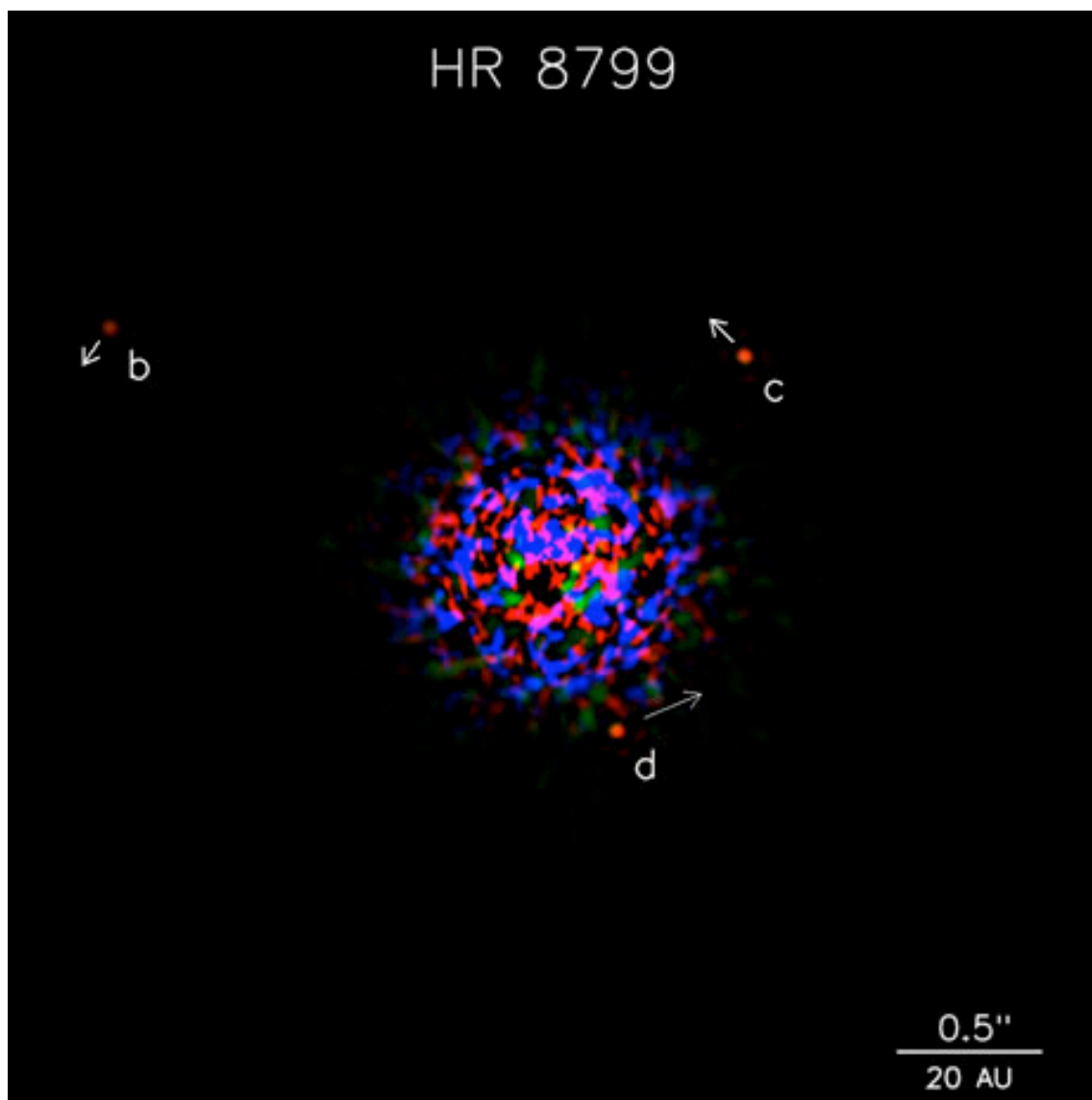


宇宙の観測と技術

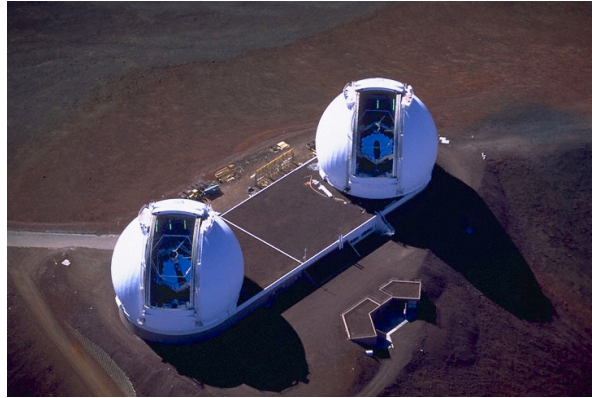
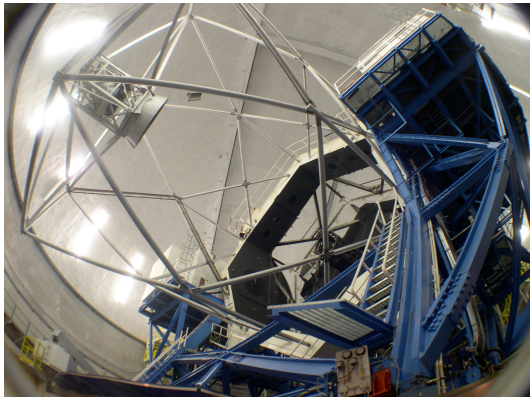
第12章 系外惑星は いかに撮影されたか

3 2. 系外惑星の撮影成功！

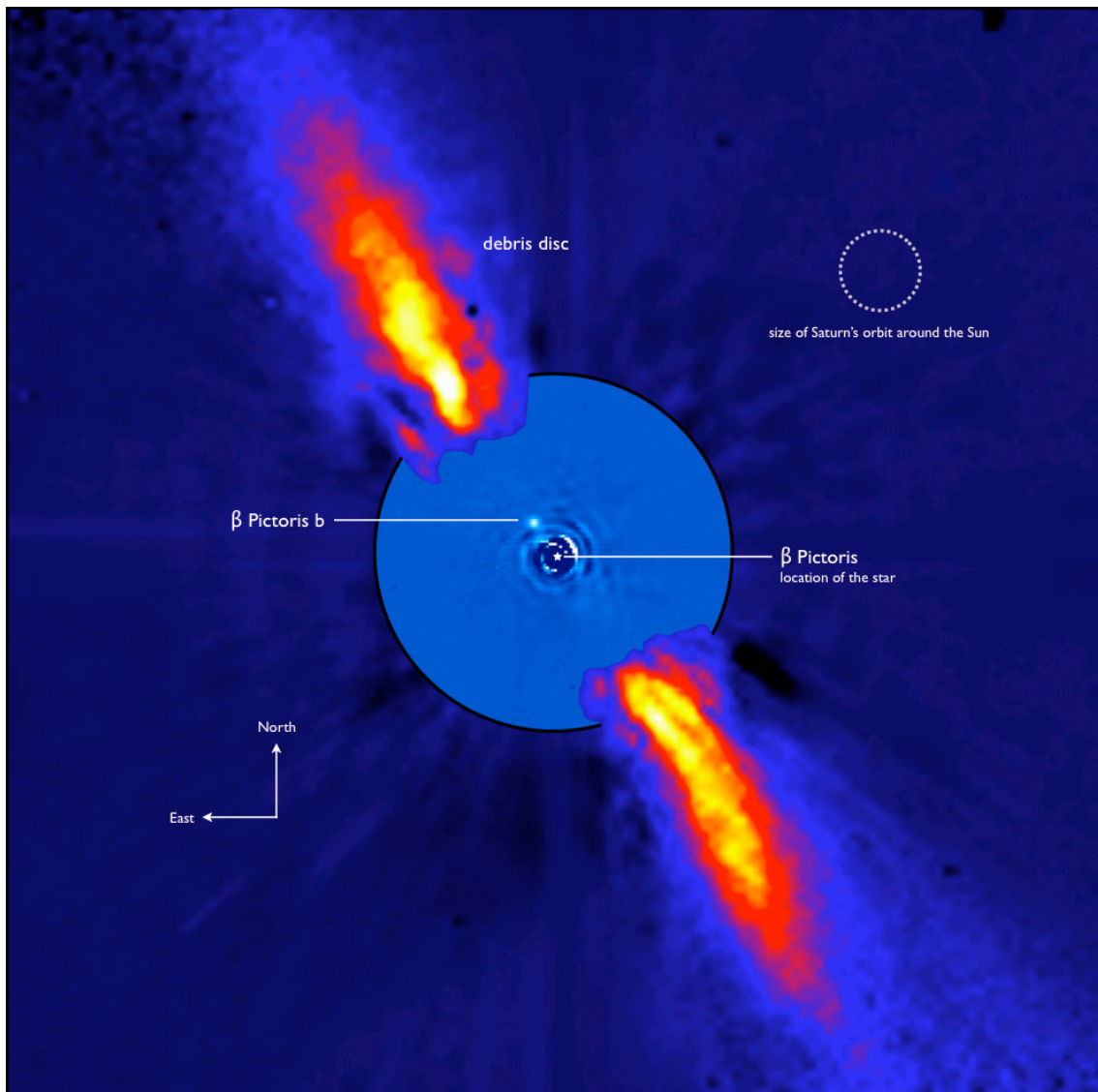
2008 年 11 月、太陽以外の星が持つ惑星－系外惑星－の撮影に成功したというニュースが世間を賑わした。成功したのは Gemini 望遠鏡と Keck 望遠鏡を使用したカナダ・アメリカのチーム。そして VLT を使用したヨーロッパ南天天文台のチームである。彼らは、それぞれに独自の方法を考案して、この快挙を成し遂げた。その成功の裏には日本では全くノーマークの方向性が違うアイデアがあった。世界初の系外惑星撮影はどうして成功に至ったのか、その方法論に迫る。



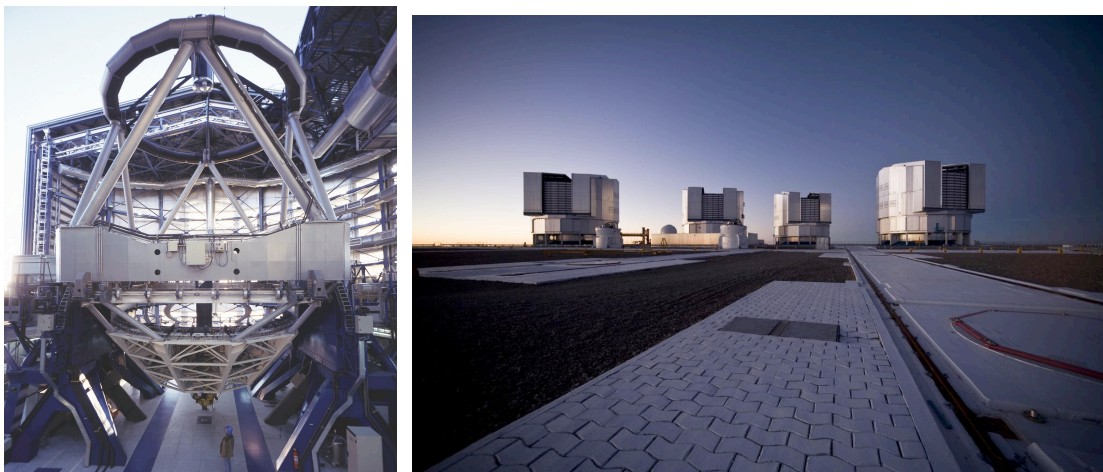
Keck 望遠鏡で撮影された HR 8799 の 3 惑星 (b, c, d)



Keck 望遠鏡（10m）と天文台全景



VLT で撮影された、がが座ベータ星の惑星と惑星系円盤（塵のあつまり）



VLT と天文台全景

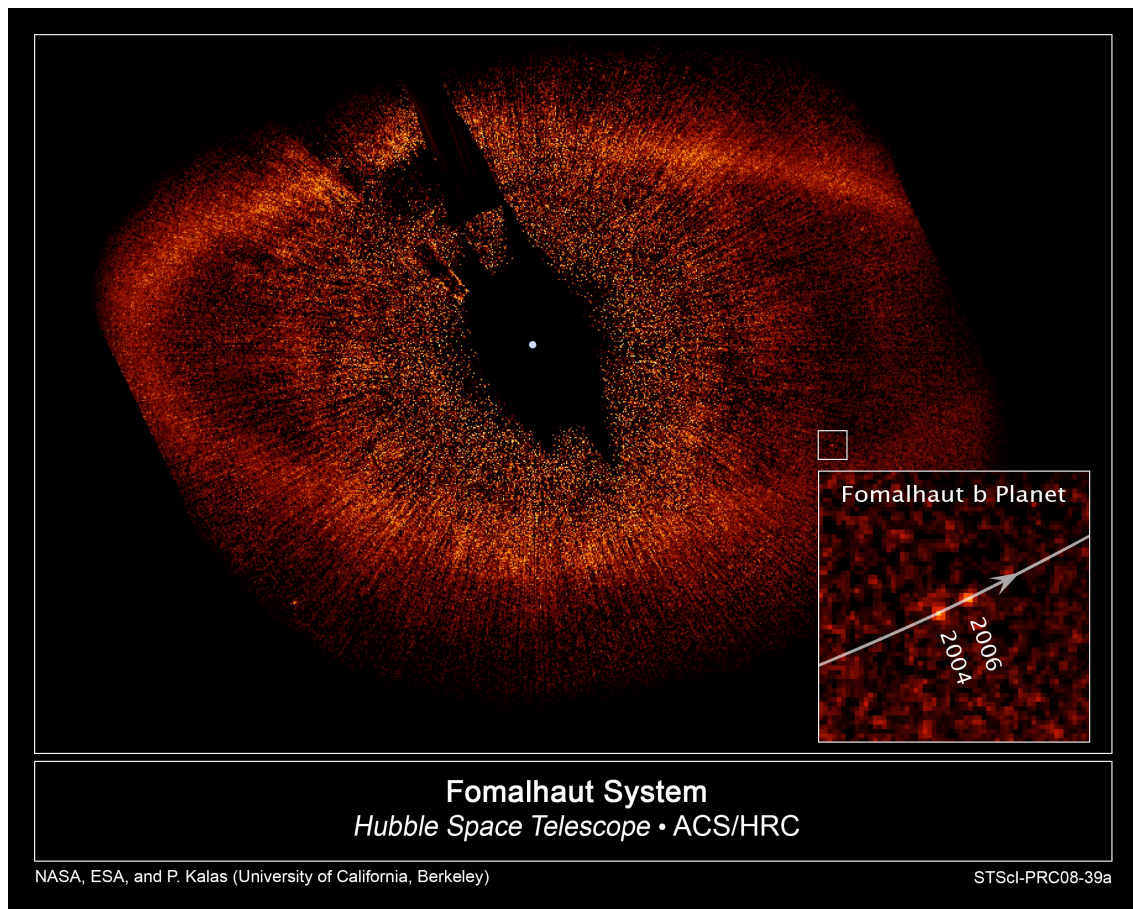
3 2 - 1. 系外惑星の撮影に必要なこと

夜空の星の中には大小の恒星が互いの重力で引かれ合って、明るい方の恒星の周りを暗い方の恒星が回って見える（正確には共通重心の周りをお互いに回る）連星系が数多くある。観測技術が進み、明るい方の主星に対して、より暗く、より近くを回っているものが撮影できるようになってきた。その技術発展の延長上に、惜しくも恒星になりきれなかった褐色矮星や今回の系外惑星の撮影がある。系外惑星は自分で光を殆ど出さない。しかも連星系の伴星や褐色矮星より、さらに小さく、連星系の伴星よりも主星（中心星）に近いところに位置する可能性が高い。この小さい天体による中心星の反射光（または温度の低い熱放射）を捉える必要がある。接近した二つの物体を見分ける高い分解能と同時に、まばゆい光源の近くにある非常に暗い光源を見つける技術が要求される。一般に中心星と最大クラスの惑星（木星の10倍程度、それ以上の質量を持つ天体は褐色矮星に分類される）との明るさの比は、可視光（波長 $1\mu\text{m}$ 弱）で9～10桁、近赤外線（波長 $2\mu\text{m}$ ）で6～7桁の隔たりがある。

3 2 - 2. 解像度を上げる

接近した二つの物体を見分ける性能（分解能）を上げるためには、まず望遠鏡の口径を大きくすることである。ところが地球には大気があり、そこを星の光が通ると、空気の屈折率の不均一さによって光の波（波面）が乱されてしまう。波面が乱された星の光は望遠鏡で像を結ばせてもピントがぼけたように滲んでしまい、口径に見合った解像度を発揮できない。大気の影響を完全に避け

るには100倍のお金をかけて望遠鏡を宇宙空間に打ち上げるしかない。

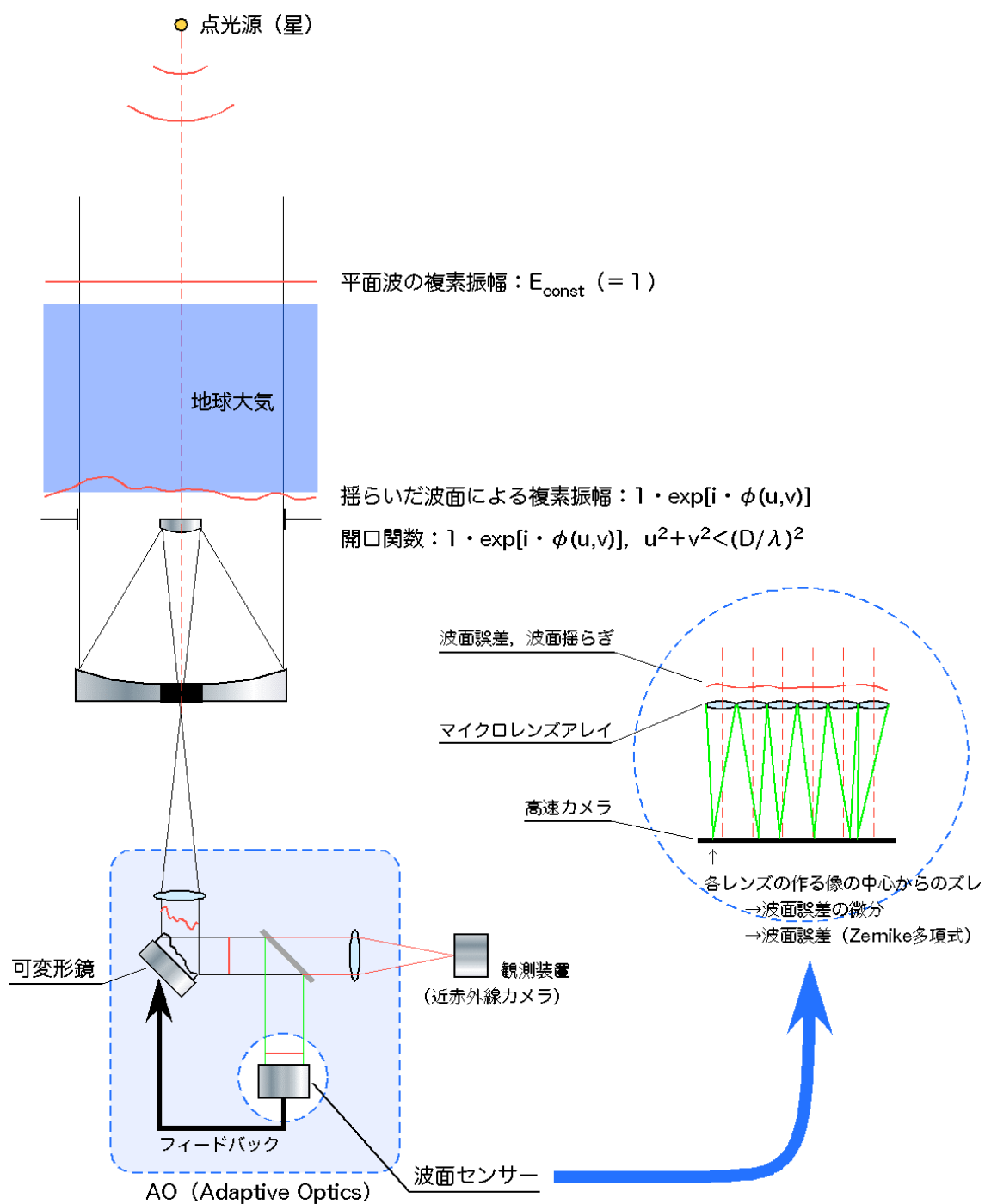


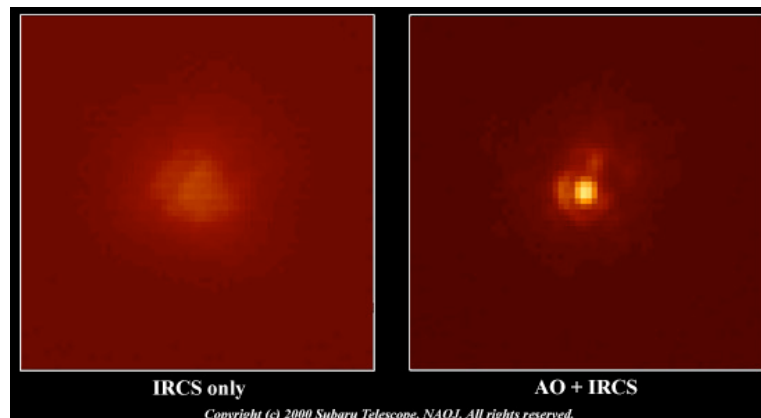
時期を同じくして発表された、ハッブル宇宙望遠鏡による、フォーマルハウト（みなみのうお座の1等星）を回る惑星



ハッブル宇宙望遠鏡

ただし最近はペラペラの鏡を制御して、乱れた波面を反射させて元に戻す技術（アダプティブオプティクス）が確立され、大気の影響をかなり取り除けるようになってきた。現在、この技術は近赤外線（波長1～数ミクロン）で最も実用的である。

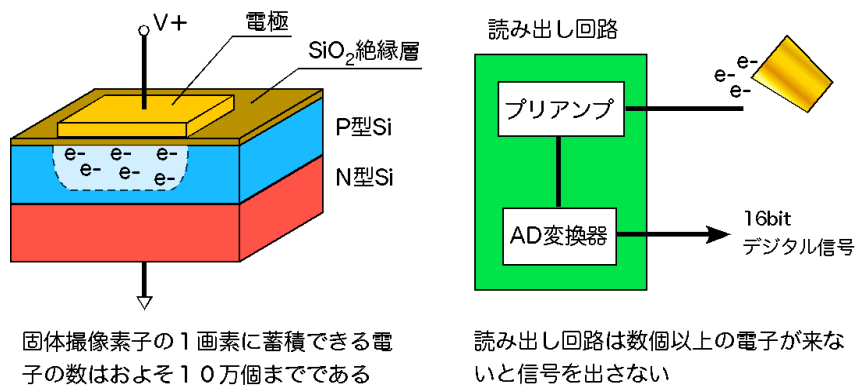




すばる望遠鏡の 36 素子アダプティブオプティクスによる像改善

3 2 - 3. 撮像素子の限界

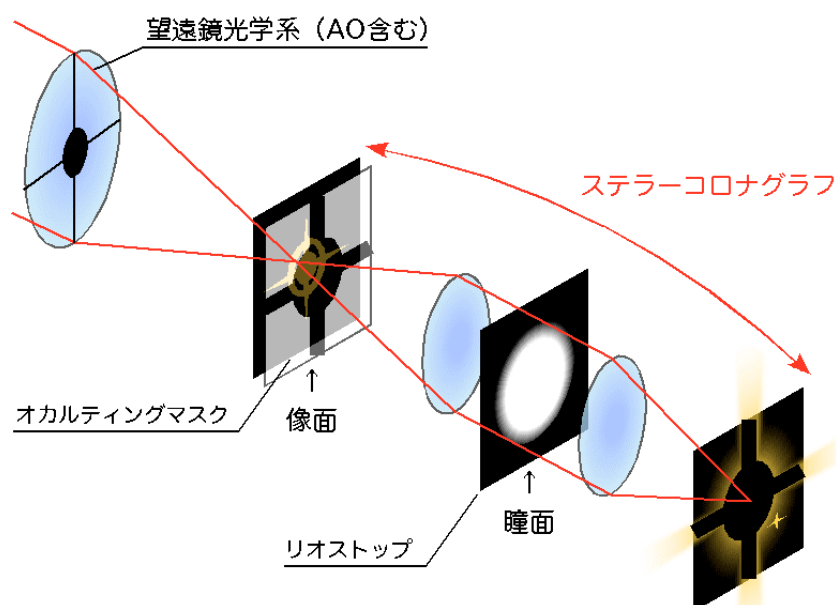
口径が大きくなり、アダプティブオプティクスで大気の影響が改善されると、星像が小さくなって光が集中するため、より暗い天体を写すことができるようになる。しかし、これで系外惑星も撮影できるかという、そう簡単ではない。惑星のすぐそばには強烈な光を放つ中心星がいる。現代の天体観測では半導体素子を用いた専用のデジタルカメラを使う。心臓部である固体撮像素子は、受け取った光（光子）を電子に変えて蓄積（露出）をすることで暗いものまで写すことができるが、蓄積できる電子の量には限界がある。それは一つの画素につき電子 10 万個くらいである。露出時間中に蓄積される電子が 10 万個近くに達すると画素が飽和（サチると言ったりする）し、露出過多になって画像情報としての意味がなくなってしまう。一方で暗い方にも限界がある。デジタルカメラでは各画素の蓄積電子量を最大 16bit（65536 段階）の信号として読み出す。するとデジタル信号 1 カウントは電子 1.5 個分ということになる。露出時間中に数個以上の電子が蓄積されないと、その画素は信号を出力しないことになる。



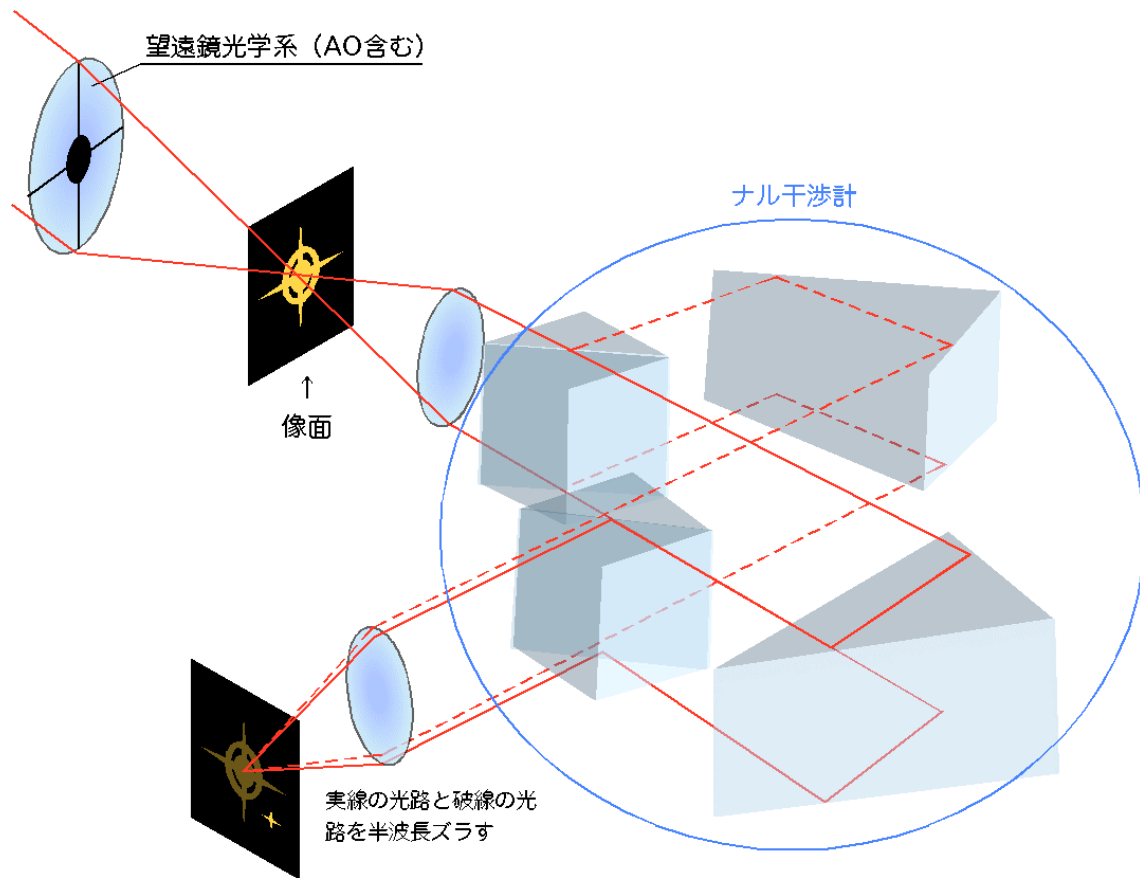
さらに読み出し回路の出すノイズも考慮する必要がある。読み出しノイズは研究所が独自に開発した最高のものでも1画素平均3電子程度。通常、良いもので5～10電子未満といったところである。したがって固体撮像素子では、明るい方が数万カウント、暗い方が数千カウント以上というのが画像として信号が取れる限界である。つまり光量比で 10000 対 1 を超えるようなコントラストを持つ対象は同時に写すことができない。

3.3. 隠す？ 消す？ 引く？

ディテクタに検出コントラストの限界がある以上、系外惑星を撮影するには何らかの工夫が必要になる。まず中心星と惑星との極端な明るさの違いを緩和するため、観測波長として近赤外線が用いられる。これはアダプティブ光学（AO）による解像性能アップのための要件でもある。それでも中心星は明るすぎるので、その光の影響を取り除く方法が幾つか考えられている。方法としては光を「隠す」、「消す」という2つが提案され各国研究機関で装置開発が続けられている。



隠す方法：ステラーコロナグラフ



消す方法：ナル干渉計

ところが今回、Keck、Gemini、VLTが系外惑星の撮影に成功したのは、殆ど注目されていなかった第3の方法「引く」であった。彼らはステラーコロナグラフもナル干渉計も一切使わずに系外惑星の姿を写したのである。

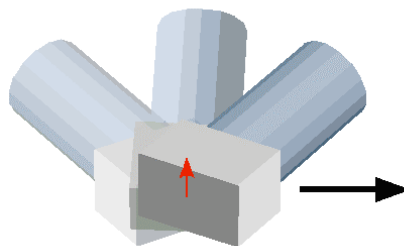
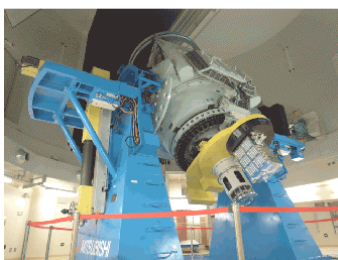
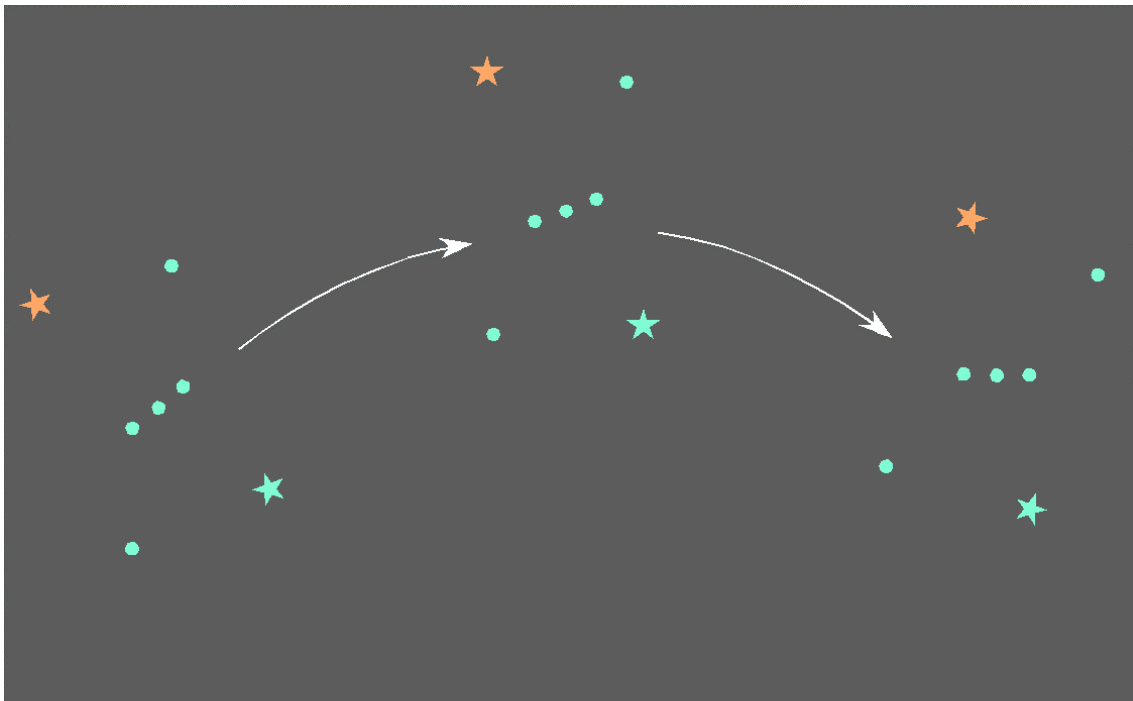
中心星の写っている画像から中心星をきれいに引き算するにはどうすれば良いだろう。これ以上ない方法は中心星の写っている画像からその画像を引き算することである。

「 $A - A = 0$ 」

完璧に中心星は取り除かれるはずである。ただし一緒に写っているはずの系外惑星も取り除かれてしまう。これでは元も子もないが「 $A - A = 0$ 」という考えは魅力的には違いない。この魅力に取り付かれた人は知恵を巡らせたはずである。どうすれば「 $A - A$ 」に近い画像、系外惑星だけ残せる「 A' 」を得られるかと。

3 3 - 1. Keck・Gemini の方法

HR 8799 の周りに 3 つの惑星の姿を撮影したカナダ・アメリカのチームは、現在ある世界最大級の望遠鏡が経緯台方式であることに着目した。経緯台に載せた望遠鏡は天体を追尾する時に鏡筒が回らない。一方、星空は例えばオリオン座を思い浮かべてみると、仰向けの格好で東からのぼり、真南にくると直立し、うつ伏せの格好で西に沈む。したがって経緯台に固定したカメラで追尾するとオリオン座は回って写ってしまうことになる。これは視野回転という経緯台固有の欠点である。

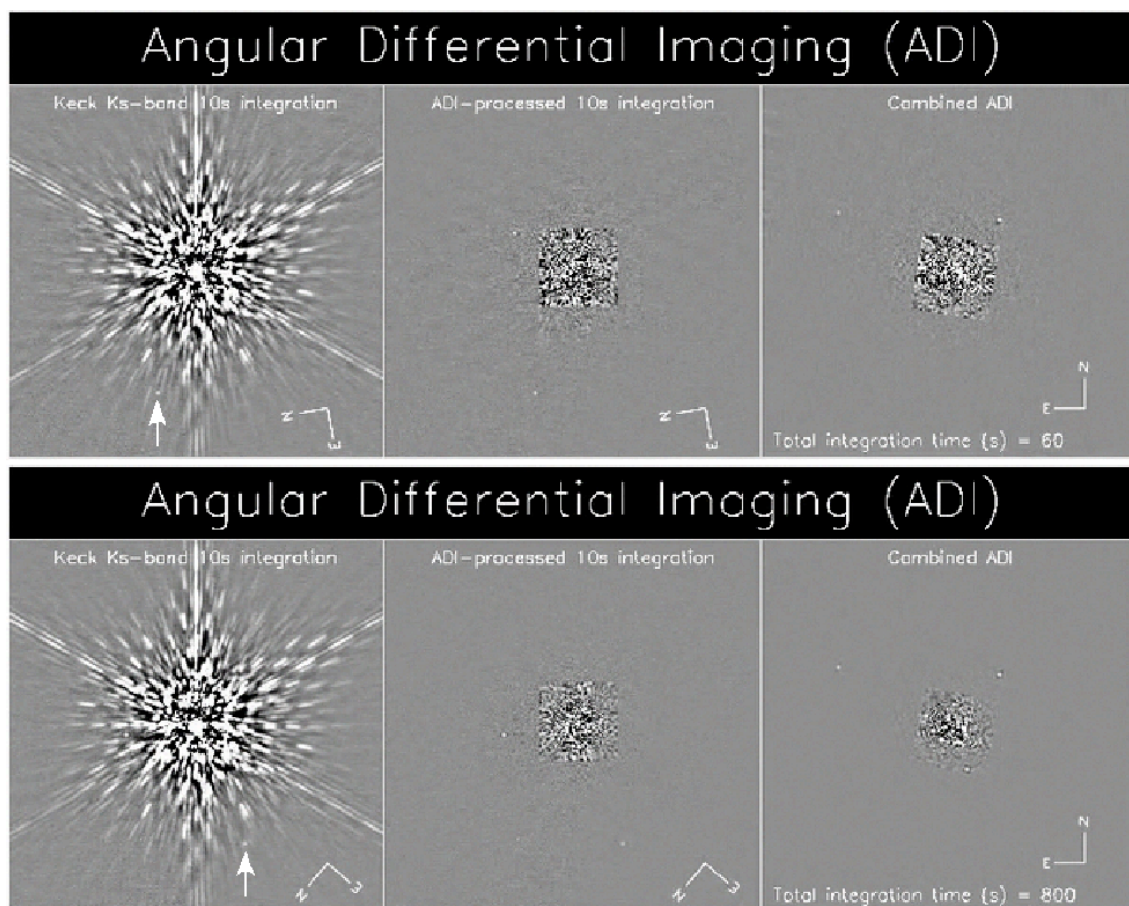


経緯台で追尾すると視野が回る



しかし一方で、経緯台に固定した望遠鏡やカメラは光学系など装置の様々な不完全さから生じる星像のいびつさ（同心円形からの歪み）が固定される。経緯台で追尾しながら撮った時間差のある HR 8799 の画像は、中心星の位置といび

つな形が殆ど変わらず、惑星の位置だけが視野回転で移動したものになる。彼らは経緯台に載せた望遠鏡の特徴を利用して「A引くA'」を実現した。



Keck 望遠鏡で撮られた HR8799 の画像（動画）の一部。左の上下段が時間を置いた 2 枚。母星の画像の歪みは固定され、惑星（矢印：HR8799b）だけが視野回転で位置を変えている。中央上下段は、それぞれ左の画像から別の時間の画像を引き算したもの。右の上下段は引き算した画像を足し算した結果

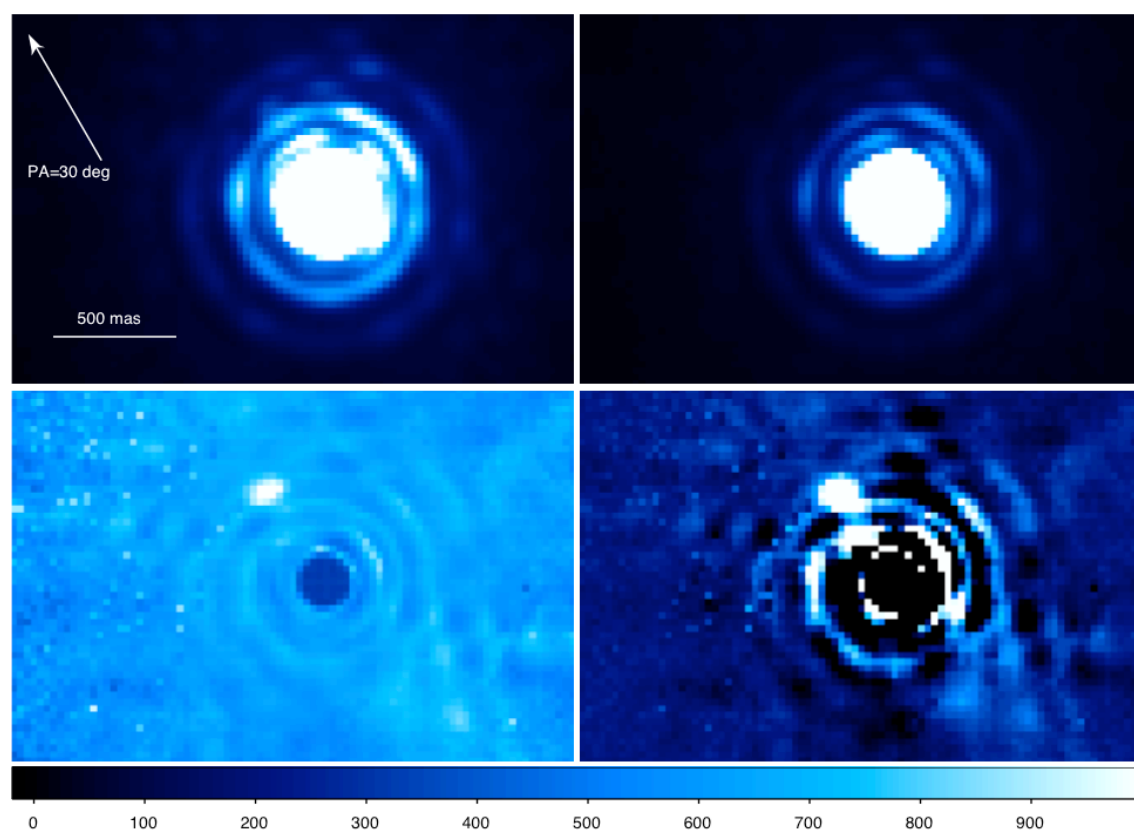
33-2. VLTの方法

がく座ベータ星の惑星を撮影したヨーロッパ南天天文台のチームは違った方法を考えた。アダプティブオプティクスを完璧に近い状態で動かすことができれば、星像のいびつさは無視できるようになるはずである。そうすれば惑星を持った中心星とほぼ同じ画像を単独星の画像から得ることができる。彼らはアダプティブオプティクスを理想に近い状態で動かせるために約 3.5 ミクロンという長めの波長を使った。アダプティブオプティクスで最も高解像度が得られ

るのは波長約 2 ミクロンであるが、波面揺らぎの修正誤差は無視できないほど残る。彼らの採用した波長だと解像度は波長が長いぶん落ちる（分解能は λ/D に比例）が、アダプティブオプティクスは理想的に働いて、いびつさの少ない星像を得やすくなる。さらに彼らは常識外れの発想をした。

「星像のいびつさが少ないならば、明るい星像の中心がサチって（飽和状態で）もいいじゃないか」

それが的を射ていたかどうかは、がが座ベータ星の惑星が写った画像を見ればわかる。



VLT で撮影された、がが座ベータ星の画像処理。上段左が、がが座ベータ星で上段右が母星の影響除去に使った HR2435 の画像。どちらも星像の中心は露出過多で蓄積電荷が飽和している。下段左は上段左右の画像を割り算したもの。下段右は引き算したもの。明るい星を飽和させてもその星像はきれいに消せている。Astronomy & Astrophysics 掲載の元論文より引用

3 4. なゆた望遠鏡の方法（計画）

時間があれば紹介します。学会等未発表の内容です。