

太陽系外惑星観測

講演者：田村元秀

自然科学研究機構 国立天文台

太陽系外惑星探査プロジェクト室

書記：田中圭,原川紘季

主に赤外線・可視光による太陽系外惑星とその誕生現場に関して、
観測手法を含めて紹介する。

目次

1. 包括的イントロダクション	2
2. 系外惑星観測 1	11
3. 系外惑星観測 2	16
4. 系外惑星観測 3	28
5. 系外惑星観測 4	34
6. 直接観測 1	39
7. 直接観測 2	43
8. 直接観測 3	50
9. 直接観測 4	54
10. 将来計画	56

1. 包括的イントロダクション

自己紹介：田村元秀

略歴

- 奈良県出身
- 京都大学理学部大学院で修士・博士課程修了、理学博士
- 野辺山宇宙電波観測所、マサチューセッツ大学、
アメリカ国立光学天文台(キットピーク天文台@アリゾナ)
ジェット推進研究所(NASA/JPL@カリフォルニア)
- 現在、国立天文台(三鷹) 太陽系外惑星探査プロジェクト室設立、室長

著書・論文

- 「宇宙は地球であふれている(技術評論社)」
- 「宇宙画像2009&2010(ニュートンプレス)」
- 「宇宙に知的生命体は存在するか(ウエッジ)」
- 「シリーズ現代の天文学6,9,15巻章執筆(日本評論社)」

査読あり論文200編以上 (ADS : 436 entries)

参考となる教科書・参考書：基礎

- Glass, I. "Handbook of Infrared Astronomy"
- Stahler, S. "The Formation of Stars"
- Hartmann, L. "Accretion Processes in Star Formation"
- Spitzer, L. "Physical Processes in the Interstellar Medium"
- Osterbrock, D. E.
"Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei"
- 日本評論社 "太陽系と惑星""宇宙の観測 I(光・赤外天文学)"
"星間物質と星形成""恒星" 日本評論社
- 小暮智一 "星間物理学" ごとう書房
- 井田、佐藤、田村、須藤 "宇宙は地球であふれている" 技術評論社

参考となる教科書・参考書：専門

- "Protostars and Planets V" Arizona University Press
- "Extrasolar Planets" Saas Fee Advanced Course 31
Saas-Fee Advanced Courses
- "Planet Formation: Theory, Observations, and Experiments" Cambridge
- Reid & Hawley "New Light on Dark Stars" Springer

- 井田茂 “系外惑星”東大出版
- Jean Schneider "The Extrasolar Planets Encyclopediadia",
<http://exoplanet.eu/>
- Gargaud et al. Eds. "Lectures in Astrobiology" Springer
- **系外惑星観測の包括的教科書はまだないので、近々執筆予定。**

1995年 - 天文学の歴史的な年

30年代~ 系外惑星探査の失敗の長い歴史

95年 8月：系外惑星存在せず！と結論 by ウォーカー(カナダ)

95年 10月：系外惑星発見！ペガサス座 51 番星周りに巨大な惑星！

by マイヨールとケロズ (スイス)

直後にマーシーとバトラー(アメリカ)によって確認された

トップサイエンスの前夜にはドラマがあった！

◎マイヨールとケロズ (スイスチーム：ダークホース?)

94年 4月から惑星探しプロジェクト開始し、

95年 7月ペガサス座 51 番星に惑星を発見、8月にはネイチャーに登校！

背景に、13年にわたる地道な連星研究があった！！

◎マーシーとバトラー (アメリカチーム：本命?)

7年に渡り 60 個の恒星を調査していたが、

太陽系 (木星の公転周期 12 年) の先入観から解析を進めていなかった！！

その後、半年でおとめ座 70 番星, おおぐま座 47 番星, かに座口一星,

うしかい座タウ星の惑星を次々に発見！

◎ウォーカーとキャンベル (カナダチーム：不運?)

78年から現在主流となるガスセル法を採用。

12年間 21 天体を観測の結果、巨大惑星の存在を否定したが、

現在の検出確率 5%を考えると「不運」だったと言える。

◎レイサム (アメリカチーム：やはり不運)

当時は質量不定性のためカウントされなかった天体が

現在では系外惑星と認定されている…

発見された系外惑星は想定外の惑星だった！

初めて発見された惑星は**短周期, 高温のガス惑星・ホットジュピター**だった！

ペガサス座 51 番星 b : 周期 4 日、温度 1000 度

(参考) 木星 : 周期 12 年、温度 120 度

私と系外惑星・円盤の関わり

- 1988- アメリカでポスドク、赤外線観測「革命」を体験
- 1992- すばるの観測用装置CIAOの開発をリード
 - 装置の目的は円盤、褐色矮星、系外惑星
 - 日本初の高コントラスト天文撮像への挑戦、偏光観測
- 1998- 南アIRSF望遠鏡用装置SIRIUS開発をリード
 - 広視野多色天文撮像の極限、偏光観測
- 1999- NASA/TPFの活動に日本から参加;国際協力
- 1999- SPICA(HII/L2)コロナグラフ提案
- 2000- CIAOのすばる望遠鏡でのファーストライト
- 2000- SIRIUSの望遠鏡ファーストライト
- 2001- 日本での系外惑星観測をプロモート
- 2002- 宇宙研JTPFワーキンググループを設立
- 2004- すばる望遠鏡用次期装置HiCIAO開発をリード
 - CIAOの10倍以上の性能
- 2005- 太陽系外惑星探査プロジェクト室設立
- 2009- HiCIAO+AO188 望遠鏡ファーストライトと直接撮像

系外惑星研究・観測の面白さ

- 人類の世界観に新知見をもたらしていると言っても過言ではない
地動説以来?
- 歴史ある天文学の中でも極めて若い学問
- かつ、学問の進展が文字通り日進月歩
- 学問的目標とロードマップが立てやすい
- いっぽう、意外性も多々ある
- 多様な系外惑星の存在が明らかになり、
 - 多様な学問的展開が可能であることがわかった
- 既に天文学、惑星科学、工学の共通のテーマとなった
- 次には、生物学、生命起原とも結びつく高い学際性を持つ
- 宇宙における生命は人類の究極の疑問のひとつ
- 典的手法から最先端技術までを観測に活かすことができる
- 天文学の中でもさまざまな分野が連携できる
(太陽系、恒星、星惑星形成、星間物質など)

まずは、(赤外) 天文の方からの包括的なイントロをしていく。

系外惑星自体のイントロは別で。

太陽系と太陽系外

太陽系外の天体をどれくらい観測できてる/できるのか？

太陽系の構成物 (個数)	太陽系外では? (検出できる?)
恒星 1 個	恒星 既検出
惑星 8 個	惑星 既検出
惑星リング 4 個	惑星リング トランジット法で可能
衛星 146 個	衛星 トランジット法で可能
小惑星 6000 個	小惑星 間接的に既検出
彗星 10^{12} 個	彗星 ベガ型星 (オールト雲)
惑星間ガス 1 個	惑星間ガス 電波で出来る?
惑星間磁場 1 個	惑星間磁場 電波で出来る?
黄道雲 1 個	黄道雲 ベガ型星

模擬観測：太陽系を 5pc から太陽系を直接観測したら? をシミュレーション

木星~海王星まで観測できる スペクトルも取る!

実現するのは 20 年以上先になるが...

三種類の星：恒星・褐色矮星・惑星

星は重力エネルギー解放で光るが、その後の進化が質量によって変わる!

3つに分類! 惑星は年をとると暗くなるので、若いうちが観測のターゲット!

恒星	太陽質量の 0.075 倍以上 水素を燃やして自ら光り明るい
褐色矮星	太陽質量の 0.075 - 0.013 倍 水素は燃えないが、D-burning で少し明るさを保つ
惑星	太陽質量の 0.013 倍以下 ただし、恒星を周回するもの! ただただ暗くなってゆく...

本講義における惑星の定義

惑星定義は太陽系内ですら議論がある...

そこで本講義での惑星を定義 (注)IAU の惑星の定義とは異なる

◎単一天体または多重天体の周りを公転するもの

free-floating planet-mass object は含まない

◎最大質量は木星の13倍 (0.013 太陽質量)

重水素を安定して燃焼できないもの

◎最小質量は特に定めない

現在は観測の限界が決める。冥王星質量(10^{22} kg)とする人もいる

Q: 「重水素が燃えるかどうか」が何故定義に入ってる？

A: 形成の仕方では分けたいがそれはまだ難しいし、
便宜的にみんな使っていて便利だから

多波長観測の重要性

実際の観測は様々な波長で観測されている。

大気の吸収があるので地上で観測できたり、宇宙に行かないと観測できない波長もある。

また、多波長で見ることで様々な情報が見えるようになる。銀河系の観測では可視光で恒星をみたり、電波でガスをみることで、銀河系全体のイメージが得られて来た。

観測手段としての赤外線

波長 0.8-300 μ m の光。今回の話しでは解像度の関係で <100 μ m まで。

大気の窓：大気中の透過度の高い波長域のこと。地上観測では窓を狙って観測するため、利便のためバンド名が付いている。

赤外線バンド名	中心波長	バンド幅
J	1.25 μ m	0.3 μ m
H	1.65 μ m	0.35 μ m
K	2.2 μ m	0.4 μ m
L	3.5 μ m	1.0 μ m
M	4.8 μ m	0.6 μ m
N	10.6 μ m	5.0 μ m
Q	21 μ m	11.0 μ m

波長帯ごとのゼロ等級 (Vega を基準にした等級) リストを紹介(see スライド)

Q: 宇宙に出たらバンドは関係ない？

A: バンドは関係ないが、ディテクターはバンドに合わせて作られていることが多い。

Q: Vega の黒体放射を基準にしていると思えばいいか？

A: おおよそそれで良いが、実際には温度だけでなくフィーチャーの情報も入っていると思う。

赤外線観測 (vs 可視光観測)

◎低温の天体を観測しやすい

惑星, 褐色矮星, 生まれたての星, 年老いた星

◎大きな減光を受けた天体に有利

ダスト減光した天体、星形成領域、銀河中心、スターバースト銀河

◎大きな赤方変移天体を観測しやすい

遠方銀河、宇宙論観測

◎高解像度観測を実現しやすい

shift-and-add, tip/tilt, 補償光学 詳細は後で…

◎分子・原子等のライン・バンドが豊富

減光と星間赤化

ダストによる吸収散乱は 赤外<可視 なので、減光した光は赤化する。
領域ごとにダストサイズなどが変化などを特徴づける

撮像観測・分光観測

撮像観測装置：空間情報を読む 詳しい話しは後で

分光観測装置：分光素子をいれて、空間情報と波長情報を読む

可視・赤外線検出器

可視光 CCD と赤外線 CCD の違い

検出器読み出しの革命（詳しくは話さないが）

今まで手作業だった部分が IC 化！

すばるの星像性能と第一期装置群

seeing がいい！

日本で 2 秒角程度だが、ハワイなら 0.6 秒角くらい出せる！

補償光学（後で説明）！

地上大望遠鏡：現在と将来

チリ、ハワイ、カナリア諸島、アリゾナ、カリフォルニアなど

オーストラリア、南アフリカなども系外惑星探査ではよく聞く

世界中の天文台で連携すれば、昼夜問わず 1 天体を観測することも出来る！

TMT(30m 望遠鏡)も出来るかもしれない

スペース望遠鏡：現在の例

グレートオブザバトリー計画：色んな波長をカバーする大規模計画

Spitzer, Hubble, Chandra, Compton

Hubble の装置アップデート 2013 年まで使う予定

スペース望遠鏡：現在と将来 (NASA only)

系外惑星に特化した宇宙望遠鏡 Kepler に注目

Herschel, WISE, SOFIA, JWST など

Q：宇宙＝窓がないときの波長分解能はどれくらい必要？

A：系外惑星探査なら波長分解能 100 くらい

星・惑星形成

講義のもう1つの目的は単に系外惑星だけでなく、星・惑星系形成を理解することでもある。

可視光で暗い星間雲で星形成は進んでいる＝暗黒星雲

形成進化＝スケール進化：分子雲 > 分子雲コア > 原始星+円盤

→ 1 秒角～100AU で円盤が見え始める (100pc あたりに) !!

最近ようやく出来始めて来た!!

大質量星形成領域は遠いためまだ余り調べられていない…

が、単独の低質量星はよく調べられている!

低質量星形成

分子雲コア → 原始星 → T タウリ型星 → 弱輝線 T タウリ型星 → 主系列星

赤外線に基づく YSO の分類

形成進化に合わせて、赤外線スペクトルも進化する。

これはダストによる減光＝赤外超過なので、埋もれているほど赤外超過が強く出たためだ。

class 0	class I	class II	class III
	赤外超過大	赤外超過小	赤外超過無

※class 0 後から付け足された赤外線でも暗い天体

原始星：class I 天体

年齢～ 10^5 yr。円盤とエンベロープを持ち outflow を伴う。

近赤外線で見える。

Tタウリ型星と弱輝線 Tタウリ型星 (CTTS と WTTS)

円盤を持つ。可視光でも見えるが円盤が見えるようになったのは最近。

CTTS と WTTS は星周構造の違い。

星周構造と理論モデル

円盤+エンベロープ+中心原始星のモデルで観測が説明できる。

Whitney+2003 等

Hertzsprung Russell 図 (HR 図)

小質量星進化トラック上に Tタウリ型星。HR 図上では CTTS と WTTS はほとんど区別がつかないので、本当に進化かはまだ不明。

中質量星ではハービック Ae/Be 星。

小さい質量の M 型星や巨星は後で話しに出る。

近傍(10pc 以内)の恒星

軽い方が多い！！近い G 型は限られてるけど、M 型はいっぱい！

スペクトルタイプ(質量)	10pc 以内の個数
O : 250-17.5	0
B : 17.5-2.9	0
A : 2.9-1.6	4
F : 1.6-1.05	8
G : 1.05-0.79	19
K : 0.79-0.51	43
M : 0,51-0.06	267+
M,L,T-BD <0.075	21+
D - WD	21+
Total (known)	383+

Q : 連星も含まれている？

A : はい

連星

◎頻度

重いほど連星頻度が高い。G 型星で~50%程度。

前主系列星(PMS)の連星頻度(MS)は主系列星時代の 2 倍程度~100%！！

シミュレーションとも一致。

◎連星周期

周期 180 年~35AU をピーク

MS も PMS も同じ傾向

◎離心率

P>1 日では $e=0-1$ でほぼフラット

2. 系外惑星観測 1

系外惑星探観測イントロ

惑星はどのように検出されるのか？

画像におさめるのはとても難しい…

10pcにある太陽-木星を観測したとすると(可視 vs 赤外)

感度：V~29mag, N~20mag

感度：0.1 arcsec

コントラスト：DR(V)~ 10^{10} , DR(N)~ 10^7

熱放射があるぶん赤外の方が見やすいがまだ見えていない…

→ 惑星を見つけるためには工夫が必要！！

系外惑星検出方法

間接観測法：惑星からの光を直接見ているわけではない

- ドップラー法（これまでのメイン）

公転運動による恒星の速度ふらつきを分光観測により検出

- トランジット法（これから注目！）

惑星が恒星の前面を通過する際の明るさの変化を検出

- マイクロレンズ法

惑星を持つ恒星が背景の恒星の近くを通過する際の重力レンズ効果による明るさの変化を検出

- アstrometry法

公転運動による恒星の位置の位置ふらつきを検出

直接観測法：惑星からの光を直接見る

- 直接撮像法：高解像度観測により惑星と恒星を見分けて撮像する

究極の惑星観測法

系外惑星候補の数

系外惑星発券数は>450 個！ +706 個の候補あり！

◎ 発見数 vs 年

まあ年々増加している！特に近年はトランジット法により急増している。

◎ 発見数 vs 距離

~100pc がほとんど。

凄く遠くに見つかっているのはマイクロレンズ法~銀河中心近く

◎ 発見数 vs 恒星質量

太陽質量付近に集中。G型星をターゲットにしてきたから。

系外惑星の統計学

多くは木星質量 7%以上が惑星を持つ

木星質量付近にピークがあり、褐色矮星は少ない 褐色矮星砂漠？

ドップラー法に基づく統計が主だが、これからはトランジット法が卓越！

ドップラー系外惑星の統計：低質量側

40個以上の多重系外惑星 最多はかに座 55番星の5個！

90個以上のトランジット惑星 Kepler 結果に注意！！

20個以上のスーパーアース Kepler 結果に注意！！

最小質量: $m \sin i = 2M_e$ Kepler 結果に注意！！

Q: スーパーアースの定義は？サブアースは？

A: ここでは $<10M_e$ としている。まだ議論はある。 $<1M_e$ はまだない。

ドップラー系外惑星の統計：軌道長半径、周期

軌道長半径 0.014-6AU、周期 0.79日-14年と幅広い

$<0.1AU$: ホットジュピター $T_{\text{eff}} > 1000K$

>15 年: データが不完全

ドップラー系外惑星の統計：離心率

$e > 0.1$ も多い

$a < 0.1AU$ では潮汐作用での円軌道化の効果も見えている

重い惑星は円軌道にならないと言われていたが、強い相関は見られない

ドップラー系外惑星の統計：連星

連星系にも惑星 約40個 周星惑星 (S-type) と周連星惑星 (P-type)

ほとんどが主星周り

両方にあす例は未発見 / 周連星惑星も未発見

惑星形成への制限

系外惑星の性質：頻度 Johnson et al. 2010

Keck サーベイ

$N_{\text{planet}}/N_{\text{star}} = 0.07 * (M/M_{\text{sun}}) * 10^{1.0}$ for $[Fe/H]=0$

$N_{\text{planet}}/N_{\text{star}} = 0.07 * (M/M_{\text{sun}}) * 10^{1.2 * [Fe/H]}$ for $M=1M_{\text{sun}}$

モデルへの制限

- 重力不安定モデル
金属量への依存性はないはずなので×
- 金属量依存性の Pollution モデル
(惑星落下による恒星表面金属汚染 Murray&Chaboyer02)
巨星は対流のため金属量依存性が弱まるはず ×
M型星も同様に金属量依存性が薄まるはず ×

系外惑星の性質：質量・半径図

理論と比較的良好一致

Hot Jupiter のいくつかには半径超過 WAPs1, HAT1, HD209458

逆に高密度のガス惑星もある HD149026

最も軽いトランジット惑星 CoRoT-7b や GJ436b の発見 岩石型？惑星！

系外惑星の性質：理論との比較

観測と理論(Ida&Lin 等) と比較 コアアクリーションでいいのか？

系外惑星検出入門

系外惑星検出方法：ドップラー法

惑星公転に伴う恒星の速度ふらつきによる、恒星スペクトル線の移動を測定

現在の最高精度 <1m/s！

80%以上の系外惑星がドップラー法 → 重い惑星、近接惑星にバイアス

惑星の軌道要素

軌道の決定 = 7 個の軌道要素

天体力学の講義で一番退屈なトコ (笑)

惑星の軌道とドップラー法

視線速度を見ているので軌道傾斜角は不明：質量の不定性 $m \cdot \sin(i)$

中心星質量はモデルから求める

ドップラー法と統計的議論

軌道傾斜角は等分布として 平均 $\langle m \cdot \sin(i) \rangle \sim 0.8m$

統計的議論は問題ない … 個別の惑星の議論は要注意

ドップラー法と速度観測精度

揺さぶりの速度比較

地球 0.089m/s, 木星 12.4m/s, 天王星 0.297m/s

Hot Jupiter@0.1AU 4.8m/s, 5Me-SuperEarth@0.1AU 1.4m/s

近接 SuperEarth なら観測可能な時代に！！

ドップラー法と高分散分光器

望遠鏡に入って来た光をスリットに通し回折格子分光器を通す

1m/s の精度ってどれくら凄いのか！？

- 1個のスペクトルの1万分の1の幅を解像する必要あり！！！！

特別な工夫もいっぱい 分光器、波長校正、地球の固有運動を引く…

ドップラー法：波長校正

◎トリウム-アルゴンランプ法

トリウム光源と星を同時に観測し、ランプのラインと比較

ヨードセルよりも広い波長域、吸収がない

現在の最高精度はこの方法！~1m/s

◎ヨードセル法

恒星をガスに通して観測し、ガスのラインとの相対位置で比較

簡単なので現在の主流

ドップラー法：高精度への工夫

スペクトルを幅 2\AA 程度の数百個の塊にわけ、

各塊ごとに合成スペクトルをモデリングし視線速度を求める。

スペクトルの形で決まる視線速度測定精度

深くて細いスペクトルの方が精度がいい

太陽の場合 ($R=100000$, $N=10^5$, 3pixel sampling) $\rightarrow 0.6\text{m/s}$

代表的なドップラーサーベイ

珍しいのは岡山で中質量 G 型巨星を探索している

他はすべて小質量 FGK 型主系列星

注目すべき系外惑星 1： γCep

最初の惑星発見になりそびれた惑星

Walker et al.92 で発見されていたが、連星成分を取り除くのが難しかった…

20~30AU の連星

1.6Mj, 2AU, 903days, $e=0.12$

注目すべき系外惑星 2 : Canadian survey

Walker et al.95

21 天体の 12 年サーベイ…不運にも偶然、惑星がない星を見ていた

$m \cdot \sin(i) > 1-3Mj$ & $T < 15yr$ は存在しないと結論…

その後、精度の高い観測で ϵEri b, 61Vir b,c,d が発見された…

注目すべき系外惑星 3 : HD114762

Latham et al.89, Nature. 褐色矮星候補として発表

HD114762b: $m \cdot \sin(i) \sim 11Mj$, 0.3AU, 84days

「 $\sin(i)$ 考えると M 型星の可能性もある」と主張したため注目されなかった

今の一般的な認識で言えば系外惑星って言うても OK

注目すべき系外惑星 4 : 51Peg

Mayor & Queloz95

初の系外惑星！しかも Hot Jupiter = 移動理論のモチベーションに！！

Gray97, Nature: Bisector analysis で惑星否定

→Gray98, Nature: もう一回解析して「惑星否定」否定！

Q : 速度変化のグラフ。エラーまでキレ周期的に見えるのは？

A : 周期でミラーリングしているだけ。よくやること。

Q : エラーを考えても明らかにズレているものは？

A : 恒星表面活動 and/or 他の惑星 の影響かと思う

3. 系外惑星観測 2

G 型巨星のドップラー観測：中質量星のまわりの惑星

日本で行われている系外惑星探索を紹介

- B-A 型星 (2Mo)には惑星が多いか？
- 円盤は重くて惑星を作りやすそうだが、その寿命や恒星近傍の固体物質は少ないので自明ではない
 - 重い恒星の惑星を探るには？
 - 重い恒星は RV 法には向かない (吸収線が少なく、高速回転によりラインが広がる)
- ターゲットに工夫！
 - 進化した早期型星は表面温度が下がって観測に適したスペクトルになる
- cool and slowly rotating G and K giants and subgiants
- 質量：1.6–3.9Mo
- Sato et al. 2008

ドップラー法：巨星サーベイ

これまでに報告された巨星サーベイの結果を示す

中心星質量は 2 Mo 程度

惑星も重いものが多い (Brown Dwarf も)

- Sato et al. 2008
- 1.7-3.9MJ 巨星では $a > 0.68\text{AU}$ で、短周期惑星はない
- 0.5-1AU の距離にある巨大惑星は RGB 期に主星に飲み込まれる可能性がある

@星の質量によって RGB 半径が大きく変わるので単純に飲み込まれる効果では説明できないかも。

注目すべき系外惑星系 5：Gl 876

- M4 型, 0.33Mo, $V=10.2$ mag
- 4.7pc, 2.5Gyr
- Gl 876 b: 2.28MJ, 0.21AU, 61.1days
- Gl 876 c: 0.71MJ, 0.13AU, 30.1days
- Gl 876 d: 0.021MJ, 0.021AU, 1.9days
- Gl 876 e: 0.046MJ, 0.33AU, 124days
- M 型星にも巨大惑星が存在
- さまざまな質量の惑星から成る系
- $P_i:P_j=2:1$ 共鳴軌道

注目すべき系外惑星系 6 : GI 581

- M3, 0.31Mo, V=10.6 mag
 - 6.3pc, 8Gyr
 - GI 581 b: 0.049MJ, 0.041AU, 5.4days
 - GI 581 c: 0.017MJ, 0.07AU, 12.9days
 - GI 581 d: 0.022MJ, 0.22AU, 66.8days
 - GI 581 e: 0.0061MJ, 0.03AU, 3.1days
 - e: hot Neptune
 - c と d: habitable zone にある可能性
- ? 惑星 e は質量的にスーパー地球ではないのか
= その通りです。間違えました。

? HZ の定義は ?

= 基本的には H₂O が液体でいられる領域。この領域はモデル次第で変わりうる。

@H₂O があると仮定したうえで、地表面で液体になるかを考えている。

ドップラー法の長所と短所

- 最も成功している惑星検出法手法
 - これまでの系外惑星の 80% がドップラー法によるもの
- 距離に寄らないが明るさで制限
- 統計的手法が有効
- 太陽型星向き
- 重い星、軽い星不向き
- 若い星不向き
- 短周期惑星にバイアス
- 地球型惑星に迫れるかは不明
- $M \sin i$ の不定性
 - 軌道傾斜角は決定できない

アストロメトリ法 : 位置を測る

- 惑星による主星の**位置のふらつき**を検出
 - 天球上での恒星の運動を精密測定
- van de Kamp (米) が 1940-80 年頃に発表
 - Barnard 星 (距離 4 光年) に位置ふらつきを発見

- ⇒ (2つの) 木星型惑星を発見と報告した
 - 1916年からのデータの蓄積があったが,,,
- 否定や確認の報告が続き、残念ながら、1975年頃には天文学者に**アストロメトリ法による惑星検出は信用されなくなってしまった**
- **Lalande21185** (距離 8 光年) : Gatewood (米) が2個の木星型惑星を検出したと最近主張したが未確認
- ハッブル望遠鏡での確認観測が数例ある
 - 打ち上げ前は惑星検出のホープとみなされていた
 - eps.Eri は後述 (直接観測のところで)

アストロメトリ法

- 視差 (parallax)
 - parsec の定義 ($d[\text{pc}] = 1/\theta[\text{arcsec}]$)
 - 望遠鏡の拡大率と焦点距離が大事
- 固有運動 (proper motion)
 - バーナード星 : $\sim 10 \text{ arcsec/yr}$
- **$\theta[\text{mas}] \sim (\text{惑星質量}[\text{MJ}] / \text{恒星質量}[\text{Mo}])$
 $(\text{惑星軌道半径}[\text{AU}] / \text{距離}[\text{pc}])$ ← $M_0 \sim 1000 \text{ MJ}$ とした**
- 近傍恒星の巨大惑星にバイアス
 - ドップラー法と相補的
- 導出パラメータ
 - $P = \text{period}$; $T = \text{epoch of periastron}$ (近星点) ; $\omega = \text{longitude of periastron passage}$;
 $e = \text{eccentricity}$
 - $i = \text{inclination}$; $\Omega = \text{position angle of ascending node}$ (昇交点) ; $\mu = \text{proper motion}$;
 $\pi = \text{parallax}$

アストロメトリ法 : 太陽系@ 10 pc

木星であっても非常に小さい変動

- **$\theta[\text{mas}] \sim (m[\text{MJ}]a[\text{AU}] / (m^*[\text{Mo}]d[\text{pc}]))$, or**
- $a/R_0 \sim (5\text{AU}/1000R_0)(m[\text{MJ}]/m^*[\text{Mo}])(a[5\text{AU}])$
- $5\text{AU} \sim 1000R_0$ なので、主星の公転半径は主星の半径程度

位置ふらつき

- 10pc から見ると、太陽は木星の影響で 0.5mas ふらつく (1mas peak-to-peak)
- 木星以外も無視できない寄与 ; 多惑星系の問題

注目すべき系外惑星系 : GI 876

- M4 dwarf, 0.31Mo V=10.2 mag
- 4.7pc, 2.5Gyr
- GI 876 b: 2.28MJ, 0.21AU, 61days
- GI 876 c, d, e: 別途記述
- **The first astrometrically determined mass of an extrasolar planet**
- fine guidance sensor (FGS)x1.8 年
- $\alpha=0.25\pm0.06$ mas, $i=84^\circ\pm6^\circ$
- $M^*=0.32\pm0.05M_{\odot}$
- $MP=1.89\pm0.34M_{\text{J}}$
- Benedict et al. 2002

? 衛星の姿勢制御が精度の出ない原因では?

= 同視野の参照星との位置関係なのでそれは考えにくい。

注目すべき系外惑星系 : Lalande 21185

- スペクトルタイプ=M2 dwarf, 距離=2.5pc
- Gatewood (Allegheny Observatory) のグループが 76cm の Thaw 望遠鏡 (1912 年製造) で得られた過去 50 年間の写真を解析
- さらに、MAP (Multichannel Astrometric Photometer)を用いて 8 年追観測
 - ruled grating を用いた相対位置測定
 - HST によるアストロメトリに匹敵する位置精度を達成 ($\sim 1\text{mas}$)
 - 実際、HST アストロメトリによる惑星探査計画はあったが、これと例の球面収差の問題で、うやむやに...
- 1.1MJ at $a=11\text{AU}$ with $P\sim 30\text{yr}$, $i=30^\circ$
- 0.9MJ at $a=2.2\text{AU}$ with $P\sim 6\text{yr}$
- **追証明が無い**
- MAPS (Multichannel Astrometric Photometer and Spectrometer) on KeckII M4 dwarf, 0.31Mo V=10.2 mag

アストロメトリ法は今後有望か

- ・ 長周期の惑星検出に有利
 - ドップラー法と相補的
- ・ ドップラー法が苦手な活動的な星にも適用可能
- ・ 惑星の重さが正確に求まる（下限値ではない）
- ・ **地球大気の揺らぎに伴う精度向上の困難さ**
 - **必要な精度：巨大惑星検出でも角度の 1/10000 秒角以上**
 - 大気揺らぎの無い、宇宙空間からの観測がもっとも期待される
 - ◇ SIM(シム)衛星（米、2017 年以降）
 - ◇ デカダルレポートで推薦されず

GAIA

- ・ Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
- ・ 2011 年打上予定
- ・ HIPPARCOS との比較

	HIPPARCOS	GAIA
限界等級	12	16
天体数	120,000	50,000,000
位置精度	1-3 mas	5-20 μ as
測光	Wide+BV	6 バンド
寿命	3 年	>5 年

SIM

- ・ The Space Interferometry Mission
- ・ アストロメトリのための最初の宇宙干渉計
- ・ スペック
 - 基線長：10m
 - 波長：0.4-1.0 μ m
 - 望遠鏡口径：0.3m Φ
 - 打ち上げ予定と寿命：2010 年ごろ・5 年
 - アストロメトリ精度：4 μ as - 1 μ as
- ・ NASA オリジンプログラムのひとつだった

アストロメトリ法の長所と短所

- ・ 長周期の惑星検出に有利
 - ドップラー法と相補的
- ・ ドップラー法が苦手な、活動的な星にも適用可能
 - 本当? : 黒点などの影響は?
 - >黒点で重心の位置が変わる。
- ・ 惑星質量が（下限値ではなく）求まる
 - 軌道長半径はドップラー法から、恒星までの距離は年周視差から、恒星質量は分光から求めておく
- ・ 近傍恒星の惑星探査しかできない
- ・ 惑星大気、半径など特徴づけはできない
- ・ 地球大気の揺らぎに伴う精度向上の困難さ
 - **スペースアストロメトリによる地球型惑星間接検出が本命か**
 - GAIA への期待
 - SIM は事実上キャンセル? (decadal report)

トランジット法：明るさを測る

- ・ **惑星が恒星の前面を横切ることによる、惑星の明るさの変化を測る**
- ・ アイデアは古い：Struve(1952)
 - ドップラー法の応用も同時に示唆
- ・ 問題点
 - 惑星は地球と恒星を結ぶ直線上にないといけない
 - **光度の減少は小さい**（ほぼ惑星と恒星の射影面積の比）

$$\Delta L/L = (\text{惑星半径}/\text{恒星半径})^2$$

Transit

- ・ 惑星による主星の掩蔽を観測する
 - ある空間方向について、トランジットが観測され得る恒星の回転軸の範囲がある
 - 上記の系は、視線方向に回転対称(2n)
- ・ 幾何学的確率：

$$P = (2n(d_*/(D/2)))/4n = d_*/D[\%]$$
- ・ 光度の減少： $\Delta L/L = (d_p/d_*)^2$
- ・ 継続時間： $t = \text{Period} * d_* / nD$
- ・ 得られる物理量

- 惑星半径・軌道傾斜角・軌道半径 etc.
- 従って、**惑星質量と密度が分かる**

トランジット法

木星を見つけるのにどれだけの精度がいるのか

惑星	周期	半径	継続時間	減光比
地球	1年	1AU	13時間	0.01%
木星	12年	5AU	30時間	1%
天王星	84年	19AU	57時間	0.1%

中心星に近いほど検出確率が高い

半径	周期	トランジット確率
0.05AU	4日	10%
0.1AU	12日	5%
0.5AU	129日	1%
1AU	365日	0.1%

地上観測の精度 0.02mag = 0.2% vs. Kepler 0.0025%

トランジット：最初の成功

- ・ 速度変化のデータに合わせて惑星の食を初めて検出(Charbonneau 他 2000年, Henry 他 1999+2000年)
 - 口径たった10cm! の望遠鏡で
 - 継続時間= 2.5時間、明るさの変化約2%
- ・ 初めて独立な2つの間接法で系外惑星が確認された！
 - HD209458 (150光年, 約8等の太陽に似た恒星)
 - 惑星軌道の傾き(8.5度)から質量⇒0.6木星質量
 - 明るさの変化から半径⇒1.3木星半径
 - 比重は木星より小さい⇒したがって、**岩石惑星では無く、ガス惑星**

トランジット法

- ・ 地上
 - たった6cmの望遠鏡(WASP,英)から8m望遠鏡(すばる)まで

- 天文アマチュア (TASS) も参加
- 国際的連携も (TEP ネットワーク)
- スペース (衛星)
 - Kepler(米,1m 鏡,2009 年~)
 - CoRoT(仏,25cm 鏡,2006 年~)

成功している地上トランジット法

とにかく広い視野でサーベイを行いたい

OGLE-IV	1.3m	8	Udalski Optical Gravitational Lensing Experiment
STARE+	10cm	?	Brown
TrES	10cm x 3	4	Charbonneau, Dunham Trans-Atlantic Exoplanet Survey
XO	11cm	5	McCullough
HATNet	11cm x 6	25	Bakos Hungarian-made Automated Telescope
SuperWASP	11cm	29	Pollacco, Cameron, WASP1-33 detected: Wide Angle Search for Planets
MEarth	40cm x 8	1	Charbonneau

スペーストランジット法

Transit Survey Missions (Ongoing, Planned, Possible)						
Survey Property	Ground Based	1 st Generation		2 nd Generation		
		CoRoT	Kepler	PLATO	TESS	ASTrO
Ω (sq. deg.)	$10^2 \sim 10^4$	54	100	550	40,000	>26,000
λ	Vis	Vis	Vis	Vis	Vis	Near-IR
# Stars	$10^3 \sim 10^5$	10^5	10^5	10^5	2.5×10^6	2×10^6
Brightness(mag)	6-15	11-15	10-14	8-14	4-13.5	4-13.5(J)
Precision (ppm)	2,000	50	25,1h,V=11	25,1h,V=11	77,1hr, I=9	50-100, 1hr, J=9

Summary by C. Beichman

注目すべき系外惑星系 6 : CoRot-7b

- G9V, 0.93Mo V=11.7mag
- 150pc, 1.5Gyr

- very active star; spot rotation (23days)
- CoRot-7b: 0.026MJ=5ME, 0.017AU, 0.85days; 0.033% transit depth
 - 1.7RE \Rightarrow 5.6gcm⁻³
 - ✧ 最初の岩石型惑星
- CoRot-7c: 0.015MJ=8ME, 0.046AU, 3.7days

ケプラー衛星

- 太陽型星の 1 AU 近傍にあるハビタブル地球型惑星 (0.5-10 地球質量) の検出に最適化されている
- 10 万個の主系列星の明るさを連続的かつ同時にモニターする
- 口径 1 メートルのシュミット望遠鏡：視野 100 平方度以上 (すばるの 400 倍以上)、CCD を 42 個搭載
- 測光精度： 20ppm (6.5 時間、V=12 の太陽型星) \Rightarrow 地球サイズの惑星トランジットを 4 σ で検出可能
- 軌道：太陽中心、4 年間以上の連続観測
- 観測領域：はくちょう座 デネブとベガの中間の領域

Kepler results

- Five new planets
- 706 exoplanet candidates!
- 306 released in 2010 June
- Rest 400 in Feb 1
- 小さい惑星が多い

熱放射のトランジット：広義の直接観測 Spitzer & HST/IR

- 2つのチーム(Charbonneau et al. 2005; Demming et al. 2005)が Spitzer 望遠鏡を用いて既知の RV/transit システムを観測 (惑星が中心星の背後に隠れたとき)

トランジット法のコントラスト得られる物理パラメータ

- Transit photometry
 - $(R_{\text{planet}}/R_{\text{star}})^2 \sim 10^{-2}$
 - **半径**、さらに RV と組み合わせて、**密度**
- Emission Spectra
 - $(T_{\text{planet}}/T_{\text{star}})(R_{\text{planet}}/R_{\text{star}})^2 \sim 10^{-3}$

- **温度**と其の変化
- Transmission spectra
 - $(\text{planet atmosphere}/R_{\text{star}})^2 \sim 10^{-4}$
- **大気**
- Reflection spectra
 - $p(R_{\text{planet}}/\text{distance})^2 \sim 10^{-5}$
 - $p = \text{albedo}$
 - 散乱大気、偏光

惑星大気の検出

トランジット法を利用した惑星大気の検出

トランジット中と外のスペクトルを比較して惑星大気吸収を探す

- 速度変動のデータに合わせて吸収線惑星大気の検出の変化を検出した
(Charbonneau et al. 2002)
 - HST による分光観測
 - 波長 5893Å のナトリウム線
 - 変化の大きさは 2×10^{-4} 程度と想定外の小ささ
 - 雲のない、太陽アバundanceモデルの 1/3 程度と小さい (理由?)
- 広がった水素原子の検出
 - 連続光の減少 $\sim 1.6\%$
 - Ly α の減少 $\sim 14\%$
 - 面積比 : 14/1.6 ~ 9
 - \therefore 半径比 : ~ 3
 - ✧ 水素原子が惑星半径の 3 倍の範囲に広がっている
- 惑星大気散逸の証拠?
 - $\text{rate} > 10^{10} \text{g/s}$
- Vidal-Madjar+2003
- HST/STIS が故障
- HST/COS に期待
 - 115-320nm ($R = 20000 \& 2000$)

注目すべき系外惑星系 7 : HD 209458

- G0V, 1Mo V=7.7mag
- 47pc, 4Gyr

- HD 209458 b: 0.685MJ, 0.048AU, 3.5days
- **first exoplanet detected in transit (2000)**
- R=1.32RJ
- $i=87^\circ$
- detection of sodium lines during transit (Charbonneau+2002)
- detection of HI (Ly α), OI, and CII (Vidal-Madjar+2004)
- temperature inversion の証拠
 - water emission lines (Knutson+2007;Burrows+2007)
- Planet-star flux ratios at secondary eclipse

注目すべき系外惑星系 8 : HD 189733

- K1V, 0.8 Mo V=7.7mag
 - 19pc, >0.6Gyr
 - HD 189733 b: 1.15MJ, 0.031AU, 2.2days
 - R=1.15RJ
 - $i=86^\circ$
 - distinct rise in flux from transit to secondary eclipse
 - $(0.12 \pm 0.02)\%$ 増加
 - flux peak at 16 ± 6 degrees
 - secondary eclipse から求めた brightness temperature
Teff=(1205.1 \pm 9.3) K
→別の手法で求めた値と大体一致
 - a basic map of brightness distribution
 - > 非一様な温度分布が描けた？
 - > 風が吹いて温度分布が偏ったのかも。
- ? 昼と夜の割合で温度分布は決まっているわけではないのか？
=それで決まる状態よりは少しずれているらしい。

I Emission spectra:

- I Water bump,
- I Flux ratio at 3.6 and 4.5 μ m
- I Decrease of planet/star flux ratio below 10 μ m
- I これらは水蒸気存在を示唆(transmission でも : 下記)

I 過去のデータとの違い

- I 大規模な上層大気変動

I Transmission spectrum

I H₂O, CO₂ CO の存在(Swain et al.2009)

->narrow band 測光を組み合わせたスペクトルに似せたものとフィッティング。

巨大惑星内の大気組成を考えられるようになった？

4. 系外惑星観測 3

Rossiter-McLaughlin 効果

- ・ 最初は食連星 (eclipsing binary) での議論
- ・ first detected in HD209458b (Queloz+00)
- ・ RM anomaly の形がトランジット惑星の軌道に依存
- ・ 惑星の「軌道進化」に貴重な情報 (Type II migration, Planet-Planet interaction, Kozai migration)

惑星が・・・

遠ざかる部分を隠すと近づいて見える

近づく部分を隠すと遠ざかって見える

トランジット中に RV 変動として見える。

その変動から惑星の公転軸と主星の自転軸の関係が分かる。

逆行惑星系 (Retrograde planets)

RM が観測された 29 惑星中、6 個逆行、5 個傾きあり、残りは順行。

主星の温度との関連：

温度の低い主星周りで巡行が多い

温度が高いと逆行が多い??

ホットジュピターはもともと様々な軌道傾斜角を持つが、

対流層が厚い低温星は潮汐作用で揃う?? (惑星移動よりも惑星散乱が重要???)

Winn+10

Transit Timing Variations

トランジット天体以外の惑星の存在により惑星系の重心が微妙にずれてトランジット時間が変化する現象からもう一方の惑星を検出。

- ・ トランジットタイミングの時間変化で、別の惑星を検出できる
 - Holman & Murray 2005; Agol+2005
- ・ Kepler-9 by Holman+2010 (Science Express, Aug 26)
 - 周期 P- b:c=19.2 日:38.9 日
 - P の変化- b:c=+4 分:-39 分/orbit

- 精査すると、スーパーアース存在か

重力マイクロレンズ法

- ・ 物体のまわりの空間の歪みの中を光線が沿って進む
- ・ 観測者・レンズ天体・背後の天体の配置により：
 - **2つの歪んだ像**が見える
 - **アインシュタインリング**
 - 分解して観測できないと**増光現象**として現出
 - ◇ **マイクロレンズ** (1993 : 大マゼラン星雲)

重力レンズの基本

スライド参照

発見例 1 : OGLE 2003-BLG-235/ MOA 2003-BLG-53

- ・ オグル(1.3m 望遠鏡)/ モア(0.6m 望遠鏡)による可視光観測
- ・ 短い第 2 増光を発見
- ・ 1.5 木星質量の惑星, 3AU
 - 主星を軽い星と仮定
- ・ マイクロレンズ法による惑星検出の最初の確実な例
- ・ Bond+2004

発見例 2 : OGLE 2005-BLG-390

- ・ 発見当時、最小質量の惑星
- ・ 5.5 (+5.5/-2.7) Me at 2.6 AU
- ・ 6.6 kpc
- ・ Beaulieu et al. 2006

マイクロレンズ法の長所と短所

- ・ 遠方の恒星の惑星探査 (1-6kpc)
- ・ 低質量惑星にも感度が有る地球型~木星型を 1 ~ 5 AU に検出するバイアス
- ・ 惑星の質量、軌道半径の情報だけが得られる
- ・ 一度きりのイベント

- 追観測、特徴づけが出来ない!
- WFIRST の推薦 (2020 打上?)
 - US decadal report
 - 1.5m, 近赤外線 ML

space だと検出範囲は飛躍的に広がり、地球質量の天体も十分検出可能だが
いかんせん追観測ができないのが痛い。

? 見かけの軌道半径しか見えない?

= 重力の効果なので実際の距離、すなわち軌道長半径が求まる。

? 軌道半径の最小値が見えてる?

= スナップショットの距離しか見えないので一概にそうとも言えないと思われる
(遠日点のばあいは最大値)

パルサータイミング法

- パルサー (中性子星) からの周期的な電波パルスは精密な時計と考えられる
- ミリ秒パルサー PSR 1937+214 の発見 (1982)
- 周期は非常に一定: $\sim 10^{-19}$ s/s
- パルサーのまわりを惑星が回転すると、ドップラーシフトによりパルスの間隔が周期的に変化する
- $\Delta t(\text{edge-on}) \sim$

$$1.5\text{msec}(M_p/M_{\text{Earth}})(M^*/M_{\odot})^{1/3}(P/\text{yr})^{2/3}$$

- PSR 1257+12: 3 個の地球質量の天体が存在する 6.2ms パルサー ($\sim 500\text{pc}$)
- Wolszczan & Frail 1992, 1994
- Arecibo 305m
- 3.4 M_{Earth} ($r=0.36\text{AU}$, $P=67$ 日),
2.8 M_{Earth} ($r=0.47\text{AU}$, $P=98$ 日),
0.015 M_{Earth} ($r=0.19\text{AU}$, $P=25$ 日)

* 超新星爆発後にこのような短周期の惑星が存在できるのかという議論が残る。

- Greenbank で確認

PSR 1257+12 : 速度決定精度は物凄いレベル

本来は時間変化を見ているが、視線速度に焼きなおすと 0.5m/s でも余裕で見られる

? アレシボ使う必要はあったのか?

= 望遠鏡の口径は明るさに依存するのは分かるが、詳しくは不明

時間を精密に決定するため？

パルサータイミング法

- ・ パルサー惑星の報告は Wolszczan&Frail が初めてではない
 - 5ヶ月前の別のグループによる最初の報告 (PSR1829-10) は地球の公転が円軌道から少し外れていること ($e=0.02$)を考慮していなかった
 - Crab pulsar にも 1970 年に惑星存在の報告があったが確認されず。
- ・ 他にも2つの候補が有るが、発見の頻度は少ない⇒ パルサー惑星は多くなさそう
 - PSR 1620-26 in gc M4
 - PSR 0329+52 (slow pulsar, 0.7s)
- ・ 我々の太陽系とは**成因が違う**と思われる
 - second generation planets?
 - > 超新星爆発後の残骸から形成？

偏光観測のイントロ

スライド参照

偏光観測

- ・ 太陽の全積分偏光 $< 3 \times 10^{-7}$
- ・ 惑星の反射光の偏光
 - 広義の直接検出
 - close-in planet の場合、反射光が明るく、 $\text{several} \times 10^{-6}$ レベルの偏光が期待される
- ・ 超高精度偏光器
 - $< 10^{-6}$ の精度
 - CCD よりも単一素子がベター
 - PEM などの特別な偏光素子
 - PlanetPol

PlanetPol について

- ・ システム構成
 - photoelastic modulators (PEM; frequency 20kHz)
 - a triple-wedge calcite Wollaston prism (直行した直線偏光を開き角を持って取り出すことができる)

- single-element Avalanche Photodiodes (NEP $< 2\text{fWhz}^{-1/2}$)
- 波長 : 450 and 1000nm
- 2チャンネル, 一つはオブジェクト、一つはスカイ
- 望遠鏡につけた状態で装置を回転させて linear polarisation components (Q and U)を測定

PlanetPOL の観測 : 55 Cnc と τ Boo

- 55 Cnc
 - hot Neptune(55 Cnc e) @ 0.04AU
 - hot Jupiter(55 Cnc b) @ 0.1AU
- three more distant planets.
- 偏光度変化なし安定
 - $< 2.2 \times 10^{-6}$
- τ Boo
 - unusually massive hot Jupiter
- 偏光度変化なし
 - 5.1×10^{-6}
 - 少し誤差大きい
 - MOSTが発見した黒点活動?
- Lucas+2009

結局、惑星の兆候は検出できず

偏光検出に成功か? : HD 189733b

- double image CCD polarimeter DIPol (Piirola et al. 2005)
- 60 cm KVA telescope on La Palma
- Bバンド偏光度 : $\sim 2 \times 10^{-4}$
- 惑星と主星の光度比は予想より1桁大きいことになる
- 惑星サイズに焼きなおすと、 $\sim 1.6R_J$ と大きすぎるサイズ
- 上層大気の可視光散乱特性が良い?
- Berdyugina+2008

精密偏光観測は難しい

- PlanetPolで2005年5月の観測(サハラ砂漠のダストの影響??)
- 直線偏光度 : 5×10^{-5}
- 水平方向に偏光
- 地球大気のダストが部分的に整列している?

➤ 星間偏光のように

- Bailey et al. 2008

質問タイム

? 偏光観測で分かることは?

= 反射光を見るので偏光度からアルベドの情報が新たに分かる。まだ検出できていない。

? トランジットではアルベドは分からないの?

= セカンダリの直前の増光で分かるが、見積もり方が難しい。

? トランジット観測で 10cm クラスが好まれる理由は?

= 安価で高視野な方が大規模サーベイには向いている。

暗い天体を狙いたいなら大口径の方が有利。

5. 系外惑星観測 4

褐色矮星

- 低質量恒星
 - 水素燃焼によって平衡化
 - 0.1Mo 以下で電子縮退が重要に
- 褐色矮星 (BD)
 - 0.075Mo 以下では T_{core} が PPI chain 温度に達しない
 - core H fusion を維持できない
 - 長期的なエネルギー源なし
 - Li 燃焼には 200 万度が必要
- 反応
 - PPI chain: $p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$ $T_{\text{crit}}=3 \times 10^6 \text{K}$, $M_{\text{min}}=0.075 \text{Mo}$
 - $p+d \rightarrow {}^3\text{He}+\gamma$ $T_{\text{crit}}=5 \times 10^5 \text{K}$, $M_{\text{min}}=0.013 \text{Mo}$
 - $7\text{Li}+p \rightarrow {}^4\text{He}+{}^4\text{He}$ $T_{\text{crit}}=2.5 \times 10^6 \text{K}$, $M_{\text{min}}=0.065 \text{Mo}$
 - ◇ Lithium test: 直ぐ燃焼し尽すので、検出できれば BD

なぜ褐色矮星が大事か？

- 古くは暗黒物質の候補
- 太陽近傍では少なくとも低質量星と同程度存在すると予想されている
- 星形成の極限ケース：ジーンズ質量より小さいものが形成されるか？
- **巨大系外惑星と類似**
 - 比較的簡単に観測可能
 - > 惑星じゃないので暗い天体の観測をすれば OK
 - 系外惑星の大気予想

褐色矮星

- 褐色矮星の時間進化
 - 核融合燃料が無いため、急速に冷却し、光度減少
- 時間と共に、M, L, T 型と変化（スペクトルタイプは温度で決まる。質量ではないことに注意）
 - M0, M1, ..., M9
 - L0, L1, ..., L9

- T0, T1, ..., T10? (後述)
- ・ 褐色矮星の定義はあくまで質量から
 - L型星の一部は褐色矮星、一部は恒星

褐色矮星の性質

- ・ 内部条件
 - $\rho_{\text{core}} \sim 10\text{-}1000\text{g/cm}^3$, $T_{\text{core}} \sim 10^4\text{-}10^6\text{K}$, $P_{\text{core}} \sim 10^5\text{Mbar}$
 - 完全対流⇒ 同じ化学組成
 - ほぼ電子縮退
 - ほぼ液体金属水素と推定
- ・ 大気
 - $P_{\text{phot}} \sim 1\text{-}10\text{bar}$, $T_{\text{phot}} < 3000\text{K}$
 - Hot Jupiter と似た温度
- ・ サイズ
 - ほぼ全て同じ: $R \sim 1R_J$ (電子縮退で重力支持)
 - 巨大惑星も同じ (右図: Chabrier+2009)
- ・ 年齢・質量の縮退
 - 温度と光度: 古い重い褐色矮星 = 若い軽い褐色矮星

褐色矮星の歴史: 理論

I Hayashi & Nakano (1963)

林トラック後に暗くなる一方の天体の存在を予測。

I Kumar (1963)

核融合に必要な質量の下限値の見積もり 13MJ

I Tarter (1974)

"brown dwarf"と命名 本当は赤い。

褐色矮星の歴史: 観測 1

- ・ 70年代からの探査競争
- ・ 80年代の赤外線アレイの登場によって本格化
- ・ Becklin & Zuckerman(1988)
 - A low-temperature companion to a white dwarf star
 - Nature, 336, 656
 - 最初のL型褐色矮星

- Kitt Peak でも観測

歴史：観測 2（カルテクチーム）

- Nakajima et al. (1995)
 - Discovery of a Cool Brown Dwarf
 - Nature, 378, 463
 - 最初の T 型褐色矮星
- Oppenheimer et al. (1996)
 - Infrared Spectrum of the Cool Brown Dwarf GL:229B
 - Science, 270, 1478

木星のスペクトルに酷似

? どうやって BD と判断した?

= 低温の度合いが褐色矮星でないと説明ができない程であった

歴史：観測 3

- Rebolo et al. (1995)
 - Discovery of a Brown Dwarf in the Pleiades Star Cluster
 - Nature, 377, 129
 - 星団中の褐色矮星
- Tamura et al. (1998)
 - 星形成領域の褐色矮星
 - **最初の浮遊惑星質量天体候補 (<13MJ)**
 - Science, 282, 1095

超低質量星の温度分類

I M 型星

I Teff=3800-2500K

I TiO, VO, H₂O, CO absorption plus metal/alkali lines.

I L 型星

I Teff=2500-1400K

- hydrides (FeH, CrH, MgH, CaH) and alkalis

I T 型星

I Teff=1400-500K

I strong CH₄ and H₂O

可視ではもはや見えない。近赤外で大きく振舞いが変わる。

| <12MJUP, 10-100Myr の「惑星」に対応

まだ見つかってないが・・・

| Y 型星

| $T_{\text{eff}} < 500\text{K}$

| H₂O cloud 形成

| その先

| $T < 160\text{K}$

| NH₃ cloud の形成

? T 型 BD と若い惑星で半径は違うのか?

= どちらもほぼ電子縮退で支えられるので半径は変わらないが、若い時期は半径が大きいかもしれない。

? L0-9 は連続的に変わっているのか?

= 連続的。ただし T 型に変わると相変化が起こって明確にスペクトルが変わるらしい。

? 重元素の存在量は見積もられているのか?

= 可視光で見ないとちゃんと見積もれない。これらの星では暗過ぎて観測できていない。

褐色矮星の大気は様々な物質の雲が発生する温度に掛かってくるので相変化によってスペクトルが大きく変動するかもしれない。

T 8 star と木星はアンモニア吸収の有無で区別がつくかもしれない。

Lowest temperature brown dwarf detected

T=500K at d=4.1pc

T10 dwarf or Y dwarf?

最も温度の低い褐色矮星が案外近いところにあった。

近赤外の全天サーベイを行っている。

以上で褐色矮星のイントロが終わり。

これを直接撮像するには? -> 明日

質問タイム

? 褐色矮星の成り方は?

=今のところジーンズ質量から見積もっている。

本当は惑星起源でもいい。

? 褐色矮星の周りの円盤は存在するのか？

= 円盤はある。赤外の超過が見えている。惑星ができるかもしれない。

? 褐色矮星周りの惑星探しはできないの？

= できる。既にコンパニオンは見ついている。ただし惑星と呼んでいいかは不明。

6. 直接観測 1

地球大気のゆらぎのために大口径望遠鏡はそのままではシャープな画像を撮影できない

補償光学 ⇒ 大気の揺らぎのパターンを補正

? 像をゆがめる原因は?

= 基本的には屈折率の変動

可視光で 30cm、赤外線でも 1m 以上の望遠鏡は、工夫しないと口径を生かせない(分解能が上がらない)
大気の屈折により集光性が悪化、変動するためにピンボケする。

「大気擾乱理論」

・ 大気の擾乱 → Kolmogorov spectrum

- 大気の流れにおける乱流は最初は非常に大きなスケール (outer scale; ~m - km) から生まれる
- この運動はしだいにより小さいパターンに崩壊する
- 最小スケール (inner scale; ~mm - km) 以下では散逸する
- Phase structure function
- Fried parameter : 大気の特徴づけるパラメータ r_0
 - ◇ $r_0(\lambda, z) = 0.185 \lambda^{(6/5)} \cos^{(3/5)} z (\int C_N^2)^{(-3/5)}$
 - z : 天頂角、 C_N^2 : 屈折率構造関数

Atmospheric Turbulence causing Seeing

大気の擾乱の要因

- ・ ドーム内の熱源
- ・ ドーム形状に起因する風の乱流
- ・ boundary layer
- ・ 成層圏と対流圏の境界

図には特徴的な高さが存在。

その位置 (緑線) では屈折率の変動が大きい。

? 図はどうやって描いた?

= 気球などによって測定した

完全な望遠鏡とそうでない場合

- 点源の PSF (Point Spread Function) の FWHM は
回折限界の場合 $\theta \sim \lambda/D$
- たとえば $\lambda / D = 0.02 \text{ arcsec}$ for
 $\lambda = 1 \mu\text{m}, D = 10 \text{ m}$
コヒーレント長 r_0 : 光の位相ずれ
平均自乗が 1 ラジアン² になる距離
($r_0 \sim 15 - 30 \text{ cm}$; 良観測サイトの場合、フリードパラメータとも言う)

$r_0 = 10 \text{ cm} \hat{=} \text{FWHM} = 1 \text{ arcsec}$

at $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$

と覚えると良い

開口形状による結像パターンの違い

円形 : 円形パターン

矩形 : 十字型のパターン

星像に関する用語

- 1) PSF (Point Spread Function) :
星像のこと (前述)
コア (core)、エアリ (Airy) リング、
ハロー (halo) からなる。
- 2) 半値幅 (FWHM; full-width at half-maximum)
 $\sim \lambda/D$ (D: 口径)
- 3) ストレール比 (Strehl ratio) :
星像の中心強度を回折限界像と比較した割合
 $\sim \exp(-\sigma^2)$ 、
 σ : 波面誤差 (rms)
現在の AO でも 30-70%程度は普通。
将来は 90%以上 (スペース並)
- 4) EEF (Encircled Energy Function):

PSF の積分値 (半径の関数として)

? 望遠鏡の口径が小さいとストレール比は上がる?

= 上がる。揺らぎによって歪んだ波面のスケールと口径がコンパラだから。

補償光学(AO)の原理

歪んだ波面を波面センサーで**可視光**を検知

->可変形鏡で補正して**赤外線**を検出器へ。

? 屈折率の波長依存性は?

= 可視光と赤外線の違いは考慮している。

? 露出時間の依存性は?

= 屈折率は 100Hz で変動するが、補正する間隔は 1kHz で行う。

従って基本的には露出時間が長くても補正に問題はない。

? 波面センサーで何を見ている?

= 点源と見なせる天体を見て、PSFを決めている。

? 2つの光源が(波面の歪みで)一点に来てしまったら?

= もちろん分解はできないが、定常的にそのような現象は

ほぼ起こらないので実際は大きな影響はない。

AO の性能を表す用語

1) r_0 (フリード長, Fried parameter) :

その中で、大気揺らぎが波長に比べて小さいとみなせる

開口サイズ: $r_0 \sim \lambda^{(1.2)}$

2) シーイング (seeing) :

$\sim \lambda / r_0 \sim \lambda^{(-0.2)}$

3) 風速 :

実際の風速というより、大気揺らぎが変化する時定数

4) アイソプラナティック角 (isoplanatic angle) :

正しく波面補正できる視野の大きさ。

波長に比例、シーイングに反比例、揺らぎの高さに反比例。

Kバンドでは典型的には数 10 秒角。

$\theta \sim 0.3r_0 / (\text{大気揺らぎ層の高さ}) \sim \lambda^{1.2}$

5) スカイカバレッジ :

任意の天体が AO を使って観測できる天球の割合

波面センサーの原理

図参照

広がりを持った光源にはうまく働かないので

ガイド星 (点源) が必要

? レンズアレイの数は?

= 波面変化スケール (D/r_0) 程度の数が必要

Laser Guide Star

レーザーを地球大気の上層に当てて人工的に空に星を作る試み。

? 光の行きと帰りで歪められる効果はどう考えるの?

= 行きと帰りでまったく同じ歪みの効果だと考えている。

? 屈折率を変えているのは何?

= 密度 (& 温度)

7. 直接観測 2

コロナグラフとは？

明るい天体の近くの暗い天体（円盤や惑星）を調べるための工夫

コロナグラフの歴史

Coronagraphy とは？：

画像として明るい天体とその近傍の天体の光子を区別する
本来は **Nulling** や干渉計技術も含まれる。

- | リヨ (Lyot) のコロナグラフ(1932)
- | アポダイゼーション (apodized apertures; Jacquinot, 1953)
- | 地上からの補償光学ありコロナグラフ(~90s)
- | 位相マスク(Roddier 1997)
- | さまざまなコロナグラフ (4 分割, PIAA コロナグラフ)

最初の発見例

β Pic の円盤の発見 (Smith & Terrile 1984)

Golimowski et al. (1992)

Heap et al. (2000)

円盤が傾いていることから惑星の存在を示唆。

| Tamura et al. (2005)

| Subaru + CIAO

| K-band

| 0.8" mask

*** Adaptive optics**

*** Coronagraph**

*** Polarimetry**

Lyot corona graph

単純に恒星の像をマスクするだけでなく、
マスクのエッジによる回折光も遮断する。
->よりコントラストを大きくすることができる

Image-plane coronagraph simulation

4 quadrant phase mask coronagraph

焦点面の遮光マスクの代わりに位相マスクを用いる
(Roddier & Roddier 1997)
8分割マスク (Murakami+08,+10)がさらに良い

Shaped-pupil mask

部分的にコントラストを高める。
x軸上に惑星があれば光コントラストで観測可能。
y軸上だとうまくない。

Pupil Mapping (aka PIAA)

主星の広がり光学系で一点に集める。
10pc離れた太陽系の地球を理論上撮像可能
実験室テストにて： 10^{10} のコントラストが得られるように

地上観測の現状

なぜ直接撮像か？

- ・間接法で得にくい惑星の情報を得る
 - ・光度
 - ・カラー
 - ・スペクトル
- ・従って以下の情報も
 - ・温度
 - ・大気組成
- ・RV法に比べて**外側の惑星**の情報が得やすい
- ・RV法で観測しにくい天体（若い星・重い星）に有利
- ・**百聞は一見にしかず**

直接観測の当初のサイエンスゴール

I 惑星形成理論：コア集積モデル、重力不安定性（ハイブリッド、惑星散乱？）

I 外側の惑星の検出が鍵

I とくに、M型星のコア集積の時間は遅すぎるので、惑星は無いはず

I 「直接撮像」

I ドップラー法では時間がかかりすぎる

I 質量・周期

I 1-20MJUP, $P < 2000\text{yr}$, $r = 0.1-1.5''$

巨大惑星の撮像？その1

A Candidate Protoplanet in the Taurus Star-forming Region

Terebey+1998

- おうし座原始星の伴星は原始惑星？
 - HST/NICMOS
 - 主星：TMR-1(IRAS04361+2547)クラスI天体、原始星連星
 - 主星年齢 $\sim 10^5$ 年 \Rightarrow 2-5MJ
 - それほど早期に惑星形成？
- >分光の結果 背景星と結論

巨大惑星？その2

2005年頃の直接観測手法の展開の例として巨大惑星候補の直接撮像に関する2つの論文の紹介

Evidence for a co-moving sub-stellar companion of GQ Lup

by Neuhäuser, Guenther, Wuchterl et al. 2005

\Rightarrow 若い褐色矮星と呼ぶべき

A giant planet candidate near a young brown dwarf

by Chauvin, Lagrange, Dumas et al. 2004

\Rightarrow 褐色矮星の二重星の一種と考えるべき

GQ Lup 主星

u 15h56m43.0s -35o39'53" (J2000)

u =Sz75=HRC250

u Lupus I 分子雲(距離 140 pc)

u (classical) T Tauri star

u K7eV

u mid- and far-IR excess

u mm continuum (SEST)

u 38mJy@1.3mm(0.004Mo disk)

u soft and hard X-ray emission

u variable but low polarization

u K=7.1 mag; L=6.1 mag

u $A_v=0.4$ mag

u GQ Lup, T タウリ型星

u 主星・伴星距離=0.73" (102 AU)

u $K_s=13.1$ mag ($\Delta=6.0$ mag); $K-L'=1.4$ mag (L2-L7)

背景星の排除- astrometry

u common proper motion confirmed

主星と同じ固有運動か

u GQ Lup A PM

u $\mu\alpha=-27$ mas/yr

u $\mu\delta=-14$ mas/yr

u 5σ : NACO-CIAO

u 7σ : NACO-HST

背景星の排除- spectroscopy

水の吸収線の深さを調べる

u K1 spectral index

u 0.13-0.39

u K9 L3

u H₂O-D ratio

u 0.67-0.89

u L2-L7

金属線の深さ

u NaI doublet

u $W < 2\text{\AA}$

u really? looks deeper to me

u M9 or later

u CO index

u ~0.86

u M6-L0

⇒ M9-L4

note that this does not directly translate to temperatures for young objects

バンド吸収などによりスペクトルのピークの判別が見つからないのでスペクトルタイプが直ちに表面温度に換算できるわけではない。

明るさからの質量推定

u mag, age, distance + theoretical model

u Teff: not well constrained

u Teff=1600-2500 K

u $g \sim 2.5$

u $\log(L/L_{\odot}) = -2.37$

Note that planetary masses are only for new theory or for uncertain T/age use!

? RV でパラメータの制限はできないのか?

= 若い星だから RV 観測には不向きなので難しい。

これらの推定値はモデルの不定性もあってちゃんと質量を推定することが難しい。

超低質量星の進化モデルと質量不定性

けっこう多い

Burrows + 1997

D'Antona&Mazzitelli 1997,1998

Lyon Models

Baraffe+1998

Chabrier+2000

Wunchterl&Tcharnuter 2003

Hot vs. Cold star models

惑星起源の褐色矮星のストーリーから推定する

Marley+2007

Predicts smaller cooler, fainter planets

重力不安定スタート->Hot start

惑星起源スタート->cold start

最終的には冷えるのは変わらないが、若いころの温度が数ケタ異なる

2MASS1207

褐色矮星周りの惑星発見

赤外線を使った補償光学を使用

| 2MASSWJ 1207334-39325

| 53 pc

| 5-10 Myr-old 24 MJup primary

| $T_{\text{eff}} \sim 1600\text{K}$, 8 MJup companion

マスカかこんなに小さい惑星起源の天体は考えにくい。

連星？

| Chauvin et al. (2004)

2005年に巨大惑星まであと一歩まで迫ったすばる : DH Tau

u惑星のように暗い伴星候補がすばるサーベイで見つかった

«2.4 秒角(330 AU 離れた H=15 等級の星)

«背景の星では無い

«スペクトルを調べると普通の恒星より温度が低いか？

«木星質量の 10-40 倍の若い褐色矮星と結論

«しかし、年齢を仮定すると約 10 木星質量

注目すべき系外惑星系 : ϵ Eri

| K2V, 0.83Mo V=3.7 mag

| 3.2pc, 0.7Gyr

| ϵ Eri b: 1.55MJ, 3.39AU, 2500days

| HST/FGS astrometry

| Deep direct imaging

直接撮像ではまだ見つかっていない。

質問タイム

? 質量をみつめる方法をもう一回教えて欲しい

=スペクトルをとる。

一番似ている褐色矮星のテンプレートスペクトルを見つけて、温度を推定

?じゃあテンプレートの温度はどう決める?

=電子の縮退で支えている (1 RJ)と分かっているので

フラックスから温度を決定できる

?温度を黒体で近似できないのはどのくらいから?

=M型になるともはや合わない

8. 直接観測 3

2008-2009 ついに直接観察に成功！！

最近、いよいよ直接撮像成功例が出始めた！！

明るい星を隠して惑星を探す 新装置完成 : HiCIAO

望遠鏡自体は進化しなくても観測装置の進化/改訂で精度は UP する！

例：パロマー望遠鏡は 61 周年！まだまだ元気！

すばる望遠鏡も HiCIAO で進化！！

HiCIAO Concept

光の経路准に module を簡単に紹介…

すばる望遠鏡

補償光学 module : 現在 188 素子, 次世代 32×32

コロナグラフ module

差分撮像装置 : new 光路を 2or4 個に分けて観測

何が楽しいかは後で！

IR カメラ module : 2040×2040 素子+読み出し IC

Observation mode of HiCIAO

◎ Direct Imaging (DI) mode

観測した画像と、それを 180 度回転させた画像を引き算

星が完全に対象なら星の像は消えて惑星の像のみが残る

実際には残差があり近傍惑星は見えない…そこで以下の工夫

◎ Polarization Differential Imaging (PDI) mode

偏光ごとに 2 個の経路に分けて引き算

同時に来た光なので PSF が同じ=キレイに星が引き算できる！

残るのは伴星の偏光が見える ただし視野が 1/2

◎ Spectral Differential Imaging (SDI) mode

波長ごとに 4 個の経路に分けて引き算

これも同時に来た光なので PSF が同じ=キレイに星が引き算できる！

残るのは伴星の吸収スペクトルが見える ただし視野は 1/4

◎ Angular Differential Imaging (ADI) mode

時間的に像を回しながら撮り、時間平均した物を引き算する

時間とともに変わらない部分は引ける

視野が広いまま！

など新しい mode を採用している

Q：SDI は 4 個に分けなくてもいいのでは？

A：確かにそうだけど、スペクトルをとりたいので 4 個くらい欲しいので、今は 4 個を採用している。

HiCIAO/AO188 contrast

CiAO 時代より約 1 桁高い精度で観測できる！ライバル VLT/SDI よりも！

直接観測には 0.1-1 秒角の範囲が重要 この範囲では 14~15 等まで行ける！

Next step: extreme AO

実験室では次世代の AO 32×32 素子を開発中

<0.1 秒角もターゲットに出来るようになる！

世界発、太陽型の星をめぐる惑星を撮像

HiCIAO で惑星候補天体をとらえた！！

GJ758 0.97Msun, 50 光年, 可視 5 等, [Fe/H]=0.18

IR=惑星放射が見えている！

後で話すが直接撮像されているモノの中では年をとっている方

国内外で反響あり！

Time 誌の 2009 年科学的発見 Top10 にも選ばれた！！スポ日、新華社等も

マスコミの注目はやはり地球型惑星。

Q：他の情報は？

A：スペクトルはとりましたが、まだ論文にはしてない。モデルからくる不定性があるって、データから物理量に変換するのが難しい。

Q：惑星「候補」となっているのは？

A：年齢の不定性をちゃんと論文に書いてしまったせいで惑星「候補」。他の直接撮像より惑星らしいとは思ってる笑

注目すべき系外惑星系：Formalhaut

A 型星 2.06Msun, ベガ型星の典型例

Formalhaut b:115AU,3Mj (ダストリングの力学モデルから予想) Kalas+2008

可視光で明るく赤外で暗い… ダストで覆われて星の散乱光を見てる？

→ 惑星放射から質量を見積もることは出来ない！力学モデルを採用

115AU…かなり遠い！重力不安定？

Q：反射で見えているなら満ち欠けは？

A：あるかも知れないけど公転時間が長いので…

注目すべき系外惑星系：beta Pic

A型星 1.8Msun, ベガ型星の典型例

ワープしたダスト円盤の存在からもともと惑星が予想されていた

beta Pic b: 8Mj? 12AU Lagrange+10

2003年と2009年で受かった その間は受からなかった！

edge on だったので軌道運動して受からなかった

赤外線で見える=惑星自身の放射

Q：周期と軌道説はコンシステント？

A：~12年周期なのでコンシステント

注目すべき系外惑星系：HR8799

一番驚いた天体！3個惑星候補！追加テストでも裏付けられてる！

A型星 1.5Msun, ベガ型星, HR8799 b,c,d Marois+08

3個とも~10Mjで25-70AUくらい

実は2002年のすばるのデータにも写ってた…

分光観測もしたがまだいいデータはとれない

もう少しで意味あるデータがとれるようになりそう

Imaging of exoplanets around A stars

ベガ型星には惑星はよくあるのかもしれない…

天体名	惑星	質量	軌道半径	距離
HR8799a		1.5Msun		128 ly
	HR8799b	7Mj	68AU	
	HR8799c	10Mj	38AU	
	HR8799d	10Mj	24AU	
Formalhaut a		2.1Msun		25 ly

	Formalhaut b	<3Mj?	115AU	
β Pic a		1.8Msun		63 ly
	β Pic c	8Mj	12AU	

Formalhaut b はダストリングカ学モデルから質量を求めたので ?マーク付き

Directly imaged Planets: G vs. A stars

	GJ758	HR8799
distance	15.5pc	40pc
age	7×10^8 yr	6×10^7 yr
primary	0.97Msun(solar-T,G-type)	1.5Msun(A-type)
b	10Mj(max40), 29AU	7Mj(max36), 68AU
c ?	12Mj(max47), 18AU	10Mj(max50), 38AU
d		10Mj(max50), 24AU

Q : 逆に向こうの惑星にすばるクラスの望遠鏡があったら地球は見える？

A : 地球の 20 年後くらいの技術があれば見えるかも知れない！

9. 直接観測 4

SEEDS – Strategic Exploration of Exoplanets and Disk with Subaru

すばる望遠鏡の戦略的観測！5年で120夜

今までの装置だと>100AU…これからは<50AU~太陽系スケール！！

惑星だけでなく生まれる現場=円盤の観測も進める！

現在進行中…

SEEDS – Where should we study by direct imaging technique?

0.5-2AU, 1-15Mj

まずは巨大惑星がターゲット

Planets Formation Mechanism

形成理論との絡み/制約

◎スタンダードモデル(コアアクリションモデル)

~10AUなら形成可能だが、100AUでは時間がかかりすぎて無理？

GJ758bは説明できない？ 形成後移動することもありえる

◎重力不安定モデル

コアアクリションより外に形成しやすい。

ただし重く大きな円盤を仮定する！

他にも惑星散乱理論や星形成の1部としての惑星形成理論

これらに対して観測から制約をかける！

Direct Imaged “Planets” vs. Age

Schmidt+09 多くは10Mjくらいの天体を見つけている

Imaging of transitional disk gap of LkCa 15 in reflected light

円盤観測についても論文が出ている Thalmann, ..., Tamura 2010

SEDで内側ない(?)円盤=transitional disk

→ 内側が直接撮像できるようになってきている！

内側の壁が見えて来たが、この半年では惑星>10Mjは見つかっていない

Closest image of AB Aur Disk

Hashimoto, Tamura, Muto et al.2010

偏光を利用してより内側まで見えて来ている！ ただし偏光度×強度イメージ

8AU レゾリューション！ 初の<40AU イメージング

※公開映像だから拡大図はまた後日…

10. 将来計画

第二の地球 木星型惑星から地球型惑星へのステップ

Keplar is detecting Earth-like planets

Keplar は既に~100 個の地球型惑星を見つけている！らしい

Is there anything Subaru can do after Kepler?

Yes. Keplar planets are not suitable for imaging with 30m telescopes!

Keplar は遠くの惑星を見てるのでフォローアップが難しい…

そこを狙って！

Subaru's next step:

Earth-like planet hunting with IR Doppler Instrument

近傍には M 型星があふれている→ IR によるドップラー法！！

しかも、M 型星の HZ は中心星に近いので、ドップラー法向き！

→ 「M 型星周り地球型惑星」をターゲットに！TMT で直接撮像も可能か

Q：近くても M 型星はくらいから個数が多くても観測できる個数は少ないのでは？

A：それでも十分多い

周波数コムと Astro Comb

安定したビームをフィルターに通し基準を作る（ヨードセルの代わり）

コメント：地球観測でも最近よく聞くようになってきた！

Subaru8m: a finder, TMT30m:an imager

すばる IR ドップラーで地球型惑星を探し、TMT で直接撮像を狙う！！

M 型星はコントラスト 1 桁落ちるので TMT なら直接撮像も狙える！

究極：太陽系の地球のような惑星を探せ

生命存在の指標となる惑星大気の特徴をとらえる

オゾン、水、二酸化炭素、メタンなど

地球が外からどう見えるか？ → 月に映った地球照(ES)を観測する

スペース赤外観測は背景放射が圧倒的に有利

地上では大気雑音や熱放射が邪魔だが、スペースではそれがない！
特に $\sim 10\mu\text{m}$ では顕著

スペースコロナグラフ

スペースは大気揺らぎはないが、光学機器の精度の方が追いついていない…
やはり AO は必要！！「どんなヒトでも美人に映る鏡」笑

James Webb Space Telescope: JWST

HST の後継機 近赤外線最適化スペース望遠鏡

6m, 30K, 2014 年打ち上げ予定

若い巨星狙い、地球型惑星検出向きではない

簡単な分光は出来る

解像度はすばると変わらないが、大気揺らぎなく感度が良い

Q: 若い巨星っていうのはどれくらい若い？

A: 1Gyr くらい

Q: 軌道は？

A: L2 ポイント

GSMT (TMT&GMT) 地上の計画！

Giant Segmented Mirror Telescope

推奨された大規模計画の中で第3位

1位は全天サーベイ用 8m 望遠鏡 LSST

TMT (Thirty Meter Telescope)

2011 建設予定、2018 ファーストライト予定

感度は 8m と比べて AO ありで 200 倍！！

TMT による系外惑星撮像：PFI

あくまで木星型惑星が目標という提案書

科学的目的

星形成領域の若い巨大惑星（熱放射）

G 型星周りの巨大惑星（反射）

円盤

TMT による系外惑星撮像 : SEIT [Second-Earth Imager for TMT]

M 型星周りの地球型惑星撮像！やりたい

30m 望遠鏡だったらコントラスト・解像度いける

HZ も狙える

SPICA

日本の計画 遠・中間赤外線

3.2m, 2018 年打ち上げ予定

MIR コロナグラフ - 年をとった(~5Gyr)巨大惑星検出と分光器

地球型惑星向きではない

G 型星周りの第二の地球をどう「写す」か？

直接検出は難しい

20pc で 1AU を解像したいなら…

0.5 μ m \rightarrow 7m クラス 可視光コロナグラフ望遠鏡

10 μ m \rightarrow 100m クラス 赤外線干渉計

TPF-C [Terrestrial Planet Finder – Coronagraph]

一枚鏡 8m \times 3.5m

スペースコロナグラフで 10^4 コントラスト

ただ無期延期…

中口径スペースコロナグラフ

観測波長 0.4-0.9 μ m, 高感度波面制御 + 高効率のコロナグラフ

口径 1.2m の場合 木星型惑星検出 FGK ターゲット 10 個

口径 2m の場合 地球型惑星検出 FGK ターゲット 67 個

新案 : 外部オカルター

汎用宇宙望遠鏡の外に影を作るための外部オカルターを飛ばす！

宇宙で星-望遠鏡の間にちゃんと移動できるかが難点

干渉計とは

1 枚の大きな望遠鏡では作れないので複数の望遠鏡を使って高解像度

電波では普通に使われているので、それを IR に応用

ナール干渉計とは

干渉計で恒星だけ打ち消して惑星だけ残す！ 1978 に提唱されてる

地上干渉計: VLTI, Keck, LBT, OHANA

すばるは 1 台だから干渉計にはならないが、

ヨーロッパの望遠鏡では既に干渉計もやられてる

LBL: 1 つの貨台の上に 2 個の鏡が乗っている干渉計専用望遠鏡

OHANA: すばるでも他の望遠鏡とファイバーを利用して干渉計として使える！

スペース干渉計

Darwin Interferometer

Structurally-Connected Interferometer

Formation-Flying Interferometer

ただどれの計画も今は動いていない…

地球のスペクトルモデル

最終的には可視でも赤外でもスペクトルをとりたい！

惑星の質量・半径, 大気量などを特定したい

ただ表面 (陸, 海, 森, 雲など), どの時代を見てるかなど難しい

可能性と問題点

◎ 間接法による第 2 の地球の候補天体の検出は…

- ・ トランジット法は Kepler で実現する
- ・ ドップラー法はどの種の星のどの程度軽い惑星まで測定できるのか不明
- ・ 重力レンズも可能性はあるか、フォローアップが難しい

◎ スペース可視光コロナグラフ or スペース赤外線コロナグラフの競争は続くが時間はかかる…

◎ どちらの場合も候補天体の検出から、第 2 の地球の確認までには、まだまだ道のりがありそう。特にスペクトルの理解は詳細なモデルとの比較が不可欠だろう！

◎ 第 2 の地球探し=点 から 第 2 の地球の地表=面！！

Summary

装置開発が大事！！

直接撮像が可能な時代になってきた！ SEEDS に期待！

すばるの生きる道は IR ドップラーでの M 型星周り地球型惑星！

Q：系外衛星探しは？リングは？

A：Kepler ならトランジットで見える能力はある

Q：距離を変えられない干渉計ではどうやって像を撮る？

A：回転させて角度を変えることで解決

Q：高等生命を見なければ人間が出す何かを観測したら？

A：生命探しは何個やったら当たるか分からない…今やってみるみたいに期待値が現実的なことからやっ
ていく。

Q：アストロコム+可視は有効？

A：星表面活動で先に限界がくるからあまり意味がない。他分野なら

Q：IR ドップラーのライバルは？

A：今のところ IR ドップラーで 1m/s はまだない

Q：系外惑星探査技術を系内惑星研究への何かフィードバックは出来ないか？

A：系外は暗い天体の積分量が知りたい。系内は分解したいろいろな情報が知りたいはず。だからその
まま使うのは難しいかも。

Q：若いヒトたちは育っている？

A：増えていると思う。装置開発をメインでやっているヒトは外から見えにくいかもしれないが。