



第七章：恒星的演化  
—恒星的一生和死亡

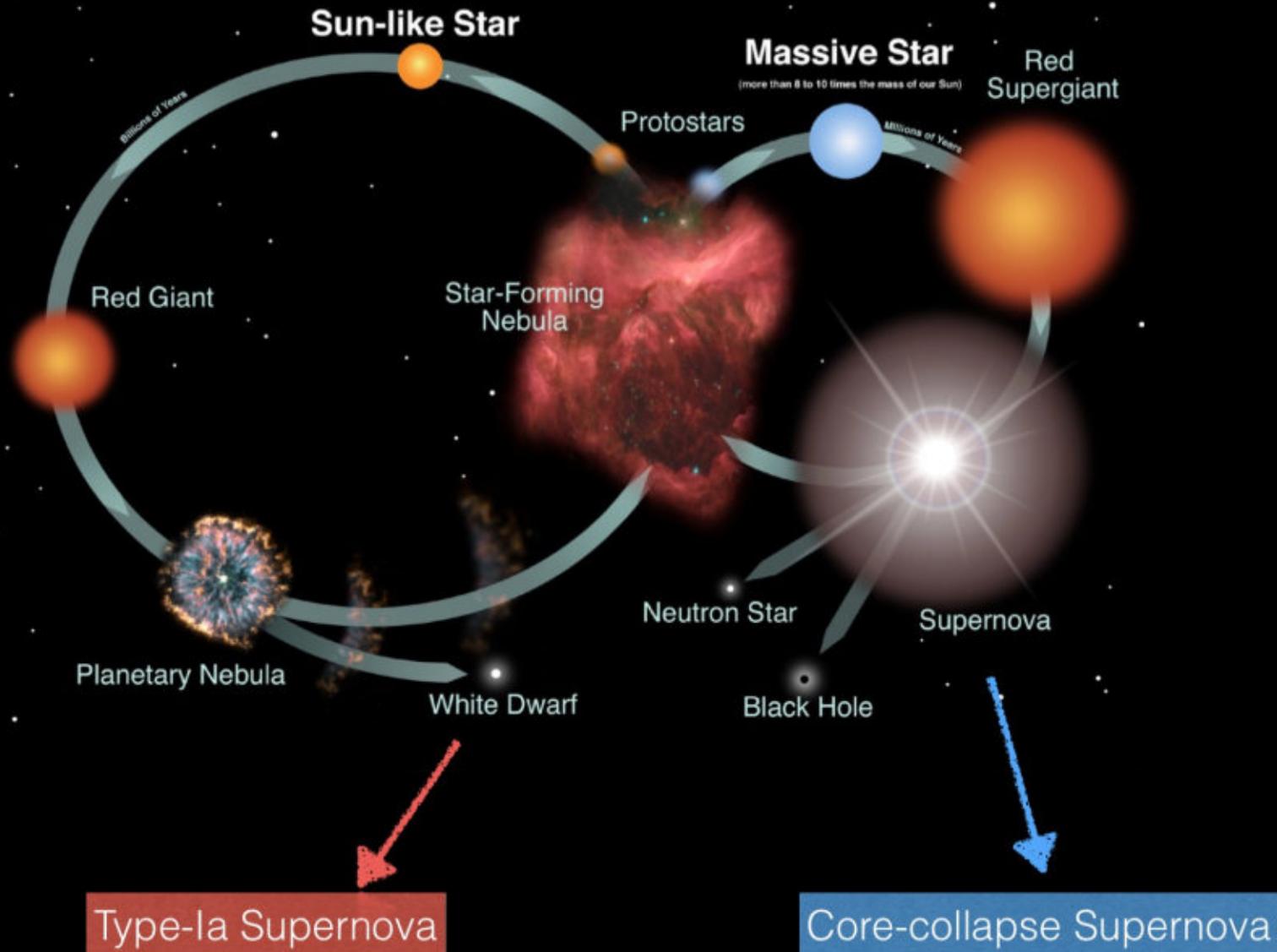
# 本章内容

- ❖ 小质量恒星如何演化？
- ❖ 中等质量恒星如何演化？  
(涉及变星、行星状星云、白矮星)
- ❖ 大质量恒星如何演化？  
(涉及超新星、中子星、黑洞，扩展至活动星系核、伽玛暴、快速射电暴)



利用时域光学观测  
搜寻致密天体（厦  
门大学 顾为民）

# Life cycle of a star



# 小质量恒星：0.08-0.5太阳质量

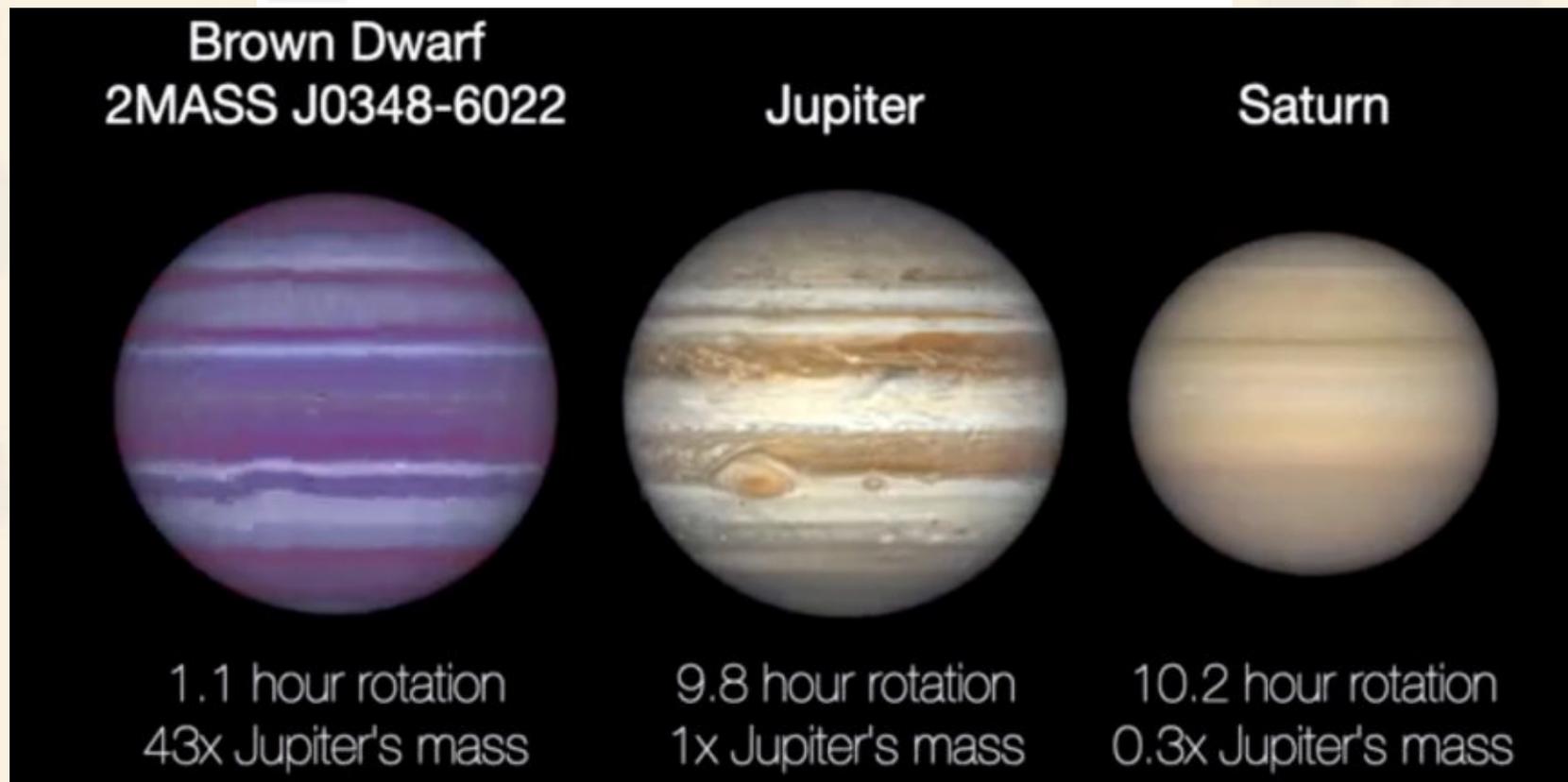
- 氢聚变点火温度： $\sim 10^7\text{K}$ ，要求  $M > \sim 0.08M_{\text{sun}}$
- 大部分的 ( $>10\%$ ) 氢通过对流燃烧, 年龄大于宇宙年龄，聚变结束到底发生什么不能通过观测，只能通过数值计算预计
- 质量太小，不能发生氦聚变 ( $>10^8\text{K}$ )
- 数值模拟：对于  $M \sim 0.1M_{\text{sun}}$ ，氢聚变成氦约持续  $6 \times 10^{12}$  年，经过几个  $10^{11}$  年，塌缩成白矮星，再经过几个  $10^{12}$  年，冷却成黑矮星

# 褐矮星中的小旋风，差点转到自我解体

原创 imufu 牧夫天文 今天

2021.04.18

(褐矮星:  $<0.08M_{\text{sun}}$ )

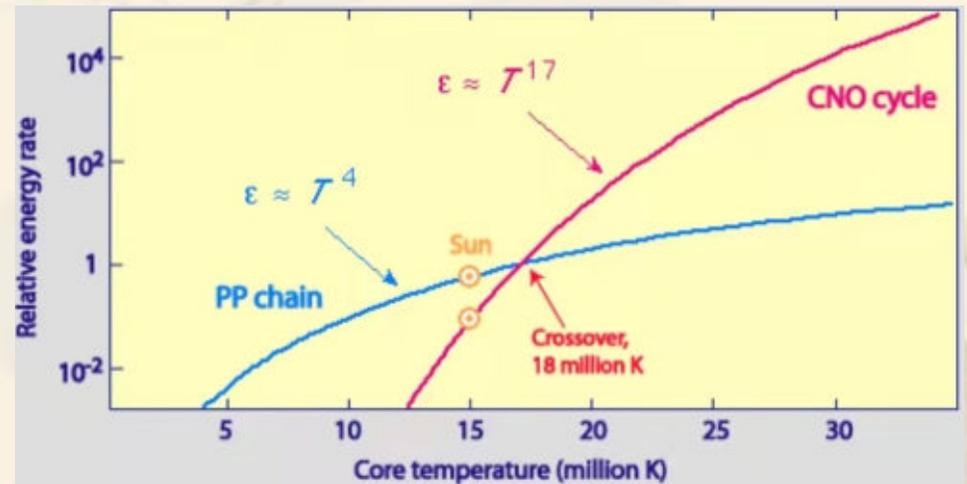


NASA JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC)

韦仕敦大学的天文学家发现了已知旋转速度最快的褐矮星。他们发现了三颗超速褐矮星，每颗褐矮星大约每小时旋转一周。这个速度几乎已经到达极限，以至于如果这些“失败的恒星”的旋转速度再快一点，它们可能会将自己撕裂。NASA的斯皮策空间望远镜发现了这些褐矮星，随后包括北双子座望远镜在内的地面望远镜对它们进行了研究，证实了它们惊人的快速旋转。

# 中等质量恒星：0.5-8.0太阳质量

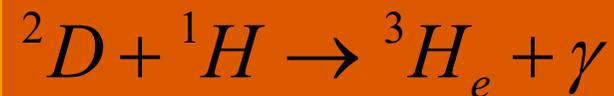
- 氢聚变，共同结局：白矮星
- $M < 2M_{\text{sun}}$ : 产能的主要方式，pp链+CNO循环（1-2%）
- $M > 2M_{\text{sun}}$ : CNO循环占主导，CNO循环使得氢聚变更有效！恒星光度更大，变蓝（根据赫罗图）
- CNO循环的提出：
  - 1938: Carl von Weizsacker
  - 1939: Hans Bethe



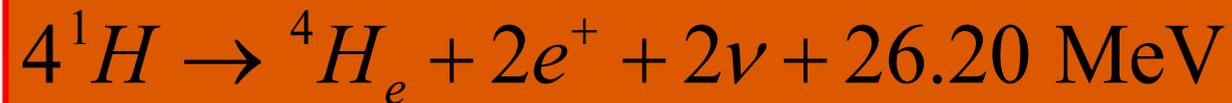
# PPI链

$$M \leq 2M_{\odot}$$

$$8 \times 10^6 \text{K} \leq T_c \leq 2 \times 10^7 \text{K}$$



总结果是

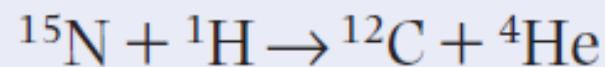
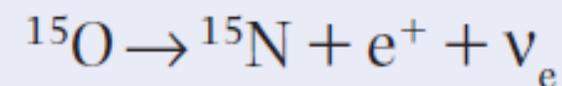
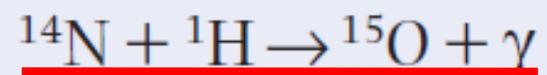
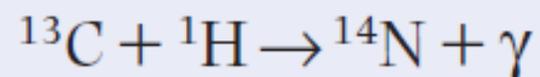
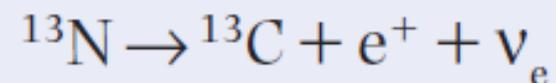
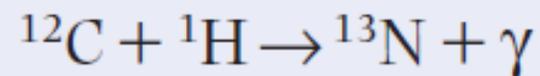
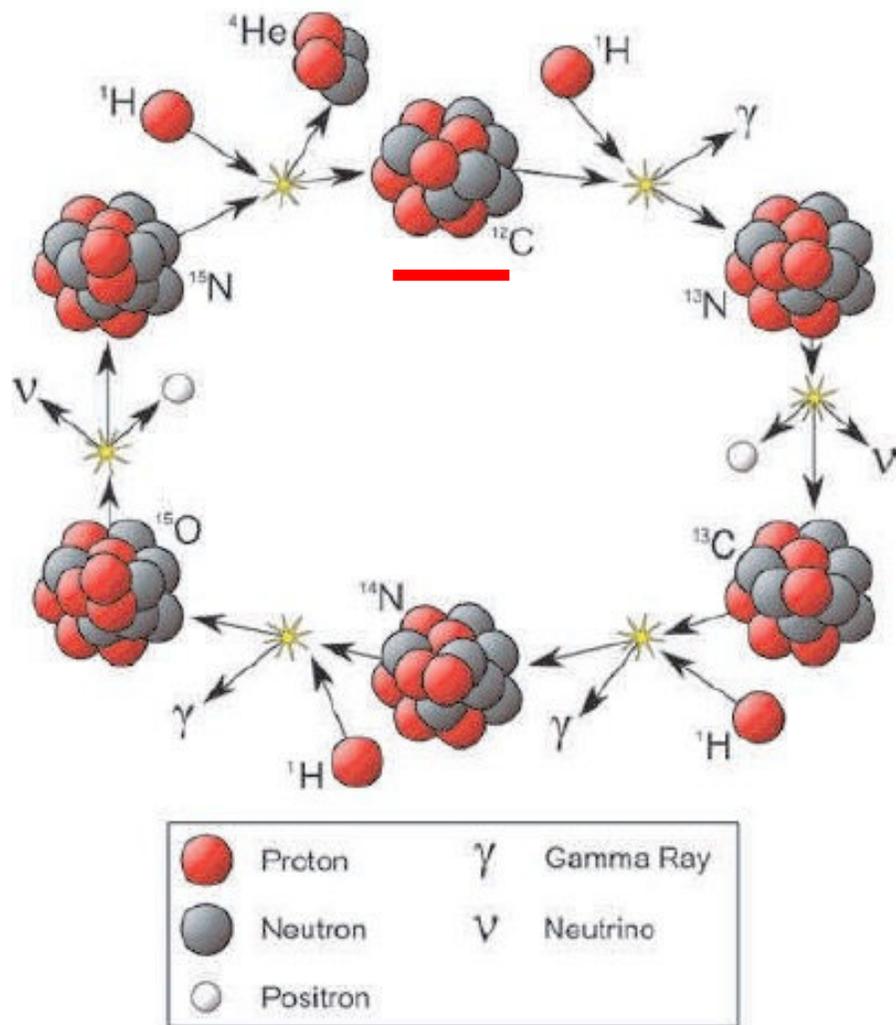


$$\Delta E = 4 \times 1.007825 - 4.002603 = 0.02870 \text{ Amu} = 26.73 \text{ MeV}$$

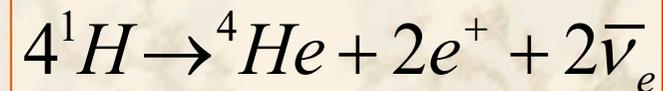
$$\gamma \Rightarrow 26.20 \text{ MeV} \quad \nu \Rightarrow 0.53 \text{ MeV}$$

# CNO 循环

$(M \geq 2 M_{\odot} \quad T_c \geq 2 \times 10^7 \text{ K})$



总结果是

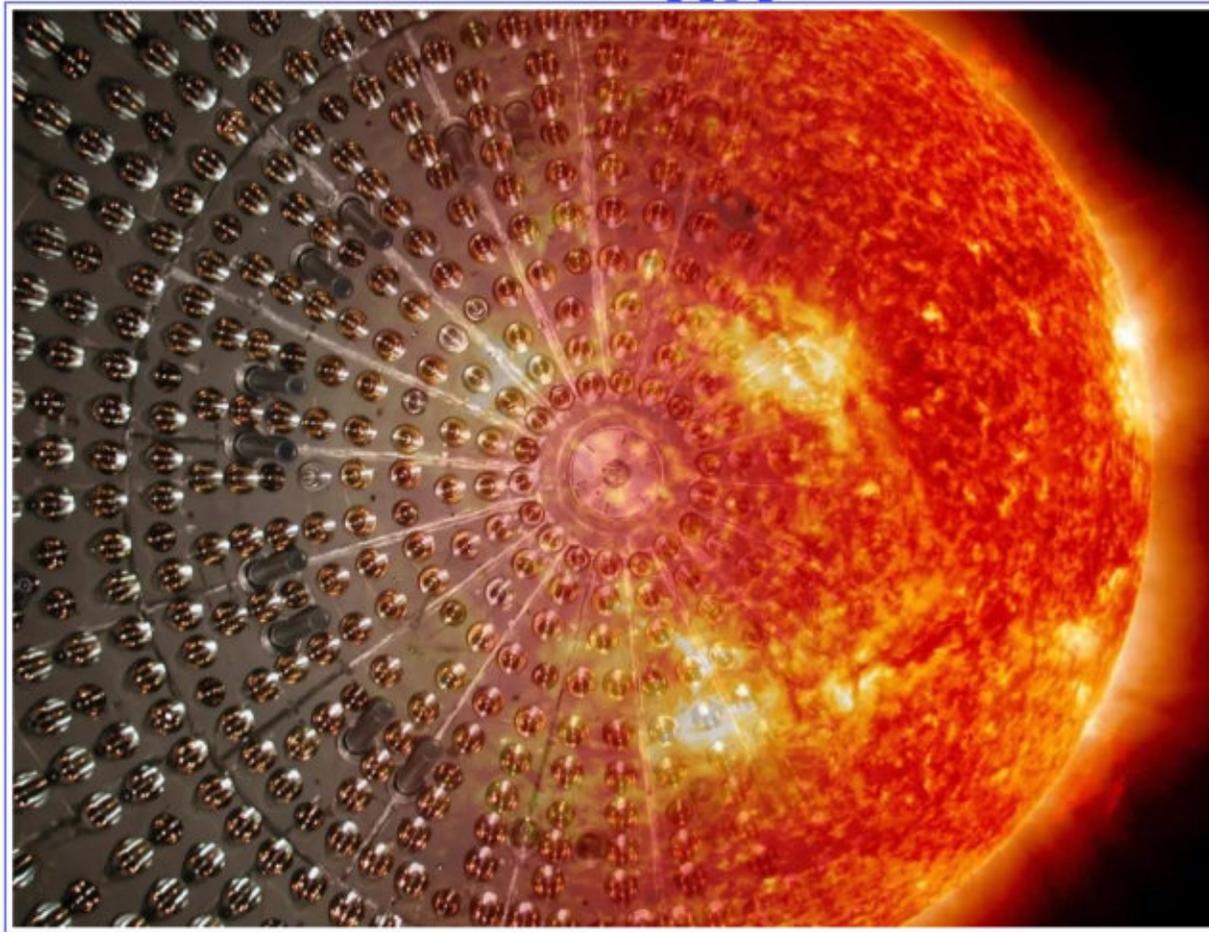


反应平衡时，N丰度高

Figure 7.1 The carbon–nitrogen–oxygen cycle. Image: Wikipedia Commons.

## 太阳内部CNO循环被直接验证 2020/11

11月，英国《自然》杂志发表的文章，科研人员利用位于意大利的格兰萨索国家地下实验室（LNGS）中的太阳中微子探测器（Borexino），首次直接测定了CNO循环中所产生的中微子流量。此次探测实验的主要难点在于如何确定过剩信号：每100吨目标每天只有几个高于背景的计数，这归因于CNO中微子的相互作用。



Borexino探测器内部（左）与太阳的拼接图。利用位于意大利地下实验室的Borexino探测器，科学家首次直接探测到太阳内部碳-氮-氧（CNO）循环产生的中微子流量。来源 / Borexino Collaboration/Maxim Gromov

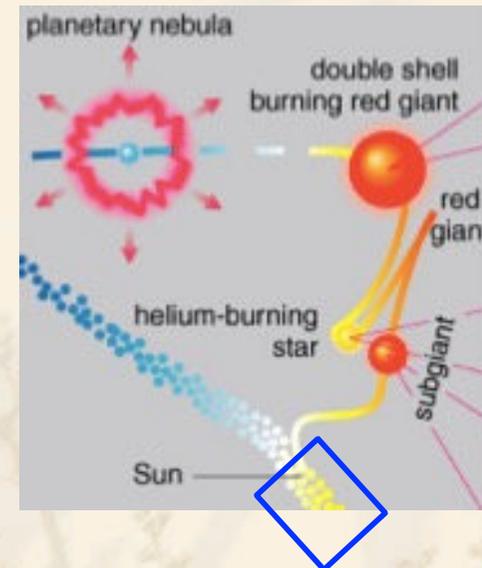
- 在主序带上的上移

- 氢聚变（pp或CNO），平均分子量增加，为了维持压强，温度升高

- 核反应率正比于温度的四次方，尽管氢含量有所下降，但光度仍然增加

- 恒星的表面温度增加

- 恒星在主序带上向左上移

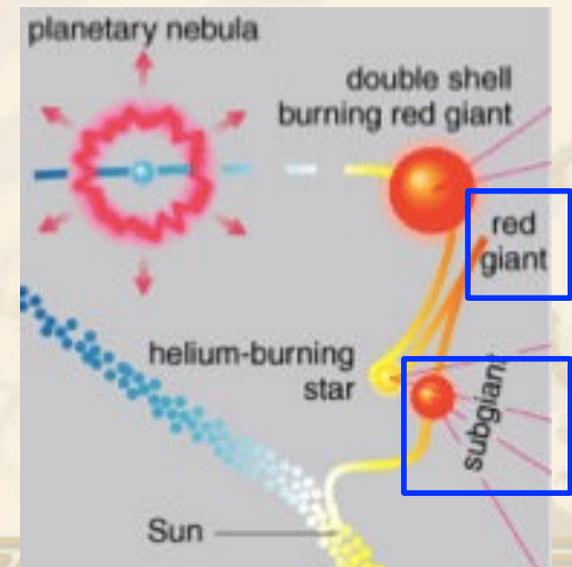


- 太阳刚诞生时，光度比现在少~30%，~ $10^9$ 年之后，光度再增加~10%，地球的温度升高，不再适合人类的生存

- 中心氢烧完，形成氦中心核与氢丰富外层，此时中心温度没有高到氦聚变（“冷核”），外层氢继续燃烧，维持恒星大部分辐射

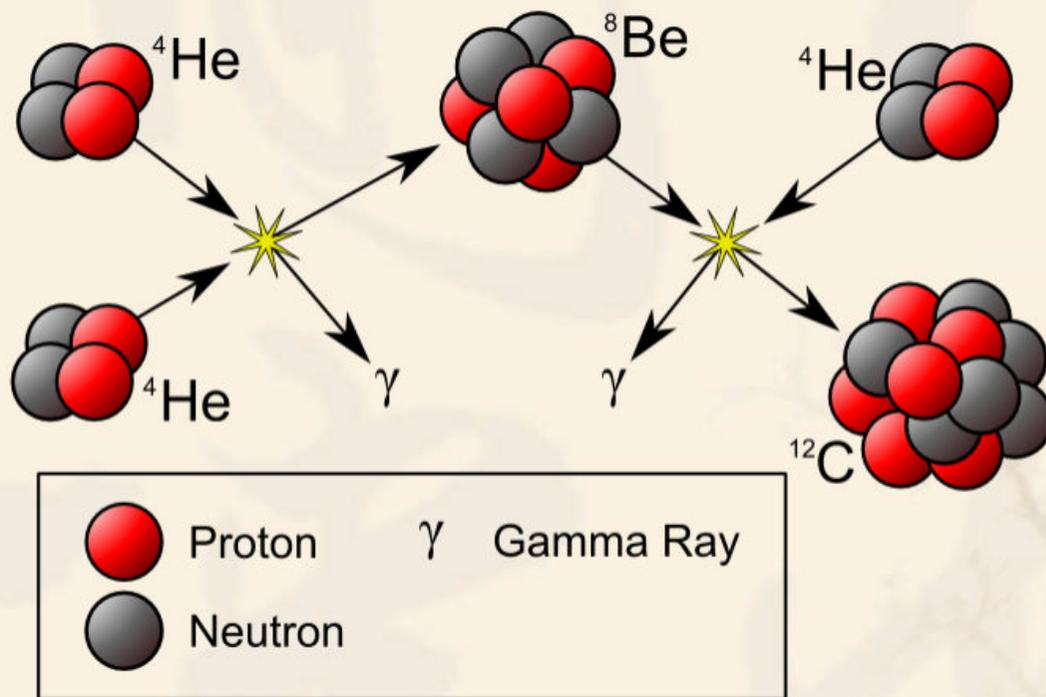
- 氦核质量增大一定程度后，由于内部压力不足开始引力收缩，势能转化为热辐射能，注入到氢外层，膨胀、半径增大；同时，外层气体膨胀导致表面温度下降，恒星脱离主序，在赫罗图向右上移动，成亚巨星

- 外层气体阻挡光子逃逸，表面温度下降到一定程度停止，但膨胀继续，表面积（光度）增大而温度几乎不变，在赫罗图中几乎垂直上升到红巨星

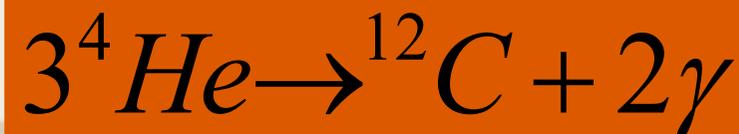


# 3alpha 过程

中心氦核质量不断增大，塌缩，温度升高，当 $T \sim 10^8 \text{K}$ 时，3alpha过程开始发生，氦核点燃



$^8\text{Be}$ 极端不稳定：半衰期仅为 $10^{-19}\text{s}$ ，衰变回两个氦核



最早由E. Opik, E. Salpeter在1951年提出

## 对地球智慧生命演化的意义

- 氢聚变所需要的温度： $\sim 1.5 \times 10^7 \text{K}$
- 3alpha过程所需要的温度： $\sim 10^8 \text{K}$
- 太阳在主序带上可以以相对稳定的光度待上较长的时间，使得地球上温度稳定长达数十亿年，有利于地球上智慧生命的演化

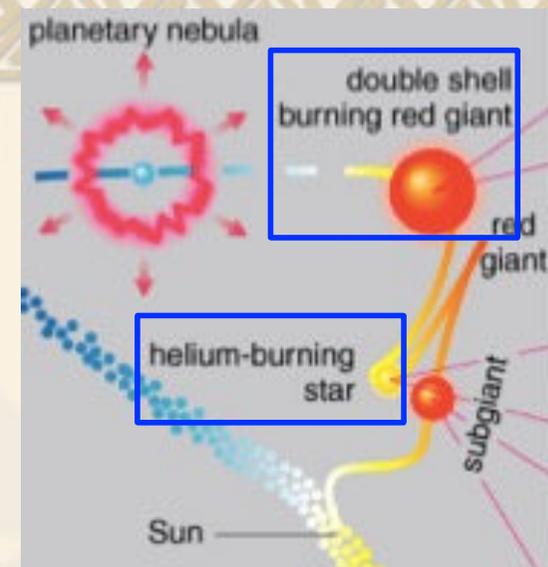
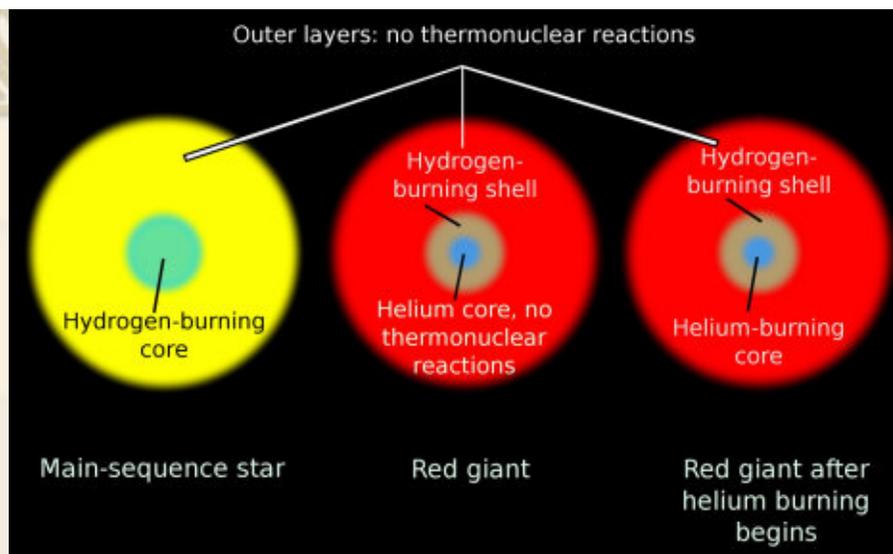
• **3alpha**过程能否发生存在疑问：参与反应的粒子温度高，容易将碳核打碎；而碳核在宇宙中普遍存在

• **1950s: Fred Hoyle**根据“人择原则”预言：存在碳核的激发态：核共振的影响，反应率增加 $10^7$ 倍！所需的温度也降低（ $4 \times 10^8 \text{K} \rightarrow 10^8 \text{K}$ ）

• **1940s**，核物理实验显示碳的激发态存在的迹象，但认为源于实验错误；**Hoyle**坚持它的存在，后由**William Fowler**（**Caltech**）做实验证实了它的存在，而且激发态的能量在5%的精度内与**Hoyle**预言的一致！**Fowler**获得**Nobel**物理奖



## 氦闪



- 氦开始燃烧时很剧烈--氦闪：电子简并压的影响
- 氦闪（~30s）之后，产生大量的热量，温度升高，密度基本不变，氦核内的电子变为非简并；星核膨胀、温度下降、光度下降，恒星在H-R图上的位置下降，进入稳定的氦燃烧（主要为3alpha过程）
$$^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$$
- 进一步碳燃烧：
- 氦燃烧产能率只有氢燃烧产能率的~10%，所以氦燃烧阶段的时间只有氢燃烧阶段时间的~10%；在赫罗图中位置上升
- 中心氦闪后进入稳定氦燃烧，核周围是氢燃烧壳层，这种核心烧氦（形成冷的碳核）、壳层烧氢的状态为水平分支

# 变星

- 恒星演化的晚期，变得不稳定，甚至大小周期性振荡

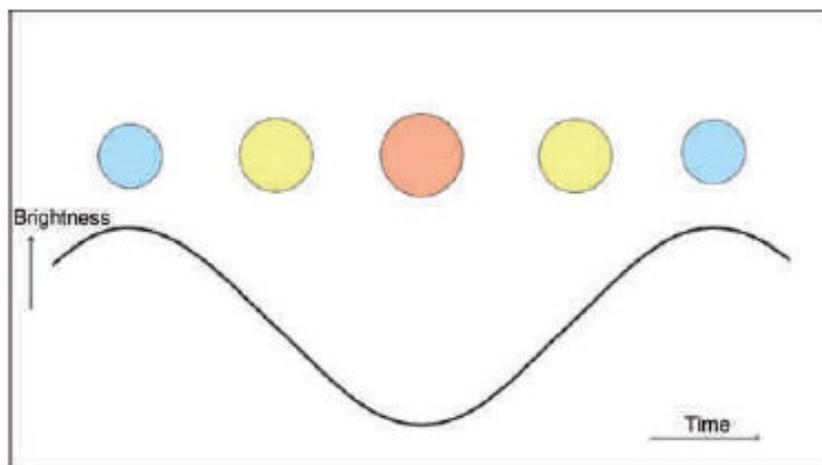


Figure 7.3 The changes in colour and brightness of a variable star.

- 星风损失
- 天琴RR型变星：0.5Msun, 0.2-2d周期，氦燃烧，四五十倍太阳亮，周光关系
- 造父变星：更亮

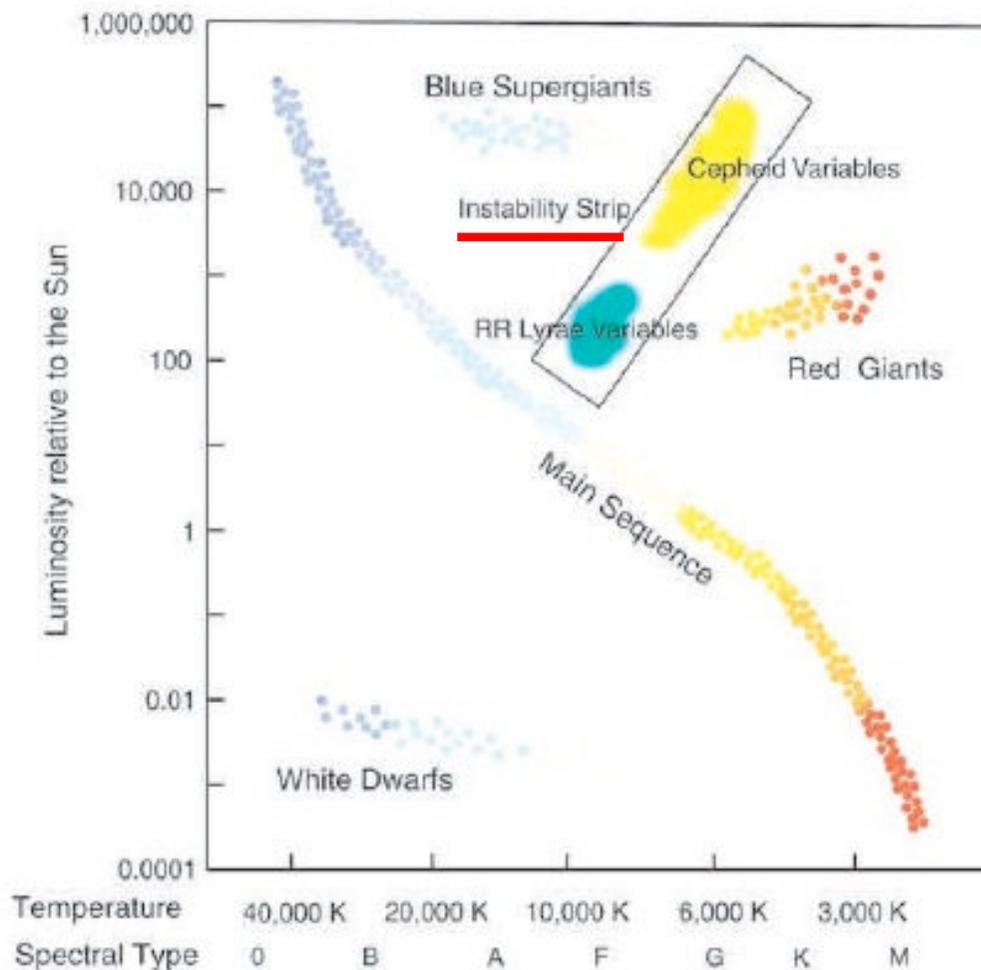
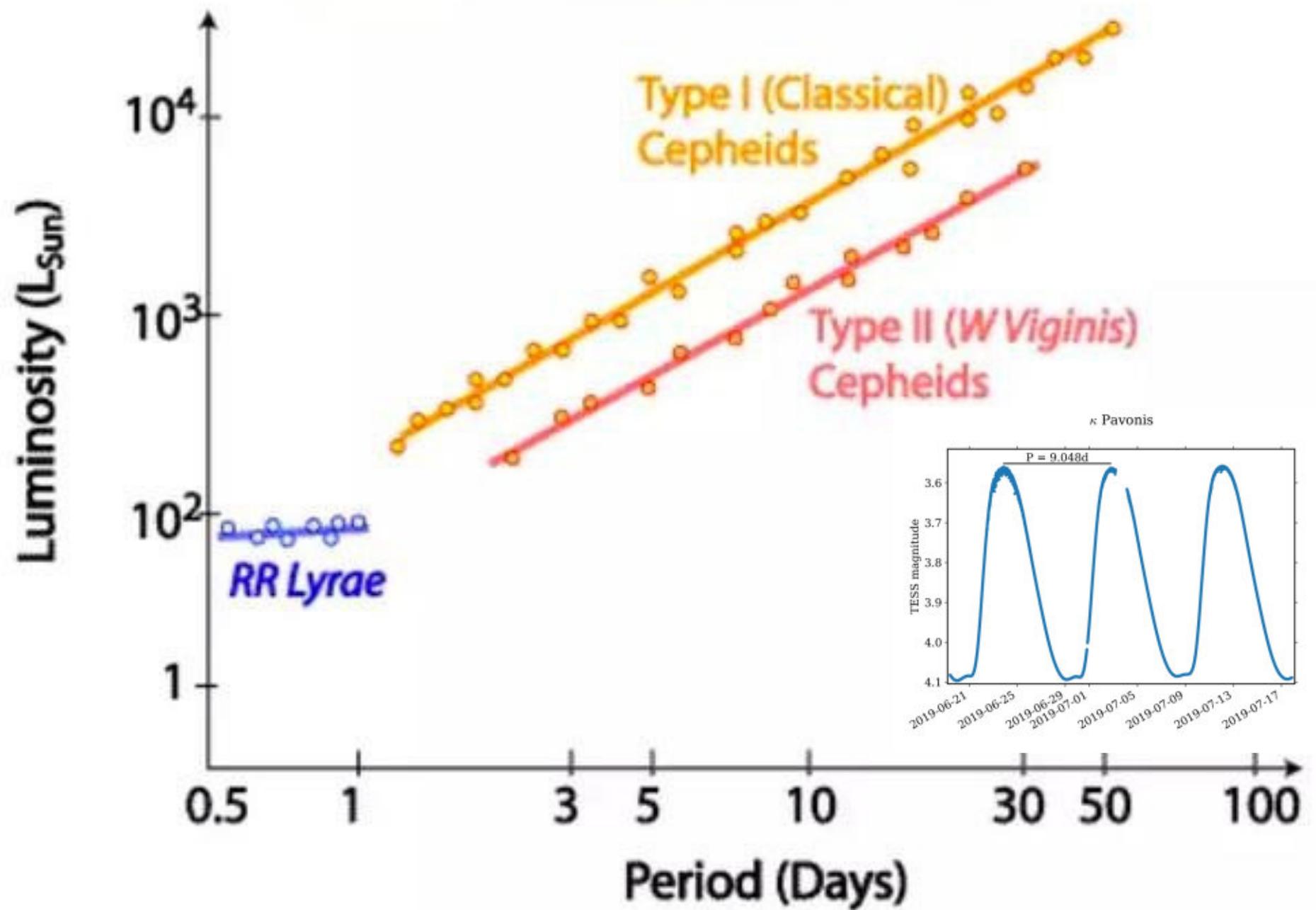


Figure 7.4 The region where variable stars are found in the H-R diagram.

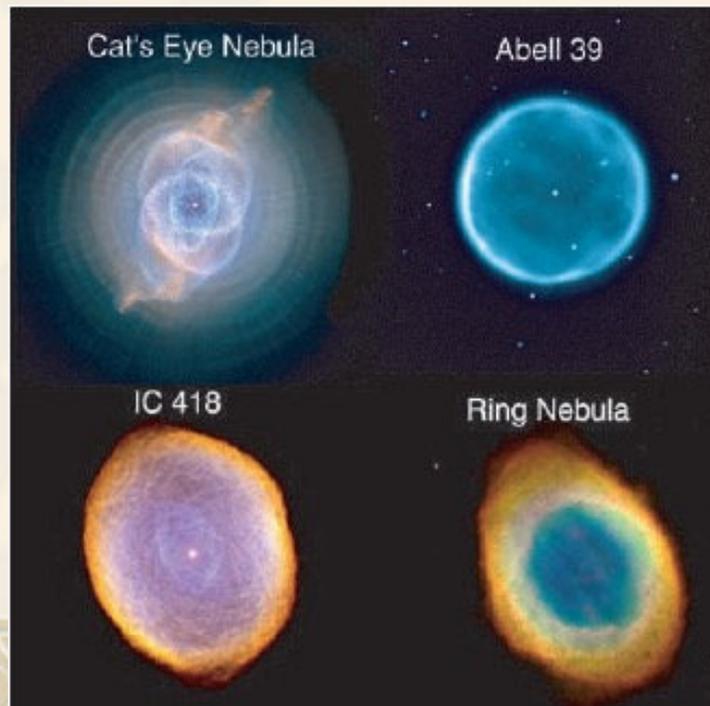
标准烛光！

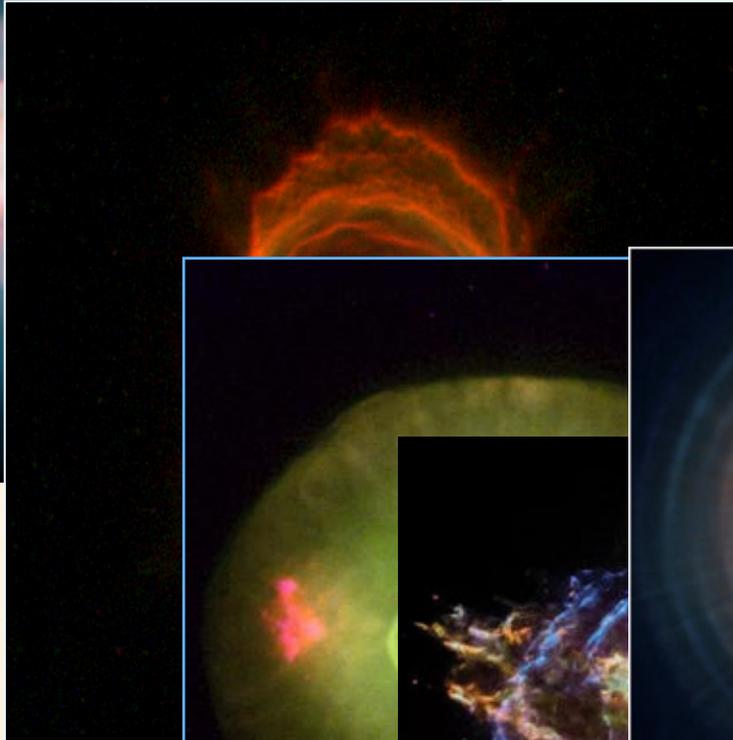
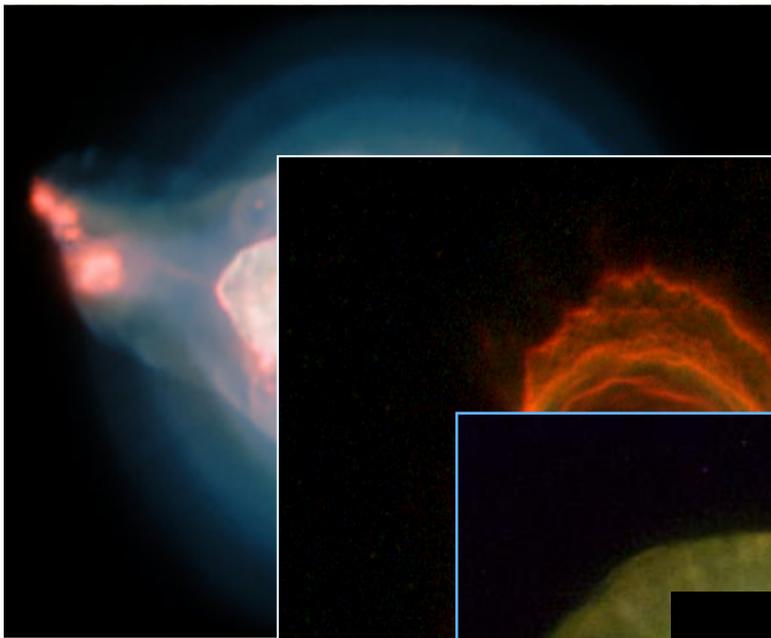
# PERIOD - LUMINOSITY RELATIONSHIP



# 行星状星云

- 行星状星云：恒星演化晚期很不稳定，抛射外壳层
- 已知的数目： $>1500$ ，银河系中估计有 $>50000$
- 特性：大、稀薄、膨胀的气体壳层， $v\sim 10\text{km/s}$ ，含一些尘埃， $M\sim 1/10-1/5 M_{\text{sun}}$
- 形成率 $\sim 10$ 个/年， $\sim 1M_{\text{sun}}$ /年物质进入ISM





CAT'S EYE



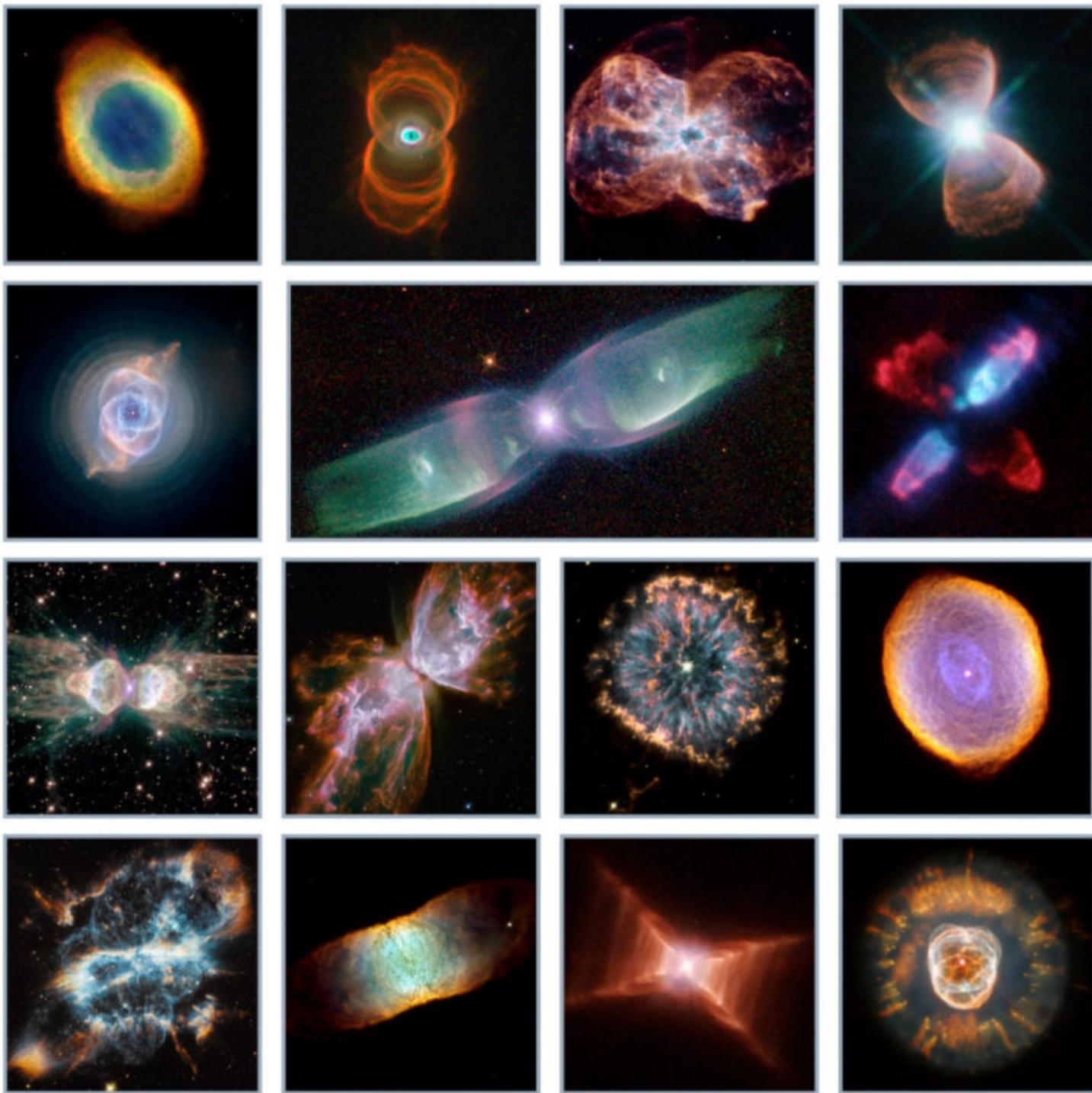
NGC 7662



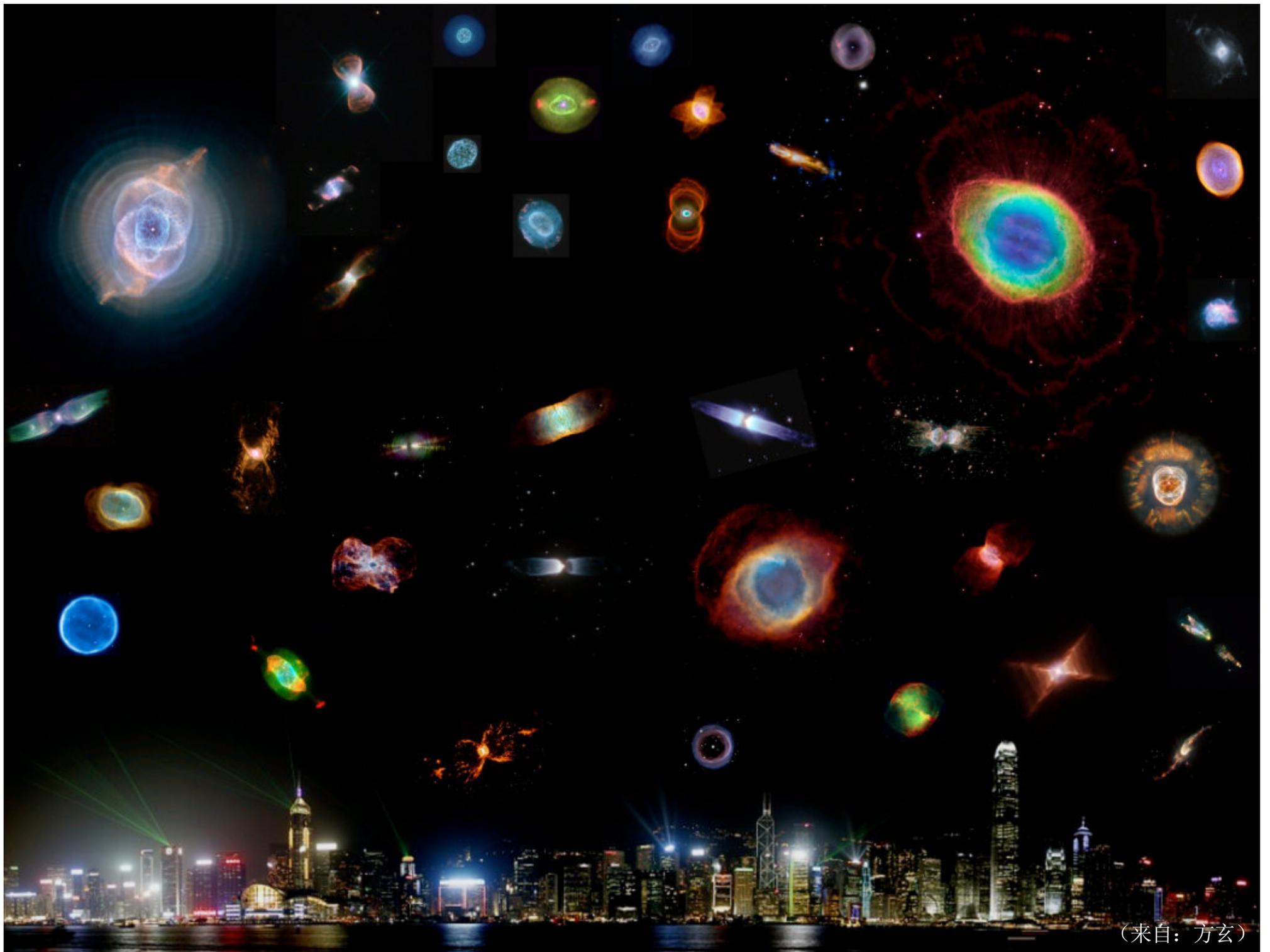
NGC 7039



NGC 6326



○ 行星状星云。| 图片来源：NASA



(来自: 方玄)



**Fig. 2.3—1. From the ISM to Life.** *Molecules traced from the ISM to collapsing cloud cores, to circumstellar disks, to planets, and the biochemical origins of life (Jenny Mottar).*

# 白矮星

- 行星状星云中心存在一暗的、白-蓝白的星：白矮星
- 电子简并压支撑：R.H. Fowler, 1926
- 钱德拉塞卡极限：1931年，19岁，1983年Nobel奖
- 白矮星：
  - $R \sim 0.008 - 0.02 R_{\text{sun}}$ , 与地球半径相当  
( $0.009 R_{\text{sun}}$ )
  - $M \sim 0.17 - 1.33 M_{\text{sun}}$
- 白矮星的发现：
  - 1783年，三星系统40 Eridani中，William Herschel
  - Sirius B, 自行，双星系统，Friedrich Bessel; 1862

## 白矮星的未来

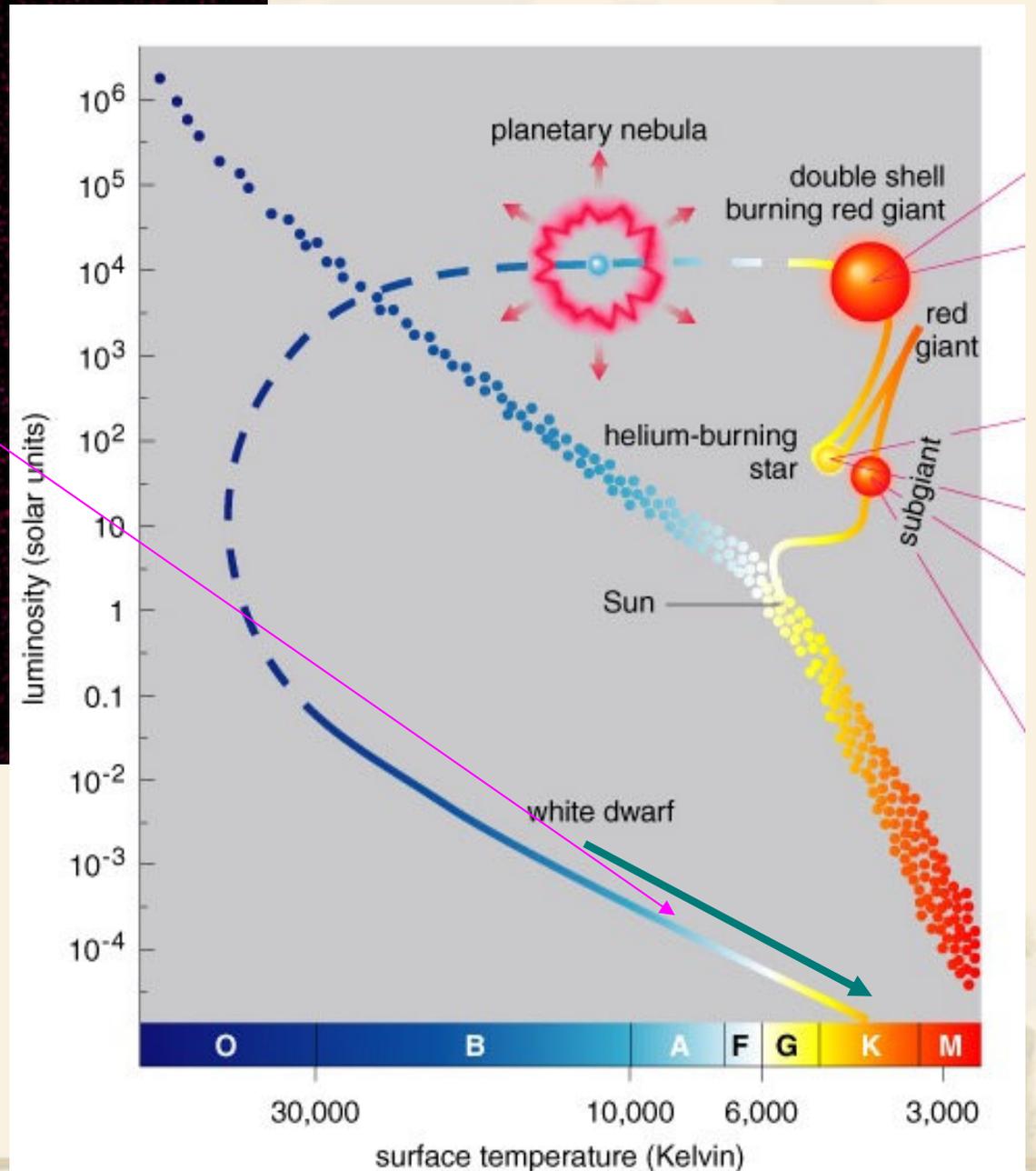
- 白矮星的温度：4 000—150 000K，橙色—蓝白色
- 辐射源于存储的热能，或者吸积伴星物质
- 表面积小，冷却慢；冷却，变红，光度下降
- 温度越低，冷却率越小：20000→5000 K与5000→4000K，需要的冷却时间差不多
- 宇宙年龄不足以使得白矮星冷却到显著<4000K
- 目前最低温度的白矮星：WD 0346+246，~3900K

## 黑矮星

# Sirius B (white dwarf)

Sirius

观测（天狼星B）：  
 $M \sim 0.75-0.95 M_{\text{SUN}}$ ，  
 $L \sim 1/360 L_{\text{SUN}}$   
 $T \sim 8000\text{K}$  (W.S.  
Adams, 1914)  
→  $R = 1.8 \times 10^4 \text{km}$



## 首次捕捉到正在进行的白矮星潮汐撕裂小行星事件

发稿时间：2020-02-13，作者：天文学系 浏览次数：194

中国科学技术大学天文学系王挺贵教授课题组在距离我们仅95光年的白矮星WD0145+234中发现了剧烈的红外爆发，并成功的解释为正在进行的白矮星潮汐撕裂小行星事件。这一天文发现2019年11月发表在国际一流天体物理期刊《天体物理快报》上，并于近期（1月30日）被美国天文学会刊物研究亮点网站AAS Nova Journals Digest栏目推荐介绍。



图1：白矮星潮汐撕裂小行星艺术想象图（来源：NASA/JPL-CalTech）。

# 类太阳恒星的演化

1: 原恒星, 开始发红光, 体积大, 光度大; 进一步收缩, 光度下降

2: 半径减小, 温度升高, 光度基本是常数

3: T Tauri阶段: 剧烈, 一半质量损失

4: 主序星, 氢燃烧

5: 红巨星, 氦燃烧

6: 碳燃烧, 不稳定, 光度和颜色变化

7: 核反应停止, 外壳层抛射, 行星状星云

8: 核区: 冷却坍塌成白矮星

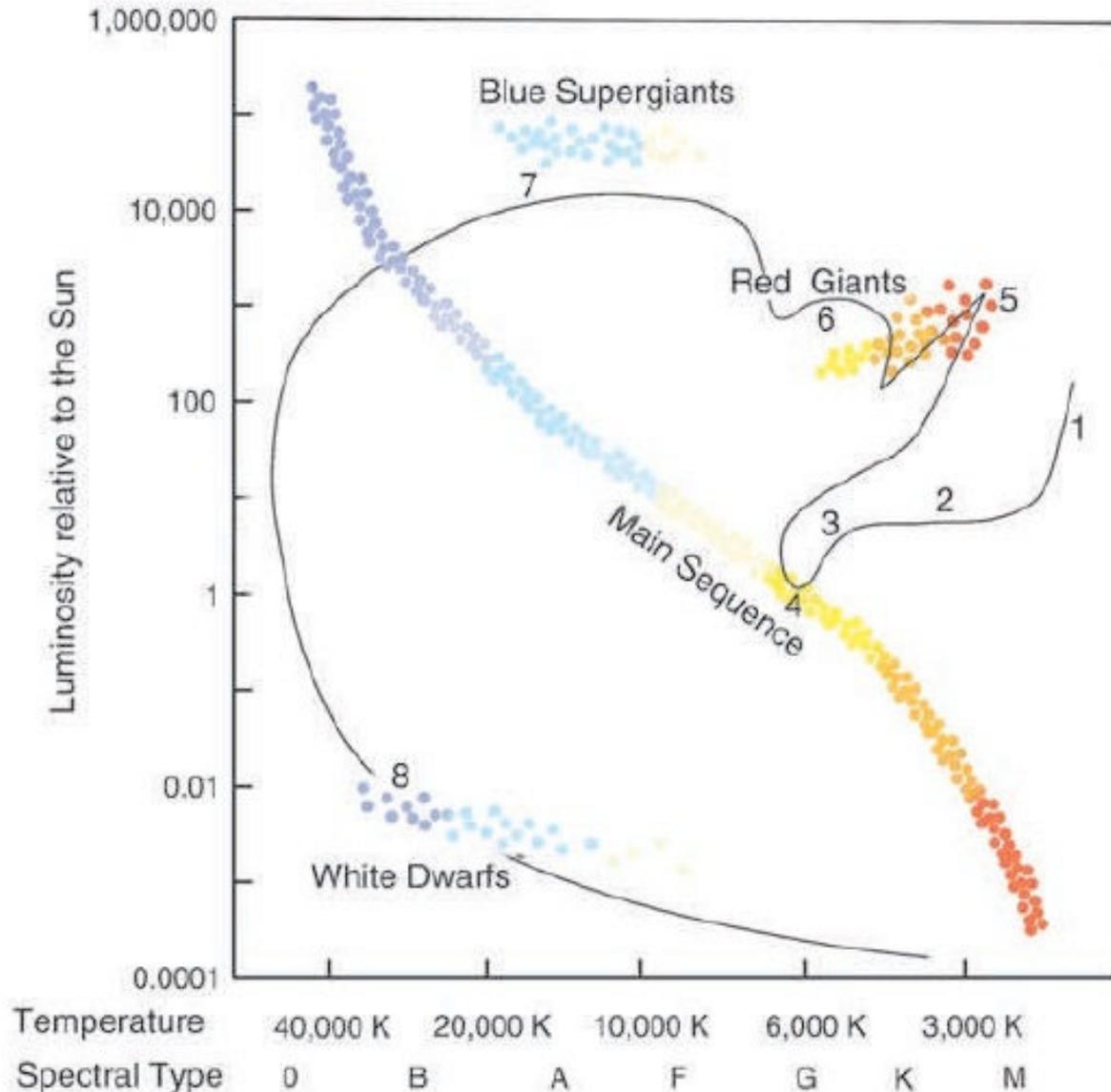
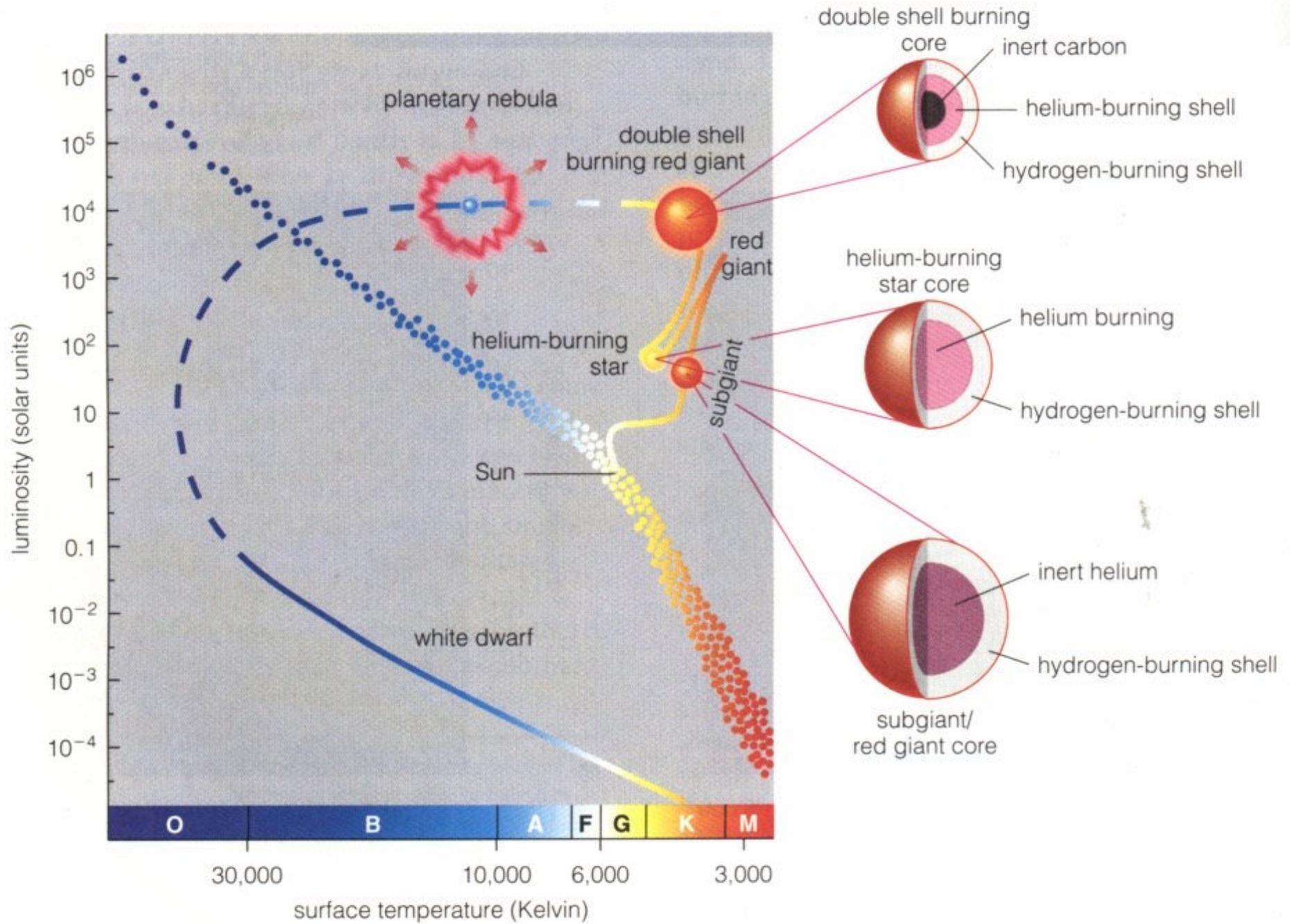


Figure 7.6 The evolutionary track of a 1 solar mass star on the H-R diagram.

**FIGURE 16.12** The life track of a  $1M_{\text{Sun}}$  star from main-sequence star to white dwarf.



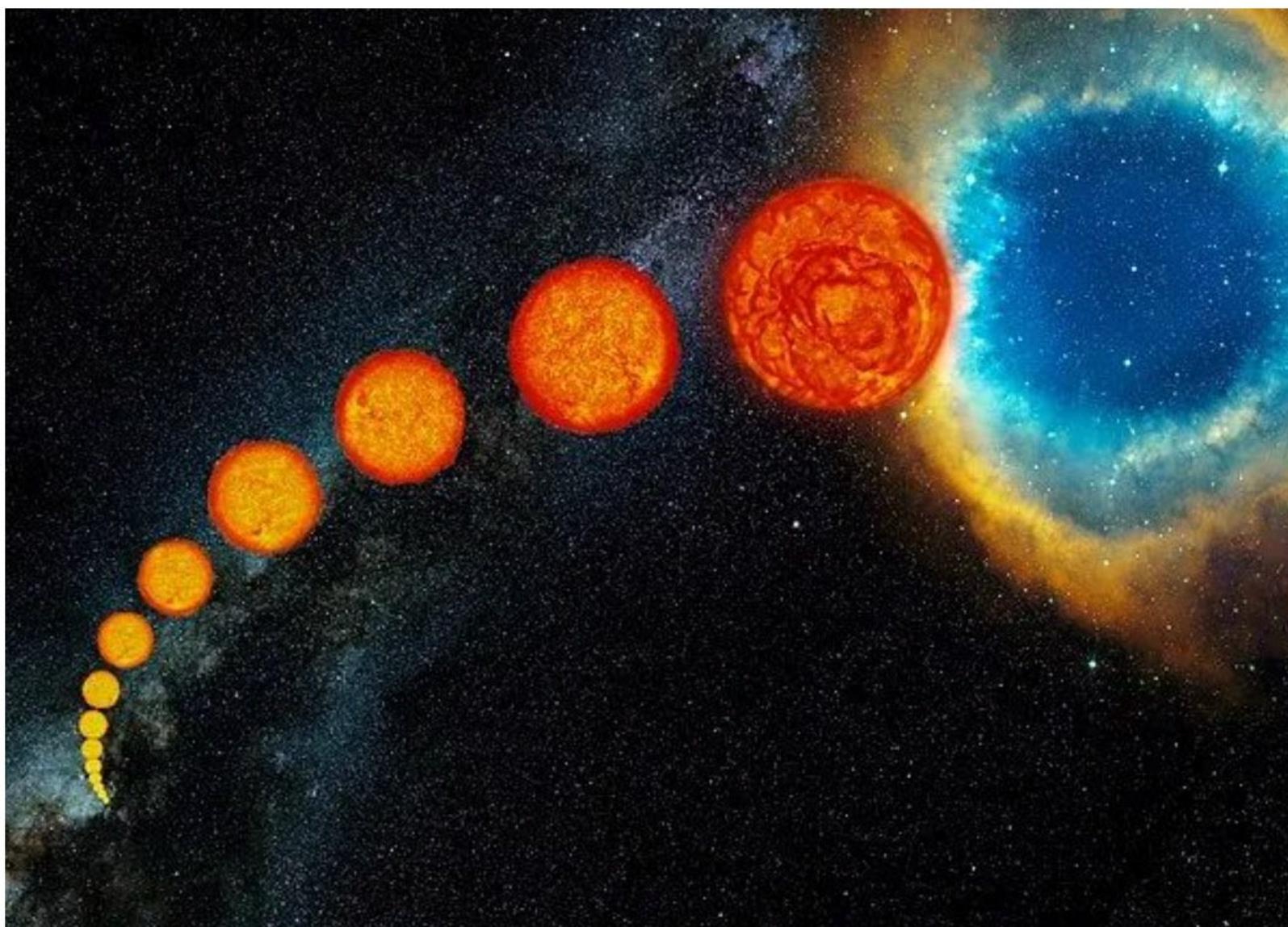


图1: 太阳 (类太阳) 一生演化示意图 (图源: 维基百科)

# 太阳的生命周期



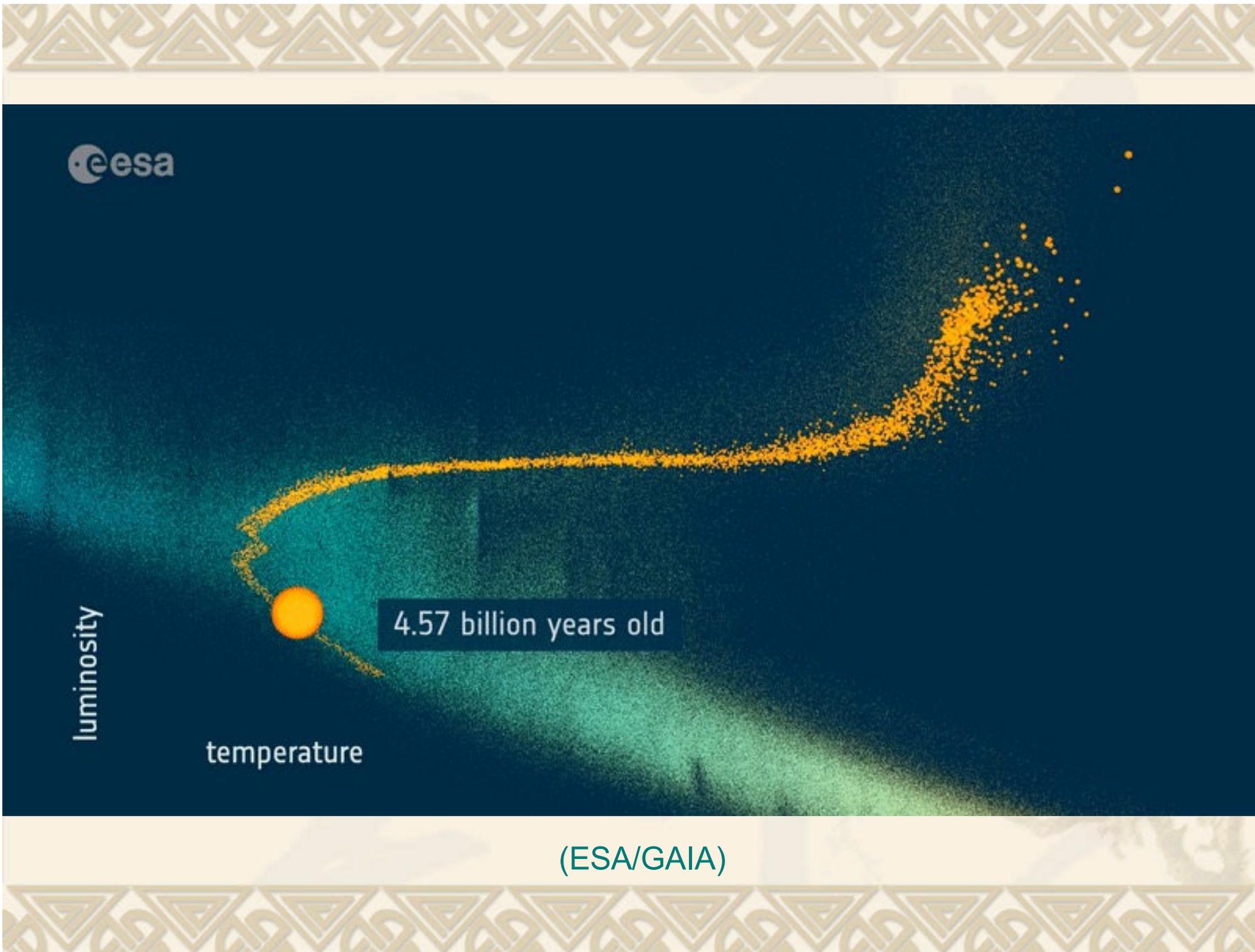


luminosity

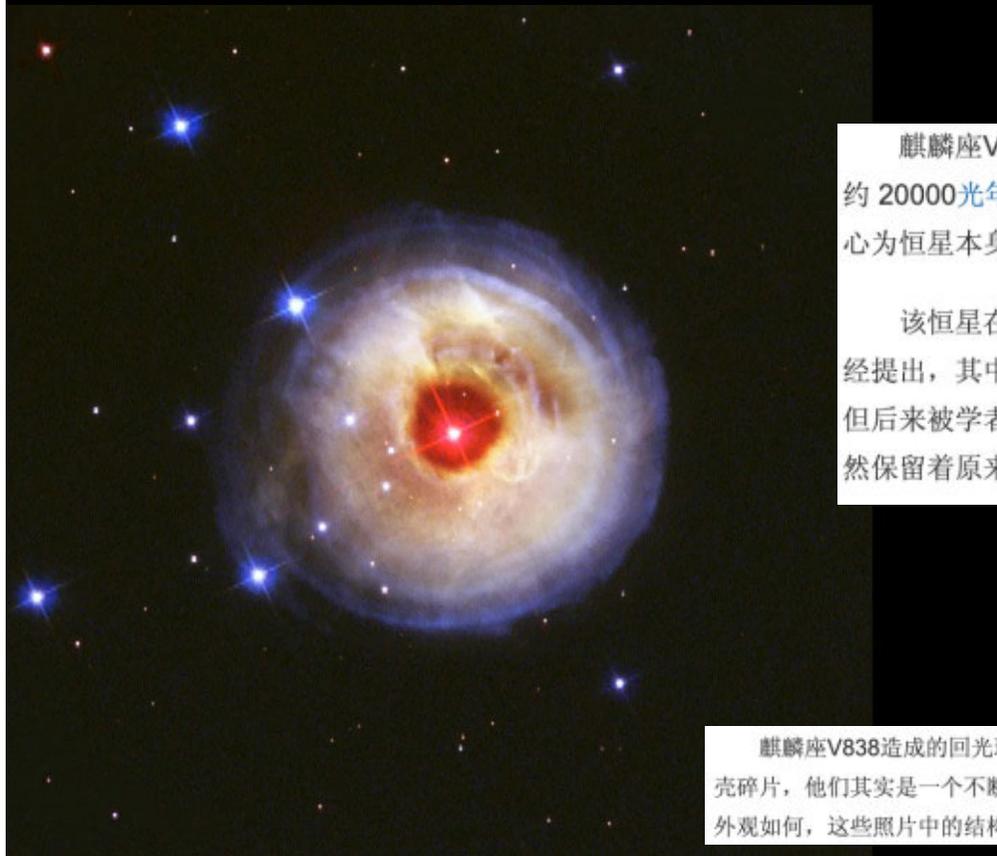
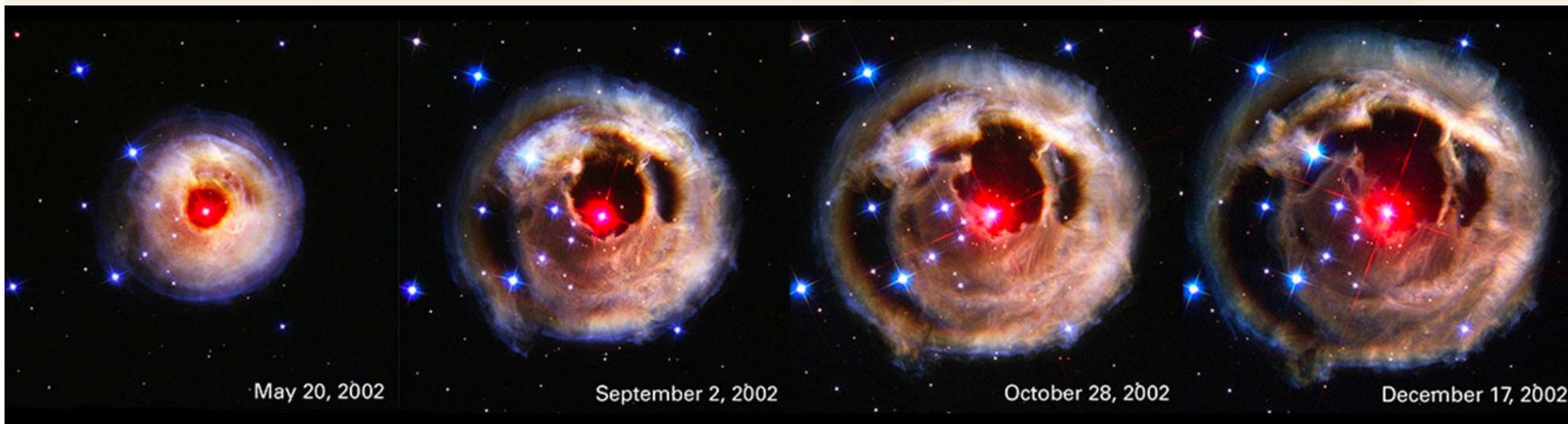
temperature

4.57 billion years old

(ESA/GAIA)



# 哈勃空间望远镜拍摄的麒麟座V838爆发事件过程。 / NASA



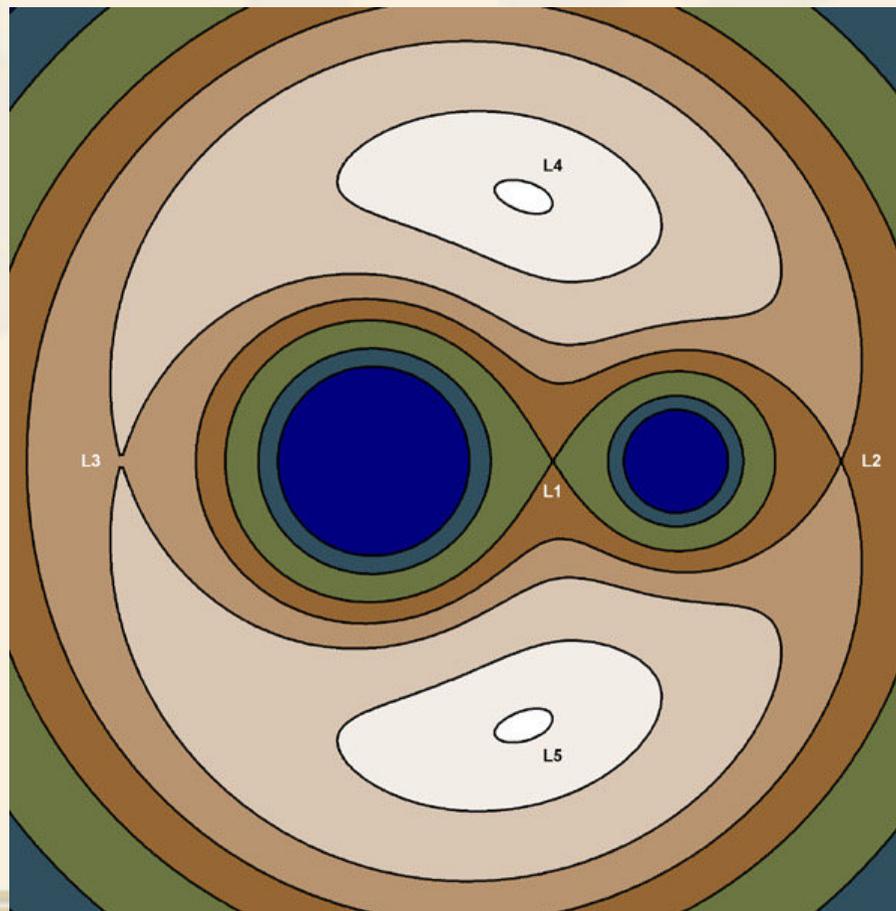
麒麟座V838（V838 Monocerotis, V838 Mon）是位在麒麟座的一颗红色变星，距离太阳约 20000光年，麒麟座v838恒星因好似梵高名作《星空》中所描绘的景象而闻名。中央红色核心为恒星本身，周围结构为被照亮的尘埃云。

该恒星在2002年经历了一次爆发事件并被观测到。爆发的原因至今不明，但有数个理论已经提出，其中包含恒星死亡的过程、联星合并或吞噬行星。最初认为是一个典型的新星爆发，但后来被学者所摒弃，因为v838恒星并没有激烈地把气体外壳掀掉、而是在迅速膨胀的同时仍然保留着原来的外壳，成为一颗表面温度较低的超巨星。 [3]

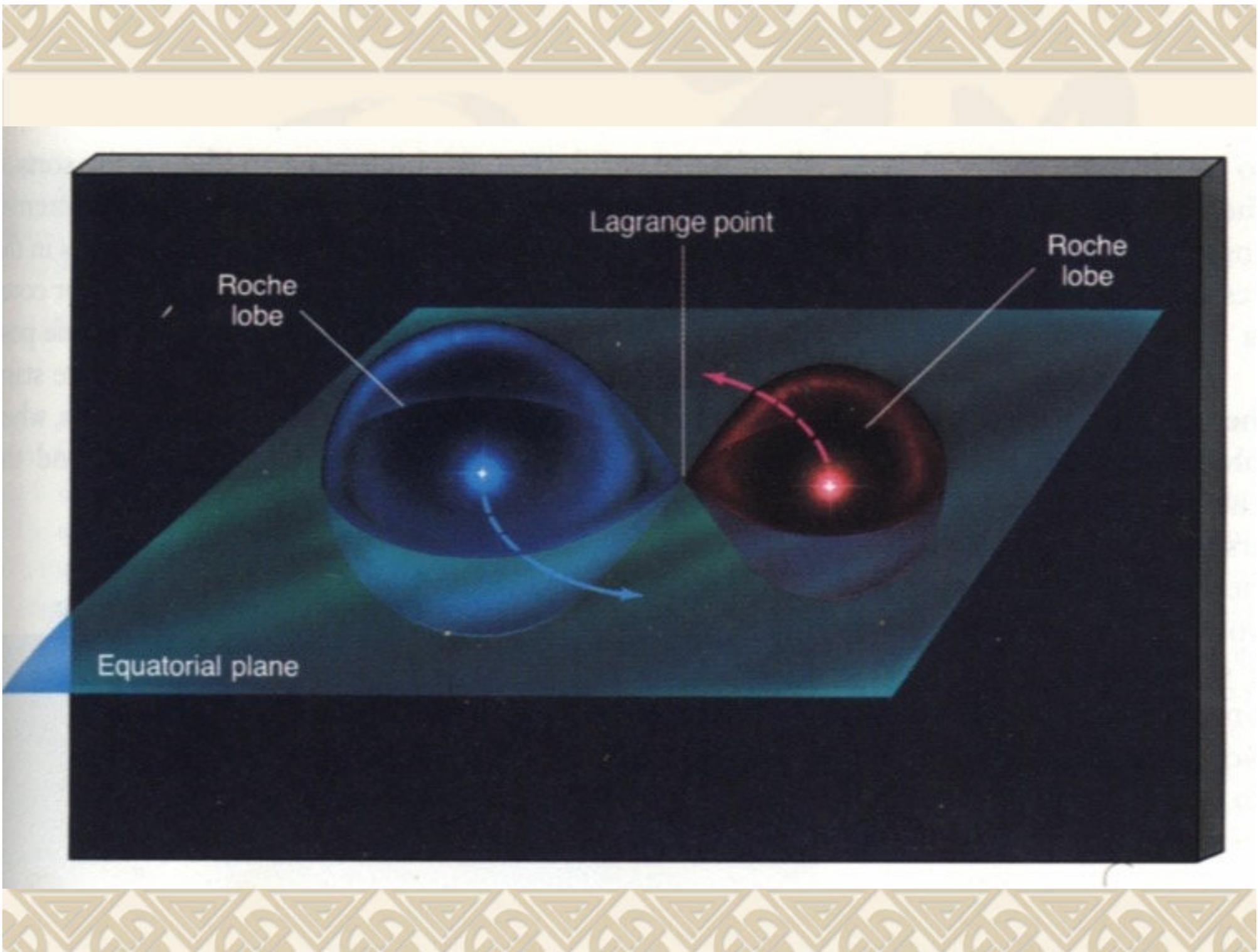
麒麟座V838造成的回光现象是史无前例的，而且被哈勃太空望远镜以影像详细纪录。从照片中看来，似乎是一个膨胀中的球壳碎片，他们其实是一个不断膨胀中的椭球被照亮所形成的，前身星在一个焦点上，而观测者在另一个焦点上。因此，不论它的外观如何，这些照片中的结构对观测者实际上是凹陷的。

# 密近双星中恒星的演化—Algol佯谬

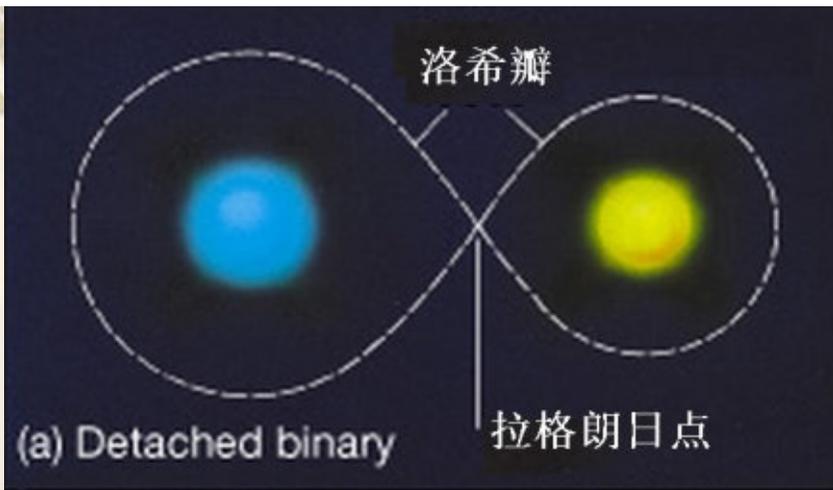
- Algol, 英仙座 $\beta$ 星: 3.7太阳质量的主序星+0.8太阳质量的亚巨星
- 质量交换!



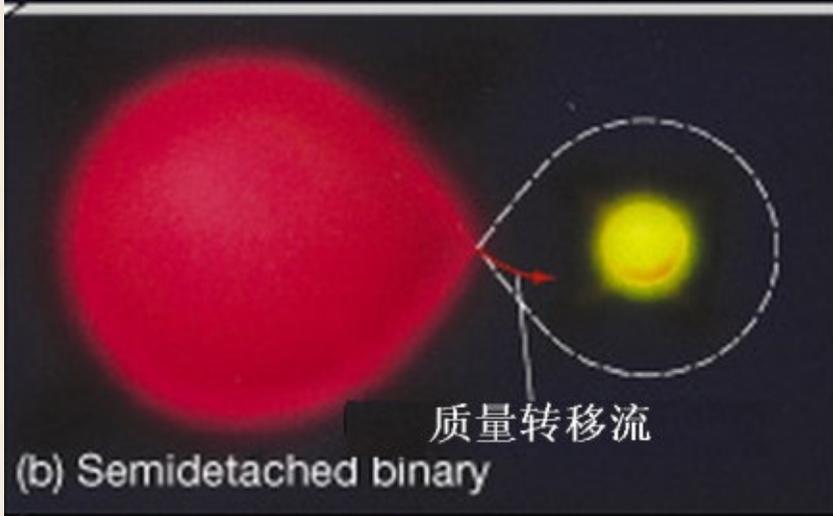
**Roche Lobes**



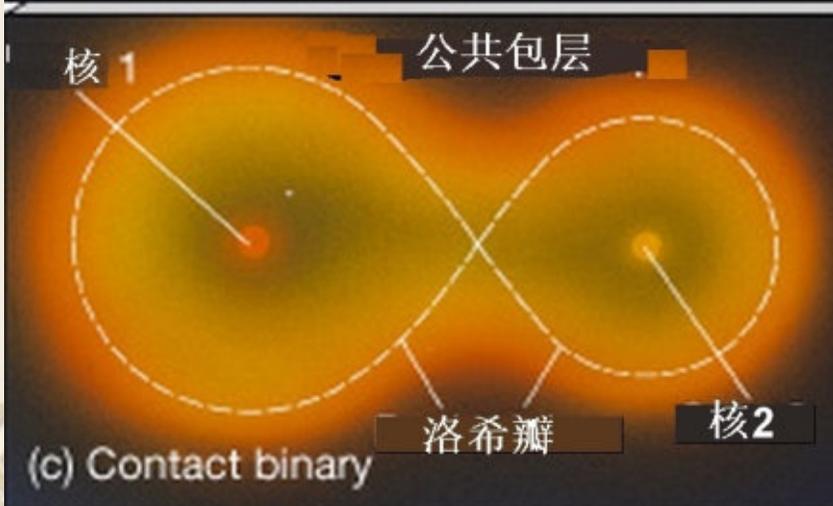
分离双星



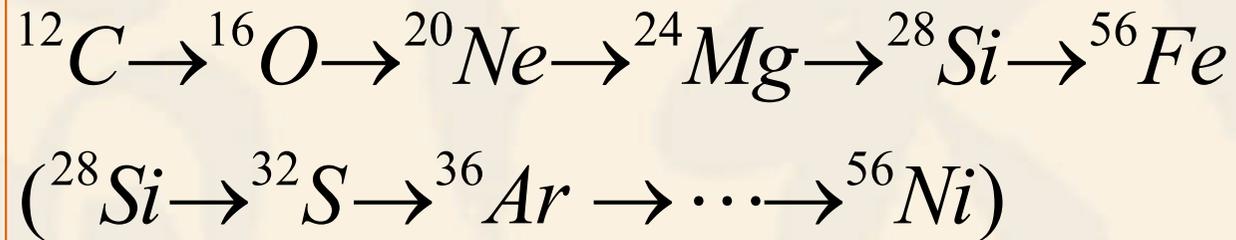
半密近双星



密近双星



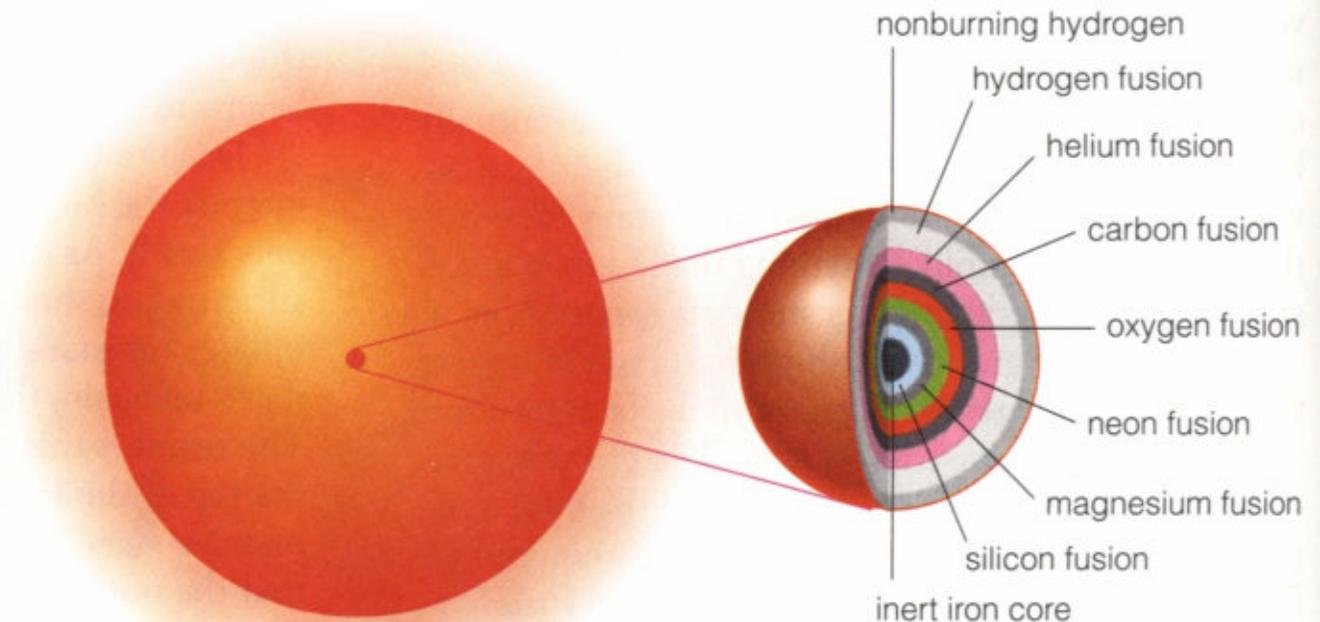
# 大质量恒星： >8.0太阳质量



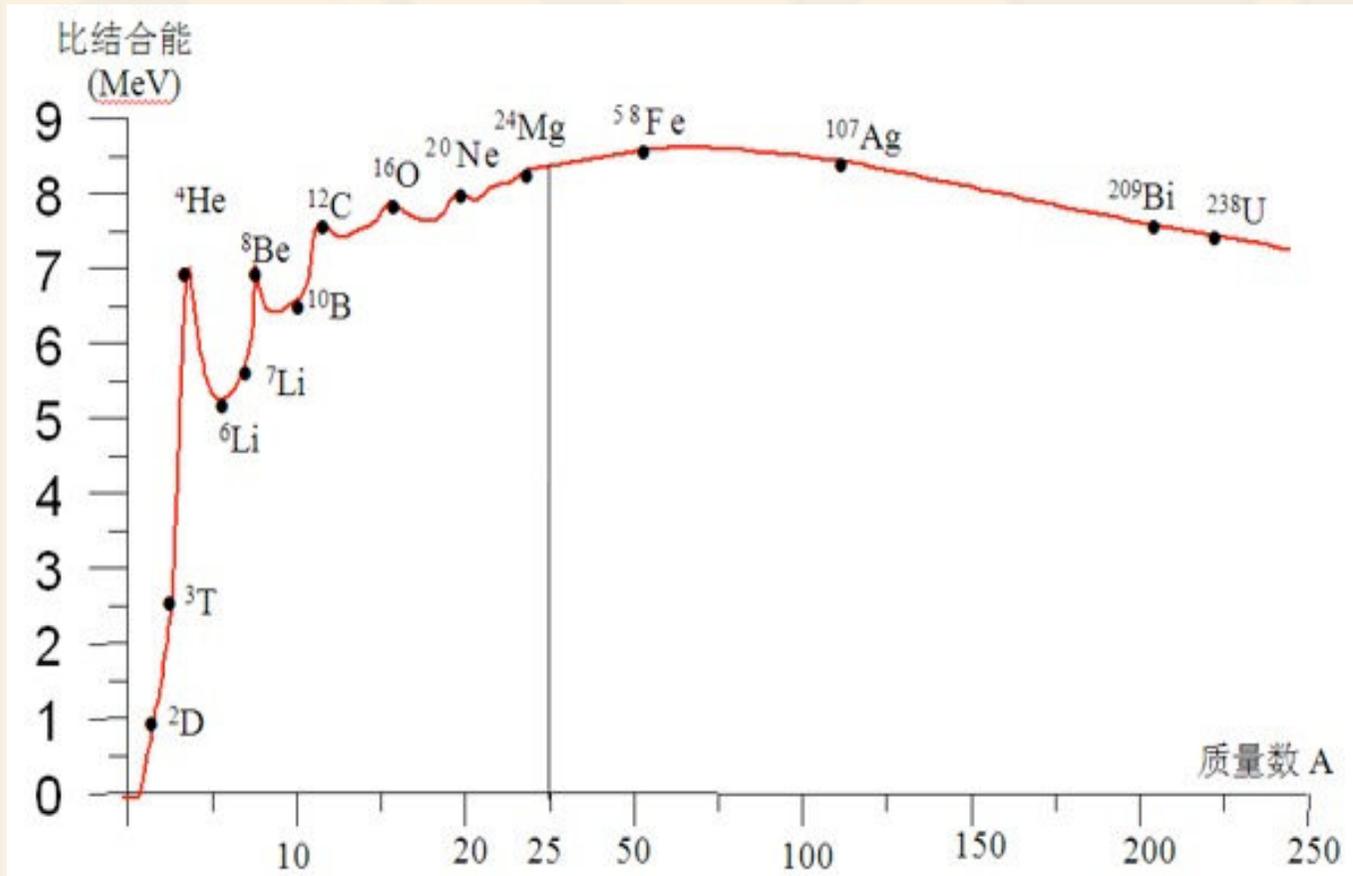
硅燃烧的温度：  $3 \times 10^9 \text{K}$

洋葱结构

**FIGURE 16.16** The multiple layers of nuclear burning in the core of a high-mass star during the final days of its life.



# 原子核结合能曲线

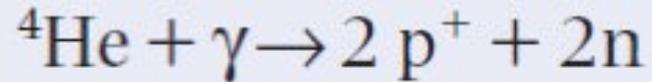
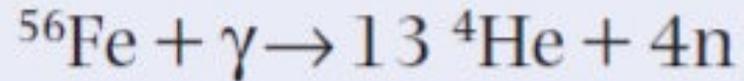


M=20Msun

- 氢燃烧:  $10^7$ 年 (主序)
- 氦燃烧:  $10^6$ 年
- 碳燃烧: 300年
- 氧燃烧: 200天
- 硅燃烧: 2天

# 光致解离

$M \sim 15 M_{\text{sun}}$ , 铁核温度:  $T \sim 8 \times 10^9 \text{K}$ , 光子能量足够高



吸热, 温度急剧下降, 铁核塌缩, 中子化, 形成中子星

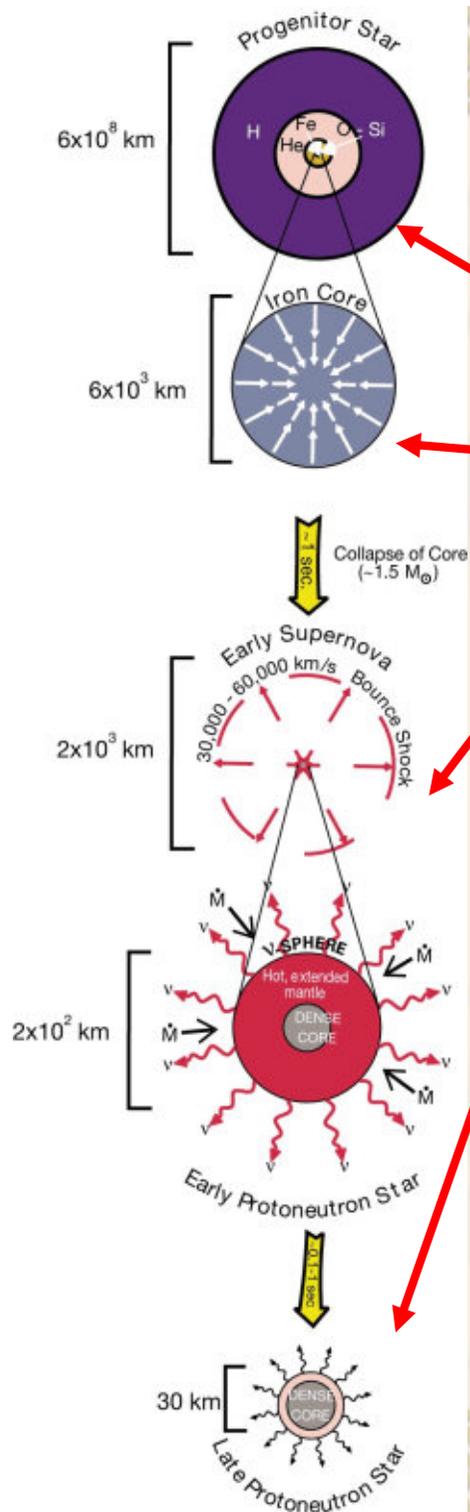


中微子带走大量能量, 核心一秒之内剧速塌缩, 外壳层坍缩打在核上, 中子简并压导致反弹, 形成激波—超新星爆发

超新星爆发光度:  $\sim 10^9 L_{\text{sun}}$ , 和整个星系的光度相当!



# 核塌缩超新星爆发 (Type



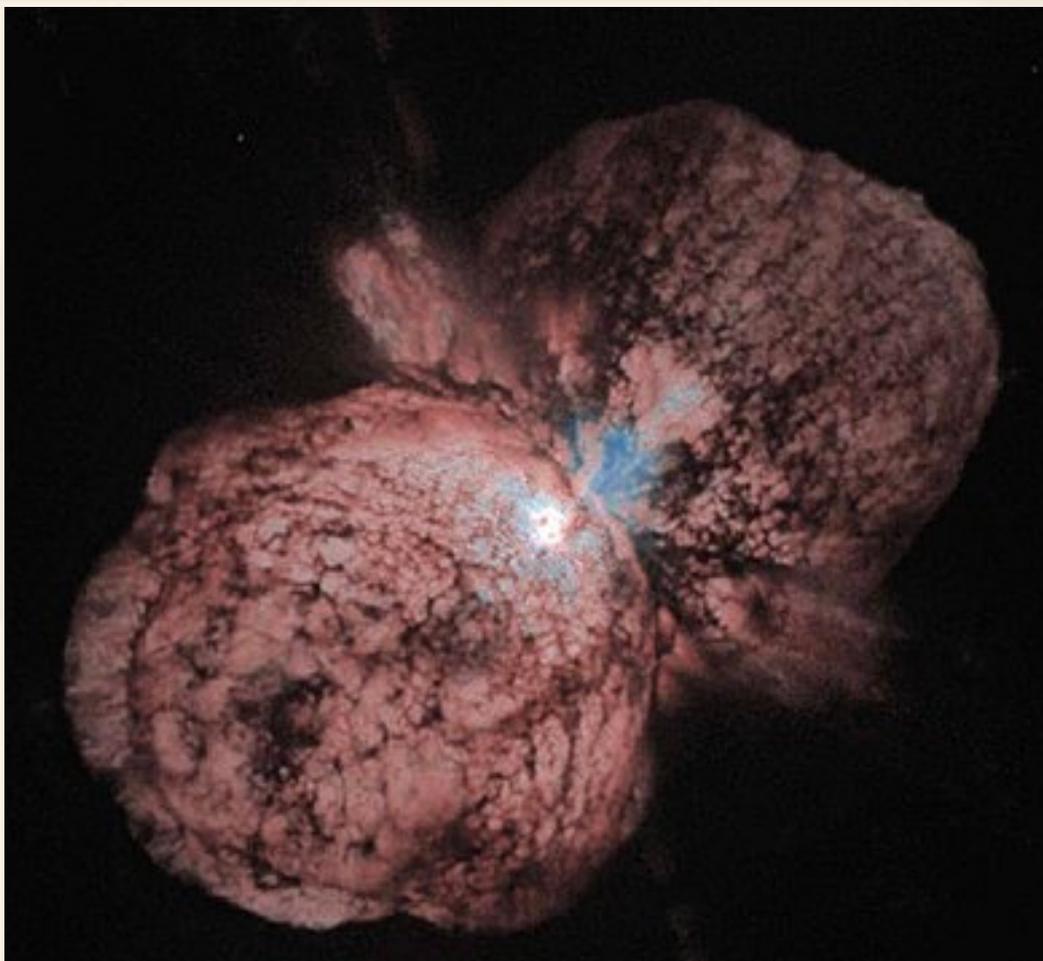
- ❖ 大质量恒星演化晚期：洋葱结构
- ❖ 铁核塌缩
- ❖ 外壳层的核反弹和激波的形成
- ❖ 新生中子星

From: Burrows 2000, Nature

- ❖ 峰值绝对星等：~-18等
- ❖ 每年下降：6-8星等
- ❖ 爆发率：~1次/44年
- ❖ 尘埃吸收，只能见到：~10-20%



红超巨星参宿四  
致暗之谜

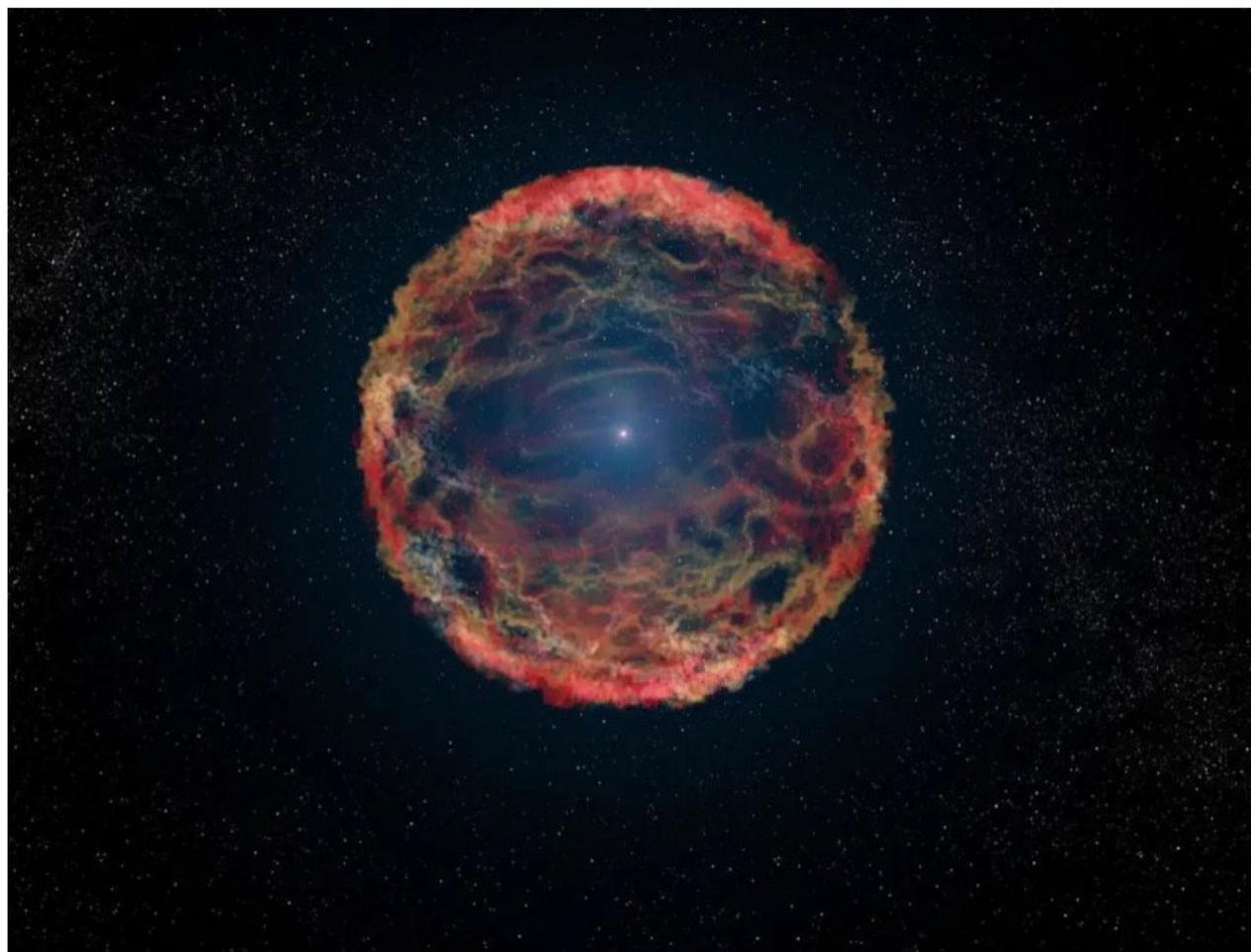


哈勃空间望远镜摄得的海山二与围绕在该天体周围的侏儒星云（Homunculus Nebula）。侏儒星云是由海山二所喷发制造出来的，它的光芒在1843年抵达地球。海山二是侏儒星云中心的白色斑点，位于星云2片两极叶瓣的接触点

[\(wiki\)](#)

海山二（Eta Carinae）是位于船底座的一个恒星系统（赤经10 h 45.1 m、赤纬 $-59^{\circ}41m$ ），距离太阳7,500至8,000光年，在北纬 $27^{\circ}$ 以北的地区难以看见，而在南纬 $30^{\circ}$ 是一颗拱极星。这个系统至少有两颗恒星，其中一颗是位于恒星生命早期阶段，质量大约是太阳150倍的高光度蓝变星（LBV），并且至少已经流失30个太阳质量。虽然它被认为还有一颗质量约为太阳30倍的沃夫-瑞叶星环绕着它较大的伴星，但海山二周围有巨大厚重的红色星云，因而很难直接的发现。它总体的光度大约是太阳的590万倍，而系统的质量估计超过150倍太阳质量<sup>[3]</sup>。由于它的质量和生命阶段，预期在天文学上不久的将来，它将爆炸成为一颗极超新星，目前的估计是从现在开始的10,000年至20,000年。

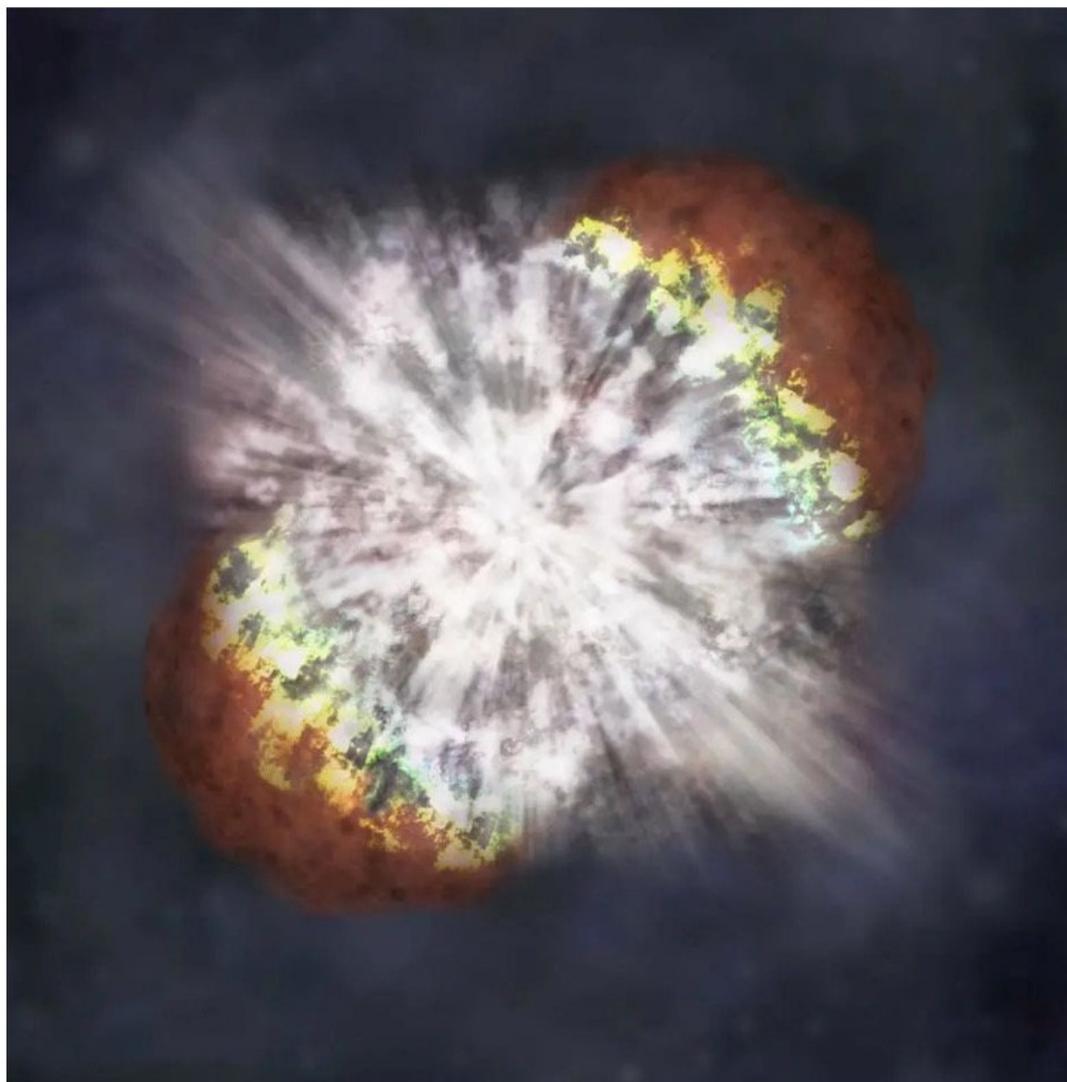
大质量恒星演化到末期，核心不再产生辐射，星体在自身引力的作用下收缩，将核心压缩为一个中子星，外层物质被核心反弹，向外爆发。



超新星遗迹  
的多样性

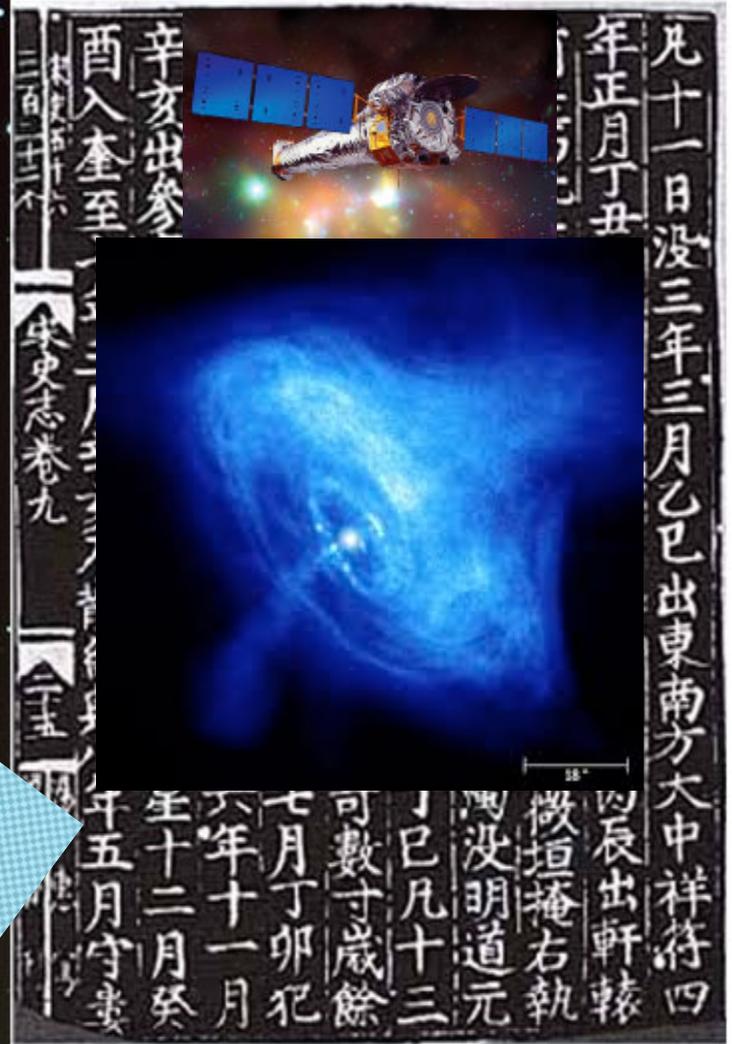
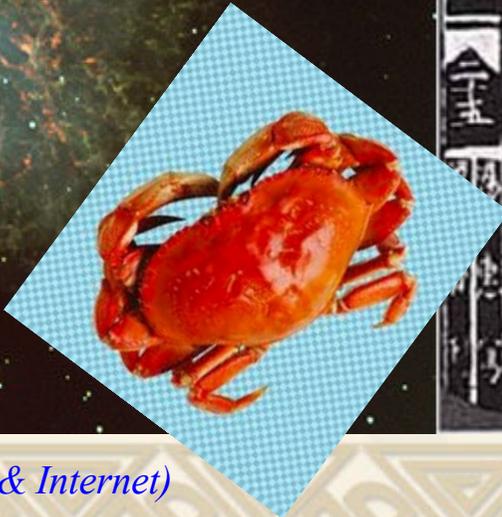
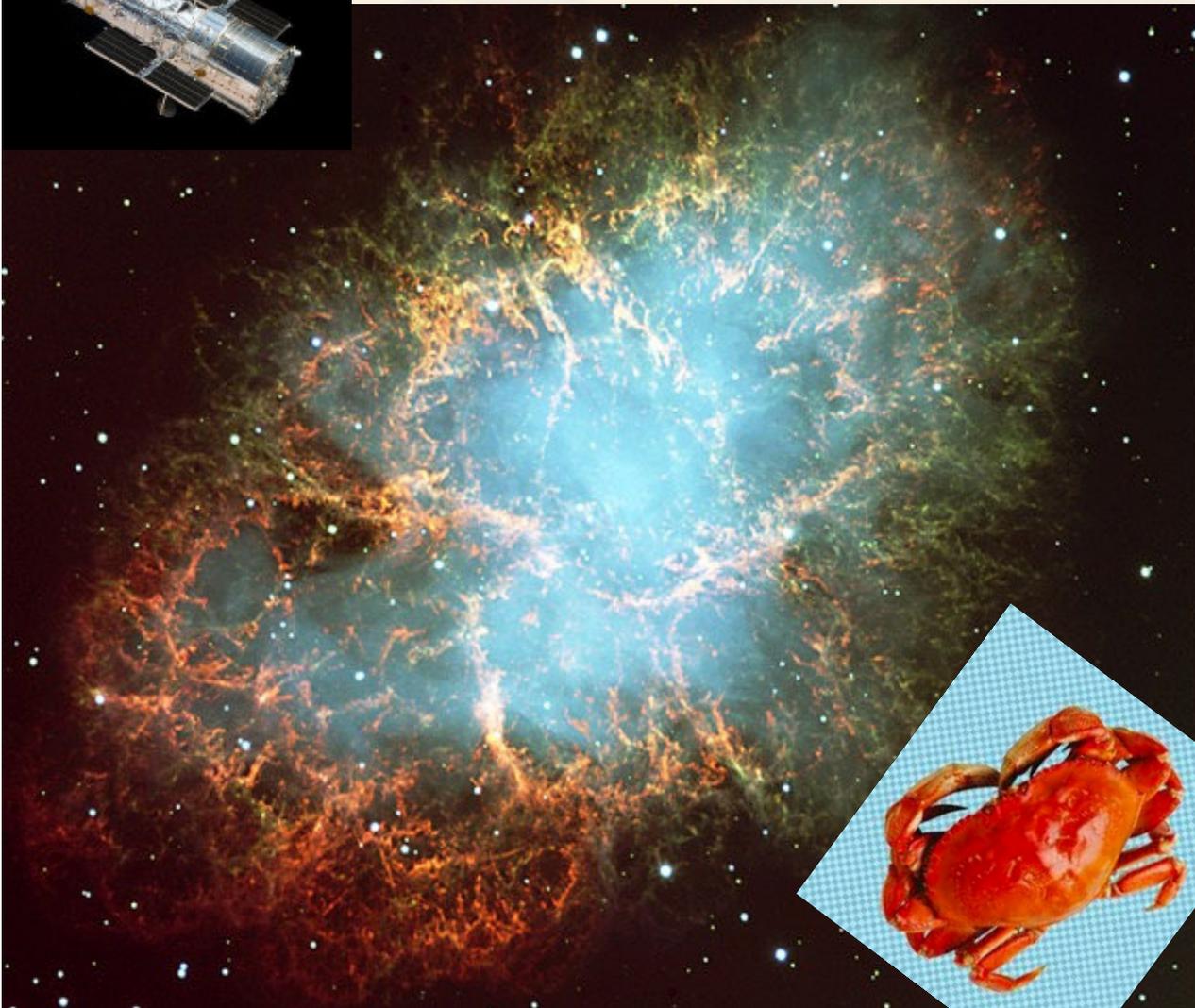
核塌缩型超新星SN 1993J 爆发后的艺术想象图。| 来源：NASA, ESA, and G. Bacon (STScI) NASA, ESA, and G. Bacon (STScI)

质量超过140个太阳的超大质量恒星演化到末期，核心产生的光子能量过高，成对转化为电子与反电子，一部分又成对地转变为中微子与反中微子，恒星迅速收缩升温，然后迅速将自身炸毁。

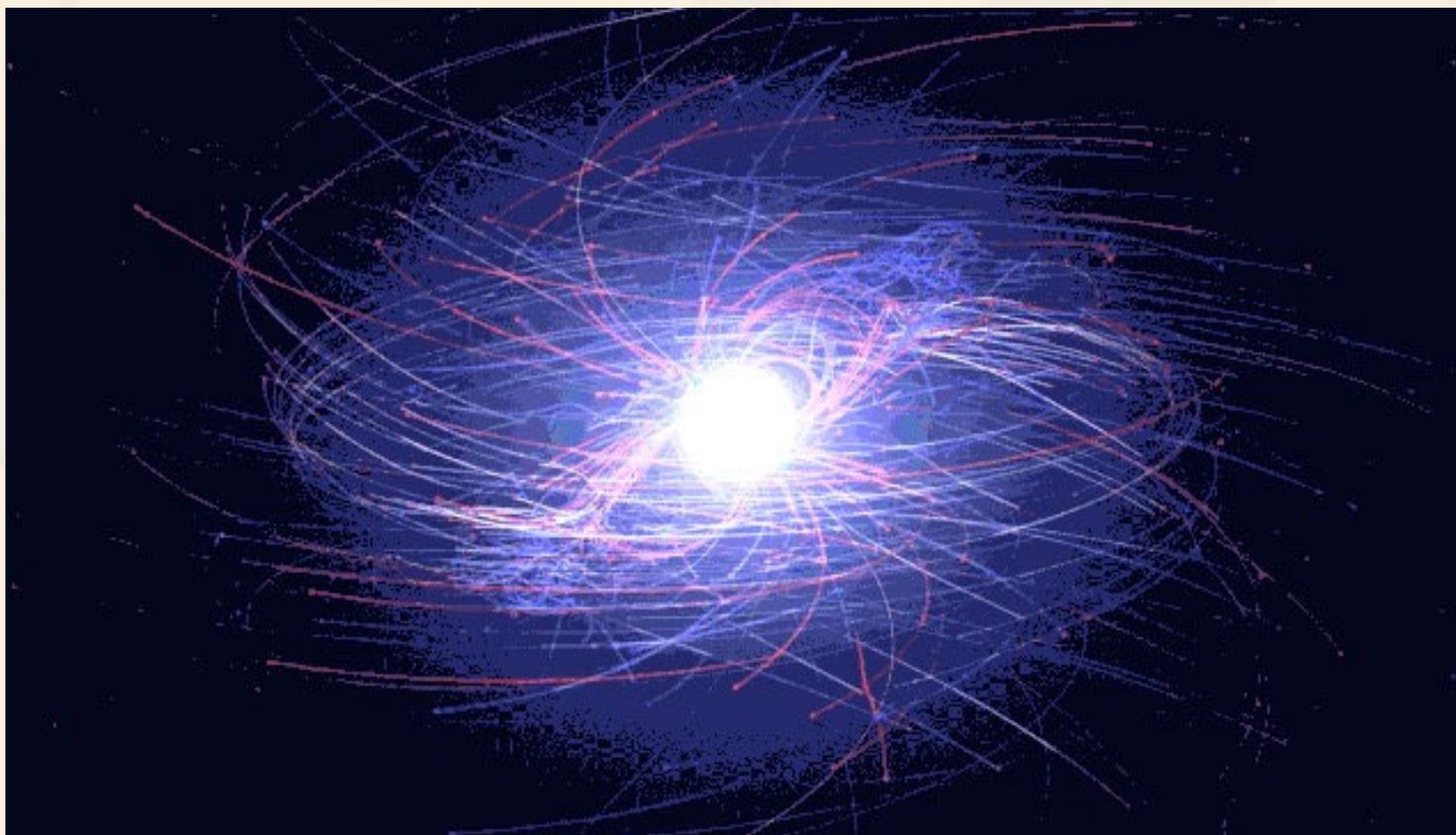


迄今为止最古老的恒星  
被发现啦（薛永泉）

# 蟹状星云与SN 1054



(NASA & Internet)



脉冲星风云反响

在一项计算机模拟中，自旋中子星周围强大电磁场将带电粒子“抽”得团团乱转。来源：NASA戈达德太空飞行中心

# 广西大学召开船帆座脉冲星风云X射线偏振观测成果发布会

12月22日上午，广西大学召开成果发布会，介绍天文与空间科学技术团队取得的深空探索观测研究重大成果，该成果的重要部分《船帆座脉冲星风云X射线偏振趋近同步辐射理论极限》已于当日在国际顶级期刊《自然》杂志发表。国内外知名领域专家、自治区相关厅局领导、10多家媒体和校内师生代表参加了本次发布会。

谢斐副教授介绍，脉冲星是由超新星的遗骸组成的一种高度磁化的旋转中子星，脉冲星风云则是快速旋转的脉冲星驱动的星风冲击外部物质产生的高能天体。船帆座脉冲星风云距离地球约900光年，是距离地球最近的脉冲星风云之一。船帆座脉冲星风云在中心快速旋转（每秒自转11.2次）的船帆座脉冲星的驱动下，能够发射出射电、X射线、高能伽马射线等不同波段的光辐射，也是目前已知最亮的脉冲星之一。通过X射线成像偏振望远镜，发现船帆座脉冲星风云存在极强的偏振，是人类目前在高能波段探测到的偏振度最高的一个目标源。它改变了科学家对粒子加速机制的认识。

中科院国家天文台台长常进院士、中科院粒子天体物理重点实验室主任和中国载人航天空间天文与天体物理领域首席科学家张双南研究员、意大利相关领域专家线上参加了本次发布会，并先后就该成果进行了精彩点评。嘉宾们一致认为，船帆座脉冲星风云X射线辐射的偏振度趋近理论预言的最大值，证实了辐射区域的磁场完美有序，这是天文观测重大突破性成果。



广西日报-广西云客户端  
记者 刘琴

2022年12月22日



## 蟹状星云（Type II SNR）的现状：

- 膨胀： $v \sim 1500 \text{ km/s}$
- $L \sim 10\,000 L_{\text{sun}}$ ， $\sim 8.4$ 星等
- 辐射来自相对论电子在磁场中的同步辐射
- 相对论电子同步辐射的时标很短，能量注入？
- 中心存在一中子星（1969年发现），不断注入高能电子
- 最近的著名超新星：SN1987A（LMC），第谷超新星（1572），开普勒超新星（1604）--I型超新星

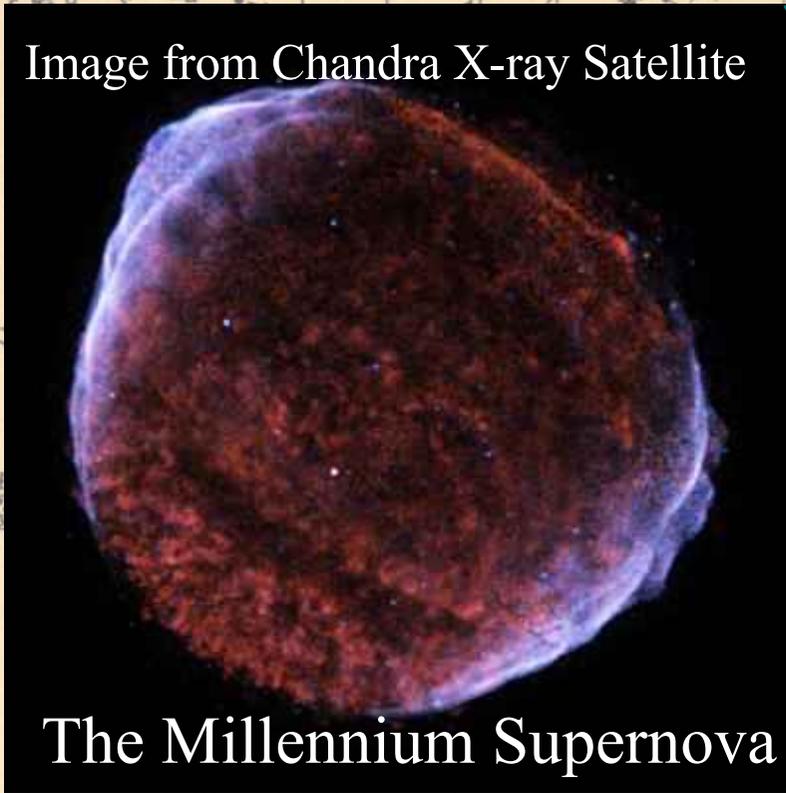
# The Incredible Expanding Crab

2008



© 2017 Detlef Hartmann

Image from Chandra X-ray Satellite



The Millennium Supernova

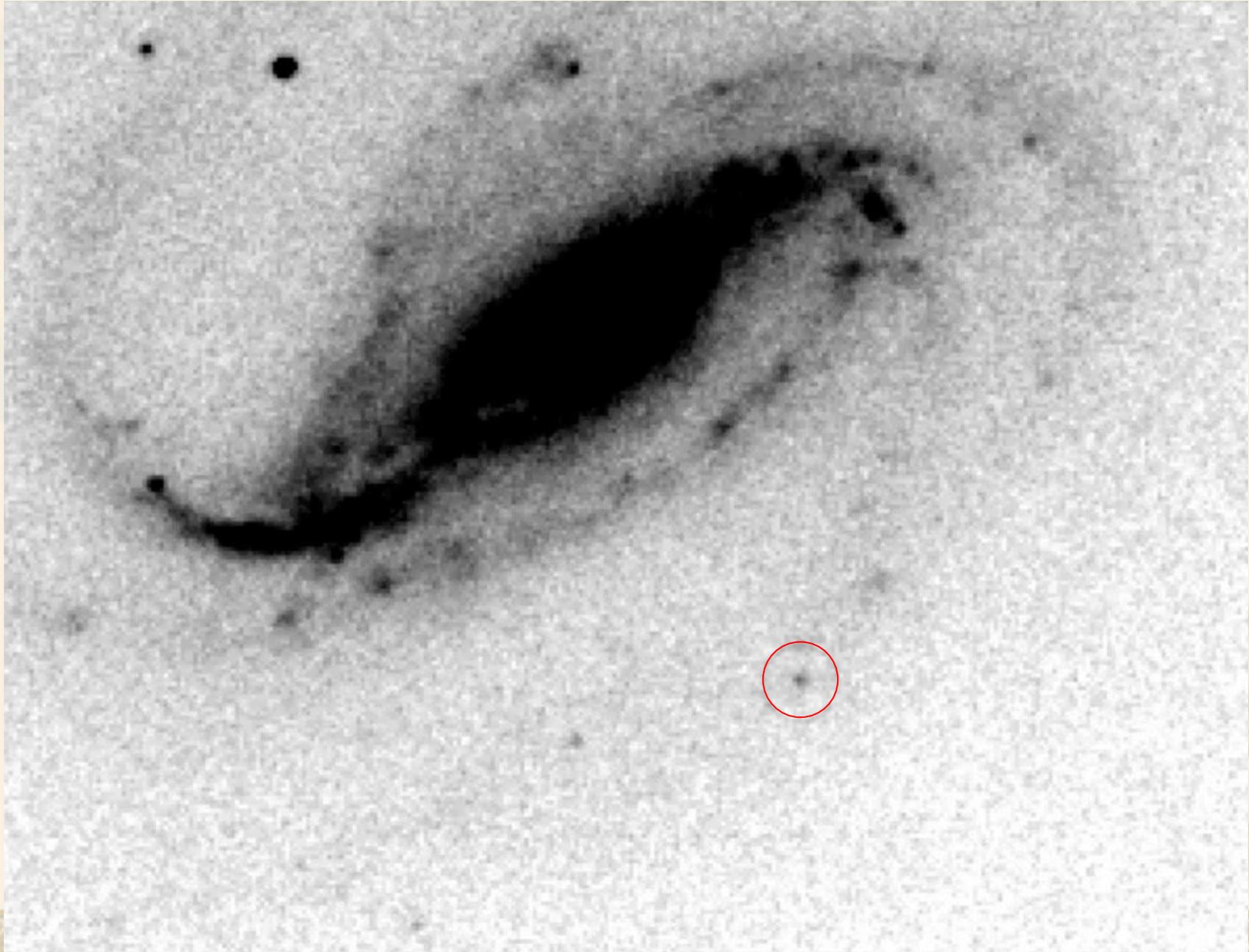
申八月乙亥宣和元年二月癸未八月癸未二年二月  
 辛巳八月己丑三年二月丙戌八月癸巳四年二月己  
 亥八月辛丑五年二月庚子八月丙子六年二月戊申  
 八月辛亥七年二月癸丑八月庚申建炎四年七月戊  
 辰皆見於丙  
 景星  
 開寶四年八月癸卯景星見最德三年四月戊寅周伯  
 星見出日南髮官西一度狀如半月有芒角煌煌然可  
 以鑿物歷唐曆東八月晦天輪入滿十一月復見在氏  
 自是常以十一月辰見東方八月西南入濁大中祥符  
 七年正月己酉合巽星見其年九月丙戌又見似彗有  
 尾而不長天聖元年二月己亥奇星見二年八月丙子  
 四年七月壬申又見明道二年二月戊戌合巽星見東  
 北方其色黃白光芒長二尺許景祐二年正月己丑奇  
 星又見政和三年二月辛卯八月己未嘉祐二年八月  
 庚午三年八月丙辰四年正月庚戌八月癸未五年八  
 月庚午六年正月癸丑八月壬辰七年正月辛亥八年  
 正月辛酉治平元年二月己丑七月癸巳二年二月癸  
 巳八月己亥三年正月庚辰八月庚戌奇星皆見  
 景星

On May 1, 1006, a star of the size of a quarter moon was seen. It was yellowish and shone brilliantly for more than 3 months.

**SN 1006**

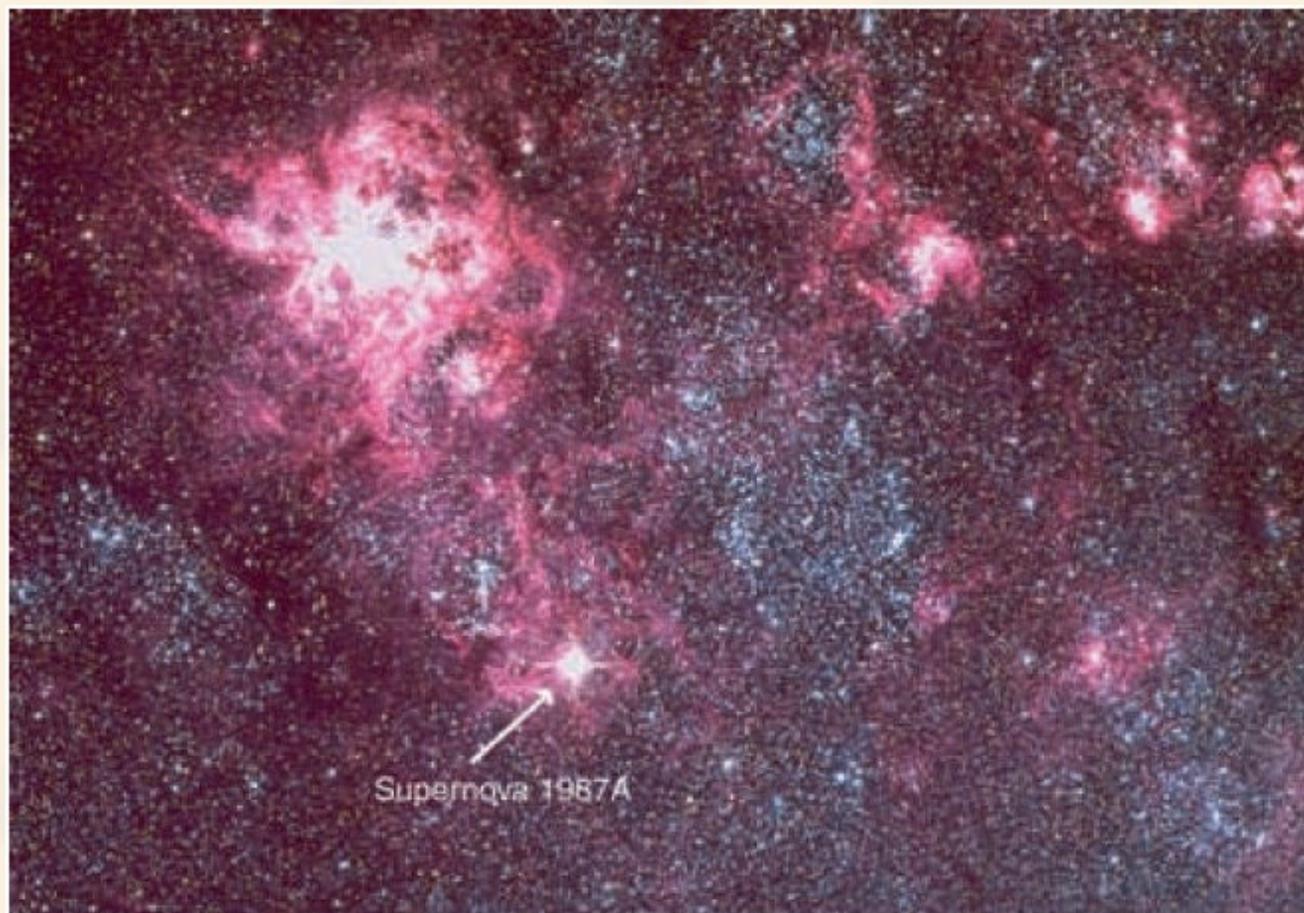
图 8-2-7 浑象东北方中外官星图——守山阁丛书本

# 在NGC613中发现的一颗超新星



SN1987A

1987年2月



**Figure 7.10** Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud. Image: European Southern Observatory.

(强、弱+电磁)

建造Kamioka, 为了测量质子的衰变 (GUT理论预言)

$$p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

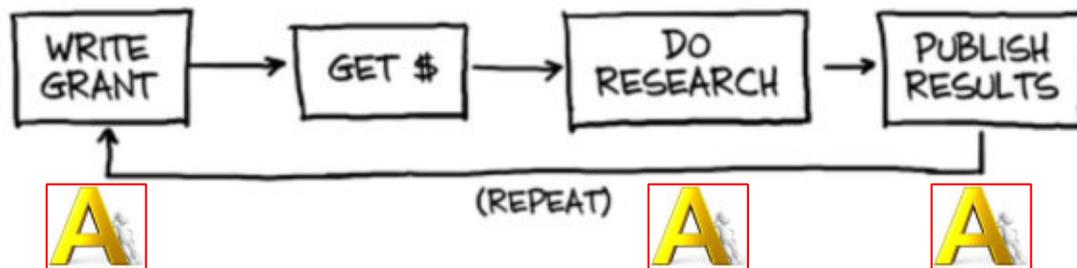
$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

但能观测中微子, 现在反而成了中微子探测器

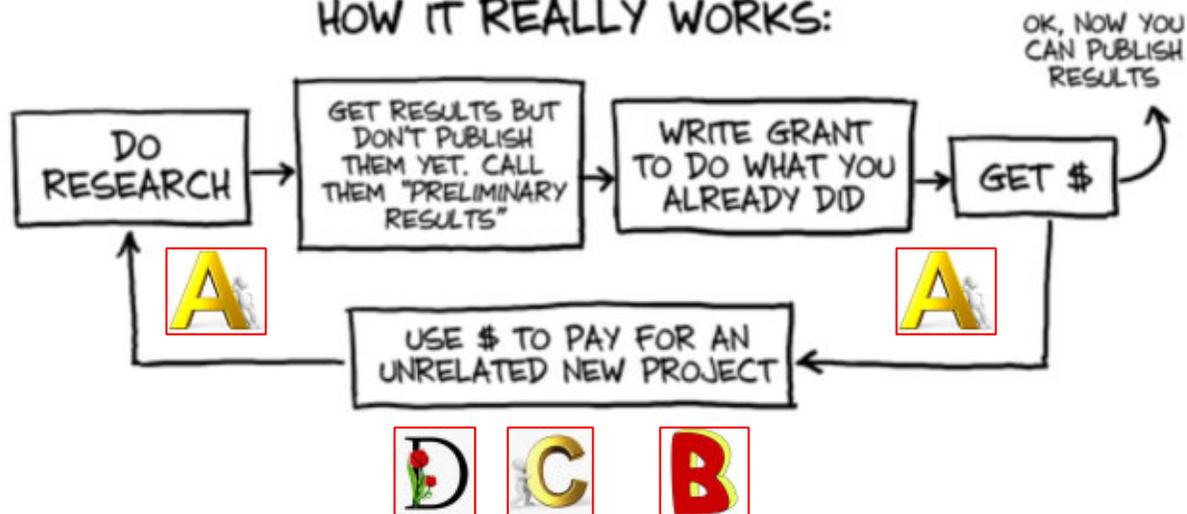
科研之不可规划性：  
想做的是A，真正做的是B，得到的结果是C

## THE GRANT CYCLE

HOW IT'S SUPPOSED TO WORK:



HOW IT REALLY WORKS:



自由探索研究  
与建制化科研  
都非常重要

# 超新星 SN 1987A 的中微子记录

探测器地点	中微子数目	持续时间
日本神冈, 铅矿	11	12.439s
美国俄亥俄, 莫顿盐矿	8	5.58s
前苏联, 巴克衫	5	~5s
意大利, Gran Sasso	之后在光学被观测到	(中微子比光学爆发提前4.6h, 但其他组为3h)

观测到来自SN1987A的24个中微子的意义：

1) 验证了核塌缩超新星爆发的图像：

爆发可产生 $\sim 10^{58}$ 个中微子

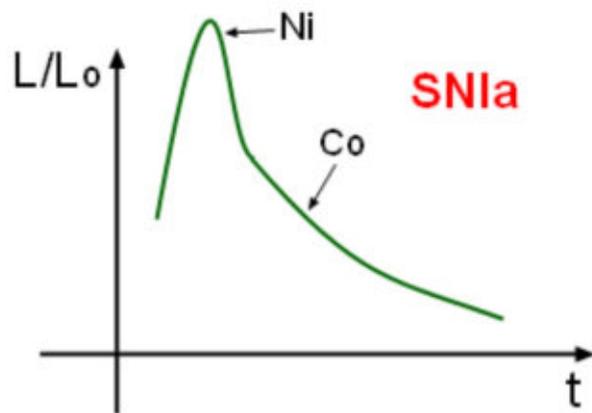
2) 得到了中微子质量的上限： $\sim 7-16\text{eV}$



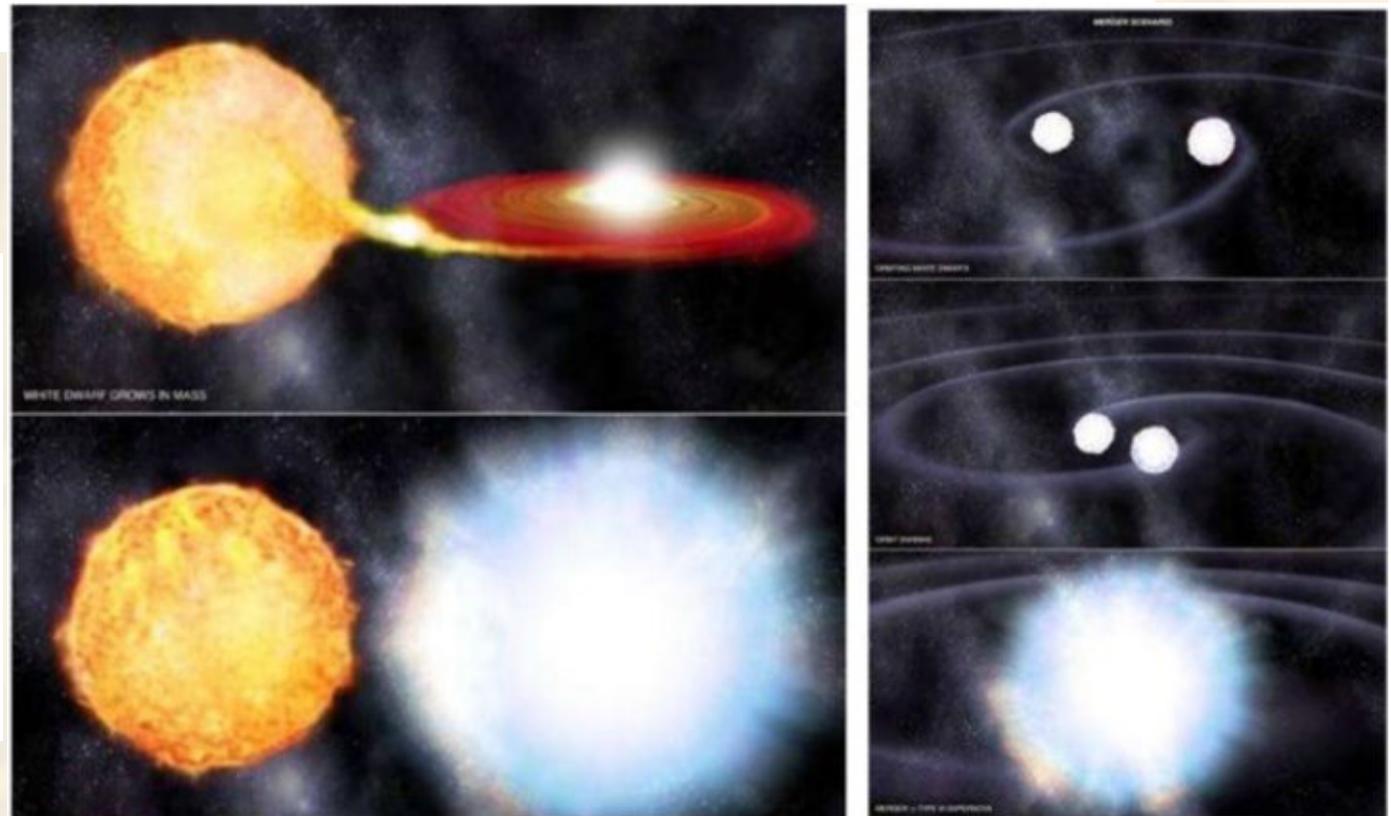
图：“第谷新星”的遗迹的多波段成像图（NASA）

1960年，霍伊尔（Fred Hoyle，1915-2001）与福勒（William Alfred Fowler，1911-1995）合作写了一篇论文，提出：有一些超新星来自白矮星的爆炸。这个想法是正确的。现在的理论研究和观测研究都表明：如果白矮星堆积物质的速度太快却没有及时喷发出去，就会迅速收缩、变热，然后彻底炸毁自身，成为“热核爆炸超新星”，对应的分类是Ia型。<sup>[8]</sup>两颗白矮星并合在一起，也会爆炸为Ia型超新星。

(王善钦)



Ia型超新星爆发的光变曲线

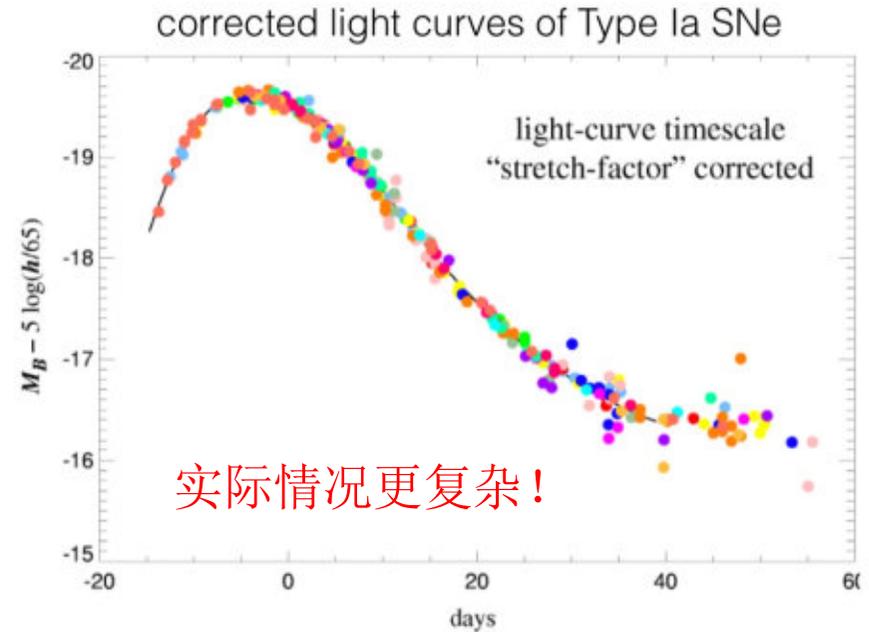


图：单个白矮星堆积伴星物质后爆炸为超新星（左）与两颗白矮星并合后爆炸为超新星（右）的艺术想象图。

(Credit: NASA/CXC/M Weiss)

Ia型超新星的亮度演化比较有规律，通过某些方法可以将众多远近不同的Ia型超新星的亮度演化曲线统一为同一个模板，定出其修正后的最亮值，这个值基本上是一样的。利用这个性质，可以将Ia型超新星作为标准烛光，探测几十亿光年之外的距离。1998年，两个互相竞争的小组据此推断出远处的Ia型超新星比正常膨胀的宇宙模型给出的亮度低一些，据此判断出宇宙在加速膨胀，进而给出了暗能量存在的证据。

# Type Ia supernovae – Standard candles



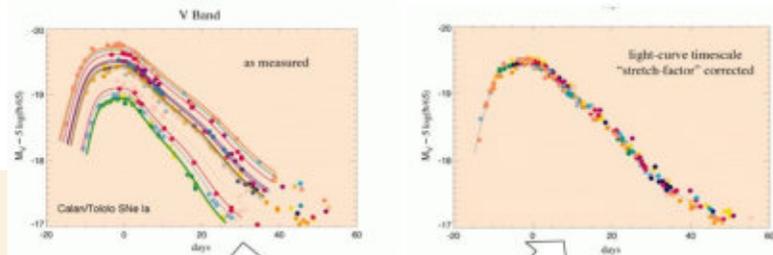
实际情况更复杂!

Decay of radioactive elements Kim, et al. (1997)



6 days 77 days

Supernova light curve stretch  $s$



$$M_B = M_{B_0} + \alpha(s - 1) - \beta c$$

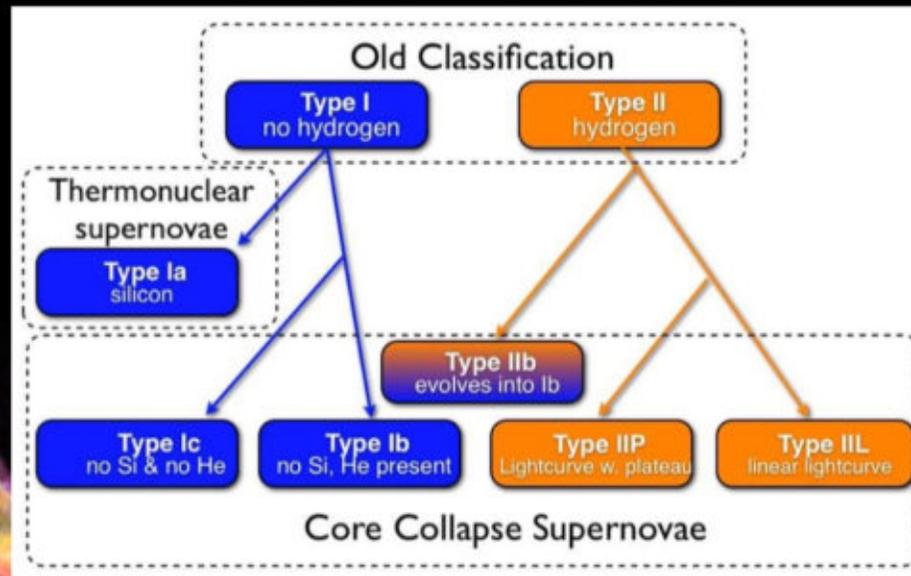
aka Phillips relation



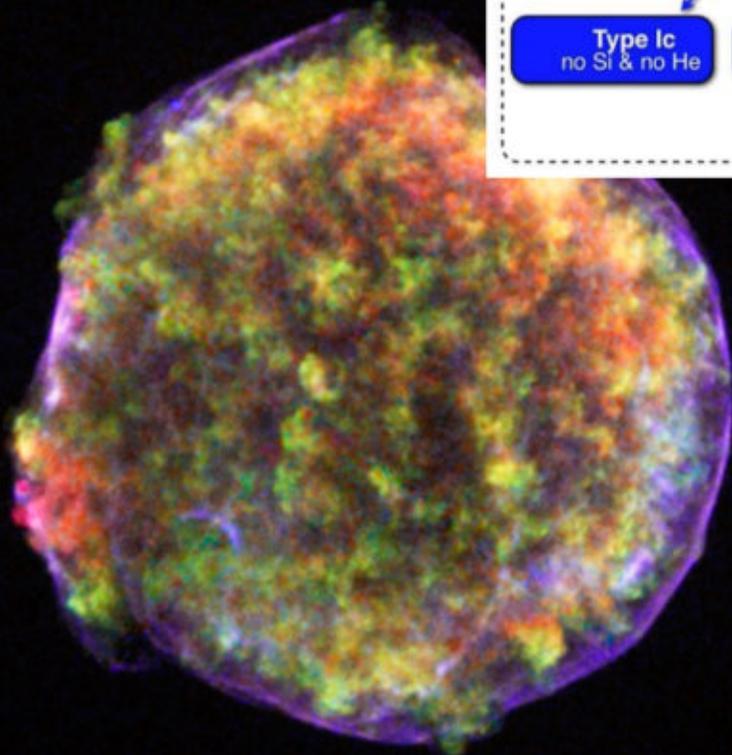
The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

# Supernova (SN) classification

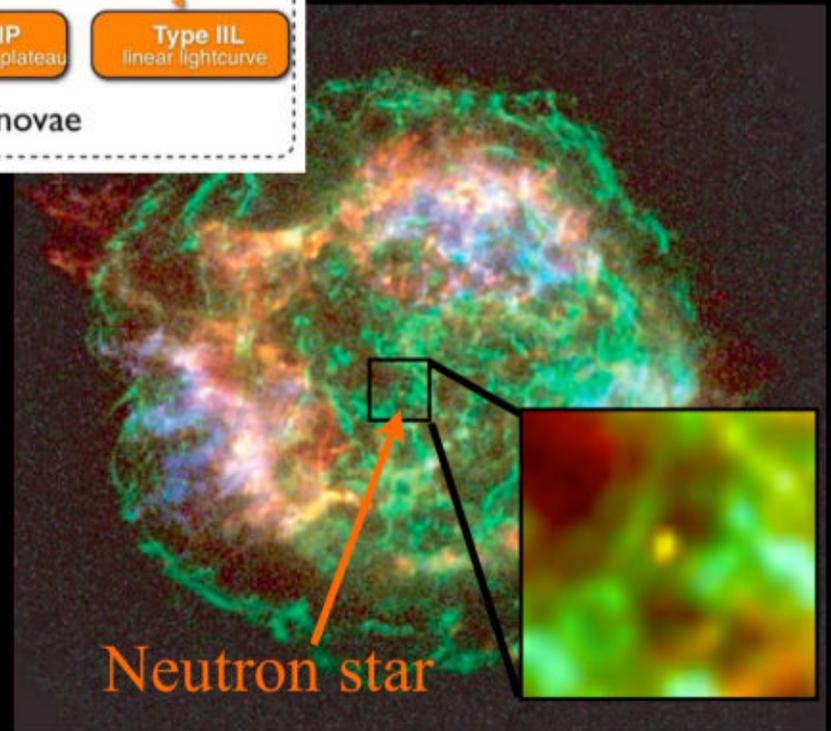


Vink 2011



Tycho (Type Ia)

credit: Warren & Hughes et al.



Cas A (core collapse)

credit: Hwang et al. 2004

*(from Ping Zhou)*

# 中子星

- ❖ 1932:Chadwick发现中子
- ❖ 1932:Landau提出中子星的概念
- ❖ 1934:Baade & Zwicky提出中子星诞生于超新星爆发
- ❖ 1939:Oppenheimer首次计算了中子星的结构(基于Tolman-Oppenheimer-Volkoff方程)
- ❖ 1962:Giacconi发射火箭, X-Ray探测器
- ❖ 1964: 发现Crab星云为 X-Ray源
- ❖ 1967:Hewish & Bell发现第一个脉冲星

- ❖ 1968: Gold, Gunn, Ostriker & Gunn提出脉冲星为快速转动的强磁场中子星
- ❖ 1968: 在蟹状星云中发现了一个脉冲星
- ❖ 1970: Uhuru卫星发射升空 (NASA) 发现了300多个X-Ray双星
- ❖ 1970s: 10个其它的卫星发射
- ❖ 1975: Hulse & Taylor发现双射电脉冲星PSR1913+16
- ❖ 1979: 软重复爆发1979.3.5
- ❖ 1982: Backer, Kulkarni, Heiles, Davis, & Goss发现第一个毫秒脉冲星PSR1937+215
- ❖ 1987: SN1987A发现



# Discovery of pulsars in 1967

1974  
No Bell  
Prize



Jocelyn Bell Burnell



## Special Breakthrough Prize In Fun

Breakthrough Prize Recognizes Bell Burnell  
Scientific Leadership.

50 Years After Her Significant Role in the Discovery

**Baidu 百科**  
**主要看气质!** (2015年热门话题)  
 引爆全民跟风晒气质图!  
 ↓ ↓ ↓ ↓  
**God wants to check air quality!**

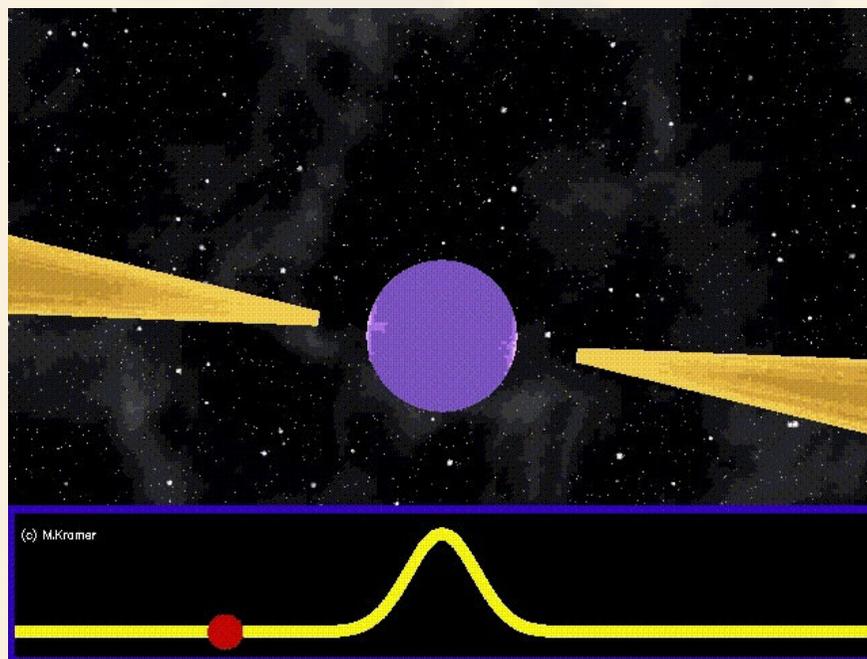
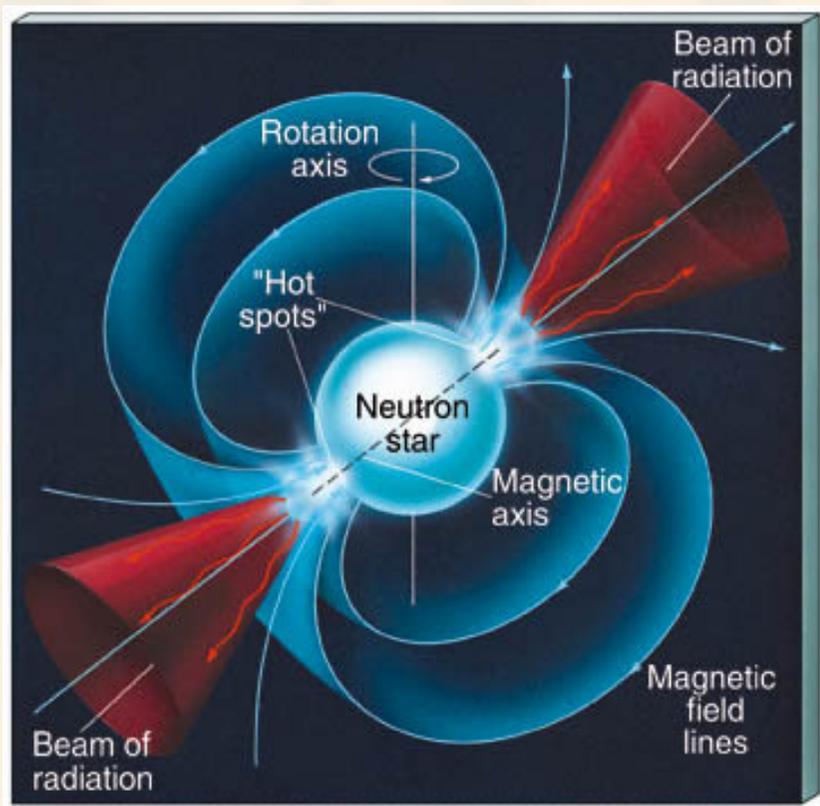


September 06, 2018

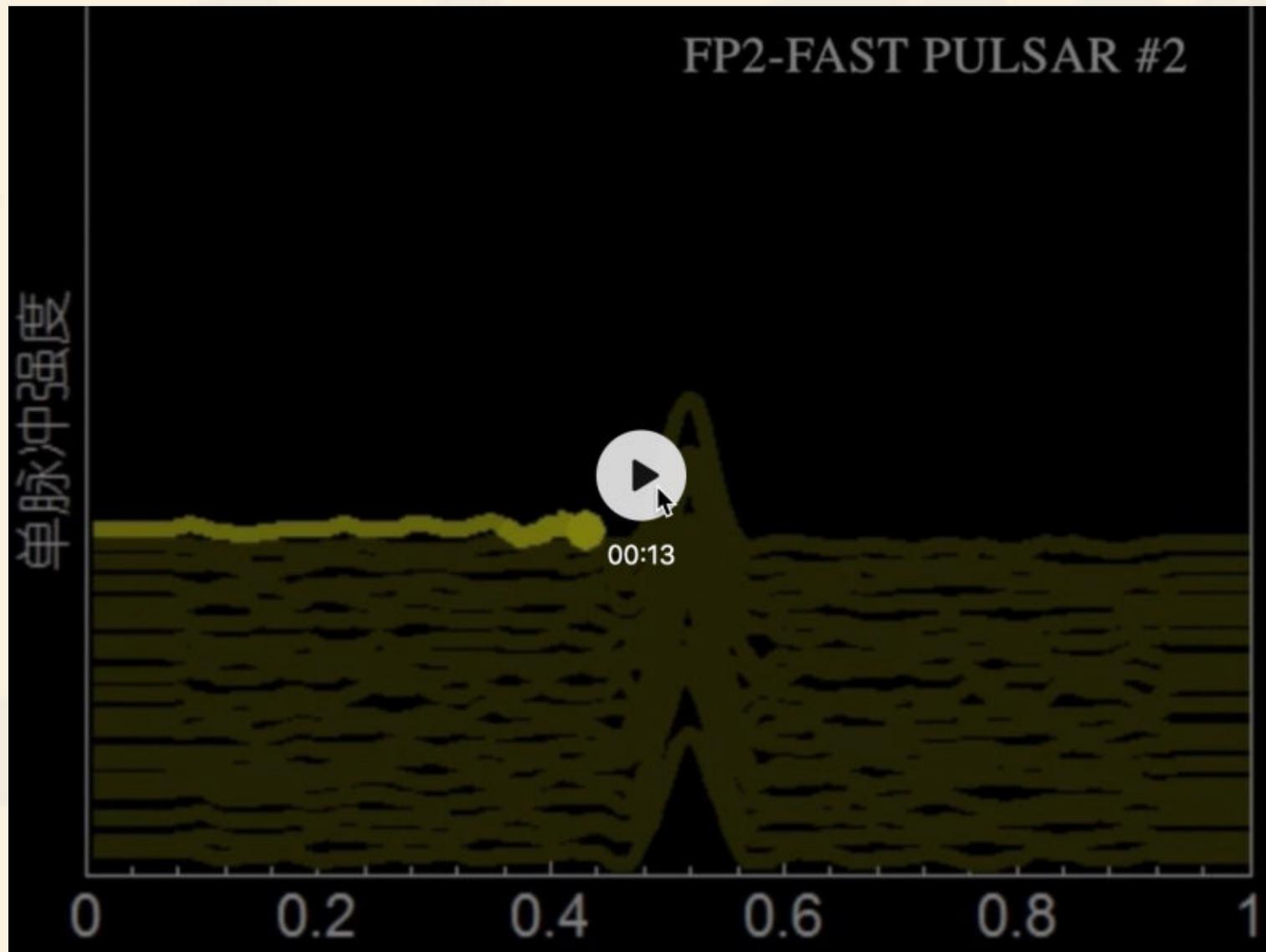
## Discovery Of Pulsars

Neutron Stars and a Lifetime of Inspiring

Wins \$3 Million Physics Prize.

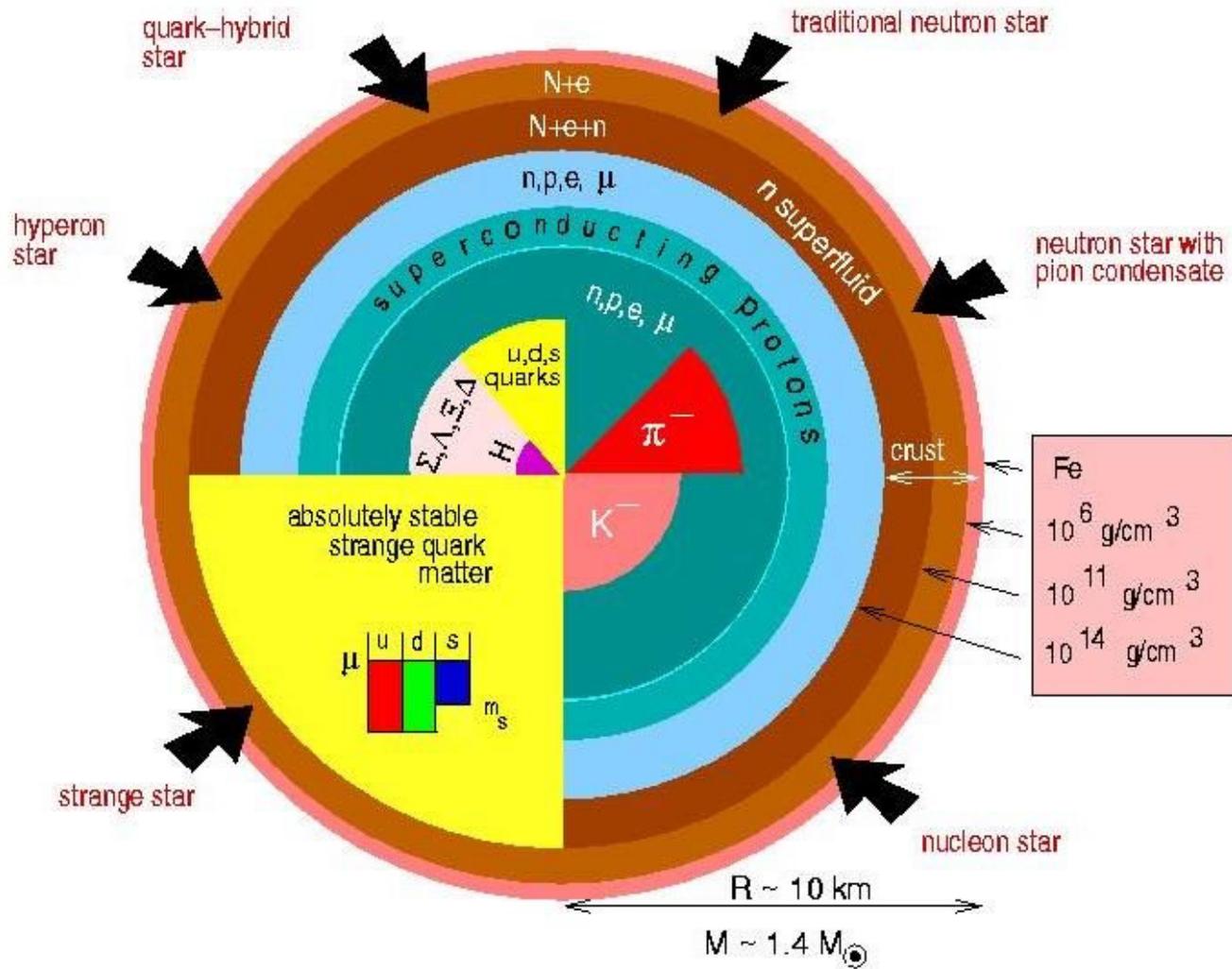


实锤！一特殊伽玛射线双星中存在中子星！



FAST发现的第一颗脉冲星发出的脉冲（王培、李菡、高鹤）

# 中子星的内部结构



通过界面模式探测  
中子星相变（马怡秋 华中科技大学）

# 中子星的特性

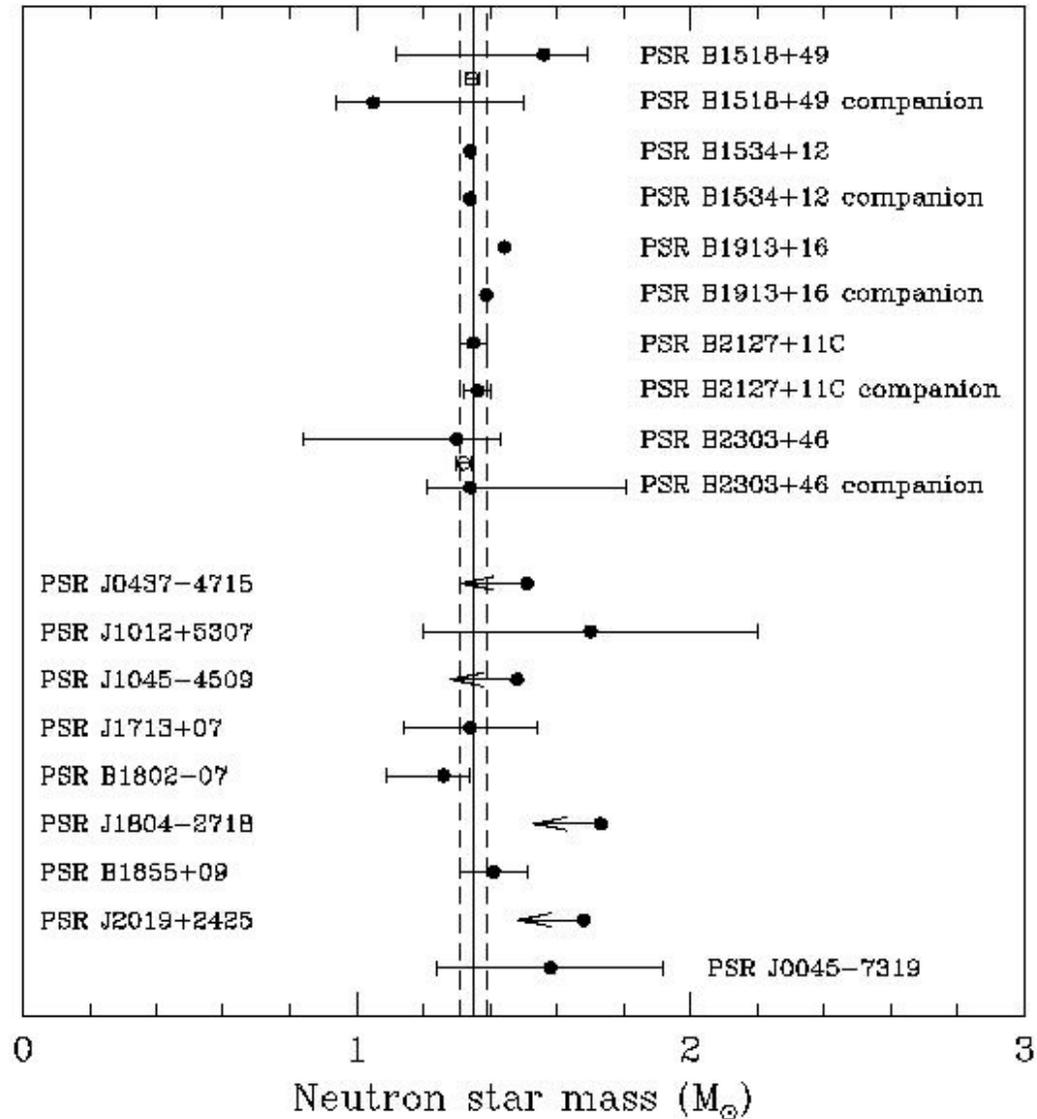
❖ 质量大多

~ 1.3-1.5  $M_{\text{sun}}$   
( $3 \cdot 10^{30}$  kg)

❖ 半径 ~ 10 km

❖ 密度 ~  $10^{14}$  g/cc

❖ 磁场 ~  $10^8$ - $10^{12}$   
Gauss



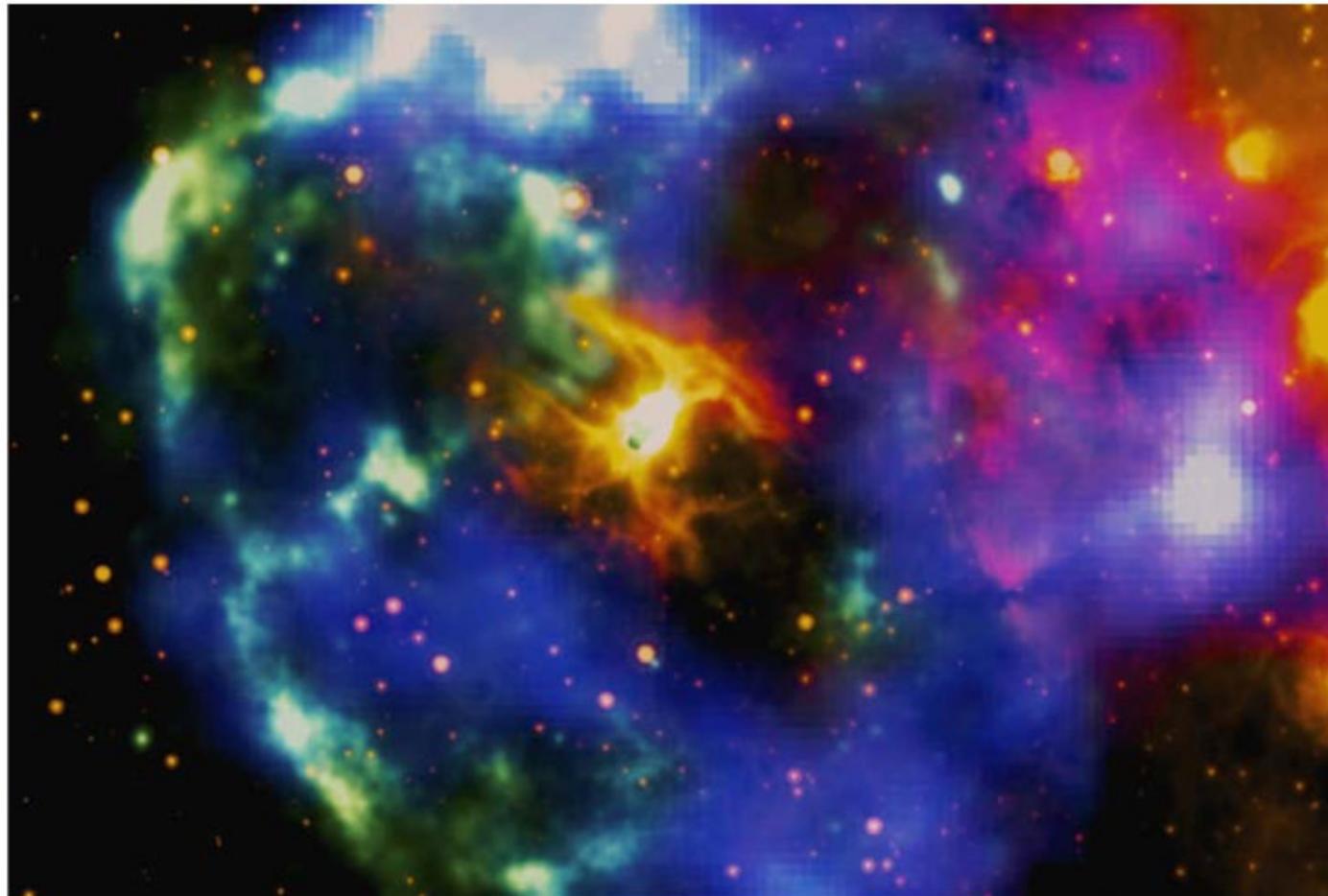
# Lightest neutron star ever found could contain compressed quarks

A neutron star that is lighter than seems possible could be so small because it is made up of compressed versions of particles called strange quarks



SPACE 24 October 2022

By [Alex Wilkins](#)



The supernova remnant HESS J1731-347 (yellow and white) hosting a strangely small neutron star  
Victor Doroshenko

# A strangely light neutron star within a supernova remnant

Received: 31 March 2022

Accepted: 1 September 2022

Published online: 24 October 2022

 Check for updates

Victor Doroshenko  , Valery Suleimanov , Gerd Pühlhofer  and Andrea Santangelo 

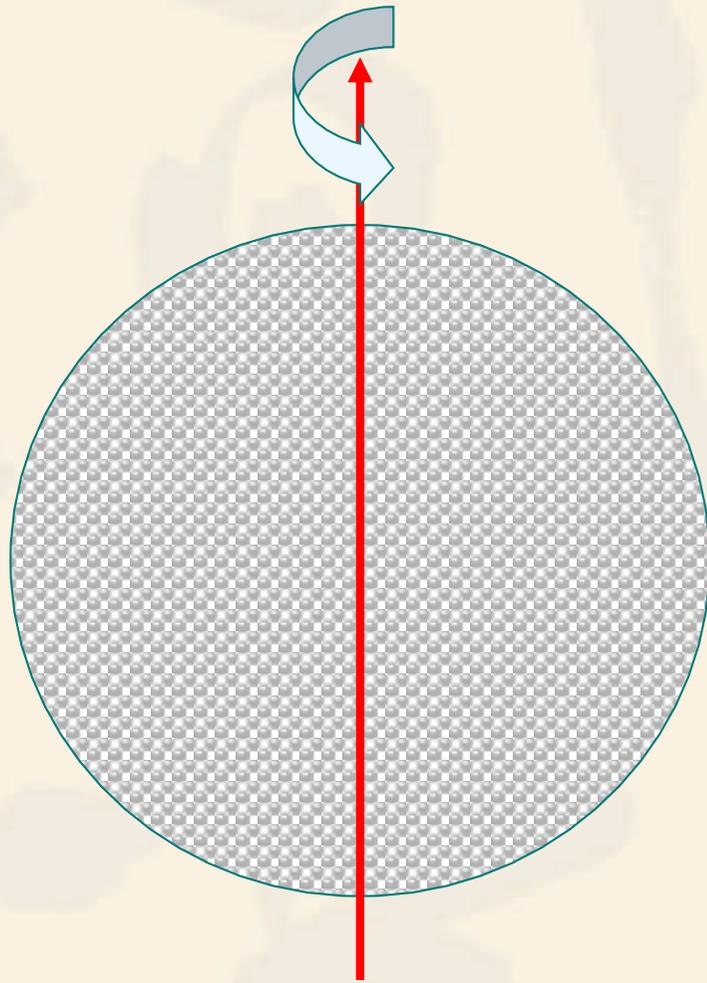
To constrain the equation of state of cold dense matter, astrophysical measurements are essential. These are mostly based on observations of neutron stars in the X-ray band, and, more recently, also on gravitational wave observations. Of particular interest are observations of unusually heavy or light neutron stars which extend the range of central densities probed by observations and thus permit the testing of nuclear-physics predictions over a wider parameter space. Here we report on the analysis of such a star, a central compact object within the supernova remnant HESS J1731-347. We estimate the mass and radius of the neutron star to be  $M = 0.77^{+0.20}_{-0.17} M_{\odot}$  and  $R = 10.4^{+0.86}_{-0.78}$  km, respectively, based on modelling of the X-ray spectrum and a robust distance estimate from Gaia observations. Our estimate implies that this object is either the lightest neutron star known, or a ‘strange star’ with a more exotic equation of state. Adopting a standard neutron star matter hypothesis allows the corresponding equations of state to be constrained.

## List of most massive neutron stars [[edit](#)]

Below is a list of neutron stars which approach the TOV limit.

Name	Neutron star mass (solar masses)	Distance from Earth (light years)	Location <sup>[16]</sup>	Notes
PSR J1748–2021B	2.74 <sup>+0.21</sup> <sub>−0.21</sub> <sup>[17]</sup>	27,700	15:28:01 −20:21:35	Mass value considered dubious, obtained via analysis of orbital inclination angle
<a href="#">PSR J1311–3430</a>	2.15–2.7	6,520–12,720 <sup>[18]</sup>	13:11:50 −34:30:07	Black Widow Pulsar, mass determined by spectroscopic observation
PSR J2215+5135	2.27 <sup>+0.17</sup> <sub>−0.15</sub> <sup>[7]</sup>	10,000	22:15:33 +51:35:36	
XMMU J013236.7+303228	2.2 <sup>+0.8</sup> <sub>−0.6</sub> <sup>[19]</sup>	2,730,000	01:32:37 +30:32:30	in <a href="#">M33</a> , <a href="#">HMXB</a> system
PSR J0740+6620	2.14 <sup>+0.10</sup> <sub>−0.11</sub> <sup>[8]</sup>	4,600	07:40:46 +66:20:34	
<a href="#">PSR B1957+20</a>	1.66–2.4	6,500	19:59:37 +20:48:15	Prototype star of Black Widow Pulsars
<a href="#">PSR J0348+0432</a>	2.01 <sup>+0.04</sup> <sub>−0.04</sub>	2,100	03:48:44 +04:32:11	
<a href="#">PSR J1614–2230</a>	2.01 <sup>+0.04</sup> <sub>−0.04</sub>	3,900	16:14:37 −22:30:31	
PSR B1516+02B	1.94 <sup>+0.17</sup> <sub>−0.19</sub> <sup>[20]</sup>	24,500	15:18:31 +02:05:15	in Globular Cluster <a href="#">M5</a>
<a href="#">Vela X–1</a>	1.88 <sup>+0.13</sup> <sub>−0.13</sub>	6,200±650	09:02:07 −40:33:17	Blue supergiant companion, prototypical detached HMXB system

\* 中子星的自转很快：最小的周期1.39ms



大质量恒星核，塌缩之前  
(大的半径，自转速度小)



中子星  
(小的半径，  
自转速度快)



Slow

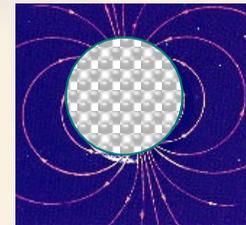
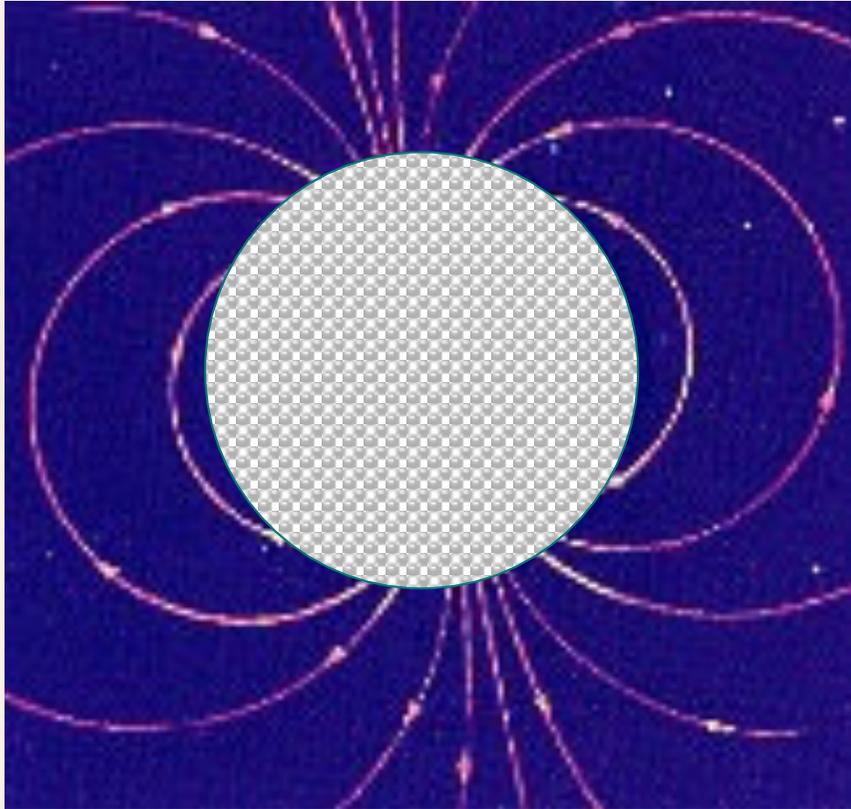


Fast

$$I\omega = I\omega$$

角动量守恒

\* 中子星一般表面磁场很强 . . .



磁通量守恒

脉冲星是宇宙中最精确的时钟。因为这个原因，脉冲星是天文学的重要研究对象之一。脉冲星是向地球发出周期信号的中子星，直径大约二十千米，质量和太阳差不多，非常致密，是大质量恒星死亡的产物，在银河系中主要分布在银道面上和球状星团（分布在银河系各处，及呈球状或椭球状的星团）中；在近邻的大小麦哲伦星系中也有发现。年轻的脉冲星具有较快的自转速度，比如蟹状星云中的脉冲星每秒钟会旋转约30圈。脉冲星通过旋转将自身动能转化成其它形式的能量，比如电磁波，向宇宙空间释放，并因此越转越慢，并在数千万年后由于自转太慢而不能发射电磁波。如果脉冲星存在物质吸积，如存在于双星系统中，伴星的物质可能就会受到脉冲星吸引而落向脉冲星。物质吸积同时给脉冲星带来了外界的能量，使得脉冲星自转速度的减慢率下降，甚至可以加速脉冲星的自转。毫秒脉冲星是自转周期30毫秒(也有定义为20毫秒)以下的脉冲星，就是物质吸积产生的。这样的外界能量注入可以使得脉冲星，尤其是毫秒脉冲星，能在甚至诞生百亿年后依然发射出电磁波并被探测到。

*(钱磊、潘之辰，中国科学院国家天文台)*

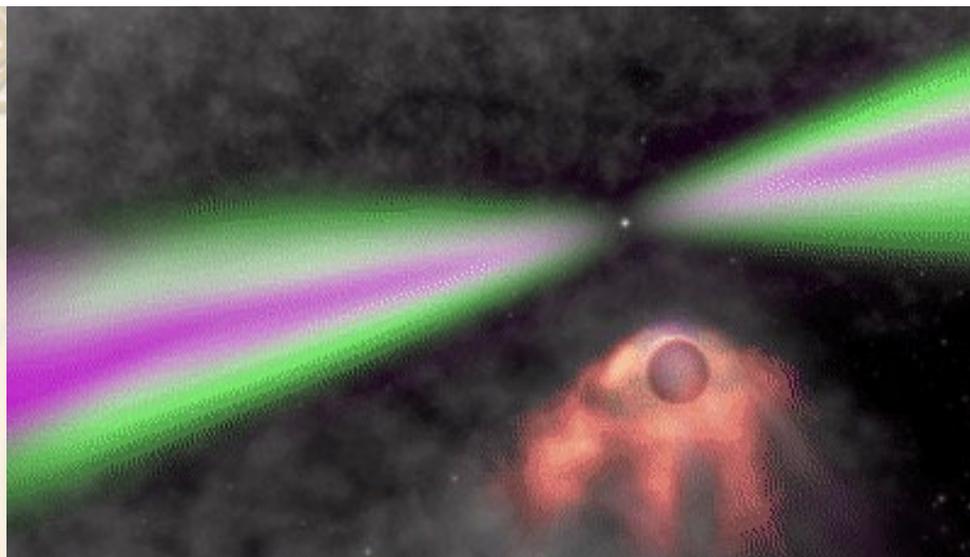


图1: 中间是脉冲星, 围绕脉冲星运动的是它的伴星, 一个小质量恒星。可以看到恒星物质受脉冲星影响正在脱离, 随后被脉冲星吸积或者向宇宙空间布散。图片来源:

NASA。 <https://svs.gsfc.nasa.gov/11215>



图4, 蓝色的是脉冲星, 红色的是一个低质量恒星。可以看到恒星的物质被脉冲星吸积。而在双星轨道运动过程中, 存在恒星遮挡脉冲星的情况, 即有掩食发生。图片来源:

NASA。 <https://svs.gsfc.nasa.gov/10625>

# 慧眼卫星直接测量到宇宙迄今最强磁场

文章来源：高能物理研究所

发布时间：2020-09-07

硬X射线调制望远镜卫星（即慧眼卫星）团队通过对X射线吸积脉冲星的详细观测，采用直接测量的方法得出其最强磁场，这是迄今为止，人类直接且非常可靠地测量到的宇宙中的最强磁场。该结果于8月10日在国际期刊*Astrophysical Journal Letters*上发表。

2017年8月，科研人员利用慧眼卫星对X射线吸积脉冲星GRO J1008-57的一次暴发活动进行了详细观测，首次在其X射线能谱中以高于20倍标准偏差的高置信度在90千电子伏特(keV)附近发现了一条回旋吸收线。根据理论推断，该回旋吸收线对应的中子星表面磁场强度高达约10亿特斯拉，比目前地球实验室中能够产生的几十特斯拉的最强磁场高几千万倍。该项研究工作主要由中国科学院高能物理研究所与德国图宾根大学合作完成。



吸积脉冲星艺术图



慧眼卫星艺术图



中子星与  
热吸积流

## 寻找中子星

中子星表面应该很热:  $T \cong 10^6 \text{ K}$

$$\text{光度} = \text{表面面积} \times \sigma T^4$$



小



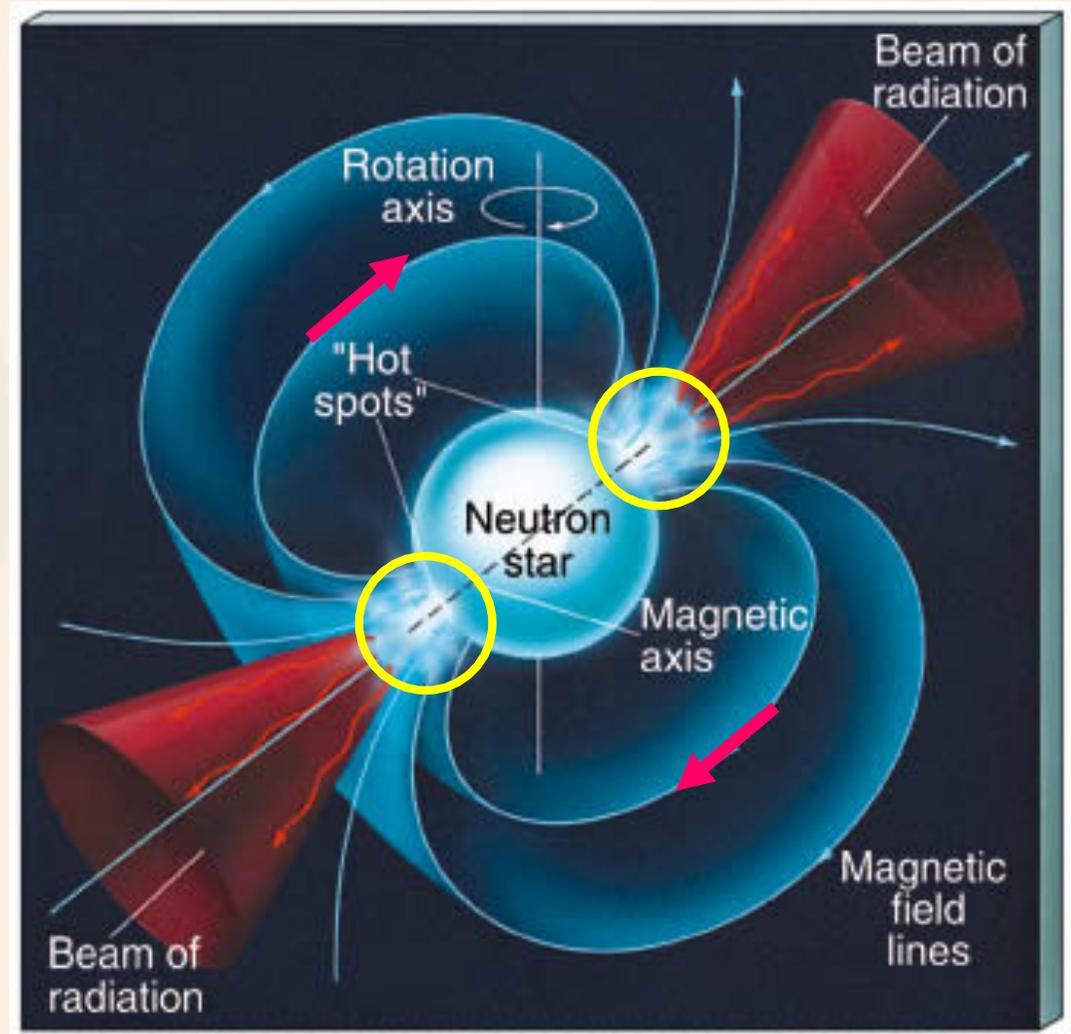
很小!

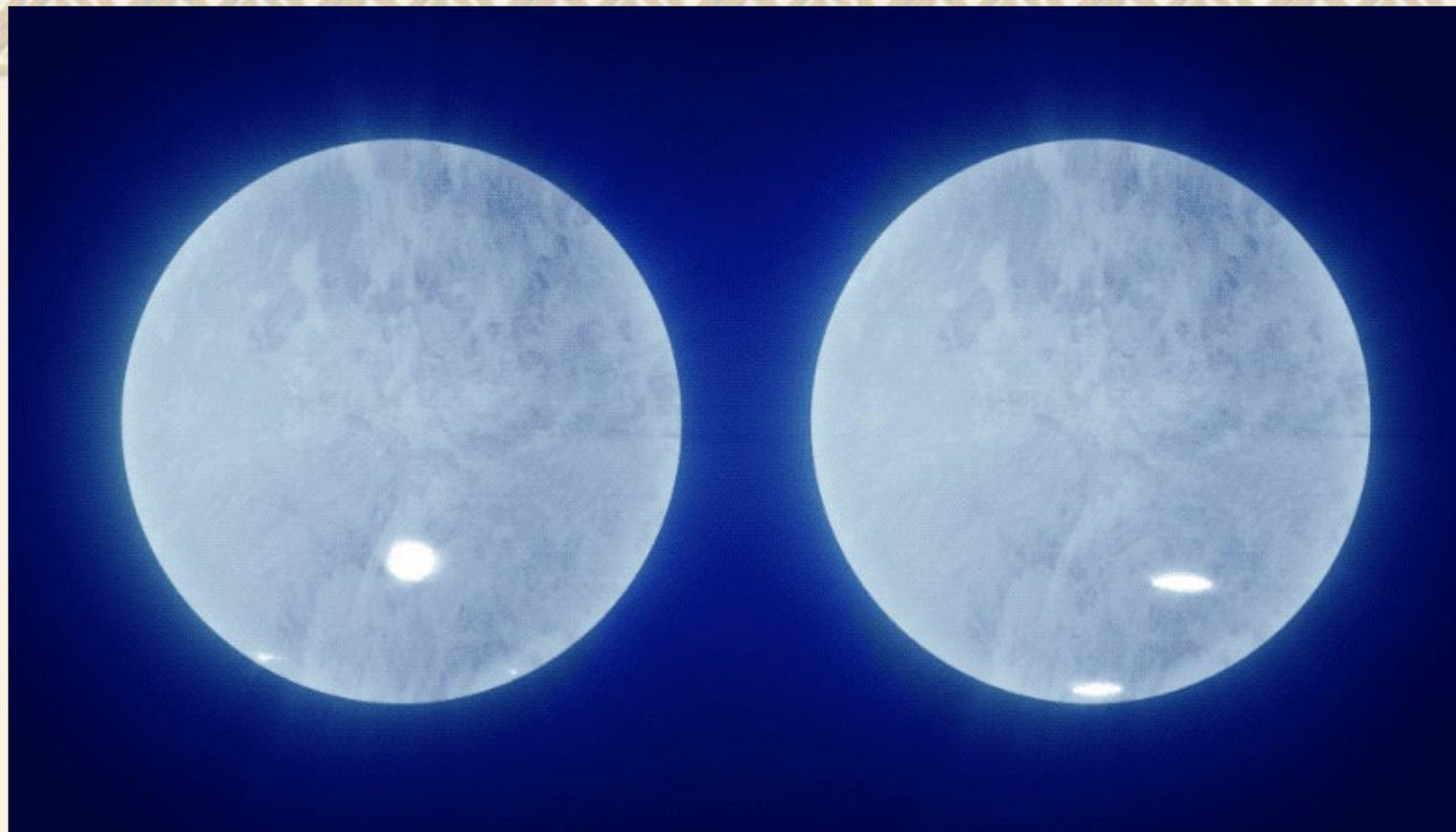


非常高

## 转动能转化为电磁辐射

- 转动磁场产生电场
- 电场沿着磁力线加速电子
- 电子辐射 — 主要在磁场很强的区域





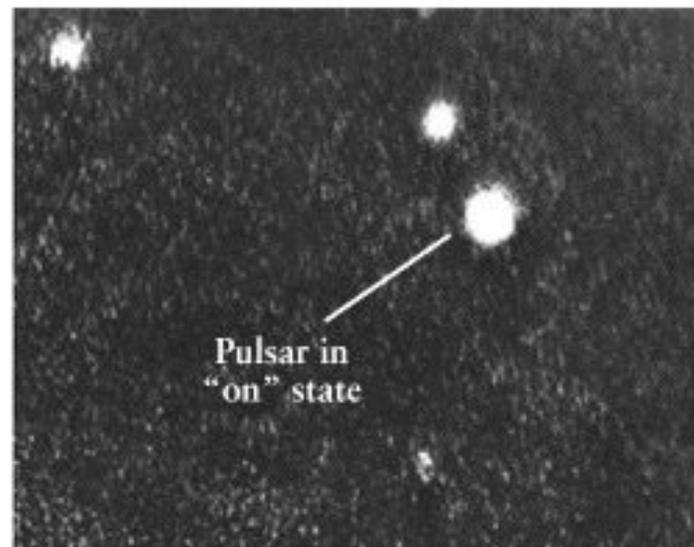
[https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus\\_on\\_NICER\\_Constraints\\_on\\_the\\_Dense\\_Matter\\_Equation\\_of\\_State](https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_NICER_Constraints_on_the_Dense_Matter_Equation_of_State)

这两个团队的结果意味着这颗脉冲星的南极区域至少有两个热斑，甚至可能有三个热斑。此前公认的理论假定中子星只有两个磁极，因此应该只有两个热斑。而此次发现仅在该脉冲星的南半球就发现了三个热斑。磁极总是成双成对的出现。因此，这颗脉冲星整体上至少应有四个热斑甚至可能有六个热斑（三个在南极，另外的热斑会出现在北极），对应的是四个甚至六个磁极，这简直是三头六臂的脉冲星。这个结果直接颠覆了此前教科书里公认的中子星拥有两个磁极的磁场结构模型。

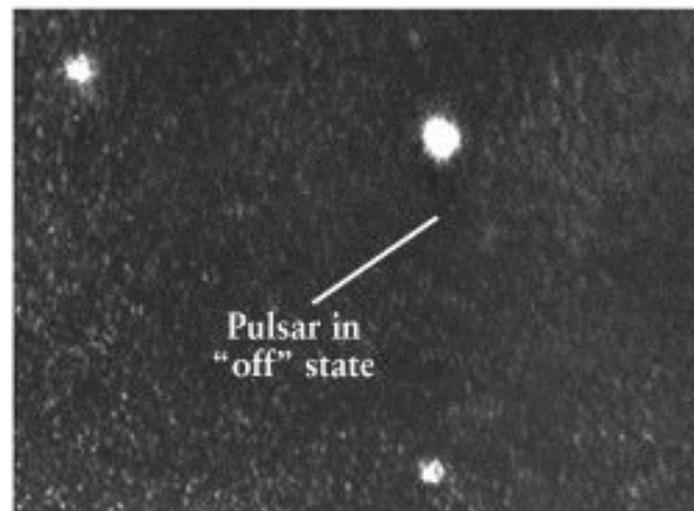
# 蟹状星云脉冲星



a.



Pulsar in  
"on" state



Pulsar in  
"off" state

b.

# 蟹状星云脉冲星：Chandra观测

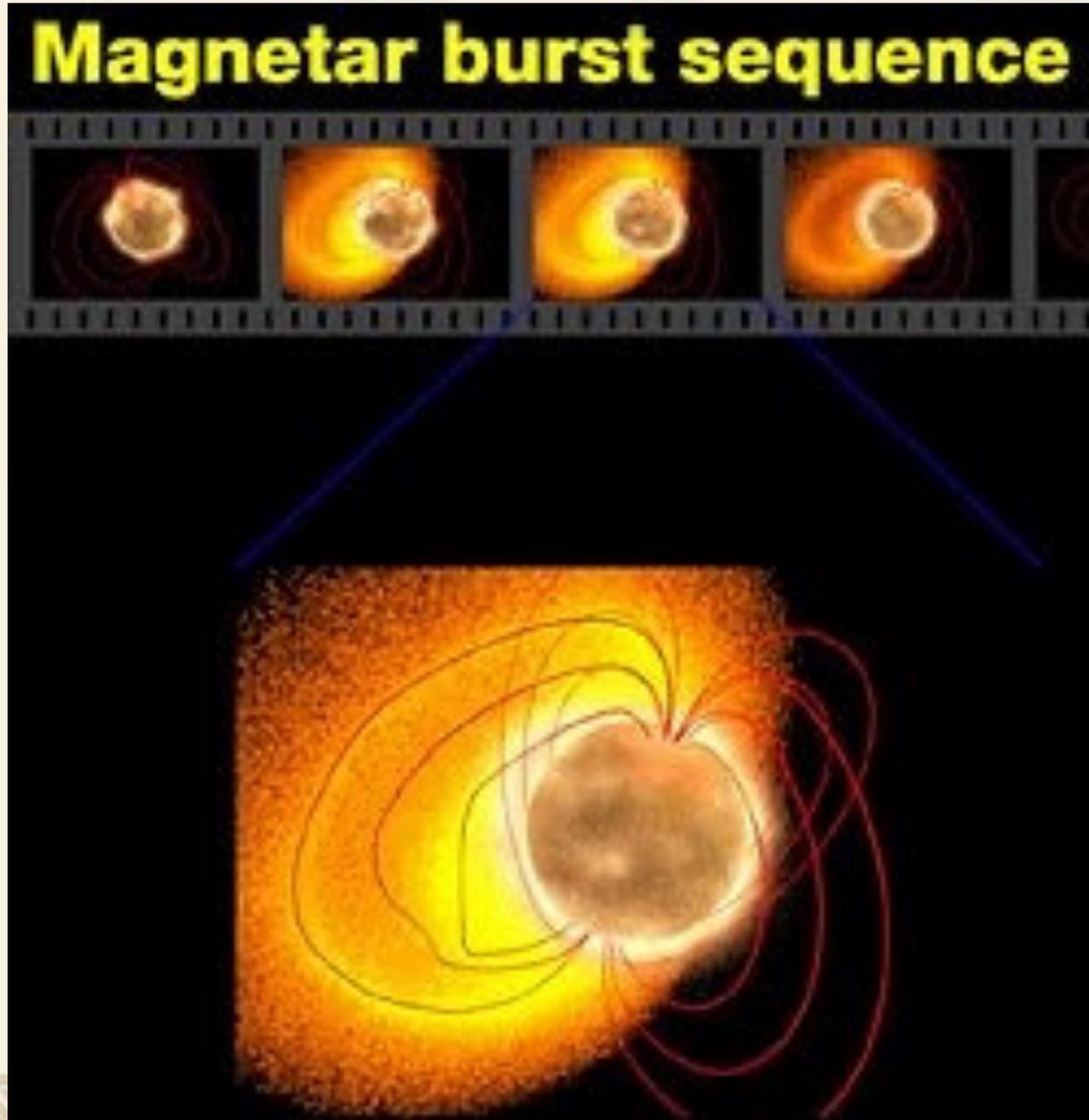


X射线脉冲星极冠  
区吸积过程（中山  
大学 纪龙）



理解独特的  
高能脉冲星

# 磁星/磁陀星 (Magnetars)



磁场极强  
( $\sim 10^{15}\text{G}$ )，在中子星表面产生星震

星震产生巨大的X射线和 $\gamma$ 射线爆发

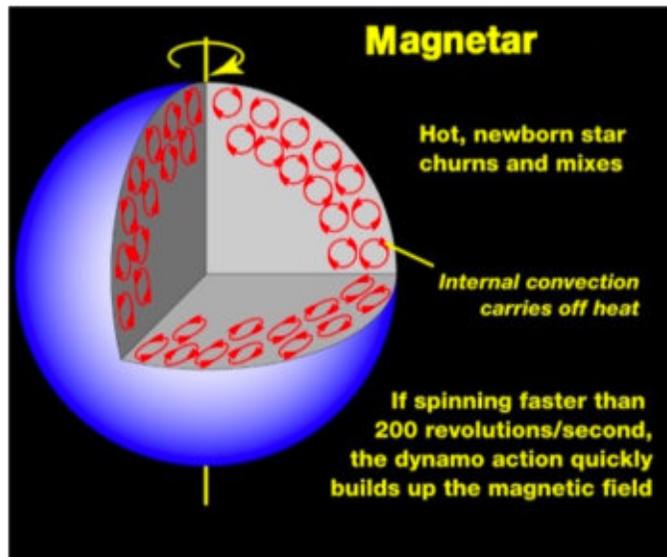
爆发的能源来自磁能

# Formation mechanism of magnetars

## Dynamo origin

(Thompson & Duncan 1993; Heger + 2005)

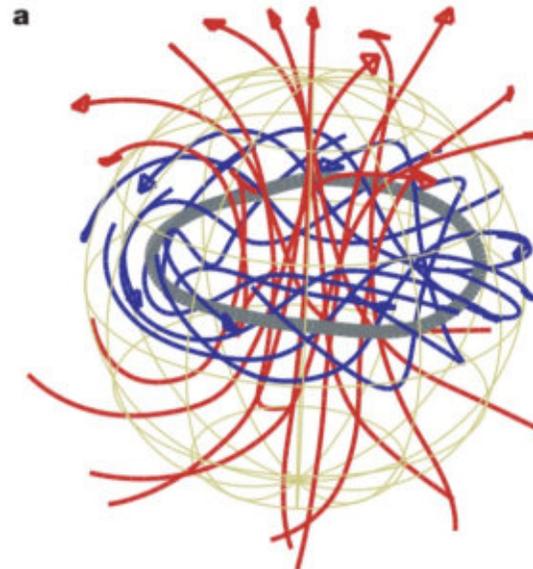
- rapid initial spin  $P < \sim 5$  ms
- energetic supernova  $\sim 10^{52}$  erg
- very massive stars ( $M > 25 M_{\text{sun}}$ )



## Fossil field origin

(Ferrario & Wickramasinghe 2006)

- descendants of stars with very high magnetic fields

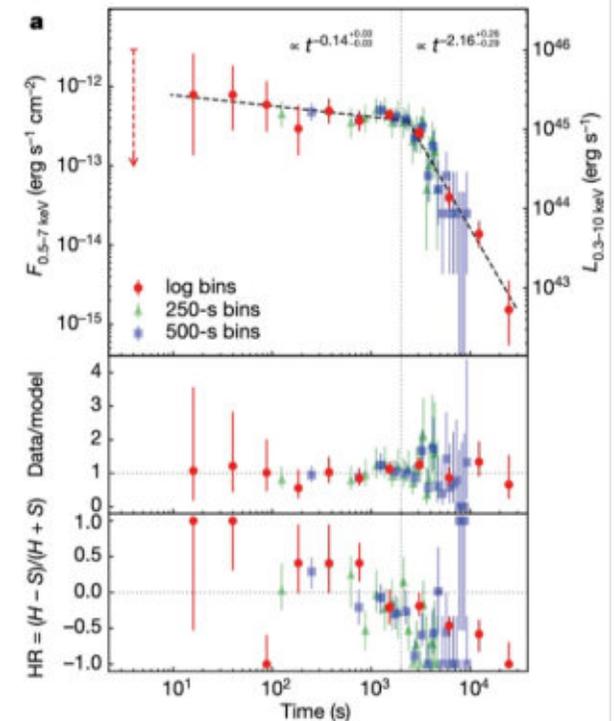


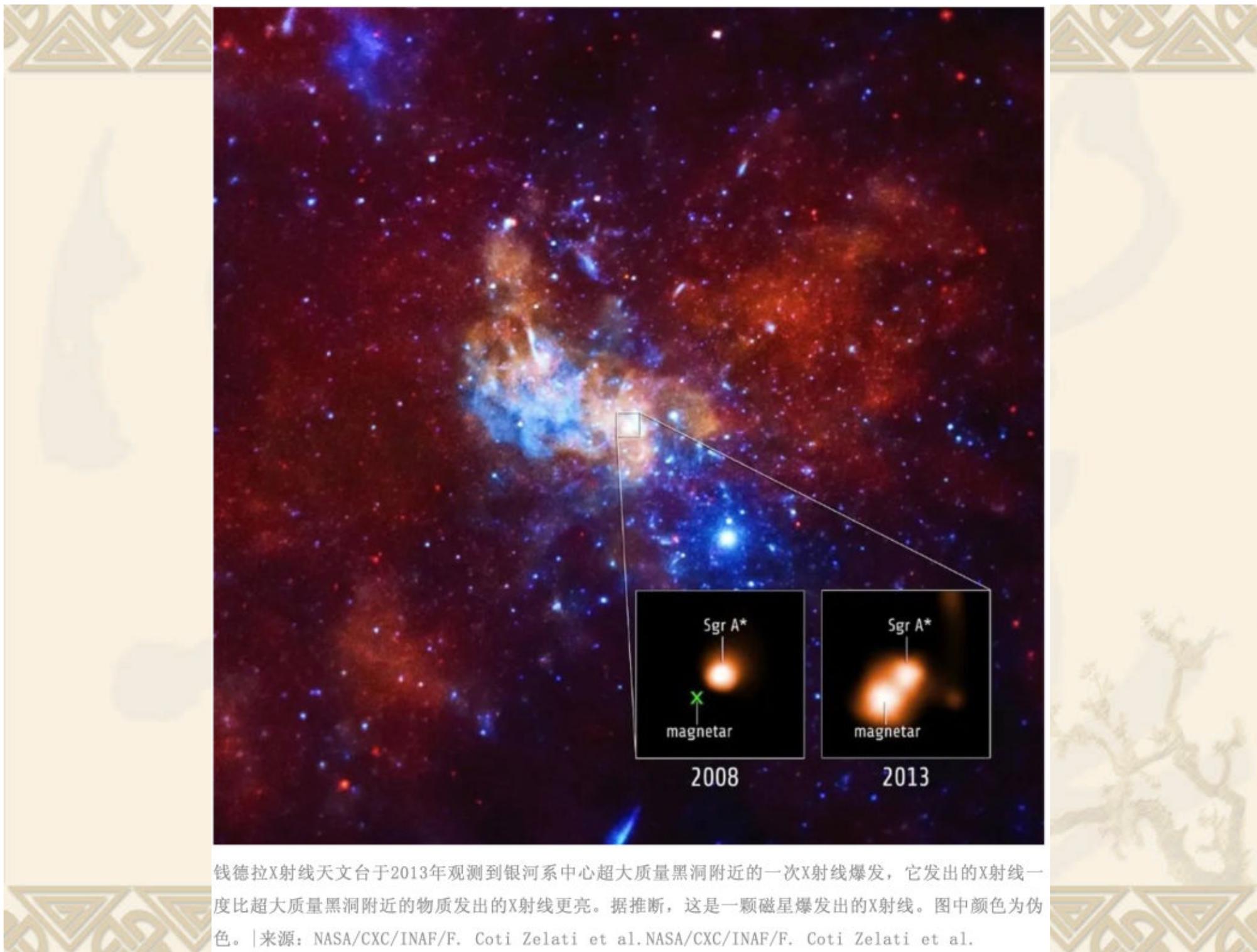
Braithwaite & Sprui 2004

## Double NS merger

(Bruno & Rosalba 2013; Xue et al. 2019)

- do not produce a lot of intermediate-mass elements





钱德拉X射线天文台于2013年观测到银河系中心超大质量黑洞附近的一次X射线爆发，它发出的X射线一度比超大质量黑洞附近的物质发出的X射线更亮。据推断，这是一颗磁星爆发出的X射线。图中颜色为伪色。|来源：NASA/CXC/INAF/F. Coti Zelati et al. NASA/CXC/INAF/F. Coti Zelati et al.

# Two Sides of the Same Star



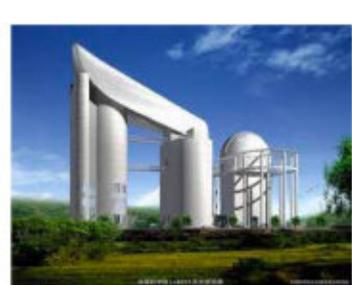
Video Length: 3:43

A neutron star comes from a large star that has run out of fuel, and exploded as a supernova. First it becomes a radio pulsar and later becomes a magnetar. Or maybe it's the other way around!

## Video Links:

[Two Sides of the Same Star - mp4](#)

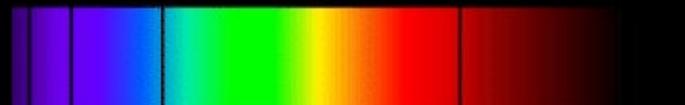
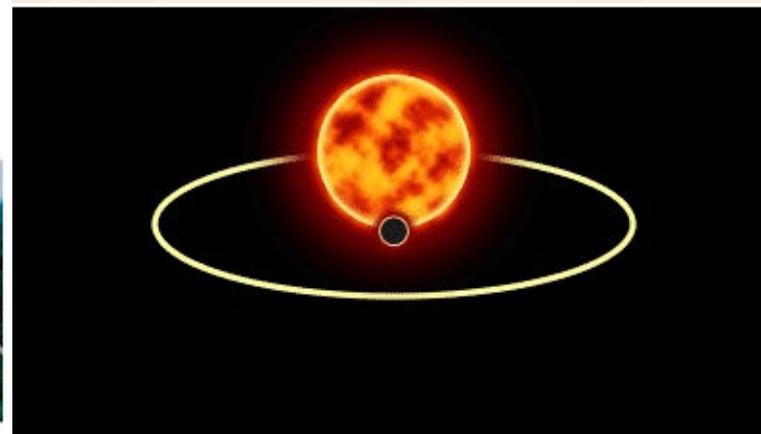
# 现身吧，“闷声发大财”的中子星



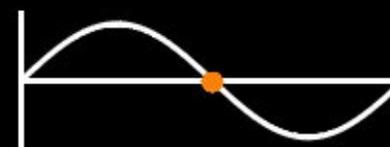
J1123



(LAMOST, Palomar, TESS, FAST, internet)



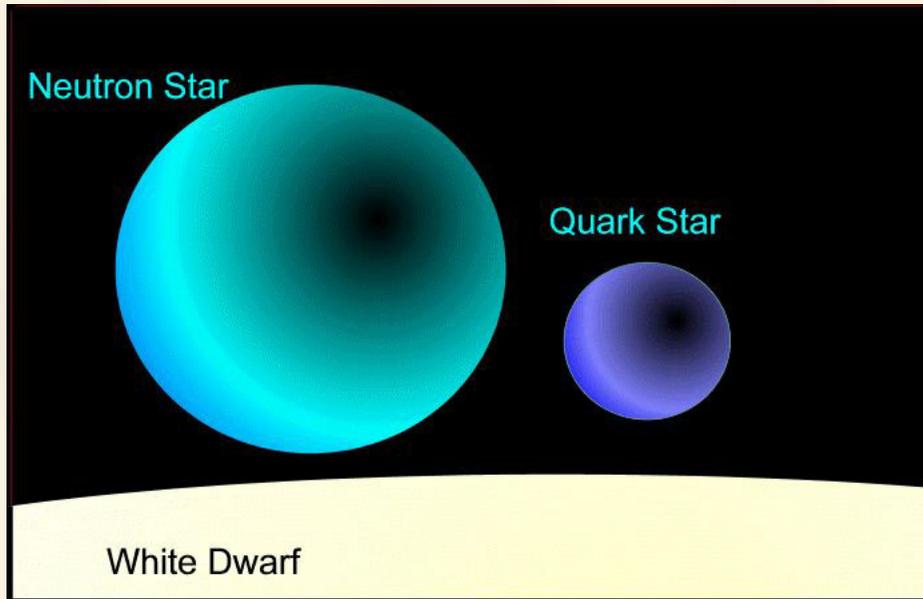
Radial Velocity



Orbital Phase



# 发现了“Quark”星？



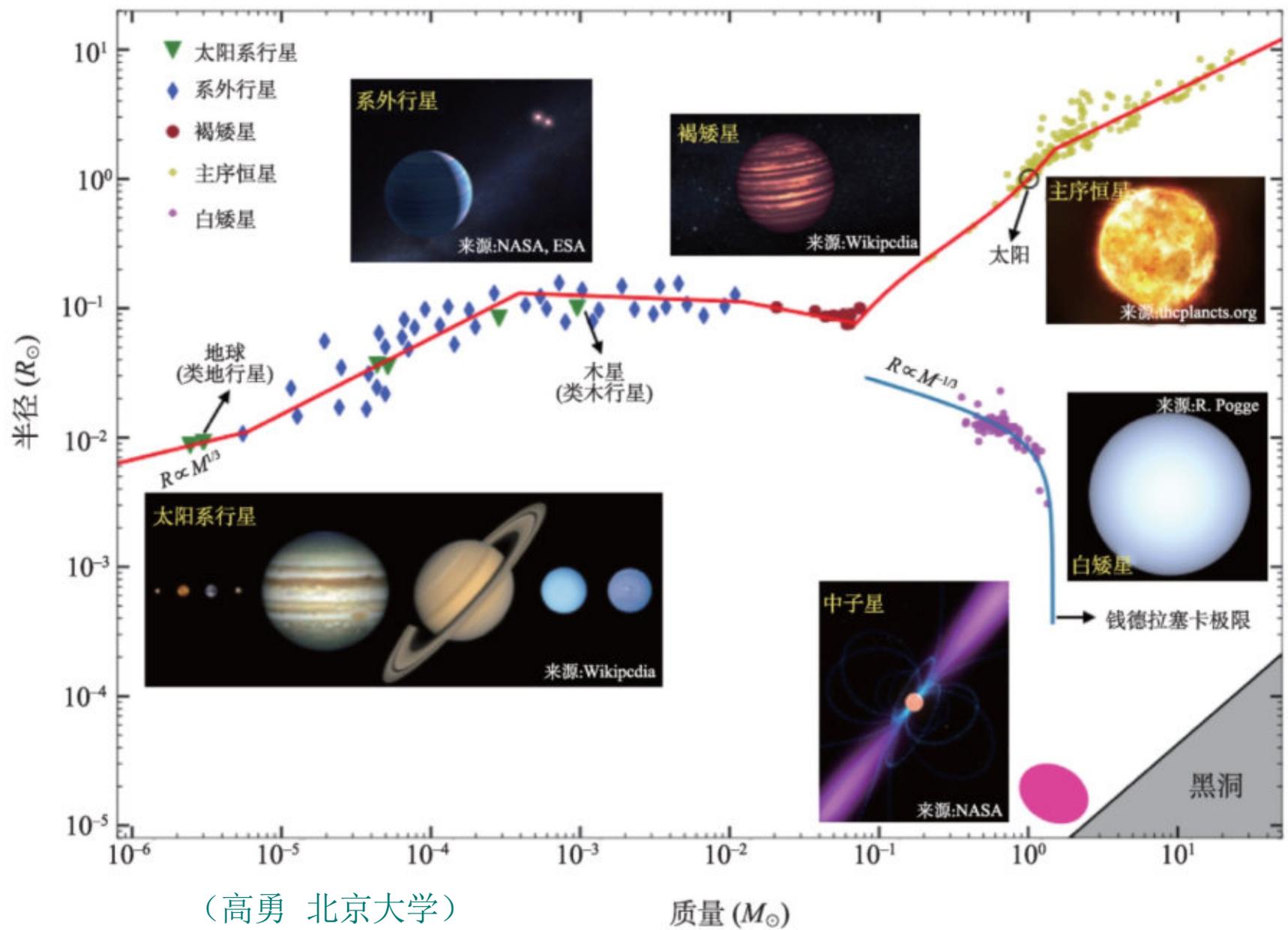
	u	c	t
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	up	charm	top
	轻	重	
QUARKS	d	s	b
	down	strange	bottom
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$

图2: 六种夸克, 图片来源: wikipedia.org

RX J1856.6-3754: Drake et al (2002)

Is it a Quark Star?

仍然有争议



(高勇 北京大学)

质量 ( $M_{\odot}$ )

图1 各类星体的质量 $M$ 和半径 $R$ 之间的关系，不同颜色的散点分别代表太阳系行星、系外行星、褐矮星、白矮星和主序恒星的天文观测数据，省去了质量和半径的测量误差。类地行星随着质量增大，密度基本不变， $R \propto M^{1/3}$ 。类木行星内部电子简并压开始扮演重要作用。从大质量行星到褐矮星，随着质量增大半径变化不大，

这是电子简并压和库伦排斥共同作用的结果。主序恒星随着质量增大半径逐渐增大。红色的曲线大致描绘了各类星体的质量半径关系。白矮星由电子简并压主导，低质量时满足 $R \propto M^{-1/3}$ ，随着质量增大达到钱德拉塞卡极限。中子星主要由强相互作用主导的超核物质构成，其质量半径关系将在后面的小节介绍。

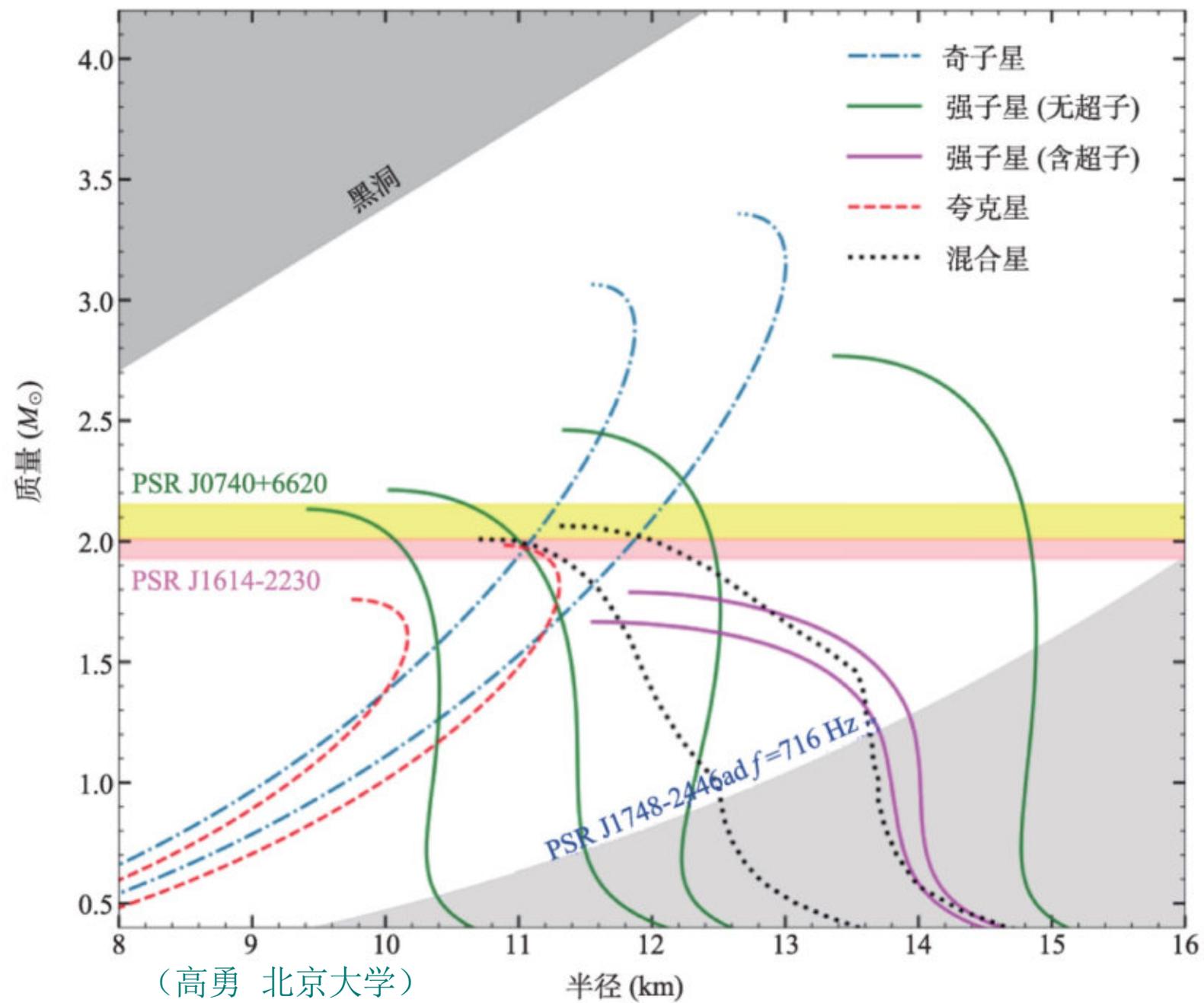


图3 不同物态模型对应的质量半径关系。右下方的阴影是由目前已知的自转最快的中子星(自转频率为716 Hz)排除的区域, 左上方阴影区为黑洞, 中间黄色和粉色的带是目前观测到的质量最大的中子星

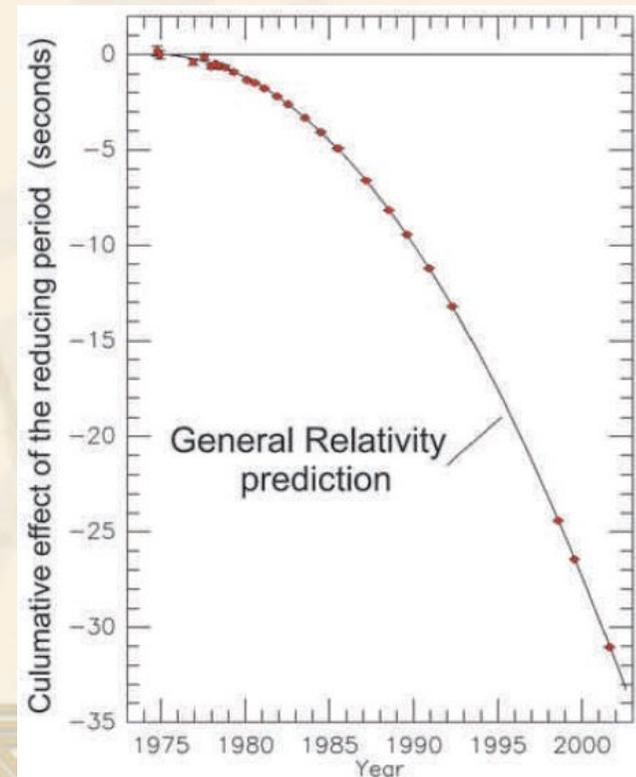
# 脉冲星的研究意义

- ❖ 自转非常稳定且慢地变慢：宇宙中最好的钟<sub>导航</sub>
- ❖ 超致密物质：自转速率突然增加（glitch）
- ❖ 星际介质：色散<sub>距离</sub>
- ❖ 空间分布：自行（ $\sim 500-1100\text{km/s}$ ）

源于natal kick

- ❖ 检验广义相对论：  
双脉冲星系统

Taylor & Hulse, 1993 Nobel



# General black hole properties

- ❖ BHs: extreme cases of curved space-time; described by GR

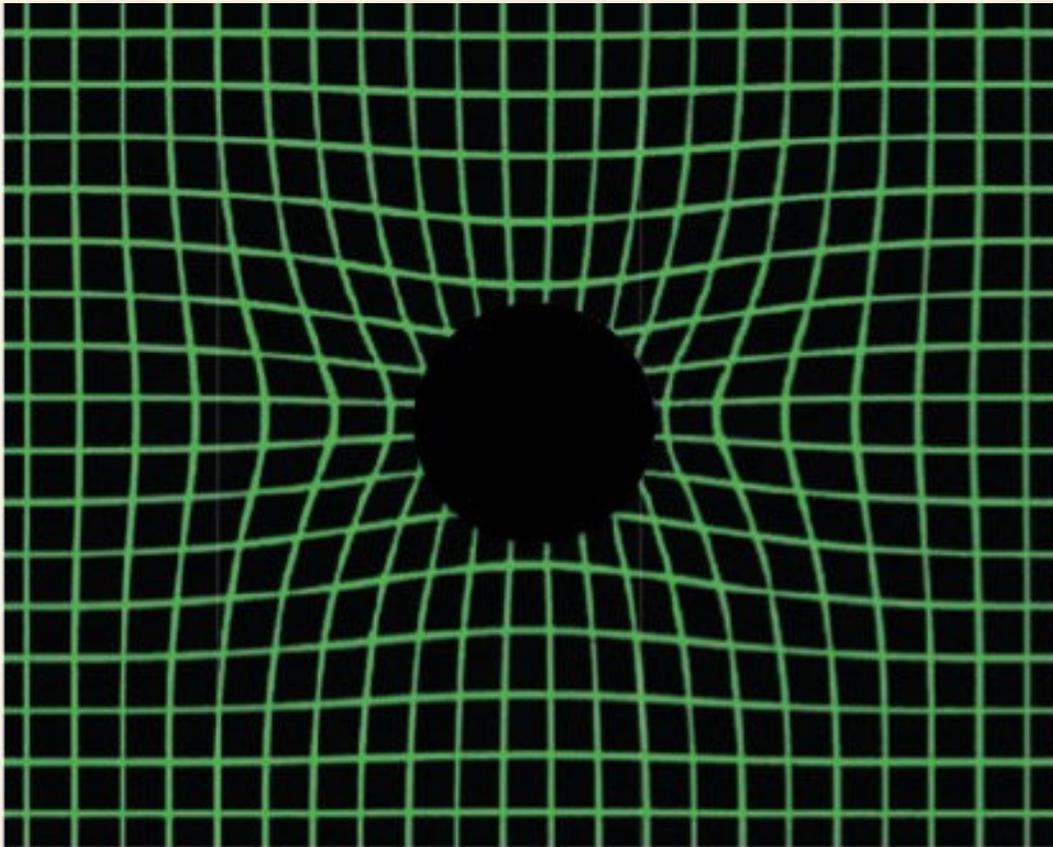
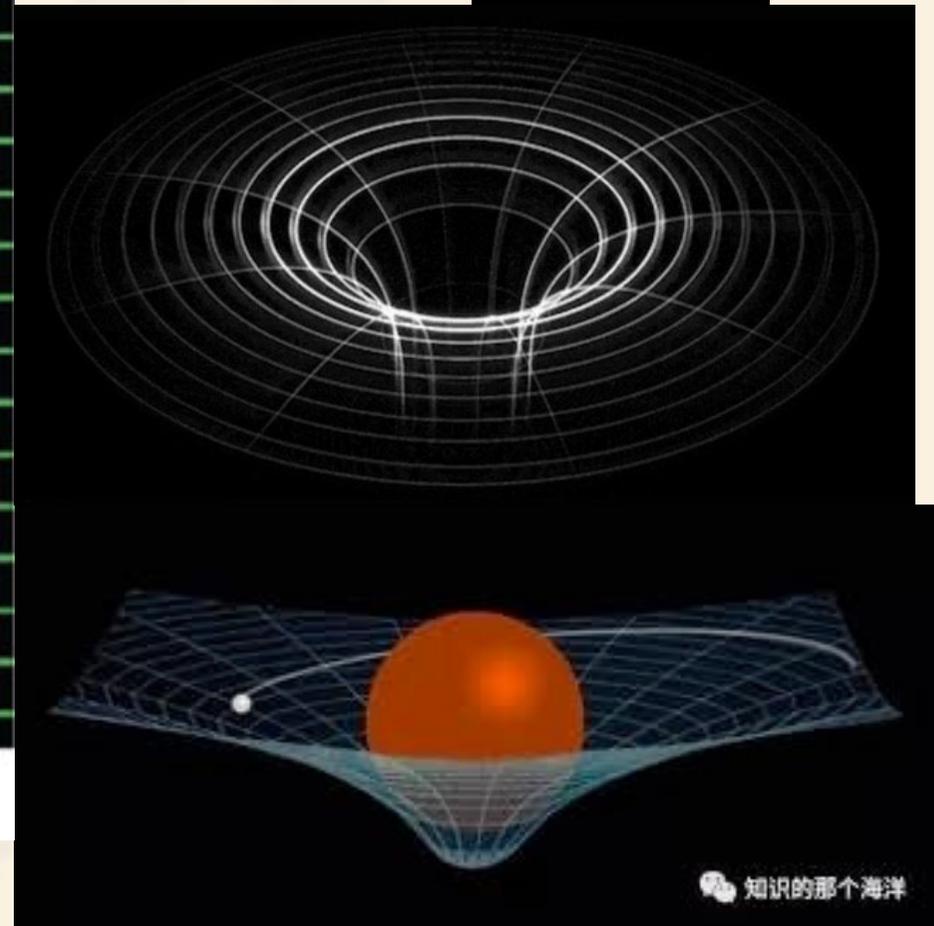


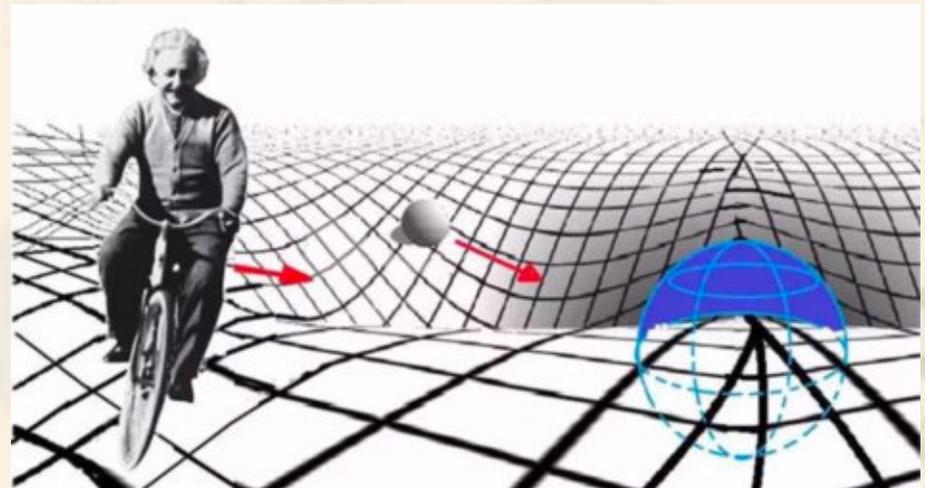
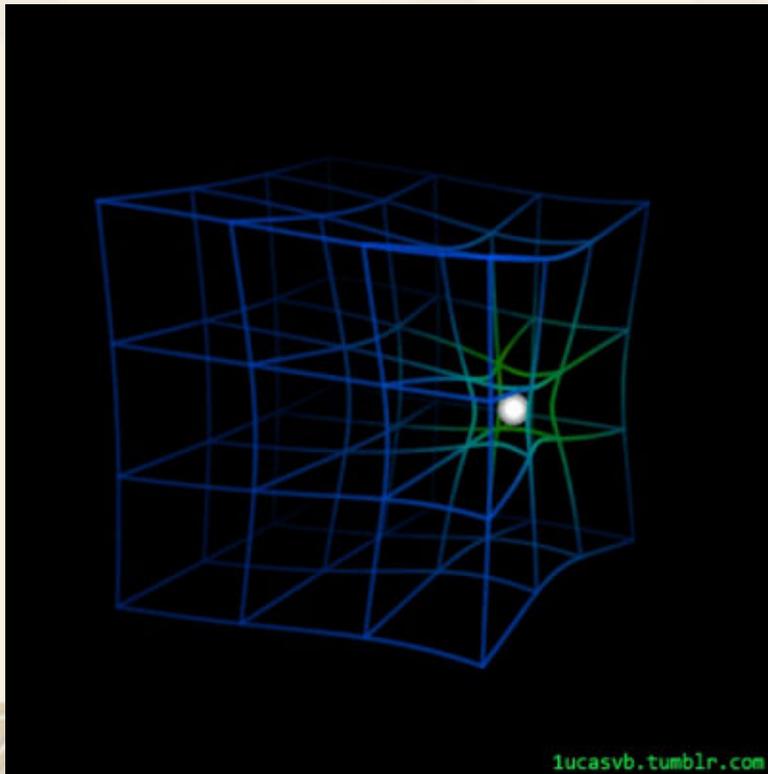
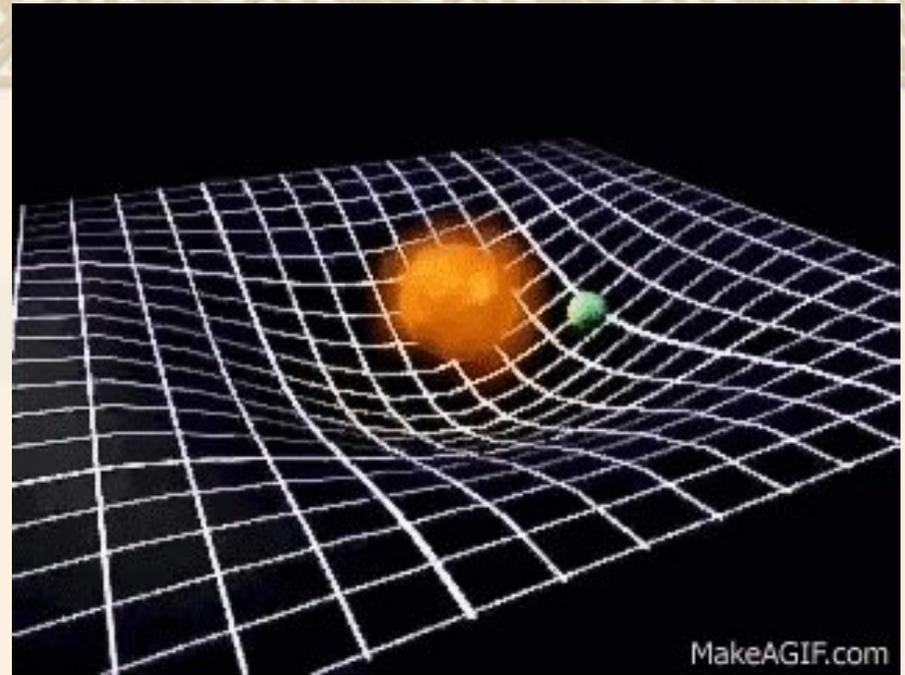
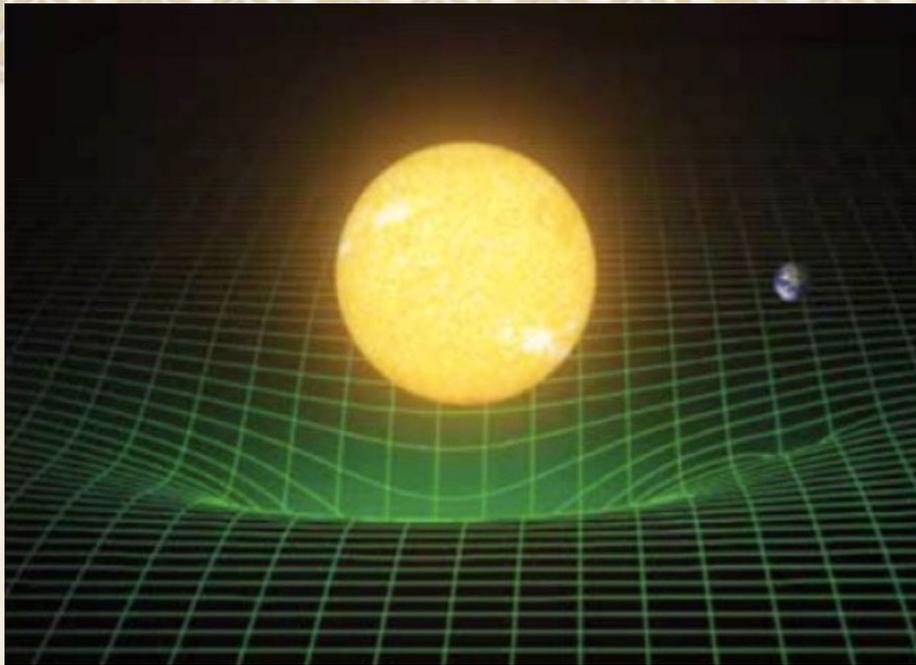
Figure 1.20 A rubber sheet analogy of the distortion of space-time by mass.

<<I.A.C.>>



知识的那个海洋

Matter tells spacetime how to curve; spacetime tells matter how to move.

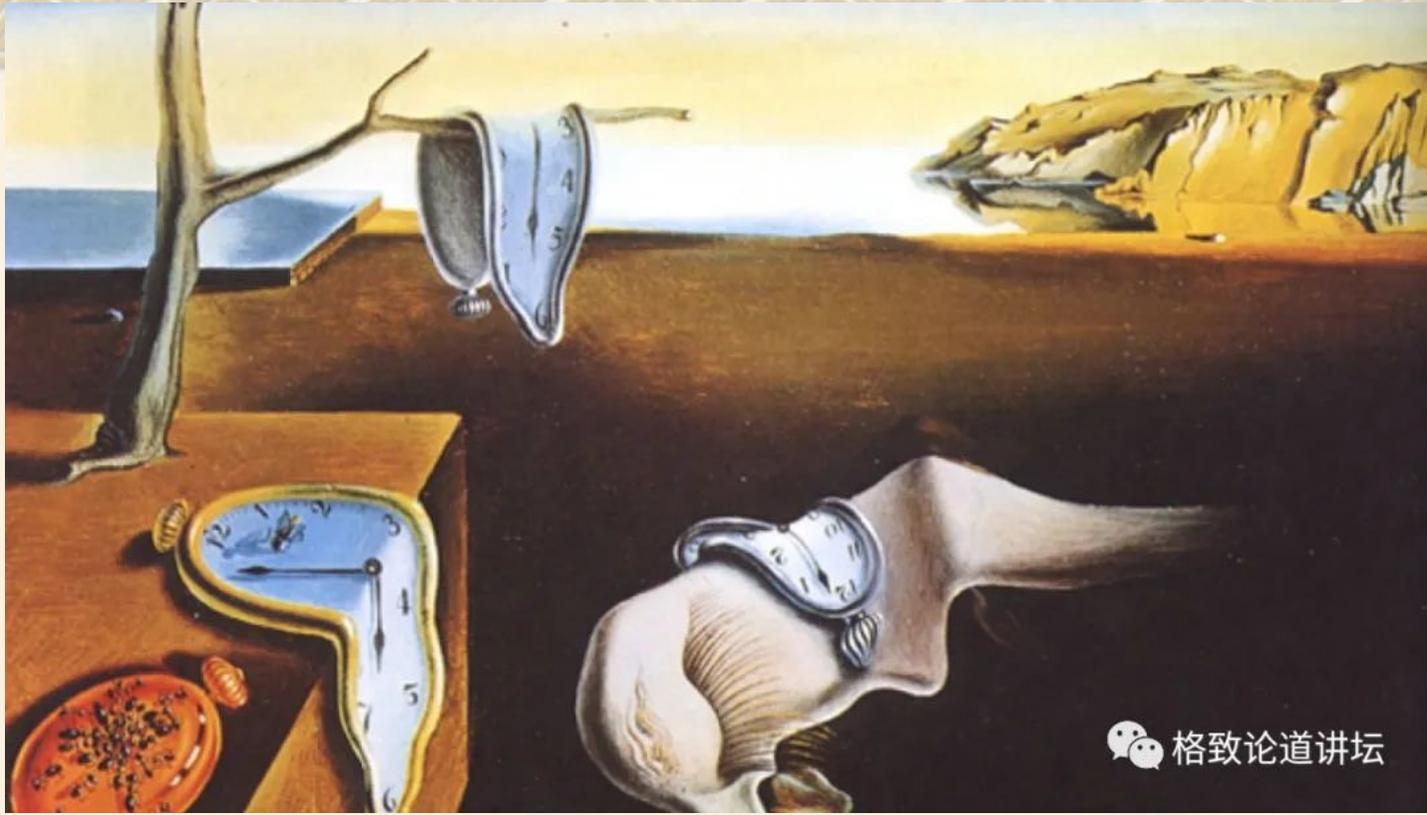


Einstein: “Let us sing the song of black hole together”

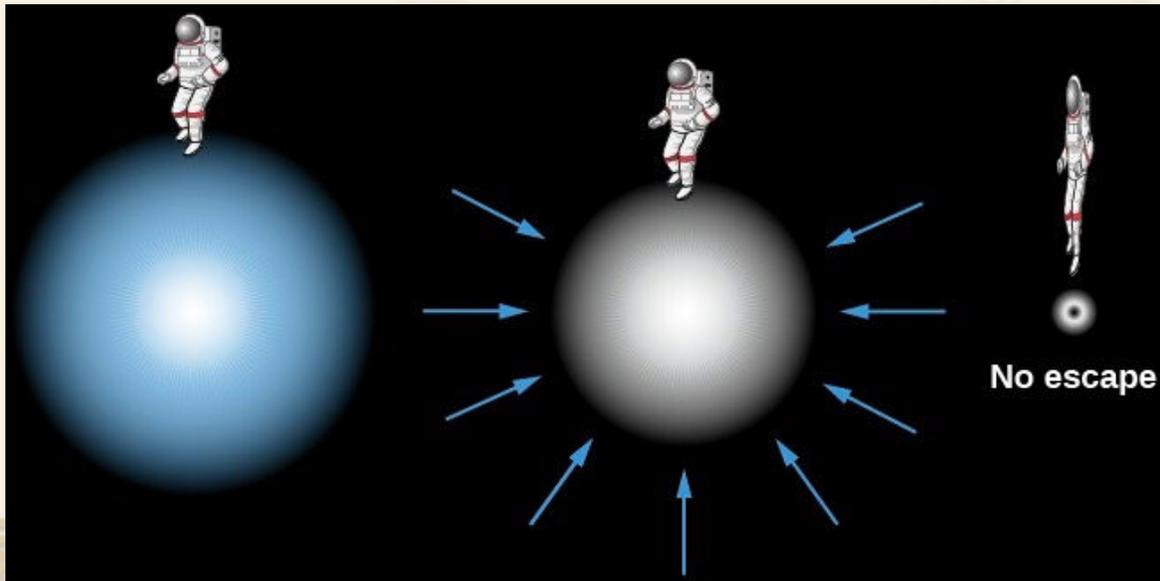


# 《最伟大的理论》





格致论道讲坛



# 黑洞的基本概念

$$\text{逃逸速度 } \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \Rightarrow v^2 = \frac{2GM}{r}$$

$$v=c \Rightarrow r_g = \frac{2GM}{c^2} \text{ 与 } R \text{ 无关!}$$

如果  $r < r_g \Rightarrow v > c$  光子都不能逃逸

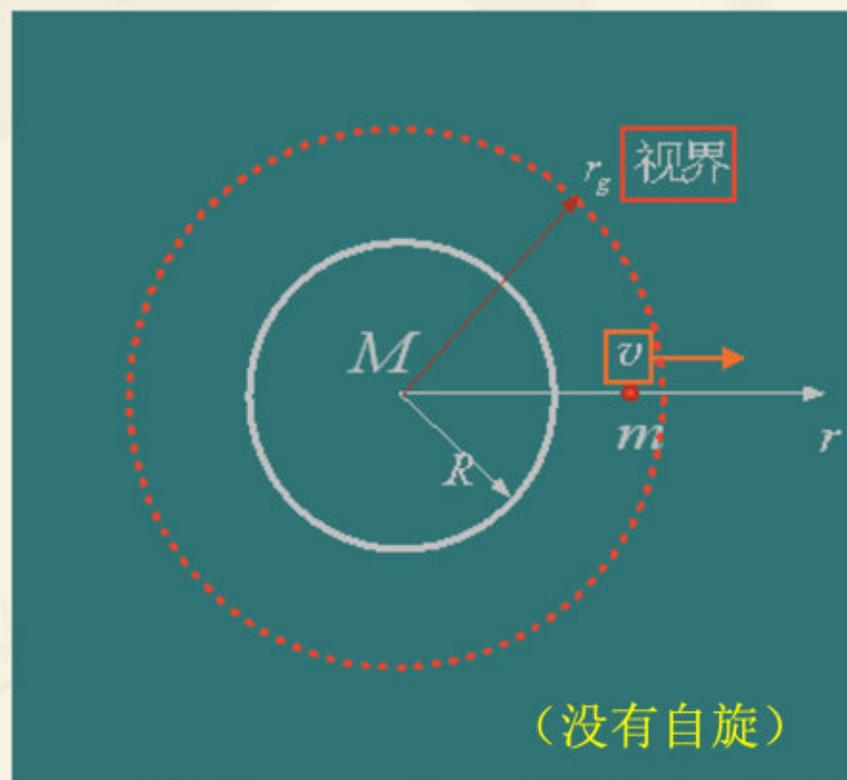
引力红移

$$\begin{aligned} h\nu &= h\nu_0 - \frac{GM}{r} \left( \frac{h\nu_0}{c^2} \right) \\ &= h\nu_0 \left( 1 - \frac{GM}{rc^2} \right) \end{aligned}$$

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 - \frac{GM}{rc^2} \right)^{-1}$$

$$\text{牛顿引力红移 } z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \left( 1 - \frac{GM}{rc^2} \right)^{-1} - 1$$

$$\text{广义相对论结果 } z = \left( 1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1$$



# “The Black Hole Movie”



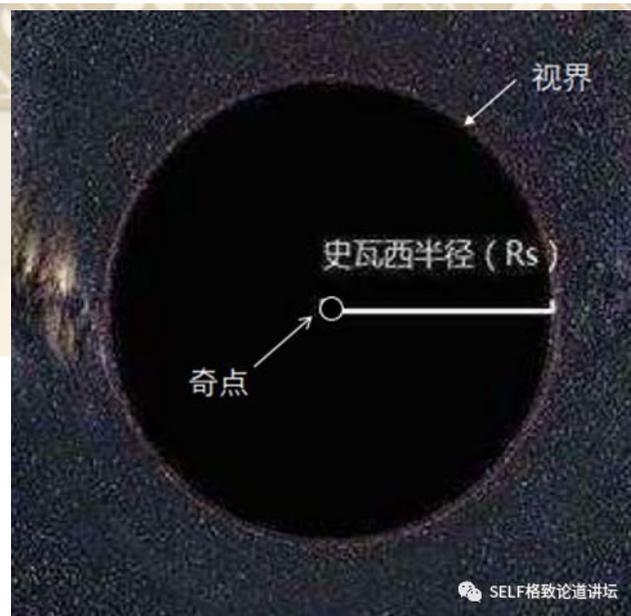
# 黑洞无毛发

经典黑洞只有  
三个参量：

- 质量  $M$
- 角动量  $J$
- 电荷  $Q$



无发结果。



(简单、光滑、均匀的时空结构)



# 基本特性

- ❖ 黑洞并不吞噬所有的物质  
(除了视界之内)
- ❖ 远离黑洞，其引力与任何其它同质量的天体并没有什么不同



# 探索黑洞的方法

(举例)

## 1. 追踪恒星

通过追踪绕银心黑洞旋转的恒星轨道，可以揭示黑洞是否如广义相对论所预测那样弯曲空间和时间。



## 2. 拍照

通过拍摄黑洞的照片，科学家可以检验许多东西，比如黑洞剪影的形状可以用来检验无毛定律。



## 3. X射线

在一个X射线双星系统中，伴星的物质会落在黑洞上，并形成炽热的吸积盘。吸积盘会释放出可被探测到的X射线。



## 4. 捕捉引力波

当两个黑洞相互靠近、并合时，就会产生时空的涟漪——引力波。



# 如何发现黑洞？

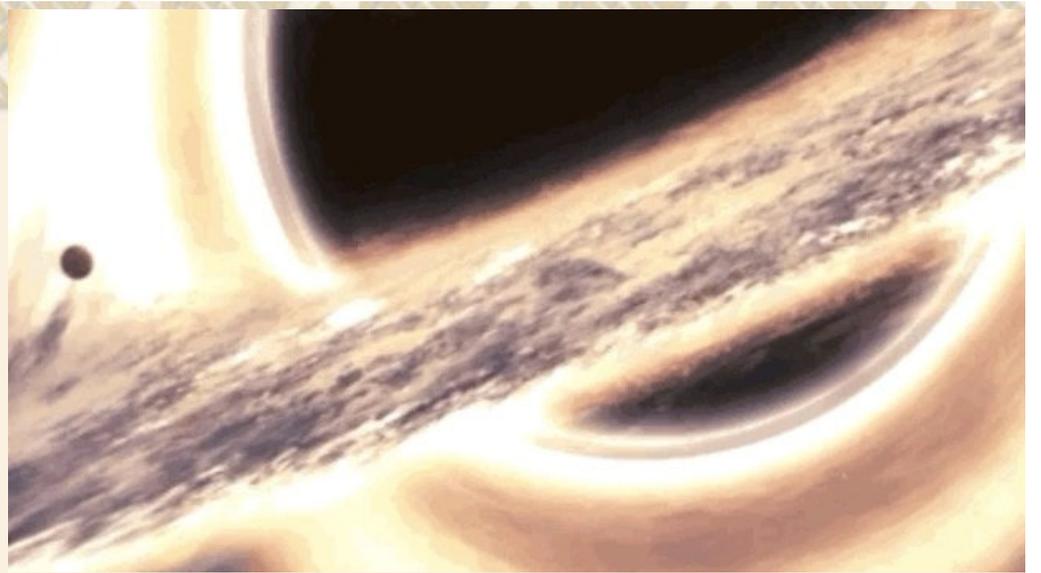


"It's black, and it looks like a hole.  
I'd say it's a black hole."

Sidney Harris

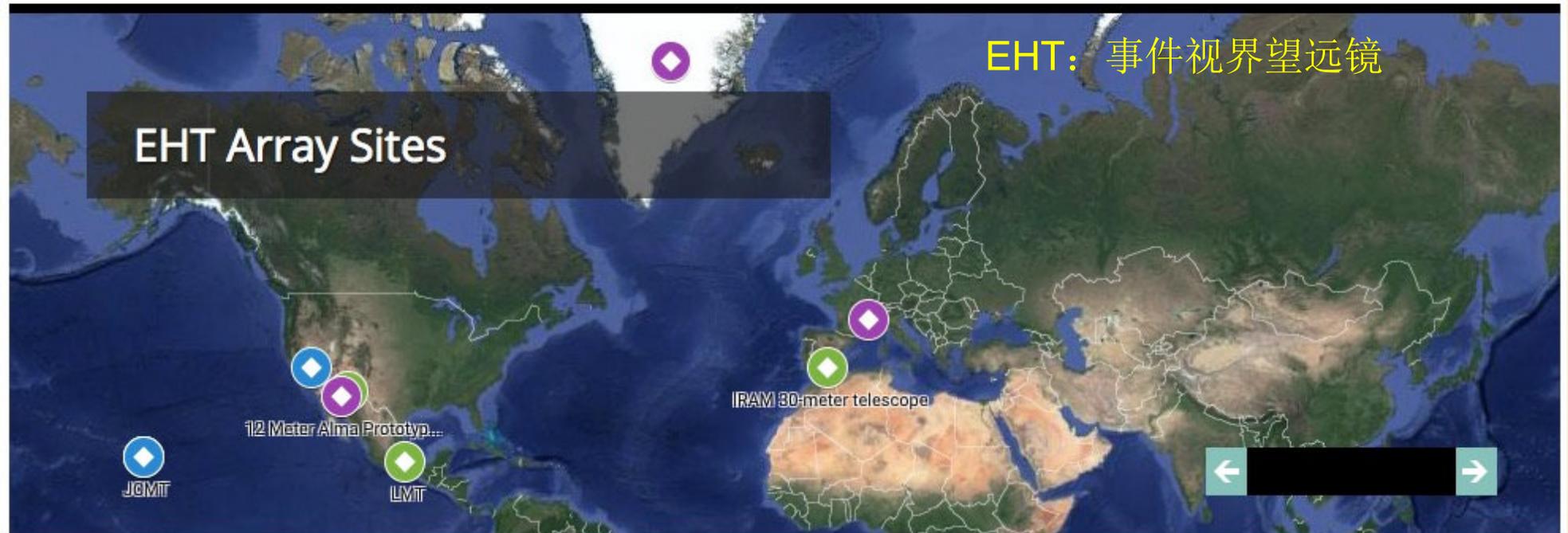


**“It’s black, and it looks like a hole.  
I’d say it’s a black hole.”**



(Wiki)

The Event Horizon Telescope is an international collaboration aiming to capture the first image of a black hole by creating a virtual Earth-sized telescope.



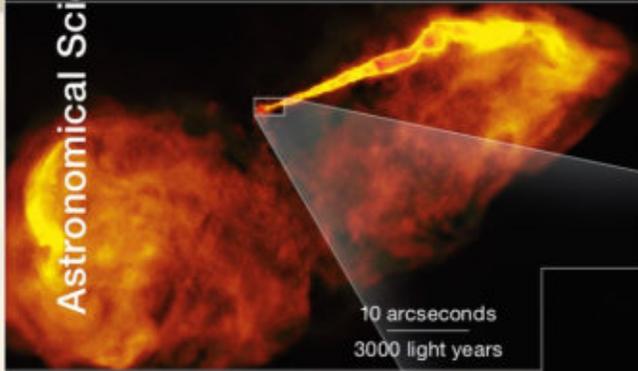
<https://eventhorizontelescope.org/>

Simulations Gallery



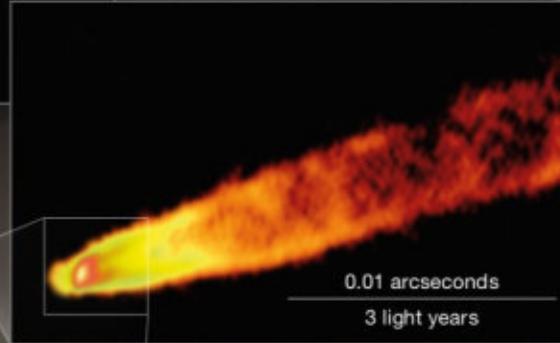
Astronomical Science

VLA - 1.5 GHz

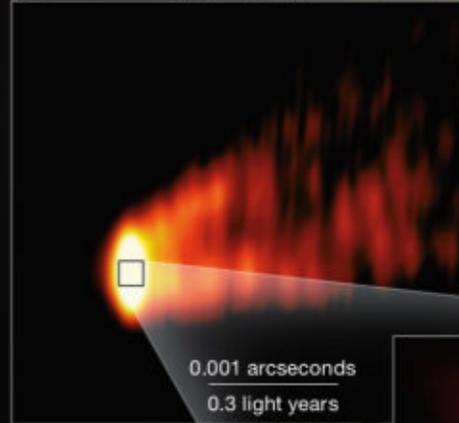


$$\theta = 1.22 \lambda / D$$

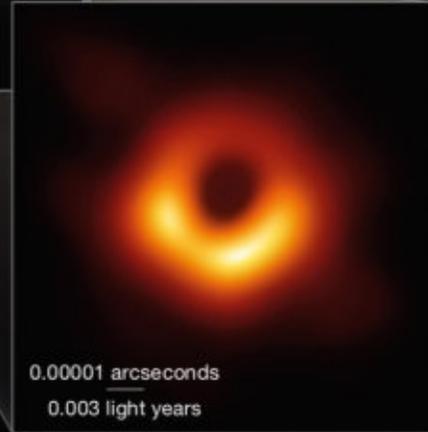
VLBA - 43 GHz



GMVA - 86 GHz

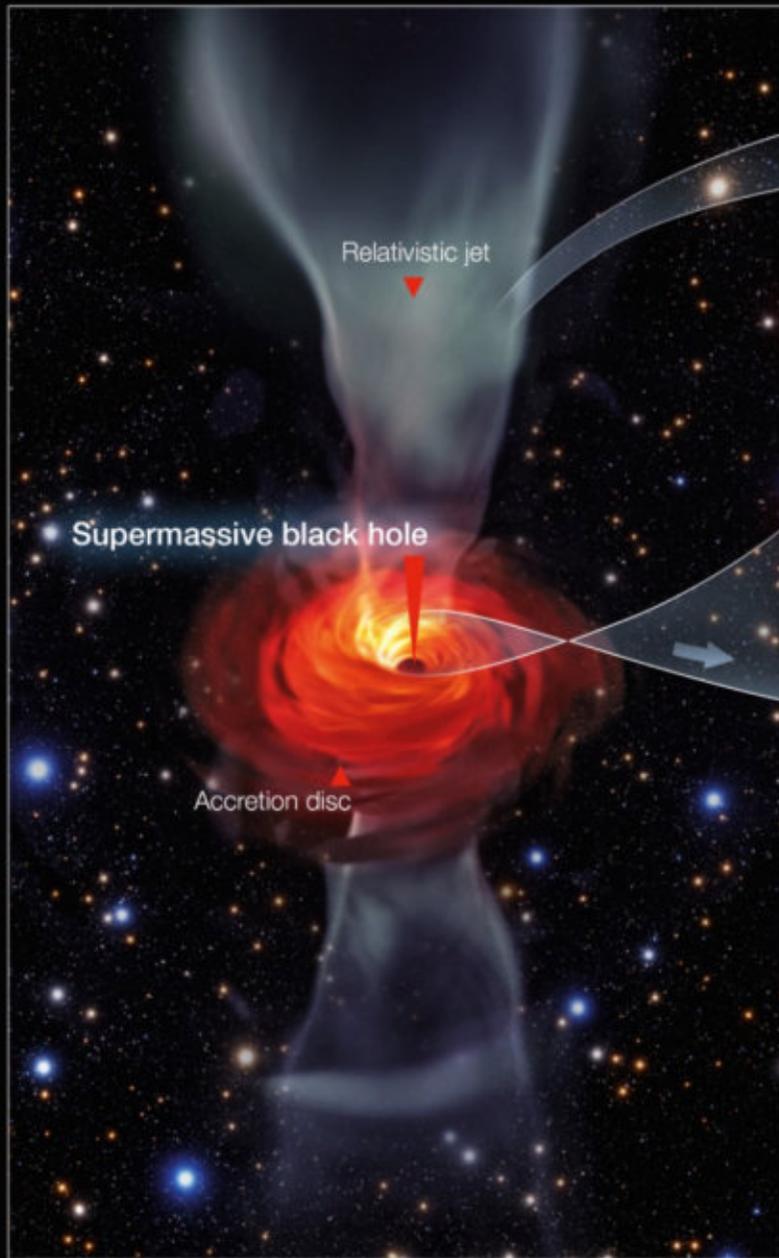


EHT - 230 GHz



The centre of the giant elliptical galaxy M87 seen at spatial resolution scales spanning six orders of magnitude. The detailed structure of the relativistic jet is revealed by observations at different radio wavelengths using several interferometric facilities, zooming into the supermassive black hole imaged by the EHT collaboration.

# M87 Black Hole – Event Horizon Telescope



EHT image of the black hole shadow

Size of the Solar System

0.01 light years  
40 microarcseconds

Material rotating toward Earth is Doppler boosted and brighter

ALMA image of the jet

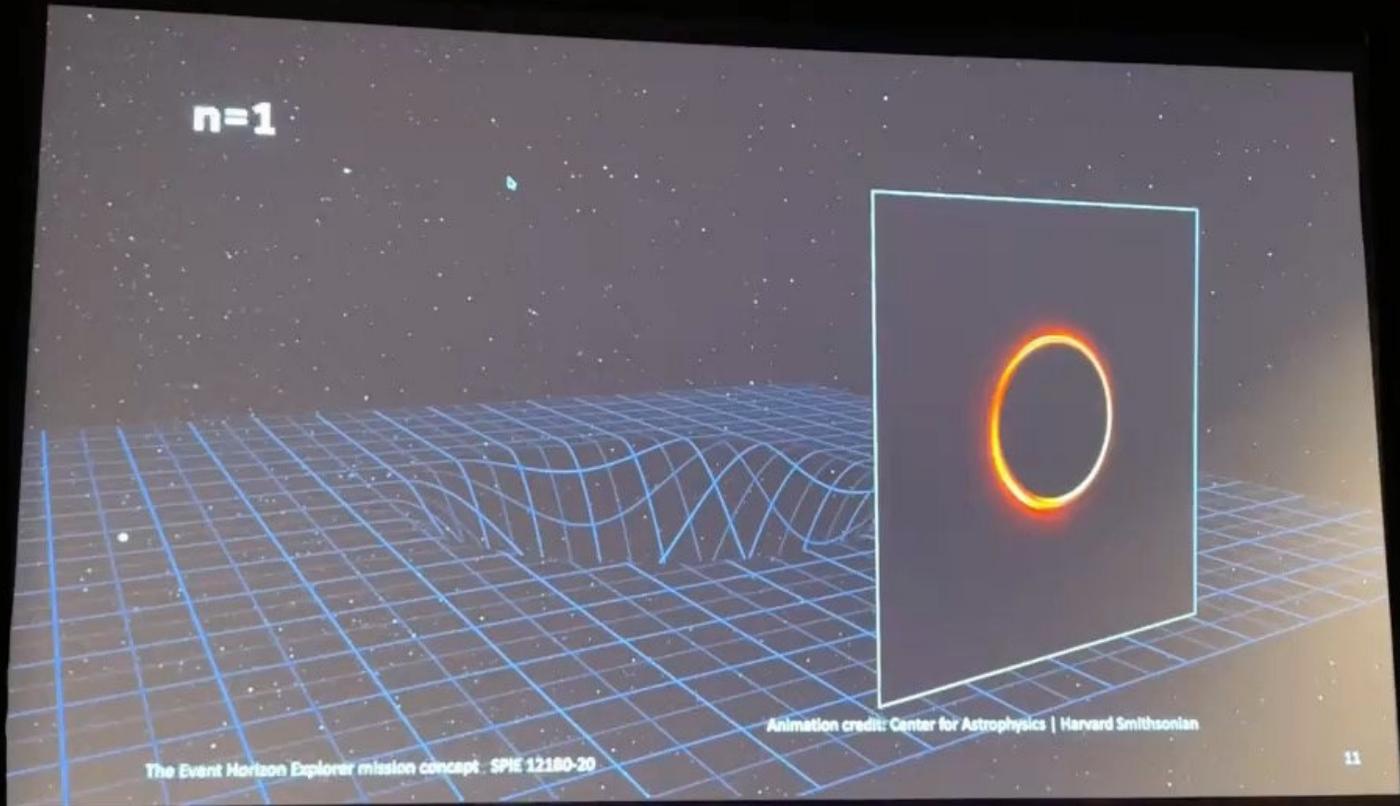
1500 light years  
6 arcseconds

Simulated image

Event horizon

Photon ring

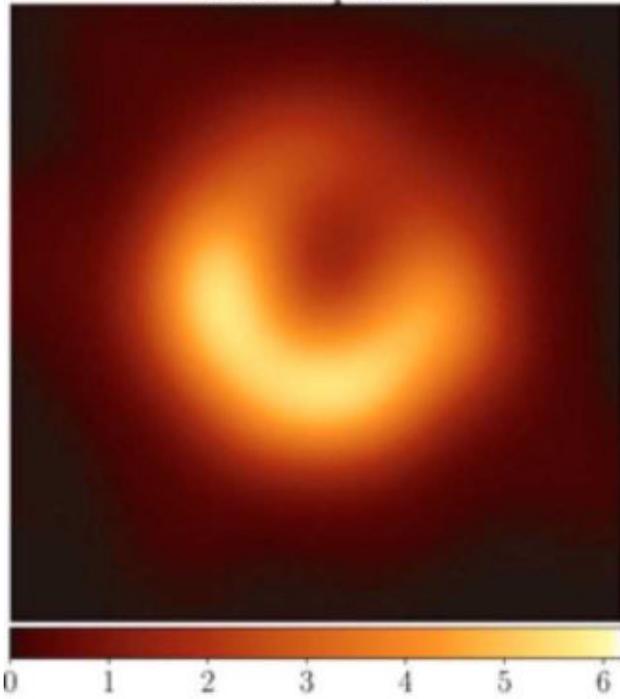
n=1



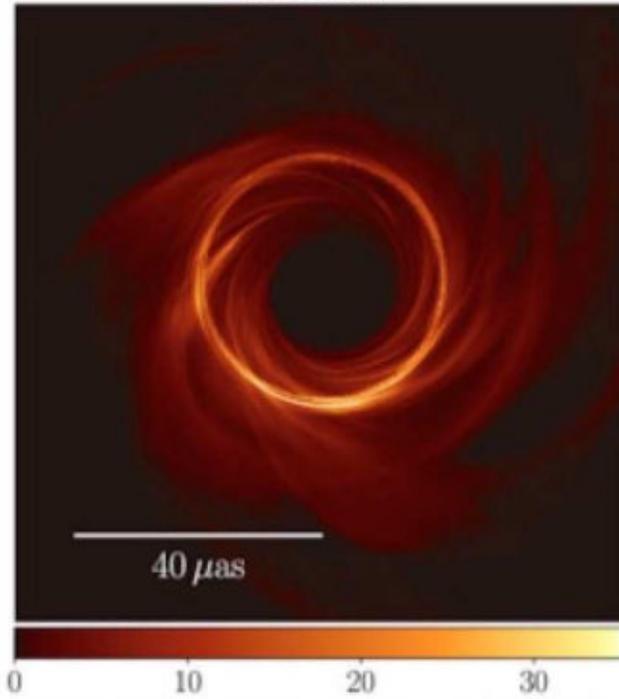
The Event Horizon Explorer mission concept - SPIE 12180-20

Animation credit: Center for Astrophysics | Harvard Smithsonian

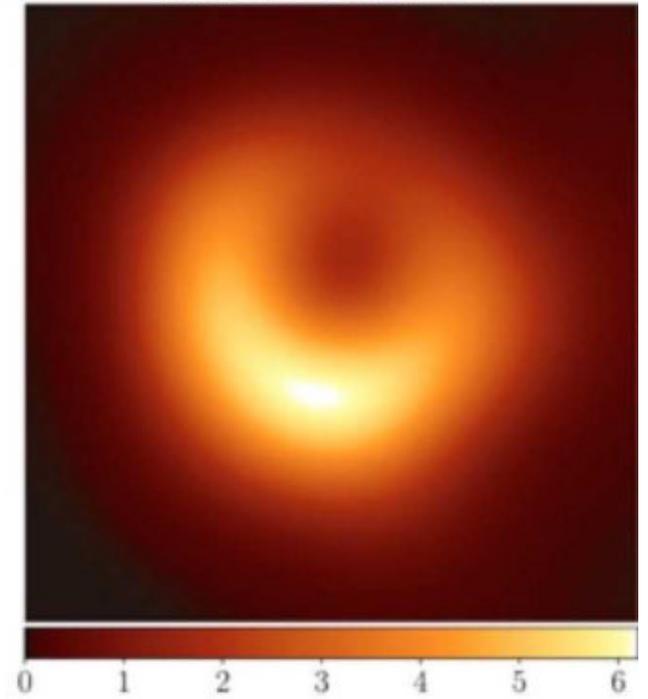
M87 April 6



GRMHD



Blurred GRMHD

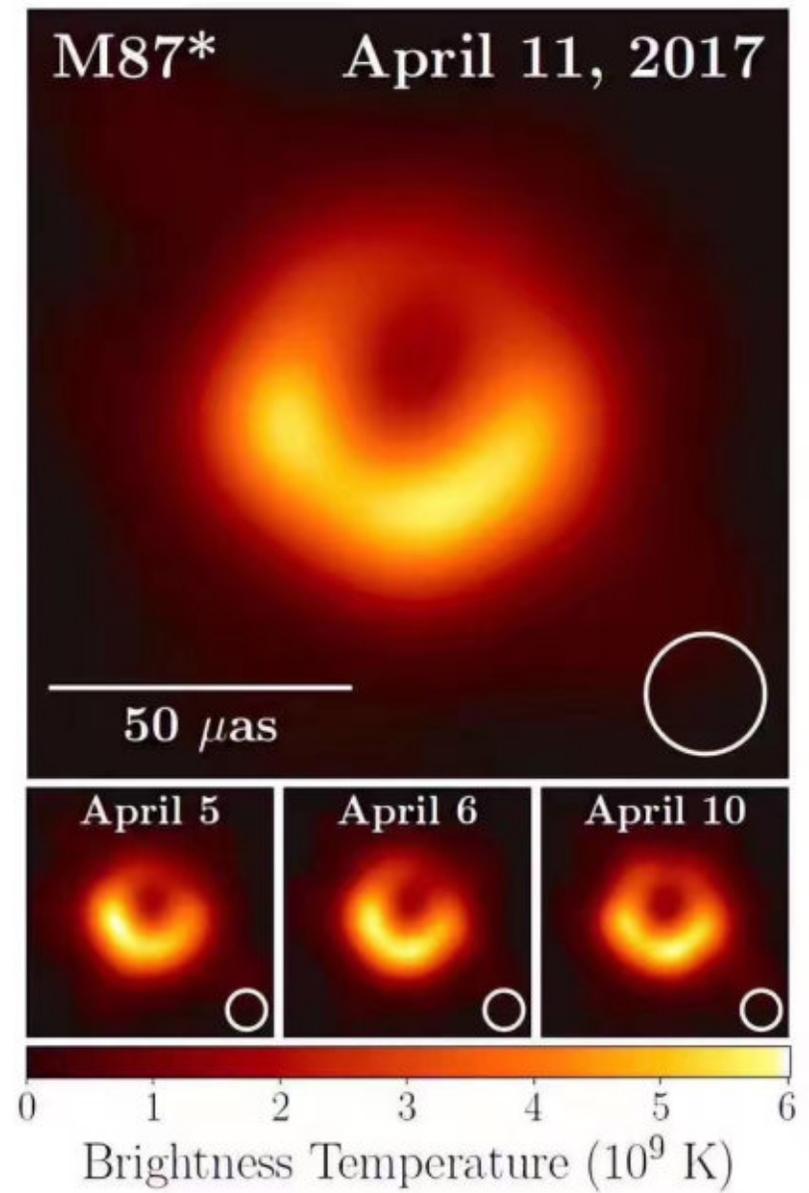


Brightness Temperature ( $10^9$  K)



The groundbreaking ALMA array is composed of 66 giant antennas situated on the Chajnantor Plateau in the Chilean Andes.

# Event Horizon Telescope: The first BH image ever



印象中的木星



印象中的土星



印象中的星云



印象中的黑洞



实际看到的木星



实际看到的土星

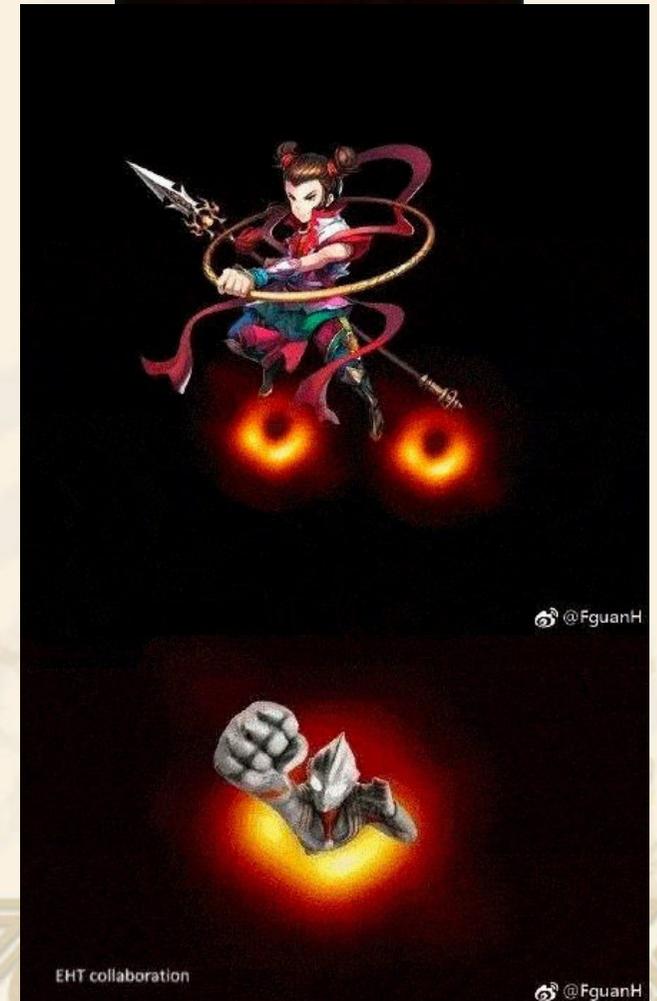
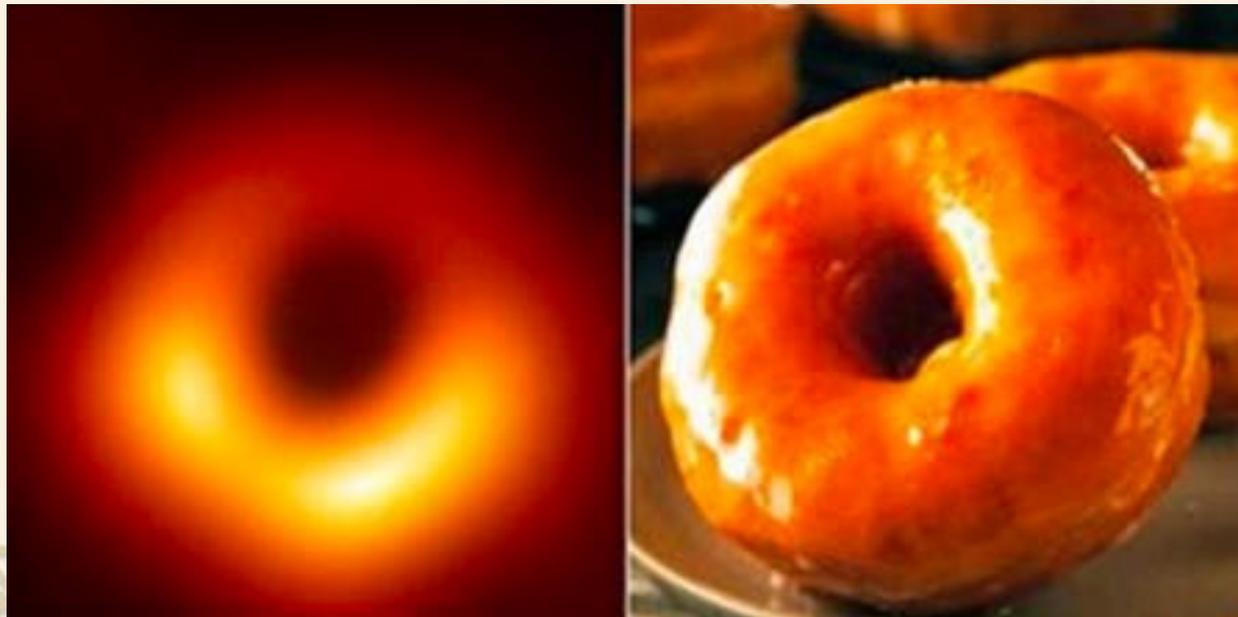
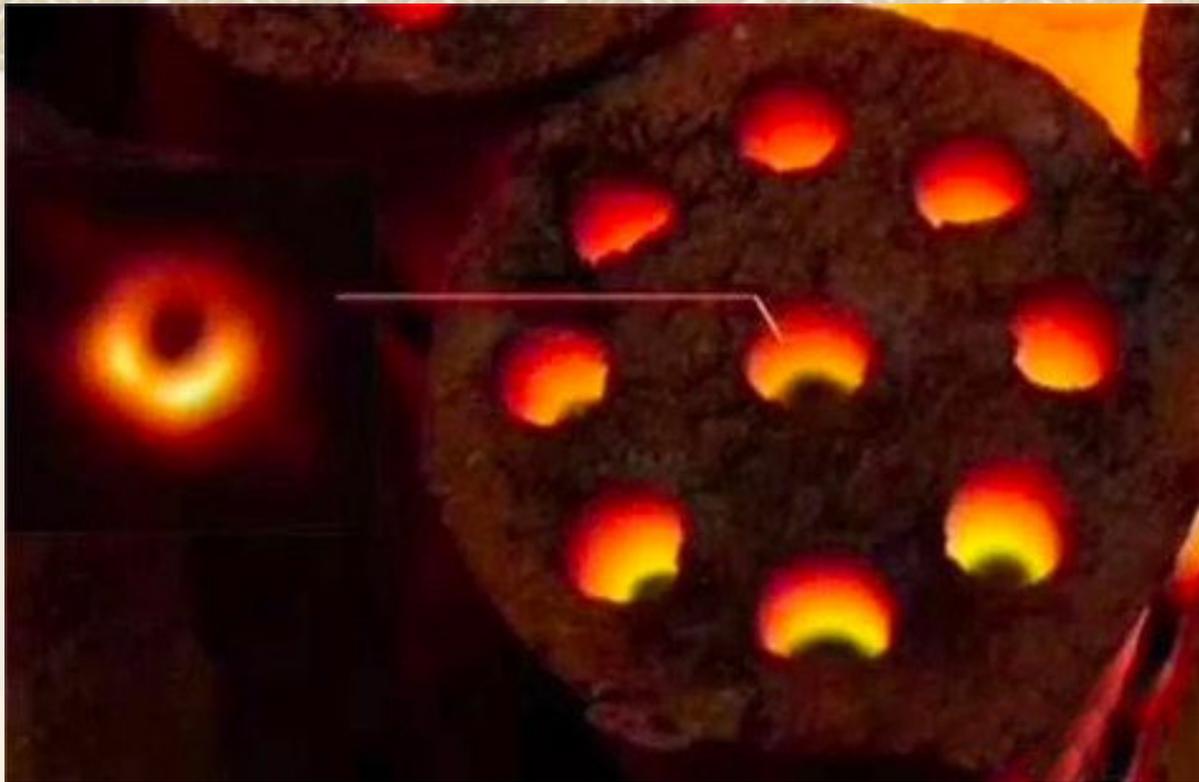


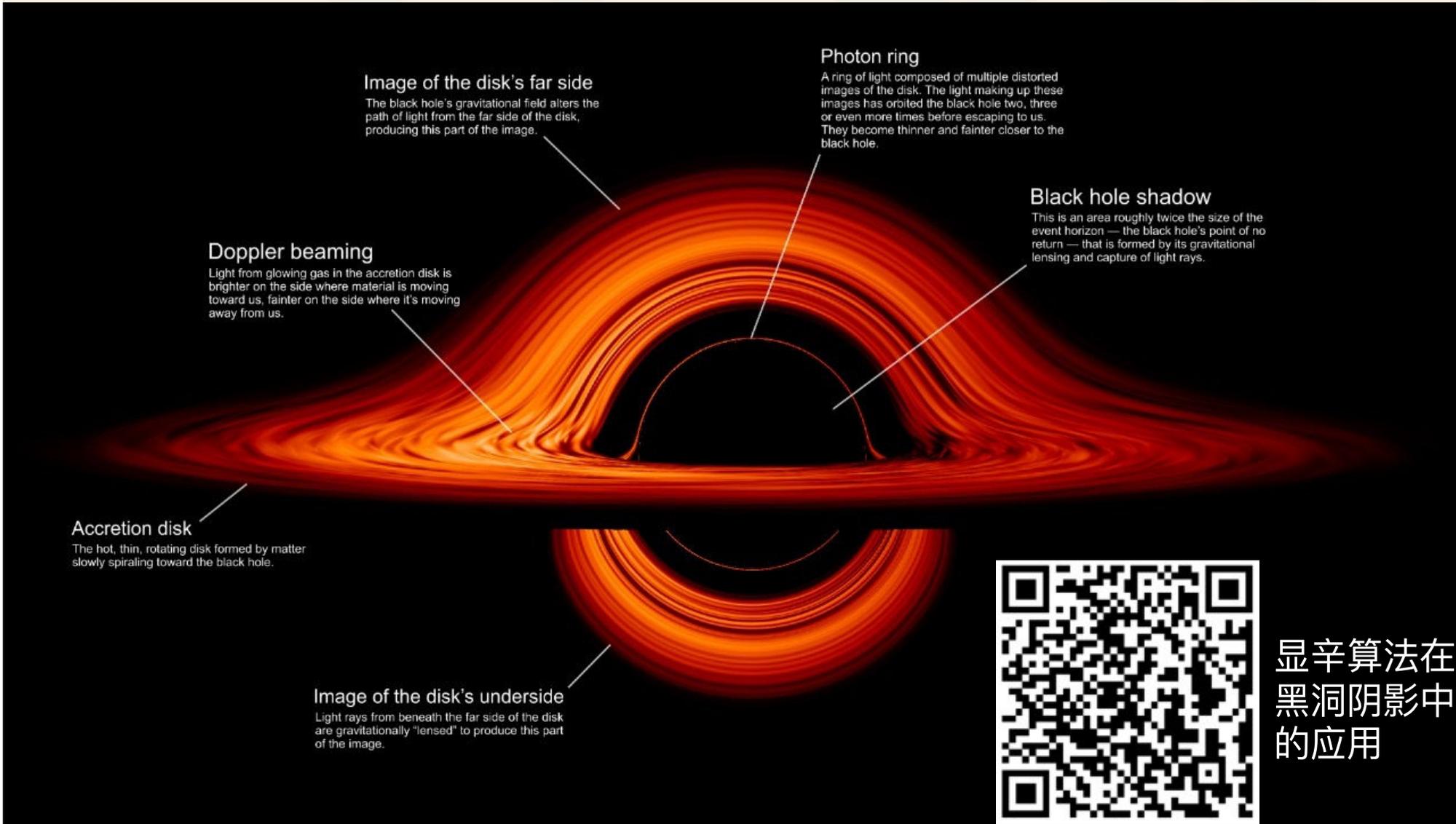
实际看到的星云



实际看到的黑洞







**Image of the disk's far side**

The black hole's gravitational field alters the path of light from the far side of the disk, producing this part of the image.

**Photon ring**

A ring of light composed of multiple distorted images of the disk. The light making up these images has orbited the black hole two, three or even more times before escaping to us. They become thinner and fainter closer to the black hole.

**Black hole shadow**

This is an area roughly twice the size of the event horizon — the black hole's point of no return — that is formed by its gravitational lensing and capture of light rays.

**Doppler beaming**

Light from glowing gas in the accretion disk is brighter on the side where material is moving toward us, fainter on the side where it's moving away from us.

**Accretion disk**

The hot, thin, rotating disk formed by matter slowly spiraling toward the black hole.

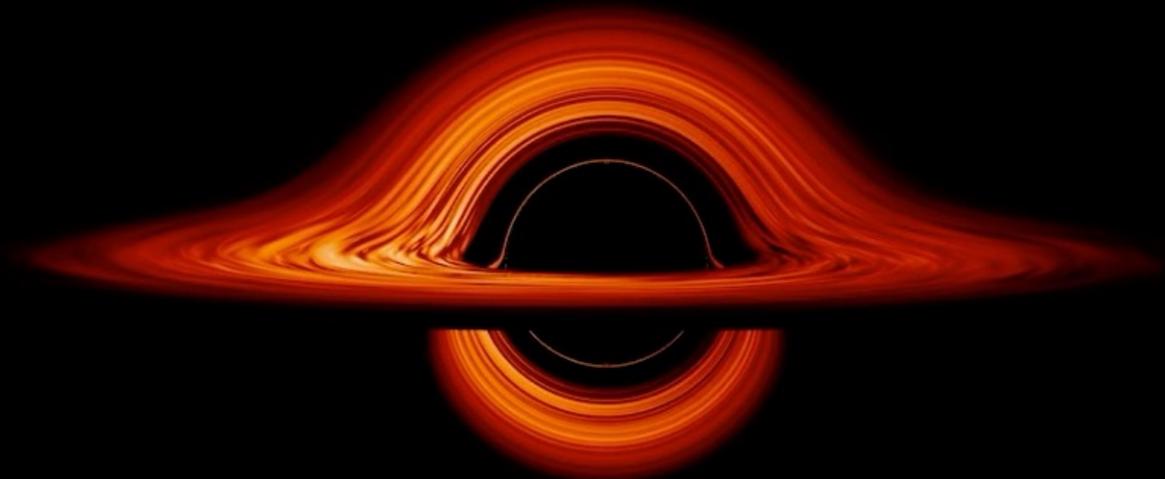
**Image of the disk's underside**

Light rays from beneath the far side of the disk are gravitationally "lensed" to produce this part of the image.



显辛算法在  
黑洞阴影中的  
应用







# 2019

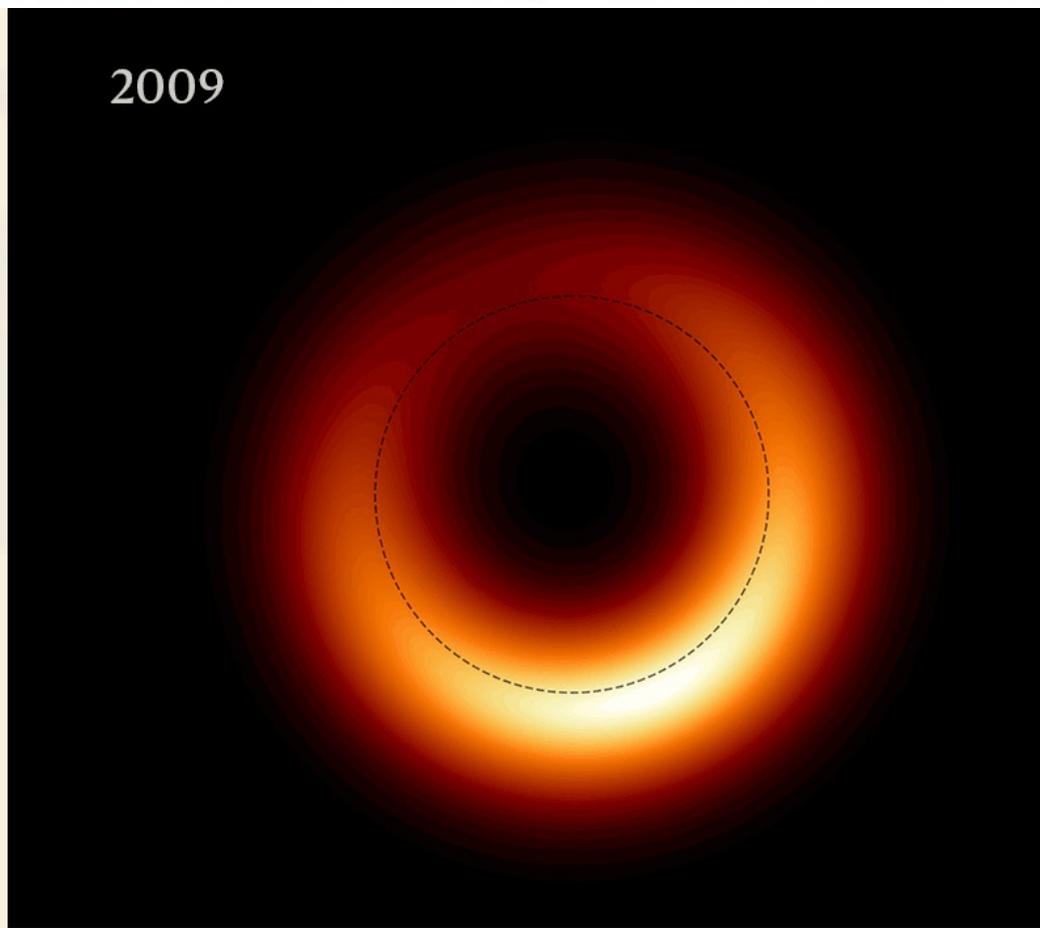
AKTHROUGH

And now, the Breakthrough of the Year.

接下来，年度科学突破之首

## 首张黑洞动态照片发布，再次验证广义相对论

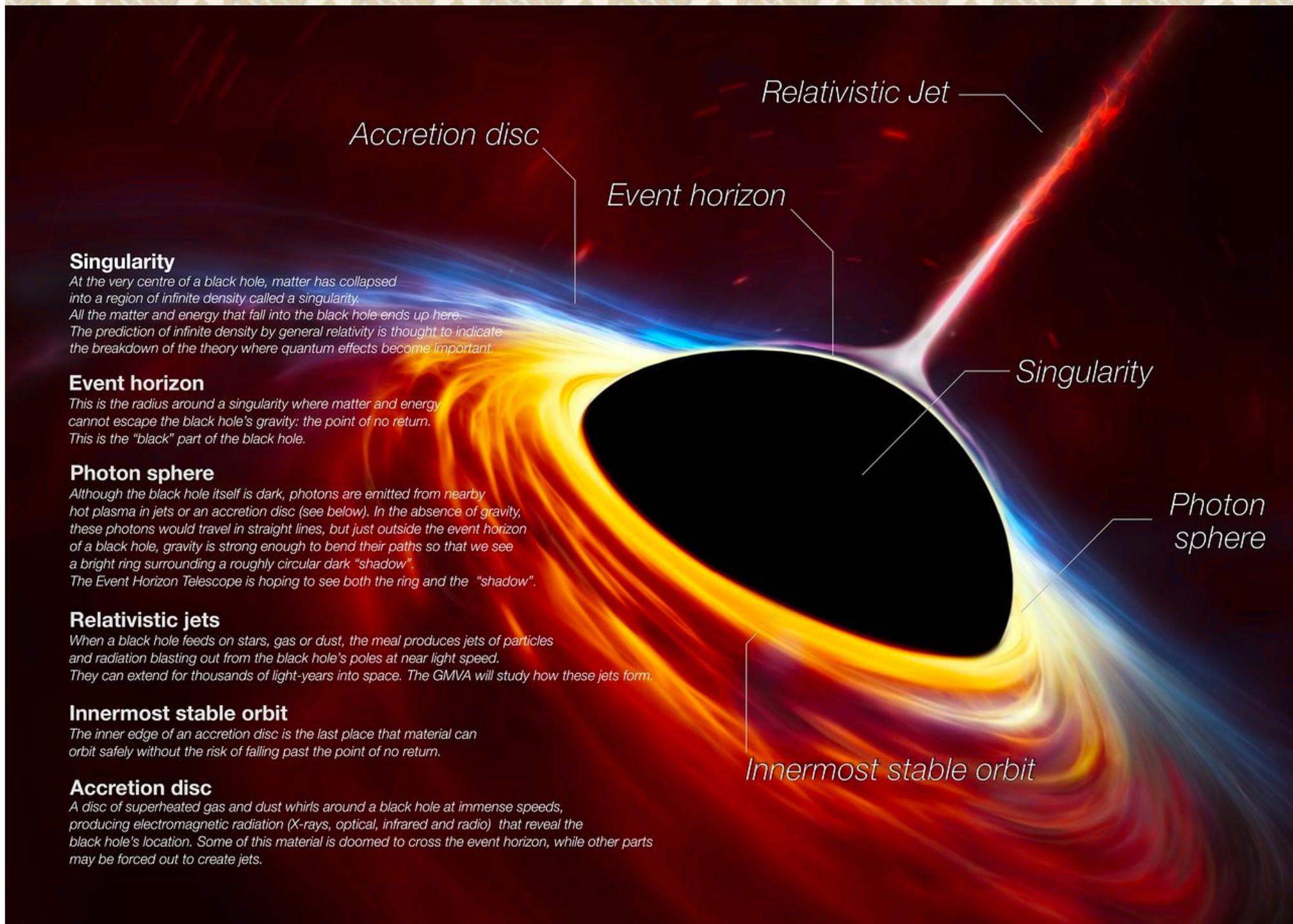
2009



23 SEPTEMBER 2020

图片来源：M. Wielgus and the EHT Collaboration, 经 Nature news 加工

9月23日，事件视界望远镜（Event Horizon Telescope, EHT）协作组织发布了首张黑洞动态照片。EHT利用全球天文台网络，进一步挖掘M87星系中心的超大质量黑洞M87\*在2009年至2017年的观察结果，同时与图像的数学模型结合，合成了黑洞动态图片，显示一个不均匀的光团围绕着M87\*旋转。此项研究已发表于《天体物理学杂志》（[Astrophysical Journal](#)）。该图像展示的结果与爱因斯坦的广义相对论中关于黑洞周围环境的预测相符。（[Astrophysical Journal](#)）



**Singularity**

*At the very centre of a black hole, matter has collapsed into a region of infinite density called a singularity.*

*All the matter and energy that fall into the black hole ends up here.*

*The prediction of infinite density by general relativity is thought to indicate the breakdown of the theory where quantum effects become important.*

**Event horizon**

*This is the radius around a singularity where matter and energy cannot escape the black hole's gravity: the point of no return.*

*This is the "black" part of the black hole.*

**Photon sphere**

*Although the black hole itself is dark, photons are emitted from nearby hot plasma in jets or an accretion disc (see below). In the absence of gravity, these photons would travel in straight lines, but just outside the event horizon of a black hole, gravity is strong enough to bend their paths so that we see a bright ring surrounding a roughly circular dark "shadow".*

*The Event Horizon Telescope is hoping to see both the ring and the "shadow".*

**Relativistic jets**

*When a black hole feeds on stars, gas or dust, the meal produces jets of particles and radiation blasting out from the black hole's poles at near light speed.*

*They can extend for thousands of light-years into space. The GMVA will study how these jets form.*

**Innermost stable orbit**

*The inner edge of an accretion disc is the last place that material can orbit safely without the risk of falling past the point of no return.*

**Accretion disc**

*A disc of superheated gas and dust whirls around a black hole at immense speeds, producing electromagnetic radiation (X-rays, optical, infrared and radio) that reveal the black hole's location. Some of this material is doomed to cross the event horizon, while other parts may be forced out to create jets.*

Relativistic Jet

Accretion disc

Event horizon

Singularity

Photon sphere

Innermost stable orbit

# 黑洞偏振图像发布！M87黑洞又有新头像了

原创 上海天文台 中国科普博览 今天

北京时间2021年3月24日晚10点，曾成功捕获人类有史以来首张黑洞照片的事件视界望远镜（EHT）合作组织，又为揭秘M87超大质量黑洞提供了一个崭新视角：它在偏振光下的影像（图1）。

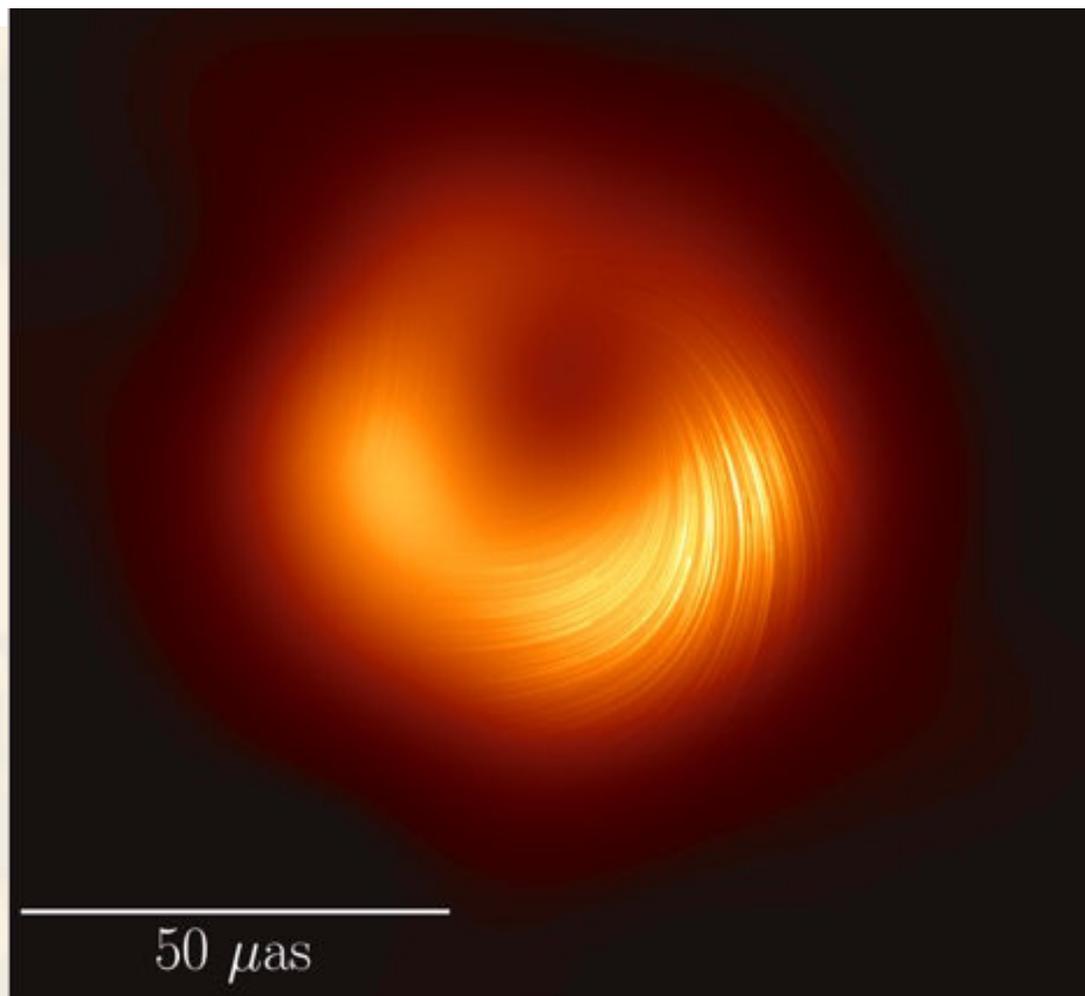


图1.（上）偏振光下M87超大质量黑洞的图像，图中线条标记了偏振的方向，它与黑洞阴影周围的磁场有关。（图片版权：EHT合作组织）

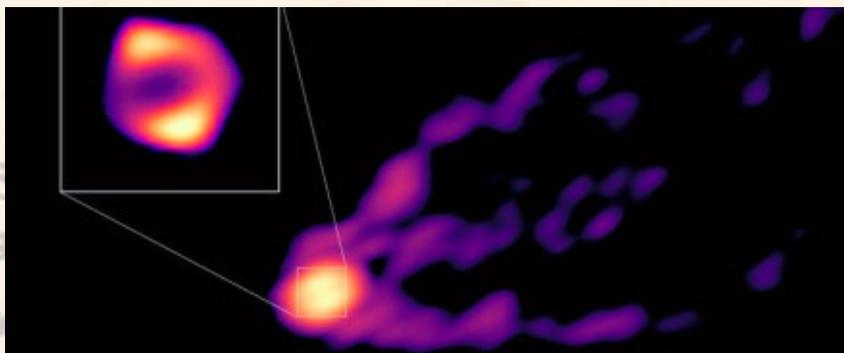
eso2105 — Science Release

# Astronomers image magnetic fields at the edge of M87's black hole

24 March 2021



# 首张黑洞喷出强大喷流的图像



Article | [Open Access](#) | [Published: 26 April 2023](#)

## A ring-like accretion structure in M87 connecting its black hole and jet

[Ru-Sen Lu](#) , [Keiichi Asada](#) , [Thomas P. Krichbaum](#) , [Jongho Park](#), [Fumie Tazaki](#), [Hung-Yi Pu](#), [Masanori Nakamura](#), [Andrei Lobanov](#), [Kazuhiro Hada](#) , [Kazunori Akiyama](#), [Jae-Young Kim](#), [Ivan Marti-Vidal](#), [José L. Gómez](#), [Tomohisa Kawashima](#), [Feng Yuan](#), [Eduardo Ros](#), [Walter Alef](#), [Silke Britzen](#), [Michael Bremer](#), [Avery E. Broderick](#), [Akihiro Doi](#), [Gabriele Giovannini](#), [Marcello Giroletti](#), [Paul T. P. Ho](#), ... [Chen-Yu Yu](#)

[+ Show authors](#)

### Abstract

[Nature](#) **616**, 686–690 (2023) | [Cite this article](#)

The nearby radio galaxy M87 is a prime target for studying black hole accretion and jet formation<sup>1,2</sup>. Event Horizon Telescope observations of M87 in 2017, at a wavelength of 1.3 mm, revealed a ring-like structure, which was interpreted as gravitationally lensed emission around a central black hole<sup>3</sup>. Here we report images of M87 obtained in 2018, at a wavelength of 3.5 mm, showing that the compact radio core is spatially resolved. High-resolution imaging shows a ring-like structure of  $8.4^{+0.5}_{-1.1}$  Schwarzschild radii in diameter, approximately 50% larger than that seen at 1.3 mm. The outer edge at 3.5 mm is also larger than that at 1.3 mm. This larger and thicker ring indicates a substantial contribution from the accretion flow with absorption effects, in addition to the gravitationally lensed ring-like emission. The images show that the edge-brightened jet connects to the accretion flow of the black hole. Close to the black hole, the emission profile of the jet-launching region is wider than the expected profile of a black-hole-driven jet, suggesting the possible presence of a wind associated with the accretion flow.



- 上海天文台的研究人员领衔的国际研究团队
- 首次对射电星系M87的黑洞（M87\*）阴影、其周围被吸积物质的环状结构和强大的相对论性喷流同时进行成像，揭示了中央超大质量黑洞附近的吸积流与喷流起源之间的联系
- 成果于2023年4月26日发表于国际科学期刊《自然》

# M87\*黑洞喷流：只有我最摇摆！



CUI YUZHU NO.00001 EMPOWERED BY  INTOUCHABLE LAB





USTC

中国科大施汝为系列讲座  
-中国科大寰宇开物天文讲坛  
-Early Universe & AliCPT EU Forum



# 黑洞照片又双叒叕来啦

## ——直击银心黑洞



薛永泉 教授  
中国科学技术大学



时 间：2022年5月22日（周日）下午15:00-17:00  
地 点：水上报告厅

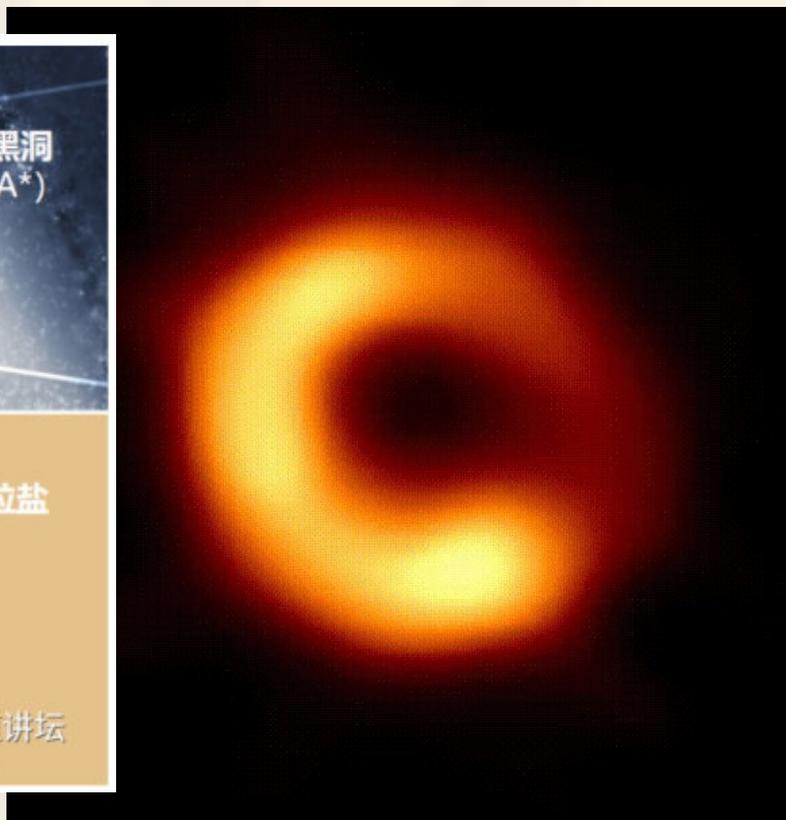
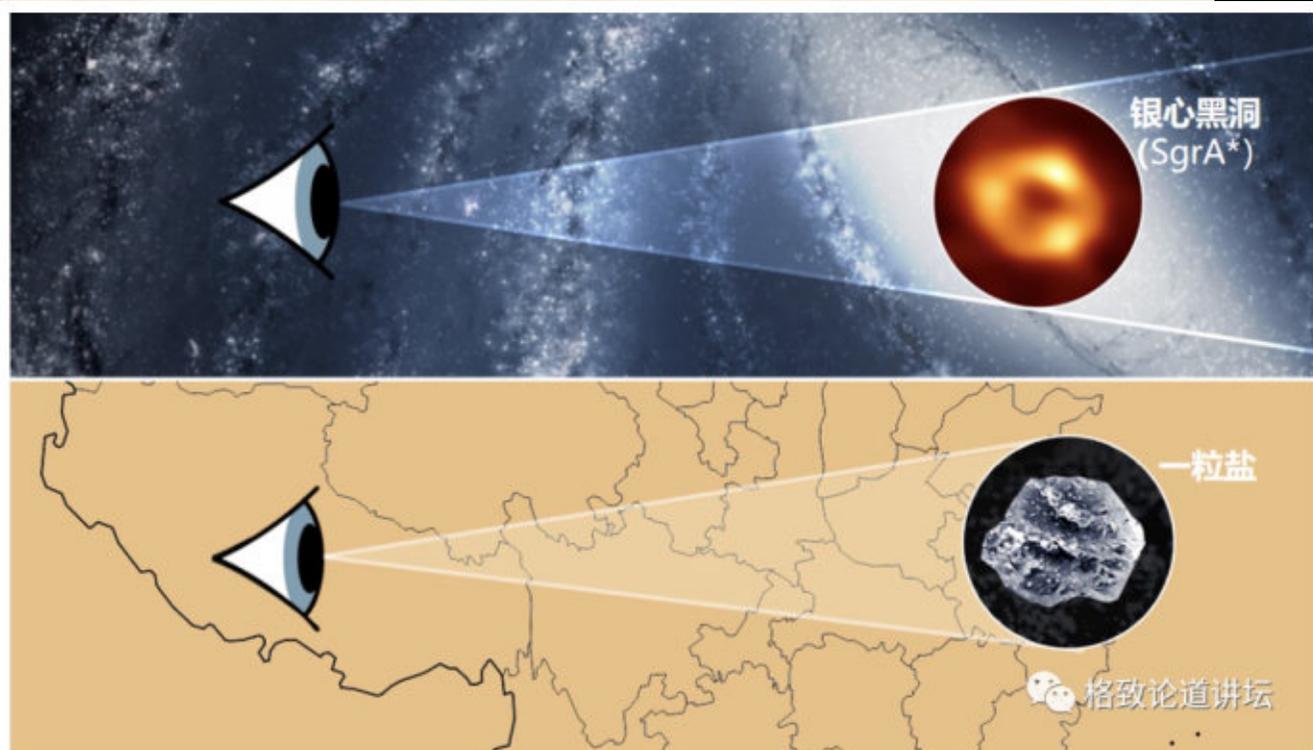
主办方：天文学系、物理系、中国科学院强耦合量子材料物理重点实验室、  
安徽省天文学会、科研部、国际合作与交流部

5



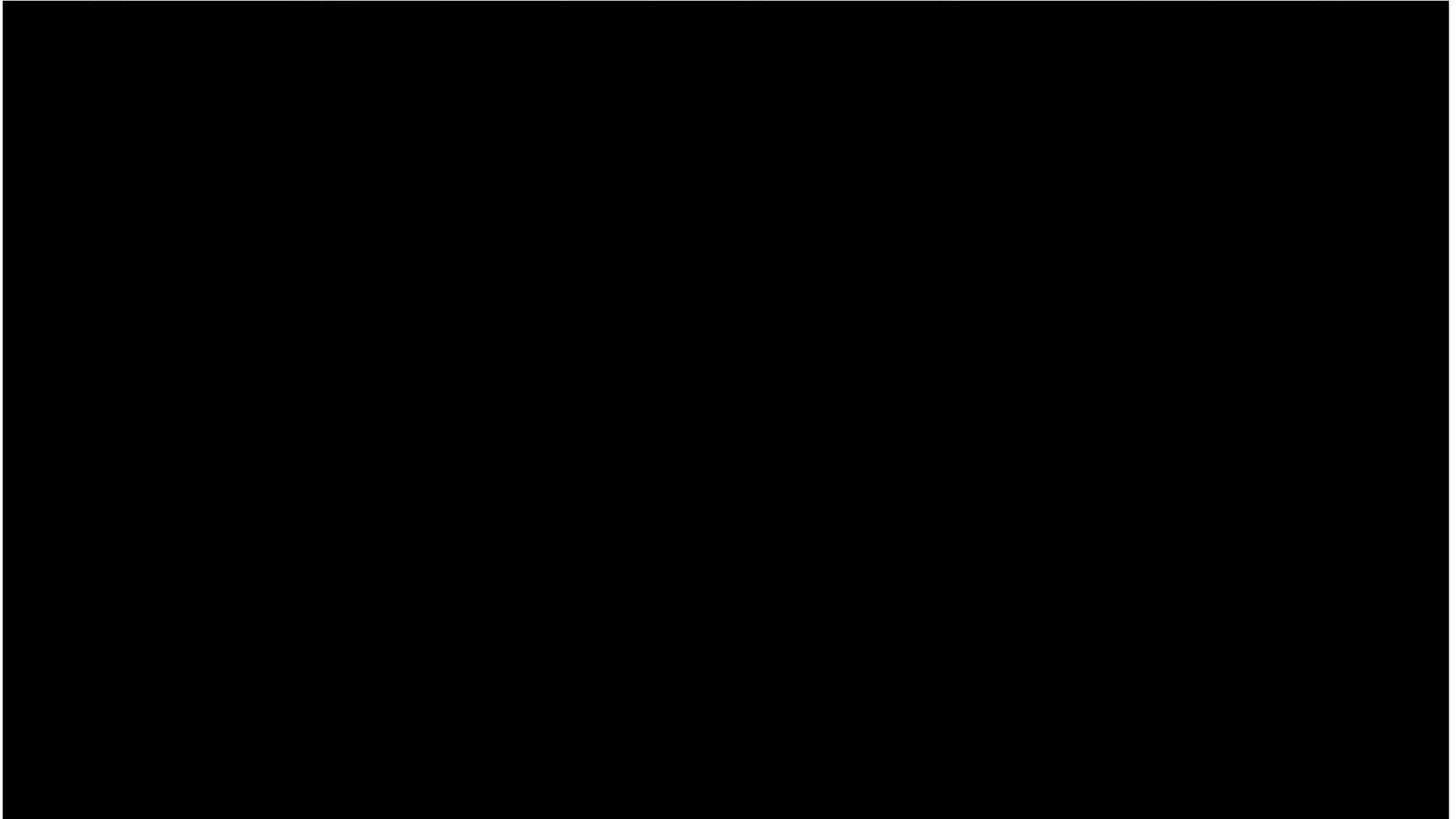
# 在地球上观测银河系中心的黑洞，相当于站在布达拉宫拍外滩的一粒盐 | 孙赫

原创 孙赫 格致论道讲坛 2022-11-23 17:00 发表于北京



# NASA Visualization Probes the Doubly Warped World of Binary Black Holes

Released on April 15, 2021



# 在什么地方发现?

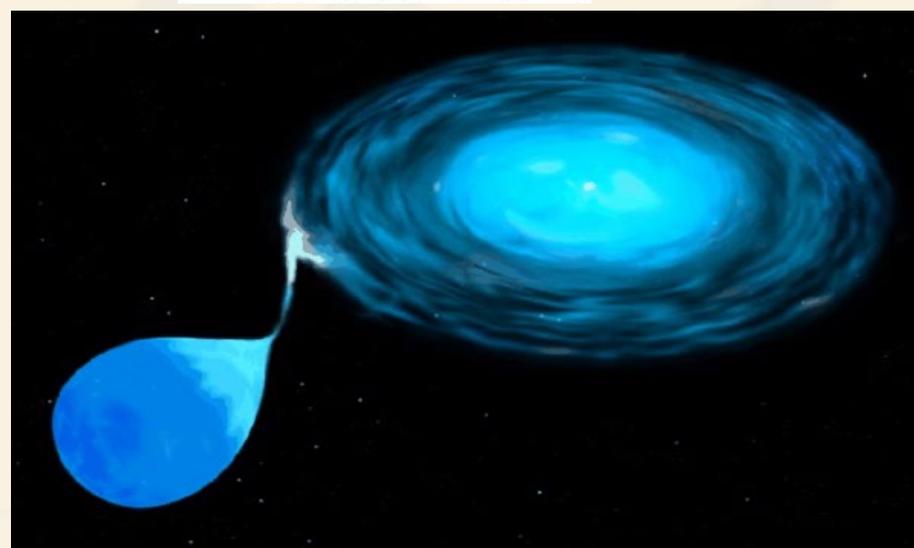


用黑洞X射线数据  
检验广义相对论  
(复旦大学  
Cosimo Bambi)



## 星系中心

1 **BIG** BH per galaxy  
million-billion x mass of sun  
formation not fully understood



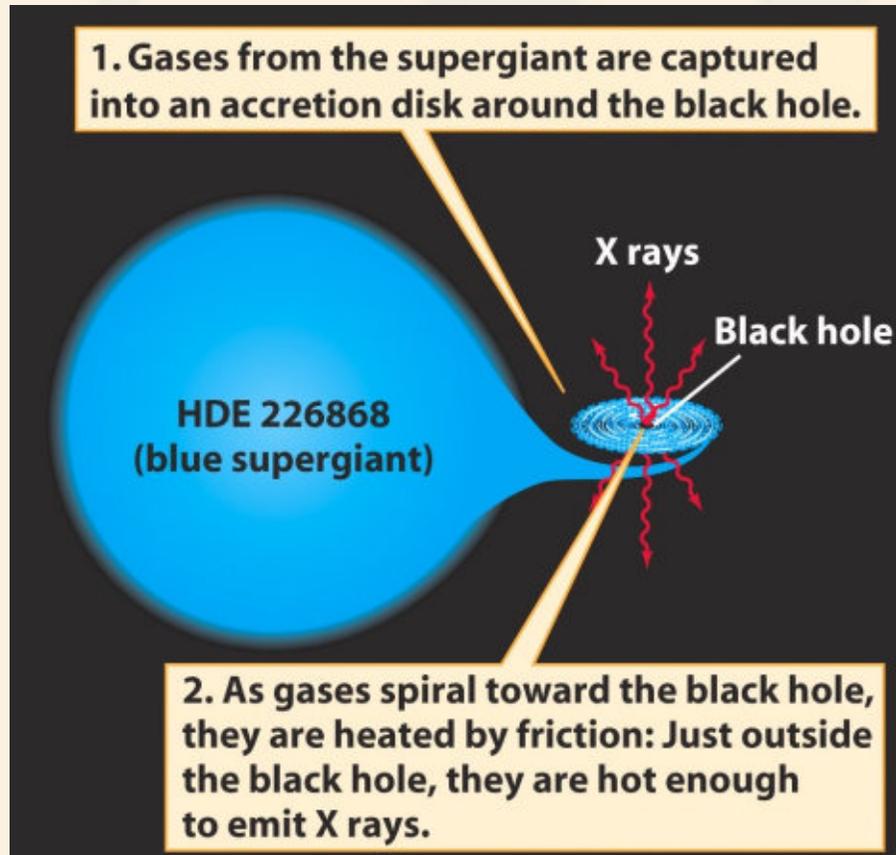
## 双星系统

**millions** of 'little' BHs per galaxy  
~ 10 x mass of sun  
formed by collapse of a massive star

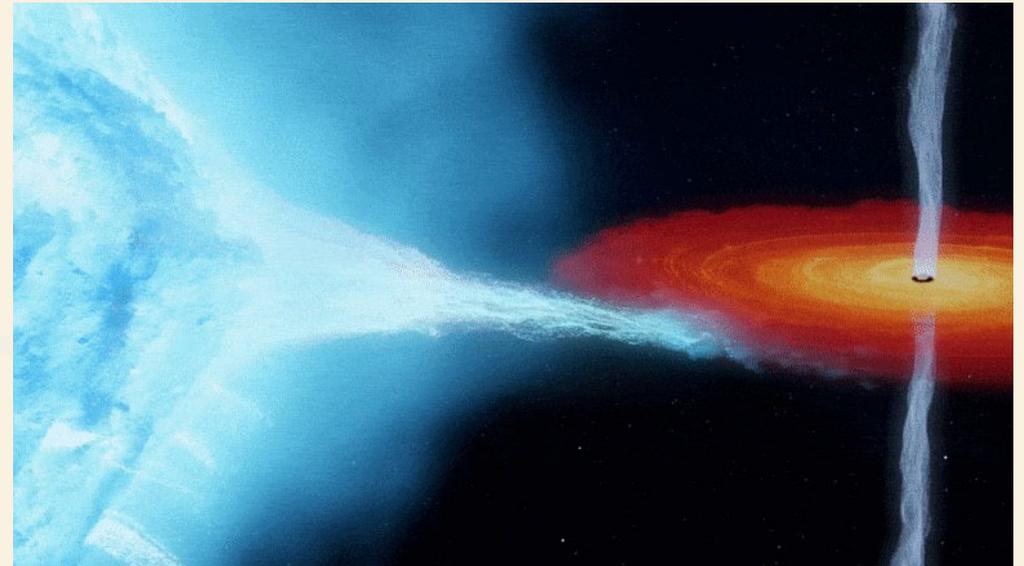
# X射线双星



黑洞X射线  
双星的时变  
与能谱性质



气体落入黑洞的过程中释放引力势能，加热气体，辐射大量X射线



If two stars orbit close enough to each other, mass gets pulled from one and falls (accretes) onto the other. The smaller the target object, the faster the gas moves and the hotter it gets.

# 如何被吸入“黑洞”？



“疯狂”的  
黑洞磁囚禁  
吸积盘



微类星体的多波  
段研究（紫金山  
天文台 刘庆忠）

# 如何知道它是黑洞？

- ❖ 致密星：白矮星、中子星或黑洞？
- ❖ 通过伴星测质量

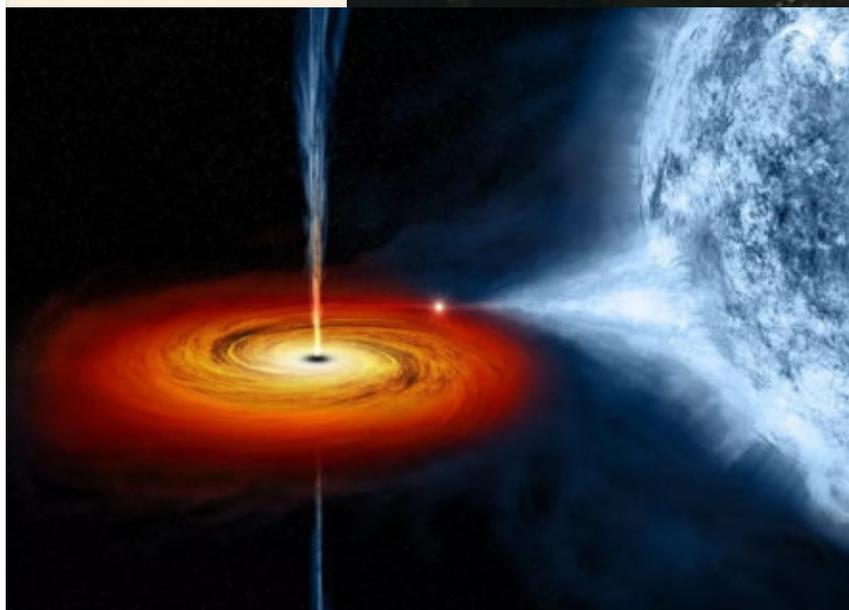
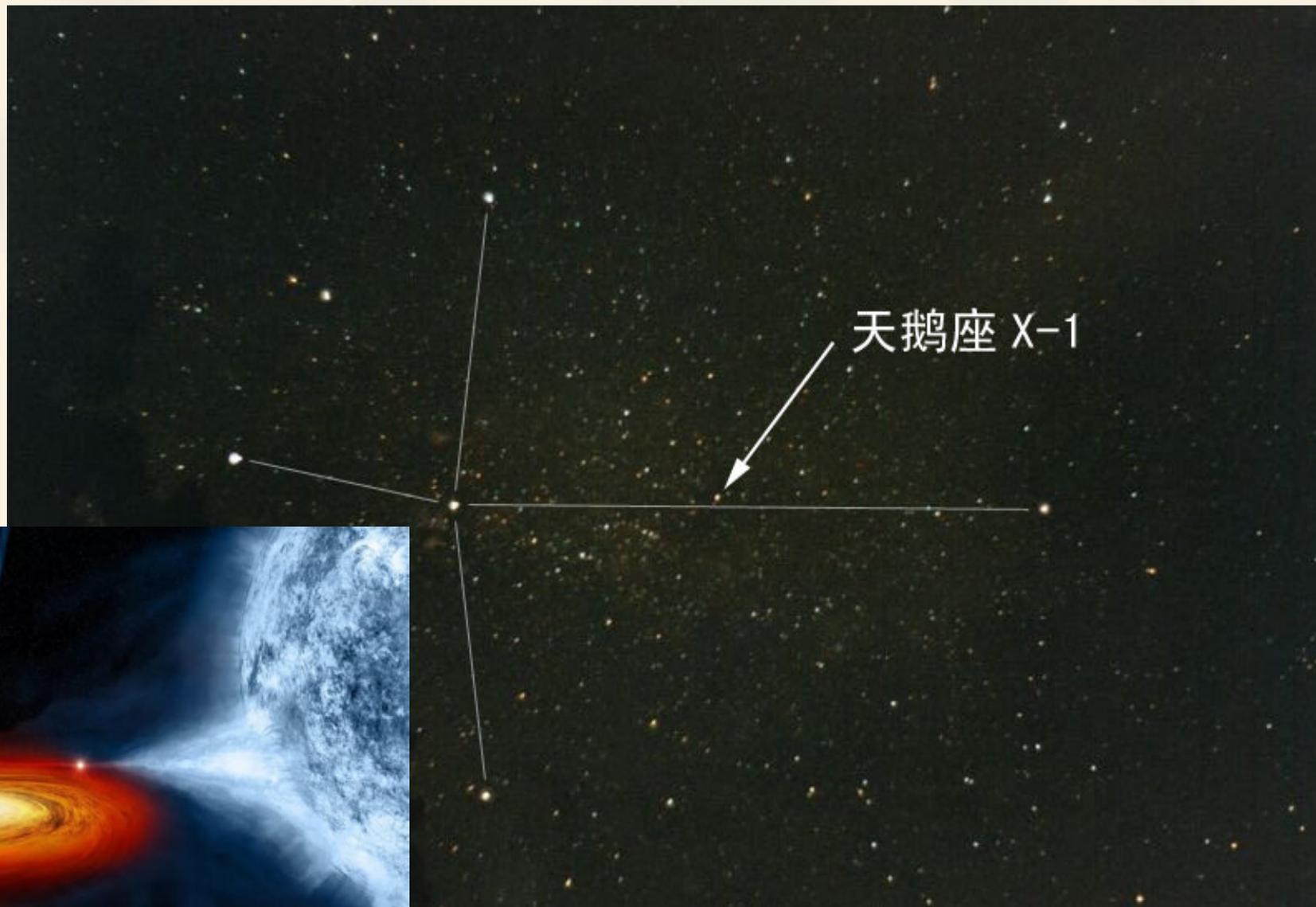
质量  $>$  3倍太阳质量  
 $\Rightarrow$  黑洞!



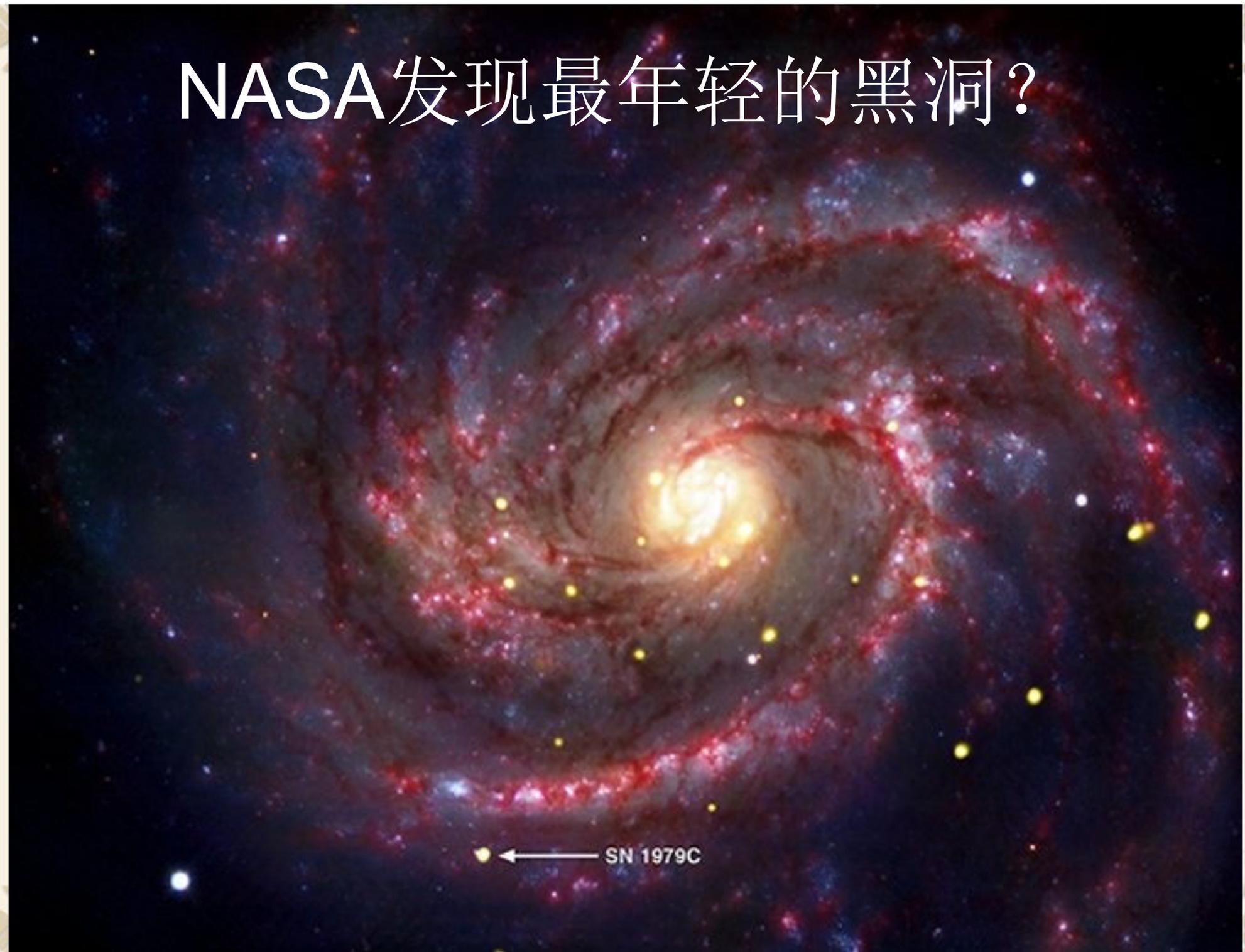
Chandrasekhar

- ❖ 目前发现几十个黑洞候选者 (冰山一角)

# 可能的黑洞-----天鹅座X-1 已确认



# NASA发现最年轻的黑洞?



eso2007 — Science Release



# ESO Instrument Finds Closest Black Hole to Earth

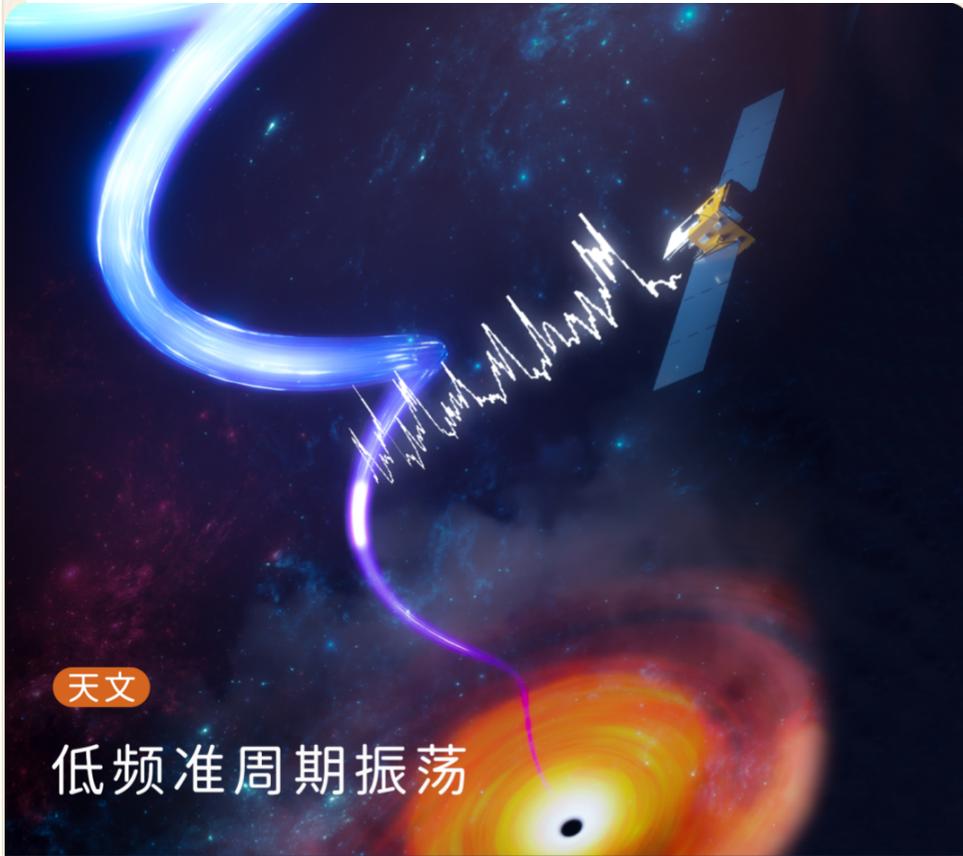
Invisible object has two companion stars visible to the naked eye

6 May 2020



A team of astronomers from the European Southern Observatory (ESO) and other institutes has discovered a black hole lying just 1000 light-years from Earth. The black hole is closer to our Solar System than any other found to date and forms part of a triple system that can be seen with the naked eye. The team found evidence for the invisible object by tracking its two companion stars using the MPG/ESO 2.2-metre telescope at ESO's La Silla Observatory in Chile. They say this system could just be the tip of the iceberg, as many more similar black holes could be found in the future.

# Discovery of oscillations above 200 keV in a black hole X-ray binary with Insight-HXMT



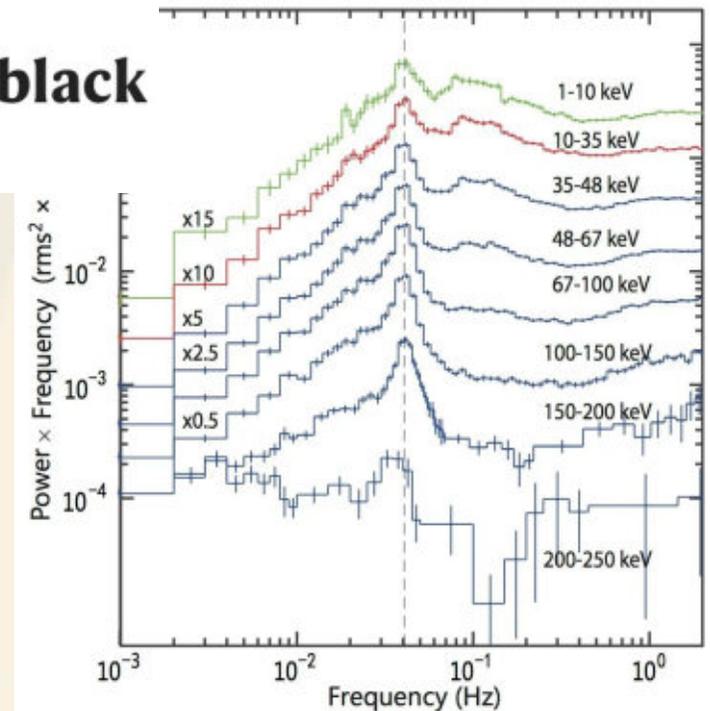
天文

## 低频准周期振荡



原理@principia 1687  
科学，照亮黑暗的蜡烛。

中国慧眼卫星发现了迄今为止能量最高的低频准周期振荡现象。

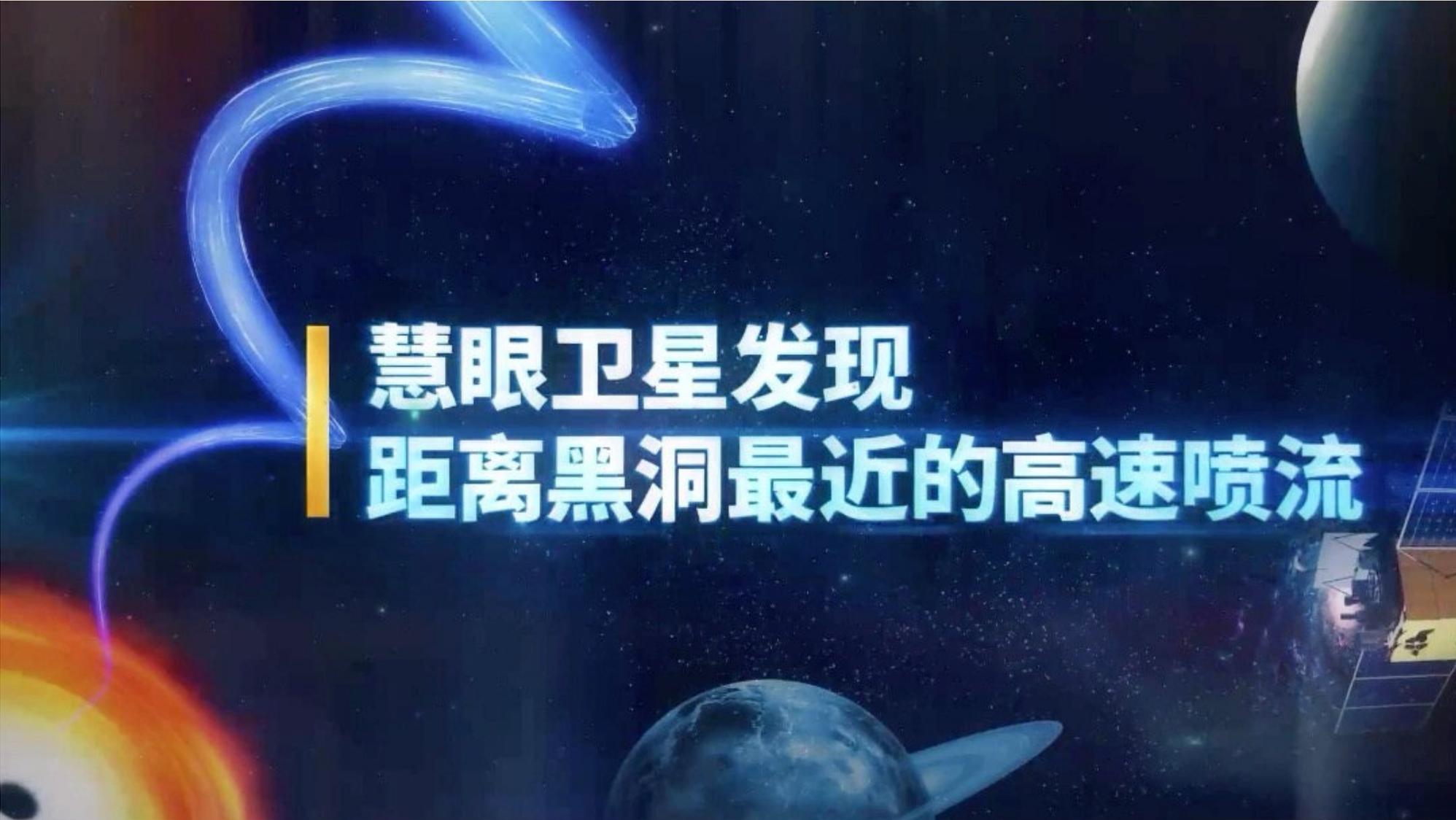


黑洞的自转会对黑洞周围的空间产生拖曳效应，这就导致了黑洞视界附近的喷流发生进动。研究人员认为，观测到的低频QPO很可能起源于围绕黑洞的喷流的进动。

这一次，慧眼卫星的观测将喷流的源头定位到距离黑洞上百公里（几倍黑洞视界半径）的区域，这是迄今为止观测到的距离黑洞最近的相对论喷流！

此次的观测为解决一直以来存在争议的低频QPO物理起源问题提供了重要依据，对于研究黑洞附近的广义相对论效应、物质动力学过程和辐射机制等也都具有重大意义。

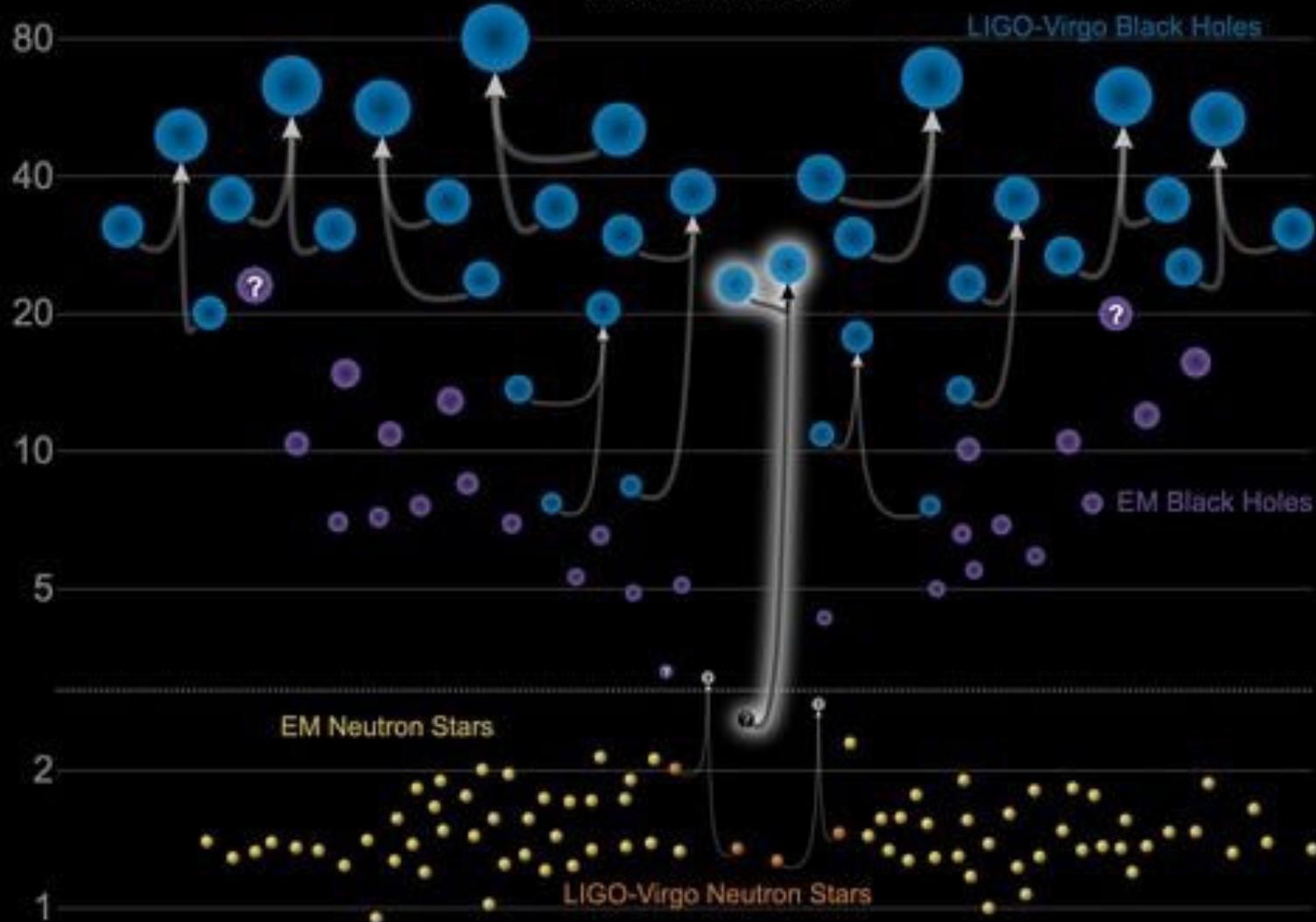
慧眼卫星发现距离黑洞最近的高速喷流



慧眼卫星发现  
距离黑洞最近的高速喷流

# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



Updated 2020-05-16

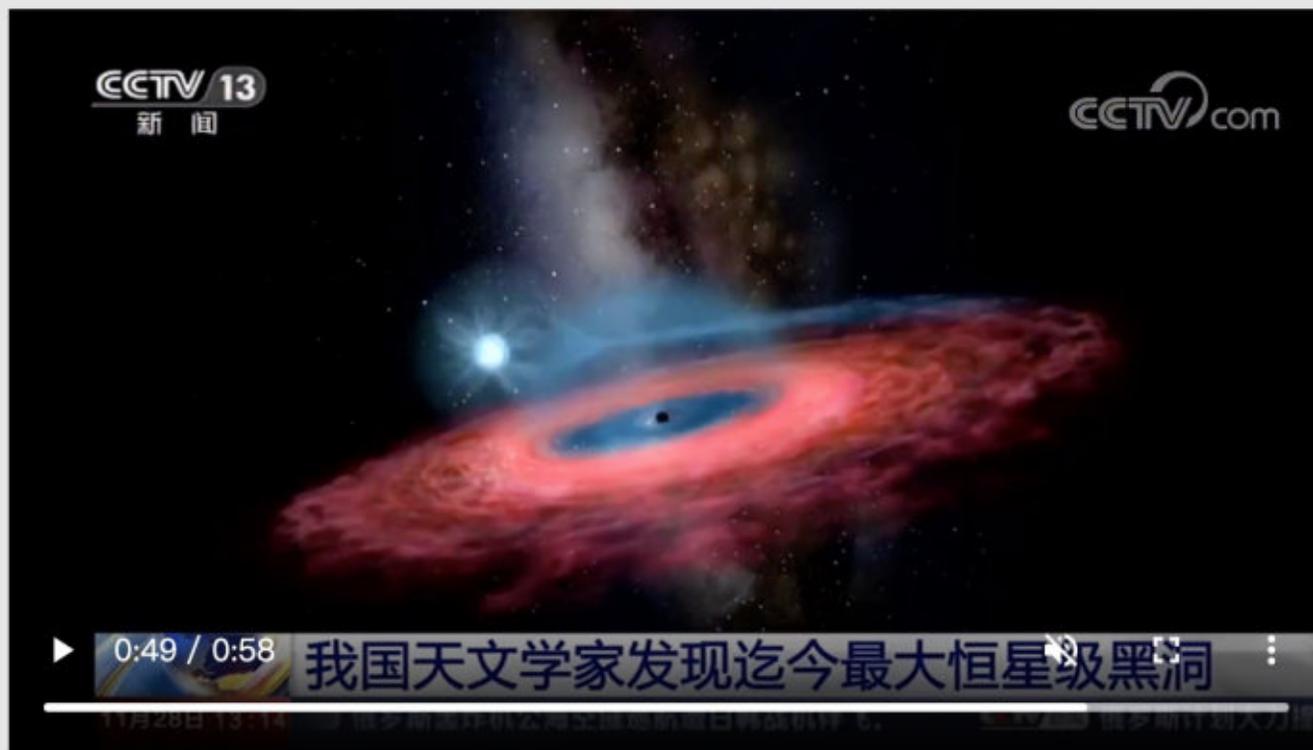
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

A chart depicting the range of collision events observed through gravitational waves. The bottom section of the image shows neutron-star-size objects; the top section shows black-hole-size objects. The new detection, highlighted here, involved a black hole and what is either a very large neutron star or a very small black hole. (Image credit: LIGO-Virgo/ Frank Elavsky & Aaron Geller (Northwestern))

# 天文学家利用LAMOST发现迄今最大的恒星级黑洞

文章来源：国家天文台

发布时间：2019-11-28



11月28日，国际科学期刊《自然》发布了中国科学院国家天文台刘继峰、张昊彤研究团队的一项重大发现。依托我国自主研发的国家重大科技基础设施郭守敬望远镜（LAMOST），研究团队发现了一颗迄今为止质量最大的恒星级黑洞，并提供了一种利用LAMOST巡天优势寻找黑洞的新方法。这颗70倍太阳质量的黑洞远超理论预言的质量上限，颠覆了人们对恒星级黑洞形成的认知，有望推动恒星演化和黑洞形成理论的革新。

黑洞是一种本身不发光的神秘天体。任何物质，包括光也无法从它身边逃离。根据质量的不同，黑洞一般分为恒星级黑洞、中等质量黑洞和超大质量黑洞。这其中，恒星级黑洞是由大质量恒星死亡形成的，是宇宙中广泛存在的“居民”。理论预言银河系中有上亿颗恒星级黑洞，但迄今为止，天文学家仅在银河系发现了约20颗恒星级黑洞——而且都是通过黑洞吸积伴星气体所发出的X射线来识别的、质量均小于20倍太阳质量的黑洞。

找到新的方法，发现数量巨大、没有X射线辐射的黑洞，成了天文学界近年来研究的热点和难点。



## 现身吧，“闷声发大财”的中子星

nature  
astronomy

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41550-022-01766-0>



### A dynamically discovered and characterized non-accreting neutron star-M dwarf binary candidate

Published: 22 September 2022

Tuan Yi<sup>1</sup>, Wei-Min Gu<sup>1</sup>, Zhi-Xiang Zhang<sup>1</sup>, Ling-Lin Zheng<sup>1</sup>, Mouyuan Sun<sup>1</sup>, Junfeng Wang<sup>1</sup>, Zhongrui Bai<sup>2</sup>, Pei Wang<sup>2</sup>, Jianfeng Wu<sup>1</sup>, Yu Bai<sup>2</sup>, Song Wang<sup>2</sup>, Haotong Zhang<sup>2</sup>, Yize Dong<sup>3</sup>, Yong Shao<sup>4</sup>, Xiang-Dong Li<sup>4</sup>, Jia Zhang<sup>5</sup>, Yang Huang<sup>6</sup>, Fan Yang<sup>7</sup>, Qingzheng Yu<sup>1</sup>, Hui-Jun Mu<sup>8</sup>, Jin-Bo Fu<sup>1</sup>, Senyu Qi<sup>1</sup>, Jing Guo<sup>1</sup>, Xuan Fang<sup>2</sup>, Chuanjie Zheng<sup>2,9</sup>, Chun-Qian Li<sup>2</sup>, Jian-Rong Shi<sup>2,9</sup>, Huanyang Chen<sup>10</sup> and Jifeng Liu<sup>2,9</sup>

Typically, neutron stars are discovered by observations at radio, X-ray or gamma-ray wavelengths. Unlike radio pulsar surveys and X-ray observations, optical time-domain surveys can unveil and characterize exciting but less explored non-accreting and/or non-beaming neutron stars in binaries. Here we report the discovery of such a neutron star candidate using the LAMOST spectroscopic survey. The candidate, designated LAMOST J112306.9 + 400736, is in a single-lined spectroscopic binary containing an optically visible M star. The star's large radial velocity variation and ellipsoidal variations indicate a relatively massive unseen companion. Utilizing follow-up spectroscopy from the Palomar 200 in. telescope and high-precision photometry from the Transiting Exoplanet Survey Satellite, we measure a companion mass of  $1.24^{+0.03}_{-0.03} M_{\odot}$ . Main-sequence stars with this mass are ruled out, leaving a neutron star or a massive white dwarf. Although a massive white dwarf cannot be excluded, the lack of UV excess radiation from the companion supports the neutron star hypothesis. Deep radio observations with the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) yielded no detections of either pulsed or persistent emission. J112306.9 + 400736 is not detected in numerous X-ray and gamma-ray surveys, suggesting that the neutron star candidate is not currently accreting and pulsing. Our work exemplifies the capability of discovering compact objects in non-accreting close binaries by synergizing optical time-domain spectroscopy and high-cadence photometry.

- 厦门大学、国家天文台、加州大学戴维斯分校、南京大学、云南天文台、云南大学、北京师范大学、郑州大学等的研究人员
- 使用郭守敬望远镜等设备，利用动力学的方法，发现了一个“宁静态”中子星-M型红矮星的双星系统，阐明了该方法搜寻宁静态致密天体的有效性
- 成果于2022年9月22日发表于国际科学期刊《自然·天文》

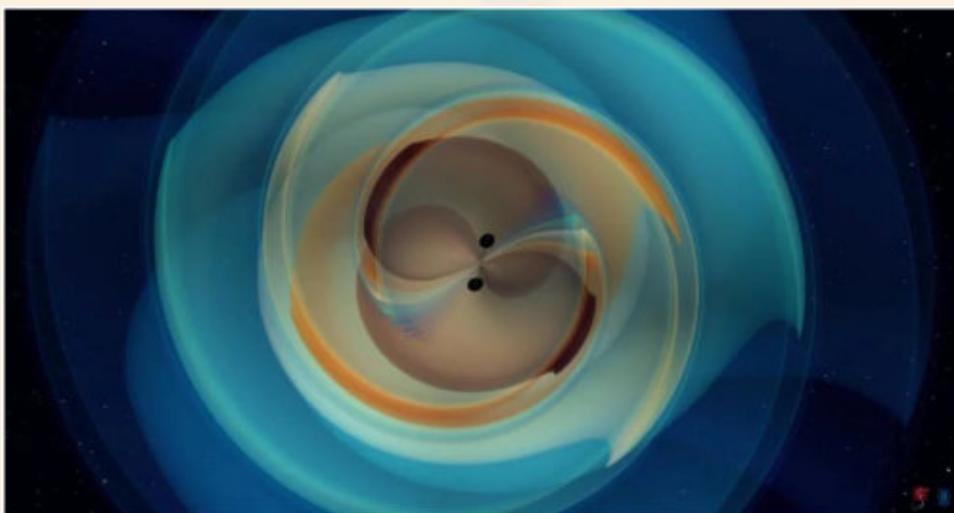
# 史上首次!“不可能质量”黑洞被发现, LIGO-Virgo探测到迄今最强引力波源

原创 科研圈 科研圈 5天前 (2020.09.02)

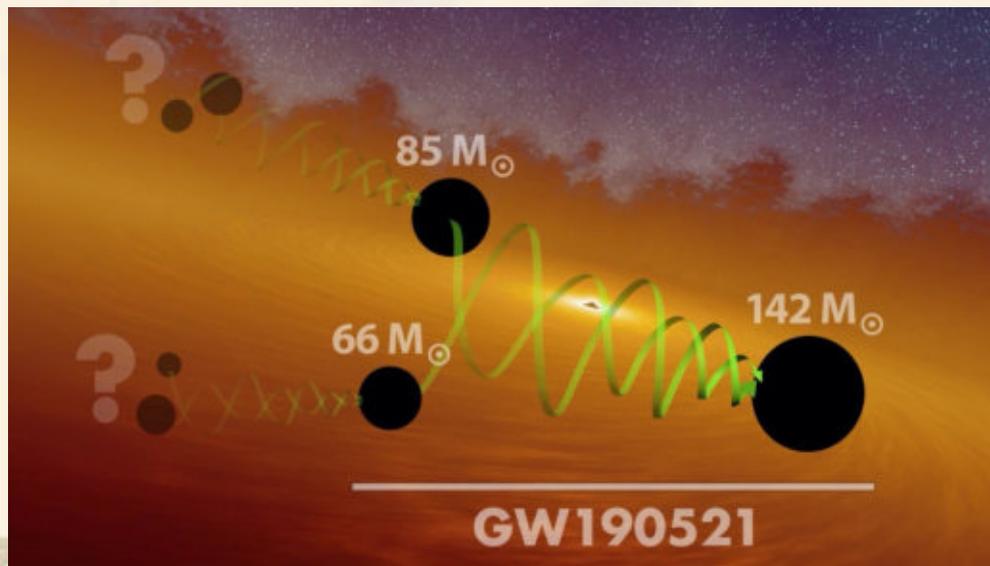
引力波探测器 LIGO/Virgo 发现了一个 142 倍太阳质量的黑洞, 这是天文学家首次观测到中等质量黑洞, 也是目前借助引力波观测到的最大的黑洞。

这个黑洞由两个质量分别为 85 倍和 65 倍太阳质量的黑洞合并而成, 这也对目前的黑洞形成理论提出了挑战, 因为理论预测 85 倍太阳质量的黑洞是不可能存在的。

相关研究今日在《物理评论快报》(*Physical Review Letters*) 和《天体物理学期刊通讯》(*Astrophysical Journal Letters*) 发表, 这一发现将帮助我们更好地认识位于一些星系中央的超大质量黑洞。



图片来源: N. Fischer, H. Pfeiffer, A. Buonanno (Max Planck Institute for Gravitational Physics),  
Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) Collaboration



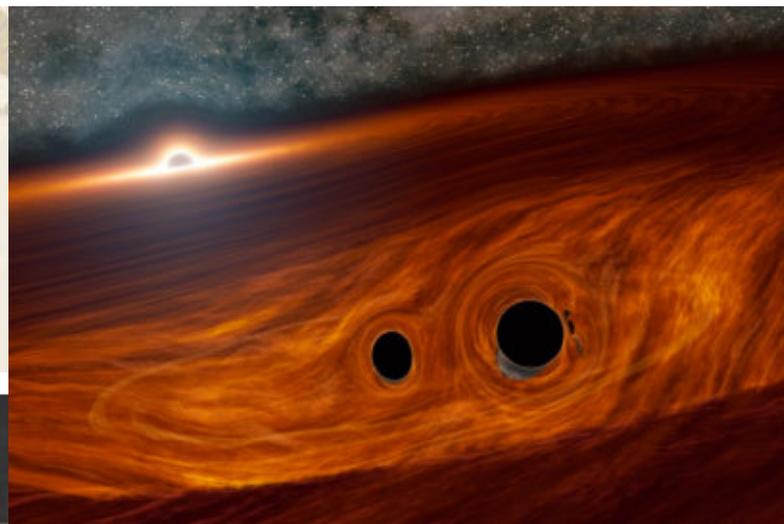
图片来源: LIGO/Caltech/MIT/R. Hurt (IPAC)

I HAVE NO FRIENDS

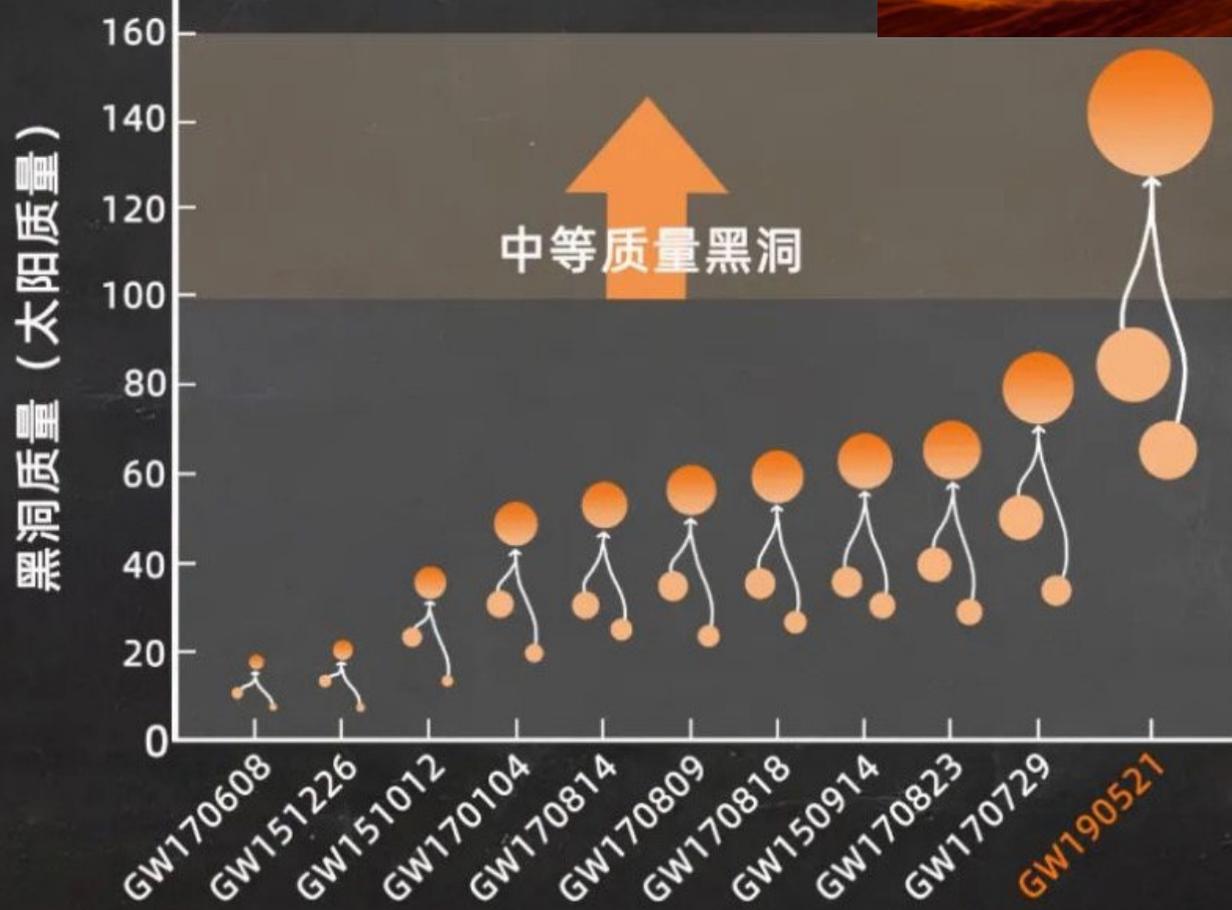


I ATE THEM ALL...

imgflip.com

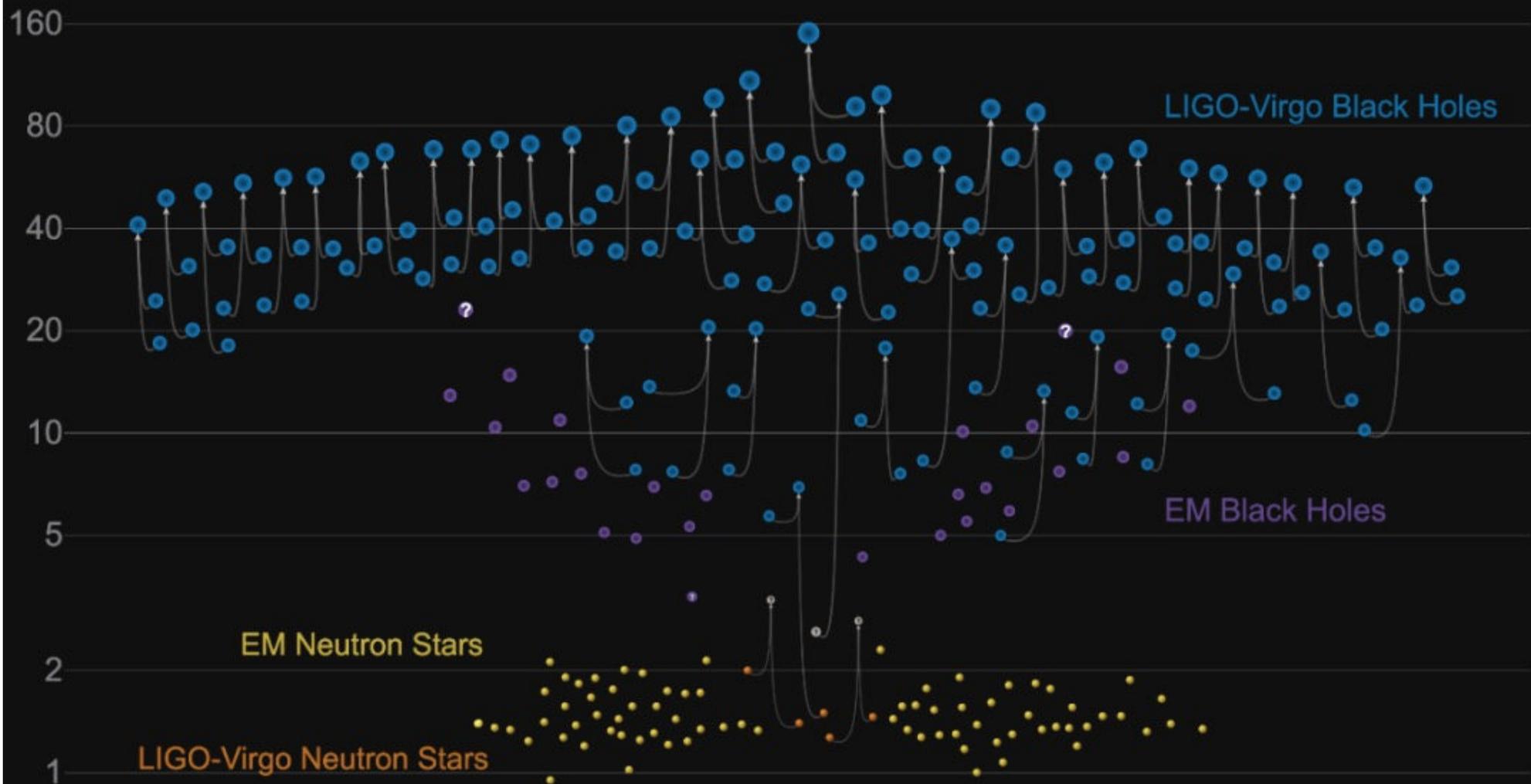


### 黑洞并合事件



# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

中国科学院国家天文台

# Masses in the Stellar Graveyard

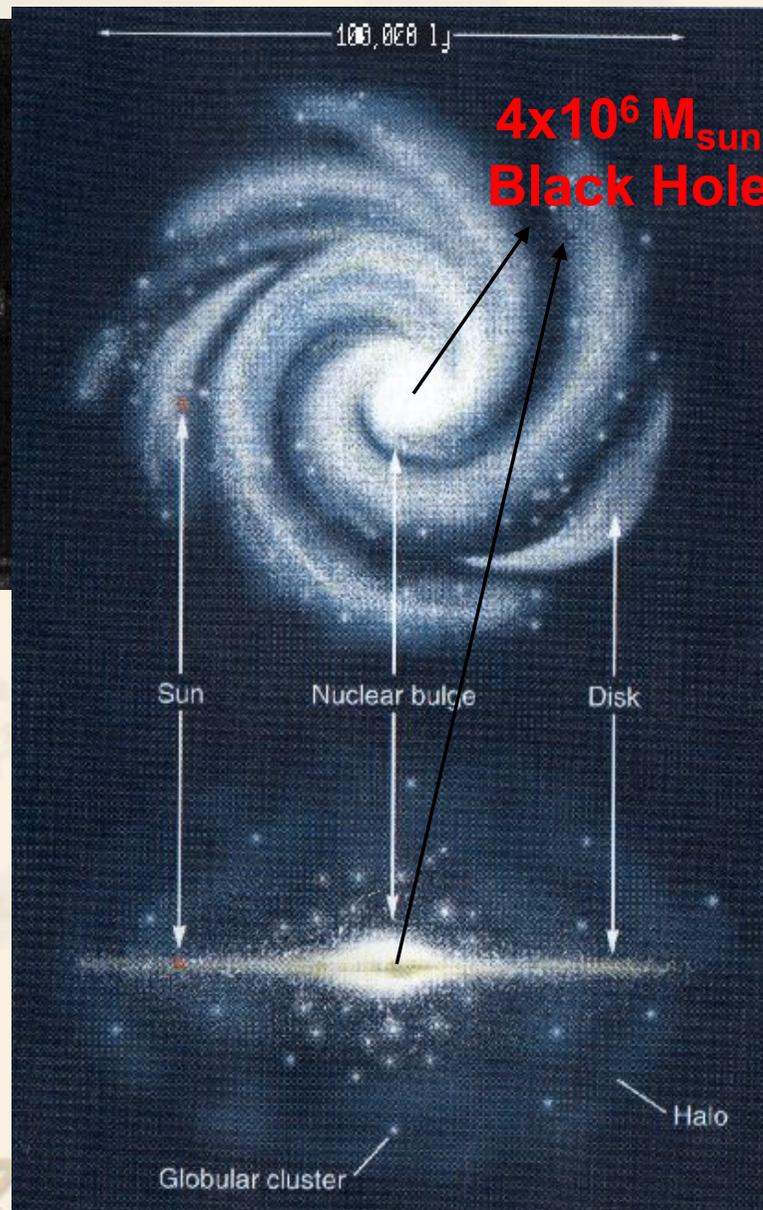
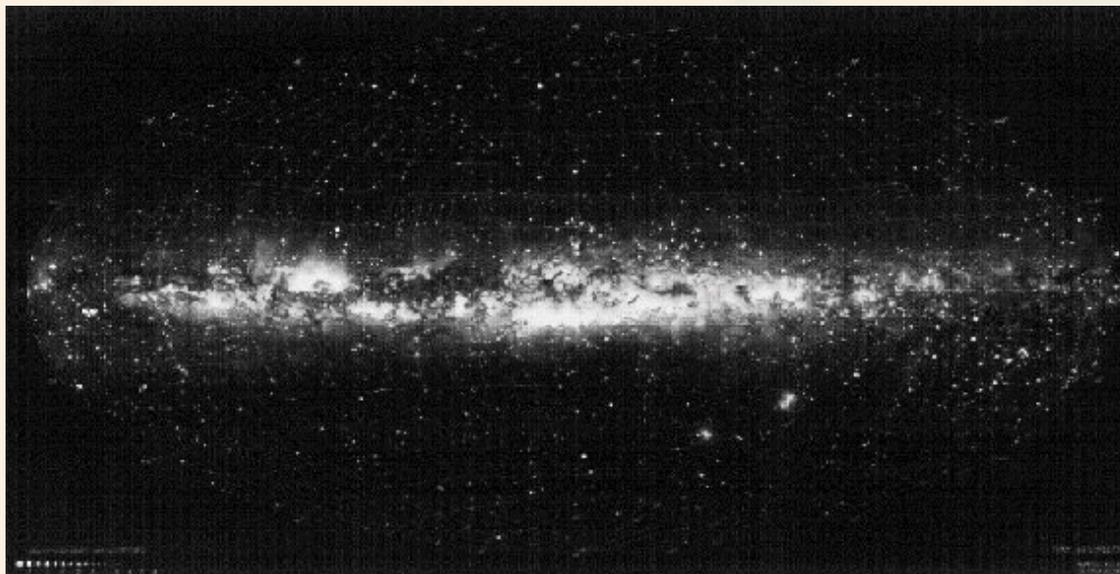
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



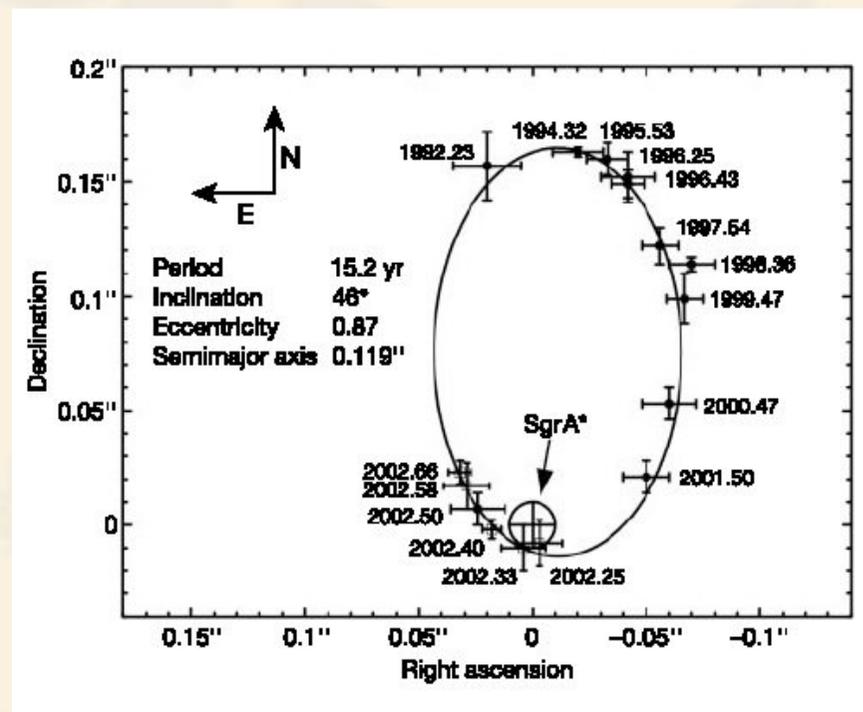
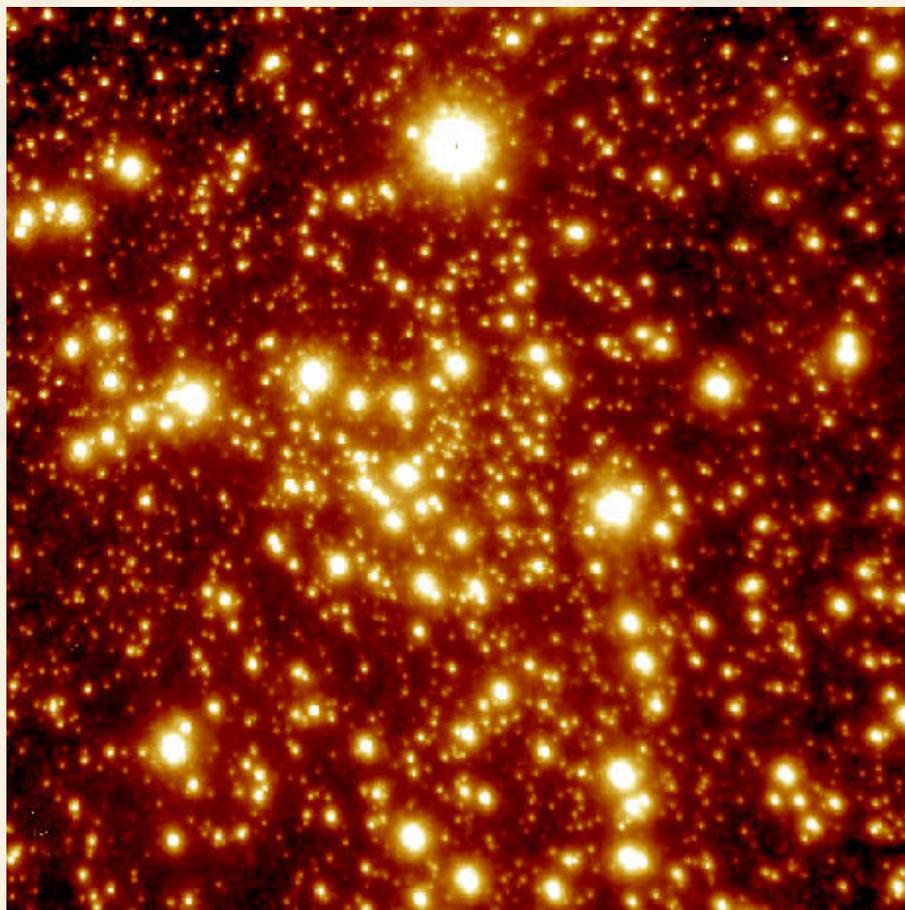
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

Credit: Visualization: LIGO-Virgo-KAGRA / Aaron Geller / Northwestern

# 银河系中心存在大质量黑洞



# 银河系中心（光年）的恒星



检测恒星的运动得到中心黑洞的质量约为4百万太阳质量

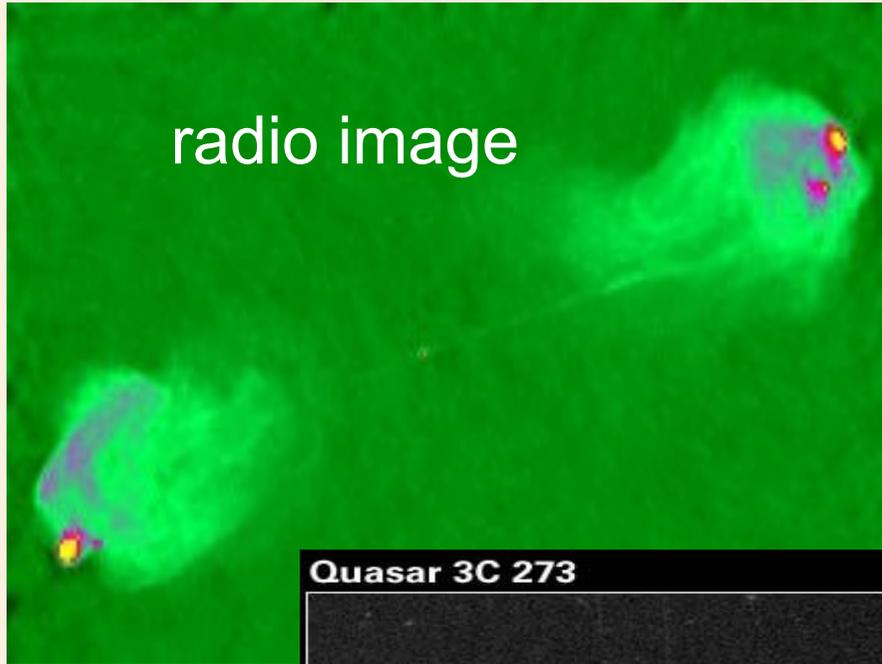


# “活动星系核”



请扫码观看

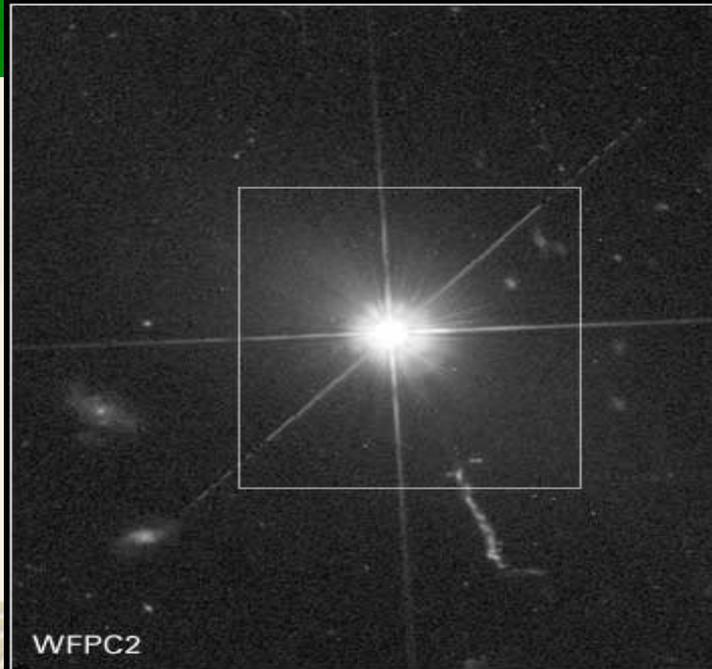
科普演讲：凝望，与黑洞共舞！



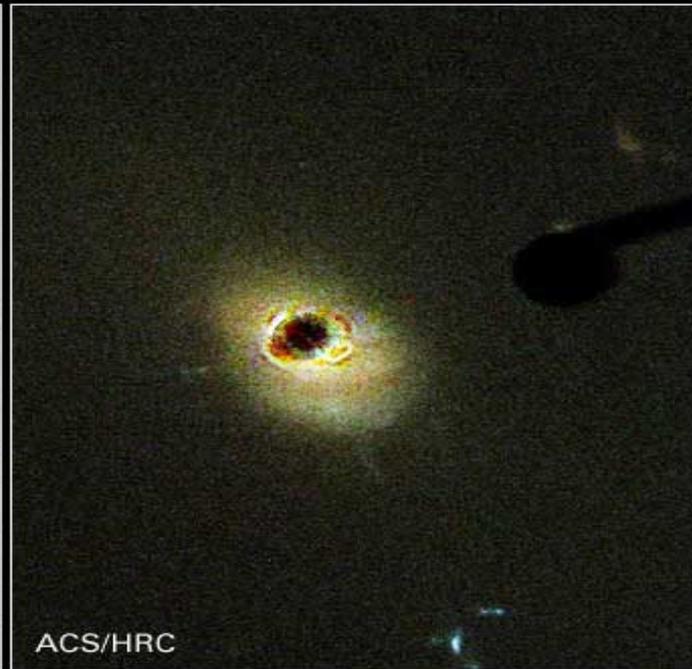
radio image

Quasar 3C 273

HST • WFPC2, ACS

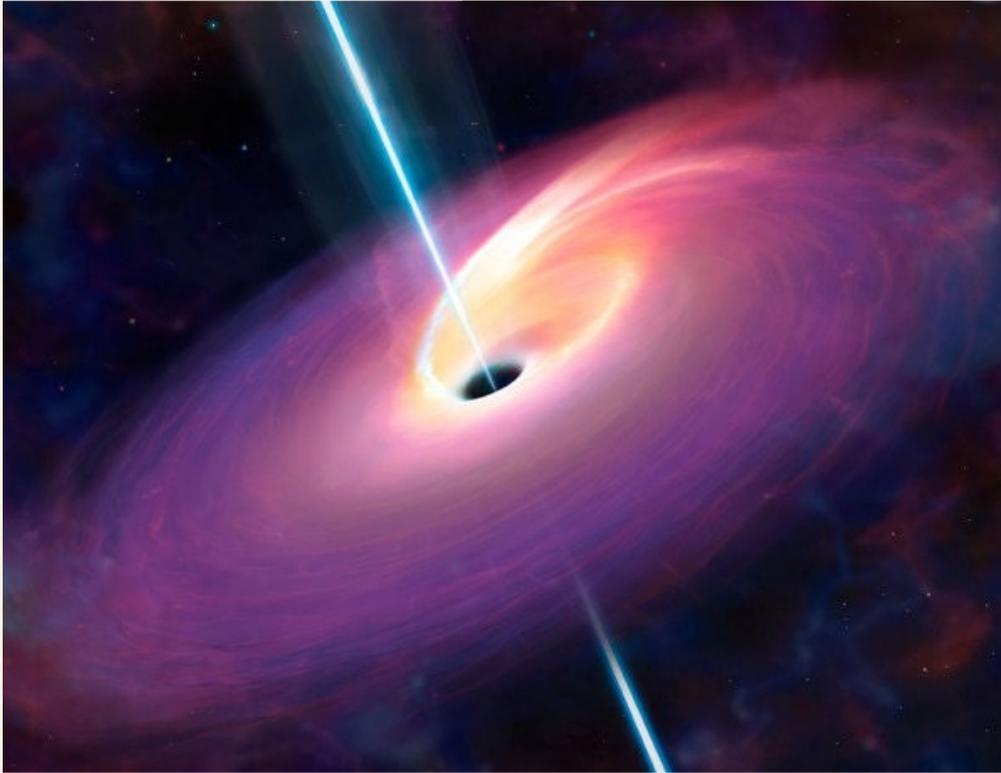


WFPC2

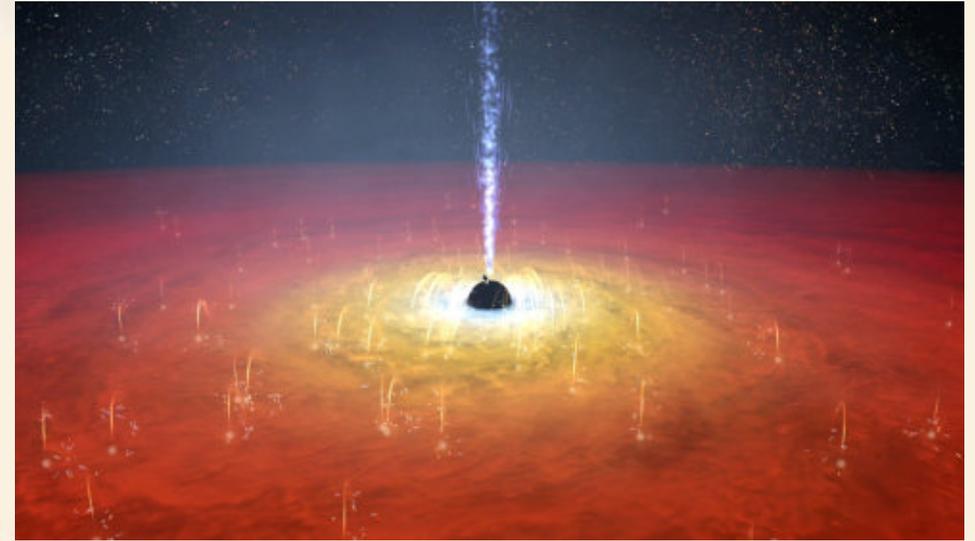


ACS/HRC

# Active galactic nuclei (AGNs) = accreting SMBHs



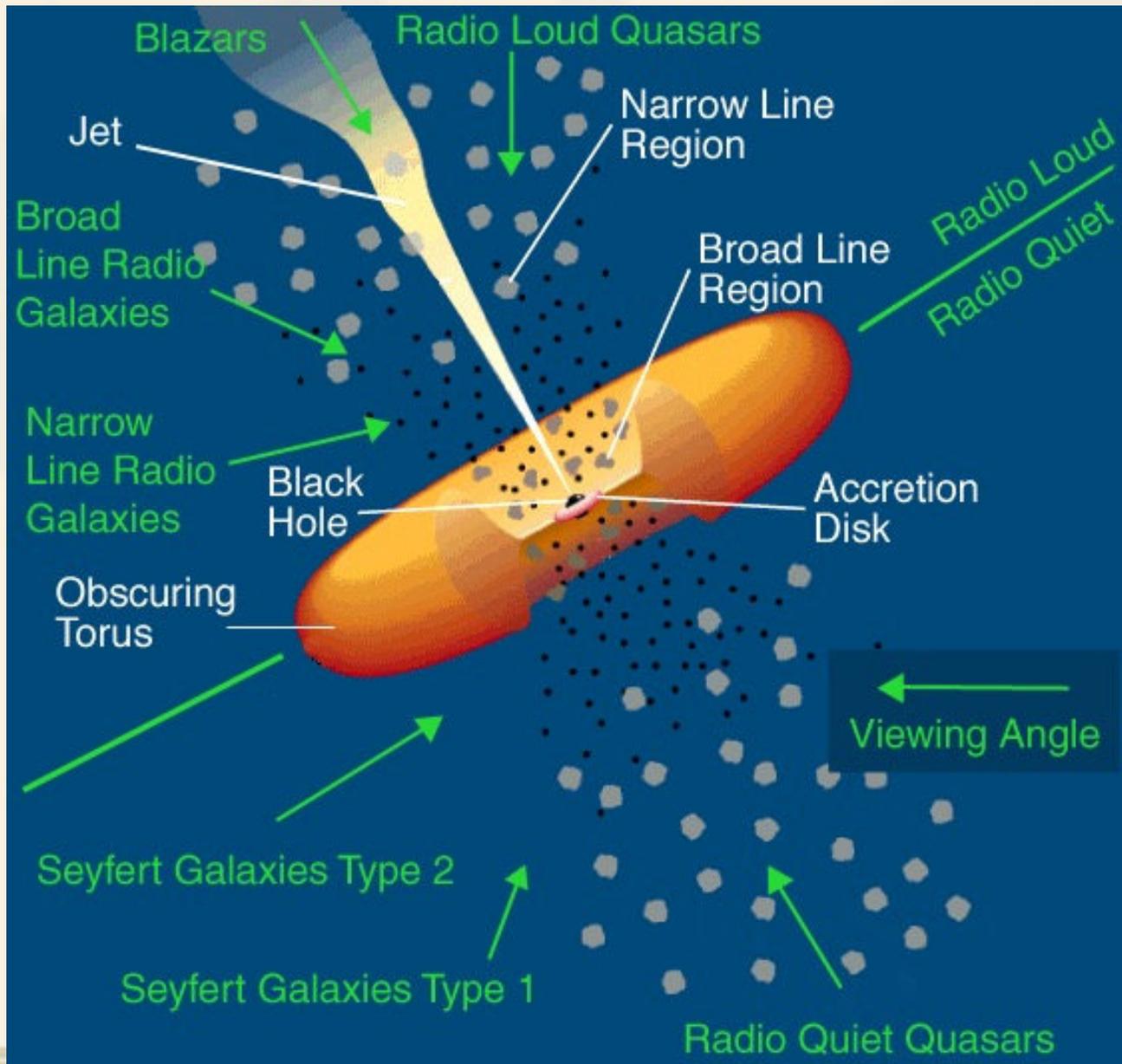
*(University of Warwick, retrieved from bordermail.com.au)*



Tr'Ehnl & Brandt (2017)

- Tremendous amounts of energy from the center of a galaxy
- Excess emission across almost all wavelengths
- Accretion of mass onto supermassive black holes (SMBHs) ( $\sim 10^6\text{-}10^9$  Msun)
- Most luminous persistent sources of electromagnetic radiation
- Key role in galaxy formation and evolution & LSS formation etc.

# Orientation-based unified models for AGNs



(NASA)



宇宙中的黑洞：  
黑洞点亮宇宙



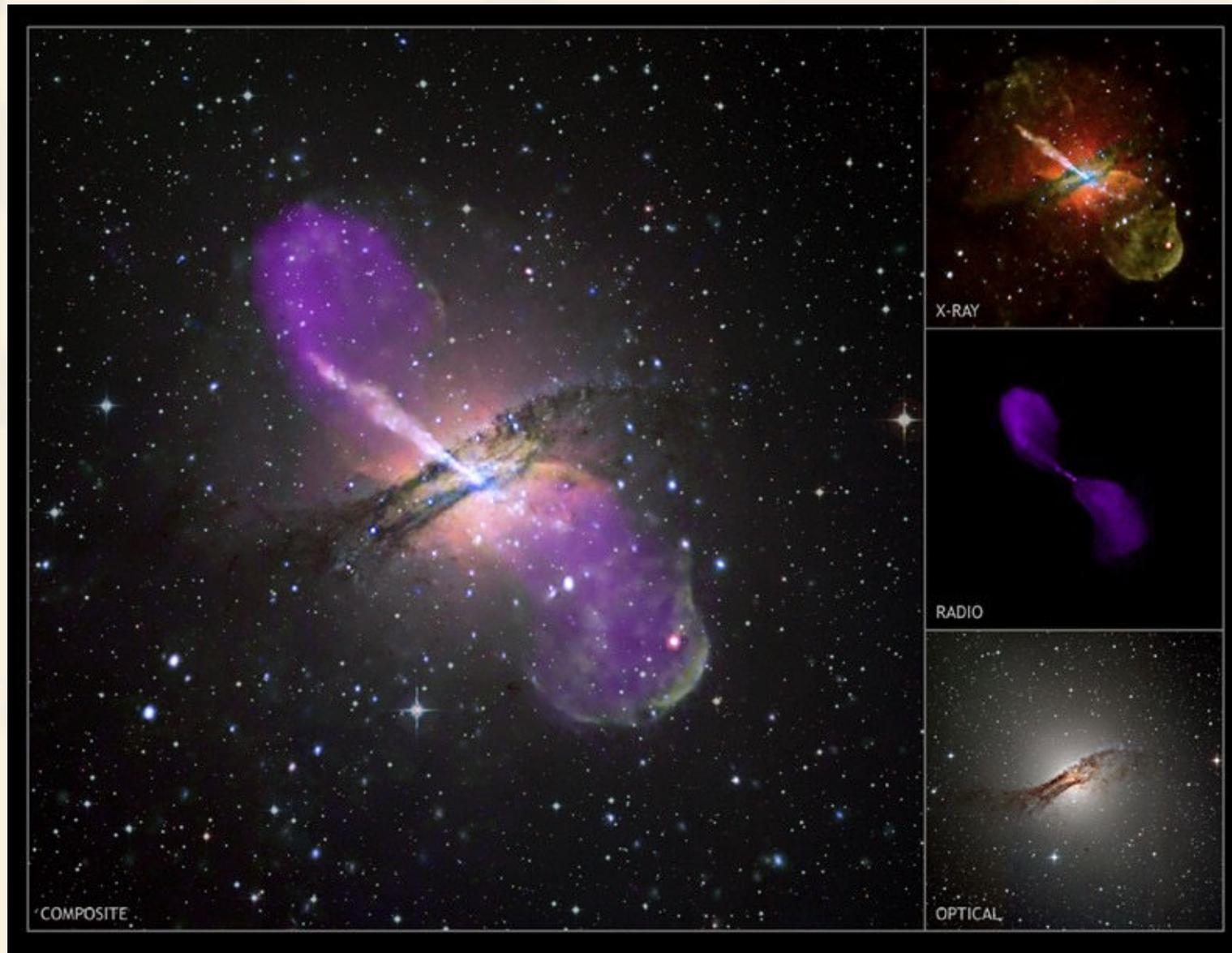
耀变体的喷流效应

# Fly toward a SMBH



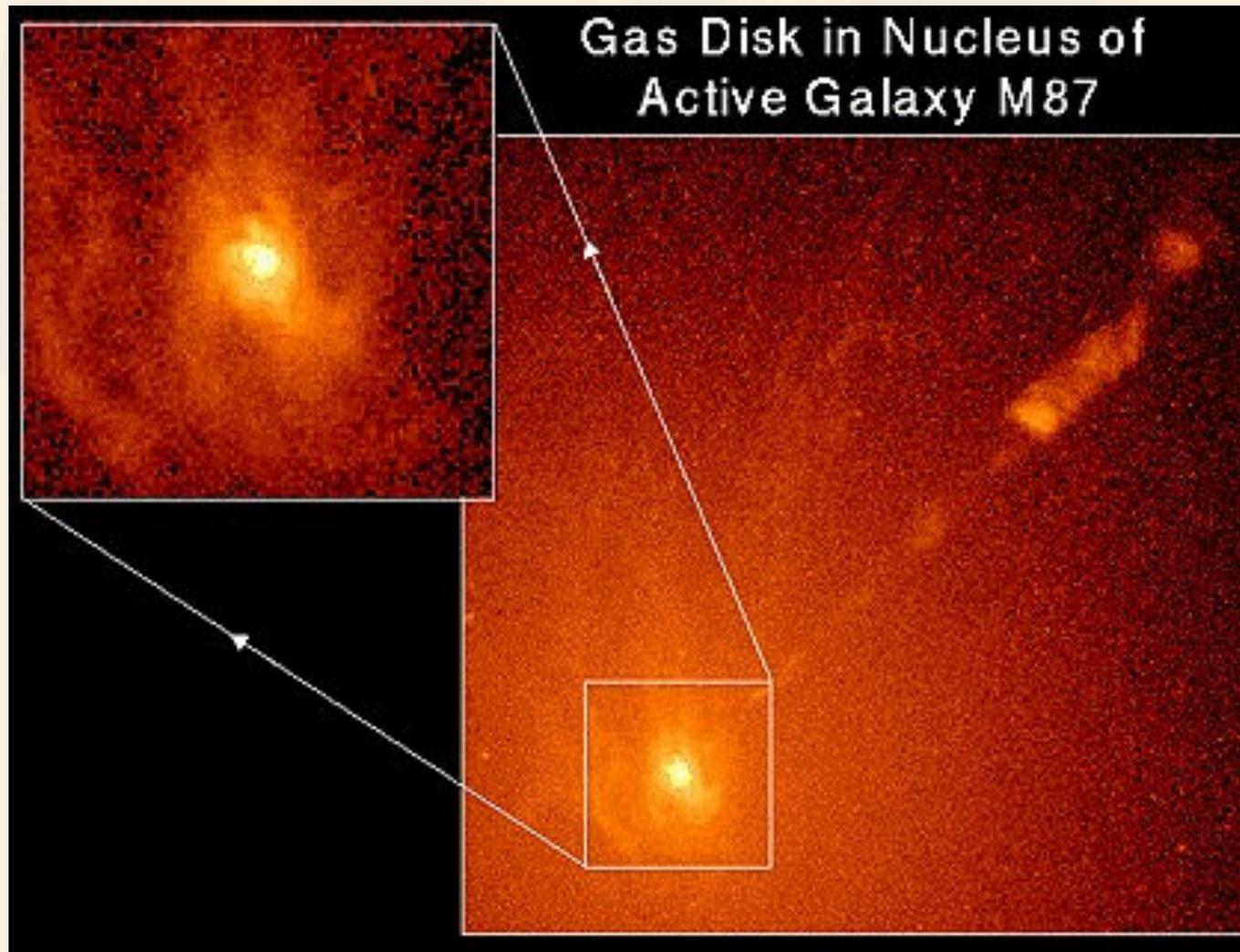
*(CXC, A. Hobart)*

# Active galaxy Centaurus A



*(NASA, CXC, R. Kraft et al.; NSF, VLA, M. Hardcastle et al.; ESO, M. Rejkuba et al.)*

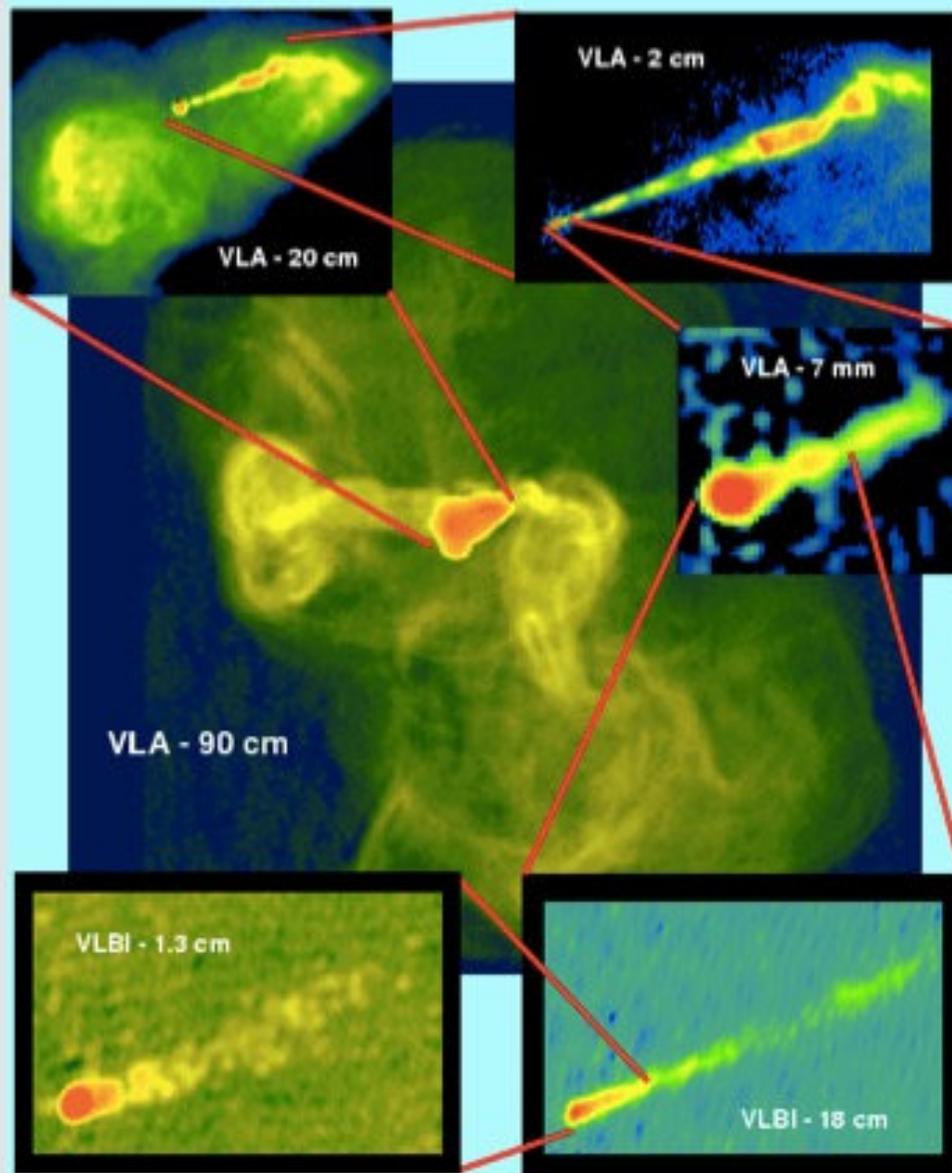
# 超大质量黑洞: M87



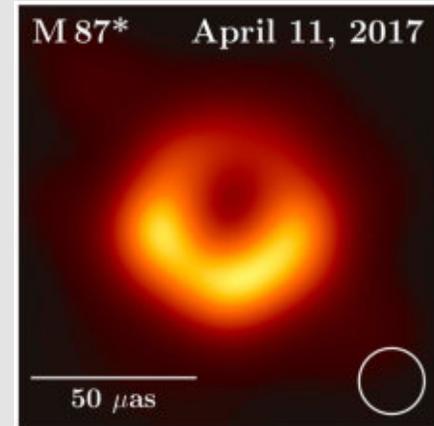
Relativistic beaming  
Doppler boosting  
Doppler deboosting

Credit: STScI WFPC2.

# Launching of the M87 Jet



$$\theta \sim \lambda / D$$



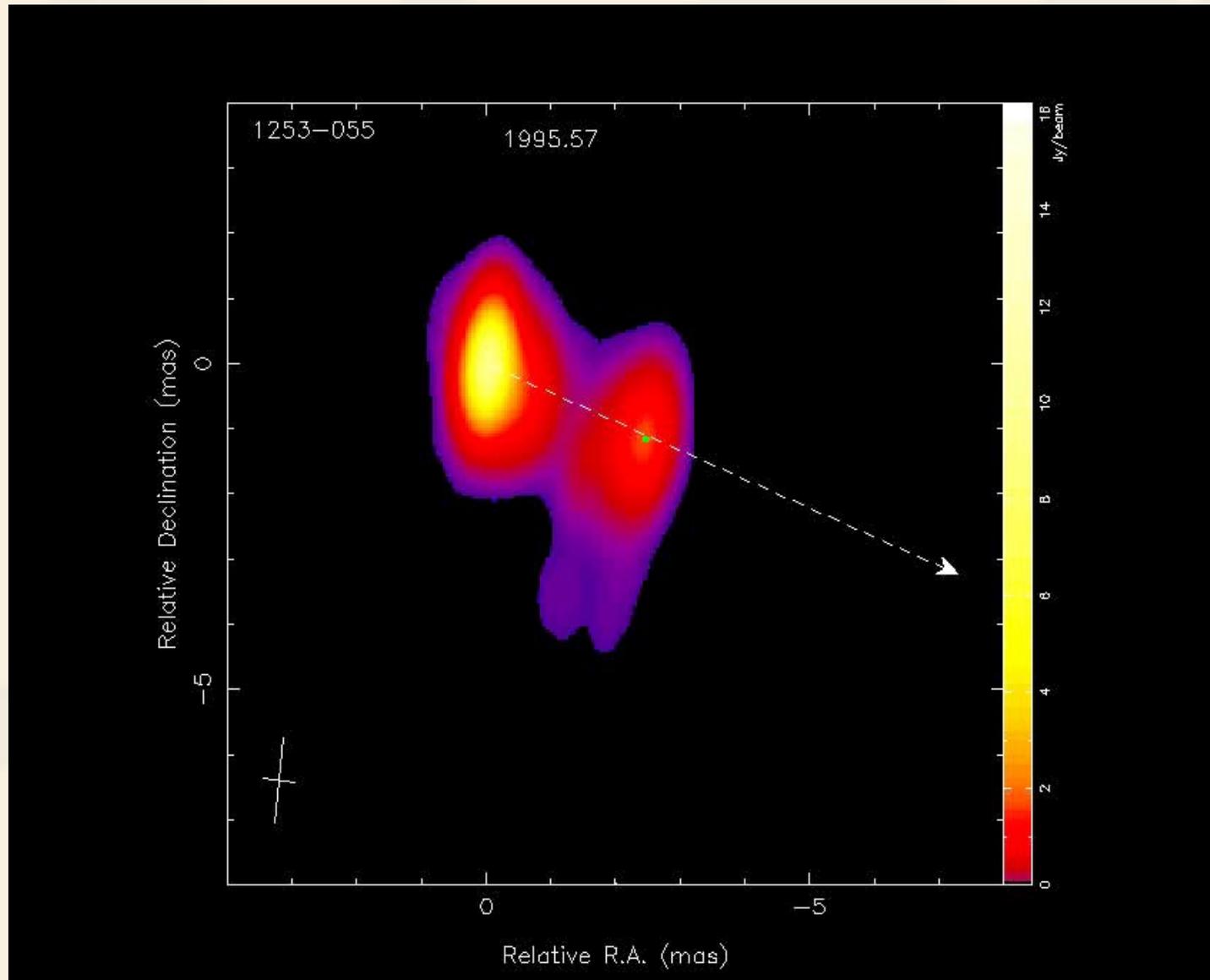
We can directly observe the M87 jet down to a few hundred  $R_S$ .

# 揭秘M87黑洞喷流的形成机制



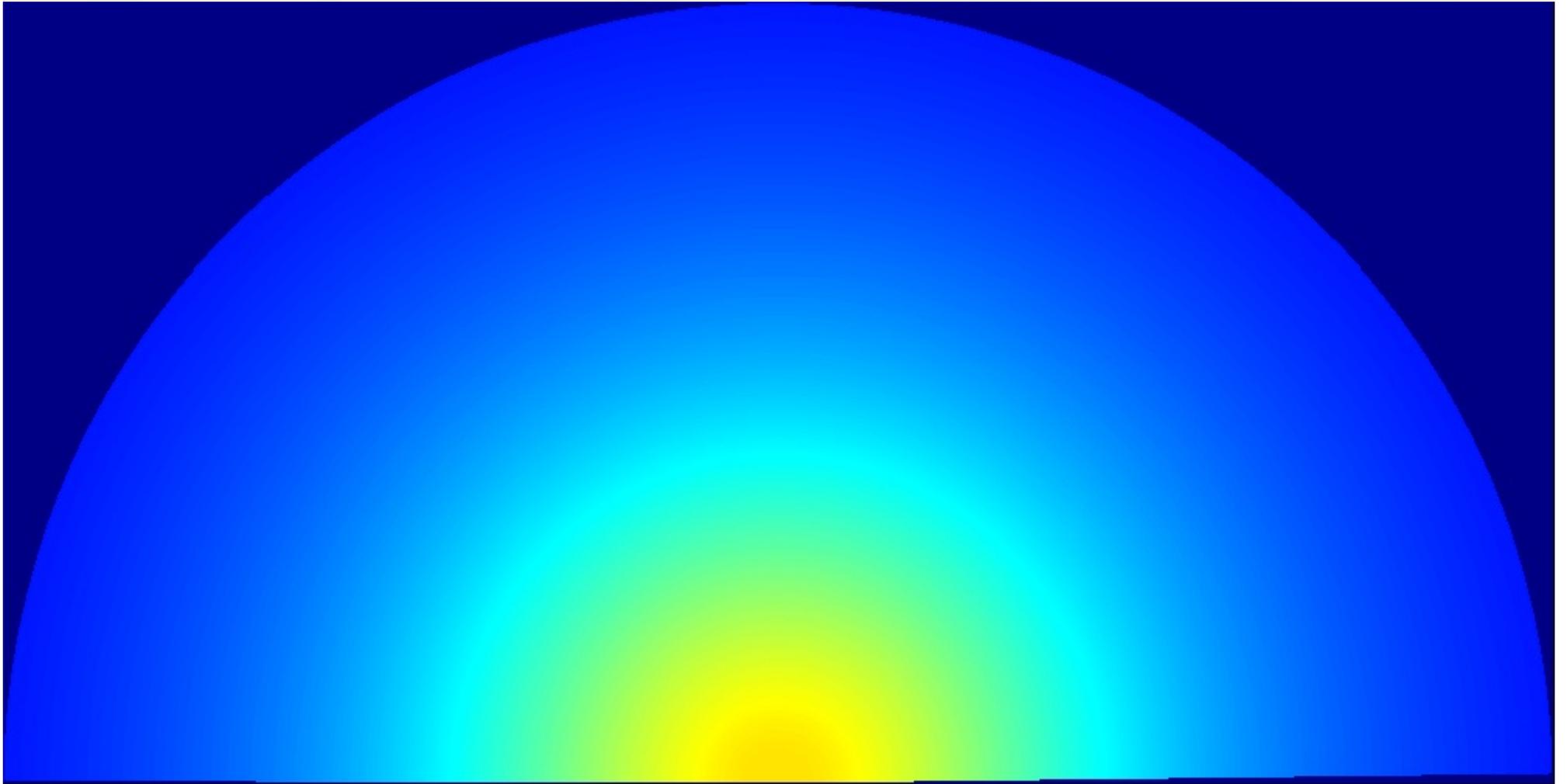
Magnetic Field Lines

# Quasar 3C 279



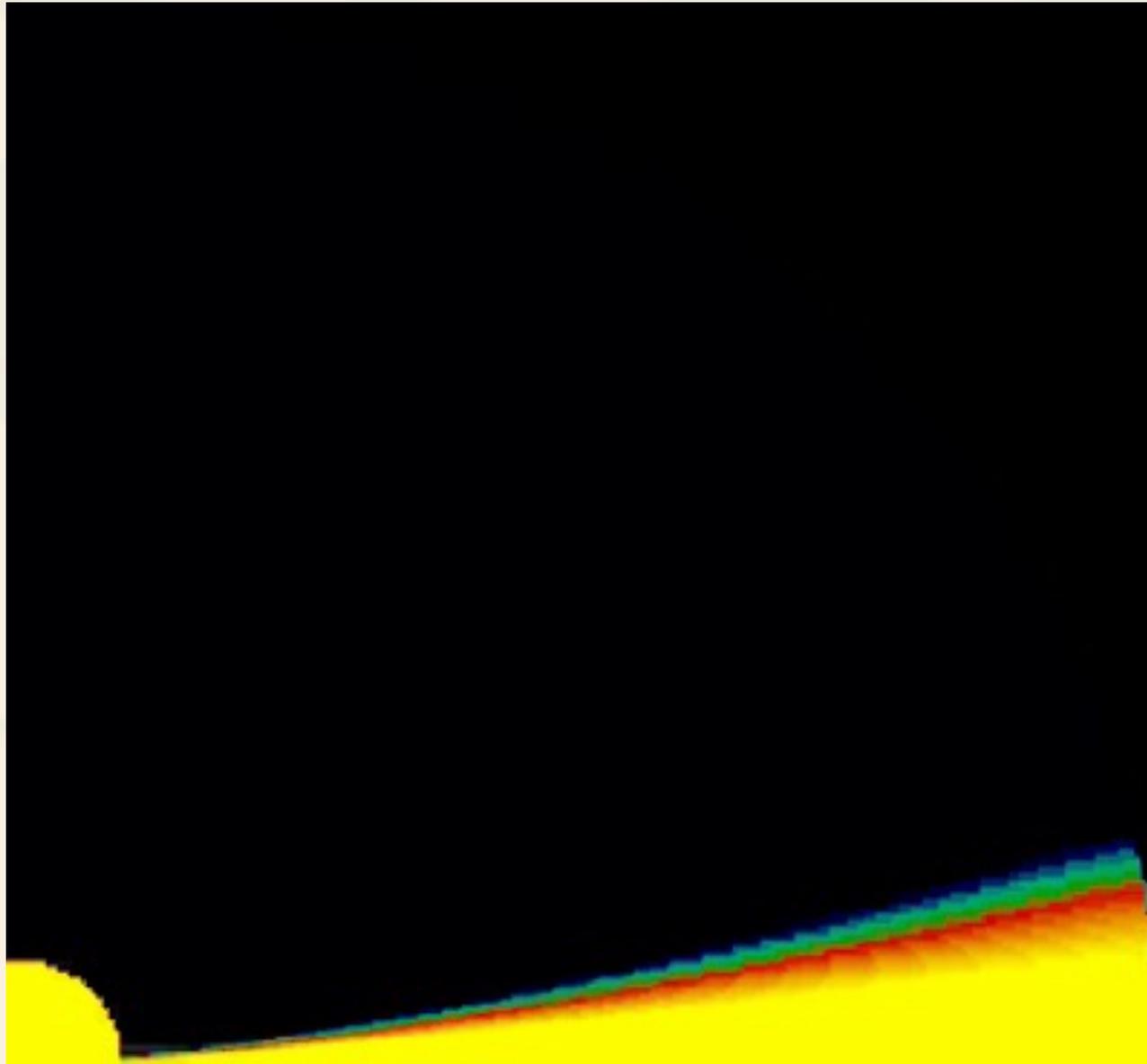
(Lister et al., MOJAVE project; <http://www.physics.purdue.edu/MOJAVE>)

# Feedback by jetted AGNs

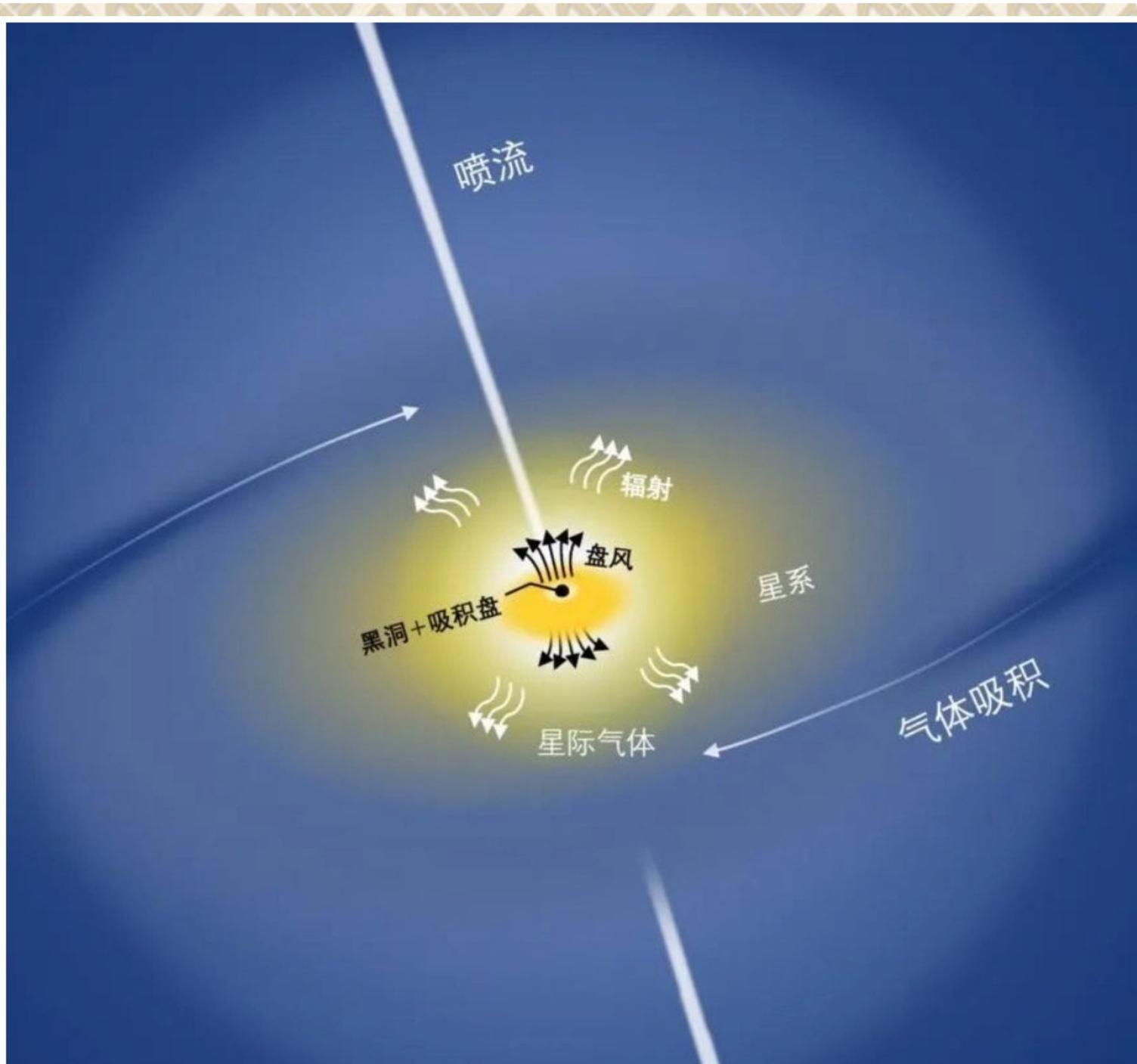


*(Vernaleo & Reynolds 2006)*

# Mass outflows from accretion disks

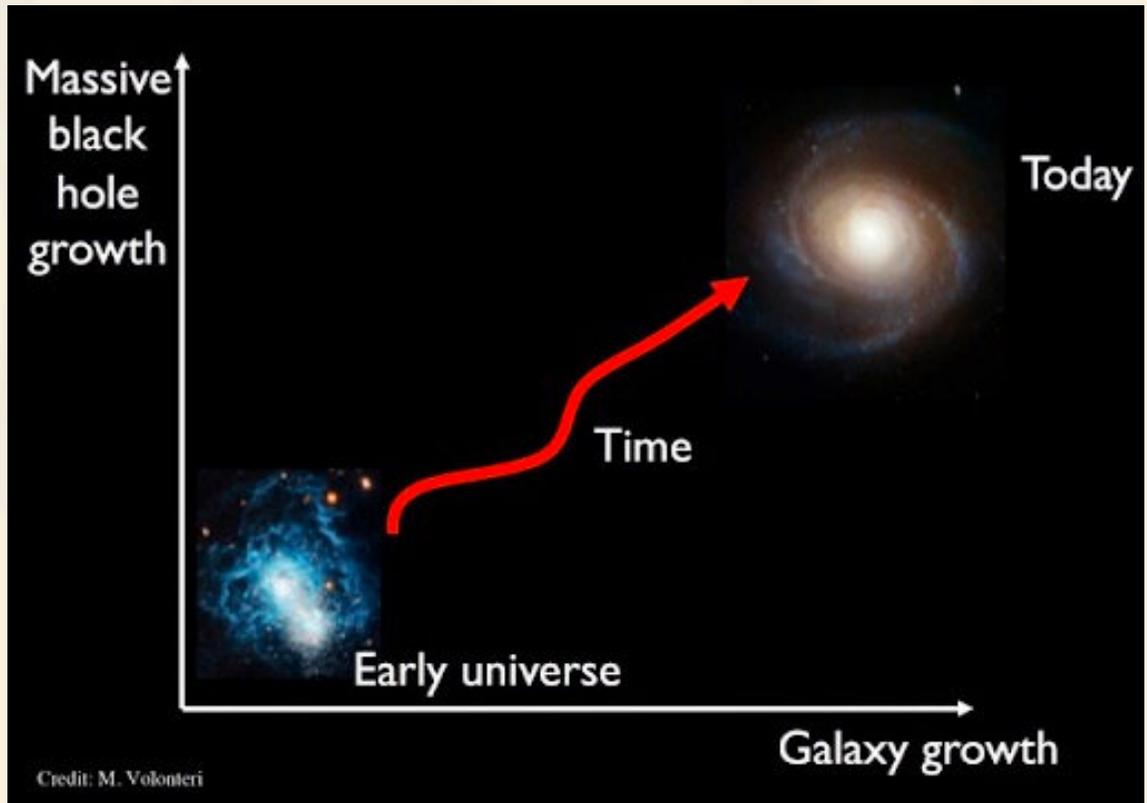
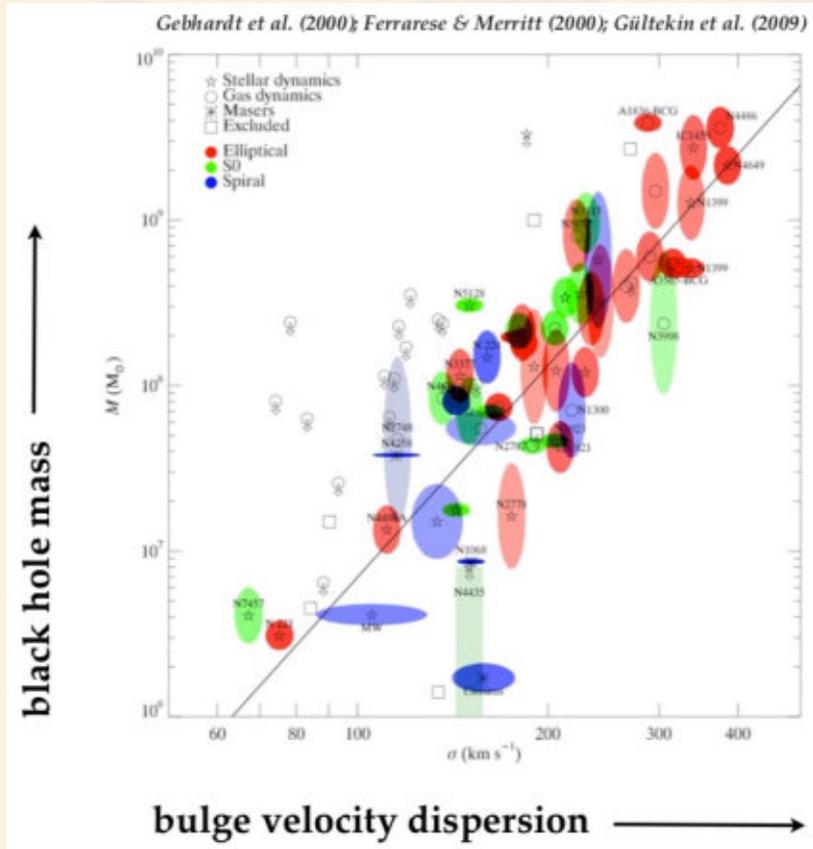


*(Proga, Stone & Drew 1998, 1999)*

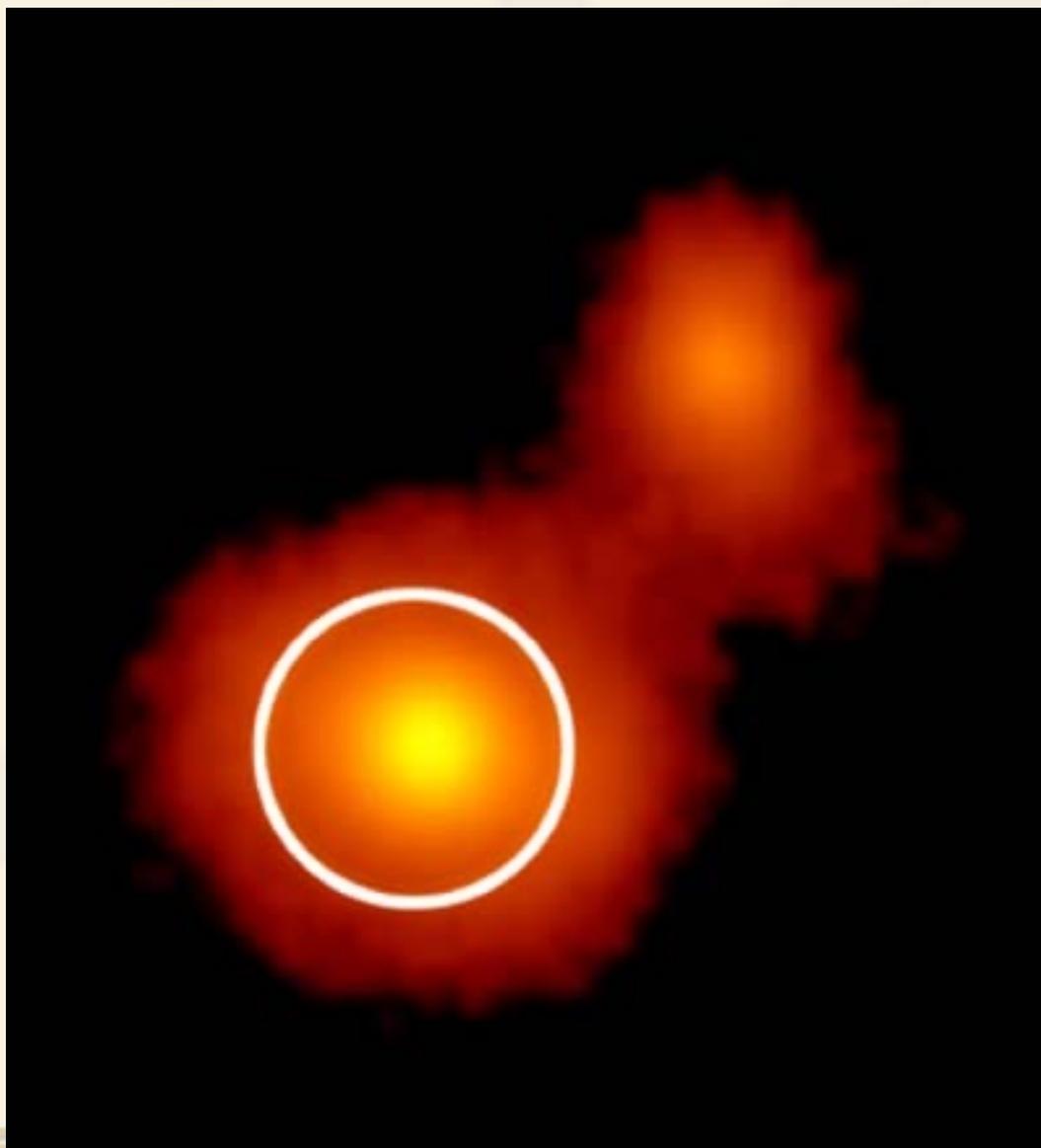


早期宇宙星系气体  
内流的直接成像

图9: 活动星系核反馈示意图



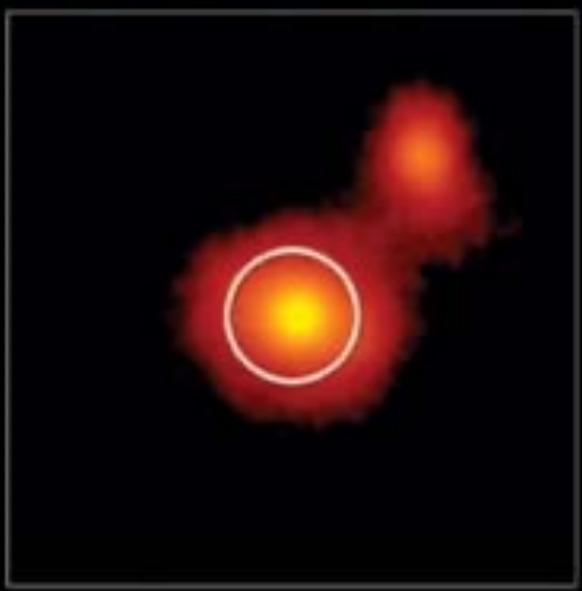
# 超大质量黑洞撕裂恒星



潮汐撕裂恒星事件的  
光学、紫外与射电辐射（上海天文  
台 部德福）



CHANDRA X-RAY



ESO OPTICAL

# Tidal disruption event by a SMBH



*(NASA)*

# Galaxy merger



光干涉时代的  
超大质量黑洞  
及其相关研究



*(Animation: NASA/CXC/A. Hobart; Simulation: Josh Barnes/U. Hawaii, John Hibbard/NRAO)*

# 黑洞的类型

## 恒星级黑洞

在大质量恒星的生命末期，恒星的核心会坍缩形成恒星级黑洞。

## 超大质量黑洞

几乎所有星系的中心都包含着一个超大质量黑洞，其质量是太阳质量的数百万倍，甚至是数十亿倍。

## 中等质量黑洞

质量介于恒星级黑洞和超大质量黑洞之间。

## 原初黑洞

形成于宇宙大爆炸之后的微型黑洞。



原初黑洞：声速  
共振宇宙学简介

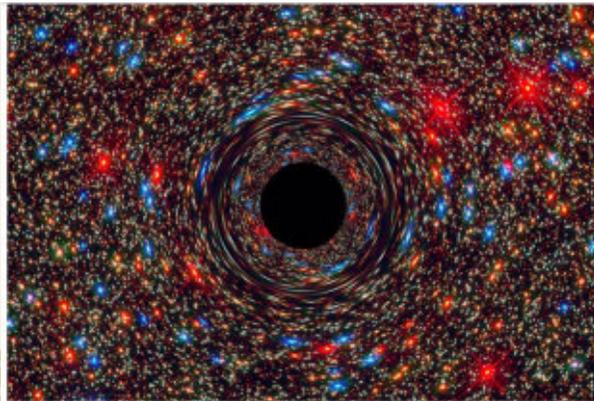


# An Isolated Stellar-Mass Black Hole Detected Through Astrometric Microlensing\*

(arXiv:2201.13296)

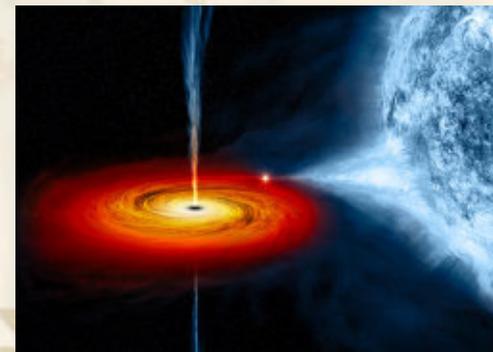
ABSTRACT

We report the first unambiguous detection and mass measurement of an isolated stellar-mass black hole (BH). We used the *Hubble Space Telescope* (*HST*) to carry out precise astrometry of the source star of the long-duration ( $t_E \simeq 270$  days), high-magnification microlensing event MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462, in the direction of the Galactic bulge. *HST* imaging, conducted at eight epochs over an interval of six years, reveals a clear relativistic astrometric deflection of the background star's apparent position. Ground-based photometry shows a parallactic signature of the effect of the Earth's motion on the microlensing light curve. Combining the *HST* astrometry with the ground-based light curve and the derived parallax, we obtain a lens mass of  $7.1 \pm 1.3 M_\odot$  and a distance of  $1.58 \pm 0.18$  kpc. We show that the lens emits no detectable light, which, along with having a mass higher than is possible for a white dwarf or neutron star, confirms its BH nature. Our analysis also provides an absolute proper motion for the BH. The proper motion is offset from the mean motion of Galactic-disk stars at similar distances by an amount corresponding to a transverse space velocity of  $\sim 45 \text{ km s}^{-1}$ , suggesting that the BH received a natal "kick" from its supernova explosion. Previous mass determinations for stellar-mass BHs have come from radial-velocity measurements of Galactic X-ray binaries, and from gravitational radiation emitted by merging BHs in binary systems in external galaxies. Our mass measurement is the first ever for an isolated stellar-mass BH using any technique.

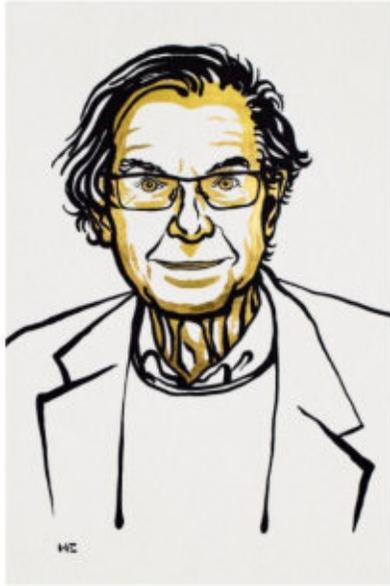


An artist's impression of a black hole against a rich background of stars. The black hole's immense gravitational field creates a surrounding warped region of spacetime, a "gravitational lens" that distorts the light from background stars. Credit: NASA, ESA, and D. Coc, J. Anderson, and R. von der Marel (STScI)

vs.



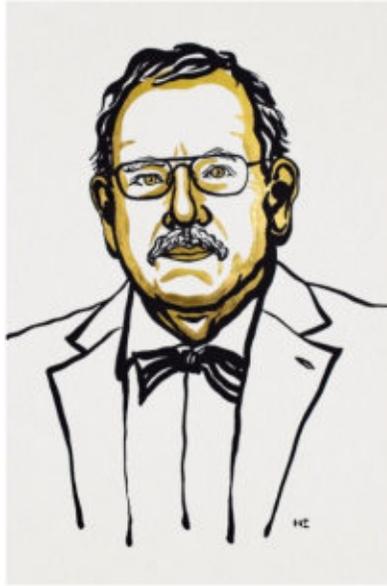
# The Nobel Prize in Physics 2020



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.

Roger Penrose

Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.

Reinhard Genzel

Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. Niklas Elmehed.

Andrea Ghez

Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2020 was divided, one half awarded to Roger Penrose "for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity", the other half jointly to Reinhard Genzel and Andrea Ghez "for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy."

“猎寻宇宙致密物质之王——黑洞捕手”：  
2020年诺贝尔物理学奖  
科普解读



请扫码观看

# Monsters of the Cosmos --- BHs

天体物理学家：Ramesh Narayan  
物理学家：Michio Kaku (加来道雄)  
天体物理学家：Neil deGrasse Tyson

# 当今黑洞研究的热点问题

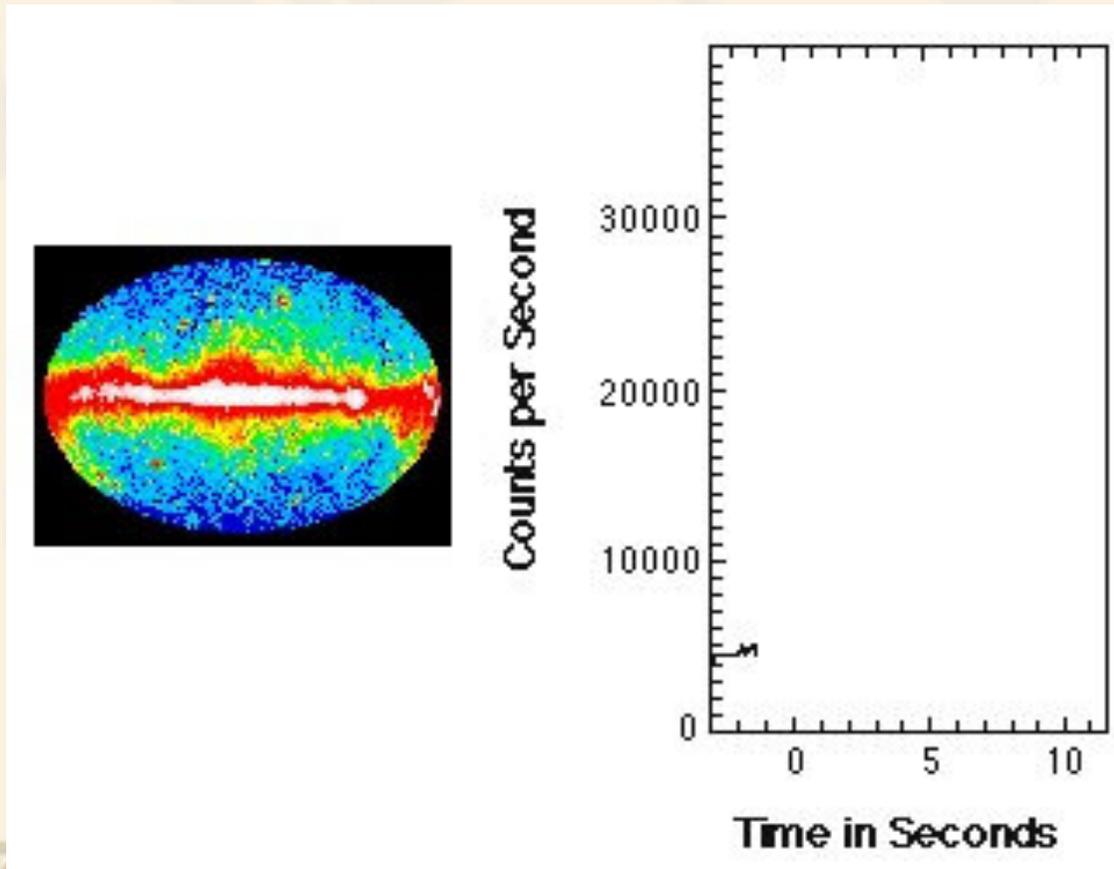
- ❖ 黑洞视界存在的观测证据
- ❖ 测量黑洞的质量与自旋
- ❖ 超大质量黑洞的起源与演化
- ❖ 种子黑洞的形成和演化
- ❖ 超大质量黑洞的演化与星系形成和演化的关系
- ❖ 吸积盘的物理性质以及喷流如何形成
- ❖ 黑洞吸积作为许多高能天体物理现象的中心引擎？



揭秘宇宙致密物质之王  
——超大质量黑洞

# 伽马射线暴

## ❖ 60's年代发现 (Vela)

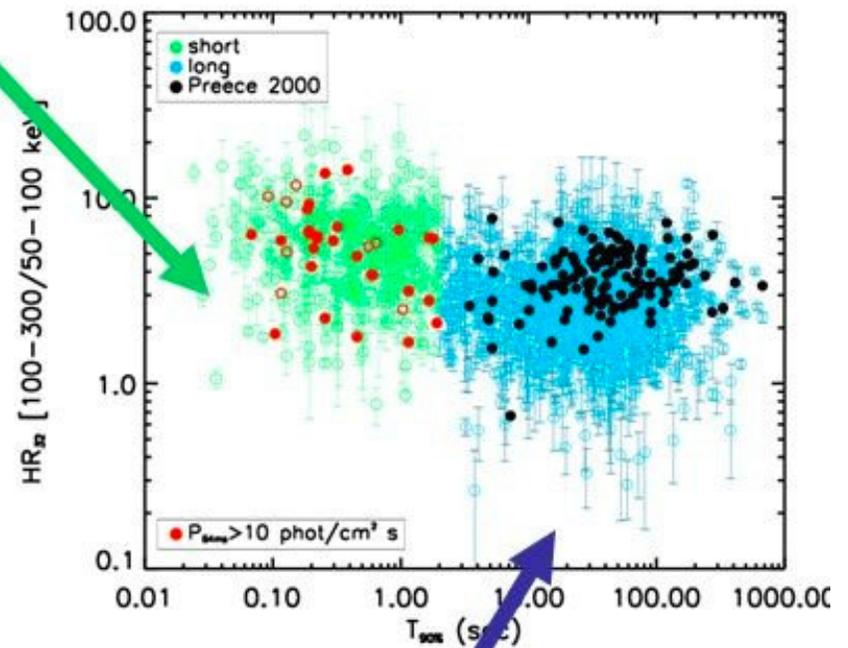
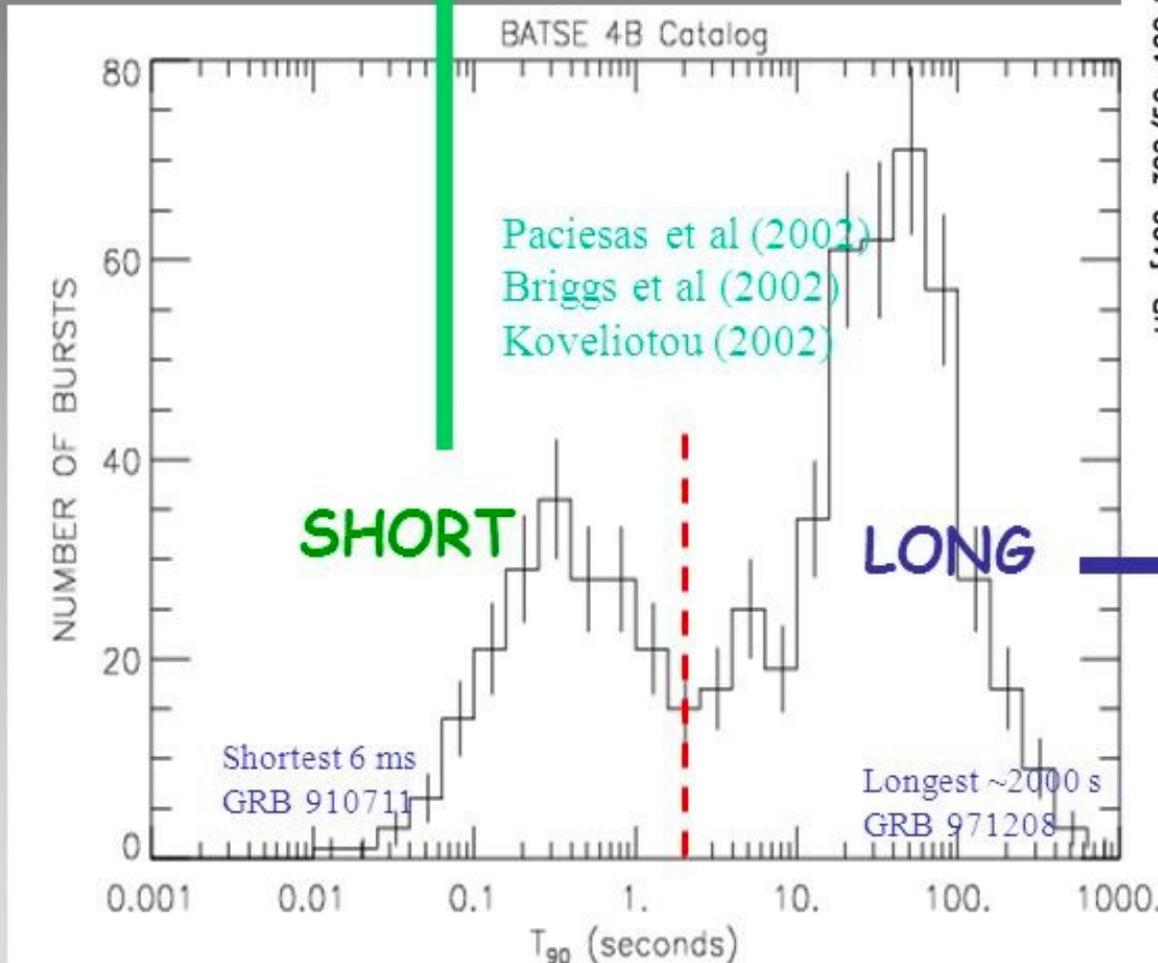


宇宙伽玛射线暴  
的多信使研究



大质量恒星死亡的最强“回光返照”  
(薛永泉)

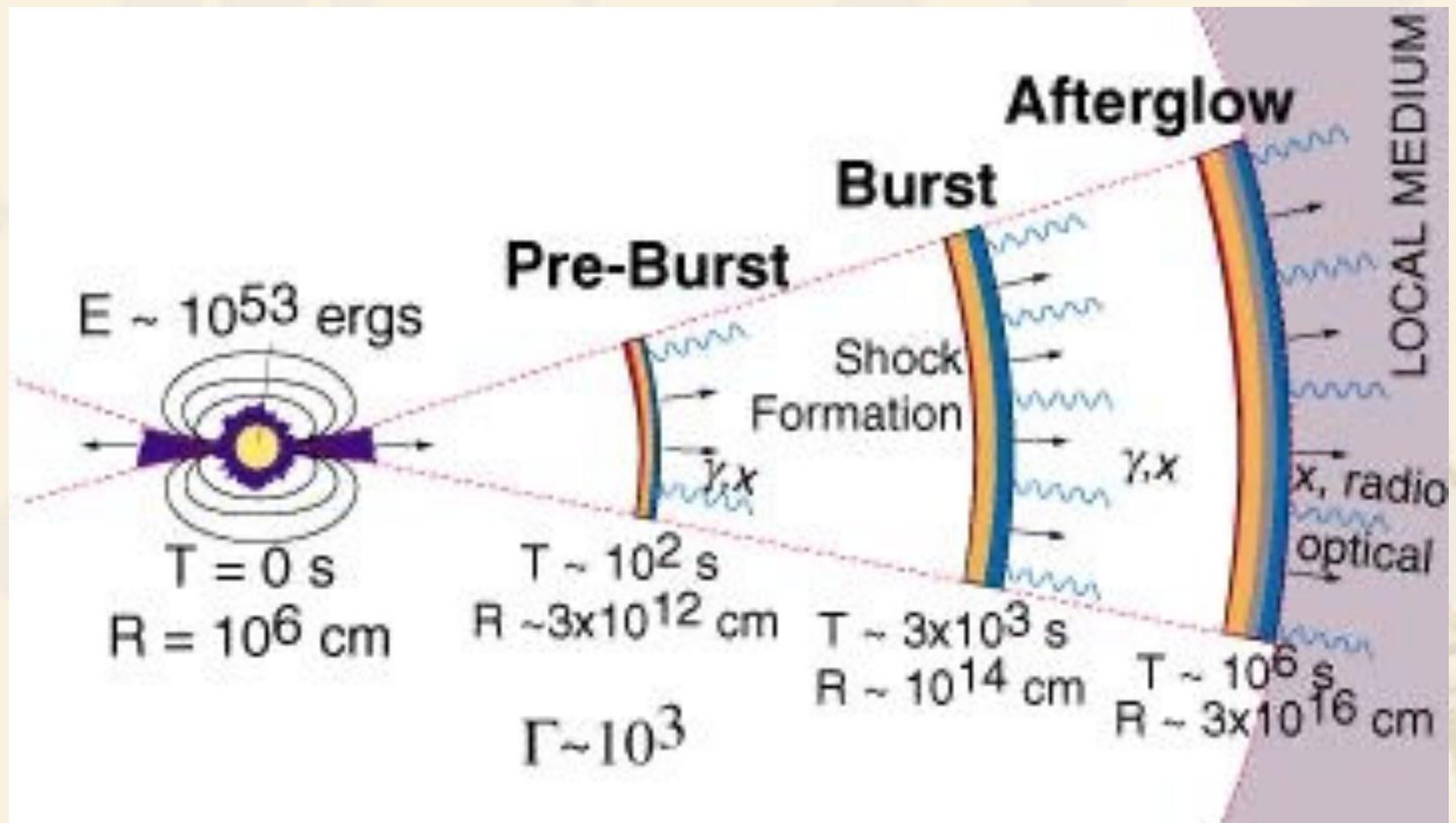
# Two flavours, long and short



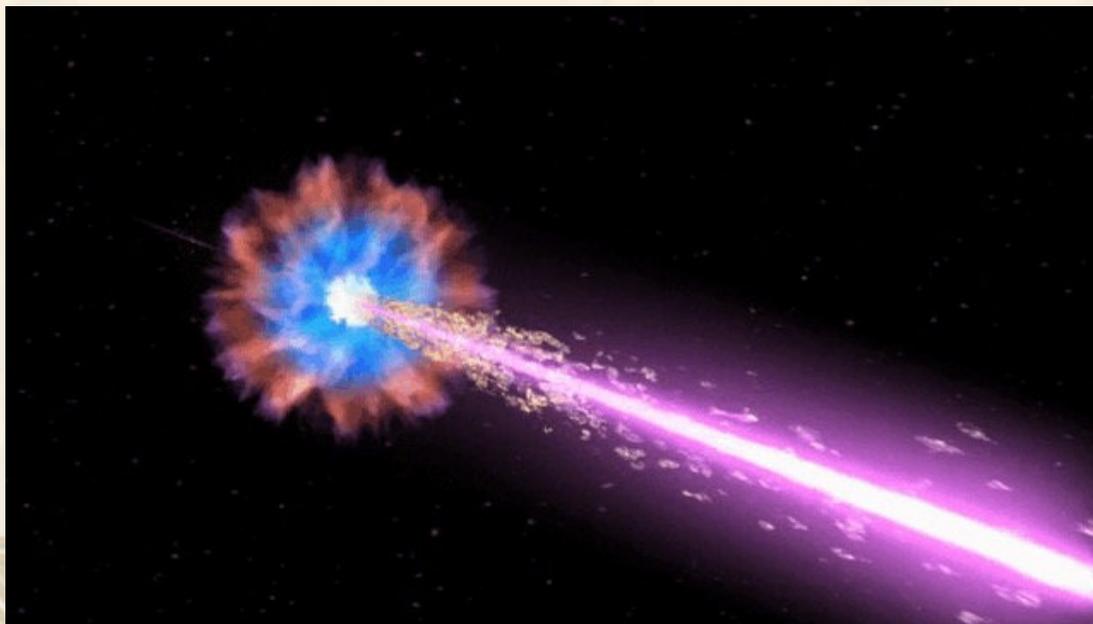
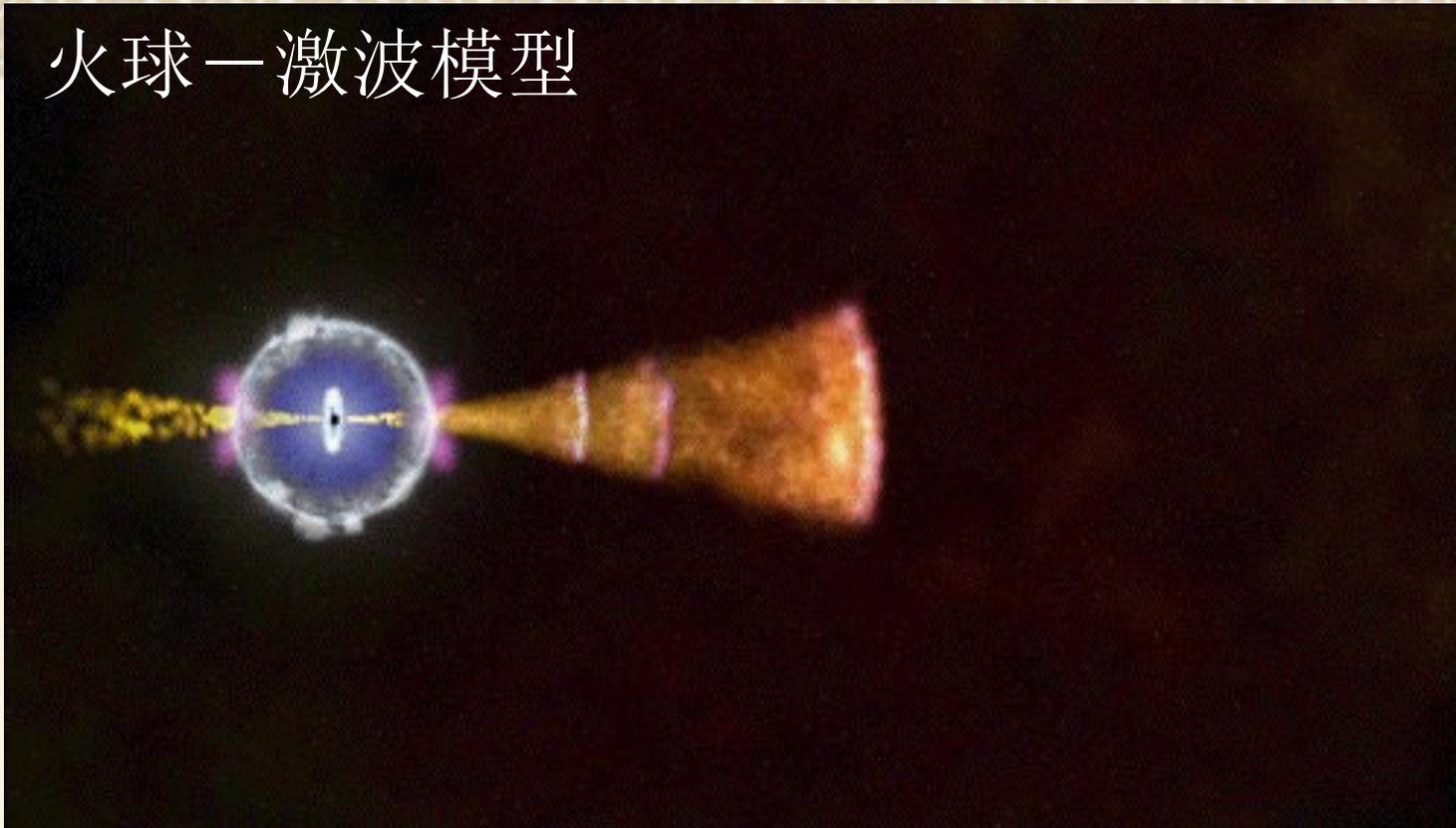
Short - Hard  
Long - Soft

- GRBs分类

# 火球—激波模型



# 火球—激波模型



# Afterglow研究的成功

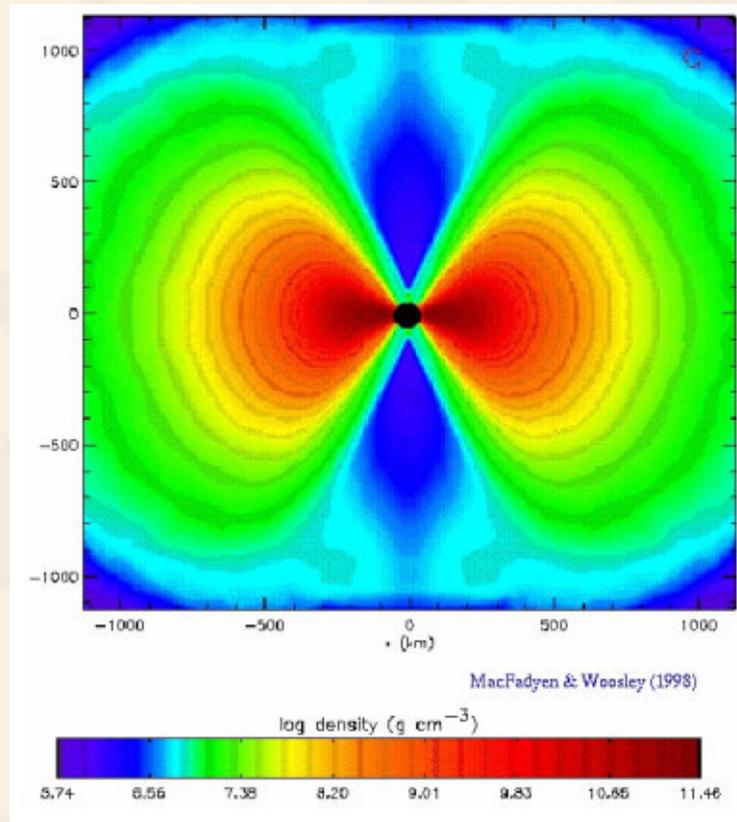
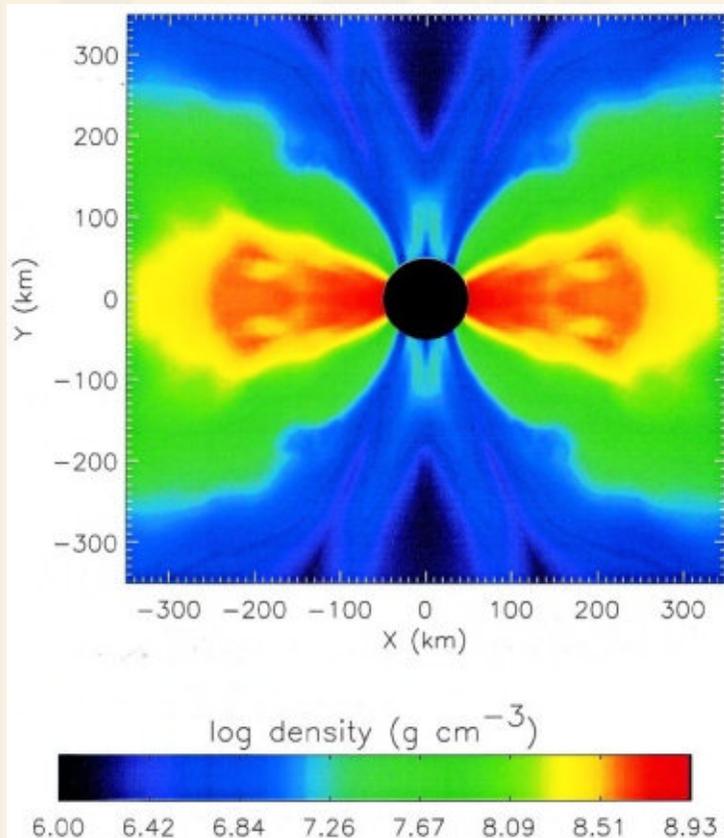
余辉观测证明了:

- ❖ 火球模型很好地描述了GRBs
- ❖ GRBs 在宇宙学距离上
- ❖ GRB ejecta 作相对论性运动
- ❖ GRBs 发生在星系中
- ❖ GRBs 可能和大质量恒星的死亡有关
- ❖ GRBs 可能是成束的collimated喷流

# 中心引擎??

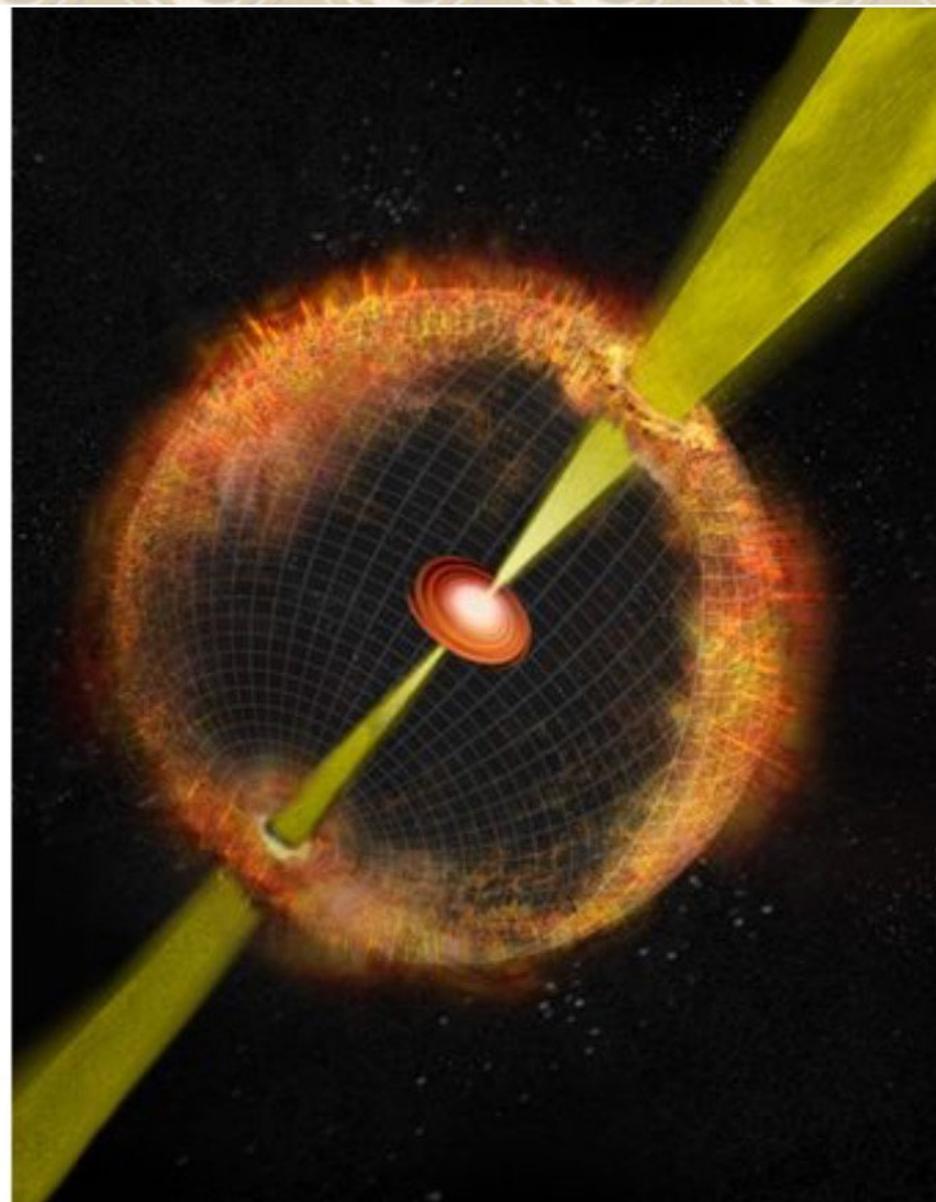
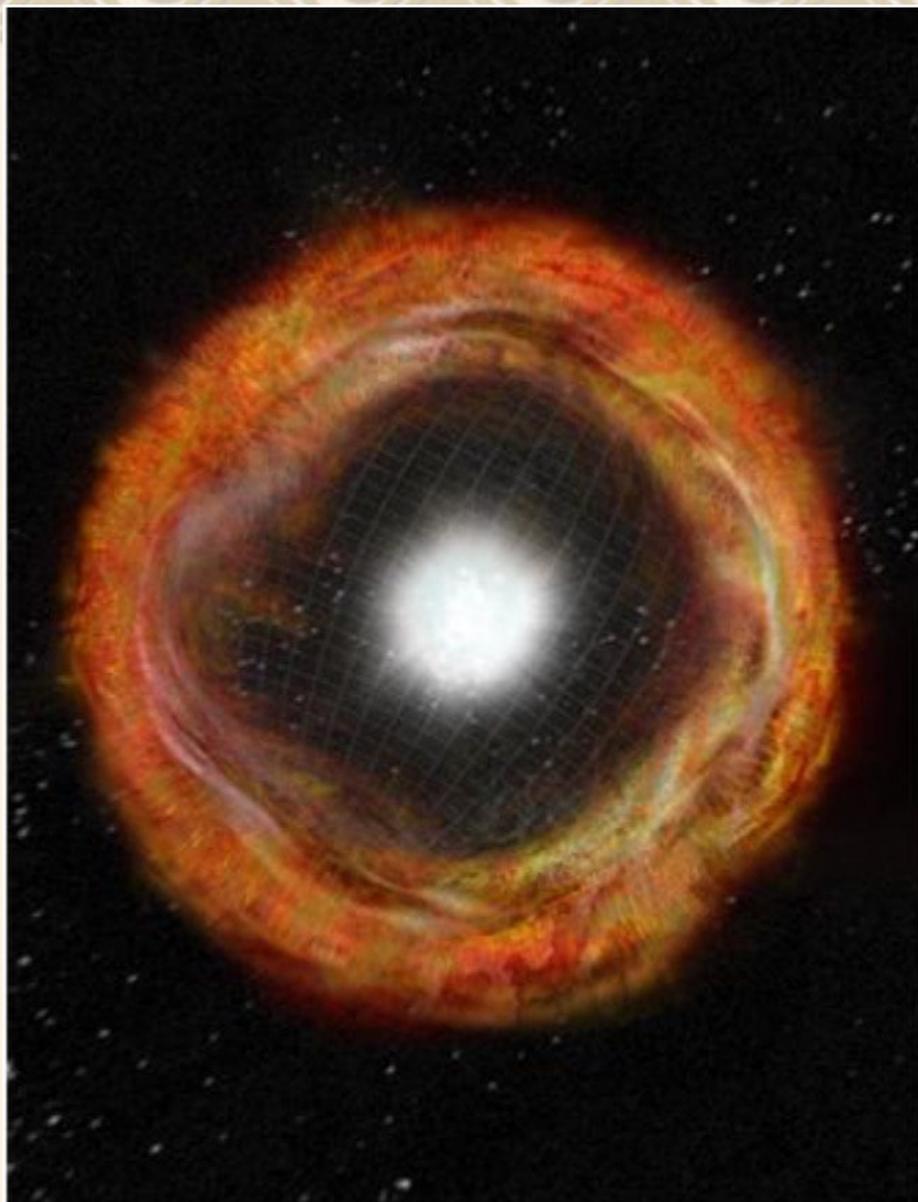
❖ Collapsar模型-长GRBs: 大质量, 转动恒星  
塌缩成黑洞

常与SNR成协



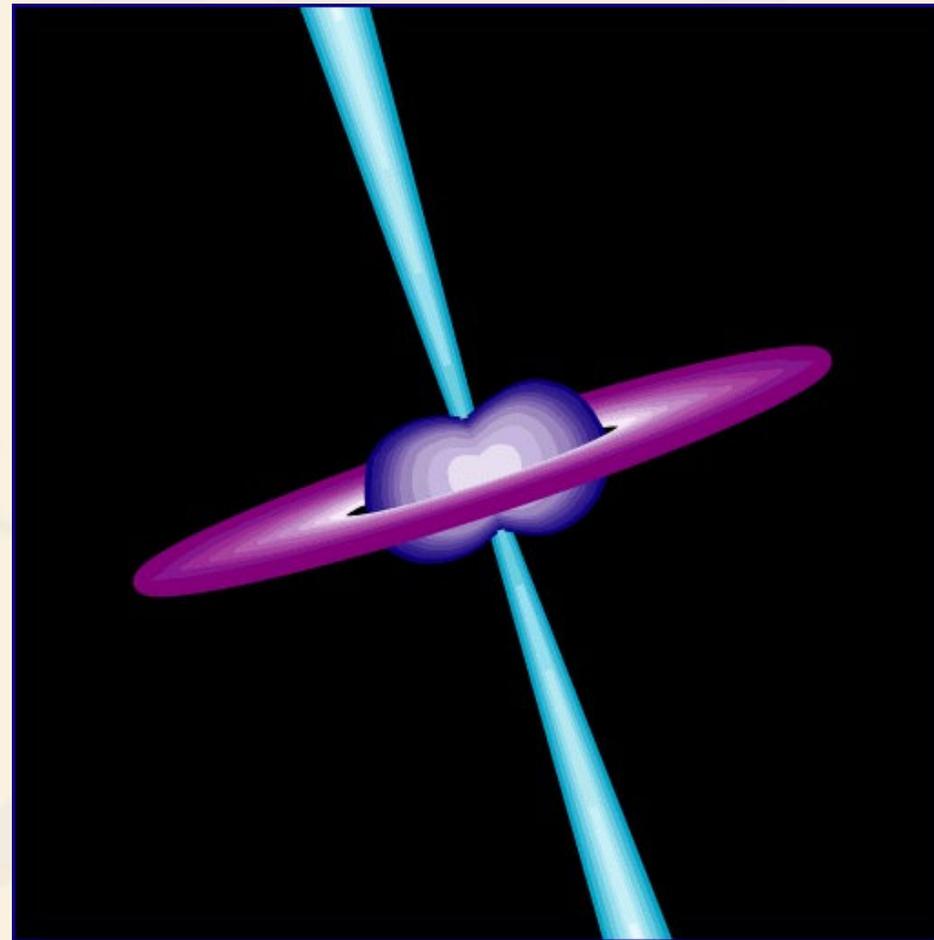
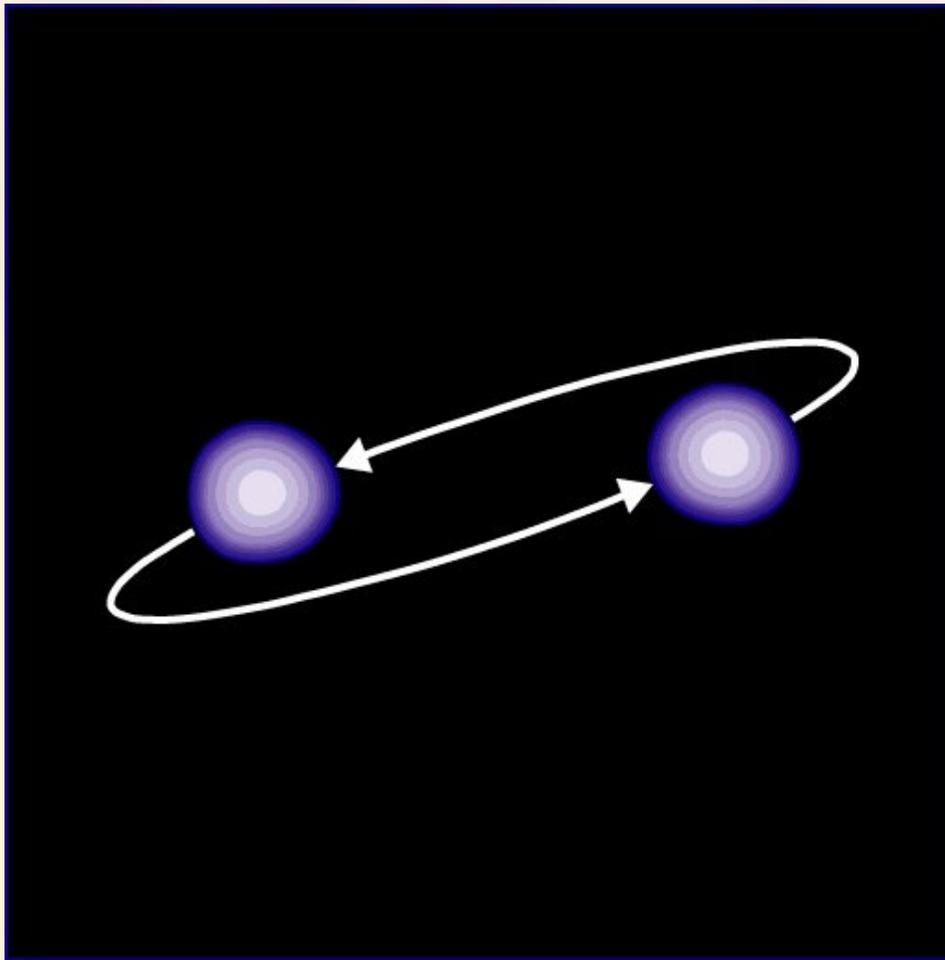
黑洞吸积与爆发天体  
(厦门大学 刘彤)

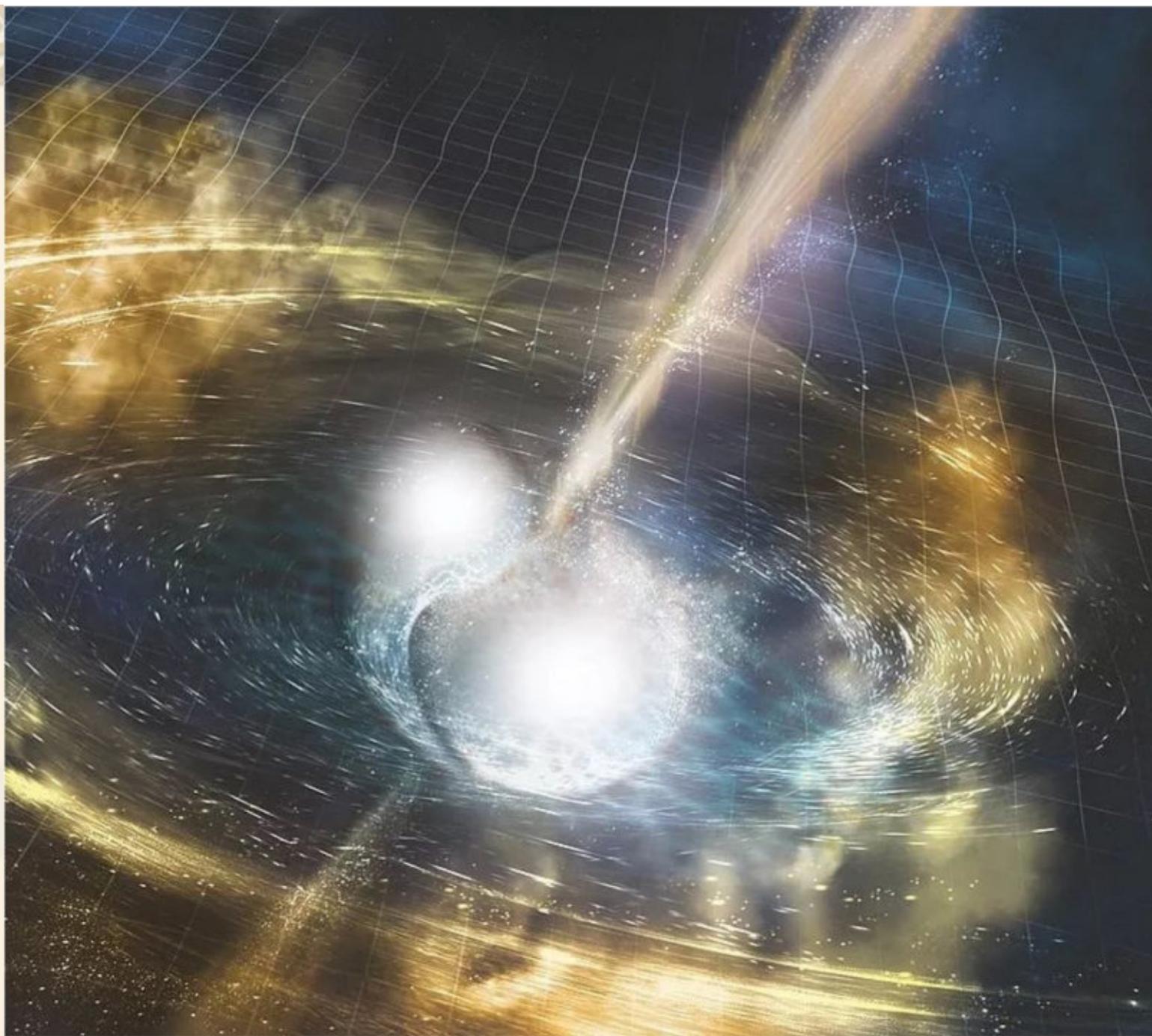
MacFadyen & Woosley ApJ, 524, 262, (1999)



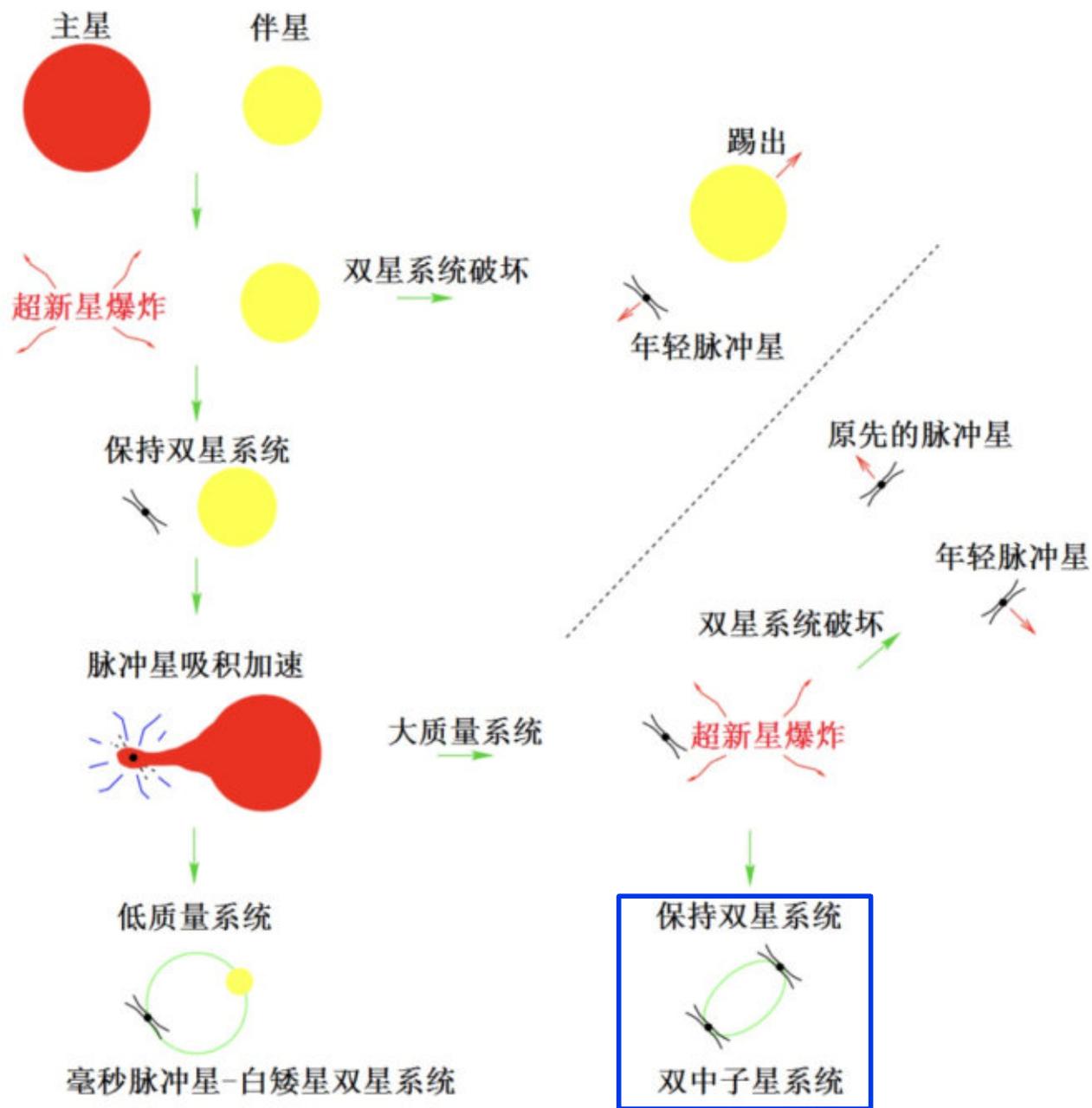
图：普通的超新星爆发的艺术想象图（左）与伴随伽玛暴的超新星爆发的艺术想象图（右）。伽玛暴具有强烈的方向性。（来源：<https://www.universetoday.com/52412/supernova-or-grb-radio-observations-allow-astronomers-to-find-unusual-object/>）

❖ 中子星—中子星并合？ --短GRBs



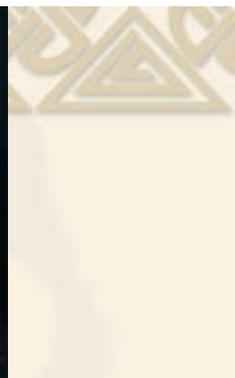


图：双中子星并合后抛出碎片的艺术想象图，图中还给出了周围时空扭曲、两极产生喷流的图景  
(来源：NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet - <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20171016d>)



毫秒脉冲星及脉冲星相关双星系统演化示意图。

(原图来源：<http://www.jb.man.ac.uk/distance/frontiers/pulsars/lorimer-review.pdf>)

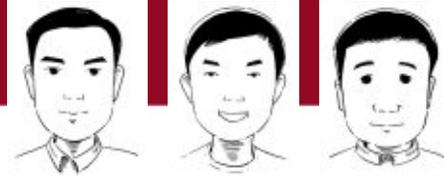


GW170814 

GW170817



time observable (seconds)

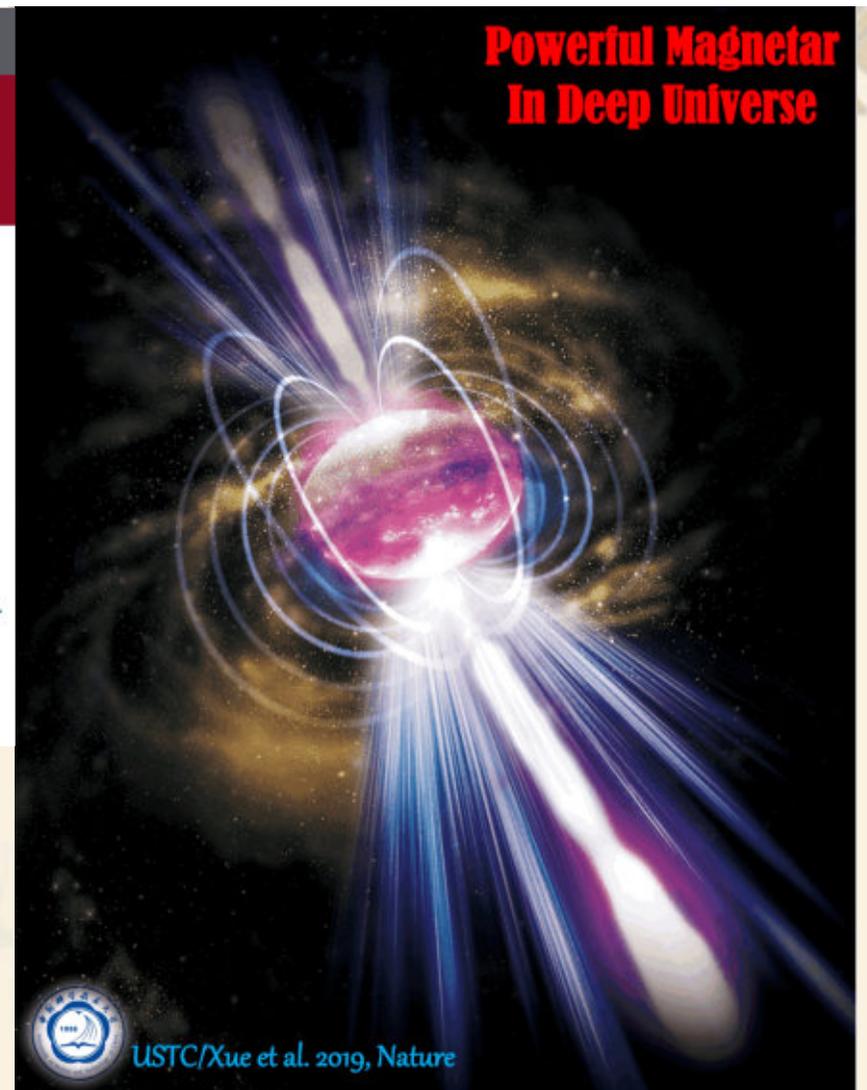
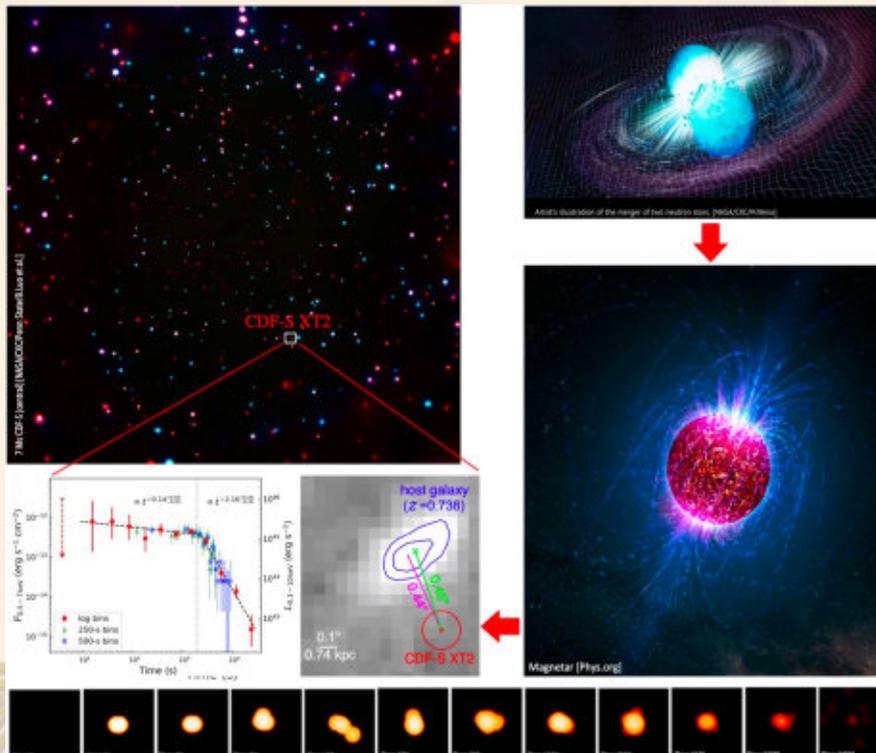


Letter | Published: 10 April 2019

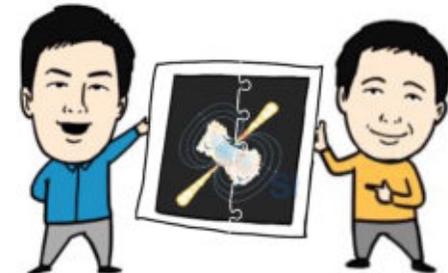
# A magnetar-powered X-ray transient as the aftermath of a binary neutron-star merger

Y. Q. Xue , X. C. Zheng , Y. Li, W. N. Brandt, B. Zhang , B. Luo, B.-B. Zhang, F. E. Bauer, H. Sun, B. D. Lehmer, X.-F. Wu, G. Yang, X. Kong, J. Y. Li, M. Y. Sun, J.-X. Wang & F. Vito

Nature 568, 198–201 (2019) | Download Citation 



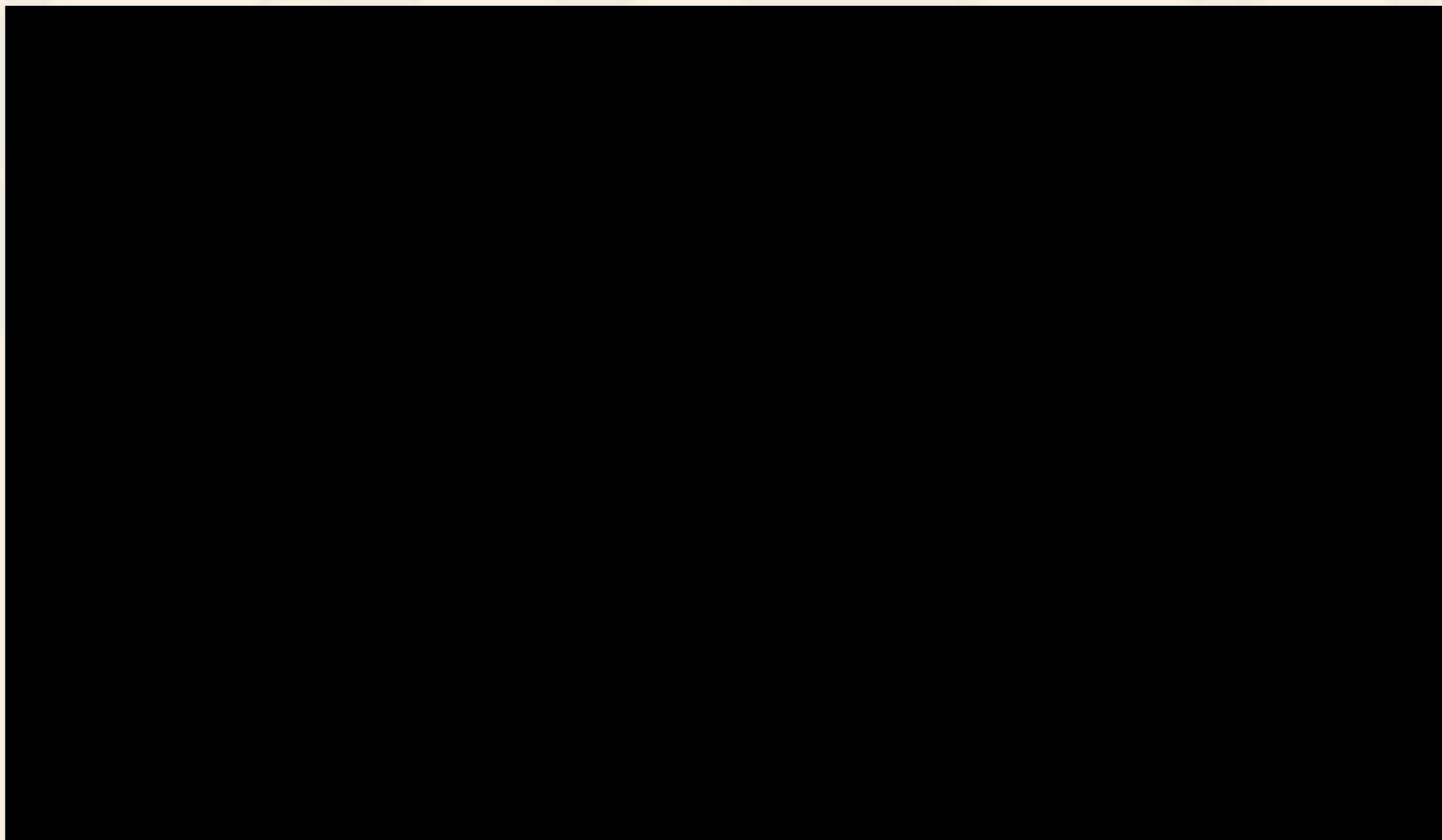
CDF-S team + GRB team observations + theories



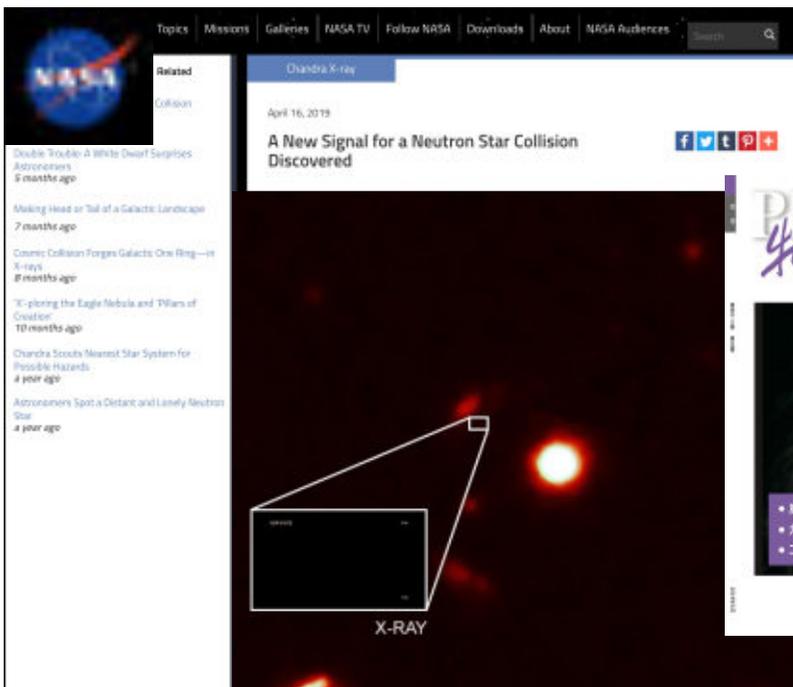
Y.Q. Xue

B. Zhang

**旁白** 薛永泉教授课题组观测到来自约66亿光年外神秘磁星驱动的X射线暂现源，首次证实了双中子星合并的直接产物可以是高质量毫秒磁星，深化了对中子星基本属性的认识



NASA press release



## A Magnetar-powered X-ray Transient as the Aftermath of a Binary Neutron-star Merger

Submitted by chandra on Wed, 2019-04-24 10:46



Yongquan Xue

We are pleased to welcome Yongquan Xue, a professor at the Department of Astronomy, University of Science and Technology of China (USTC), as a guest blogger. He is an astrophysicist whose main research field is X-ray high-energy astrophysics, and has been significantly involved in the Chandra Deep Fields. Yongquan led the Nature paper that is the subject of our latest press release on the discovery of a magnetar-powered X-ray transient. Before joining USTC in 2012, he worked at Penn State University as a postdoc, after obtaining his astrophysics B.S. and M.S. degrees at Peking University, and Ph.D. degree at Purdue University, respectively.

A neutron star is the compact object formed after a supernova explosion occurring in the late evolutionary stage of a massive star, and it is one of the most mysterious objects in the universe. It is composed of almost all neutrons, and has some extreme physical properties such as ultra-high density and a super-strong magnetic field. It is an excellent natural laboratory for testing basic physical laws. However, up to now, our understanding about the basic properties of neutron stars (e.g., the equation of state, which describes the relation among pressure, density, etc.) is still relatively vague.



# Meltwater

## 薛永泉老师工作报道 (英文)

Top 10  
Publications  
by Reach

2.8 M	Science Alert
1.4 M	EurekAlert!
733,016	Discover Magazine
690,939	UrduPoint Network
440,068	China.org.cn
344,421	Astronomy Magazin
310,567	Xinhua News (Eng.
243,750	Futurity.org
225,903	Before It's News
174,156	Tech2.org

# Meltwater

## 薛永泉老师工作报道 (中文)

Top 10  
Publications  
by Reach

46. M	今日头条
39.4 M	搜狐新闻-搜狐
25.7 M	腾讯网
21. M	新浪科技
15.2 M	雪花新闻
15.1 M	新浪新闻
12.8 M	壹讀
12.8 M	360doc个人图书馆
10.5 M	知乎专栏
8.8 M	新浪看点

- **Hundreds of domestic and international media reports**
- **Sum of top 10 presses: 0.215 billion (i.e., 215,000,000) “clicks”**

# 物理科学与工程导论系列讲座 (第六讲)

## 源于66亿光年外双中子星 并合的磁星之光

主讲人：薛永泉 教授

1 2 3 4 5 6



请扫码观看



墨子论坛漫  
画：万磁王

中国科学院大学物理学院  
物理科学与工程导论系列讲座  
(第六讲)  
来自66亿光年外  
双中子星并合的磁星之光

主讲人：薛永泉 教授  
中国科学院大学天文系 教授  
中国科学院大学 硕士生导师  
国家青年千人计划入选者

报告时间：11月28日(周四) 19:00  
报告地点：科大东区水上报告厅

**报告摘要：**  
本组最新发现的双中子星并合事件GW170817及其产生的短伽马暴GRB 170817A (暂命名为XT2) 事件，主要内容包括：(1) 中子星、脉冲星与超新星原理；(2) 双中子星并合原理；(3) XT2发现过程；(4) XT2起源理论及后续观测；(5) 总结，展望未来及个人职业规划。

**报告人简介：**  
薛永泉，中国科学院大学教授，博士生导师，国家青年千人计划入选者。2000年至2003年分别获得北京大学与硕士学位，2003年获美国麻省理工学院博士学位，2008年至2012年在美国加州州立大学任博士后，2012年5月回国任中国科学院高能物理研究所天文系任教授至今。主要从事双中子星并合与X射线暴天文物理理论及观测研究。目前：(2015年11月) 已发表两篇NATURE在物理SCI论文33篇，引用超3800多次，H指数34；其中，两篇NATURE (第一作者发表)，1篇NEW ASTRONOMY REVIEWS第一作者发表，2篇SIAM JOURNAL (1篇第一作者发表)，1篇为第二作者)；1篇美国天文学会天文学与空间科学会 (ICP) 出版物并入选ICP2016年度最佳论文 (第一作者发表)。(个人主页: [HTTP://STAFF.USTC.EDU.CN/~XUE/](http://staff.ustc.edu.cn/~xue/))

欢迎大家踊跃报名参加!

扫码关注公众号  
扫码获取资料

QQ扫码入群  
报名咨询实验室

组织单位：物理学院



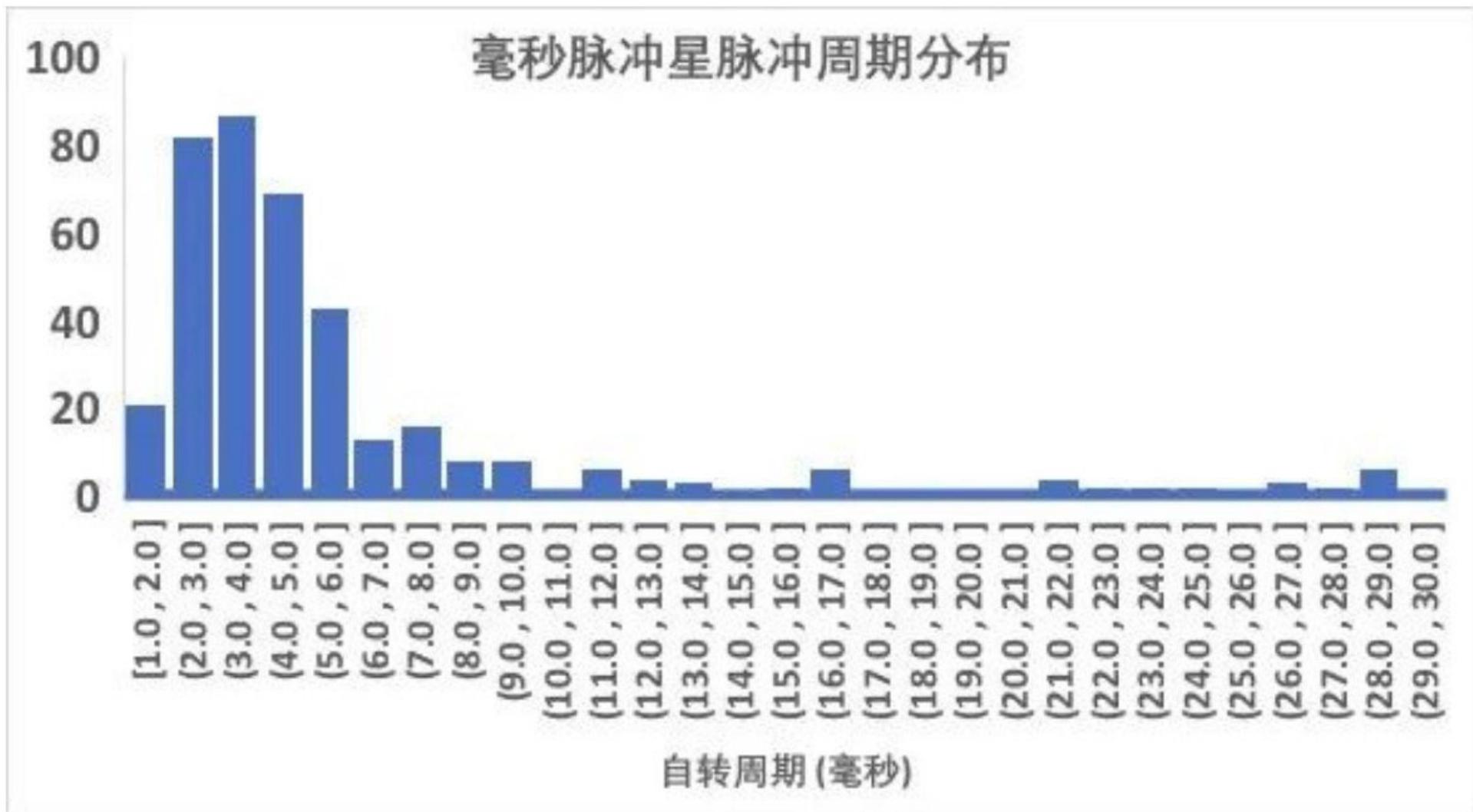


图3. 毫秒脉冲星的周期分布 (图源: 作者, 数据来自ATNF psrcat)

157 pulsars in 30 clusters

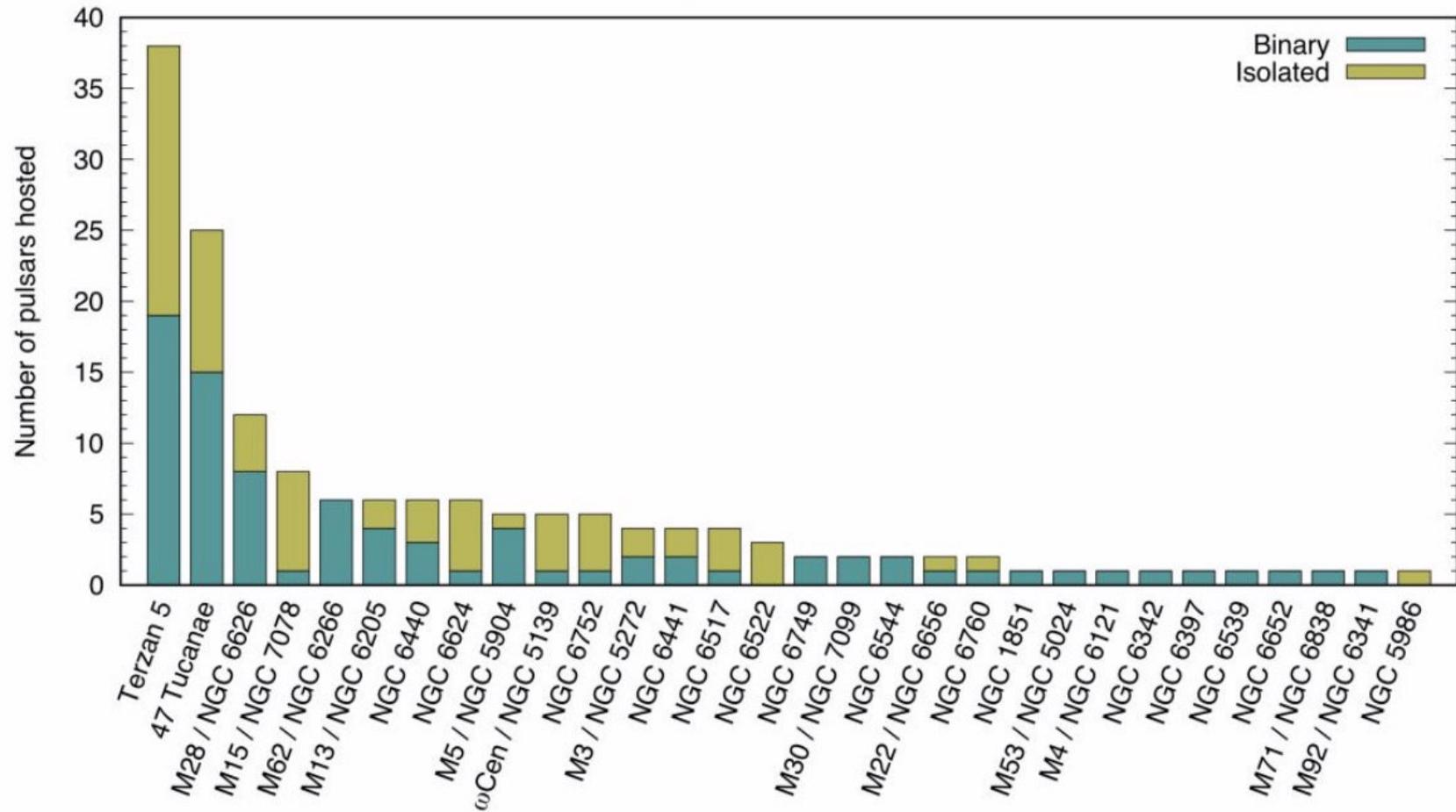


图5. 根据公开信息统计得知，至今为止人类一共在30个球状星团中找到了157颗脉冲星。柱形图中蓝绿色区域表示脉冲双星的占比，土黄色区域表示孤立脉冲星的占比（图源：<http://www.naic.edu/~pfreire/GCpsr.html>）

## ❖ 中子星—黑洞并合？--短GRBs



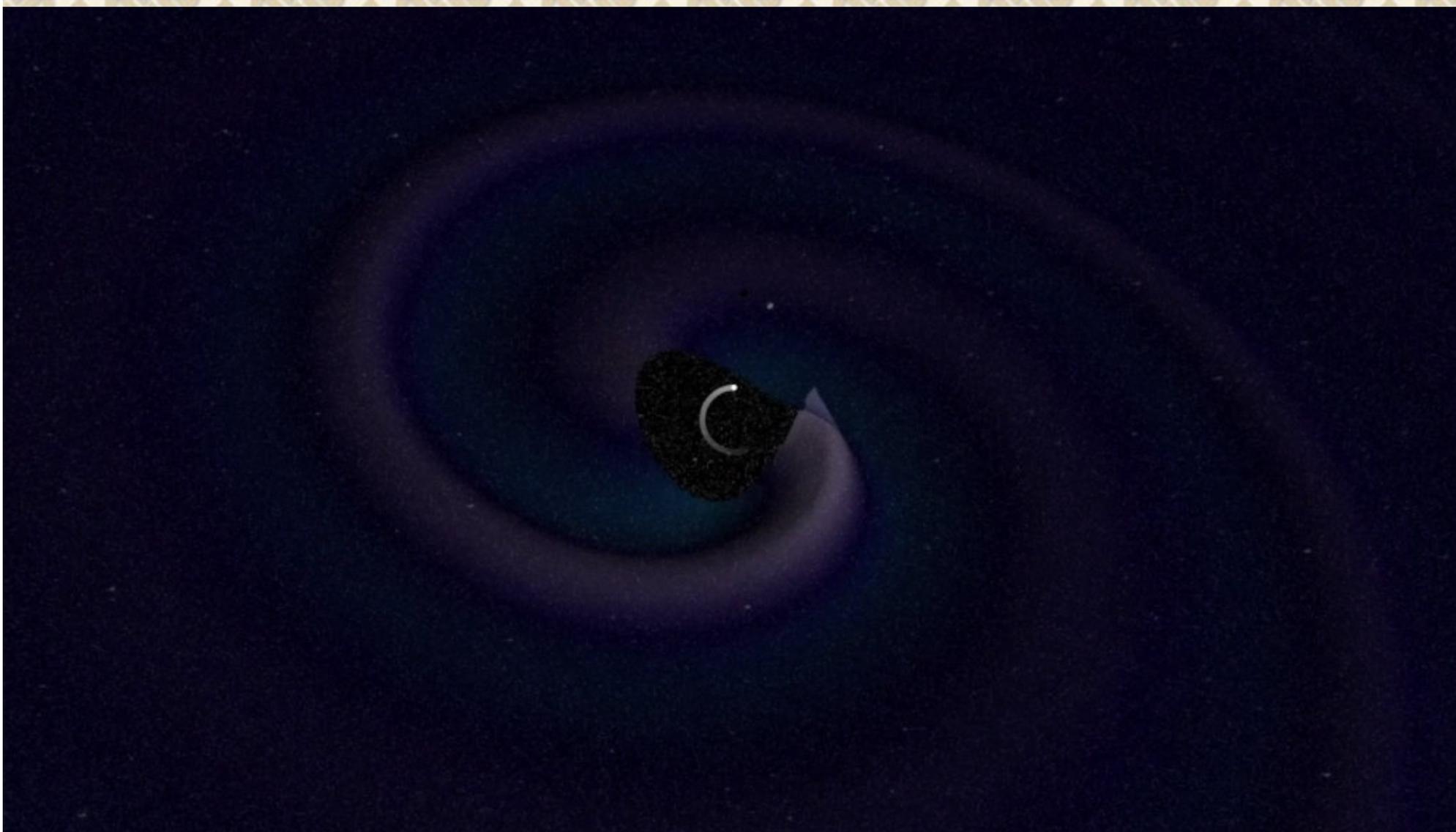
黑洞和中子星合并示意图。 / Carl Knox, OzGrav ARC Centre of Excellence

2019年8月，美国LIGO和欧洲VIRGO天文台再次传来中子星和黑洞并合消息，又一次吸引了大家的注意力。美国地基引力波探测装置Advanced LIGO从2015年9月开始运行到现在已超过4年，这是第一次探测到中子星和黑洞并合事件。



BH-NS merger

黑洞-中子星合并艺术图 (图片来源: Carl Knox, OzGrav – Swinburne University)



2021年

来自GW200105的引力波信号（视频来源：MAYA Collaboration）

BH-NS merger

6月29日，在一篇发表在《天体物理学杂志快报》的论文中，来自美国LIGO、欧洲Virgo和日本KAGRA的天文学家公布了他们的合作成果。在LIGO和Virgo的第三轮运行（被称为O3b）中，**天文学家接连发现了两例来自黑洞-中子星合并的引力波事件——GW200105和GW200115。**



CrossMark

## GRB 200415A: A Short Gamma-Ray Burst from a Magnetar Giant Flare?

Jun Yang<sup>1,2</sup> , Vikas Chand<sup>1,2</sup> , Bin-Bin Zhang<sup>1,2,3</sup> , Yu-Han Yang<sup>1,2</sup> , Jin-Hang Zou<sup>4</sup>, Yi-Si Yang<sup>1,2</sup> ,  
Xiao-Hong Zhao<sup>5,6,7</sup>, Lang Shao<sup>4</sup>, Shao-Lin Xiong<sup>8</sup>, Qi Luo<sup>8,9</sup>, Xiao-Bo Li<sup>8</sup>, Shuo Xiao<sup>8</sup>, Cheng-Kui Li<sup>8</sup>, Cong-Zhan Liu<sup>8</sup>,  
Jagdish C. Joshi<sup>1,2</sup> , Vidushi Sharma<sup>10</sup> , Manoneeta Chakraborty<sup>11</sup>, Ye Li<sup>12,13</sup> , and Bing Zhang<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, People's Republic of China; [bbzhang@nju.edu.cn](mailto:bbzhang@nju.edu.cn), [vikasK2@nju.edu.cn](mailto:vikasK2@nju.edu.cn)

<sup>2</sup> Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Ministry of Education, People's Republic of China

<sup>3</sup> Department of Physics and Astronomy, University of Nevada Las Vegas, NV 89154, USA

<sup>4</sup> College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, People's Republic of China

<sup>5</sup> Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, People's Republic of China

<sup>6</sup> Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, People's Republic of China

<sup>7</sup> Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming, People's Republic of China

<sup>8</sup> Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 19B Yuquan Road, Beijing 100049, People's Republic of China

<sup>9</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, People's Republic of China

<sup>10</sup> Inter University Centre for Astronomy and Astrophysics, Pune, India

<sup>11</sup> DAASE, Indian Institute of Technology Indore, Khandwa Road, Simrol, Indore 453552, India

<sup>12</sup> Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, People's Republic of China

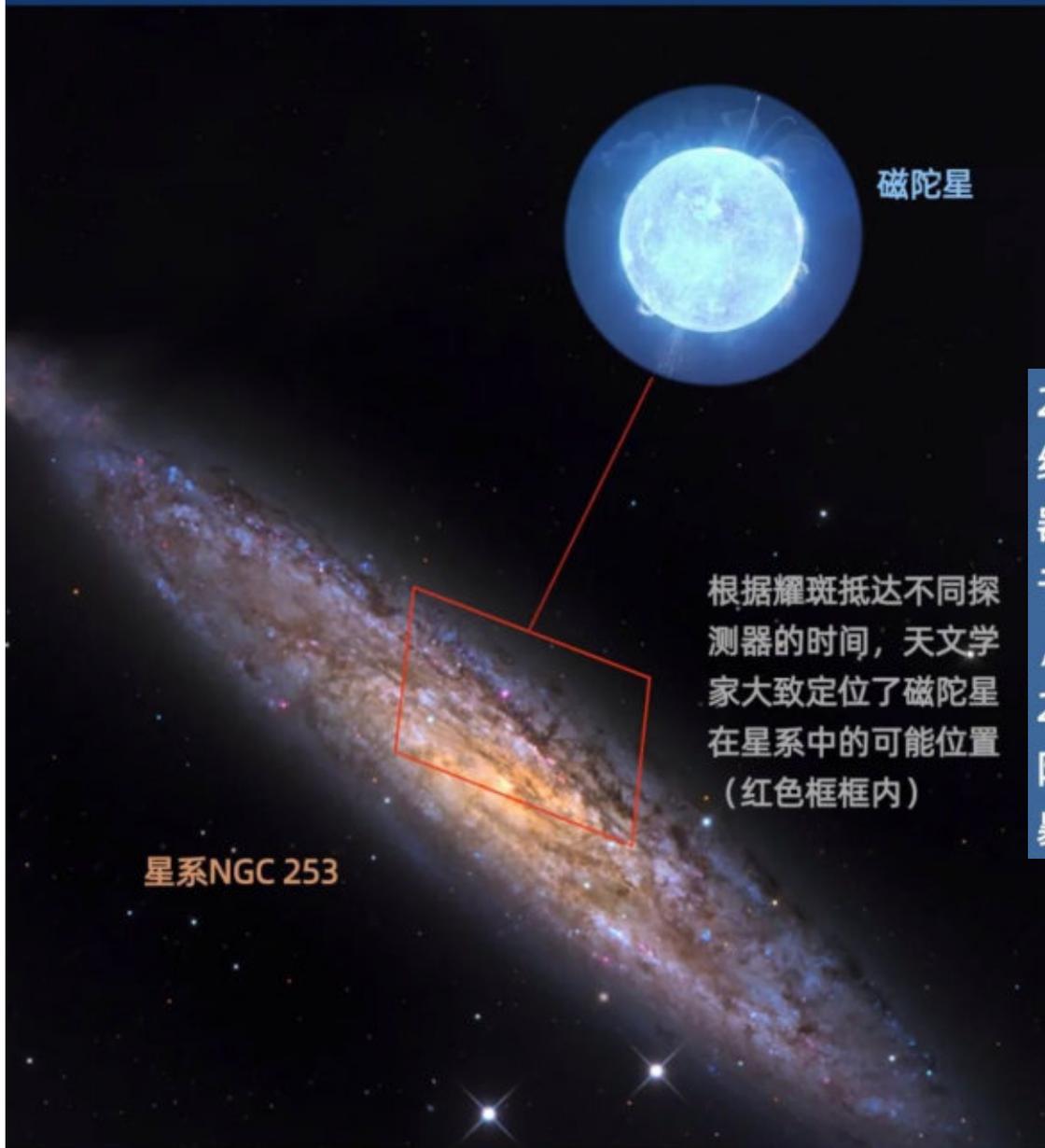
<sup>13</sup> Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, People's Republic of China

*Received 2020 June 23; revised 2020 July 10; accepted 2020 July 16; published 2020 August 18*

### Abstract

The giant flares of soft gamma-ray repeaters (SGRs) have long been proposed to contribute to at least a subsample of the observed short gamma-ray bursts (GRBs). In this paper, we perform a comprehensive analysis of the high-energy data of the recent bright short GRB 200415A, which was located close to the Sculptor galaxy. Our results suggest that a magnetar giant flare provides the most natural explanation for most observational properties of GRB 200415A, including its location, temporal and spectral features, energy, statistical correlations, and high-energy emissions. On the other hand, the compact star merger GRB model is found to have difficulty reproducing such an event in a nearby distance. Future detections and follow-up observations of similar events are essential to firmly establish the connection between SGR giant flares and a subsample of nearby short GRBs.

# 磁陀星爆发



2020年4月15日，一束短暂的X射线和伽马射线爆席卷了太阳系，触发了多个太空中的探测器。现在，多个团队得出结论，这一爆发来自于一颗磁陀星（这是一种高度磁化的中子星），位于距地球约1140万光年的明亮星系NGC 253内。这是第一次在另一个星系探测到了磁陀星的耀斑，这一发现也证实了一些伽马射线暴实际上是来自磁陀星的耀斑。

短GRB

# 《自然·天文学》报道南大研究团队发现史上最短的II型伽马射线暴

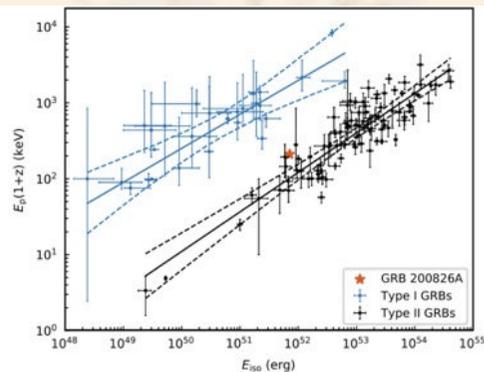
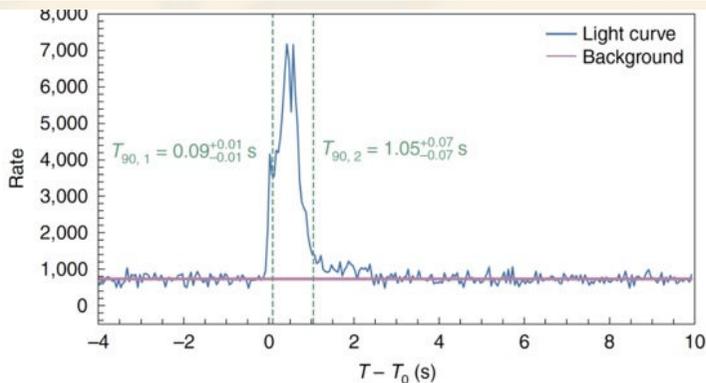
发布时间：2021-07-27

伽马射线暴（简称伽马暴），是迄今为止观测到的宇宙中最剧烈的天体爆发现象。在统计上，伽马暴瞬时辐射的持续时间的分布呈现双峰结构，以两秒为界将其分为长伽马射线暴（长暴）和短伽马射线暴（短暴）。长久以来，通过多波段性质的研究，人们认为这两类暴有着非常不同的物理起源。通常认为长暴是超大质量恒星演化到晚期“死亡”时坍缩的产物，而短暴是由致密双星并合（如中子星-中子星/黑洞并合）所产生。

然而2006年以来，人们逐渐发现仅依据持续时间的长短来判定伽马暴的物理起源和分类的作法面临诸多挑战。一方面，一些高红移或较弱的长暴，由于仪器的探测灵敏度问题，很可能表现为观测上的短暴，就像只被观测到了“冰山一角”。另一方面，人们发现一些短暴带着长长的“尾巴”，尽管严格按照爆发持续时间定义属于长暴，然而其所有的其他特征（如能量、宿主星系、有无超新星关联等）却符合典型短暴的性质。因此，为了避免上述混淆，科学家们提出，可以用“I型”和“II型暴”来替换原来长短暴的分类名称。即I型暴指由双致密星并合产生的伽马暴（典型为短暴），II型暴指由大质量恒星坍缩产生的伽马暴（典型为长暴）。

值得一提的是，对大部分呈现为短时标（如<2秒）的II型暴，人们始终用观测效应（如仪器灵敏度、冰山效应）来解释其“表象”的短，却不相信大质量恒星的坍缩能够产生一个持续时间非常短的爆发。这是因为伽马暴中心引擎的活动时标是由中心黑洞吸积周围物质所耗费的时间所决定，而后者直接跟大质量恒星的密度有关。在传统的恒星密度下，这一时标典型值为百秒，即使考虑极端情况，理论学家也非常自信的推断II型伽马暴的爆发时间最短也不会低于十秒。

上述的推断在2020年8月26日迎来了巨大的挑战。当天发生了一例非常特殊的II型伽马射线暴，编号GRB 200826A。南京大学张彬彬老师研究小组与合作者对其进行了全面的观测和分析，发现该暴的所有物理特征，包括宿主星系及其恒星形成率、能量统计关系（图1）、超新星关联等，都表明其为非常典型的来自大质量恒星坍缩的II型伽马暴。然而，此暴持续时间仅有0.96秒，其光变曲线（伽马光子计数随时间的变化曲线，图1）呈现了极强信噪比，意味着以往“冰山一角”的解释不再成为可能。因此，GRB 200826A是一例非常特殊的爆发时间只有1秒的II型暴。这也是人们首次观测到瞬时辐射时标短于两秒但起源于大质量恒星坍缩的伽马暴。



Zhang, B.-B. et al 2021,  
*Nature Astronomy*

# 《自然·天文学》报道南大研究团队发现史上最短的II型伽马射线暴

GRB 200826A的出现挑战了人们关于伽马暴爆发时间及相关物理模型的认识。这一奇异事件的发生再次让人们重新审视伽马暴中心引擎的多样性。在发表于《自然·天文学》的一篇论文[1]中，张彬彬带领研究团队指出了**几种可能性**：（1）大质量恒星坍缩成黑洞之后伽马暴并没有立即产生，而是等黑洞扫清了周围重子物质之后才产生伽马暴；（2）恒星坍缩之后形成的喷流将大部分时间用在突破抛射物包层，突破之后只有很少的一部分被我们观测到；（3）大质量恒星坍缩后并没有直接形成黑洞，而是先坍缩成大质量磁星，磁星的较差自转通过磁重联过程产生磁泡作为此伽马暴的中心引擎。无论哪种理论解释，都需要将来进一步的观测、数据的检验，以及更多理论细节的支持。



# 扑朔迷离的伽玛暴起源

Article | Published: 07 December 2022

## A long-duration gamma-ray burst with a peculiar origin

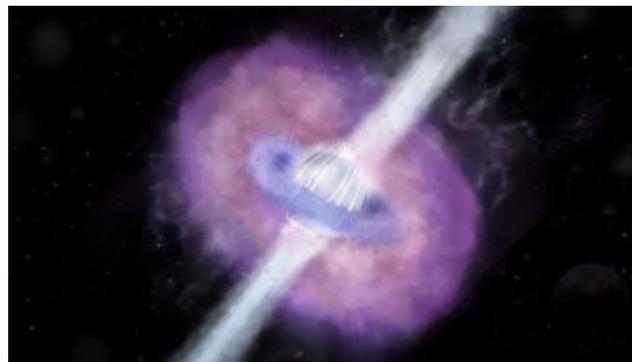
Jun Yang, Shunke Ai, Bin-Bin Zhang , Bing Zhang , Zi-Ke Liu, Xiangyu Ivy Wang, Yu-Han Yang, Yi-Han

Yin, Ye Li & Hou-Jun Lü

*Nature* **612**, 232–235 (2022)

It is generally believed that long-duration gamma-ray bursts (GRBs) are associated with massive star core collapse<sup>1</sup>, whereas short-duration GRBs are associated with mergers of compact star binaries<sup>2</sup>. However, growing observations<sup>3–6</sup> have suggested that oddball GRBs do exist, and several criteria (prompt emission properties, supernova/kilonova associations and host galaxy properties) rather than burst duration only are needed to classify GRBs physically<sup>7</sup>. A previously reported long-duration burst, GRB 060614 (ref. <sup>3</sup>), could be viewed as a short GRB with extended emission if it were observed at a larger distance<sup>8</sup> and was associated with a kilonova-like feature<sup>9</sup>. As a result, it belongs to the type I (compact star merger) GRB category and is probably of binary neutron star (NS) merger origin. Here we report a peculiar long-duration burst, GRB 211211A, whose prompt emission properties in many aspects differ from all known type I GRBs, yet its multiband observations suggest a non-massive-star origin. In particular, substantial excess emission in both optical and near-infrared wavelengths has been discovered (see also ref. <sup>10</sup>), which resembles kilonova emission, as observed in some type I GRBs. These observations point towards a new progenitor type of GRBs. A scenario invoking a white dwarf (WD)–NS merger with a post-merger magnetar engine provides a self-consistent interpretation for all the observations, including prompt gamma rays, early X-ray afterglow, as well as the engine-fed<sup>11,12</sup> kilonova emission.

- **南京大学、内华达大学拉斯维加斯分校、紫金山天文台、广西大学的研究人员**
- **发现了一例观测上具有特殊意义的伽玛暴GRB 211211A，通过详尽的数据分析得出这一长伽玛暴与千新星成协的证据，并原创性地提出了这一事件背后的特殊物理起源，指出其前身星可能为白矮星-中子星并合系统**
- **成果于2022年12月7日发表于国际科学期刊《自然》**



(图片：  
雷晗雨、  
陈静)

# 北大学者提出长时标伽马暴GRB211211A等起源于黑洞-中子星并合

原创 北大天文 北大天文 2022-12-11 11:30 发表于北京

人们相信，双中子星并合和黑洞-中子星并合事件会产生引力波暴，以及伽马射线暴（简称伽马暴）和千新星现象。2017年8月17日，LIGO-Virgo引力波探测器首次探测到一次双中子星并合事件的引力波信号，而空间伽马射线望远镜和地面巡天望远镜也分别探测到与之成协的短时标伽马暴（持续时间小于2秒）和千新星，因此证实了引力波暴、短伽马暴和千新星三者统一起源于双中子星并合的理论。关于黑洞-中子星并合，科学家也持续研究和搜寻其产生的引力波、伽马暴和千新星信号，但在观测上一直没有证实。直到2020年初，由黑洞-中子星并合产生的两例引力波信号（GW200105和GW200115）首次在O3时期（即引力波探测第三次运行）被LIGO-Virgo探测到，但是科学家并没有观测到预期的伽马暴和千新星。

理论上，黑洞-中子星并合只在黑洞拥有很大自旋时才会潮汐瓦解系统中的中子星，并由于吸积产生明亮的伽马暴，以及由并合抛射物产生千新星热辐射。与双中子星并合不同的是，黑洞较大的引力可能会使并合后抛出的一些物质重新回落，形成回落吸积辐射——导致伽马暴持续时间的延长。据理论估计，这些可以发生潮汐瓦解的系统在宇宙所有黑洞-中子星并合事件中的占比小于20%。引力波观测结果证实GW200105和GW200115引力波事件中黑洞的自旋都非常小，这意味着它们没有呈现可观测的电磁辐射对应体是符合理论预期的。

另一方面，大质量恒星塌缩一般被认为是绝大部分长时标伽马暴（持续时间大于2秒）的起源，并且伴随产生明亮的超新星爆炸热辐射。然而，近年来科学家们陆续发现了3个长时标伽马暴（GRB 060614, 211211A和211227A），它们的起源存在争议，其特征展示更可能起源于致密星并合。它们爆发的时间均不在引力波探测器运行的时期内，无法通过引力波观测直接证实它们的真实起源。这3个伽马暴都没有呈现出明亮的超新星辐射，但是其中两个（GRB 060614和211211A）被探测到了疑似的千新星辐射。

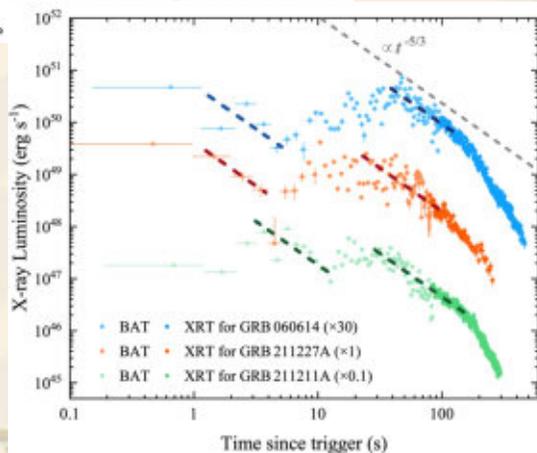


图1: 三例致密星并合起源长伽马暴的X射线波段辐射，虚线代表回落吸积过程。

北大天文一个高能天体物理研究小组系统地研究了这3个长时标伽马暴事件，从几方面提出证据证明它们可能的黑洞-中子星并合起源。他们发现这3个伽马暴早期的伽马射线辐射和X射线余辉中均包含了明确的回落吸积信号，与理论预言的黑洞-中子星并合事件导致的回落吸积辐射一致（见图1）。其次，对这2例千新星辐射进行理论分析发现，它们产生的抛射物质可以达到0.1倍太阳质量（对GRB 211211A的千新星候选体光变曲线的拟合见图2）。模拟计算表明，这么大质量的抛射物质几乎只能由极高自旋的黑洞与中子星并合才能产生。还有，基于这3例伽马暴事件的光度和探测率，研究小组还估计了它们在宇宙中的爆发率，与理论上预估的高自旋黑洞与中子星并合事件率一致。这些结果都揭示了长时标伽马暴和伴随的千新星辐射极有可能起源于黑洞-中子星并合。随着引力波探测能力的进一步加强，研究小组估计在O4和O5这两个运行时期黑洞-中子星并合事件引起的引力波和电磁信号的联合探测率分别为每年0.1例和1例。近日，这些结果以“源于快自旋黑洞-中子星并合的长时标伽马射线暴和成协的千新星辐射”（Long-duration Gamma-Ray Burst and Associated Kilonova Emission from Fast-spinning Black Hole-Neutron Star Mergers）为题发表于美国《天体物理杂志通讯》（Astrophysical Journal Letters）。此研究为解释这类特殊的伽马暴事件提出了新的理论，也在黑洞-中子星并合研究方面做出具有重大意义的观测预言。

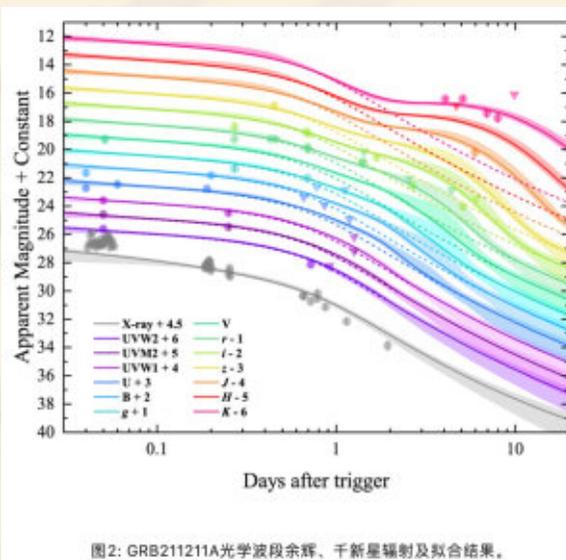


图2: GRB211211A光学波段余辉、千新星辐射及拟合结果。

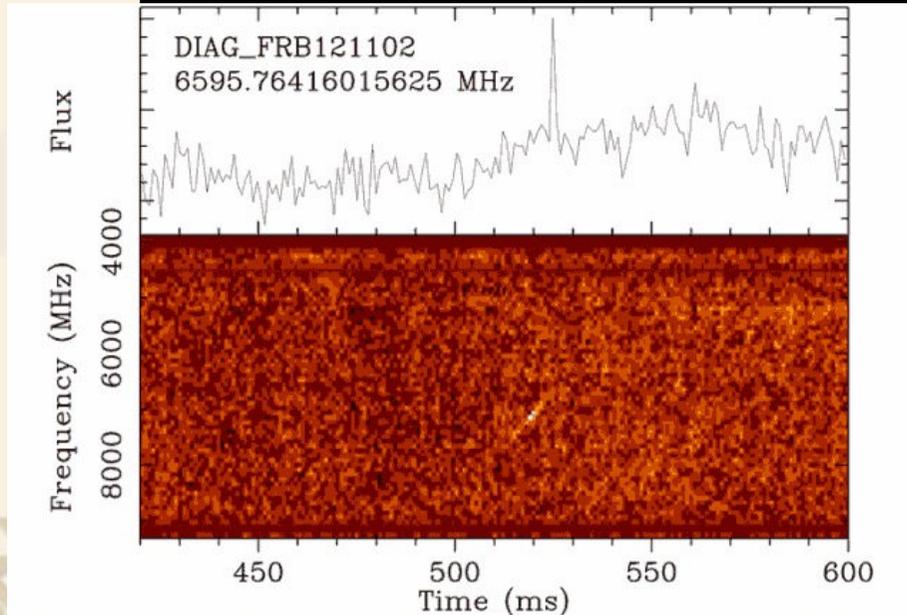
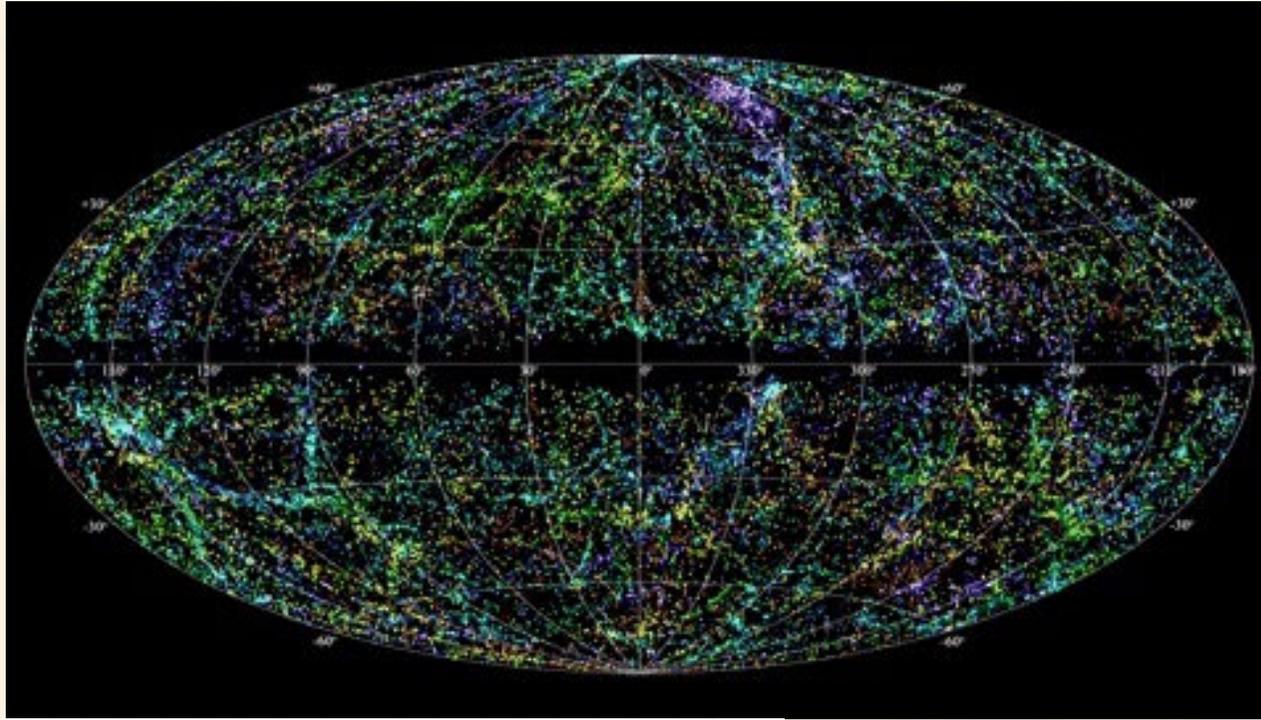
# 伽玛暴导致生命大消亡？

## 过程和证据

- $O_2 + N_2$  在伽玛射线作用下生成  $NO_2$
- $NO_2 \Rightarrow$  “遮天蔽日”，“臭氧破坏”
- 紫外光，酸雨，寒冷  $\Rightarrow$  生命大消亡
- 奥陶纪生命大消亡（在4.43亿年前）  
是5亿年里五次最大生命大消亡之一
- 证据：海洋表面浮游层生物曾大量死亡，  
而在深海区域的生物却能幸存（Melott,  
Lieberman et al. 2003, New Scientist）

(courtesy of Z.G. Dai, USTC)

# 快速射电暴 (FRB)



GRB  
FRB  
GWB

单次暴 (双中子星并合?)  
vs.  
重复暴 (周期性、非周期性)



图8: 第一个发现的重复爆发FRB121102。多台望远镜协同观测确定其宿主星系, 发表在2017年1月《自然》杂志封面, 也是迄今为止唯一精确定位的快速射电暴, 被美国天文学会誉为“自LIGO引力波事件之后, 天文学最重大的发现”。(Credit: Danielle Futselaar)



2019年，FAST捕捉到来自第一个重复暴FRB121102的脉冲。图中脉冲为FAST真实数据，左上为哈勃望远镜图像，红圈中为其宿主星系。

## FAST望远镜首次发现新快速射电暴

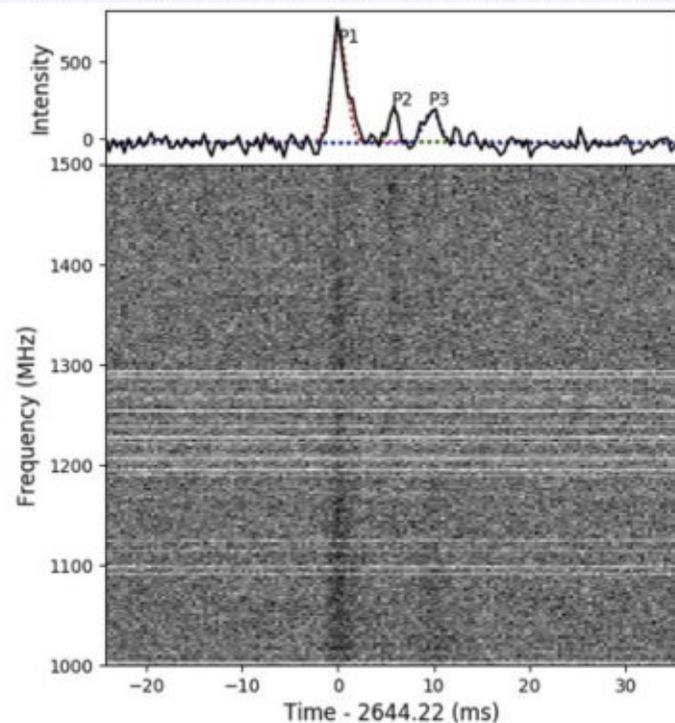
发表日期：2020-04-30

【放大 缩小】

快速射电暴（Fast Radio Burst; FRB）是一种持续仅数毫秒的神秘射电暴发现象，其起源的研究是当前天体物理前沿热点课题。国家天文台研究人员朱炜玮、李菡等与合作者利用自主研发的搜寻技术，结合深度学习人工智能，对海量FAST巡天数据进行快速搜索，并发现了新的快速射电暴。

新发现的FRB是已知样本里色散量最大的信号之一，色散达到 $1812 \text{ pc cm}^{-3}$ 。FRB色散越高越有可能是来自于宇宙深处。该发现展示了FAST望远镜在通过盲搜发现遥远FRB方面的独特优势，并已经可以对一些FRB理论模型的可行性给予限制。

未来FAST望远镜将会通过“多科学目标漂移扫描巡天（CRAFTS）”和“快速射电暴的搜寻和多波段观测”等FAST优先和重大项目，发现和观测更多FRB，进一步对该神秘天文现象的起源和发生机制的研究做出重要贡献。



新发现快速射电暴FRB 181123  
消除色散影响后的动态谱，该  
FRB有罕见的三峰结构。

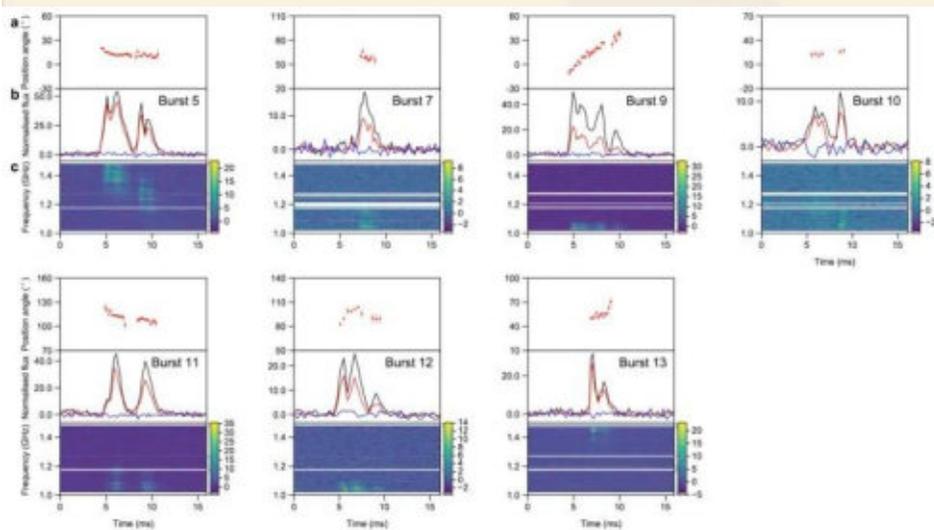
# “中国天眼”新发现 终结天文界一场争论

科技日报 2020/11/16 17:25

10月29日和11月5日，利用500米口径球面射电望远镜（FAST），科学家在国际科学期刊《自然》杂志上分别发表了2篇关于快速射电暴的研究成果，这口被喻为“中国天眼”的大锅，“看到”了这种毫秒电波起源的一些蛛丝马迹。

事实上，关于快速射电暴的来源，主流的理论假说可以分为两派。一派认为它来自磁星的磁层；另一派则认为，某些致密天体爆发会产生激波，快速射电暴便来源于激波相互作用驱动的辐射。

“现在，我们观测了一个新的快速射电重复暴，通过对11次暴发电波的高灵敏度偏振信号解析，我们发现其每个脉冲的偏振特性都不一样。FAST观测到的偏振变化多样性明确说明：宇宙中快速射电暴的爆发源可能来自致密天体磁层中的物理过程。”韩金林说，这个观测结果直接否定了一批国际学者关于快速射电暴来自粒子冲撞的理论，为近几年两大派系的理论争锋一锤定音。



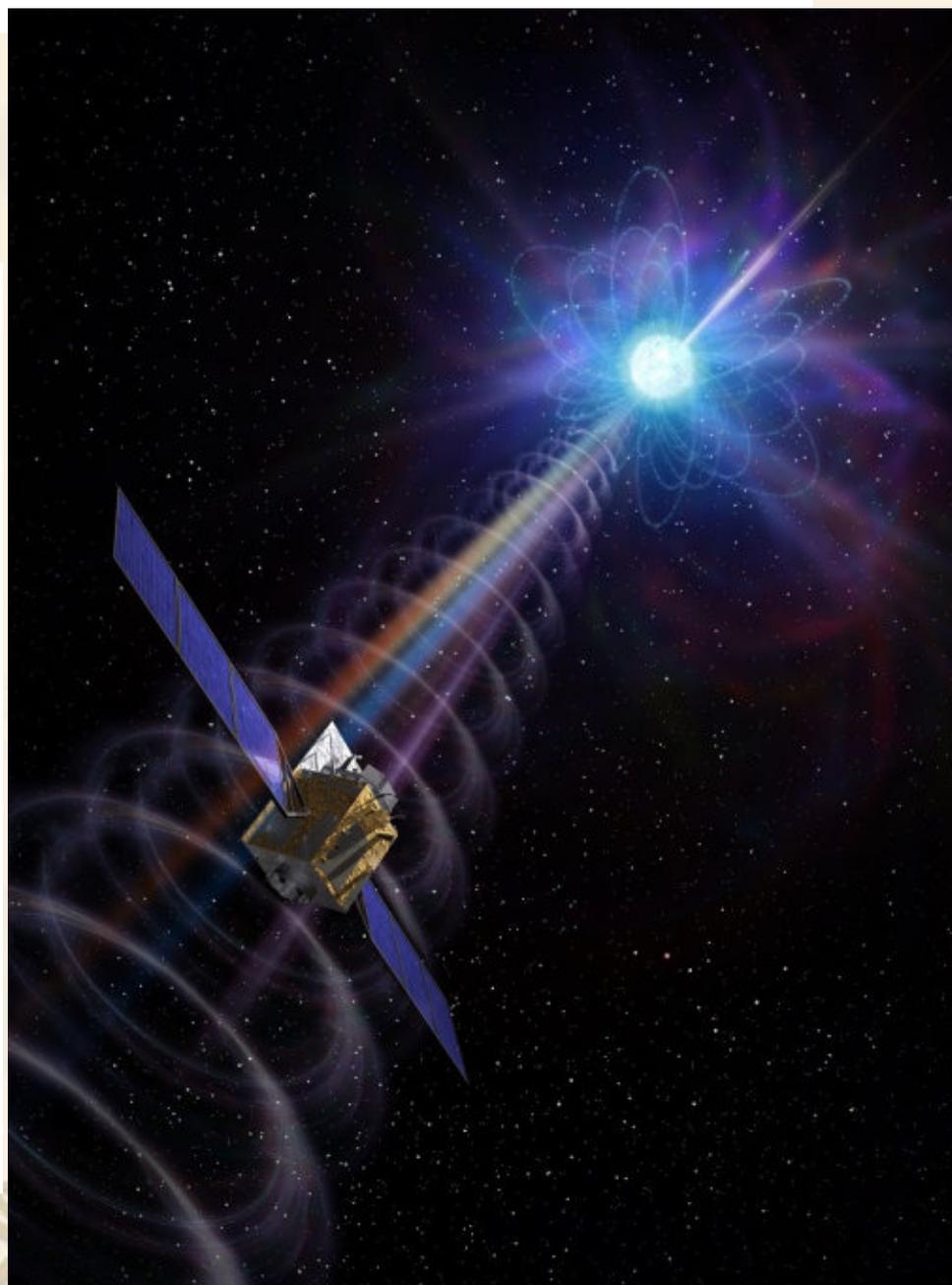
2020年4月，北京师范大学的林琳博士提出了利用FAST观测银河系磁星SGR J1935+2154软伽马射线重复暴源（SGR）的申请。经批准后，研究人员使用FAST的L波段19波束接收机，对SGR J1935+2154进行了持续监测。在SGR J1935+2154的X射线和软伽马射线暴发活跃期、特别是29个软伽马射线暴对应的精确时间节点上未探测到任何射电脉冲辐射。

借助FAST超高的灵敏度，结合此前加拿大氢强度测绘实验（CHIME）望远镜和暂现射电天文辐射巡天2（STARE-2）的探测，FAST实现了对8个数量级亮度空间的覆盖，给出了这一银河系内快速射电暴源迄今最严格的射电流量限制。

# 人类首次！中国慧眼卫星确认快速射电暴来自于磁星

来源：央视新闻 | 2021年02月19日 12:02

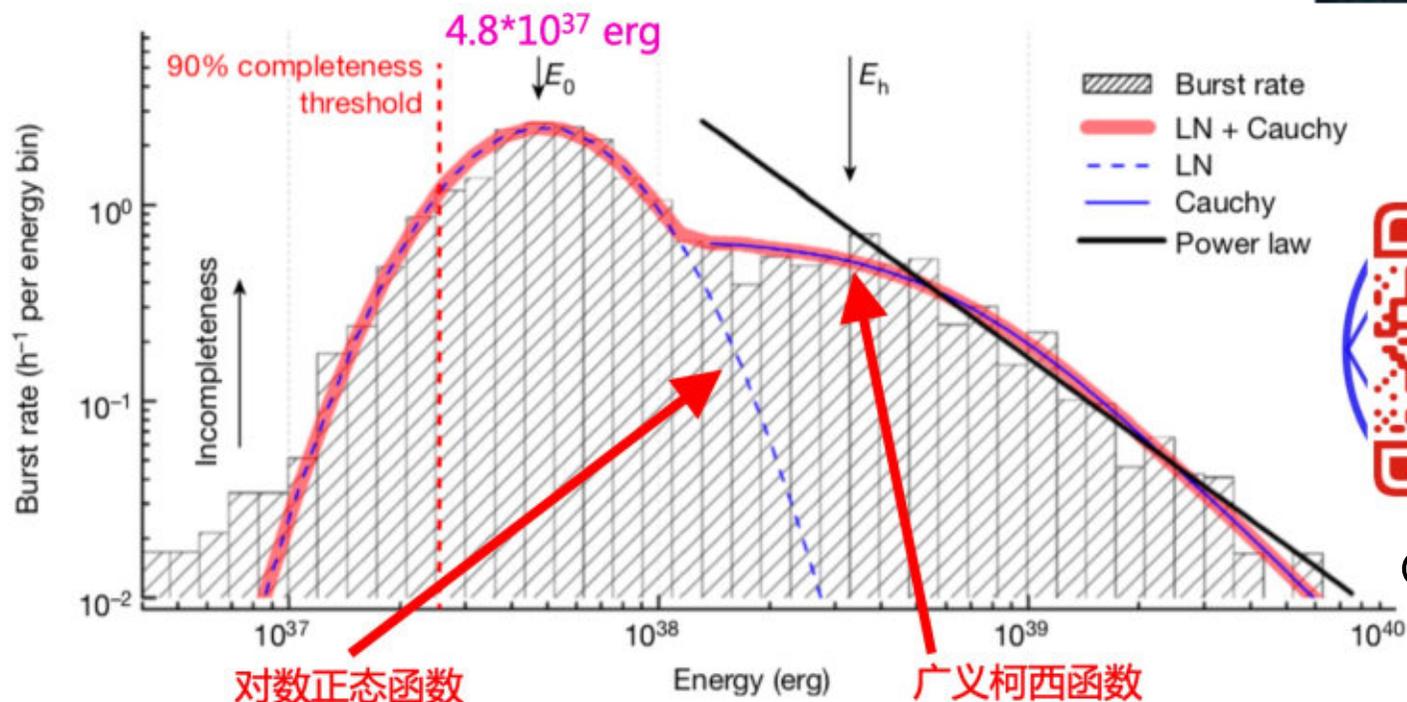
2月19日，中国科学院高能物理研究所举行新闻发布会，发布了慧眼卫星最新观测结果：慧眼卫星发现首个跟神秘的快速射电暴相关联的X射线暴，确认其来自银河系内的磁星SGR J1935+2154，并在国际上首先证认该X射线暴包含的两个X射线脉冲是快速射电暴的高能对应体。这一发现，与国际上其他望远镜的观测一起，证明快速射电暴可以起源于磁星爆发，破解了快速射电暴的起源之谜，并为理解快速射电暴的辐射机制和磁星的爆发机制提供了至关重要的数据。这一研究工作主要由中国科学院高能物理研究所、北京师范大学、美国内华达大学、清华大学等单位完成，并与19日在国际著名期刊《自然·天文学》发表。



# 具有“双重人设”的重复快速射电暴FRB 121102

## FAST对FRB 121102的观测发现

- 1652次爆发，峰值事件率122次/小时
- 爆发能量分布呈双峰结构 → 双重人设
- 不存在周期处于1毫秒至1000秒的周期性



# 全球首例！FAST如何发现这个“勤奋”的快速射电暴？

原创 牛晨辉 李菂 科学院 2022-06-09 08:00 发表于北京

借助FAST，中国科学院国家天文台李菂研究员领导的国际团队发现了迄今为止唯一一例持续活跃的重复快速射电暴 FRB 20190520B，为构建快速射电暴的演化模型、理解这一剧烈的宇宙神秘现象打下了基础。该成果于北京时间2022年6月9日在国际学术期刊《自然》杂志发表。

其他重复快速射电暴只有在爆发窗口期才能探测到信号，而在FAST的后续跟踪观测中，每次都能收到FRB 20190520B发来的“射电情书”，有时候是十几封，有时候只有几封，但从未间断，可以说是“相当勤奋”了。它也是目前找到的唯一持续活跃的重复FRB。

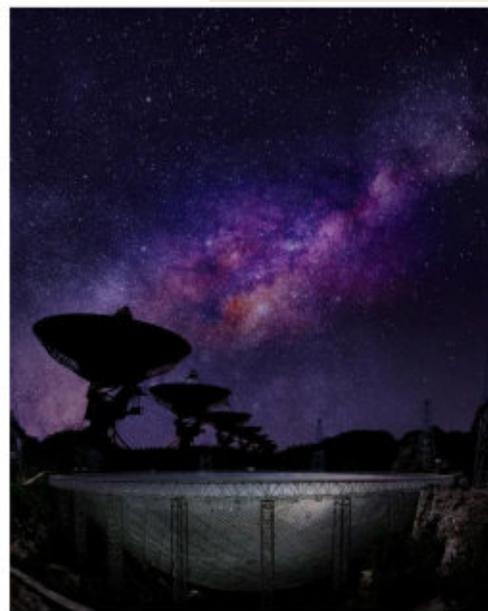


图4. FAST望远镜与VLA望远镜合成图，上图为VLA阵列，下图为FAST。

## ▶▶1. 利用VLA定位到更精确位置——发现了持续射电源

更加令人兴奋的是，我们在快速射电暴成协的位置，发现了一颗致密的持续射电源的存在，这是继首例重复暴FRB 20121102A后，第二例探测到伴随有致密持续射电源的快速射电暴。虽然这个持续射电源的对应体究竟是什么还未知，但有学者认为，FRB的起源与致密射电持续源有着非常重要的关系。

## ▶▶2. 寻找FRB20190520B宿主星系——距离我们30亿光年

有了角秒级的定位，我们通过搜寻存档的光学望远镜数据，找到了FRB20190520B的“家乡地址”，并马上组织了对宿主星系的光学后随观测。通过美国帕洛玛 200 英寸望远镜 (Palomar 200-inch telescope) 和凯克 (Keck) 望远镜，我们分别得到了两组光谱。分析发现，这两组光谱数据呈现出一致的结果：FRB 20190520B的宿主星系是一个红移 0.241 的矮星系，距离我们30亿光年。

## ▶▶3. 复杂的宿主星系环境——挑战经典模型

射电信号在空间传播时，会与路径中的介质相互作用从而产生色散效应。我们用色散值表征传播路径中电子数密度总和。FRB 20190520B拥有相对高的色散值，表明其传播路径中穿过了复杂的电子分布。我们根据测定的红移信息，得出其宿主星系内贡献的色散值高达约 900 色散单位，这是目前得到宿主星系贡献色散值最大的快速射电暴，证明其近源位置具有非常高的电子密度。

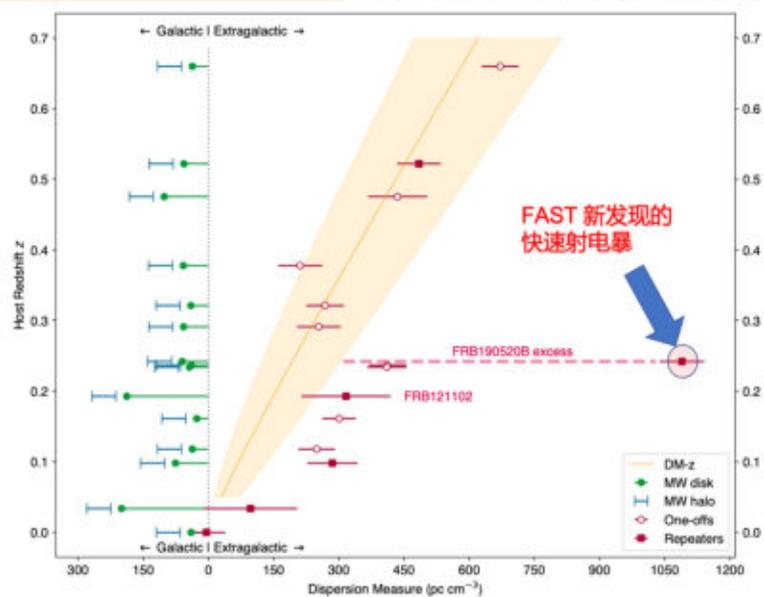


图5. 从色散-红移关系上清晰可见FRB 20190520B远远偏离了其他快速射电暴。图中斜线为包含了宇宙主要重子物质成分的“Macquart Relation<sup>[7]</sup>”，阴影区域为 cosmic variance<sup>[6]</sup>。

Article | [Published: 13 July 2022](#)

# Sub-second periodicity in a fast radio burst

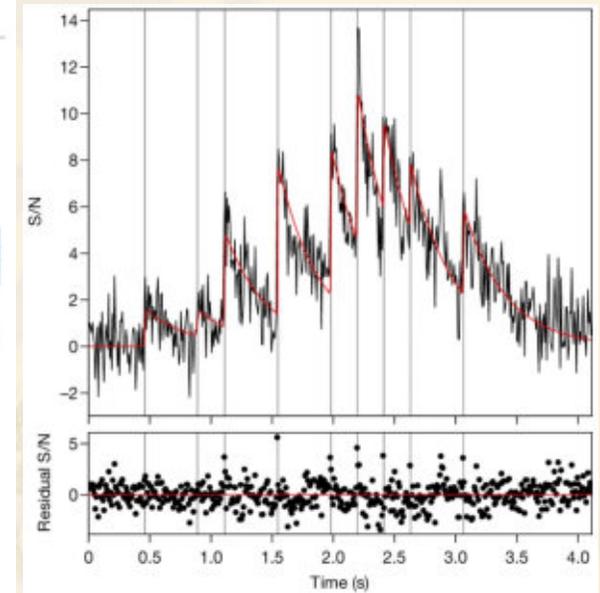
[The CHIME/FRB Collaboration](#), [Bridget C. Andersen](#), ... [Andrew Zwaniga](#)

[+ Show authors](#)

[Nature](#) **607**, 256–259 (2022) | [Cite this article](#)

## Abstract

Fast radio bursts (FRBs) are millisecond-duration flashes of radio waves that are visible at distances of billions of light years<sup>1</sup>. The nature of their progenitors and their emission mechanism remain open astrophysical questions<sup>2</sup>. Here we report the detection of the multicomponent FRB 20191221A and the identification of a periodic separation of 216.8(1) ms between its components, with a significance of  $6.5\sigma$ . The long (roughly 3 s) duration and nine or more components forming the pulse profile make this source an outlier in the FRB population. Such short periodicity provides strong evidence for a neutron-star origin of the event. Moreover, our detection favours emission arising from the neutron-star magnetosphere<sup>3,4</sup>, as opposed to emission regions located further away from the star, as predicted by some models<sup>5</sup>.



# “中国天眼”再登《自然》：“拍摄”快速射电暴密近环境动态，获得多个“世界首次”

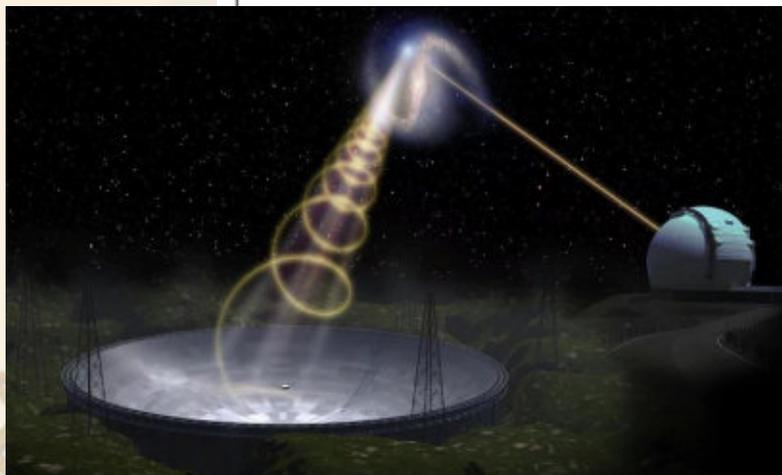
2022-09-21 23:01:14 作者：许琦敏

“中国天眼”观测成果又一次登上《自然》杂志。利用“中国天眼”FAST望远镜，中国科学院国家天文台与北京大学、美国内华达大学学者共同观测到了一次快速射电暴，获得了迄今为止最大的快速射电暴偏振观测样本，并首次探测到了迄今为止距离快速射电暴中心最近的周边环境的磁场变化。成果于2022年9月21日23点发表于《自然》杂志。

“该FRB并非起源于大质量恒星极端爆炸导致的超亮超新星或伽马射线暴后形成的年轻磁星。”

## Article

# A fast radio burst source at a complex magnetized site in a barred galaxy



H. Xu<sup>1,2,3</sup>, J. R. Niu<sup>2,4</sup>, P. Chen<sup>1,3,5</sup>, K. J. Lee<sup>1,2</sup>, W. W. Zhu<sup>2</sup>, S. Dong<sup>1</sup>, B. Zhang<sup>6,7</sup>,  
J. C. Jiang<sup>1,2,3</sup>, B. J. Wang<sup>1,2,3</sup>, J. W. Xu<sup>1,2,3</sup>, C. F. Zhang<sup>1,2,3</sup>, H. Fu<sup>8</sup>, A. V. Filippenko<sup>9</sup>, E. W. Peng<sup>1,3</sup>,  
D. J. Zhou<sup>2,4</sup>, Y. K. Zhang<sup>2,4</sup>, P. Wang<sup>2</sup>, Y. Feng<sup>2,10</sup>, Y. Li<sup>11</sup>, T. G. Brink<sup>9</sup>, D. Z. Li<sup>12</sup>, W. Lu<sup>13</sup>, Y. P. Yang<sup>14</sup>,  
R. N. Caballero<sup>1</sup>, C. Cai<sup>15</sup>, M. Z. Chen<sup>16</sup>, Z. G. Dai<sup>17</sup>, S. G. Djorgovski<sup>18</sup>, A. Esamdin<sup>16</sup>, H. Q. Gan<sup>2</sup>,  
P. Guhathakurta<sup>19</sup>, J. L. Han<sup>2</sup>, L. F. Hao<sup>20</sup>, Y. X. Huang<sup>20</sup>, P. Jiang<sup>2</sup>, C. K. Li<sup>15</sup>, D. Li<sup>2,21</sup>, H. Li<sup>2</sup>,  
X. Q. Li<sup>15</sup>, Z. X. Li<sup>20</sup>, Z. Y. Liu<sup>16</sup>, R. Luo<sup>22</sup>, Y. P. Men<sup>23</sup>, C. H. Niu<sup>2</sup>, W. X. Peng<sup>15</sup>, L. Qian<sup>2</sup>,  
L. M. Song<sup>15</sup>, D. Stern<sup>24</sup>, A. Stockton<sup>25</sup>, J. H. Sun<sup>2</sup>, F. Y. Wang<sup>26</sup>, M. Wang<sup>20</sup>, N. Wang<sup>16</sup>,  
W. Y. Wang<sup>3</sup>, X. F. Wu<sup>11</sup>, S. Xiao<sup>15</sup>, S. L. Xiong<sup>15</sup>, Y. H. Xu<sup>20</sup>, R. X. Xu<sup>1,3,27</sup>, J. Yang<sup>26</sup>, X. Yang<sup>11</sup>,  
R. Yao<sup>2</sup>, Q. B. Yi<sup>15</sup>, Y. L. Yue<sup>2</sup>, D. J. Yu<sup>2</sup>, W. F. Yu<sup>28</sup>, J. P. Yuan<sup>16</sup>, B. B. Zhang<sup>26,29</sup>, S. B. Zhang<sup>11</sup>,  
S. N. Zhang<sup>15</sup>, Y. Zhao<sup>15</sup>, W. K. Zheng<sup>9</sup>, Y. Zhu<sup>2</sup> & J. H. Zou<sup>26,30</sup>

# The Innovation

Repeating fast radio bursts from collapses of the crust of a strange star

Jinjun Geng   • Bing Li • Yongfeng Huang  

Open Access • Published: August 11, 2021 • DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100152>

## The Innovation | 快速射电暴现象或暗示奇异夸克星的存在

原创 J Geng & Y Huang TheInnovation创新 2021/08/11

**快速射电暴**是天文学家新发现的一种来自太空、持续仅毫秒量级的强烈射电爆发现象。它们是如何产生的，科学家一直在不断地探索和争论。本研究表明，当**奇异夸克星**从其伴星吸积物质，导致其壳层反复发生局部坍塌时，可周期性地重复产生快速射电暴现象。此项研究不仅可以解释快速射电暴的起源，还有助于回答**脉冲星是否为奇异夸克星**这一基本问题。

罗会仟：看似宁静的夜空，每天却有数万起快速射电暴此起彼伏地不断闪现。这些神秘莫测的无线电波，真的是外星人星际航行时的光帆在反光吗？The Innovation这篇Report可能打断了人们关于外星人的遐想，将线索指向了另一类奇特的致密天体 --- 奇异夸克星。

快速射电暴（FRB）起源追溯：不是外星人的摩斯密码，也不是中子双星或磁陀星的颤抖，而是奇异夸克星在周期性爆浆 😊

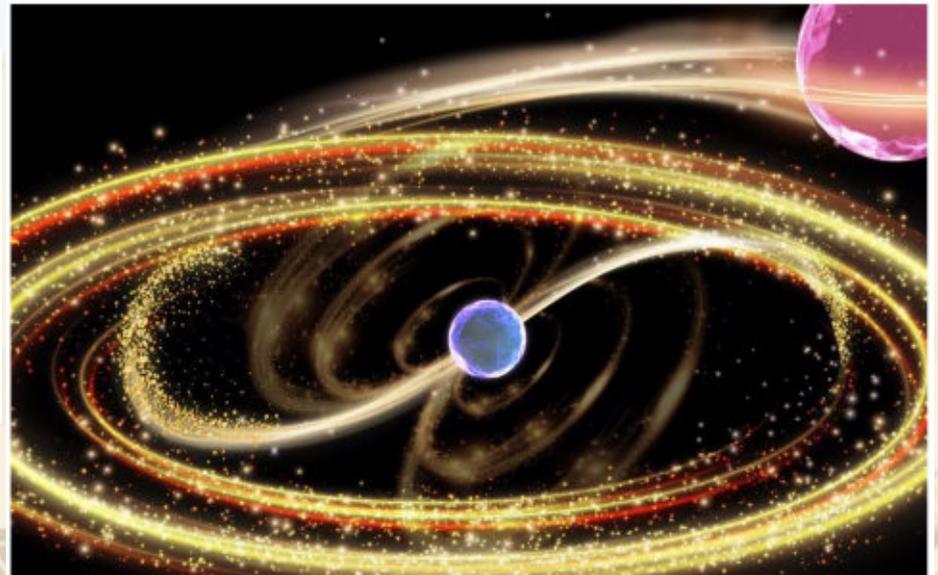
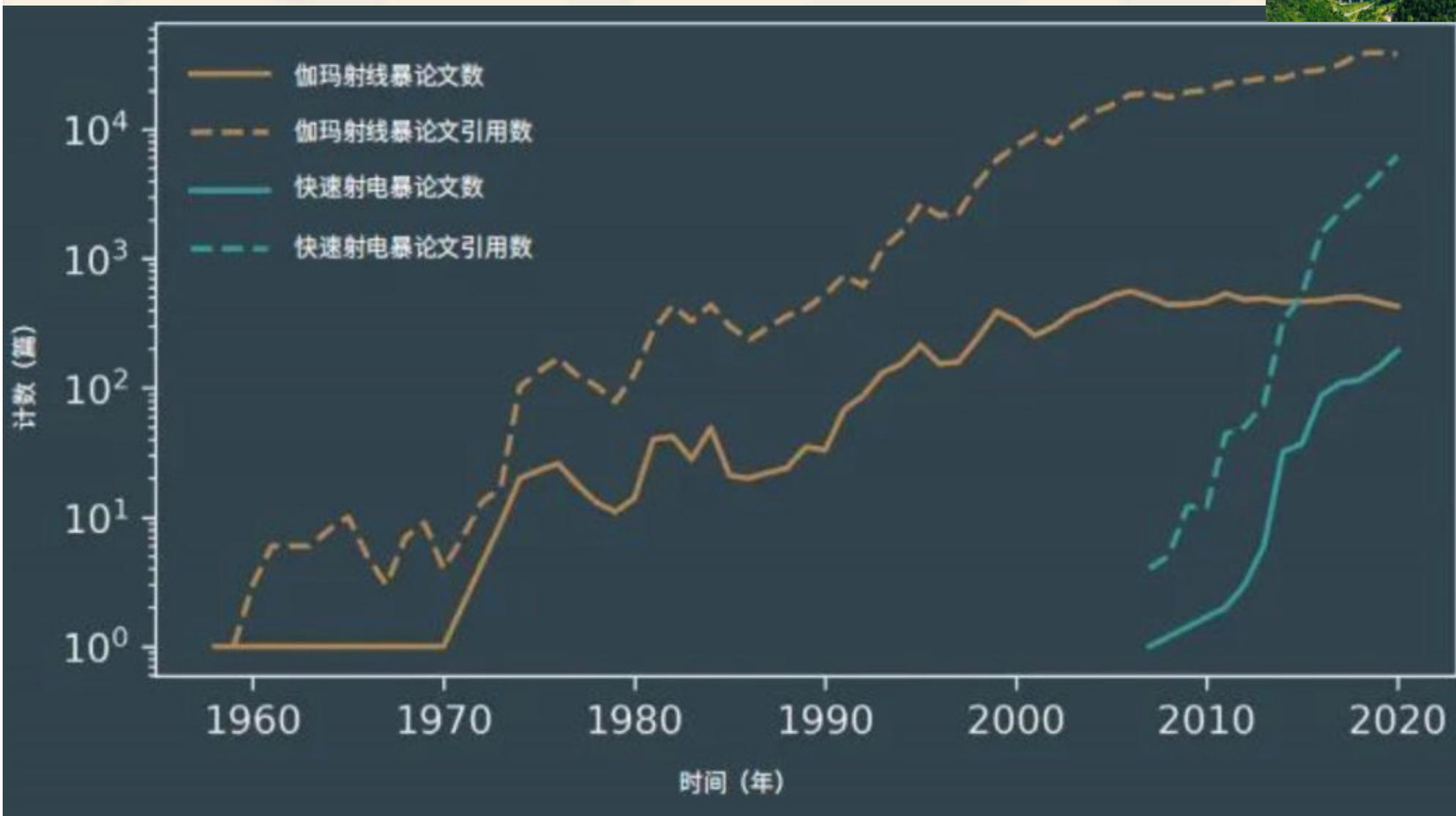


图1 被吸积的伴星物质最终沿着奇异夸克星磁层的磁力线落到两极



伽马射线暴和快速射电暴发现之后论文量和引用量变化曲线。

# What may make them?

(An incomplete list, no particular order)

(张冰 内华达大学拉斯维加斯分校)

## Repeating:

- Supergiant radio pulses (Cordes & Wasserman 2015; Connor et al. 2015; Pen & Connor 2015)
- Magnetar giant flare radio bursts (Popov et al. 2007, 2013; Kulkarni et al. 2014; Katz 2015)
- NS-Asteroid collisions (Geng & Huang 2015; Dai et al. 2016)
- WD accretion (Gu et al. 2016)
- Flaring stars (Loeb et al. 2013; Maoz et al. 2015)
- AGN induced plasma instability (Romero et al. 2016)
- Young magnetar powered bursts (Murase et al. 2016; Metzger et al. 2017)
- Cosmic combs (Zhang 2017)
- Bremsstrahlung / synchrotron / curvature maser (Romero et al. 2016; Ghisellini 2017; Waxman 2017; Beloborodov 2017)
- Instability within pulsar magnetosphere (Philippov, Katz)

## Catastrophic:

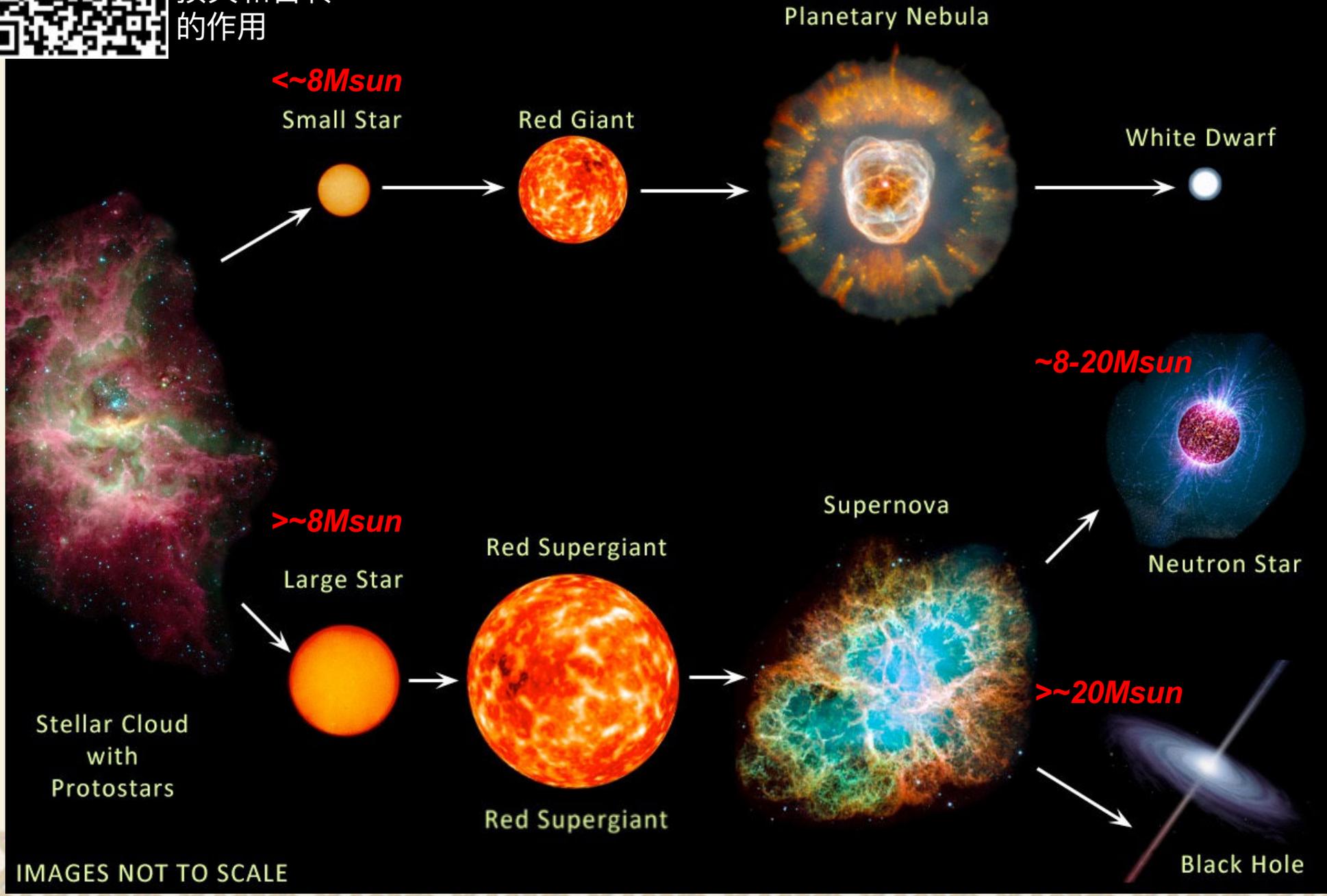
- Collapses of supra-massive neutron stars to black holes (thousands to million years later after birth, or in a small fraction hundreds/thousands of seconds after birth), ejecting "magnetic hair" (Falcke & Rezzolla 2013; Zhang 2014)
- Magnetospheric activity after NS-NS mergers (Totani 2013)
- Unipolar inductor in NS-NS mergers (Piro 2012; Wang et al. 2016)
- Mergers of binary white dwarfs (Kashiyama et al. 2013)
- BH-BH mergers (charged) (Zhang 2016; Liebling & Palenzuela 2016)
- Kerr-Newman BH instability (Liu et al. 2016)
- Cosmic sparks from superconducting strings (Vachaspati 2008; Yu et al. 2014)
- Evaporation of primordial black holes (Rees 1977; Keane et al. 2012)
- White holes (Barrau et al. 2014; Haggard)
- Axion miniclusters, axion stars (Tkachev 2015; Iwazaki 2015)
- Quark Nova (Shand et al. 2015)
- Dark matter-induced collapse of NSs (Fuller & Ott 2015)
- Higgs portals to pulsar collapse (Bramante & Elahi 2015)



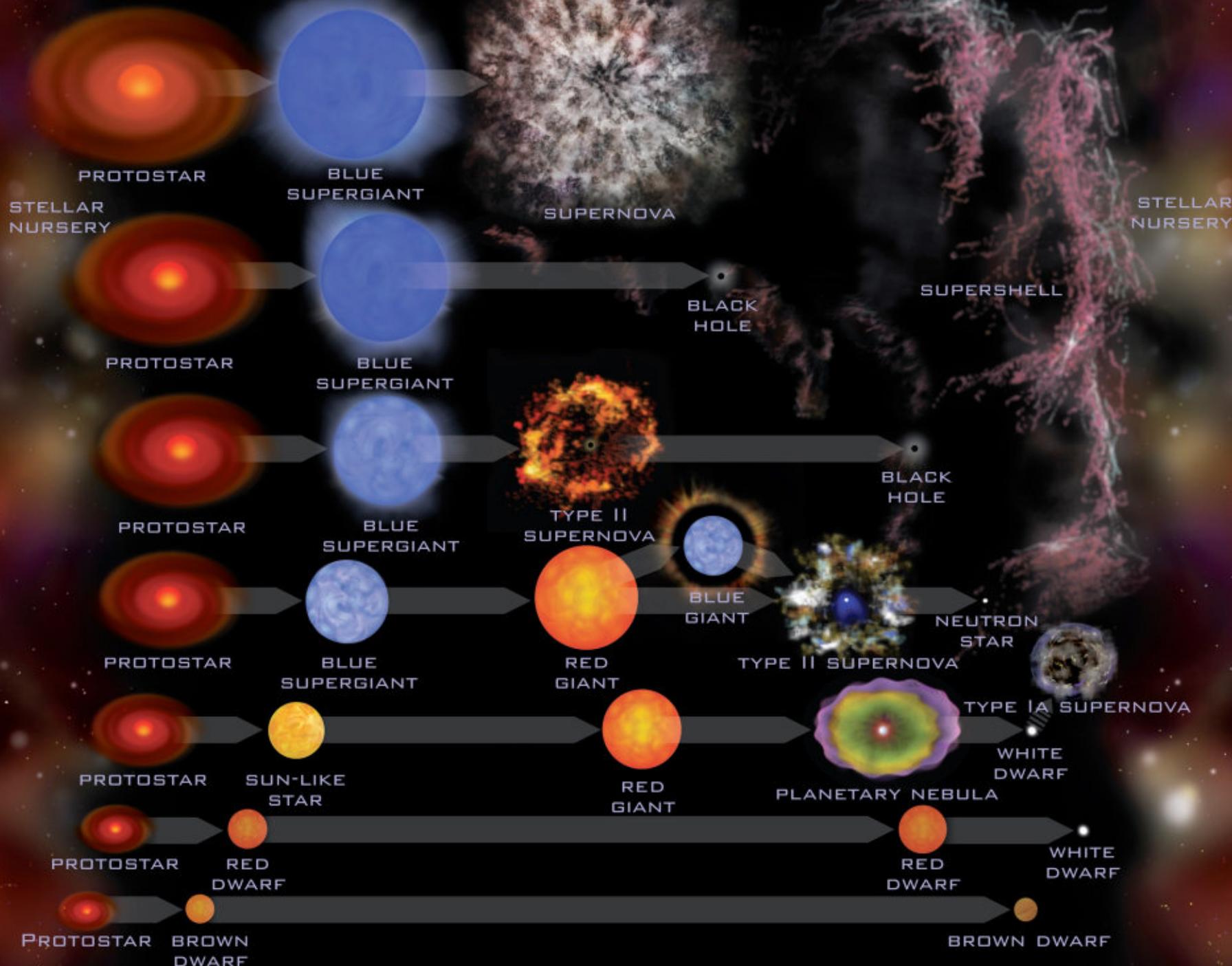


恒星演化中  
混合、质量  
损失和自转  
的作用

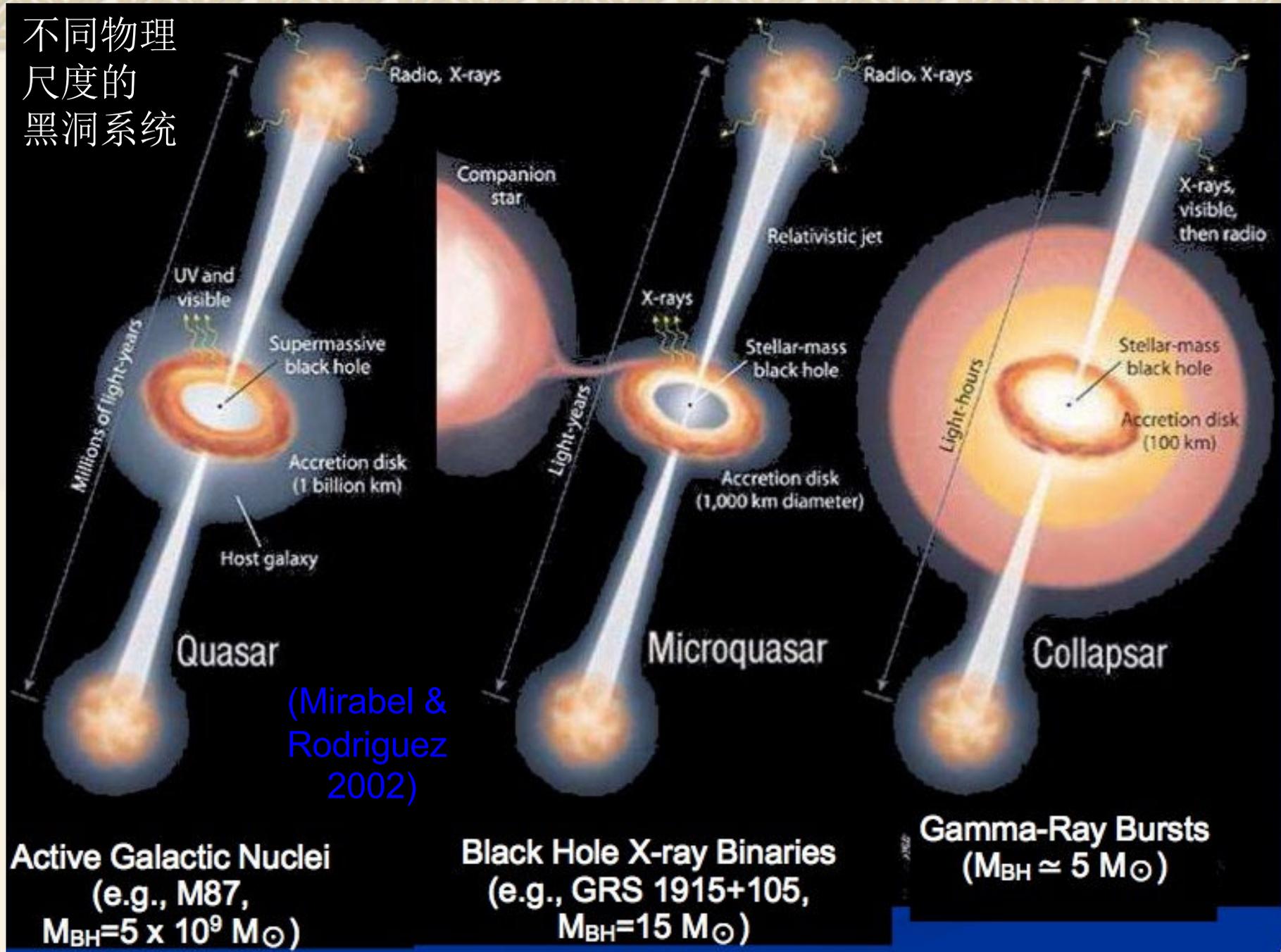
# EVOLUTION OF STARS



(NASA)



# 不同物理尺度的黑洞系统



- ❖ Common key ingredients: BH, AD, jets