとは光の波面位相の乱れが無視できるサイズを指し、観測地点における実質的な空間分解能を決める。例えば、すばる望遠鏡（口径約8.2 m）の位置するマウナケア山頂でも20 cmくらいである。いくら大きな望遠鏡を作れたとしてもこれが小さいと空間分解能は向上せず、星像を取得しても理論上の完璧な性能（回折限界：空間分解能～波長／口径）には遠く及ばない。しかも天候相手なので

逆らいたくても逆らえない。これらの影響で高感度・高分解能も落ちてしまうが、さらに問題なのは高コントラストの部分である。高コントラストを達成するには星の光だけをできるだけ取り除いて惑星の光を効率的に集める必要があるが、数万倍以上の明るさの差があるものをそう簡単に取り除けるわけではない。星像ができるだけ回折限界に近く、シャープな形状をしていれば、そのモデルはある程度簡単に作成できるので効率よく差し引くことができるが、上記の通り地上望遠鏡では大きく星像が歪んでしまう、かつこの歪み方はランダムでありモデル化が非常に難しい。

この大気の揺らぎに対処する手法として現在最も有効なのが補償光学（Adaptive Optics; AO）という技術である。歴史を紐解くと、補償光学のコンセプトは1953年に提唱され [3]、その後は軍事的な目的のために開発されていたが1990年代から天文観測に応用され発展を進めてきた。今回は補償光学を用いた系外惑星の直接撮像に焦点を置いているので、補償光学自体の細かい説明^{*2}は割愛するが、流れとしては大きく分けて1) 参照星の波面センシング、2) 可変鏡（deformable mirror; DM）を用いた波面補正、の2段階があり、それぞれにおいて専用の装置が準備されている。大気の変動というのはミリ秒単位という非常に短いタイムスケールであり、星像への影響も同じように非常に速いスケールで受けてしまう。この変動を高精度に補正する必要があるため、大型望遠鏡の補償光学観測では観測中に補償光学専門のサポートアストロノマーに協力してもらい^{*3}、星像の補正をかけてもらう必要がある。

ちなみに、補償光学技術は現在天体望遠鏡だけでなく、顕微鏡の技術開発や眼科治療に応用され始めている。一見役に立たないと言われる基礎研

^{*2} 詳細はすばる望遠鏡の補償光学ページを参照 [4].

^{*3} ある程度補正をかけるのであればオートメーションで補償光学を行うことも可能であり、Robo-AOを搭載している望遠鏡もある [5].

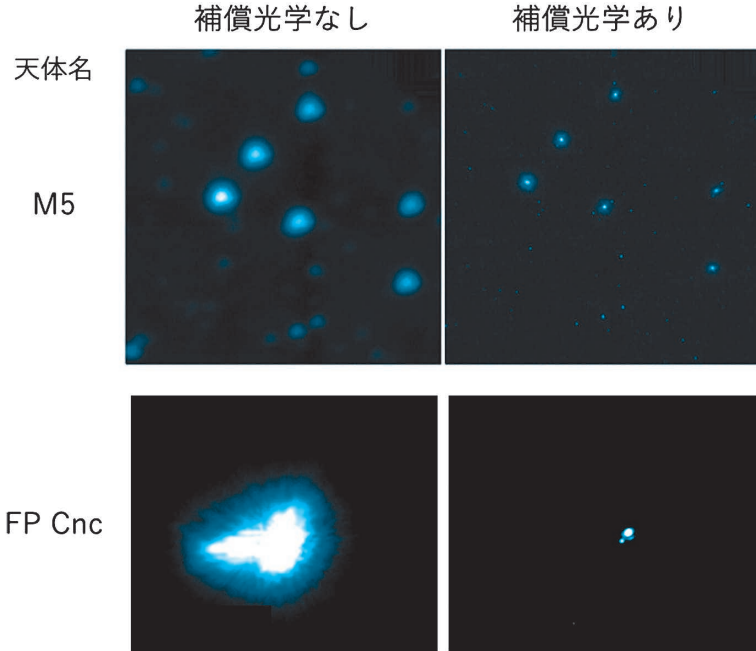


図1 同じ天体において補償光学装置を使用した画像（左）と使用していない画像（右）を比較したもの。補償光学を使っていない画像では星像がぼやけている一方で、補償光学を使用すると像が非常にシャープになっていることが確認できる。空間分解能が上がり、より暗い天体にも感度が高くなる。さらにシャープになることで星の近傍に何か天体がある際に検出が容易になる。右下図において、主星（FP Cnc）の左下部分に小さく点源が見えているが、こちらは補償光学なしでは存在がわからなかった伴星である。

究である天文学の中で使われ発展してきた技術が全く異なる分野、特に実生活に関わるところで利用されるようになってきているという例の一つとして挙げておきたい。

3. 直接撮像法

3.1 データ解析手法

さて系外惑星の直接撮像に話を戻し、まずデータ解析がどのように行われるかを紹介しようと思う。系外惑星は星に比べて非常に暗いため、補償光学装置を用いてできるだけ星像を回折限界に近づけるだけでは検出は難しい。補償光学を用いた上でコロナグラフを組み合わせて星の光を極力抑え、さらに星の光を差し引く解析を行い、惑星のシグナルを探す必要がある。この時に利用する解析手法を差分撮像（differential imaging）と呼び、平たく言うと惑星以外のシグナルを参照星像とし

て取り出し、元の観測データから差し引くことで惑星のみのシグナルを取り出すことを指す。差分撮像もいくつか手法があり angular differential imaging (ADI), spectral differential imaging (SDI), polarization differential imaging (PDI), reference-star differential imaging (RDI) など多岐にわたる。特に利用されているのがADI [6]（図2参照）であり、簡単に説明すると、これは視野回転を利用して参照星像を作成している。星を中心に視野を回転させると、直接撮像探査においてノイズとなる中心星の星像や装置由来の模様（スペックル）がこの視野の角度にかかわらず（原理的には）一定である一方で、惑星など周囲に天体が存在していれば回転する。この視野回転を無視して重ね合わせると回転している成分の惑星シグナルは消える一方で、ノイズ源のシグナルだけが残るため、参照星像として利用できる。こ

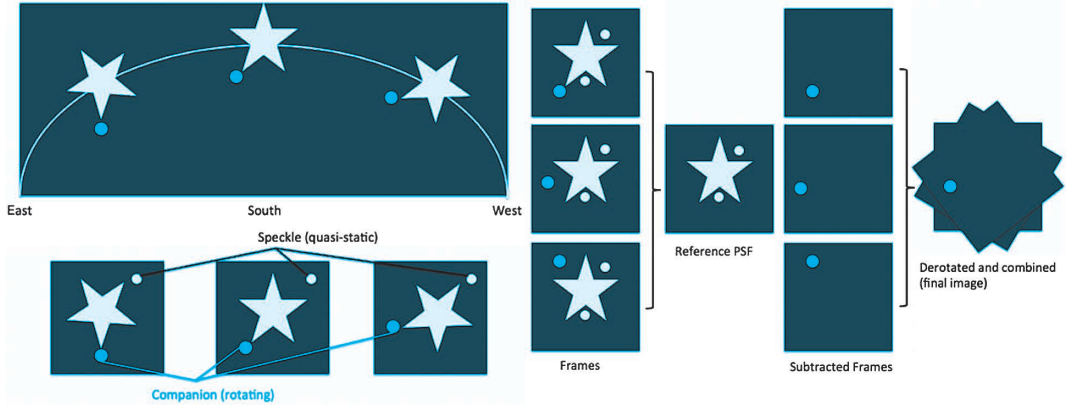


図2 ADIを利用した観測（左図），解析行程（右図）を簡略化したもの．惑星以外のシグナルは基本的に視野回転に関わらず一定であるが，惑星シグナルは視野に合わせて回転している．この視野回転を重ね合わせると惑星シグナルが消えて参照用の星像（reference point spread function; reference PSF）を作成できるので，元のデータからこれを差し引くことで惑星のみのシグナルを取り出すことができる．最終的に視野回転部分を調整して惑星のシグナルをより強くなるように重ね合わせることで，直接撮像が可能となる．

れを得られた観測データから差し引くと，惑星のシグナルだけが残るので，最後に各データの回転角を補正して重ね合わせれば惑星のシグナルを高い精度で引き出すことが可能となる．他の差分撮像もこういった装置由来のノイズと実際に存在する天体の特性の違いを利用して参照星像を差し引くことで，惑星など得たいものを探することができるようになる．また系外惑星や伴星だけでなく，原始惑星系円盤やデブリ円盤など，星の周囲にある構造の観測にも利用される．実際の差分撮像の解析では，どのように参照星像を作るかでまた結果が変わってくる．基本的には統計的にもっともらしくなるように次元削減（例えば主成分解析— principal component analysis; PCAなどを利用）[7]するのだが，ノイズ源の多い主星近くを強く差し引きするような設定にすると実際に惑星などのリアルなシグナルが存在した時に，そのシグナル自身が差引かれてしまうケースが生じる．そのため，できるだけ惑星のシグナルを減らさない，かつノイズを減らすような設定を見つける必要があるのだが，観測条件が毎回異なるうえ，補償光学がある程度効いていると言ってもランダムな歪みはどうしても残ってしまう．それゆえに観

測データごとにこの設定パラメータをマニュアルで調べてちょうどよいものを見つけられないといけない．将来的にディープラーニングなどで人の手で調べる労力が減らせればいいのだが，まだパイプラインに使えるほどのものは確立されていない．そのため，現状の解析はどうしても専門的な知識と経験のある人にある程度限られてしまっている．

こういった細かい解析を行うことでようやく惑星のシグナルを見つけることができる．さらにここから測光や分光（面分光装置など，スペクトル情報を取り出せる場合）を組み合わせると系外惑星の色（波長ごとの明るさの差）などを惑星大気モデルや惑星進化モデルと比較することで，惑星の質量や温度，大気がどのような性質を持っているかを調べることが可能となる．ここで，特に進化モデルと比較する際には年齢が重要となってくるのだが，いかんせんこの年齢の同定が難しい．基本的に惑星は中心の恒星と同じ年齢と仮定しているが，ある1つの恒星の年齢を観測からきちんと調べることは難しい．若い星であれば星形成領域や星団に属していることが多く，その統計的な年齢から推測することが可能であるが，もしそういった若い星の集まりに属していない天体になる

と自転や活動度，さらには恒星スペクトルの細かい議論を経て年齢を推定する必要がある．しかしそうやって年齢を推定してモデルと比較しても観測と完全に整合する結果が得られることは少ない．そもそも，このモデルもきちんと較正されていないのである．なぜかという点，若い系外惑星はほとんど見つかっておらず，形成・進化のメカニズムが分かっていないから進化モデルは理論予測のままだからである．

3.2 直接撮像のメリットと課題

検出数の多い視線速度法やトランジット法では若い恒星をターゲットとすると恒星由来のノイズが惑星の存在を隠してしまい，若い系外惑星の観測には原理的に向いていない．一方で，直接撮像は若い天体の方が形成後のエネルギーが残っていて高温なため，歳をとった天体よりも検出しやすいという特徴がある．つまり直接撮像が惑星形成・進化のメカニズムを理解するために有用な手法の一つであるが，現在までに直接撮像で検出された惑星程度（約20木星質量以下）の天体は20程度と非常に少なく，一つの理由として補償光学で得られるコントラストでは惑星を検出するレベルまで到達できていないという技術的な問題がある．例えば，2010年前後に開発されたすばる望遠鏡の補償光学装置AO188を用いて，開始からトータル5年以上，120夜をかけた大規模な直接撮像探査（SEEDSプログラム）[8]が進められていた．筆者も修士課程の頃から一部この観測サーベイに関わっており，特に年齢1000万年以下で惑星の材料となる原始惑星系円盤がまだ存在している（1000万年以降になるとほとんど無くなる）非常に若い天体をターゲットとした全データ（延べ約100天体）を解析した．原始惑星系円盤を持つような若い天体はインパクトは大きいものの，補償光学という点で若い星は

比較的暗い天体（＝波面センシング，補償光学の効きづらい天体）であり，当時はターゲットとしての優先度が高くなかったため，本研究が世界初の非常に若い天体をターゲットとした直接撮像による大規模系外惑星探査 [9] であったが，結果として新たな惑星を発見することはできなかったのである．検出できなかったという結果から検出限界を計算し，惑星の存在頻度に制限をかけることができた点において，直接撮像観測的な成果は得られたが，各々の星系において惑星があるのかわるのかを結論づけるには感度が不十分であるという印象は否めなかった．一方で，SEEDSプログラムを通して惑星形成を示唆するような様々な原始惑星系円盤の構造が新たに発見されており [10-12]，円盤観測分野はSEEDSプロジェクトを経て大きく進歩を遂げた*4．

検出数の増加と天体の特性を詳細に調べることは惑星形成・進化論を発展させるうえで喫緊の課題であり，検出数を増やすためには観測性能を上げる，つまり補償光学装置の技術的向上が必須である（次章に続く）．

4. 現在の超補償光学観測

4.1 補償光学から超補償光学へ

系外惑星の直接撮像には観測中における補償光学技術と観測後のデータ解析における差分撮像それぞれが重要であると説明してきたが，それぞれにおいてテクニカルな面で開発当初に比べて発展してきている．特に補償光学は2010年代後半に大きな発展を遂げており，現在それらを総称して超補償光学（Extreme AO; ExAO）[13-15] と呼ばれている．具体的には高精度な波面センシングを可能にするアルゴリズムや可変鏡の高細分化によるハードウェアの発展などがある．これらによってより回折限界に近い星像への復元が可能と

*4 原始惑星系円盤と言えばALMA望遠鏡による観測成果が華々しいが，すばる望遠鏡のような可視光近赤外望遠鏡による観測とは円盤の見えるところが少し異なっている．またALMAで系外惑星を直接観測するのは非現実的である．

なるだけでなく、今まで補償光学が効かなかった暗い天体や、波長のバリエーションを増やすことに成功している。またコロナグラフも発展しており、より小さいサイズで効率よく星の光を抑えることができるようになってきている。マスクのサイズが小さいほどより中心星の近くを探索できるが、中心星に近いほどノイズが大きくなるのでコロナグラフの技術的な進歩も重要である。

実際にどれほど直接撮像の性能が向上したのか、一つの天体に絞って比較してみようと思う。ぎょしゃ座AB星 (AB Aur) という非常に若い天体は、主星が太陽よりも重くハービッグ型 Ae/Be星と分類されるものの一つである。この天体の周囲には星周構造 (原始惑星系円盤やさらに大規模なエンベロープ構造) が見えていることがハッブル望遠鏡の観測から知られており [16], 星形成や原始惑星系円盤進化, さらには惑星形成

を調べる上で有名なターゲットであった。すばる望遠鏡においても補償光学観測の始まった頃から現在にかけて AB Aur は 15 年以上も観測され続けてきており, 図 3 は各補償光学装置において得られた AB Aur の観測成果の変遷を辿っている。補償光学 (+コロナグラフ) 観測の始まった当時に使用されていた CIAO+AO36 (CIAO がコロナグラフ観測装置, AO36 が補償光学装置と分かれており, 36 という数字が可変鏡におけるアクチュエーターの数を指す) では基本的に 150 au (au: 地球と太陽の距離) より外側の大きなスパイラル構造 [17] しか確認されていなかった。その後 SEEDS プログラムにおいて使用された HiCIAO+AO188 では 100 au 以内の複雑な構造が判明 [10] し, 惑星形成の現場観測がより期待されるようになったが, こちらでも惑星の存在は確認されなかった。そして現在, 最新の観測装置 CHARIS+SCExAO

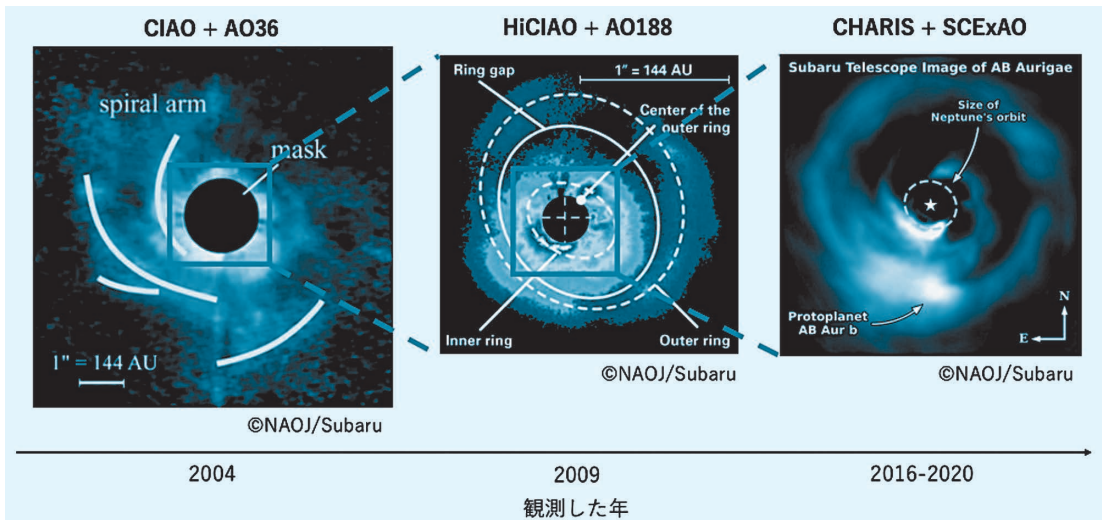


図3 ぎょしゃ座AB星 (AB Aur) と呼ばれる若い星の周囲を取り巻く原始惑星系円盤をすばる望遠鏡の補償光学装置で観測した成果を示したもの。初期の補償光学装置CIAO+AO36を用いて2004年に観測された際(左図) [17] は, 1秒角(この天体では約150 au=150天文単位=地球と太陽の距離の150倍に相当)より内側はマスクされており, より外側の大きなスパイラル構造しか見えていなかった。アップグレードされたHiCIAO+AO188を用いて観測された2009年(中心図) [10] ではCIAOで見えていなかったリング(約150 au, 45 au)などの円盤構造が判明するようになった。2016年から2020年にかけて最新の観測装置CHARIS+SCExAOを用いた観測(右図) [18] では, さらに内側, 海王星軌道と同じ領域(約30 au)まで調べることができ, ついに形成中の原始惑星AB Aur bの存在が直接的に明らかとなった。それぞれの画像はすばる望遠鏡プレスリリースより引用 [21-23].

SCEXAOによってついに原始惑星系円盤内に埋もれていた形成中の惑星 (AB Aur b) を検出することに成功した [18]. 形成中の惑星の存在を確認できた例はまだほとんどなく (他に PDS 70bc という惑星が報告されている [19, 20]), 超補償光学の発展によって今後このような原始惑星系円盤に埋もれた形成中の原始惑星が発見されることが期待されている。

4.2 SCEXAO を用いた可視光超補償光学

補償光学は星像をどれくらい回折限界に復元できるかが一つの目安となるが, 回折限界パターンは波長が短いほどシャープになる (空間分解能 $\sim \lambda/D$; λ : 波長, D : 望遠鏡の口径) ため, 波長が長い方が補償光学の効きが弱くても復元率が高かった. そのため補償光学観測は主に近赤外線 (1–3.5 μm)^{*5} で発展してきたが, 補償光学技術の発展によってより短い波長: 可視光領域 (>500 nm) において補償光学, つまり直接撮像が可能となってきた. 可視光で観測するメリットの一つとして $\text{H}\alpha$ 輝線 (波長: 656.3 nm) の直接撮像がある. 現在直接撮像可能な木星型惑星の主成分は水素であり, 形成過程において原始惑星系円盤から大量の水素が形成中の惑星に降り注ぐ. その活発な降着過程において惑星上部でショックが形成され, このショックによって水素のエネルギー準位が励起, 最終的にその励起したエネルギーが下がる際に水素輝線が放出されると考えられている. つまり, 水素輝線を観測することで今まで謎であった惑星形成過程の直接的な現象を調べることができる. 水素輝線はエネルギー準位によって様々な種類があるが, 現在観測可能なものの中で最も明るいものは $\text{H}\alpha$ 輝線であり, 最も詳細な観測を進めるのに有用だと考えられている [24].

すばる望遠鏡では VAMPIRES という可視光用

の観測装置が超補償光学装置 SCEXAO に取り付けられており^{*6}, 現在北半球において唯一 $\text{H}\alpha$ を用いた高コントラスト観測, 系外惑星の直接撮像が可能な装置である [26]. 筆者がデータ解析パイプラインを開発したので裏話にはなるが, VAMPIRES は様々な観測モードを搭載しており, 試験観測を始めた当初の装置チームはきちんと装置を運用できるかどうか注力しておりデータ解析を主導する人がいなかった. 当時筆者は博士課程の学生であったのだが, 新しい観測モードで色々楽しめそうという軽い気持ちで VAMPIRES チームに $\text{H}\alpha$ 用の解析パイプライン作るよと言い, 実際にすばる望遠鏡やシドニー大学に滞在してパイプライン開発を進めるようになった. ただ蓋を開けてみると試験観測データには解析に必要な観測パラメータなどの詳細な情報が全く記録されておらず, 唯一記録されていた時間だけを頼りに必要なパラメータをすべて自分で計算する羽目になった. さらに装置チームすら把握していないデータ上のオフセットのパラメータを試験観測データから導出したり, データ解析した結果を確認したら装置内部に不備が見つかって修理待ちで1年ほど遅れるなど, パイプライン開発だけでも色々トラブルが続きまどっていた. そしてようやく一通り解決してパイプラインを作成完了させたところ, 幸運にも上記の形成中の惑星 AB Aur b における $\text{H}\alpha$ 輝線を発見することができた. $\text{H}\alpha$ 観測の最初の科学成果が Nature Astronomy で公開された論文 [18] と非常にインパクトのある成果となり, 大きく貢献できたことで報われたと思う傍ら (筆頭著者ではないが, $\text{H}\alpha$ に関しては第一発見者である一図4参照), VAMPIRES を使った観測でもっと新しい観測を行っていかうというモチベーションもふつふつと湧いてきたのである.

^{*5} これより長い波長でも原理上補償光学はよく効くが, 地球大気による熱雑音が見えやすくなるため波面センシングが使えなくなる.

^{*6} CHARIS は赤外線用の観測装置で, VAMPIRES と同時に使用可能である. 詳細は装置ページ参照 [25].

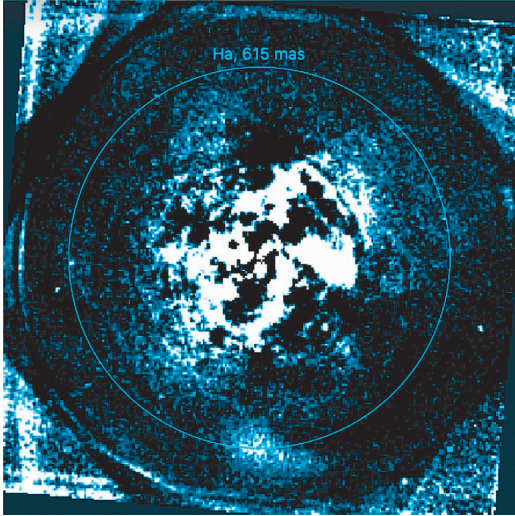


図4 筆者がVAMPIRESのAB Aurデータを解析し、形成中の惑星AB Aur bと同じ位置に初めてH α （真ん中下のぼんやりした構造，c.f. 図3）を発見したときのもの。この画像は急いで結果を確認する用に細かいパラメータの調整をせずに解析したもので論文で公開された画像よりは質が粗いが、それでも明らかなH α シグナルが確認できた。

VAMPIRESでは高コントラストだけでなく、H α 輝線における高空間分解観測や偏光観測、さらには開口マスクング干渉法を利用した回折限界を超えた高空間分解能を持った観測などを可能とする。また将来的な面分光（2次元画像+波長方向にも分解した観測）や、可視光領域の高分散分光などの装置アップデートも議論している。すばる望遠鏡の補償光学アップデートも相まって（より細かい可変鏡AO3000や近赤外波面センシングなど [27]）、今後さらなる観測成果を生み出すことが十二分に期待できる。装置チームも系外惑星以外の分野における使用機会を探っているのも、もしVAMPIRESに興味を持った際にはぜひとも装置チームを交えて観測可能性について議論できたらと思う。

5. 次世代望遠鏡TMTの展望

すばる望遠鏡は2022年現在においては可視光・近赤外の地上望遠鏡において世界最大級の口径を誇っているが、木星型惑星より遥かに小さく暗い地球型惑星を直接検出するには感度が足りていない。想像するのは難しいかもしれないが、これを簡単に言い換えると、すばる望遠鏡だと口径が小さくて地球型惑星を直接撮像できる見込みがほとんどないのである。地球型惑星のようなより暗く小さい天体まで感度が届くようになれば、惑星形成過程の理解はさらに深まることが可能となるが、天文学／系外惑星科学に対するインパクトはそれだけではない。第二の地球、地球外生命を探すうえで地球型惑星の直接撮像は大きな役割を担うことになる。そこで天文学者達はかねてから、次世代超大型望遠鏡の準備に取り掛かってきた。すばる望遠鏡の近くに建設される予定の30 m超大型望遠鏡TMT (Thirty Meter Telescope)^{*7}もそのうちの一つである。

第二の地球の定義というのはまだはっきりしたものはないが、まずは地球型惑星において液体の水や大気中の酸素やオゾンなど、生命の兆候を示すもの（バイオシグナチャー）を見つけることが最優先である。最終的には地表の光合成を示唆するスペクトル上のレッドエッジ [28] まで検出できれば地球外生命への期待は大きく膨らむ。ただここで大事になってくるのが、大気情報はトランジット法における透過分光 [29] などで調べることができるが、地表の情報は反射光を調べないといけない。そこで次世代望遠鏡を用いた系外惑星からの反射光の直接撮像が期待されているのである。

しかし地上で観測するとなると大気の問題はどうしても避けられず、直接撮像を進めるためには超大型望遠鏡の性能をフルに発揮するための補償

^{*7} TMT望遠鏡の詳細は国立天文台TMTプロジェクト参照 [30].

光学技術も必須になってくる。そこで大事になってくるのがすばる望遠鏡をはじめとする現存する超補償光学装置である。これらの技術がそのままTMT望遠鏡における補償光学装置に適用されるため、ある意味で現在の超補償光学観測は将来的な第二の地球の直接観測に向けたパイロットプログラムなのである。系外惑星が1995年に発見されるまで太陽系の外の惑星はサイエンスフィクション(SF)であったが、そこから一つの系外惑星の発見で突如として科学議論の主要分野の一つとなった。次は補償光学と大型望遠鏡の発展を経て、地球外生命がSFから科学の対象となっていくことを期待したい。

6. 終わりに

ここまで説明してきた中で、じゃあ宇宙空間で観測すれば地球大気の影響を無視できるのではないかと考えた人もいるかと思う。大正解である。極端な言い方になるが、観測は地上で進める必要はほとんどのケースでない、むしろ宇宙空間で観測できる方が同じ観測装置を使っても地球大気の影響を受けなくなる^{*8}ため得られる情報は格段によくなる。天候に左右されることもなくなるので確実によいデータが取れる。しかし、コンセプトはよくてもそれを技術的・資金的なところを加味したうえで実現できるかはまた別問題であり、実現できる目処が立ったとしても準備に相当な時間・労力もかかる。さらに現在運用されている宇宙望遠鏡のハッブル望遠鏡やジェームズウェッブ望遠鏡は数多くの天文・宇宙物理分野の人たちがこぞって使おうとしているため非常に倍率が高く、簡単には観測枠を得ることができない。なので、地上でできる観測はできるだけ地上で進めて、宇宙空間でしかできないものを宇宙望遠鏡に観測提案を出すという流れが一般的であ

る。とはいえさらに次世代、2040年以降を見据えた観測装置計画は宇宙空間での観測を前提に考えているものが多く、TMT以上の観測成果が期待されるだろう。個人的にもまだまだ終わることのない分野で最先端の観測成果に携われるように精進しつつ、第二の地球の検出に向けて研究道中を楽しめたらと思っている。

謝辞

本稿におけるVAMPIRESのH α 高コントラスト観測については投稿論文 [26] に詳細を述べてあるのでそちらをご覧ください。実際の観測成果に関しては別の投稿論文 [18, 31] をご覧ください。この原稿を作るにあたって、すばる望遠鏡を用いた系外惑星の直接撮像に触れるきっかけとなった田村元秀様、大学院時代にデータ解析のいろはを教えていただいた葛原昌幸様、解析パイプラインの作成の際に協力していただいたSCExAO/VAMPIRESチームの皆様はじめ、様々な共同研究者からの支援や日本学術振興会からの研究補助によって成り立っております。この場をお借りして感謝申し上げます。加えて、編集委員である福井暁彦様には今回執筆の機会をいただき感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Mayor, M., & Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
- [2] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (2023.2.17)
- [3] Babcock, H. W., 1953, PASP, 65, 229
- [4] <https://subarutelescope.org/jp/about/instrument/ao36/index.html> (2023.2.17)
- [5] <https://www2.ifa.hawaii.edu/Robo-AO/> (2023.2.17)
- [6] Marois, C., et al., 2006, ApJ, 641, 556
- [7] Soummer, R., et al., 2012, ApJ, 755, L28
- [8] Tamura, M., 2009, Am. Inst. Phys. Conf. Ser., 1158, 11
- [9] Uyama, T., et al., 2017, AJ, 153, 106
- [10] Hashimoto, J., et al., 2011, ApJ, 729, L17
- [11] Hashimoto, J., et al., 2012, ApJ, 758, L19

^{*8} 宇宙空間だからと言って常に完璧な回折限界の星像を得られるわけではなく、波面センシングなどの補償光学技術は引き続き使用される。

[12] Muto, T., et al., 2012, ApJ, 748, L22
 [13] Macintosh, B. A., et al., 2008, Soc. Photo-Opt. Inst. Eng (SPIE) Conf. Ser., 7015, 701518
 [14] Beuzit, J.-L., et al., 2008, Soc. Photo-Opt. Inst. Eng. (SPIE) Conf. Ser., 7014, 701418
 [15] Guyon, O., et al., 2010, Soc. Photo-Opt. Inst. Eng. (SPIE) Conf. Ser., 7736, 773624
 [16] Grady, C. A., et al., 1999, ApJ, 523, L151
 [17] Fukagawa, M., et al., 2004, ApJ, 605, L53
 [18] Currie, T., et al., 2022, Nat. Astron. 6, 751
 [19] Keppler, M., et al., 2018, A&A, 617, A44
 [20] Haffert, S. Y., et al., 2019, Nat. As-tron., 3, 749
 [21] <https://subarutelescope.org/en/gallery/pressrelease/2004/04/18/2154.html> (2023.2.17)
 [22] <https://subarutelescope.org/en/gallery/pressrelease/2011/02/17/2120.html> (2023.2.17)
 [23] <https://subarutelescope.org/en/results/2022/04/04/3039.html> (2023.2.17)
 [24] Aoyama, Y., et al., 2018, ApJ, 866, 84
 [25] <https://www.naoj.org/Projects/SCEXAO/scexaoWEB/000home.web/indexm.html> (2023.2.17)
 [26] Uyama, T., et al., 2020, J. Astron. Telesc., Inst., Syst., 6, 045004
 [27] Lozi, J., et al., 2022, Soc. Photo-Opt. Inst. Eng. (SPIE) Conf. Ser., 12185, 1218533
 [28] <https://astro-dic.jp/biosignature/> (2023.2.17)
 [29] <https://astro-dic.jp/transmission-spectrum/> (2023.2.17)
 [30] <https://tmt.nao.ac.jp/about/science.html> (2023.2.17)
 [31] Uyama, T., et al., 2022, AJ, 163, 268

High-Contrast Imaging of Exoplanets with Extreme-AO at Optical WaveLengths at the Subaru Telescope, and Prospects for TMT

Taichi UYAMA

*National Astronomical Observatory of Japan, Division of Theoretical Astronomy 2-21-1 Osawa Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan
 Infrared Processing and Analysis Center/NASA Exoplanet Science Institute, California Institute of Technology
 1200 E California Blvd, 100-22, Pasadena, CA 91125, USA*

Abstract: High-contrast imaging of exoplanets provides very useful information on planet formation and evolution mechanisms. With ground-based telescopes, adaptive optics (AO) is the most important to achieve high contrast enough to detect exoplanets. The Subaru telescope has been developing the AO facility and the latest instrument, SCEXAO, provides the diffraction-limited quality of the PSF at optical wavelengths, providing unique opportunities to search for H α emissions from protoplanets. The development at SCEXAO will also play a pathfinder role for future high-contrast explorations for the Second Earth in the era of TMT.