

# アストロメトリ法を用いた 系外惑星の軌道傾斜角及び質量の決定

東京工業大学 修士1年 大貫裕史

## 1. 研究背景

東工大の観測グループがドップラーシフト法を用いた観測で最近新たに発見した系外惑星候補は、中質量星まわりの伴星である。中質量星まわりの伴星を発見すること自体にも重要な意味があるが、中質量星まわりの伴星の質量分布を知るとも、褐色矮星形成や連星形成を理解する手がかりとなるため、重要な意味を持つ。しかし、中質量星まわりの伴星の質量分布はまだよく分かっていないのが現状である。

なお、ドップラーシフト法とは、中心星の視線速度の変化を観測することによって、間接的に惑星の存在を確認する観測方法である。その観測精度は数m/s程度と、現在の観測手法の中では最も高く、系外惑星の発見に適している。このため、現在までに発見された系外惑星（400個以上）のうち300個以上はこの観測法で発見されたものである。

## 2. 研究目的

ドップラーシフト法による観測だけでは視線方向成分の情報しか得られないため、系外惑星の軌道傾斜角を定めることができないという観測上の制約があり、伴星の質量の下限値しか求めることができないという問題点がある。

本研究では、アストロメトリ法と呼ばれる観測手法を併用することで、この問題点を解消し、ドップラーシフト法だけでは定めることができなかった軌道傾斜角の決定を行い、中質量星まわりの伴星の質量を定めることが目的である。また、質量の大きさによりその伴星が惑星・褐色矮星・恒星のいずれかであるのか判断できる。

なお、アストロメトリ法のデータとしては、ヒッパルコスデータを用いることにする。

## ドップラーシフト法の問題点

- 中心星の軌道長半径が  $a_1 \sin i$  と、 $\sin i$  の不定性が残ってしまう。
- ◆そのため、系外惑星の質量にも、 $M_2 \sin i$  と、 $\sin i$  の不定性が残ることになる。

例: ドップラーシフト法により、 $M_2 \sin i = 10 M_J$  が得られたとする。

- $i = 90$  のとき  $M_2 = 10 M_J$  ← 惑星
- $i = 45$  のとき  $M_2 = 14 M_J$  ← 褐色矮星
- $i = 15$  のとき  $M_2 = 39 M_J$  ← 褐色矮星
- $i = 5$  のとき  $M_2 = 115 M_J$  ← 恒星
- $i \sim 0$  のとき  $M_2 \sim \infty M_J$  ← 質量無限大!?

### 3. 解析手法

「伴星がある時刻 $t$ に、軌道上のどの位置にいるか」は、軌道6要素と周期 $P$ の7つのパラメータを指定することで表現することができる。軌道6要素とは、軌道長半径 $a$ 、軌道離心率 $e$ 、昇交点経度 $\Omega$ 、近点引数 $\omega$ 、軌道傾斜角 $i$ 、近点通過時刻 $t_0$ のことである。（ $\Omega$ 、 $\omega$ 、 $i$ の位置関係は図1を参照のこと。）

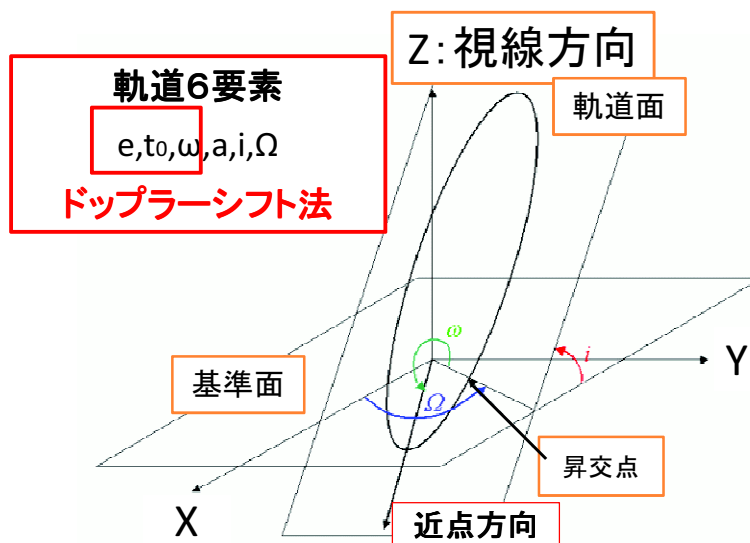


図1. 基準面と軌道面の関係

まず、ドップラーシフト法から、 $e$ 、 $\omega$ 、 $t_0$ 、 $a$ の $\sin i$ 倍、 $P$ の5つの情報が分かる。

次に、この $e$ 、 $\omega$ 、 $t_0$ 、 $P$ の4つを既知として固定し、アストロメトリ法を併用することで、残りの $i$ と $\Omega$ を求める。その際、以下の関係を利用する。

## 恒星の時刻と位置の式

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_z(\Omega) R_x(i) R_z(\omega) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$

アストロメ  
リ法    ドップラー  
シフト法

$$x = a \cos E - de$$

$$y = a \sqrt{1-e^2} \sin E$$

**ケプラー方程式**

$$E - e \sin E = 2\pi(t - t_0) / P$$

$$R_z(\Omega) = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R_x(i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{pmatrix} \quad R_z(\omega) = \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## 軌道傾斜角 $i$ を決める式

観測位置  $\rightarrow$   $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_z(\Omega) R_x(i) R_z(\omega) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$   $\leftarrow$  予測位置  
(理論値)

アストロメ  
リ法    ドップラー  
シフト法

**左辺の観測位置を再現する  $(i, \Omega)$  を定める**

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^n (\text{時刻 } t_j \text{ での 観測位置} - \text{予測位置})^2$$

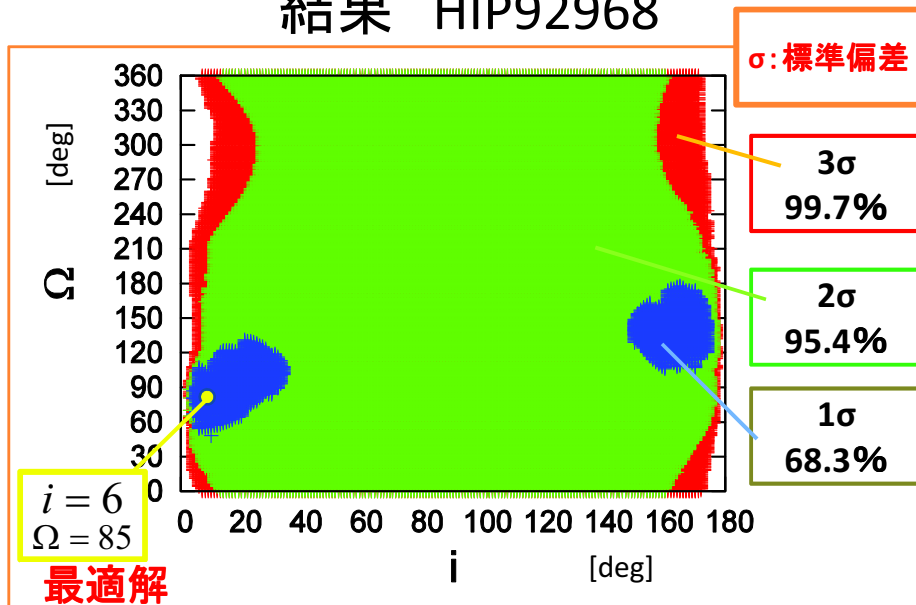
各観測時刻毎の観測位置と予測位置との差の二乗和

最小二乗法の考え方から、 $\chi^2$  が最小となるときが最適解  
そのときの  $(i, \Omega)$  の組が知りたかった  $i, \Omega$  の最適解

このようにして、アストロメトリ法による観測位置を最もよく再現するような  $(i, \Omega)$  の組を定めるのである。

#### 4. 解析結果

### 結果 HIP92968



### HIP92968結果・考察

ドップラーシフト法から

$$M \sin i = 37.1 M_J$$

アストロメトリ法より

$$i = 6^{+28}_{-2} \text{ deg}$$

【3 $\sigma$ の範囲】  
上限(708 $M_J$ ): K型星  
下限(37.1 $M_J$ ): 褐色矮星

$$M = 355^{+177}_{-289} M_J$$

【1 $\sigma$ の範囲】  
355 $M_J$ : M4型星  
上限(532 $M_J$ ): M0型星  
下限(66 $M_J$ ): 褐色矮星

## 5. まとめ

### まとめ

- ドップラーシフト法だけでは、  
軌道傾斜角  $i$  が定まらないために、  
系外惑星の質量  $M_2 \sin i$  が定まらないという問題があった。
- ◆ そこで、アストロメトリ法を併用することで、  
軌道傾斜角  $i$  に制限を与えることができ、  
その結果、系外惑星の質量  $M_2$  に上限値を与えることができた
- ◆ 本研究は、現在あまり知られていない中質量星まわりの伴星の  
質量分布を知る上で重要な結果である。