

❖ 主要探测方法

● 动力学方法

- 视向速度法
- 脉冲星计时法
- 天体位置测量法

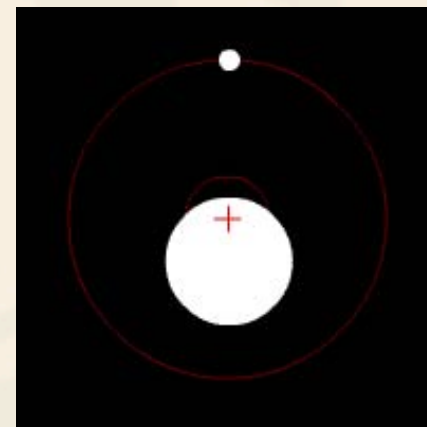
● 凌日法（掩食）

● 微引力透镜方法

● 直接成像法

动力学方法

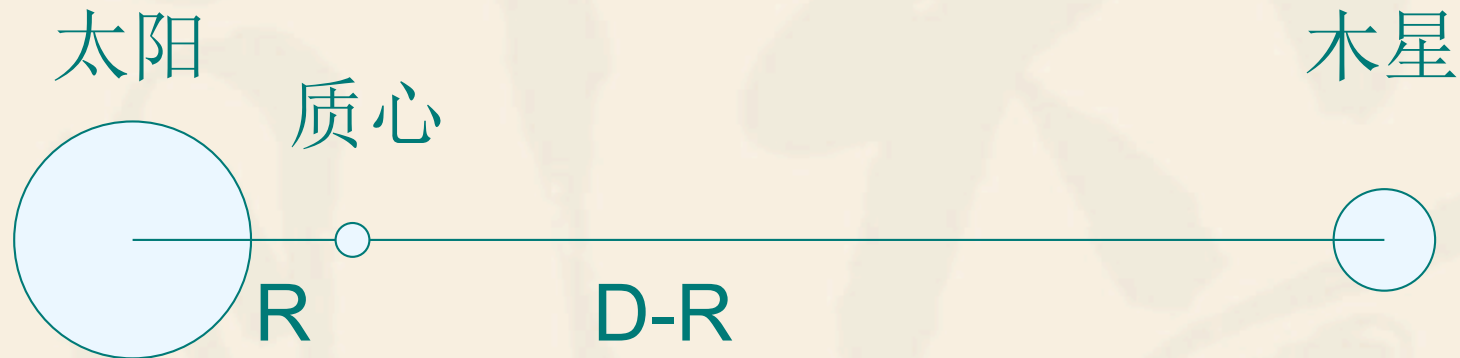
- 视向速度法
- 脉冲星计时法
- 天体位置测量法



原理

- 行星围绕恒星运动
- 恒星也围绕质心运动（轨道半径小）
- 恒星的运动比行星的运动好测量

视向速度法/多普勒方法



$$M_{\text{Sun}} R = M_{\text{Jupiter}} (777\,547\,199 - R)$$

$$M_{\text{Sun}} / M_{\text{Jupiter}} \sim 1000$$

$$R = 776\,770 \text{ km} > R_{\text{sun}} = 695\,500 \text{ km}$$

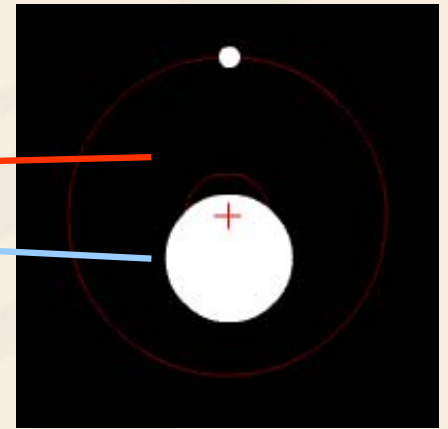
- 主要的行星在太阳的一侧（**1980s**）：质心离太阳中心更远
- 木星与其他行星位于太阳的两侧：质心靠近太阳中心
- 在 $\sim 0.3 - 2 R_{\text{sun}}$ 之间，平均： $\sim 1.25 R_{\text{sun}}$

- 至少探测到半个或整个周期：大轨道行星难探测
- 如果轨道平面与视向垂直，无法探测
- 往往会低估行星质量：如果轨道倾角不知道
- 如果是圆轨道，Doppler曲线为sin函数，如果是椭圆轨道，稍复杂，但依然存在周期性
- 多行星系统：Doppler曲线复杂，理论分析仍可以证认每个行星的存在
- 地球-太阳系：~ 0.1 m/s, 需要用其它方法发现，更长时间径向速度监测可能探测到

视向速度法/多普勒方法小结

原理

- 恒星相对我们有径向运动
- 产生红移和蓝移



缺点

- 大质量行星
- 小的、快速的轨道
- 看不到行星

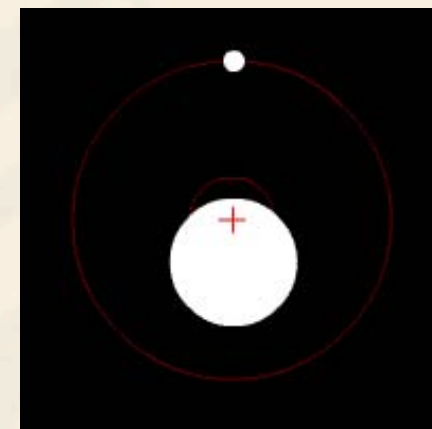
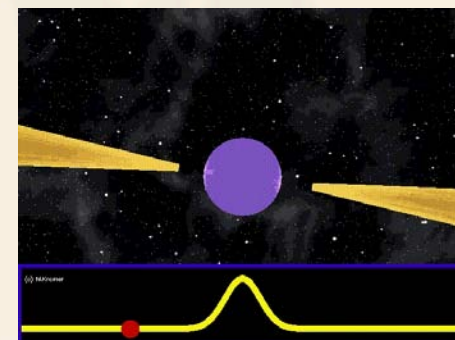
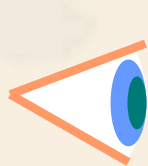
优点

- 目前最敏感的测量方法

脉冲星计时法

原理

- 脉冲星发射周期性非常好的信号
- 脉冲星相对地球的速度略有变化
- Doppler效应测量可到极高精度



优点：

- 非常灵敏
- 容易
- 可探测小质量的行星

缺点：

- 仅对脉冲星系统适用

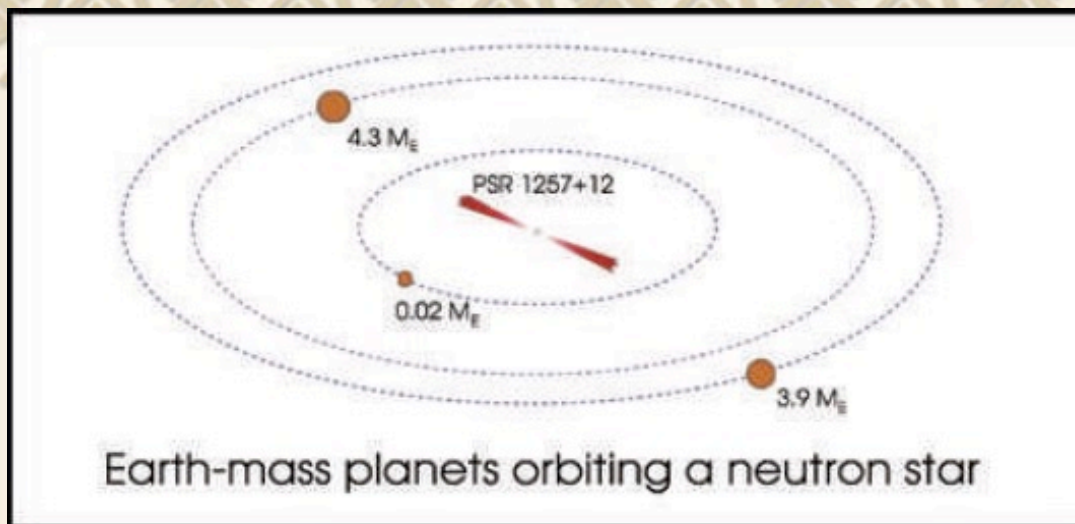


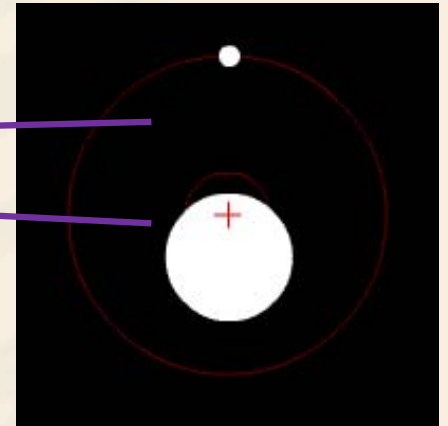
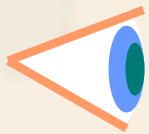
Figure 4.2 Planets orbiting the pulsar PSR 1257+12 at distances of 0.19, 0.36 and 0.46 AU.

- ❖ 脉冲星-行星系统很少：难于存活于超新星爆发？
- ❖ 脉冲星周围存在环绕的气体盘：2006年Spitzer， 4U 0142+61，存在行星？
- ❖ 脉冲星的辐射强，不适合生命的存在（也没“太阳”光）
- ❖ PSR B1257+12, 1992年发现两个行星，质量：4.3，3.9地球质量，在水星轨道之内；随后又发现了两个小质量的行星（0.004，0.02地球质量）
- ❖ PSR B1620-26，发现一个2.7倍木星质量的行星
- ❖ 其它三个脉冲星系统存在一至三个行星，但还没有确认

天体位置测量法

原理

- 短期内绕银心运动近似直线；双星或行星系统中恒星会有额外微小圆形或椭圆运动



优点

- 对大的轨道更敏感

缺点

- 需要极高位置精度
- 大质量的行星
- 大的轨道需要长的观测时间

- ❖ 目前还没有通过天体位置测量法探测到新的地外行星
- ❖ 难观测：例如，太阳-木星系统位于30光年远
 - $R \sim 776\,770\text{ km}$
 - $D \sim 30\text{光年} \sim 3 \times 10^{14}\text{ km}$
 - 角径 $\sim 7.77 \times 10^5 / 3 \times 10^{14} \sim 2.6 \times 10^{-9}\text{ rad} \sim 0.00054\text{ 角秒}$
 - HST分辨率： $\sim 0.05\text{ 角秒} \rightarrow 0.0005\text{ 角秒}$ 位置精度（利用某种技术?!）
- ❖ 幸运的例外：HST通过天体位置测量法证认了Gliese 876中行星（之前由视向速度法发现）
- ❖ Gliese 876： $D \sim 15.6\text{ 光年}$ ，HST两年的位置监测（+视向速度观测），确定轨道平面，确定行星质量
- ❖ NASA空间干涉项目（SIM）：
位置测量精度： $\sim 0.0000001\text{ 角秒}$ ！

凌日（掩食）法

原理

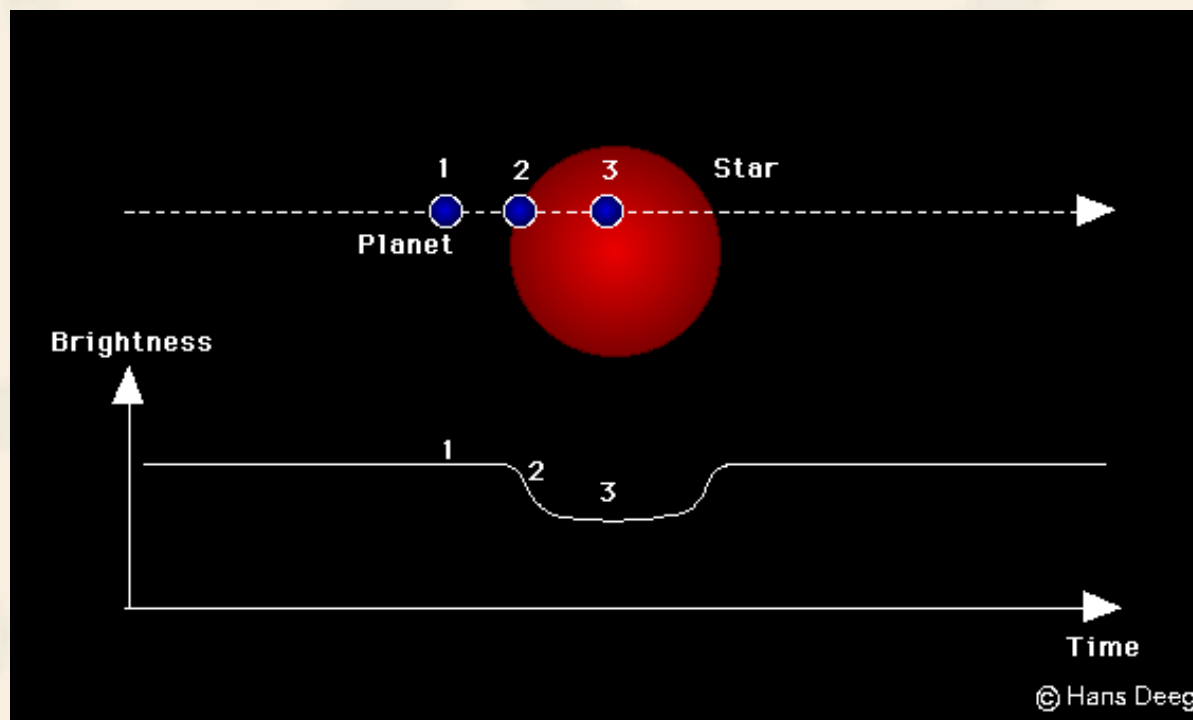
- 行星阻挡了恒星光, 使恒星变暗

缺点

- 观测几率小

优点

- 空间观测容易进行
- 观测恒星（被行星大气）吸收光谱
- 测量行星大气



掩食：太阳-木星系统

- 木星的半径约为太阳半径的1/10
- 掩食时，太阳的发光面积减少了1/100（设面亮度均匀）
- 太阳的光度变化：

$$\begin{aligned}\Delta m &= 2.5 \log_{10}(0.99) \\ &= -0.011 \text{ magnitudes.}\end{aligned}$$

掩食法发现行星

- 1999 11.5: HD 209469（最早被径向速度法发现），亮度下降了1.7%
- 2002，OGLE-TR-56B发现，后被径向速度法确认
- 2006，HST搜寻了180000个恒星（在26 000光年范围），发现了16个候选者，3个被证认。若16个都被证认，银河系中可能存在~60亿个木星大小的行星！

- ❖ 类地球-太阳系发生掩食的概率：~0.5%
- ❖ 空间项目：Kepler & COROT
- ❖ 掩食法可以测量行星的大小，加上质量，可以估算行星的密度，研究行星的结构
- ❖ 可以通过恒星的吸收光谱分析，得到行星的大气成份：HST观测

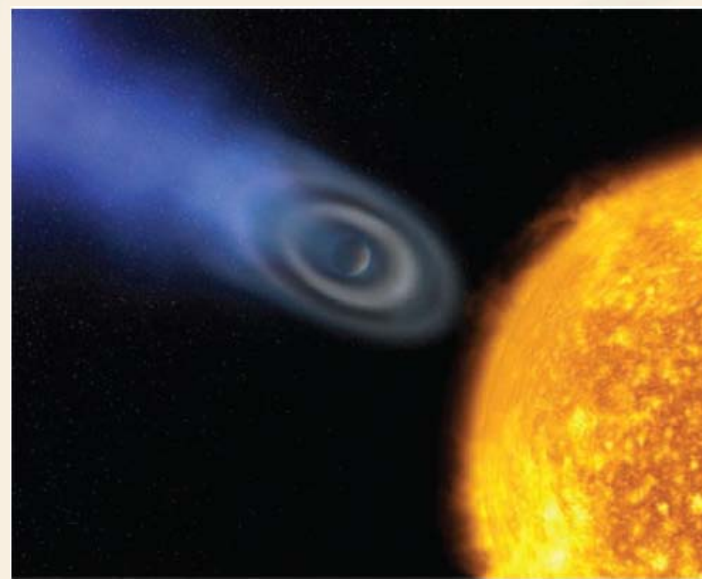
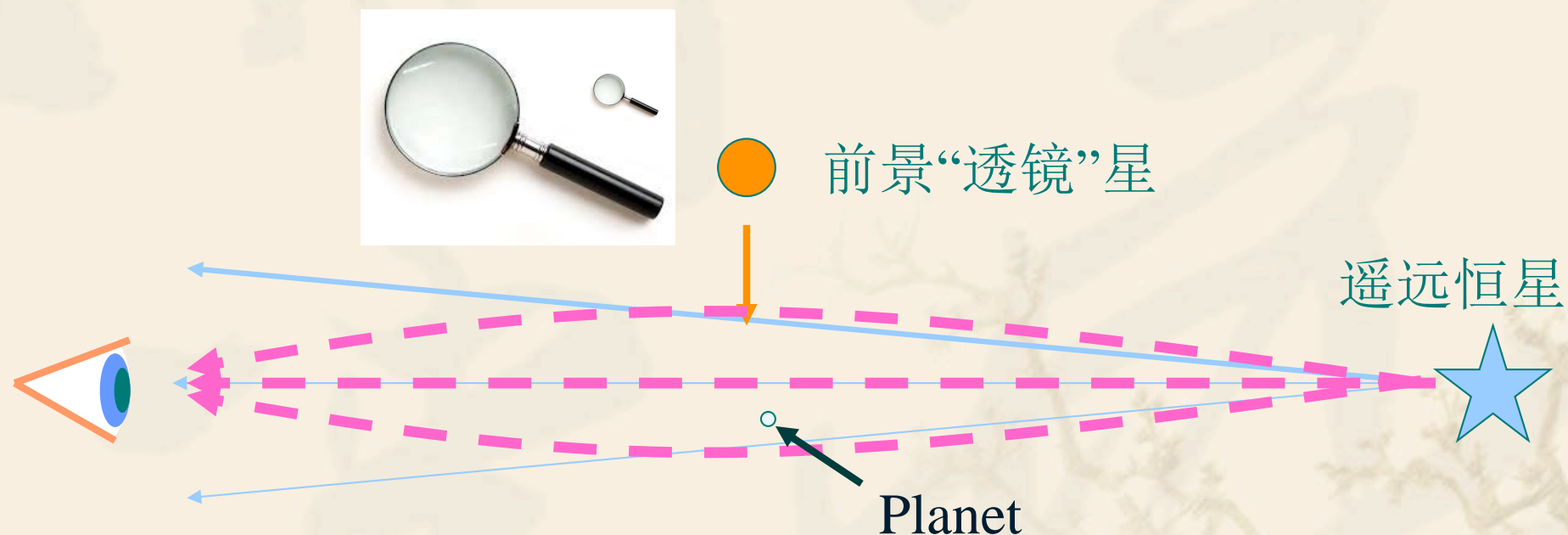


Figure 4.7 An artist's impression of the planet HD 209458b showing an extended envelope of carbon and oxygen and tail of evaporating hydrogen. Image: ESA and Alfred Vidal-Madjar (Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, France).

微引力透镜

技术

- 广义相对论 – 光线在引力场中弯曲
- 微引力透镜效应：恒星的亮度增加



- 仔细观测遥远恒星的亮度，可以探测透镜恒星周围有没有行星

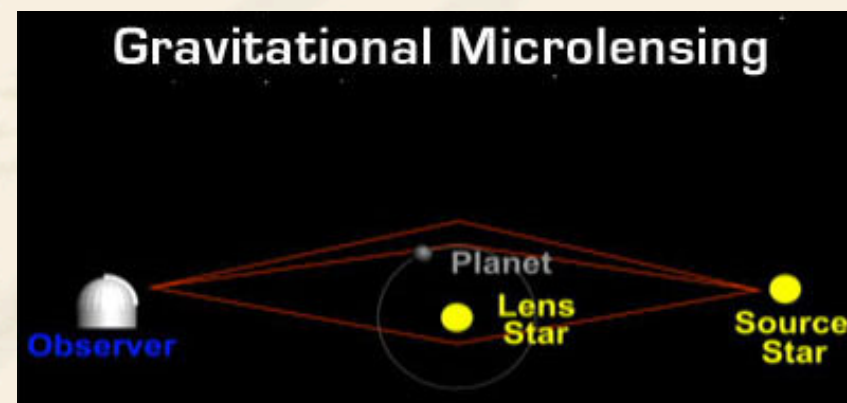
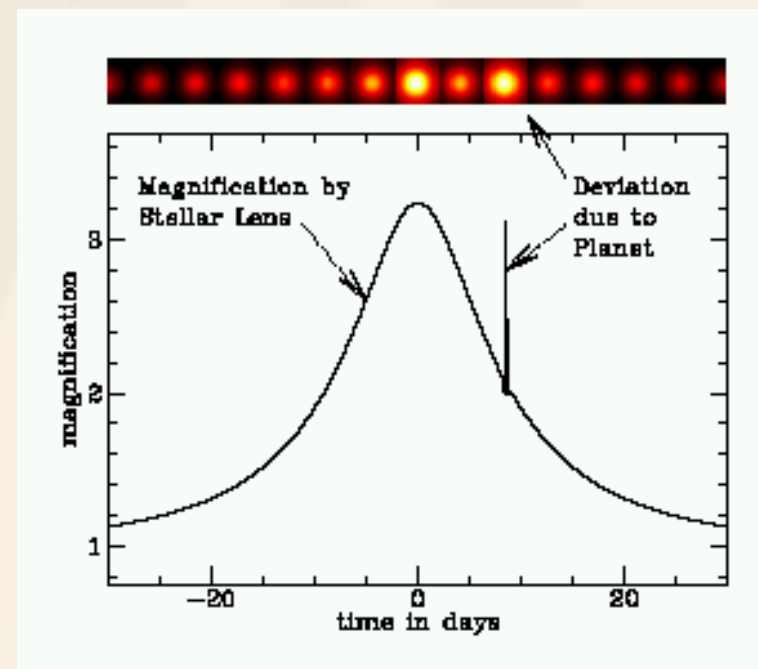
微引力透镜

缺点

- 透镜事件很少
- 几乎无法重复、后续观测
- 得到的行星的信息很少

优点

- 可以很“便宜”监测很多恒星
- 对小质量的行星敏感



- ❖ 到目前（2016/04）为止，有46个太阳系外行星通过微引力透镜法被探测到
- ❖ 2008年，发现类木星-土星-太阳系
 - 恒星：~5000 光年，0.5太阳质量
 - 近的行星：~0.71木星质量，~2.3AU
 - 远的行星：~0.27木星质量，距离两倍
 - 质量比（3：1）；距离比（1：2）；轨道周期比（2：5）非常类似木星-土星！

直接成像法

缺点:

- 恒星与行星亮度对比度大
- 一般依赖空间观测

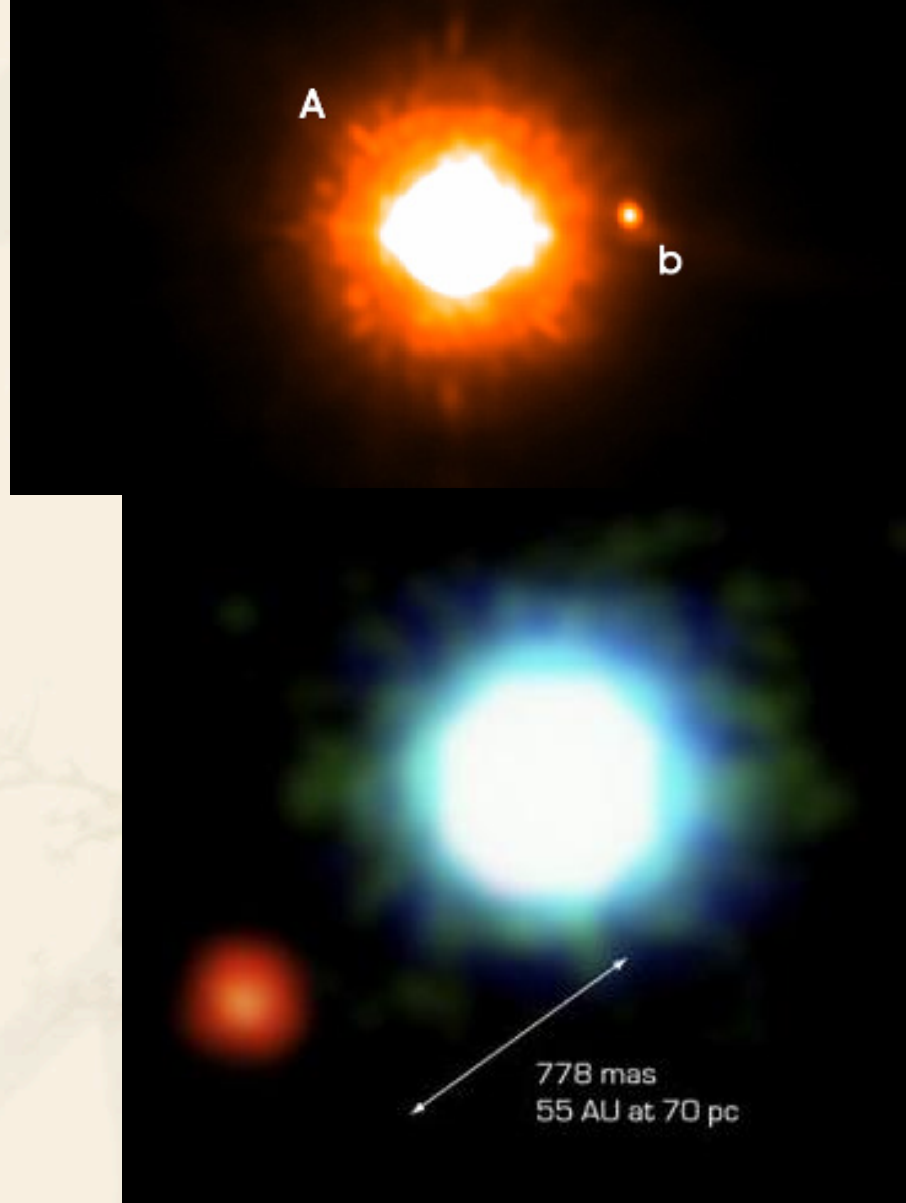
优点:

- 估计行星的大小 (?)
- 可以研究行星的光谱



明星“走光”图

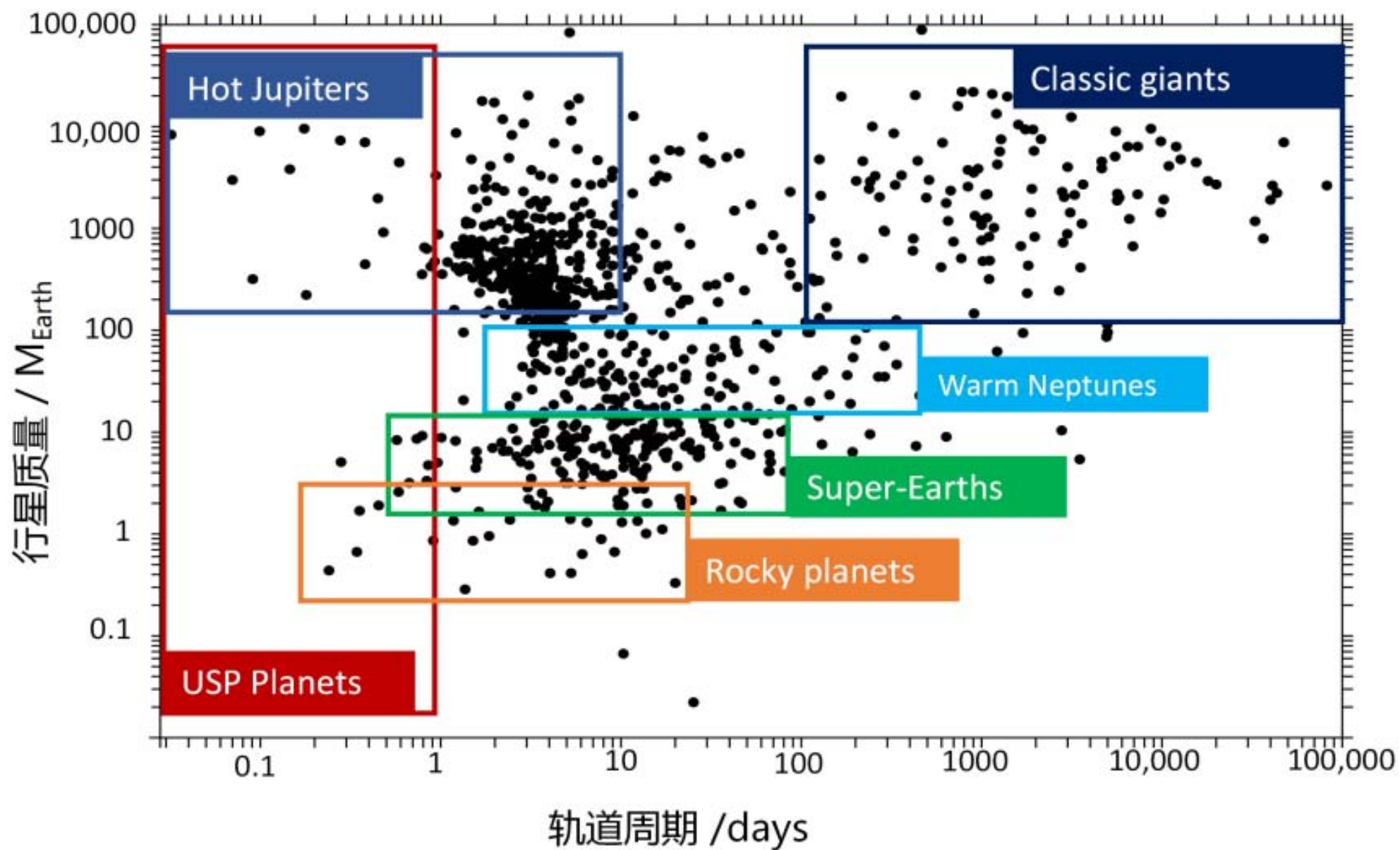
GQ Lupi及可能为行星的GQ Lupi b



2M1207 (蓝色) 及其行星 M1207b

地球上为什么存在生命？

- 足够长的恒星和行星寿命
- 适宜的恒星光度（行星距离）
- 稳定的低偏心率行星轨道
- 适宜的自转倾斜度
- 具有合适成分的行星大气
- 具有磁场
- 月球稳定地球自转轴
- 附近存在一个大质量的木星



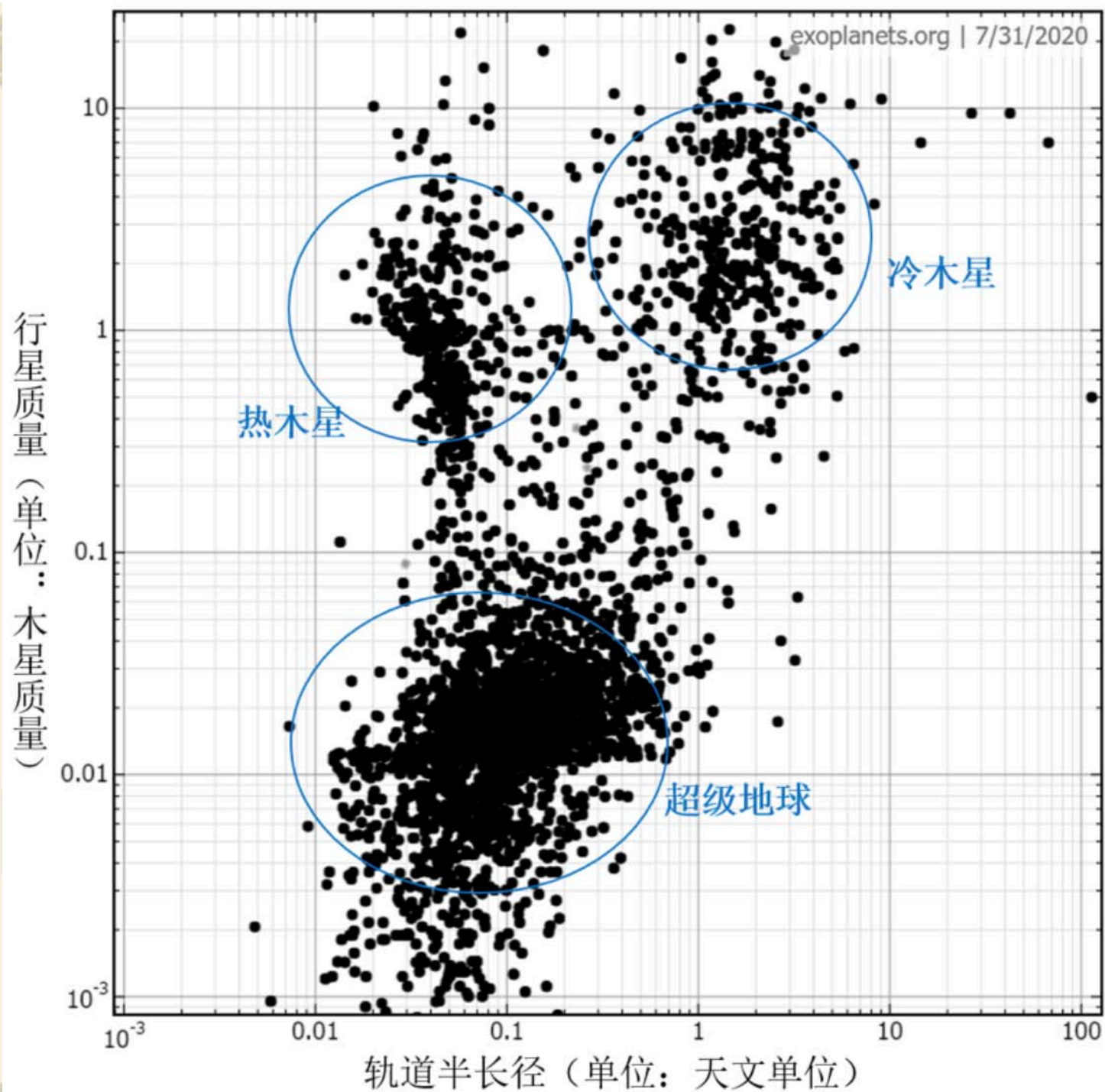


图3 已知系外行星的轨道半长径-行星质量分布图. 数据来源: <http://exoplanets.org>

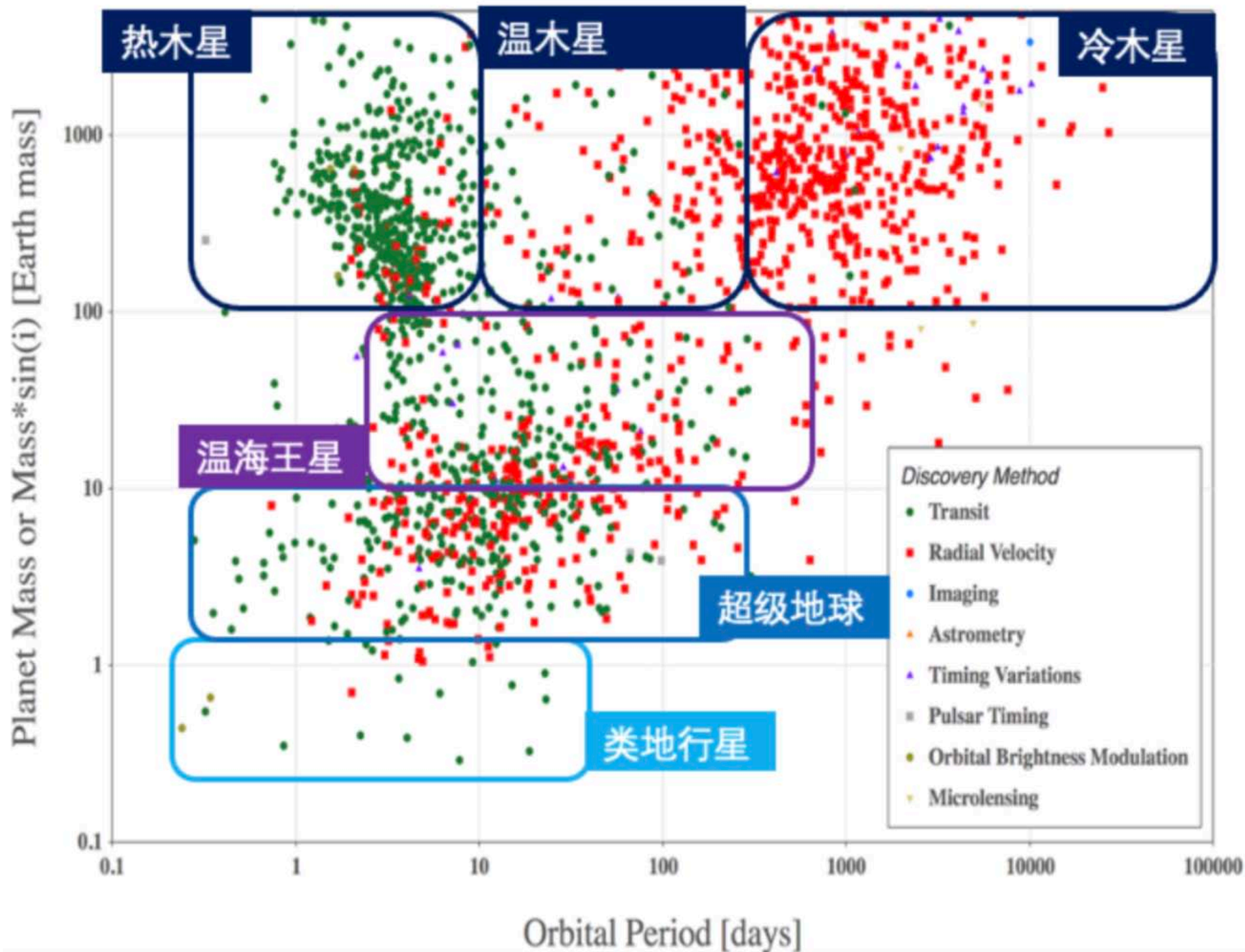


图2 系外行星的类型

(季江徽)

$$N = N_s \times F_p \times F_l \times F_i \times L_c / L_s$$

N is the number of civilizations in the Milky Way today.

N_s is the number of stars in the Milky Way.

F_p is the fraction of stars with habitable planets.

F_l is the fraction of habitable planets with life.

F_i is the fraction of life-bearing planets where intelligent civilizations arise.

L_c is the typical life-time of a civilization in years.

L_s is the typical life-time of a star (10 billion years for Sun-like stars).

银河系
地外文
明总数
目

银河系
恒星总
数目

具有宜
居行星
的恒星
比率

有生命
存在的
宜居行
星比率

有生命
的宜居
行星上
高等文
明出现
的比率

高等文
明存在
的典型
时间

恒星的
典型寿
命

我们可以和高等外星文明有效交流吗？