

# 天文学导论（II）：行星

## 第05讲 行星系的形成与系外行星

SS1 \*类地行星与月球

SS2 \*类地行星的大气

SS3 \*气态巨行星（类木行星）

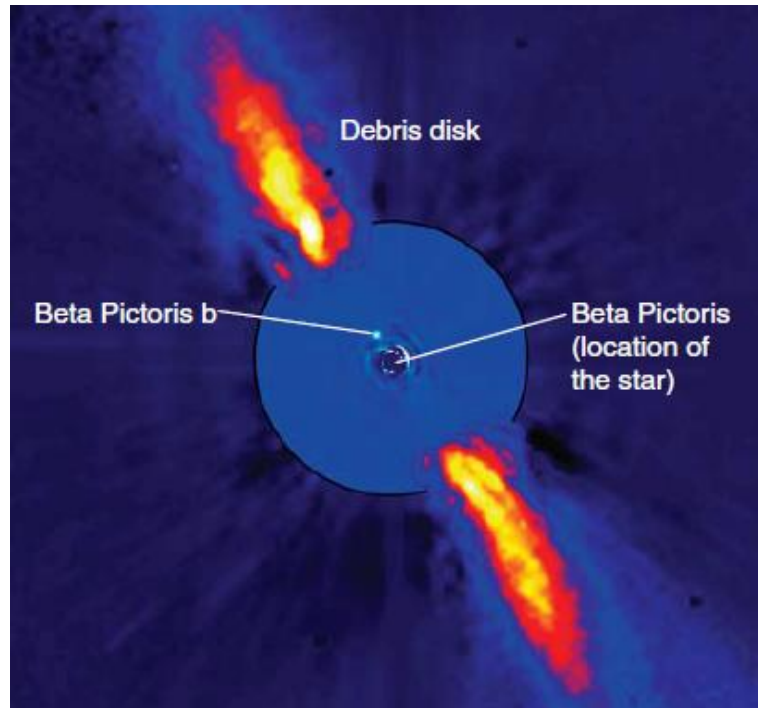
SS4 \*行星的卫星与光环

SS5 \*矮行星和小太阳系天体

# 天文学导论

## 第05讲

### 行星系的形成与系外行星



# 本讲内容

1. 恒星形成与行星诞生
2. 太阳系起源于一个盘
3. 原行星盘内热外冷
4. 太阳系的形成
5. 系外行星
6. 地球2.0

# 教材学习

Chapter 7: The Birth and Evolution of Planetary System

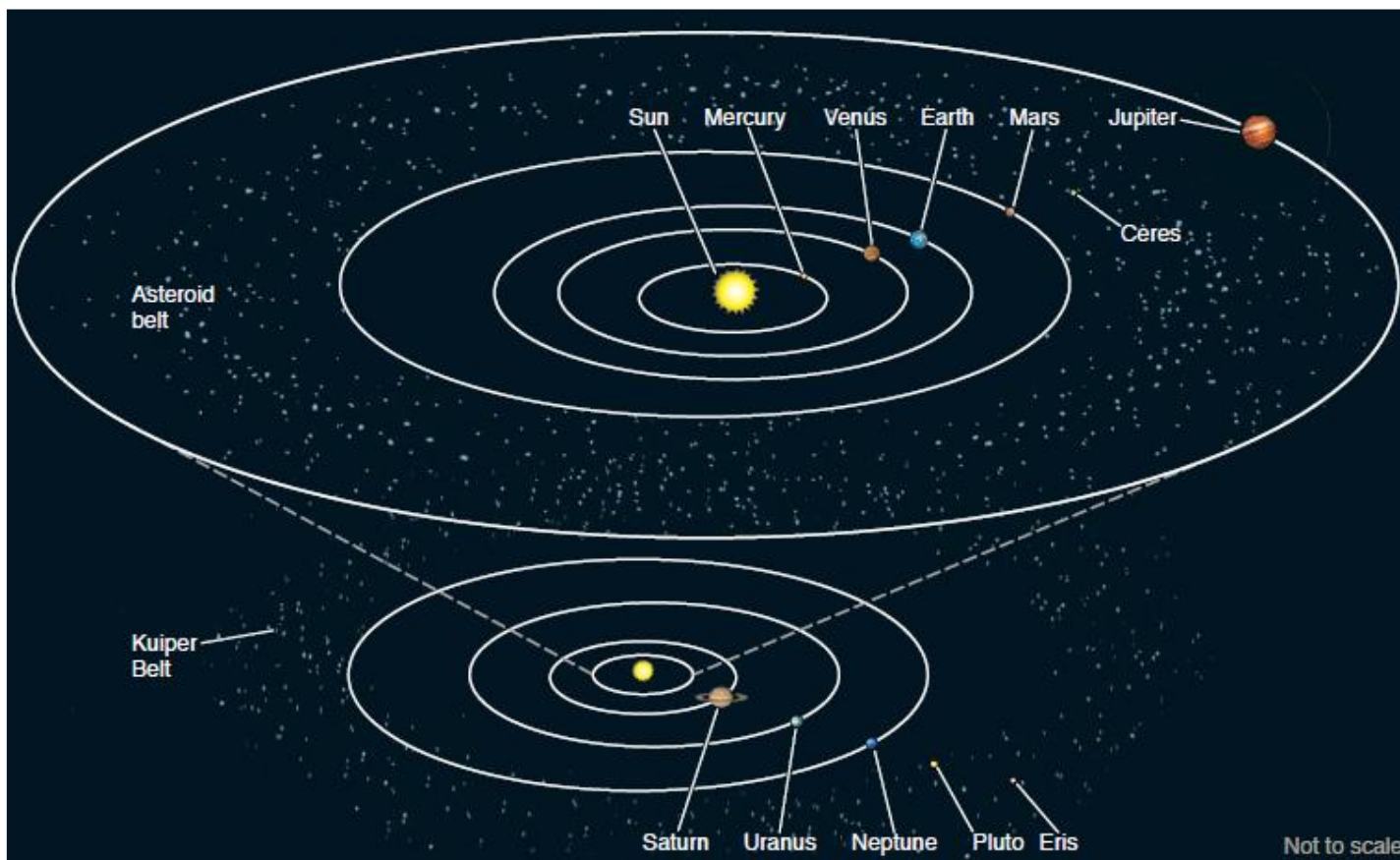
Chapter 10.5 The Planets of Our Solar System Might Not Be  
Typical

# 学习目标

- 行星形成和恒星形成的关系
- 太阳系起源的观测证据
- 太阳系全貌、太阳系的规则性和不规则性
- 形成行星系统的理论基础和主要阶段
- 太阳系形成的具体过程
- 探测系外行星的历史
- 探测系外行星的基本方法
- 系外行星的主要性质，特别是不同于太阳系的
- 系外地球2.0的观测现状

# 1、恒星形成与行星诞生

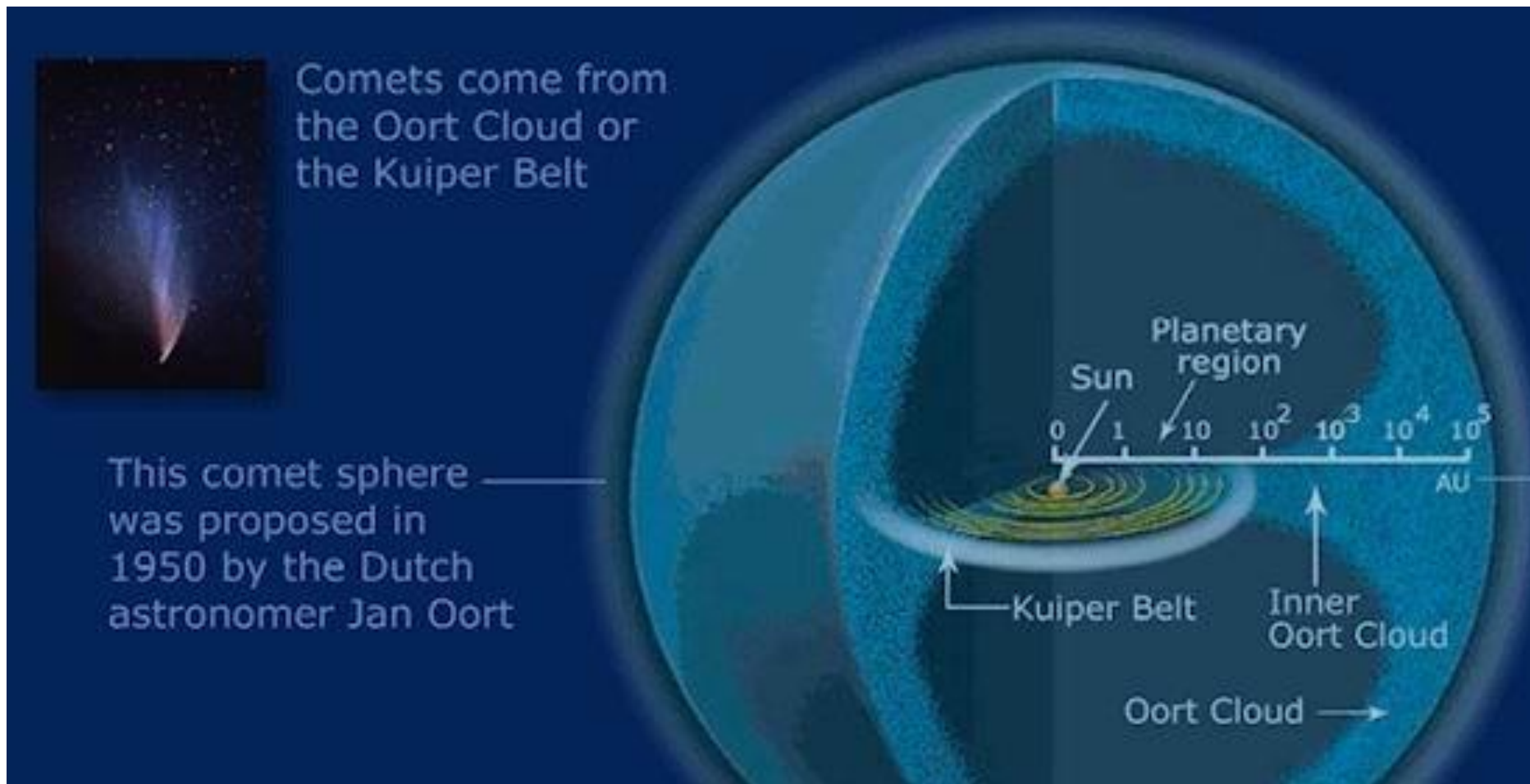
- 行星系是环绕一颗恒星的天体集合
- 太阳系是环绕太阳的包括地球在内的天体集合



行星、矮行星、卫星、小行星、彗星、流星体——（流星/流星雨、陨石）

# 太阳系边缘的柯依伯带和奥尔特云

## 彗星的发源地



# 太阳系形成的星云假说

## 康德 - 德国古典哲学创始人

- 伊曼努尔·康德，生于1724年4月22日，1804年2月12日逝世。
- 德国思想家、哲学家、天文学家、星云说的创立者之一，德国古典哲学的创始人。其学说深刻地影响了此后的哲学，开启了德国唯心主义和康德主义的诸多流派，被认为是对现代欧洲最具影响力的思想家之一。



1755年，康德“首先”提出

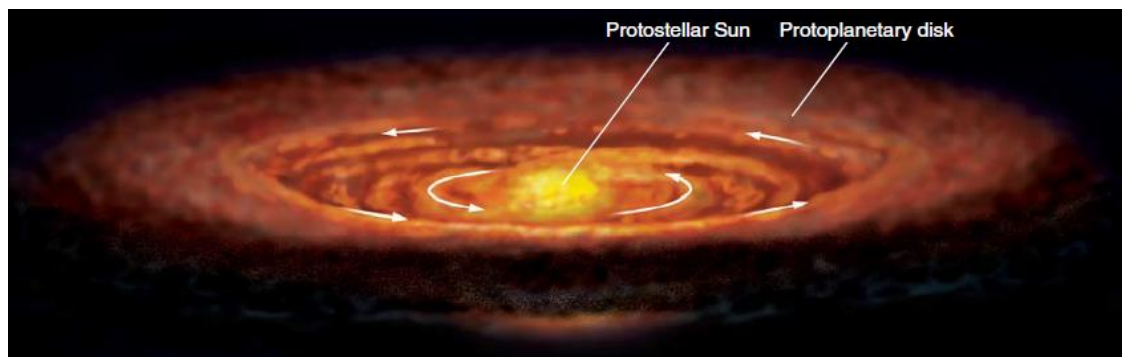


1796年，拉普拉斯独立提出量化的版本（数学、力学）



# 太阳系的早期图景

- 年轻太阳被一个扁平的**气体尘埃盘**环绕。这个旋转的盘不仅为太阳的成长提供物质，而且这个盘中的少量剩余物质也形成了太阳系的行星等其它天体
- 一个自转的**星际云**通过**引力坍缩**形成了太阳及太阳系

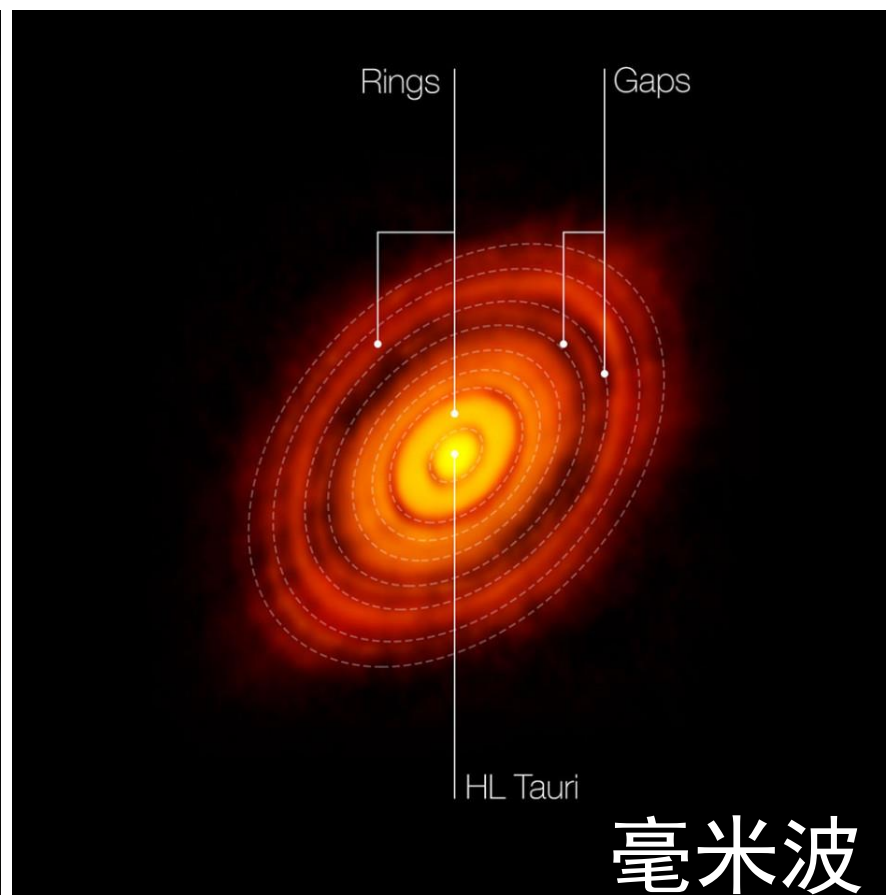
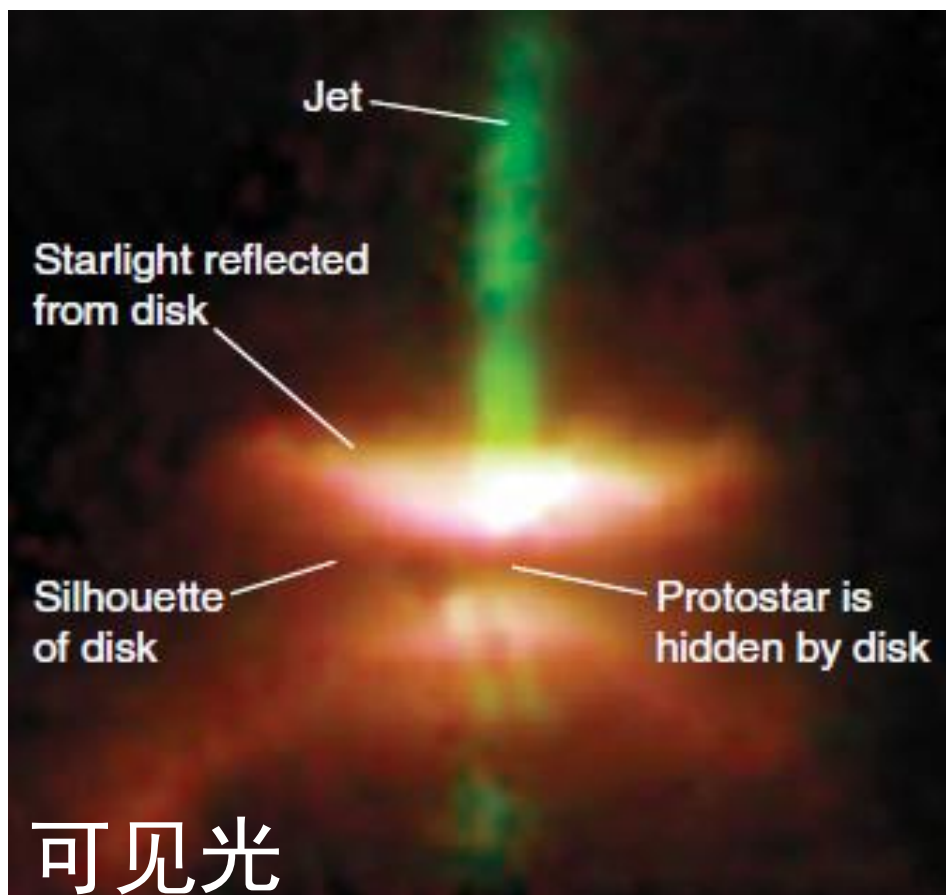


我们和太阳原来是一体的！



# 恒星天文学家发现的证据

支持星云假说的一个证据是，已观测到许多年轻恒星被气体尘埃盘（星周盘/原行星盘）环绕

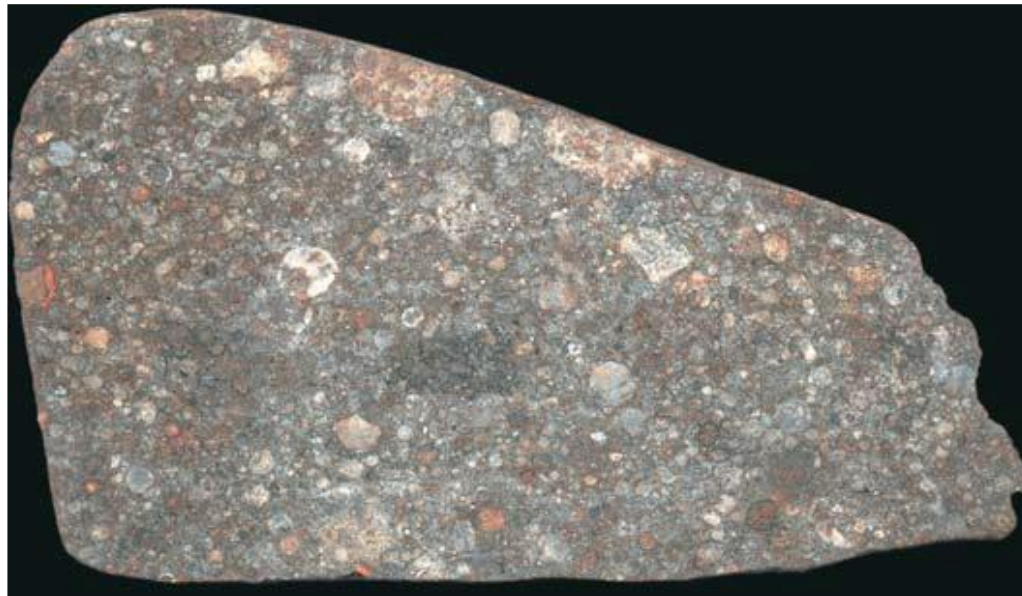


# 行星科学家发现的证据

- 所有行星轨道基本位于同一平面内
    - 早期太阳系必定是扁平的
  - 所有行星公转方向与太阳自转方向（“和行星自转”）相同
    - 形成行星的物质必定沿相同方向围绕太阳转动
- 太阳系源自一个转动的盘
- 随机的大碰撞改变行星的自转（轴）方向

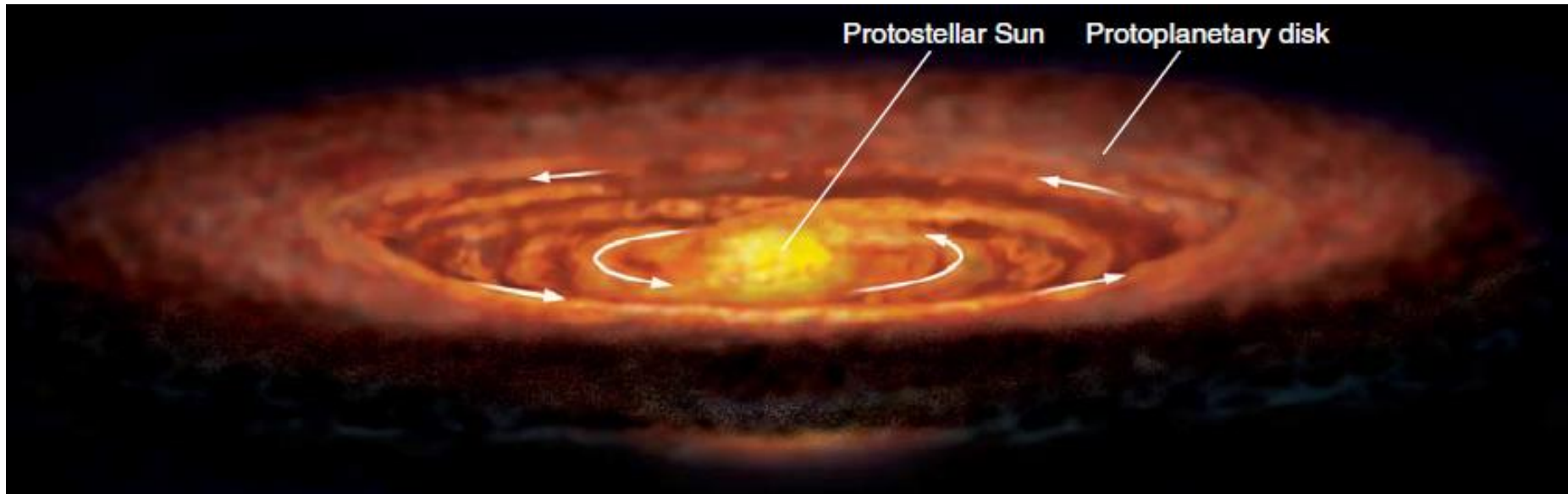
# 地球化学家和地质学家发现的证据

陨石是落到地球表面的年轻太阳系的遗留碎片。其结构清晰地表明，陨石（→行星）是由许多小块物质聚合而成的



## 2、太阳系起源于一个盘

- ~46亿年前，围绕还是一个**原太阳**的是一个扁平的公转的**气体尘埃盘**，称为**原行星盘**，其质量不到原太阳的1%
- 这样的结构是如何形成的？

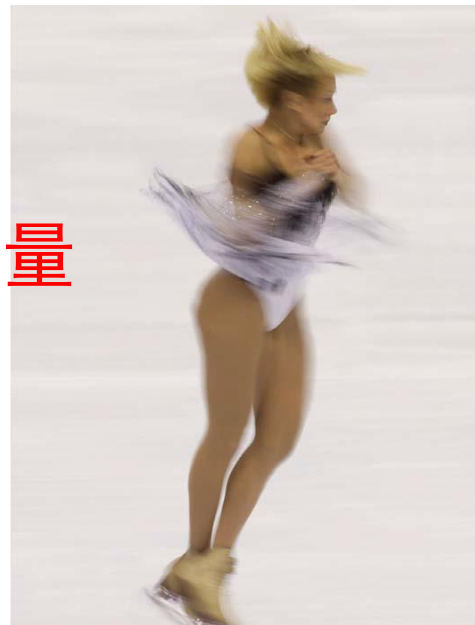




# 形成原行星盘的关键是角动量

- 角动量的大小依赖于
  - 物体转的快慢
  - 物体的质量
  - 物体质量分布的致密程度
- 角动量守恒定律：在没有外力矩作用下，一个物体（体系）的角动量保持不变

转动惯量



- **自转角动量**是指一个自转物体自身所拥有的角动量。  
一个均匀球体的自旋角动量为

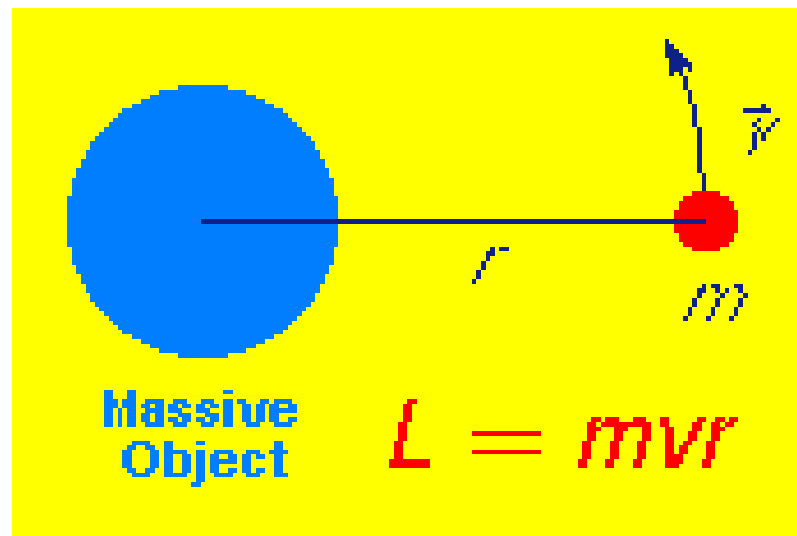
$$L_{spin} = \frac{4\pi m R^2}{5P}$$

- **太阳**的自转角动量为

$$\begin{aligned} L_{spin} &= \frac{4 \times \pi \times (1.99 \times 10^{30} \text{ kg}) \times (6.96 \times 10^8 \text{ m})^2}{5 \times (2.12 \times 10^6 \text{ s})} \\ &= 1.14 \times 10^{42} \text{ kg m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

# 轨道角动量

- 轨道角动量是指一个物体围绕一个定点（轴）转动所具有的角动量
- 木星围绕太阳公转的轨道角动量为



$$L_{\text{orbital}} = (1.90 \times 10^{27} \text{ kg}) \times (1.31 \times 10^4 \text{ m/s}) \times (7.79 \times 10^{11} \text{ m})$$
$$= 1.94 \times 10^{43} \text{ kg m}^2/\text{s}$$

~ 太阳自转角动量的17倍！



# 星际云

- 一个星际云 [分子云核] 绕银河系中心公转，由于不断被恒星爆炸推挤，或与其它星际云碰撞，使得星际云有一定的轻微自转
- 星际云非常延展巨大，尺度~光年（转动惯量巨大）
- 大尺度 + 慢自转 → 星云具有巨大的角动量

$$L_{spin} = \frac{4\pi m R^2}{5P}$$

# “孤立”星云的角动量守恒

- 一个自转星云的
  - （自转周期与其半径的平方成正比）
  - 自转角速度与其半径的平方成反比

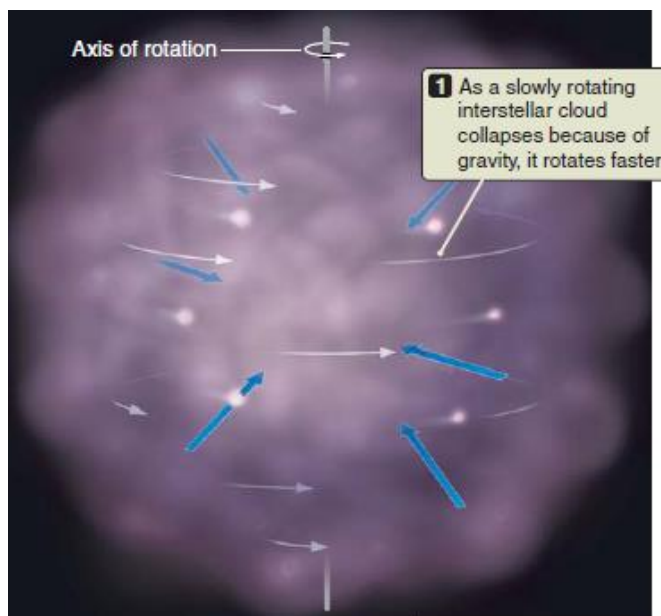
$$L_{spin} = \frac{4\pi m R^2}{5P}$$

- （满足一定物理条件的）星际云在自引力的作用下开始坍缩变小 → 其自转随着坍缩而越来越快

# 太阳系角动量的分布与演化

- 当今的太阳系中，木星的轨道角动量约为太阳的自旋角动量的17倍。这表明，现在太阳系的角动量集中在（大）行星上，而非集中在太阳上，尽管太阳系绝大部分质量集中在太阳上
- 因此，星际云的初始角动量，在演化为太阳系的过程中，必定是通过某种（吸积盘的）机制，使得大部分角动量成为其所形成的行星系的轨道角动量

解释从星际云到当今太阳系的角动量分布变化的关键在于**引力坍缩具有方向性**：星际云坍缩为一个盘而不是直接坍缩为一个球（恒星）

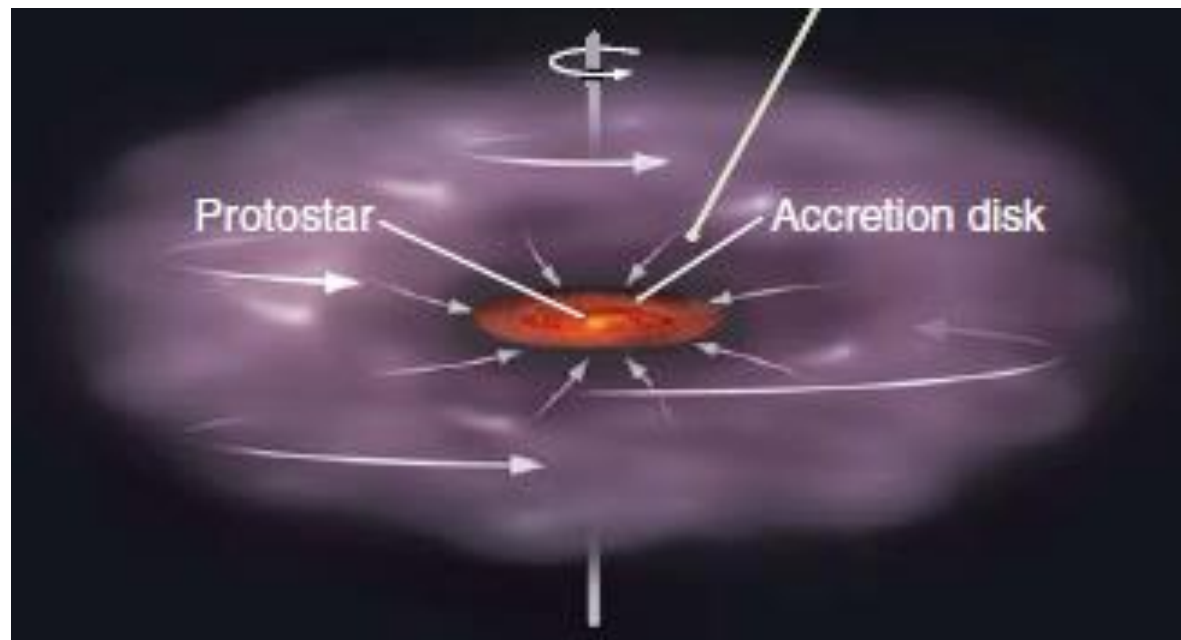


随着坍缩，星际云  
自转加快



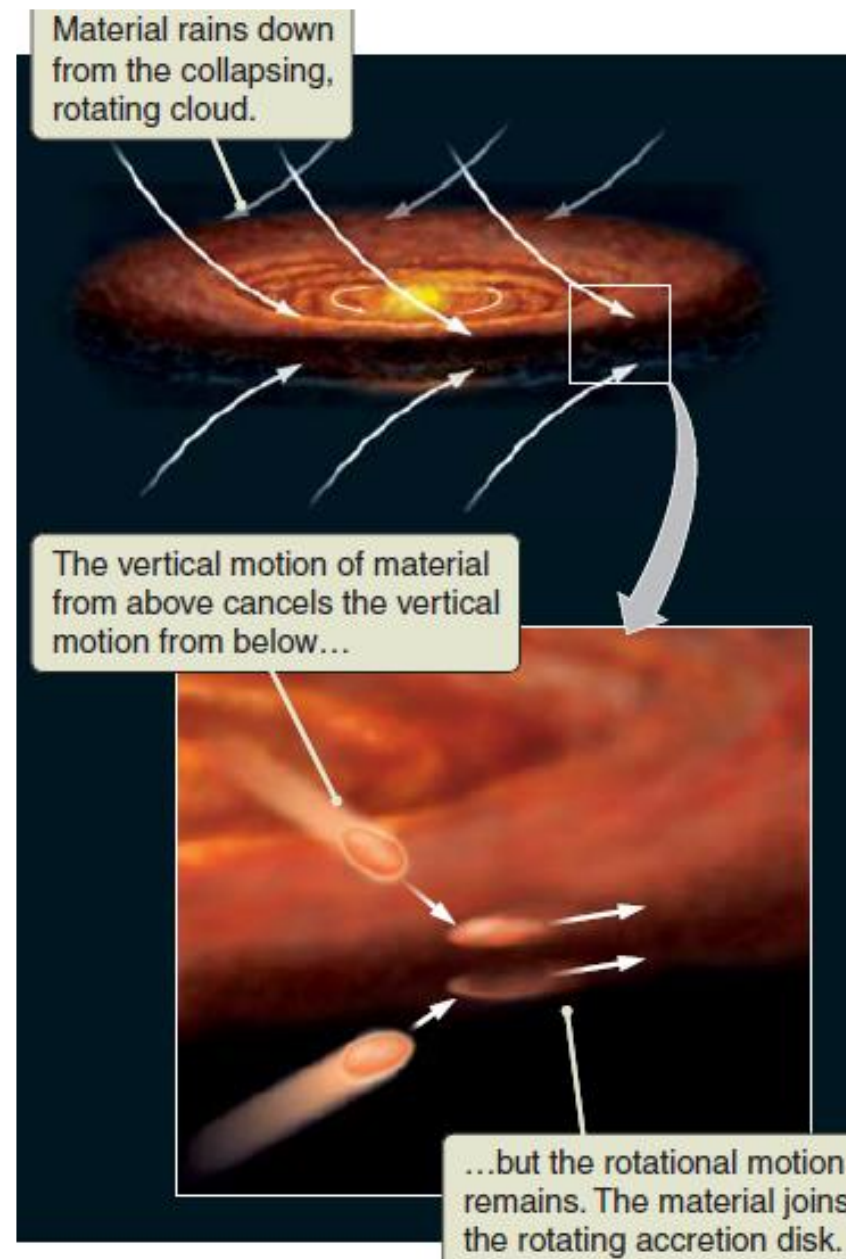
自转的“惯性离心力”  
减弱了垂直于自转轴方  
向的坍缩

由于坍缩更快，  
与外区分离的内区形  
成**原恒星**与**吸积盘**



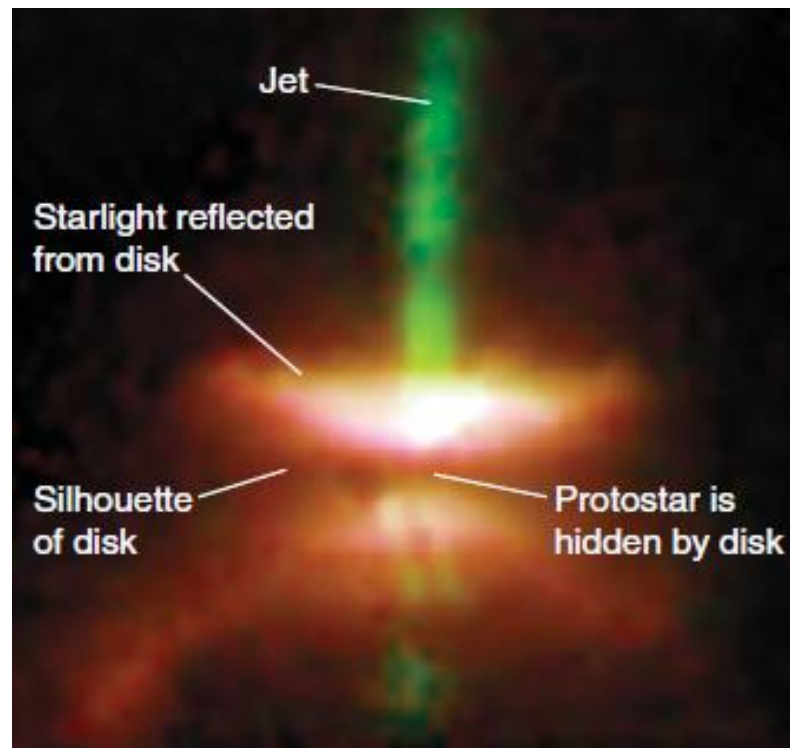
- 外区物质首先下落到具有转动的**吸积盘**（其平面垂直于星云的自转轴）上，然后沿近似椭圆轨道靠近原恒星
- 通过作为**中转站**的吸积盘，物质源源不断地流入正在中心成长的“恒星”上

- 从相反方向下落的物质相撞，汇聚成吸积盘
- 垂直于吸积盘方向的运动抵消，而平行于吸积盘方向的运动转化为吸积盘的角动量
- 盘中大部分物质因粘滞损失角动量而向中心靠近
- 星际云的大部分角动量结束于吸积盘而非中心的恒星！



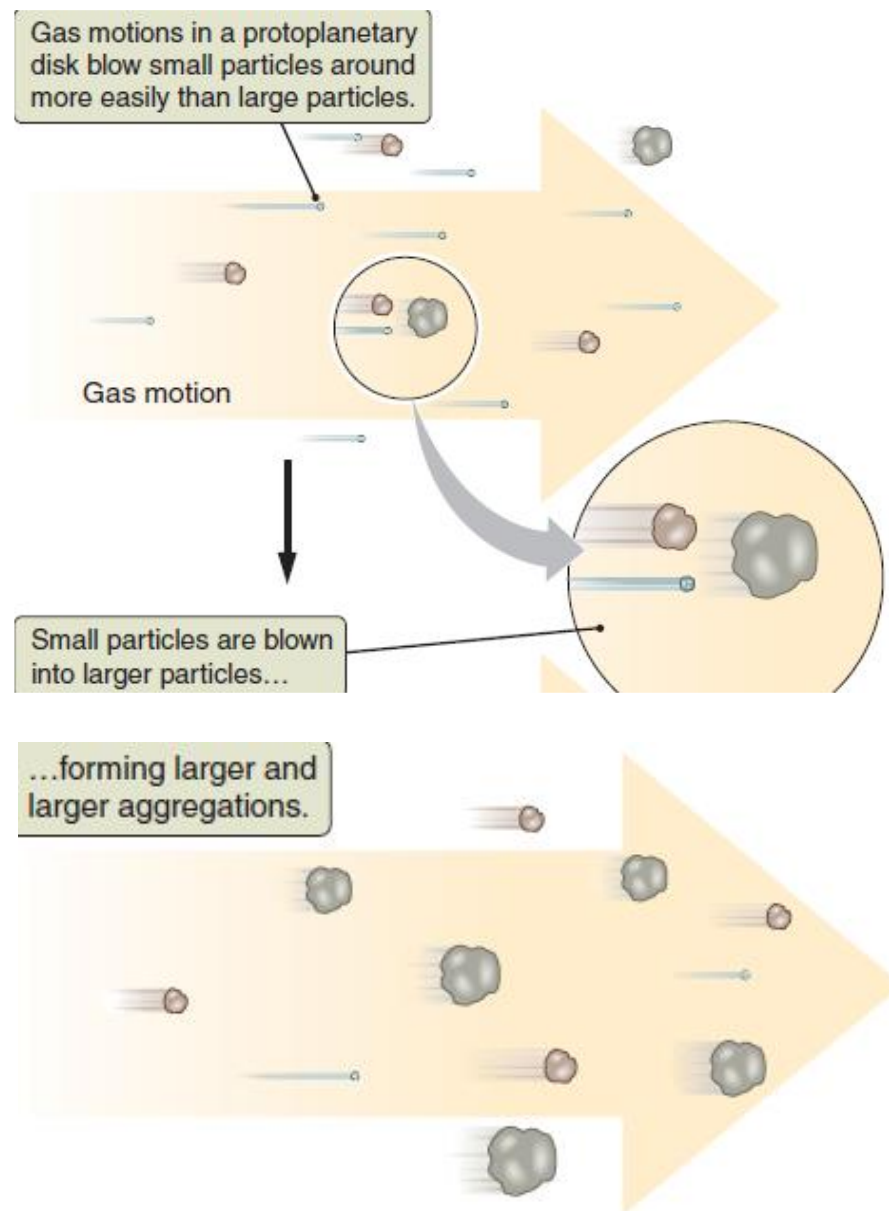
- 吸积盘的大部分物质成为恒星的原材料，或被抛回星际空间（有时以**喷流**形式）
- 一小部分物质留在吸积盘上。正是恒星形成过程的吸积盘的剩余物质（即**原行星盘**）成为形成行星系的原材料

太阳系诞生时的情景？



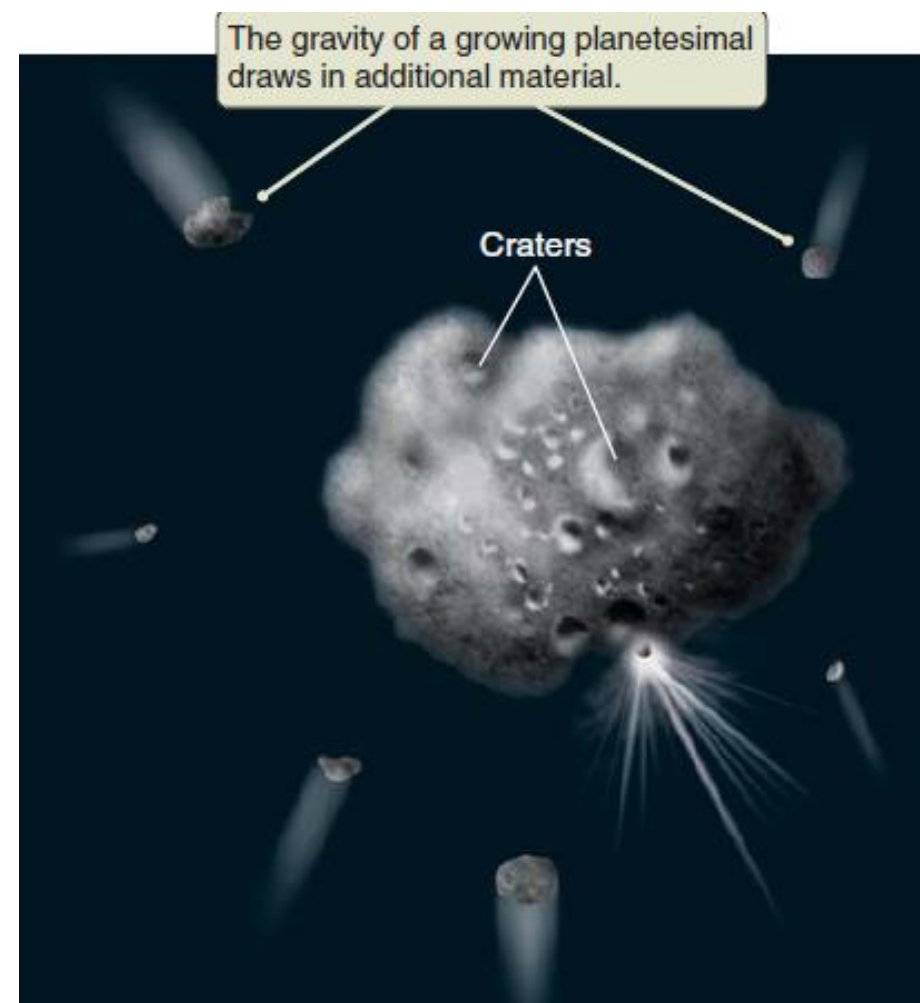
# 星体的成长

- 在原行星盘内，气体的随机运动将较小的颗粒吹入较大的颗粒内。从只有几微米大小开始，通过[静电]吸附较小的颗粒，较大的尘埃颗粒变得更大
- 100米大小的物体碰撞时必须轻微，否则猛烈的碰撞会使它们再裂解为小碎片





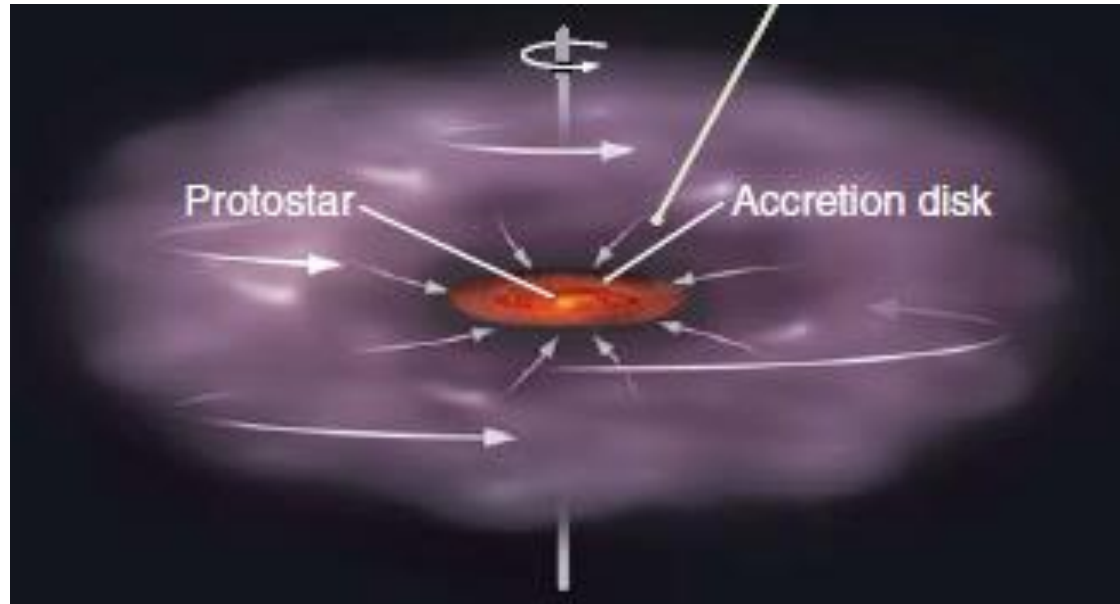
- 1千米大小的物体称为星子，其质量足够大而引力吸引附近物体
- 星子增长加快，较大的星子很快清理完其轨道附近的小物体
- 最终的胜利者的质量足够大，成为[原]行星
- 正如太阳系那样，行星的大小不一



### 3、原行星盘内热外冷

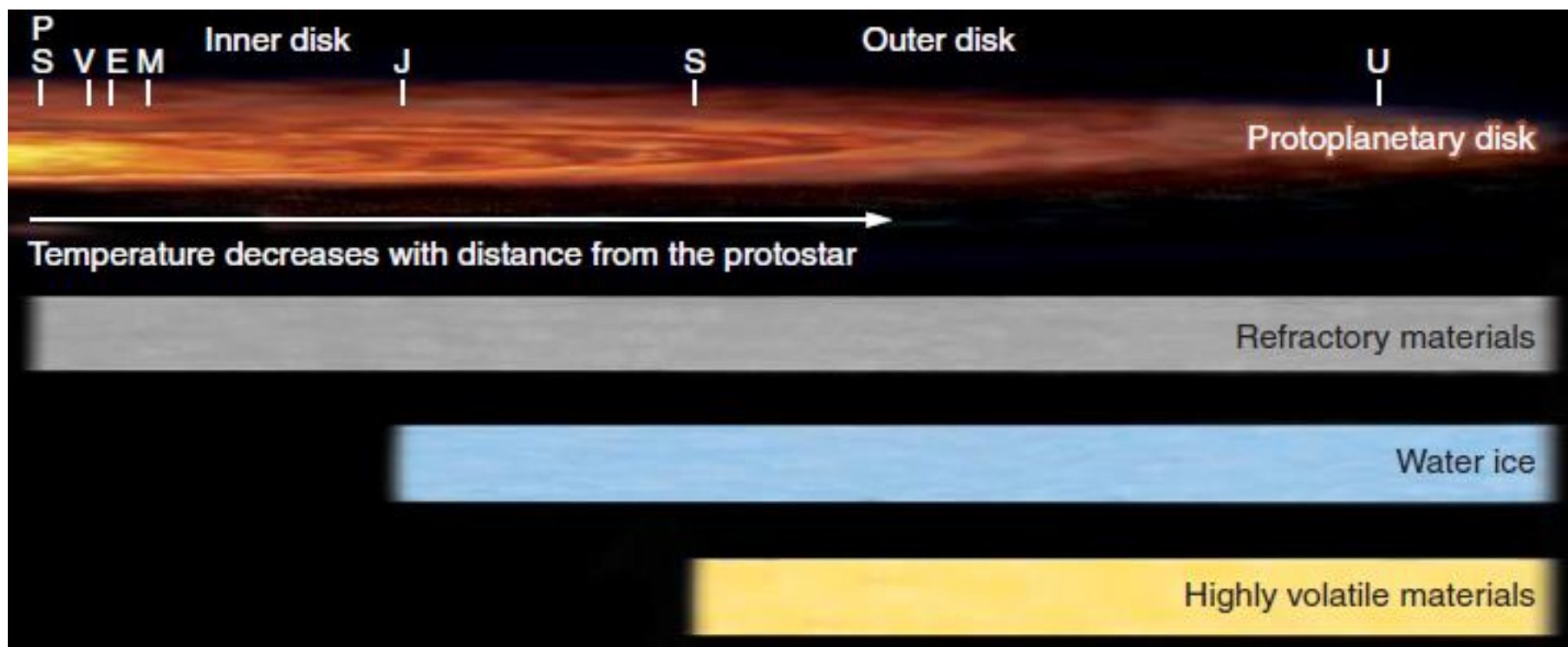
原行星盘的能源：

- 原恒星的热辐射：内盘得到的能量多而温度高
- 下落气体的引力势能：到内盘的距离远，加热内盘到更高的温度



原行星盘的温度差异决定了其内的尘埃固体颗粒的性质  
按到原恒星的距离分布

## 雪线



- 太阳系的行星排列：
  - 内区：岩石包裹着铁镍金属核
  - 外区：主要由多种挥发性物质的冰态组成
- 系外行星系的行星排列并非都是如此，可能发生了行星迁移？
  - 大量系外热木星的存在表明轨道角动量损失引起行星向内迁移，靠近恒星而变热
  - （木星和土星的引力散射导致天王星和海王星外移到目前的位置）

# 巨行星的成长

- 固态行星（核）一旦形成，它将继续吸积原行星盘中的气体而成长
- 质量巨大的固态行星对聚集和维系氢和氦等轻元素气体具有明显的优势
- 但，由于强烈的原恒星风和辐射压驱散吸积盘中的剩余气体，所以行星（核）吸积气体不会持续太久

# 巨行星的卫星系的形成

- 强大的引力使得大质量的年轻固态行星在其周围形成“**微型吸积盘**”，气体通过吸积盘旋入固态行星
- 微型吸积盘中的固态物质凝聚为“**微型太阳系**”：环绕巨行星公转的卫星系

# 行星的原始大气与次生大气

- 行星形成时从原行星盘中所获得的气体称为原始大气
- 巨行星能吸积并维系很多的原始大气，主导像木星这样的巨行星的质量
- 低质量行星所吸积的少量的原始大气随后逃逸。今天像地球这样的行星的大气为次生大气，源自火山从行星内部喷出来的二氧化碳等气体，或由移步到内太阳系的彗星撞击带来（水、有机物等挥发性物质）

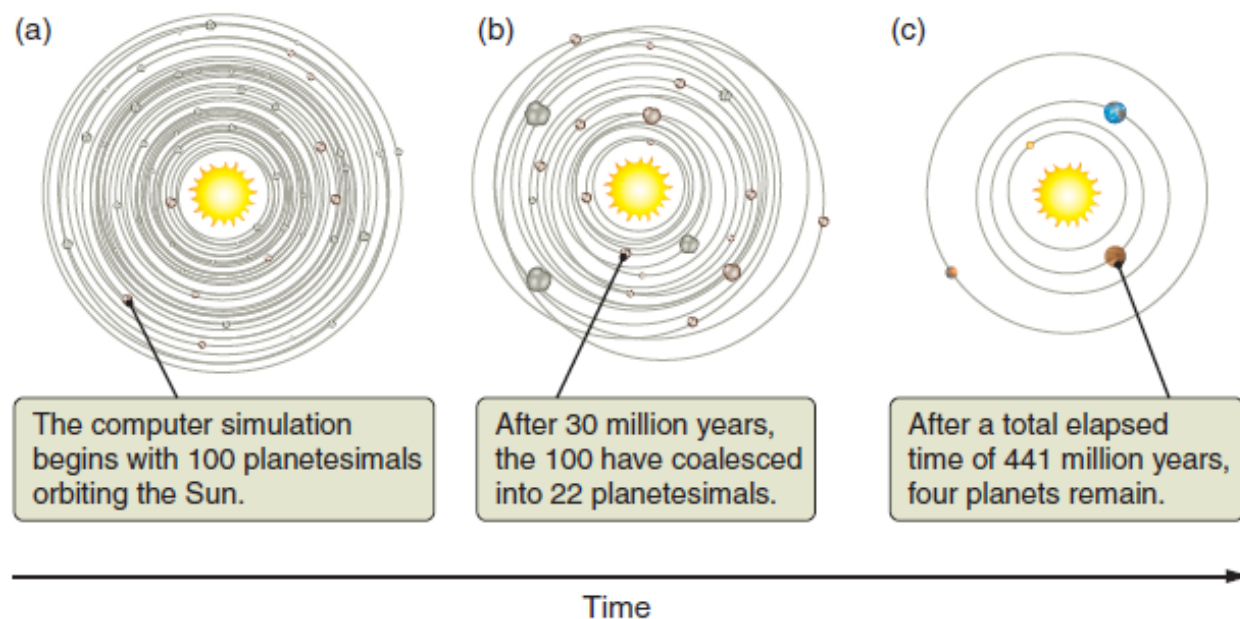
# 4、太阳系的形成

- 环绕原太阳的原行星盘中的大部分尘埃凝聚成星子
  - 在靠近太阳的内区，星子由岩石和金属组成
  - 在远离太阳的外区，星子由岩石、金属、水冰和冰态的挥发性有机物组成



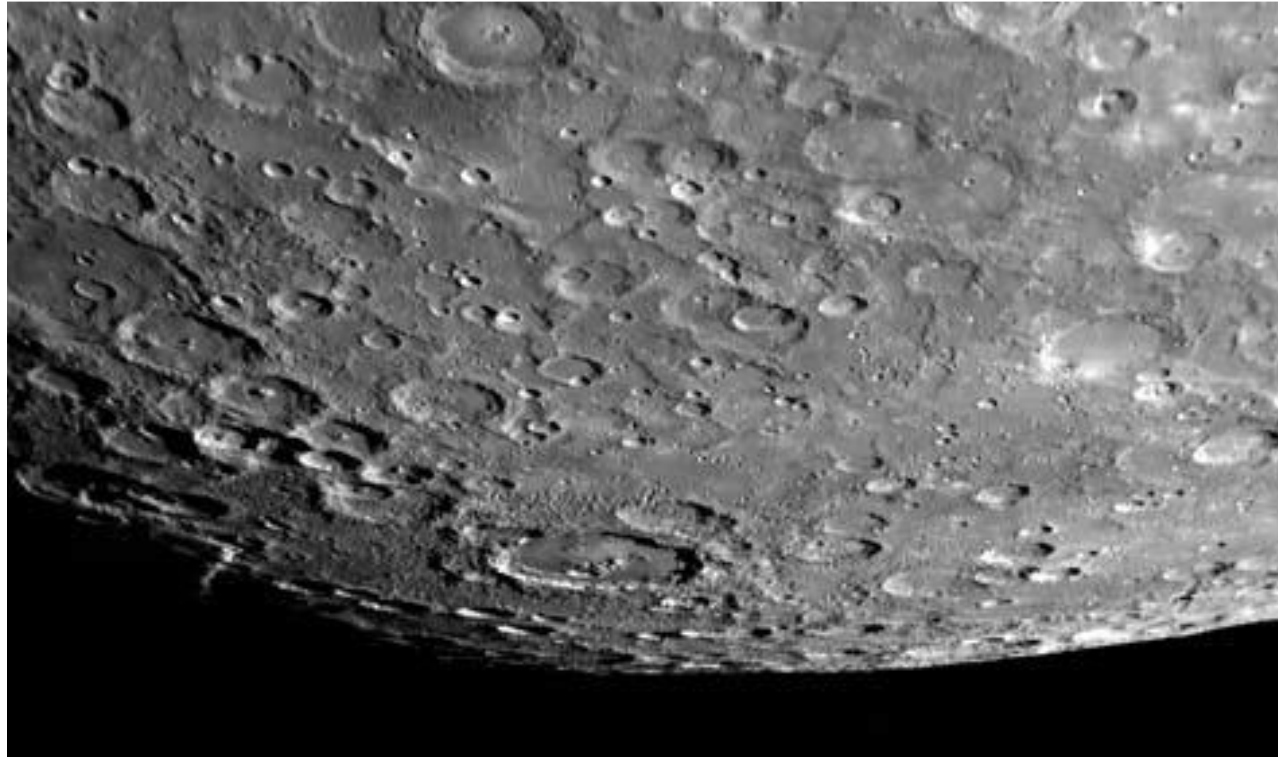
# 内太阳系形成岩质类地行星

在盘的 $\sim 5\text{AU}$ 以内， $\sim 4 (+1)$  个星子很快成长为各自轨道附近的主导星子，不断增强的引力使得它们捕获大部分剩余星子，或者把一些星子抛出



主导星子清空了自己的轨道，成长为原行星，继而演化为类地行星

- 在4个类地行星形成后的几亿年间，环绕太阳的剩余物质继续雨点般地砸落到它们的表面
- 它们成长的伤痕（[陨石坑](#)）如今在它们的表面依然可见



# 类地行星的大气形成

- 原太阳成为太阳前，原行星盘内区的气体依然丰沛
- 地球和金星也许hold住了稀薄的原始大气（氢和氦），但很快逃逸出去
- 当前，金星、地球和火星的“浓密”大气是后来形成的次生大气
- 水星离太阳很近，月球质量太小，它们连次生大气也维系不了，至今几乎无大气

# 外太阳系形成巨行星

- 距离太阳5AU以远的冷区域，星子并合形成多个5-10倍地球质量的行星大小的天体，除了岩石和金属外，它们还含有挥发性的冰和有机化合物
  - 4个大质量的天体成为今天的巨行星的核
- 通过核吸积气体俘获过程，在这些行星核周围形成微型吸积盘，俘获大量的氢和氦，并把气体输送给行星核，成长为以气体为主的巨行星

# 巨行星的卫星的形成

- 大质量的木星核能够俘获并维系~300倍地球质量的（H和He）气体
- 土星核吸积~100倍地球质量的气体，而天王星核和海王星核仅抓住不到20倍地球质量的气体
  - 可能因为核的质量小，或因为可用气体少
- 微型吸积盘中剩余的物质凝聚成绕巨行星公转的天然卫星系
- 环绕行星的卫星材料的成分，遵循环绕太阳的行星材料的形成规律

# 核吸积 or 盘不稳定？

- **核吸积**：可能需要~1千万年才能使木星长成，但原行星盘也许在一半左右的时间就**烟消云散**了
- **盘不稳定**：原行星盘突然快速地破裂为质量等同于巨行星的团块，降低巨行星形成所需的时间
- 在行星系的形成过程中，两个过程可能都起了作用？

# 并非所有的星子都能成为行星

- 小行星和彗星核是存活到今天的星子，几乎保持太阳系刚形成时的状态
- 木星与火星之间的星子，由于受到木星强大引力的搅动没能凝聚为一个行星而存活至今成为小行星带。谷神星是其中最大的
- 太阳系最外区的冰质星子（由于太过稀疏而不能长成行星）存活至今而成为彗星核。冥王星和阋神星是其中的大的样品
- 矮行星没能清空其轨道附近的星子

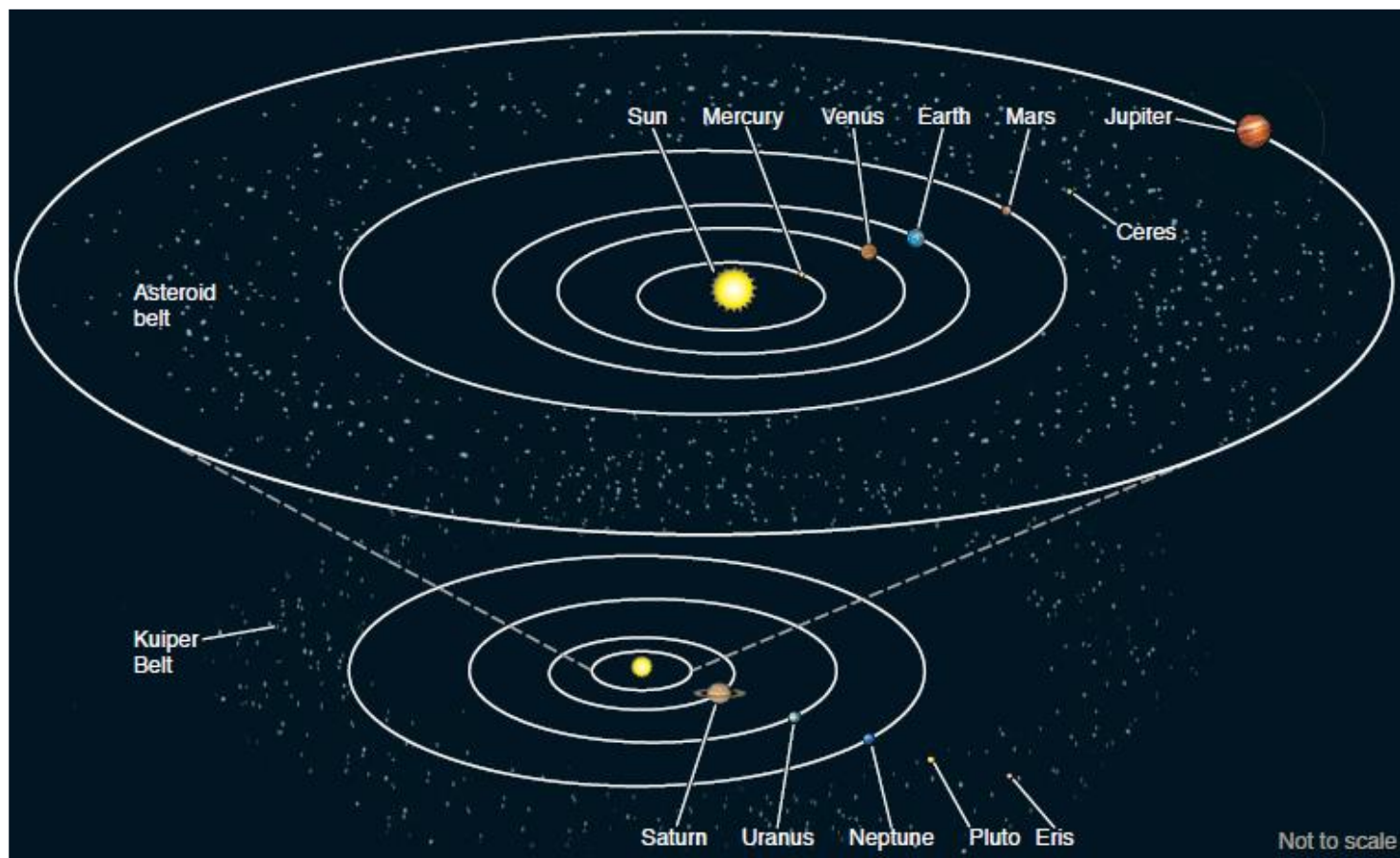
# 早期太阳系必定是一个混乱的场所

- 水星的一个环形山，在其另一侧对应一个巨大的隆起
- 金星的异常低速的反向自转
- 地球曾被火星大小的类地天体撞击，可能形成环绕地球的光环，随后凝聚成现在的月球。地轴倾斜。
- 火星南北半球地形的巨大差异
- 天王星的自转轴几乎平行其公转轨道平面



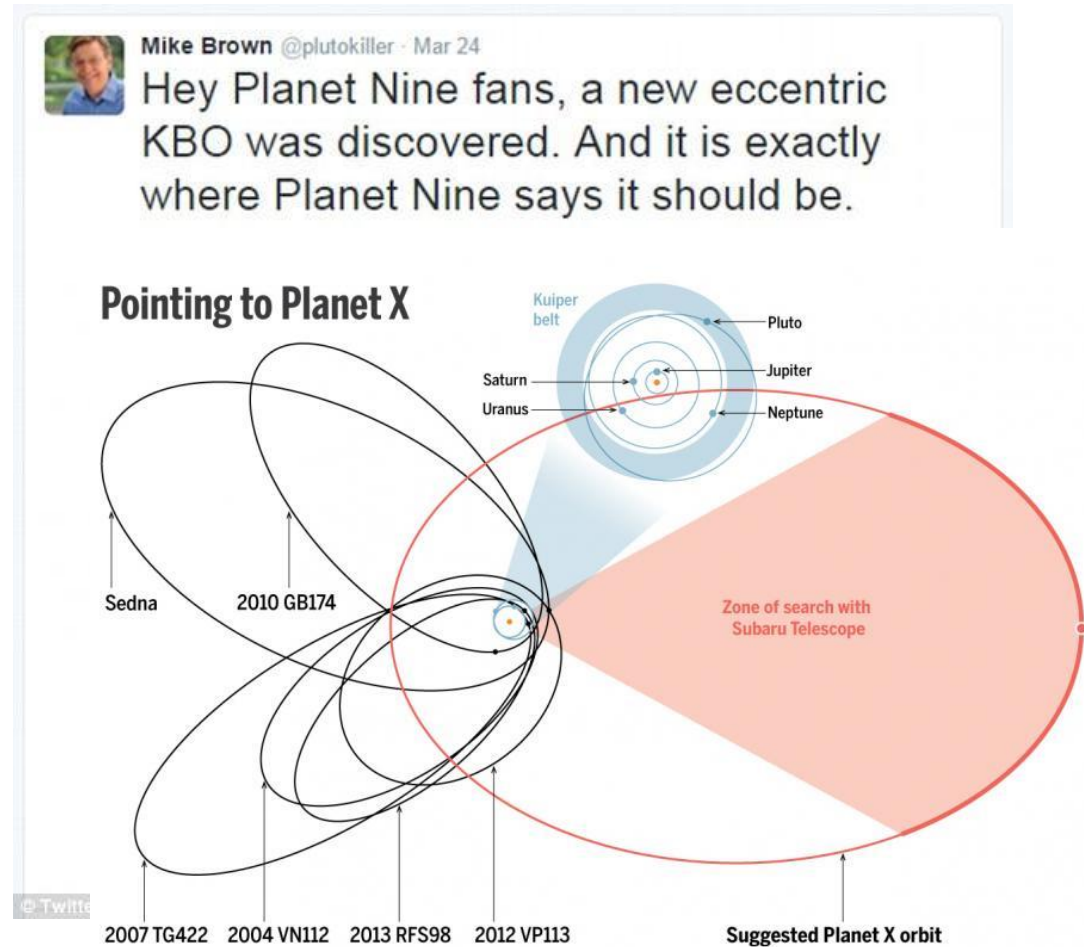


# 冥王星：“曾经的第九大行星”

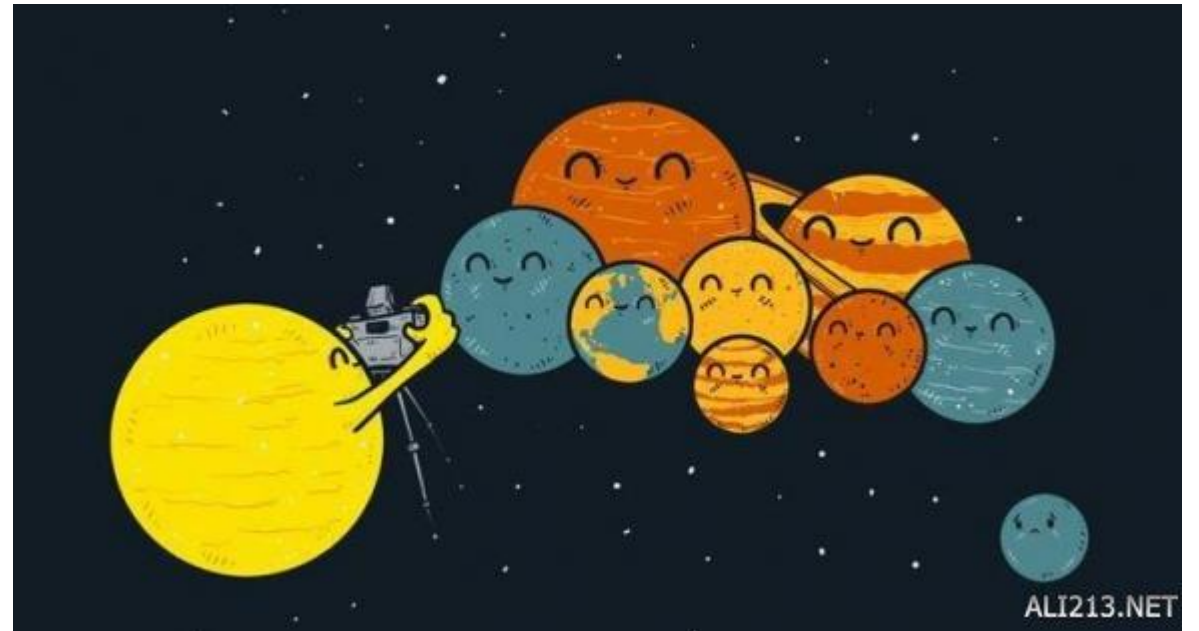


# “冥王星杀手”：“第九大行星”回来了？

2016年1月

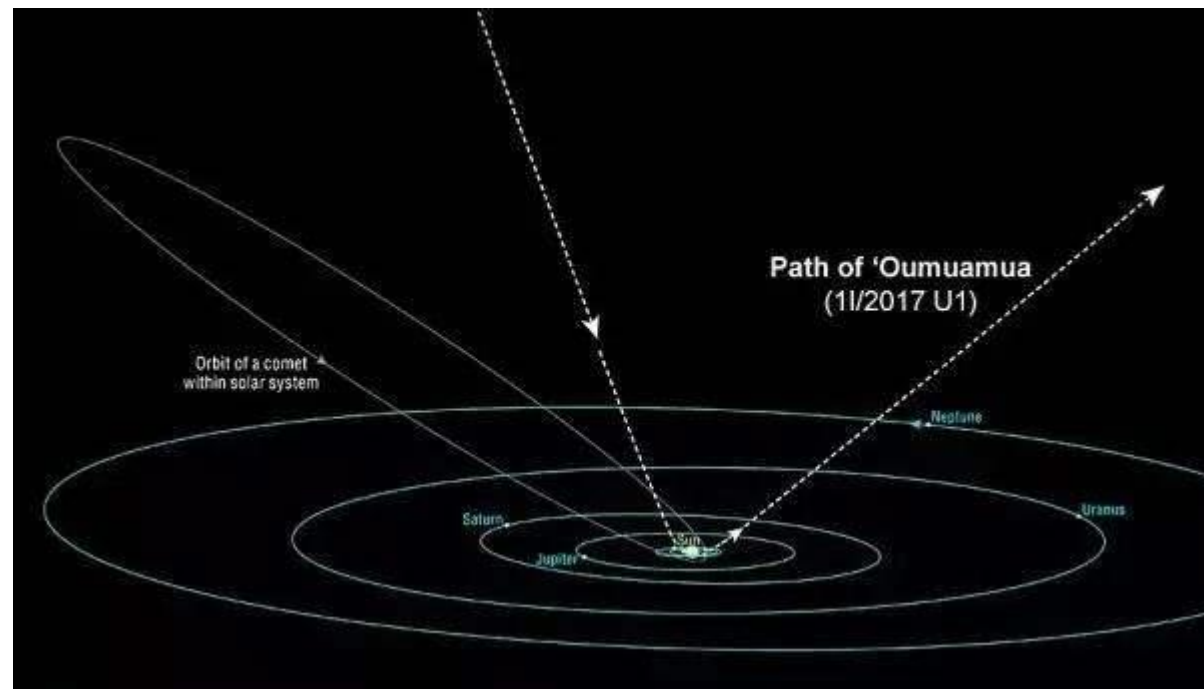


# “太阳系要添丁？”





# 2017年10月19日人类首次在太阳系内发现系外天体？



奥陌陌  
Oumuamua

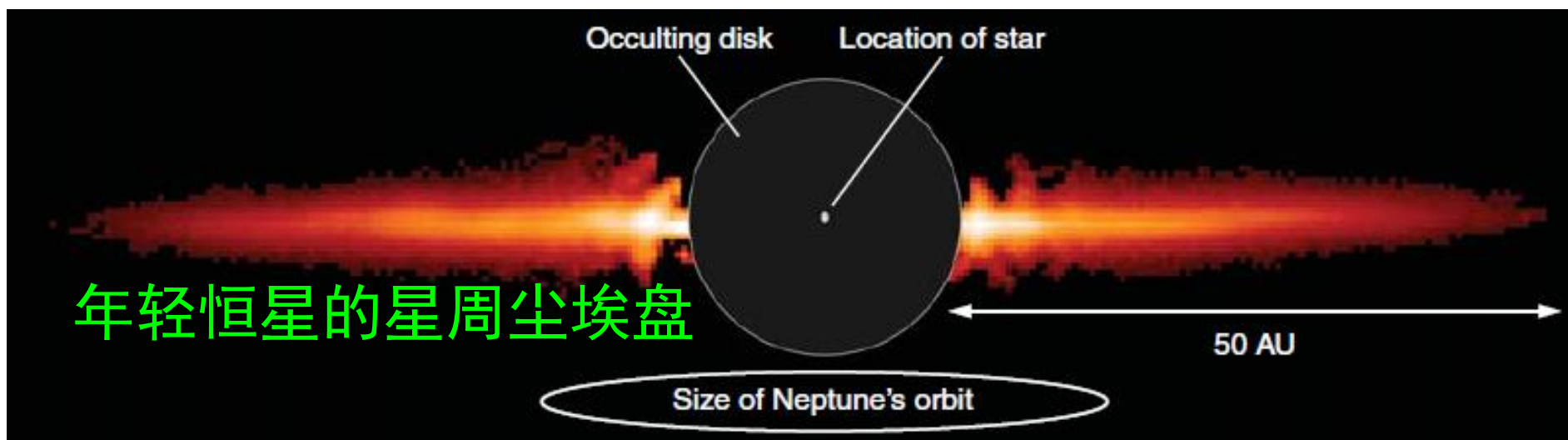
2019年8月：太阳系内第二个来自太阳系外的  
天体：彗星？



百家号/剥柠檬

## 5、行星系很常见

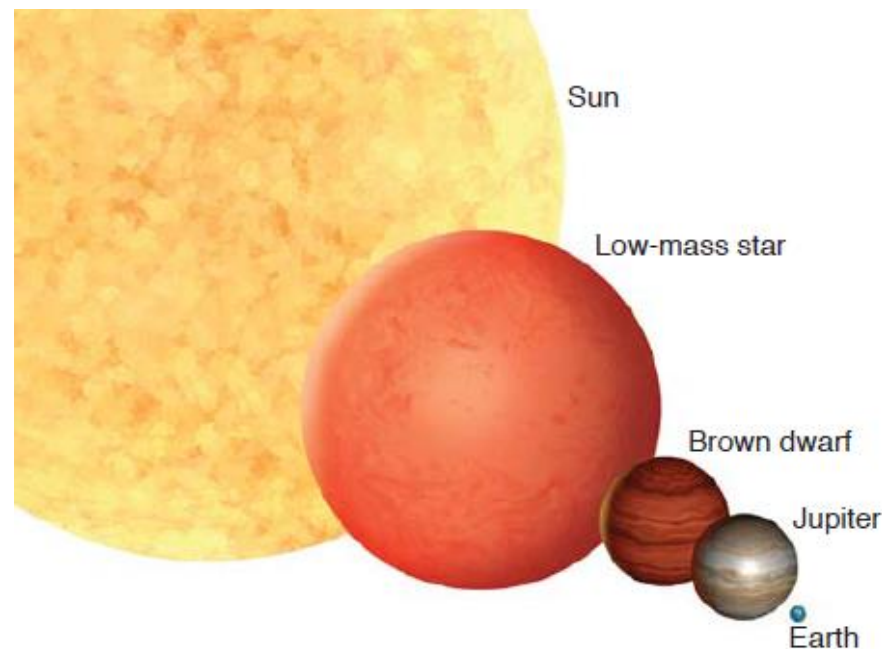
- 年轻恒星具有类似于形成太阳系的原行星盘
  - 对于正在诞生的新恒星，伴随行星系形成的物理过程应该是普遍的
- 行星小而暗弱，且靠近明亮的恒星
  - 探测很困难



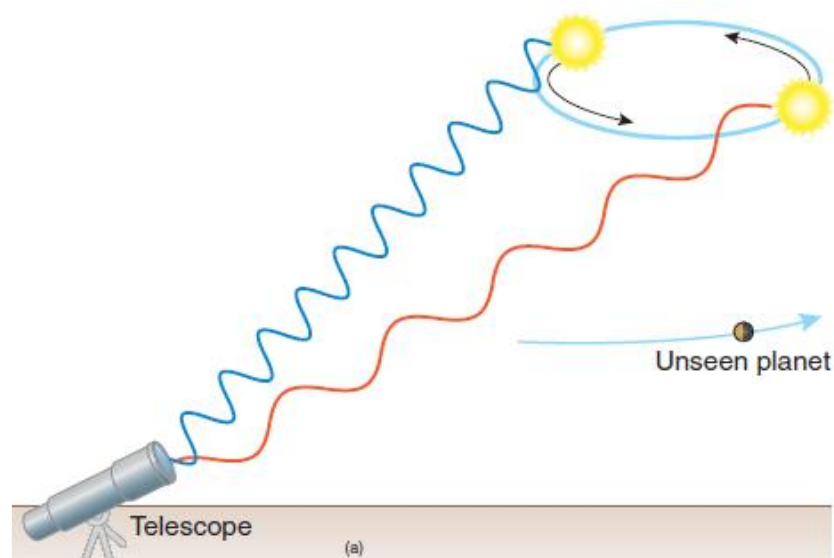
- 1995年发现的，环绕类太阳恒星飞马座51公转的木星大小的行星，开启了太阳系外行星 [系外行星，extrasolar planet 或 exoplanet] 的探测与研究
- 已经确认的系外行星已有数千颗
- 系外行星是绕恒星公转的且质量小于13倍木星质量 ( $M_J$ ) 的天体

褐矮星：  $13M_J < \text{质量} < 0.08M_{\text{Sun}}$  ( $80M_J$ )

恒星： 质量  $> 0.08M_{\text{Sun}}$

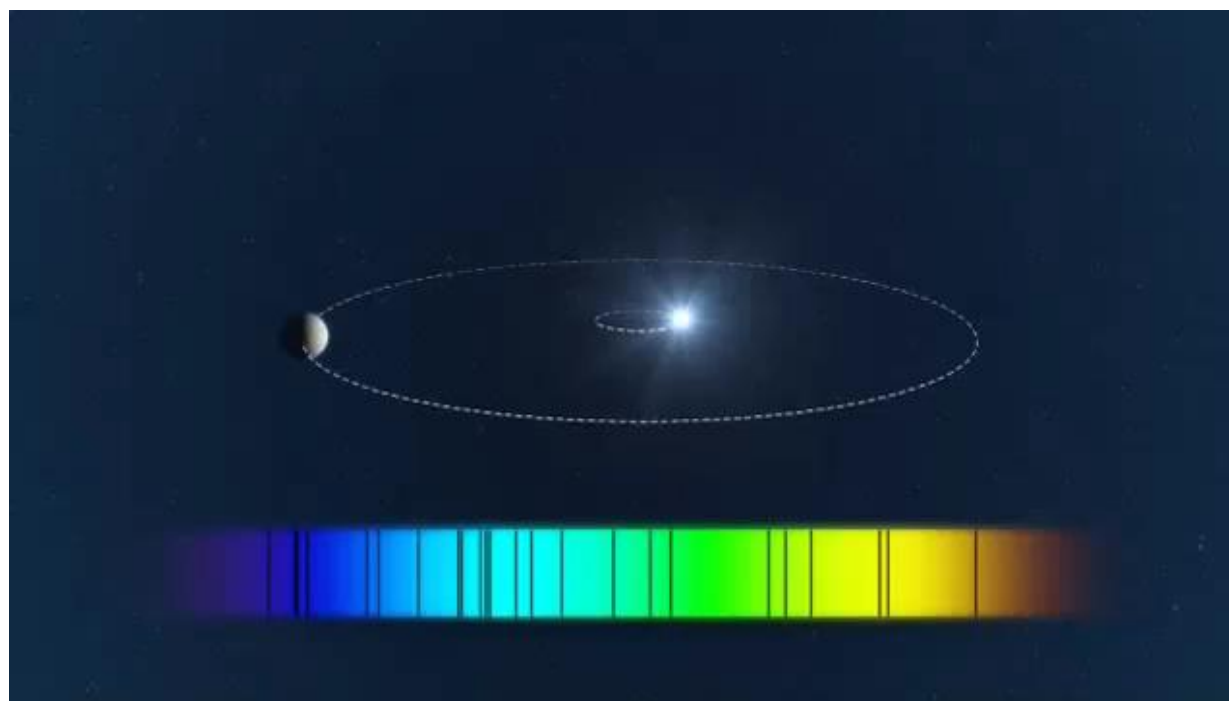


# (1) 视（径）向速度法



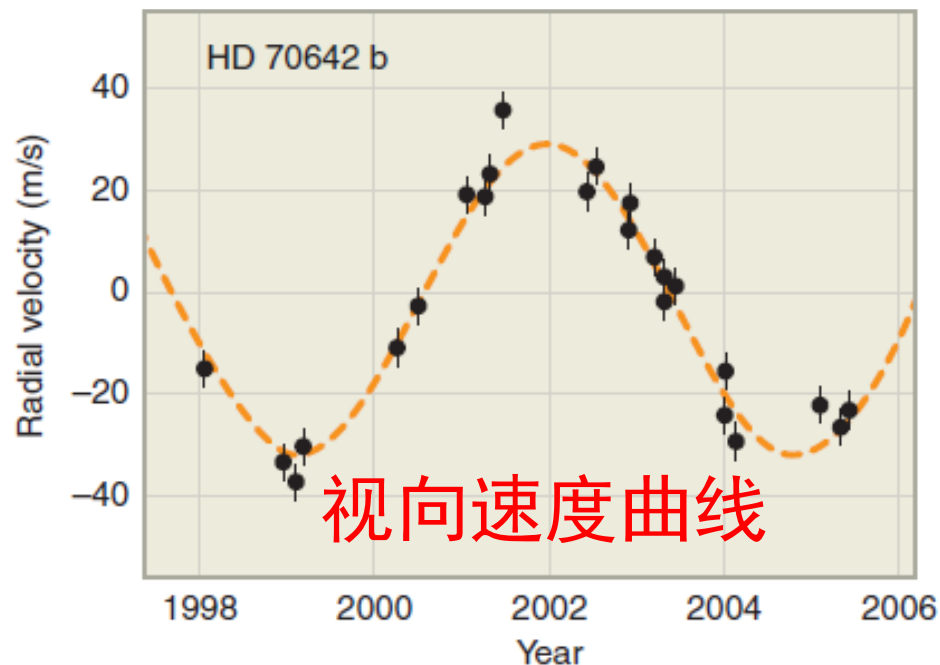
行星使得恒星也在  
做轨道运动

如果轨道面不垂直于视线方向，  
恒星光谱的吸收线就会发生周期  
性的频移





# 估算系外行星轨道的大小



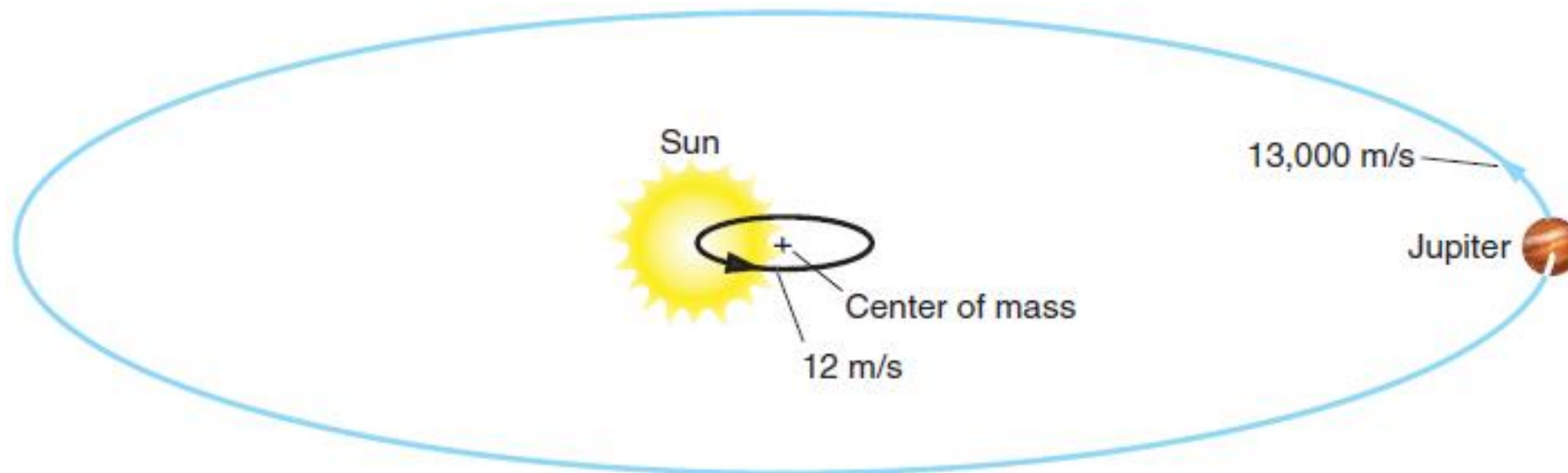
- 轨道周期 $P=5.7$ 年
- 总质量 $M \sim$ 恒星质量

$$\underline{2 \times 10^{30} \text{ kg}}$$

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G} \times \frac{A^3}{M}$$

$$\begin{aligned} A^3 &= \frac{G}{4\pi^2} \times M \times P^2 \\ &= 3.2 \text{ AU} \end{aligned}$$

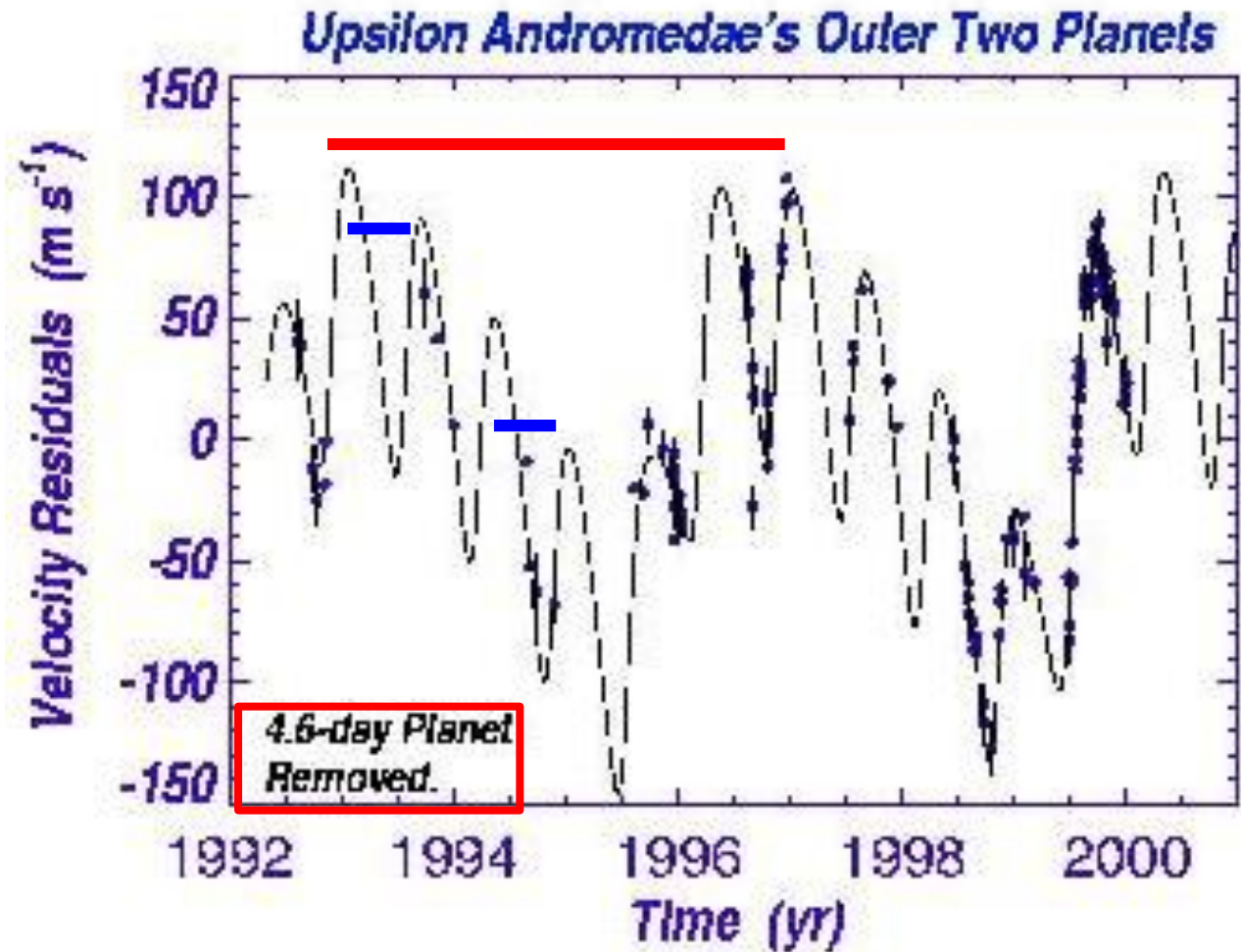
视向速度法可估算系外行星的质量及其到恒星的距离（轨道）



通过发现太阳有11.86年周期的视向速度  $[+12\text{m/s}, -12\text{m/s}]$  曲线，外星天文学家敢说我们的太阳至少有一个木星质量的行星

## 多周期的视向速度曲线：系外行星系

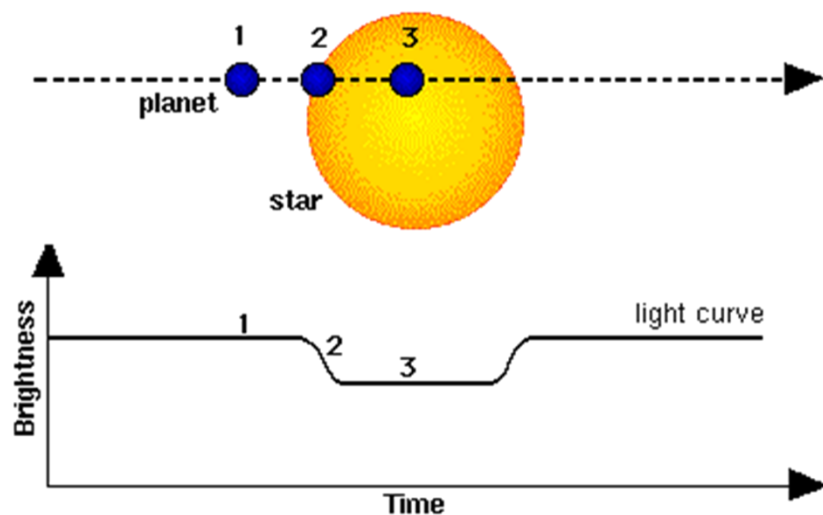
4.6天，0.5年和3年的  
周期 →  
至少3个行星的证据



## (2) 凌星法

当行星运行到恒星前面时，会遮挡很小一部分恒星光，从而使恒星周期性地变暗

- 测量系外行星的大小



# 行星大小的估算

$$\text{Percentage reduction in light} = \frac{\text{Area of disk of planet}}{\text{Area of disk of star}} = \frac{\pi R_{\text{planet}}^2}{\pi R_{\text{star}}^2} = \frac{R_{\text{planet}}^2}{R_{\text{star}}^2}$$

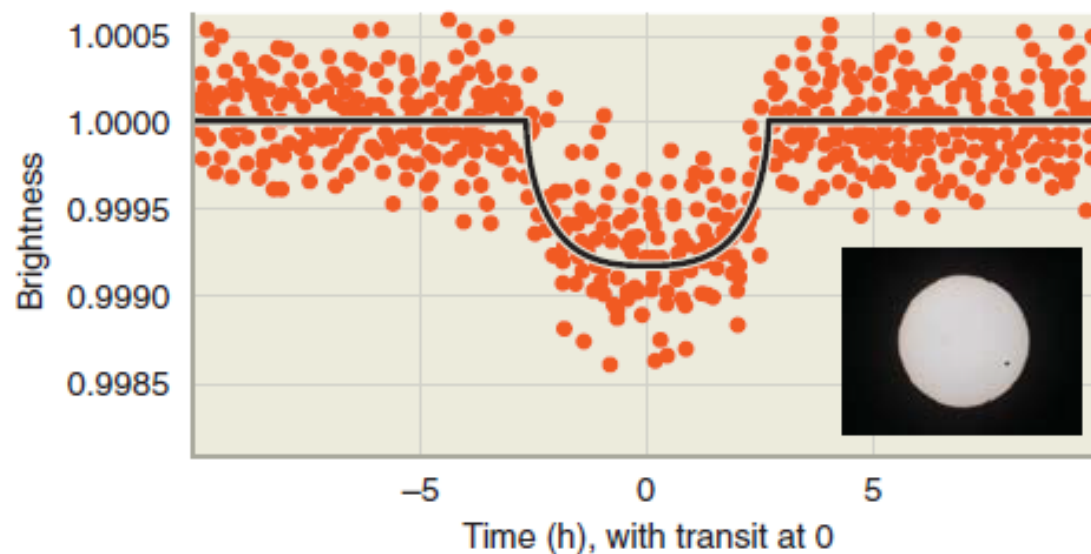
$$0.00077 = \frac{R_{\text{Kepler-11c}}^2}{R_{\text{star}}^2} = \frac{R_{\text{Kepler-11c}}^2}{(7.7 \times 10^8 \text{ m})^2}$$

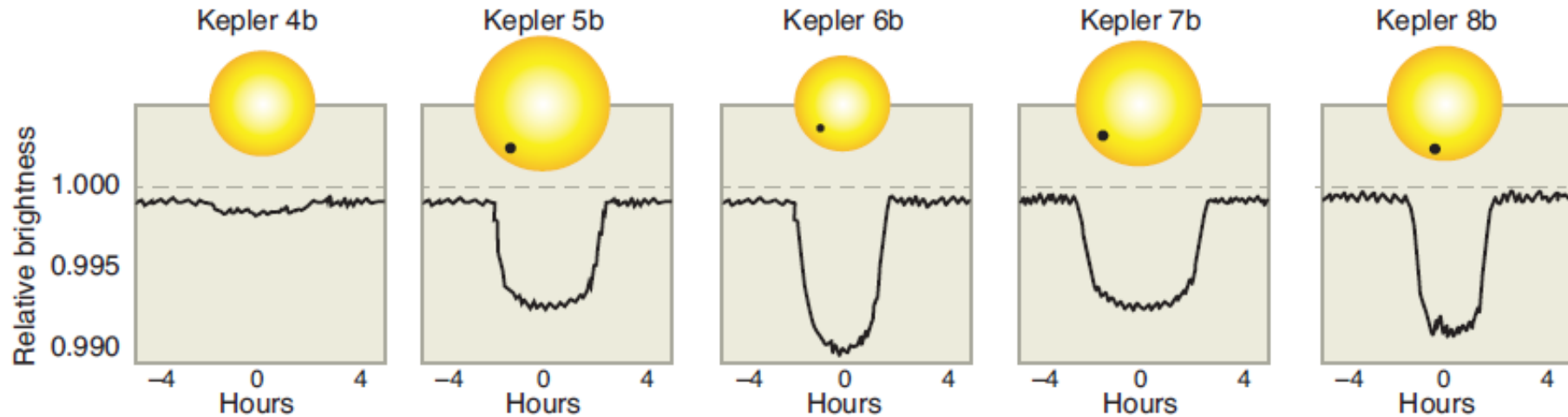
$$R_{\text{Kepler-11c}}^2 = 4.5 \times 10^{14} \text{ m}^2$$

$$R_{\text{Kepler-11c}} = 2.1 \times 10^7 \text{ m}$$

$$3.3 R_{\oplus}$$

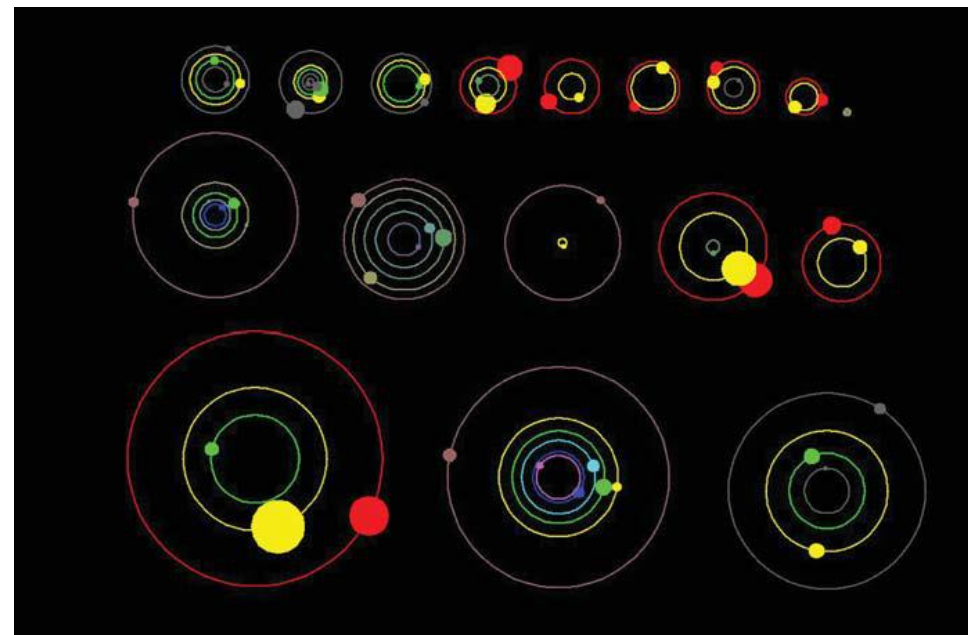
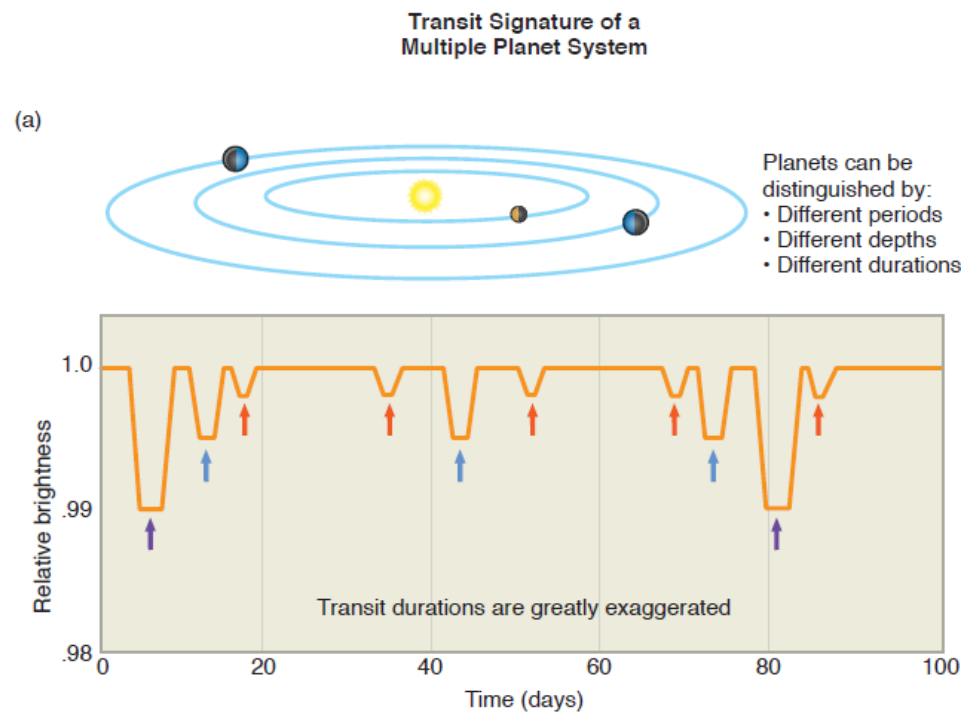
内插图为金星凌日





- 要看到系外行星对其恒星的凌星，地球必须大致位于该行星的轨道平面上
- （位于地球轨道平面内的外星天文学家如果发现太阳亮度0.009倍的周期性变暗，即可推测地球的存在）

# 凌星法发现多行星系

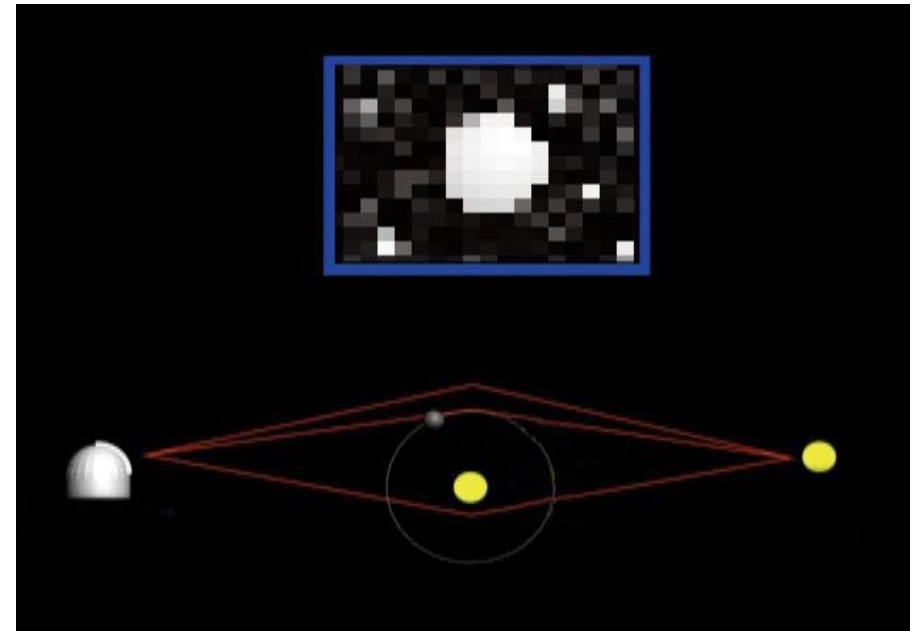


开普勒空间望远镜发现的行星系

## (2) 微引力透镜法

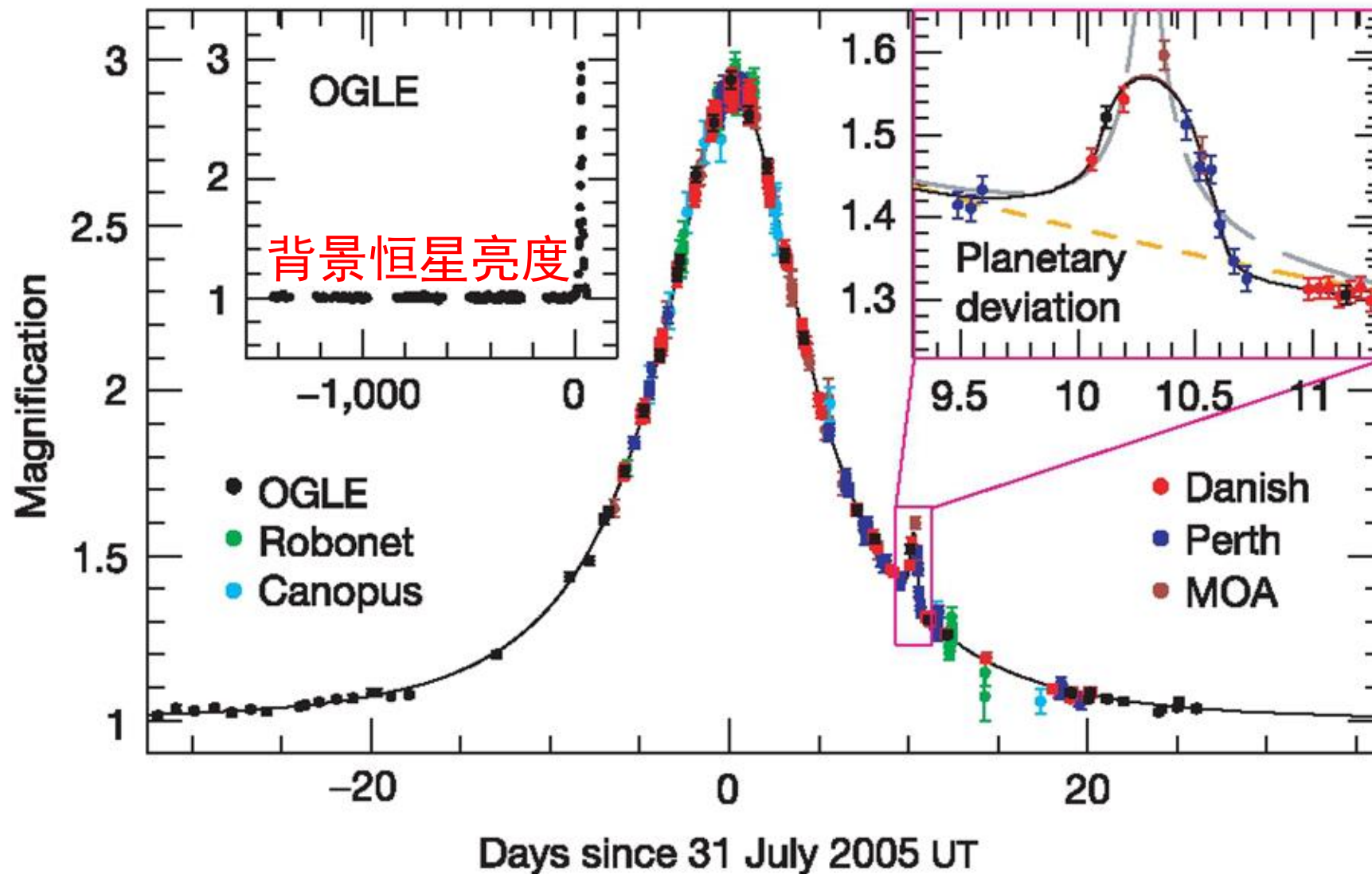
当一颗恒星及其行星从远处背景恒星前经过时，引力透镜效应增强背景恒星的亮度，从而能够显示恒星及其行星的存在

- 估算行星的质量
- 发现流浪行星





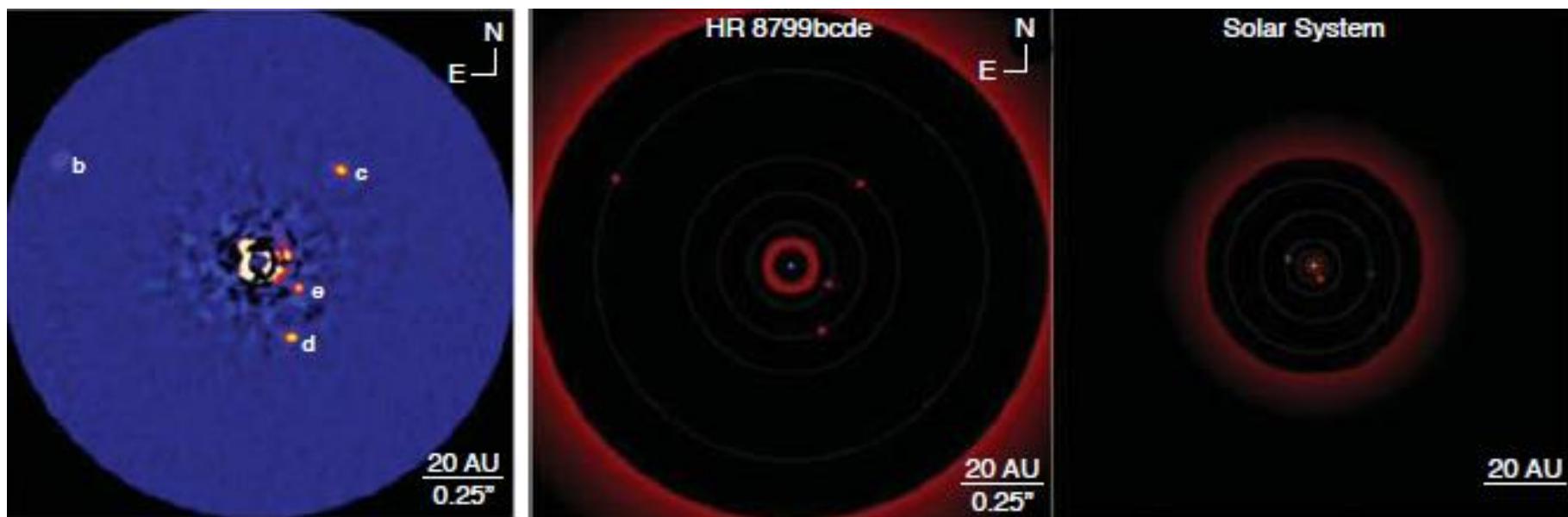
# OGLE-2005-BLG-390



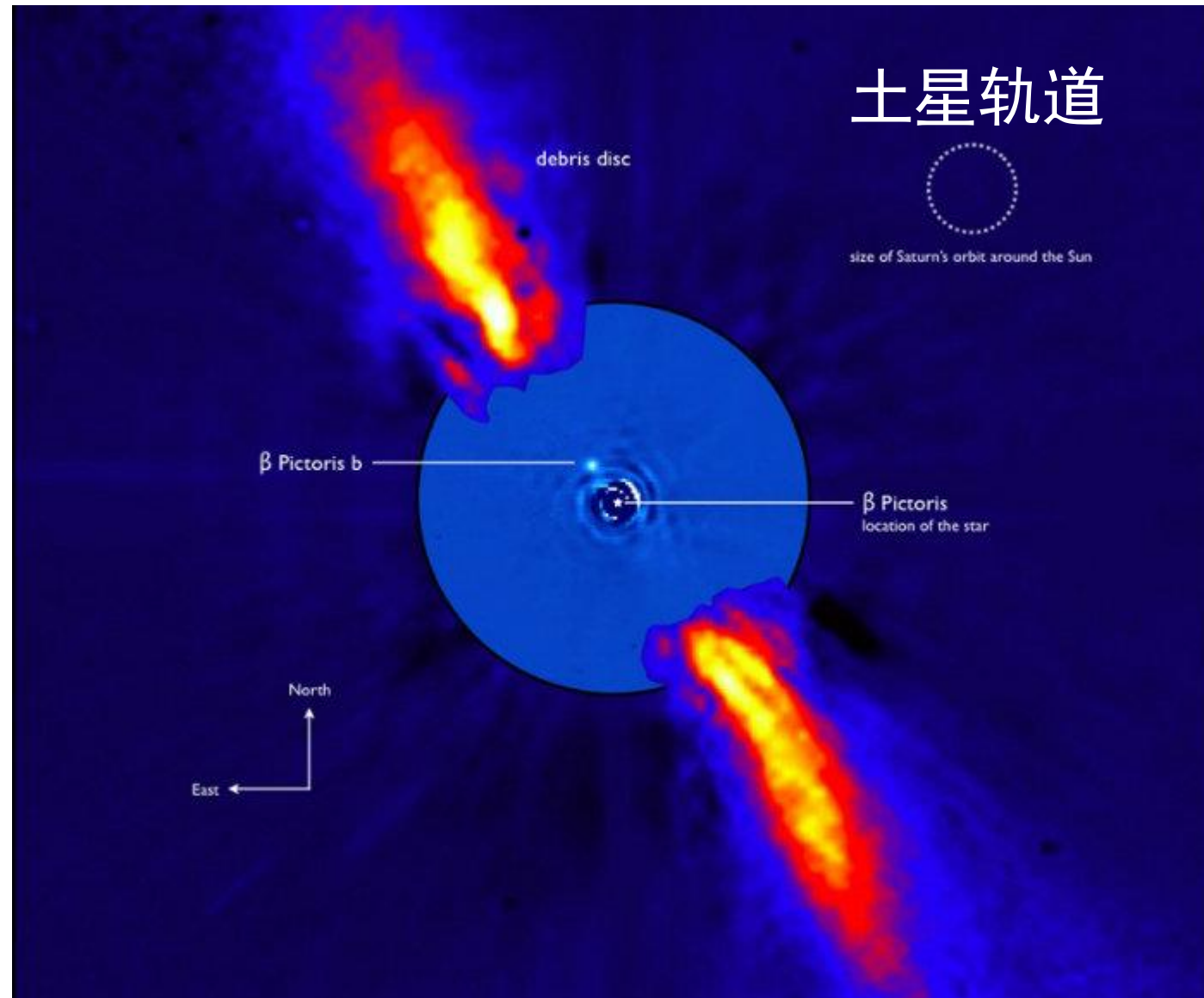
## (4) 直接成像法

在天文望远镜上加装星（日）冕仪，降低恒星亮度，直接拍摄行星

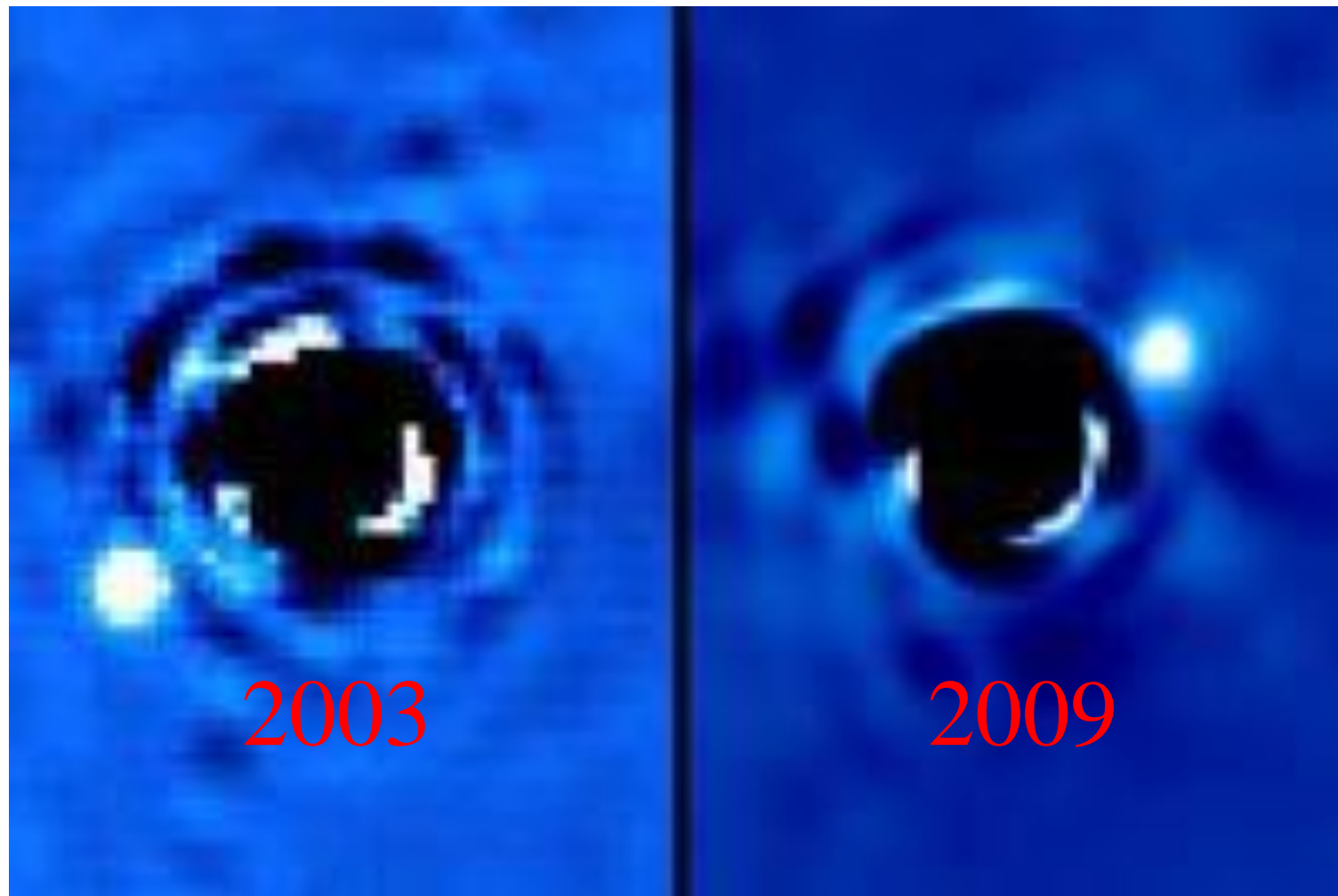
- 发现远离恒星的大行星
- 已发现数十颗系外行星（系）



# 绘架座 $\beta$ 的尘埃盘与巨行星绘架座 $\beta$ -b



## 绘架座 $\beta$ -b的公转



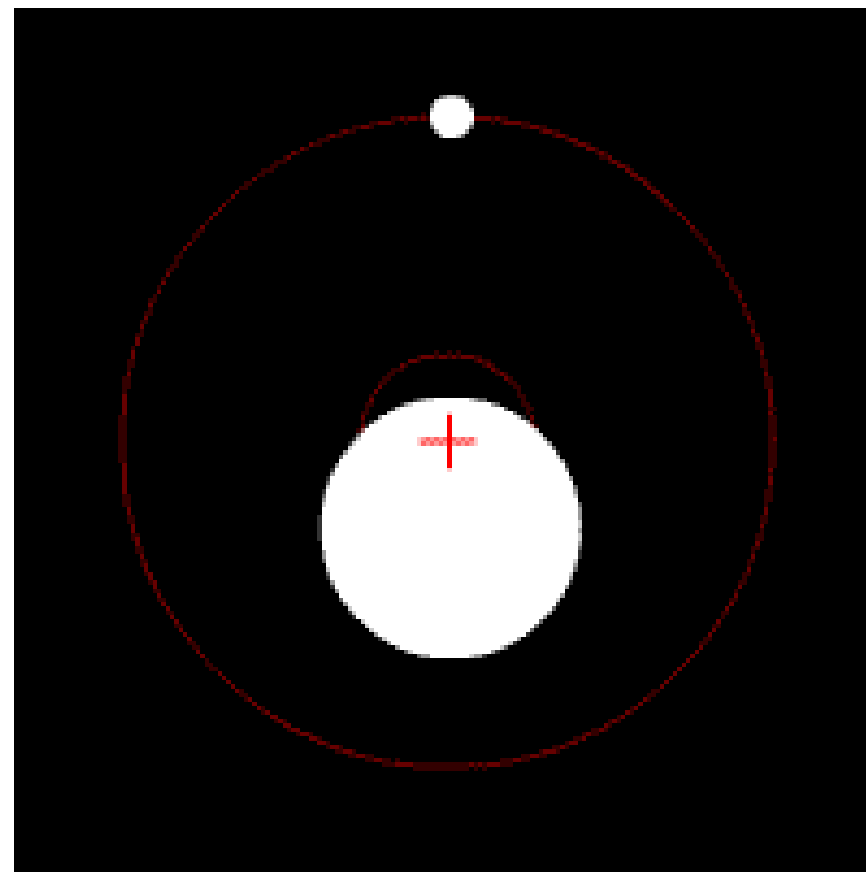
## (5) 天体测量法

直接观测恒星位置的周期性变化

盖亚空间望远镜发现1颗系外行星

20世纪~60年代宣称的用此方法发

现的系外行星没有得到确认



恒星的反射运动或摆动

# 系外行星有诸多变数

- 热木星

- 选择效应，迁移

- 小型海王星：2-10倍地球质量，小于海王星的气态行星

- 超级地球：大于地球的岩石行星

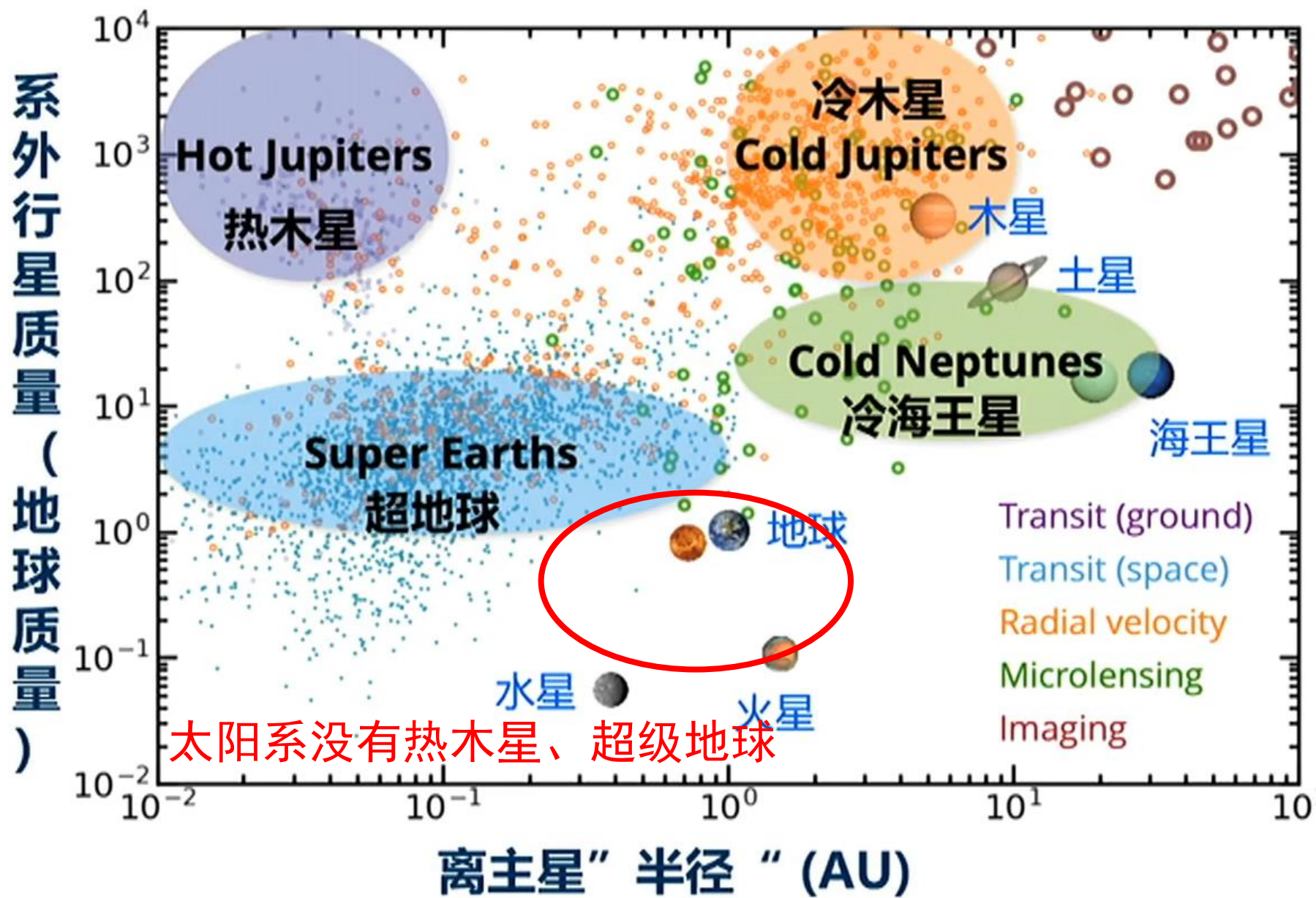
- 高椭圆度轨道、高倾角轨道

- 公转方向与恒星自转相反

- 多行星系：小型海王星与超级地球交替

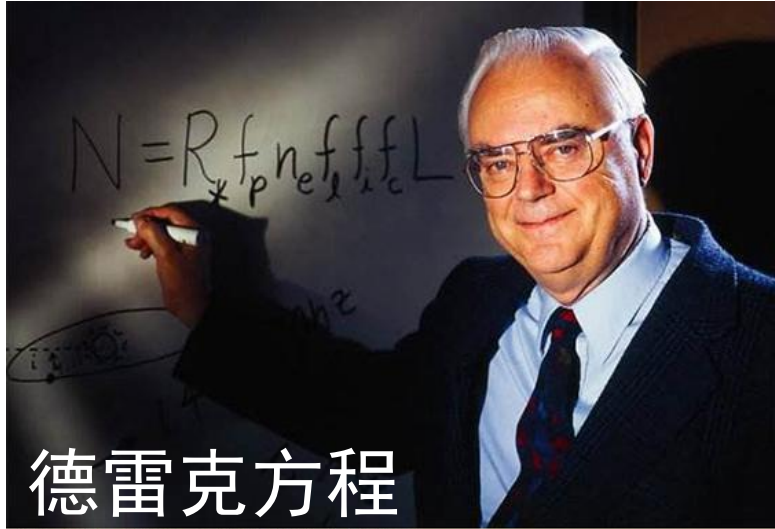
- 流浪行星（被踢出行星系的行星）





# 6、地球2.0

- 行星形成往往（也许总是）伴随恒星形成
- 对于一个~2000亿恒星的银河系，有多少行星（+卫星）？
- 有多少适合生命的行星？
- 有多少智慧生命的行星？
- 有多少有文明社会的行星？



德雷克方程

银河系内可能与我们通讯的文明数量

$$N = N_g \times F_p \times N_e \times F_l \times F_i \times F_c \times F_L$$

银河系内恒星数目

恒星有行星的比例

宜居行星的比例

演化出生命的宜居行星行星比例

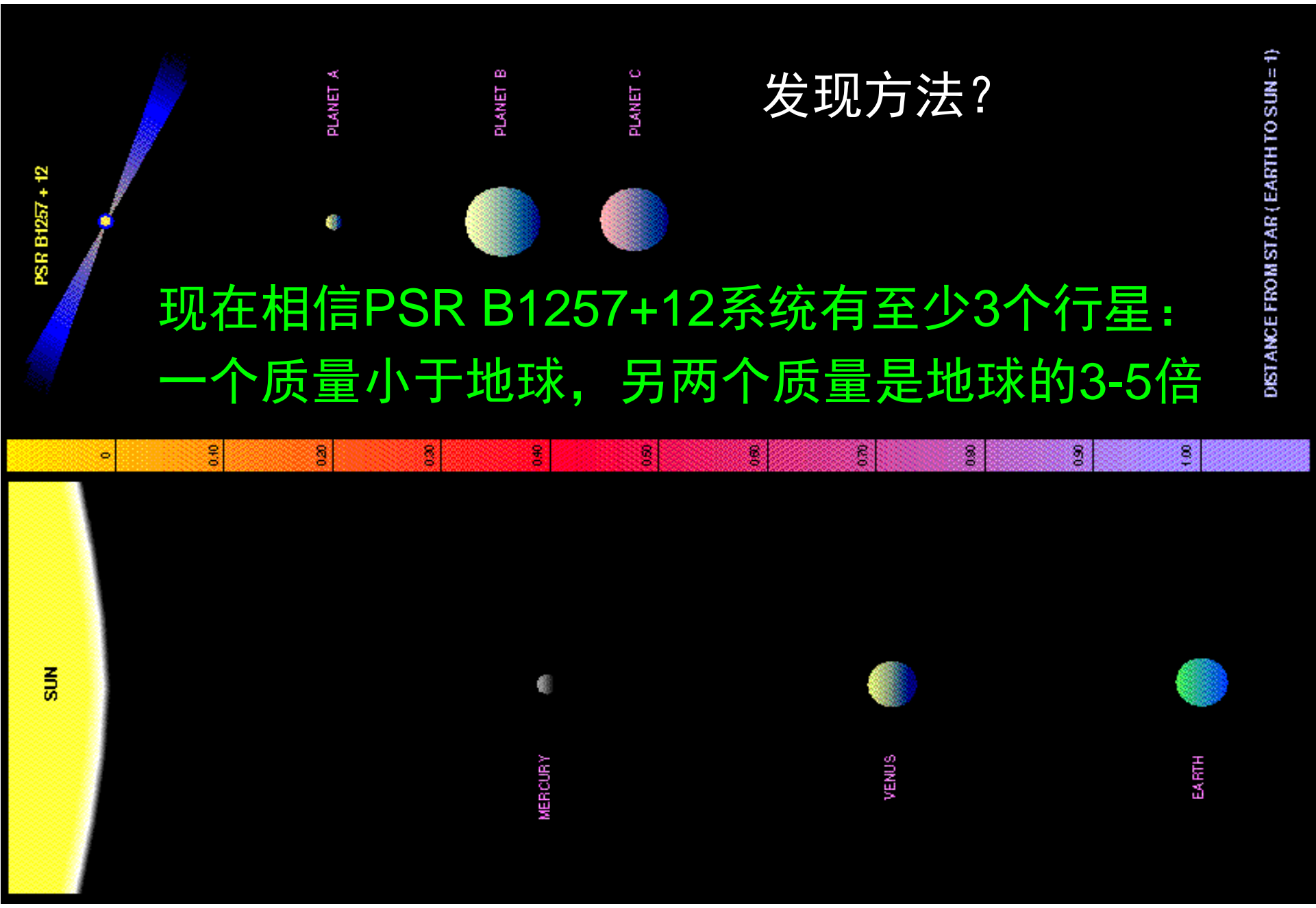
演化出高智生物的概率

高智生命能够进行通讯的概率

科技文明持续时间在行星生命周期中占的比例



- 很久很久以前：猜测？
- 1960s：声名狼藉的系外行星探测
- 1991：系外行星被发现在不该在的地方
- 1995：其它恒星有行星



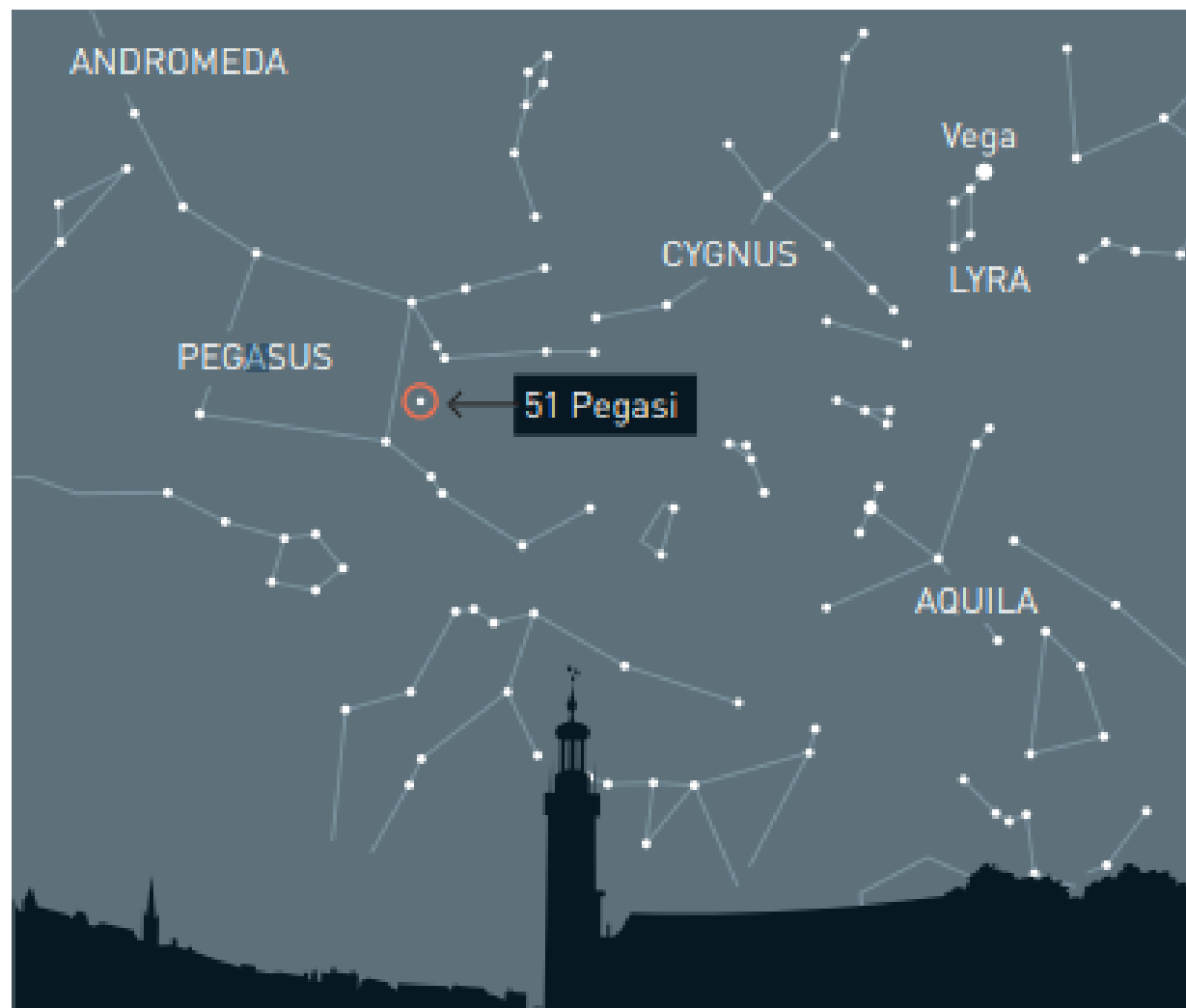
# 发现方法？

现在相信PSR B1257+12系统有至少3个行星：  
一个质量小于地球，另两个质量是地球的3-5倍



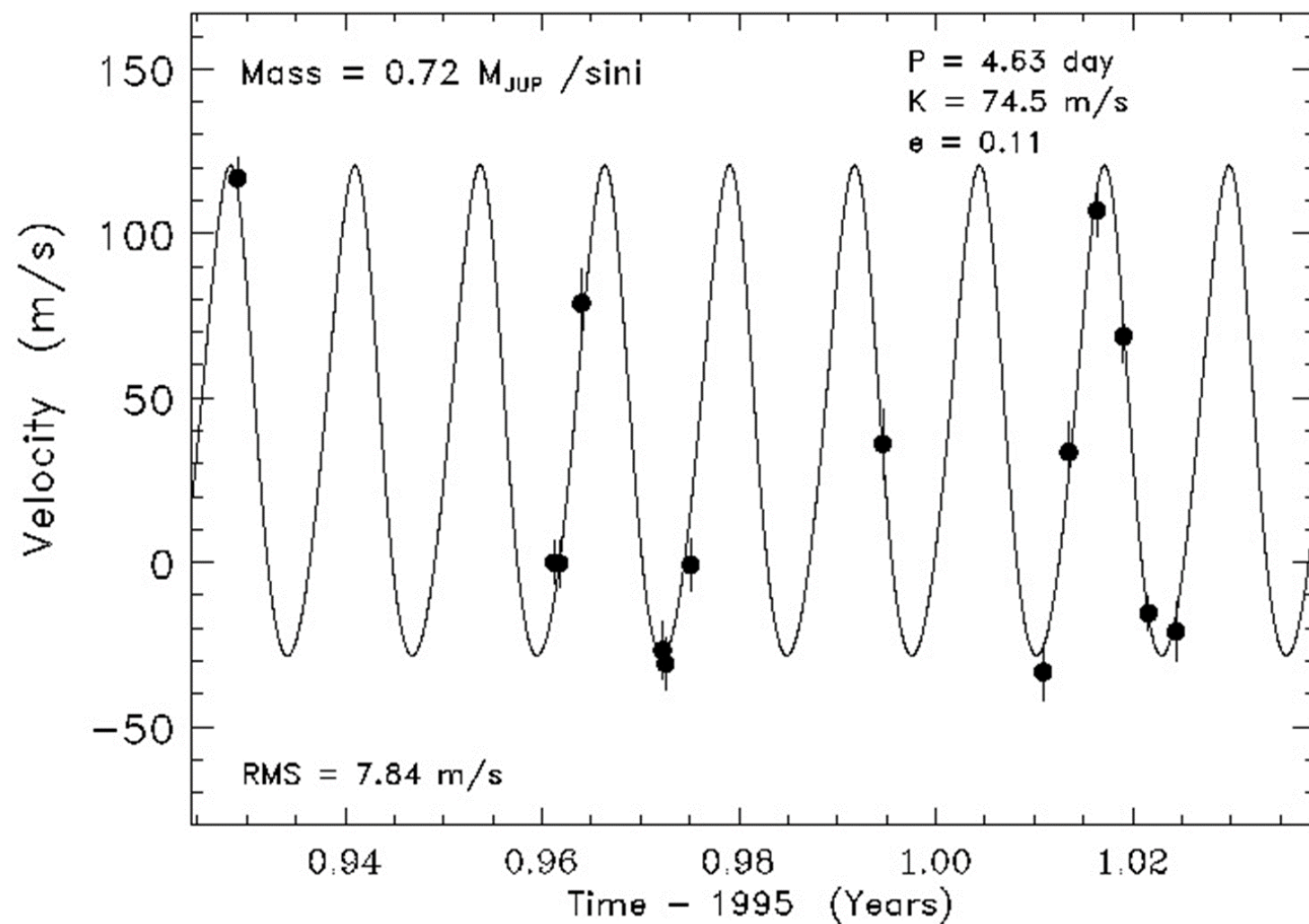
1995, 瑞士天文学家马约尔 (Mayor) 和  
奎洛兹 (Queloz)

# 飞马座51恒星

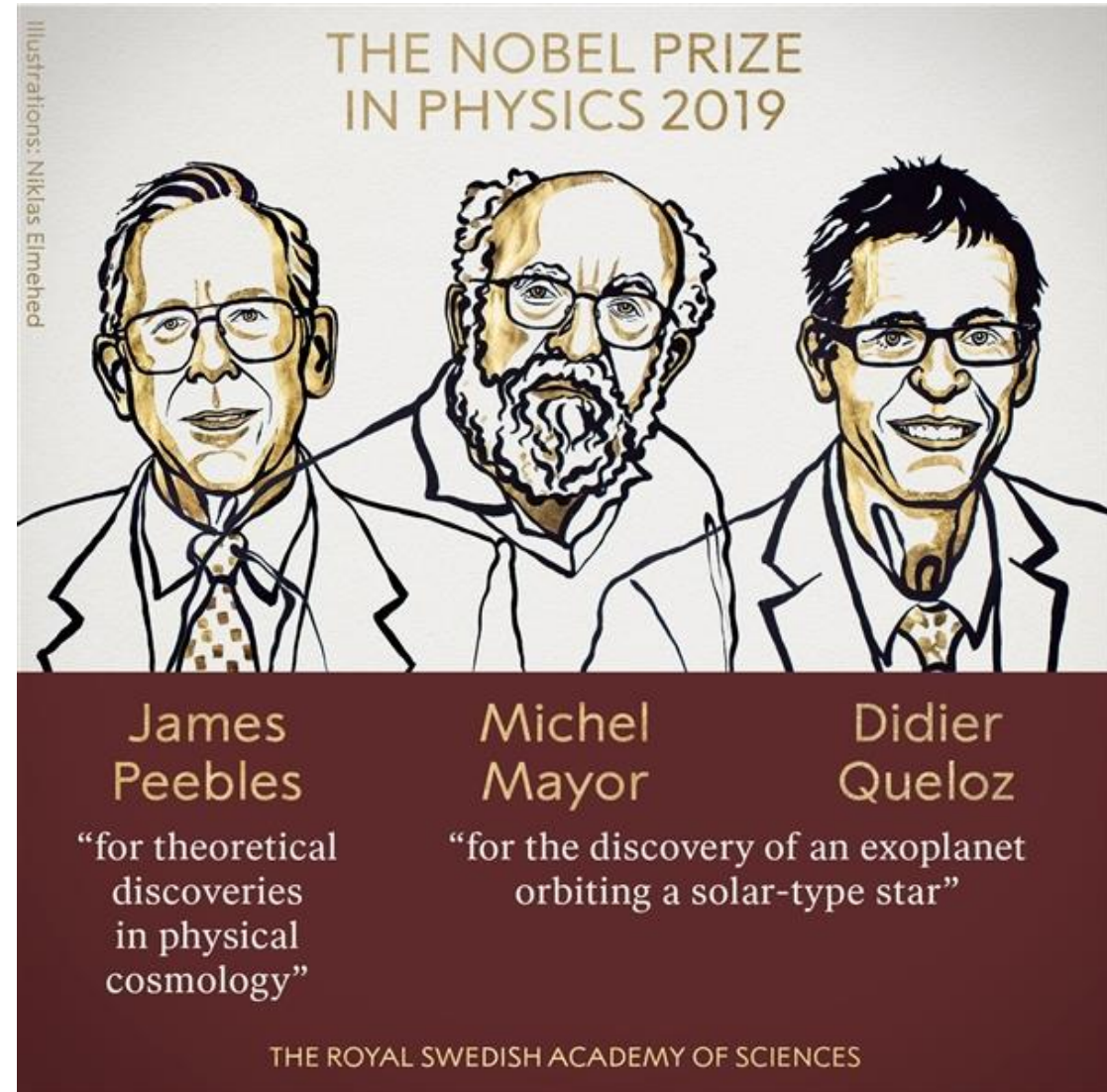


© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

# 飞马51恒星的视向速度曲线



"for contributions to our understanding of the evolution of the universe and **Earth's place in the cosmos**"

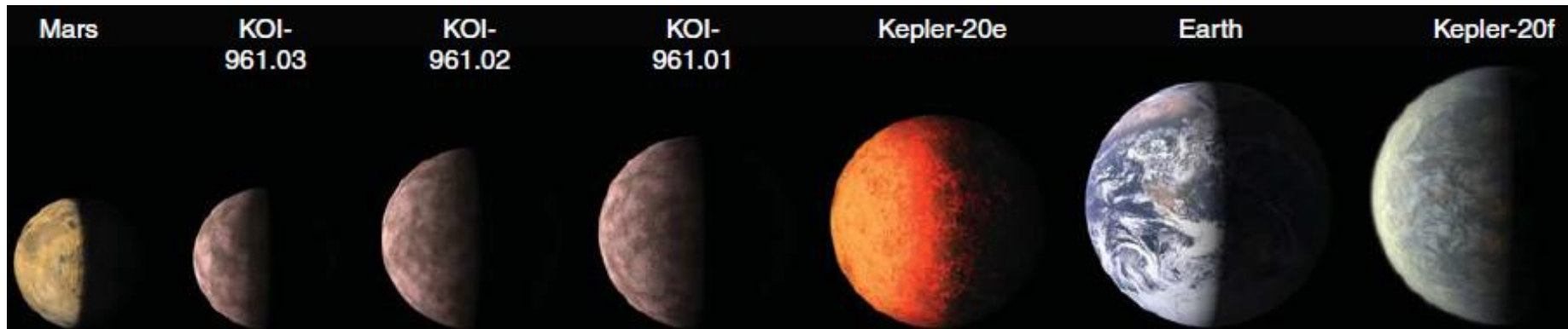




# 热木星 Hot Jupiter?

- 它一点不像太阳系中的行星！
- 质量为木星一半的行星应该是一个气态巨行星。
- 但它十分靠近恒星，相当于在恒星表面掠过。

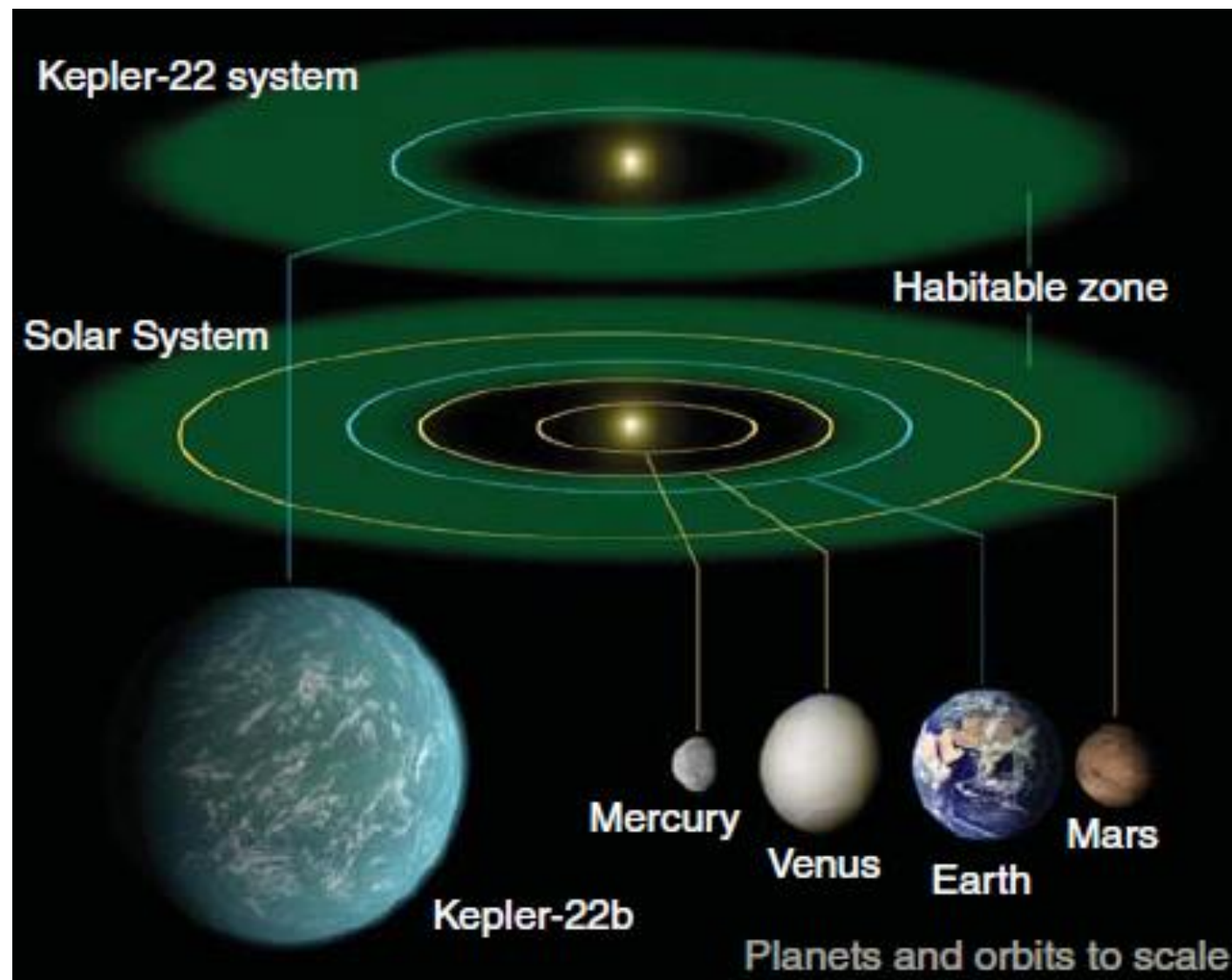
- 开普勒望远镜证认的首批地球大小的系外行星（凌星法 → 大小）
- 进一步证认：视向速度法 → 质量
- 行星的密度 → 行星的成分：气体？岩石？冰？水？或混合？





# 宜居带

恒星周围适合液态水存在的区域



# 入选地球2.0的基本条件

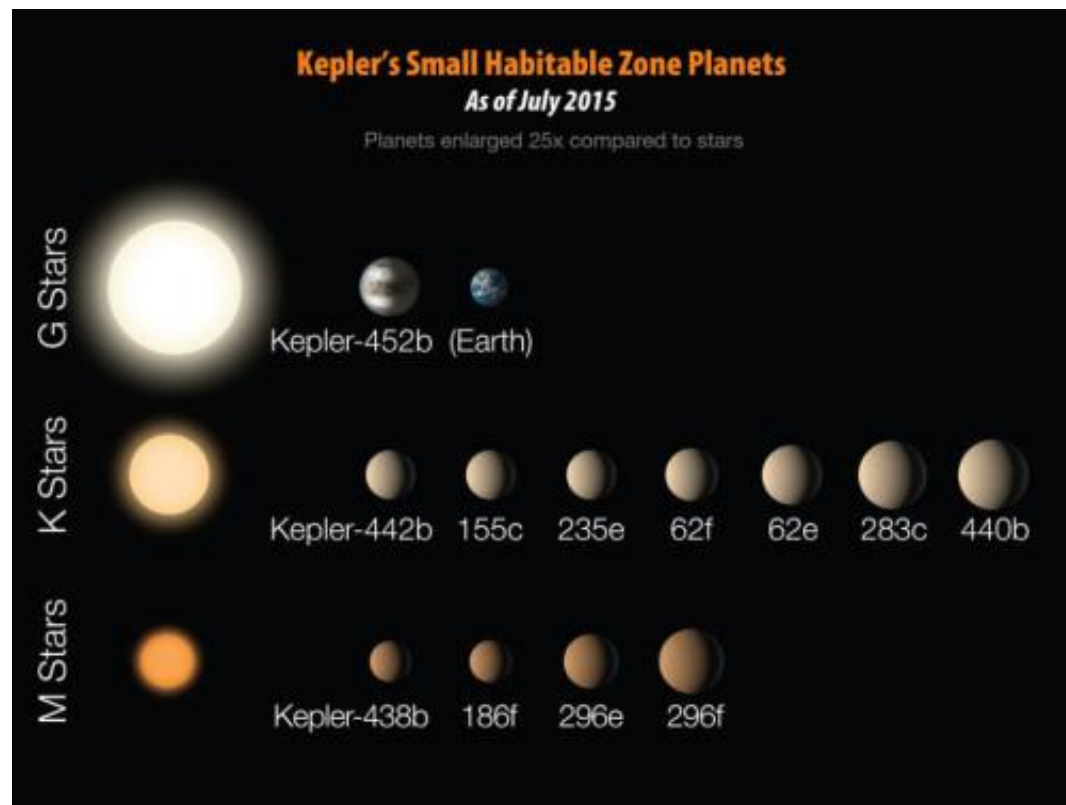
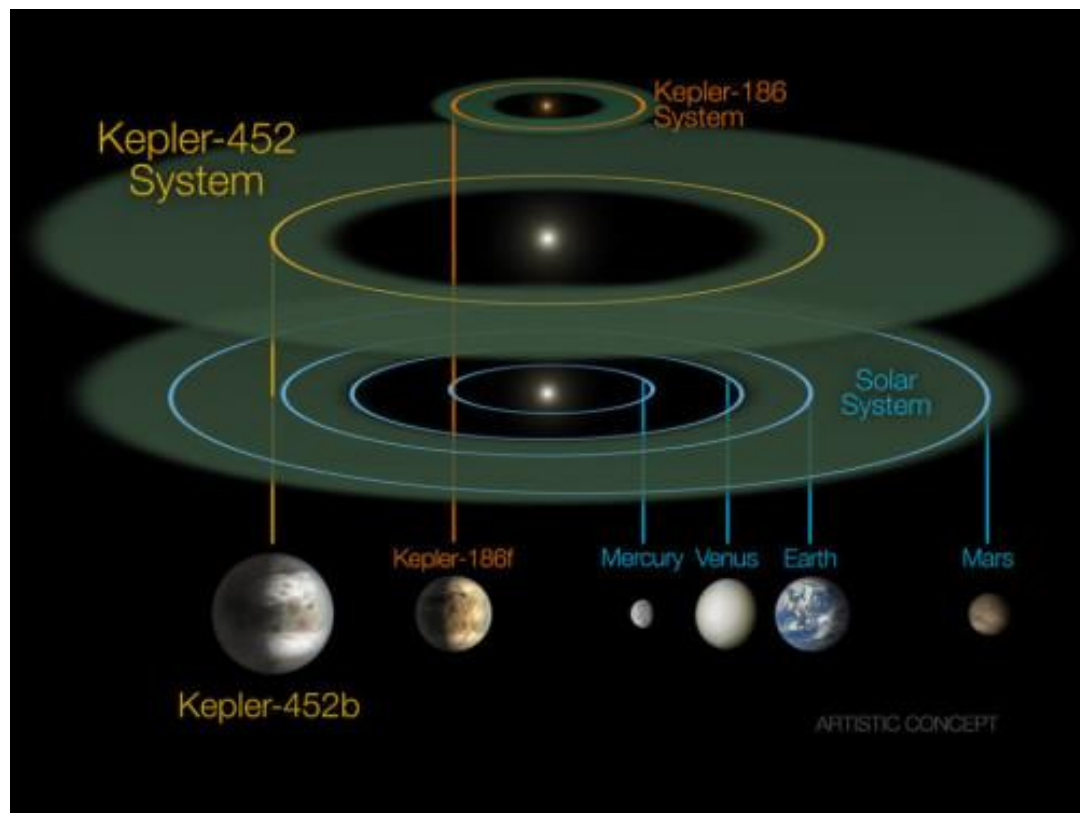
## No Place Like Home

	Planet	Near Earth size?	Sunlike star?	In habitable zone?
	Kepler-20e	✓ (0.8 Earth radius)	✓	No (too hot)
	Kepler-22b	No (2.4 Earth radii)	✓	✓
	Kepler-186f	✓ (1.1 Earth radii)	No (red dwarf)	✓
<i>Not yet found</i>	"Earth 2.0"	Yes	Yes	Yes

**Near misses.** Several Earth-like exoplanets have been discovered, but none meets all the criteria for Earth 2.0.

# Kepler-452b: 第一个地球2.0（假的？）

2015.07.24

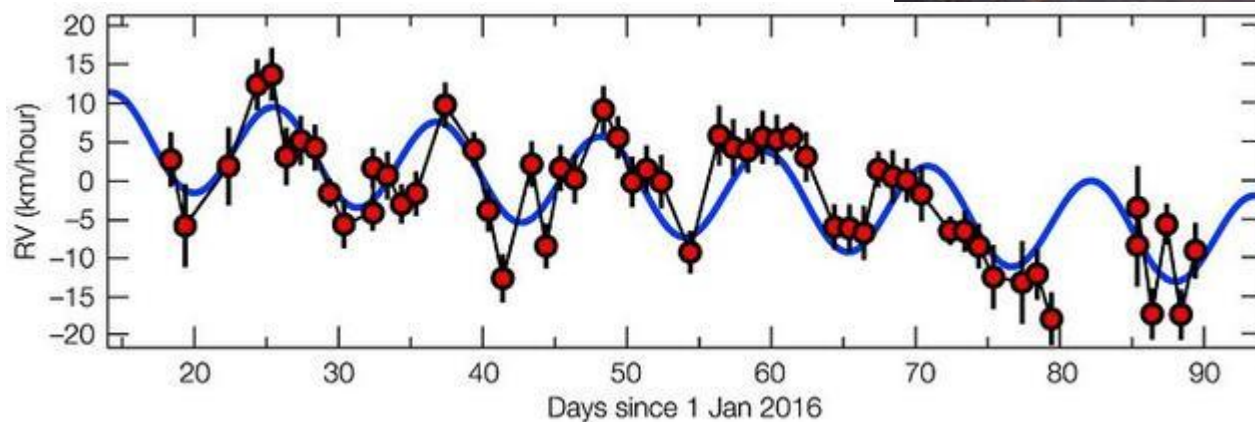
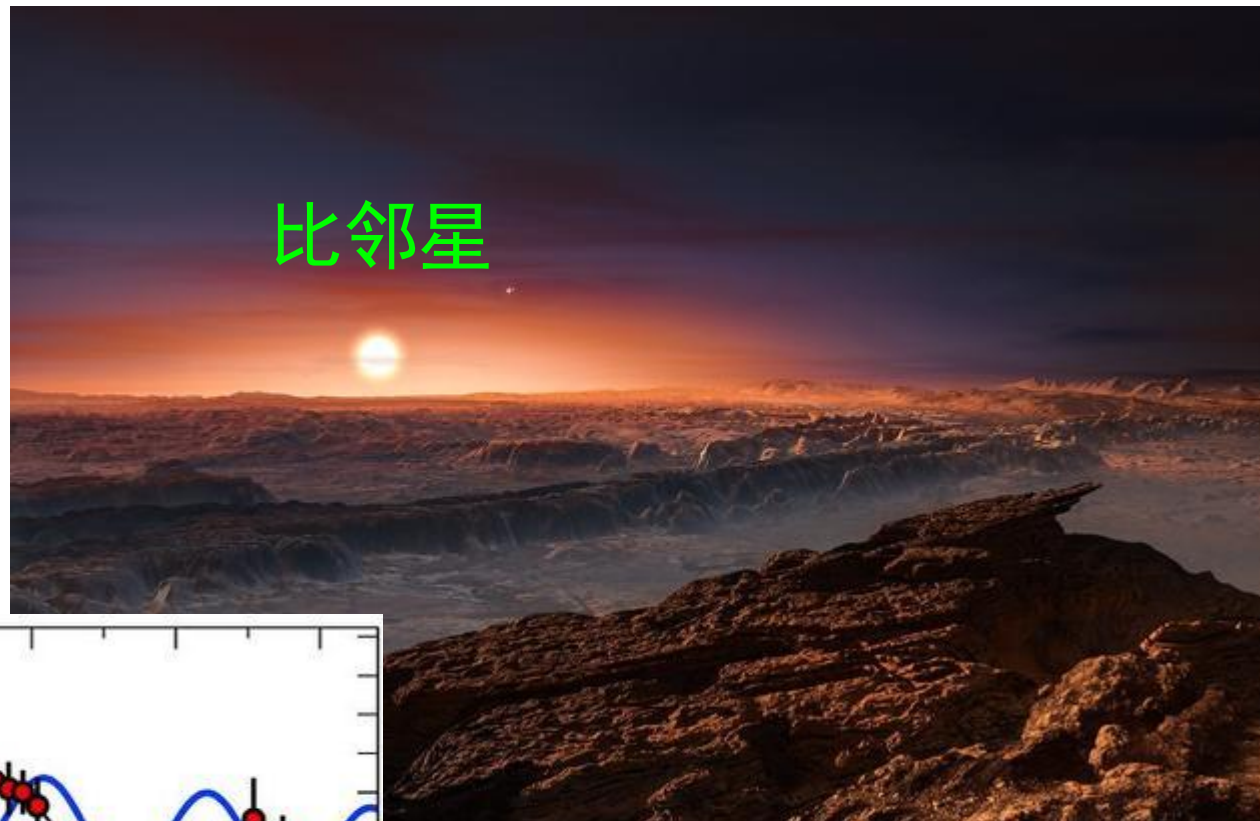






# 距离地球最近恒星周围发现2颗系外行星

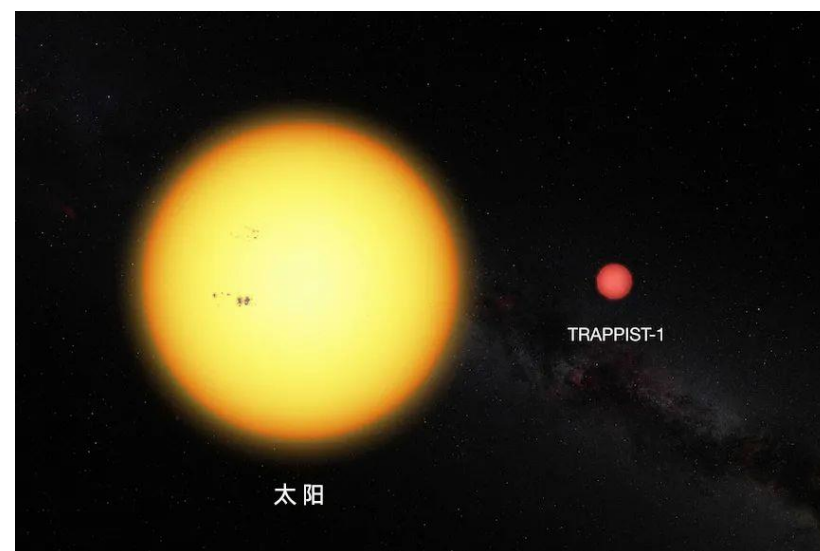
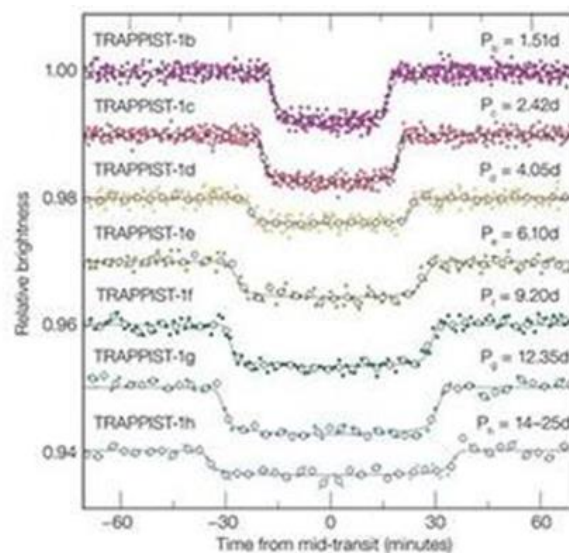
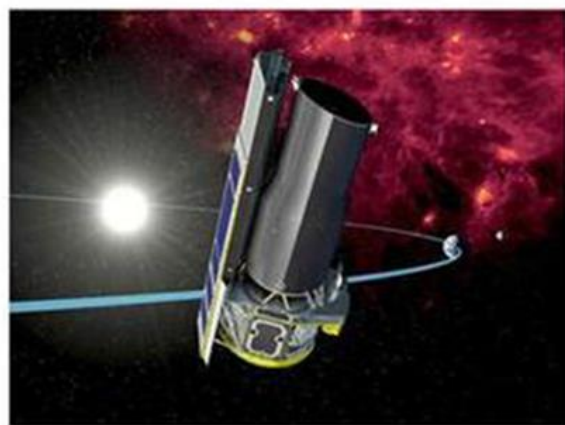
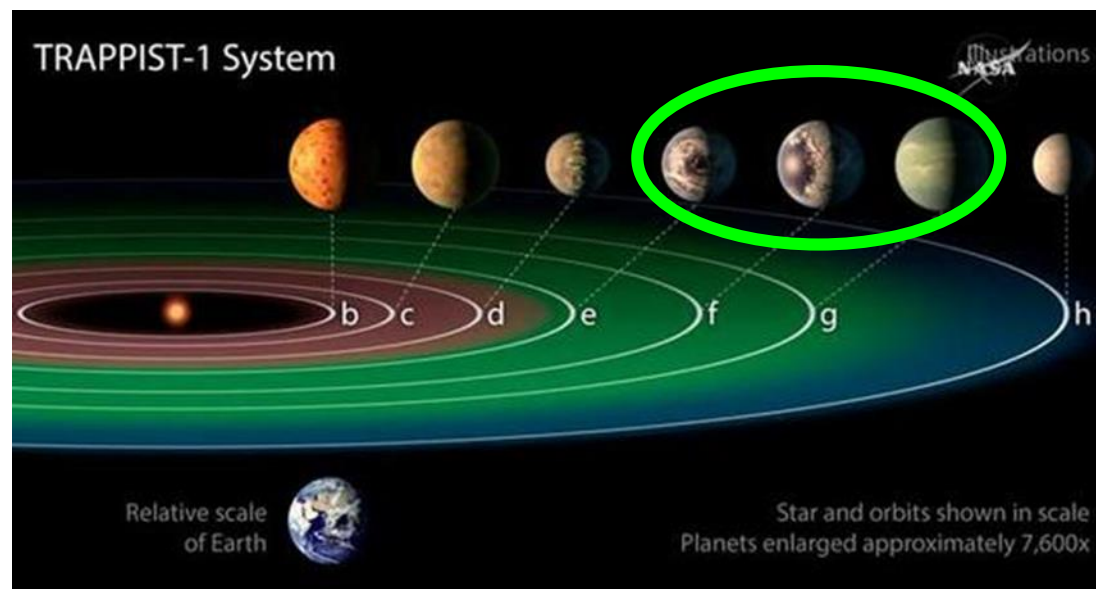
- 2016、2020
- 地表或有水
- 红矮星

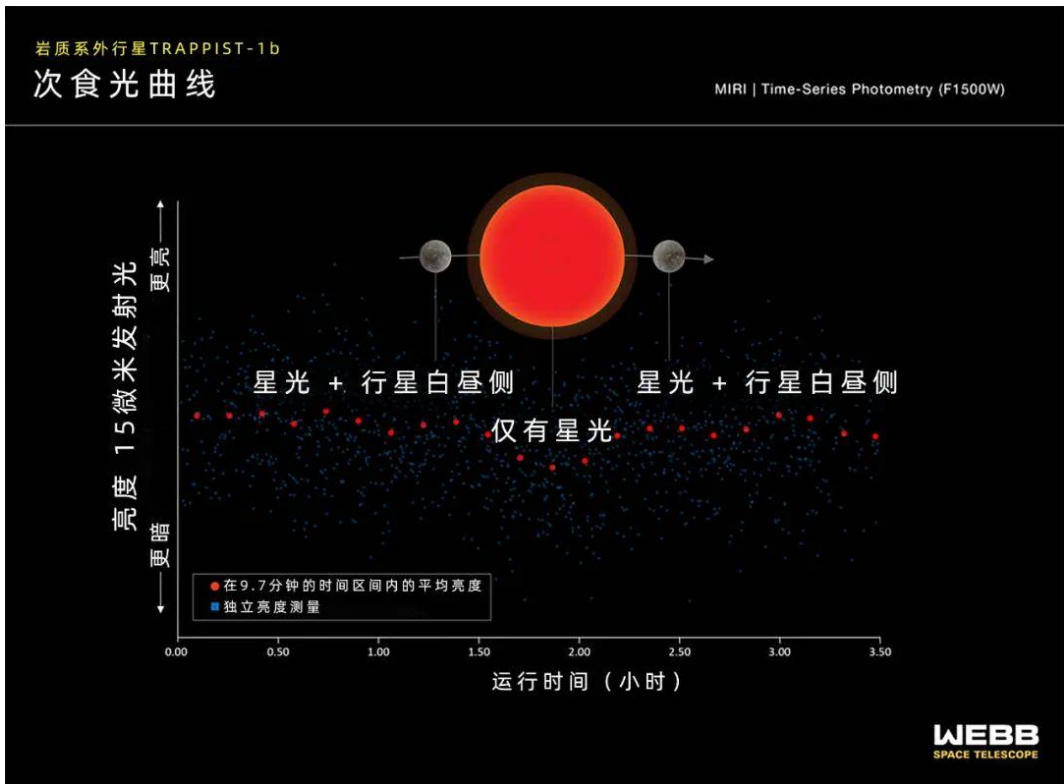
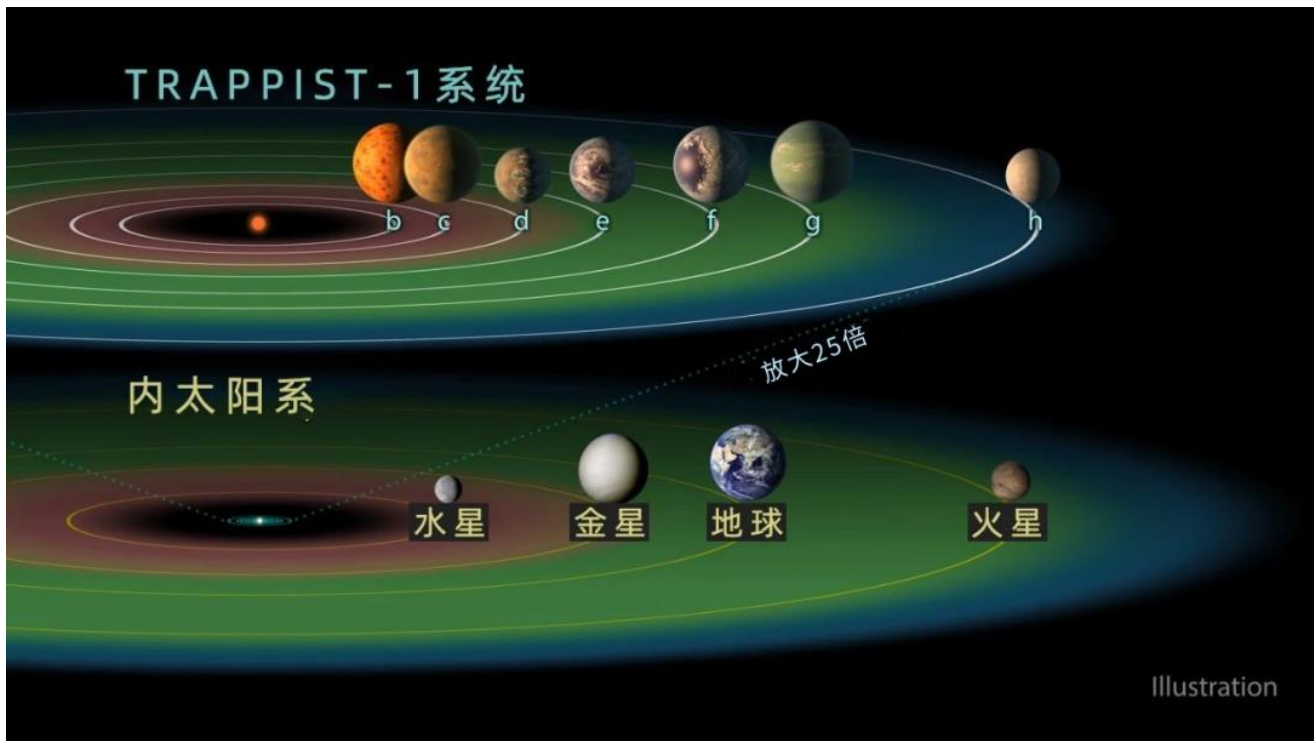




# 40光年外恒星周围发现7颗类地行星

- 2017.02.22
- 斯皮策红外太空望远镜
- 超冷矮（M型）星40光年

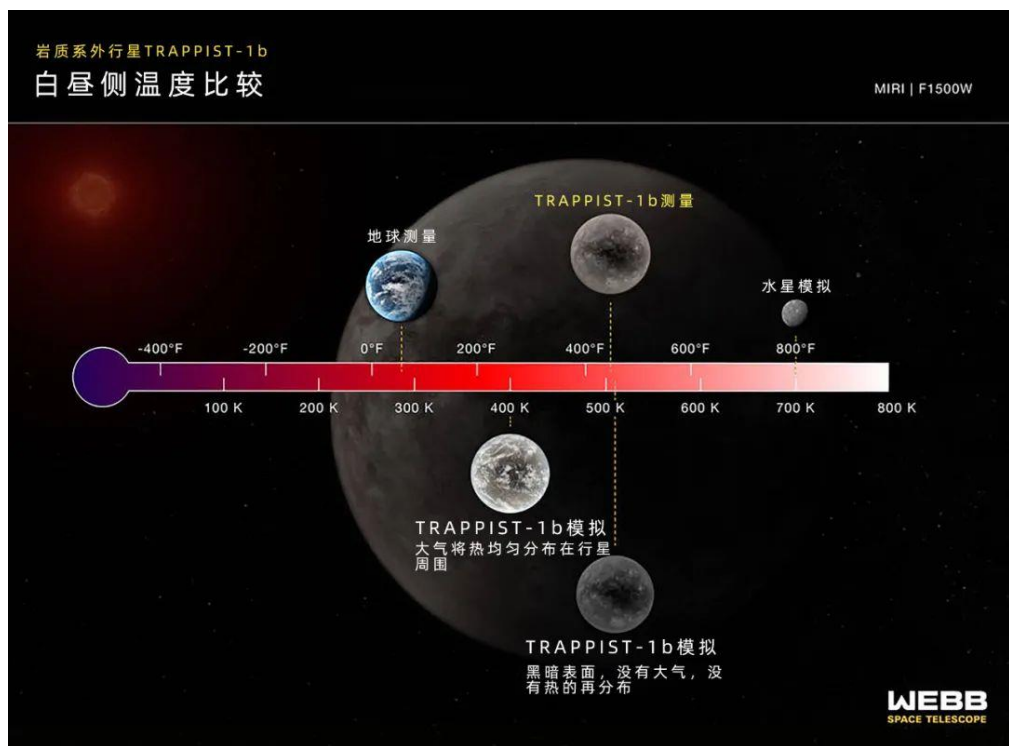




团队分析了来自5个独立的次食观测的数据，并将结果与显示不同情况下温度应该是多少的计算机模型进行比较。它们的结果几乎与一个由裸岩构成的黑体以及没有大气来循环热量的情况完全一致。

他们也没有看到任何光被二氧化碳吸收的迹象。而如果存在这种吸收，它在这些测量中应该会很明显。

那个备受瞩目的世界，竟没有大气？



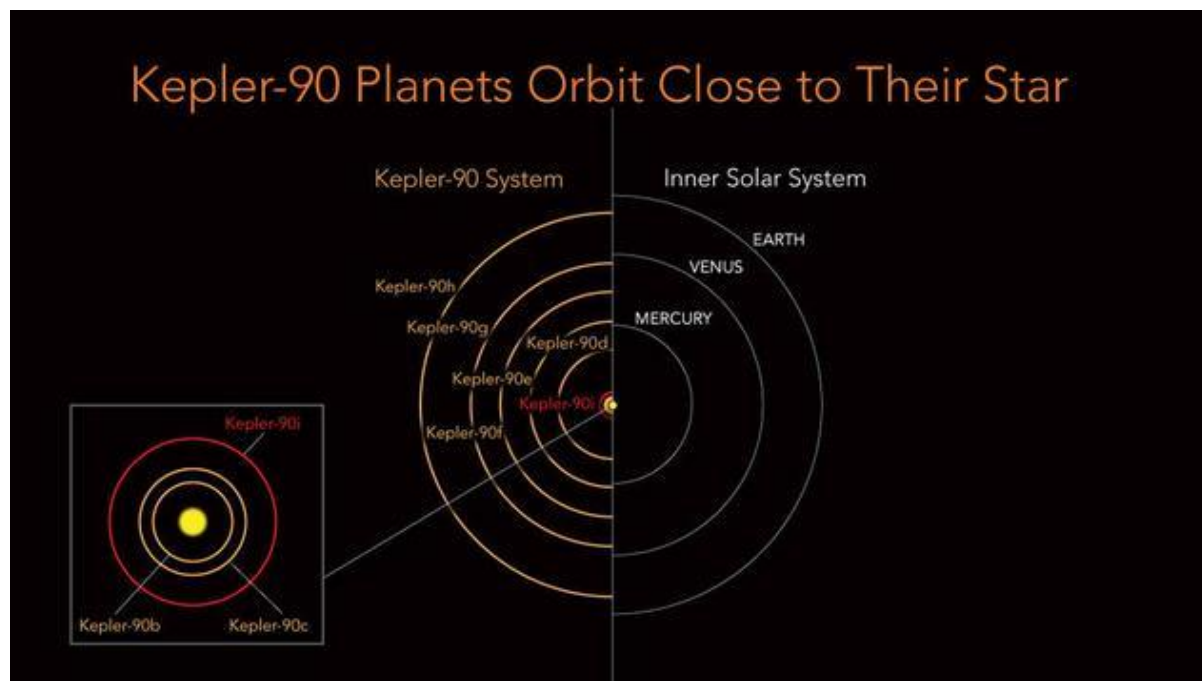
**JWST对次食的探测本身就是一个重要的里程碑。**恒星比行星亮1000多倍，亮度的变化还不到0.1%。想要探测出这种微小的变化差异，难度可想而知。

这也是首次探测到像太阳系中岩质行星那样低温的小型系外行星发出的任何形式的光。这一结果标志着，科学家在确定像TRAPPIST-1这样围绕小型活跃恒星运行的行星是否能够维持支持生命所需的大气层方面，迈出了重要一步，也证明了JWST在中红外波段的强大能力。

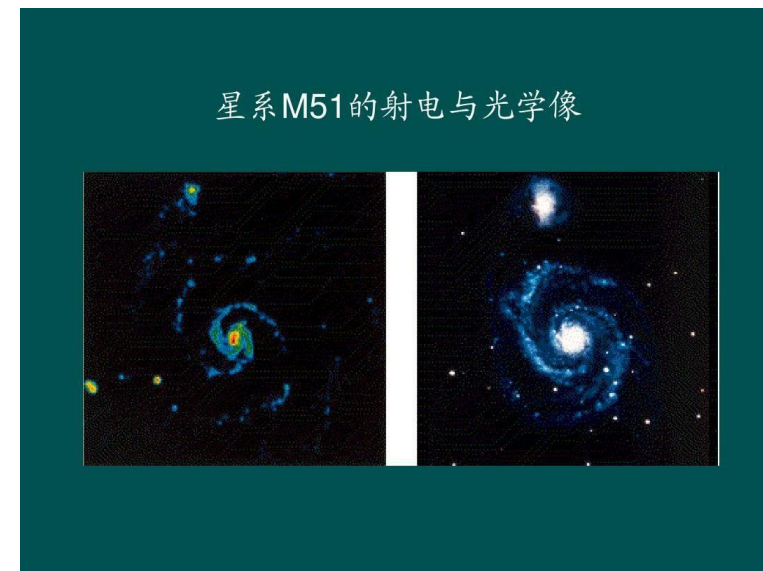
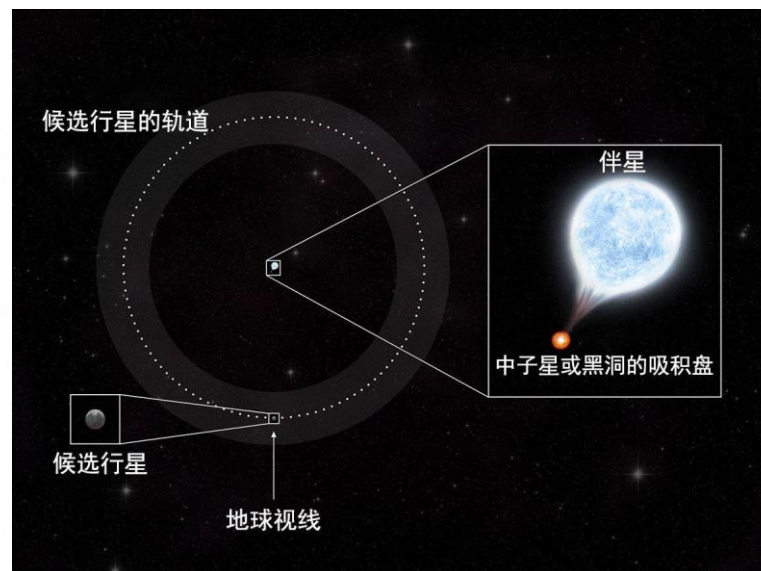
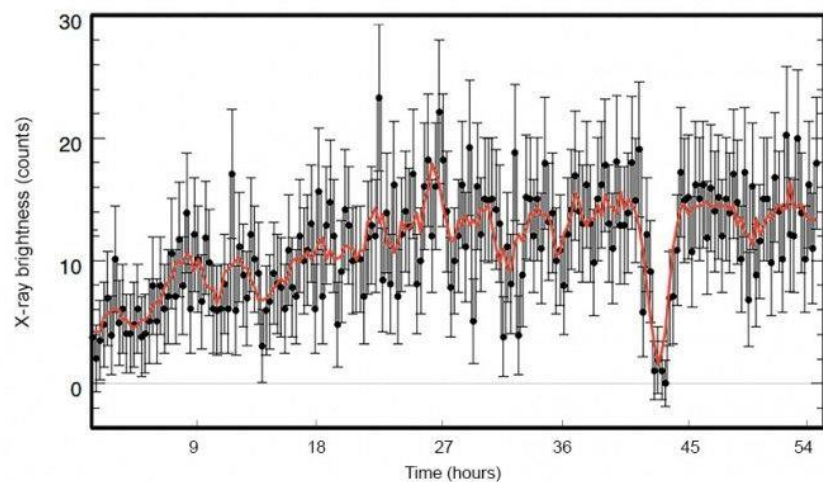


# AI 发现2500光年外拥有8颗行星的迷你太阳系

- 2017-12-15
- 谷歌软件工程师: **Kepler-90i**
- 数据分析技术发威



# 2800万光年外，首次发现银河系外的行星？



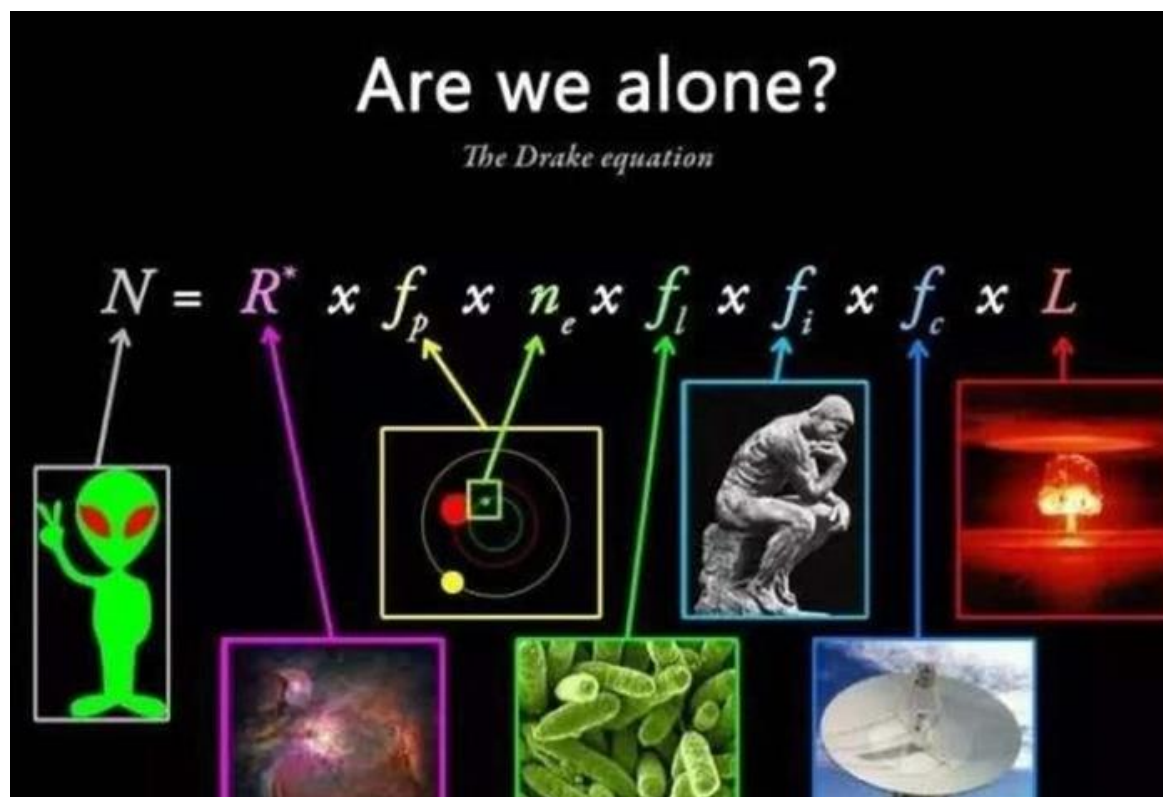
X射线双星

# 我们是否唯一？

- 旧知：太阳是银河系数千亿颗恒星中的一员，银河系是宇宙中数千亿星系中的一员
- 新知：太阳系是散布于银河系的众多行星系的一员
- 刚知：地球也许是散布于银河系的众多地球的一员。第一个地球2.0，Kepler-452b，被认证（假的？）
- 将知？：地球生命（人类）是否是散布于银河系的众多（高等智慧）生命的一员？









# 外星生命与文明？

