

分光観測によって発見された連星系 HD139461 における「惑星」の存在 について

中島 健太 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

近年、系外惑星が大量に見つかるようになってきており、その多くは太陽系の惑星とは様相が異なっている。そのため、標準的なコアアクリションモデルや古典的な重力不安定性モデルで簡単には説明できないことが議論されている。また、これまでの惑星形成理論であまり考えられてこなかった連星系をなす星の周りでも系外惑星は発見されている。HD139461 は分光観測により連星系であることが分かり、連星系の軌道長半径は 2.05AU、離心率は 0.83 と求められた (Katoh et al. 2013)。この HD139461 の連星系の視線速度の変化には、二体問題では説明できないようなズレが存在する。このズレは周期的に変化しており、主星 (HD139461A) の周りには三つ目の天体、「惑星」が存在することが示唆されている。さらに加藤らはこのズレを「惑星」が主星の周りをケプラー軌道で公転しているとの仮定の上で解析し、この「惑星」は連星系の主星の周りを軌道長半径 0.179AU、離心率が 0.31 の軌道で公転しており、質量が最低でも 0.7 木星質量程度のカス巨星であると見積もった。しかし、この結果に従うと「惑星」と伴星の軌道が非常に接近するため、力学的に不安定なことが予想される。つまり、視線速度のズレを解析する上で行ったように、伴星の重力を無視したケプラー軌道での解析から「惑星」の軌道は大幅に変更されるだろう。本研究では、伴星の重力も考慮した数値シミュレーションを行うことで、視線速度のズレを説明するにはどのような「惑星」が必要なのか制限をつけることを目指す。

1 イントロダクション

近年多くの系外惑星が見つかるようになってきており、その中には連星系をなす星の周りを公転する惑星の存在が示唆されている。Katoh et al.(2013) では、連星系 HD139461AB (主星 HD139461A、伴星 HD139461B) をドップラーシフト観測によって詳細に調べている。この論文では、HD139461AB の軌道長半径を 2.05AU、離心率を 0.83 と結論付け、主星の質量は 1.25 太陽質量、伴星の質量は 0.35 太陽質量と求めている。また、主星 HD139461A の視線速度の変化には伴星との二体問題だけでは説明できないズレが存在することが分かった。このズレは周期的に変化しており、その周期は 24.585 日である。このことにより、この連星系の周りには三つ目の天体「惑星」が存在することが示唆された。加藤らはこの三体目の「惑星」は主星の周りを軌道長半径 0.179AU、離心率 0.31 の軌道を描いて公転しており、その質量は最低でも 0.7 木星質量程度のカス惑星であると見積もっている。

本論文ではまず、三体目の「惑星」の存在は考え

ずに、主星の視線速度の解析解を求め、Katoh et al.(2013) の観測結果と比較を行う。その上で主星と伴星の二体、さらには三体目の「惑星」を加えた数値シミュレーションを実行して解析を行うことで、視線速度のズレを説明するにはどのような「惑星」が必要なのか制限をつけることを目的とする。

2 方法

2.1 軌道要素

惑星の軌道を解析する上で重要なのが軌道要素である。軌道要素はどのような形の軌道がどの位置にあるのかを与えるパラメータである。

- 軌道長半径 a … 惑星軌道の長半径。
- 軌道離心率 e … 焦点からの距離と、準線までの距離の比。惑星軌道の形を決める。
- 昇交点経度 Ω … 基準面と軌道面の交線 (the line of node) が基準線 (X 軸) となす角。

- 軌道傾斜角 I … 基準面と軌道面のなす角。
- 近日点引数 ω … 近日点の方向と the line of node がなす角。

図 1 は軌道要素のうち、 Ω, I, ω を表したものである。

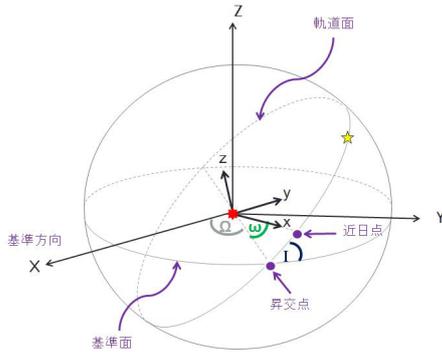


図 1: 惑星軌道要素

惑星の軌道面上の座標 (X, Y) では惑星の位置および速度は以下のように与えられる (Murray&Dermott 1999)。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos f \\ r \sin f \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} v_X \\ v_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{na}{\sqrt{1-e^2}} \sin f \\ \frac{na}{\sqrt{1-e^2}} (e + \cos f) \end{pmatrix} \quad (2)$$

これらを回転行列を用いて Ω, I, ω それぞれについて回転させると、 z 方向が地球とは反対方向の座標となる。ここで、 f は近日点から周回天体がある位置までの角度であり、真近日離角と呼ばれる。 r は a, e, f を用いて、

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos f} \quad (3)$$

と書ける。式 (2) は、式 (1) に (3) を代入して微分することで得られる。式 (2) に現れる n は二体問題の場合の平均運動であり、

$$n = \sqrt{\frac{G(M+m)}{a^3}} \quad (4)$$

と表せる。ここで、 G は重力定数、 M と m はそれぞれ中心星と伴星の質量である。

2.2 視線速度の計算

主星の視線速度を計算する。数値シミュレーションに際して、基準となる座標系の原点を主星 HD139461A の位置にとり、 z 軸を我々から見た視線方向、 x 軸 y 軸を z 軸に垂直に右手系をなすようにとる。数値シミュレーションは原点を主星において計算しているので、主星の視線速度を求めるには重心の座標と速度を知る必要がある。質量を m 、座標を r 、速度を v として、重心の座標は、

$$\mathbf{r}_G = \frac{m_0 \mathbf{r}_0 + m_1 \mathbf{r}_1}{m_0 + m_1} \quad (5)$$

と表せる。以降、添え字 0 は主星 HD139461A を、添え字 1 は伴星 HD139461B を表すものとする。式 (5) を微分すると重心の速度が得られる。

$$\dot{\mathbf{r}}_G = \frac{m_0 \dot{\mathbf{r}}_0 + m_1 \dot{\mathbf{r}}_1}{m_0 + m_1} \quad (6)$$

重心座標系では重心は止まっているので、式 (6)=0 であるから、

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = -\frac{m_0}{m_1} \dot{\mathbf{r}}_0 \quad (7)$$

という関係が導ける。主星を原点とした相対座標 (数値シミュレーションと同じ設定) を \mathbf{R} で表すとすると、

$$\dot{\mathbf{R}}_1 = \dot{\mathbf{r}}_1 - \dot{\mathbf{r}}_0 \quad (8)$$

であるから、式 (7) を (8) に代入して変形することで、

$$\dot{\mathbf{r}}_0 = -\frac{m_1}{m_0 + m_1} \dot{\mathbf{R}}_1 \quad (9)$$

が得られる。式 (9) の z 成分が主星の視線速度である。

二体問題の場合の主星の視線速度の解析解を求める。上記のように z 方向が地球と反対方向なので、式 (2) を軌道要素に応じて回転させることによって得られる二体間の相対速度の z 成分を求める。その結果、

$$v_z = \frac{na \sin I}{\sqrt{1-e^2}} \{ \cos(f + \omega) + e \cos \omega \} \quad (10)$$

となる。式 (10) と (9) から、主星の視線速度の式が導出でき、

$$\begin{aligned} v_{rad} &= -\frac{m_1}{m_0 + m_1} v_z \\ &= -\frac{m_1}{m_0 + m_1} \frac{na \sin I}{\sqrt{1-e^2}} \{ \cos(f + \omega) + e \cos \omega \} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。式 (11) 内の f は、

$$\frac{df}{dt} = \frac{na}{r\sqrt{1-e^2}}(1 + e \cos f) \quad (12)$$

であるから、式 (12) を数値積分して求められる。本研究では、四次のルンゲクッタ法を用いて積分し、式 (11) によって主星の視線速度を解析的に求める。

2.3 三体問題の運動方程式

主星 HD139461A(添え字 0) のまわりを伴星 HD139461B(添え字 1) と三体目の「惑星」(添え字 2) が回っている三体問題を考える。三天体の重心を原点にとった座標系で各天体の運動方程式を書き下すと、

$$\mathbf{a}_0 = Gm_1 \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|^3} + Gm_2 \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0|^3} \quad (13)$$

$$\mathbf{a}_1 = Gm_0 \frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1|^3} + Gm_2 \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^3} \quad (14)$$

$$\mathbf{a}_2 = Gm_0 \frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_2|^3} + Gm_1 \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^3} \quad (15)$$

式 (14)、(15) から式 (13) をそれぞれ引くことで中心星を原点にとった座標系における運動方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= -G(m_0 + m_1) \frac{\mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_1|^3} \\ &\quad - Gm_2 \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^3} - Gm_2 \frac{\mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_2|^3} \\ \mathbf{a}_2 &= -G(m_0 + m_2) \frac{\mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_2|^3} \\ &\quad - Gm_1 \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^3} - Gm_1 \frac{\mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_1|^3} \end{aligned}$$

ここで第一項は主星からの重力、第二項は相互重力、第三項は indirect 項となっている。indirect 項は重心座標系から、加速度運動している主星中心へと座標系を移したことによる慣性力を表わしている。

この方程式を四次のルンゲクッタ法を用いて解くことで、軌道の時間発展を求めることができ、式 (9) によって視線速度の変化が調べられる。

3 結果

まず、三体目の「惑星」の存在は考えずに、連星系 HD139461 の主星と伴星の二体問題の場合について式 (11) を用いて主星の視線速度の解析解を求め、Kato et al.(2013) の観測結果との比較を行った。計算には、軌道長半径 2.05AU、離心率 0.83、近日点引数 106° 、主星の質量は 1.25 太陽質量、伴星の質量は 0.35 太陽質量を用いている。その結果が図 2 である。

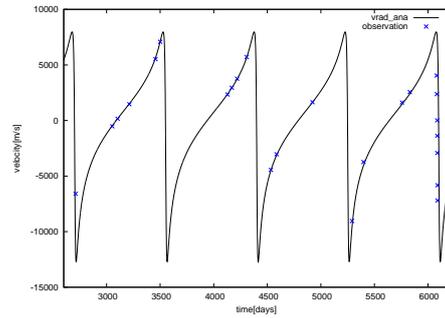


図 2: 主星と伴星の二体問題の場合についての HD139461A の視線速度の解析解 ($v_{\text{rad,ana}}$) と、Kato et al.(2013) による観測結果 ($v_{\text{rad,obs}}$)

次に、先ほどのものと同様のパラメータを用いて、四次のルンゲクッタ法によって主星と伴星の二体問題を解き、主星の視線速度を計算して数値解を求めた。これを先ほどの解析解と比較した結果が図 3 である。

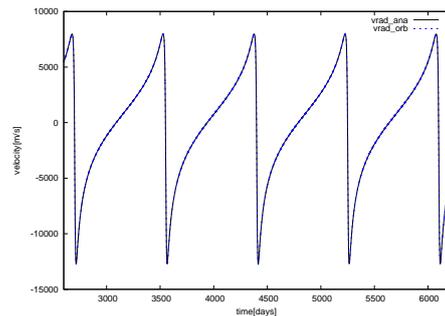


図 3: 主星と伴星の二体問題の場合についての HD139461A の視線速度変化の解析解 ($v_{\text{rad,ana}}$) と数値解 ($v_{\text{rad,orb}}$)

Kato et al.(2013) によれば、HD139461A の視線速度の変化には、主星と伴星の二体問題では説明で

きないようなズレが存在する。二体問題の場合の解析解と観測結果のズレをプロットしたものが図 4 である。

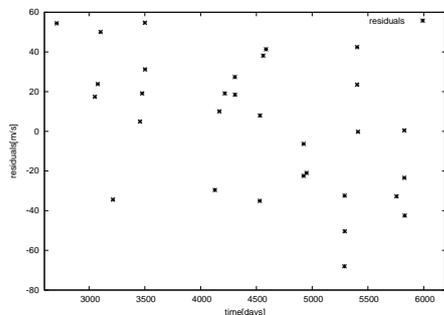


図 4: 主星 HD139461A の Katoh et al.(2013) で求められた視線速度変化に対する解析解と観測結果のズレ

図 4 に見られるようなズレは、三体目の「惑星」からの摂動によるものだと考えられる。Katoh et al.(2013) では、その「惑星」HD139461Ab の軌道要素を見積もり、軌道長半径 0.179AU、離心率 0.31、近日点引数 192°、質量は 0.7 木星質量としている。次は、もしもこの HD139461Ab と主星の二体だけだった場合に、どの程度主星の視線速度が影響を受けるのかを計算した。その結果が図 5 である。この質量の惑星だと、観測で求められたズレよりも小さくなっている。

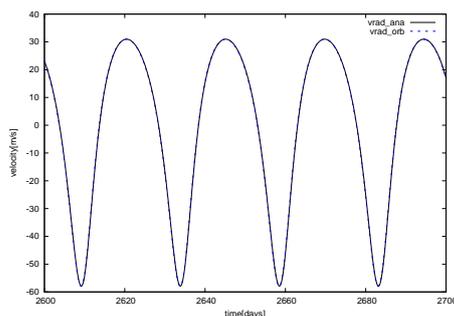


図 5: 主星と「惑星」の二体問題についての視線速度変化の解析解と数値解

最後に、主星・伴星・三体目の上で与えられたものと同じパラメータを持つ「惑星」の三体問題を解いた結果が図 6 である。二体問題の解析解を 2 つ足し合わせたものにはならず、そもそもの周期がずれてしまっている。

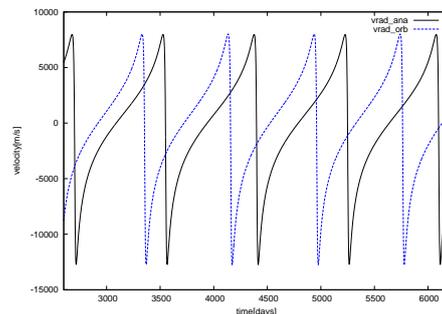


図 6: 三体問題についての視線速度変化の解析解と数値解

4 まとめ・今後の展望

Katoh et al.(2013) による連星系 HD139461 の観測結果に関して、四次のルンゲクッタ法を用いて二体問題および三体問題の数値計算を行い、主星の視線速度の変化について検証した。二体問題については、主星と伴星の場合にはよく一致したが、主星と第三の「惑星」の場合については観測で求められたズレよりも小さい計算結果が得られた。三体問題については、視線速度変化の周期が大きすぎてしまった。この結果から、三体目すなわち惑星の質量が二つの二体問題の足し合わせで見積もられたものよりも小さい、あるいは、軌道要素に違いがあることが予測される。

今後は、様々に条件を変えて数値計算を行うことで、三体目の「惑星」の質量・パラメータの決定を目指す。

謝辞

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。また、研究を進めるにあたって多くの助言を頂いた小林浩助教には深く感謝を申し上げます。

Reference

Noriyuki KATOH, Yoichi ITOH, Eri TOYOTA & Bun'ei SATO 2013, KATOH 博士論文
Murray & Dermott 1999, Solar System Dynamics