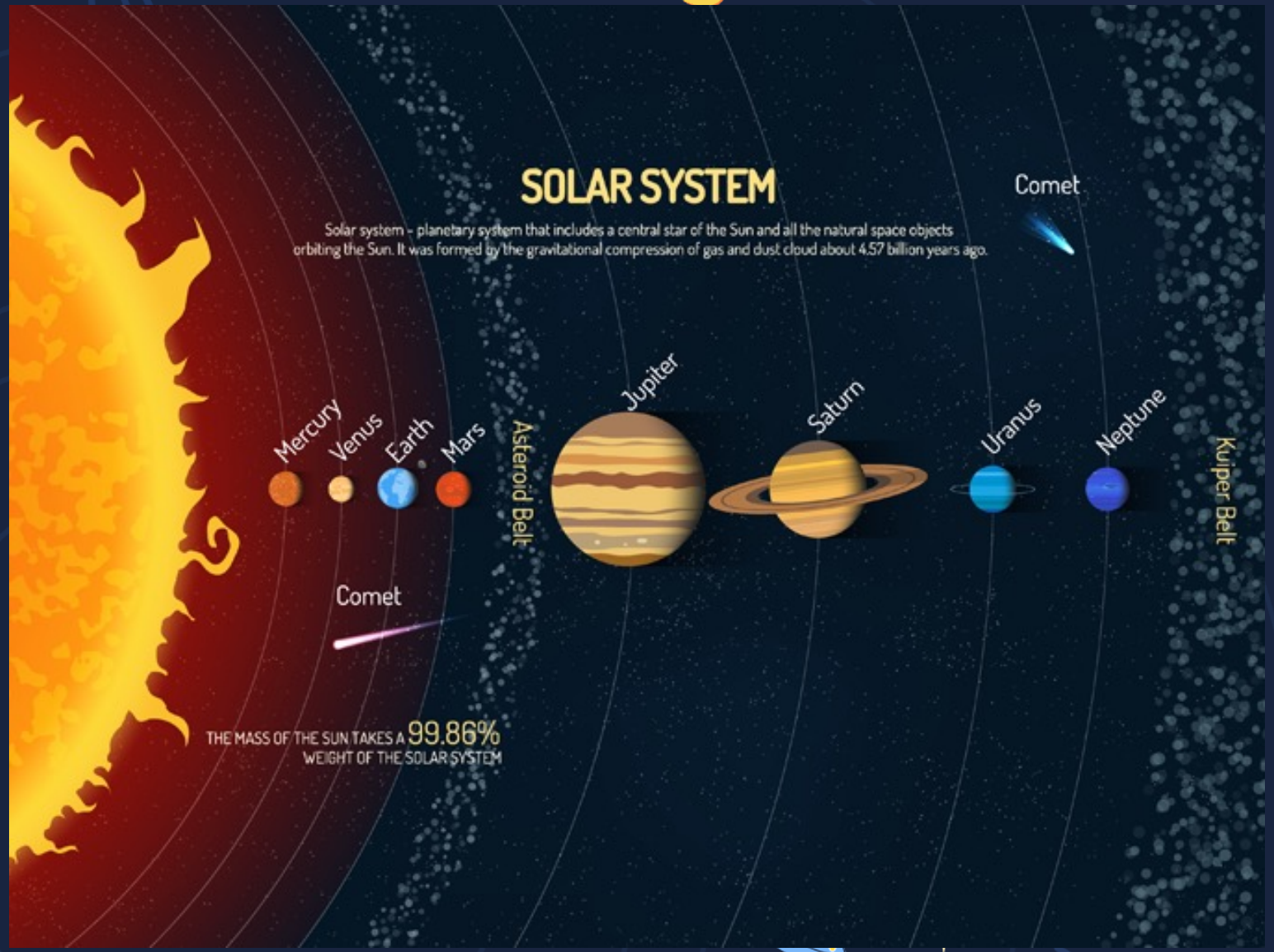
天体物理概观

第一章：太阳系

孔旭 (xkong@ustc.edu.cn)

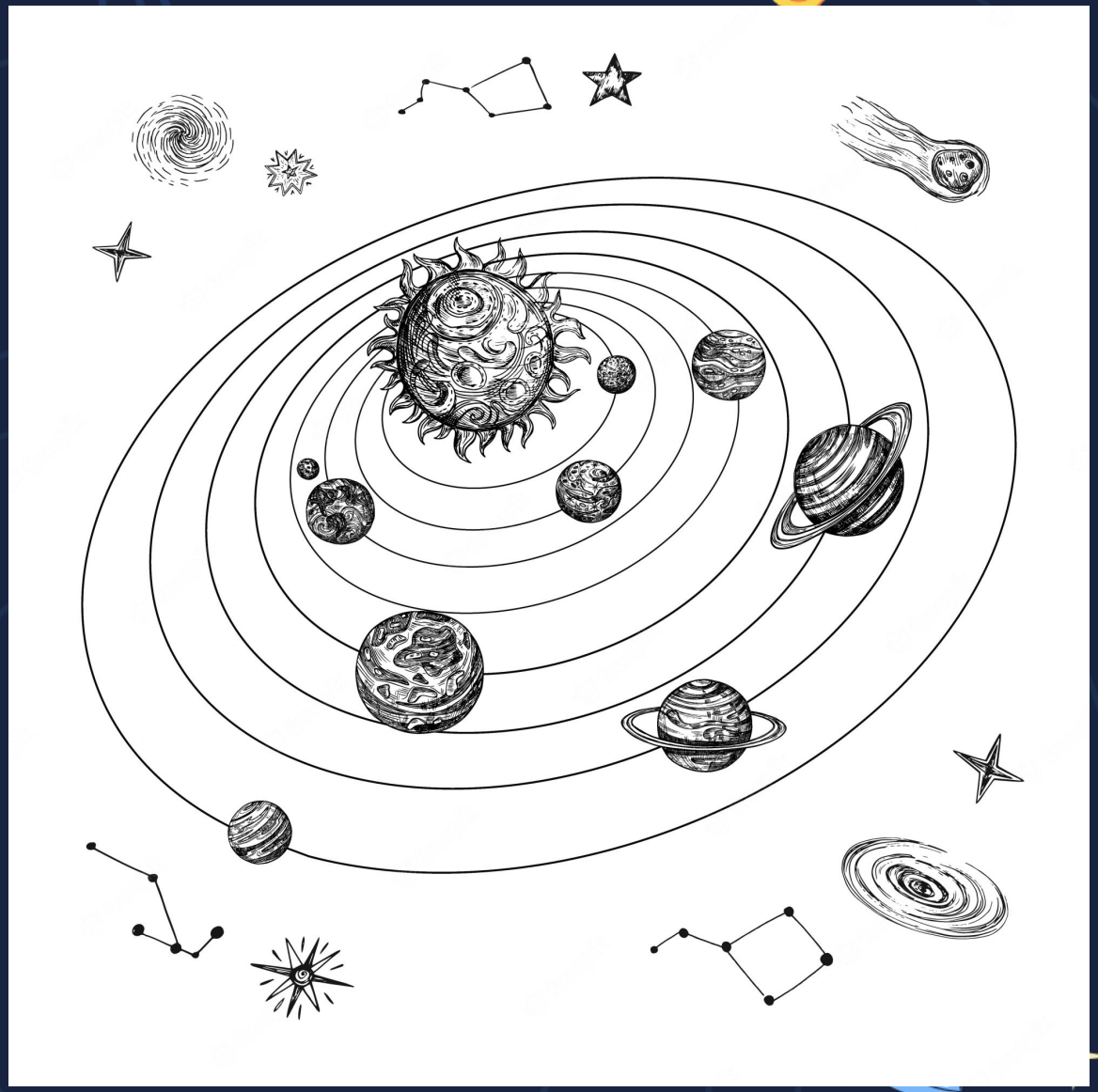
中国科学技术大学　天文学系

太阳系 -- 比较行星学和太阳系形成模型

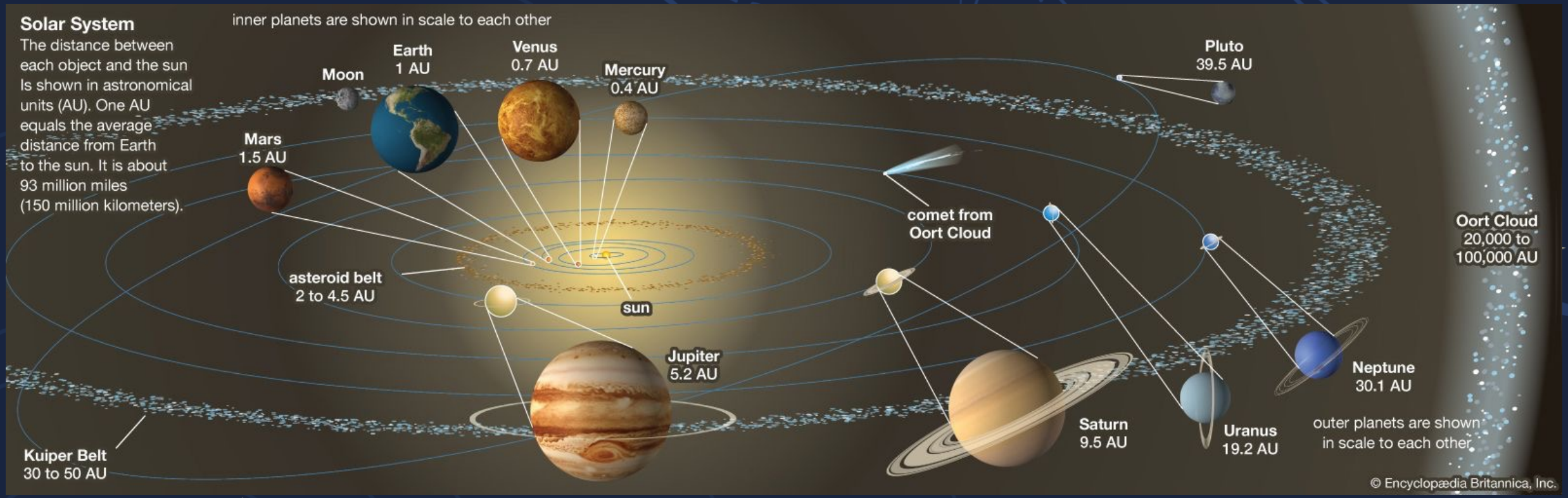


- 在过去不到一个世代的时间里，我们了解到的关于太阳系的知识比过去所有世纪的总和，还要多
- 人类的太空探测器已经访问了太阳系中所有的行星，包括从类地行星和轨道远离太阳的巨型气态行星
- 行星不是太阳系的唯一居民。现代望远镜和太空探测器揭示了关于彗星、小行星和大量行星卫星的诸多信息
- 学习目标：解释比较行星学对太阳系研究的重要性；描述太阳系的整体尺度和结构；总结类地行星和类木行星的主要区别；太阳系形成理论；彗星和小行星是如何形成的

1. 太阳系清单

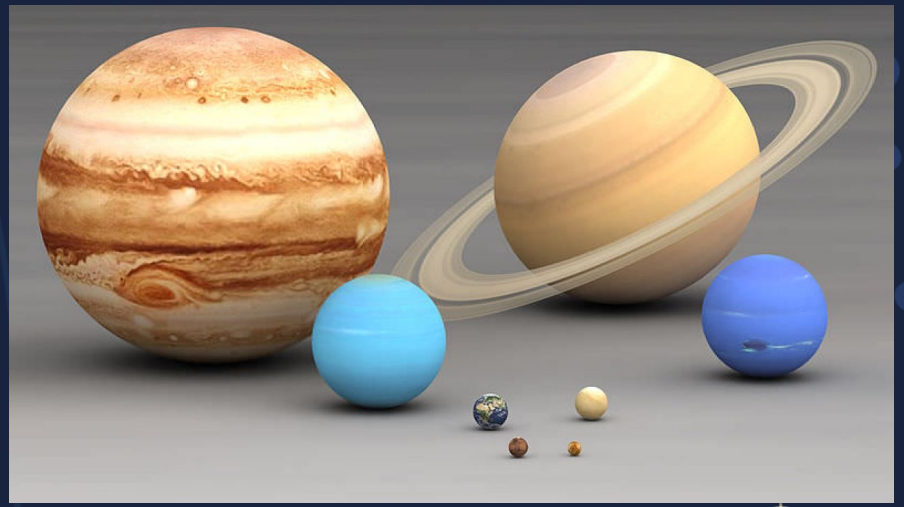


- 古代天文学家：夜空中有月亮、恒星和五大行星（水星、金 星、火星、木星、土星）、彗星（长尾巴）、流星（夜空一划而过）
- 17世纪初望远镜的发明，详细观测成为可能：伽利略对金星相位和绕木星旋转的四大卫星的发现，帮助人类改变了宇宙观
- 随着技术进步，发现人类肉眼不可见的天体：1659年发现了土星环； 1781年发现了天王星；1846年发现海王星
- 1801年第一个小行星（谷神星、最大的小行星）被发现。小行星大多分布在位于火星和木星之间的带状区域（小行星带）

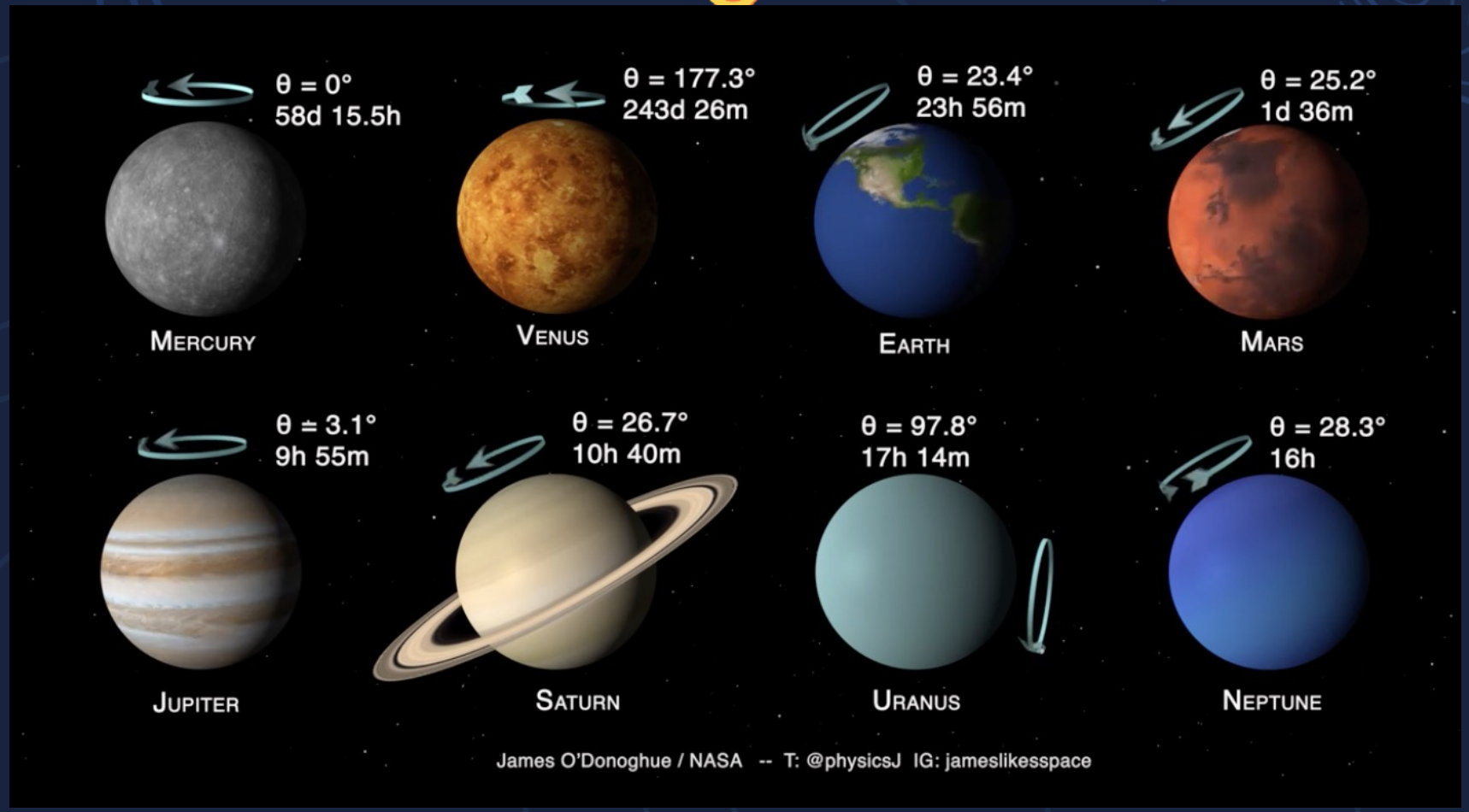


太阳系有1颗恒星、8颗行星，169颗卫星环绕这些行星；小行星、彗星、流星；柯伊伯带天体；奥尔特云

随着人类探索能力提升，这份名单无疑还会继续增加



比较行星学



将每个行星与地球相比较，了解是什么令太阳系成为一个整体：行星系统起源和演化?

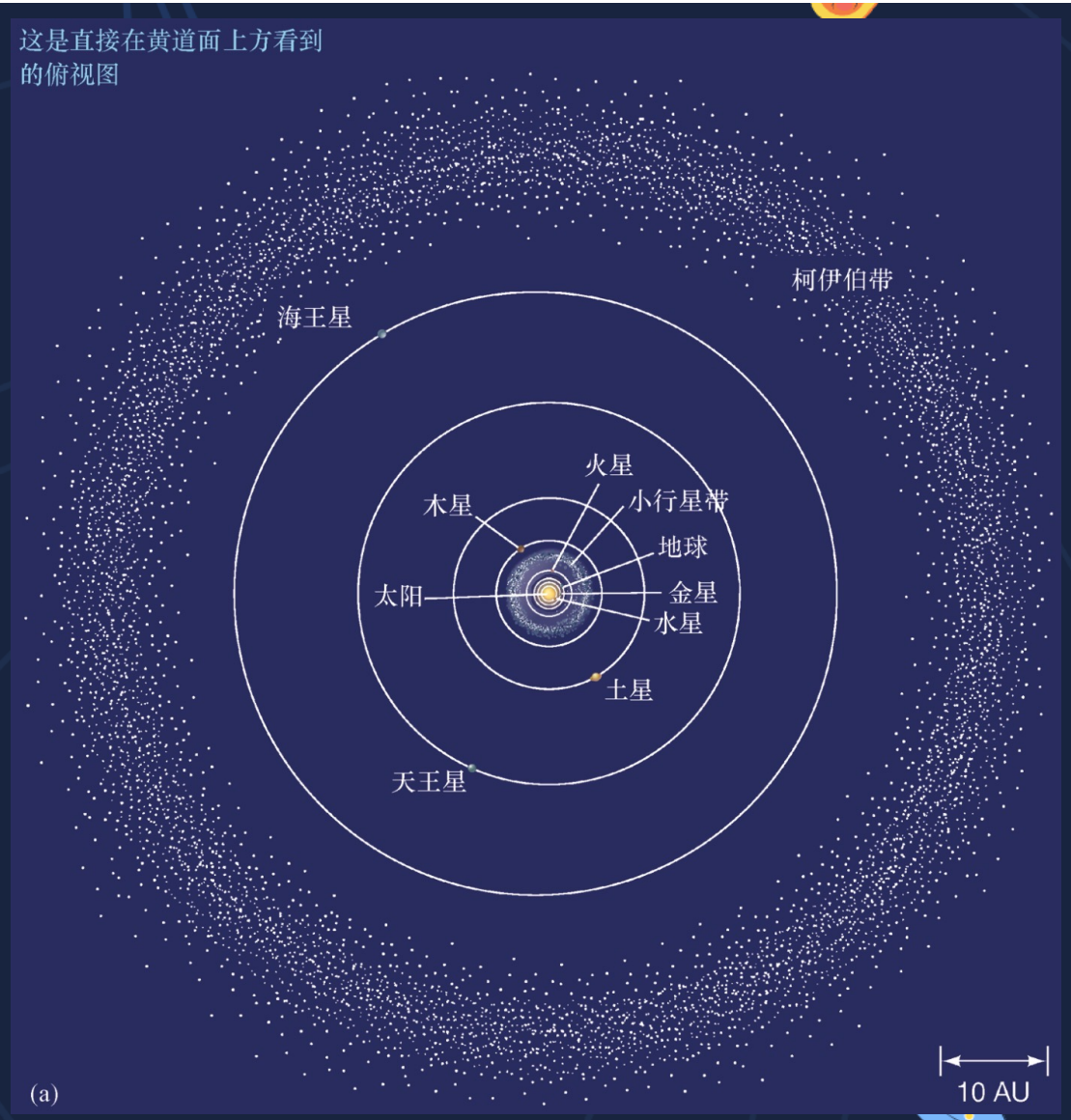
2. 测量行星

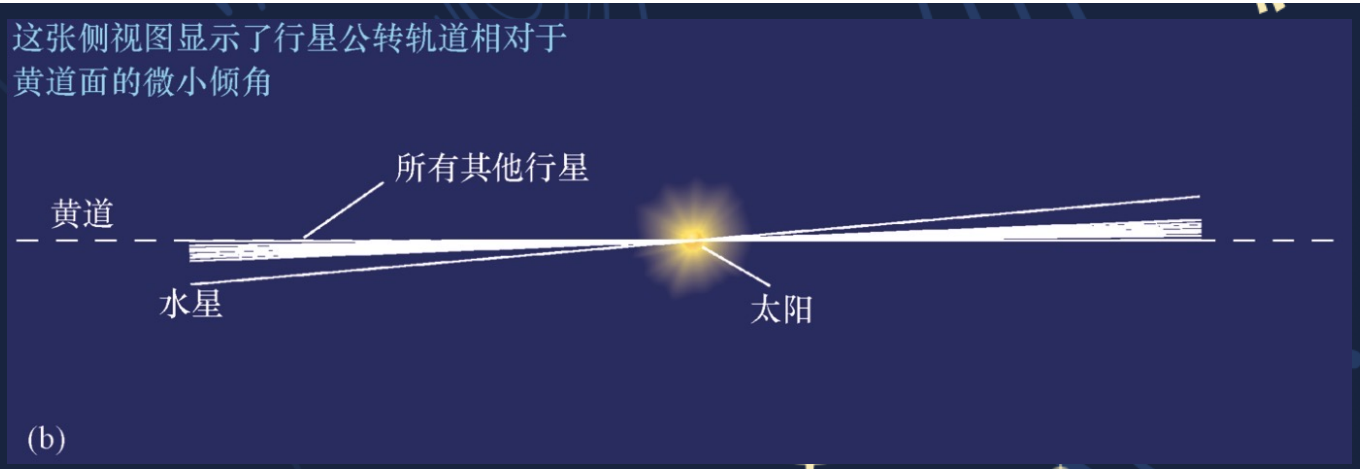
天体	轨道半长径/AU	轨道周期/地球年	质量/地球质量	半径/地球半径	已知卫星数量	自转周期[①]/天	平均密度/(km/m^3)	平均密度/(g/cm^3)
水星	0.39	0.24	0.055	0.38	0	59	5400	5.4
金星	0.72	0.62	0.82	0.95	0	–243	5200	5.2
地球	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1.0	5500	5.5
月球	—	—	0.012	0.27	—	27.3	3300	3.3
火星	1.52	1.9	0.11	0.53	2	1.0	3900	3.9
谷神星（小行星）	2.8	4.7	0.000 15	0.073	0	0.38	2700	2.7
木星	5.2	11.9	318	11.2	63	0.41	1300	1.3
土星	9.5	29.4	95	9.58	56	0.44	700	0.7
天王星	19.2	84	15	4.0	27	–0.72	1300	1.3
海王星	30.1	164	17	3.9	13	0.67	1600	1.6
冥王星（柯伊伯带天体）	39.5	248	0.002	0.2	3	–6.4	2100	2.1
海尔–波普（彗星）	180	2400	1.0×10^{-9}	0.004	—	0.47	100	0.1
太阳	—	—	332 000	109	—	25.8	1400	1.4

- 太阳包含约99.9%的太阳系物质；木星是第二大天体
- 每颗行星到太阳的距离都遵从开普勒定律
- 太阳系的距离标度通过雷达对金星测距来确定
- 轨道周期：观察其在天空中的位置
- 行星半径：测量行星的视大小
- 质量：有卫星的容易测量；水星和金星质量测定不准确
- 自转周期：表面特征随自转交替变化（困难）

3. 太阳系概观

$1AU = 1.496 \times 10^{11} m$





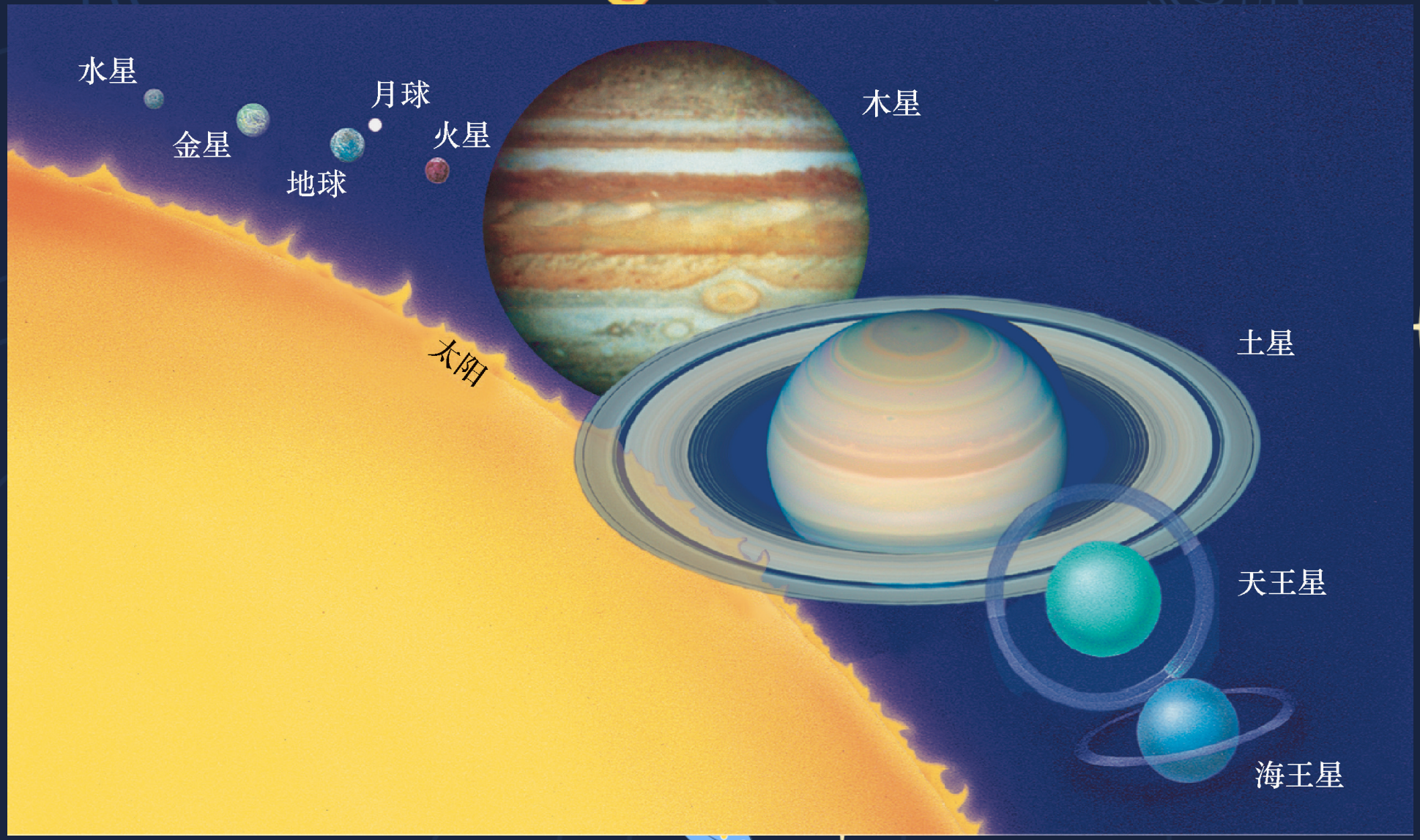
- **太阳系是巨大的**。从太阳到海王星（30AU）轨道以外的柯伊伯带的距离大约是**50AU**，超过100万倍地球半径
- 所有行星绕太阳**公转轨道方向相同**；除了**水星**（与黄道面的夹角大约为7°），行星轨道**几乎在同一平面上**
- 太阳位于（或非常接近）椭圆（近圆）的一个焦点上，整个太阳系在100 AU的尺度内是**非常扁平的**
- 离太阳最近的行星是水星，向外依次是**金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星**

提丢斯-波得定则

$r_n=0.4+0.3\times(2^n-2)$ (AU)

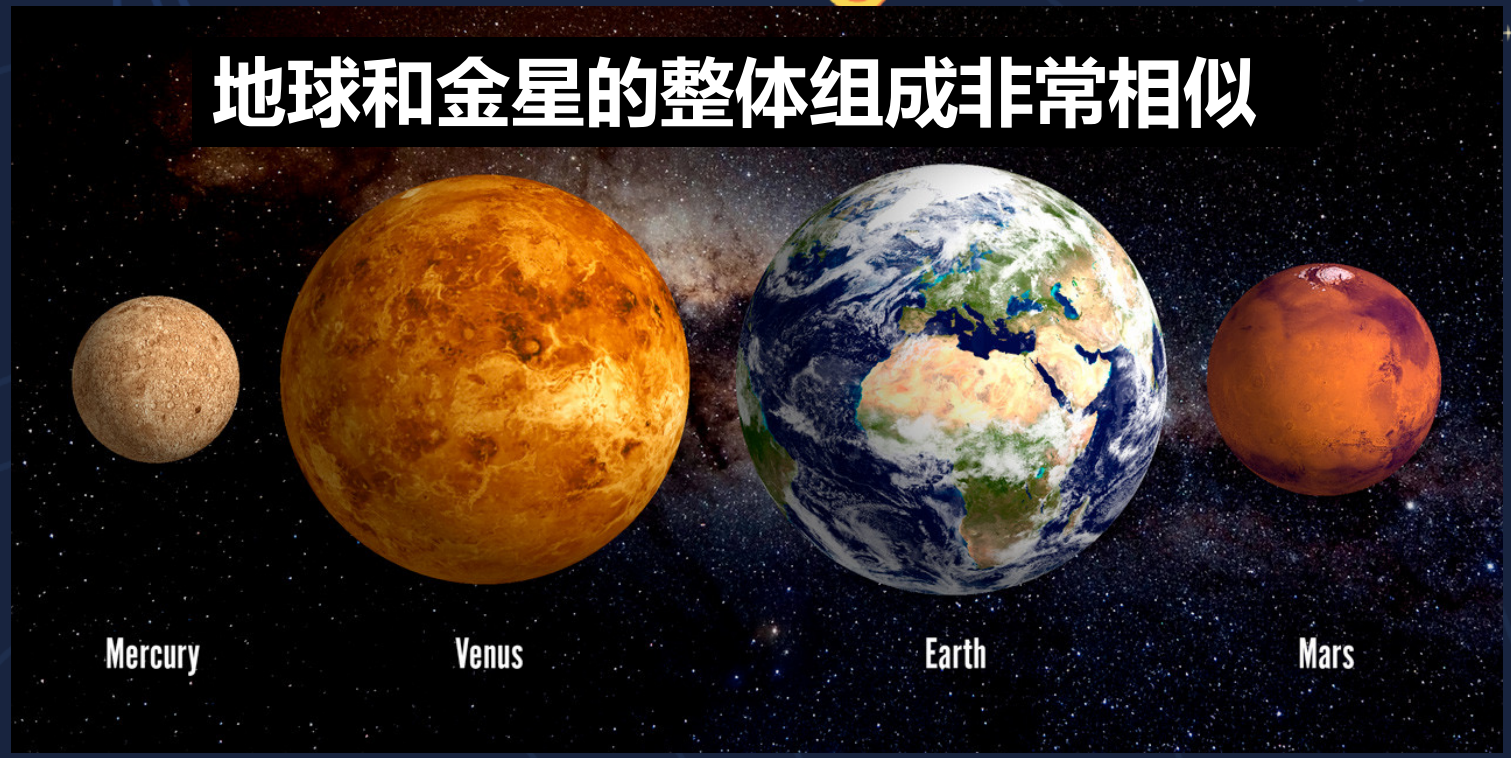
行星名称	理论	实际
水星	0.4	0.39
金星	0.7	0.72
地球	1.0	1.00
火星	1.6	1.52
小行星带 (1801)	2.8	2.9
木星	5.2	5.20
土星	10.0	9.54
天王星 (1781)	19.6	19.18
海王星 (1846)	38.8	30.06
冥王星 (1930)	77.2	39.44

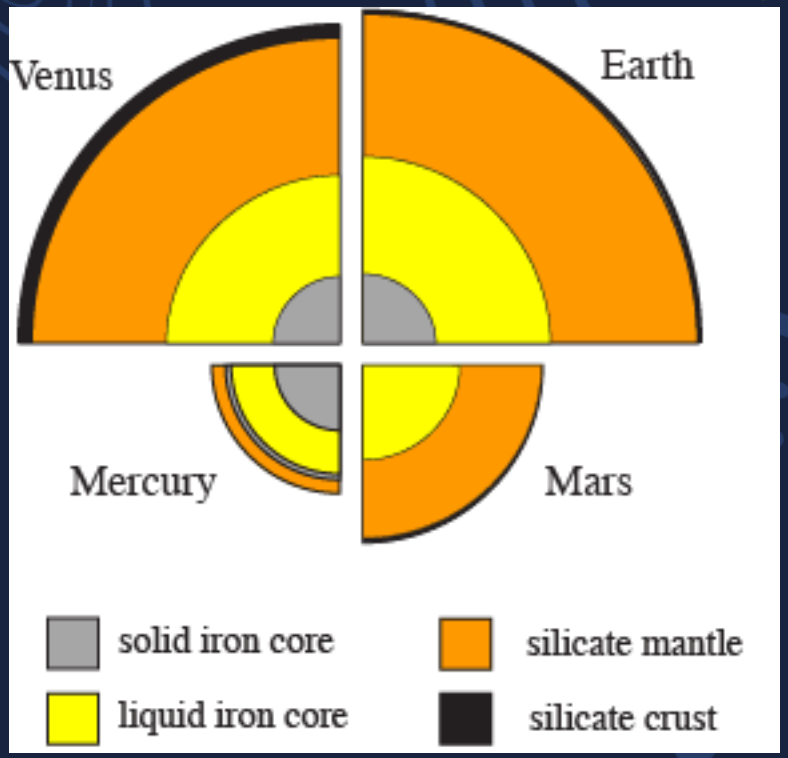
4. 类地行星和类木行星



- **类地行星**（内行星）：水星、金星、地球和火星；个头小，密度高，有固态表面
- **类木行星**（外行星）：木星、土星、天王星和海王星；个头大，密度低，呈气态
- 化学和物理性质不同：**类木行星外层主要由富含氢和氦气体构成**

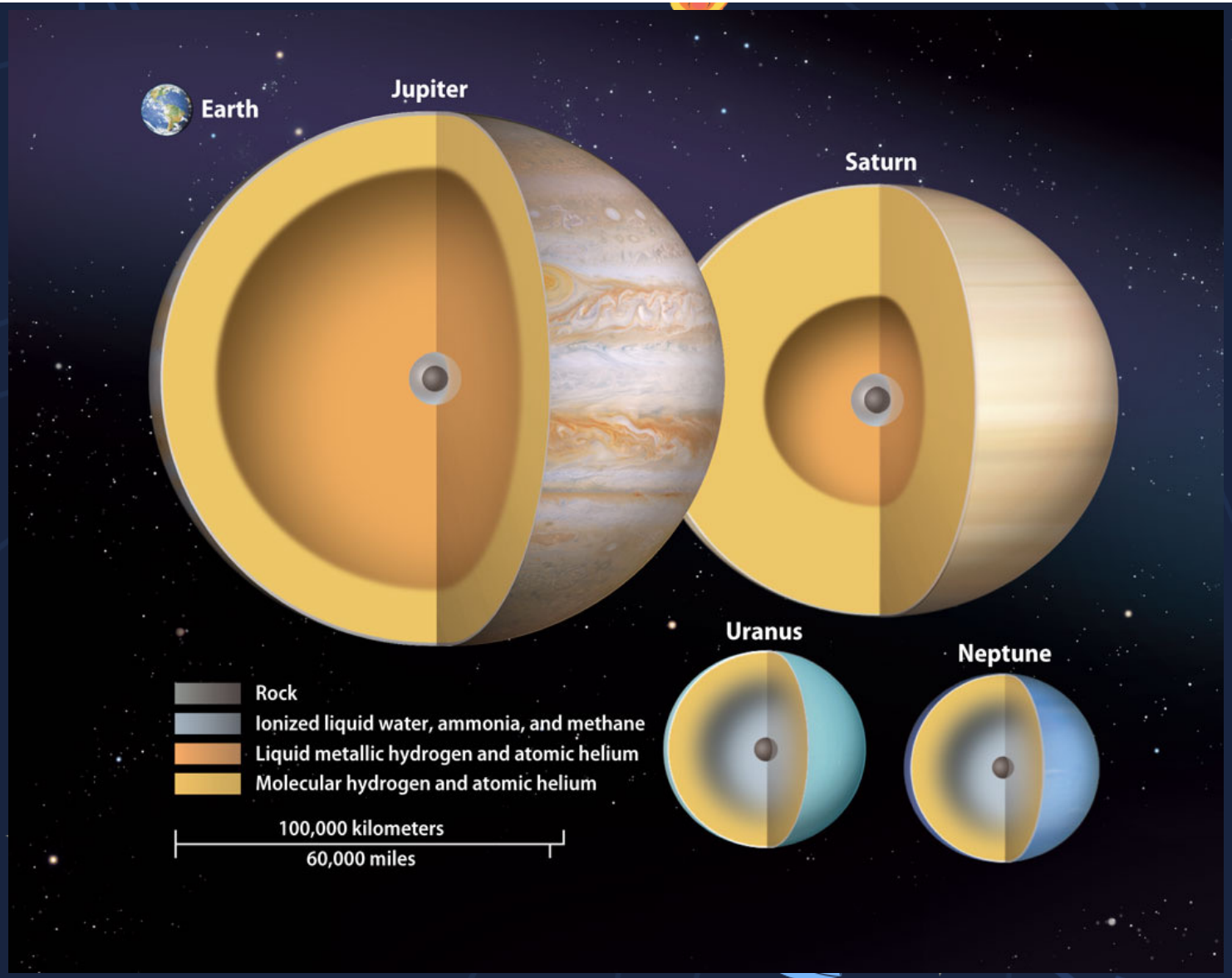
类地行星





- 类地行星都有大气，但**大气成分和密度不同**：从水星上的接近真空，到金星上的炼狱般浓密酷热
- **地球是唯一在大气中有氧气，在表面上有液态水的行星**。地球和火星有卫星，但水星和金星没有
- 类地行星表面条件彼此非常不同，从水星上贫瘠、布满了撞击坑的地形到金星上广泛活跃的火山
- 地球和火星自转周期~24h；水星和金星自转周期~几个月；而且**金星的自转方向与其他行星相反**

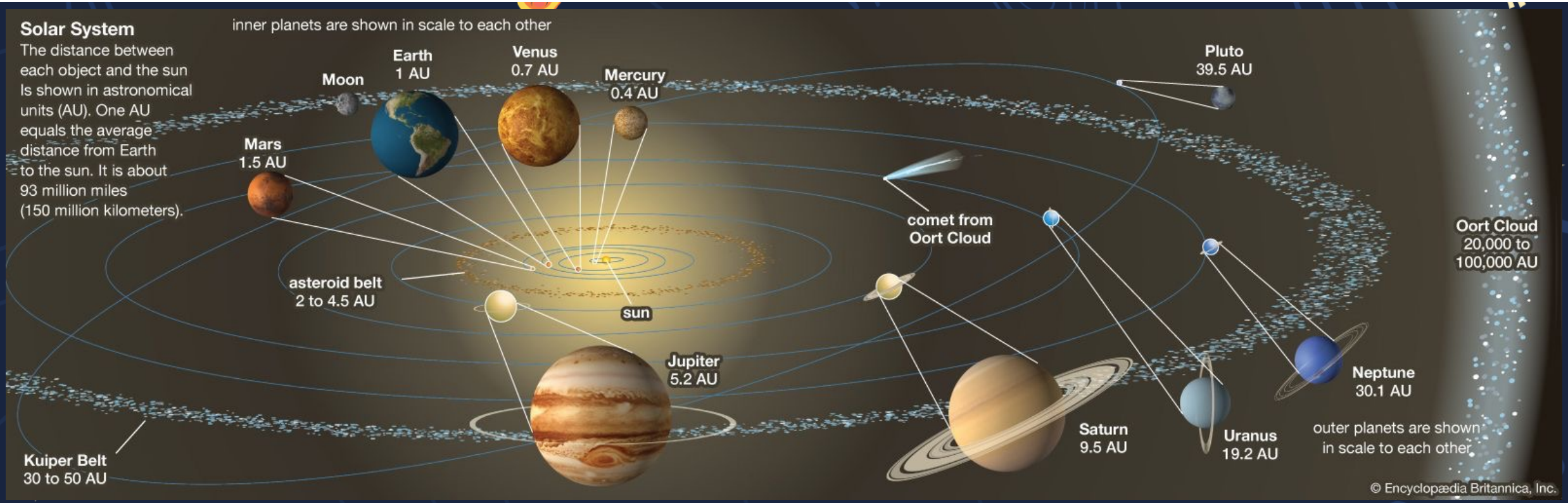
类地行星和类木行星比较

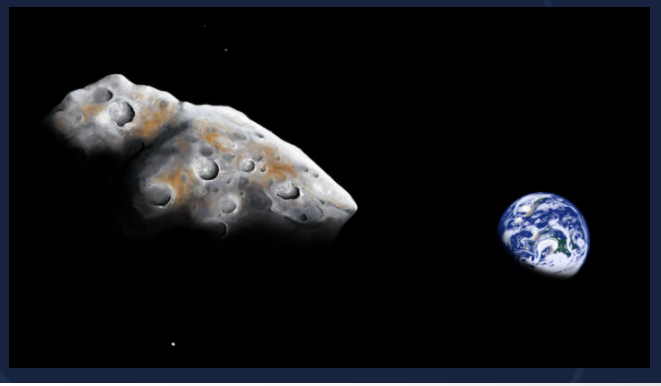


- 类木行星互相之间距离远且远离太阳；是大的**气态行星**，含有大量的氢和氦
- 类木行星**没有固态表面**；它们稠密的大气随着深度而密度增加，最终与**内部的液体**融合在一起
- **类地行星即便有磁场也很微弱；而类木行星都有强磁场**
- 类木行星都含有巨大而高密度的**“类地”核心**，质量大约为10~15倍地球质量
- 类地行星只有三颗卫星；**类木行星每颗都有许多卫星**；卫星们彼此都不一样，跟月球也不一样。
- 所有的类木行星**都有环**；而类地行星都没有。

5. 行星际物质

行星际物质保留着太阳系诞生的信息：太阳系起源?



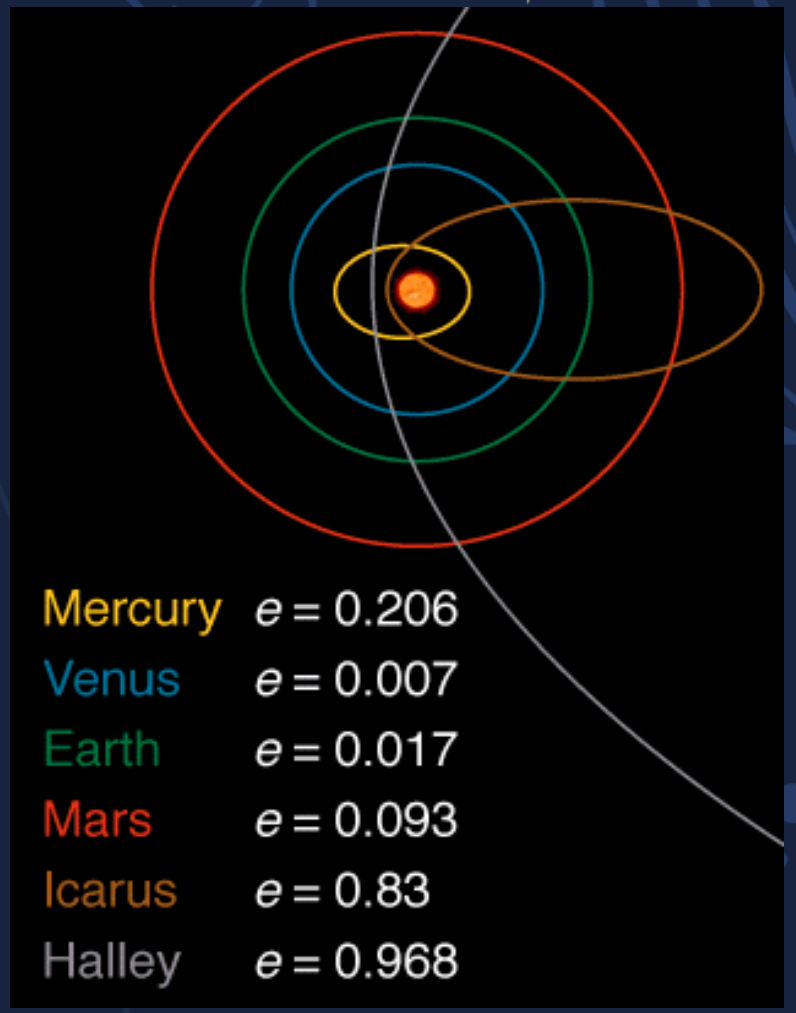


8颗行星之间，运行着无数结实的岩石和冰块，大多体积较小。它们都绕着太阳转，许多轨道偏心率很高

行星际物质(宇宙中的“碎片”)：小行星、柯伊伯带天体、彗星；弥漫在行星际空间中的行星际尘埃颗粒

6. 太阳系是如何形成的?

- **太阳系特征:**
  - 每颗行星在空间中相对独立。行星的轨道离中心太阳的距离逐渐变大。它们不聚集在一起。**每个行星到太阳的距离往往是其内侧邻居到太阳距离的两倍**
  - 行星的轨道几乎是**圆形**的。各行星的轨道都接近于一个完美的圆，除了水星
  - 行星的轨道几乎位于同一平面上。行星轨道划出的平面被准确地对准，**仅水星有一点异常**
  - **行星的公转轨道方向与太阳自转的方向一致**。几乎太阳系中的所有大尺度运动(彗星轨道除外)都是在同一平面上，具有同样的公转方向

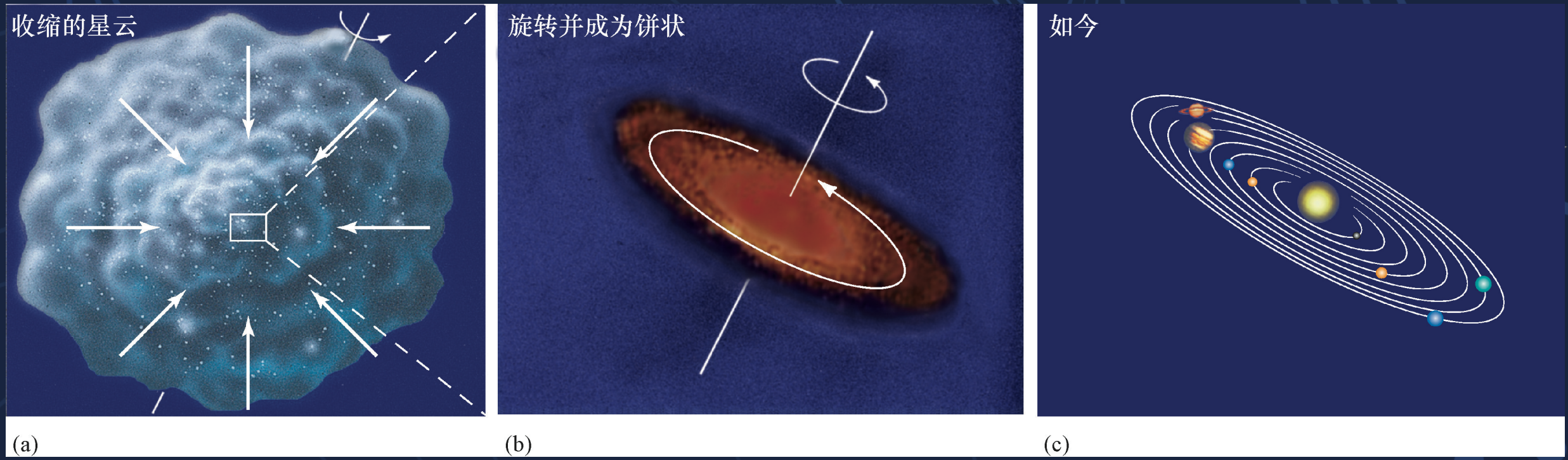


6. 太阳系是如何形成的?

- **太阳系特征:**
  - 每颗行星在空间中相对独立。行星的轨道离中心太阳的距离逐渐变大。它们不聚集在一起。**每个行星到太阳的距离往往是其内侧邻居到太阳距离的两倍**
  - 行星的轨道几乎是**圆形**的。各行星的轨道都接近于一个完美的圆，除了水星
  - 行星的轨道几乎位于同一平面上。行星轨道划出的平面被准确地对准，**仅水星有一点异常**
  - **行星的公转轨道方向与太阳自转的方向一致**。几乎太阳系中的所有大尺度运动(彗星轨道除外)都是在同一平面上，具有同样的公转方向
  - **行星系统是高度分化的**。类地行星密度高、大气适量、自转速度慢，以及很少或根本没有卫星；类木行星密度低，大气浓密
  - **小行星**是很古老的，并表现出一系列既不像内行星又不像外行星或它们卫星的特点；是由古老的材料组成的
  - **柯伊伯带**是超出了海王星轨道的小行星大小冰天体集合；冥王星是柯伊伯带中最大成员
  - **奥尔特云**中的彗星是原始冰质碎片，轨道不在黄道面上，主要存在于距离太阳很遥远的地方；奥尔特云是外太阳系**完全不同的部分**

任何太阳系起源和形成理论必须符合已知事实。

星云理论



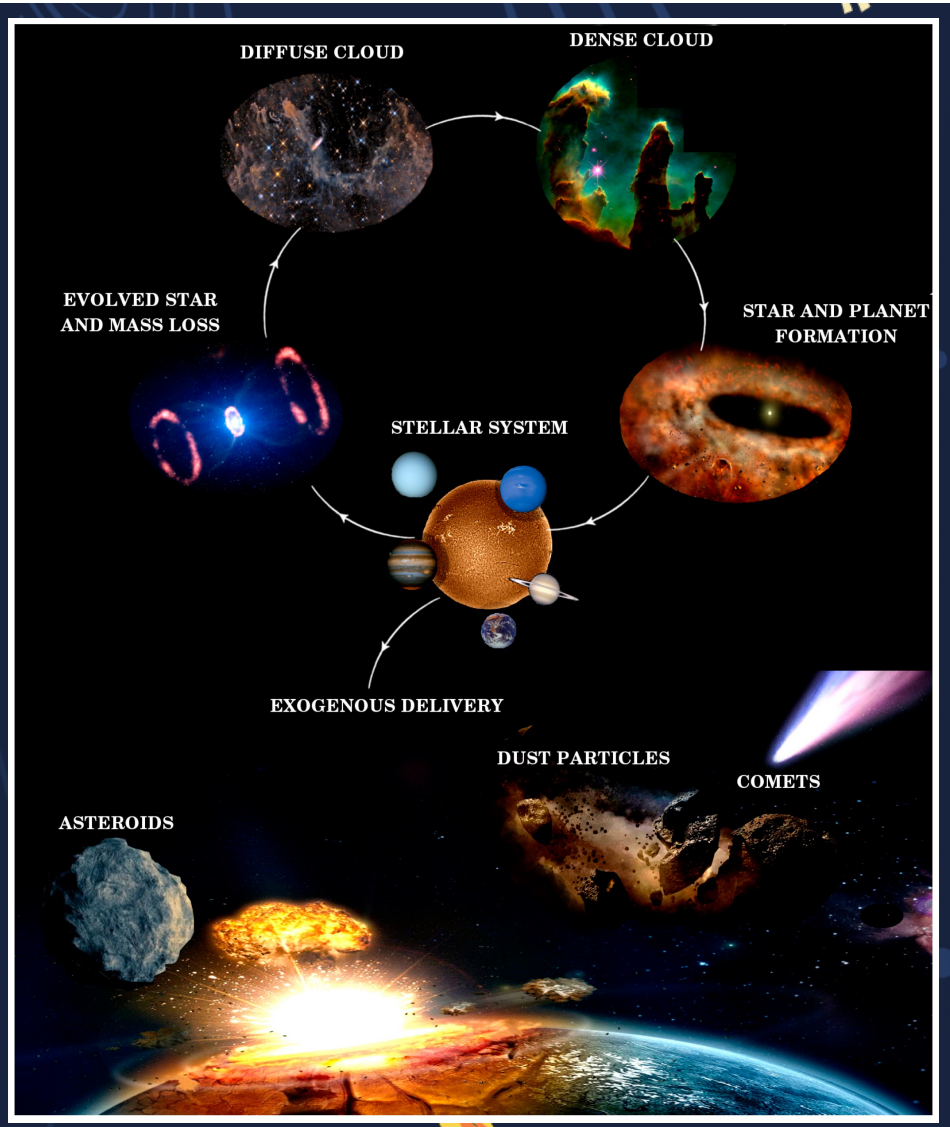
一个尺度1光年左右大型星云（星际尘埃和气体），在自身引力影响下开始收缩。随着自身的缩小，它变得更密和更热，最终在中央形成一颗恒星（太阳）。 随着太阳在星云热的核心中形成，行星和它们的卫星在星云冷的外围区域形成。行星是恒星形成过程中的副产品。由于角动量守恒，星云随着收缩而旋转加快。离心力倾向于在垂直于旋转轴的方向上反抗收缩，于是导致星云沿旋转轴的坍缩更快。最终形成了一个扁平形状的原始太阳系。行星从这些旋转的原料中形成。

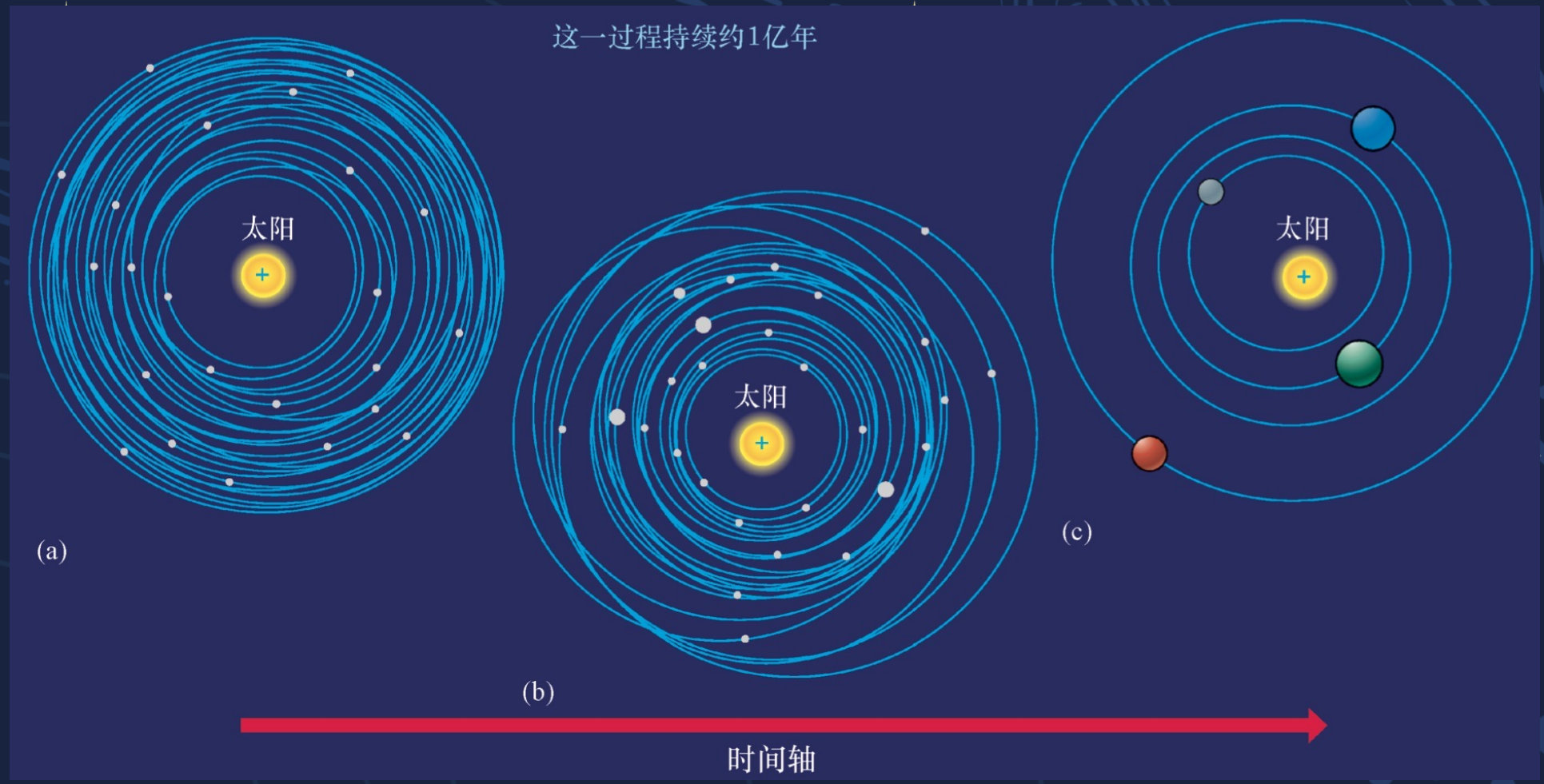
凝聚理论

- 星云理论：关于太阳星云的崩溃和扁平化的描述是正确的，但气体盘不会形成后来能演变成行星的物质团块，即在星云中气体不能演化成尘埃，如组成类地行星、小行星和彗星的岩石

- 凝聚理论：以星云模型为基础，结合星际化学信息的新理论。关键是太阳星云中已经存在星际尘埃

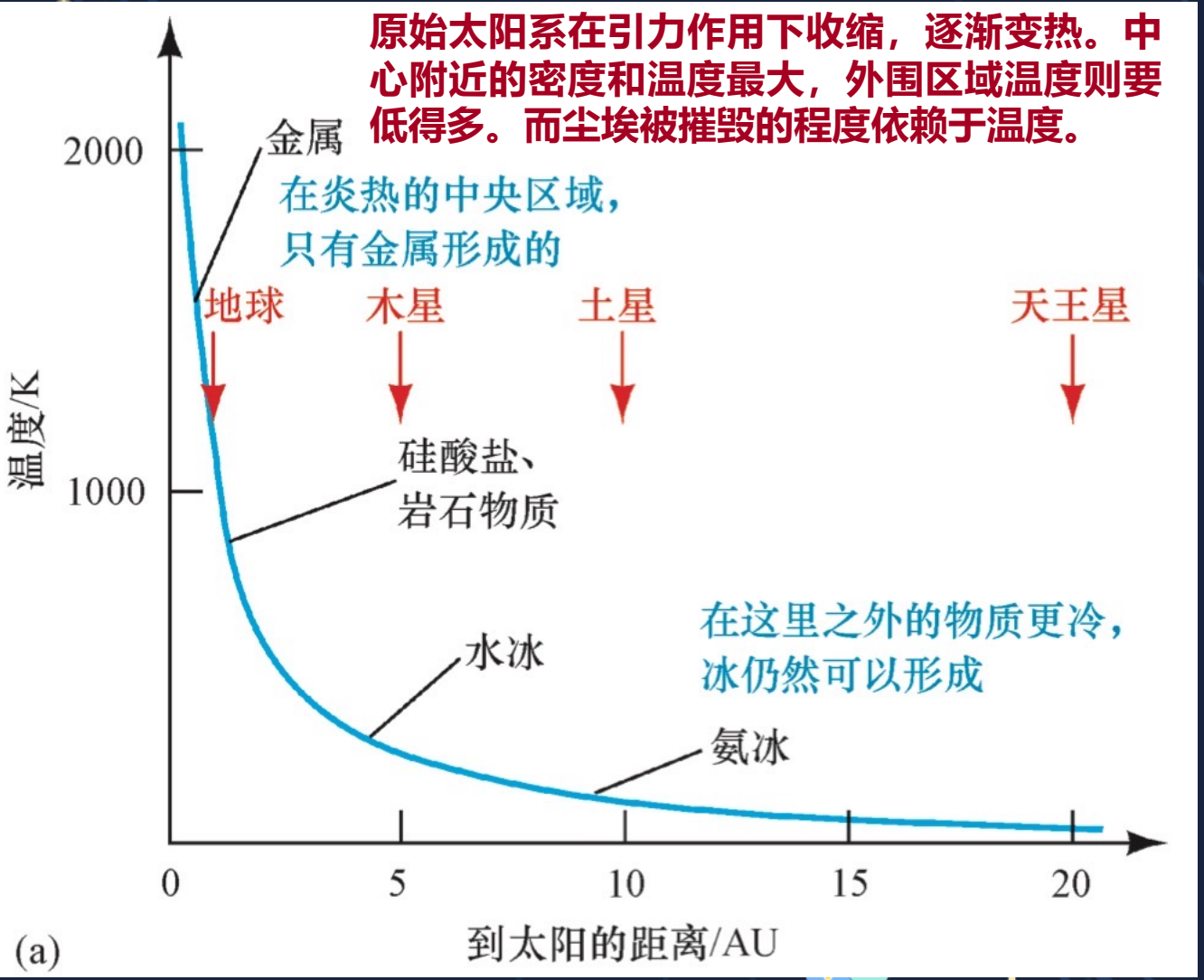
- 尘埃颗粒在气体星云的演变中扮演了两个重要角色。
  - 尘埃可以有效地以红外辐射的形式带走热量，有利于气体等冷却。星云冷却，其分子移动速度变慢，内部压力降低，星云更容易在引力的影响下收缩
  - 尘埃作为凝结核，吸附其他原子，形成质量越来越大的球——尘埃颗粒大 大加快了聚集足够多的原子形成行星的过程





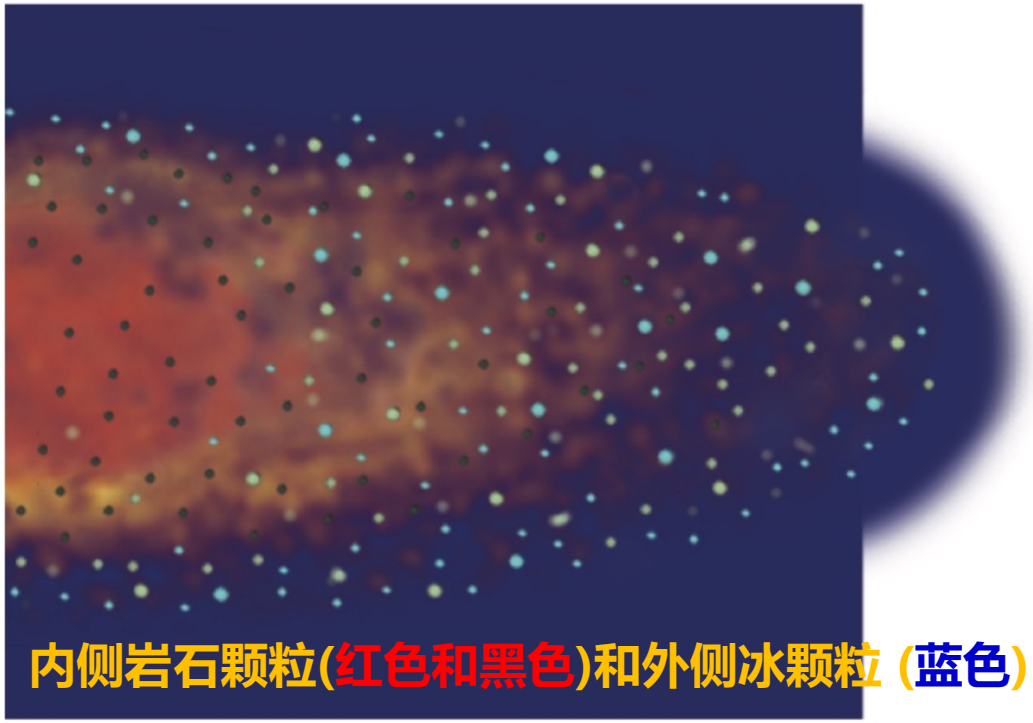
凝聚核的形成，极大地加速了第一批小团块物质形成过程。这些小团块又会通过吸附其他团块快速成长：类比猛烈的雪灾引发滚雪球，雪球越滚越大， 越大便会遇到越多的雪花。由于团块越长越大，表面积增加，它们横扫新物质的速度大大加快，形成了几百千米大小的“星子”。星子的引力拉拽已强大到足以影响它们的邻居，星子的增长速度加快，形成较大的天体；较大的天体有较强的引力，最终几乎所有的原始材料都被扫成了几颗大的原行星→行星

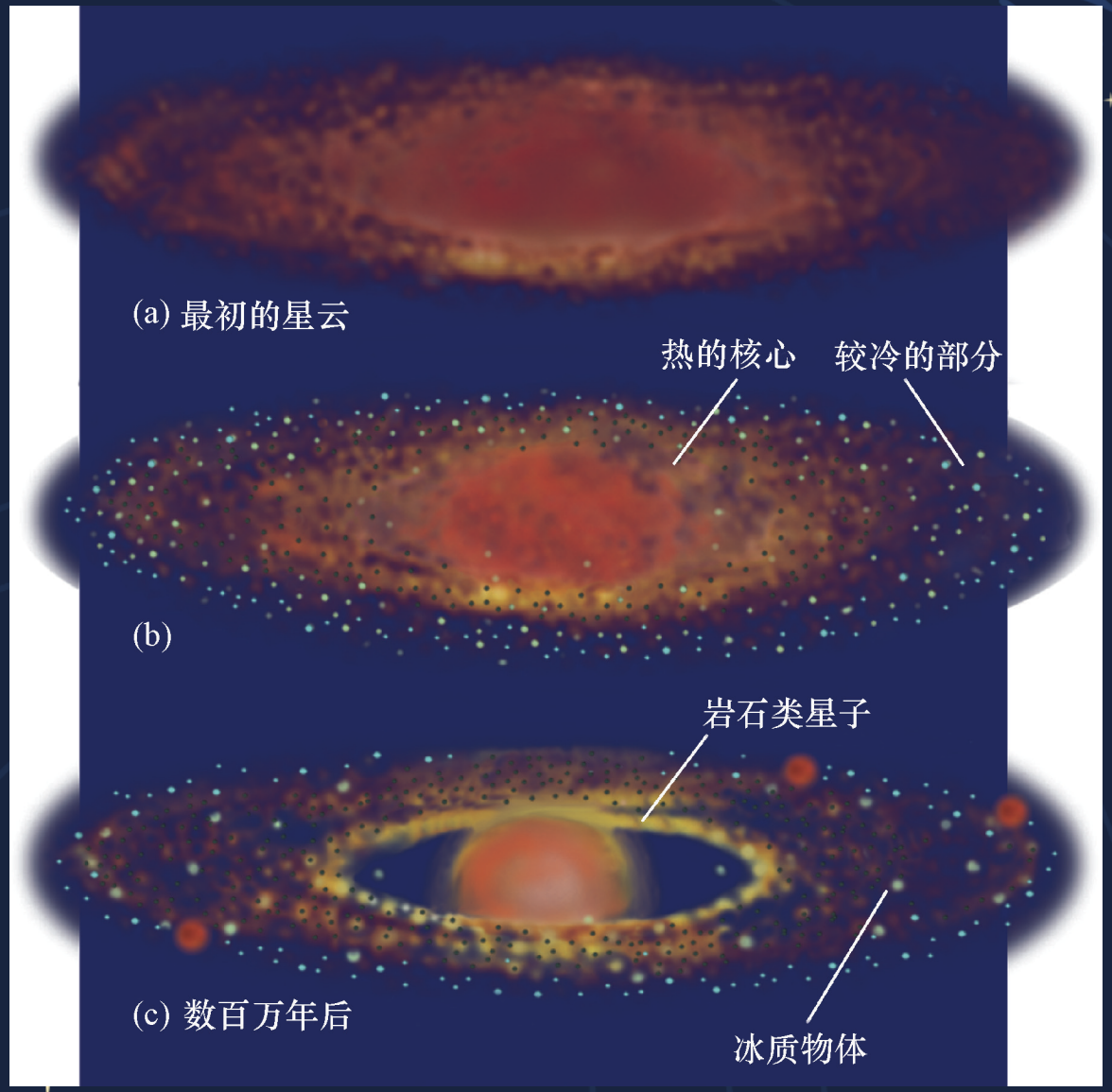
太阳系的分化

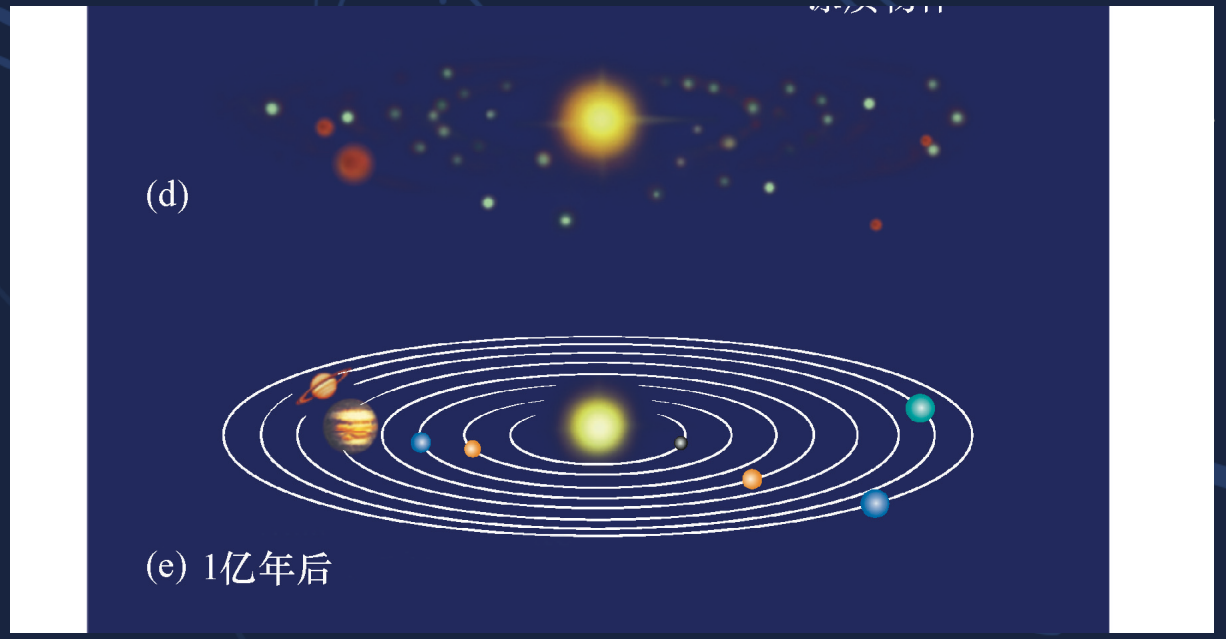


凝聚理论可以很好的解释太阳系的行星和大尺度结构的形成。**关于类地行星和类木行星之间的区别，如何解释?**

温度曲线：行星成分与其在太阳系中位置关系

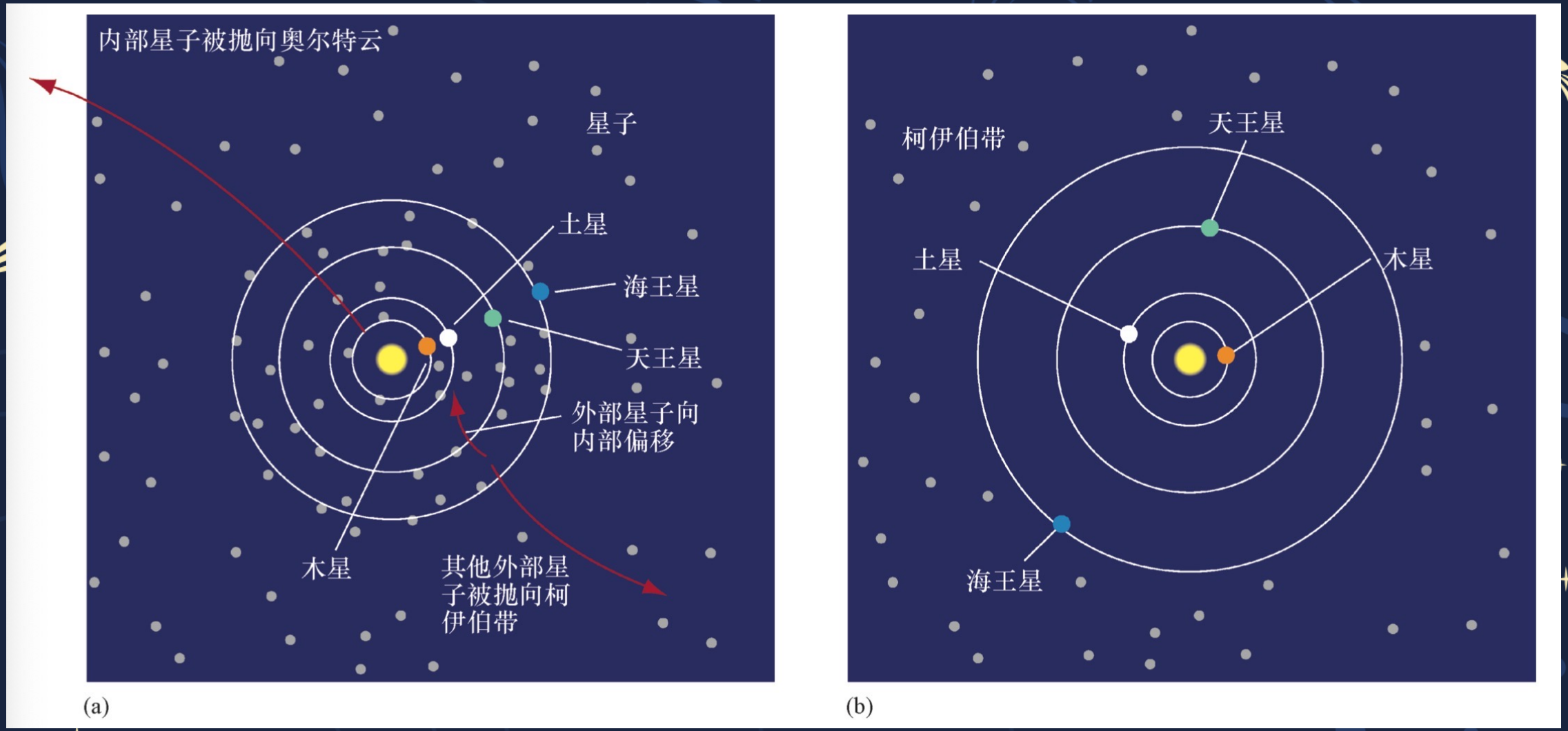






太阳系形成（凝聚理论）

a）**太阳星云**收缩后形成一个旋转盘；b）尘埃颗粒作为凝聚核，与团块物质碰撞，成长为**星子**，聚合物和星子的成分取决于它们在星云中的位置； c）经过几百万年，仍然在形成中的太阳的**强烈星风**开始驱逐云气，而一些在太阳系外围的大质量星子从星云中捕获了气体；d）星子不断碰撞和成长。**气态巨行星**形成了，太阳成了一颗真正的恒星；e）在超过约一亿年的过程中，**星子聚合或被抛出**，最终留下几个在近圆轨道上运行的大行星。



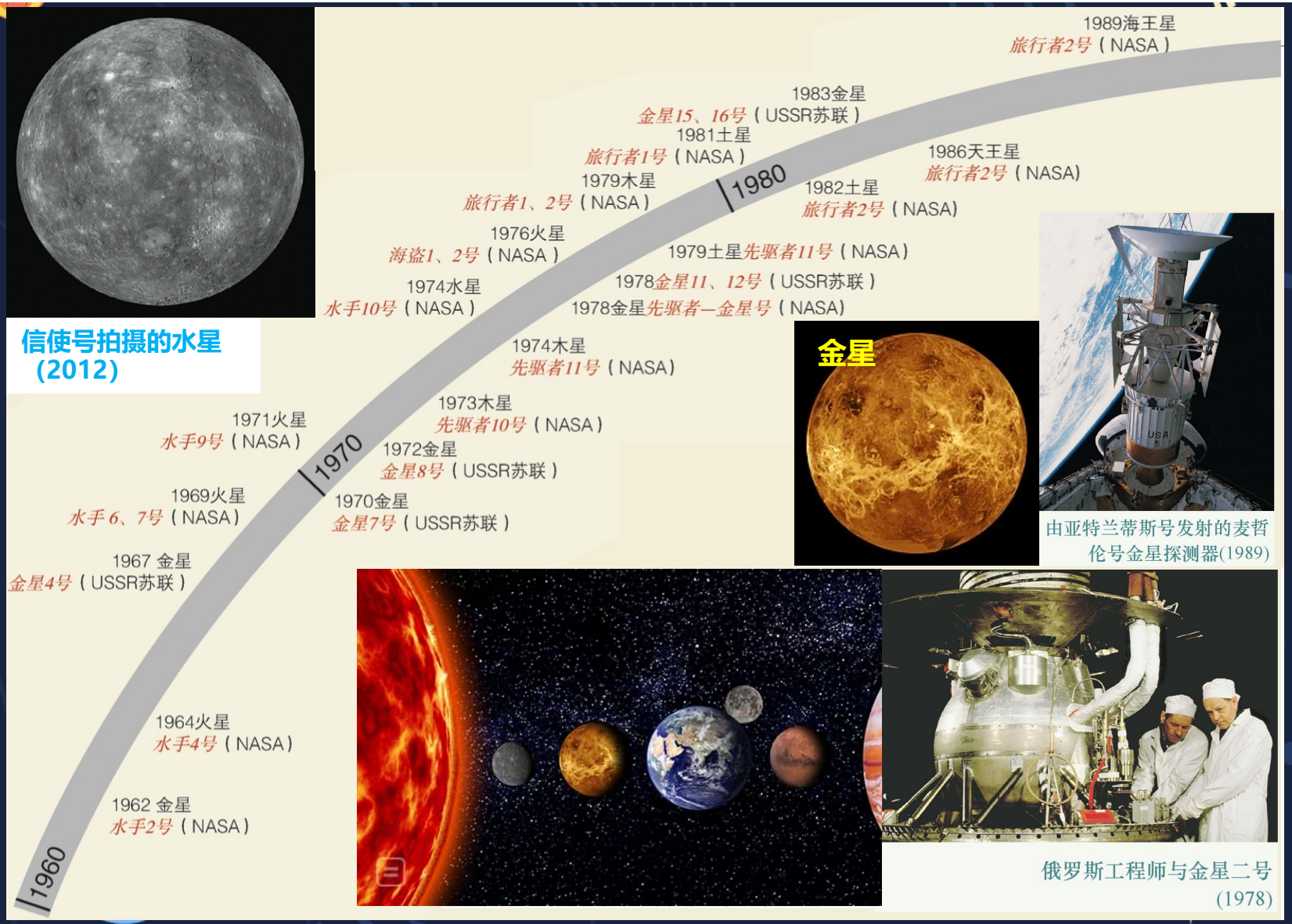
随着原行星的增长，它们强大的引力场导致了许多星子和原行星之间**高速碰撞**。碰撞产生了大量小碎片，落入较大**原行星**。只有数量相对较少、大小 10~100km的碎片逃脱行星或卫星捕获，成为**小行星和彗星**。~1000万年后，原始太阳系演变成8颗原行星、几十颗原卫星和1颗居于中心的发光的**原太阳**。

How Did our Solar System Come to Be?

7. 太阳系探测

- 截至2023年1月，有270多艘太阳系探测器，其中162艘成功；11艘部分成功；97艘失败（Wiki）
- **所有行星都被近距离探测过了**；自动探测器同时还造访了许多彗星和小行星
- 这些探测器对我们了解太阳系和行星系统具有**革命性**
- 水星：1974年水手10号，2021年信使号成功
- **金星：比探测任何一个其他行星的探测器都多，苏联、美国、欧洲**

信使号拍摄的水星（2012）

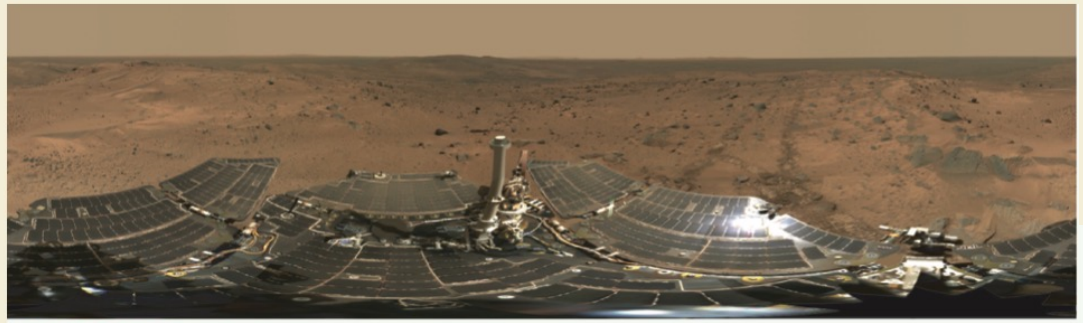


由亚特兰蒂斯号发射的麦哲伦号金星探测器(1989)

俄罗斯工程师与金星二号(1978)

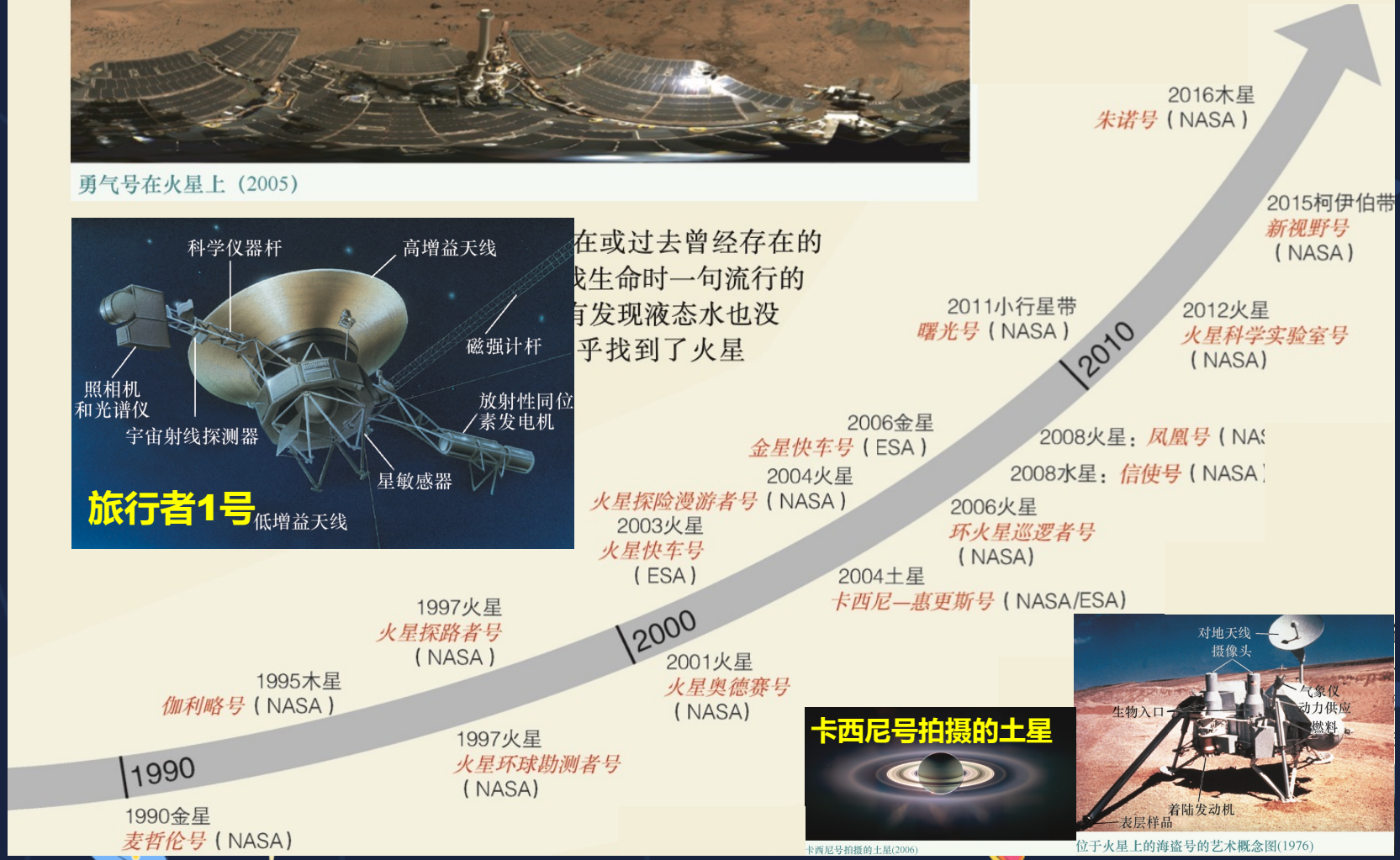
太空探测器

- **火星**：自动探测器非常热衷于探索的目标。美国、俄罗斯、欧洲和中国。20世纪60年代，美国几艘水手号飞船首先来到火星，显示火星非常不宜居
- **木星**： 先驱者10号、11号和旅行者1号、2号。旅行者2号接着探测了天王星和海王星 — **引力弹弓**
- **外太阳系**：美国伽利略号木星探测器和美国—欧洲的卡西尼号土星探测器
- **月球、彗星、小行星**等等



勇气号在火星上（2005）

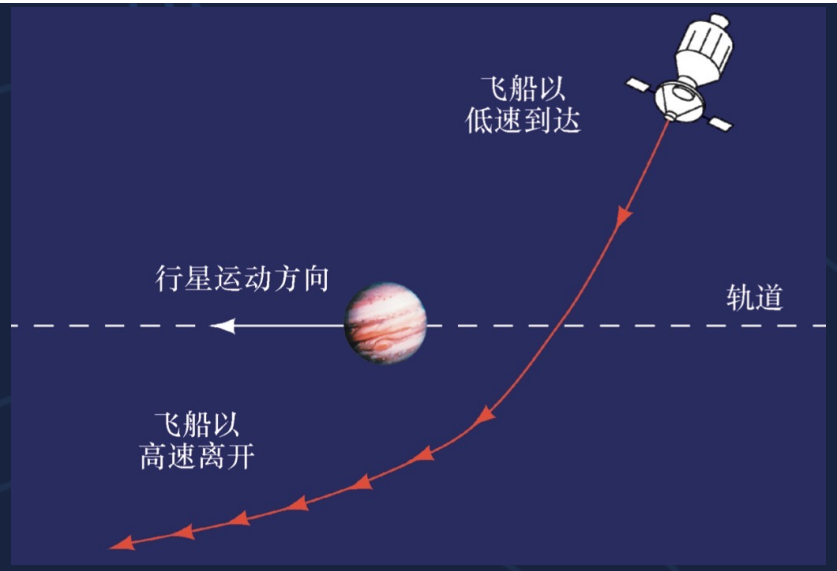
在或过去曾经存在的
生命时一句流行的
有发现液态水也没
乎找到了火星



卡西尼号拍摄的土星(2006)

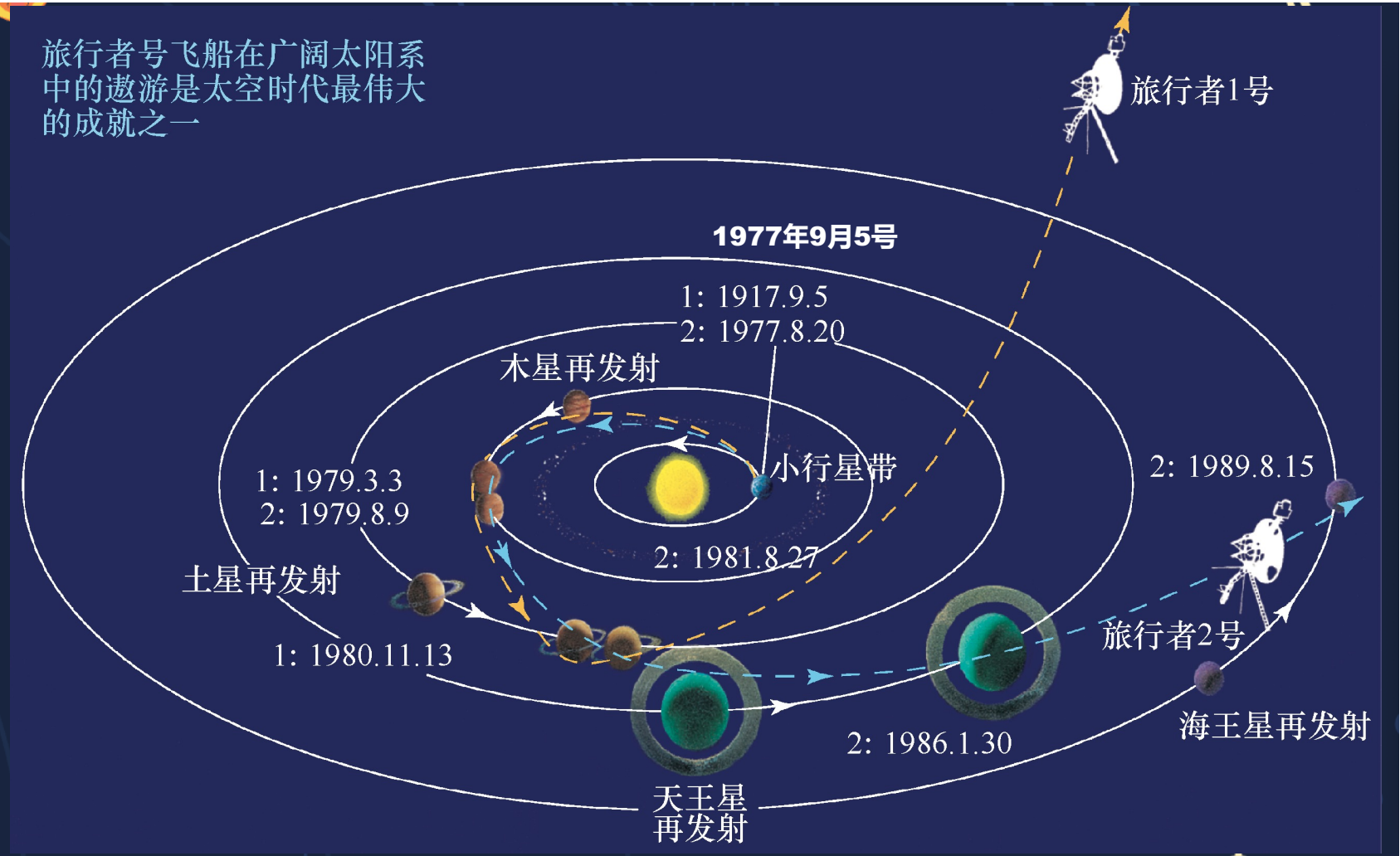
位于火星上的海盗号的艺术概念图(1976)

引力“弹弓” Gravity assist



将航天器发送到另一个星球需要的能量，**远远超过**直接由火箭从地球发射或先用航天飞机运送到轨道上再进行发射所能提供的能量。

引力弹弓，即**引力辅助**在飞行中的示意图。速度变化幅度可以高达两倍行星轨道速度。

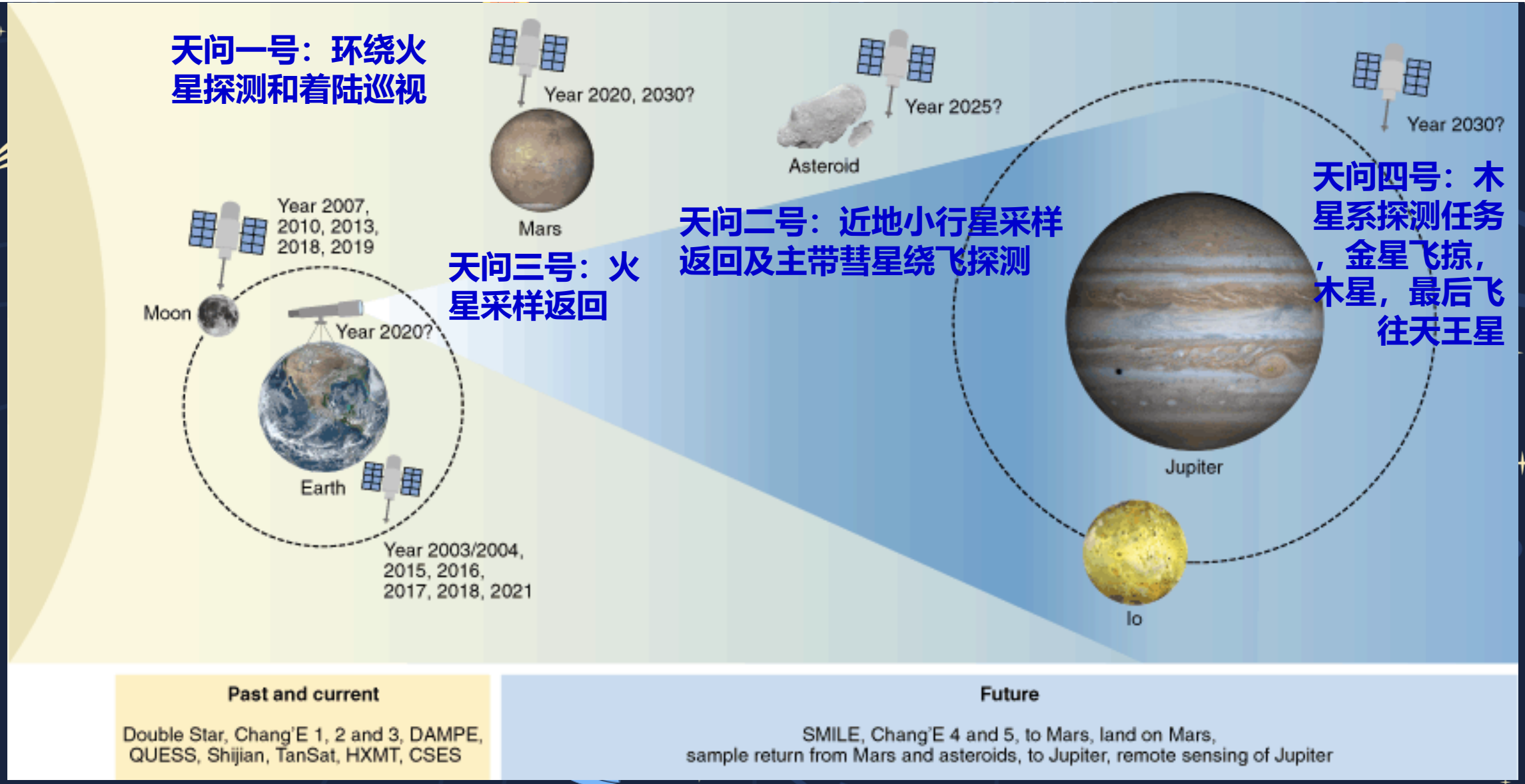


旅行者号穿过外太阳系的飞行轨迹。旅行者2号利用了木星，土星、天王星和海王星的引力弹弓效应。

太阳系探测 – 中国

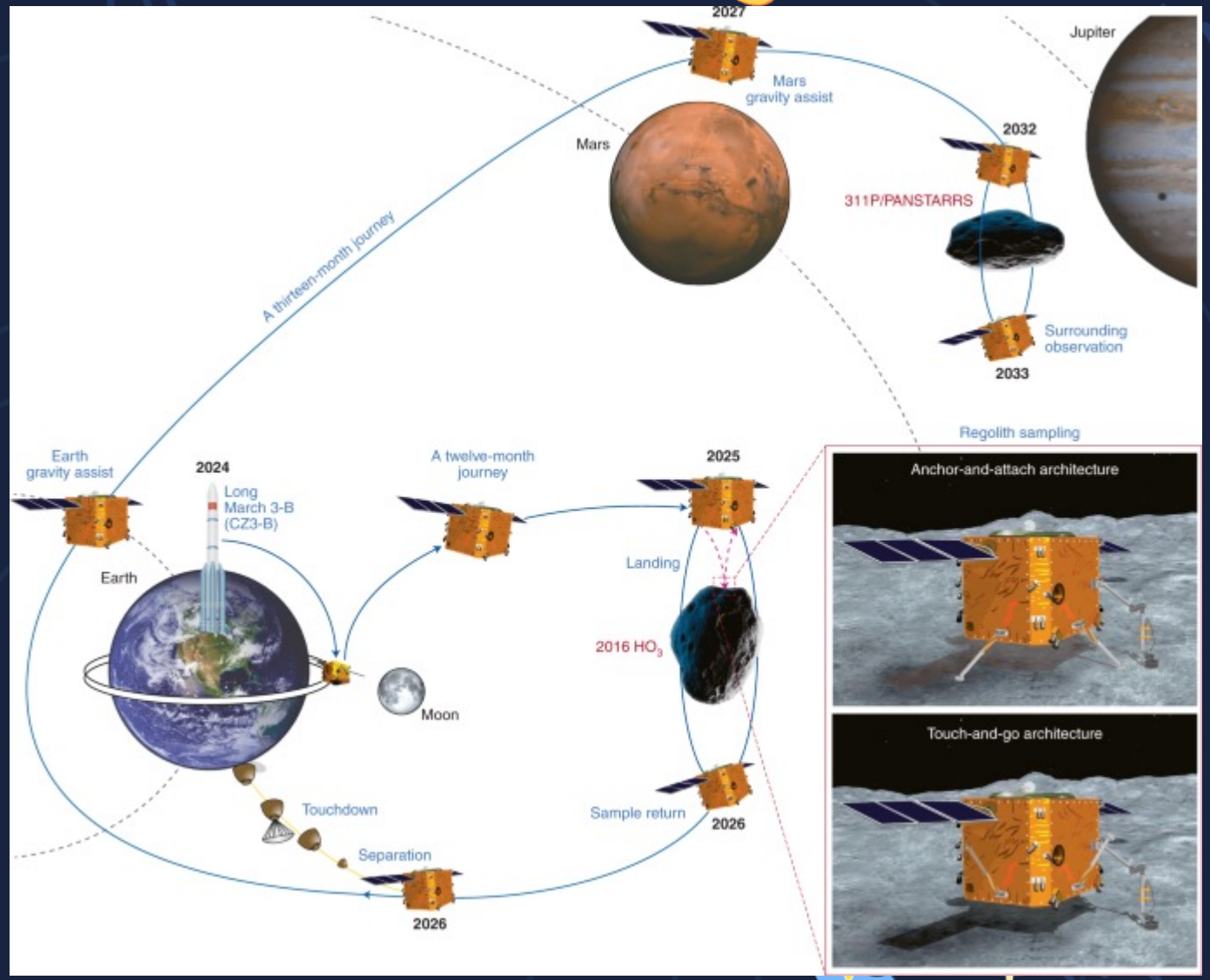
CHINA'S LUNAR PROBE MISSION
2004年启动
国际月球科研站 – 深空探测实验室
Oct 24, 2007
Chang'e-1 launched via Long March-3A Y14 rocket
Oct 1, 2010
Chang'e-2 launched via Long March-3C Y7 rocket
Dec 2, 2013
Chang'e-3 & Yutu-1 rover launched via Long March-3B Y23 rocket
Dec 8, 2018
Chang'e-4 & Yutu-2 rover launched via Long March-3B Y30 rocket
Nov 24, 2020
Chang'e-5 launched via Long March-5 Y5 rocket
Dec 17, 2020
Chang'e-5 lands in N China, concludes epic lunar round trip
Chang'e-6 is expectedto robotically collect lunar samples, and hopefully carry intl payloads on board
Chang'e-7 will compre-hensively explore the moon
Chang'e-8 will explore the possi-bility of building an intl lunar research base
二期工程“落”（嫦娥3-4号/玉兔）
STAGE 1 ORBITING
STAGE 2 LANDING
STAGE 3 RETURN
四期工程（嫦娥6-8号）
一期工程“绕”（嫦娥1-2号）
三期工程“回”（嫦娥5号探路星、嫦娥5号）
To be continued...

中国行星探测工程



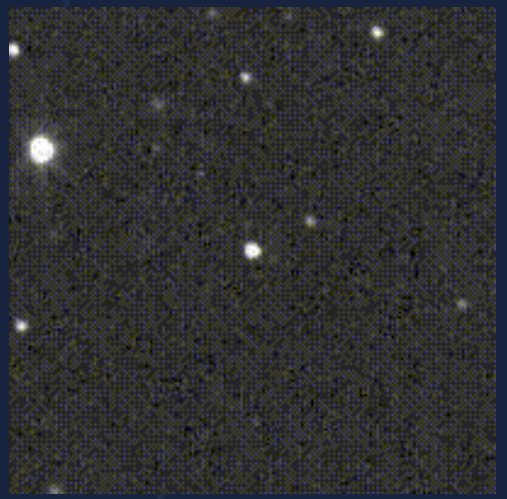
Past and current	Future
Double Star, Chang'E 1, 2 and 3, DAMPE, QUESS, Shijian, TanSat, HXMT, CSES	SMILE, Chang'E 4 and 5, to Mars, land on Mars, sample return from Mars and asteroids, to Jupiter, remote sensing of Jupiter

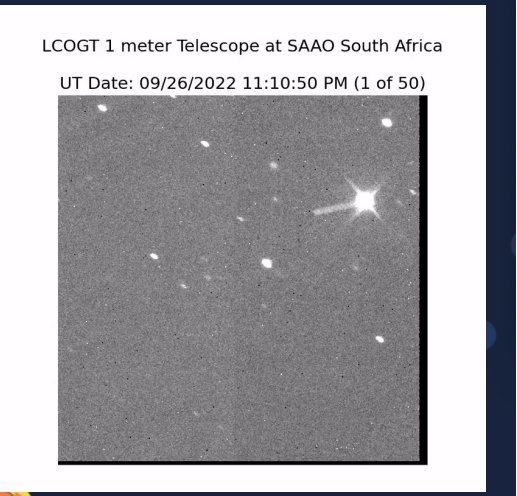
小行星在轨处置



撞得准、推得动、评得出、说得清

双小行星重定向测试（DART）：2022年9月27日撞击





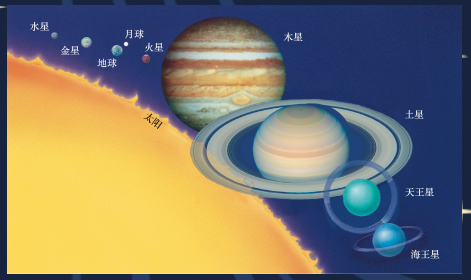
太阳系边际探测

中国探月工程总设计师，深空探测实验室主任、科大校友吴伟仁院士

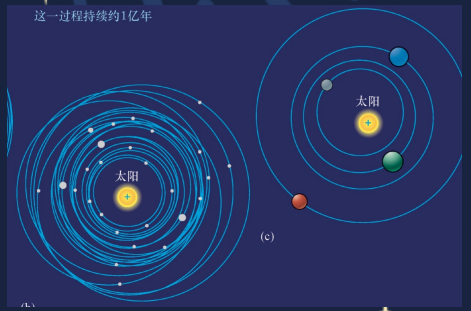
中国深空探测希望实现“两个100”：在2049年，新中国成立100周年之际，实现对100个天文单位（150亿公里）之外的太阳系边际进行探测。

本章总结

- **太阳系**由太阳和一切绕其运行的天体组成，包括八大行星、绕它们自转的卫星以及行星际空间中的许多小天体

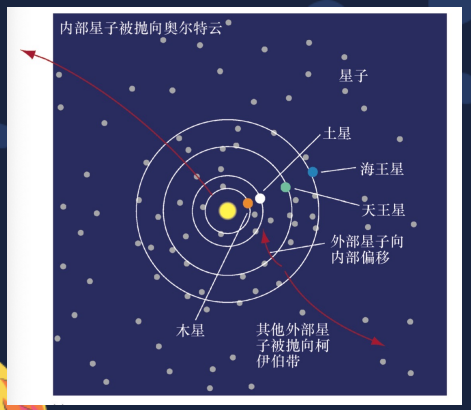


- 各大行星以同一情形（**逆时针**）沿着位于**黄道面**的**近圆轨道**绕太阳公转。**最里面的水星的轨道是最古怪的，并具有最大的轨道倾角。金星**的自转方向与其他行星相反



- 太阳系最内层四颗行星，水星、金星、地球和火星，与地球的平均密度相仿，它们总体是岩石成分，被称为**类地行星**。外围的**类木行星**，木星、土星、天王星、海王星，的密度比类地行星低得多，总体上是由气态或液态的氢和氦组成

- 小行星是太阳系中的小天体，它们均小于月球。其中大部分在一条位于火星和木星轨道之间带状区域。**彗星**是主要存在于太阳系外围的大块的冰，含有非常早期的太阳系形成演化阶段的线索。**柯伊伯带是一个位于海王星轨道之外的冰质天体带**



- **凝聚理论**植根于星云理论中，并考虑了**气体星云中含有尘埃**和**太阳加热**对行星形成过程的影响。**太阳星云的位置（温度）决定着星子和行星的成分**