



山田研究室 M1
藤井 淳

第119回雑誌会

EVIDENCE FOR A LONG-PERIOD
ORBITING ϵ ERIDANI
HATZES ET AL. 2000

Contents

1. Introduction
2. Data Sets
3. Estimation of Orbital Elements
4. Periodogram Analysis
5. Ca II H and K Measurements
6. Discussion
7. Summary

1. Introduction

❖視線速度法-基本-

間接法の中でも最も多くの成果を挙げている検出法。
惑星を持つ恒星が惑星との質量中心を公転運動する。この時生じる視線速度の周期的な揺れは、恒星のスペクトルにおける吸収線の周期的なドップラーシフトとして観測される。

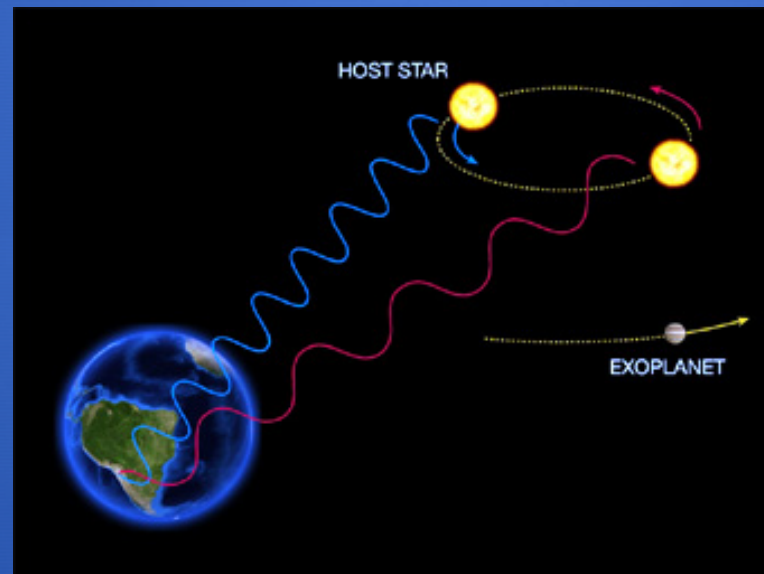


Diagram showing the Radial-Velocity method of detection

CREDIT

European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere

1. Introduction

❖ 視線速度法-得られる惑星の情報-

- 惑星の軌道周期: P
- 惑星の軌道長半径: a
- 惑星の軌道離心率: e
- 惑星の質量: $M_p \sin i$ (但し、 $\sin i$ の不定性が残る)
→軌道傾斜角 i はトランジット法、アストロメトリ法から求まる

❖ 視線速度法-高精度を得る条件-

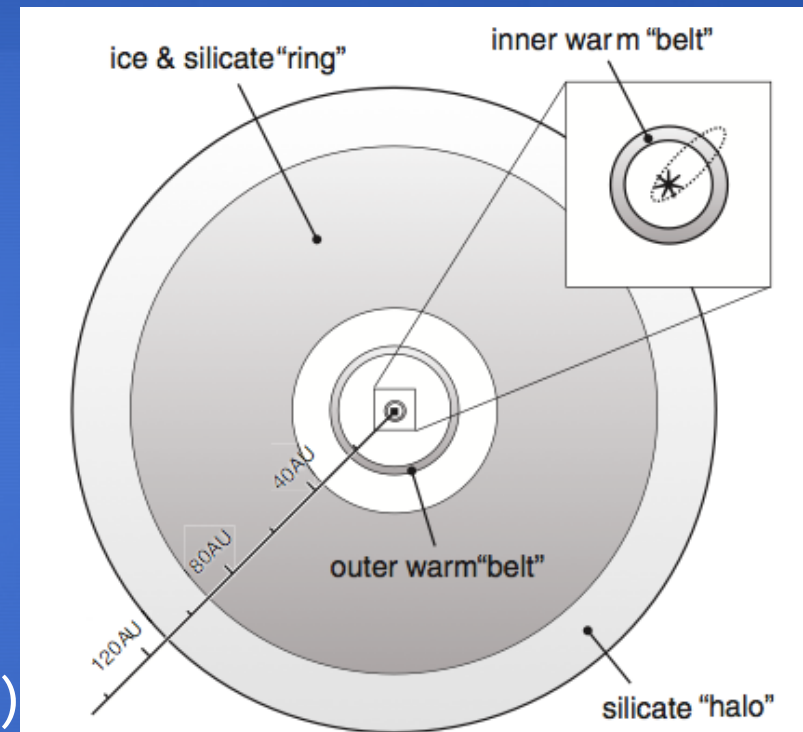
- 十分な吸収線の数&吸収線の狭さ
- 光球の安定性
- 実視等級が明るい星

ターゲットは、近傍のF,G,K型星

1. Introduction

❖ ϵ Eridani (HR 1084)

- 距離 : 3.2 pc
- スペクトル型 : K₂V型
- 実視等級 : $V = 3.7$
- 質量 : $0.85M_{\odot}$
- 特徴
 - high chromospheric activity
(Gray & Baliunas 1995)
→ 1Gyr未満の比較的若い星
(Soderblom & Däppen 1989)
 - dusty ringの存在
(Greaves et al. 1998)
→ 最近、より複雑なdusty ring modelも
(Backman et al. 2009)



1. Introduction

□ 視線速度測定に関する先行研究

- ・ Walker et al. (1995)
11年間の視線速度観測から、速度振幅15m/s, 周期10年の変動の痕跡
- ・ Cumming, Marcy, Butler (1999)
11年間の視線速度データを解析し、速度振幅15m/s, 周期6.9年の有意な変動を確認
→ 星の活動性に起因した変動?



Walker et al. (1995)とCumming, Marcy, Butler (1999)のデータに他のサーベイのデータを加え、1980.8-2000.0の長期にわたる ϵ Eriの視線速度測定からその周期性を確認する！

2. Data sets

❖ 1980年~2000年の視線速度測定データ

- ・ 4つの独立なデータセット(McD, CFHT, Lick, ESO)

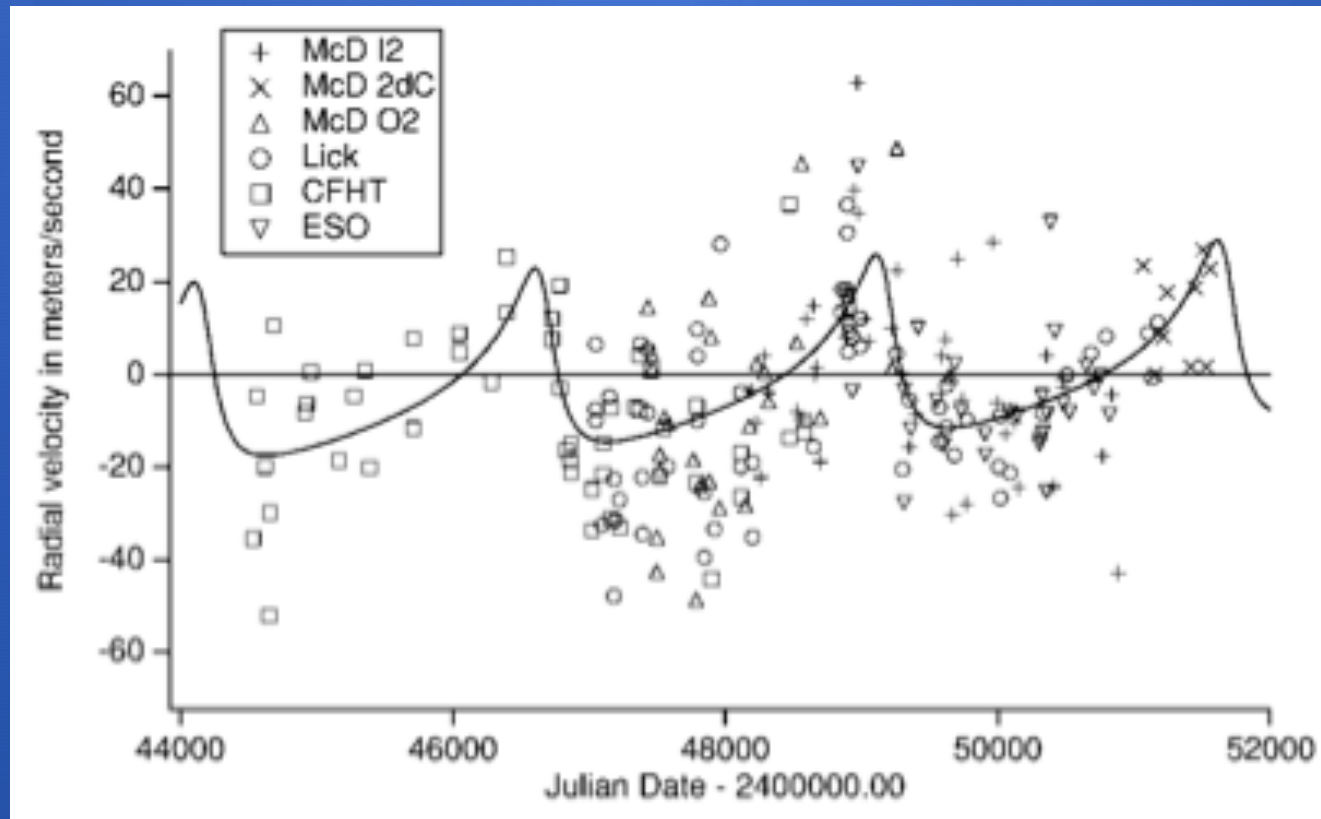
TABLE 1
THE DATA SETS

Data Set	Coverage (yr)	Technique	N	σ_{RV} (m s ⁻¹)
McD-O ₂	1988.74–1994.81	Telluric	29	22.8
McD-I ₂	1990.78–1998.07	Iodine cell	46	16.5
McD-2dC	1998.69–2000.03	Iodine cell	9	11.4
CFHT	1980.81–1991.88	HF cell	51	14.5
Lick	1987.69–1998.99	Iodine cell	62	14.0
ESO	1992.84–1998.02	Iodine cell	28	13.9

3. Estimation of Orbital Elements

❖ 視線速度曲線へのフィット

GaussFit モデルを用いて軌道要素をパラメータとした理論曲線を最小二乗法とロバスト推定の両方で視線速度データとフィット



3. Estimation of Orbital Elements

❖ 軌道要素の推定

TABLE 2		
ORBITAL ELEMENTS OF THE PLANET AROUND ϵ ERIDANI		
Element	Robust Estimation	Least Squares
Period (days)	2502.1 ± 20.1	2503.5 ± 27.1
T (JD)	$2,449,194.8 \pm 13.5$	$2,449,180.62 \pm 17.2$
Eccentricity	0.608 ± 0.041	0.584 ± 0.043
ω (deg)	48.9 ± 4.1	45.5 ± 4.3
$K1$ (m s^{-1})	19.0 ± 1.7	19.0 ± 1.6
$f(m)$ ($\times 10^{-9} M_{\odot}$)	0.886 ± 0.248	0.943 ± 0.266
Slope ($\text{m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	0.42 ± 0.20	0.44 ± 0.19

σ_{RV} (m s^{-1})
22.8
16.5
11.4
14.5
14.0
13.9

Check Point!!

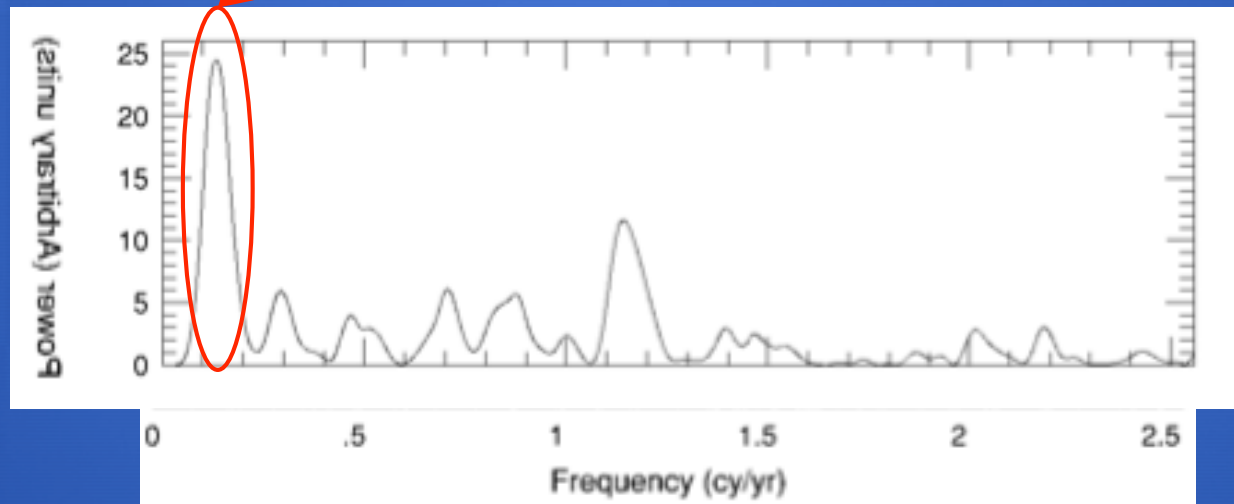
- 高い離心率
- 速度振幅とrms scatter
- 視線速度曲線でのスロープ

4. Periodogram Analysis

❖ Lomb-Scargle Periodogram (Scargle 1982)

得られた視線速度データに有意な周期性があるかを調べる。

周期7.13年(2603日)に有意なピーク



GaussFitの見積もり ($P=6.9$ 年) と consistent な周期

4. Periodogram Analysis

❖ 周期のFalse Alarm Probability

Periodogramはノイズに弱い。

たとえ、有意なピークがあっても真にシグナルの周期性を示しているとは限らない。

Scargle 1982 のPeriodogram

観測データから得られた強度がある強度 z_0 を超えて検出された時、この検出が p_0 (False Alarm Probability)の小さい確率で間違っているようなthreshold z_0 を定義できる。

先ほどのピーク強度でのFAPは、、、 $p_0 = 5 \times 10^{-9}\%$

周期7.13年は恒星の視線速度変動の周期性

5. Ca II H and K Measurements

❖ Ca II の S-index

Ca II のH線(396.8nm)とK線(393.4nm)は恒星表面の磁場が集中する領域で観測される。

→H線,K線は磁場が存在する領域や磁場の強さの分光学的な指標

•S-indexの定義

$$S = \alpha \frac{H + K}{V + R}$$

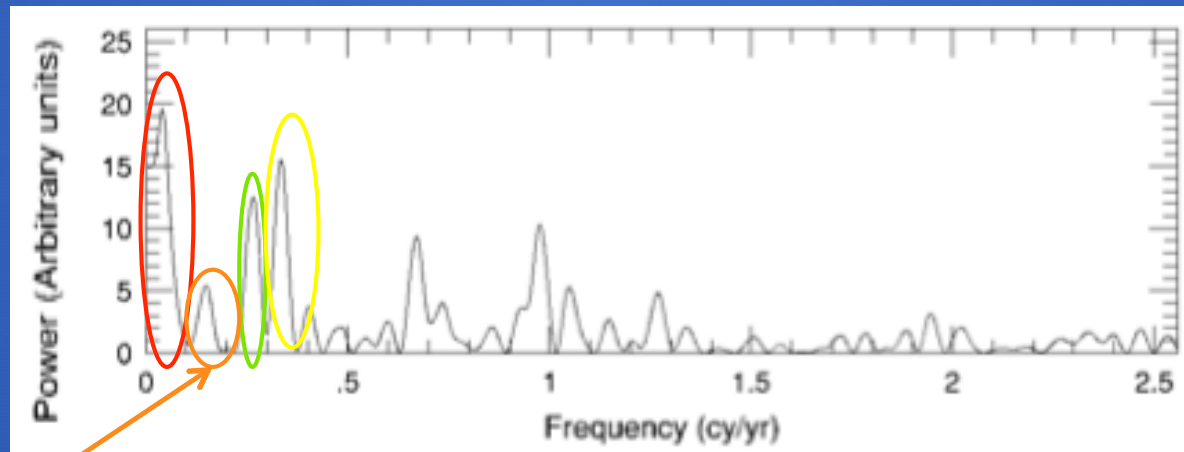
Stellar magnetic activityの指標であるCa II S-indexの変動の周期性が...

視線速度変動の周期性と $\left\{ \begin{array}{ll} \text{一致} \cdot \cdot \cdot & \text{Stellar activityの可能性大} \\ \text{不一致} \cdot \cdot \cdot & \text{惑星仮説の可能性大} \end{array} \right.$

5. Ca II H and K Measurements

❖ Ca II の S-index

S-indexの変動の周期性もPeriodogramで調べてみる。



視線速度変動
の周期と近い
周期6.78年
(FAP~16%)

TABLE 3
Ca II ANALYSIS

Parameter	Peak 1	Peak 2	Peak 3
Frequency (cycles day ⁻¹)	0.049 ± 0.004	0.334 ± 0.004	0.265 ± 0.005
Period (yr)	20.38	2.99	3.77
Power	18.5	15.6	12.8
FAP (%)	3.9×10^{-5}	0.0006	0.01
Amplitude	0.02	0.02	0.02

6. Discussion

❖ Planetary companion or stellar activity ?

- 観測された ϵ Eri の視線速度と S-index の periodogram 解析
- GaussFit モデルを用いた視線速度へのフィットから得られる周期

観測された視線速度変動は **Stellar activity** よりも
惑星の存在 が原因という可能性が高い

❖ Relationship between dusty ring and candidate planet

- 今回検出された惑星が Dusty ring の中心空洞のダストの吹き飛ばしに一役買っている？
- 視線速度曲線の slope (0.4 m/s)

Dusty ring の inner radius (30 AU) に質量 $2M_J$ の惑星があればこの slope を再現可能

6. Discussion

❖ Candidate Planet Physical Quantity

- Estimation of the true mass

ϵ Eriの質量 $0.85M_{\odot}$ を仮定すると、 $M_p \sin i = 0.86M_J$
 ϵ Eriの極軸の傾き($i=30^\circ$)を惑星の軌道傾斜角と等しいと仮定する

惑星の真の質量は、 $1.7M_J$ と推定

- High eccentricity

考えられる解釈は3つ

1. 連星との相互作用
2. 円盤との相互作用
3. 2つ、又はそれ以上の巨大惑星同士による散乱、または合体

**現時点ではまだどの解釈が候補惑星の高
離心率を説明するか特定できない**

6. Discussion

❖ Additional Observation

i. Direct Imaging

主星と惑星の角距離は $1''$ (3.2AU) + ϵ Eriの近傍性(3.2pc)+younger star

補償光学込みの地上の撮像観測、宇宙からの撮像で惑星からの光は検出可能

ii. Astrometric measurements

候補惑星によって生じる ϵ Eri の astrometric perturbation : $\sim 2\text{mas}$

HSTやVLTIによる
astrometric measurementで検出可能

7. Summary

- ❖ 1980.8-2000.0の期間に及ぶ4つの独立なデータセットから成る ϵ Eriの視線速度測定を提示。
- ❖ Periodogram解析から、周期6.9年の視線速度の有意な変動を確認した。
- ❖ 同様の解析からStellar magnetic activityの指標となるS-indexの変動の周期性は、視線速度変動の周期性とは有意に異なる。
- ❖ 視線速度変動から高離心率($e=0.6$)の最小質量 $0.86M_J$ の惑星の存在が示唆される。
- ❖ 予想される惑星と ϵ Eriの角距離と天体の近接性、系の年齢を考えると、この天体の惑星は補償光学を用いて直接撮像できるだろう。

Appendix

❖ 視線速度の理論曲線

$$V = \gamma + K_1[\cos(\nu + \omega) + e \cos \omega]$$

K_1 : 速度振幅 γ : 系の重心速度 ν : 真近点角

ω : 近点引数 e : 軌道離心率

$$\frac{2\pi}{P}(t - T) = E - e \sin E$$

$$\tan \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2}$$

P : 軌道周期 T : 近点通過時間

E : 離心近点角

Appendix

❖ 視線速度法による惑星の最小質量の決定

実際の連星系のmass functionの定義

$$\frac{(m_p \sin i)^3}{(M + m_p)^2} = \frac{P}{2\pi G} K_1^3 (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}$$

$$f(m_p) \equiv (m_p \sin i)^3 \approx \frac{P}{2\pi G} K_1^3 M^2 (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}$$

$$m_p \sin i \approx \left(\frac{P}{2\pi G}\right)^{\frac{1}{3}} K_1 M^{\frac{2}{3}} \sqrt{1 - e^2}$$

M : 主星の質量 m_p : 惑星の質量 ($m_p \ll M$)

Hatzes et al. (2000) では、Table.2でこの形で $f(m)$ と表している

Appendix

❖ Periodogram の定義

• 古典的な定義

$$\begin{aligned} P_V(\omega) &= \frac{1}{N_0} |FT_V(\omega)|^2 \\ &= \frac{1}{N_0} \left| \sum_{j=1}^{N_0} V(t_j) \exp(-i\omega t_j) \right|^2 \\ &= \frac{1}{N_0} \left[\left(\sum_j V(t_j) \cos \omega t_j \right)^2 + \left(\sum_j V(t_j) \sin \omega t_j \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$FT_V(\omega)$: $V(\omega)$ の離散型フーリエ変換

N_0 : データの測定数

Appendix

❖ Periodogram の定義

• Scargle 1982 の定義

$$P_V(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sum_j V(t_j) \cos \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{[\sum_j V(t_j) \sin \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}$$

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\left(\sum_j \sin 2\omega\tau\right)}{\left(\sum_j \cos 2\omega\tau\right)}$$

• FAP の定義

$$p_0 = 1 - (1 - e^{-z_0})^N$$

$$N = -6.362 + 1.193N_0 + 0.00098N_0$$

p_0 : FAP(False Alarm Probability)

z_0 : Periodogram の強度

N : 独立と見なせる周波数の数 (式は Horne & Baliunas 1986 より)