

天文学导论（四）星系与宇宙

第11讲：银河系

第12讲：星系

第13讲：膨胀的宇宙

第14讲：宇宙结构的起源

第15讲：宇宙的未来与极早期



天文学导论

第11讲 银河系

2022.05.12 ESO/José Francisco Salgado/EHT Collaboration

本讲内容

1. 银河系的结构
2. 银河系的恒星
3. 银河系的暗物质
4. 银河系中心的超大质量黑洞
5. 银河系的历史和未来

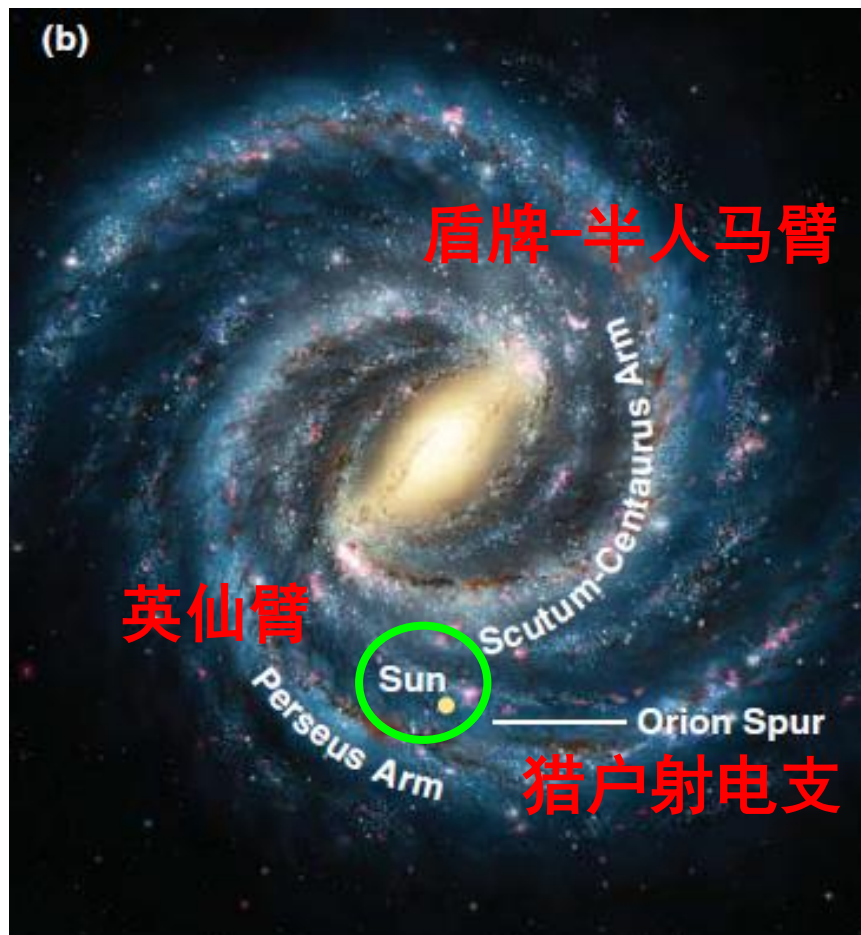
教材学习

Chapter 20 The Milky Way—A Normal Spiral Galaxy

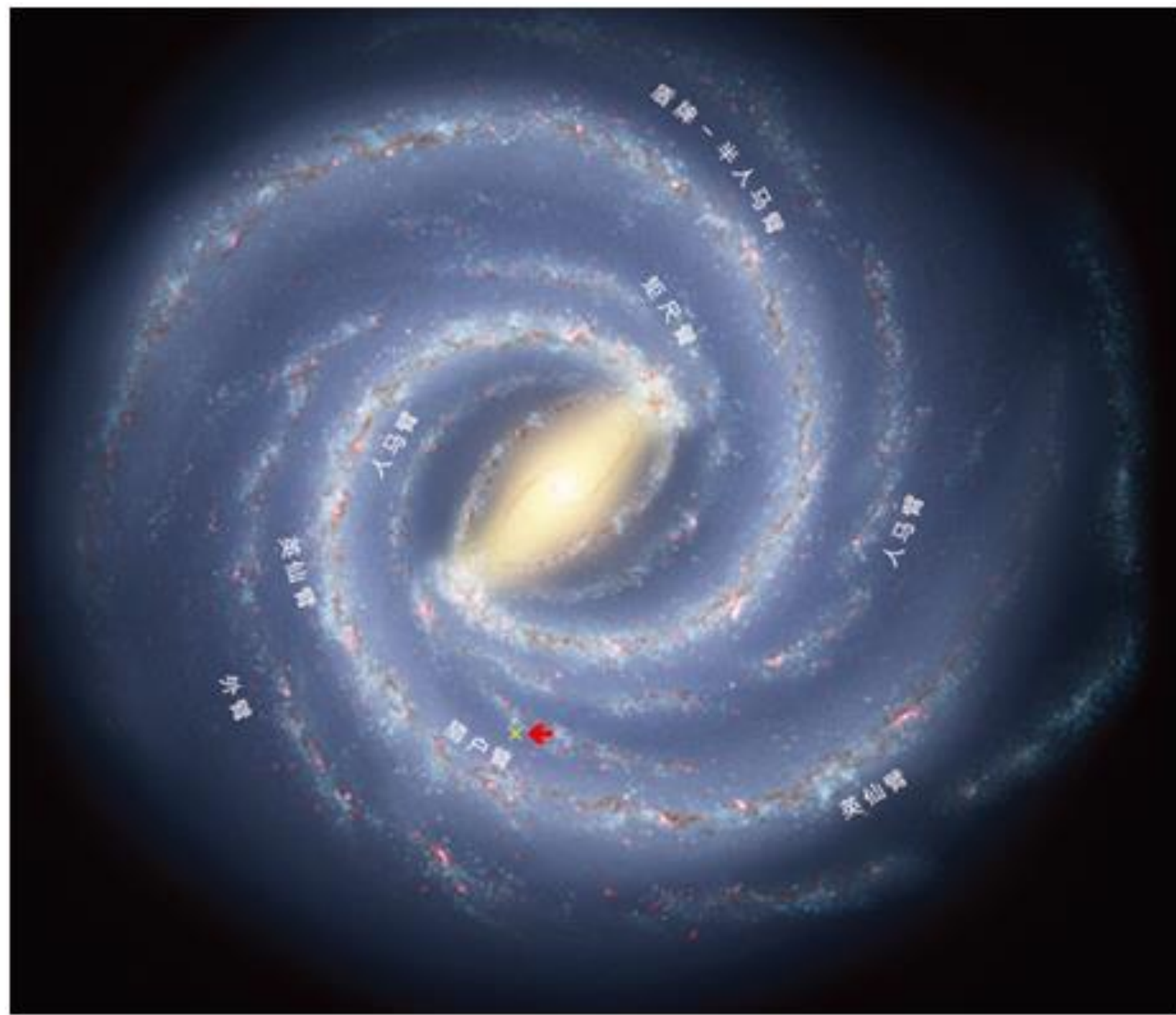
1、银河系的结构



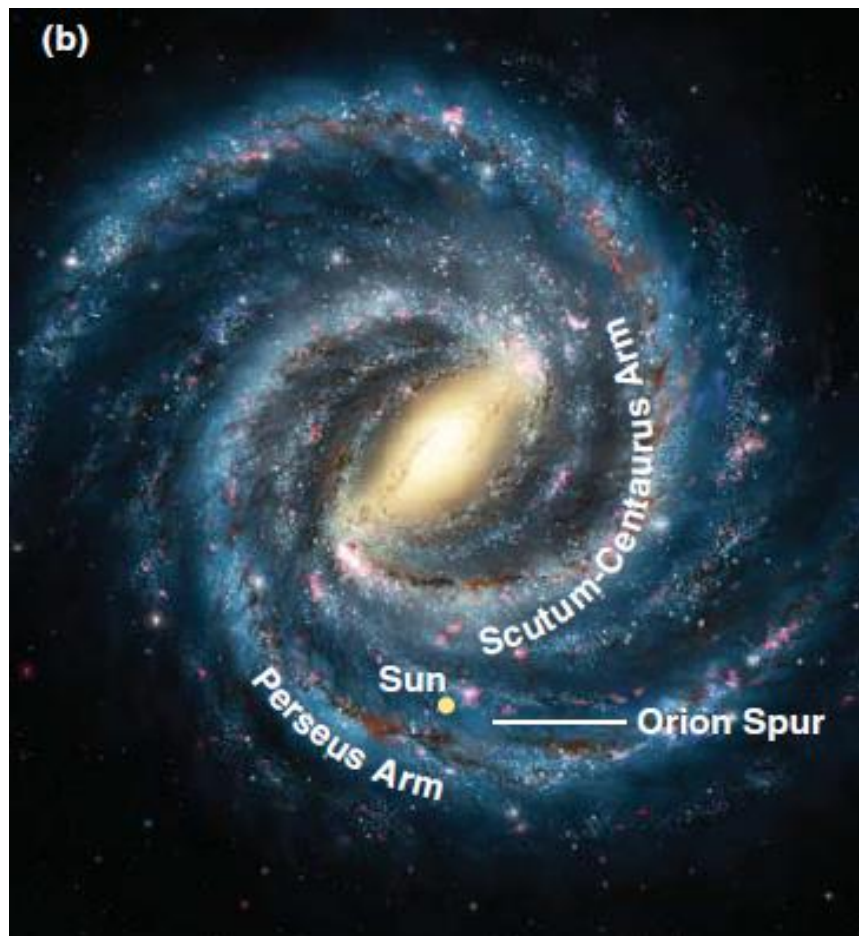
银河系是一个SBb (c) 型的棒旋星系



- 中性氢的21厘米射电辐射图像
→ 星系的旋涡结构
- 电离氢的可见光观测 → 富集年轻的热的O和B型恒星的两条旋臂
- 空间红外观测确认银河系中心的中等大小的核球和明显的棒



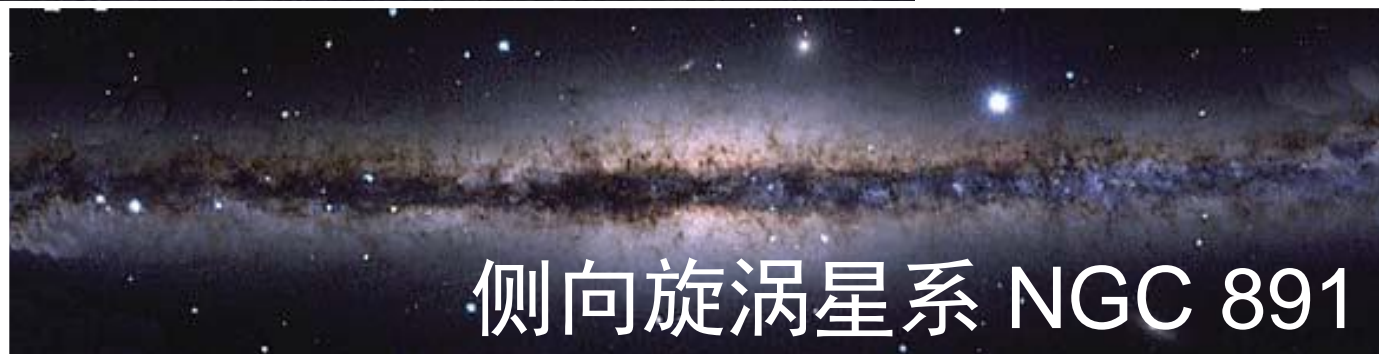
银河系是一个SBbc型的棒旋星系



地球夜空上的银河系

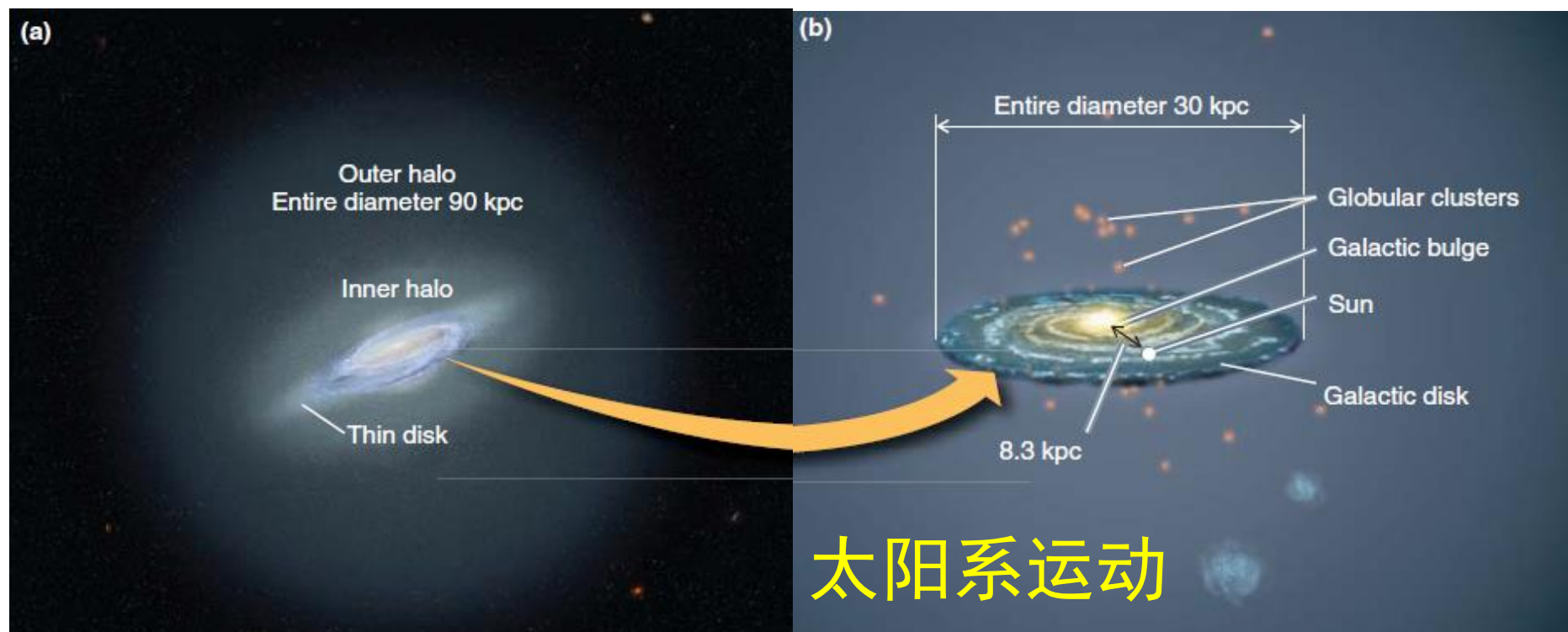


侧向旋涡星系 NGC 891



银河系的大小

- 银盘~30k pc (~10光年)
- (内、外) 银晕~90 kpc: 球状星团相对银心呈球对称分布
- 太阳距银心~ 8,300 pc [~27,000光年]



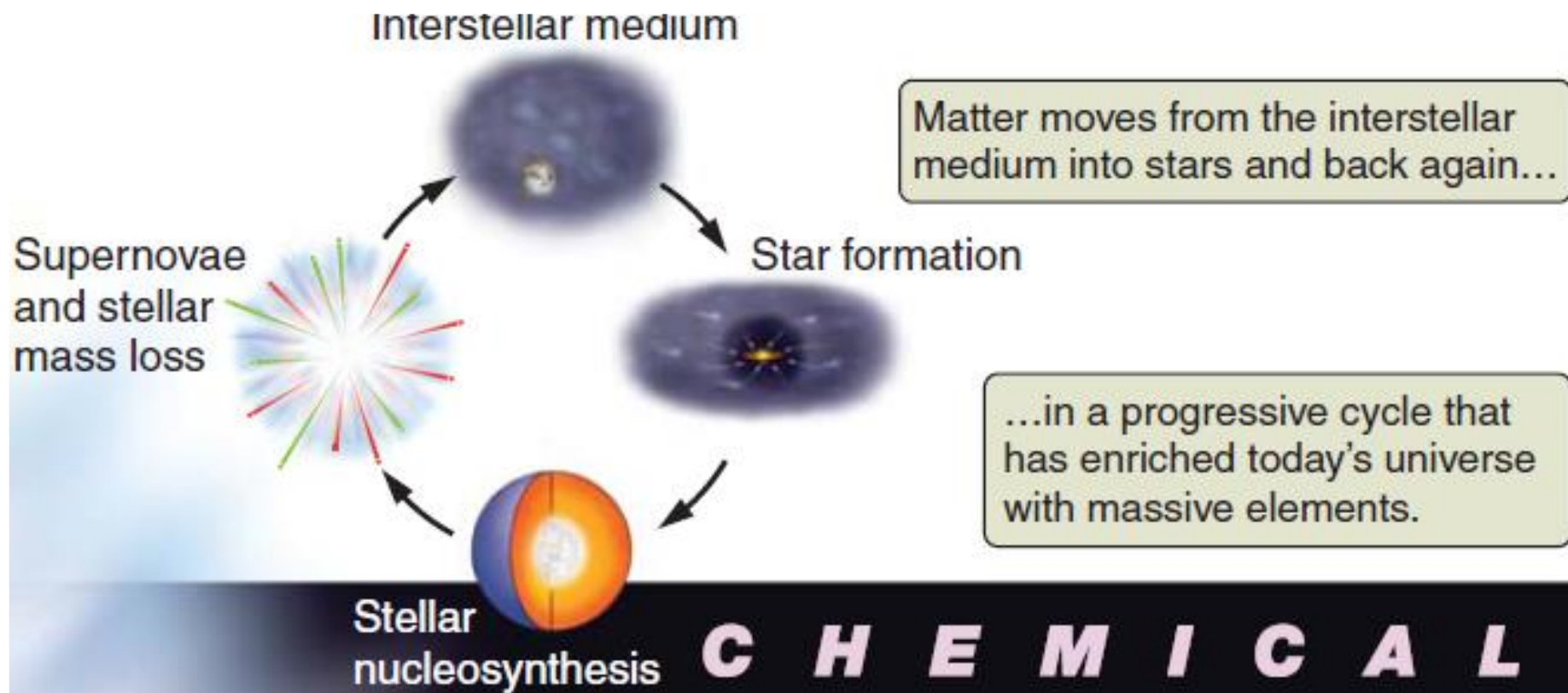
2、银河系的恒星

- 盘族恒星~星族I：环绕银心转动
- 晕族恒星~星族II：轨道类似椭圆星系中的恒星
- 棒族恒星~星族II：长轨道与短轨道

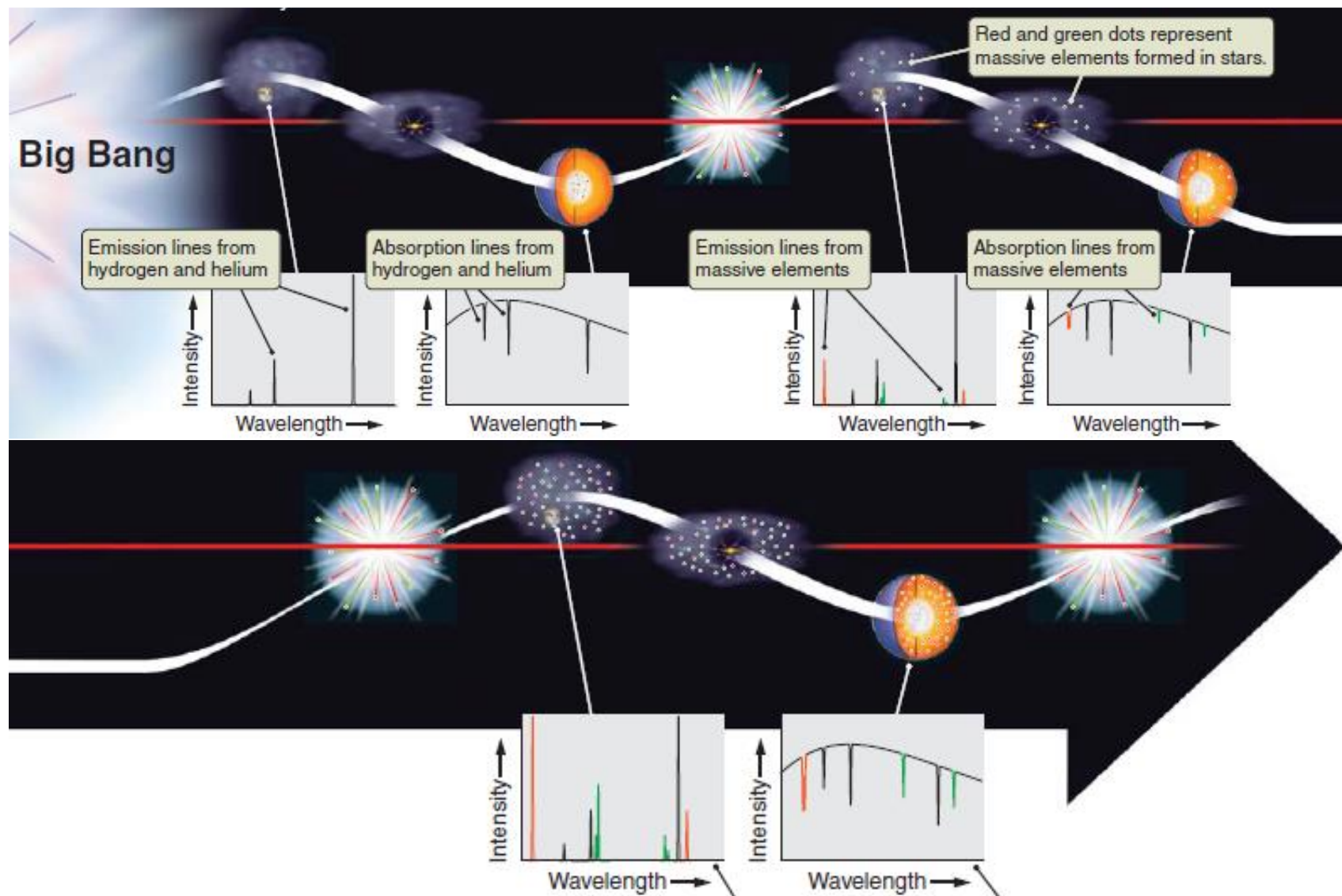
- 太阳是中等年龄的盘族恒星
- 一些晕族恒星的轨道穿越太阳附近的银盘
- 区分盘族与晕族恒星的方法：年龄、化学丰度与轨道

银河系的重元素增丰

银河系的重元素丰度随星际介质和恒星间的循环而增加



银河系的化学演化



银晕和核球外层的恒星（年老）

- 核球外层气体含量较少，其性质与银晕更为接近，恒星形成早已停止
- 恒星年老、重元素丰度极低
- （恒星最早形成的）球状星团
 - 0.5% 太阳重元素丰度
 - 非第一代恒星，至少第一代大质量恒星之后
- * （一颗昏暗恒星：重元素丰度是太阳的20万分之一【2012 ESO SDSS】）

银盘和核球内层中的恒星（年轻与年老）

- 核球内层气体密度很高，其性质与银盘更为接近，是恒星形成的地方
- 恒星相对年轻、重元素丰度相对较高
- 恒星持续形成 → （同一位置）盘族恒星重元素丰度：年轻恒星比年老恒星高
- 恒星形成率决定恒星的重元素丰度：
 - 银盘内区的恒星形成率高于外区的 → 从银盘的内区到外区，重元素丰度依次降低

银盘中的恒星

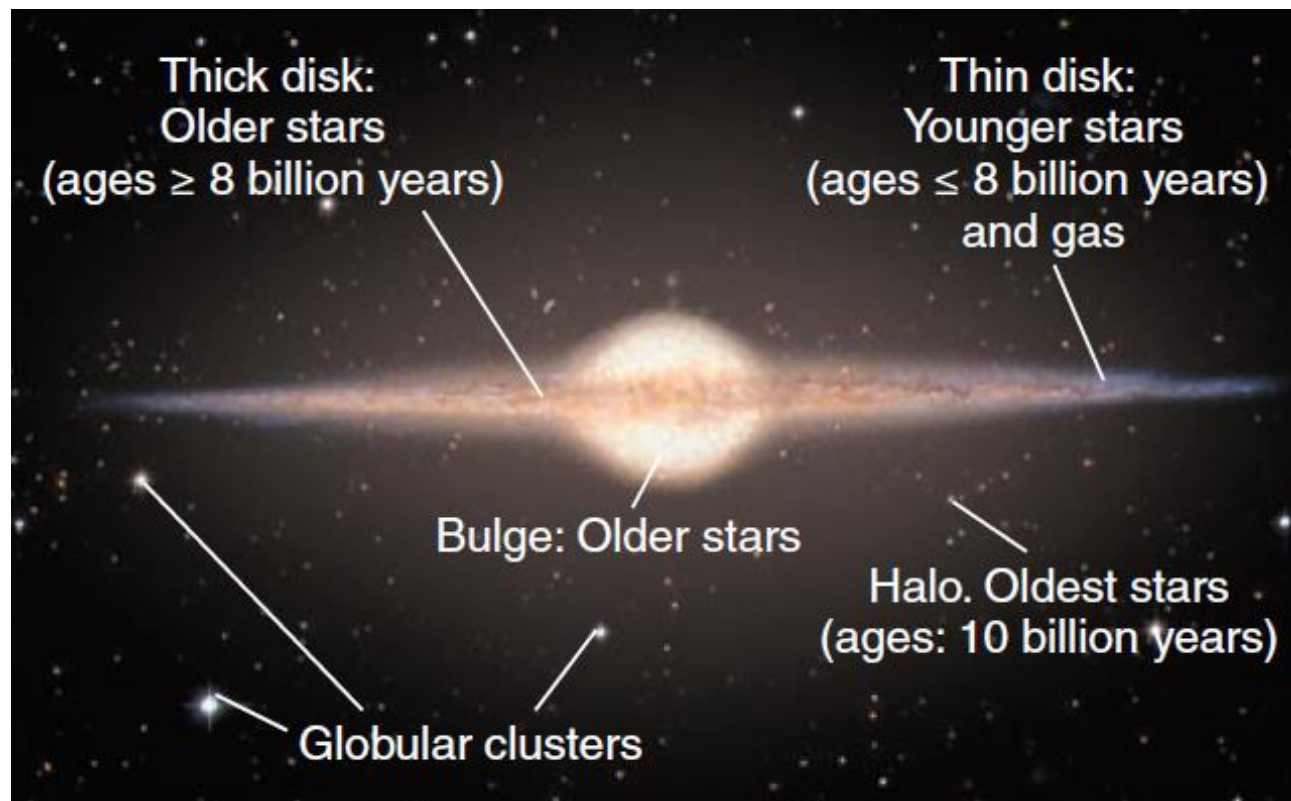
- 质量 $<0.8M_{\odot}$ 的恒星依然为主序恒星 + 没有发现**重元素特别低**的**盘族恒星**
- 形成银盘及其恒星的气体，之前已经历显著的恒星形成
- **太阳**：形成它的气体已历经~90亿年的恒星历史，但仍仅含2%重元素

球状星团与疏散星团

- 最年老的**疏散星团**比最年轻的**球状星团**还要年轻几十亿年 →
- **晕族恒星**首先形成。但是，因为没有发现年轻的球状星团，所以恒星形成没有持续太久
- **盘族恒星**形成较晚。但是，因为疏散星团的年龄跨度大，所以恒星形成一直在持续

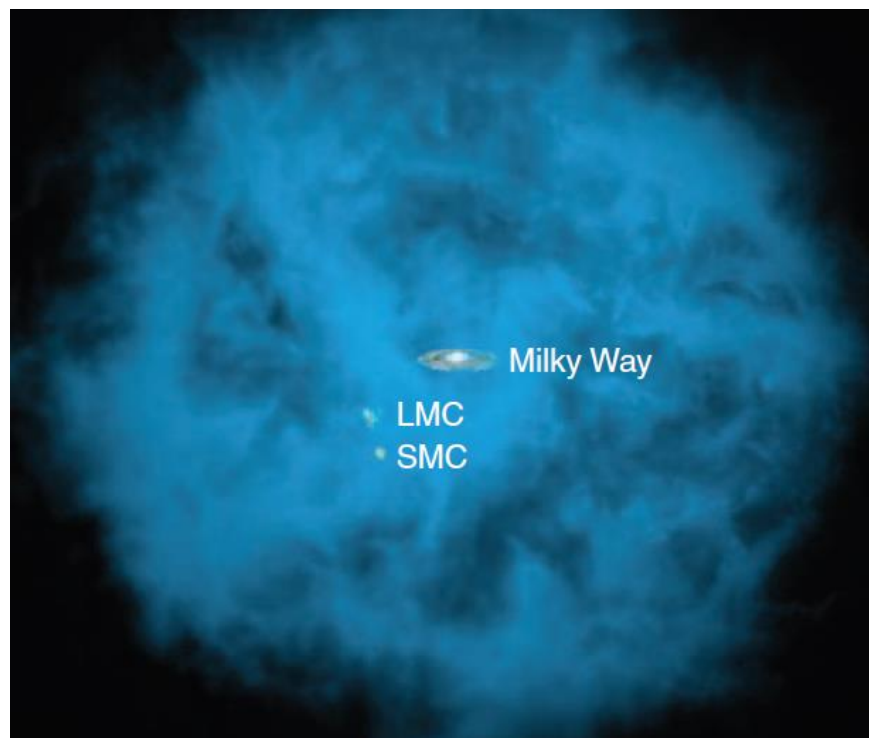
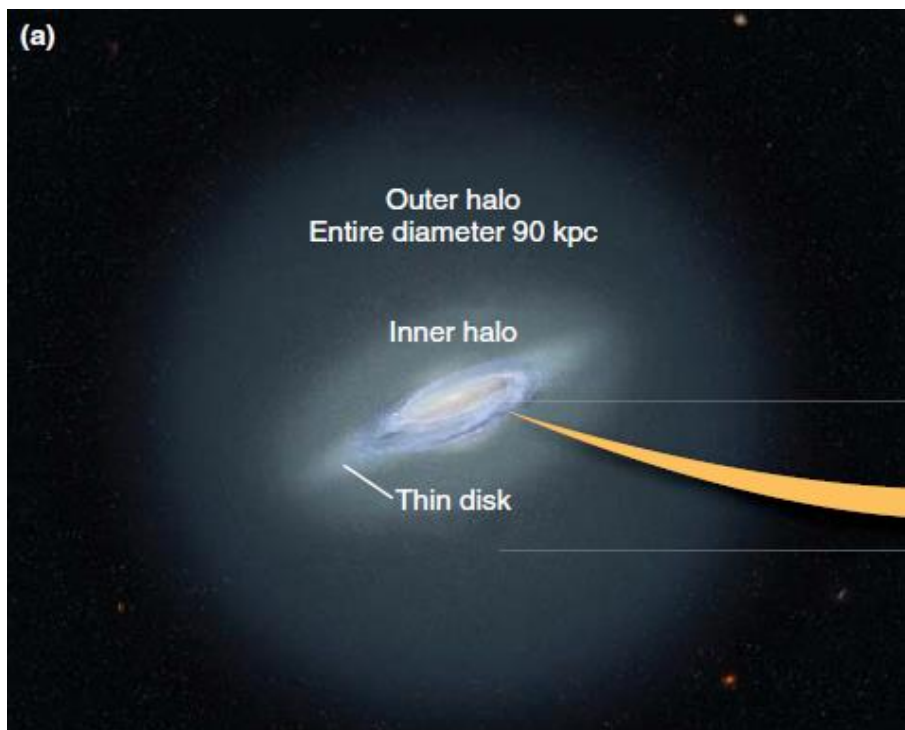
银盘的结构

- 薄盘（分子云）：由年轻的恒星构成，厚1000光年、宽100000光年
- 厚盘：由年老恒星组成，12000光年厚



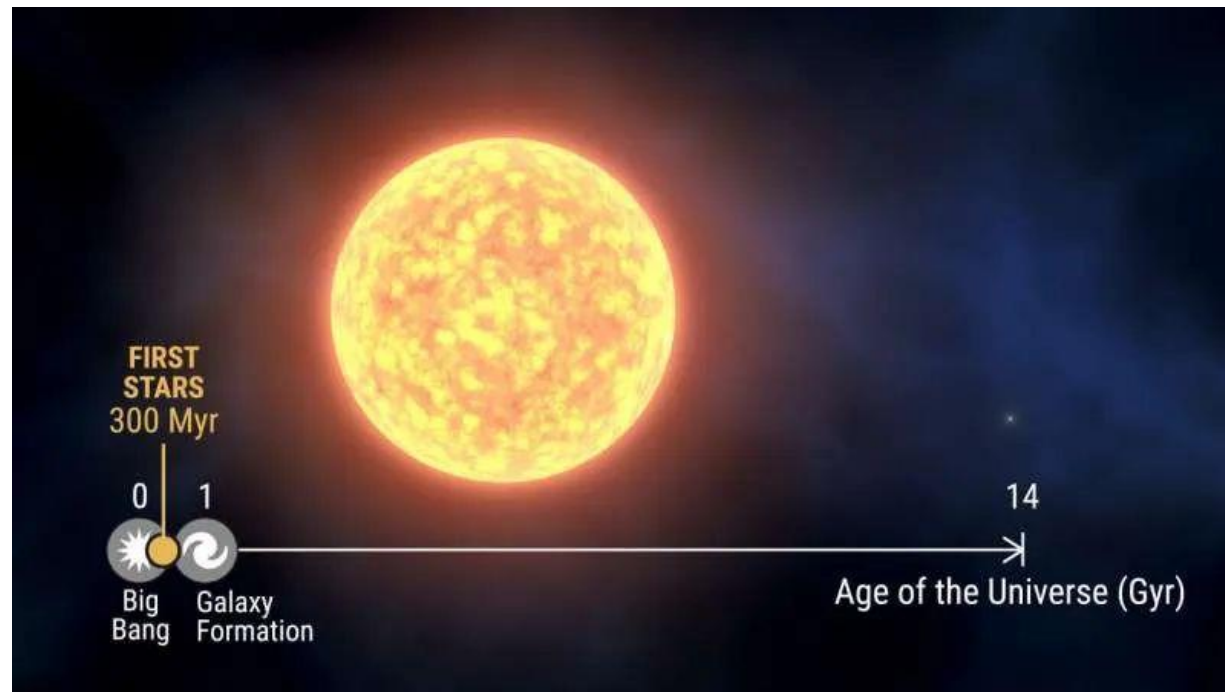
银晕的结构

- 内晕：恒星距银心可达5万光年
- 外晕：恒星的重元素丰度更低，更早形成，延展至距银心~15万光年
- 热气体云：延展至距银心30万光年



*银河系中一颗古老恒星的原始起源

- SMSS1605-1443（2018年发现），双星
- ESPRESSO仪器揭示天体速度的微小变化
- 诞生于第一批**大质量恒星内部**，并在银河系形成的最初阶段于超新星爆炸中被喷射出来
- 铁含量很低，但碳含量很高，在第一批大质量恒星的内部产生
- 恒星的大气中碳-12和碳-13的比例：这两种同位素的相对比例表明，恒星的内部过程并没有改变其原始成分



图片来自Instituto de Astrofísica de Canarias。

<https://scx1.b-cdn.net/csz/news/800a/2023/astronomers-find-the-o.jpg>

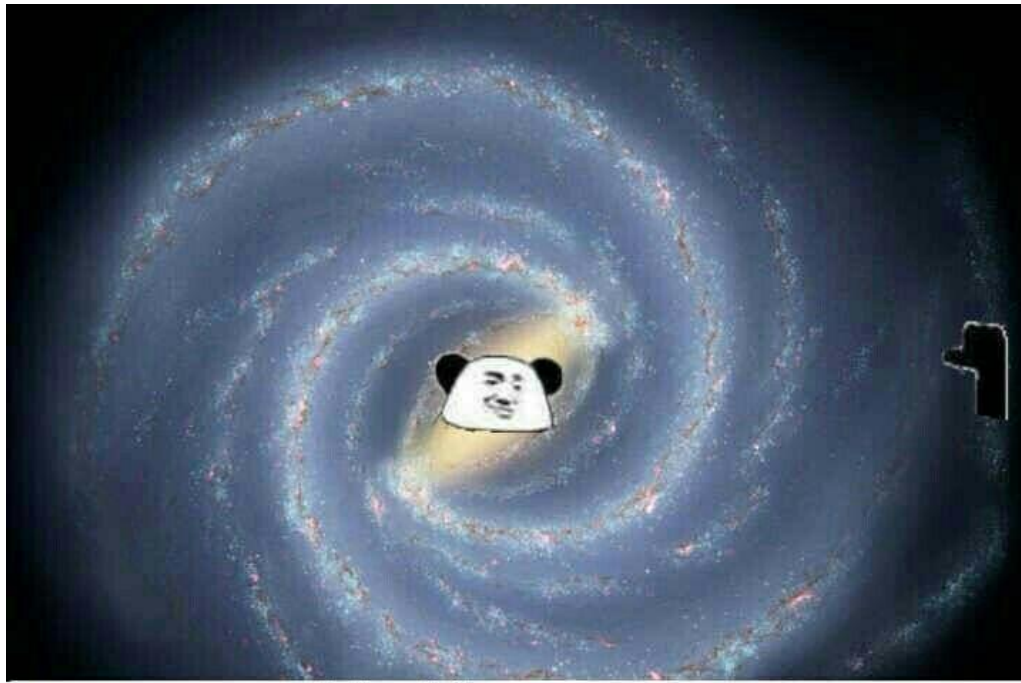
来源 / <https://phys.org/news/2023-01-astronomers-oldest-stars-milky.html>

原创

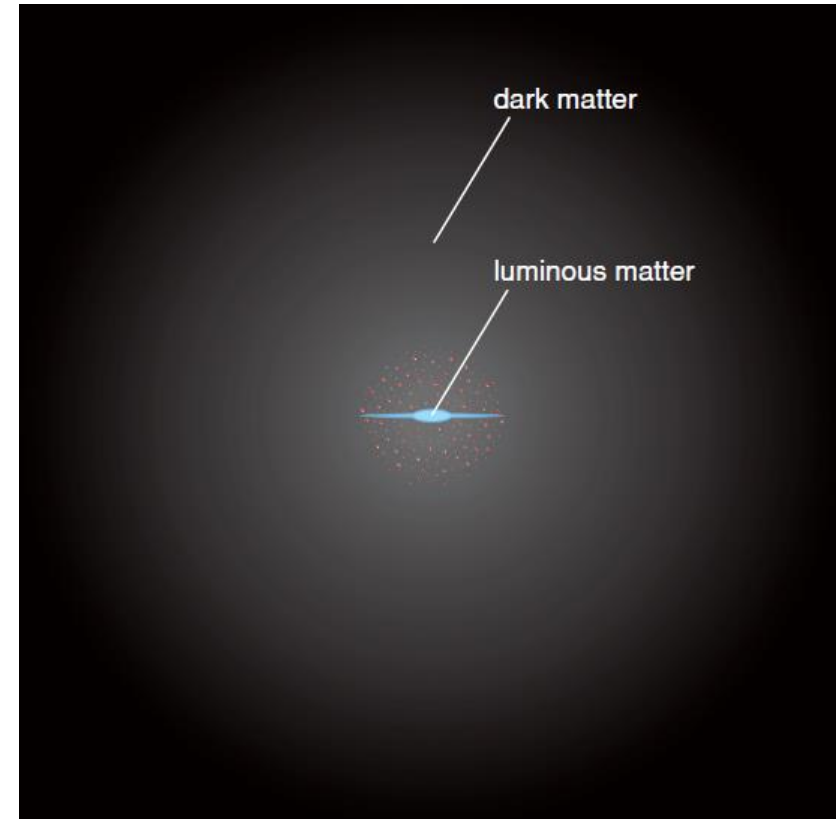
CNA 中国国家天文 2023-02-07 16:30 发表于北京

3、银河系中的暗物质

暗物质主导银河系的总质量，其分布范围远超可见银盘和球状星团的边界

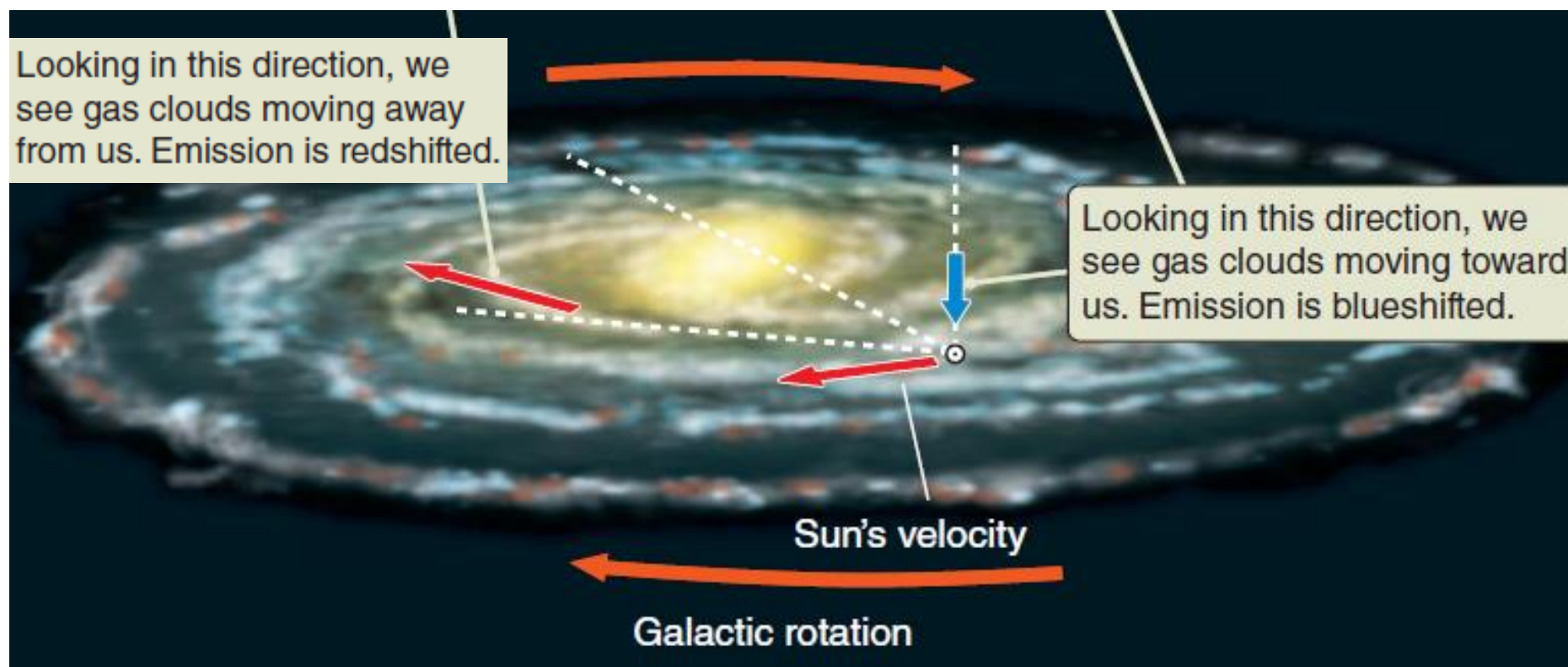


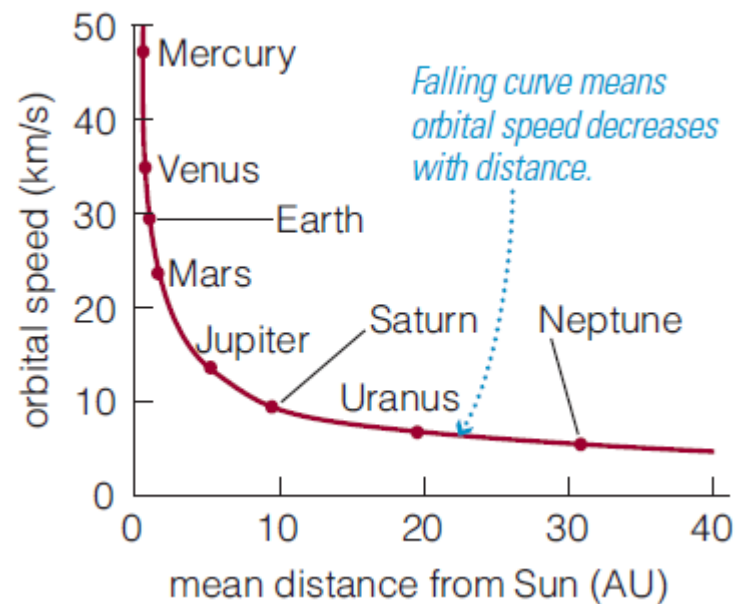
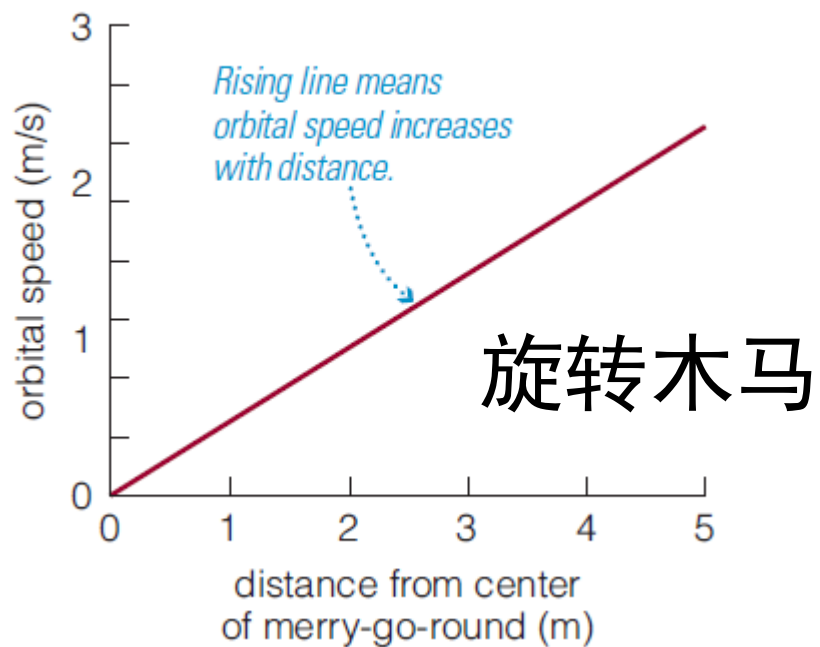
棒旋星系



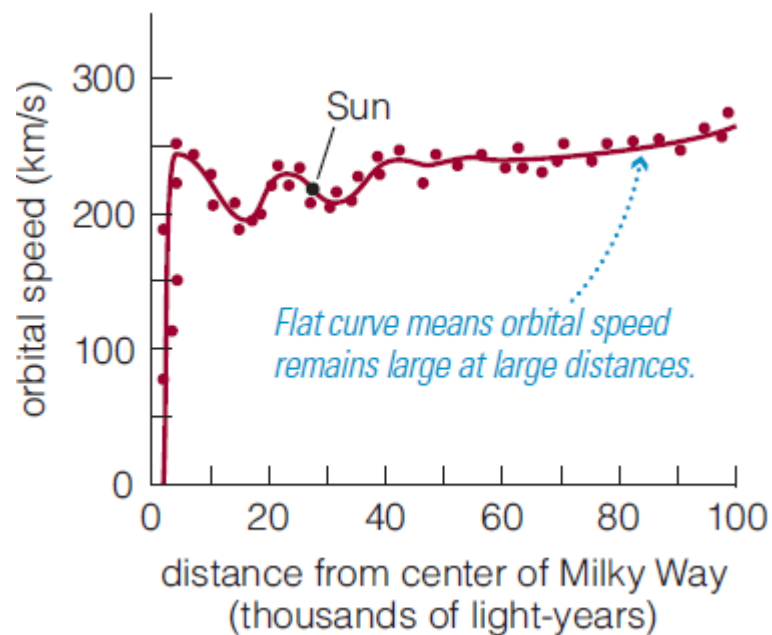
自转曲线：自转速率与到银心距离的关系

由星际中性氢的21厘米射电（+恒星等）辐射的多普勒效应确定银盘的自转曲线





太阳系



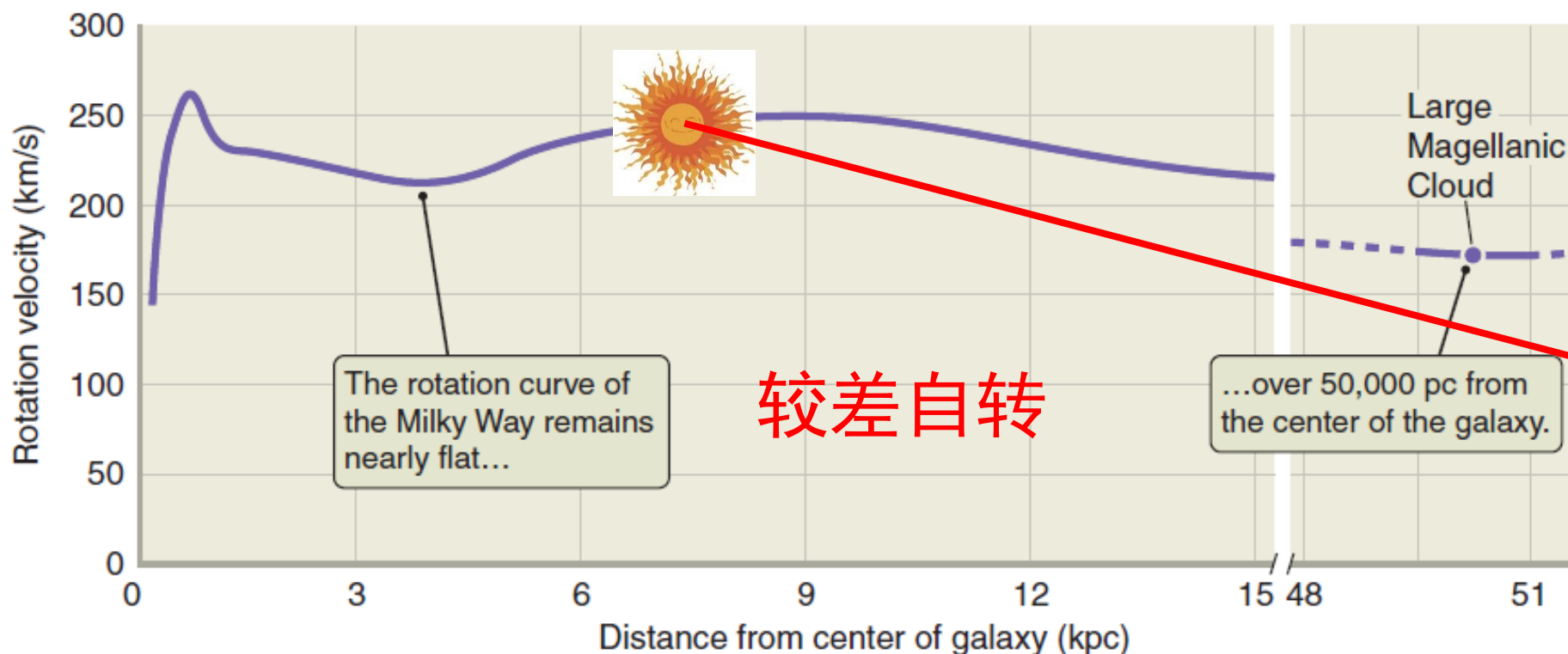
银河系

平坦的自转曲线表明暗物质的存在

亮物质预言下降的自转曲线（红线表示）

引力质量 = $1.0 - 1.5 \times 10^{12} M_{\odot}$ ，亮物质质量仅占~1/10

比较质量分布 → 暗物质主导外区，亮物质主导内区



【例】太阳轨道以内的银河系引力质量

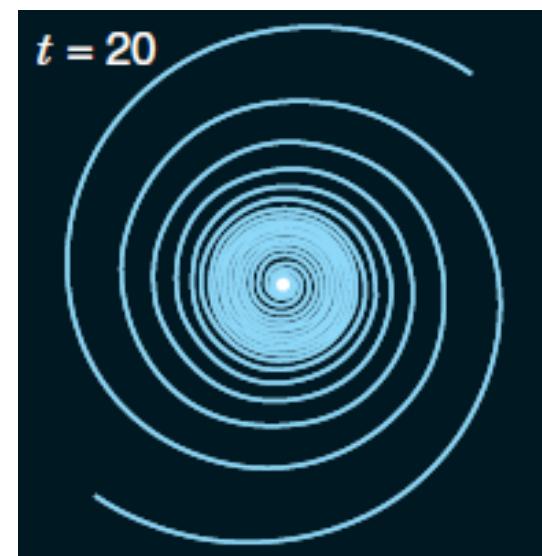
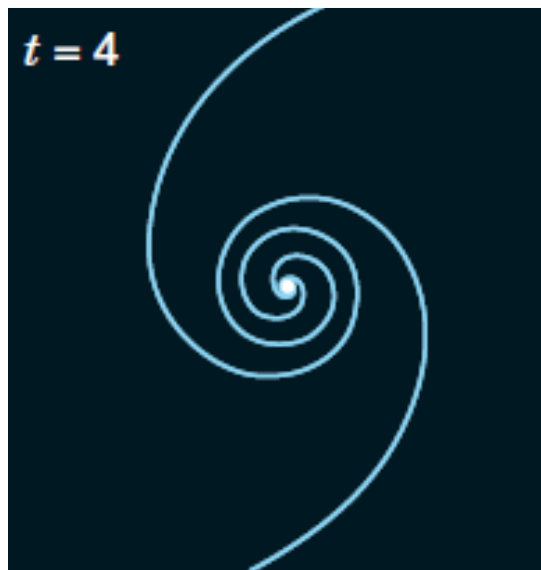
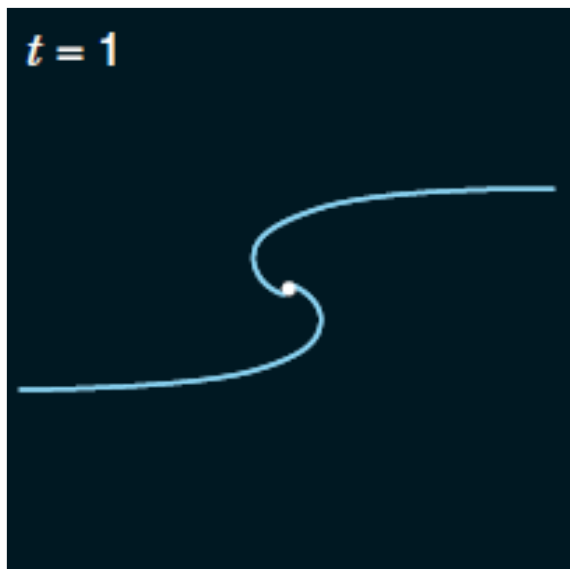
太阳轨道速度=220km/s = 2.2×10^5 m/s

太阳轨道半径=8,300pc = 2.56×10^{20} m

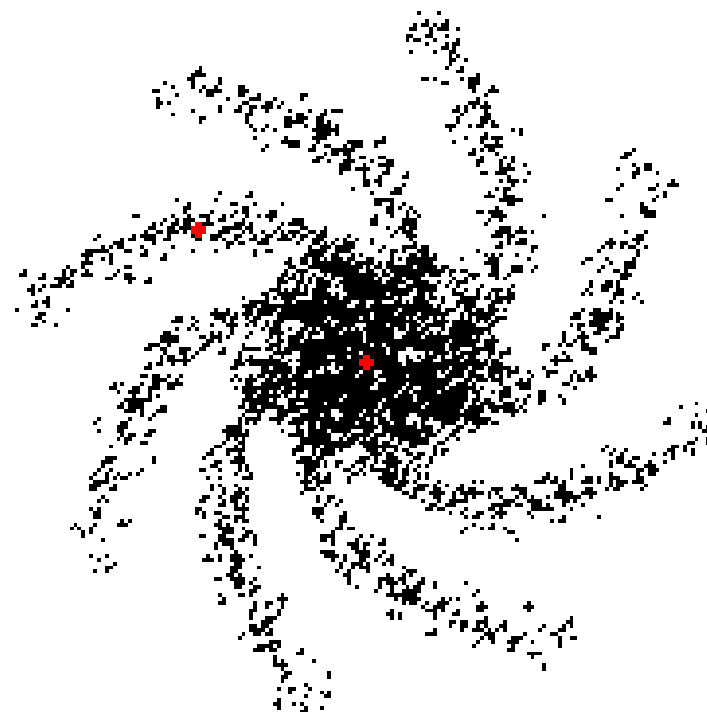
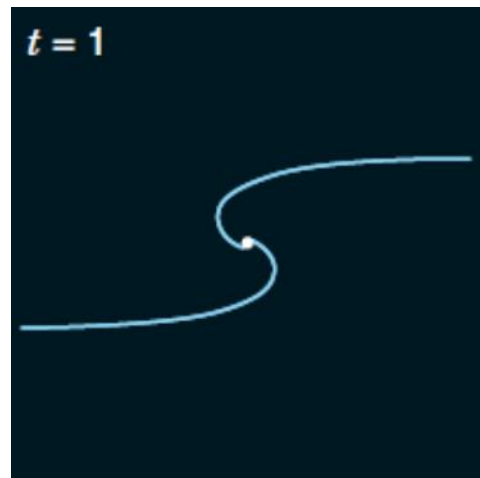
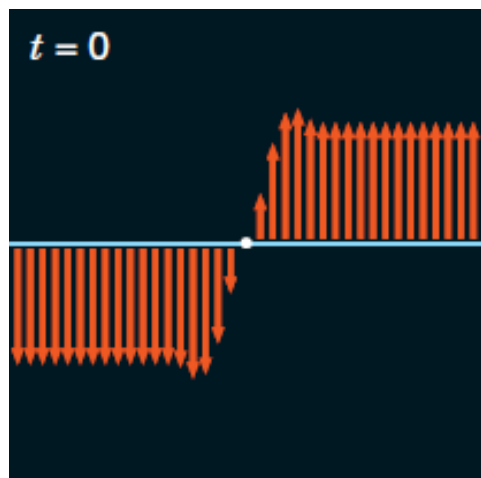
$$M = \frac{rv_{\text{circ}}^2}{G} = \frac{(2.56 \times 10^{20} \text{ m}) \times (2.2 \times 10^5 \text{ m/s})^2}{6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2} = 1.86 \times 10^{41} \text{ kg}$$
$$= \frac{1.86 \times 10^{41} \text{ kg}}{1.99 \times 10^{30} \text{ kg}/M_{\odot}} = 9.35 \times 10^{10} M_{\odot} \sim \text{引力质量的1/10}$$

→ 暗物质主要分布于太阳轨道以外的区域

较差自转表明旋臂会消失

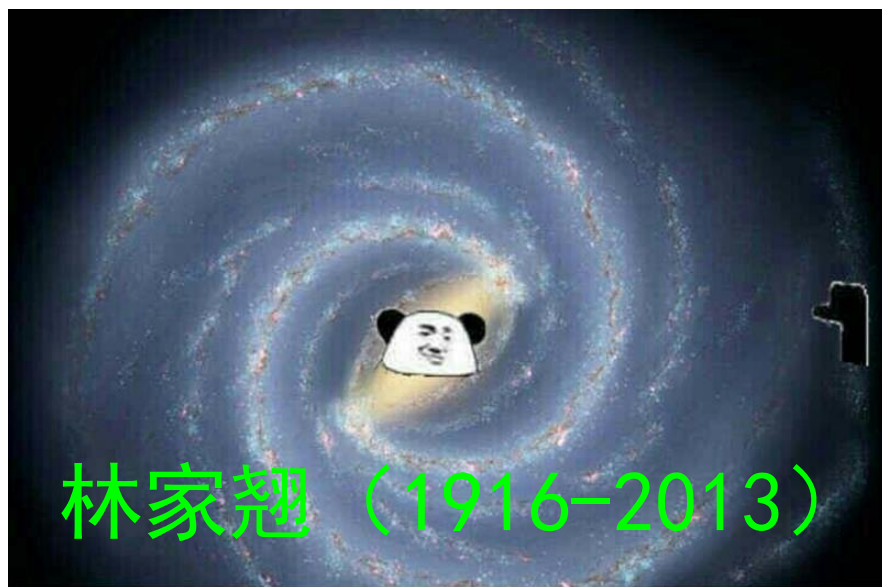


- 旋臂的大量存在，表明星系盘存在重复的扰动，形成旋臂模式的**密度波**。可能的原因：
 - 伴星系的引力作用、重复的恒星形成
 - 不对称的棒或椭圆型的核球，引力扰动星系盘



旋臂是密度波，其物质川流不息

- **密度波**：某种扰动所产生的两个**旋臂模式**的高密度区域，以不同于盘中物质绕银心旋转的速率在盘中波动
- 盘物质通过密度波时受到压缩，触发**恒星形成**

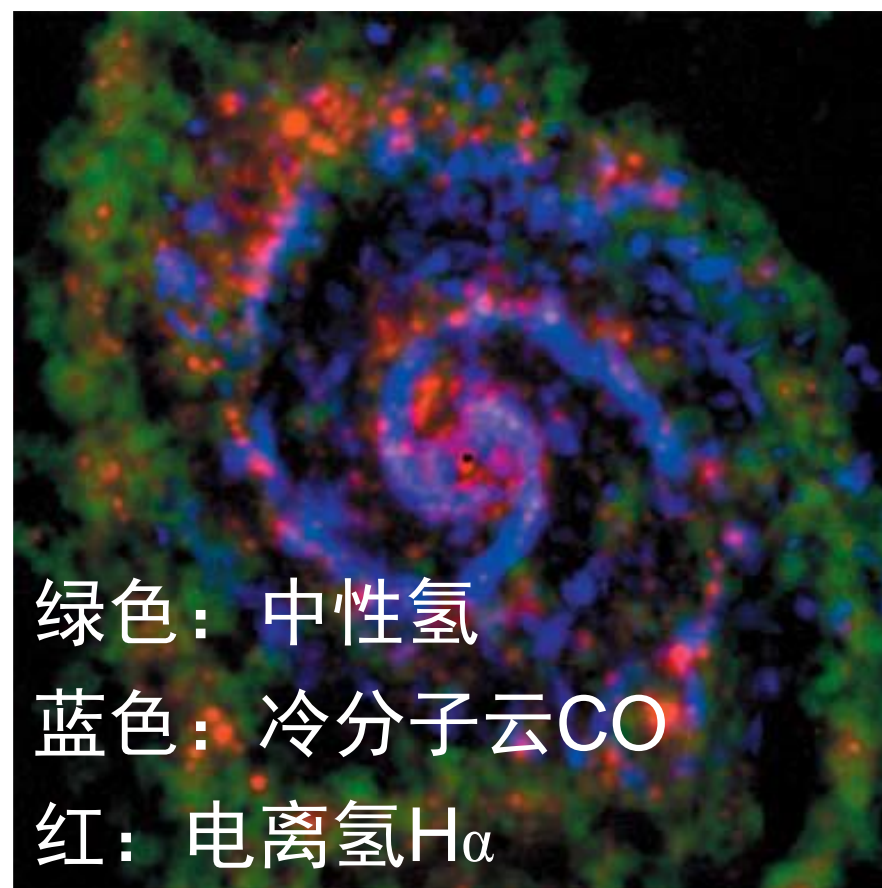


林家翘 (1916-2013)

棒旋星系



- 旋臂是物质聚集并被压缩形成恒星的场所
- 尘埃带、高密度气体区域、新形成的O、B型星等刻画出旋臂密度波的模式图样



绿色：中性氢

蓝色：冷分子云CO

红：电离氢 H_{α}

旋臂是恒星正在形成的场所

- 旋臂不是大量恒星特别聚集的表现
- 旋臂是少量的年轻的大质量、高光度、炽热恒星聚集的表现



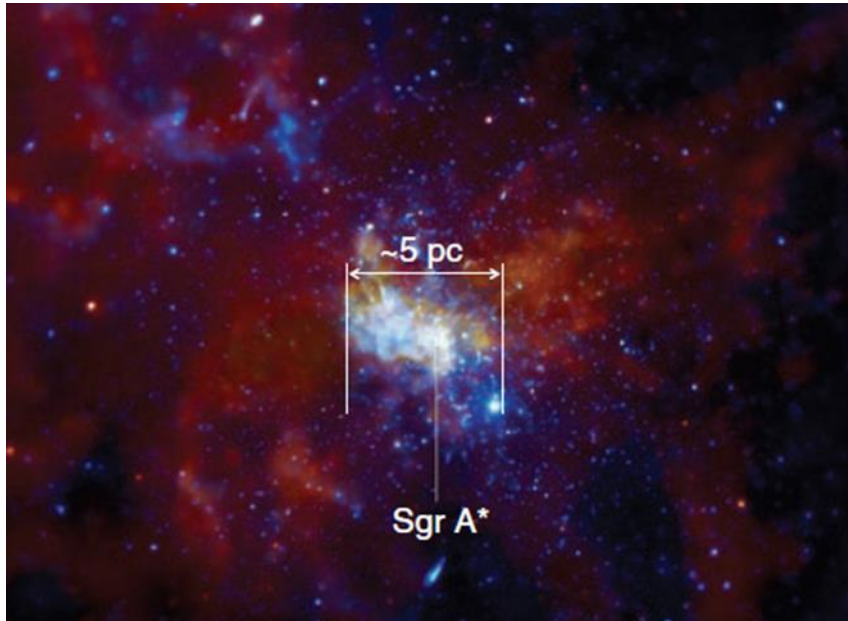
M31 紫外图像



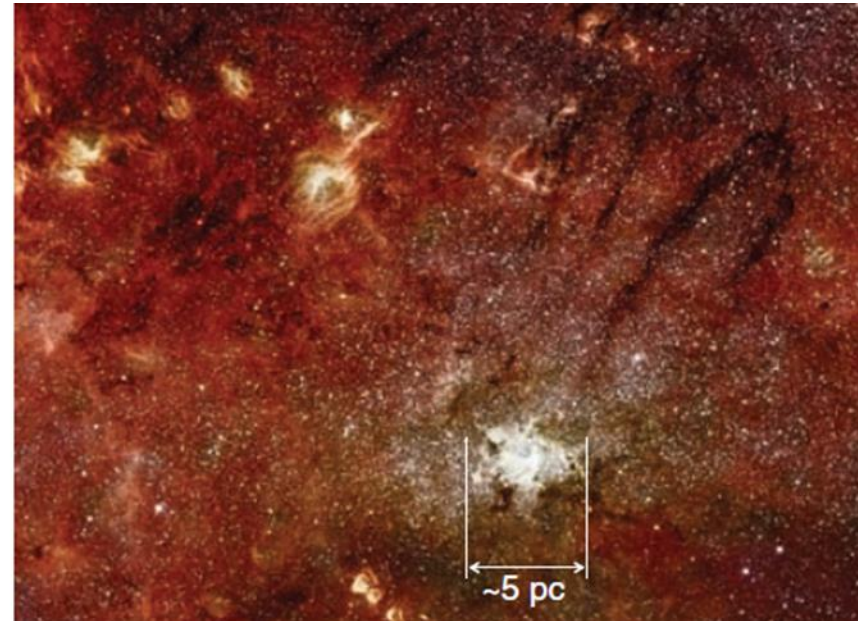
M31 光学图像

4、银河系中心的超大质量黑洞

强射电源 Sgr A* 标志银心的位置

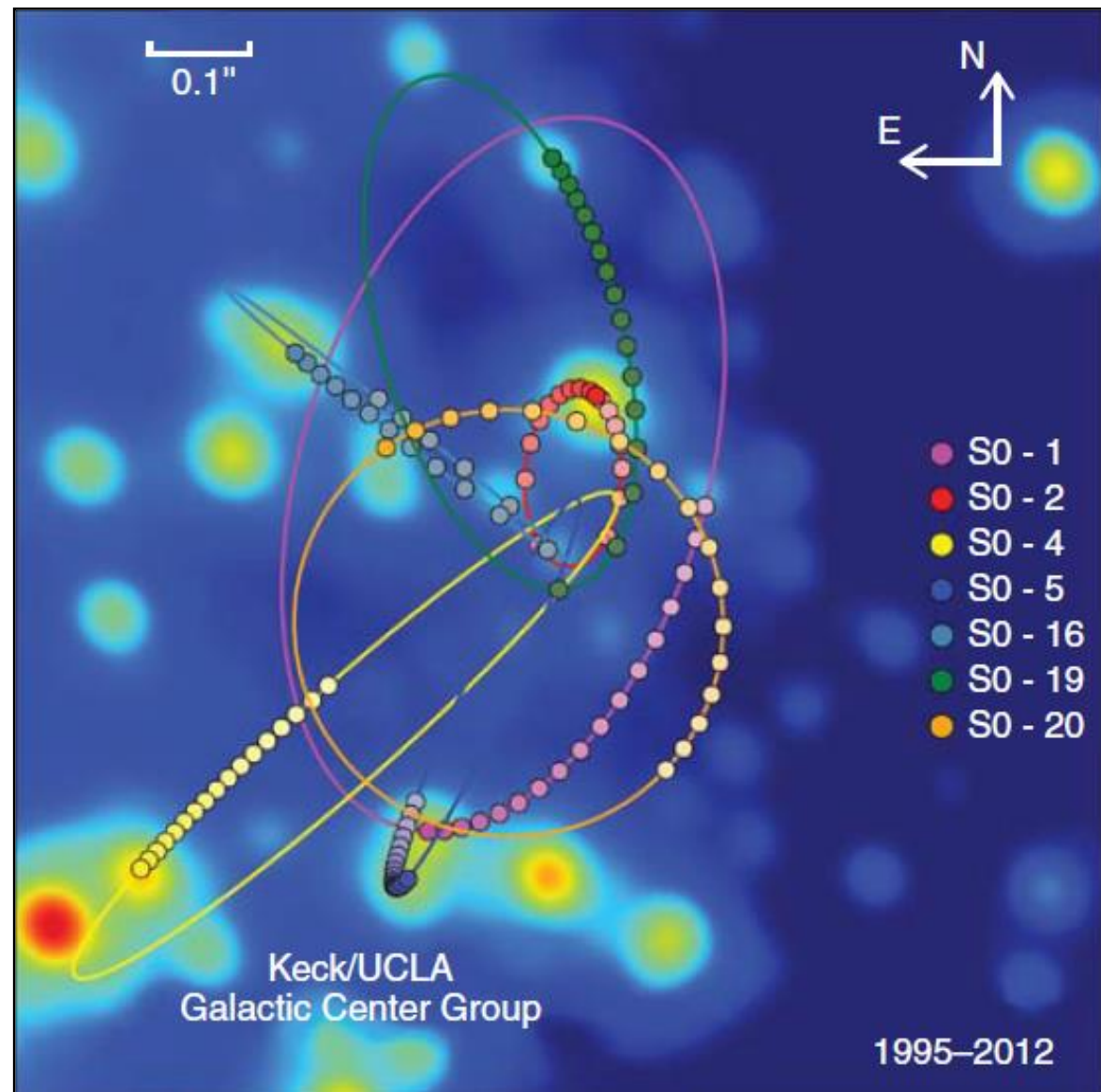
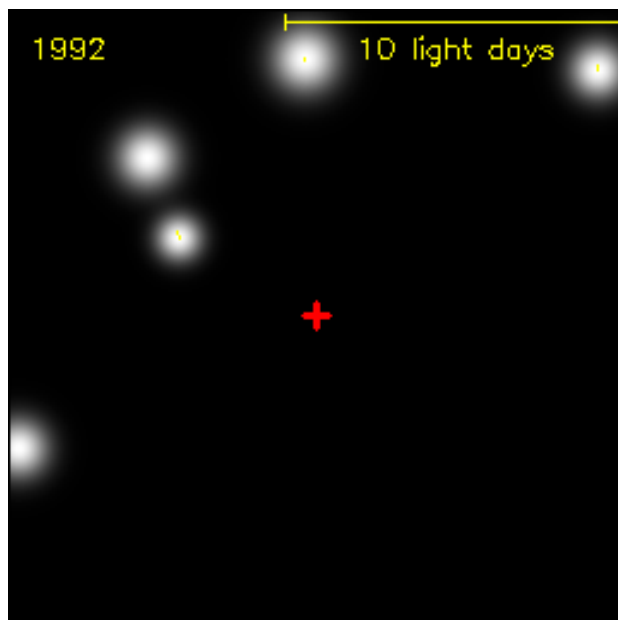


Chandra X射线观测
表明银心的活动性



Spitzer 红外观测给出
银心的恒星的密集

距银心 6000AU/0.1光
年内的恒星轨道符合
开普勒定律 → 其轨道
(球体) 内的质量



银河系中心的黑洞质量

距银心~0.01光年的恒星

S0-2 (S-2) :

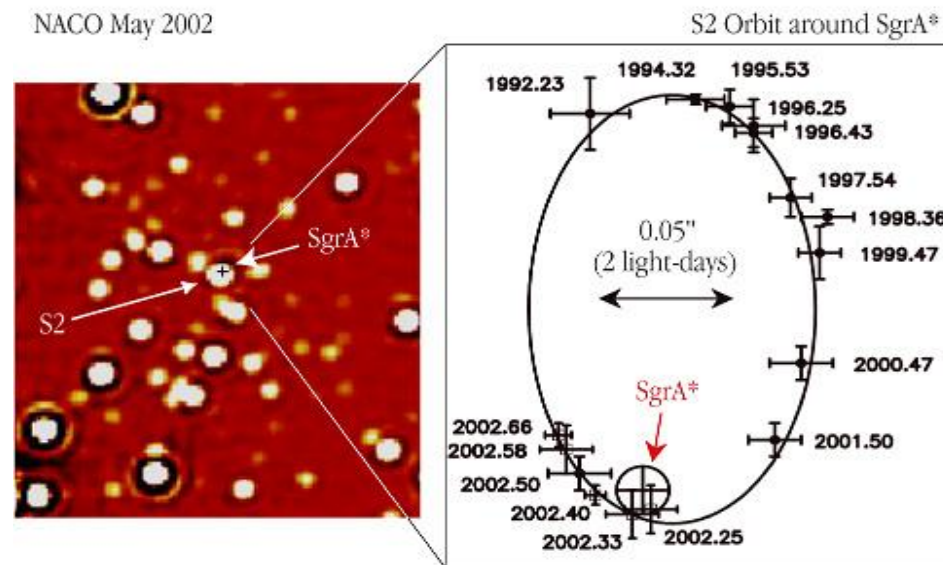
轨道周期15.8年

轨道半长轴1,000 AU

$$\frac{m_{\text{BH}}}{M_{\odot}} = \frac{A_{\text{AU}}^3}{P_{\text{years}}^2} = \frac{1,000^3}{15.8^2} = 4.0 \times 10^6$$

$$m_{\text{BH}} = 4.0 \times 10^6 M_{\odot}$$

$$\frac{m_{\text{BH}}}{M_{\odot}} \boxed{} = \frac{A_{\text{AU}}^3}{P_{\text{years}}^2}$$



The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

ESO PR Photo 23c/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory



THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2020



Roger Penrose

"for the discovery that
black hole formation
is a robust prediction
of the general theory
of relativity"

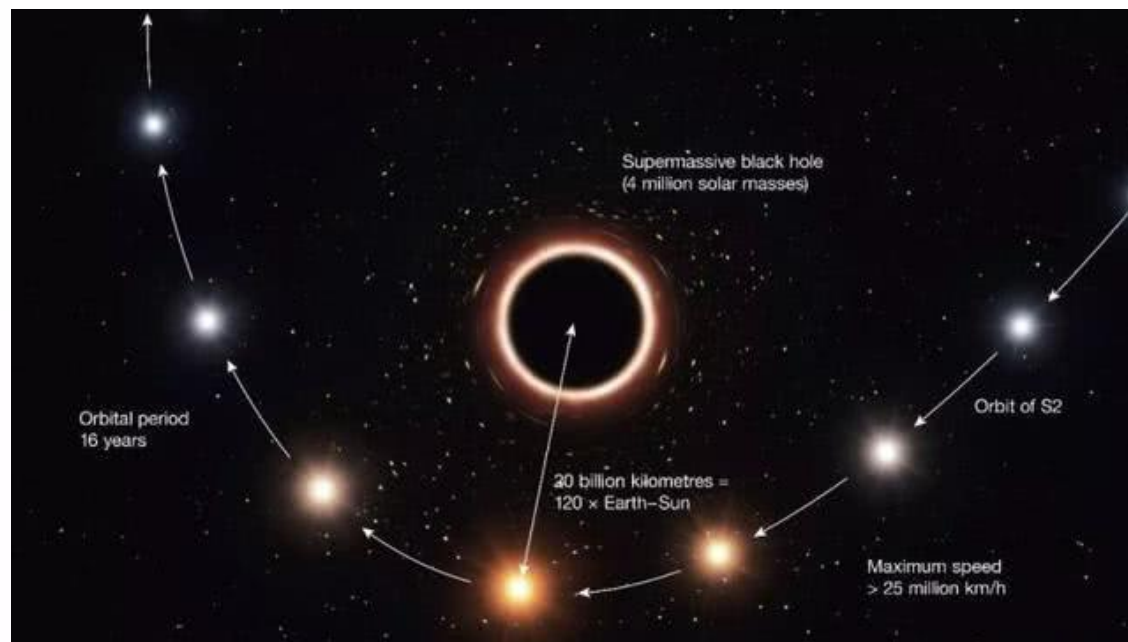
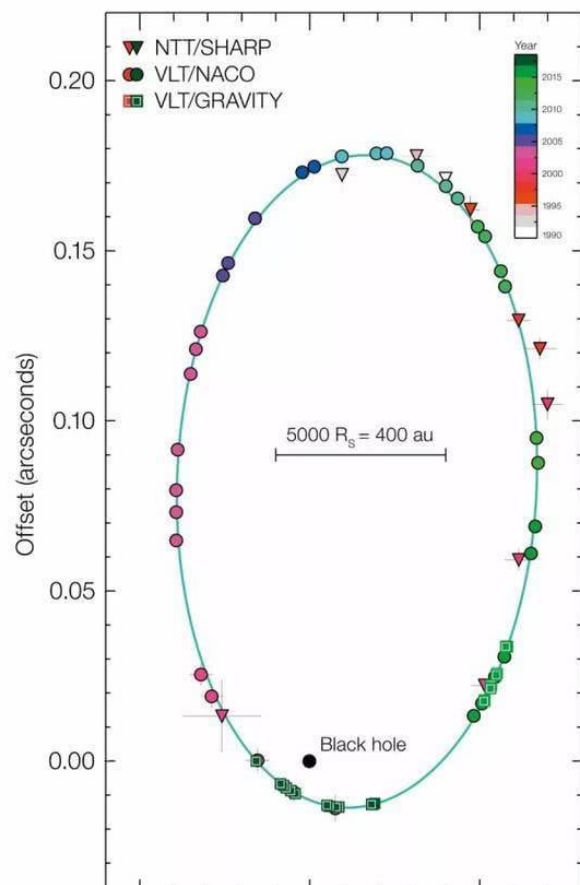
**Reinhard
Genzel**

"for the discovery of a
supermassive compact object
at the centre of our galaxy"

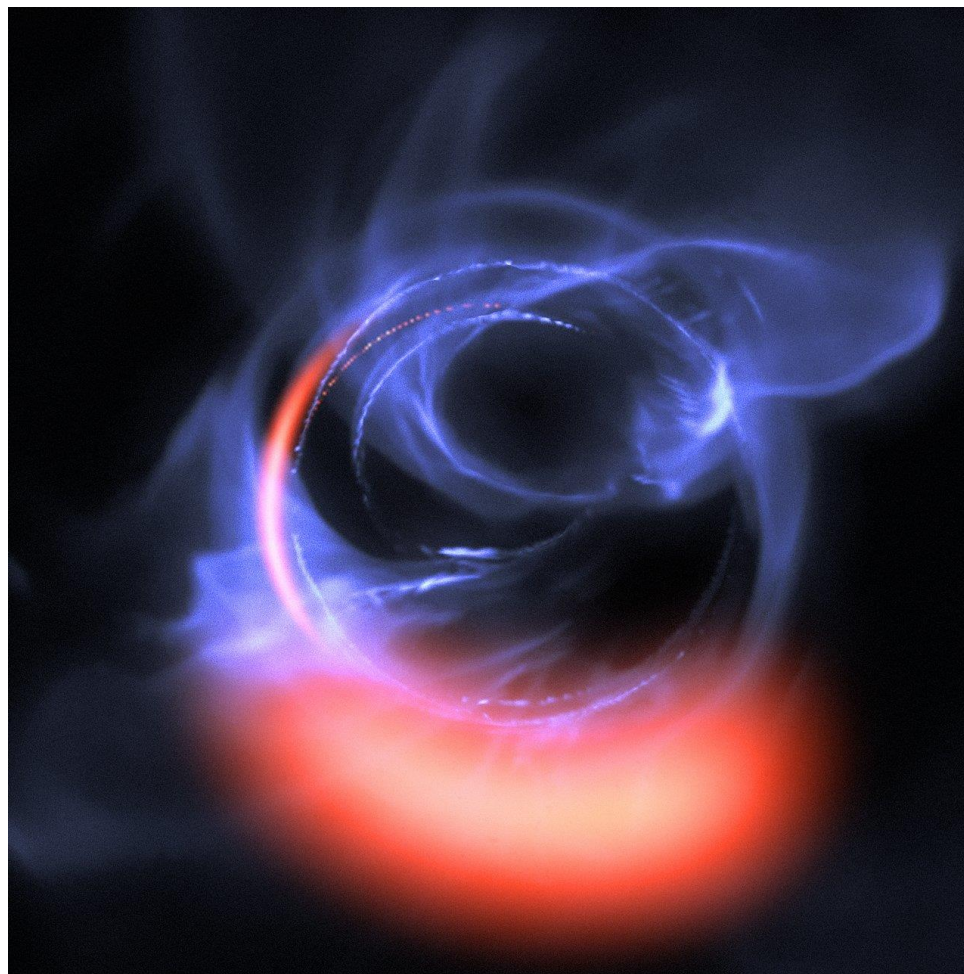
**Andrea
Ghez**

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

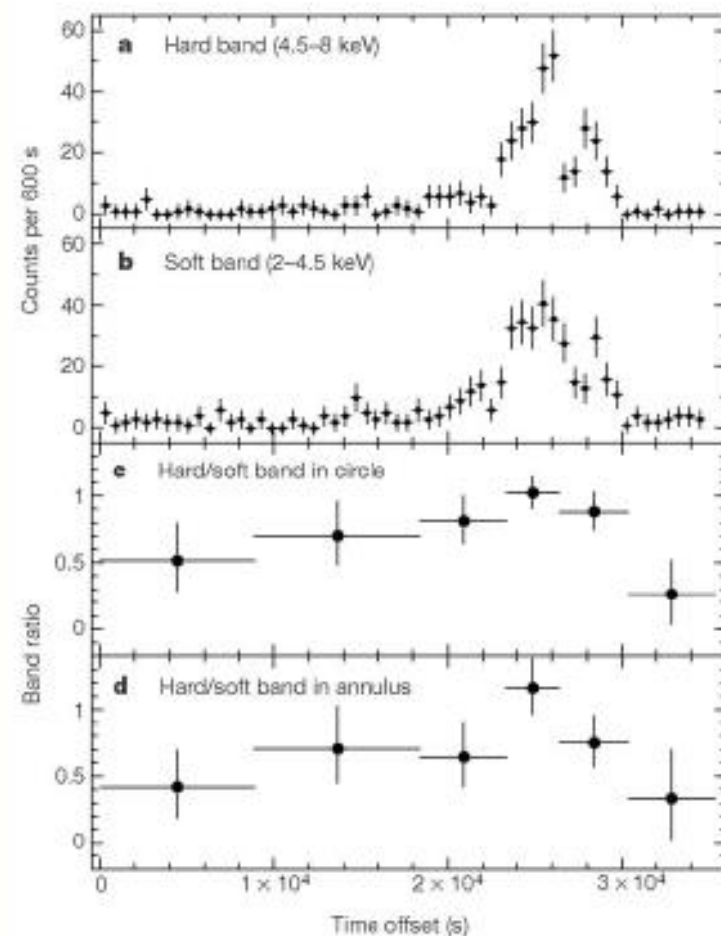
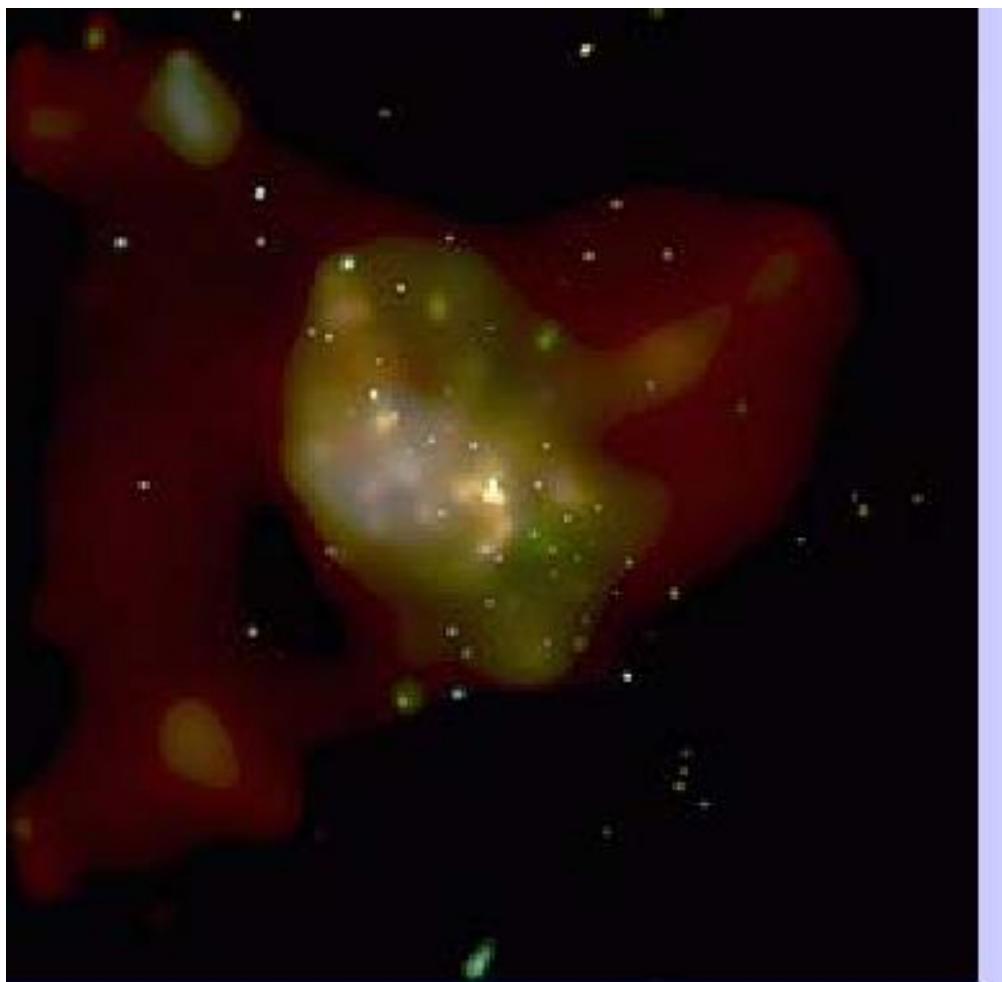
银河系中央黑洞对S0-2恒星的引力红移



*银河系中央黑洞视界附近：3次吸积盘红外辐射爆发



Chandra X-射线卫星观测到银心X射线源爆发 (活动星系核特性)



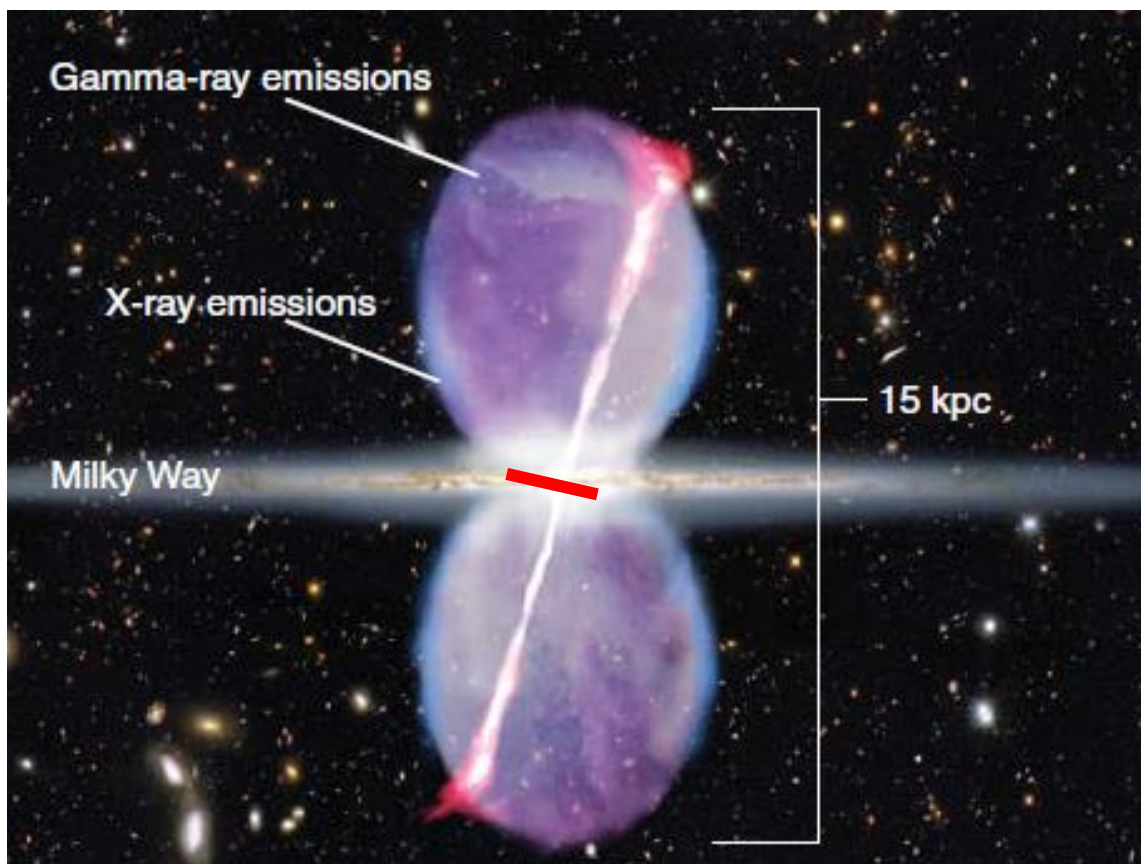
潮汐瓦解事件TDE (Tidal Disruption Event)

超大质量黑洞的
潮汐力瓦解靠近
它的小行星而吸
积其部分物质



Fermi 伽马射线卫星发现银河系伽马射线泡：

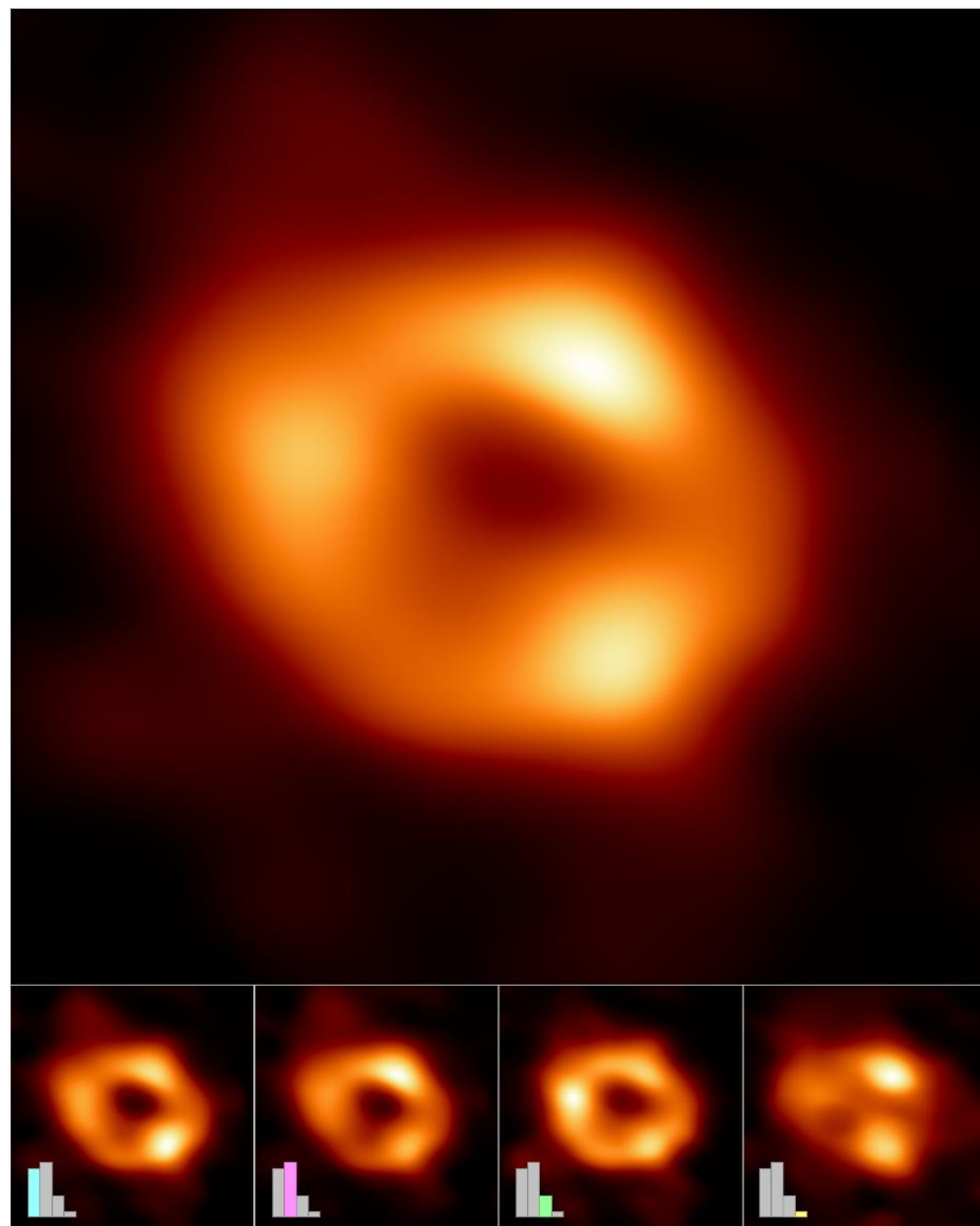
- 形成大质量恒星星团 [星爆]
- 黑洞吸积物质释放巨大能量

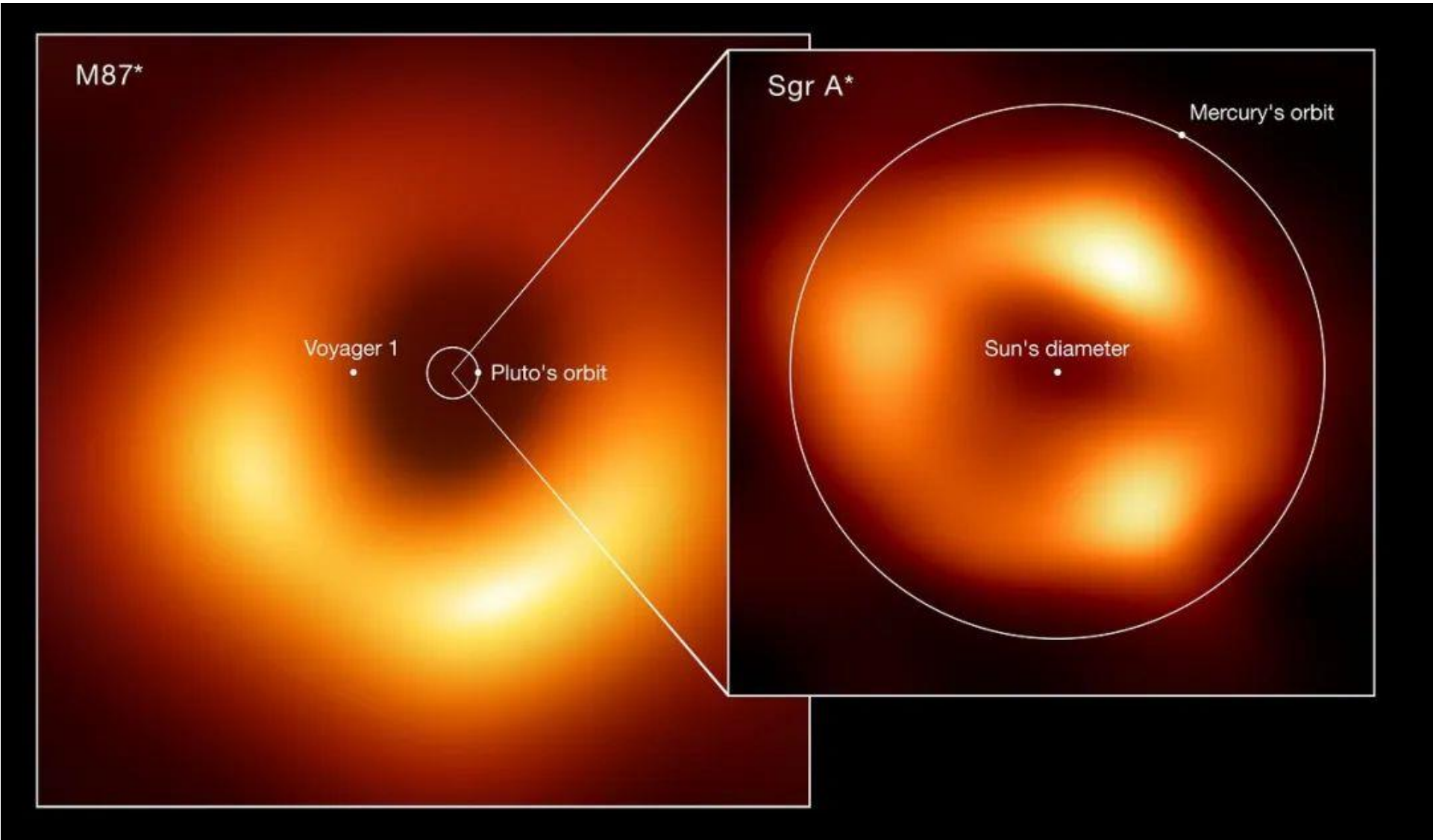


伽马射线喷流：
物质向银心黑洞
运动并形成吸积
盘的证据

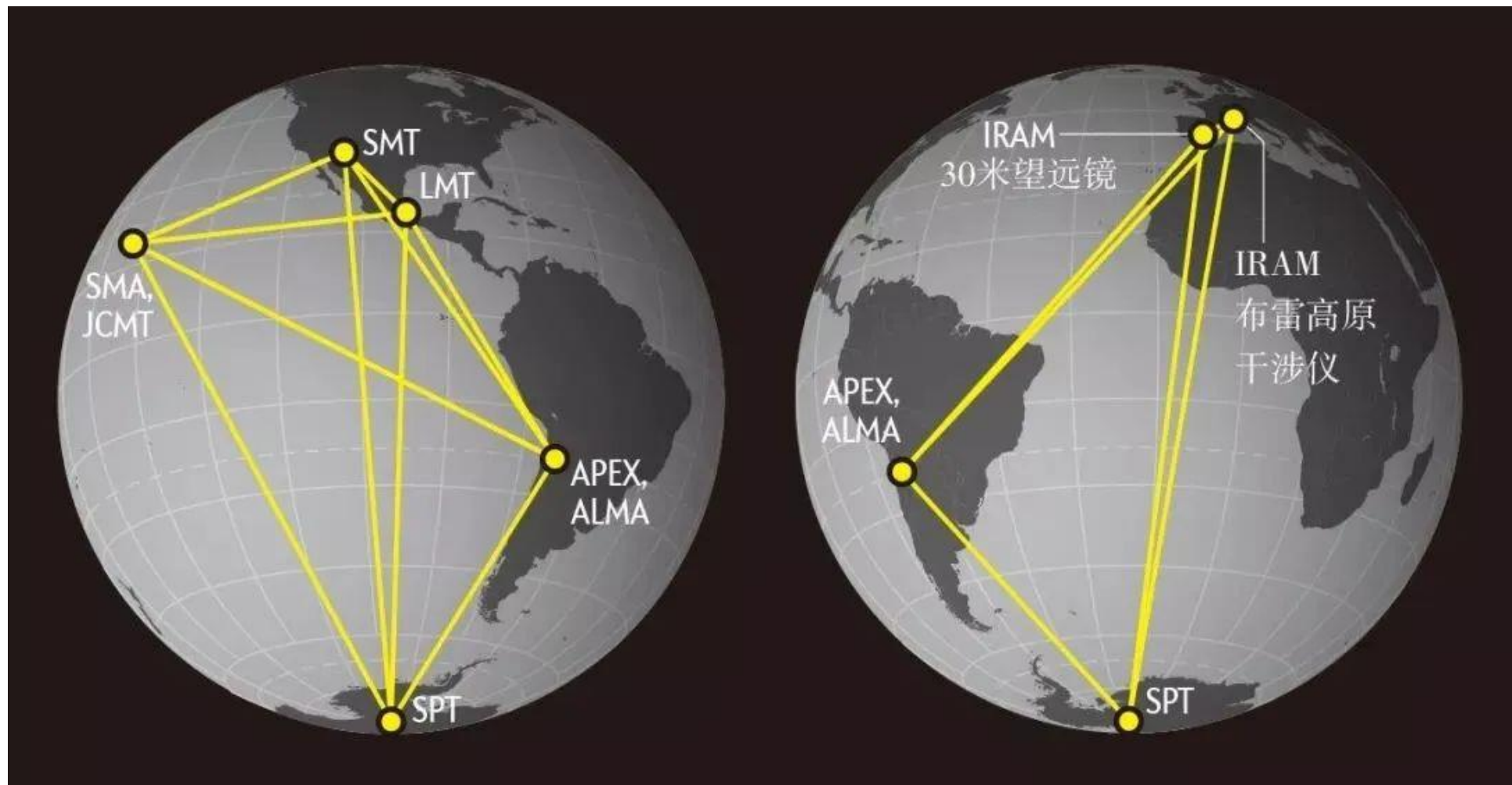


EHT 2022年5月12
日公布：银心黑洞
人马座A*的首张照片，符合广义相对
论的结果





事件视界望远镜EHT：拍摄黑洞照片



有效角分辨率将达到数百万分之一角秒—足以看清月球上一张DVD

5、银河系的历史和未来

银河系（星系）：

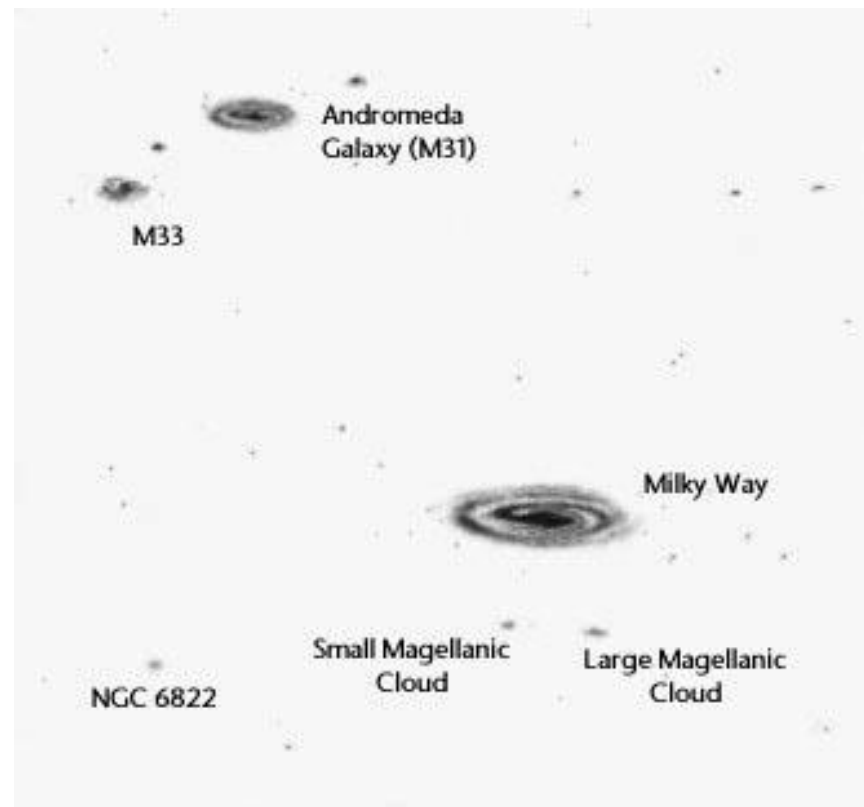
- 如何形成？
- 怎样的未来？



5.1、本星系群

星系群是由数十个星系组成的引力束缚的星系群体，其中的大部分星系是**矮星系**

银河系所在的星系群称为**本星系群**，大小约3Mpc，~50个星系



矮星系分别是银河系和仙女星系的**卫星星系**

大、小麦哲伦云 (LMC/SMC)

LMC: 距离 50kpc, 质量
 $2 \times 10^{10} M_{\odot}$, 直径 10kpc

SMC: 距离 60kpc, 质量
 $4 \times 10^9 M_{\odot}$, 直径 6kpc

大量的年轻恒星和中性 H 气体



仙女座大星系 M31

本星系群内质量最大的星系

距离 ~ 770 kpc, 直径 ~ 60 kpc

SBb型棒旋星系

中心黑洞质量 ~ 1 亿倍太阳质量



三角座星系 M33

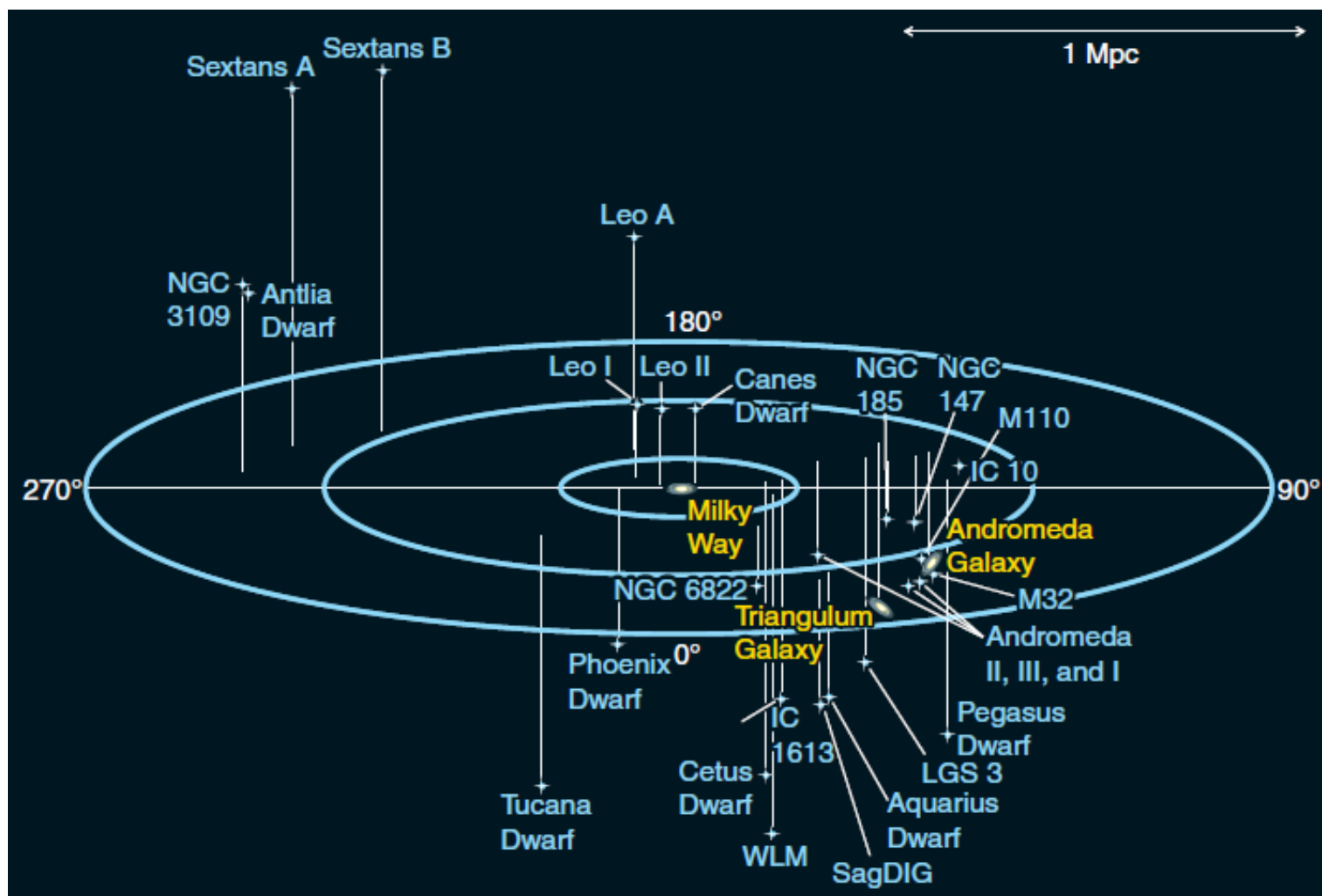
本星系群内第三大星系

距离 ~ 720 kpc, 直径 ~ 18 kpc

Sc型旋涡星系



越来越多的[超弱]矮星系被发现，它们含更大比例的暗物质和重元素丰度极低的恒星



5. 2、银河系的形成

1. 银河系被许多近邻矮星系环绕 → 在一个巨大暗物质团块中的气体坍缩成许多小的原星系的同时，形成了银河系

一部分原星系并合成巨型棒旋星系，其它原星系留存至今，成为银河系（和仙女星系）的卫星矮星系

2. 比较不同距离（不同年龄）星系的大小、形态、超大质量黑洞质量等 → 星系的并合历史

→ 银河系由许多小的原星系并合而成

银河系年轻时的样子



3. 远离银盘和核球的球状星团及晕族恒星表明它们早在气体云团落入并形成银盘之前已形成

证据：其中最年轻的恒星比最年老的盘族恒星还要年老

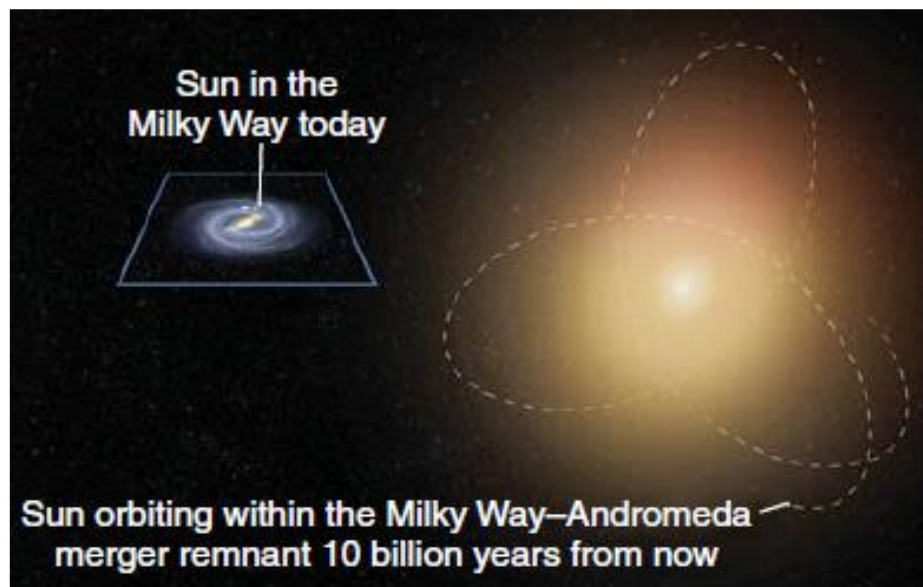
→ 通过并合而形成银河系的许多小物质团块已包含恒星和气体尘埃云

5.3、银河系的未来

- 本星系群的并合与碰撞仍在进行
- 人马座矮星系穿越银盘，形成**恒星潮尾**，将与银河系**次并合**（不破坏银盘及旋臂）
- 银河系还在持续增长



- 仙女星系正以110km/s的速率靠近银河系
- 40亿年后，银河系与仙女星系首次穿过。再过20亿年，并合为一个巨椭圆星系（主并合）

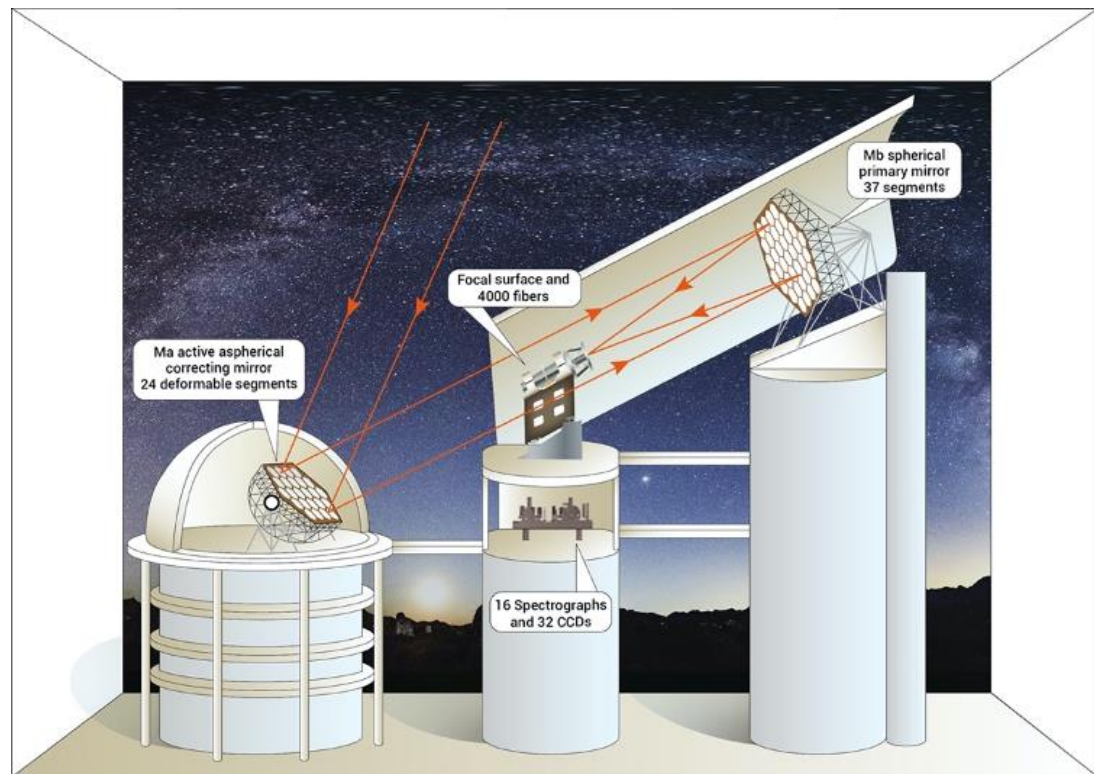


银河仙女星系

**4 billion years from now,
Andromeda & the Milky
Way will collide - this is
how it will look like.**



*郭守敬望远镜(LAMOST)对银河系的新认知

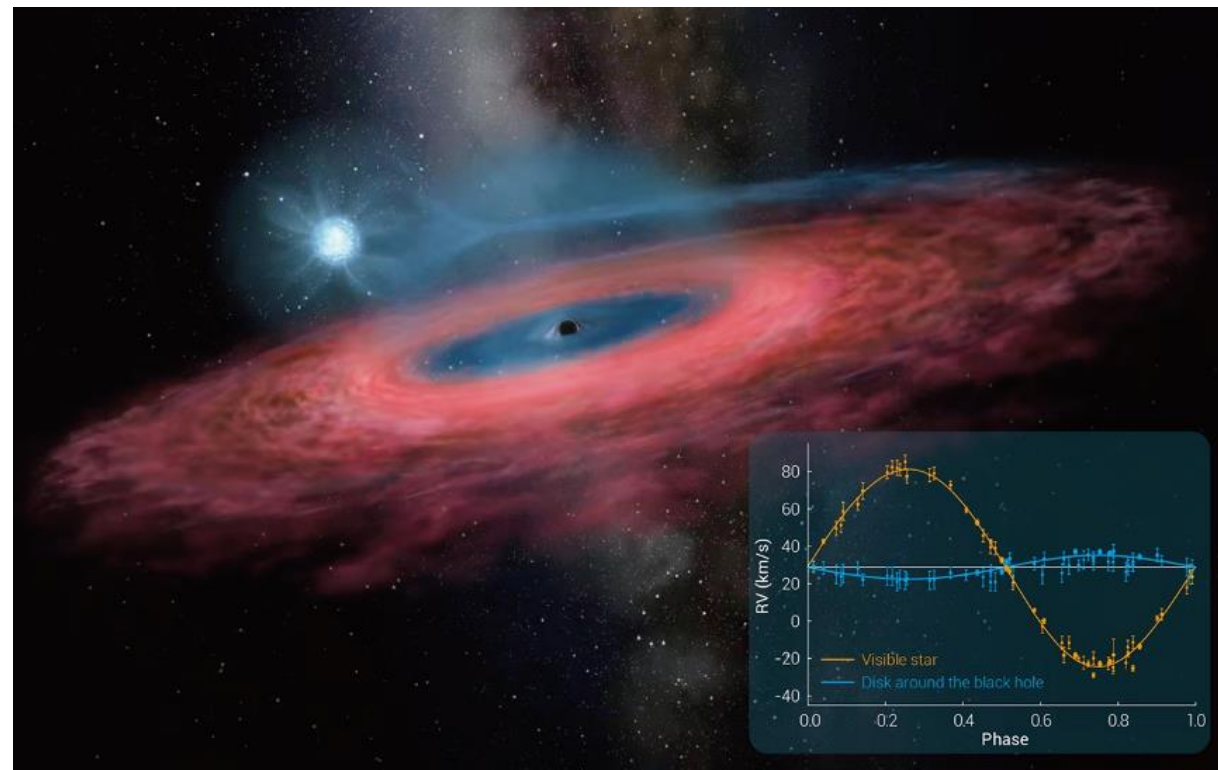


- 银河系直径：10万光年→ 20万光年
- 银河系（薄盘）“S型”翘曲；众多矮星系的星流

文章来源于TheInnovation创新，作者HL Yan & YH Zhao

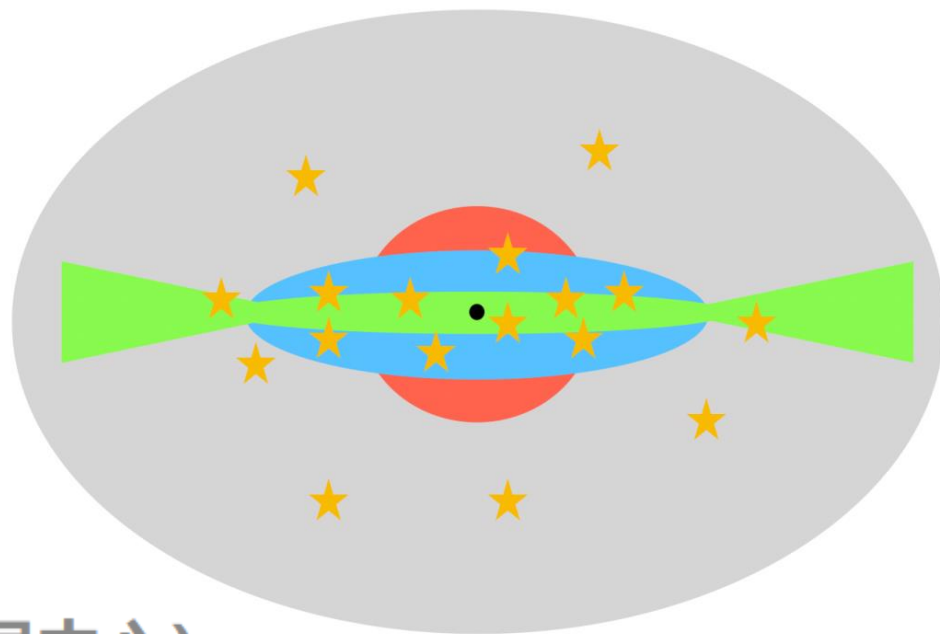
*

- 一颗绕着“虚空（黑洞）”旋转的恒星
- 锂丰度最高的恒星，其锂含量是太阳的3000多倍
- “宇宙活化石”贫金属星、超高速星、来自其他星系的“流浪”恒星





3月24日，《自然》以封面文章形式发布了一项研究成果：德国马普天文研究所的研究人员向茂盛博士和Hans-Walter Rix教授利用中国科学院国家天文台郭守敬望远镜（LAMOST）和欧空局天体测量卫星盖亚望远镜（Gaia）的巡天观测数据，获取了迄今最为精确的大样本恒星年龄信息，按照时间序列清晰还原了银河系幼年和青少年时期的形成演化图像，刷新了人们对银河系早期形成历史的认知。本期赛先生天文，让我们从时间的起点去看银河！



撰文 | 李双、王丹（LAMOST运行和发展中心）

*银河系恒星晕的真实形状？

原创 环球科学 环球科学 2022-11-22 12:12 发表于北京

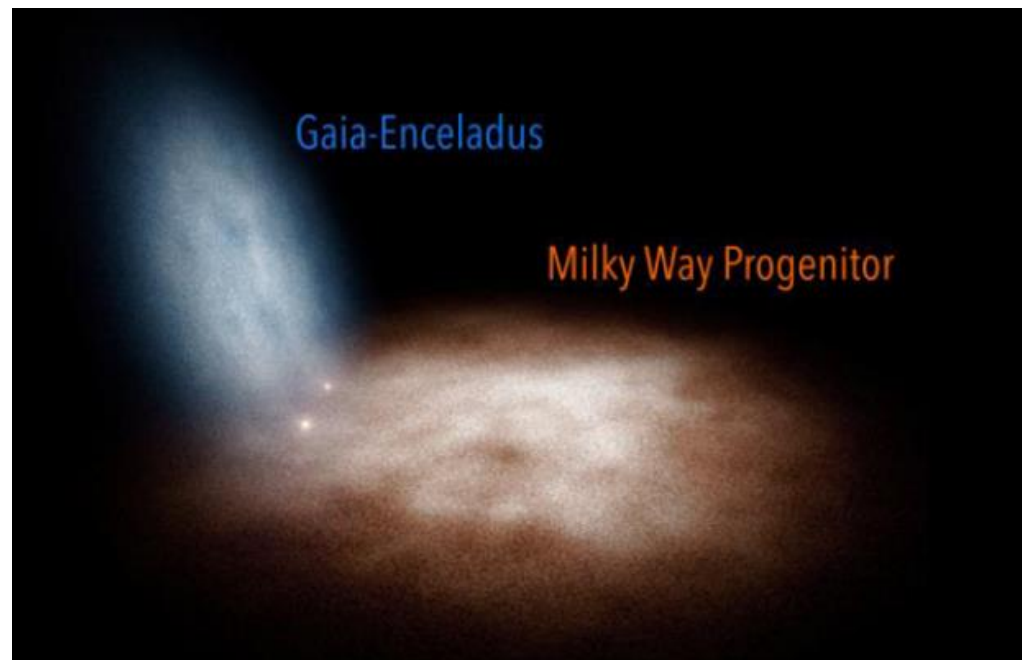
- 银河系的恒星晕是橄榄球形的，且处于倾斜状态。
- 恒星晕的结构由两堆恒星构成，形成于70 ~100亿年前矮星系“盖亚香肠结构”（GSE）与银河系的碰撞事件。

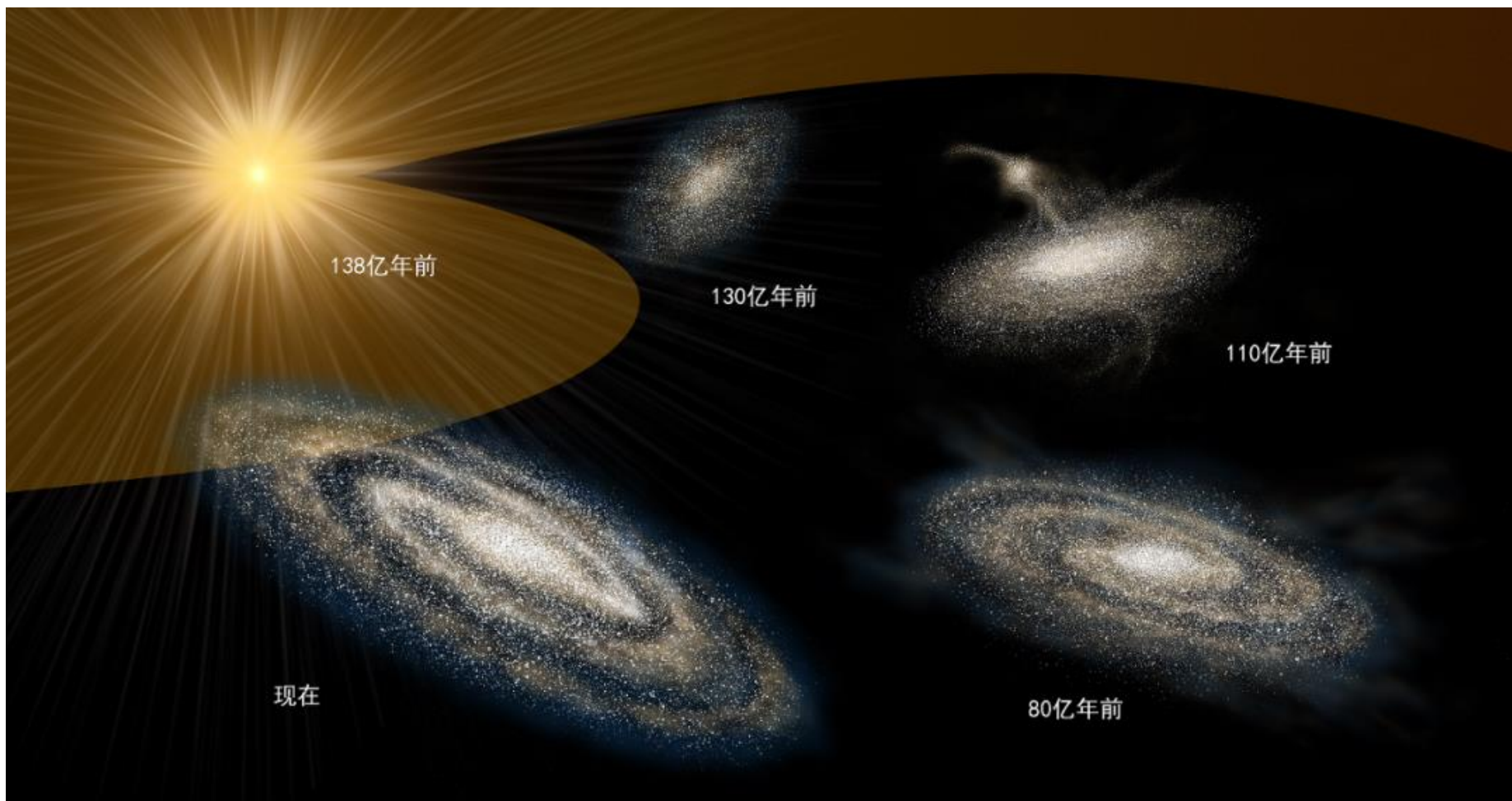


图片来源：Melissa Weiss/Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian

✱

- 银晕中的绝大部分恒星主要是靠吸积数量众多的矮星系而来，其中GSE碰撞银河系是最主要的吸积并合事件，贡献了大约2/3的银晕恒星
- 碰撞事件更准确的时间点大约是在110亿年前
- 厚盘的恒星形成活动也在110亿前年达到峰值
- 暗示了厚盘的恒星形成活动受到了GSE撞击事件的显著激发





银河系形成历史示意图：138亿年前宇宙大爆炸，130亿年前厚盘出现，110亿年前银晕形成、厚盘显著成长，80亿前厚盘形成停止、薄盘开始形成并持续至今。图片来源：喻京川

*1000万颗恒星正在高速逃离银河系？

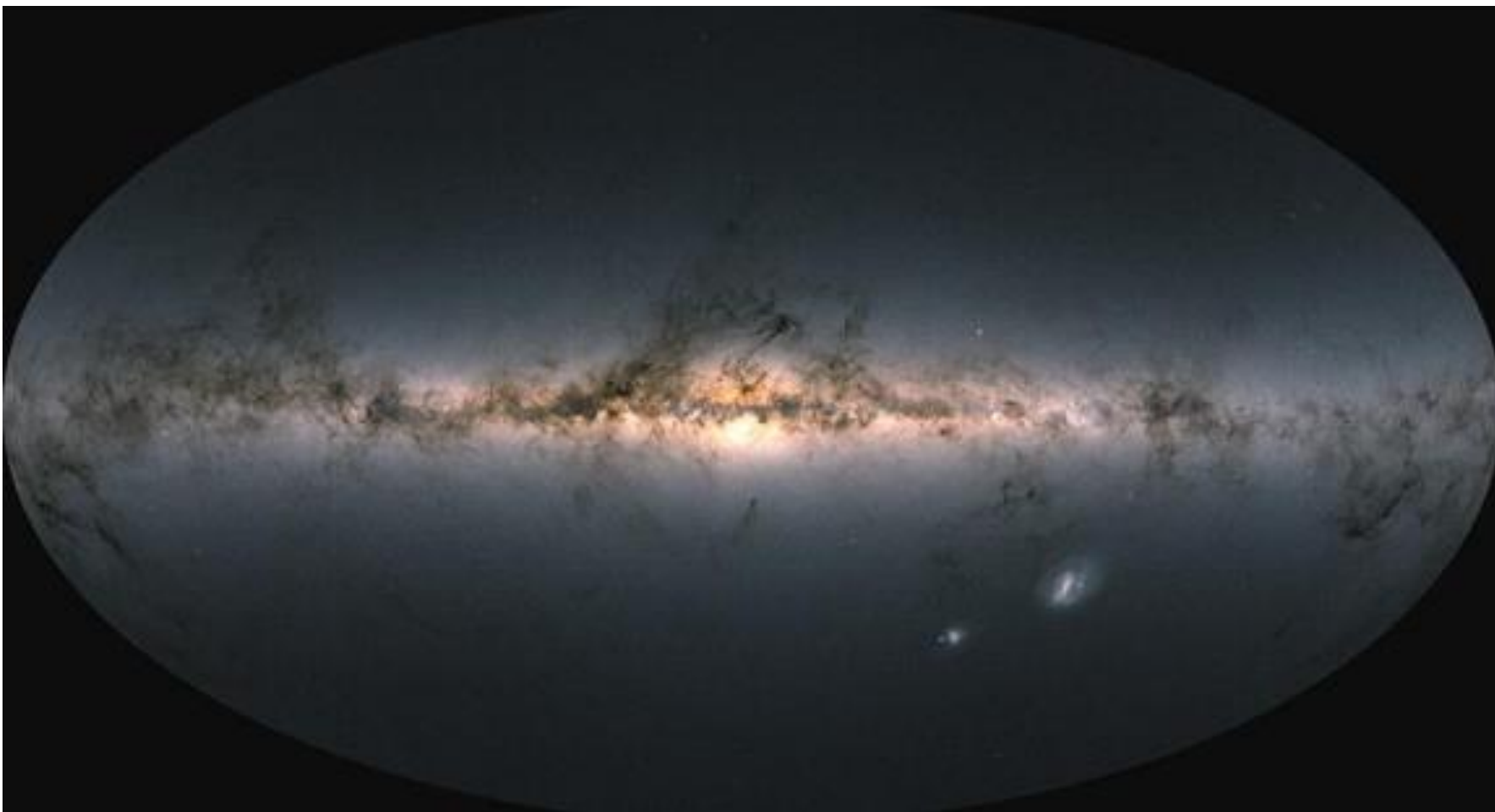


*JWST 在银河系中心，看见前所未见的特征



这张图像显示了银心的人马座C（Sgr C）的部分区域，图中估计包含了许许多多闪烁的恒星，以及一些尚未确定的特征。一大片青色显示的是电离氢区，它包含没有统一方向的针状结构。（图/NASA, ESA, CSA, STScI, Samuel Crowe/UVA）

请欣赏



银河全景图，图片来源：ESA-Gaia-DPAC