第五章：观测宇宙

--望远镜的基本原理

实际上的望远镜观测……

| HP 观测中心

| 帕洛玛望远镜控制中心

| ALMA 中控中心

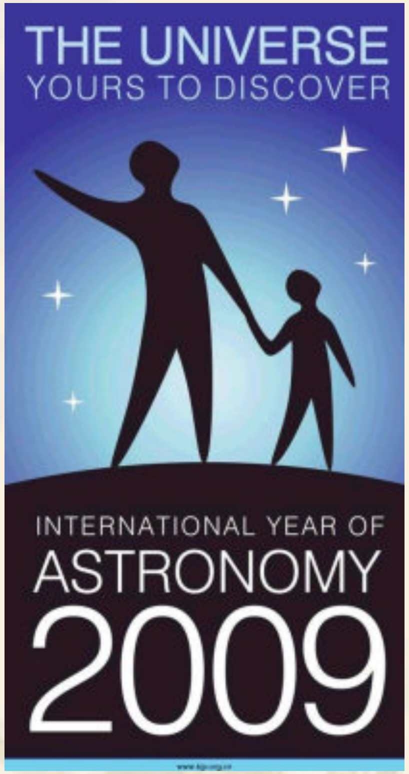
（戴昱 国家天文台）

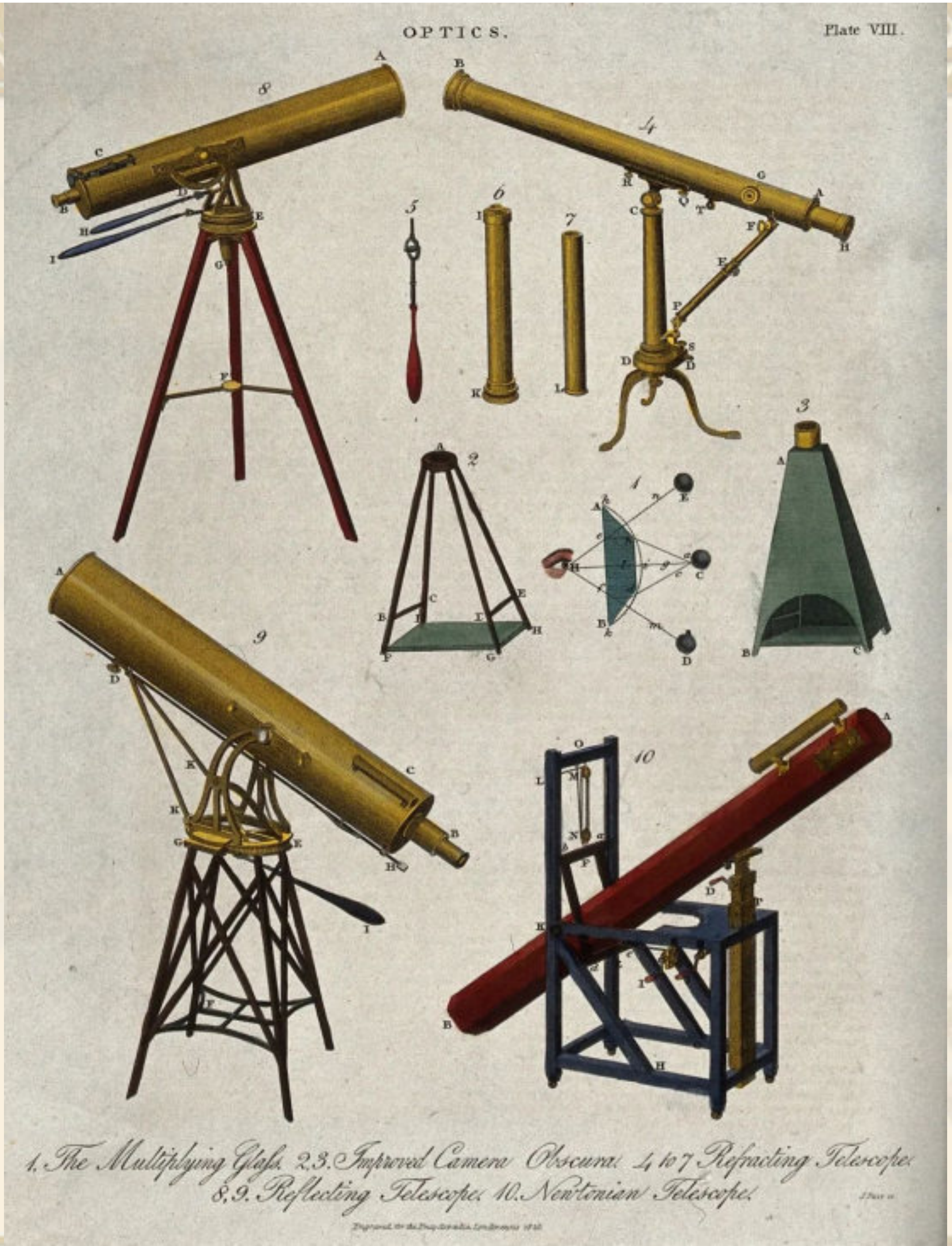
本章内容

- 早期望远镜类型
- 一些光学原理
- 如何选取好的天文台址？
- 望远镜分辨率、放大率、视场
- 近现代望远镜类型
- 各个波段的一些代表性望远镜
- 宇宙线观测
- 引力波观测

望远镜的发明

- 1608年夏末 荷兰的眼镜匠汉斯.黎波塞发明
- 1609年 伽利略将望远镜用于天文观测
- 2009 国际天文年

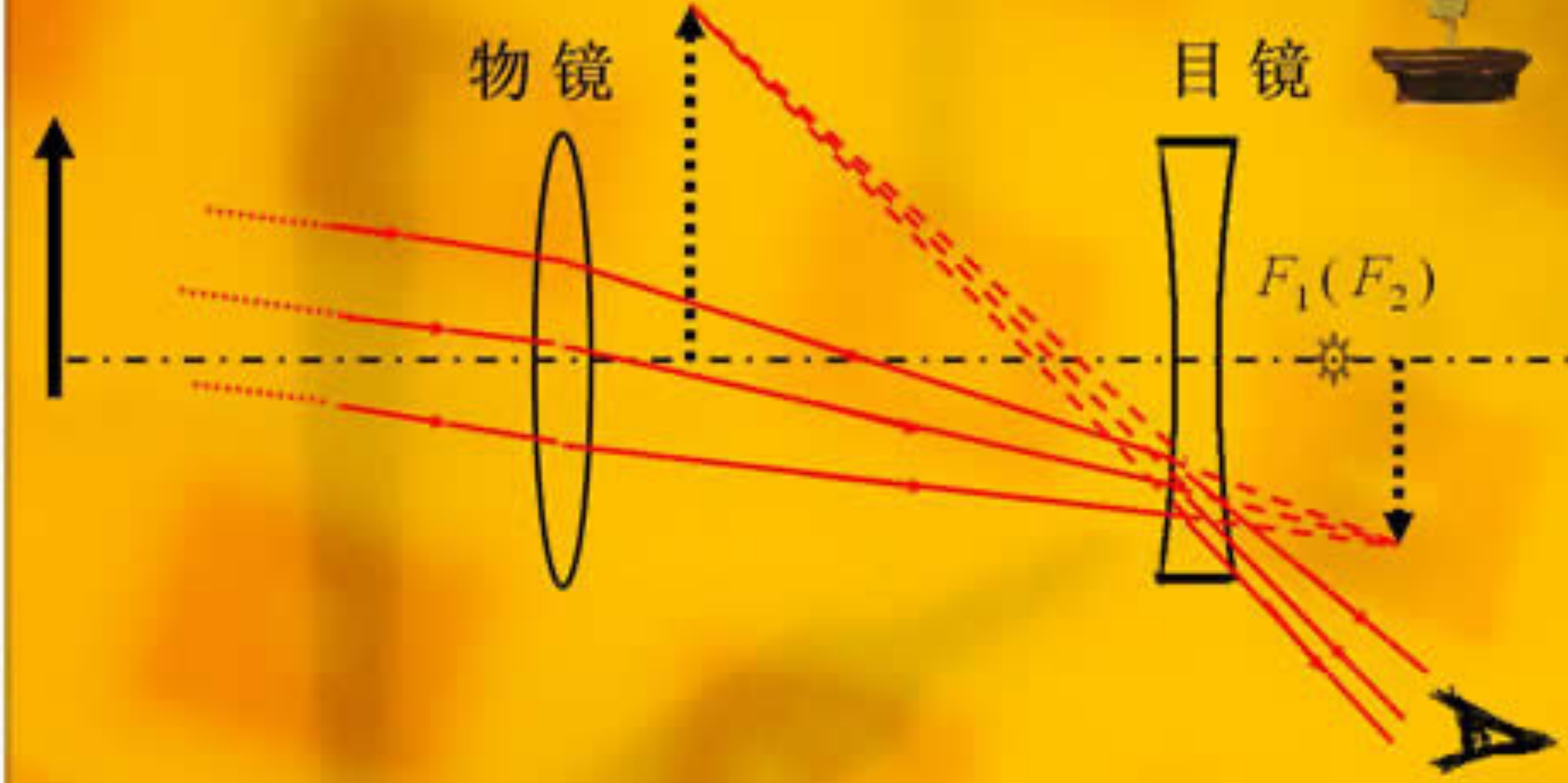

THE UNIVERSE
YOURS TO DISCOVER
INTERNATIONAL YEAR OF
ASTRONOMY
2009


OPTICS.
Plate VIII.
1. The Multiplying Glass. 2.3. Improved Camera Obscura. 4 to 7 Refracting Telescope.
8.9. Reflecting Telescope. 10. Newtonian Telescope.

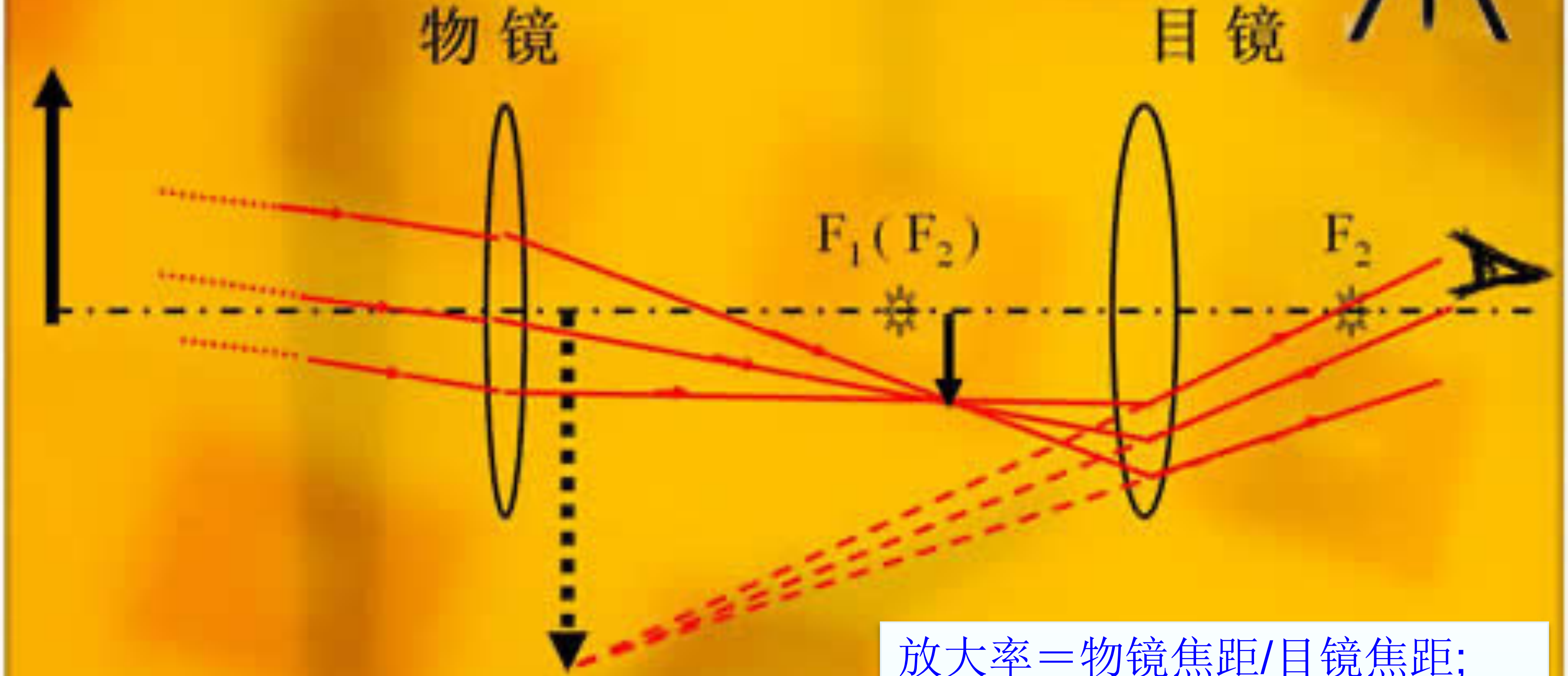
早期望远镜及其支撑架的各种设计

（范舟《中国国家天文》）

伽利略望远镜



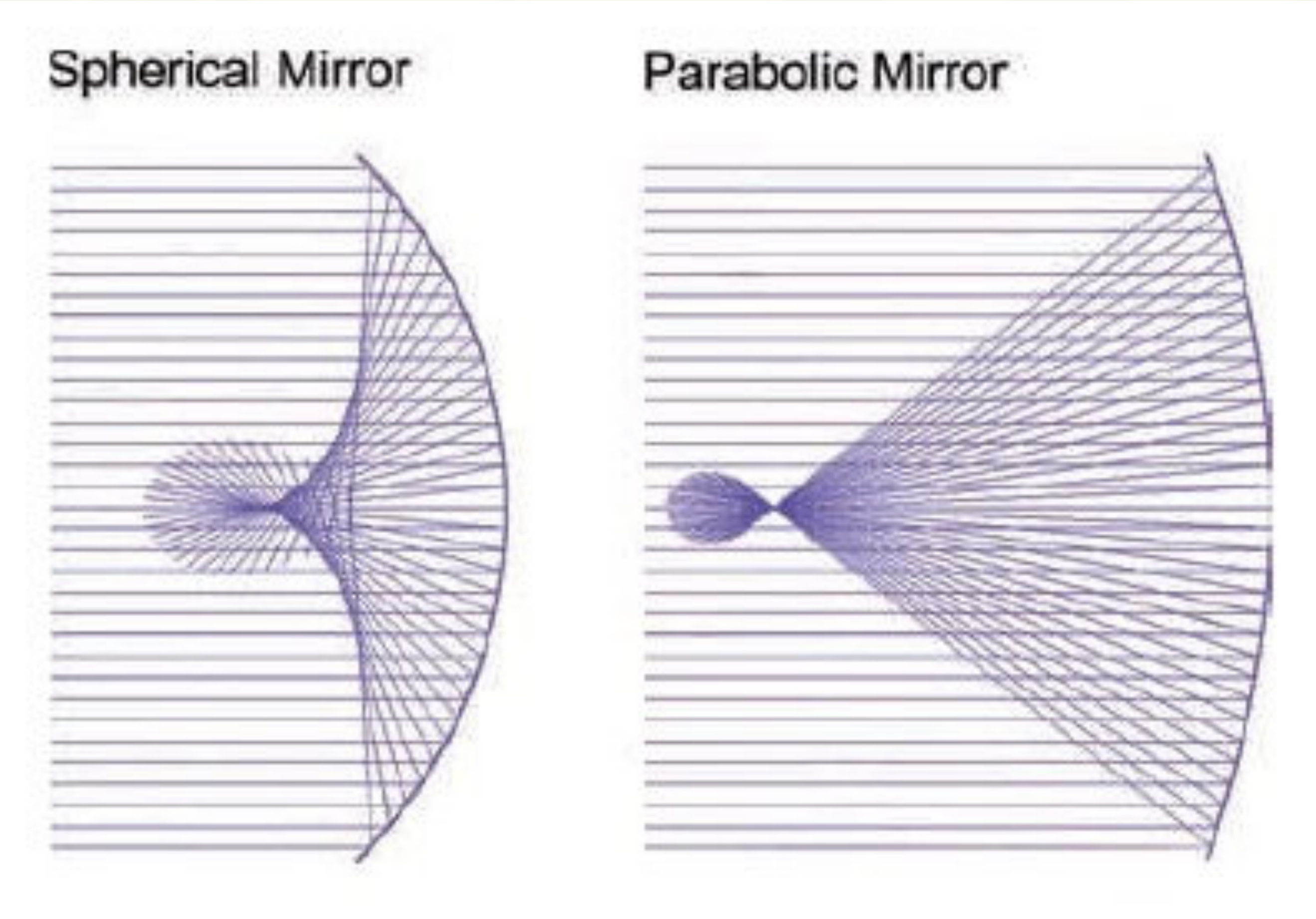
开普勒望远镜


物 镜
目 镜
$F_1(F_2)$
F_2

放大率＝物镜焦距/目镜焦距;
焦比f/x=物镜焦距/物镜口径(x);
一般来说，f/x越小，视场越大;
观测视场=目镜视场/放大率。

光学原理

- 光波：强度和位相，矢量叠加


Spherical Mirror
Parabolic Mirror

- 焦点：光线相干叠加（射电望远镜为例）

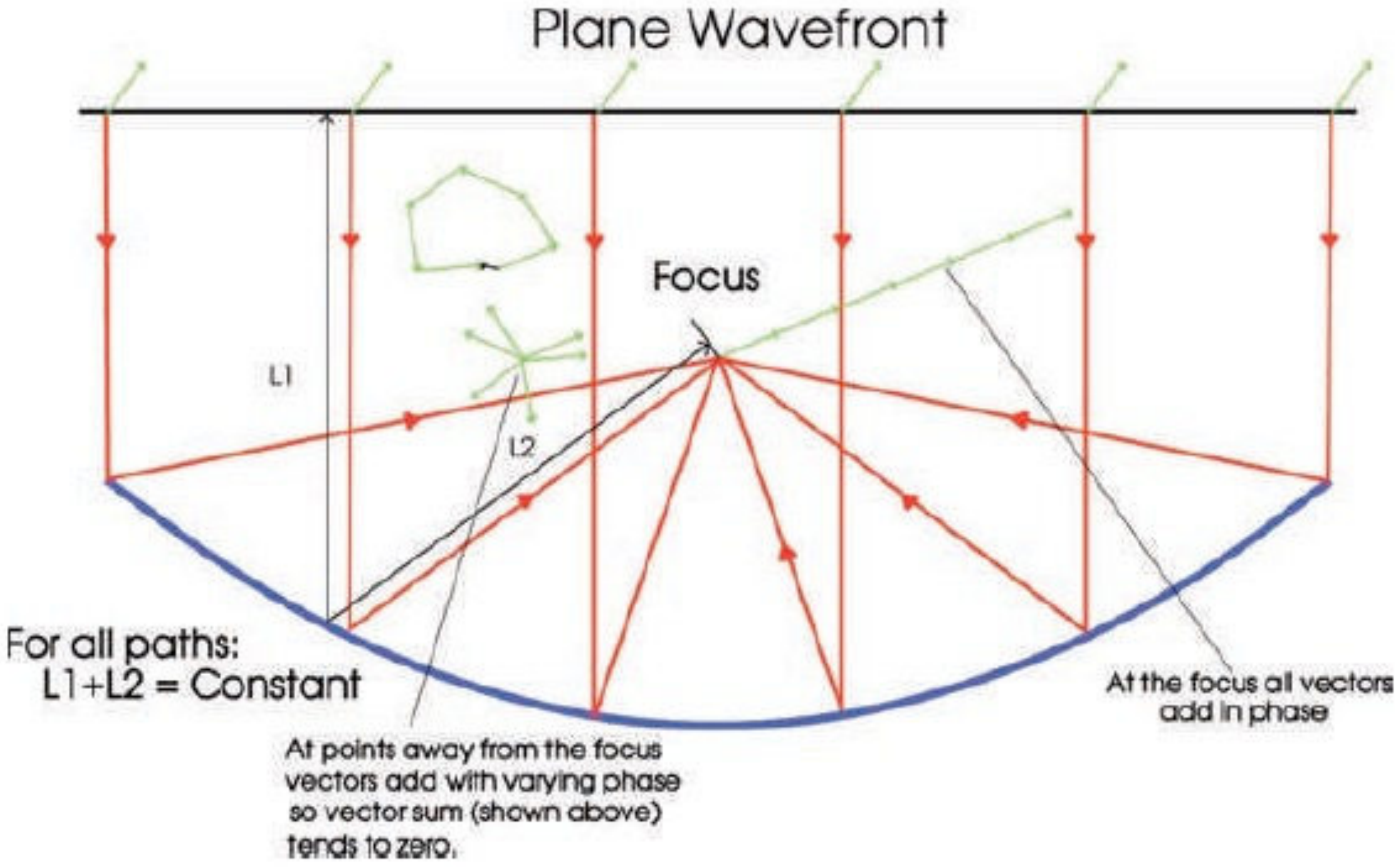

Plane Wavefront
Focus
L1
L2
For all paths:
L1+L2 = Constant
At points away from the focus vectors add with varying phase so vector sum (shown above) tends to zero.
At the focus all vectors add in phase

Figure 5.2 The vector addition of wavelets at, and away from, the focus of a parabola.

❖ 旋转抛物反射镜面为什么存在“好的”焦点？

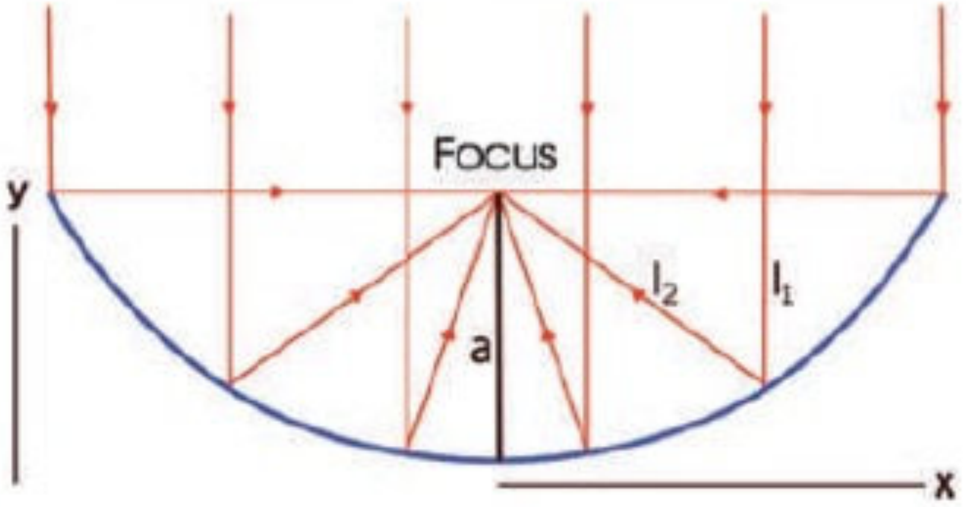


Figure 5.3 The geometry of a parabola.

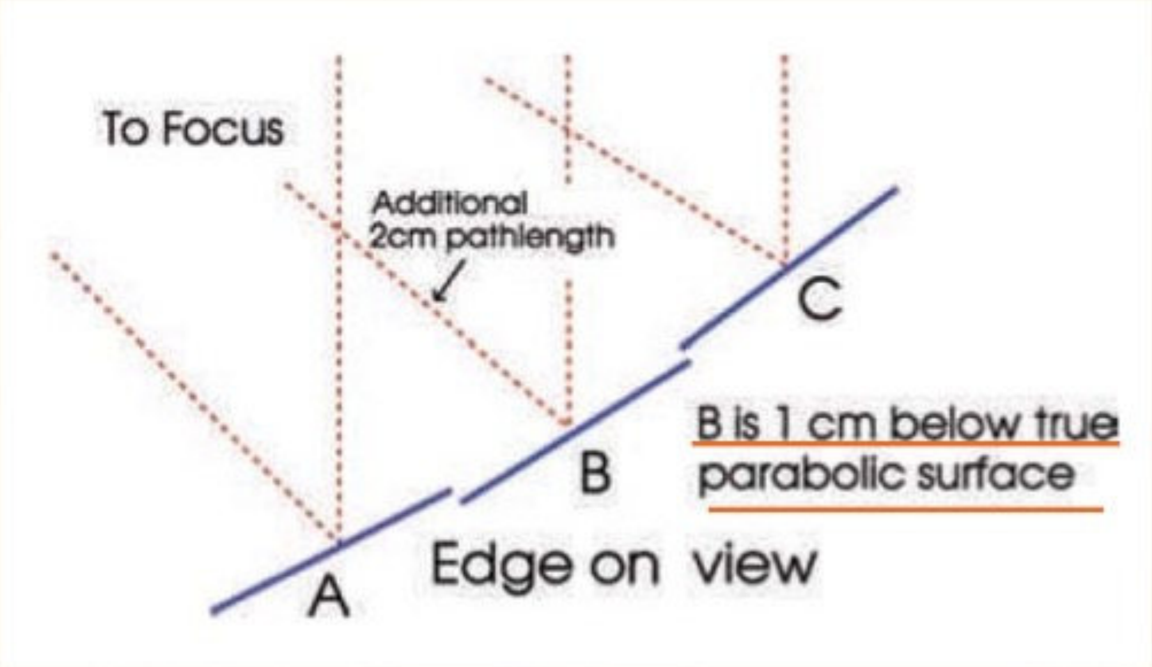
$$y = (1/4a)\,x^2$$

$$l_1 = a - y$$
$$l_2 = [x^2 + (a-y)^2]^{1/2}$$

$$\begin{aligned} l_2 &= (4ay + a^2 - 2ay + y^2)^{1/2} \\ &= (a^2 + 2ay + y^2)^{1/2} \\ &= [(a+y)^2]^{1/2} \\ &= (a+y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_1 + l_2 &= (a-y) + (a+y) \\ &= 2a \end{aligned}$$

❖对镜面的要求：


To Focus
Additional 2cm pathlength
C
B is 1 cm below true parabolic surface
B
A
Edge on view

假设波长为：

8cm

位相差：

90度

对镜面的要求：<1/20 波长

存在的问题：离开轴向，彗形像差，点光源变成彗星形状

薄透镜：焦距与镜面曲率半径的关系

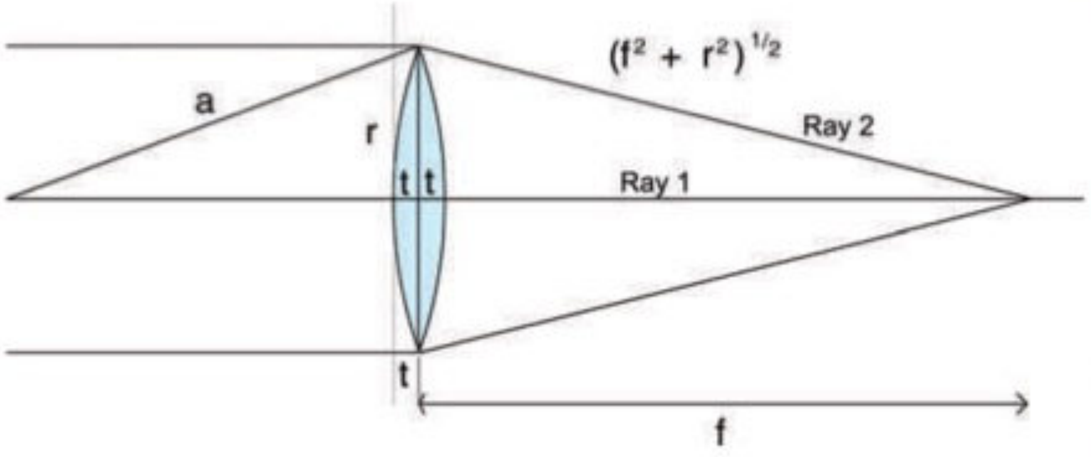


Figure 5.5 The geometry of imaging with a biconvex lens.

$$(f^2+r^2)^{1/2}+t=(f-t)+2nt$$
$$=f+t\,(2n-1)$$
$$(f^2+r^2)^{1/2}=f+t\,(2n-2)$$
$$(f^2+r^2)^{1/2}=f+2t(n-1)$$

$$f^2+r^2=f^2+4ft(n-1)+[2t(n-1)]^2$$

$$r^2=4ft(n-1)$$
$$f=r^2/4t(n-1)$$

$$a^2=(a-t)^2+r^2$$

$$a^2=a^2-2at+t^2+r^2$$

（忽略t^2项）

$$2at=r^2$$

$$a=r^2/2t$$

$$f=a/2(n-1)$$

透镜设计方程

❖ 色差

$$f = a/2(n-1)$$

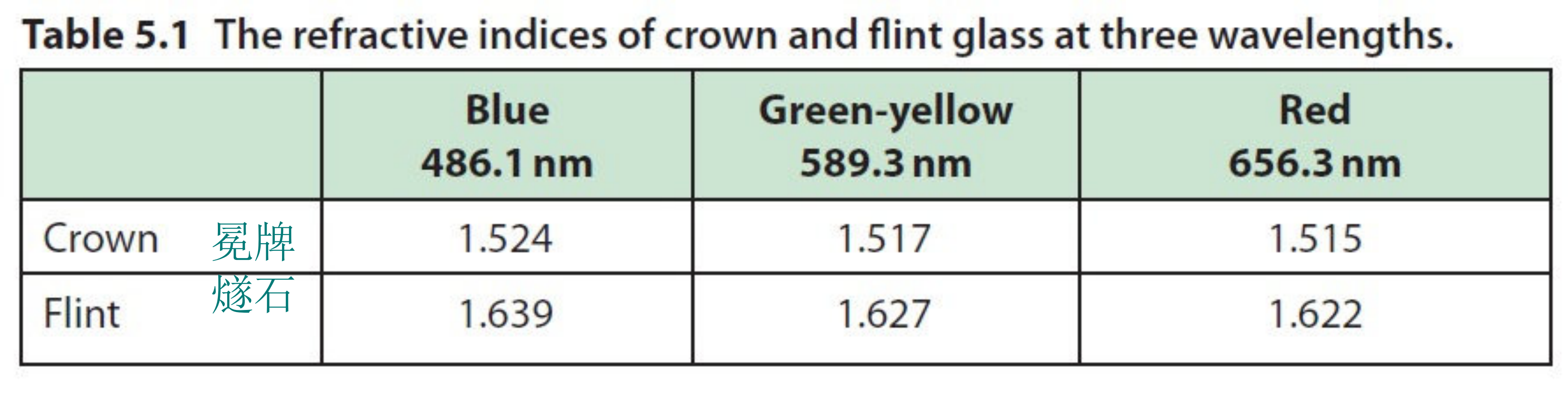


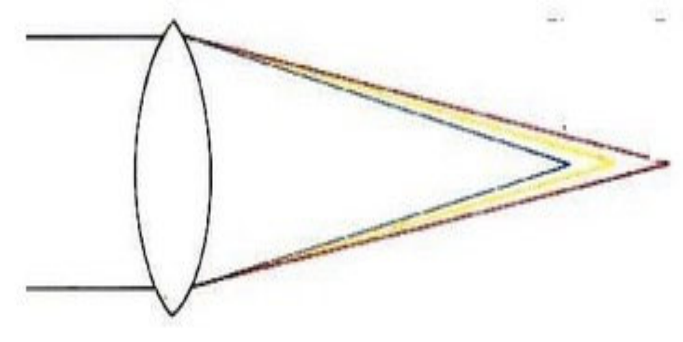
Table 5.1 The refractive indices of crown and flint glass at three wavelengths.

	Blue 486.1 nm	Green-yellow 589.3 nm	Red 656.3 nm
Crown 冕牌	1.524	1.517	1.515
Flint 燧石	1.639	1.627	1.622

波长（色）不同，折射率不同：

设a=1000mm
(Crown)

$$f_{\text{blue}} = 954\,\text{mm}$$
$$f_{\text{green-yellow}} = 967\,\text{mm}$$
$$f_{\text{red}} = 970\,\text{mm}$$

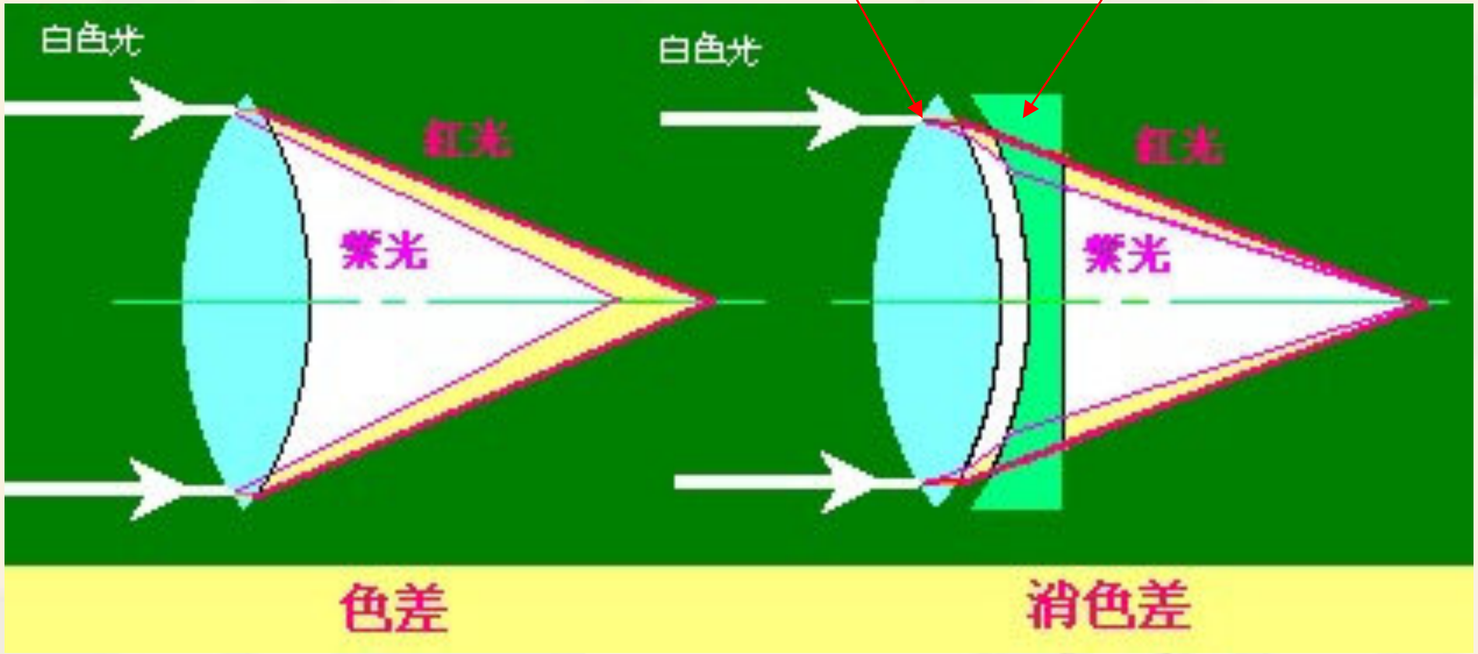


色差现象：在绿光的焦平面上，亮的绿色光斑周围有紫色的环（蓝色+红色）

消色差双合透镜

冕牌玻璃：
折射率小

燧石玻璃：
折射率大


白色光
红光
紫光
色差
白色光
红光
紫光
消色差

•John Dolland 1758 专利

•Chester Moore Hall 1733 首次制造

消色差双合透镜原理

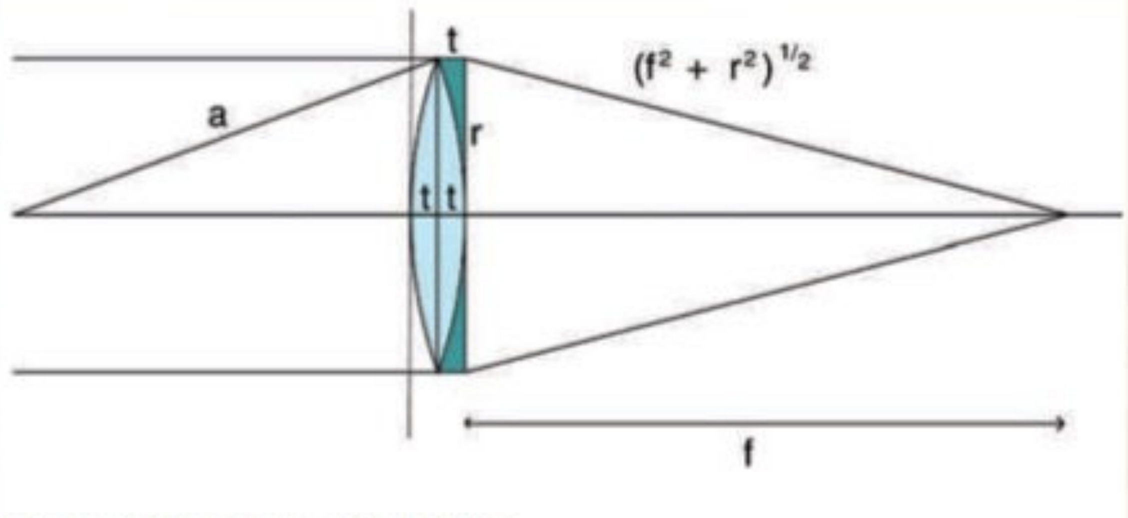


Figure 5.6 An achromatic doublet.

$$f + 2n_1 t = t + n_2 t + (f^2 + r^2)^{1/2}$$

$$f + t(2n_1 - n_2 - 1) = (f^2 + r^2)^{1/2}$$

$$f^2 + 2ft(2n_1 - n - 1) + [t(2n_1 - n_2 - 1)]^2 = f^2 + r^2$$

$$f = r^2/2t(2n_1 - n_2 - 1)$$

$$2at = r^2$$

$$f = a/(2n_1 - n_2 - 1)$$

消色差双合透镜原理

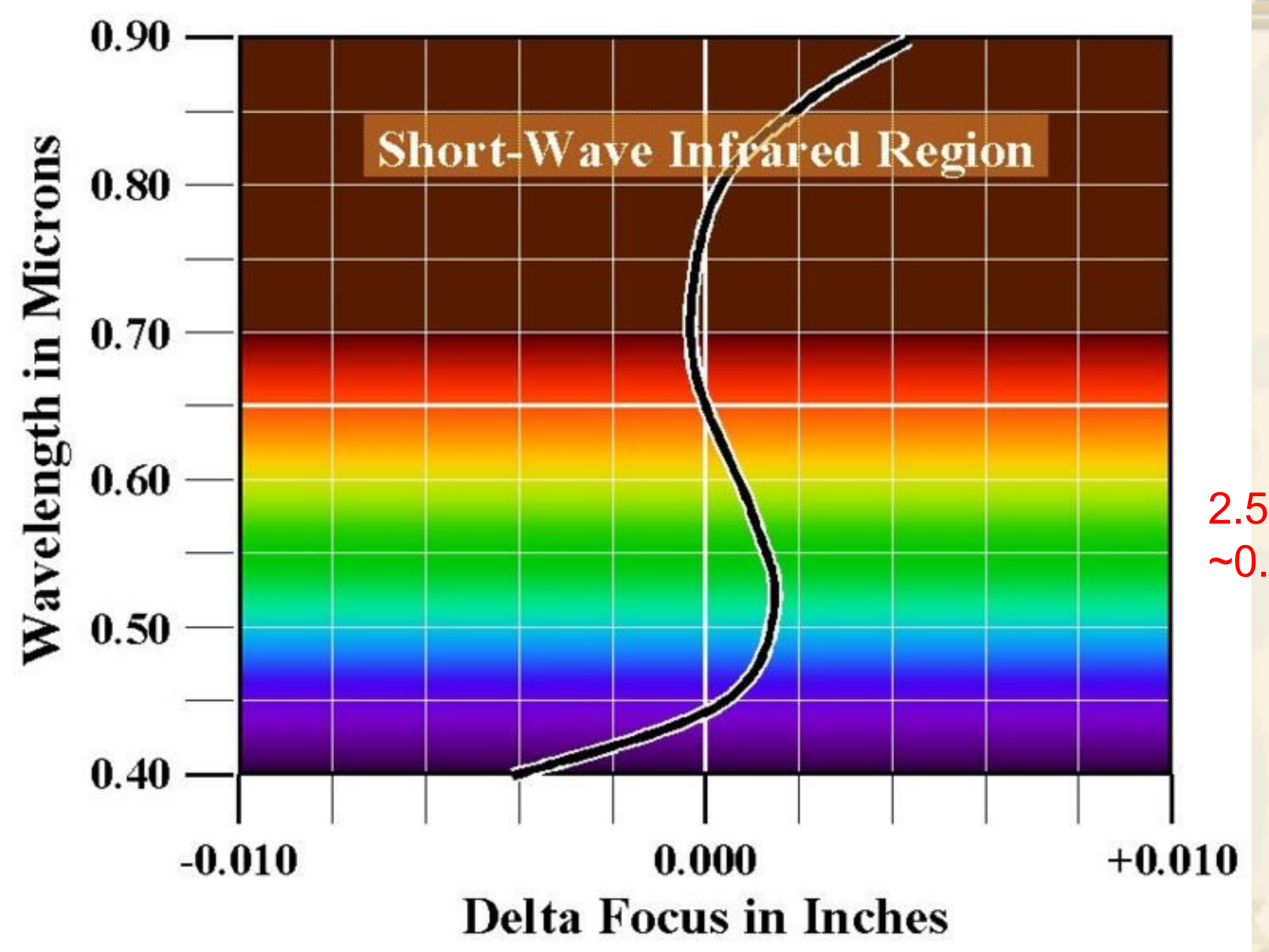
设a=393.6mm

Blue	0.409	962.3 mm
Green-yellow	0.407	967.0 mm
Red	0.408	964.6 mm

$f = a/(2n_1 - n_2 - 1)$

$2n_c - n_f - 1$

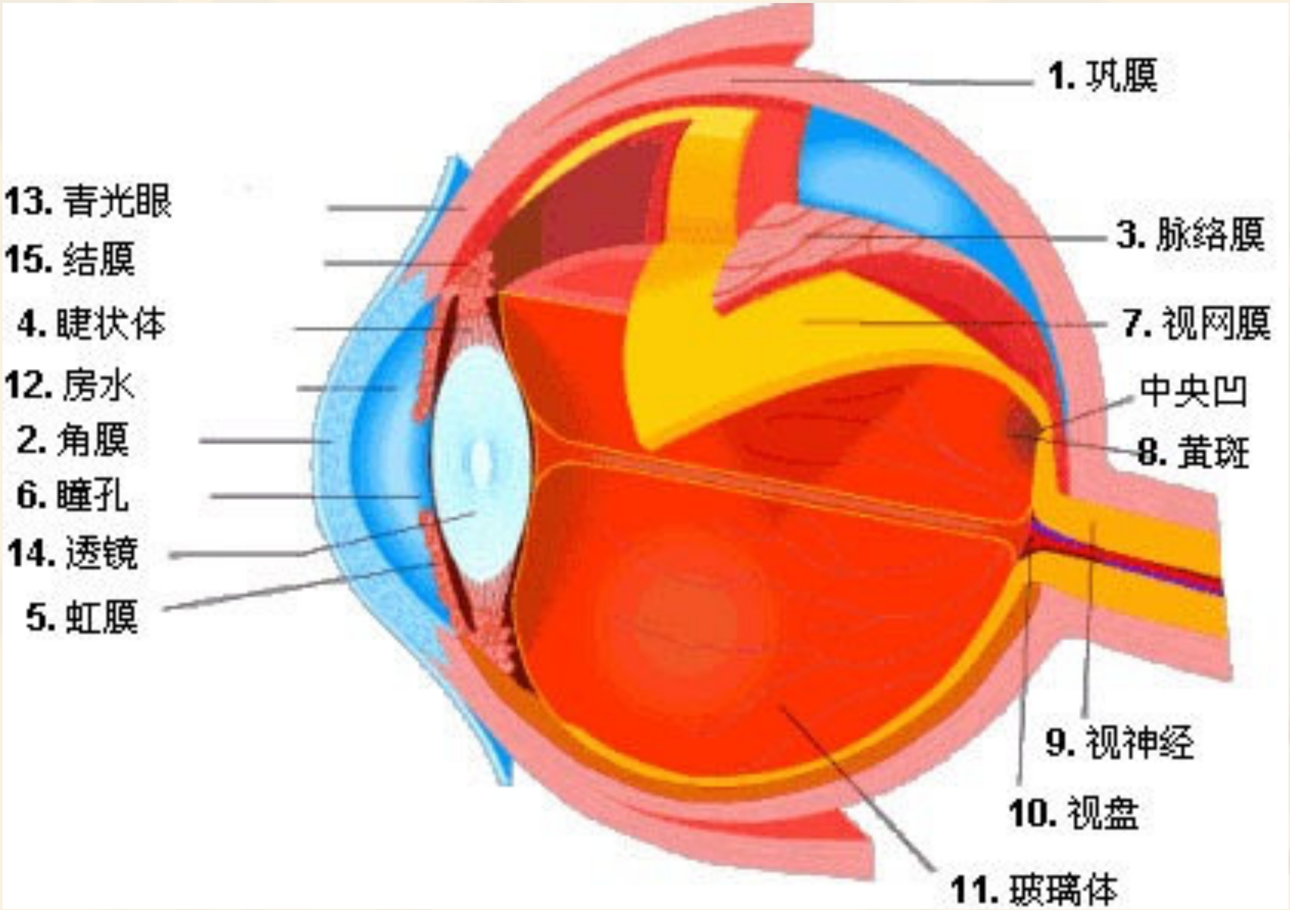
- 复消色差透镜：基本->完全消除色差
- 消色差三合透镜：Peter Dollond 1763



2.54cm*0.004*2
~0.2mm

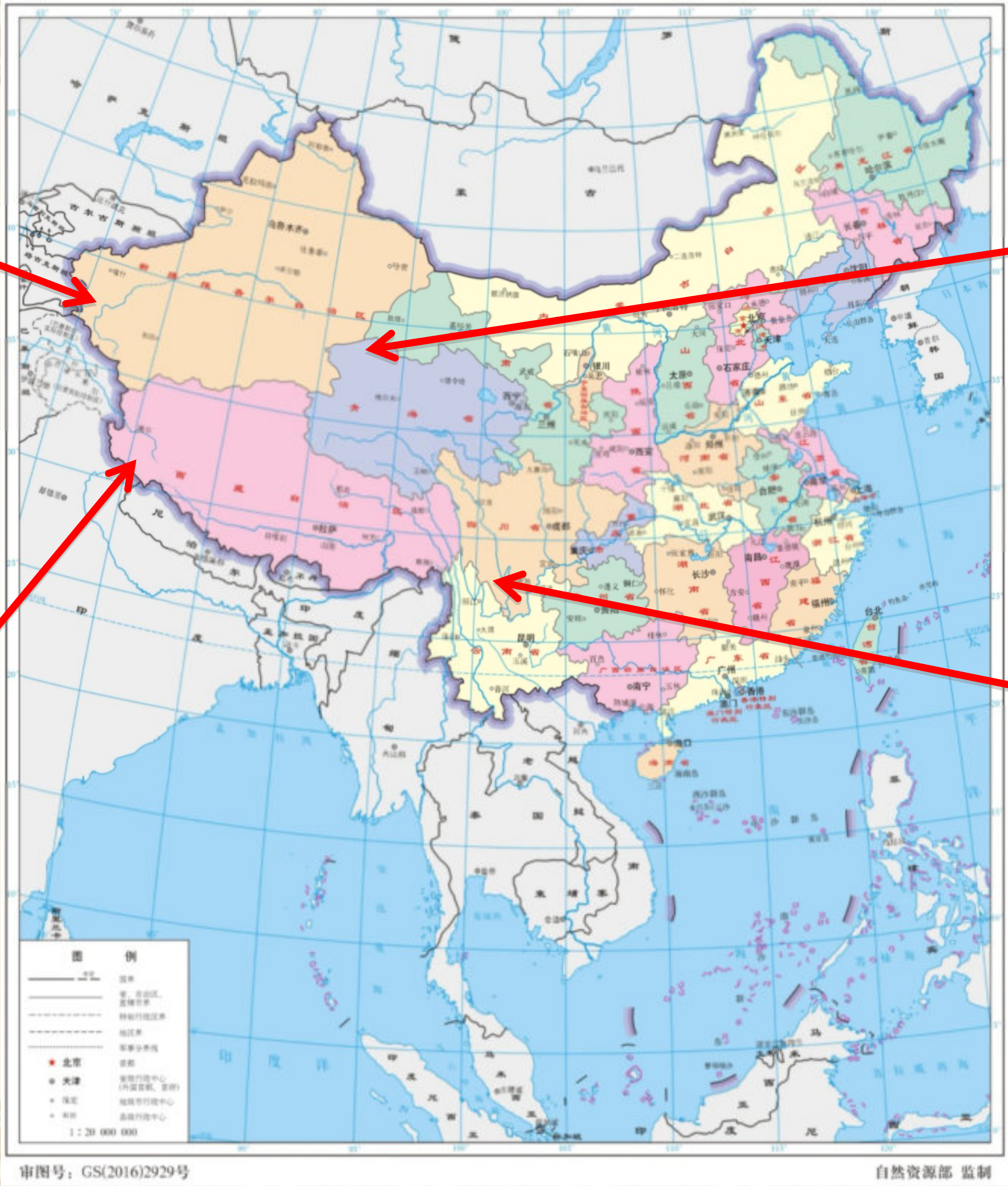
复消色差透镜将三种波长/颜色的光汇聚在同一个焦平面上

人眼—光学系统很好的探测器/接收器


1. 巩膜
13. 青光眼
15. 结膜
3. 脉络膜
4. 睫状体
7. 视网膜
12. 房水
中央凹
2. 角膜
8. 黄斑
6. 瞳孔
14. 透镜
5. 虹膜
9. 视神经
10. 视盘
11. 玻璃体

- 眼睛适应夜晚
  - 瞳孔放大，进光量增加，需要～20s。白天：尺寸~2.5-3 mm； 昏暗：~5-7 mm；老人：~5 mm，面积减少一半！
  - 没有亮光进入视网膜，维生素A首先转变为视黄醛，再转变为视紫醛，明显提高rods（视觉杆状细胞，昏暗光线）和cones（视觉锥状细胞，光线和色彩，集中于中央凹）的灵敏度
  - Cones感受色彩需要一定的光强，所以晚上很难分辨色彩
  - Rods对色彩不敏感，但对光强敏感
- 尘埃和水汽的影响：
  - 吸收和散射星光
  - 散射地面的光到人眼—光污染
  - 理想状况（黑暗地点加透明天空），人眼能看6-6.5等星

好的天文台址非常重要！战略资源！


审图号：GS(2016)2929号
自然资源部 监制

新疆
慕士塔格

青海冷湖

四川稻城

西藏阿里

西藏阿里

四川稻城

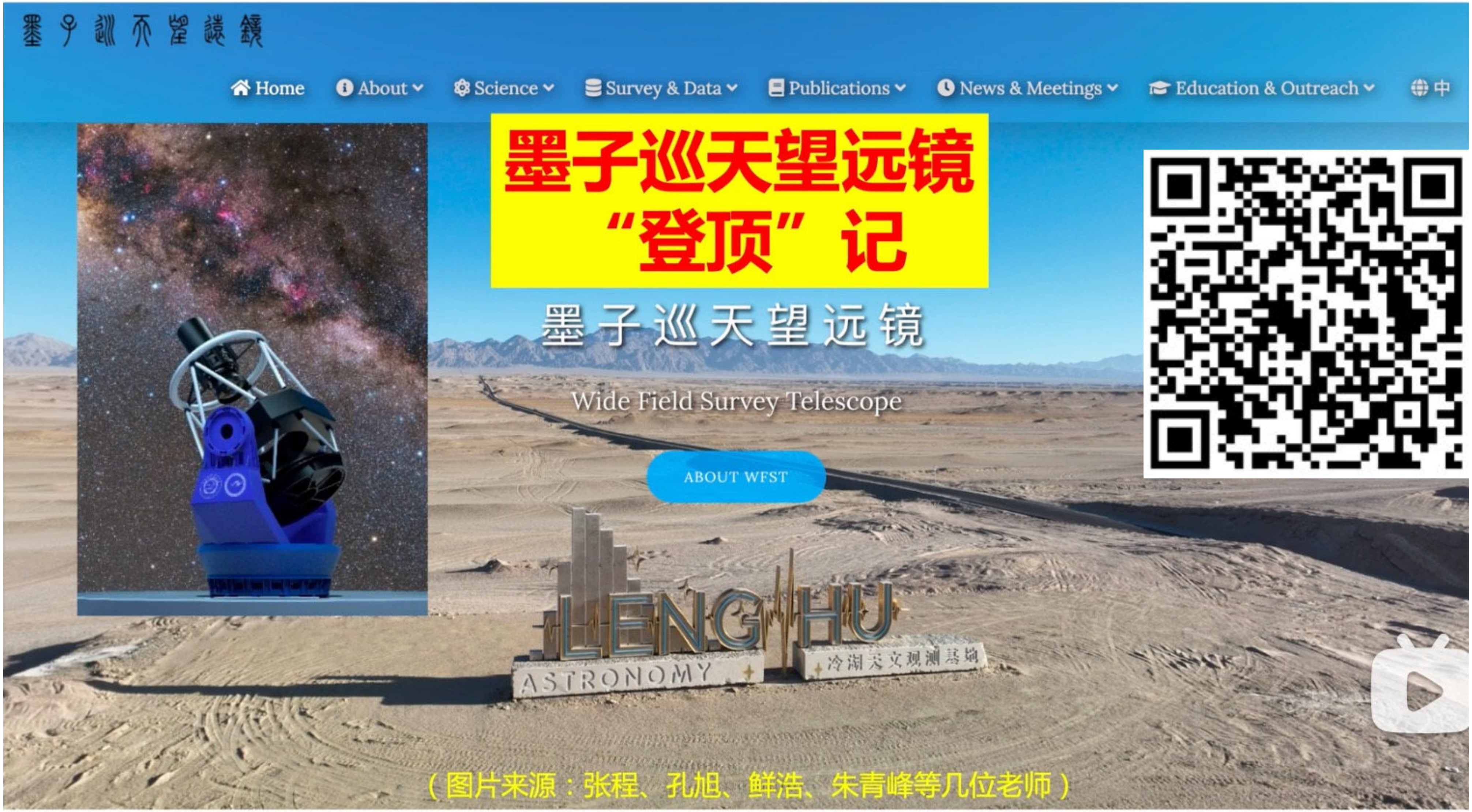
2017/10/20

青海冷湖

冷湖探秘24小时

2023/07/15下午-07/16下午

墨子巡天望远镜
“登顶”记


墨子巡天望远镜
Home
About
Science
Survey & Data
Publications
News & Meetings
Education & Outreach
中
墨子巡天望远镜
Wide Field Survey Telescope
ABOUT WFST
LENGHU
ASTRONOMY
冷湖天文观测基地

（图片来源：张程、孔旭、鲜浩、朱青峰等几位老师）

墨子巡天望远镜“登顶”记（补遗篇）

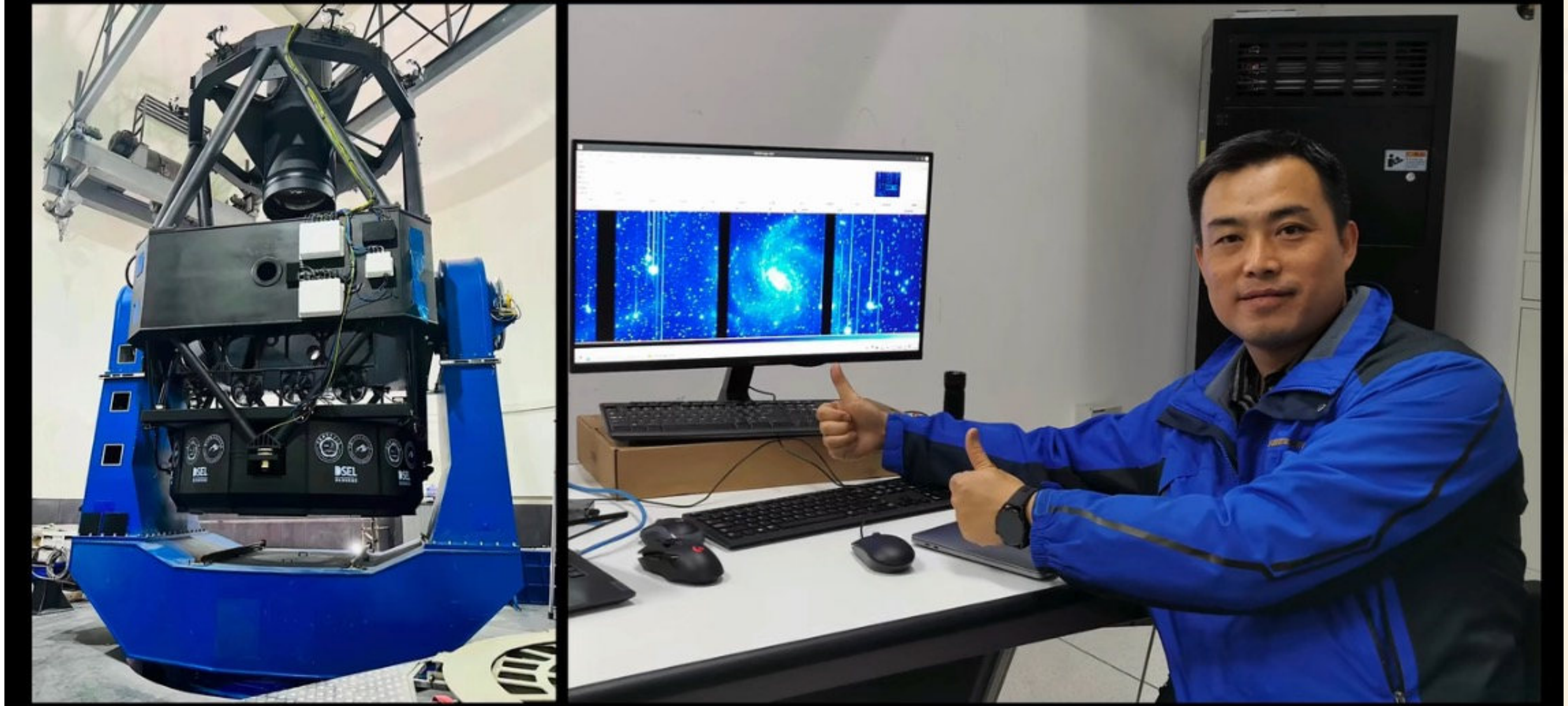
墨子巡天望遠鏡
Home
About
Science
Survey & Data
Publications
News & Meetings
Education & Outreach
中
墨子巡天望远镜
Wide Field Survey Telescope
ABOUT WFST
LENG HU
ASTRONOMY
冷湖天文观测基地

（图片与视频来源：李生学老师）

墨子巡天望远镜
明眸初开

（图片来源：张程、王坚、张鸿飞、娄铮、孔旭、蔡萍等几位老师）

墨子巡天望远镜
调试正酣



（图片来源：娄铮、李生学、孔旭、薛永泉等几位老师）

中国科大巡星记——中国科大天文人的观测之旅

雪后的赛什腾|
墨子巡天望远镜

大视场巡天望远镜：动态光学宇宙的探索者

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China
墨子巡天望远镜
发布首光照片
@2023/09/17上午

（图片与视频来源：中科大、薛永泉等）

光明日报 2020-04-23

青海冷湖将建成国内最大天文观测基地

赛什腾山天文台观测双塔 资料图片

青藏高原光学天文台址与中国天文的发展契机

在位于青海省最西端茫崖市冷湖地区，延绵不绝的雅丹地貌让这里有着大自然鬼斧神工般的奇迹和壮观，有人说这里是最接近火星地貌特征的地方，也是地球上最不像地球的地方。同时，也正是由于这里地域广阔、资源富集、地貌万千，被中外天文界普遍认为是中国天文学的核心战略资源地区，最具建设大型天文望远镜的优势。

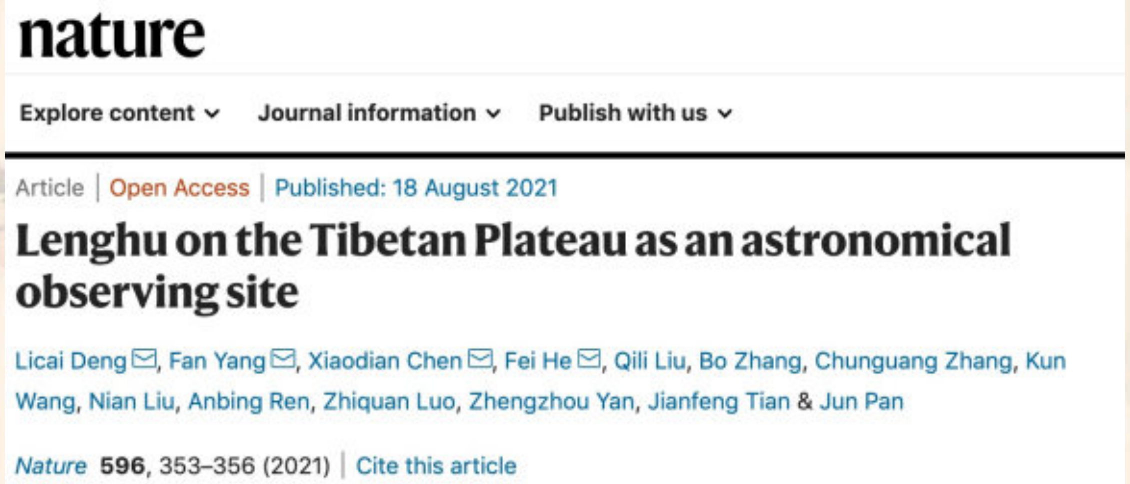
4月16日，青海省海西蒙古族藏族自治州与中国科学技术大学共同签署《关于“大视场巡天望远镜项目”合作协议》，标志着大视场巡天望远镜（WFST）项目正式落地青海省茫崖市冷湖镇赛什腾山天文台址。

据介绍，大视场巡天望远镜为中国科学技术大学在建的“双一流”学科平台，望远镜口径2.5米，采用国际先进的主焦光学设计，提供大视场、高精度和宽波段巡天能力，性能先进。配备大面阵7.5亿像素拼接CCD探测器，具备强大的巡天能力，能够每3夜巡天整个北天球一遍。

“冷湖天文观测基地位于茫崖市冷湖镇赛什腾山地区，经过前期多次调研勘察，中外天文界一致认为，这里所处地理位置、气候、空气洁净度和海拔高度等因素对天文观测研究具有独特优势，具备世界级优良天文台址的发展前景，是中国天文学的核心战略资源。”中科院国家天文台研究员邓李才此前表示，赛什腾视宁度为0.7角秒的天数占监测总天数的比例超过50%，天文晴夜占比超过60%，风和沙尘影响几无，这意味着冷湖具备开展光学天文观测的优越条件。

田才让表示，2020年在冷湖赛什腾山天文观测基地将建设望远镜项目4个，总投资26455万元，后续项目正在紧锣密鼓地协商洽谈之中，这些项目的陆续落地将进一步促进地方经济发展，为提高国内外知名度起到积极的推动作用，标志着冷湖将建成国内最大的天文观测基地，成为世界级的天文研究中心。

追寻天文学家的内心平静



nature

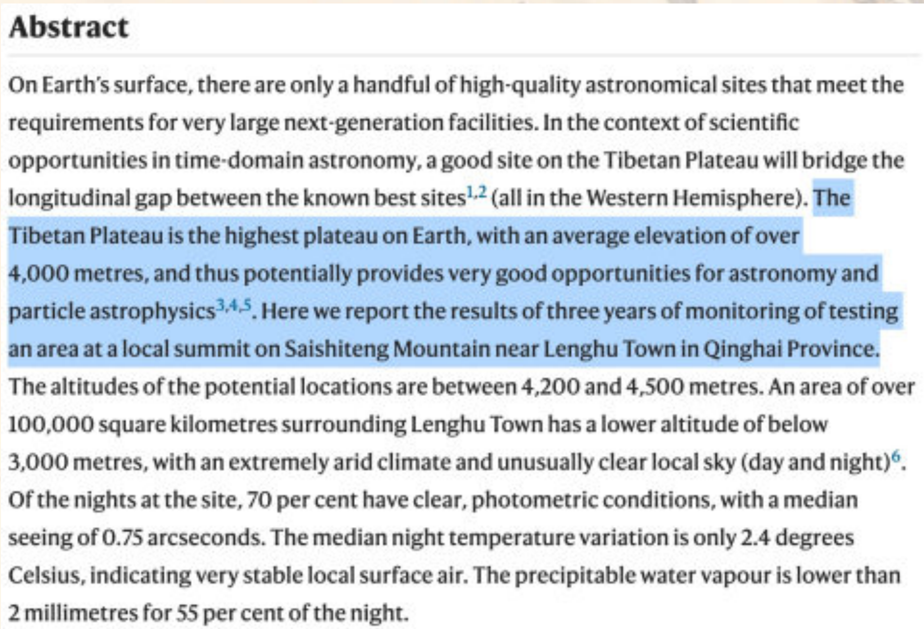
Explore content ⌄ Journal information ⌄ Publish with us ⌄

Article | Open Access | Published: 18 August 2021

Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site

Licai Deng, Fan Yang, Xiaodian Chen, Fei He, Qili Liu, Bo Zhang, Chunguang Zhang, Kun Wang, Nian Liu, Anbing Ren, Zhiquan Luo, Zhengzhou Yan, Jianfeng Tian & Jun Pan

Nature **596**, 353–356 (2021) | Cite this article



Abstract

On Earth's surface, there are only a handful of high-quality astronomical sites that meet the requirements for very large next-generation facilities. In the context of scientific opportunities in time-domain astronomy, a good site on the Tibetan Plateau will bridge the longitudinal gap between the known best sites[1,2] (all in the Western Hemisphere). The Tibetan Plateau is the highest plateau on Earth, with an average elevation of over 4,000 metres, and thus potentially provides very good opportunities for astronomy and particle astrophysics[3,4,5]. Here we report the results of three years of monitoring of testing an area at a local summit on Saishiteng Mountain near Lenghu Town in Qinghai Province. The altitudes of the potential locations are between 4,200 and 4,500 metres. An area of over 100,000 square kilometres surrounding Lenghu Town has a lower altitude of below 3,000 metres, with an extremely arid climate and unusually clear local sky (day and night)[6]. Of the nights at the site, 70 per cent have clear, photometric conditions, with a median seeing of 0.75 arcseconds. The median night temperature variation is only 2.4 degrees Celsius, indicating very stable local surface air. The precipitable water vapour is lower than 2 millimetres for 55 per cent of the night.

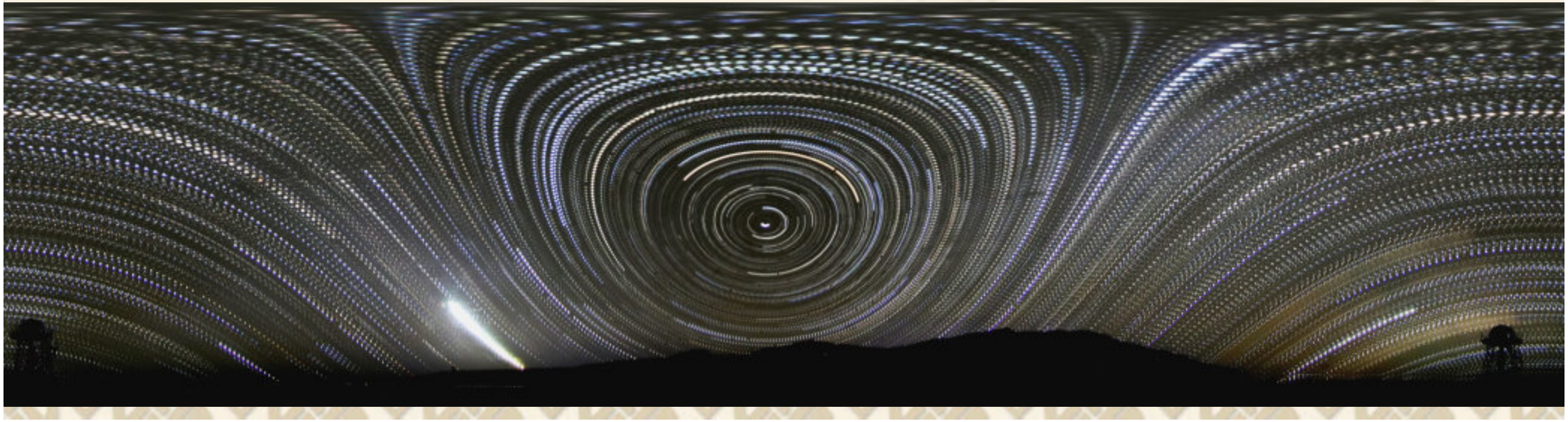
追寻天文学家的
内心平静

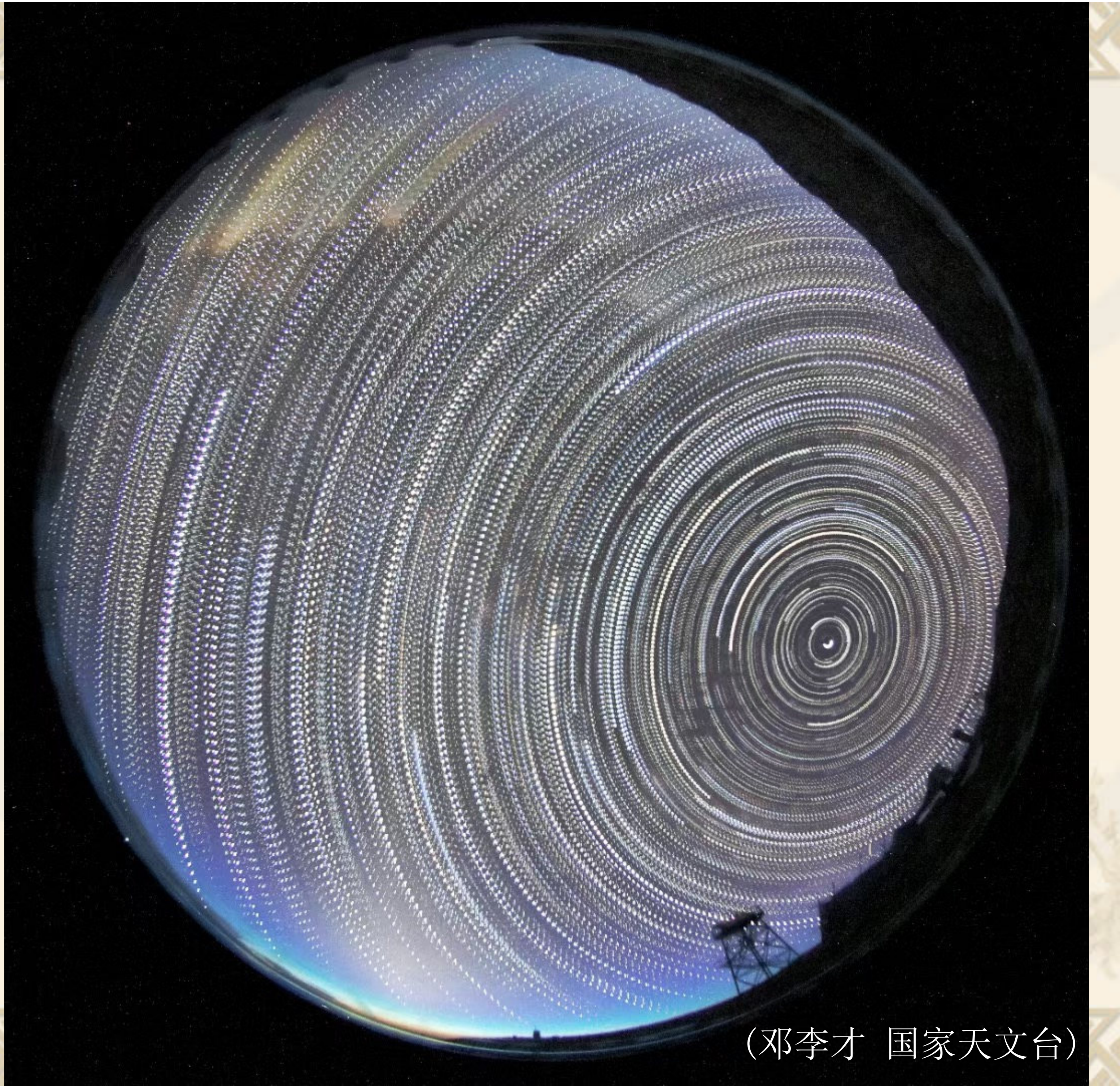
- 国家天文台、西华师范、地质与地球物理所、国科大、紫台的研究人员
- 青海冷湖赛什腾山：光学观测条件比肩国际一流大型天文台
- 为我国光学天文发展创造了重大机遇，也为国际光学天文发展提供了宝贵的战略资源
- 成果于2021年8月19日发表于国际科学期刊《自然》

Lenghu
beauty of starry sky

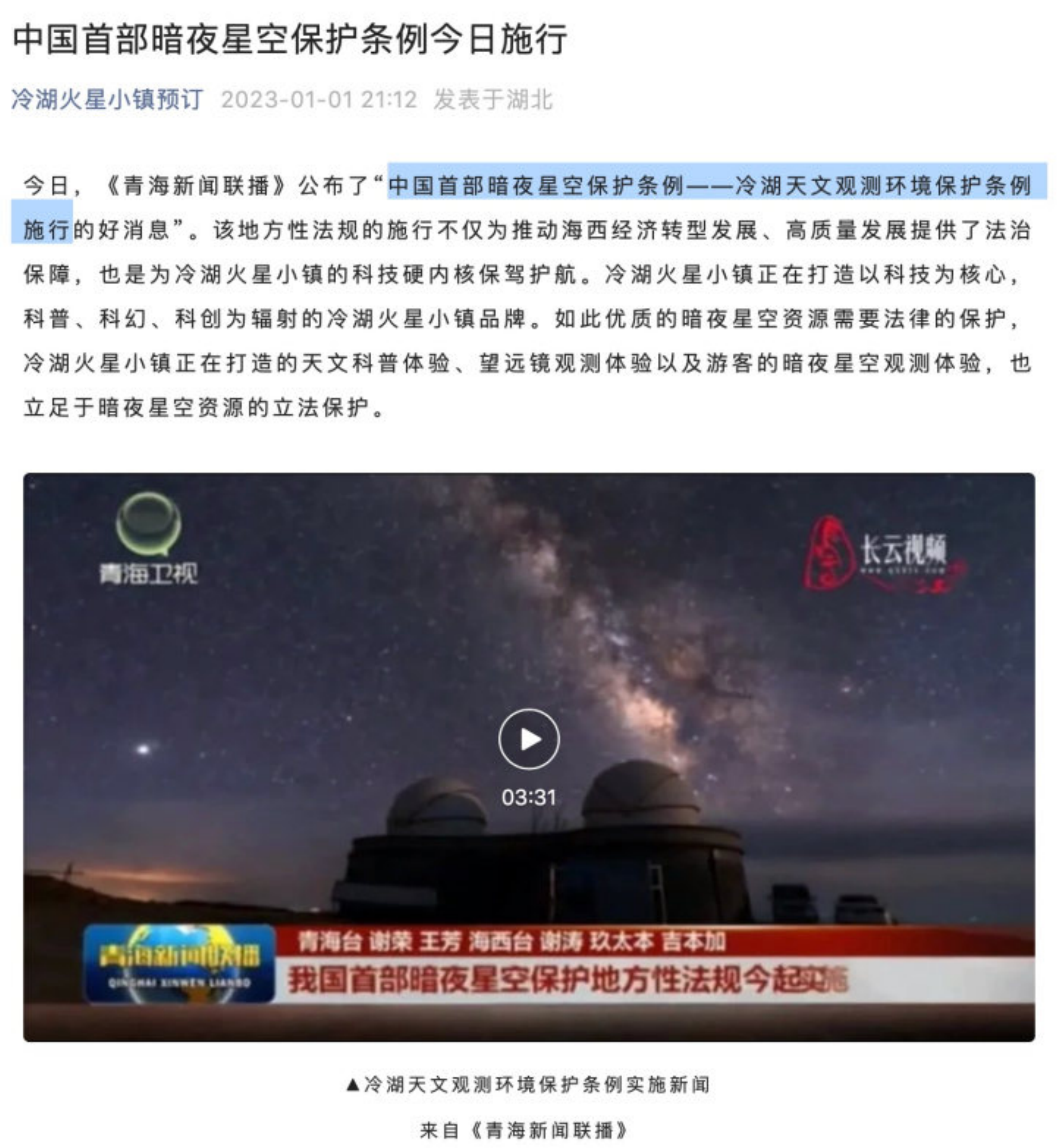
（邓李才 国家天文台）

（邓李才 国家天文台）





（邓李才 国家天文台）



中国首部暗夜星空保护条例今日施行

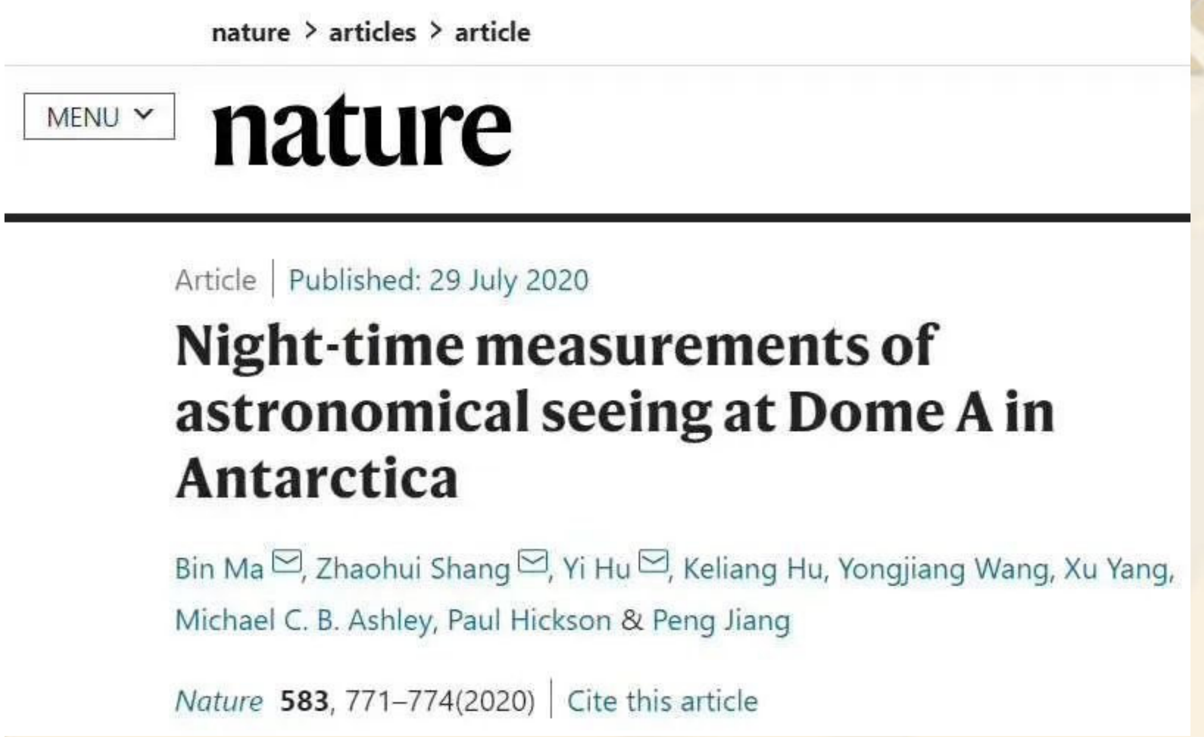
冷湖火星小镇预订 2023-01-01 21:12 发表于湖北

今日，《青海新闻联播》公布了“中国首部暗夜星空保护条例——冷湖天文观测环境保护条例施行的好消息”。该地方性法规的施行不仅为推动海西经济转型发展、高质量发展提供了法治保障，也是为冷湖火星小镇的科技硬内核保驾护航。冷湖火星小镇正在打造以科技为核心，科普、科幻、科创为辐射的冷湖火星小镇品牌。如此优质的暗夜星空资源需要法律的保护，冷湖火星小镇正在打造的天文科普体验、望远镜观测体验以及游客的暗夜星空观测体验，也立足于暗夜星空资源的立法保护。

青海卫视
长云视频
03:31
青海新闻联播
QINGHAI XINWEN LIANBO
青海台 谢荣 王芳 海西台 谢涛 玖太本 吉本加
我国首部暗夜星空保护地方性法规今起实施

▲冷湖天文观测环境保护条例实施新闻

来自《青海新闻联播》



nature > articles > article

MENU ˅

nature

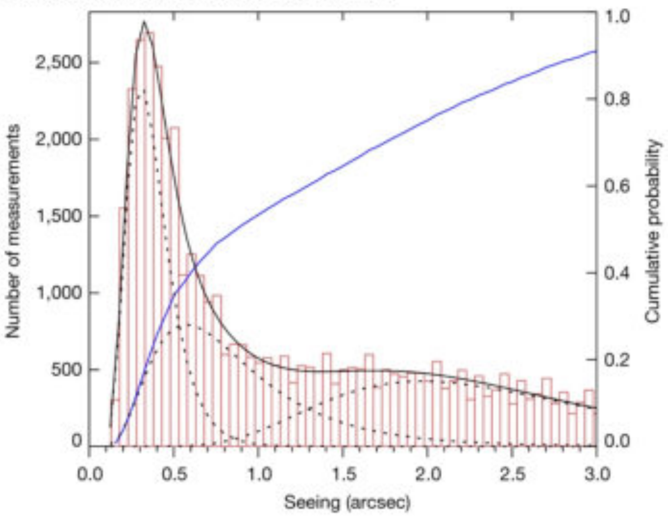
Article | Published: 29 July 2020

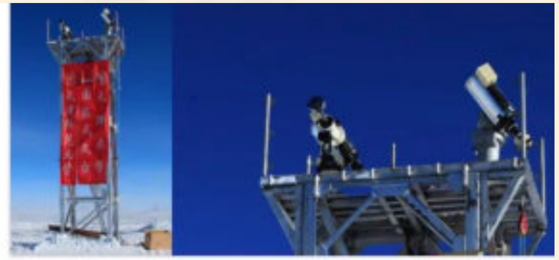
Night-time measurements of astronomical seeing at Dome A in Antarctica

Bin Ma, Zhaohui Shang, Yi Hu, Keliang Hu, Yongjiang Wang, Xu Yang, Michael C. B. Ashley, Paul Hickson & Peng Jiang

Nature **583**, 771–774(2020) | Cite this article

Fig. 1: The night-time seeing at Dome A in 2019.

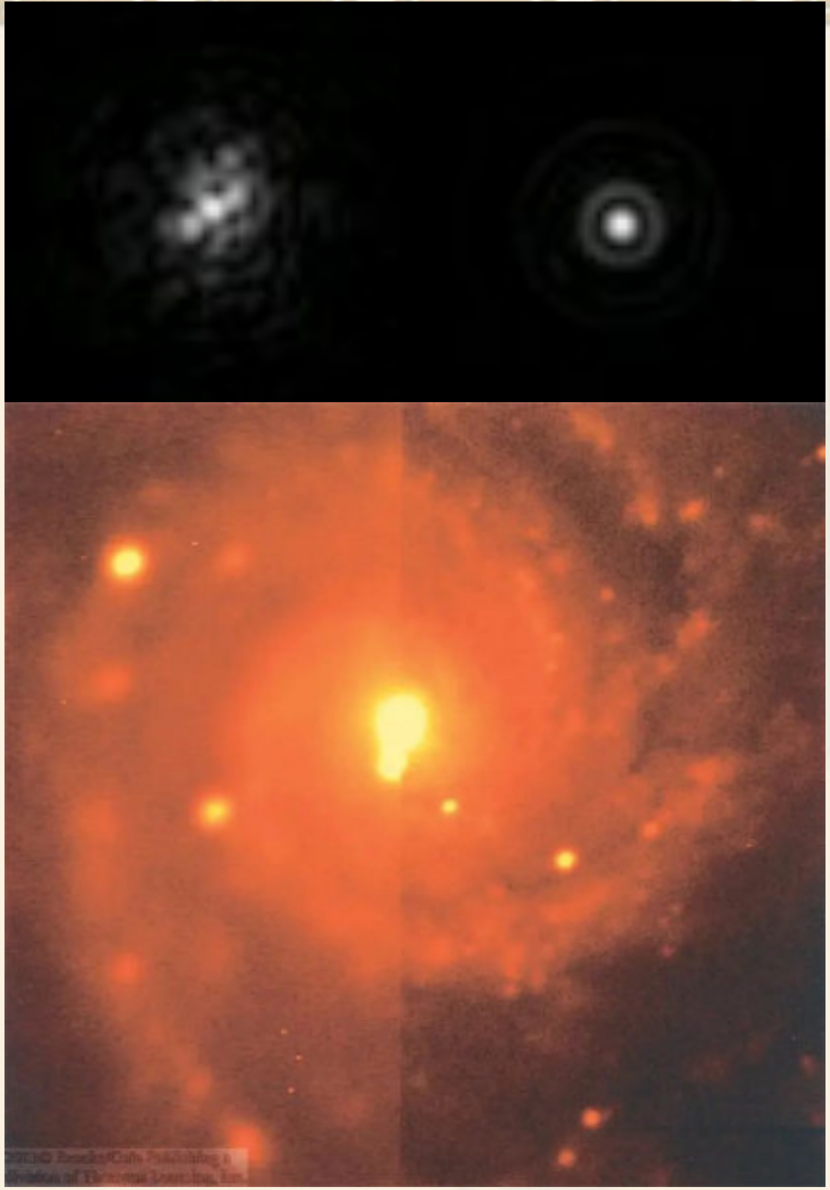




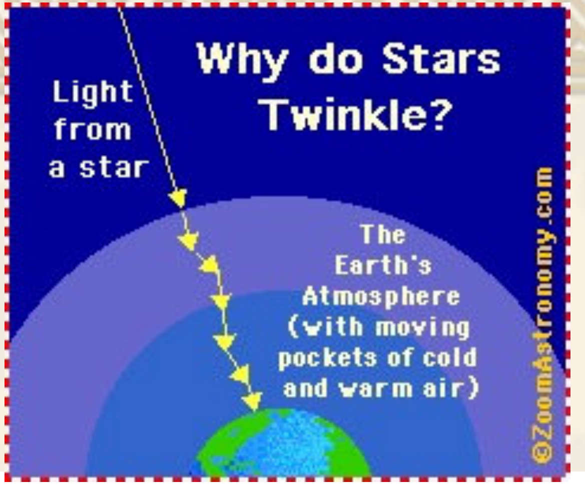
图一：两台冗余的南极昆仑站视宁度望远镜及其8米高的塔架（安装时照片）。

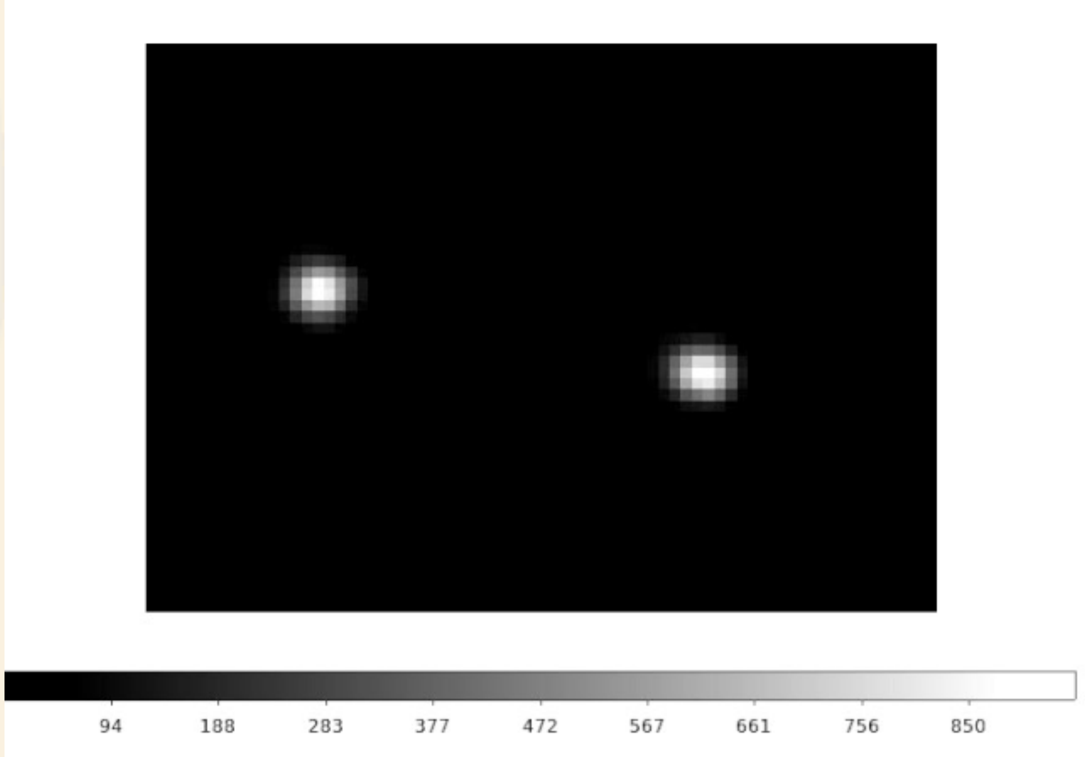
2019年1月，在我国第35次南极科考期间，国家天文台在南极冰穹A昆仑站安装了两台视宁度测量望远镜（KL-DIMM）。他们经历了冰霜的考验，也经历了零下70多度的低温，在极夜里顽强地工作。他们首次测量并获得了极佳的夜间大气视宁度，证明昆仑站所在的冰穹A地区的光学天文观测条件优于已知的其他任何地面台址，包括夏威夷和智利北部。这项研究成果证明了昆仑站有珍贵的天文观测台址资源，为我国进一步开展南极天文研究奠定了科学的基础。

在南极冰穹A，大气湍流主要集中在近地表的大气边界层，而在边界层之上，就是非常稳定的自由大气。KL-DIMM的数据分析表明，自由大气视宁度的中值只有0.31角秒，最佳值达到0.13角秒，并且在离地面8米的高度，就有31%的时间可以获得自由大气视宁度；在离地面14米的高度，有近一半的时间可以获得自由大气视宁度。相比较而言，同在南极的冰穹C，在30米的高度，才有一半的时间可以获得自由大气视宁度。天文观测对成像质量要求极高，目前世界上最好的望远镜集中在夏威夷和智利北部优良的台址上，视宁度一般在0.6-0.8角秒。



视宁度示意图。左：视宁度差，星象晃动厉害、眨眼，拍摄图像不清晰；右：视宁度好，拍摄图像清晰。


Why do Stars Twinkle?
Light from a star
The Earth's Atmosphere (with moving pockets of cold and warm air)
©ZoomAstronomy.com


94
188
283
377
472
567
661
756
850

KL-DIMM观测到的图像，两只眼睛看到的同一颗星（老人星），从抖动引起的星象之间的距离变化可以计算出视宁度。星象的抖动反映的就是大气湍流引起的抖动。

（商朝晖 国家天文台）

极限星等

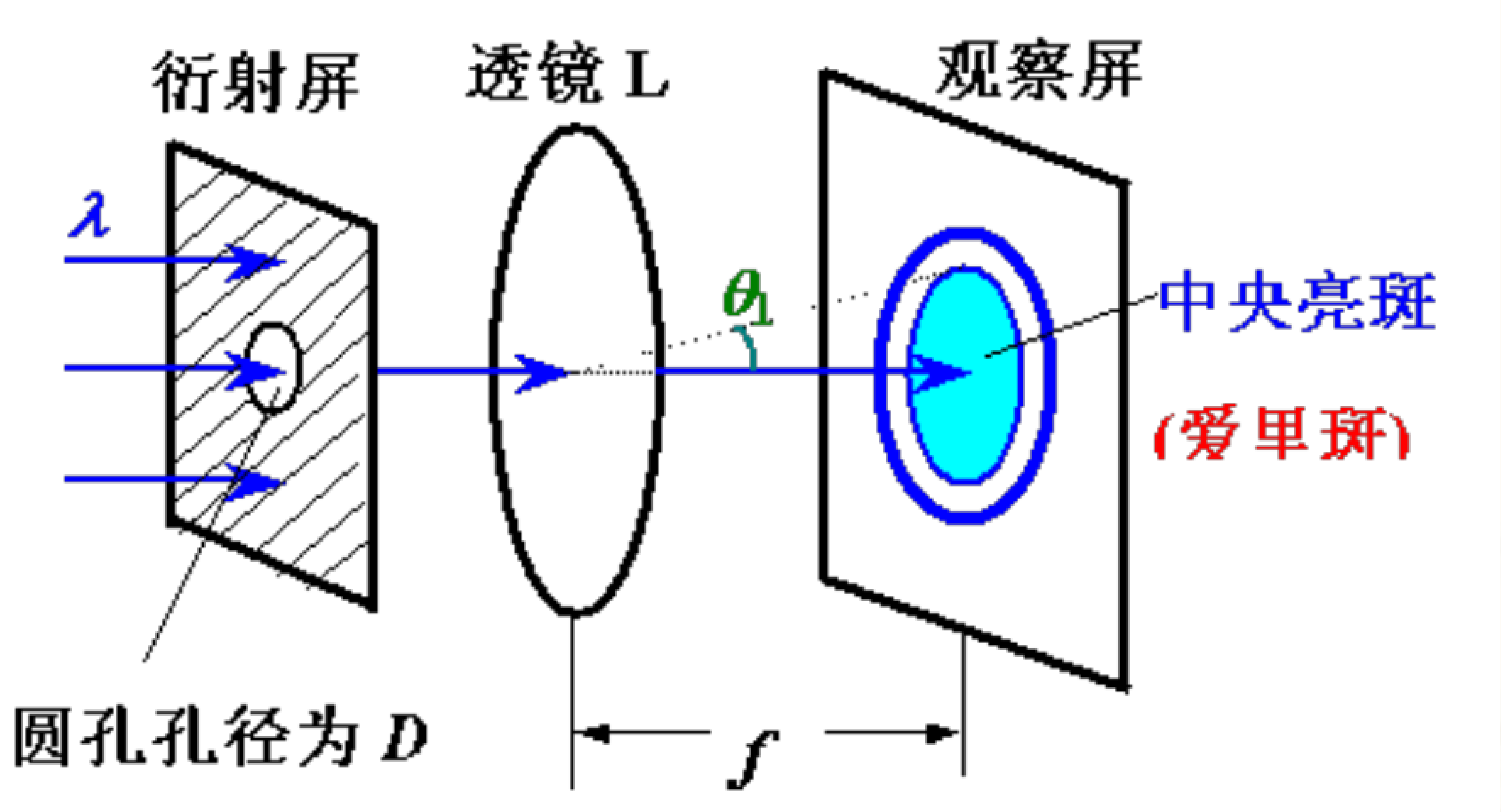
- 150mm的望远镜： $(150/7)^2$~460

$$\begin{aligned}\Delta m &= 2.5\times\log_{10}(460)\\ &= 6.65\end{aligned}$$

该望远镜的极限星等：~ 6.5+6.65=13.15

- 望远镜效率
  - 折射式望远镜：~98%
  - 反射式望远镜：~86%，两个镜子：~74%；现代多层镀膜技术：~97%，两个镜子：~94%
- 望远镜半径增加1.58倍，极限星等增加1等
- 大气视宁度（单位为角秒）的影响

圆孔衍射


衍射屏
透镜 L
观察屏
λ
θ1
中央亮斑
(爱里斑)
圆孔孔径为 D
f

望远镜分辨率

- 衍射极限：Airy斑-望远镜分辨天体的极限

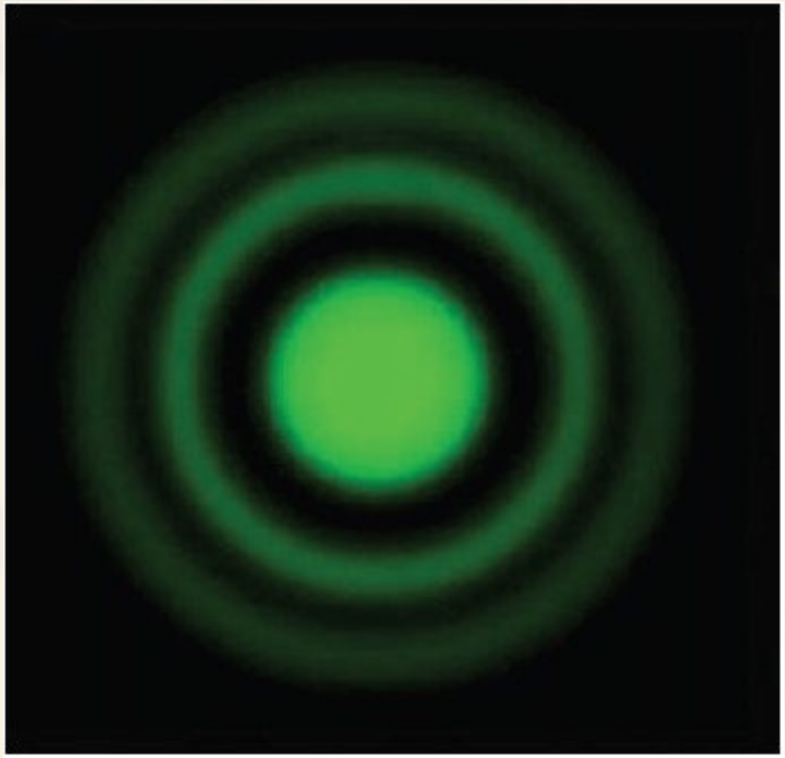


Figure 5.8 The Airy disc.

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

（定量理解）

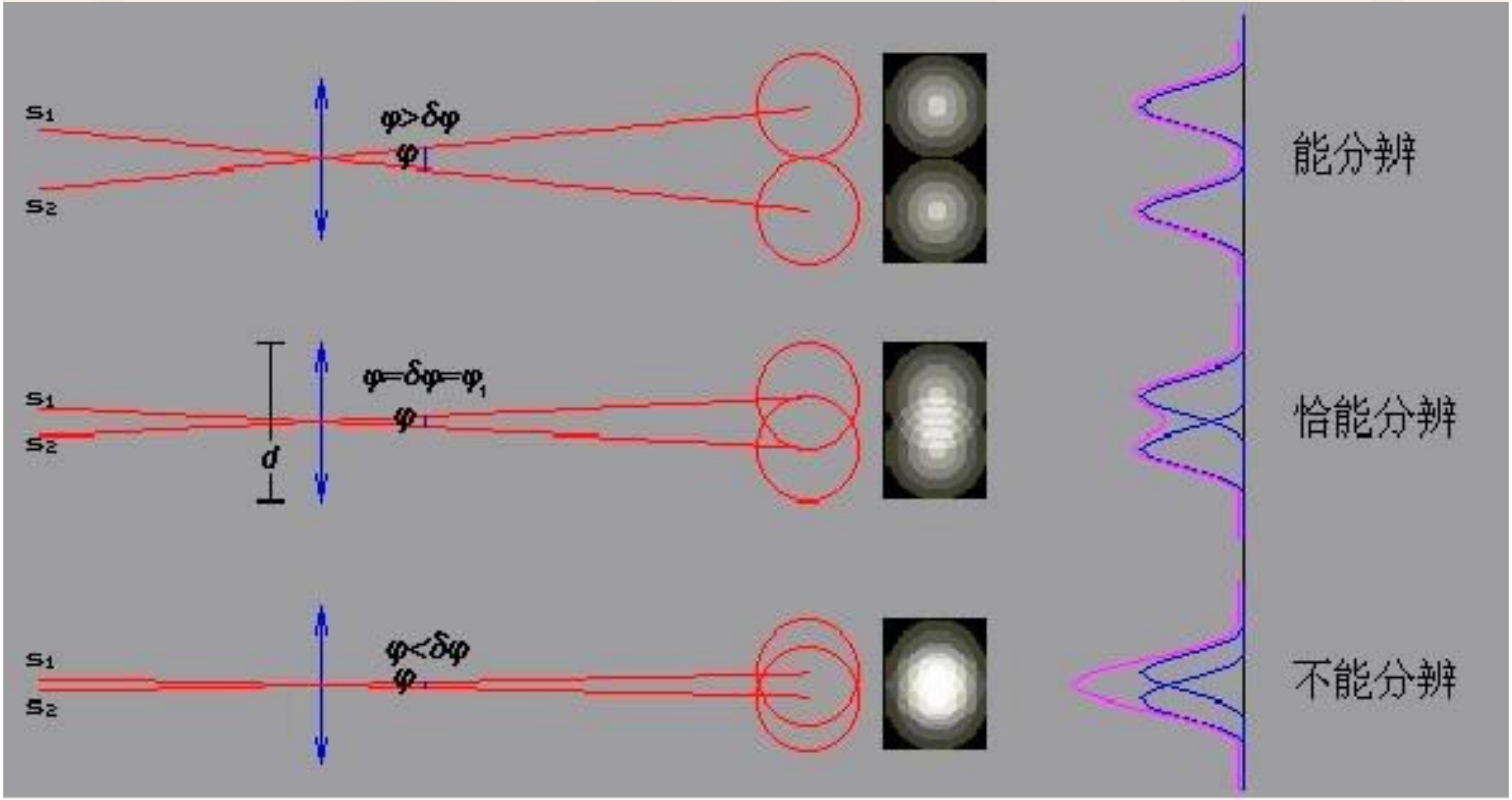
•84%光集中于中心斑

•第一个环的半径大概是中心斑的两倍，集中了大部分剩余的光

（实际分辨率受大气视宁度的影响）

望远镜分辨率

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


S_1
S_2
$\varphi>\delta\varphi$
φ
能分辨
S_1
S_2
d
$\varphi=\delta\varphi=\varphi_1$
φ
恰能分辨
S_1
S_2
$\varphi<\delta\varphi$
φ
不能分辨

源的混淆与灵敏度的关系：XMM-Newton vs. Chandra

望远镜为什么越大越好？

- 收集光线的面积大：能看到很遥远，很暗弱的天体
- 分辨本领高：能看到很小的细节

❖ Airy斑/角分辨率的定性推导

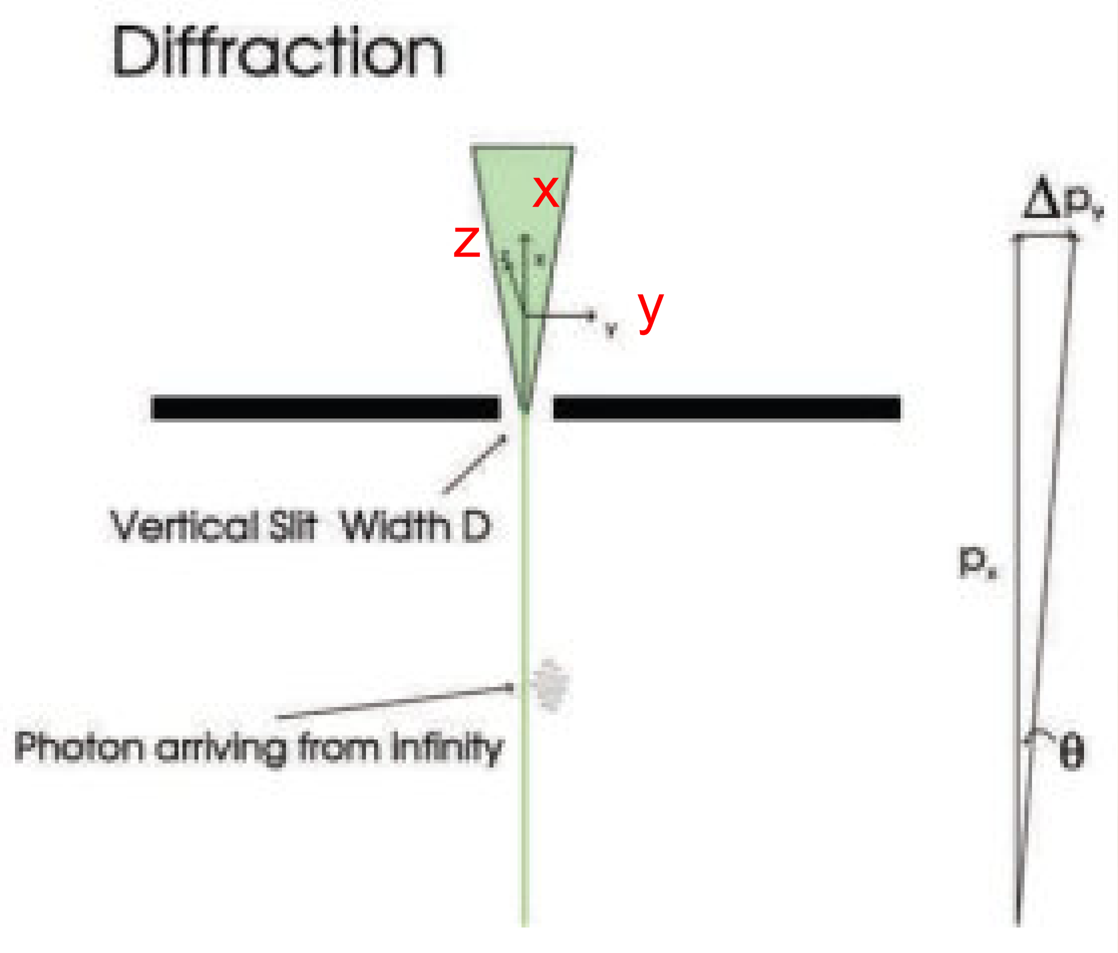

Diffraction
x
z
y
Δp_y
Vertical Slit Width D
p_x
Photon arriving from Infinity
θ

Figure 5.9 Diffraction of a photon passing through an aperture.

$$p_x = h/\lambda$$

$$\Delta p_y D = h$$

$$\Delta p_y D = p_x \lambda,$$

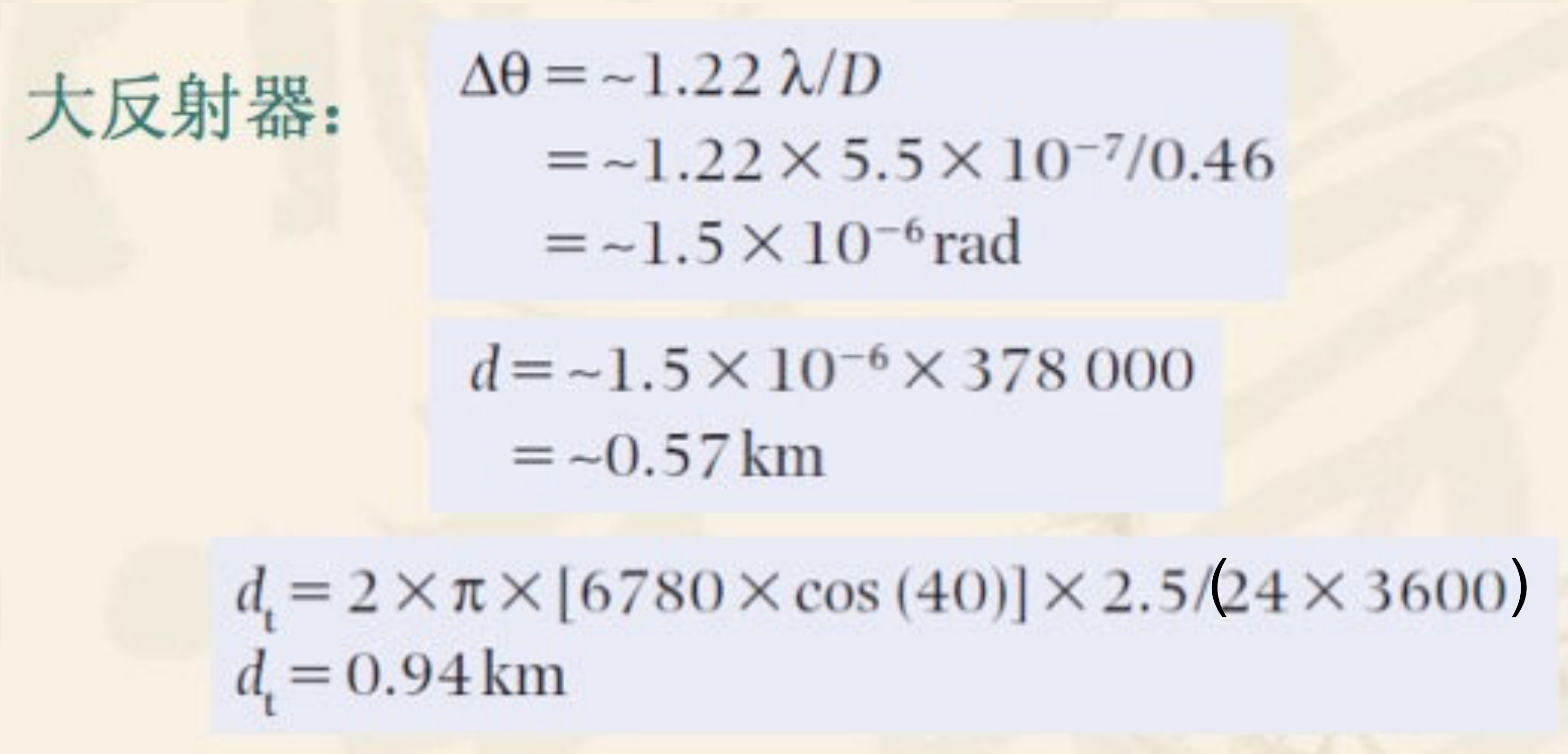
$$\Delta p_y / p_x = \lambda / D.$$

$$\Delta\theta = \Delta p_y / p_x$$

$$\boxed{\Delta\theta = \lambda / D.}$$

（两个方向受限，系数变成1.22）

- 衍射例子：月亮激光反射器
- 不是单一、大面积的反射器；而是100个，3.8cm见方的三面直角反射棱镜，组成一个边长46cm的方阵



大反射器：

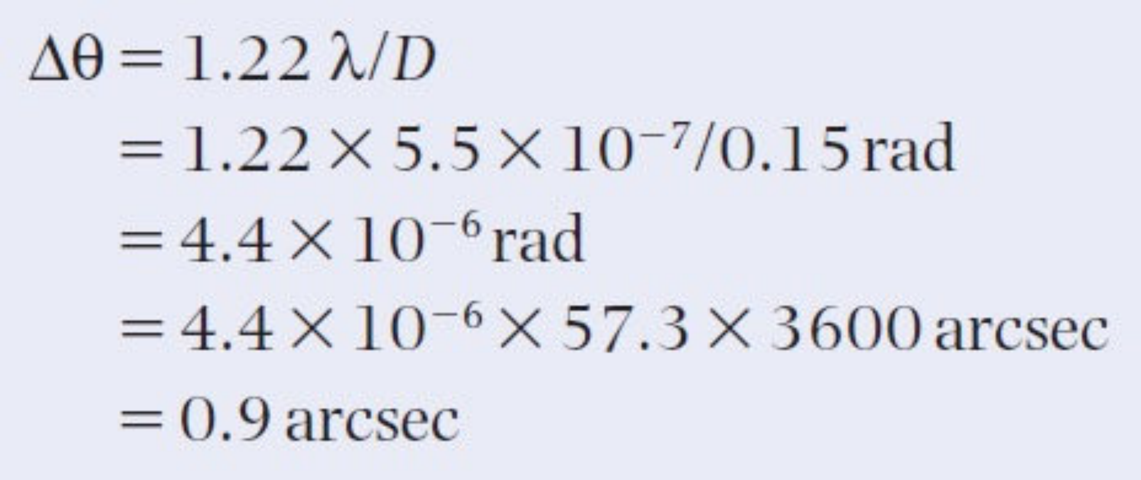
$$
\begin{aligned}
\Delta\theta &= \sim 1.22\,\lambda/D \\
&= \sim 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7}/0.46 \\
&= \sim 1.5 \times 10^{-6}\,\text{rad}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
d &= \sim 1.5 \times 10^{-6} \times 378\,000 \\
&= \sim 0.57\,\text{km}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
d_t &= 2 \times \pi \times [6780 \times \cos(40)] \times 2.5/(24 \times 3600) \\
d_t &= 0.94\,\text{km}
\end{aligned}
$$

小反射器：反射斑的直径 ~ (46/3.8)x0.57 = 6.9 km

- 望远镜的分辨率：D=150mm，绿光



$$\begin{aligned}\Delta\theta &= 1.22\,\lambda/D\\ &= 1.22\times 5.5\times 10^{-7}/0.15\,\mathrm{rad}\\ &= 4.4\times 10^{-6}\,\mathrm{rad}\\ &= 4.4\times 10^{-6}\times 57.3\times 3600\,\mathrm{arcsec}\\ &= 0.9\,\mathrm{arcsec}\end{aligned}$$

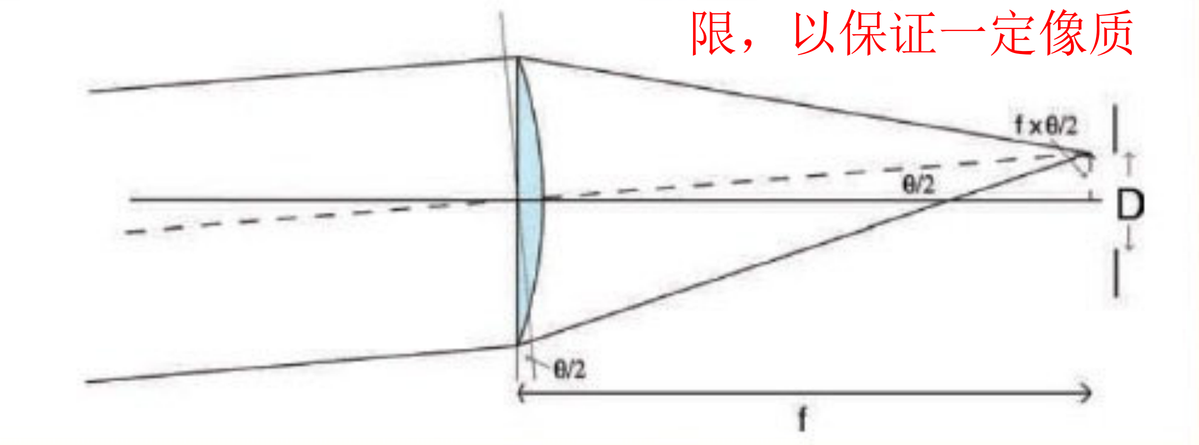
- 大气视宁度（seeing）的影响
  - 一般seeing：1-3 arcsec
  - 最好：~ 0.5 arcsec；口径大的望远镜，影响大
  - HST：D=2.4m, ~ 1/20 角秒@可见光

望远镜的放大率

- 物镜焦距/目镜焦距
- 在光路中靠近目镜插入一个凹透镜（Barlow透镜），增加放大率：~ 2-4倍

望远镜的视场

像质在轴上好，偏轴则变差，所以视场有限，以保证一定像质



$$D = 2 \times f \times \theta / 2 = f \times \theta$$

$$\theta = D / f$$

$$D = 12mm \quad f = 1200mm$$

$$\theta = 1/100rad = 0.573^0$$

放大率＝物镜焦距/目镜焦距;
焦比f/x=物镜焦距/物镜口径(x);
一般来说，f/x越小，视场越大;
观测视场=目镜视场/放大率。

月亮角直径~0.5度

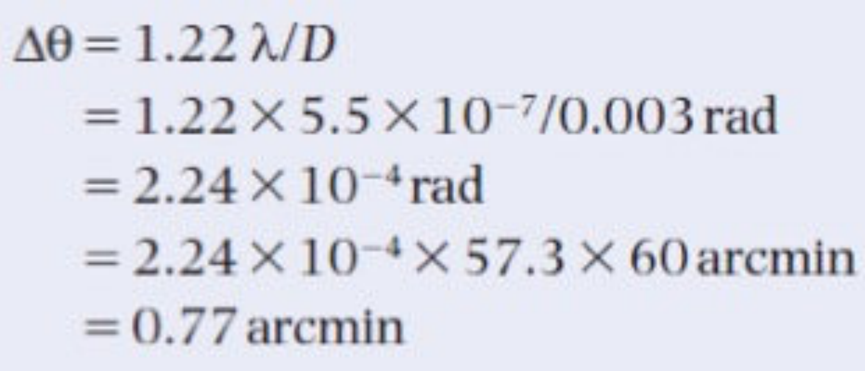
D=视场光阑直径（CCD大小）

（对于类似光路设计的目镜） $\theta = D / f$

- 视场光阑(field stop)直径与目镜焦距**大致**正比
  - 目镜焦距越小，放大率越大，但观测视场越小
  - 标准目镜：Plossl目镜，由两个消色差双合透镜组成
  - 宽视场目镜：给定焦距，使用五个或以上光学器件，视场大，价格高

- 肉眼看望远镜放大率越大越好？~100-200倍

- 眼睛的衍射极限
- 视网膜上视觉细胞的数量足够多
- 大气视宁度



$$\begin{aligned}\Delta\theta &= 1.22\,\lambda/D \\ &= 1.22\times 5.5\times 10^{-7}/0.003\,\mathrm{rad} \\ &= 2.24\times 10^{-4}\,\mathrm{rad} \\ &= 2.24\times 10^{-4}\times 57.3\times 60\,\mathrm{arcmin} \\ &= 0.77\,\mathrm{arcmin}\end{aligned}$$

（设瞳孔D=3mm）

- 像的对比度

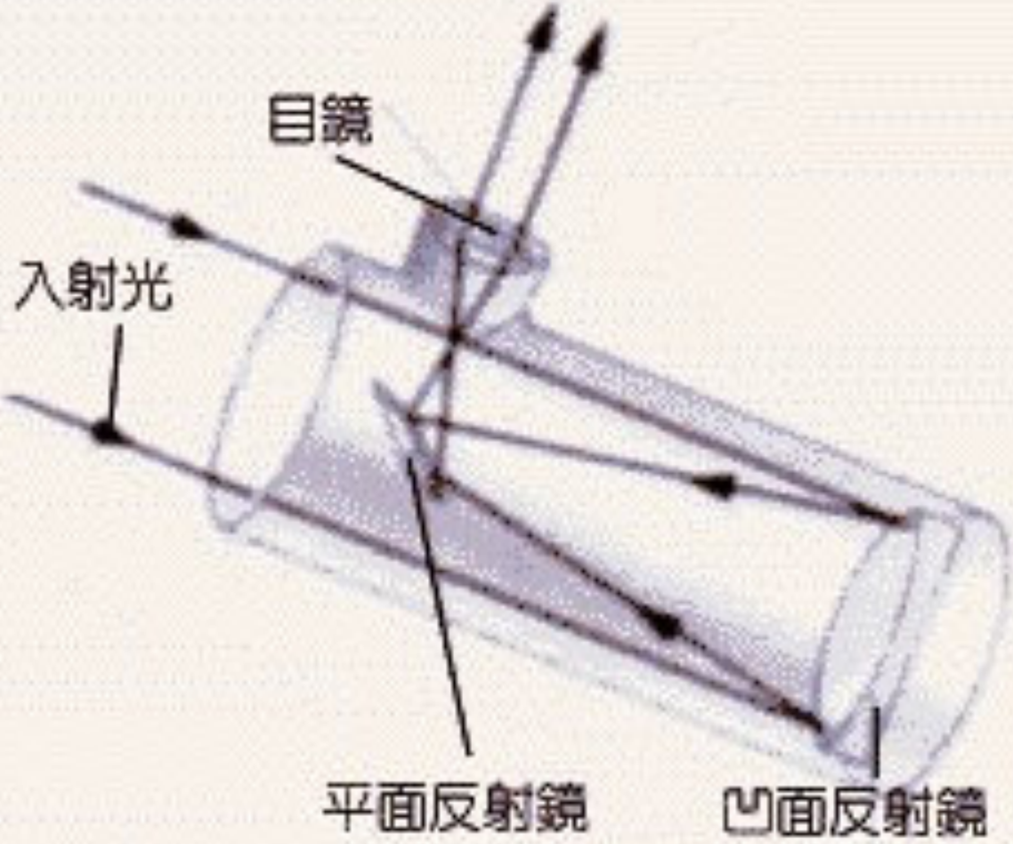
镜筒、面等散射星光：黑->暗灰，降低对比度。

折射式望远镜要好于反射式望远镜。

通过镀膜提高反射率，可以看到更暗的天体，并且降低散射光，提高对比度。

反射式望远镜

（牛顿）


目鏡
入射光
平面反射鏡
凹面反射鏡

经典牛顿式望远镜

次镜小且需要悬挂

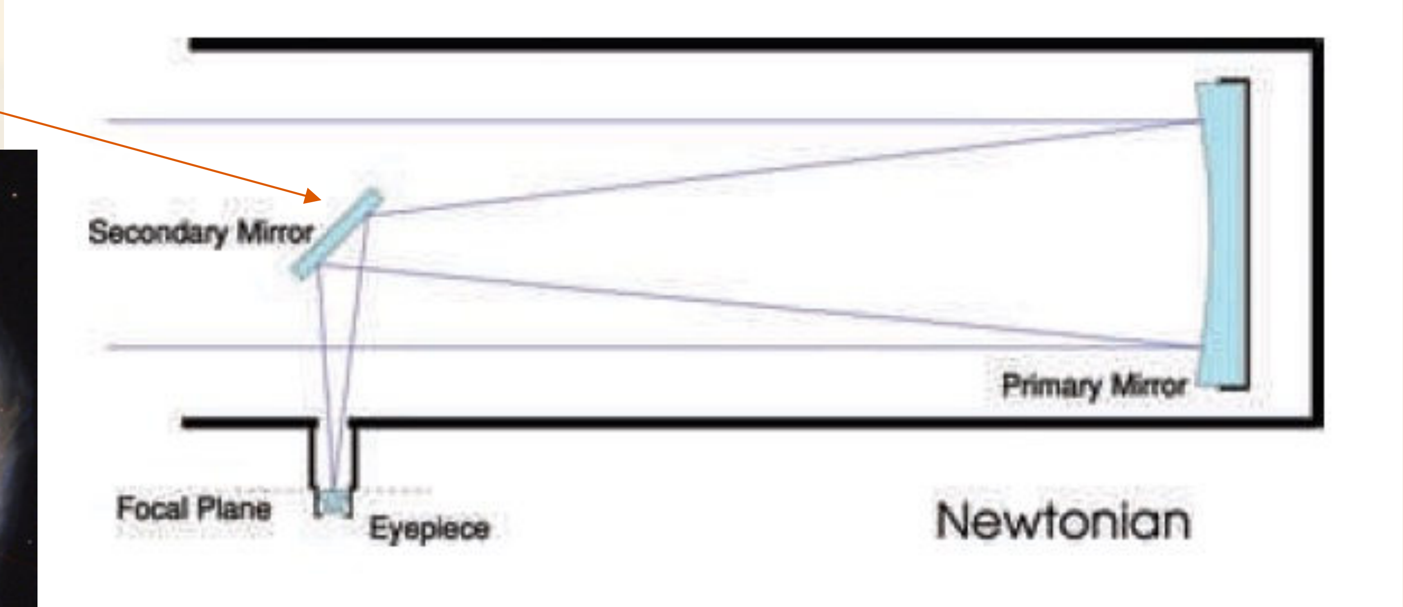

Secondary Mirror
Primary Mirror
Focal Plane
Eyepiece
Newtonian

Figure 5.11 The Newtonian telescope.

$$D/F = d/k$$

$$\begin{aligned} d &= D \times k/F \\ &= 200 \times 125/1600 \\ &= 15.6\,\text{mm}. \end{aligned}$$

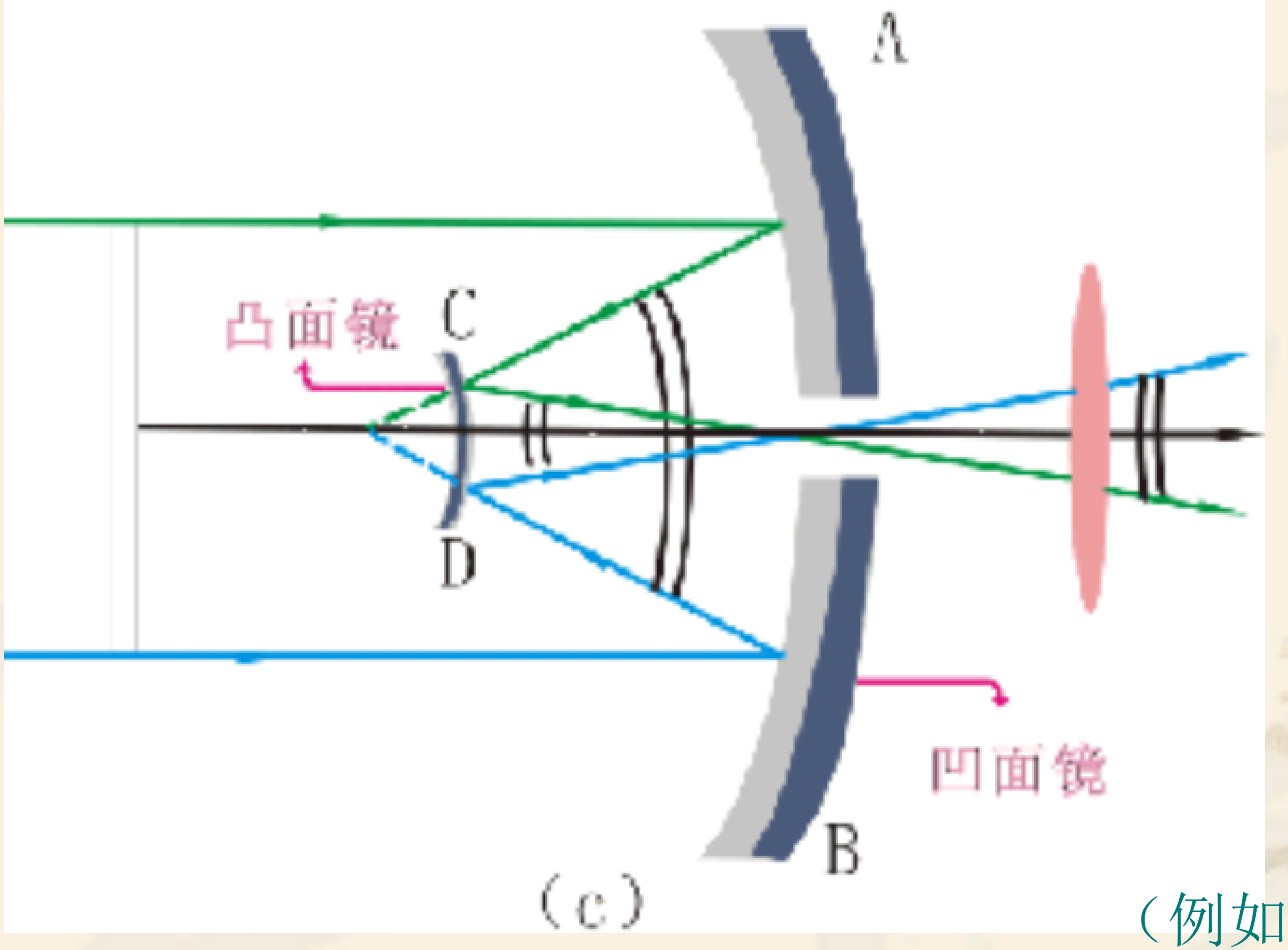
D—主镜的直径

F—主镜的焦距

k—像平面距离望远镜中心轴

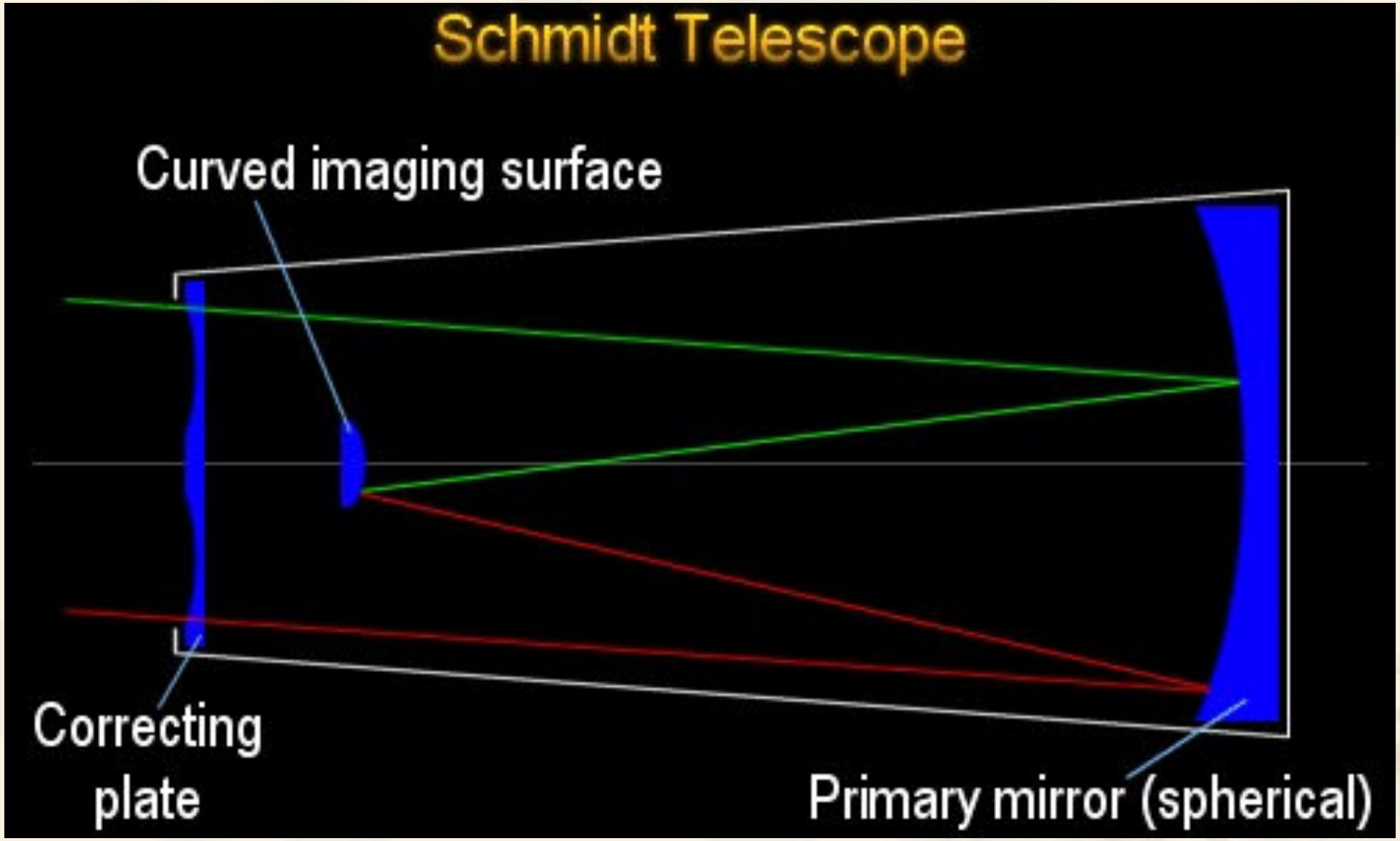
d—次镜的短轴

卡塞格林式望远镜


A
凸面镜
C
D
凹面镜
B
(c)

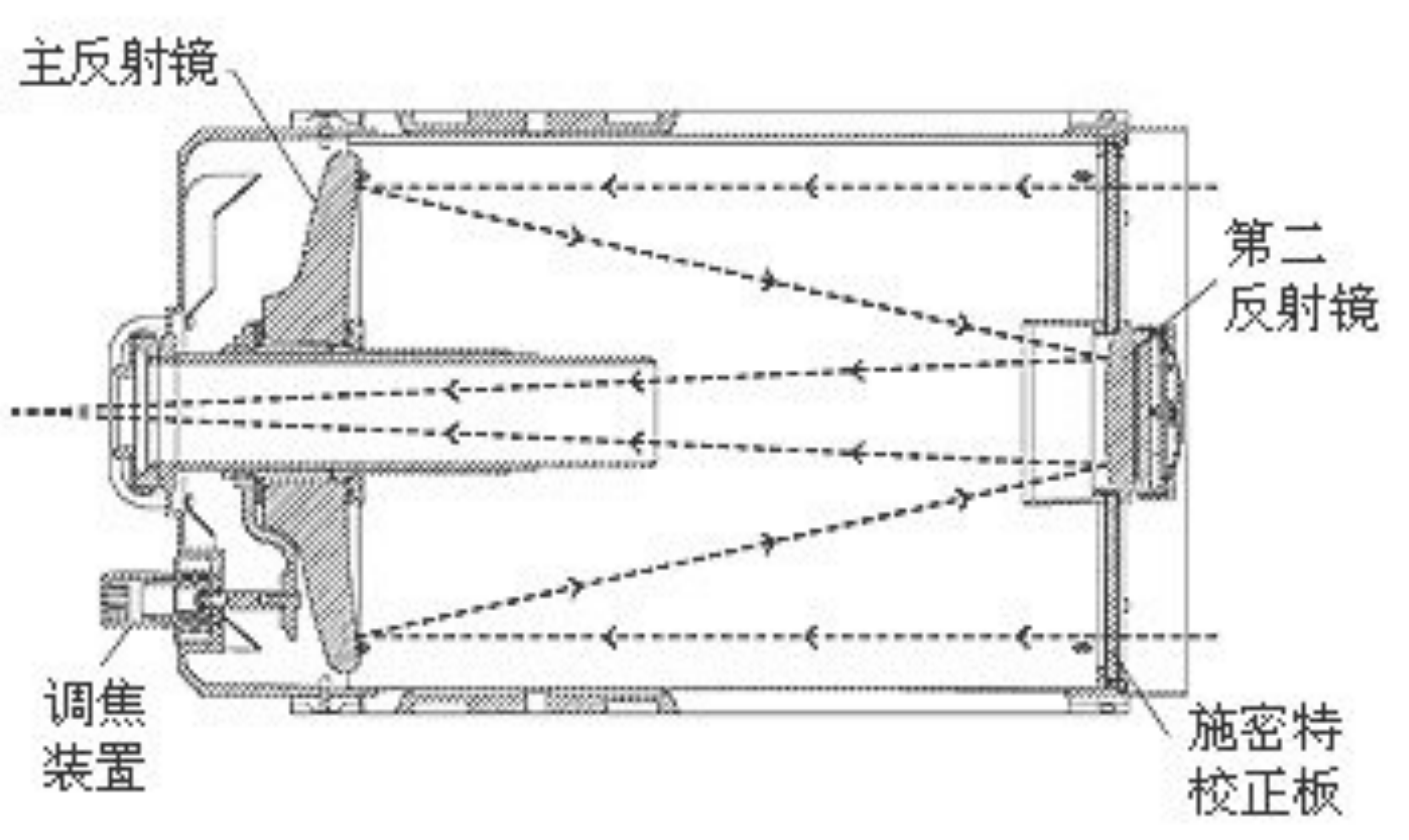
（例如HST）

折反射望远镜

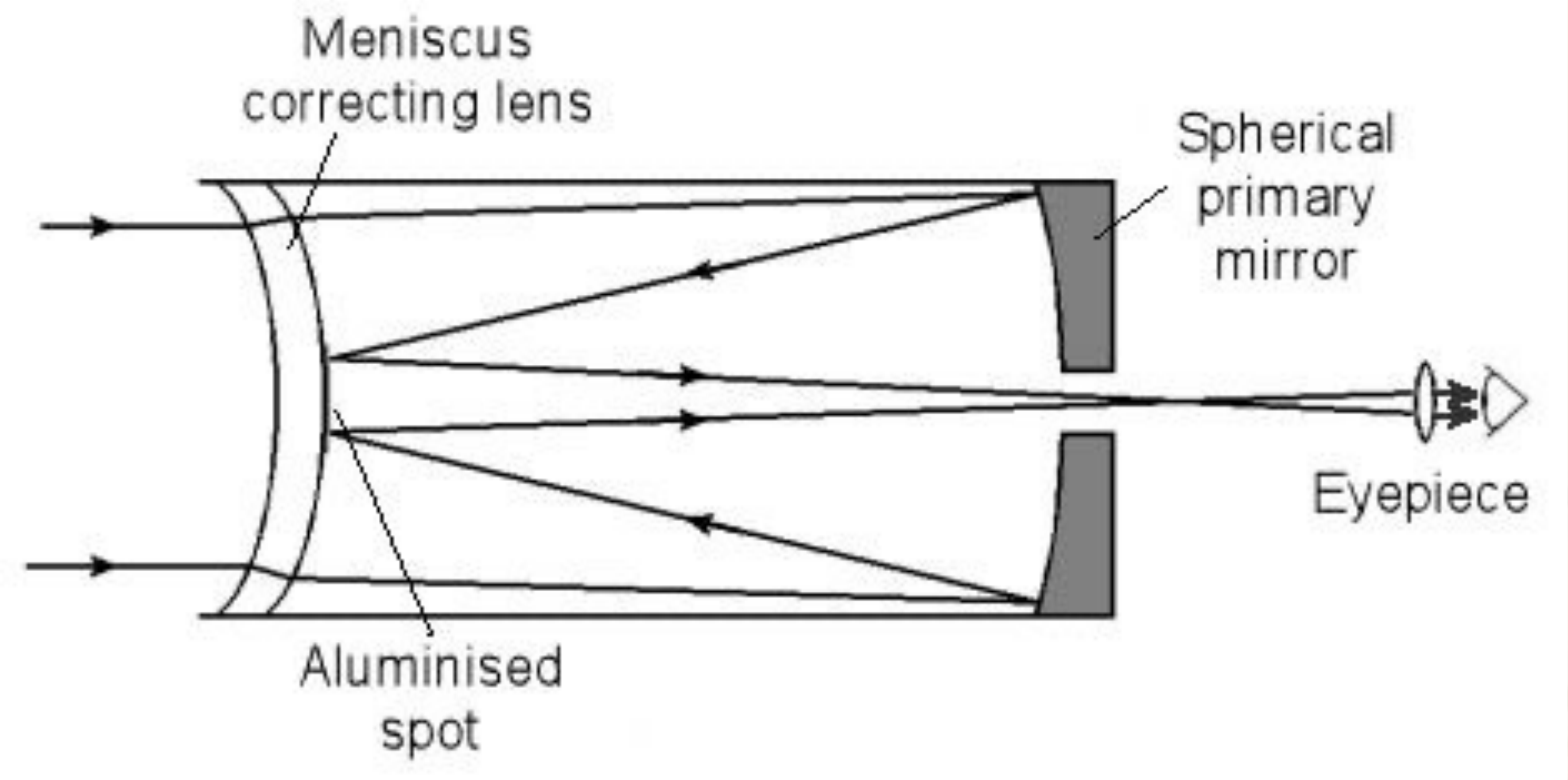

Schmidt Telescope
Curved imaging surface
Correcting plate
Primary mirror (spherical)

B.V. Schmidt 1930，球面反射镜，宽视场，小的焦比

- Schmidt-Cassegrain 望远镜

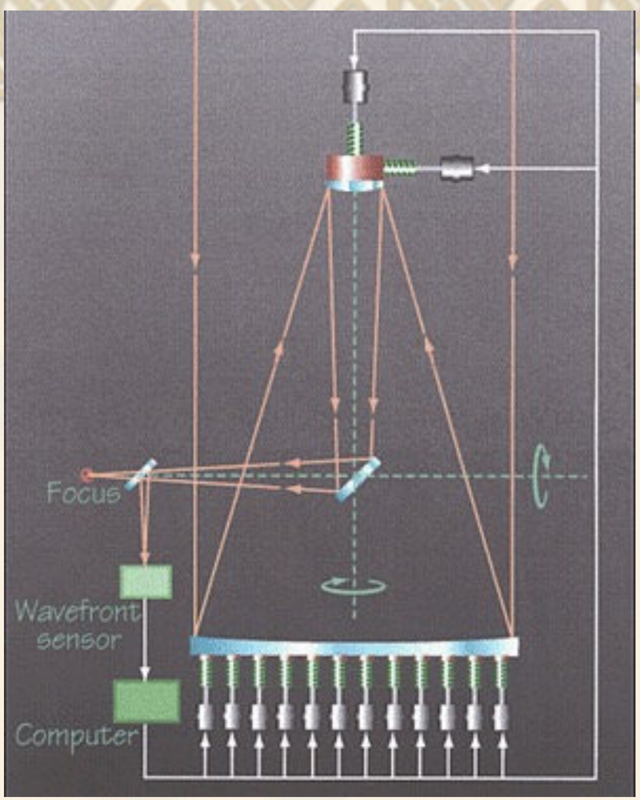

主反射镜
第二
反射镜
调焦
装置
施密特
校正板

Maksutov-Cassegrain 望远镜


Meniscus correcting lens
Spherical primary mirror
Eyepiece
Aluminised spot

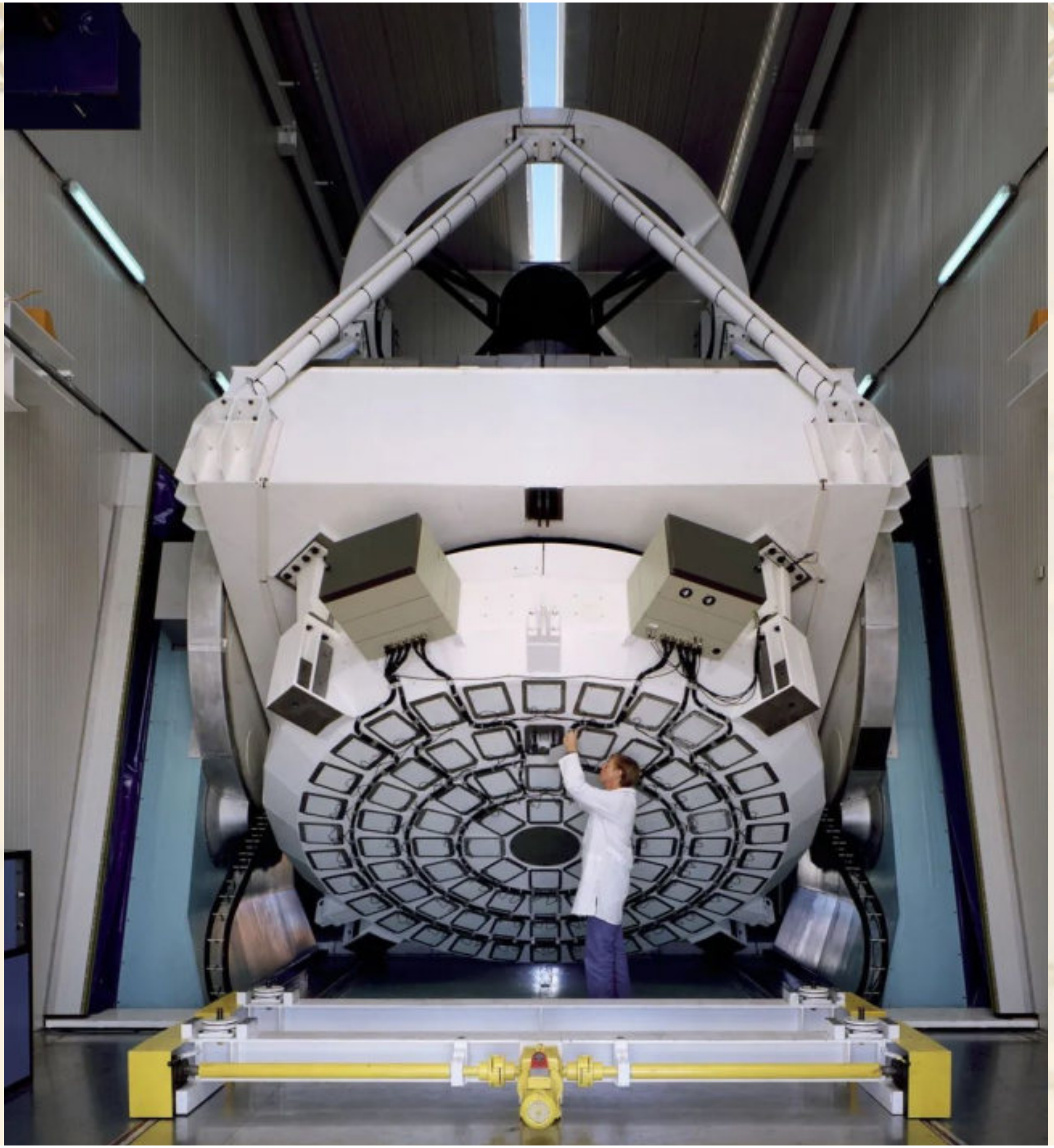
- 主动光学望远镜

  主动光学的校正是低频的，主要用于修正主镜由于自重和热胀冷缩所造成的形变，其触动器一般位于主镜的后面


Focus
Wavefront sensor
Computer

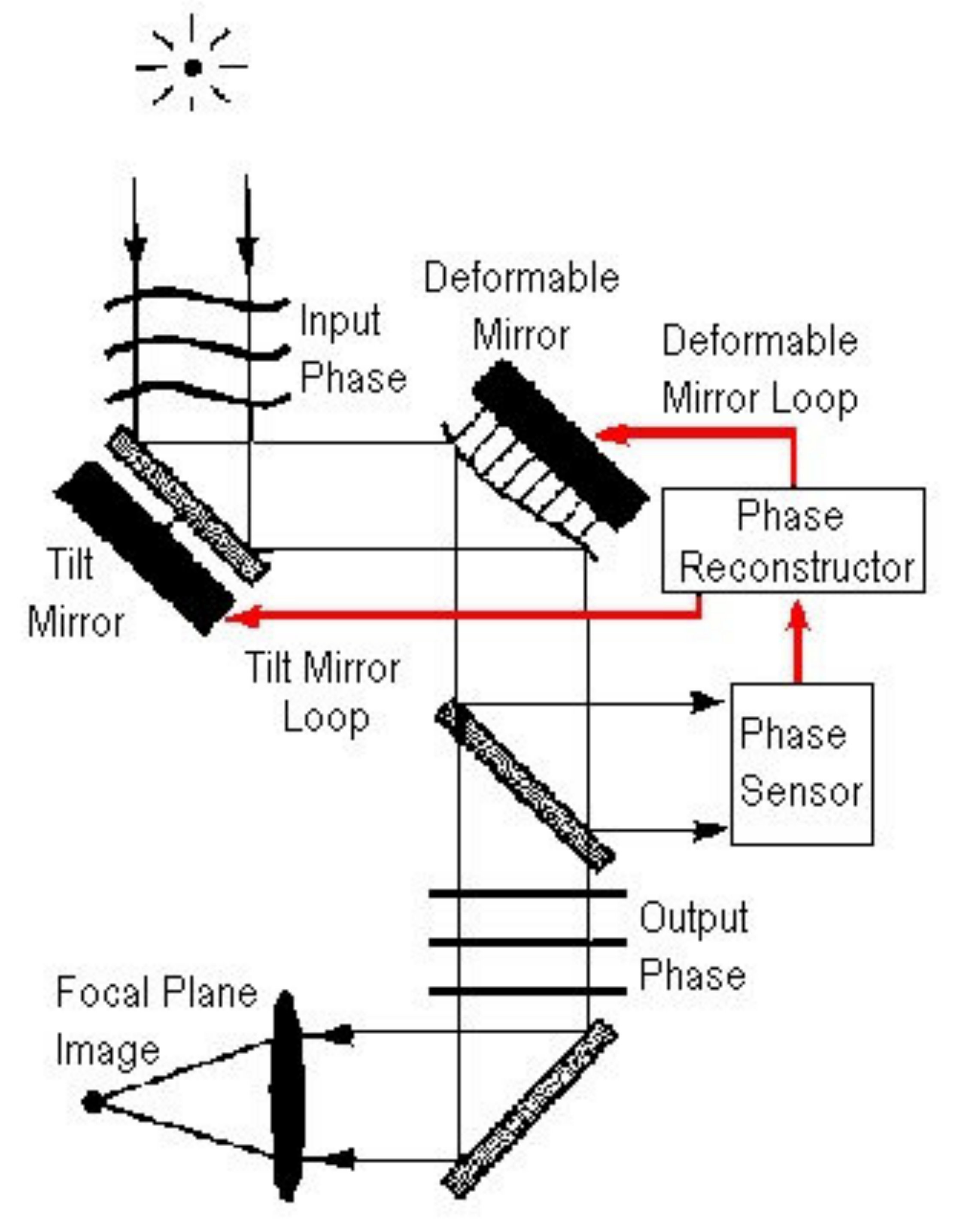
- 自适应光学望远镜

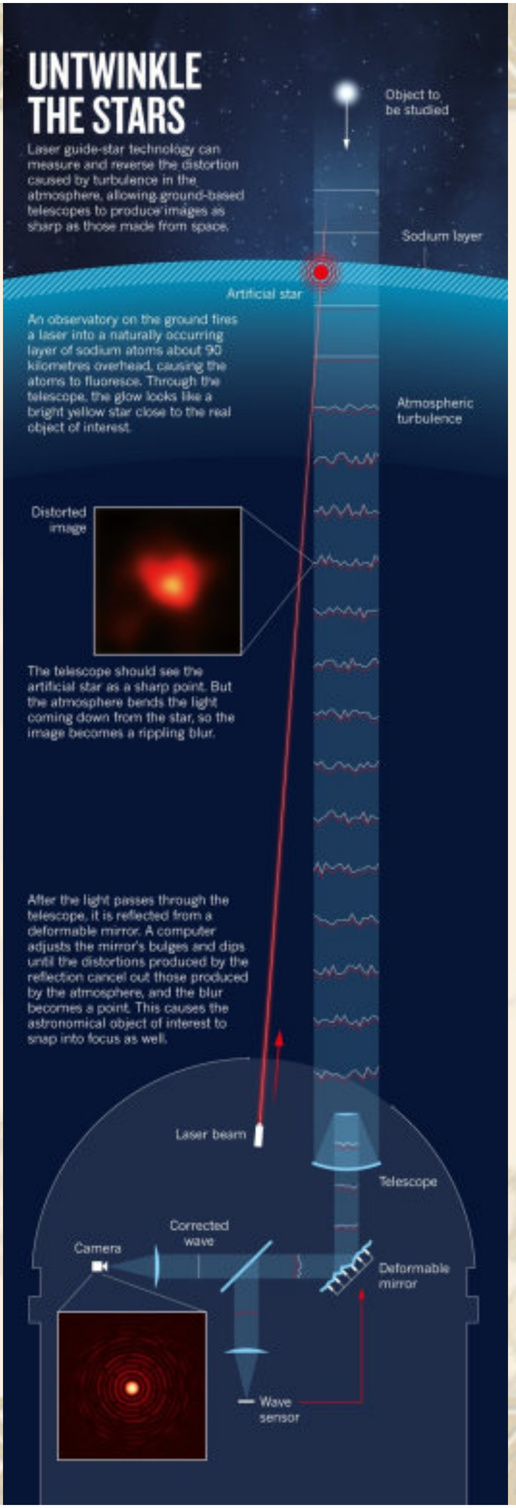
  自适应光学的校正是高频的，主要修正大气湍流对星光波前的扭曲，其触动器位于校正光路中的弹性镜面后方。自适应光学在红外波段效果最佳，在光学波段也有显著效果；通常需要大功率激光器所产生的人造定标星。



新技术望远镜（NTT）运用了主动光学技术，3.56米直径的主镜薄而可弯曲，利用主镜后面的力促动器可使镜面形状发生改变。/ ESO

自适应光学系统


Input
Phase
Deformable
Mirror
Deformable
Mirror Loop
Phase
Reconstructor
Tilt
Mirror
Tilt Mirror
Loop
Phase
Sensor
Output
Phase
Focal Plane
Image



UNTWINKLE THE STARS

Laser guide-star technology can measure and reverse the distortion caused by turbulence in the atmosphere, allowing ground-based telescopes to produce images as sharp as those made from space.

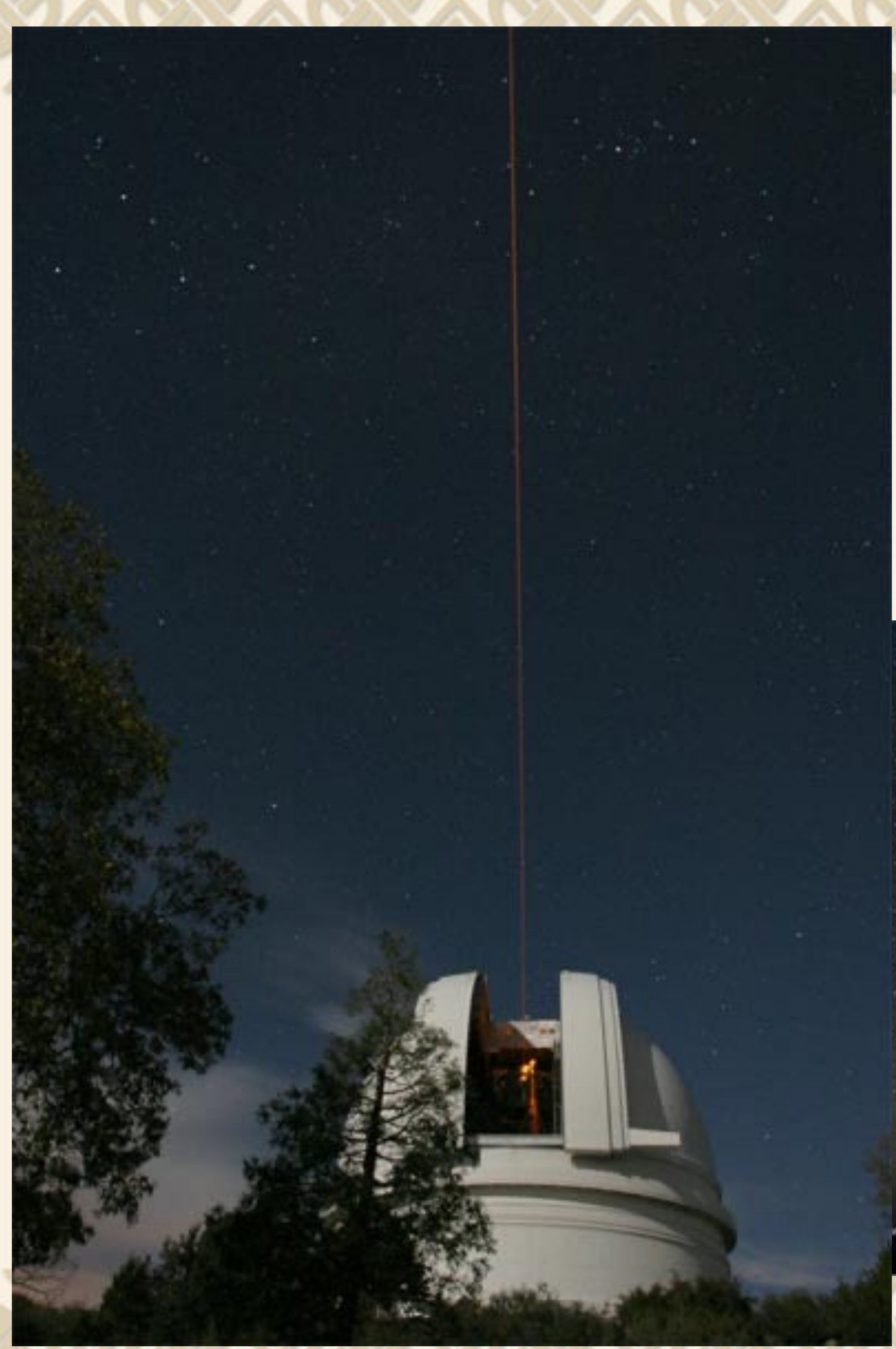
An observatory on the ground fires a laser into a naturally occurring layer of sodium atoms about 90 kilometres overhead, causing the atoms to fluoresce. Through the telescope, the glow looks like a bright yellow star close to the real object of interest.

The telescope should see the artificial star as a sharp point. But the atmosphere bends the light coming down from the star, so the image becomes a rippling blur.

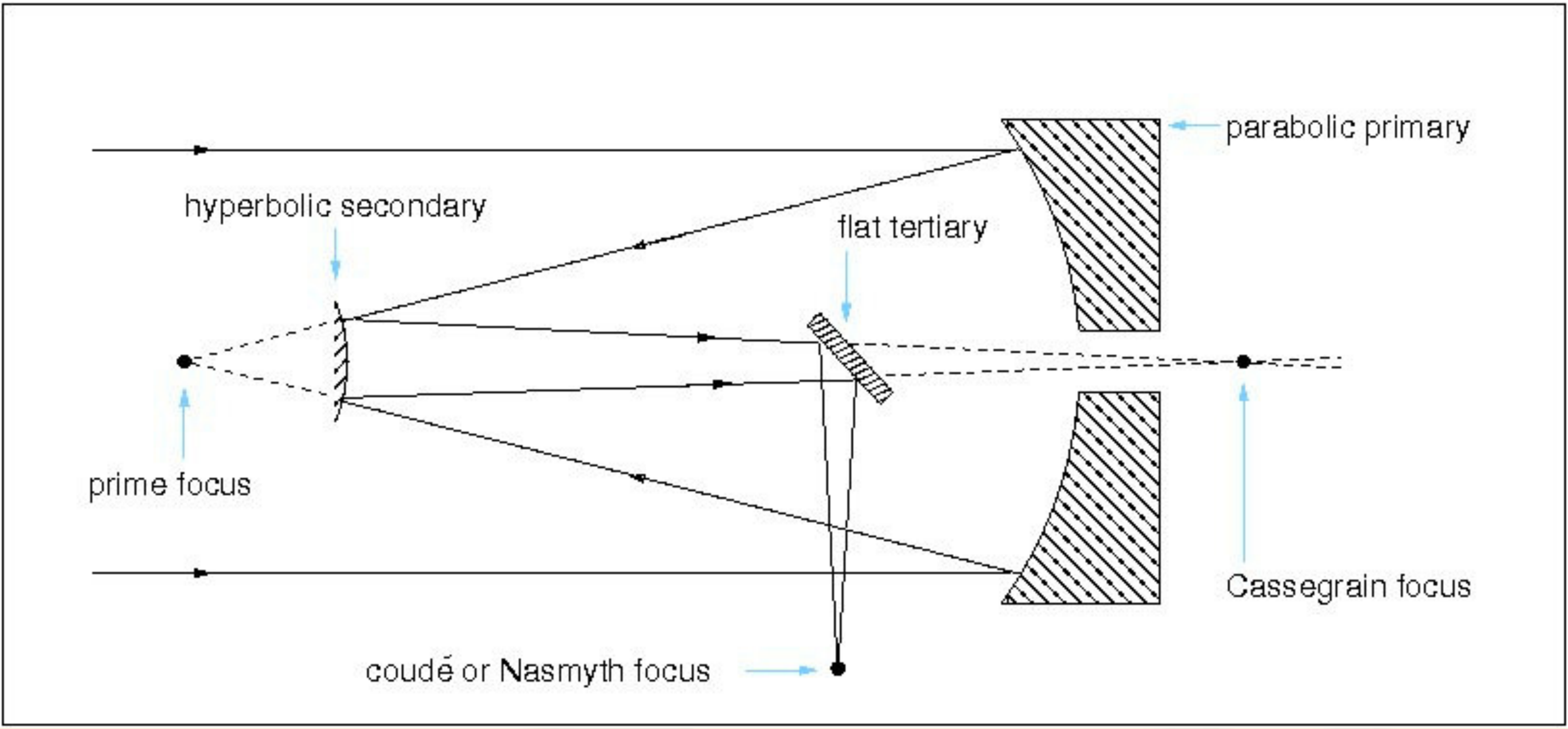
After the light passes through the telescope, it is reflected from a deformable mirror. A computer adjusts the mirror's bulges and dips until the distortions produced by the reflection cancel out those produced by the atmosphere, and the blur becomes a point. This causes the astronomical object of interest to snap into focus as well.

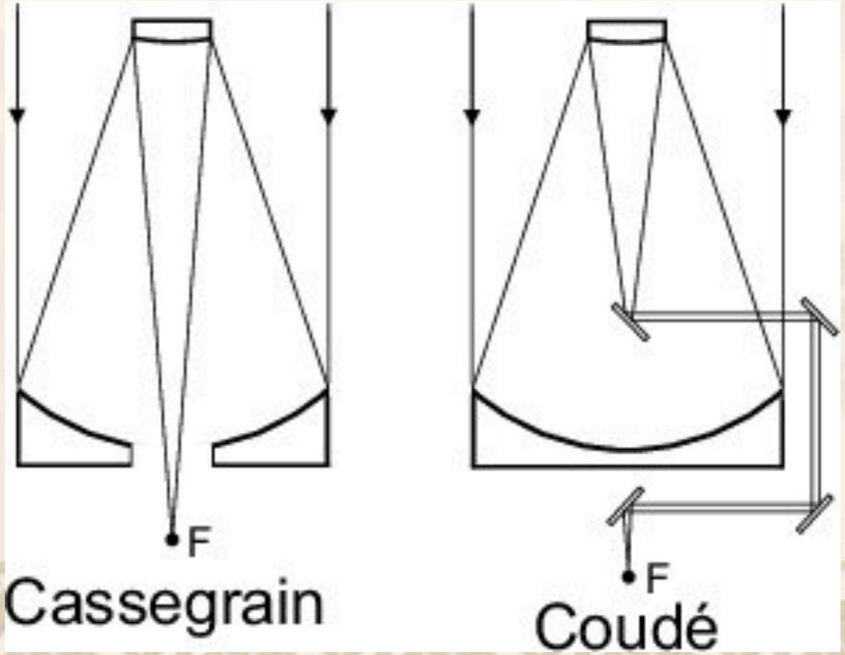
Object to
be studied
Sodium layer
Artificial star
Atmospheric
turbulence
Distorted
image
Laser beam
Telescope
Corrected
wave
Camera
Deformable
mirror
Wave
sensor

激光定标星



weedie Photography


parabolic primary
hyperbolic secondary
flat tertiary
prime focus
Cassegrain focus
coudé or Nasmyth focus


F
Cassegrain
F
Coudé

主焦点
卡塞格林焦点
耐氏焦点
库德焦点

一些代表性的光学望远镜

双子座望远镜（Gemini North & South Telescope）

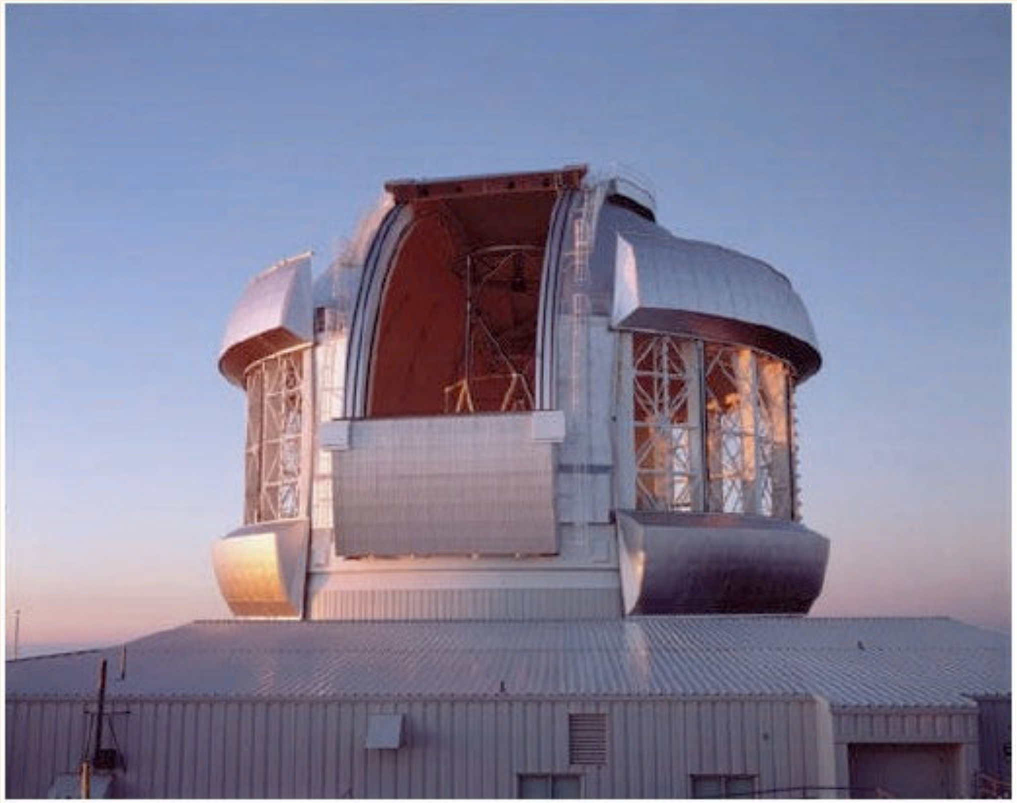


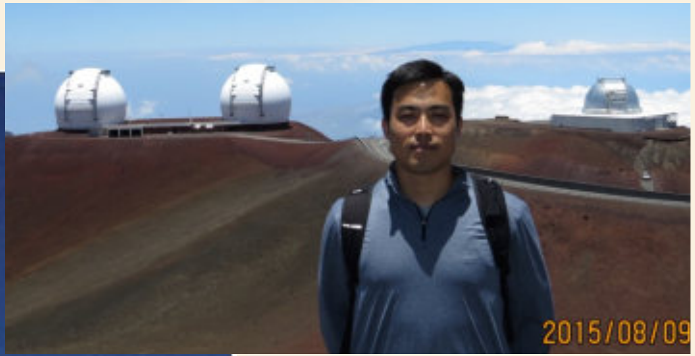
Figure 5.14 The Gemini North telescope. Note the open sides of the dome to allow the telescope to remain in thermal equilibrium with the outside air. Image: Neelon Crawford, Polar Fine Arts, courtesy of Gemini Observatory and National Science Foundation.

- Gemini North：
Mauna Kea, Hawaii
海拔：4214 m
- Gemini South：
Cerro Pachon，Chile
海拔：2737 m
- 口径：8.1m x 2
- 红外特性好，镀银（比铝更能反射红外光）
- 圆顶侧面通风，减少热不稳定性

薄镜面技术——双子望远镜（Gemini Telescope） 两台望远镜，主镜均为8.1米，厚度仅为20厘米。/ NOAO

Keck双胞胎望远镜

Mauna Kea，Hawaii，4200m，世界最大的光学和红外望远镜，主镜口径10m，由36块六边形的子镜组成。白天圆顶内温度冷却至接近零度（夜晚温度；减少热不稳定性）。主动光学（每秒2次，4nm）和自适应光学系统（15cm变形镜，每秒670次）。


2015/08/09

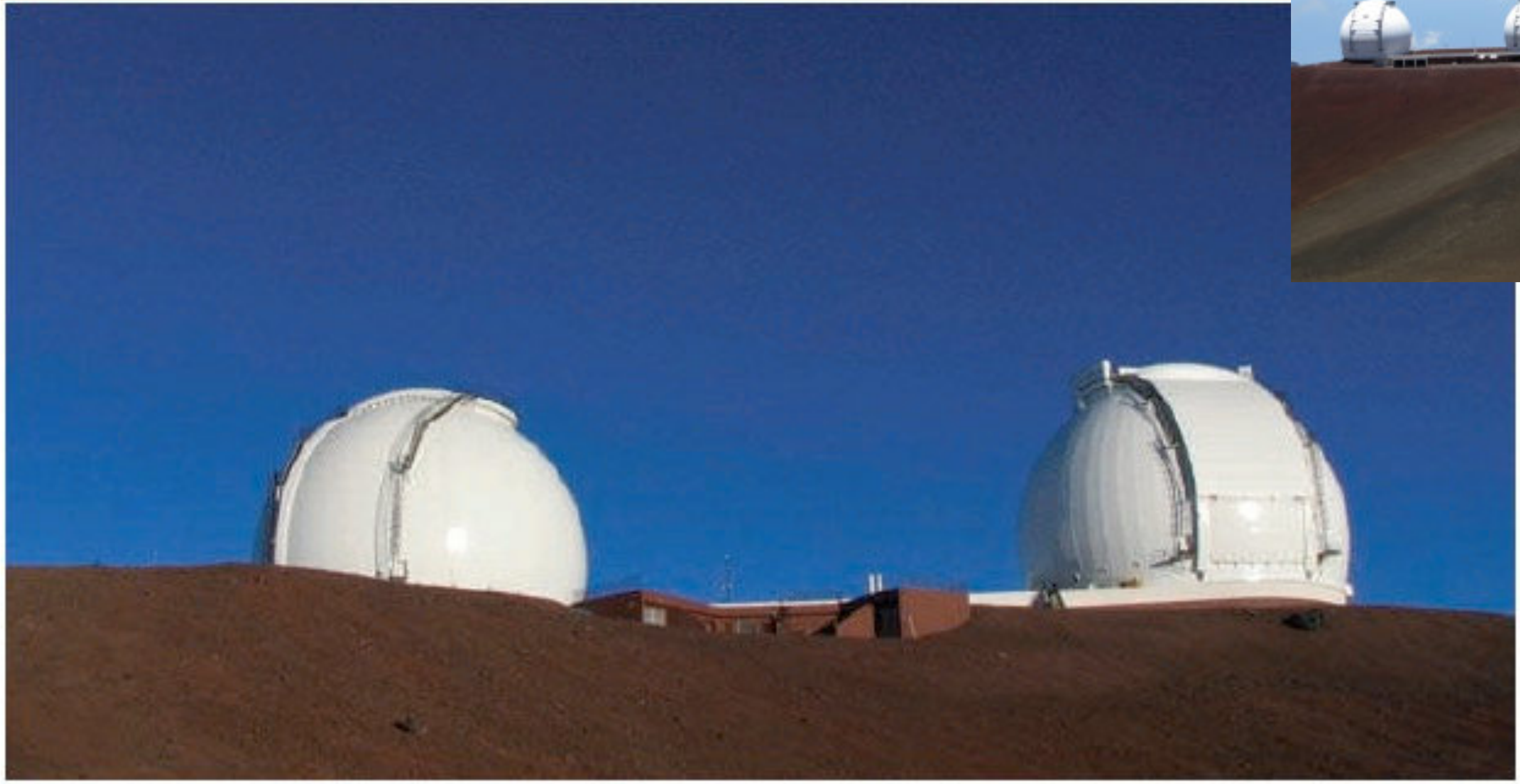


Figure 5.15 The twin Keck telescopes. Image: Courtesy W. M. Keck Observatory.

南非大望远镜（SALT）

- 南半球最大，10m球面镜
- 由91片六边形子镜子组成
- 固定倾斜角37度，只可轴向转动
- 附镜可移动，主镜可调整
- 造价低廉（<1/5费用）

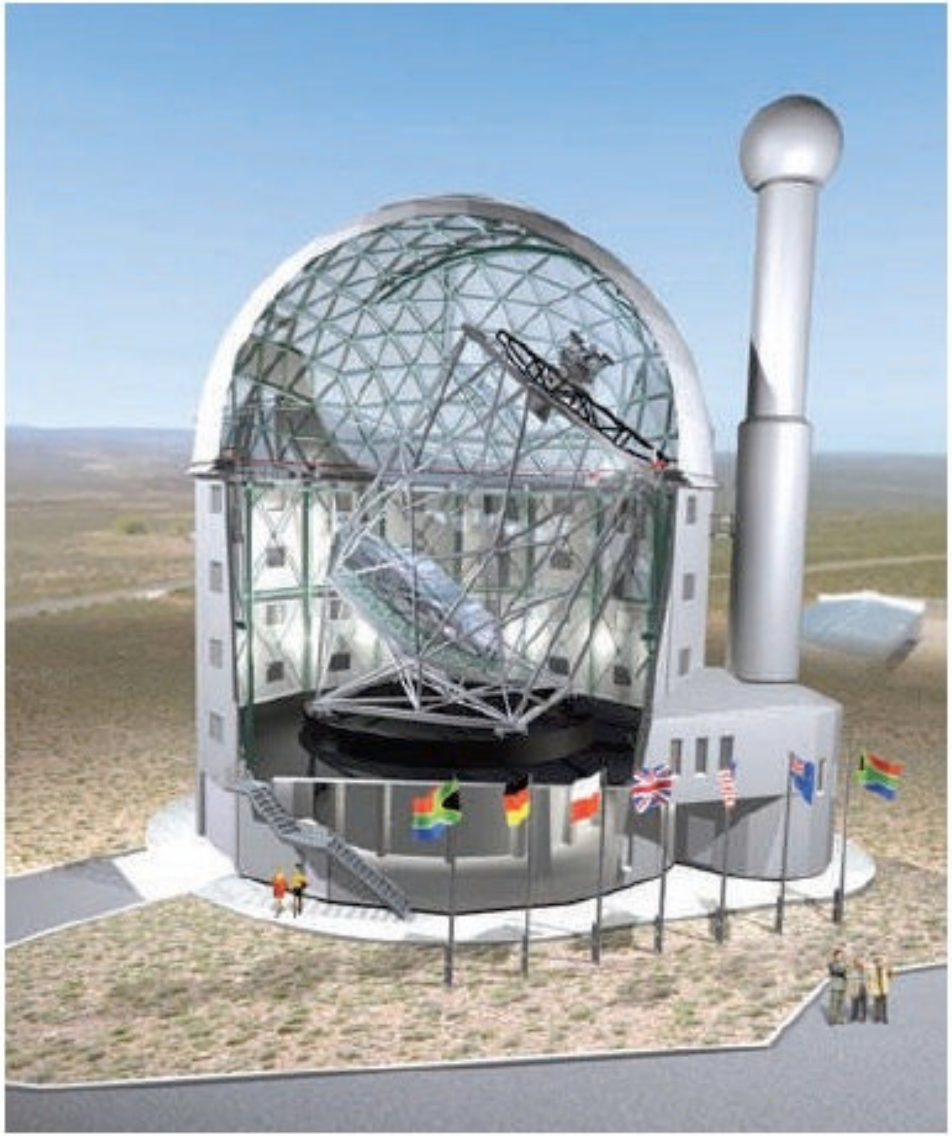


Figure 5.16 The South Africa Large Telescope. Image: SALT Consortium.

甚大望远镜（VLT）

ESO，位于智利，海拔2600m，4X8.2m（～16m）,4X1.8m副镜：提高角分辨率，NUV-25um

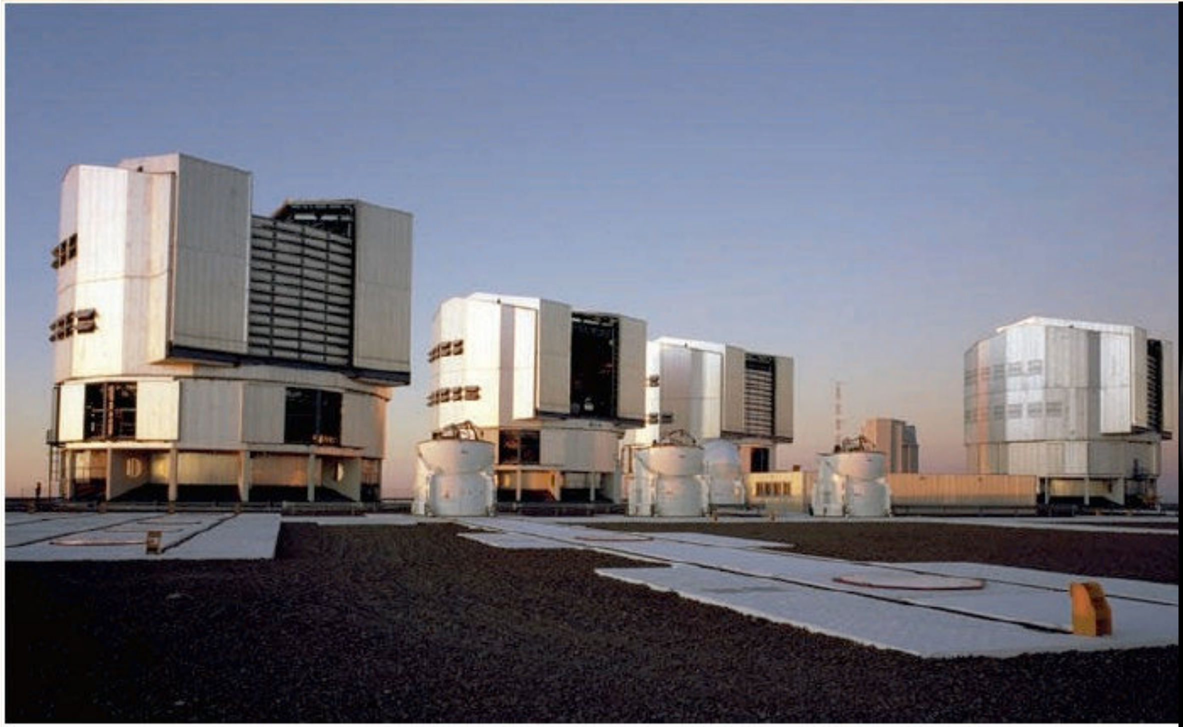
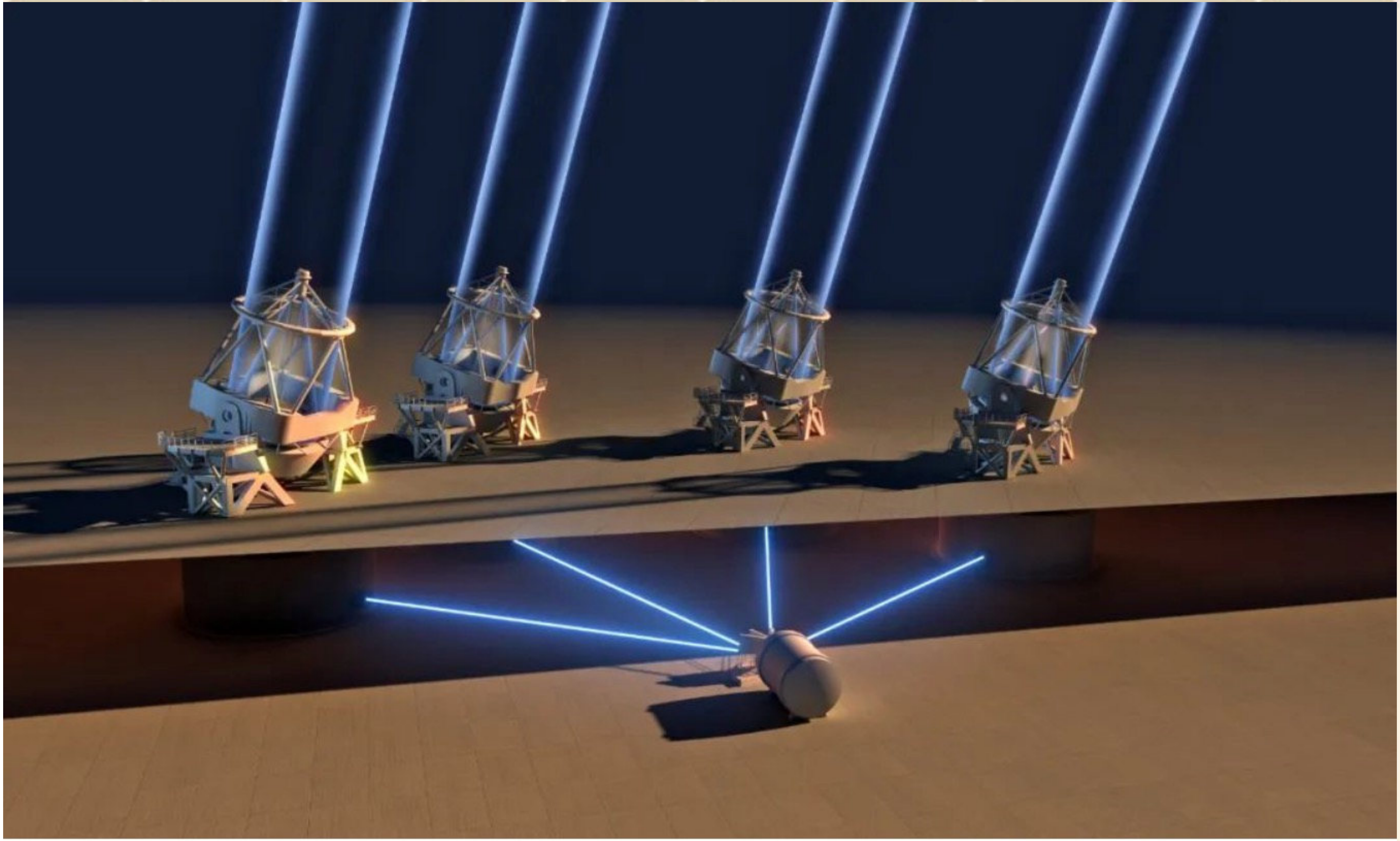


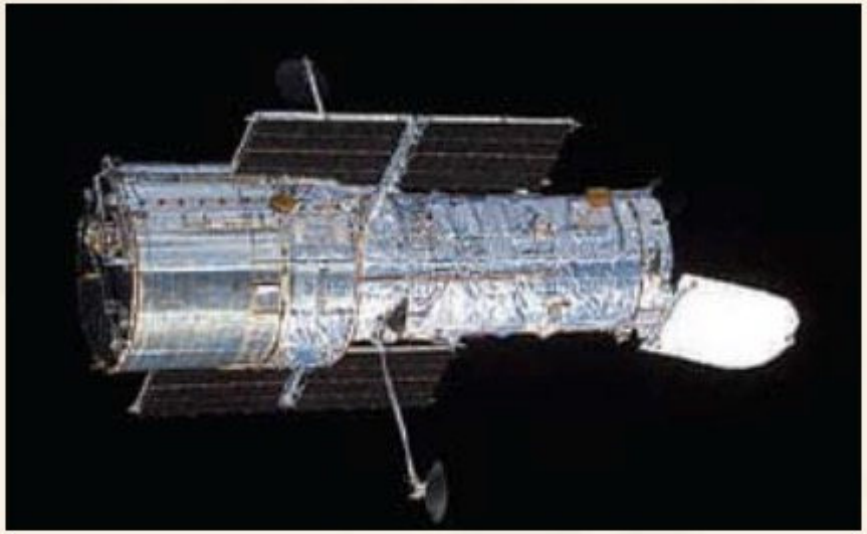
Figure 5.17 The four 8.2-m telescopes of the VLT, with the four 1.8-m auxiliary telescopes in the foreground. Image: Courtesy of the European Southern Observatory.

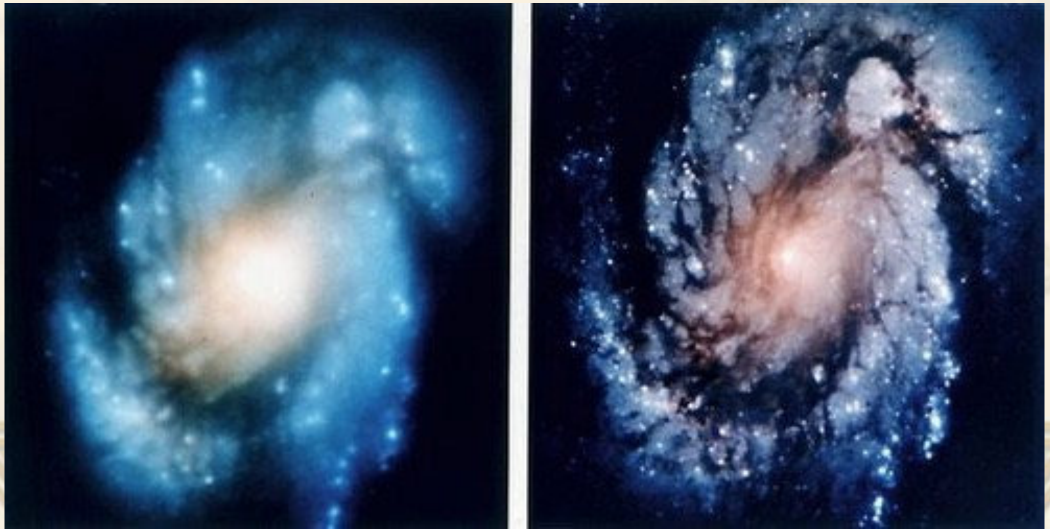


VLTI干涉示意图。/ ESO

Hubble空间望远镜（HST）

1990年4月发射，远紫外到红外（0.12-2.4um），主镜：2.4m，角分辨率：~1/20 角秒



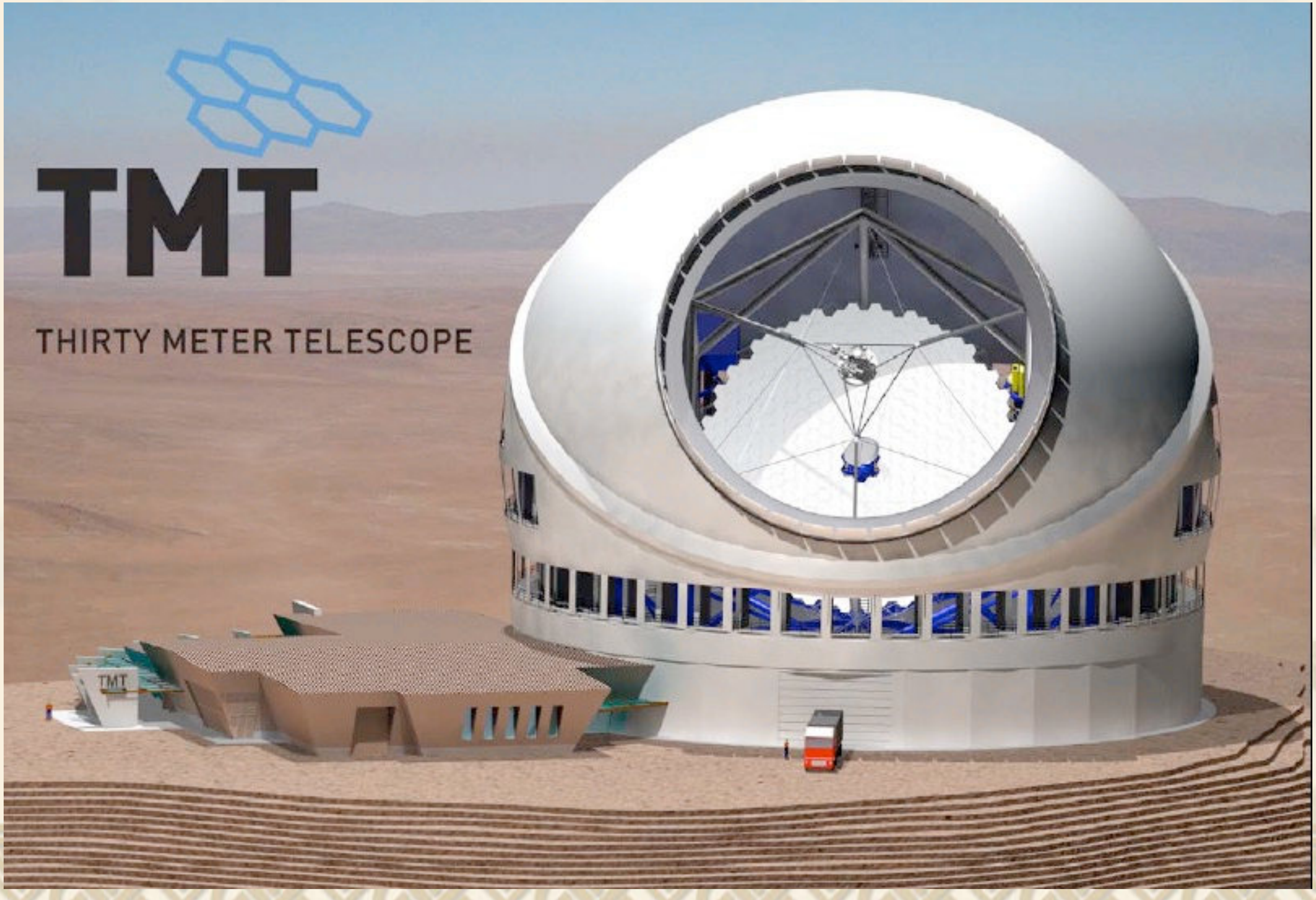


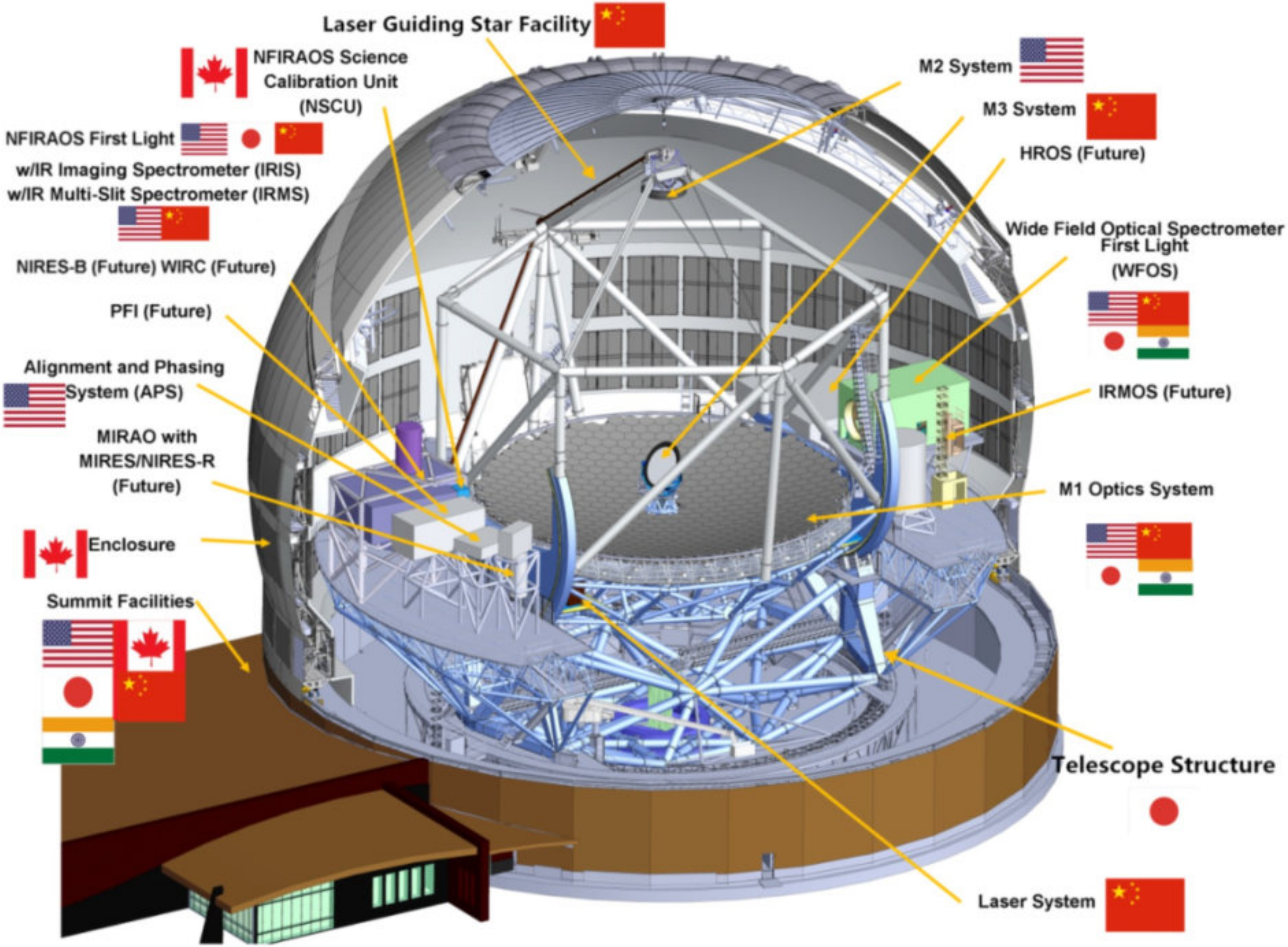
祝元宵佳节
阖家团圆
中国空间站工程巡天望远镜科学工作联合中心
CSST

2024.02

30m望远镜

Mauna Kea (?)


TMT
THIRTY METER TELESCOPE
TMT


Laser Guiding Star Facility
NFIRAOS Science Calibration Unit (NSCU)
NFIRAOS First Light
w/IR Imaging Spectrometer (IRIS)
w/IR Multi-Slit Spectrometer (IRMS)
NIRES-B (Future) WIRC (Future)
PFI (Future)
Alignment and Phasing System (APS)
MIRAO with MIRES/NIRES-R (Future)
Enclosure
Summit Facilities
M2 System
M3 Svstem
HROS (Future)
Wide Field Optical Spectrometer First Light (WFOS)
IRMOS (Future)
M1 Optics System
Telescope Structure
Laser System

30米望远镜（TMT）建设国际分工图

100m望远镜-OWL → ELT (39 m)

ＥＳＯ，角分辨率：~1毫角秒

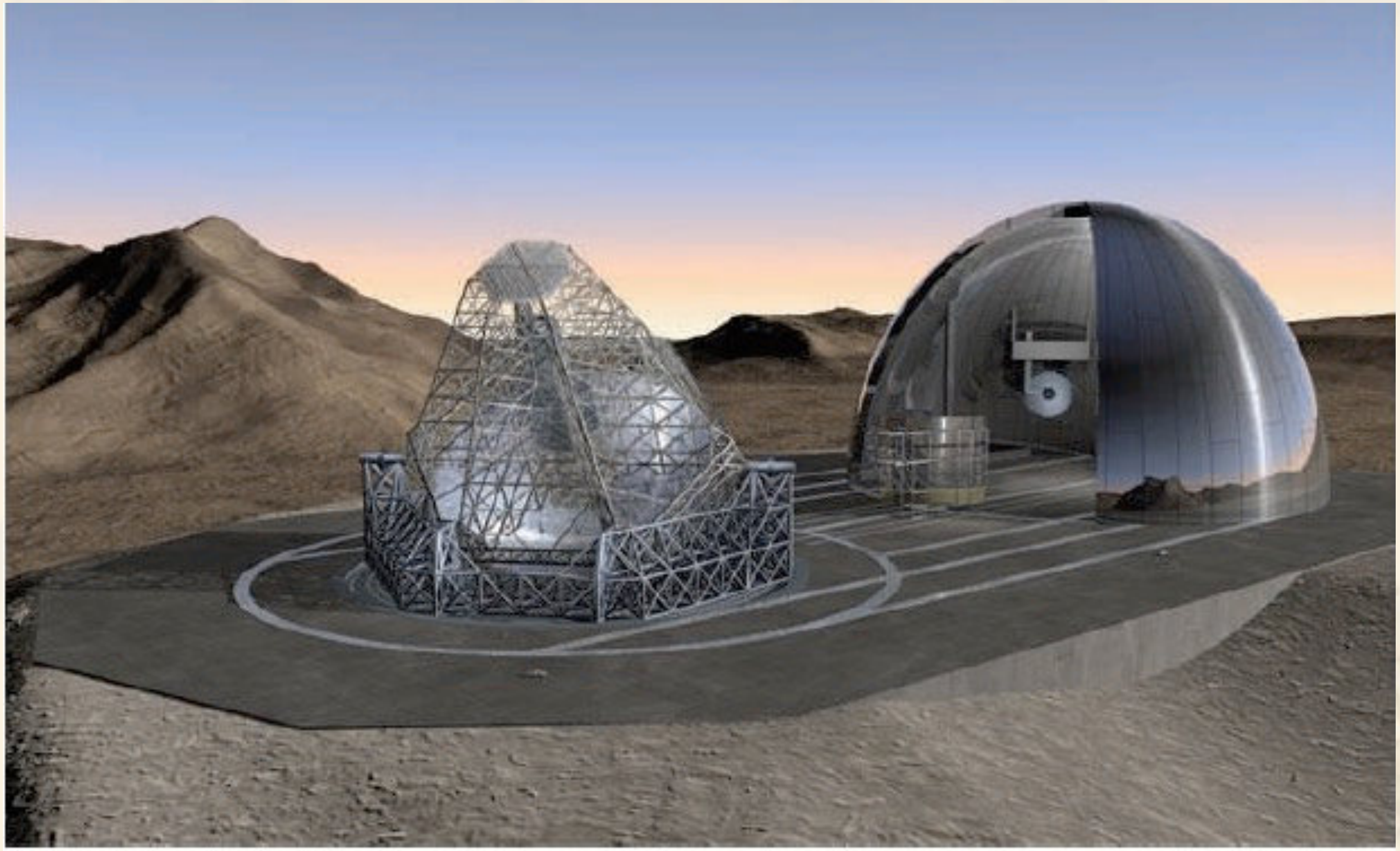
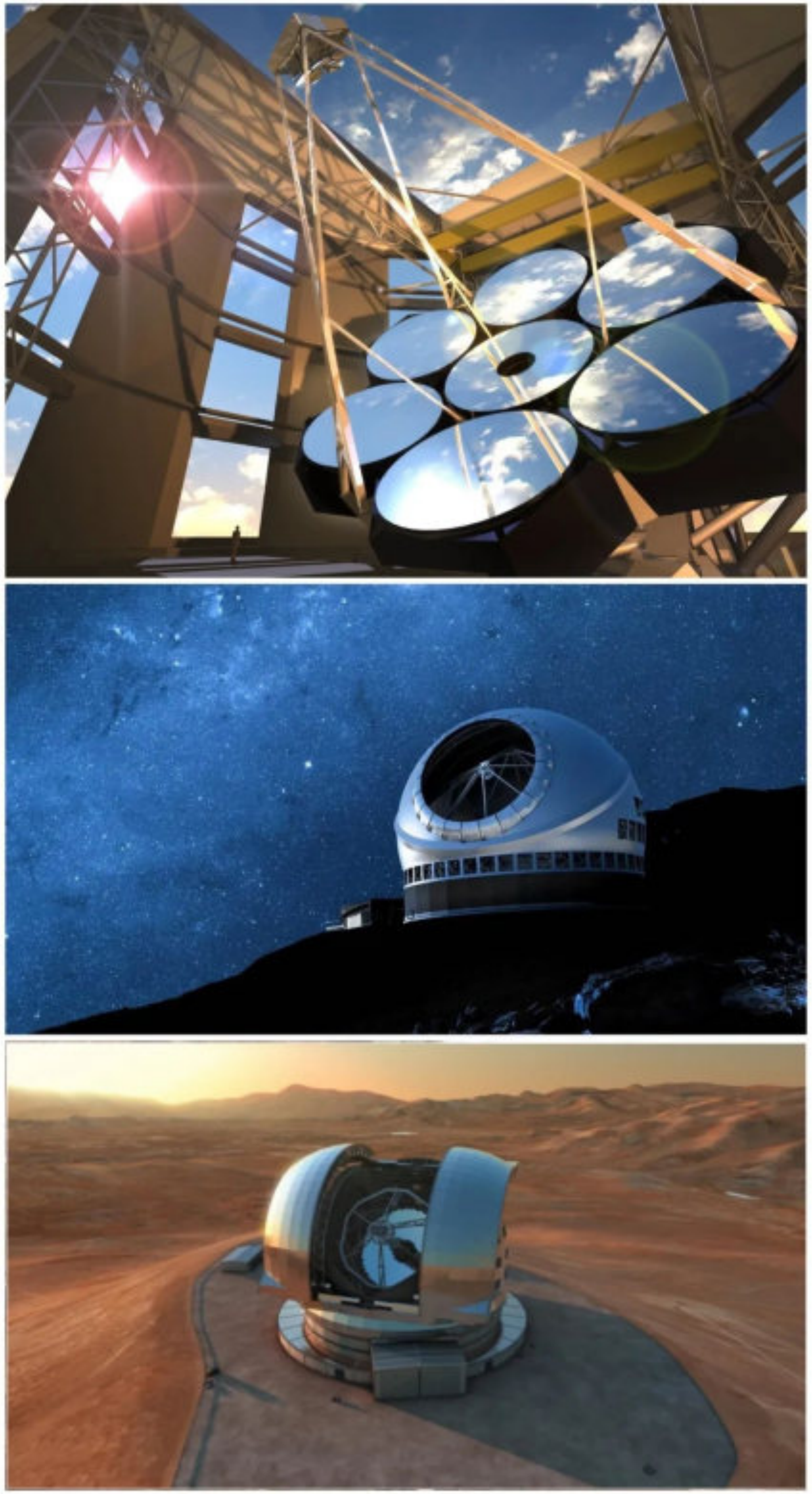
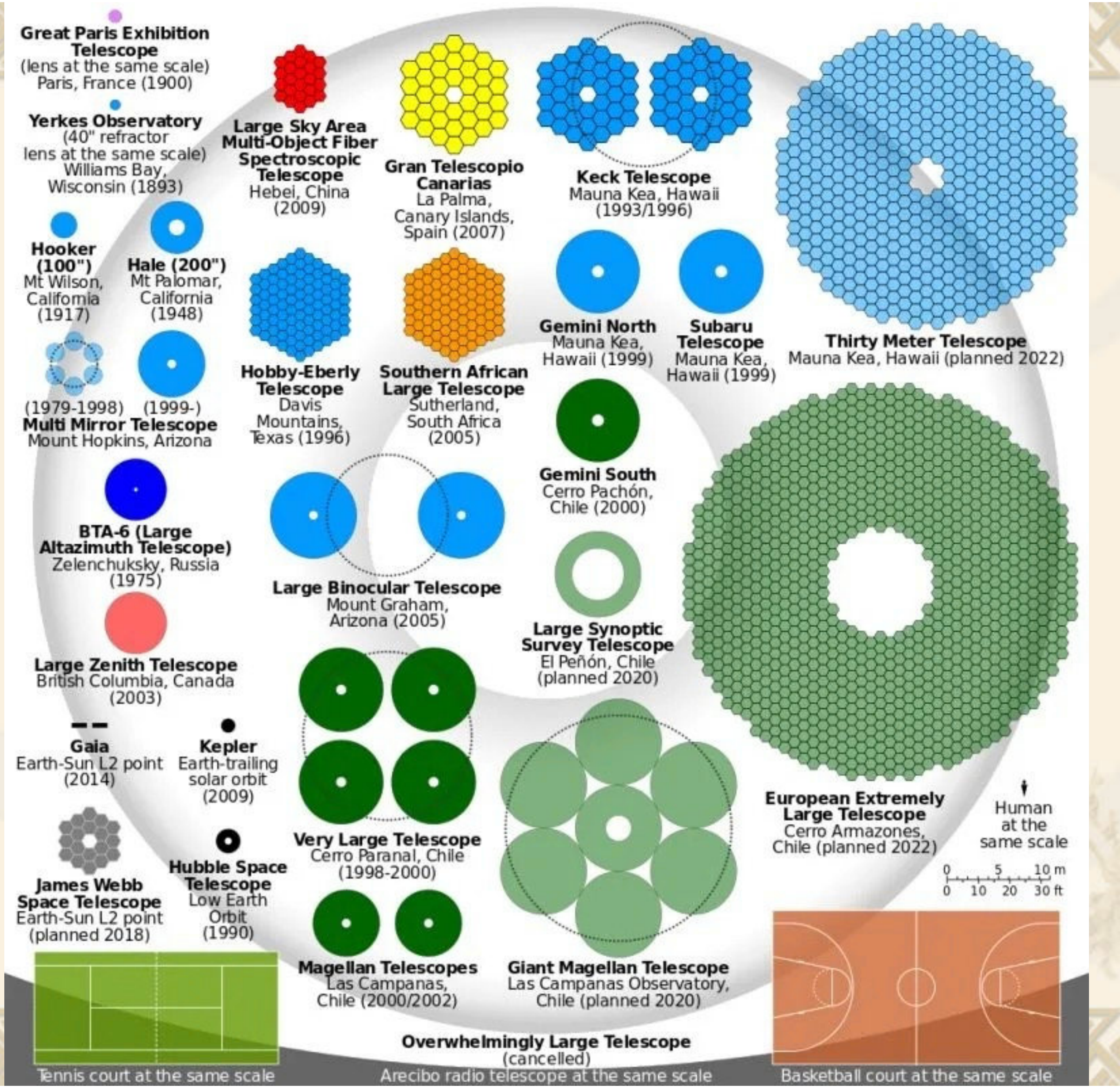
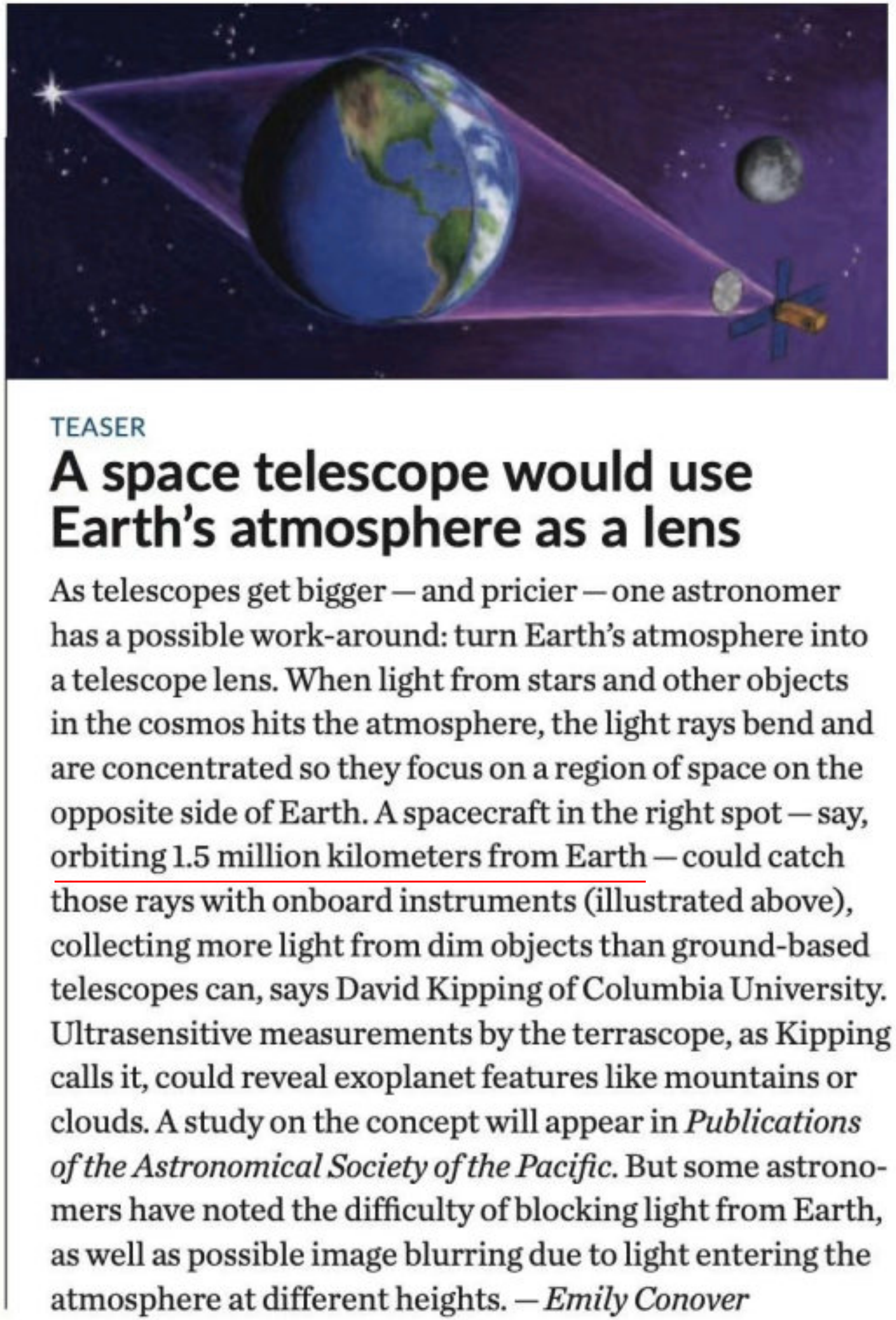


Figure 5.19 Artist's impression of the 100-m optical telescope concept. Image: European Southern Observatory.

建造中的下一代30米级地基天文光学-红外望远镜共有三台，分别为：25米的巨型麦哲伦望远镜GMT、30米望远镜TMT和39米的欧洲极大望远镜（the European Extremely Large Telescope，简称E-ELT）。




Great Paris Exhibition Telescope
(lens at the same scale)
Paris, France (1900)
Yerkes Observatory
(40" refractor
lens at the same scale)
Williams Bay,
Wisconsin (1893)
Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
Hebei, China
(2009)
Gran Telescopio Canarias
La Palma,
Canary Islands,
Spain (2007)
Keck Telescope
Mauna Kea, Hawaii
(1993/1996)
Hooker (100")
Mt Wilson,
California
(1917)
Hale (200")
Mt Palomar,
California
(1948)
Hobby-Eberly Telescope
Davis
Mountains,
Texas (1996)
Southern African Large Telescope
Sutherland,
South Africa
(2005)
Gemini North
Mauna Kea,
Hawaii (1999)
Subaru Telescope
Mauna Kea,
Hawaii (1999)
Thirty Meter Telescope
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)
(1979-1998)
(1999-)
Multi Mirror Telescope
Mount Hopkins, Arizona
Gemini South
Cerro Pachón,
Chile (2000)
BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)
Zelenchuksky, Russia
(1975)
Large Binocular Telescope
Mount Graham,
Arizona (2005)
Large Synoptic Survey Telescope
El Peñón, Chile
(planned 2020)
Large Zenith Telescope
British Columbia, Canada
(2003)
Gaia
Earth-Sun L2 point
(2014)
Kepler
Earth-trailing
solar orbit
(2009)
Very Large Telescope
Cerro Paranal, Chile
(1998-2000)
European Extremely Large Telescope
Cerro Armazones,
Chile (planned 2022)
Human
at the
same scale
0 5 10 m
0 10 20 30 ft
James Webb Space Telescope
Earth-Sun L2 point
(planned 2018)
Hubble Space Telescope
Low Earth
Orbit
(1990)
Magellan Telescopes
Las Campanas,
Chile (2000/2002)
Giant Magellan Telescope
Las Campanas Observatory,
Chile (planned 2020)
Overwhelmingly Large Telescope
(cancelled)
Tennis court at the same scale
Arecibo radio telescope at the same scale
Basketball court at the same scale



TEASER

A space telescope would use Earth's atmosphere as a lens

As telescopes get bigger — and pricier — one astronomer has a possible work-around: turn Earth's atmosphere into a telescope lens. When light from stars and other objects in the cosmos hits the atmosphere, the light rays bend and are concentrated so they focus on a region of space on the opposite side of Earth. A spacecraft in the right spot — say, orbiting 1.5 million kilometers from Earth — could catch those rays with onboard instruments (illustrated above), collecting more light from dim objects than ground-based telescopes can, says David Kipping of Columbia University. Ultrasensitive measurements by the terrascope, as Kipping calls it, could reveal exoplanet features like mountains or clouds. A study on the concept will appear in *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. But some astronomers have noted the difficulty of blocking light from Earth, as well as possible image blurring due to light entering the atmosphere at different heights. — *Emily Conover*

表 3　望远镜项目列表

	项目名称	所属单位	主科学目标	镜面结构	口径/m
建成项目	50BiN	西华师范大学、中国科学院国家天文台	疏散星团时域测光巡天	双筒单镜面	0.5
	PAST	中国科学院地质与地球物理研究所	太阳系行星系统成像观测（窄带）	单镜面，紫外优化	0.8
	WFST	中国科学技术大学、中国科学院紫金山天文台	墨子望远镜大视场测光巡天	单镜	2.5
	SONG	中国科学院国家天文台	恒星震动、系外行星专用望远镜	奈焦幸运成像，库特光谱	1.0
	AIMS	中国科学院国家天文台	用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统	离轴望远镜	1.0
在建项目	MUST	清华大学	大视场光纤光谱巡天	单镜	6.5
	MASTA	中国科学院紫金山天文台	多应用巡天望远镜	多望远镜（单镜）	有效口径 0.5
	JUST	上海交通大学	光纤光谱巡天	主镜拼接	4.0
	EAST	北京大学	通用望远镜平台	主镜拼接	8.0
	Tido	南京大学	多台望远镜	反射、折射	最大 1.0
	TINTIN	中国科学院地质与地球物理研究所	木星内部结构与木卫一地质活动观测望远镜	通用平台	1.8
	紫金山天文台 4 m	中国科学院	通用光学望远镜	单镜	4.0
规划项目	司天计划	中国科学院国家天文台	大视场时域多色巡天阵列	多望远镜（单镜）	1.0
	大口径（名称待定）	中国科学院国家天文台	通用望远镜平台	主镜拼接	14.5
	LM-Ⅱ	中国科学院国家天文台	大视场光纤光谱巡天	主、副镜拼接	8.0

射电望远镜

- 大气射电窗口：0.75m(408MHz)—1cm(22GHz)
  - 低频电离层吸收
  - 高频水蒸气吸收
- 射电的优势：不被尘埃吸收，可观测银河系中心
- 射电光路设计
  - 接收机在主焦面
  - Cassegrain式

射电望远镜天线技术

- 射电望远镜：馈源和低噪声放大器
  - 馈源收集镜面的射电波
  - 通过低噪声的放大器（低温至接近绝对零度，降噪）放大收集的信号
- 射电噪声：
  - 冷却的放大器：~8K
  - 宇宙微波背景：~3K
  - 来自银河系相对论电子的同步辐射
  - 大气中分子的辐射，特别是水蒸气（高频）

    →高海拔或南极
  - 地面的黑体辐射（~290K）被散射

射电噪声

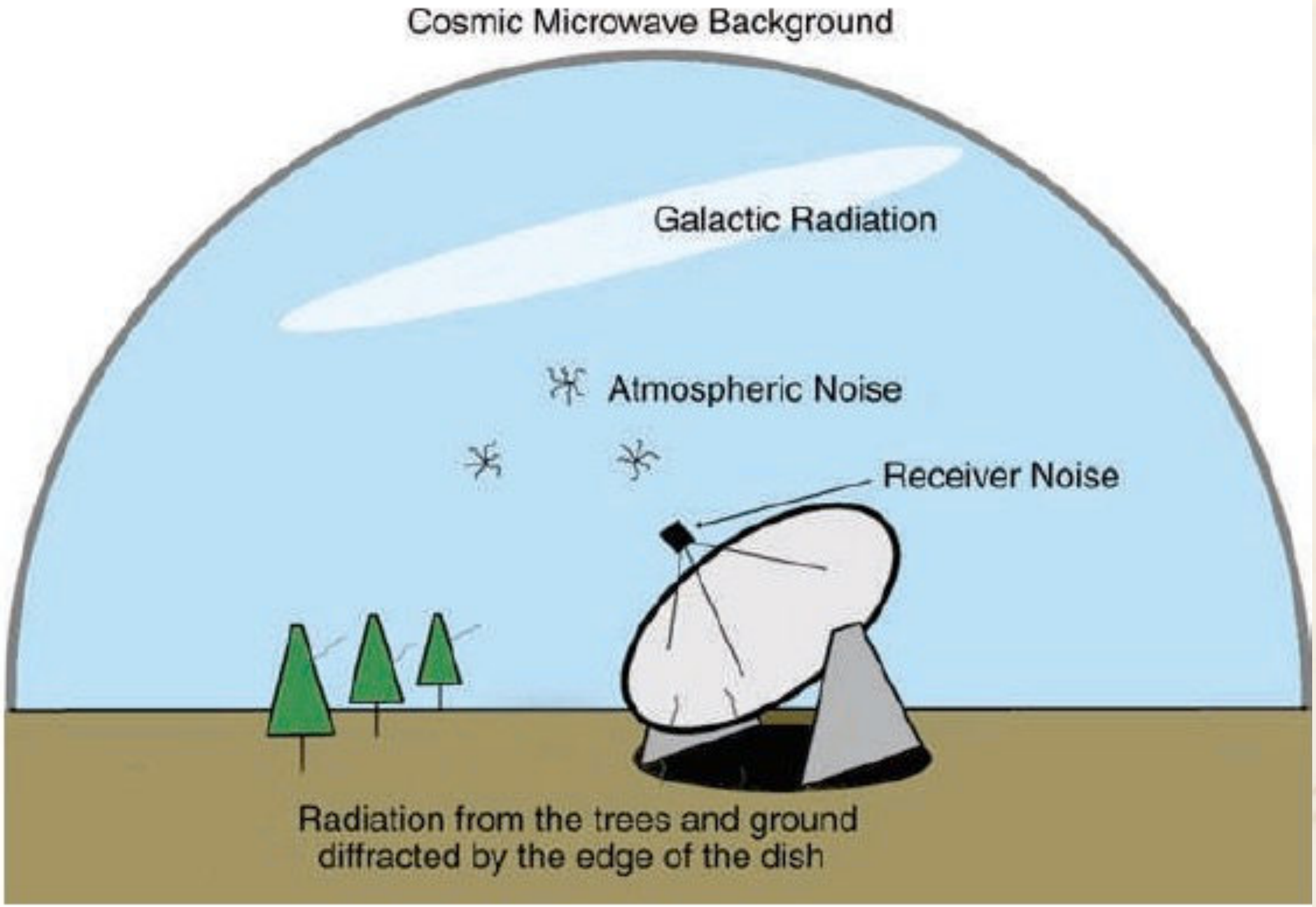

Cosmic Microwave Background
Galactic Radiation
Atmospheric Noise
Receiver Noise
Radiation from the trees and ground diffracted by the edge of the dish

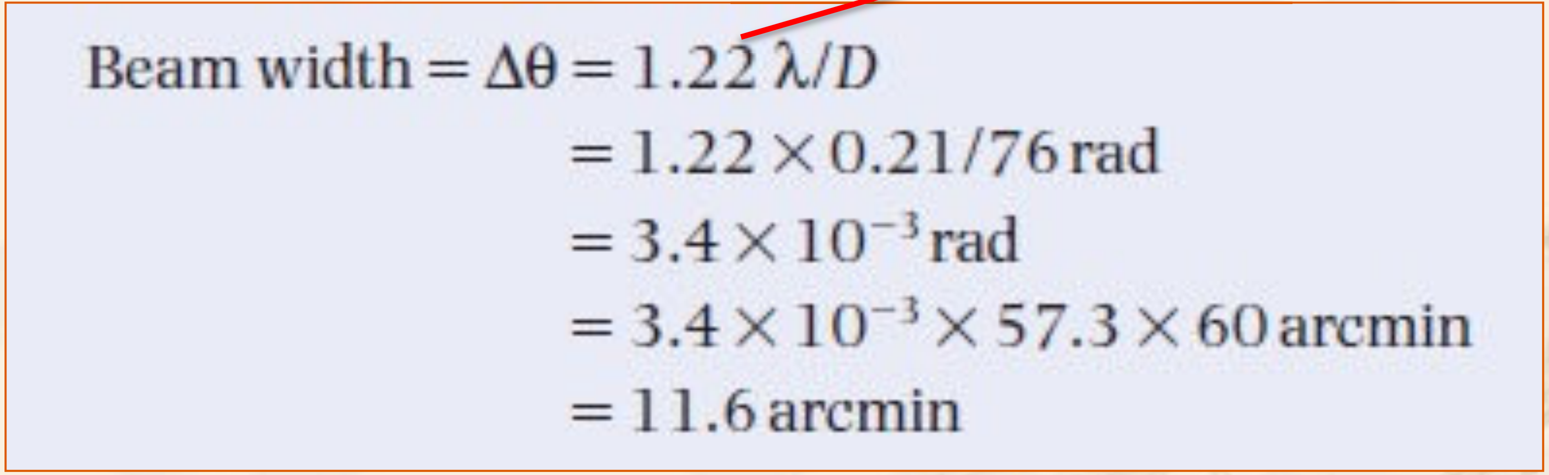
Figure 5.20 The contributions to the total system noise which is typically 25 K.

❖ 射电接收机

- 探测射电信号，记录信号强度
- 模拟信号，数字信号
- 射电分辨率：带宽（Beam width）

镜面：76m， 波长：21cm

1.6



$$\begin{aligned}\text{Beam width} = \Delta\theta &= 1.22\,\lambda/D\\ &= 1.22\times 0.21/76\,\text{rad}\\ &= 3.4\times 10^{-3}\,\text{rad}\\ &= 3.4\times 10^{-3}\times 57.3\times 60\,\text{arcmin}\\ &= 11.6\,\text{arcmin}\end{aligned}$$

比人眼在可见光波段的分辨率还要低12倍！

望远镜的设计

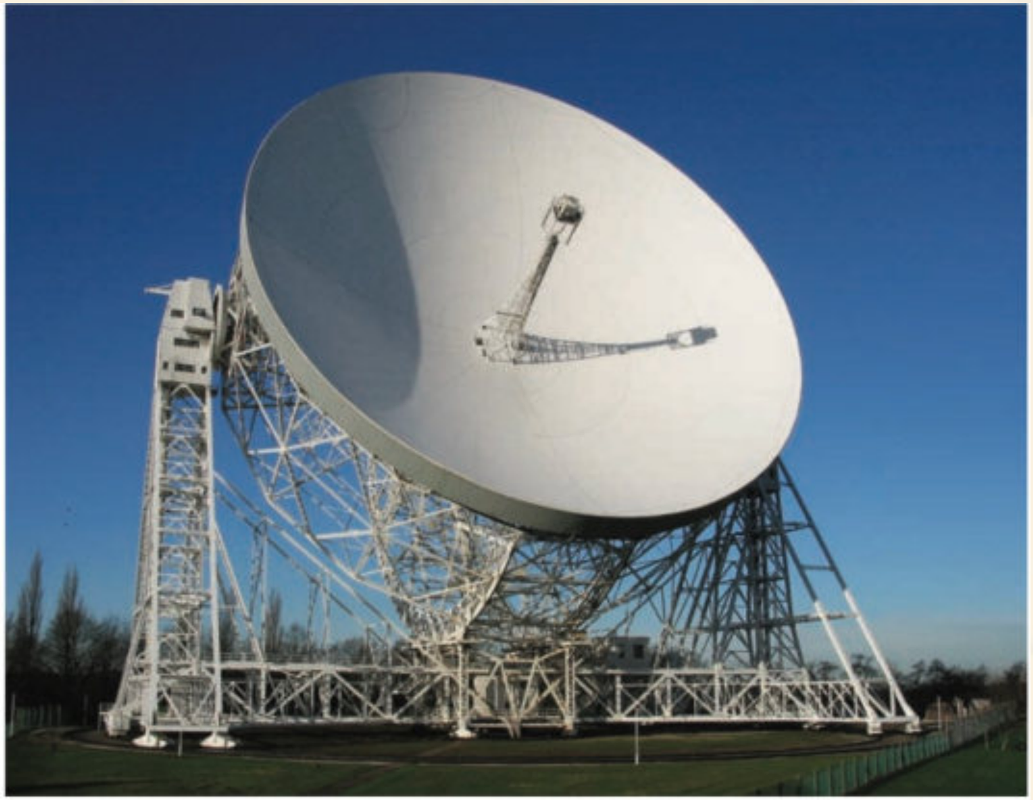


Figure 5.21 The 76-m Lovell Telescope – a prime focus design. Image: Ian Morison.

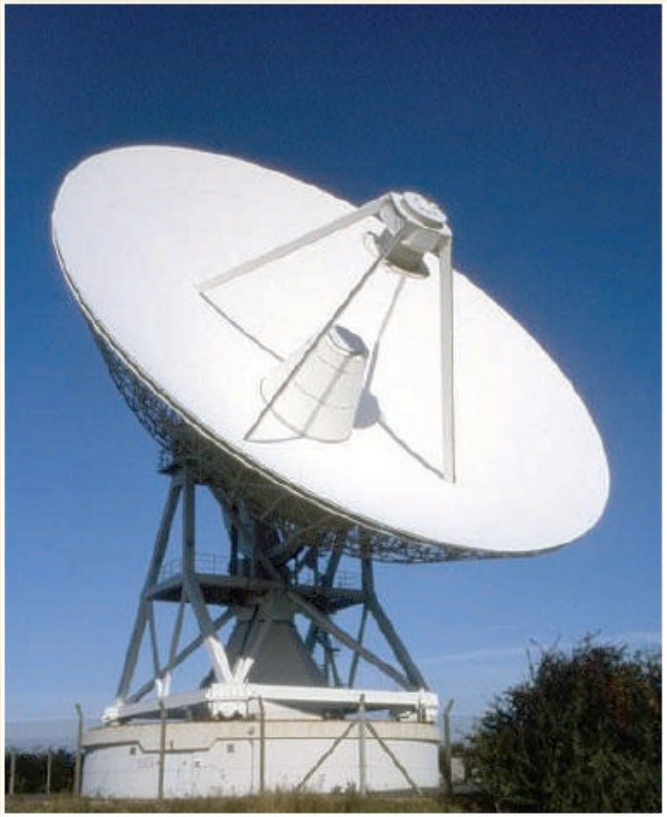
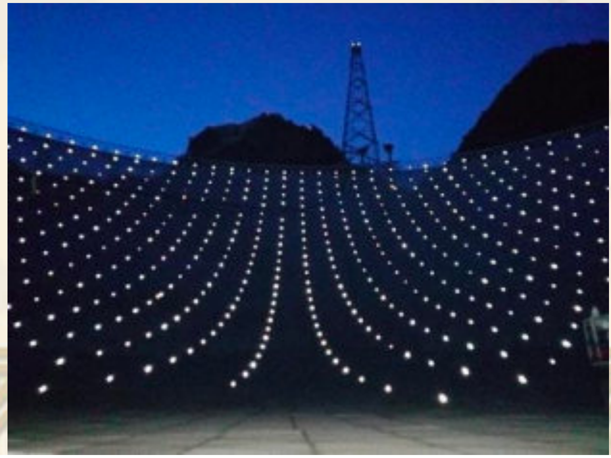


Figure 5.22 The 32-m Cambridge Telescope – a Cassegrain design. The cone houses a carousel supporting four receivers. Image: Ian Morison.

主焦面设计（低频）

Cassegrain设计

- 主焦面设计与Cassegrain设计的优缺点
  - Cassegrain设计的优点：焦平面转盘，可以放许多接收机，便于多频转换
  - 主焦面设计的优点：适合低频
- 主动光学式的设计
  - 镜面转动，引力场导致变形，调整到抛物面（例如FAST）
  - 焦点位置改变，需移动馈源
  - 焦平面放置激光光源，用于测量镜面的形变



Offset-feed 系统

避免光路上的辐射散射产生的噪声

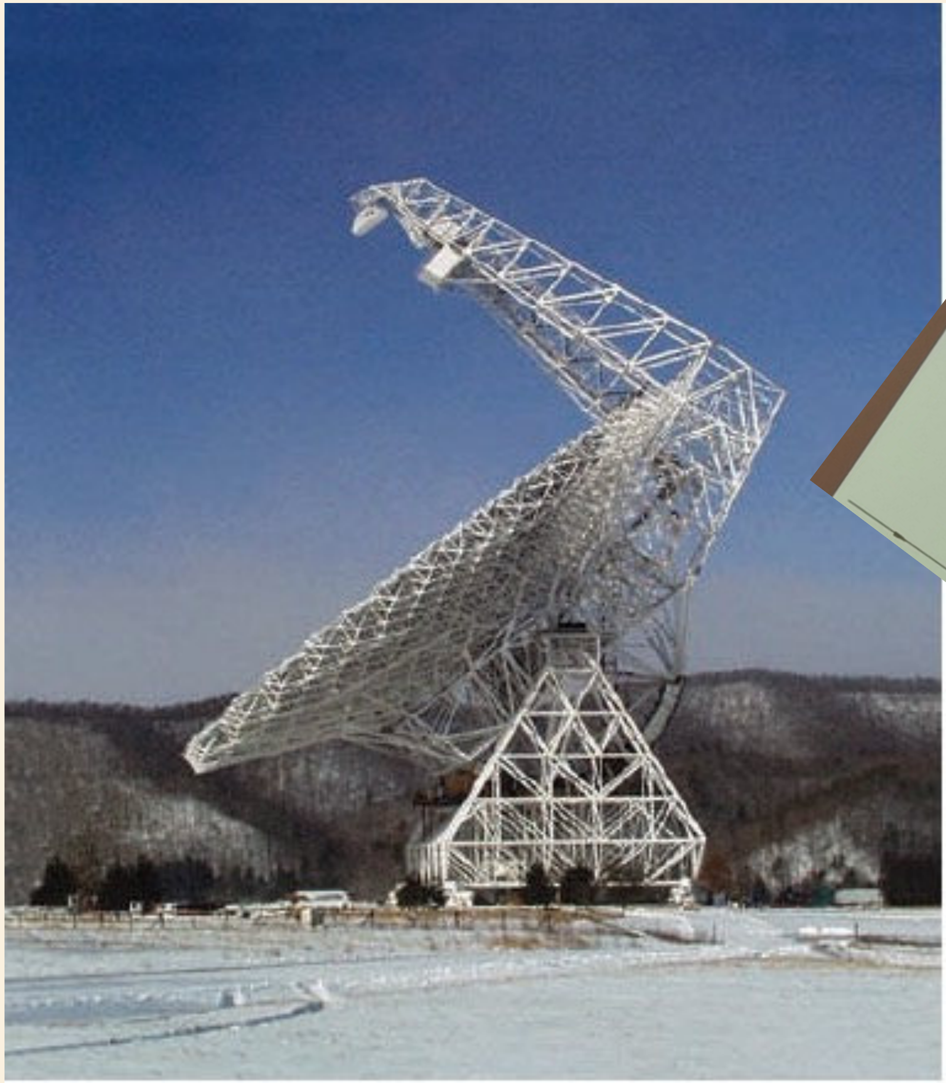
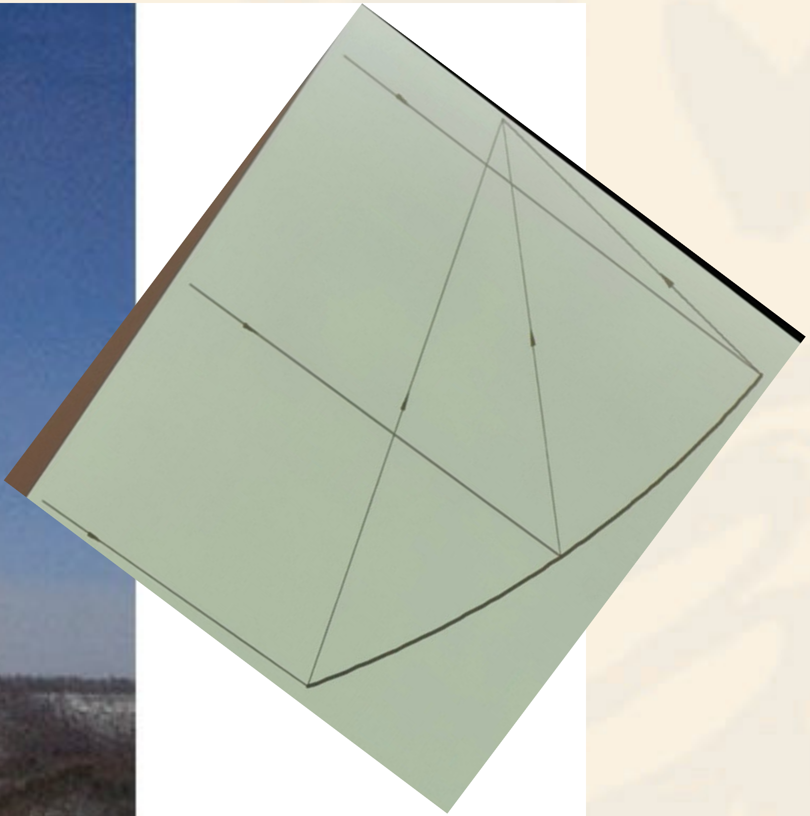


Figure 5.23 The 105-m Robert C. Byrd Green Bank Telescope. Image: National Radio Astronomy Observatory.



单偏置天线

大的固定式的射电望远镜：305m Arecibo 望远镜

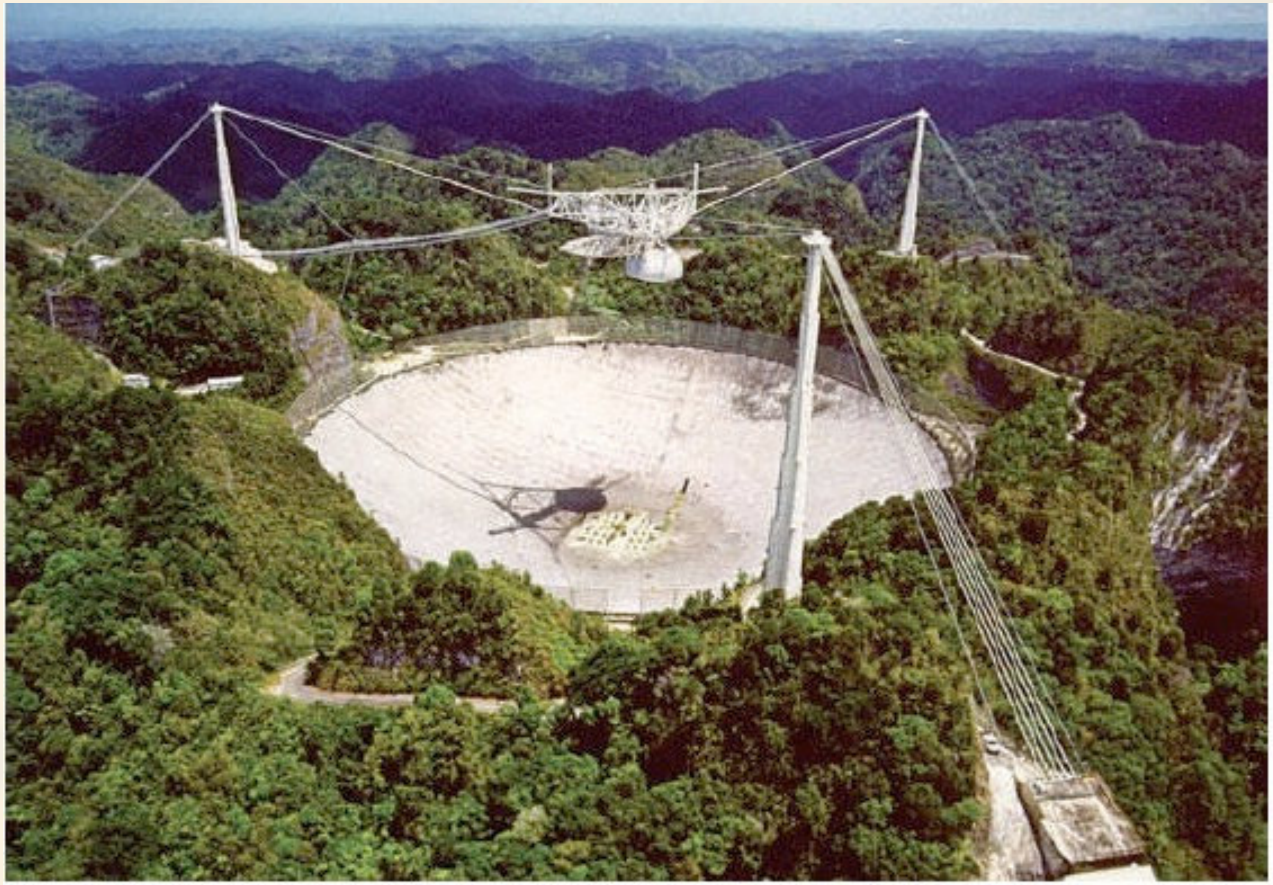
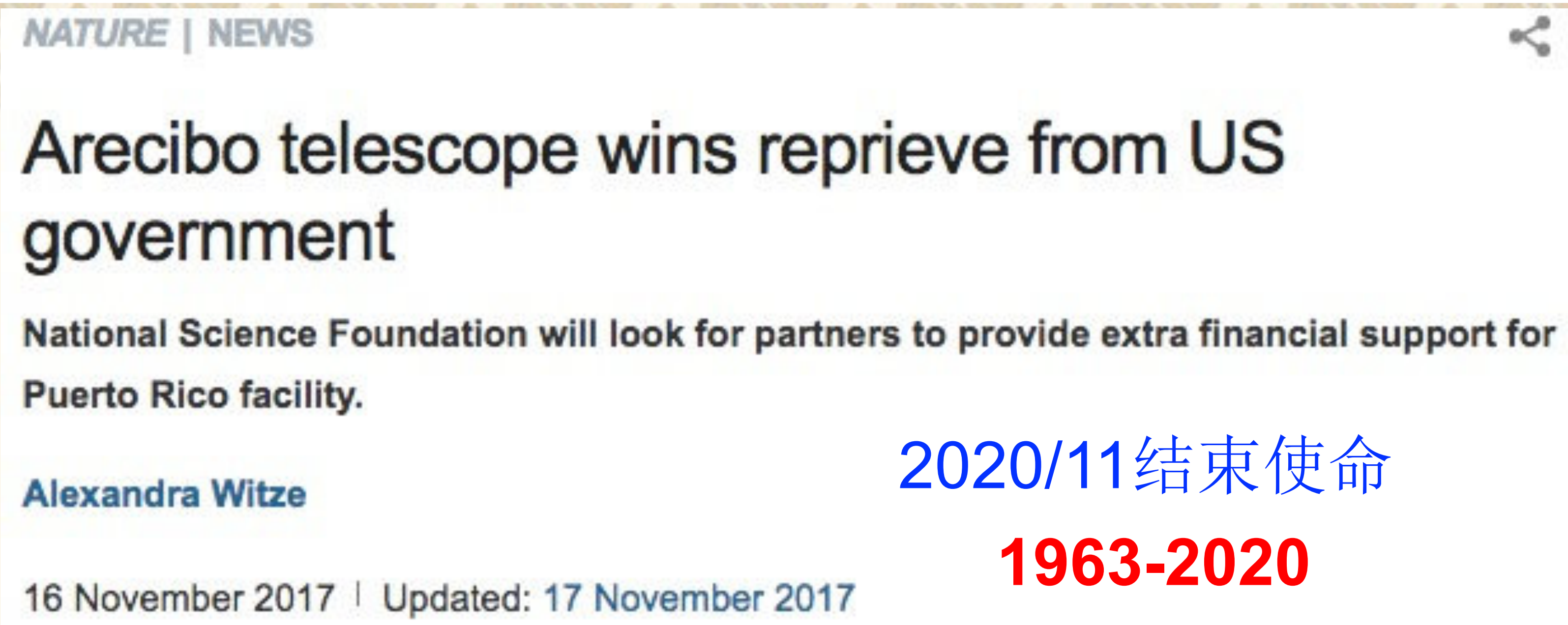


Figure 5.24 The 305-m Arecibo Telescope. Image courtesy of the NAIC – Arecibo Observatory, a facility of the NSF.

主镜球面镜；次镜25m！源移动就移动接收机进行跟踪

No limits. No fears. No substitutes.
007
GOLDENEYE

James Bond
GoldenEye
(1995)



NATURE | NEWS

Arecibo telescope wins reprieve from US government

National Science Foundation will look for partners to provide extra financial support for Puerto Rico facility.

Alexandra Witze

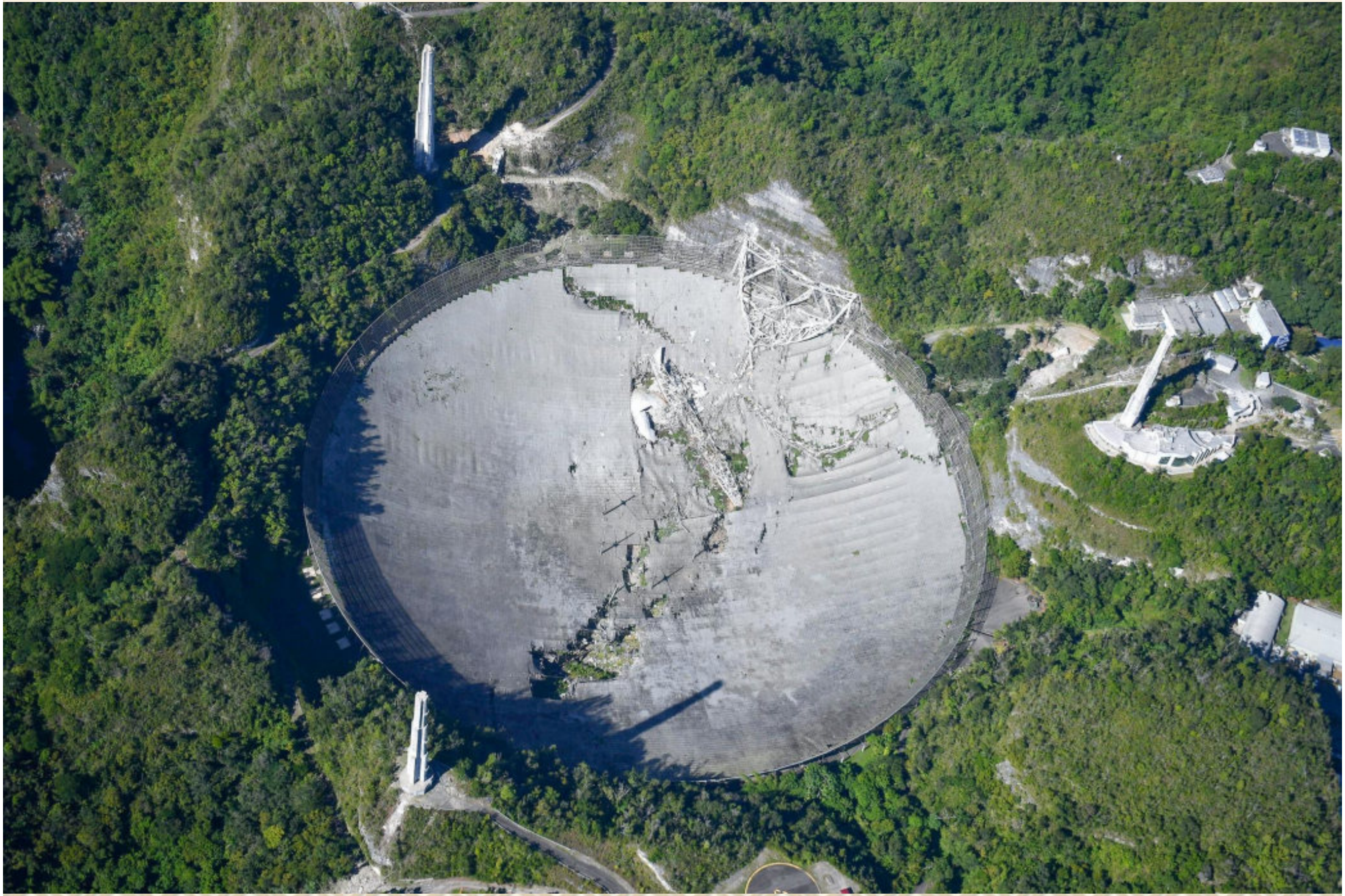
16 November 2017 | Updated: 17 November 2017

2020/11结束使命

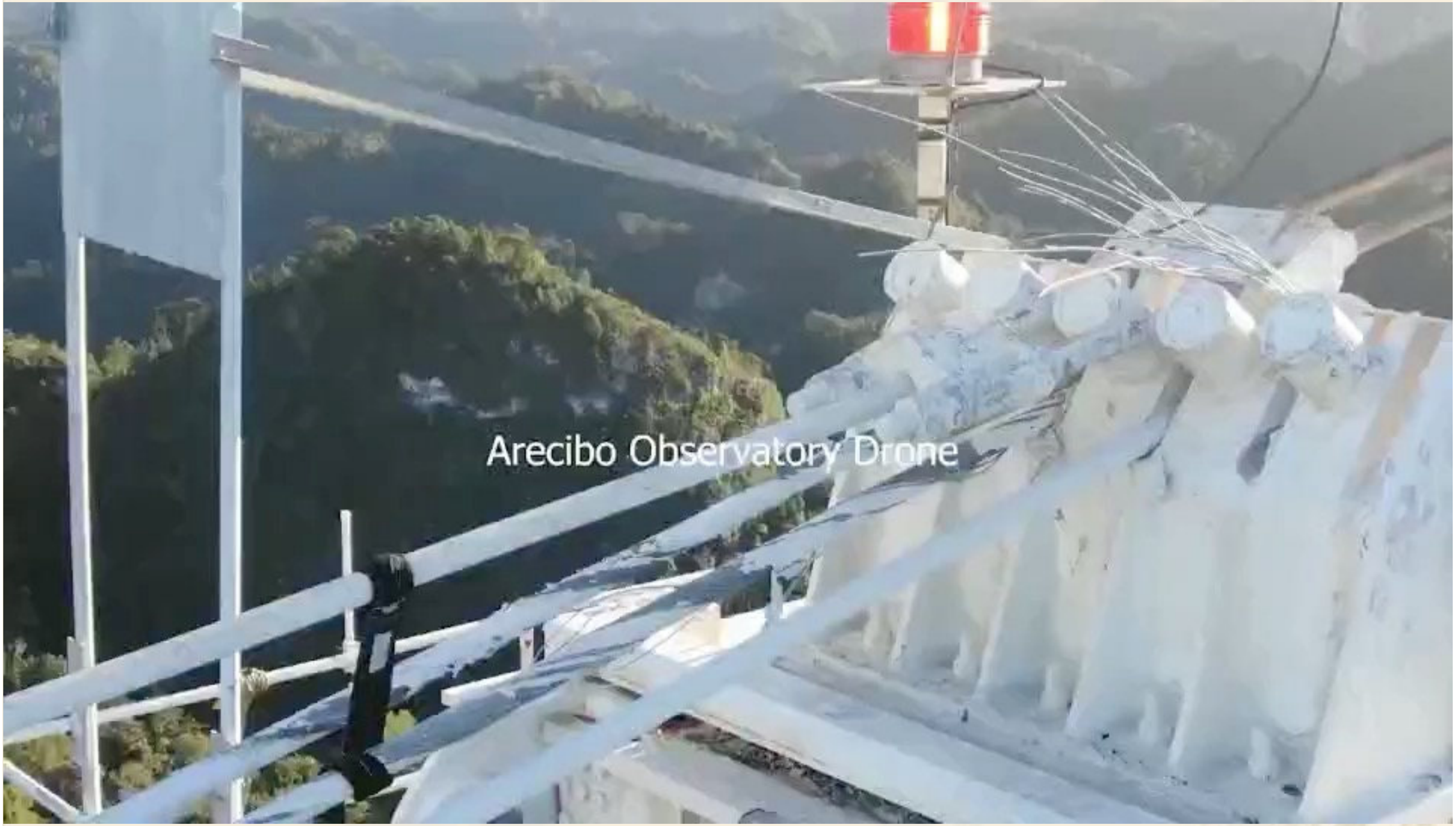
1963-2020

- 测量水星的自转周期
- 发现第一个脉冲星双星
- 发现第一颗毫秒脉冲星
- 发现河外超脉泽
- 发现第一个重复快速射电暴
- 对很多小行星雷达成像
- 发现第一颗地外行星
- “阿雷西博信息”
- SETI搜索外星人计划
- 。。。。。

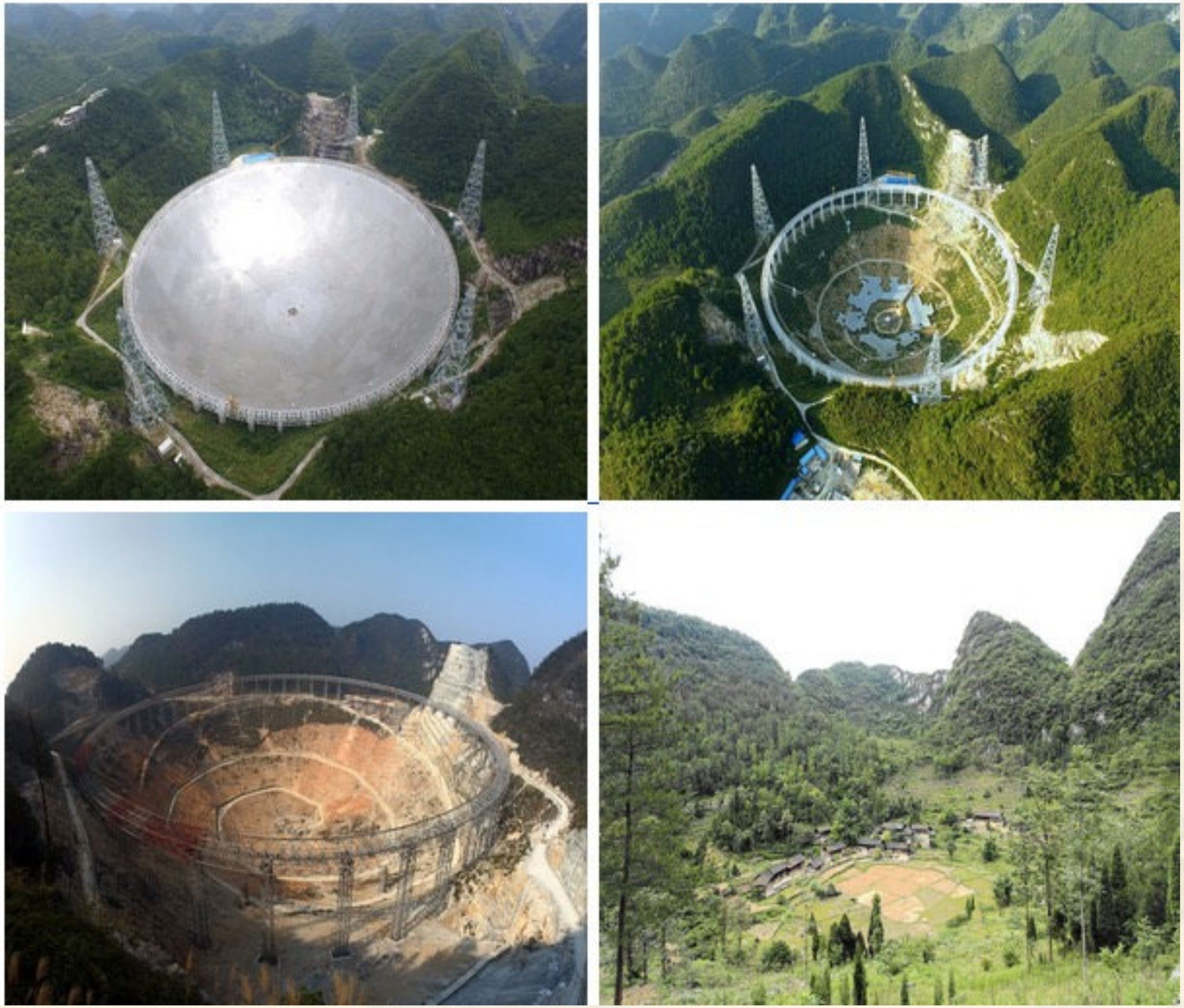
20201201：137米高、900来吨重的观测/馈源平台突然坠毁



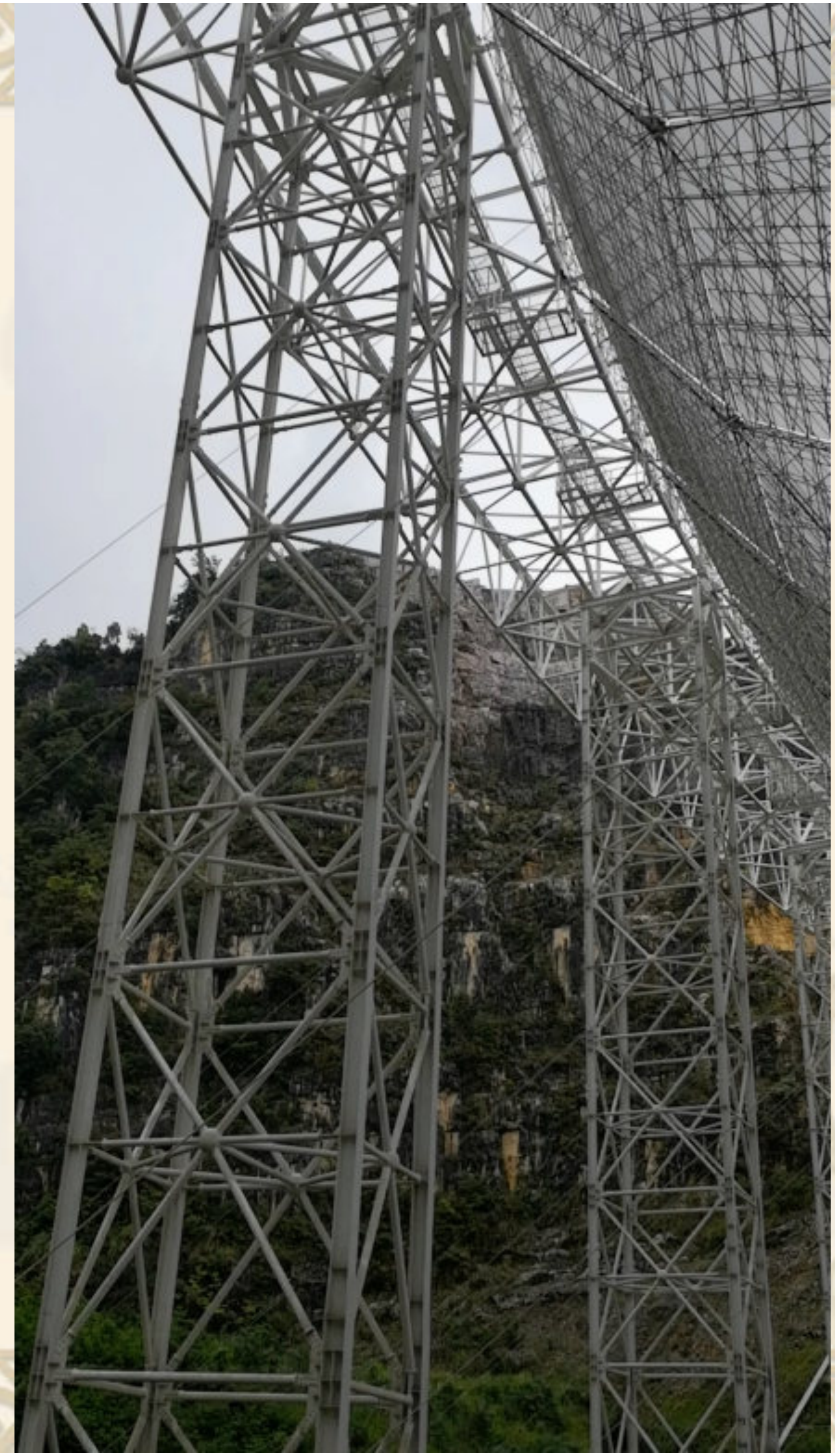
2020/12/01 07:53:50

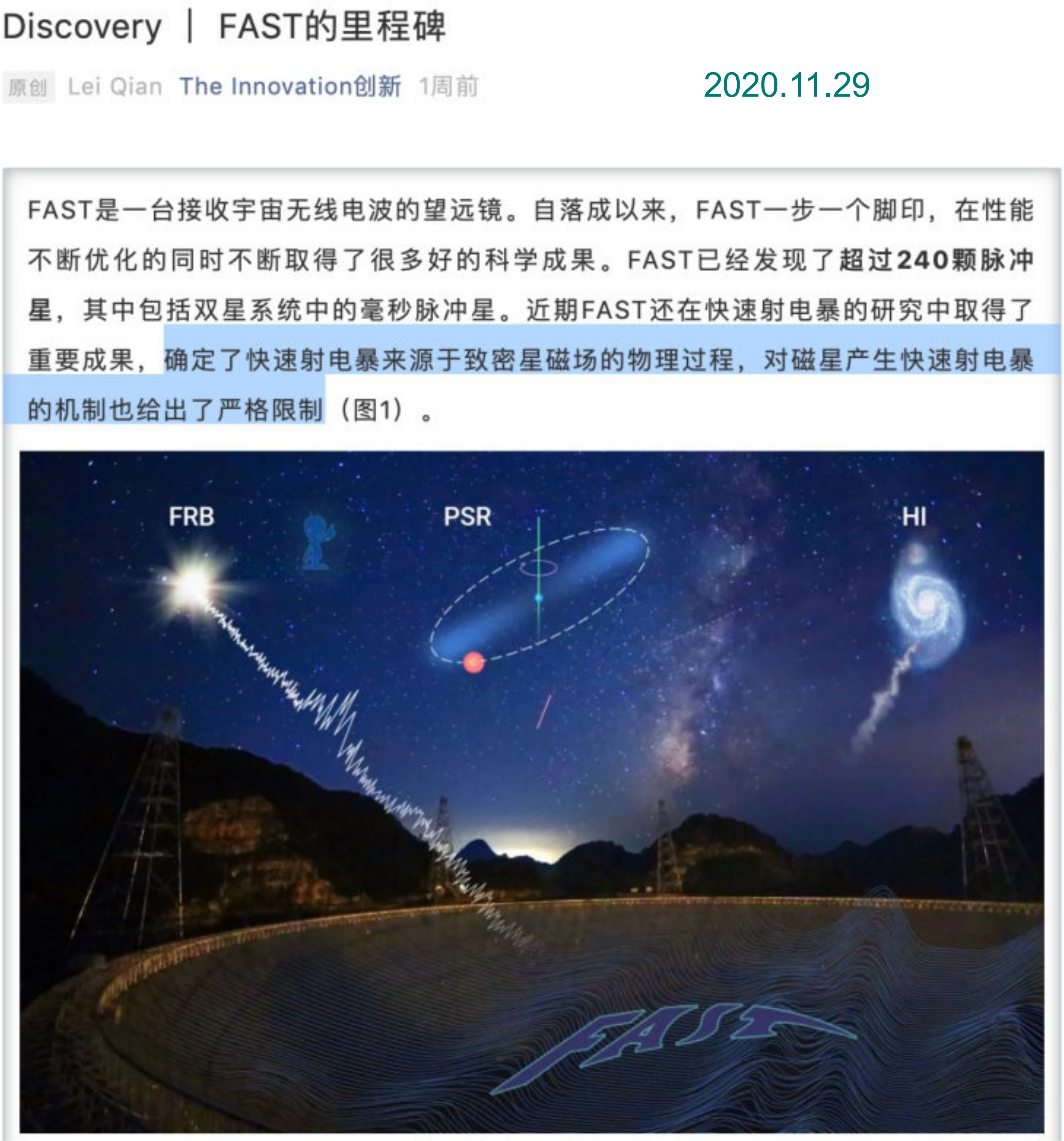

Arecibo Observatory Drone

500米口径球面射电望远镜（FAST）



- 球面反射面被照明部分实时拟合成一个瞬时抛物面
- 反射面由三四千个11米边长的正三角形单元拼合而成。
- 改正了球差，简化了馈源，克服了球反射面线焦造成的窄带效应。
- 利用贵州南部独特的天然喀斯特洼坑可大大降低望远镜工程造价





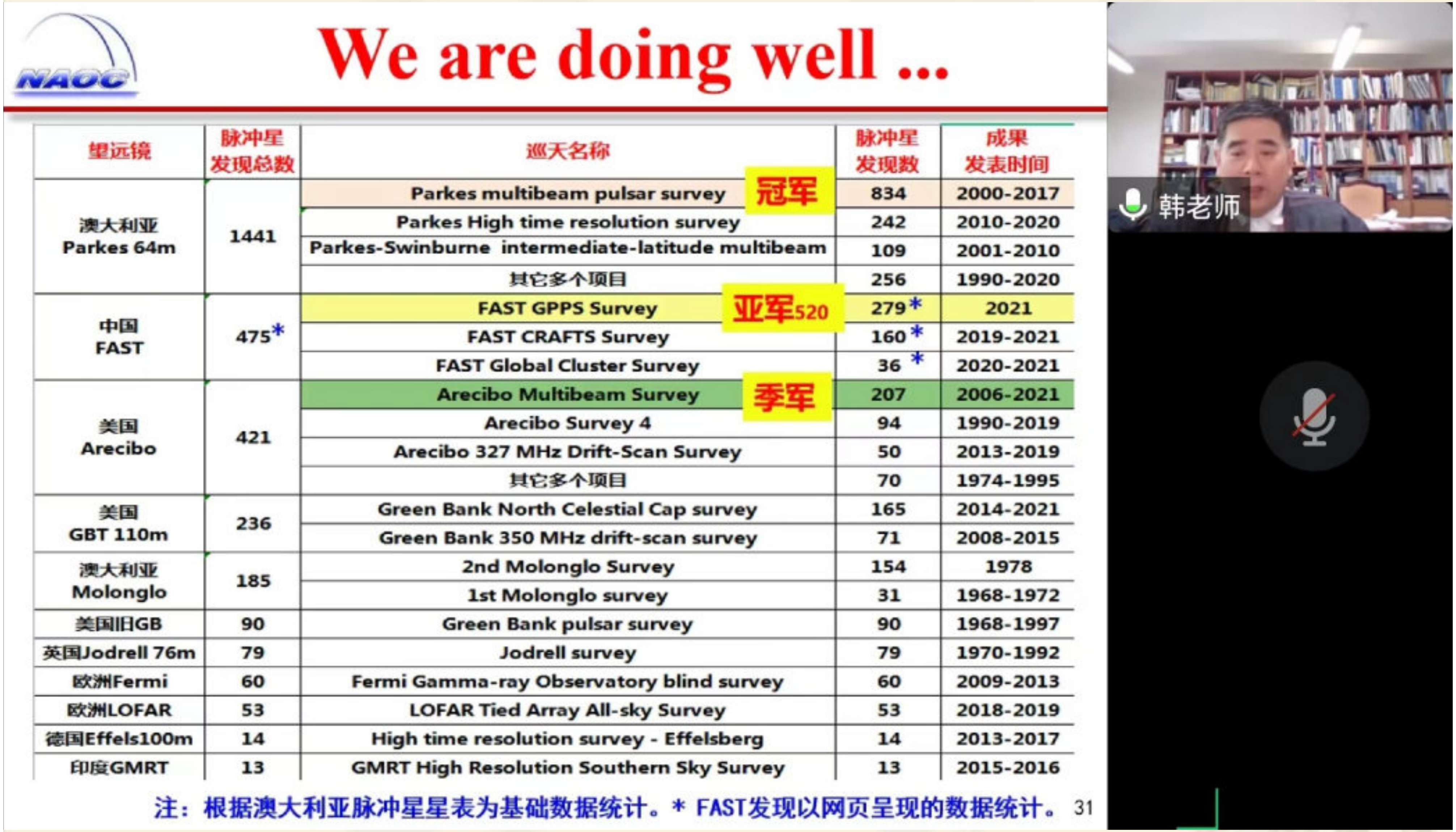
Discovery ｜ FAST的里程碑

原创 Lei Qian The Innovation创新 1周前

FAST是一台接收宇宙无线电波的望远镜。自落成以来，FAST一步一个脚印，在性能不断优化的同时不断取得了很多好的科学成果。FAST已经发现了**超过240颗**脉冲星，其中包括双星系统中的毫秒脉冲星。近期FAST还在快速射电暴的研究中取得了重要成果，确定了快速射电暴来源于致密星磁场的物理过程，对磁星产生快速射电暴的机制也给出了严格限制（图1）。

2020.11.29

FAST中性氢星系巡天研究最新进展

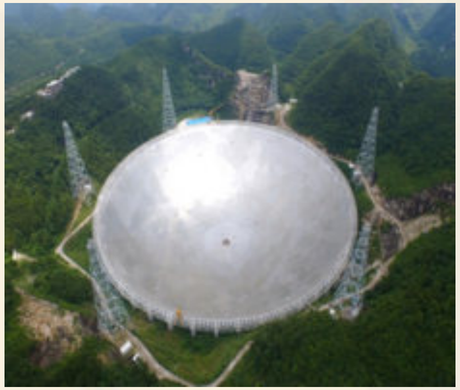


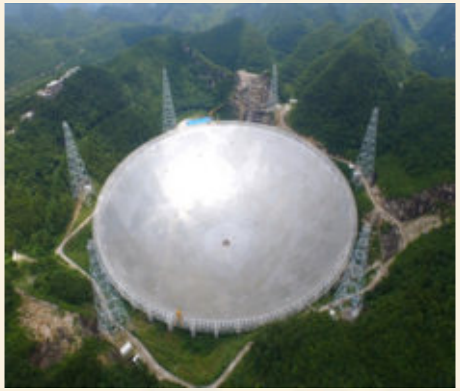
We are doing well ...

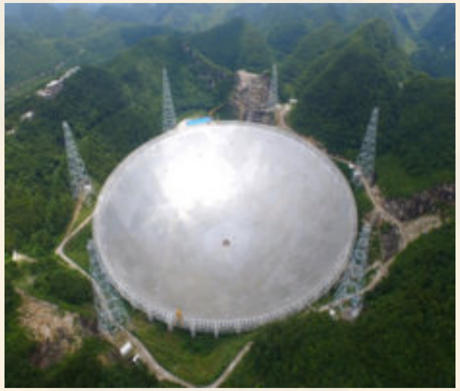
望远镜	脉冲星发现总数	巡天名称	脉冲星发现数	成果发表时间
澳大利亚 Parkes 64m	1441	Parkes multibeam pulsar survey 冠军	834	2000-2017
		Parkes High time resolution survey	242	2010-2020
		Parkes-Swinburne intermediate-latitude multibeam	109	2001-2010
		其它多个项目	256	1990-2020
中国 FAST	475*	FAST GPPS Survey 亚军520	279*	2021
		FAST CRAFTS Survey	160*	2019-2021
		FAST Global Cluster Survey	36*	2020-2021
美国 Arecibo	421	Arecibo Multibeam Survey 季军	207	2006-2021
		Arecibo Survey 4	94	1990-2019
		Arecibo 327 MHz Drift-Scan Survey	50	2013-2019
		其它多个项目	70	1974-1995
美国 GBT 110m	236	Green Bank North Celestial Cap survey	165	2014-2021
		Green Bank 350 MHz drift-scan survey	71	2008-2015
澳大利亚 Molonglo	185	2nd Molonglo Survey	154	1978
		1st Molonglo survey	31	1968-1972
美国旧GB	90	Green Bank pulsar survey	90	1968-1997
英国Jodrell 76m	79	Jodrell survey	79	1970-1992
欧洲Fermi	60	Fermi Gamma-ray Observatory blind survey	60	2009-2013
欧洲LOFAR	53	LOFAR Tied Array All-sky Survey	53	2018-2019
德国Effels100m	14	High time resolution survey - Effelsberg	14	2013-2017
印度GMRT	13	GMRT High Resolution Southern Sky Survey	13	2015-2016

注：根据澳大利亚脉冲星星表为基础数据统计。* FAST发现以网页呈现的数据统计。

（韩金林　国家天文台@2022.12）

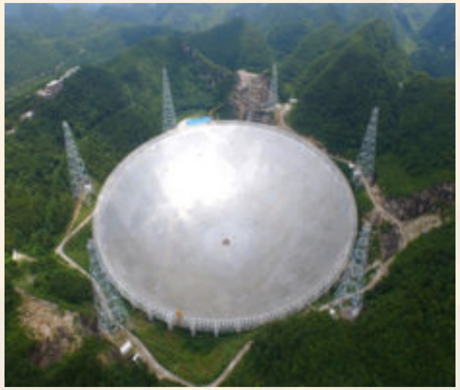


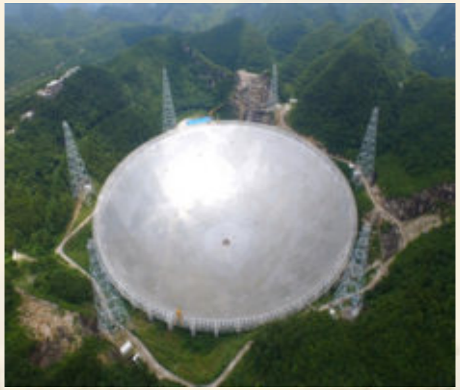


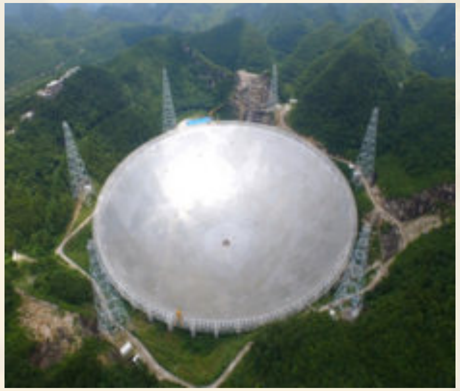


FASTA

！！！



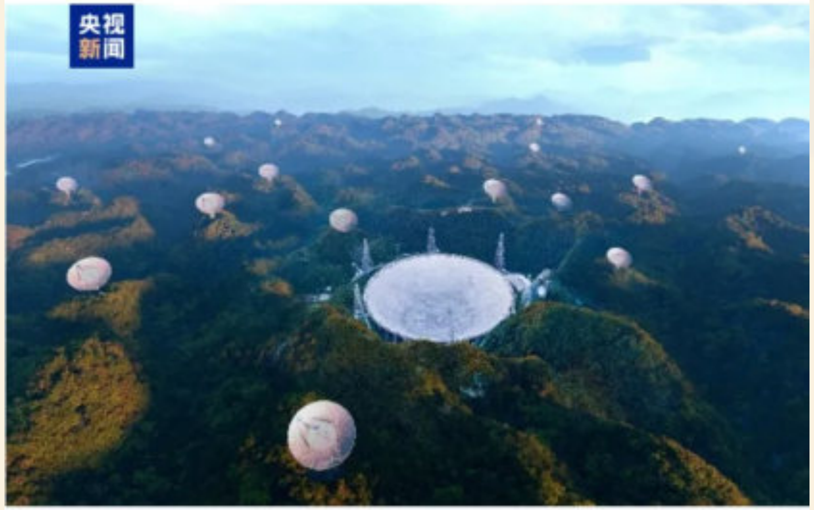




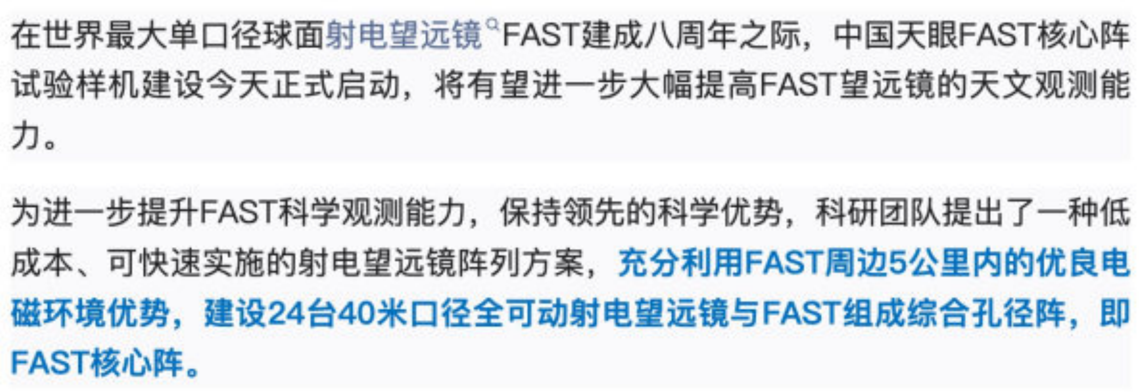
中国天眼阵来了！FAST核心阵试验样机建设启动

央视 行星防御与利用 2024年09月26日 07:12 山西

FAST核心阵将有效提升观测分辨率和成像能力

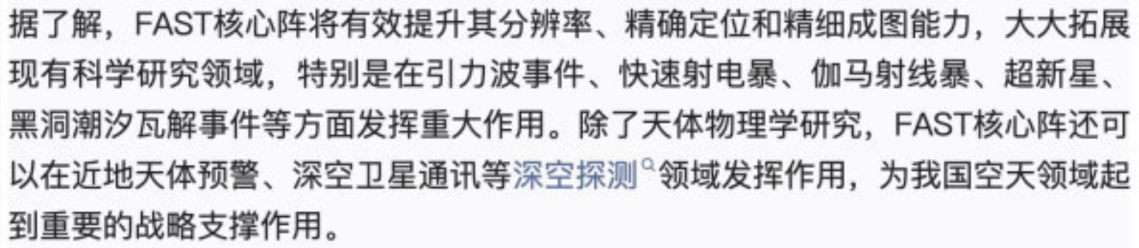


△FAST核心阵效果图



在世界最大单口径球面射电望远镜FAST建成八周年之际，中国天眼FAST核心阵试验样机建设今天正式启动，将有望进一步大幅提高FAST望远镜的天文观测能力。

为进一步提升FAST科学观测能力，保持领先的科学优势，科研团队提出了一种低成本、可快速实施的射电望远镜阵列方案，**充分利用FAST周边5公里内的优良电磁环境优势，建设24台40米口径全可动射电望远镜与FAST组成综合孔径阵，即FAST核心阵。**



据了解，FAST核心阵将有效提升其分辨率、精确定位和精细成图能力，大大拓展现有科学研究领域，特别是在引力波事件、快速射电暴、伽马射线暴、超新星、黑洞潮汐瓦解事件等方面发挥重大作用。除了天体物理学研究，FAST核心阵还可以在近地天体预警、深空卫星通讯等深空探测领域发挥作用，为我国空天领域起到重要的战略支撑作用。

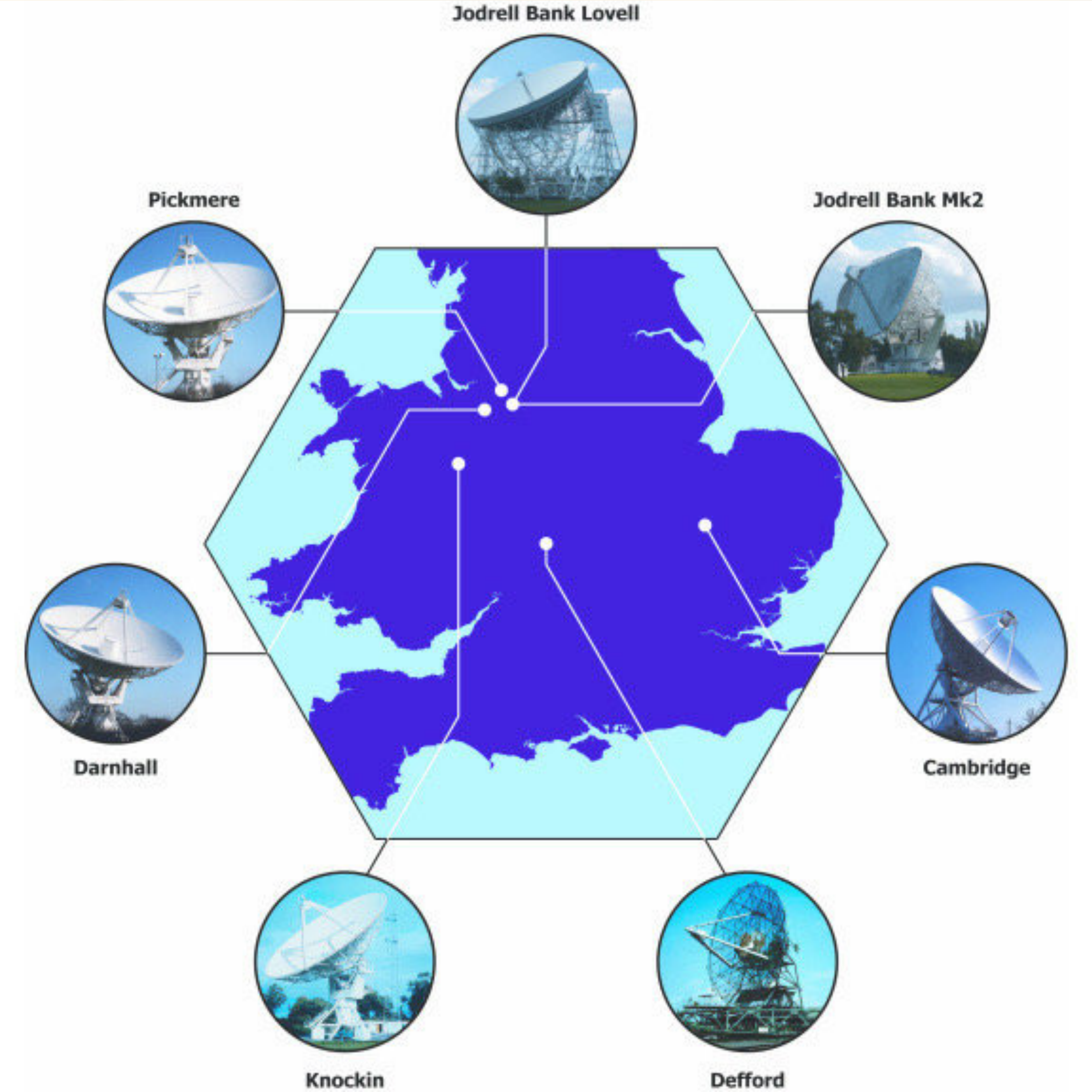
天线阵

- 地球转动综合孔径技术
- 三个主要的天线阵
  - Very Large Array（VLA）
  - MERLIN
  - Giant Metre Radio Telescope （GMRT）

VLA

- 美国新墨西哥州
- Y型：25m X 27
- 最长：36 km
- 工作波长：0.7-400 cm

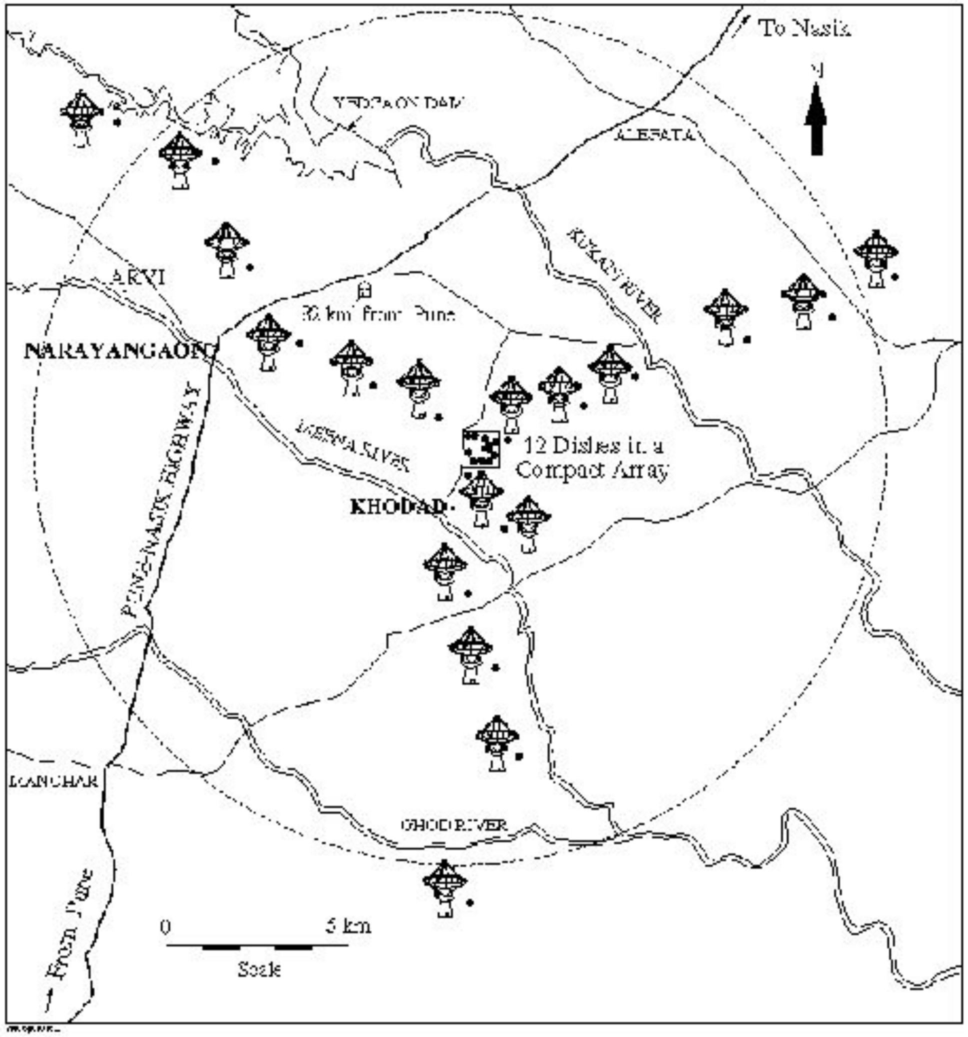
MERLIN


Jodrell Bank Lovell
Pickmere
Jodrell Bank Mk2
Darnhall
Cambridge
Knockin
Defford

- 英国
- 总尺度：217 km
- 5x25m+32m+76m
- 工作波长：1.3-74cm

$$
\begin{aligned}
\Delta\theta &= 1.22\,\lambda/D \\
&= 1.22\times 0.05/217\,000\,\mathrm{rad} \\
&= 2.8\times 10^{-7}\,\mathrm{rad} \\
&= 2.8\times 10^{-7}\times 57.3\times 3600\,\mathrm{arcsec} \\
&= 0.06\,\mathrm{arcsec}
\end{aligned}
$$

LOCATIONS OF GMRT ANTENNAS (30 dishes)


To Nasik
N
YEDGAON DAM
ALEFATA
KUKADI RIVER
ARVI
80 km from Pune
NARAYANGAON
PUNE-NASIK HIGHWAY
MEENA RIVER
12 Dishes in a Compact Array
KHODAD
MANCHAR
GHOD RIVER
0
5 km
Scale
From Pune

GMRT

- 印度
- 30x45m，14个在1 km^2之内，其它16个呈Y型
- 最大尺度：25km
- 工作波长：6m-21cm

甚长基线干涉仪（VLBI）

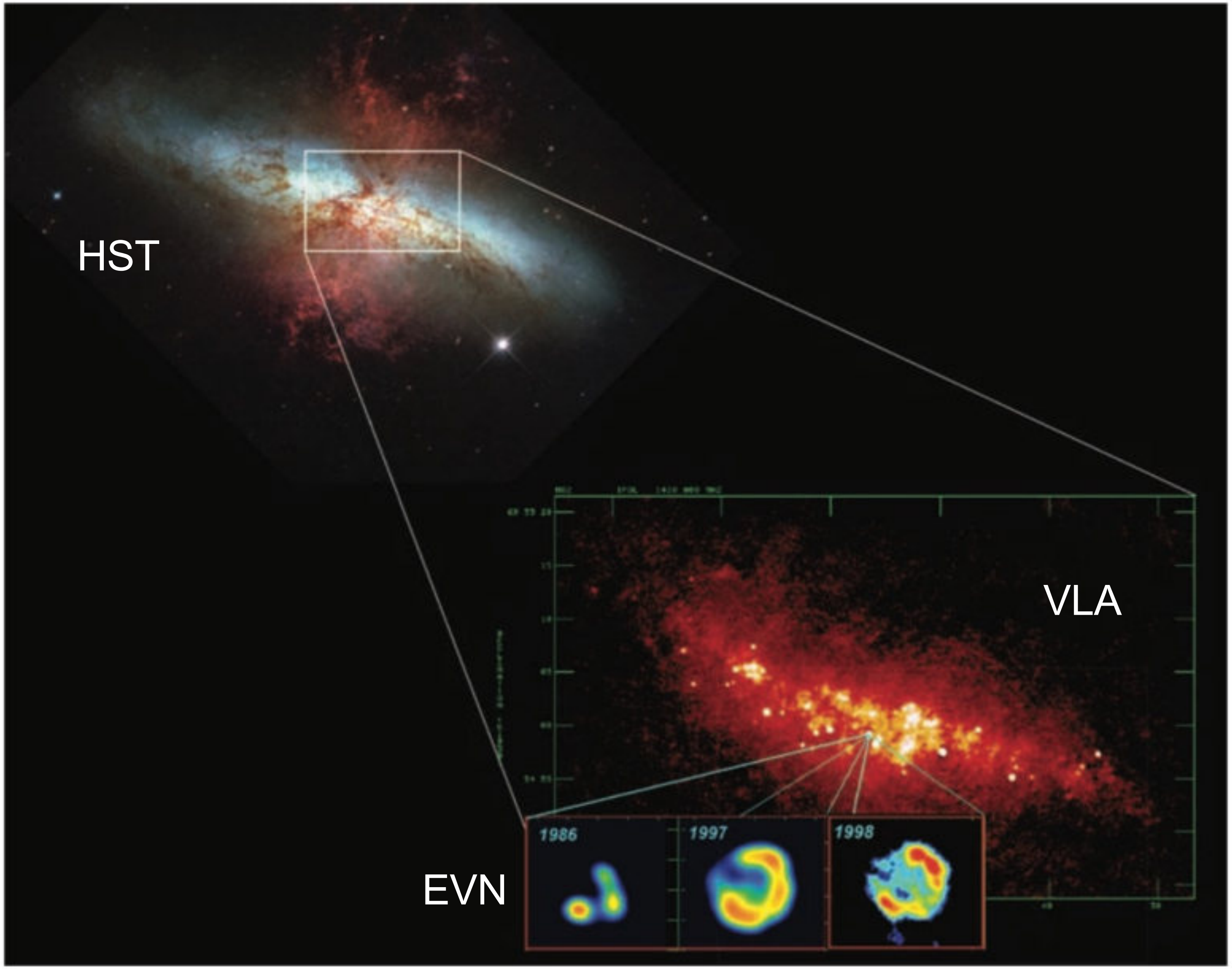
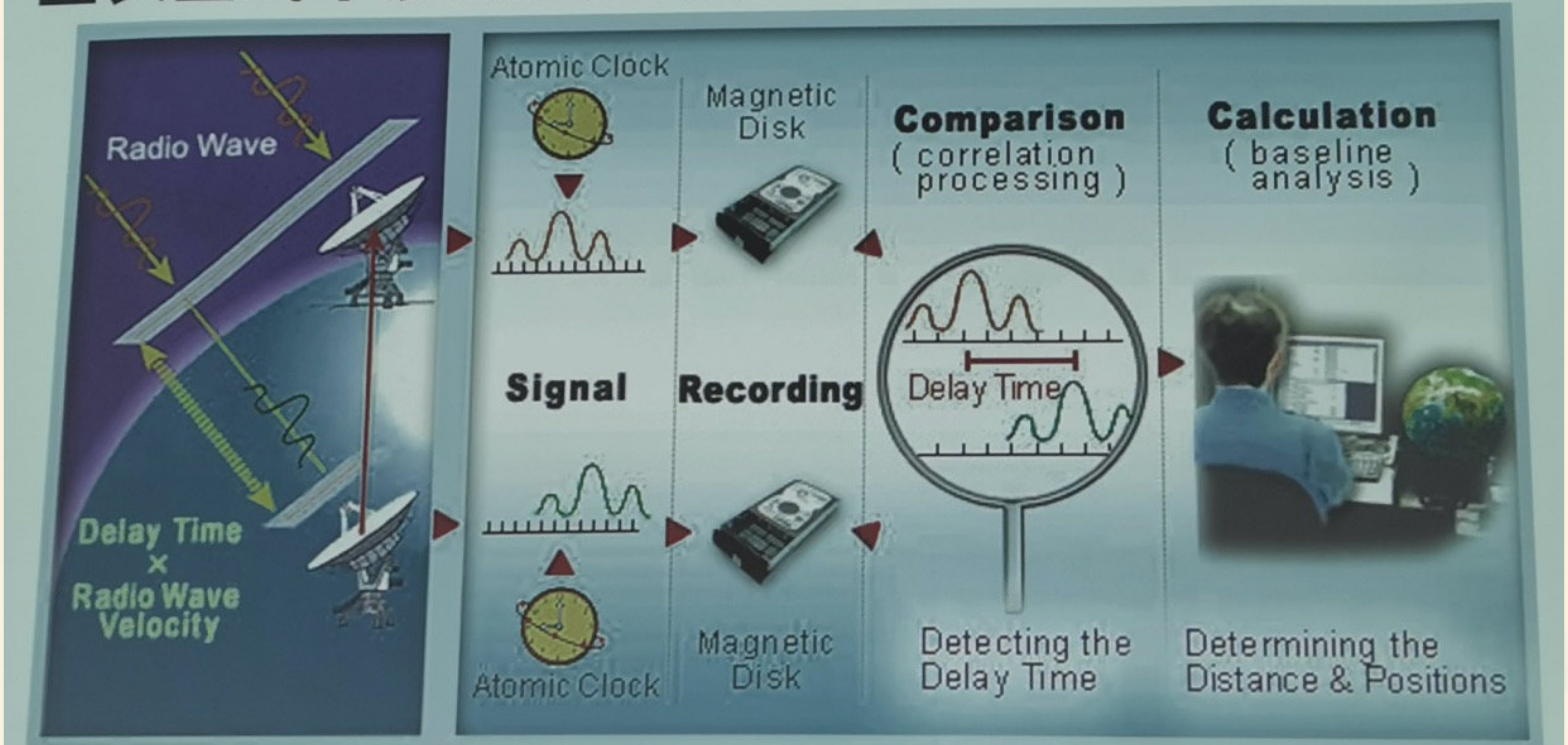


Figure 5.26 The starburst galaxy M82. Upper left: Hubble Space Telescope image of M82 in visible light. Lower right: VLA and MERLIN radio image of the central part of M82 with, below, EVN images of an expanding supernova remnant. Image: Hubble Space Telescope Institute, NASA and the University of Manchester.

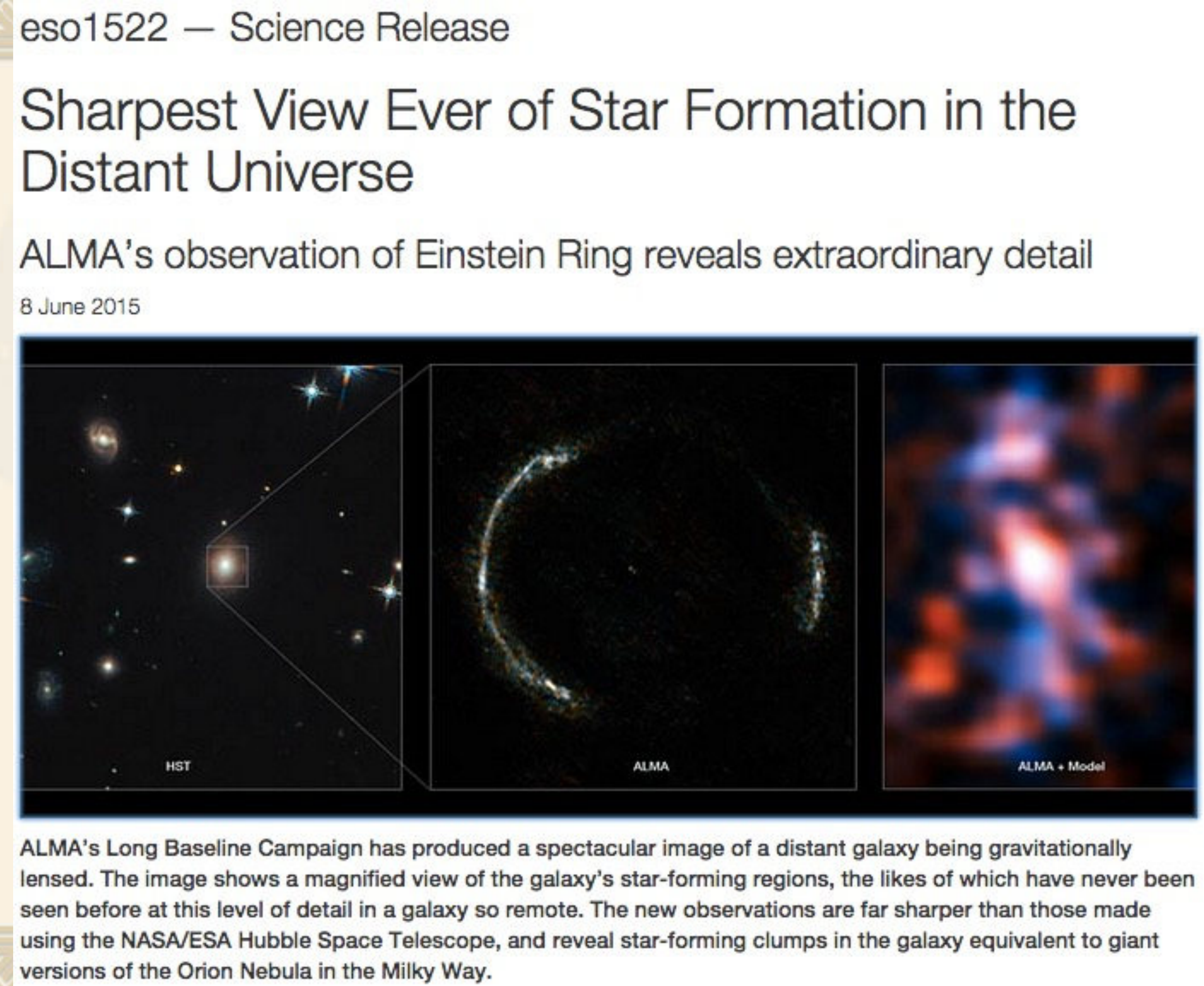
- EVN（欧洲VLBI网络）
- 原子钟
- 角分辨率可以达到：1毫角秒

Very Long Baseline Interferometry
甚长基线干涉测量 - 最高分辨率天文观测技术


Radio Wave
Delay Time
×
Radio Wave
Velocity
Atomic Clock
Signal
Atomic Clock
Magnetic
Disk
Recording
Magnetic
Disk
Comparison
(correlation
processing)
Delay Time
Detecting the
Delay Time
Calculation
(baseline
analysis)
Determining the
Distance & Positions

ALMA： Atacama Large Millimeter Array

- 智利Atacama沙漠
- 海拔：5000 m（水蒸汽少）
- 工作波长：0.3-10 mm
- 66个天线，最大相距16公里
- 观测宇宙中气体云和尘埃，恒星形成细节(0.01角秒)



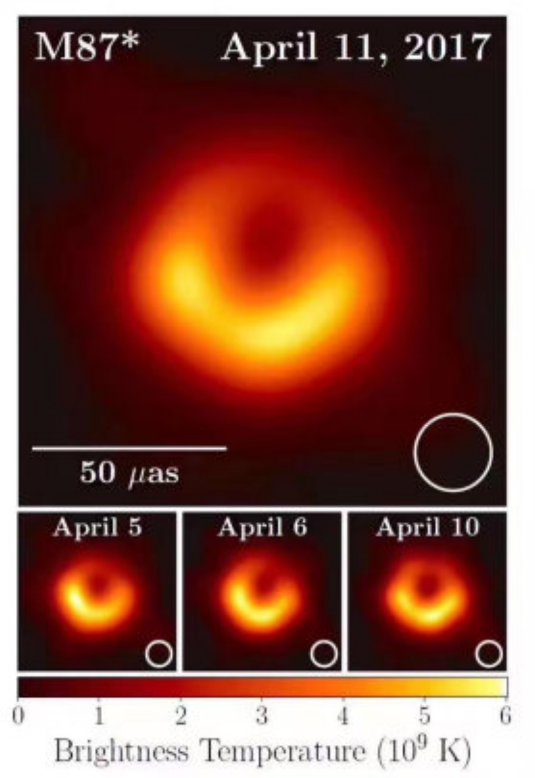
eso1522 — Science Release

Sharpest View Ever of Star Formation in the Distant Universe

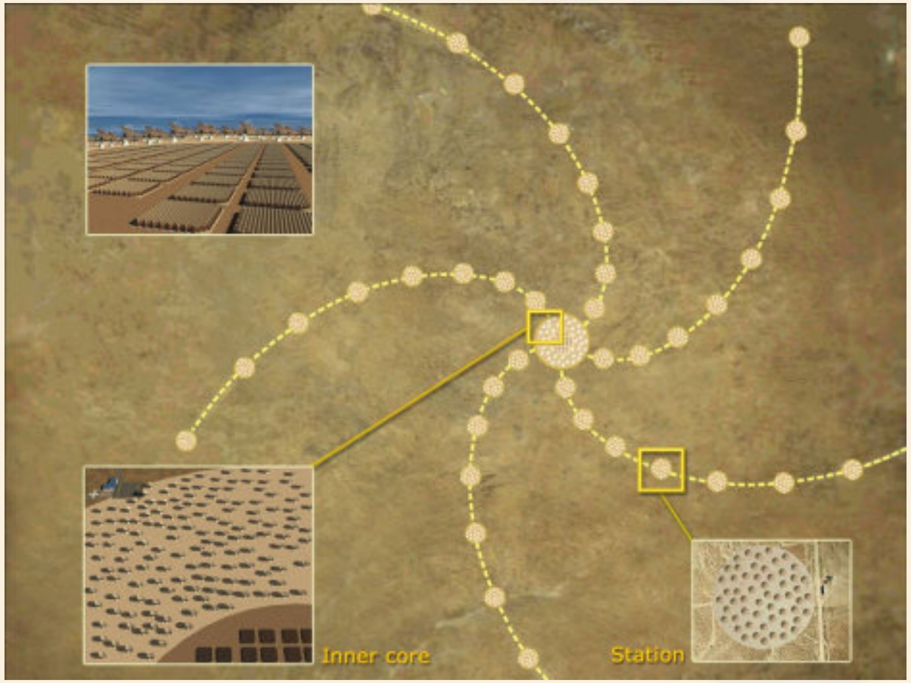
ALMA's observation of Einstein Ring reveals extraordinary detail

8 June 2015

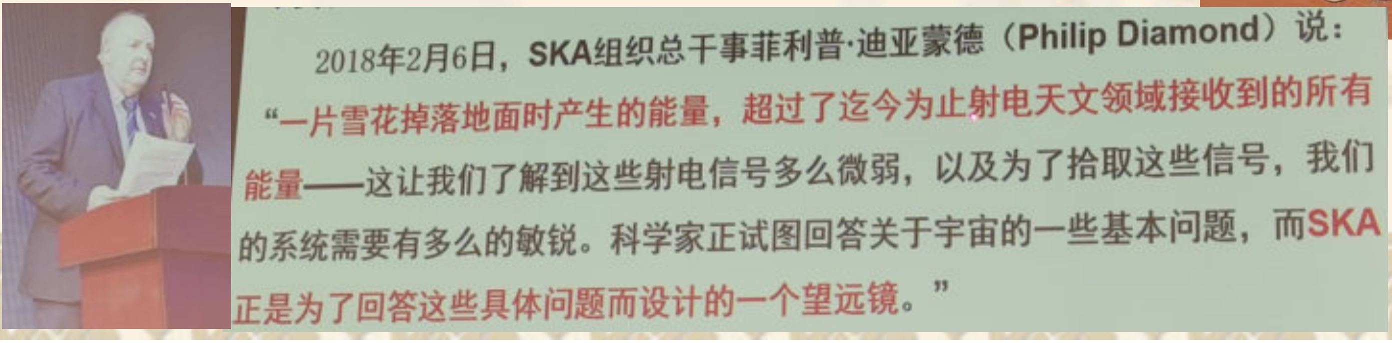
ALMA's Long Baseline Campaign has produced a spectacular image of a distant galaxy being gravitationally lensed. The image shows a magnified view of the galaxy's star-forming regions, the likes of which have never been seen before at this level of detail in a galaxy so remote. The new observations are far sharper than those made using the NASA/ESA Hubble Space Telescope, and reveal star-forming clumps in the galaxy equivalent to giant versions of the Orion Nebula in the Milky Way.


M87*
April 11, 2017
50 μas
April 5
April 6
April 10
0
1
2
3
4
5
6
Brightness Temperature (10⁹ K)

SKA：Square Kilometer Array

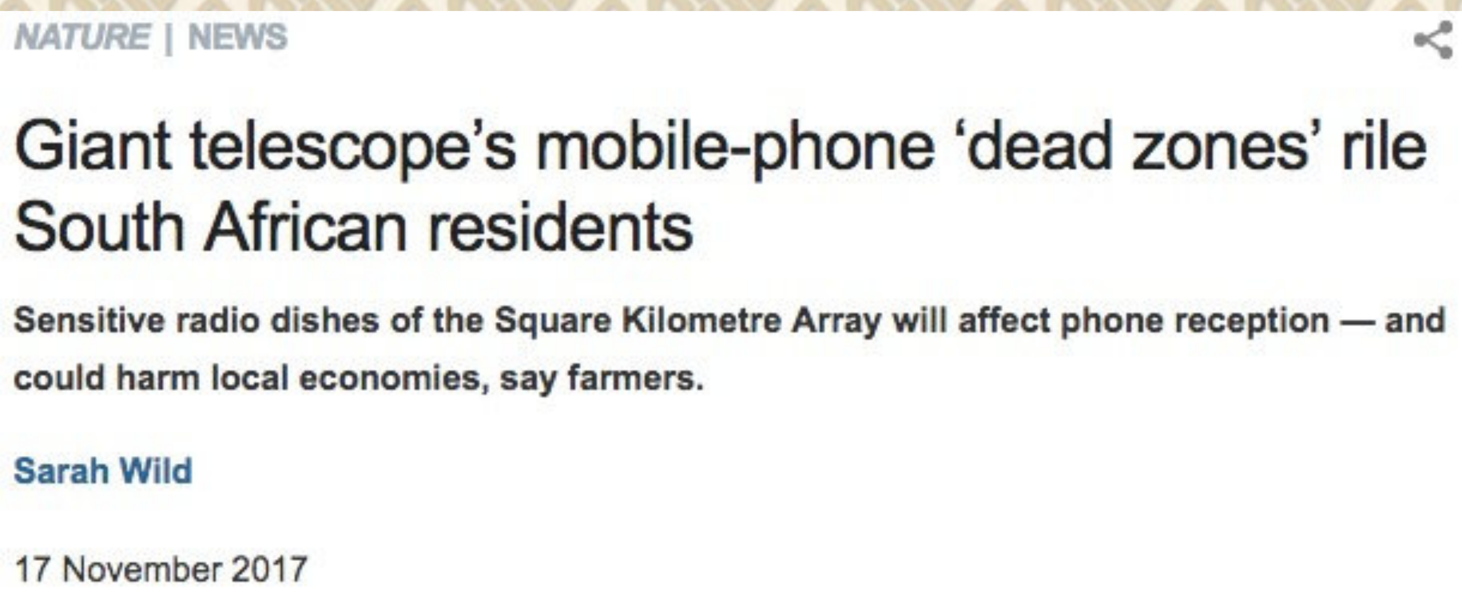


- •澳大利亚、南非等
- •有效面积：1km^2
- •中性氢、氦（dark age；第一代恒星）
- •2019开建



2018年2月6日，SKA组织总干事菲利普·迪亚蒙德（Philip Diamond）说：

"一片雪花掉落地面时产生的能量，超过了迄今为止射电天文领域接收到的所有能量——这让我们了解到这些射电信号多么微弱，以及为了拾取这些信号，我们的系统需要有多么的敏锐。科学家正试图回答关于宇宙的一些基本问题，而SKA正是为了回答这些具体问题而设计的一个望远镜。"



NATURE | NEWS

Giant telescope's mobile-phone 'dead zones' rile South African residents

Sensitive radio dishes of the Square Kilometre Array will affect phone reception — and could harm local economies, say farmers.

Sarah Wild

17 November 2017

Mujahid Safodien/AFP/Getty

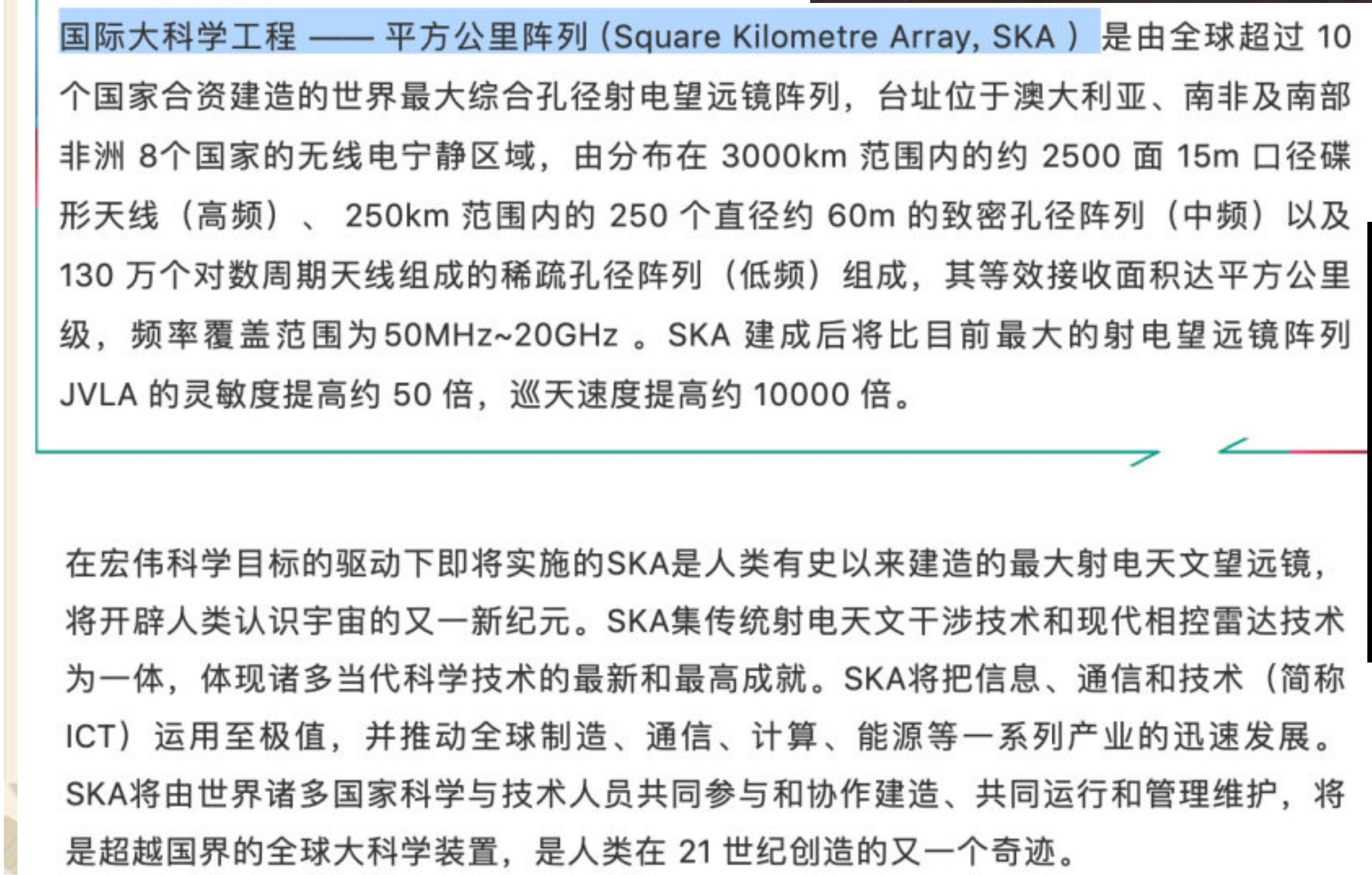
South Africa has already built prototype dishes that will form part of the Square Kilometre Array, which will be the world's largest radio telescope.

ASKAP观测的短时标、像平面射电暂现源

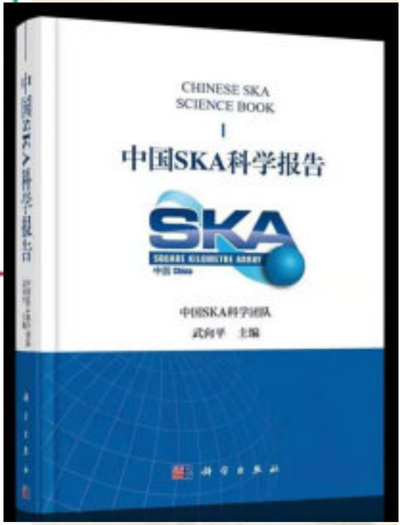
中国 SKA 科学报告

原创 武向平 **科学出版社** 3天前

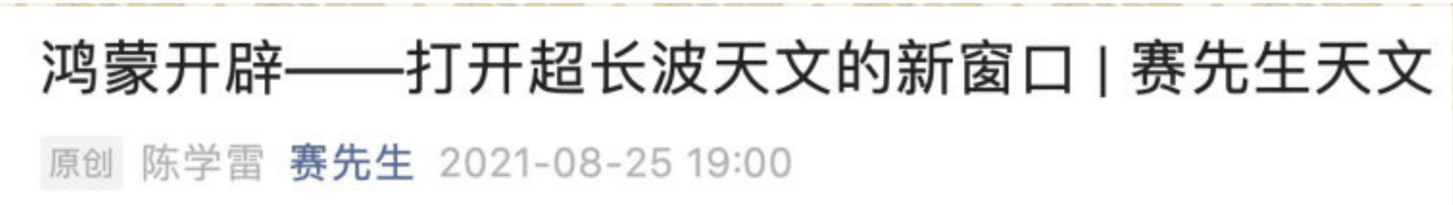
(i.e., 2020/01/19)



国际大科学工程 —— 平方公里阵列（Square Kilometre Array, SKA ）是由全球超过 10 个国家合资建造的世界最大综合孔径射电望远镜阵列，台址位于澳大利亚、南非及南部非洲 8个国家的无线电宁静区域，由分布在 3000km 范围内的约 2500 面 15m 口径碟形天线（高频）、 250km 范围内的 250 个直径约 60m 的致密孔径阵列（中频）以及 130 万个对数周期天线组成的稀疏孔径阵列（低频）组成，其等效接收面积达平方公里级，频率覆盖范围为50MHz~20GHz 。SKA 建成后将比目前最大的射电望远镜阵列 JVLA 的灵敏度提高约 50 倍，巡天速度提高约 10000 倍。

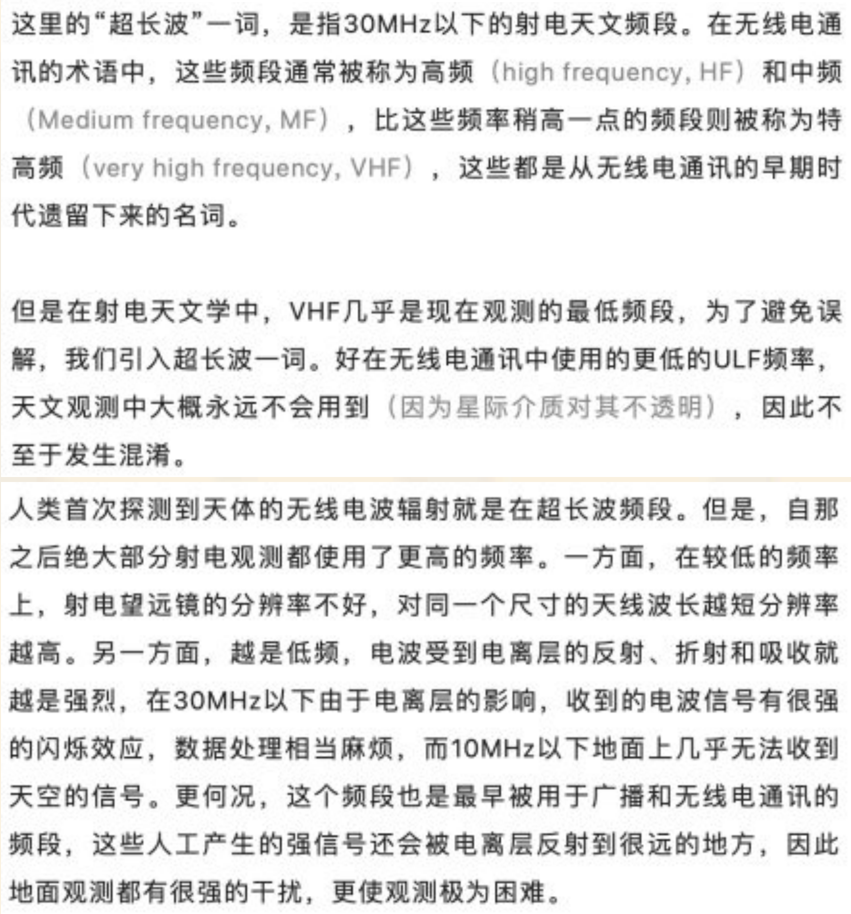

CHINESE SKA
SCIENCE BOOK
I
中国SKA科学报告
SKA
SQUARE KILOMETRE ARRAY
中国SKA科学团队
武向平 主编
科学出版社

在宏伟科学目标的驱动下即将实施的SKA是人类有史以来建造的最大射电天文望远镜，将开辟人类认识宇宙的又一新纪元。SKA集传统射电天文干涉技术和现代相控雷达技术为一体，体现诸多当代科学技术的最新和最高成就。SKA将把信息、通信和技术（简称ICT）运用至极值，并推动全球制造、通信、计算、能源等一系列产业的迅速发展。SKA将由世界诸多国家科学与技术人员共同参与和协作建造、共同运行和管理维护，将是超越国界的全球大科学装置，是人类在 21 世纪创造的又一个奇迹。



鸿蒙开辟——打开超长波天文的新窗口 | 赛先生天文

原创 陈学雷 **赛先生** 2021-08-25 19:00



这里的“超长波”一词，是指30MHz以下的射电天文频段。在无线电通讯的术语中，这些频段通常被称为高频（high frequency, HF）和中频（Medium frequency, MF），比这些频率稍高一点的频段则被称为特高频（very high frequency, VHF），这些都是从无线电通讯的早期时代遗留下来的名词。

但是在射电天文学中，VHF几乎是现在观测的最低频段，为了避免误解，我们引入超长波一词。好在无线电通讯中使用的更低的ULF频率，天文观测中大概永远不会用到（因为星际介质对其不透明），因此不至于发生混淆。

人类首次探测到天体的无线电波辐射就是在超长波频段。但是，自那之后绝大部分射电观测都使用了更高的频率。一方面，在较低的频率上，射电望远镜的分辨率不好，对同一个尺寸的天线波长越短分辨率越高。另一方面，越是低频，电波受到电离层的反射、折射和吸收就越是强烈，在30MHz以下由于电离层的影响，收到的电波信号有很强的闪烁效应，数据处理相当麻烦，而10MHz以下地面上几乎无法收到天空的信号。更何况，这个频段也是最早被用于广播和无线电通讯的频段，这些人工产生的强信号还会被电离层反射到很远的地方，因此地面观测都有很强的干扰，更使观测极为困难。

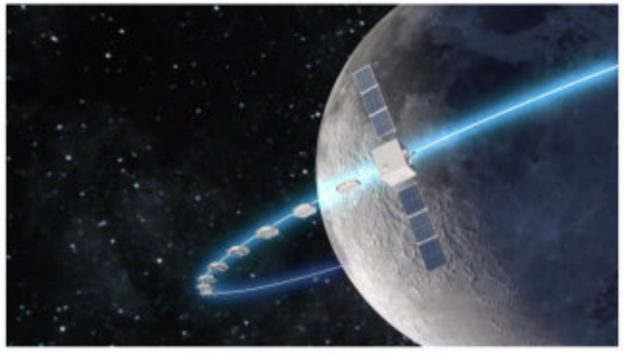
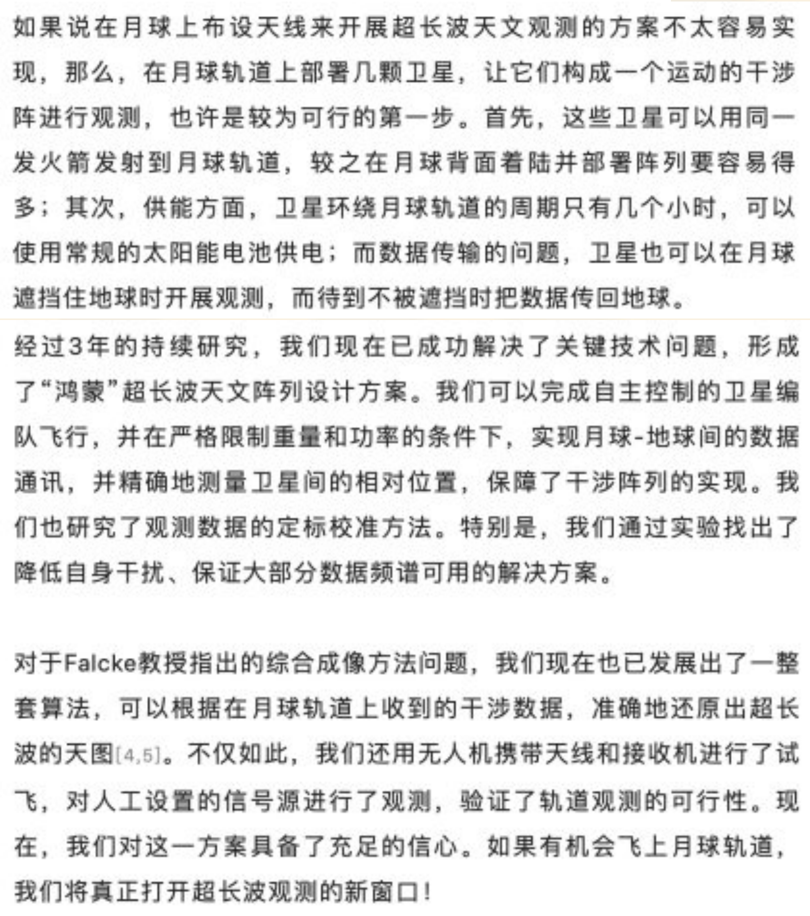


图4. 鸿蒙超长波阵列艺术想象图



如果说在月球上布设天线来开展超长波天文观测的方案不太容易实现，那么，在月球轨道上部署几颗卫星，让它们构成一个运动的干涉阵进行观测，也许是较为可行的第一步。首先，这些卫星可以用同一发火箭发射到月球轨道，较之在月球背面着陆并部署阵列要容易得多；其次，供能方面，卫星环绕月球轨道的周期只有几个小时，可以使用常规的太阳能电池供电；而数据传输的问题，卫星也可以在月球遮挡住地球时开展观测，而待到不被遮挡时把数据传回地球。

经过3年的持续研究，我们现在已成功解决了关键技术问题，形成了“鸿蒙”超长波天文阵列设计方案。我们可以完成自主控制的卫星编队飞行，并在严格限制重量和功率的条件下，实现月球-地球间的数据通讯，并精确地测量卫星间的相对位置，保障了干涉阵列的实现。我们也研究了观测数据的定标校准方法。特别是，我们通过实验找出了降低自身干扰、保证大部分数据频谱可用的解决方案。

对于Falcke教授指出的综合成像方法问题，我们现在也已发展出了一整套算法，可以根据在月球轨道上收到的干涉数据，准确地还原出超长波的天图[4,5]。不仅如此，我们还用无人机携带天线和接收机进行了试飞，对人工设置的信号源进行了观测，验证了轨道观测的可行性。现在，我们对这一方案具备了充足的信心。如果有机会飞上月球轨道，我们将真正打开超长波观测的新窗口！

超长波观测的科学发现

01 宇宙黑暗时代与黎明

02 打开电磁频谱的新窗口

03 太阳与行星

其它电磁波段的观测

- 红外
- 亚毫米波
- 紫外
- X射线
- 伽玛射线

- 红外
  - 很多望远镜的观测波长延伸到红外
  - 专门的红外望远镜，例如：United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)，Mauna Kea, Hawaii, 3.8m, 阶梯光栅光谱仪
  - 年轻的恒星被气体和尘埃包裹，近红外不可见，中红外可以
  - 褐矮星：“失败”的恒星

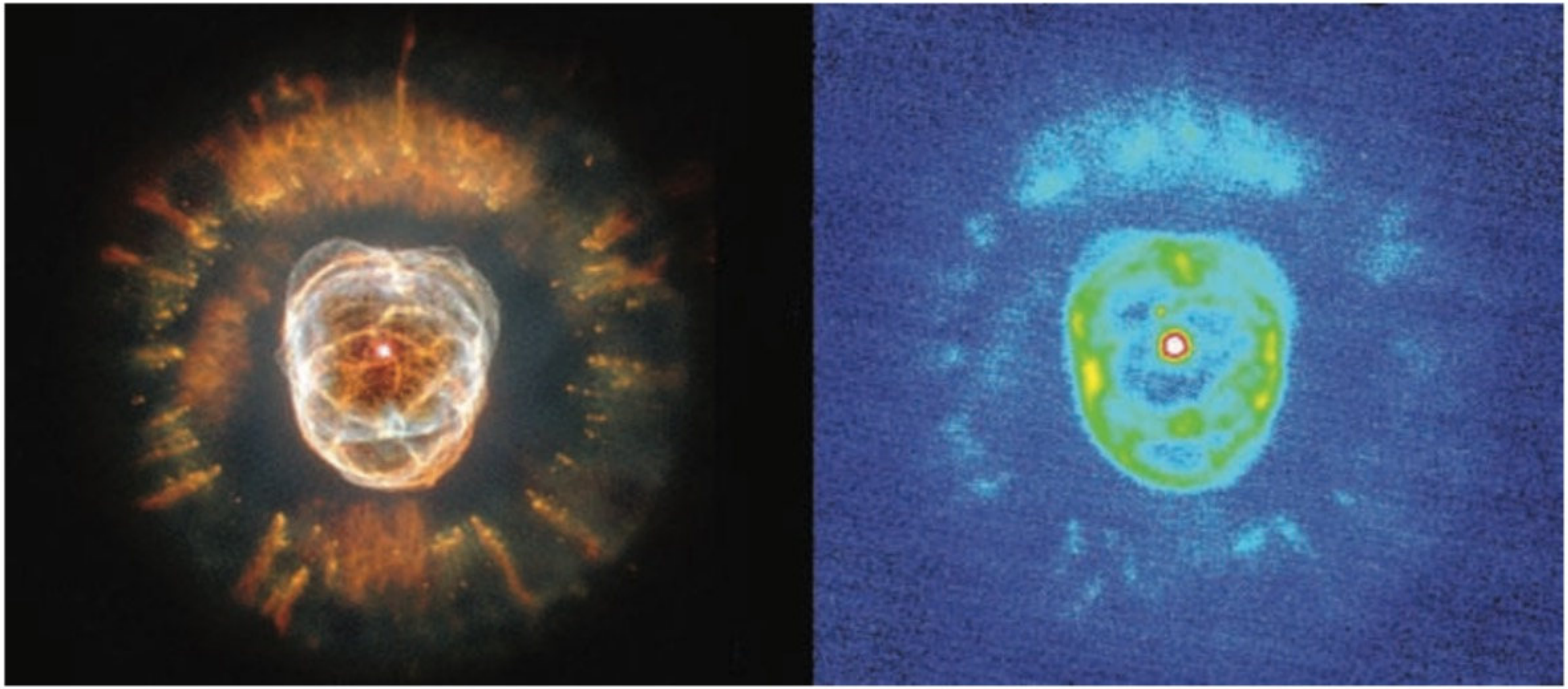
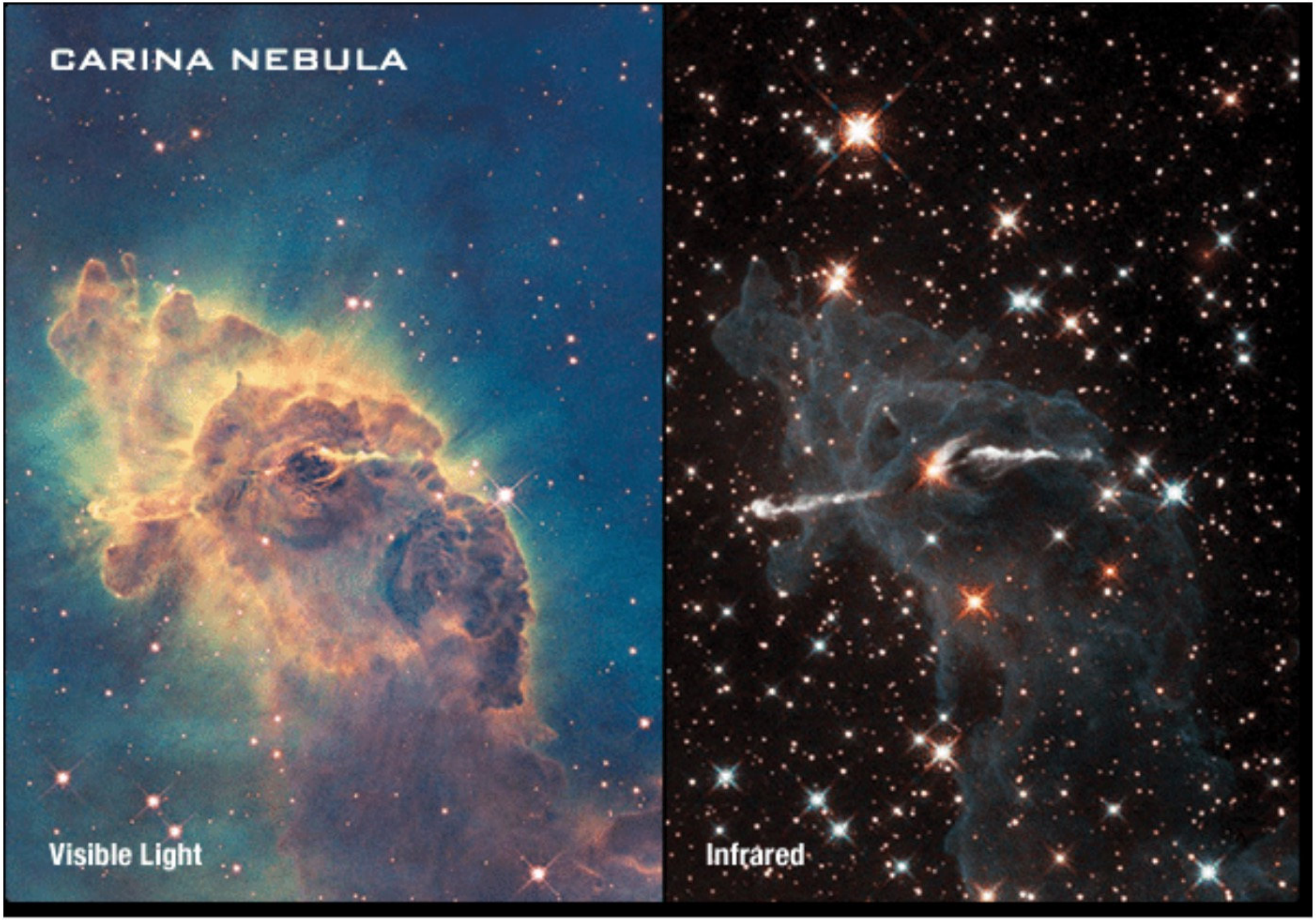
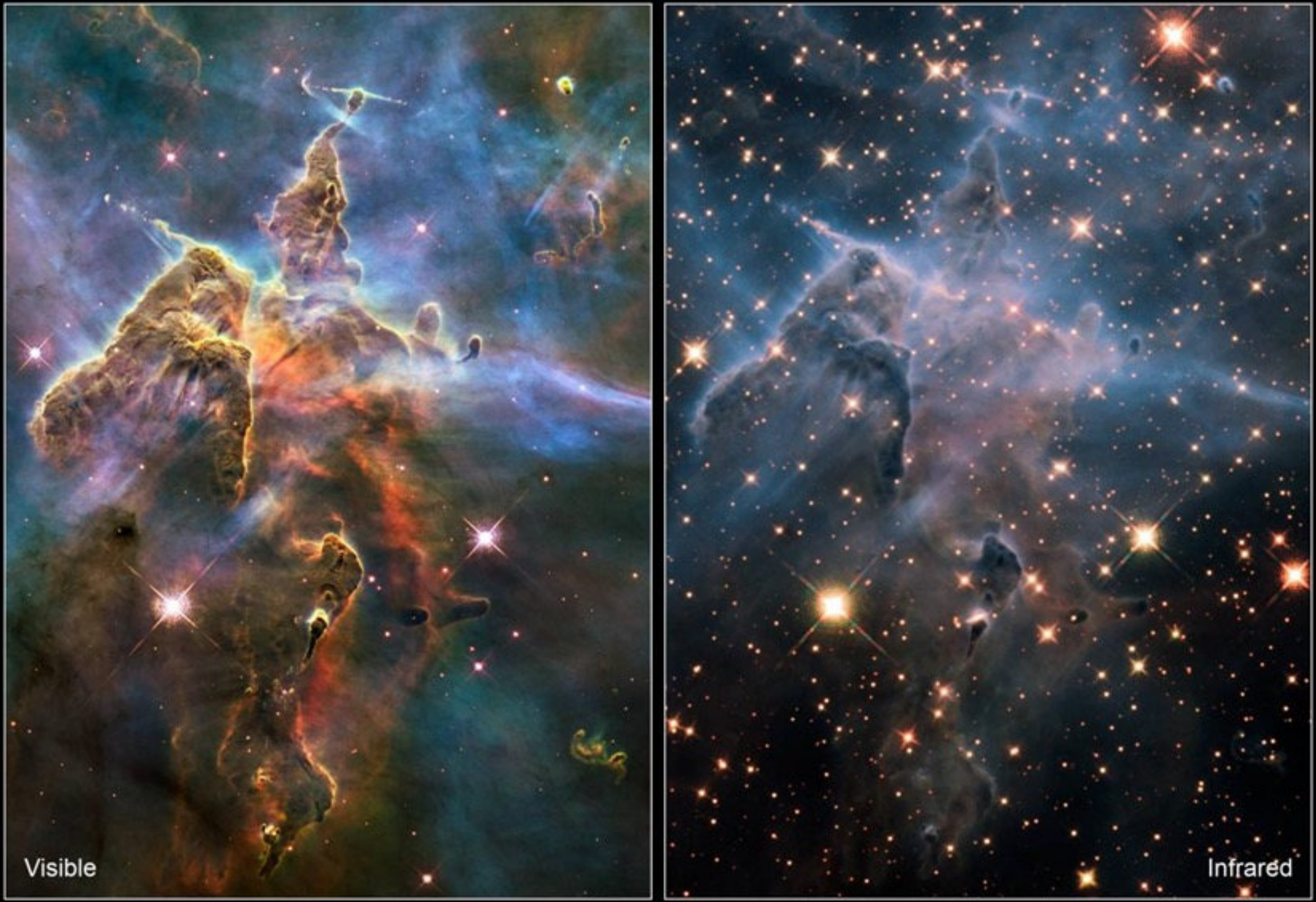


Figure 5.29 The Eskimo planetary nebula imaged in visible light by the Hubble Space Telescope (left) and in the infrared by the United Kingdom Infrared Telescope (right). Image: Hubble Space Telescope Institute, NASA and Chris Davis and Tim Carroll (Joint Astronomy Centre).


CARINA NEBULA
Visible Light
Infrared

船底座星云的可见光照片（左）和红外线照片（右）

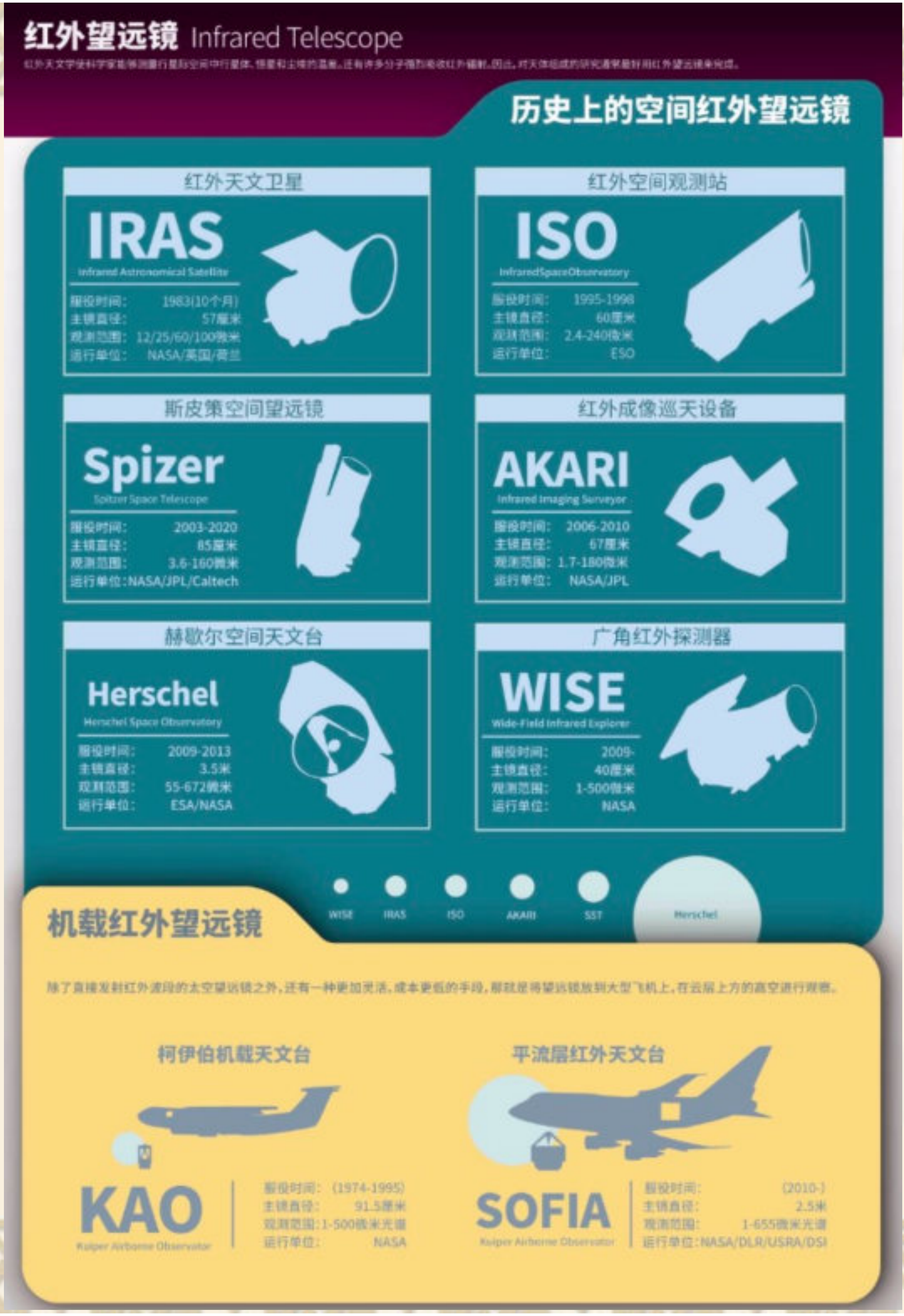
在更长的电磁波辐射下，星云变透明了，若干被遮蔽的恒星显露了出来！ / G. Cataldo, 2015



Visible vs. Infrared View of Pillar and Jets HH 901/902

Hubble Space Telescope • WFC3/UVIS/IR

NASA, ESA, and M. Livio and the Hubble 20th Anniversary Team (STScI) STScI-PRC10-13b



红外望远镜 Infrared Telescope

红外天文学使科学家能够测量行星际空间中行星体、恒星和尘埃的温度。还有许多分子强烈地吸收红外辐射。因此，对天体组成的研究通常最好用红外望远镜来完成。

历史上的空间红外望远镜

红外天文卫星

IRAS

Infrared Astronomical Satellite

服役时间：1983(10个月)
主镜直径：57厘米
观测范围：12/25/60/100微米
运行单位：NASA/英国/荷兰

红外空间观测站

ISO

InfraredSpaceObservatory

服役时间：1995-1998
主镜直径：60厘米
观测范围：2.4-240微米
运行单位：ESO

斯皮策空间望远镜

Spizer

Spitzer Space Telescope

服役时间：2003-2020
主镜直径：85厘米
观测范围：3.6-160微米
运行单位：NASA/JPL/Caltech

红外成像巡天设备

AKARI

Infrared Imaging Surveyor

服役时间：2006-2010
主镜直径：67厘米
观测范围：1.7-180微米
运行单位：NASA/JPL

赫歇尔空间天文台

Herschel

Herschel Space Observatory

服役时间：2009-2013
主镜直径：3.5米
观测范围：55-672微米
运行单位：ESA/NASA

广角红外探测器

WISE

Wide-Field Infrared Explorer

服役时间：2009-
主镜直径：40厘米
观测范围：1-500微米
运行单位：NASA

机载红外望远镜

除了直接发射红外波段的太空望远镜之外，还有一种更加灵活、成本更低的手段，那就是将望远镜放到大型飞机上，在云层上方的高空进行观察。

柯伊伯机载天文台

KAO

Kuiper Airborne Observator

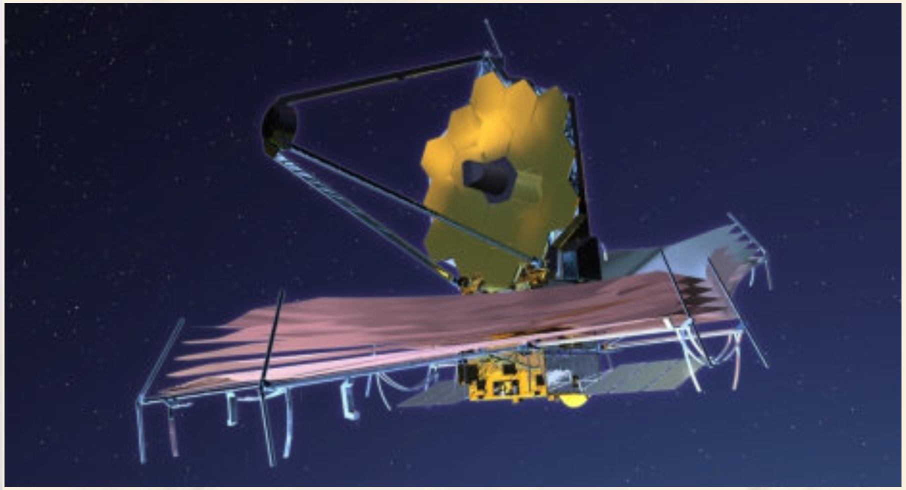
服役时间：(1974-1995)
主镜直径：91.5厘米
观测范围：1-500微米光谱
运行单位：NASA

平流层红外天文台

SOFIA

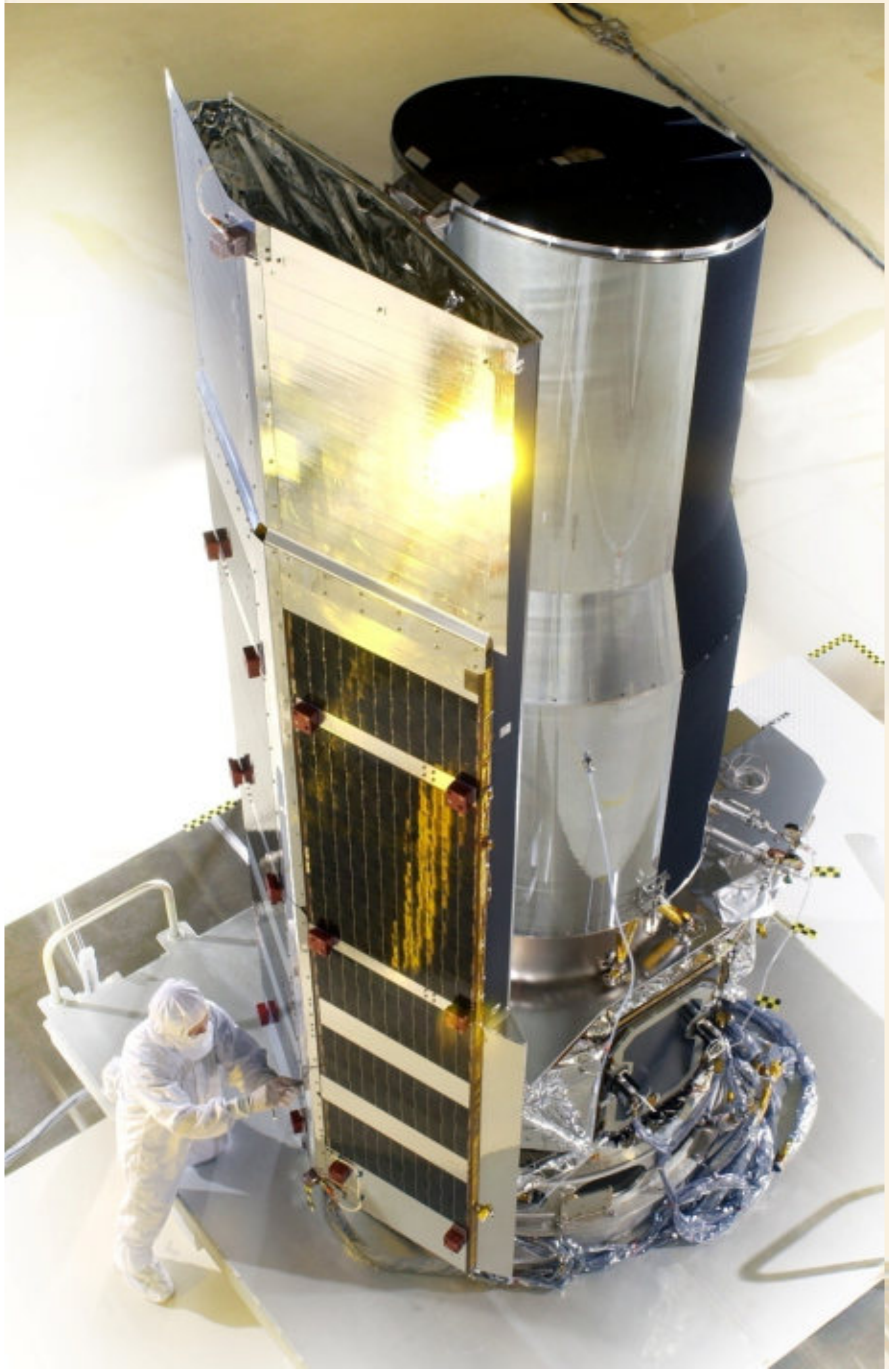
Kuiper Airborne Observator

服役时间：(2010-)
主镜直径：2.5米
观测范围：1-655微米光谱
运行单位：NASA/DLR/USRA/DSI



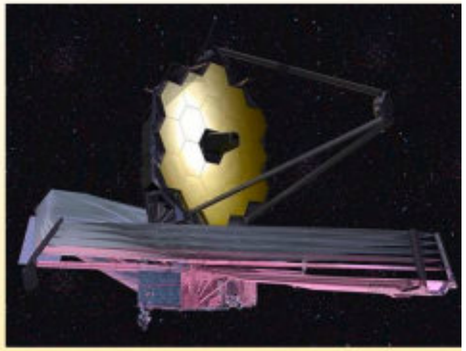
JWST

Spitzer 空间望远镜



- 3-180微米（大多不是大气窗口）
- 口径：0.85 m
- 冷却剂冷却三个科学仪器至接近绝对零度
- 遮阳板
- 轨道：跟在地球后面足够远的地方，快速冷却，且无需大量冷却剂

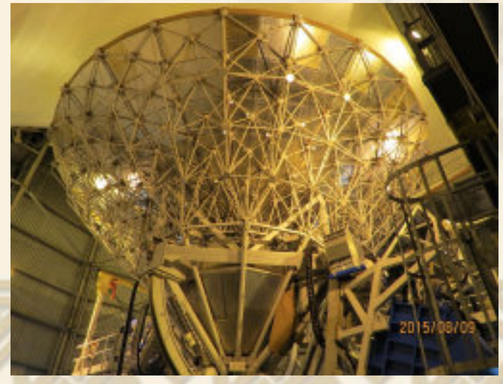
寰宇美照哪家强?
哈勃 vs. 韦布

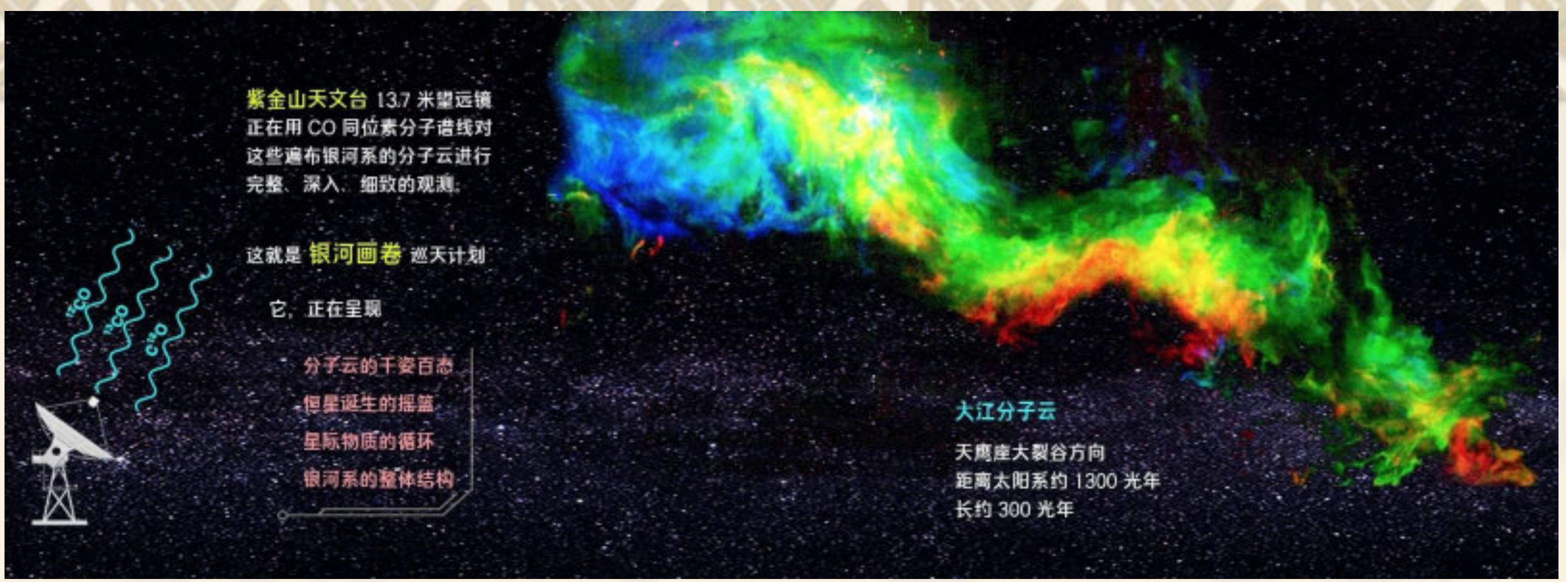


By
黎阮黃英

亚毫米波

- 红外与射电之间的波段
- 来自宇宙中冷物质---例如气体和尘埃（Interstellar medium，ISM）---的辐射
- ISM：恒星形成的温床，恒星死亡抛射物质到ISM
- James Clark Maxwell Telescope （JCMT）：
  - 15m，Mauna Kea，Hawaii（干燥）
  - 探测器：SCUBA，探测尘埃颗粒（~-240摄氏度）的热辐射，液氦降温至1/10K
  - 接收机：heterodyne （外差）接收机，探测空间气体云的辐射
  - 恒星形成区、银河系中心观测





紫金山天文台 13.7 米望远镜
正在用 CO 同位素分子谱线对
这些遍布银河系的分子云进行
完整、深入、细致的观测。

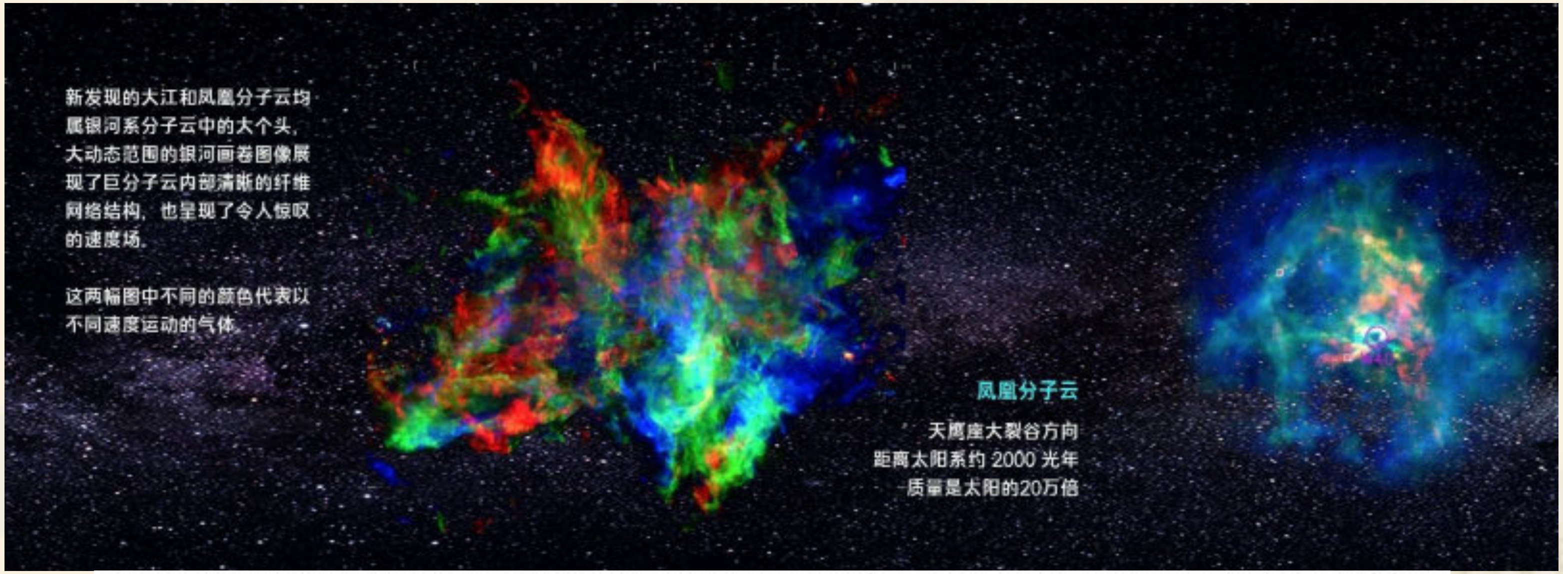
这就是 **银河画卷** 巡天计划

它，正在呈现

- 分子云的千姿百态
- 恒星诞生的摇篮
- 星际物质的循环
- 银河系的整体结构

大江分子云

天鹰座大裂谷方向
距离太阳系约 1300 光年
长约 300 光年



新发现的大江和凤凰分子云均属银河系分子云中的大个头，大动态范围的银河画卷图像展现了巨分子云内部清晰的纤维网络结构，也呈现了令人惊叹的速度场。

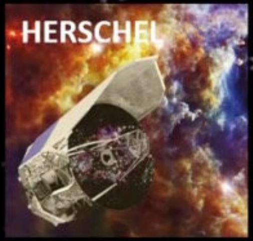
这两幅图中不同的颜色代表以不同速度运动的气体。

凤凰分子云

天鹰座大裂谷方向
距离太阳系约 2000 光年
质量是太阳的20万倍

银河画卷计划最终将完成北天银道面总面积约2700平方度完整覆盖的CO及其同位素分子谱线巡天。从多谱线的彩色高清图像中可以看到，毫米波分子辐射所呈现的天空图像与通常人们在光学波段所看到的星空图像迥然不同。对那些关注恒星形成的人们，银河画卷图像无疑就是一片科学宝藏。

人类对宇宙的探索永无止境，借助不断发展的技术与设备，可以更好地认识银河系和整个宇宙。银河画卷也将不断创新和发现，呈现更完整的、不一样的银河系……


HERSCHEL

SOFIA

空间

CCAT-p

<10米

JCMT

SMT

ASTE

APEX

SPT

GLT

10-15米

ALMA

SMA

阵列

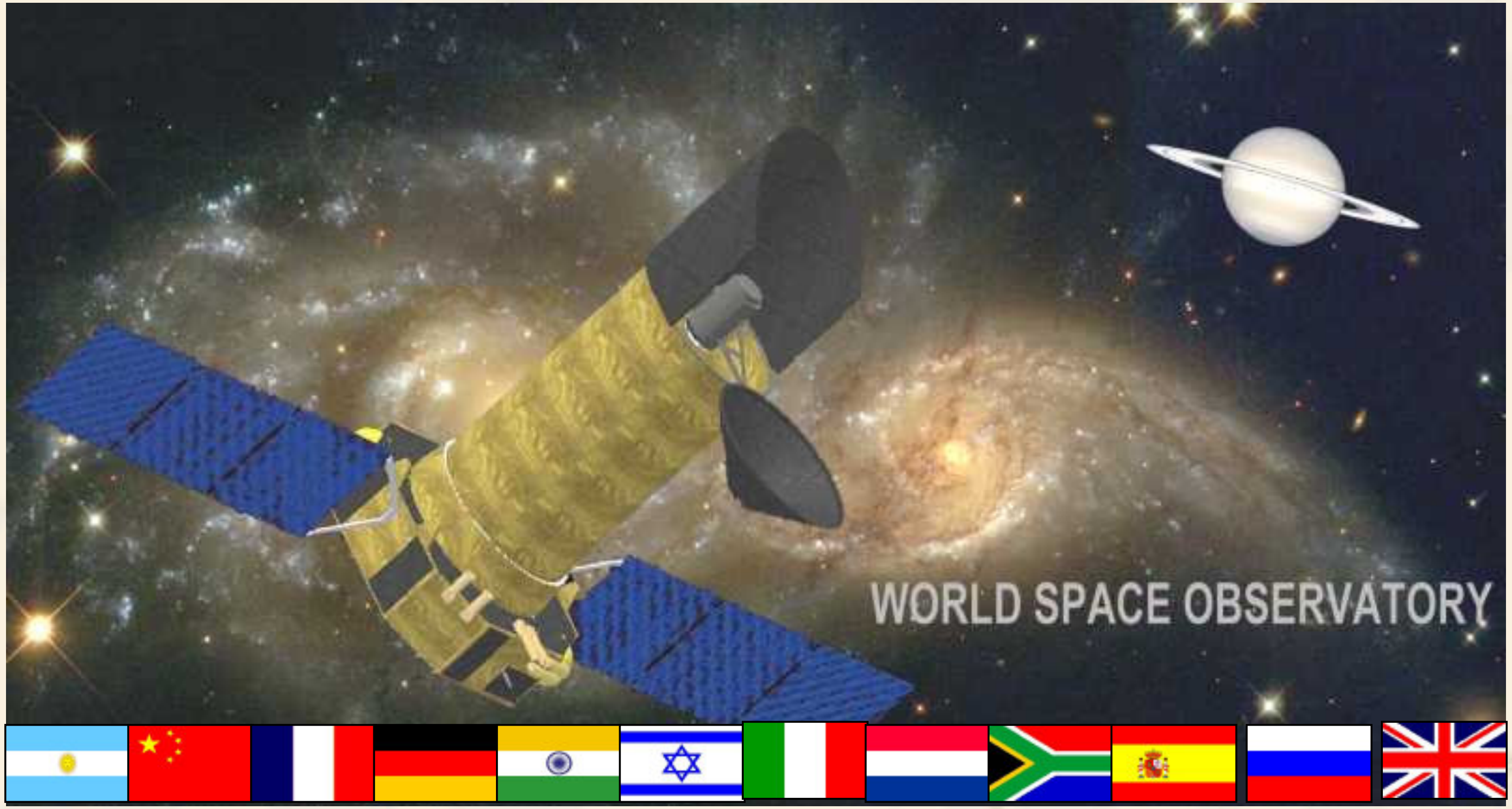
IRAM

LMT

Nobeyama

30-45米

紫外


WORLD SPACE OBSERVATORY

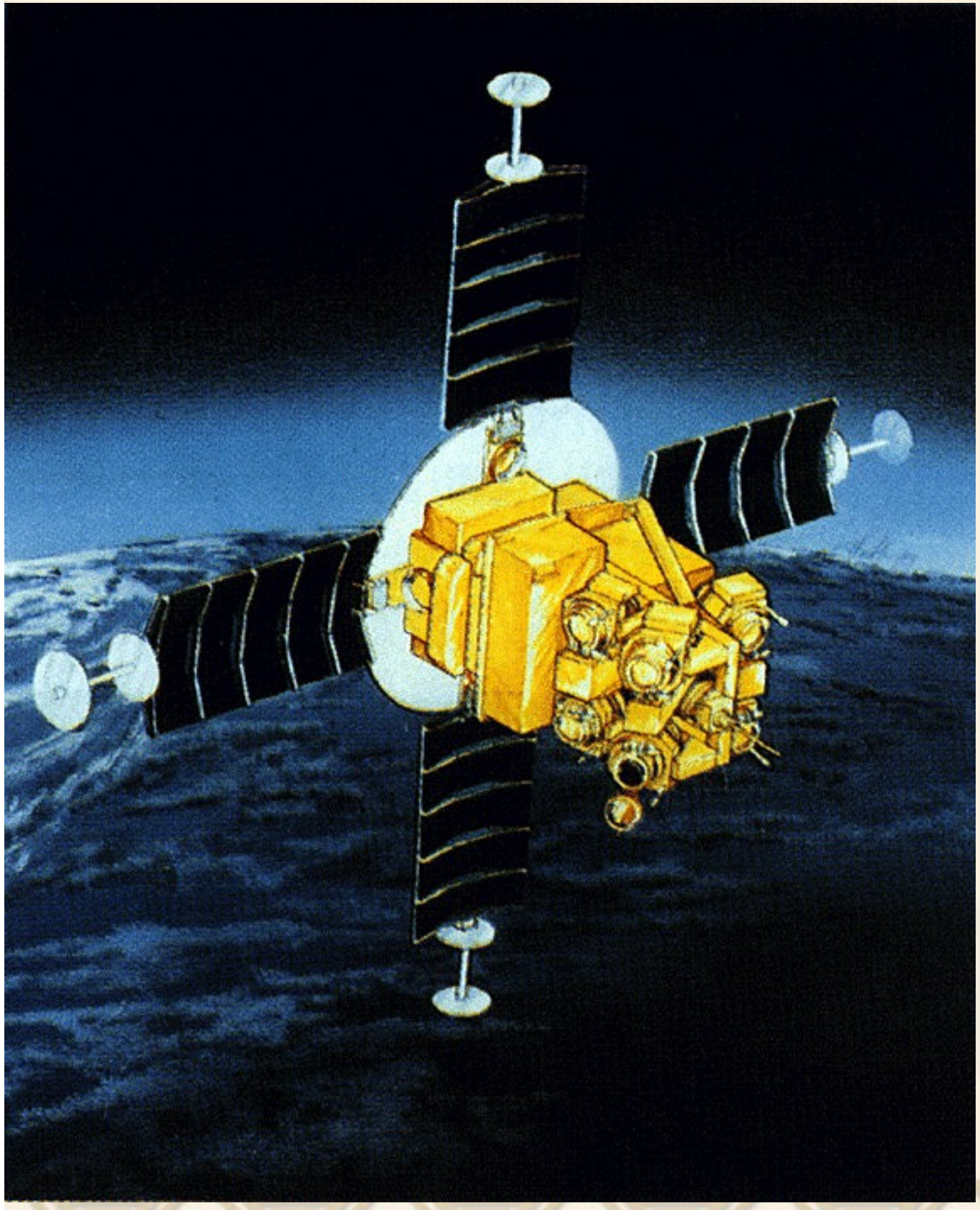
- HST可以观测紫外，但视场太小
- IUE：1978-1996

- 航天飞机搭载：Astro
- **WSO/UV**

极端远紫外

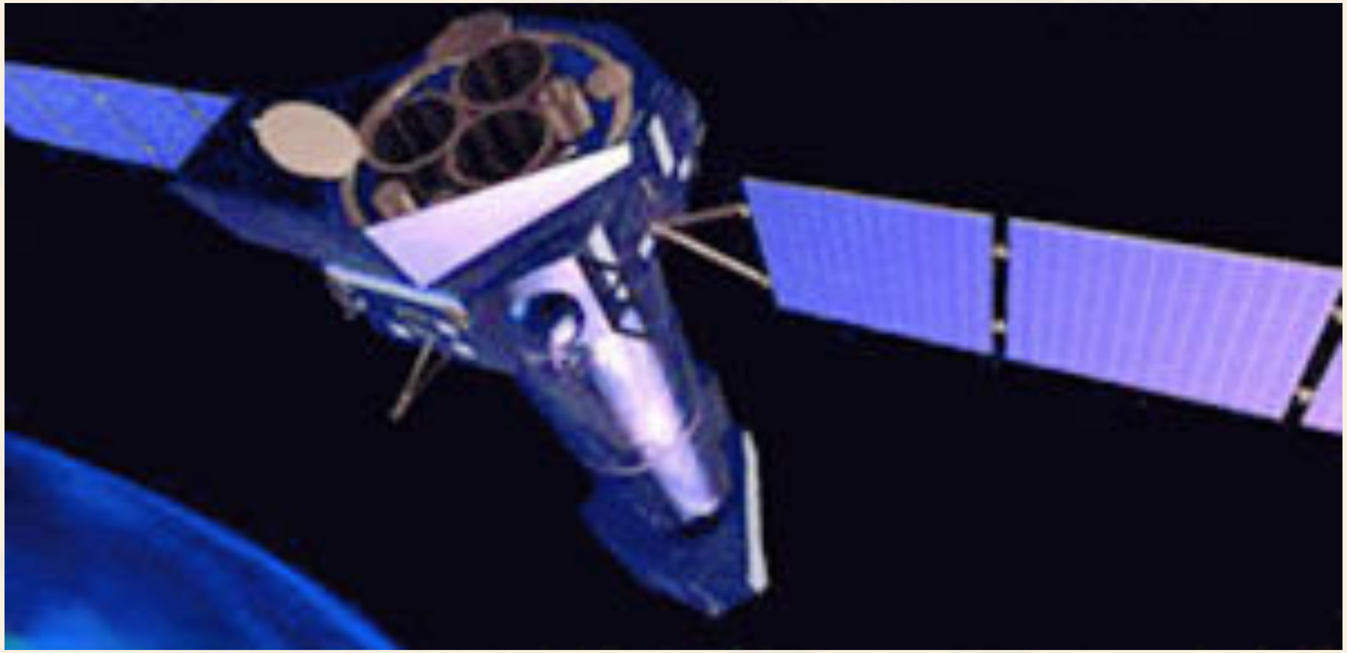
- ISM吸收厉害，科学家不太情愿建造极端远紫外卫星
- Extreme Ultraviolet Explorer（EUVE）却观测到太阳周围气体和尘埃相对稀少（bubble in local ISM）！

紫外/X射线边界



- The Array of Low Energy X-ray Imaging Sensors (ALEXIS；1995)
- 尽管名字含X-Ray,其实是X-ray射线非常低能段，被认为为极端远紫外

XMM-Newton



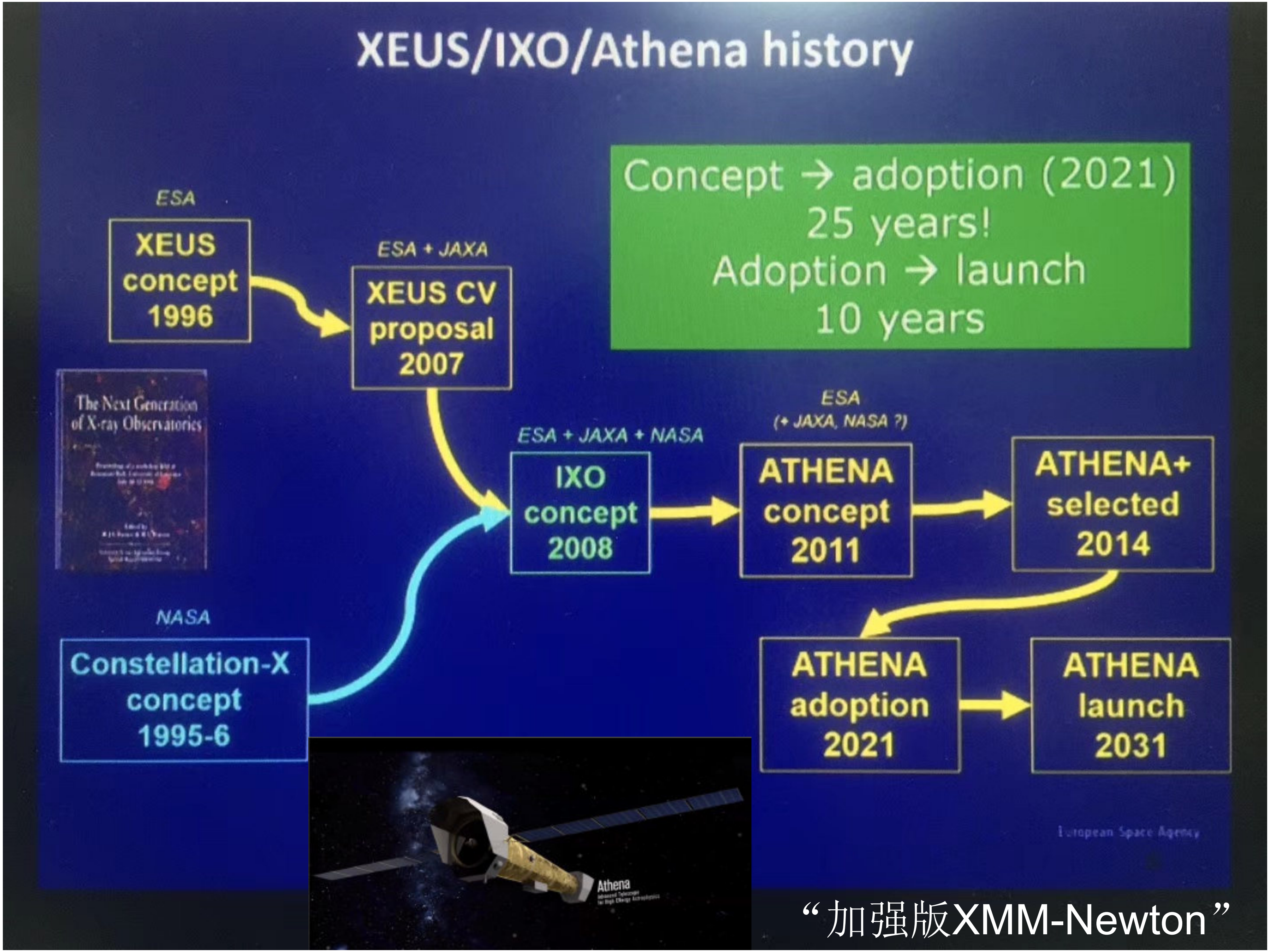
XMM-Newton

X-ray Multi-Mirror (ESA)

寿命：1999年12月 - (计划10年寿命；仍在工作中)
波段：0.1 - 15 keV

特性：大的有效面积；X射线谱和光学观测同时进行

XEUS/IXO/Athena history



Concept → adoption (2021)
25 years!
Adoption → launch
10 years

ESA
XEUS concept 1996

ESA + JAXA
XEUS CV proposal 2007

NASA
Constellation-X concept 1995-6

ESA + JAXA + NASA
IXO concept 2008

ESA (+ JAXA, NASA ?)
ATHENA concept 2011

ATHENA+ selected 2014

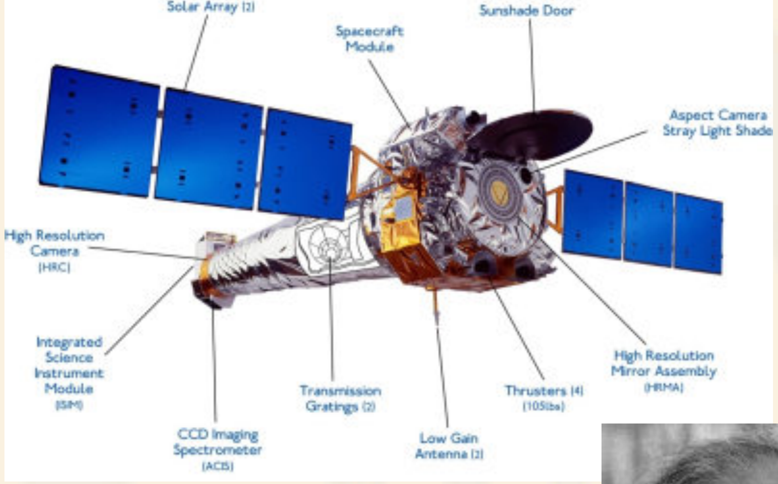
ATHENA adoption 2021

ATHENA launch 2031

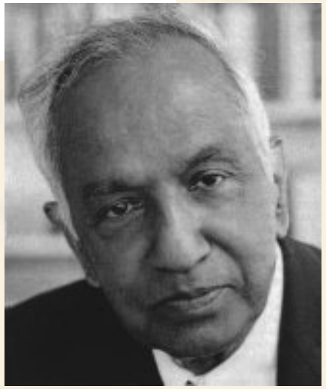
The Next Generation of X-ray Observatories
European Space Agency
Athena

“加强版XMM-Newton”

Chandra X射线天文台

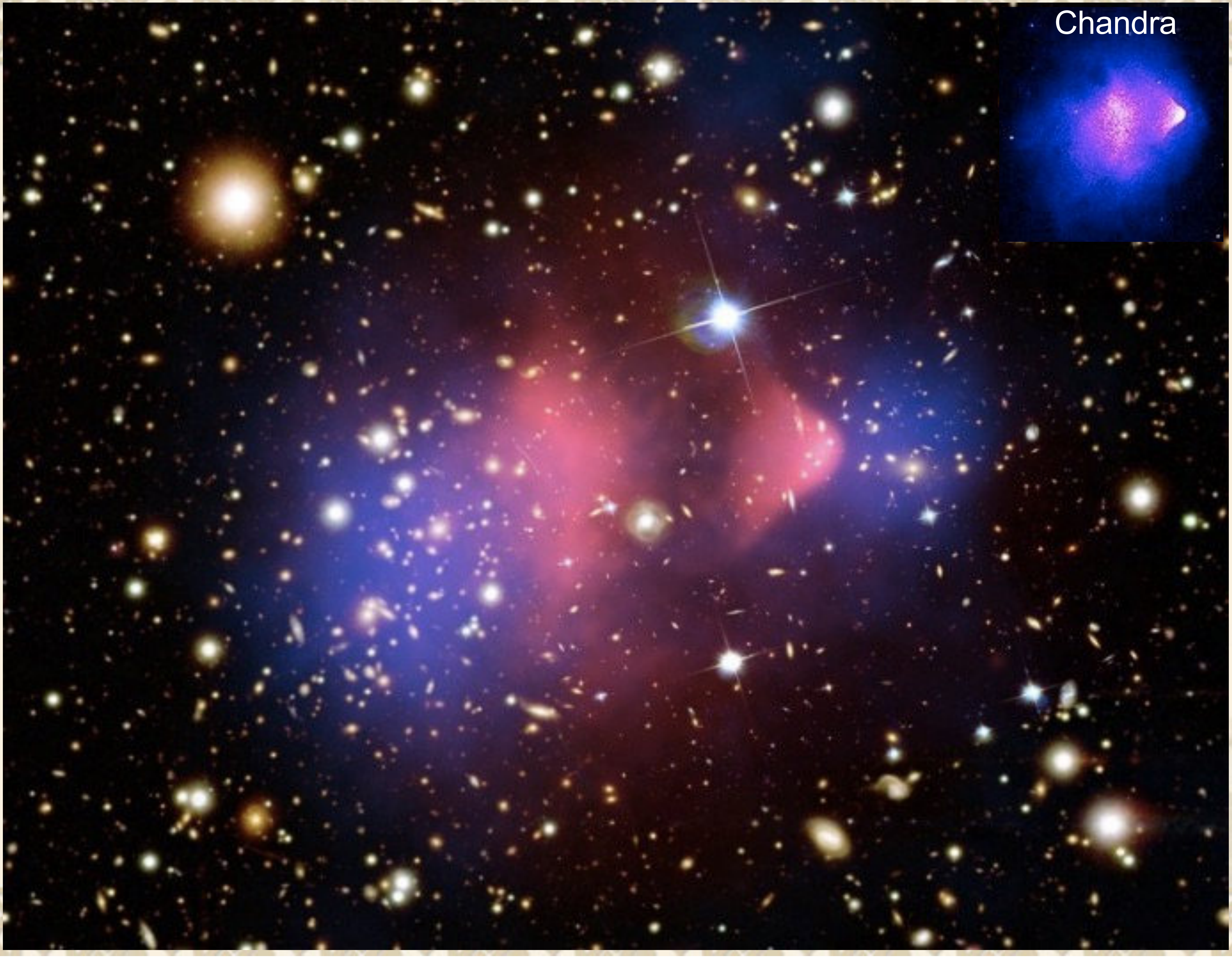

Solar Array (2)
Spacecraft Module
Sunshade Door
Aspect Camera Stray Light Shade
High Resolution Camera (HRC)
Integrated Science Instrument Module (ISIM)
CCD Imaging Spectrometer (ACIS)
Transmission Gratings (2)
Low Gain Antenna (2)
Thrusters (4) (105lbs)
High Resolution Mirror Assembly (HRMA)

X射线高能天体物理的观测研究：个人研究回顾



- 掠射式成像原理，工作波段：0.1 - 10 keV ，空间分辨率：0.5角秒（1999年底-至今）

- 重要成果举例：超新星遗迹中心致密天体、银河系中心黑洞、哈勃常数的测定、碰撞超团：暗物质存在的证据


Chandra

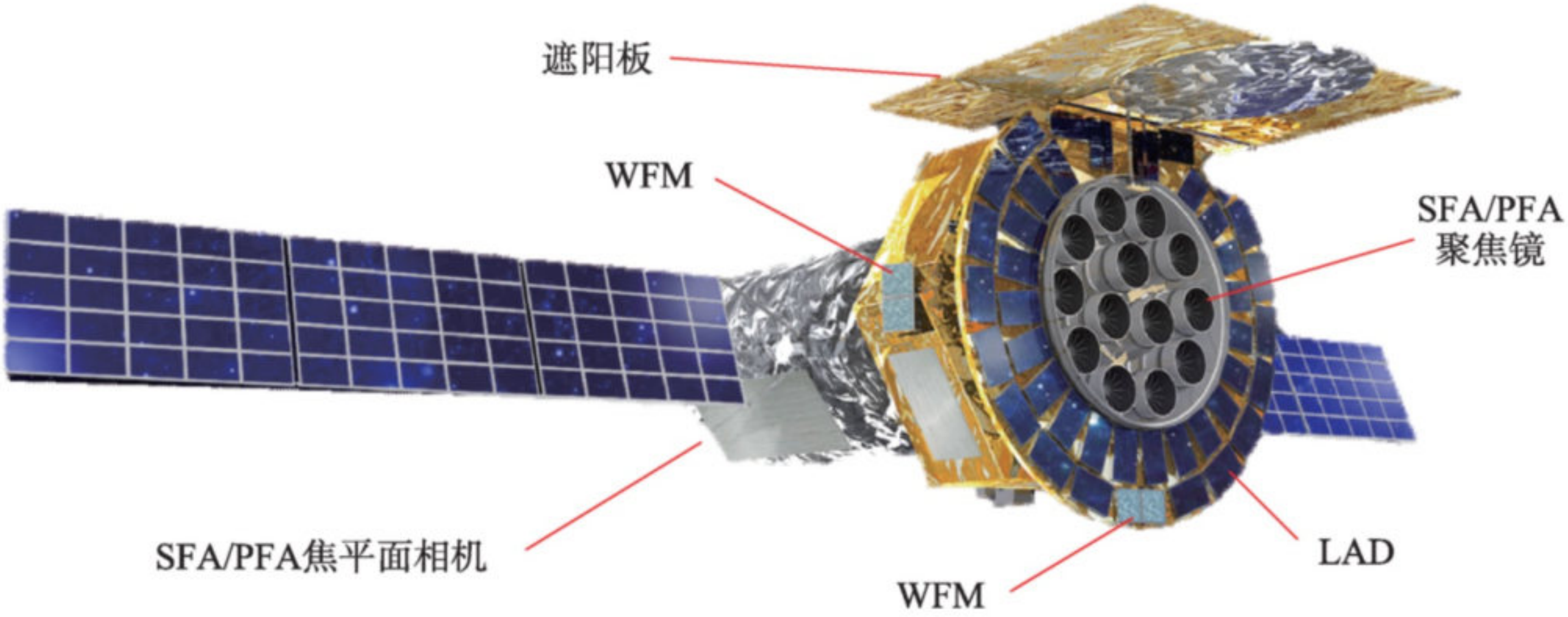
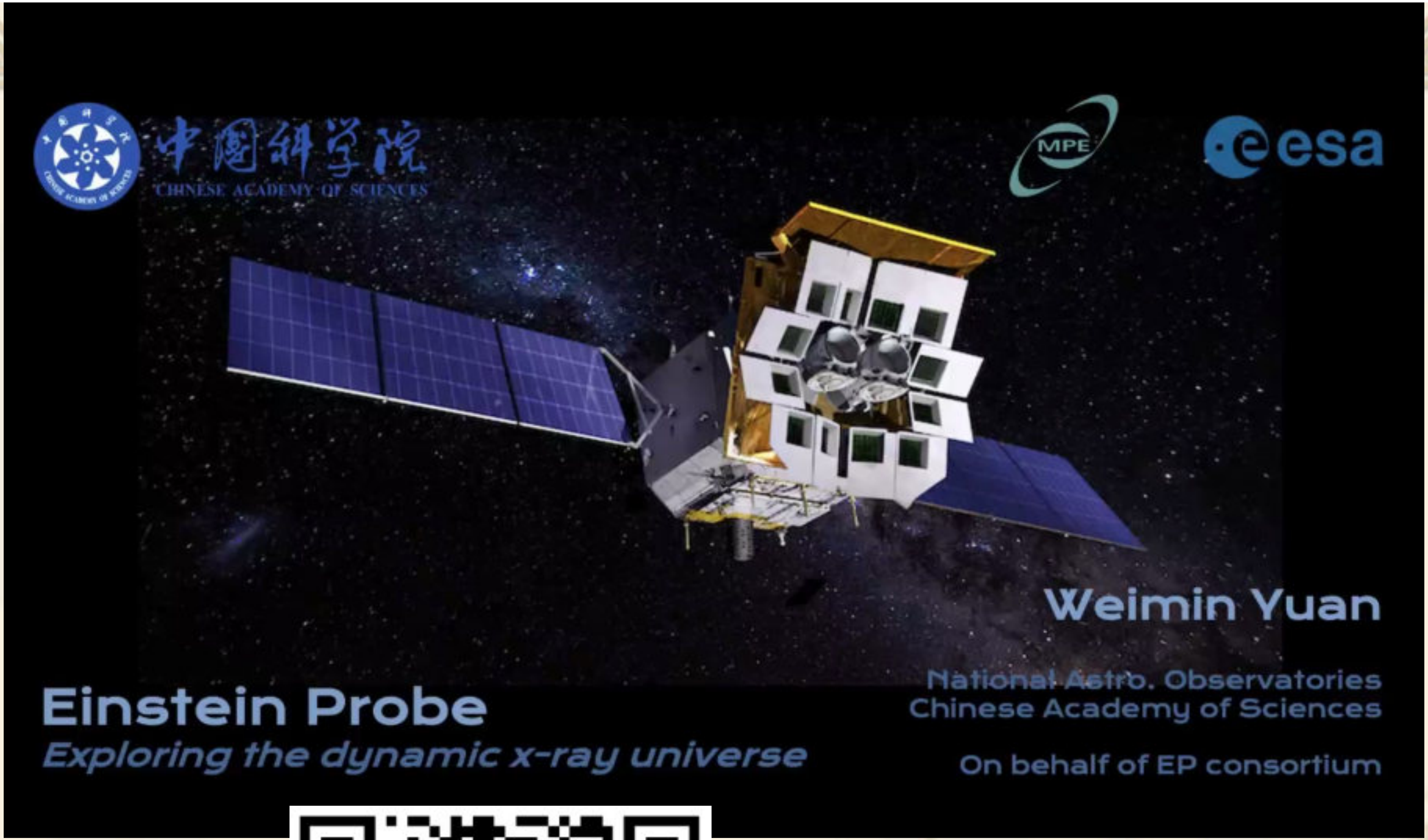

遮阳板
WFM
SFA/PFA
聚焦镜
SFA/PFA焦平面相机
LAD
WFM

图9 eXTP卫星构型示意图



Einstein Probe

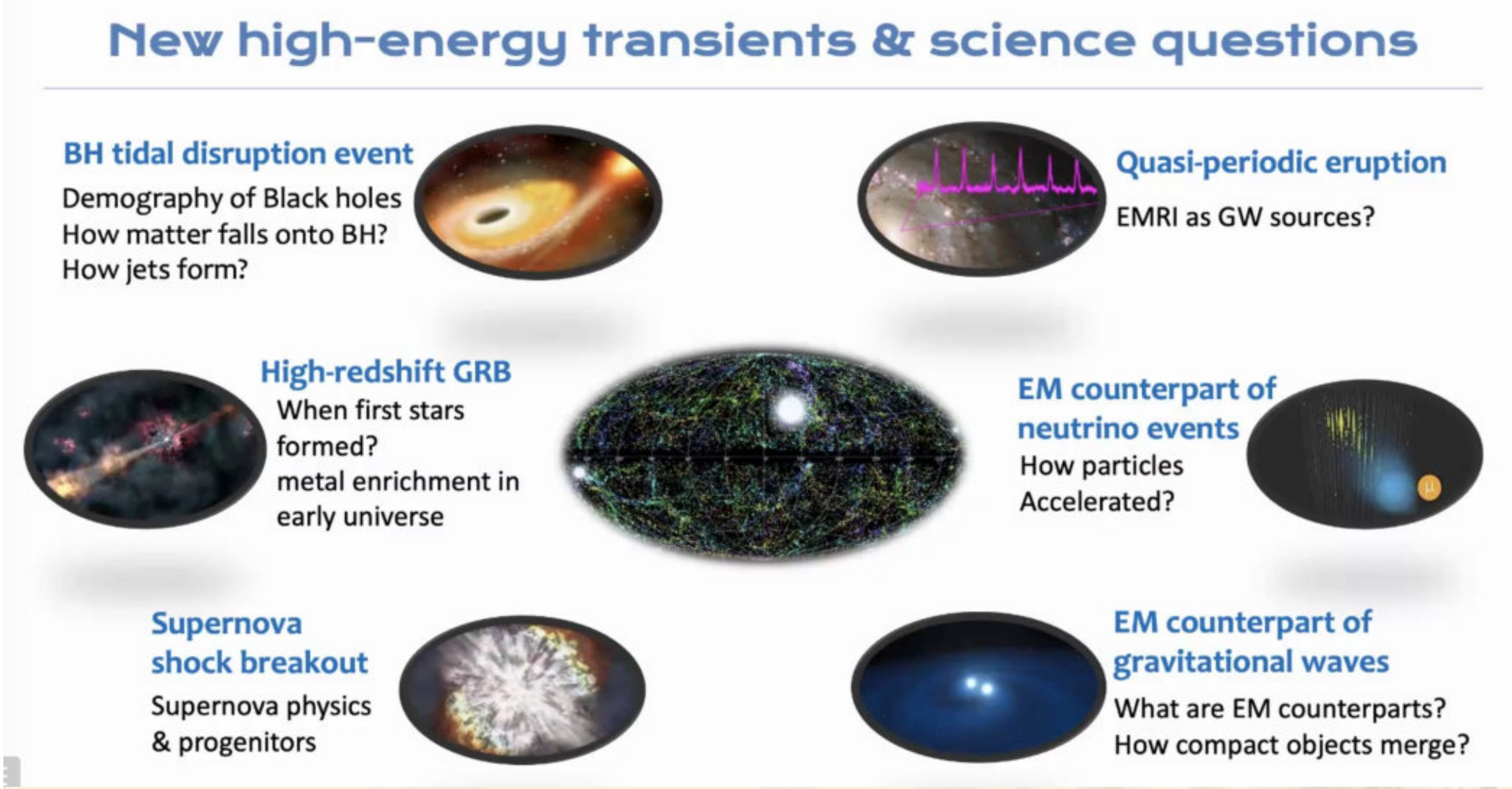
Exploring the dynamic x-ray universe

Weimin Yuan

National Astro. Observatories
Chinese Academy of Sciences

On behalf of EP consortium

爱因斯坦探针在活动星系核研究领域的科学机遇（薛永泉）



New high-energy transients & science questions

BH tidal disruption event

Demography of Black holes
How matter falls onto BH?
How jets form?

Quasi-periodic eruption

EMRI as GW sources?

High-redshift GRB

When first stars formed?
metal enrichment in early universe

EM counterpart of neutrino events

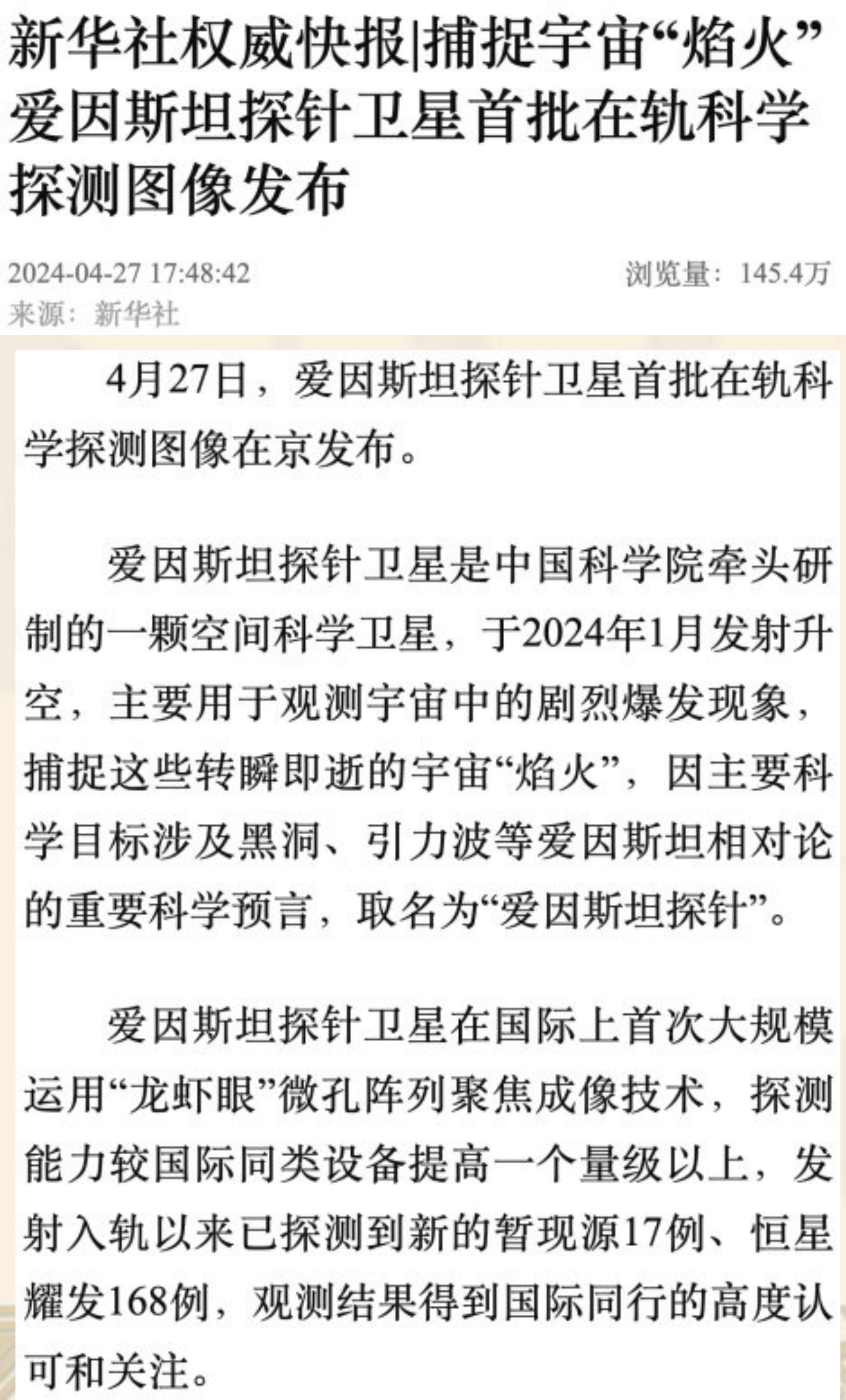
How particles Accelerated?

Supernova shock breakout

Supernova physics & progenitors

EM counterpart of gravitational waves

What are EM counterparts?
How compact objects merge?



新华社权威快报|捕捉宇宙“焰火”爱因斯坦探针卫星首批在轨科学探测图像发布

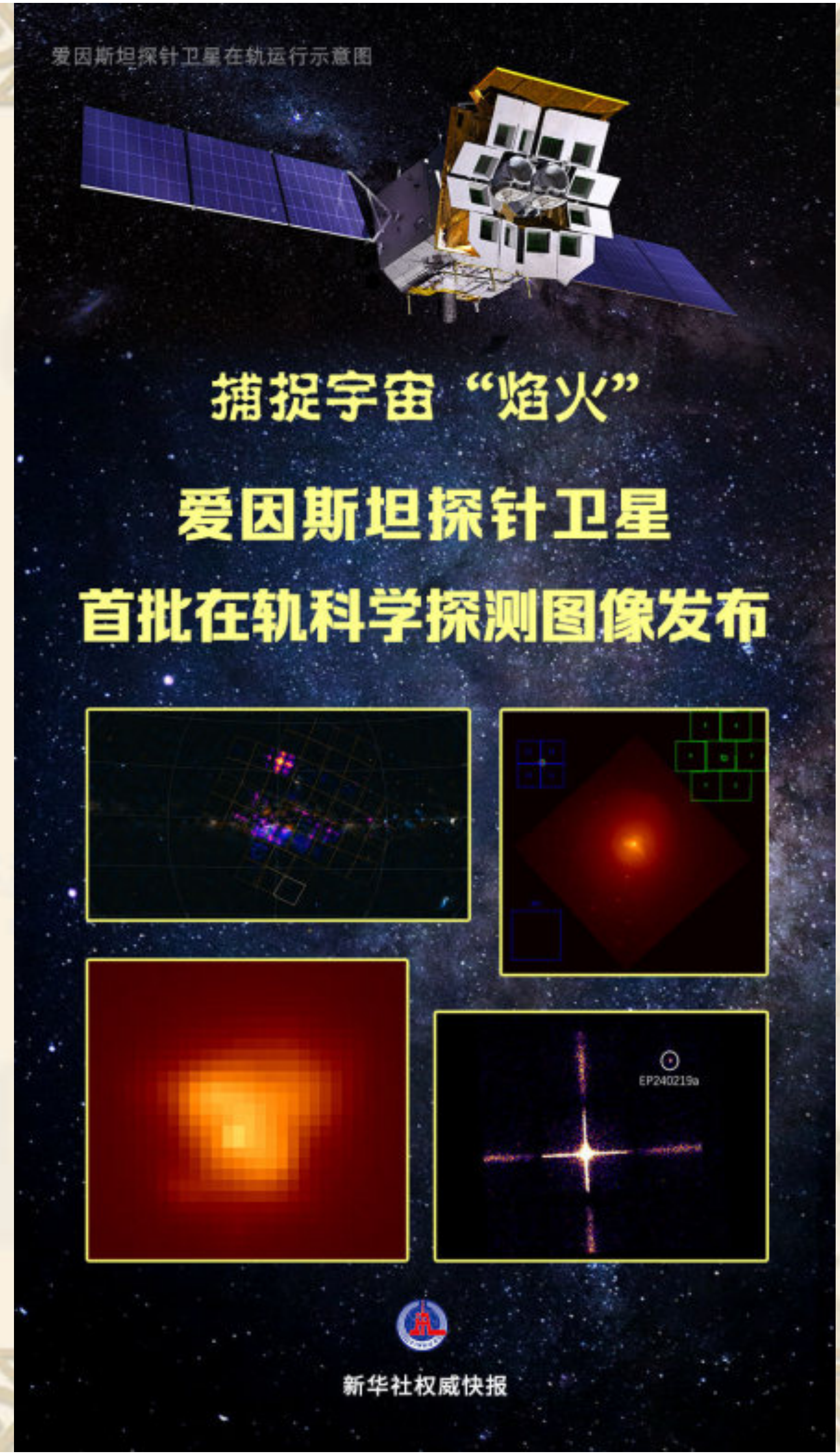
2024-04-27 17:48:42 浏览量：145.4万

来源：新华社

4月27日，爱因斯坦探针卫星首批在轨科学探测图像在京发布。

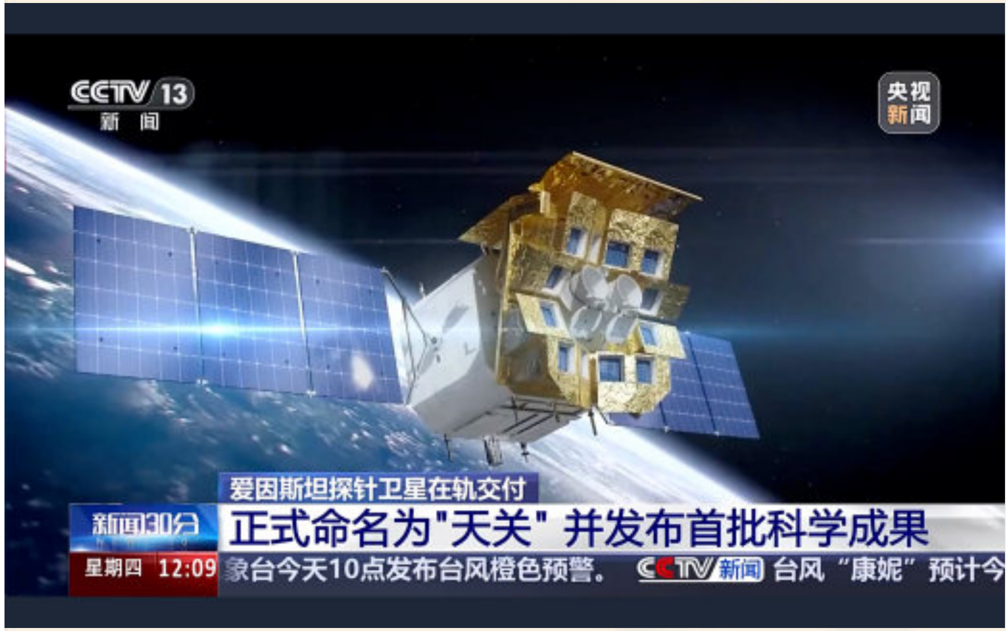
爱因斯坦探针卫星是中国科学院牵头研制的一颗空间科学卫星，于2024年1月发射升空，主要用于观测宇宙中的剧烈爆发现象，捕捉这些转瞬即逝的宇宙“焰火”，因主要科学目标涉及黑洞、引力波等爱因斯坦相对论的重要科学预言，取名为“爱因斯坦探针”。

爱因斯坦探针卫星在国际上首次大规模运用“龙虾眼”微孔阵列聚焦成像技术，探测能力较国际同类设备提高一个量级以上，发射入轨以来已探测到新的暂现源17例、恒星耀发168例，观测结果得到国际同行的高度认可和关注。



爱因斯坦探针卫星在轨运行示意图
捕捉宇宙“焰火”
爱因斯坦探针卫星
首批在轨科学探测图像发布
EP240219a
新华社权威快报

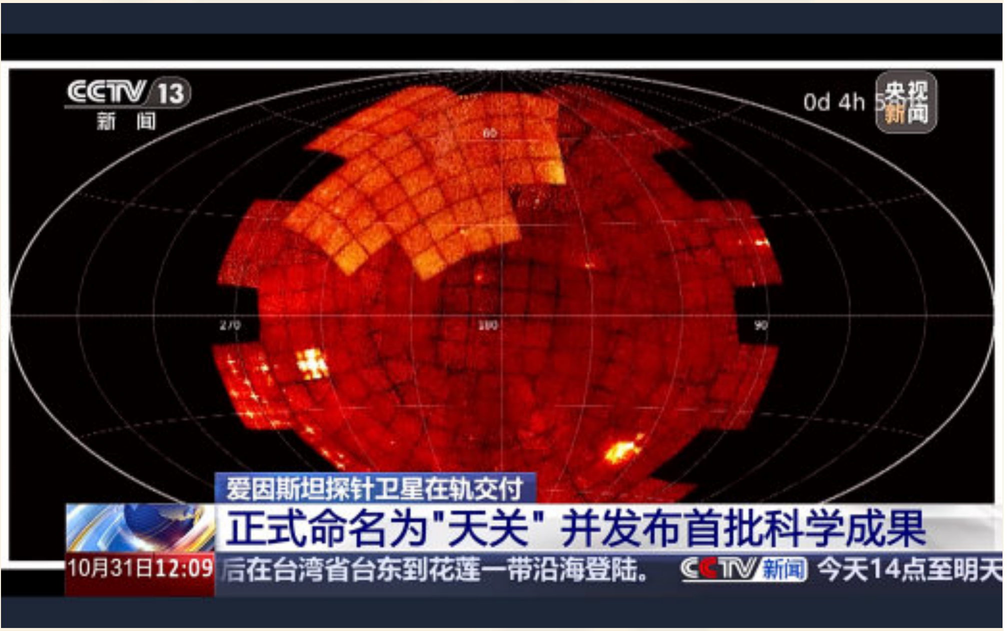
2024.10.31 新闻30分


CCTV 13
新闻
央视新闻

爱因斯坦探针卫星在轨交付

新闻30分 正式命名为"天关" 并发布首批科学成果

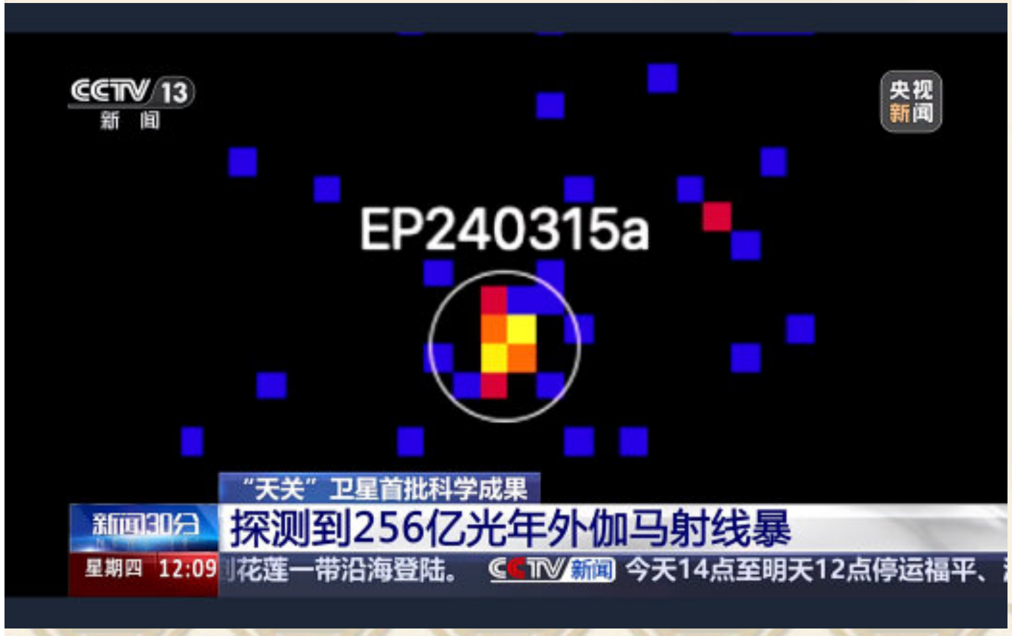
星期四 12:09 象台今天10点发布台风橙色预警。 CCTV新闻 台风“康妮”预计今


CCTV 13
新闻
0d 4h 5
央视新闻
60
270
180
90

爱因斯坦探针卫星在轨交付

正式命名为"天关" 并发布首批科学成果

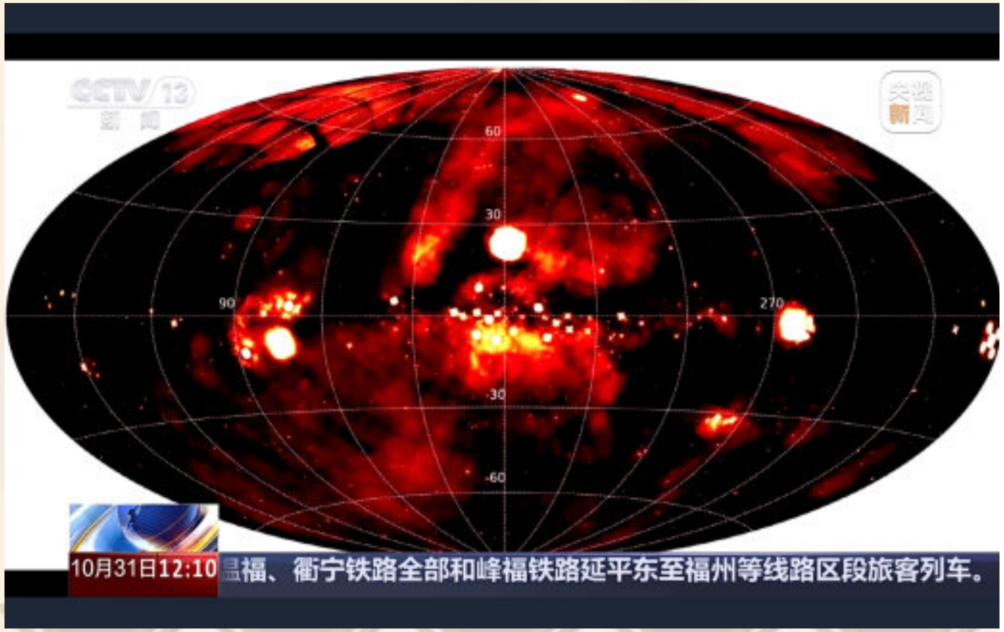
10月31日12:09 后在台湾省台东到花莲一带沿海登陆。 CCTV新闻 今天14点至明天


CCTV 13
新闻
央视新闻
EP240315a

“天关”卫星首批科学成果

新闻30分 探测到256亿光年外伽马射线暴

星期四 12:09 花莲一带沿海登陆。 CCTV新闻 今天14点至明天12点停运福平、


CCTV 13
新闻
央视新闻
60
30
90
270
-30
-60

10月31日12:10 福、衢宁铁路全部和峰福铁路延平东至福州等线路区段旅客列车。

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

廣西大學
GUANGXI UNIVERSITY

KLPA
中国科学院粒子天体物理重点实验室
KEY LABORATORY OF PARTICLE ASTROPHYSICS, CAS

CATCH计划

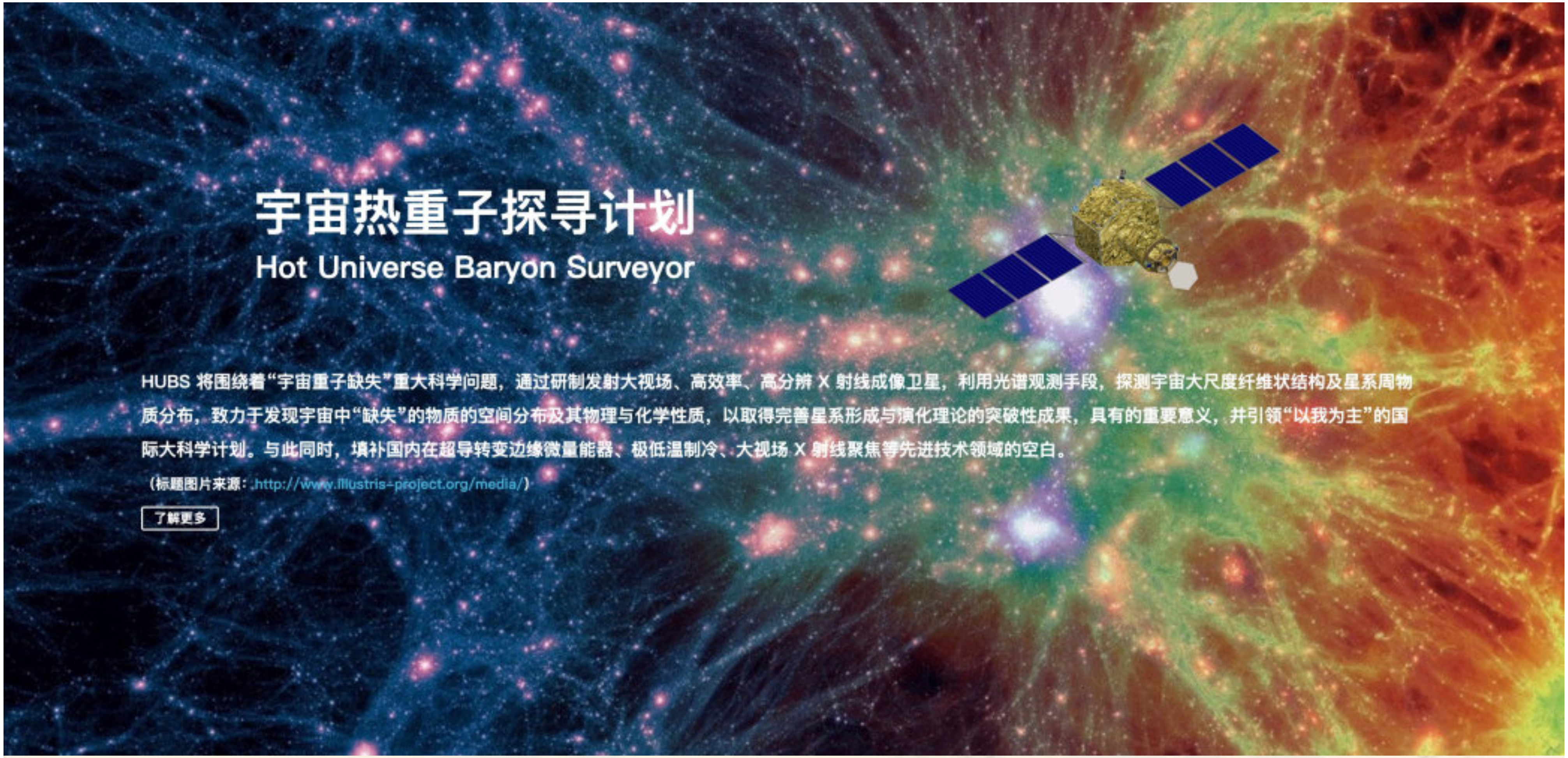
陶炼 & CATCH团队

2021-09-28@科大

Chasing **A**ll **T**ransients **C**onstellation **H**unters (CATCH)

“全变源追踪猎人星座”计划

（扫码观看）



宇宙热重子探寻计划

Hot Universe Baryon Surveyor

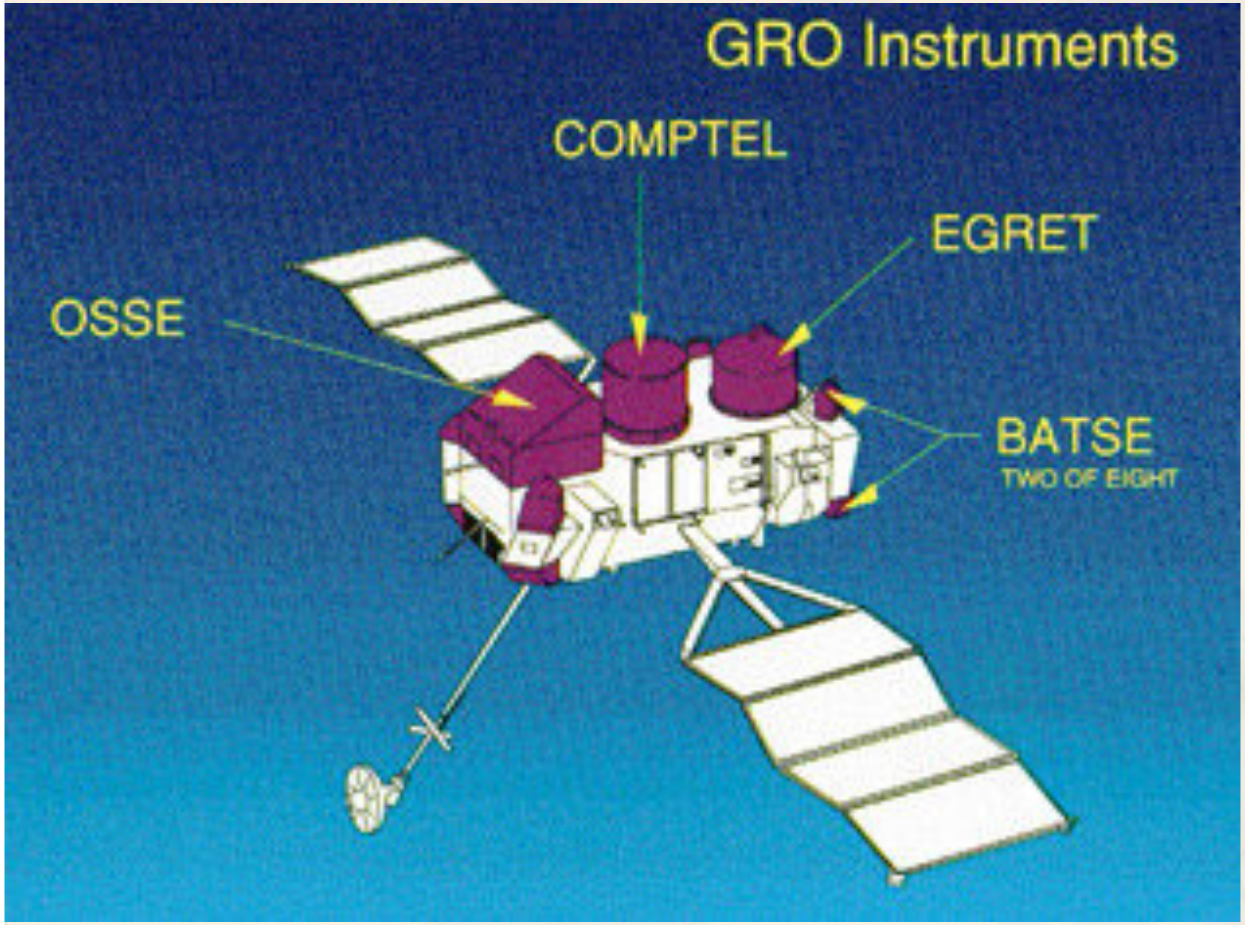
HUBS 将围绕着“宇宙重子缺失”重大科学问题，通过研制发射大视场、高效率、高分辨 X 射线成像卫星，利用光谱观测手段，探测宇宙大尺度纤维状结构及星系周物质分布，致力于发现宇宙中“缺失”的物质的空间分布及其物理与化学性质，以取得完善星系形成与演化理论的突破性成果，具有的重要意义，并引领“以我为主”的国际大科学计划。与此同时，填补国内在超导转变边缘微量能器、极低温制冷、大视场 X 射线聚焦等先进技术领域的空白。

（标题图片来源：http://www.illustris-project.org/media/）

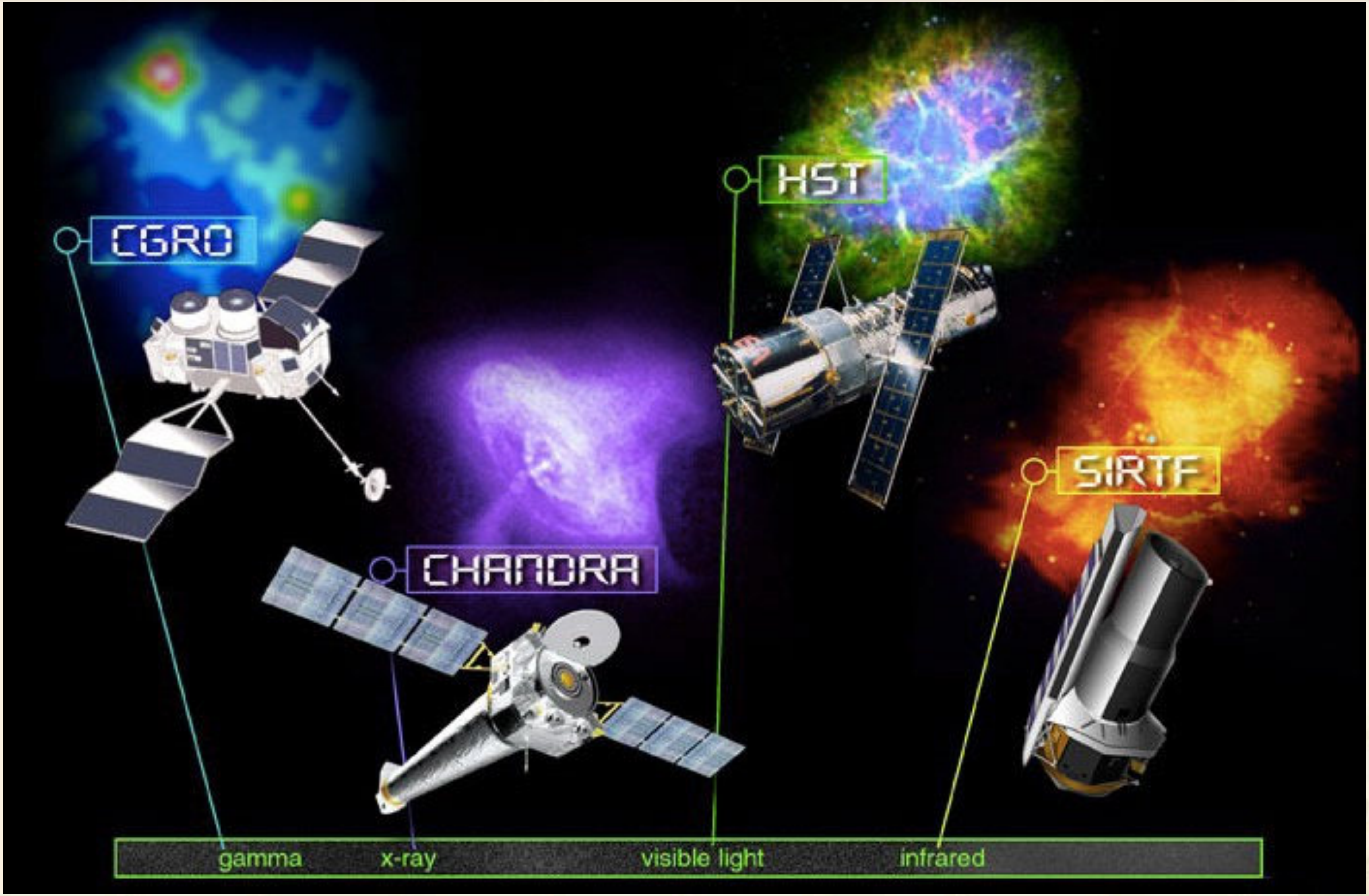
见证X射线天文
学的新时代
（清华大学 崔伟）

HUBS计划：
探测宇宙中
的热气体

伽玛射线-Compton Gamma-Ray Observatory


GRO Instruments
COMPTEL
EGRET
OSSE
BATSE
TWO OF EIGHT

- 工作波段：
  20 keV – 30GeV
- 1991.4.5－
  2000.6.4
- 主要发现：伽玛射线暴的各向同性


CGRO
HST
CHANDRA
SIRTF
gamma
x-ray
visible light
infrared

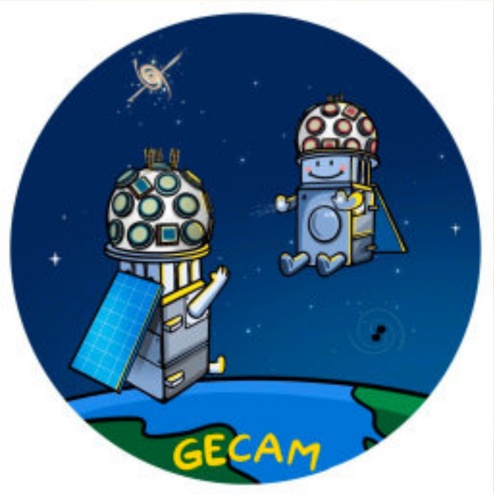
GECAM

20201210发射

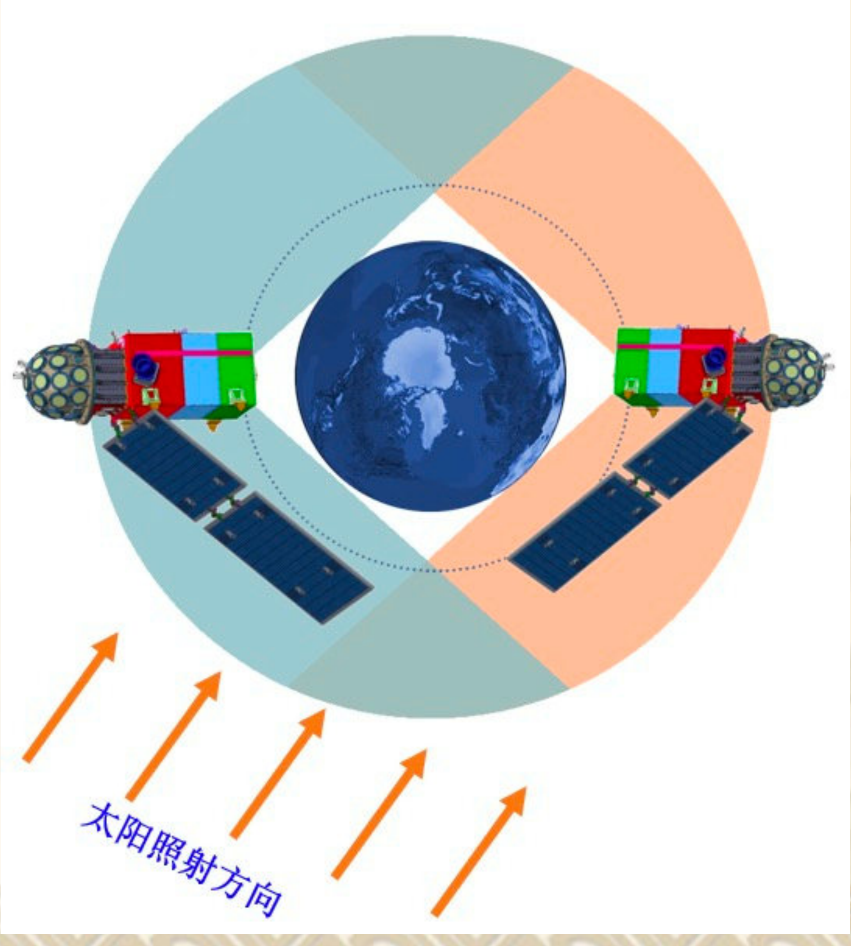
Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor

12月10日4时14分，我国在西昌卫星发射中心使用长征十一号固体运载火箭将引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星（Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor，简称GECAM）发射升空，**两颗卫星**成功进入预定轨道，这是我国首次发射全天监测引力波电磁对应体的卫星。

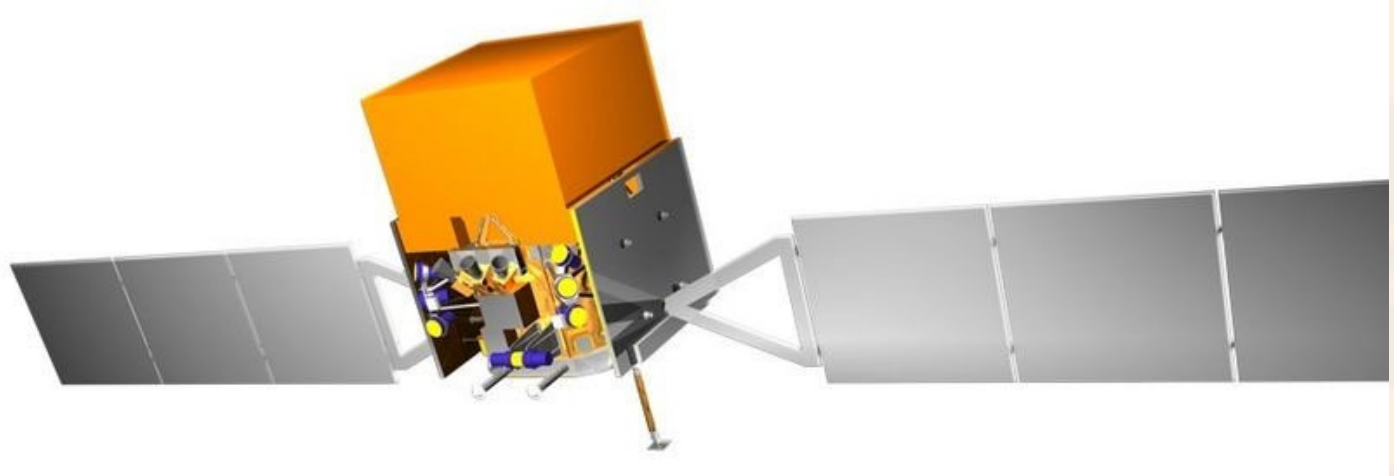
FOV: 100% all-sky
Sensitivity: ~2E-8 erg/cm²/s
Localization: ~1 deg
Energy band: 6 keV – 5 MeV



GECAM（极目）：“孪生兄妹”小极和小目入轨后分别时的场景



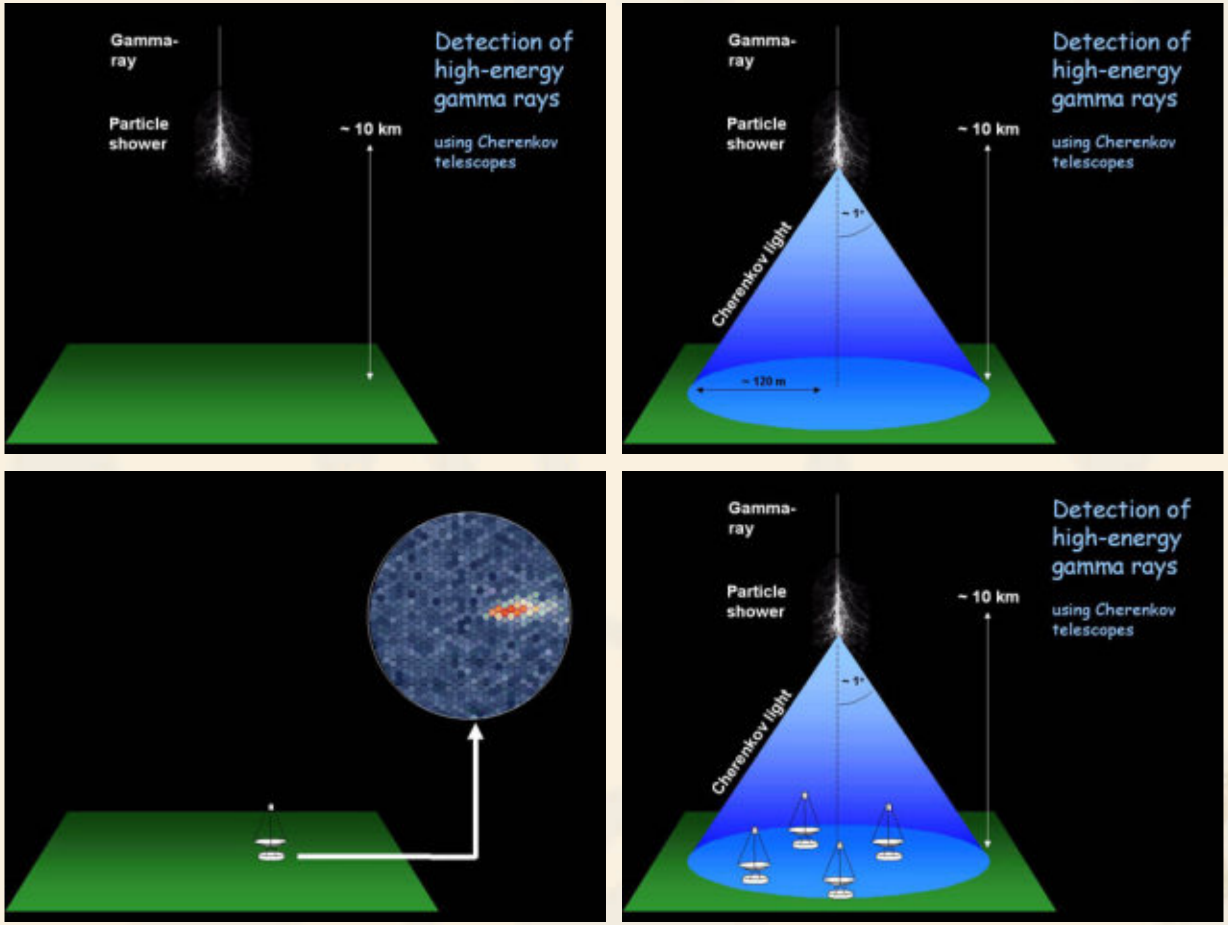
Fermi Gamma-ray Space Telescope （Fermi-GLAST）

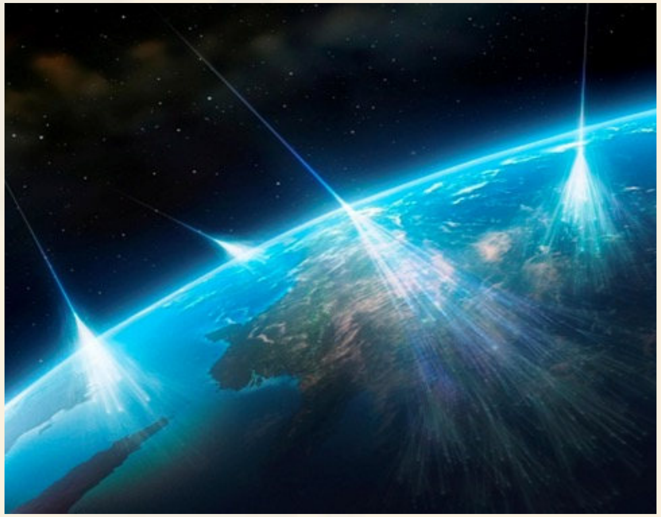


用伽玛射线观测探究高能天体物理过程

- •2008.6.11发射，工作波长：20MeV--300GeV
- •主要仪器：the Large Area Telescope (LAT) and the Gamma-ray Burst Monitor (GBM)
- •Blazars、活动星系、伽玛射线脉冲星、GRBs、宇宙线、超新星遗迹、早期宇宙、暗物质

TeV（Cherenkov）望远镜


Gamma-ray
Particle shower
~ 10 km
Detection of high-energy gamma rays
using Cherenkov telescopes
Cherenkov light
~ 1°
~ 120 m

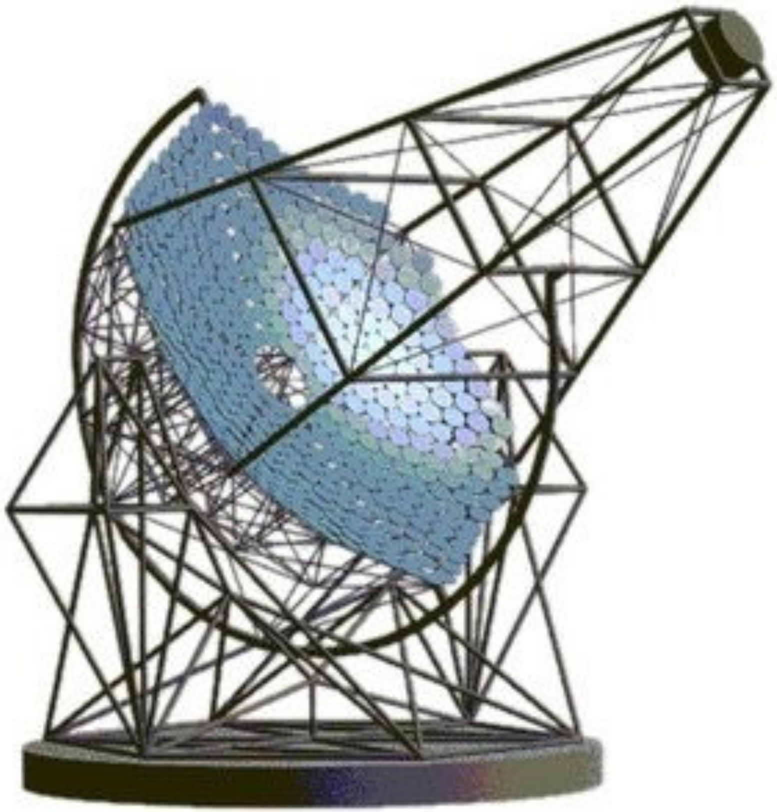


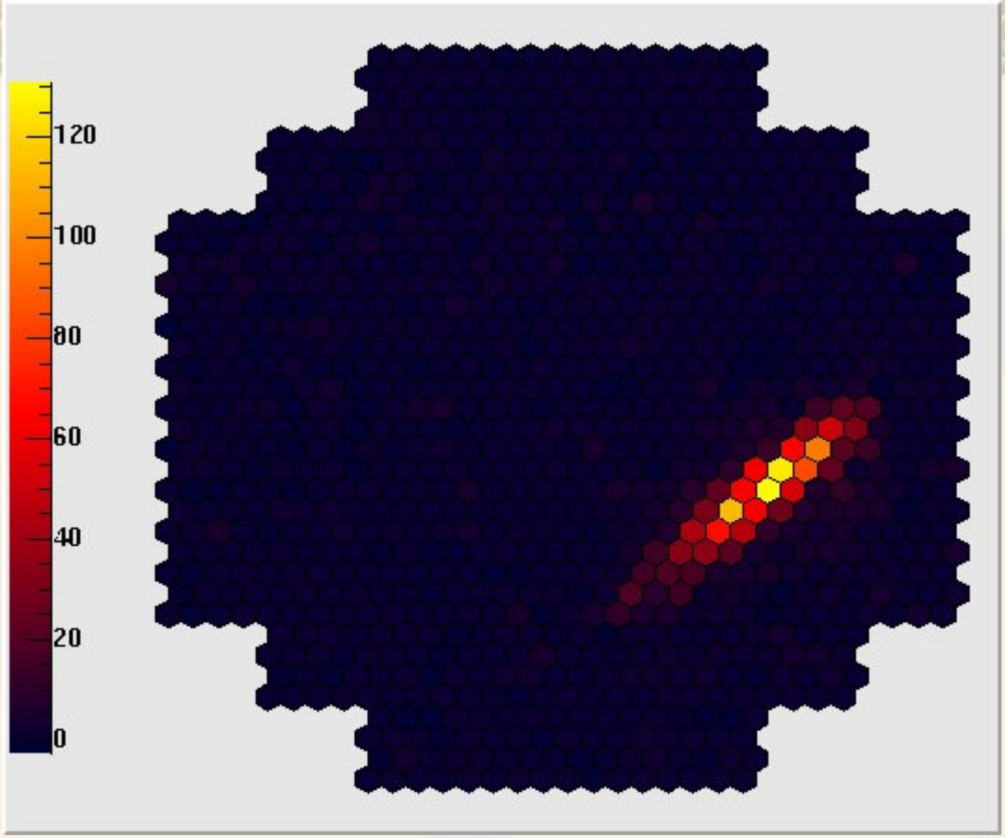
基本原理：

- 高能伽玛光子产生大气簇射
- 簇射粒子运动速度接近光速
- 产生Cherenkov光：暗蓝光
- Cherenkov 光池直径：250m，对10^{12}eV光子：~100/m^2,时间：纳秒

Hihg Energy Stereoscopic System (HESS)

- 100 GeV-100 TeV
- 位置：纳米比亚

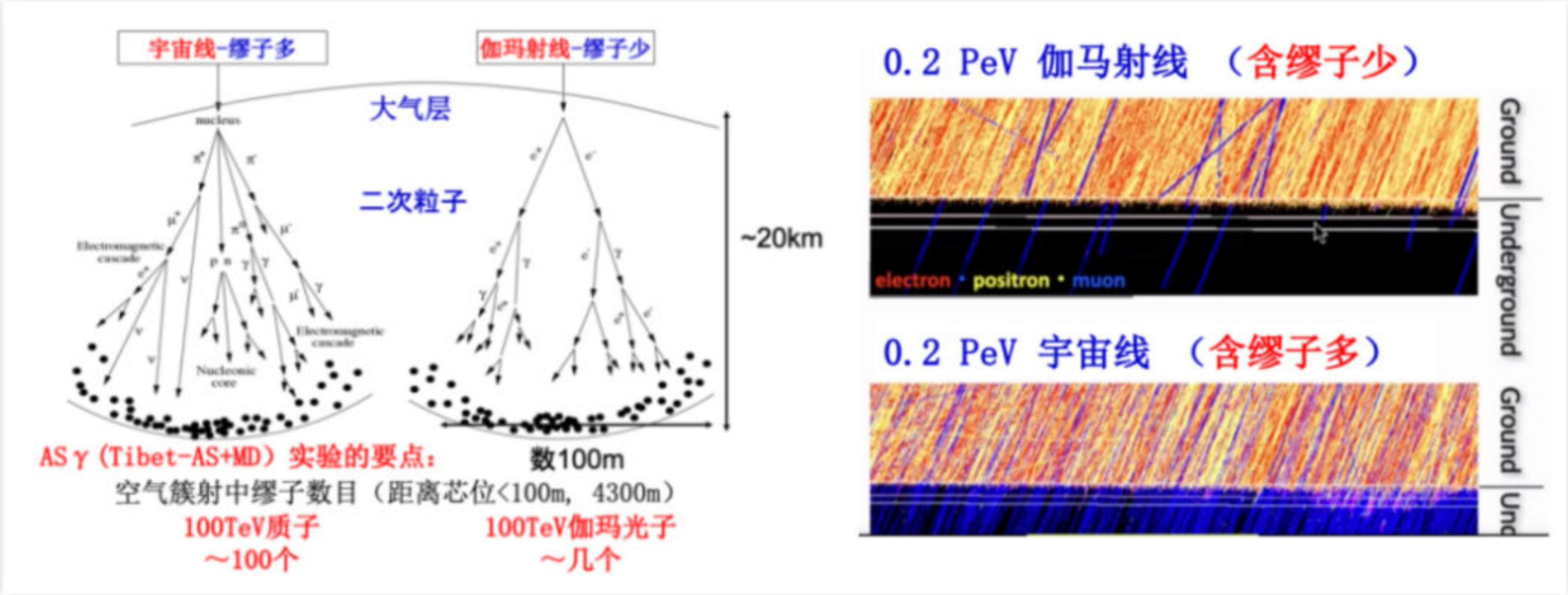




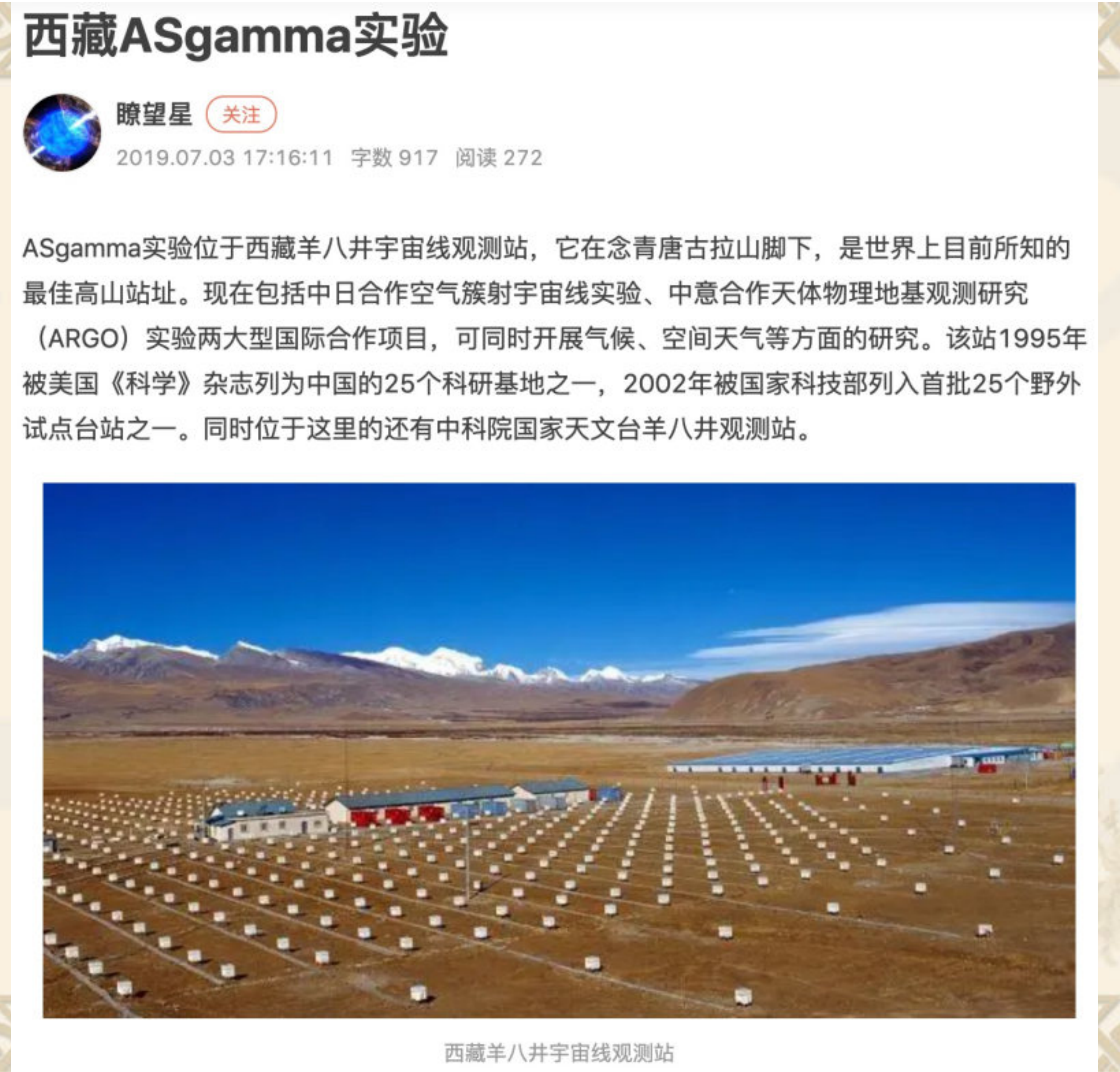
其它的Cherenkov望远镜：CANGAROO, H.E.S.S. , MAGIC, MILAGRO and VERITAS等

VE RI TAS HARVARD

VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)


宇宙线-缪子多
伽玛射线-缪子少
大气层
nucleus
二次粒子
~20km
Electromagnetic cascade
Nucleonic core
数100m
AS γ (Tibet-AS+MD) 实验的要点：
空气簇射中缪子数目（距离芯位<100m，4300m）
100TeV质子
～100个
100TeV伽玛光子
～几个
0.2 PeV 伽马射线 （含缪子少）
electron · positron · muon
Ground
Underground
0.2 PeV 宇宙线 （含缪子多）
Ground
Und

（左）宇宙线与伽马射线的区别；（右）通过对探测器接收到的缪子计数，可以挑选出伽马射线（中科院高能物理所 黄晶）



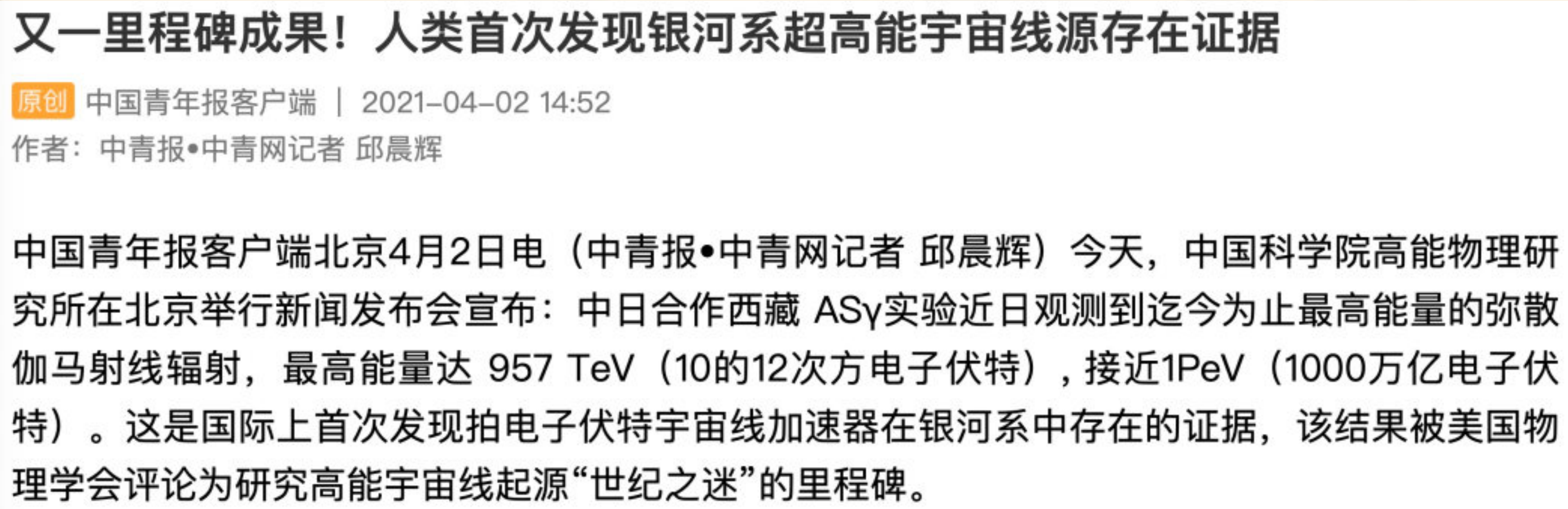
西藏ASgamma实验

瞭望星

2019.07.03 17:16:11 字数 917 阅读 272

ASgamma实验位于西藏羊八井宇宙线观测站，它在念青唐古拉山脚下，是世界上目前所知的最佳高山站址。现在包括中日合作空气簇射宇宙线实验、中意合作天体物理地基观测研究（ARGO）实验两大型国际合作项目，可同时开展气候、空间天气等方面的研究。该站1995年被美国《科学》杂志列为中国的25个科研基地之一，2002年被国家科技部列入首批25个野外试点台站之一。同时位于这里的还有中科院国家天文台羊八井观测站。

西藏羊八井宇宙线观测站

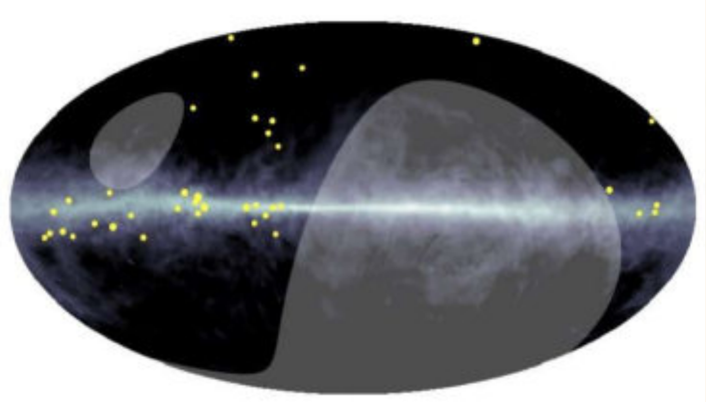


又一里程碑成果！人类首次发现银河系超高能宇宙线源存在证据

原创 中国青年报客户端 | 2021-04-02 14:52

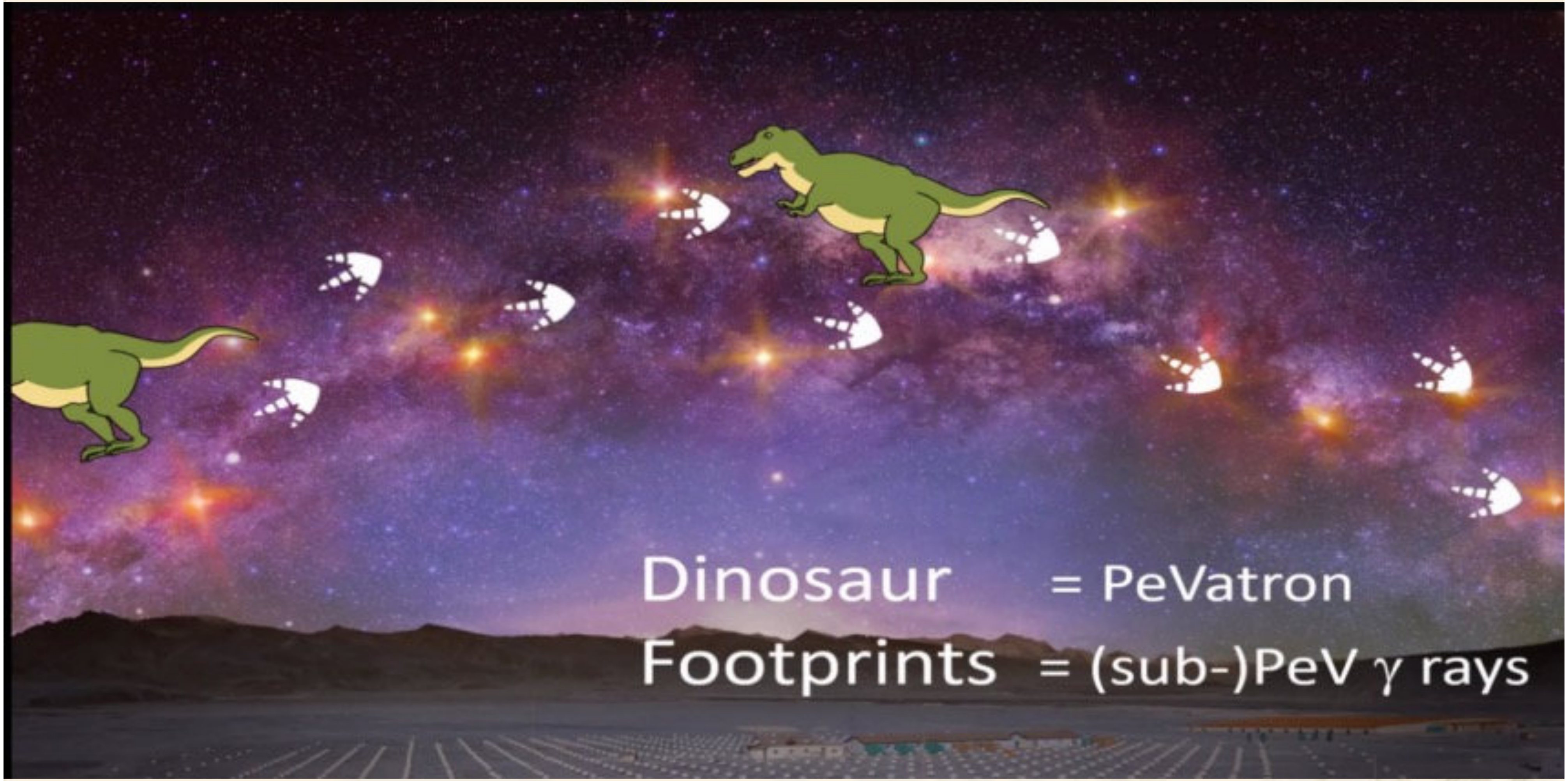
作者：中青报•中青网记者 邱晨辉

中国青年报客户端北京4月2日电（中青报•中青网记者 邱晨辉）今天，中国科学院高能物理研究所在北京举行新闻发布会宣布：中日合作西藏 ASγ实验近日观测到迄今为止最高能量的弥散伽马射线辐射，最高能量达 957 TeV（10的12次方电子伏特），接近1PeV（1000万亿电子伏特）。这是国际上首次发现拍电子伏特宇宙线加速器在银河系中存在的证据，该结果被美国物理学会评论为研究高能宇宙线起源“世纪之迷”的里程碑。



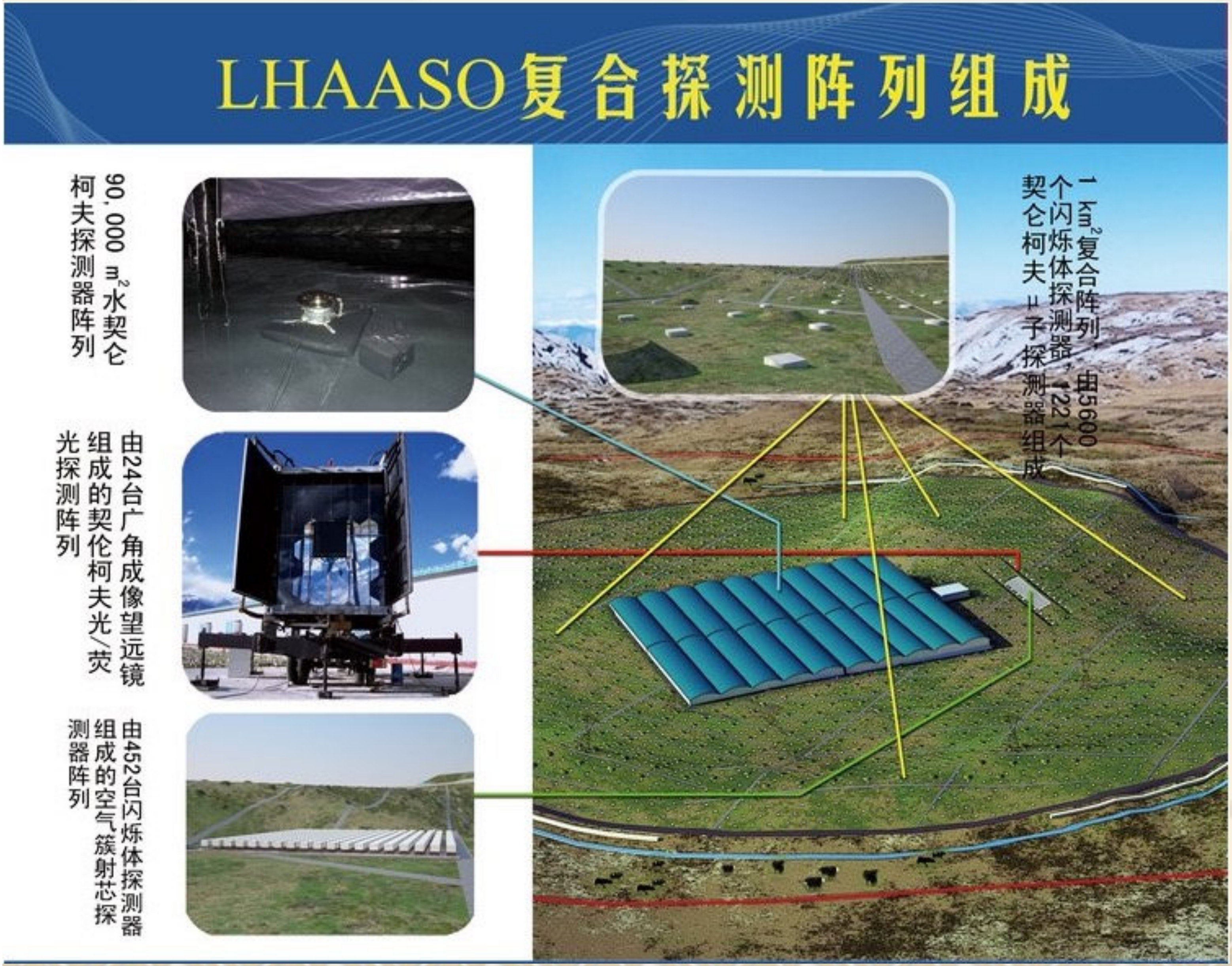
西藏ASγ实验团队观测到的超高能弥散伽马射线事例在银道坐标系下的分布。

图为西藏羊八井ASγ实验，左图为ASγ表面阵列，右图为地下水切伦科夫探测器。


Dinosaur = PeVatron
Footprints = (sub-)PeV γ rays

中科院高能物理所研究员黄晶介绍，ASγ实验探测到的伽马射线是宇宙线在银河系内留下的“一串串足迹”，是PeVatron广泛存在于银河系的重要证据。

高海拔宇宙线观测站 (LHAASO)



LHAASO复合探测阵列组成

1 km^{2}复合阵列，由5600个闪烁体探测器，1221个契仑柯夫μ子探测器组成

90,000 m^{2}水契仑柯夫探测器阵列

由24台广角成像望远镜组成的契伦柯夫光/荧光探测阵列

由452台闪烁体探测器组成的空气簇射芯探测器阵列

卢方军老师：

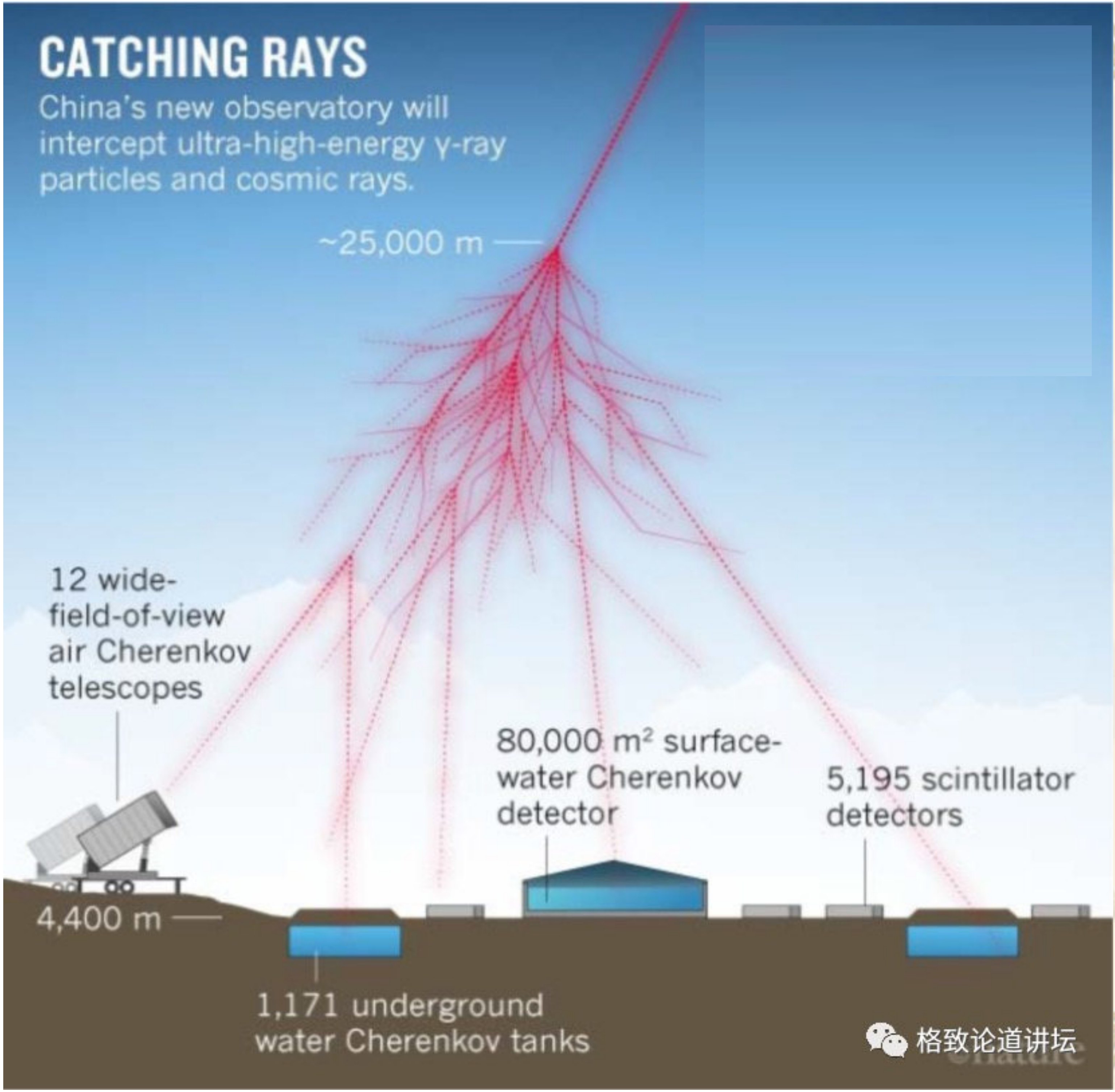
“拉锁”：打开未知世界

“拉索”：如绳一般，带出一串重大成果

“辣叟”：培养出顶级人才

XYQ:

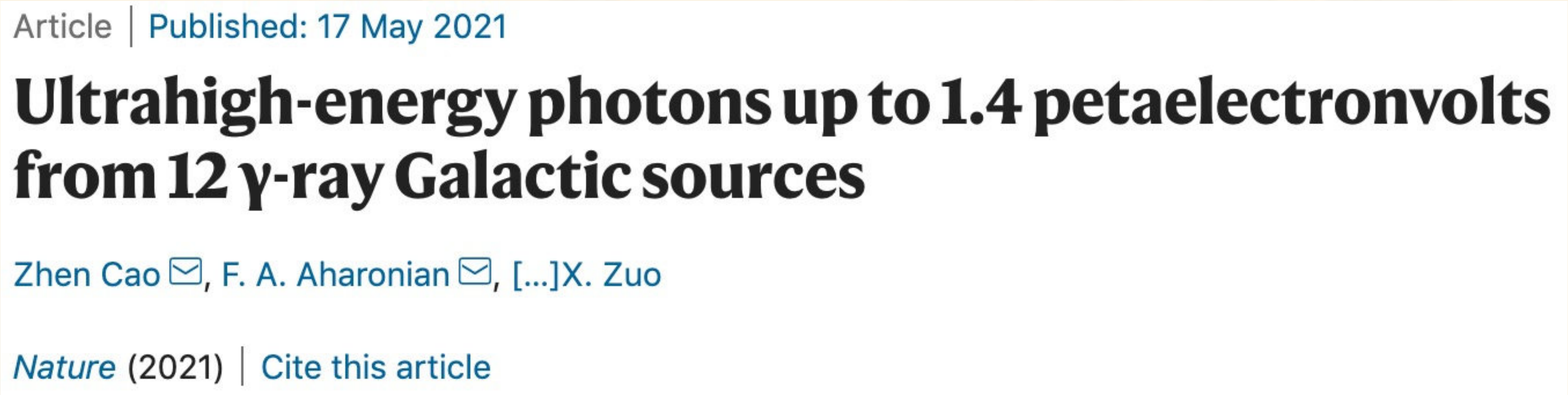
“辣嫂”：撑起半边天


CATCHING RAYS
China's new observatory will intercept ultra-high-energy γ-ray particles and cosmic rays.
~25,000 m
12 wide-field-of-view air Cherenkov telescopes
4,400 m
80,000 m² surface-water Cherenkov detector
5,195 scintillator detectors
1,171 underground water Cherenkov tanks
©nature

格致论道讲坛

地面与空间伽
玛射线天文学

突破“极限”，我国科学家发现迄今最高能量光子



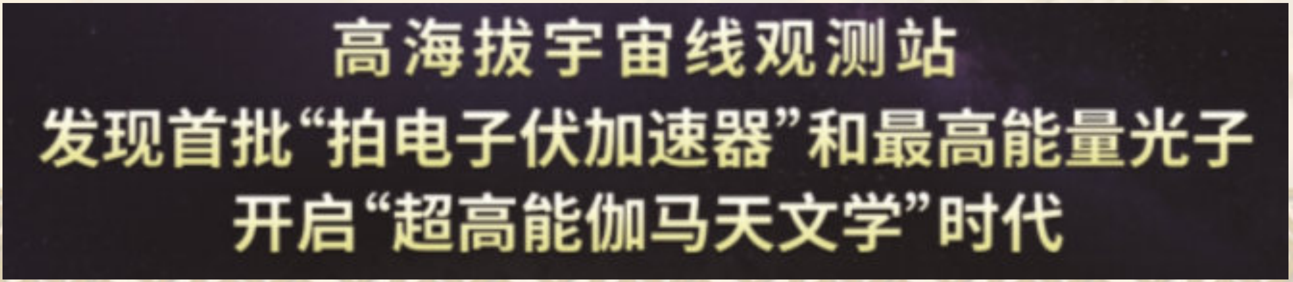
Article | Published: 17 May 2021

Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ-ray Galactic sources

Zhen Cao, F. A. Aharonian, […]X. Zuo

Nature (2021) | Cite this article

据《科技日报》，从中国科学院高能物理研究所新闻发布会获悉，国家重大科技基础设施高海拔宇宙线观测站“拉索”（LHAASO）在银河系内发现2个能量超过1拍电子伏特（PeV，1000万亿电子伏特）的光子，这2个超高能光子分别来自天鹅座和蟹状星云，其中1个光子能量高达1.4PeV。这是人类迄今观测到的最高能量光子，突破了人类对银河系粒子加速的传统认知，开启了超高能伽马天文学的新时代。相关研究成果在线发表于《自然》杂志。

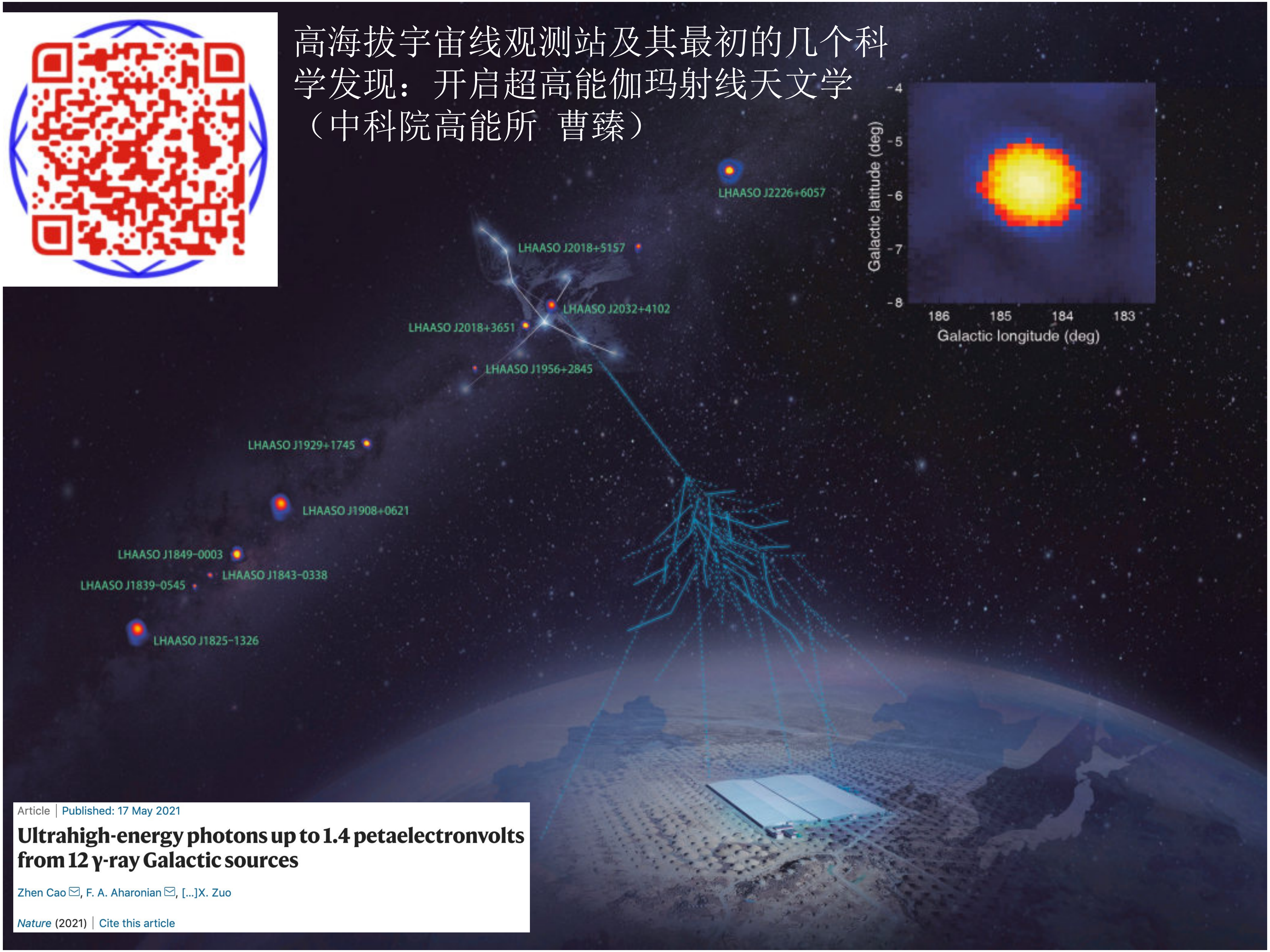


高海拔宇宙线观测站

发现首批“拍电子伏加速器”和最高能量光子

开启“超高能伽马天文学”时代

高海拔宇宙线观测站及其最初的几个科学发现：开启超高能伽玛射线天文学（中科院高能所 曹臻）


LHAASO J2226+6057
LHAASO J2018+5157
LHAASO J2032+4102
LHAASO J2018+3651
LHAASO J1956+2845
LHAASO J1929+1745
LHAASO J1908+0621
LHAASO J1849-0003
LHAASO J1843-0338
LHAASO J1839-0545
LHAASO J1825-1326
Galactic latitude (deg)
-4
-5
-6
-7
-8
186
185
184
183
Galactic longitude (deg)

Article | Published: 17 May 2021

Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ-ray Galactic sources

Zhen Cao, F. A. Aharonian, […]X. Zuo

Nature (2021) | Cite this article

非电磁辐射

- 中微子
- 宇宙线
- 引力波

宇宙线

- 宇宙线的成分：90%质子+9%氦核+1%电子+少量的重核
- 方向随机，最高能量达10^{20}eV！（大型重子对撞机：~10几个TeV）
- 宇宙线的起源：大多来自银河系中的旋转中子星、超新星（遗迹）、黑洞；最高能量的粒子来自超大质量黑洞周围、喷流；银心；低能粒子来自太阳
- 宇宙线的分类：初级粒子和次级粒子
  - 初级粒子：氧核、碳核（产自恒星，超新星爆发抛出）
  - 次级粒子：锂、铍、硼，初级粒子与ISM作用的结果
- 对全球温度的可能影响：宇宙线流量改变地球云层覆盖程度
- 大气簇射：与大气中的氧、氮作用，形成数十亿个轻的粒子！
- 中子碰撞^{14}N，产生放射性的^{14}C（半衰期：5730年），大气中^{14}C的比例稳定：定树木的年龄
- μ子衰变，检验狭义相对论（半衰期1.6us/10km高/1%光速/到达地面概率1/(3M) → 7.8us/概率1/20）

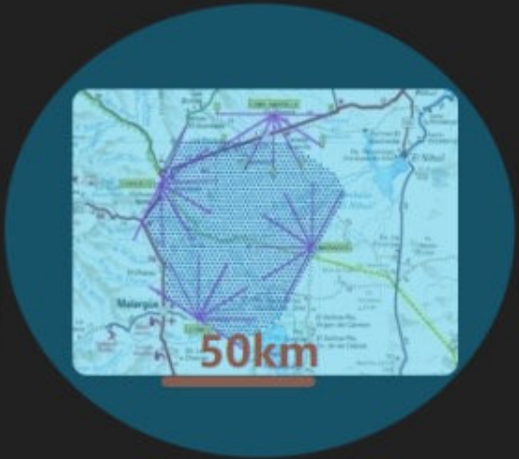
- 宇宙线的成分 少量的重核
- 方向随机，最 撞机：~10几个TeV）
- 宇宙线的起源 星、超新星（遗迹）、黑洞； 洞周围、喷流，低能粒子来自
- 宇宙线的分类
  - 初级粒子： 爆发抛出）
  - 次级粒子： 作用的结果
- 对全球温度的 云层覆盖程度
- 大气簇射：与 亿个轻的粒子！
- 中子碰撞^{14}N， 30年），大气中^{14}C的比例稳
- μ子衰变，检

TOM HANKS
A RON HOWARD FILM
ANGELS & DEMONS

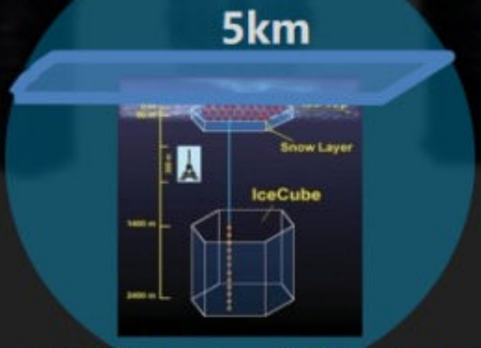
核心问题

UHE宇宙线起源

VHEγ天文学
LHAASO、CTA



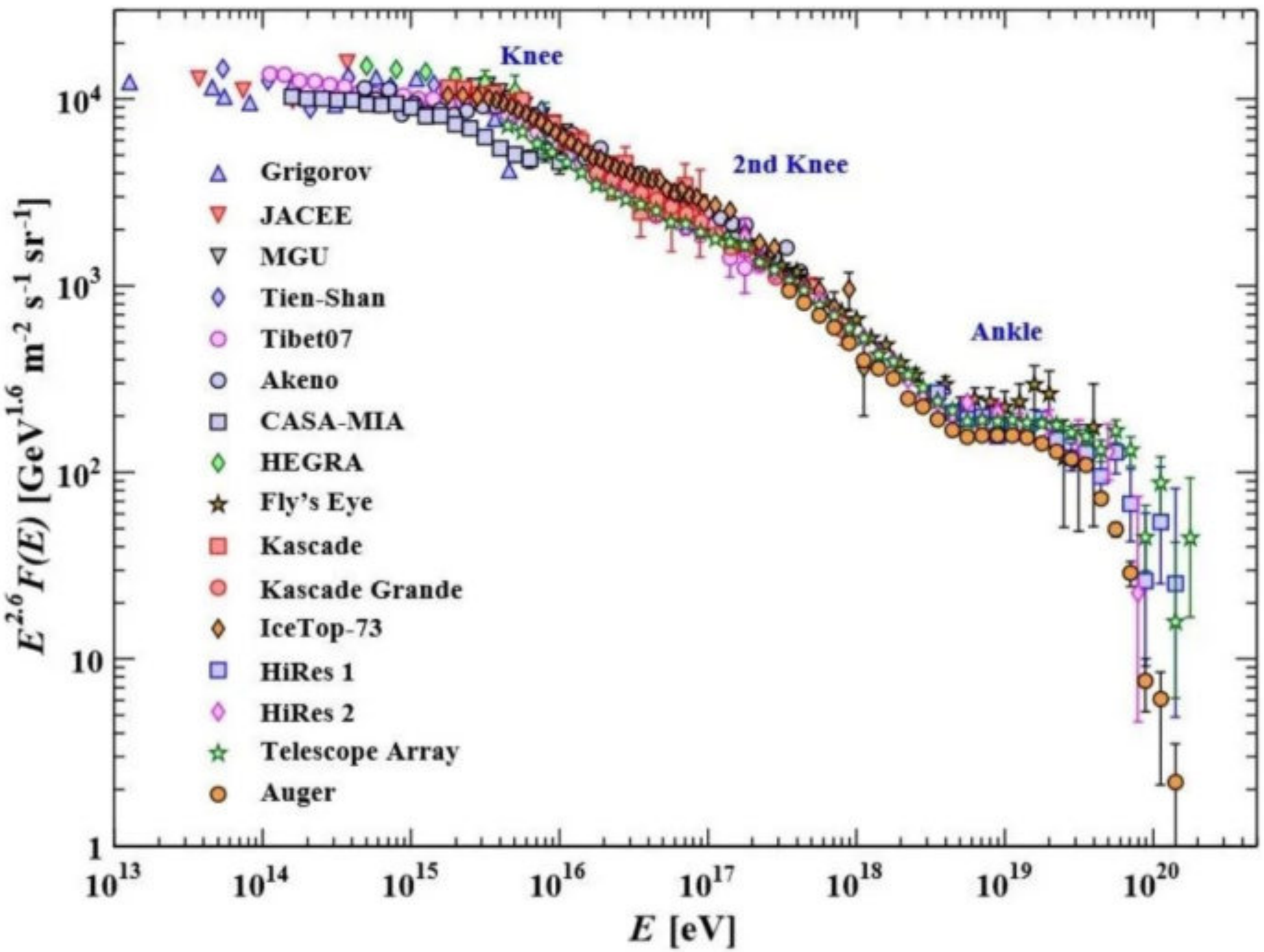
EHE宇宙线物理
AUGER、JEM-EUSO


5km
Snow Layer
IceCube

VHE/UHE中微子天文学
ICECUBE

格致论道讲坛

太阳是离我们最近的宇宙线源，太阳宇宙线就是太阳活动产生的高能粒子流，其能量较低，通常不超过~10^{10}eV。



能量大于10^{13}eV宇宙线能谱 。宇宙线的流量随着能量的增加迅速降低，这个能谱总体可以用一个幂律谱来表示，在对数坐标下近似为一条直线。在10^{15}~10^{16}eV附近变陡，称为“膝区”(Knee)，在10^{18}~10^{19} eV变平被称为“踝区”（Ankle）在10^{17}eV左右再次变陡，称为第二“膝区”(2nd Knee)。| 图源：参考文献[2]

来自不同种类高能天体的宇宙线到达地球后，会在宇宙线能谱的不同能段显现出来。一般认为，能量在“踝区”（能量10^{18}~10^{19} eV）以下的宇宙线可能起源于银河系，而在“踝区”以上的宇宙线主要来自河外高能天体源。

宇宙线的月亮影子—带电粒子

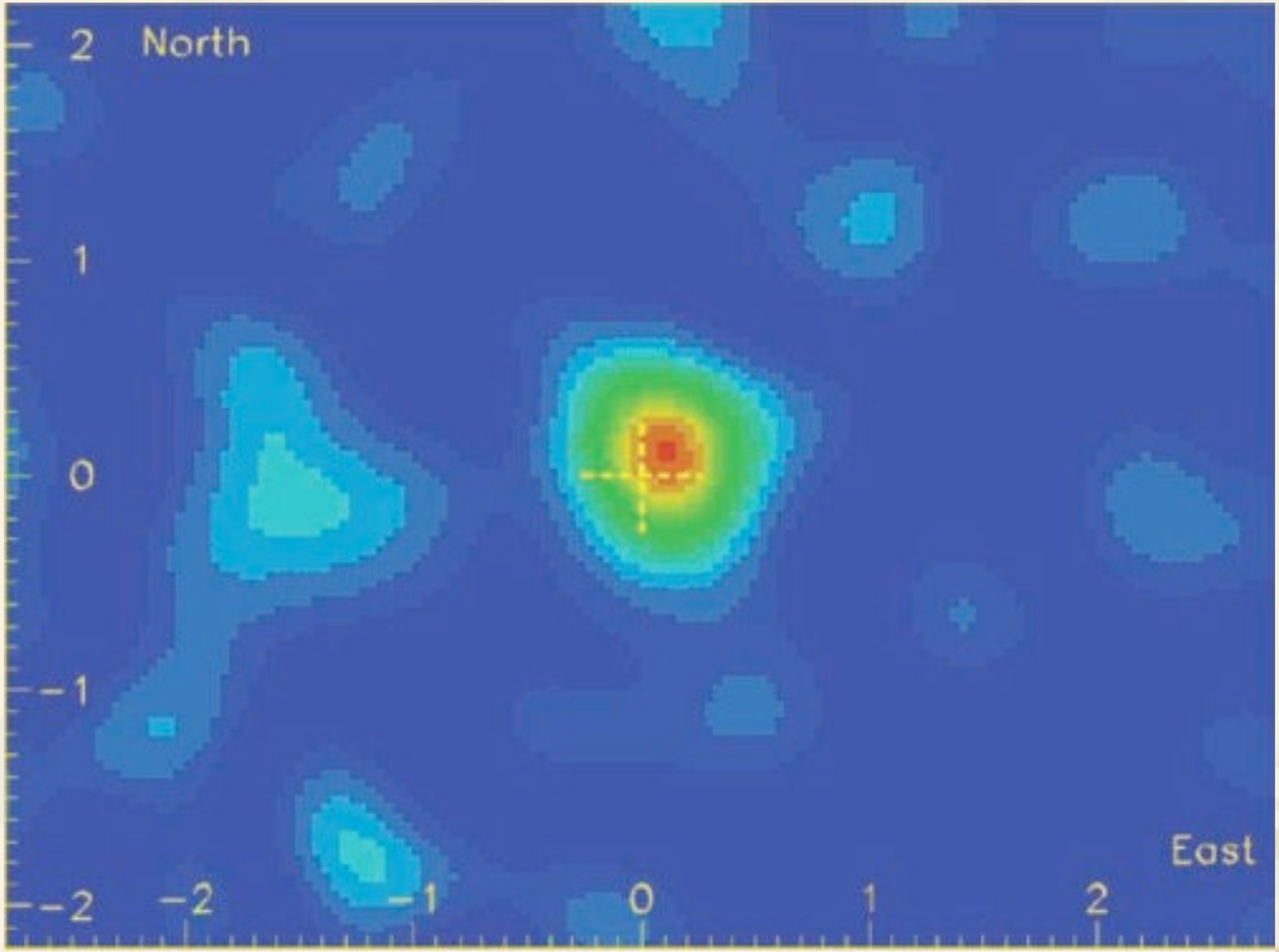
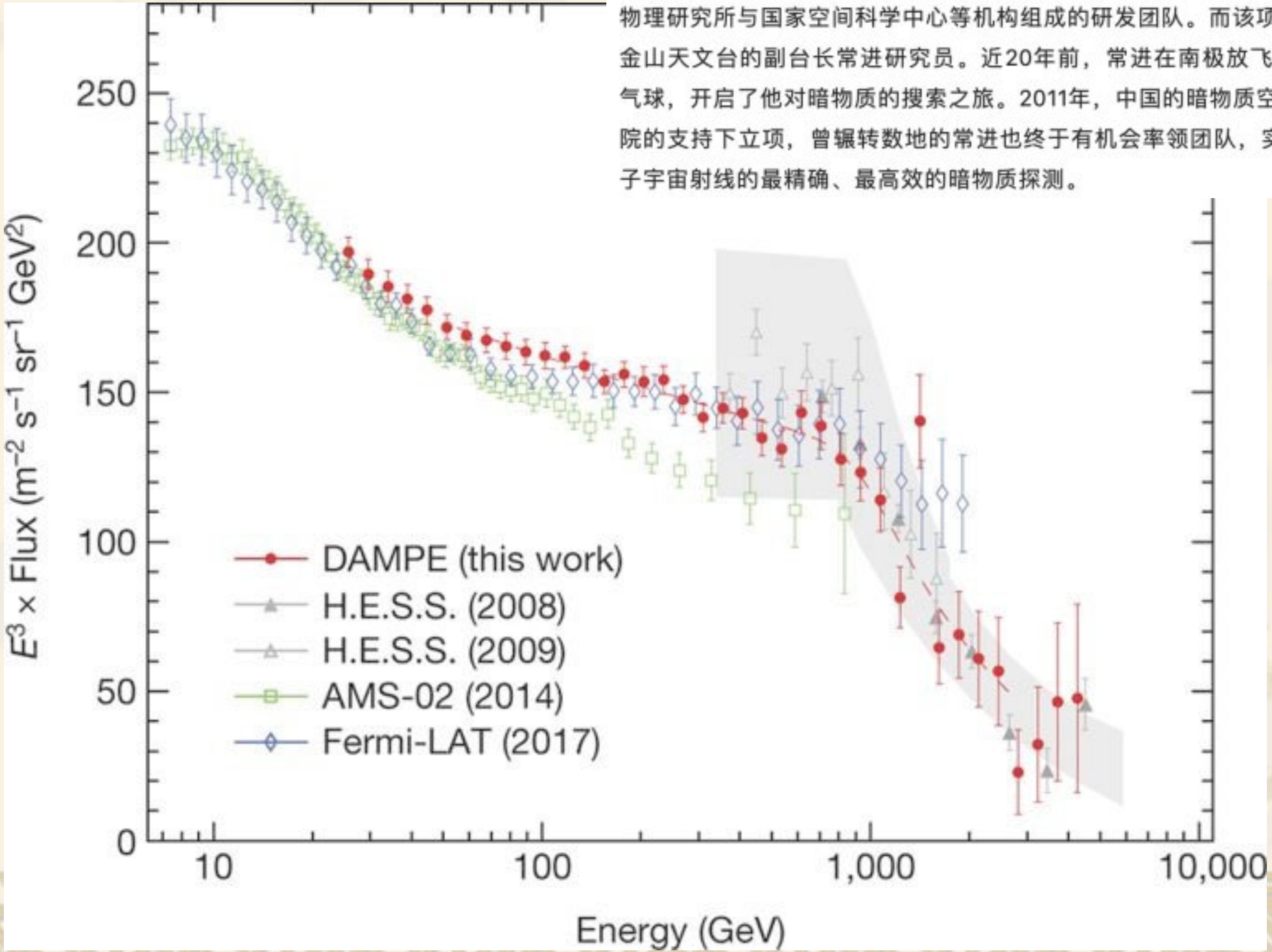


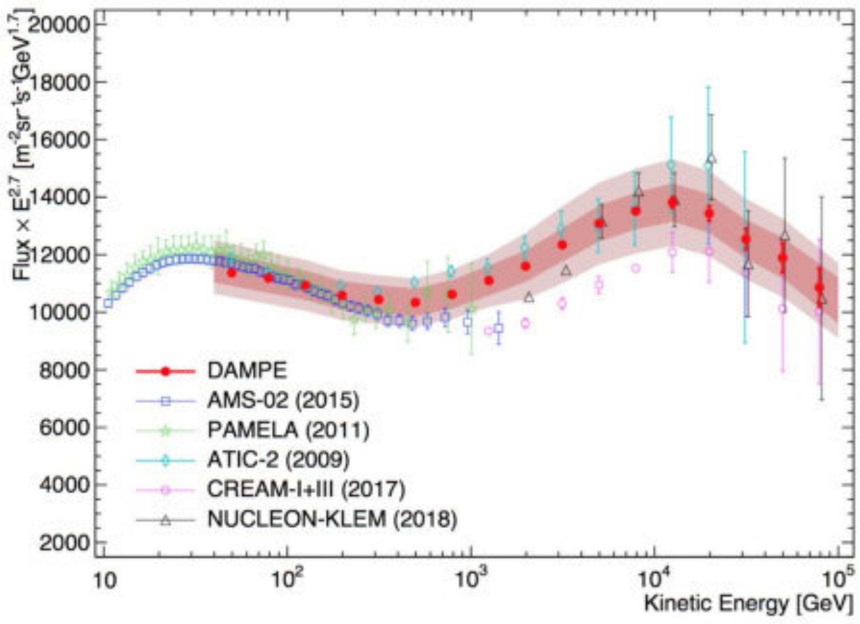
Figure 5.32 The 'Moon's shadow' as observed by the Soudan 2 muon detector. Image: Argonne National Laboratory, and Minnesota, Tufts and Western Washington Universities, USA, and Oxford University and the Rutherford Appleton Laboratory, UK.

北京时间2017年11月30日，《自然》杂志在线发表了中国暗物质粒子探测卫星“悟空”号（DAMPE）的首批成果。2015年12月17日，肩负着寻找暗物质粒子重任的“悟空”号从酒泉卫星发射中心成功发射。在近两年的在轨运行期间，“悟空”号采集了约28亿例高能宇宙射线，并基于这些数据获取了目前国际上精度最高的TeV电子宇宙射线探测结果。持续累积的数据有可能为我们带来暗物质或天体物理领域的重大发现。

在“悟空”号背后，是一支由紫金山天文台、中国科学技术大学、近代物理研究所、高能物理研究所与国家空间科学中心等机构组成的研发团队。而该项目的首席科学家，是紫金山天文台的副台长常进研究员。近20年前，常进在南极放飞了一枚探测高能电子的气球，开启了他对暗物质的搜索之旅。2011年，中国的暗物质空间探测计划在中国科学院的支持下立项，曾辗转数地的常进也终于有机会率领团队，实现了国际上基于TeV电子宇宙射线的最精确、最高效的暗物质探测。



“悟空”号新成果： 首次精确绘制超高能宇宙线质子能谱



“悟空”号探测的40 GeV-100 TeV能段宇宙线质子能谱（红点）

| 图源：DAMPE collaboration (2019, Sci. Adv., 5, eaax3793)

“悟空”号寻找暗物质的研究聚焦于高能电子宇宙线能谱。为了得到纯净的高能电子样本，要想尽办法剔除来自质子的污染。然而恰恰是这些被剔除的质子中却又隐藏着丰富而神秘的宇宙信息。

北京时间2019年9月28日，“悟空”号国际合作组在《科学进展》（Science Advances）杂志发表了从40 GeV到100 TeV能段的宇宙线质子精确能谱测量结果（1 GeV=10^9 eV，1 TeV=10^{12} eV）。这是**国际上首次利用空间实验实现对高达100 TeV的宇宙线质子能谱的精确测量**。“悟空”号的测量结果确认了之前发现的质子能谱在数百GeV处的变“硬”行为，这里“硬”和“软”衡量的是其中高能量粒子占比的多和少。更为重要的是，**“悟空”号首次发现质子能谱在约14 TeV出现明显的能谱变“软”结构。**

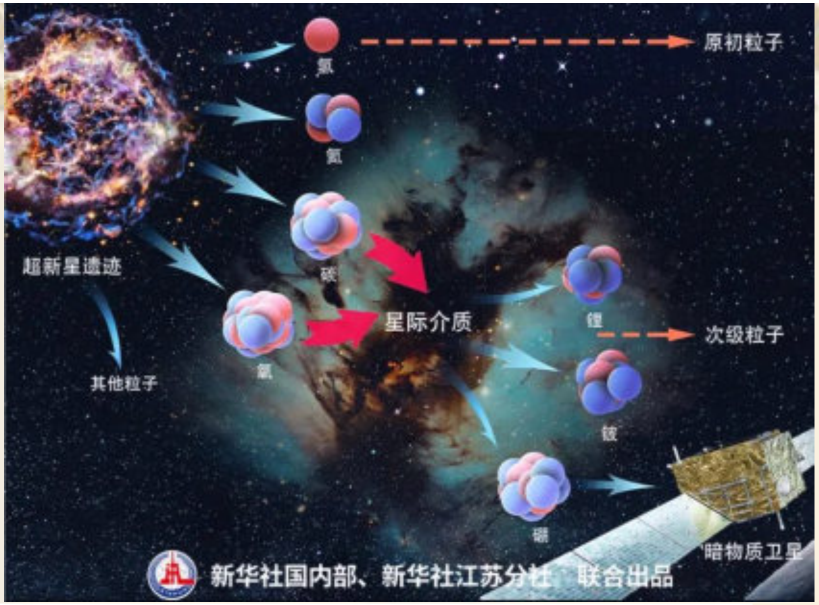
利用DAMPE研究
宇宙线起源和传播

“悟空”号的新结果对揭示高能宇宙线的起源以及加速机制具有十分重要的意义。我们对这个结果给出两种理论上的推测。14 TeV处能谱变软的结构很可能是地球附近个别宇宙线源留下的印记，拐折能量即对应于这个源的加速上限。基于该模型对数据的拟合如下图所示。也有另外一种可能性，即银河系中宇宙线源存在不同种类，它们给出具有差异的宇宙线能谱，其总和给出观测到的复杂能谱结构。

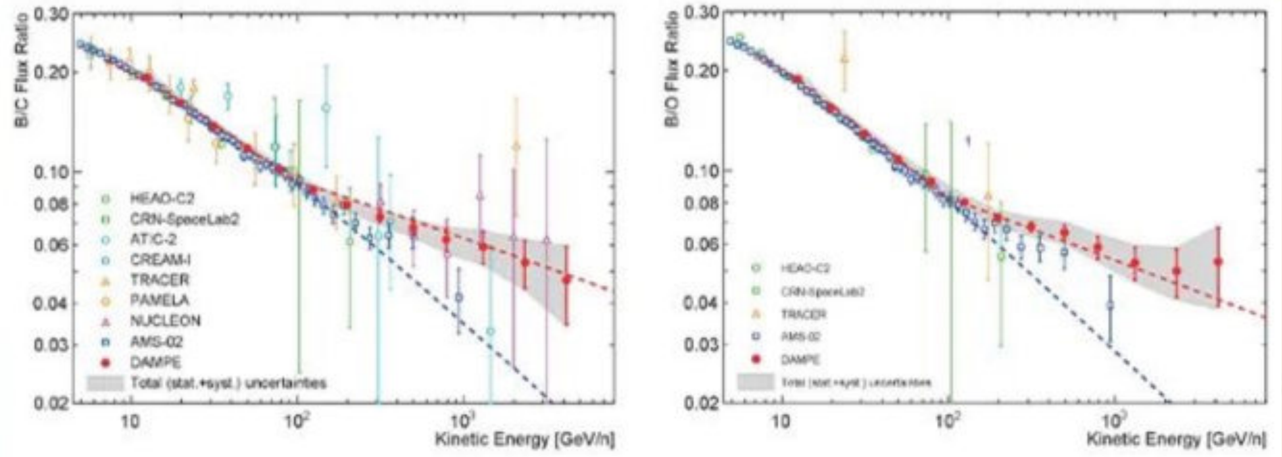
“悟空”公布最新成果！

新华社 2022-11-02 07:06 发表于北京

记者1日从暗物质卫星“悟空”团队获悉，科研人员基于“悟空”数据，新近绘制出迄今能段最高的硼/碳、硼/氧宇宙射线粒子比能谱，并发现能谱新结构。这一最新成果显示，宇宙中高能粒子的传播可能比预想更慢。

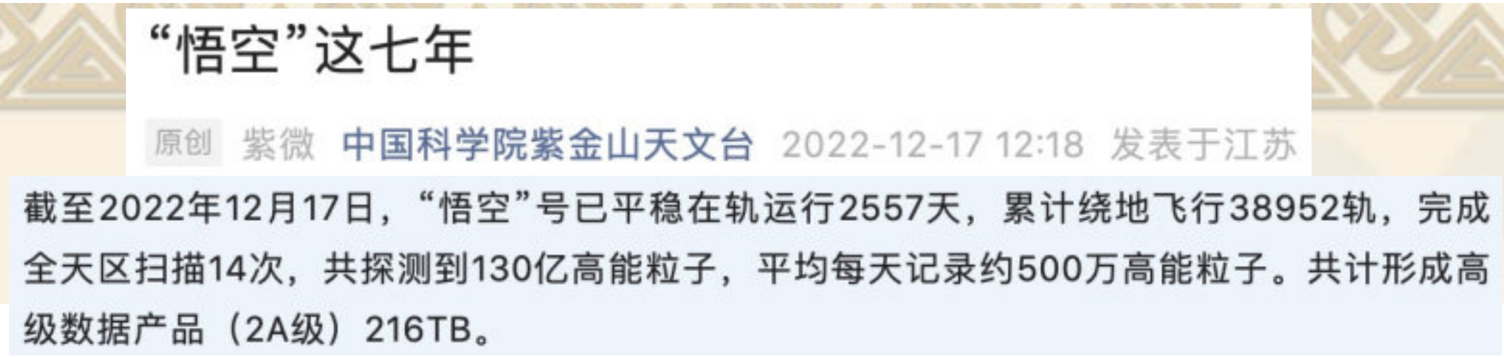

氦
氮
碳
氧
原初粒子
超新星遗迹
其他粒子
星际介质
锂
铍
硼
次级粒子
暗物质卫星
新华社国内部、新华社江苏分社 联合出品

宇宙射线是来自外太空的高能粒子。其中碳、氧原子核是恒星核合成过程中产生的原初粒子，而硼原子核主要是碳、氧原子核在传播过程中和星际物质碰撞后产生的次级粒子。在前六年观测中，“悟空”共记录了超过350万个碳、氧、硼原子核数据，科研人员据此精确绘制出0.01TeV/n到5.6TeV/n（1TeV/n =1万亿电子伏特/核子）能段宇宙射线硼/碳比和硼/氧比的精确能谱。在大约0.1TeV/n处，能谱出现了明显不同于理论预期的拐折。



暗物质卫星首席科学家、中国科学院院士常进介绍，这是“悟空”首次对宇宙射线中的次级/原初粒子比例进行精确测量。在1TeV/n以上能段，“悟空”绘出的能谱精度最高，并且“看”到了不同于预期的能谱结构，这意味着经典宇宙射线传播模型或需进一步修正。

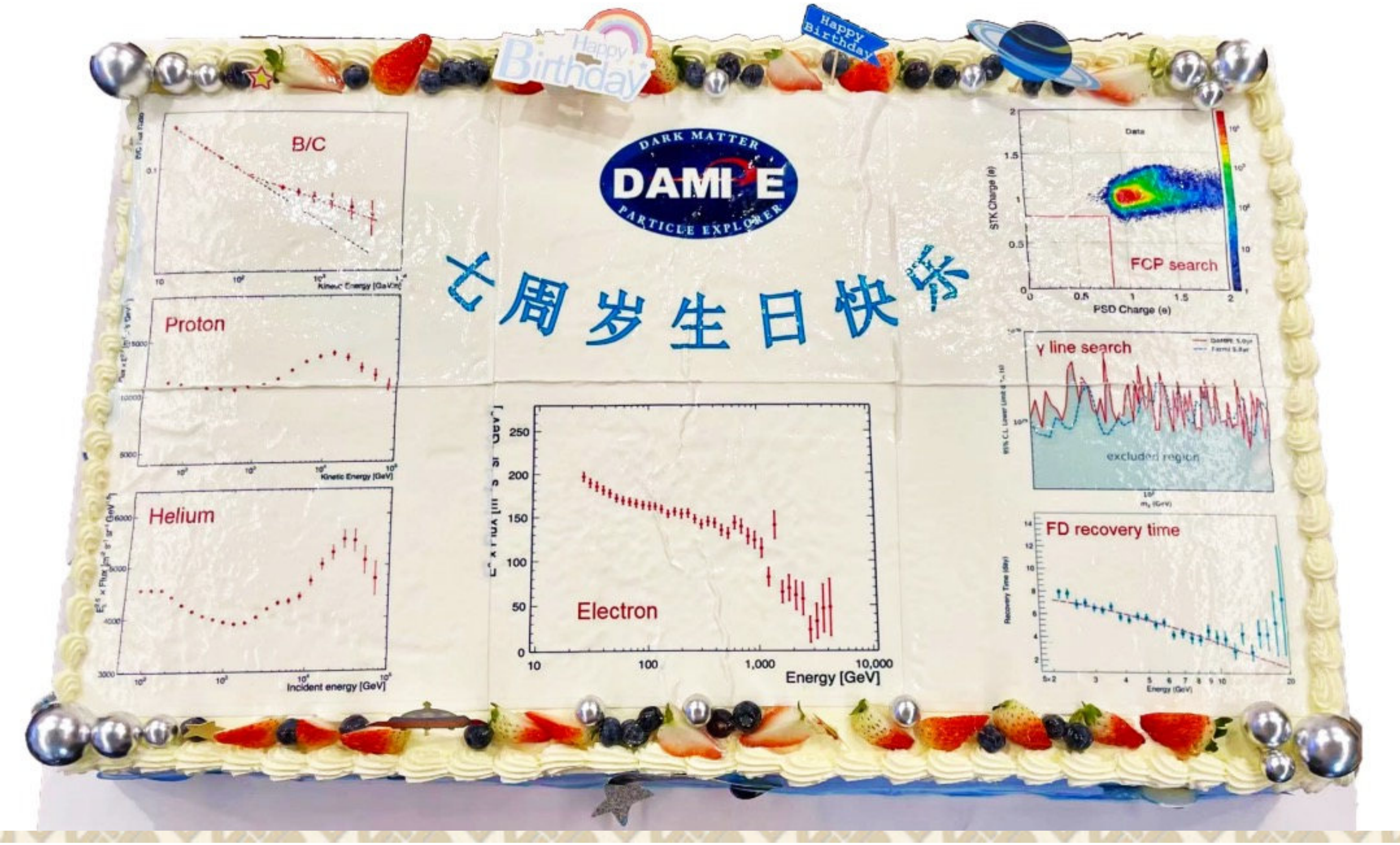
卫星科学团队成员、中科院紫金山天文台副研究员岳川解释，高能段的硼/碳、硼/氧比例出现拐折，可能是因为高能粒子在宇宙中的传播比预想更慢。原初粒子的传播速度越慢，就有越多机会与星际物质碰撞，进而碎裂产生更多次级粒子。



“悟空”这七年

原创 紫微 中国科学院紫金山天文台 2022-12-17 12:18 发表于江苏

截至2022年12月17日，“悟空”号已平稳在轨运行2557天，累计绕地飞行38952轨，完成全天区扫描14次，共探测到130亿高能粒子，平均每天记录约500万高能粒子。共计形成高级数据产品（2A级）216TB。

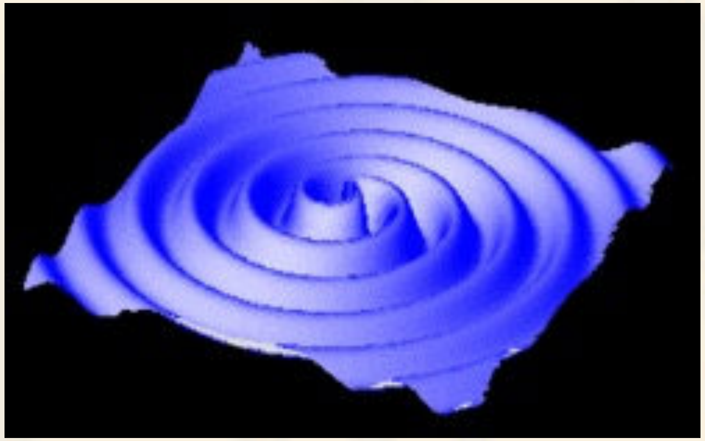

Happy Birthday
Happy Birthday
DARK MATTER
DAMPE
PARTICLE EXPLORER
七周岁生日快乐
B/C
Kinetic Energy [GeV/n]
Proton
Kinetic Energy [GeV]
Helium
Incident energy [GeV]
Electron
250
200
150
100
50
0
10
100
1,000
10,000
Energy [GeV]
Data
STK Charge (e)
PSD Charge (e)
FCP search
γ line search
excluded region
FD recovery time
Recovery Time (day)
Energy (GeV)

四川稻城海子山上的高海拔宇宙线观测站（LHAASO）

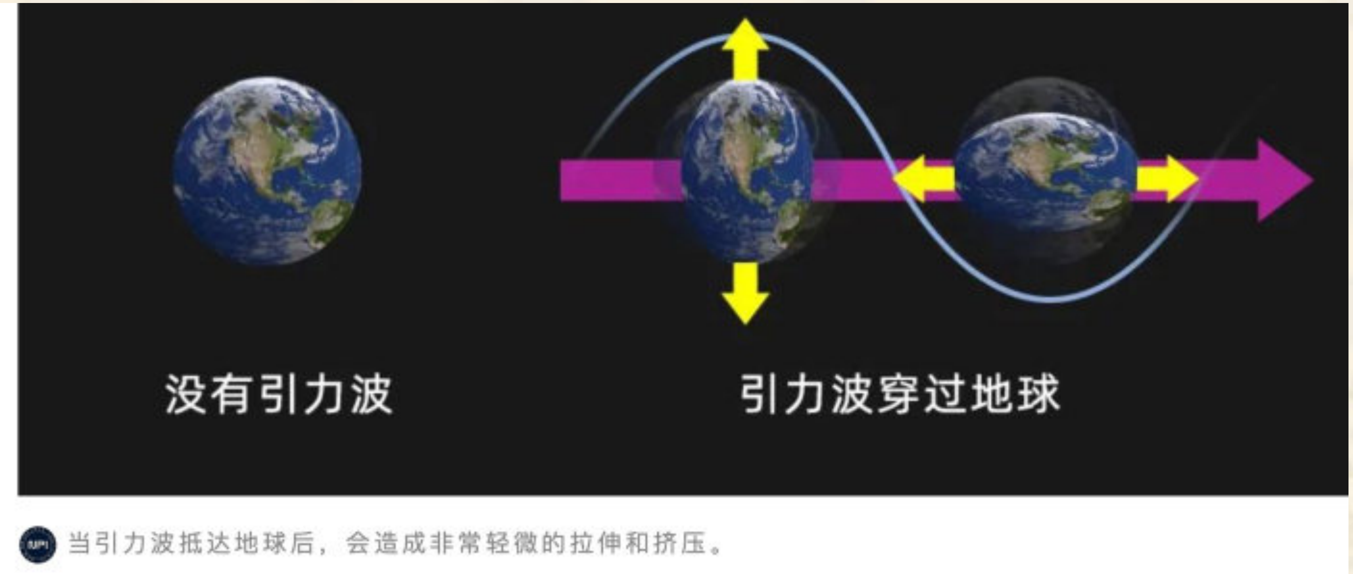
| 图源：网络

在观测方面，我国四川稻城的国家重大科学基础设施“**高海拔宇宙线观测站（LHAASO）**“将对高能宇宙线和伽马射线给出更高精度的测量，有助于我们解决宇宙线的起源等问题。

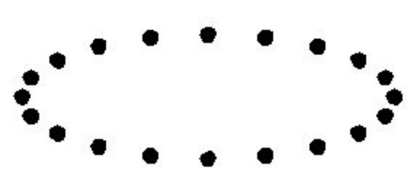
引力波

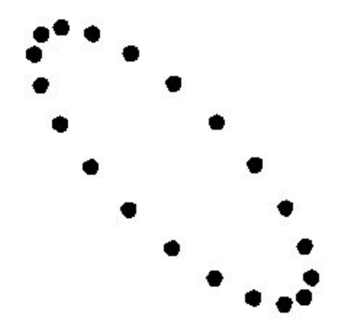


$$\frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-21}$$


没有引力波
引力波穿过地球

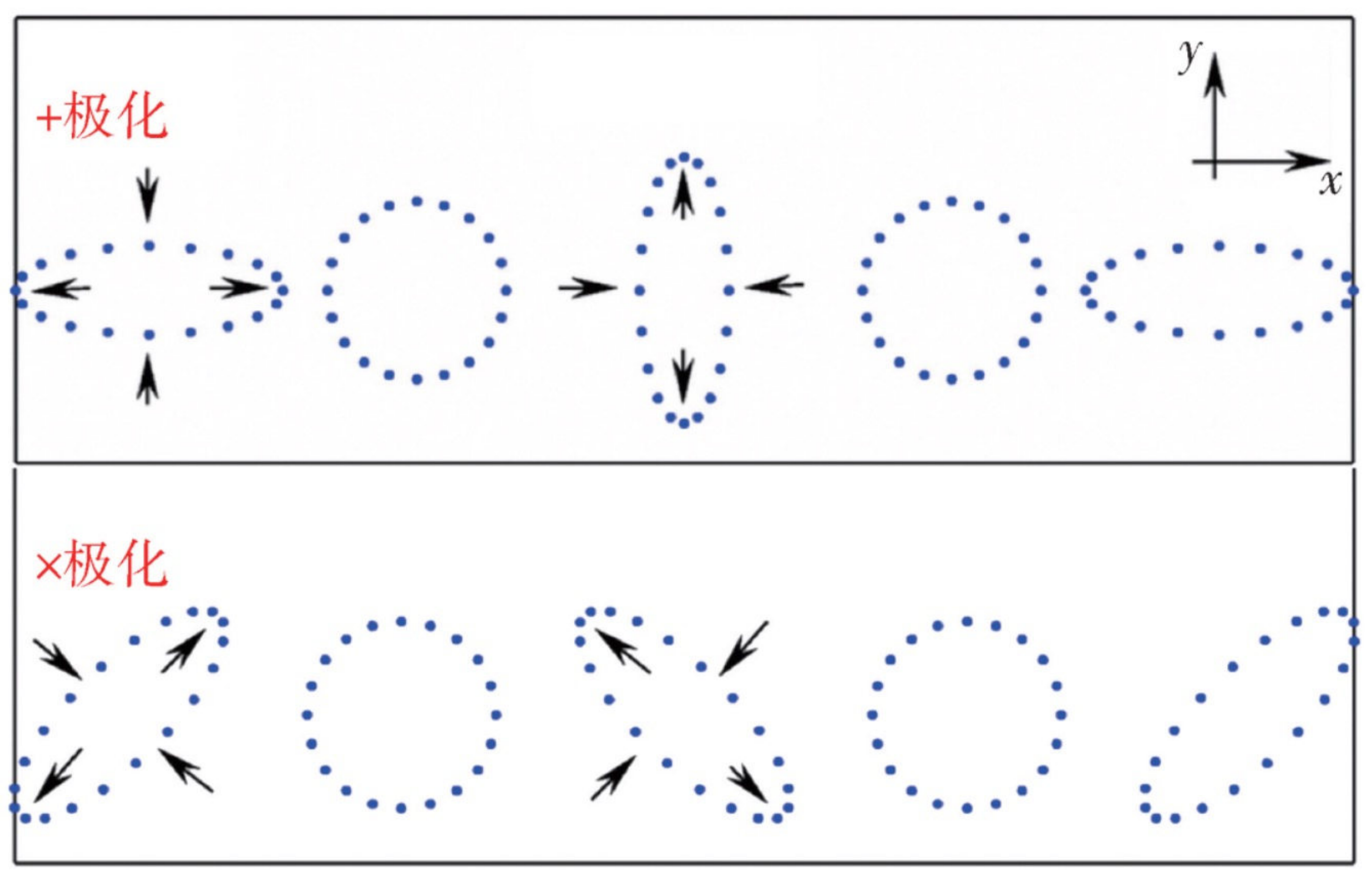
当引力波抵达地球后，会造成非常轻微的拉伸和挤压。





引力波效应：两种偏振模式

引力波的振动方向与传播方向垂直，因此是一种横波



（蔡荣根 等人）

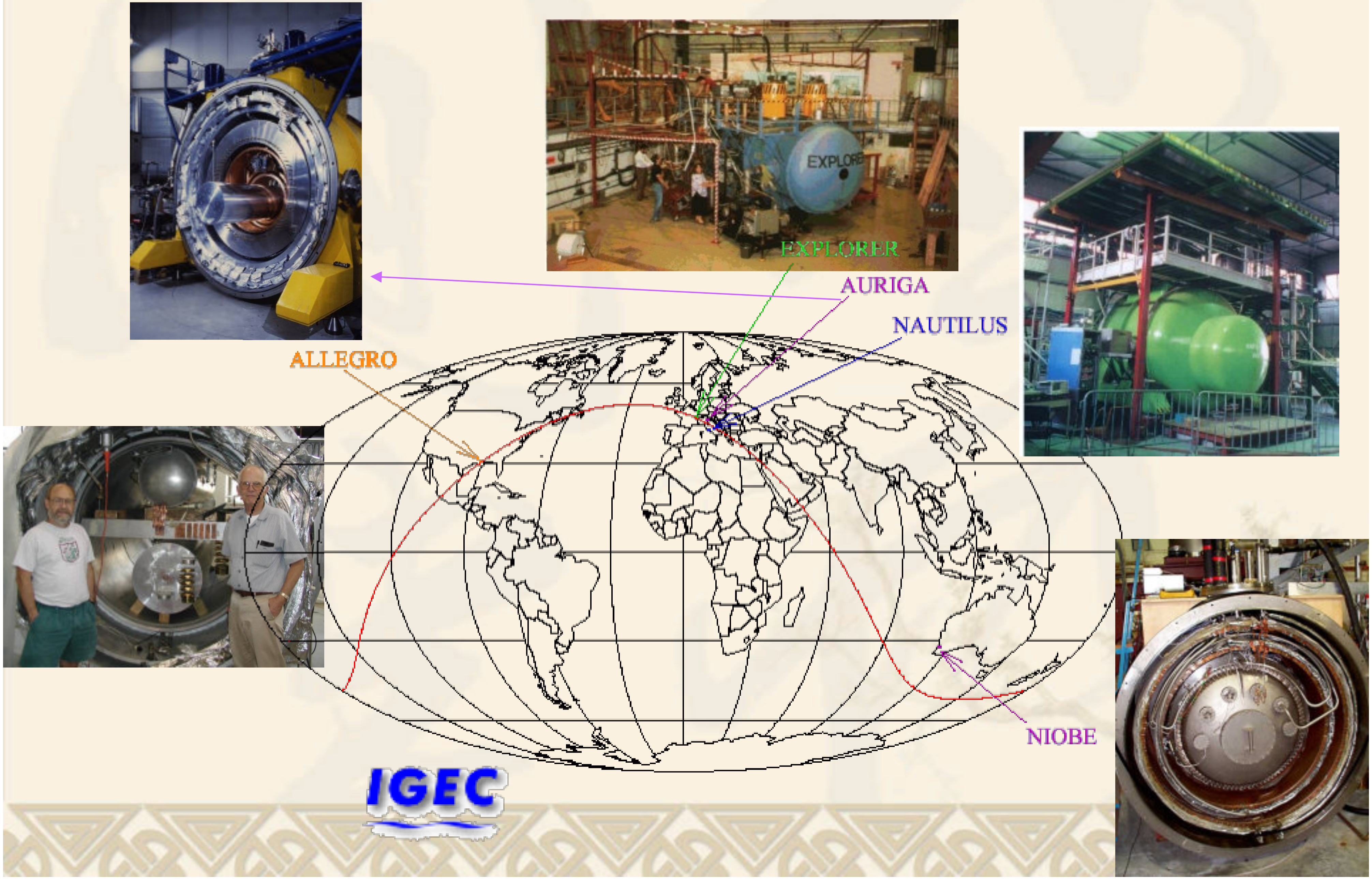
Weber 共振棒

- 金属铝棒：固有频率~1660Hz
- 压电传感器

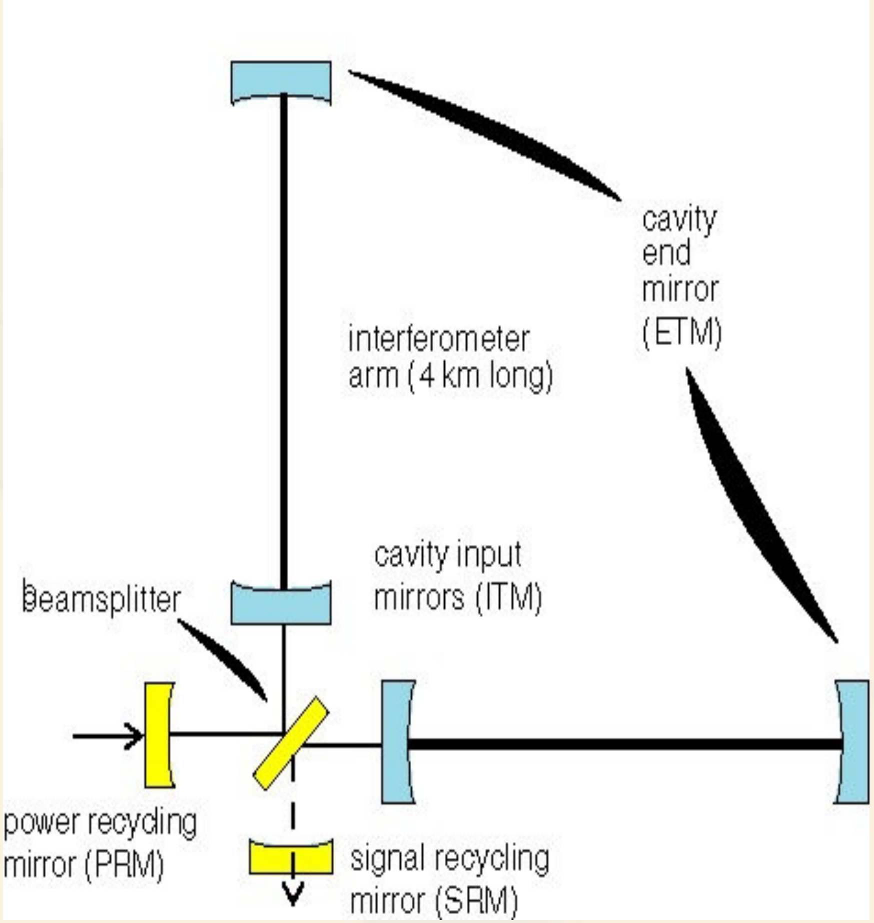
现代改进

- 更好的低温冷却
- 超导量子干涉仪测振动

Bar detectors: IGEC国际引力波探测合作

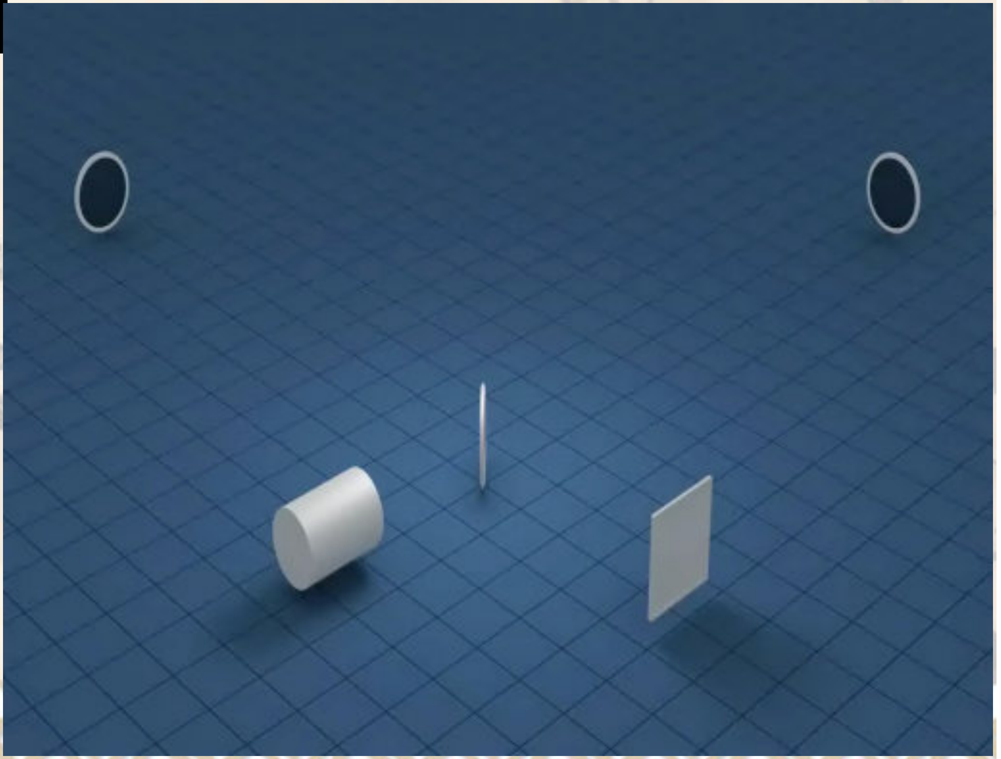

EXPLORER
AURIGA
NAUTILUS
ALLEGRO
NIOBE
IGEC

激光干涉引力波天文台（LIGO）


cavity
end
mirror
(ETM)
interferometer
arm (4 km long)
cavity input
mirrors (ITM)
beamsplitter
power recycling
mirror (PRM)
signal recycling
mirror (SRM)

致密天体的并合：黑洞/中子星

LIGO
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
Supported by the National Science Foundation
Operated by Caltech and MIT
H1
10 ms light travel time

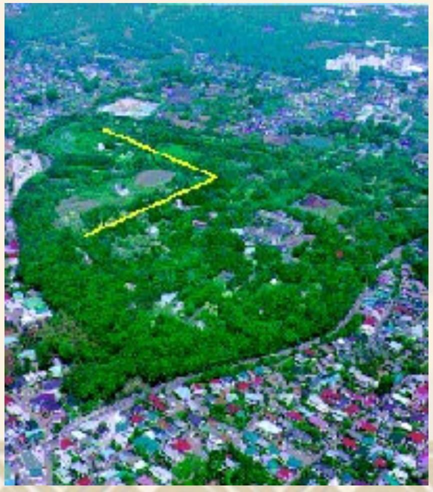


Interferometric detectors: an international dream

GEO600 (British-German)
Hanover, Germany

LIGO (USA)
Hanford, WA and Livingston, LA

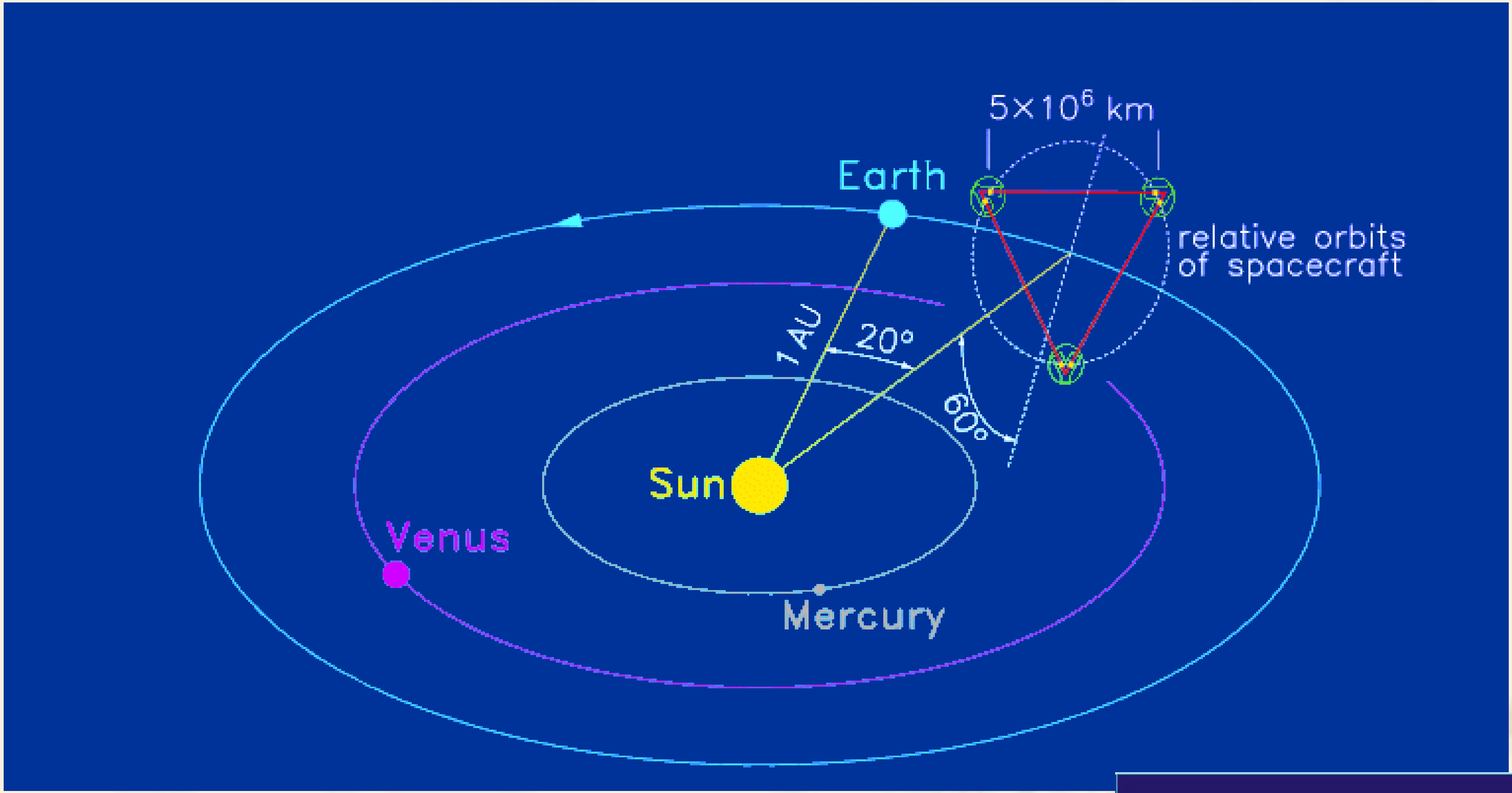
TAMA300 (Japan)
Mitaka

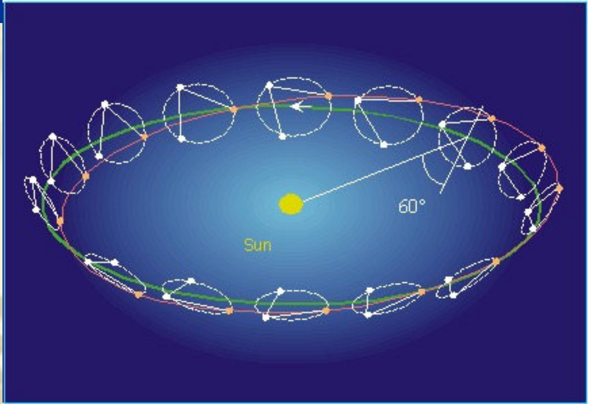


AIGO (Australia),
Wallingup Plain, 85km north of Perth

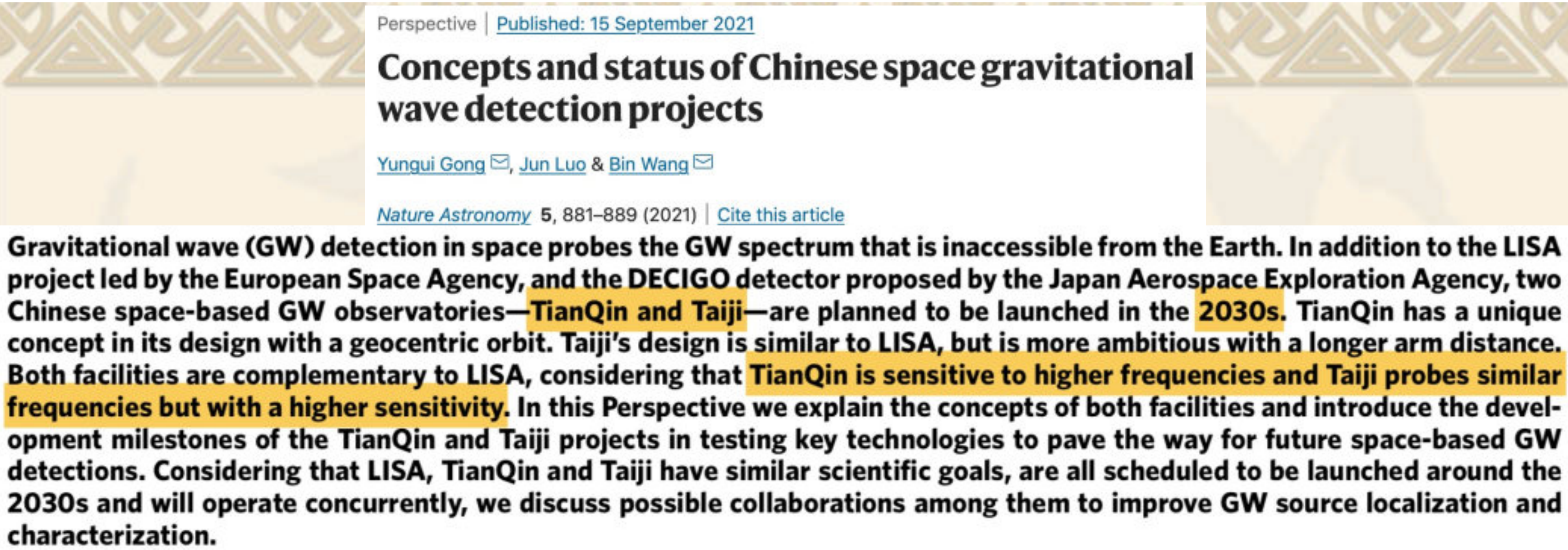
VIRGO (French-Italian)
Cascina, Italy

LISA：激光干涉空间天线


5×10⁶ km
Earth
relative orbits of spacecraft
1AU
20°
60°
Sun
Venus
Mercury



- 太阳辐射压与太阳风的影响
- 探测中等质量黑洞的并合；宇宙残留引力波（原初引力波）



Perspective | Published: 15 September 2021

Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects

Yungui Gong, Jun Luo & Bin Wang

Nature Astronomy **5**, 881–889 (2021) | Cite this article

Gravitational wave (GW) detection in space probes the GW spectrum that is inaccessible from the Earth. In addition to the LISA project led by the European Space Agency, and the DECIGO detector proposed by the Japan Aerospace Exploration Agency, two Chinese space-based GW observatories—TianQin and Taiji—are planned to be launched in the 2030s. TianQin has a unique concept in its design with a geocentric orbit. Taiji's design is similar to LISA, but is more ambitious with a longer arm distance. Both facilities are complementary to LISA, considering that TianQin is sensitive to higher frequencies and Taiji probes similar frequencies but with a higher sensitivity. In this Perspective we explain the concepts of both facilities and introduce the development milestones of the TianQin and Taiji projects in testing key technologies to pave the way for future space-based GW detections. Considering that LISA, TianQin and Taiji have similar scientific goals, are all scheduled to be launched around the 2030s and will operate concurrently, we discuss possible collaborations among them to improve GW source localization and characterization.

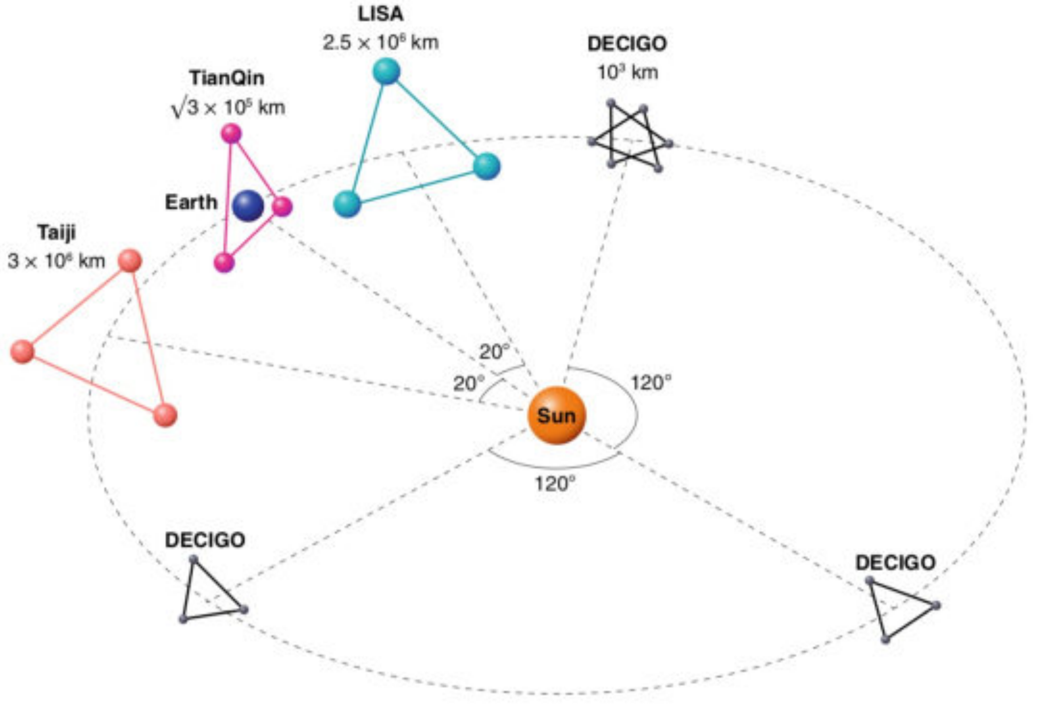


Fig. 1 | Schematic of space-based GW detector constellations. The detector plane of TianQin points to the calibration source RX J0806.3+1527 and DECIGO has four clusters.

空间引力波
探测及科学

引力波的波型—数值计算

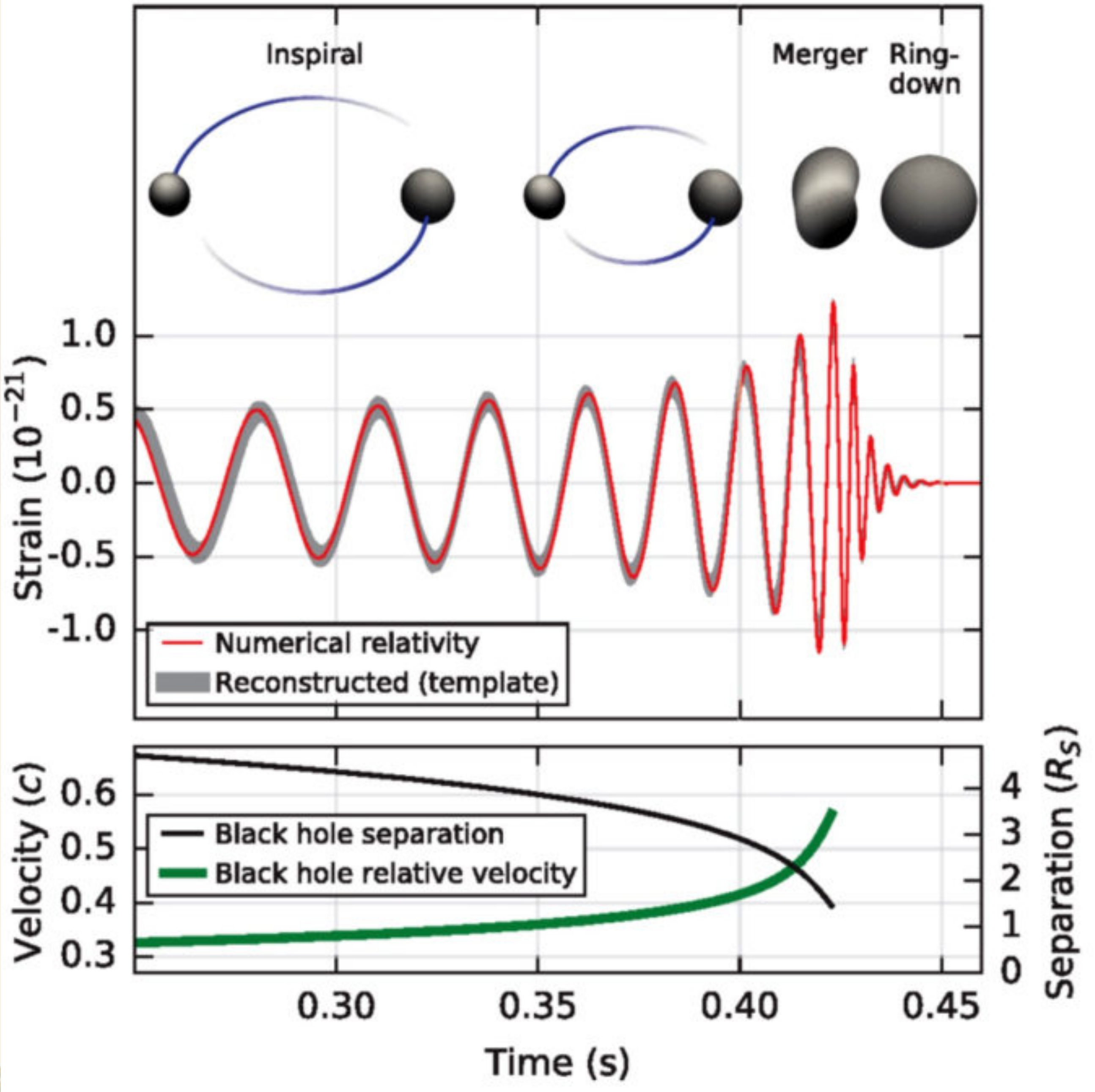
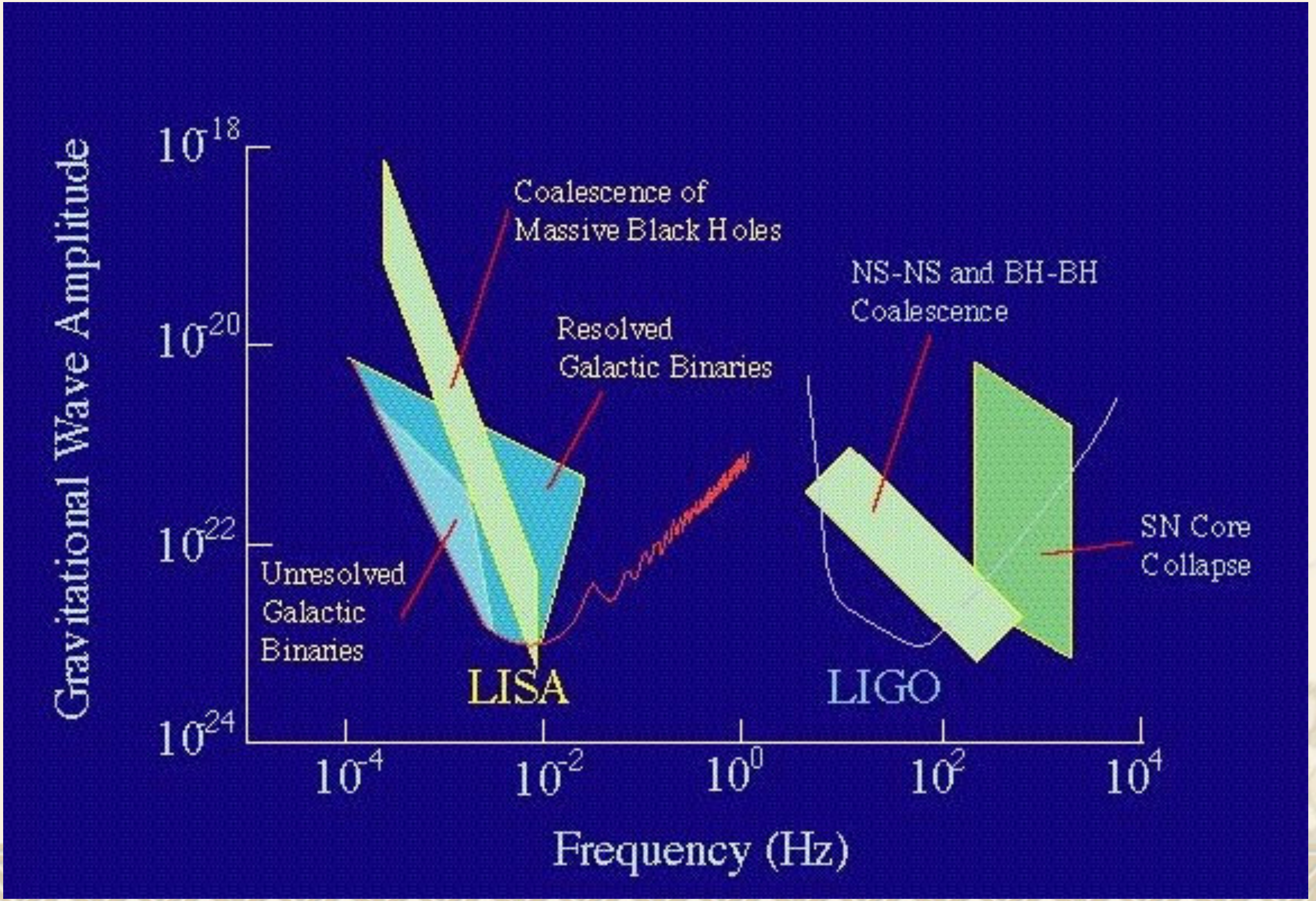
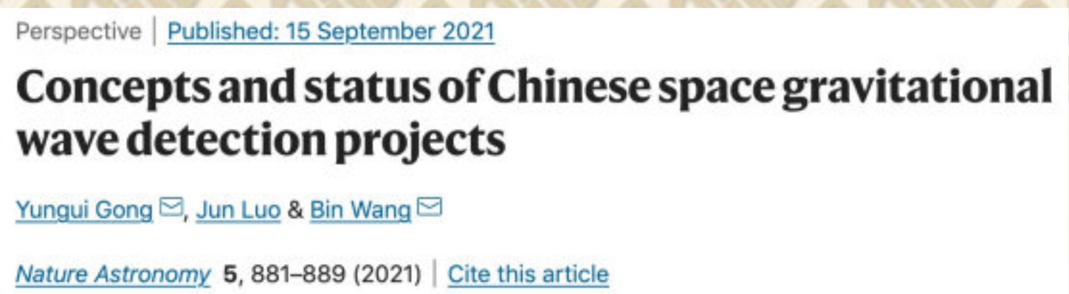


图1：GW150914在引力波探测器中的波形及轨道演化示意图，图片来源：文献[2]。

引力波天文学进展：信号搜索与黑洞铃宕分析

探测极限与引力波源


Gravitational Wave Amplitude
10^{18}
10^{20}
10^{22}
10^{24}
Coalescence of
Massive Black Holes
Resolved
Galactic Binaries
NS-NS and BH-BH
Coalescence
Unresolved
Galactic
Binaries
SN Core
Collapse
LISA
LIGO
10^{4}
10^{2}
10^{0}
10^{2}
10^{4}
Frequency (Hz)



Perspective | Published: 15 September 2021

Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects

Yungui Gong ✉, Jun Luo & Bin Wang ✉

Nature Astronomy **5**, 881–889 (2021) | Cite this article

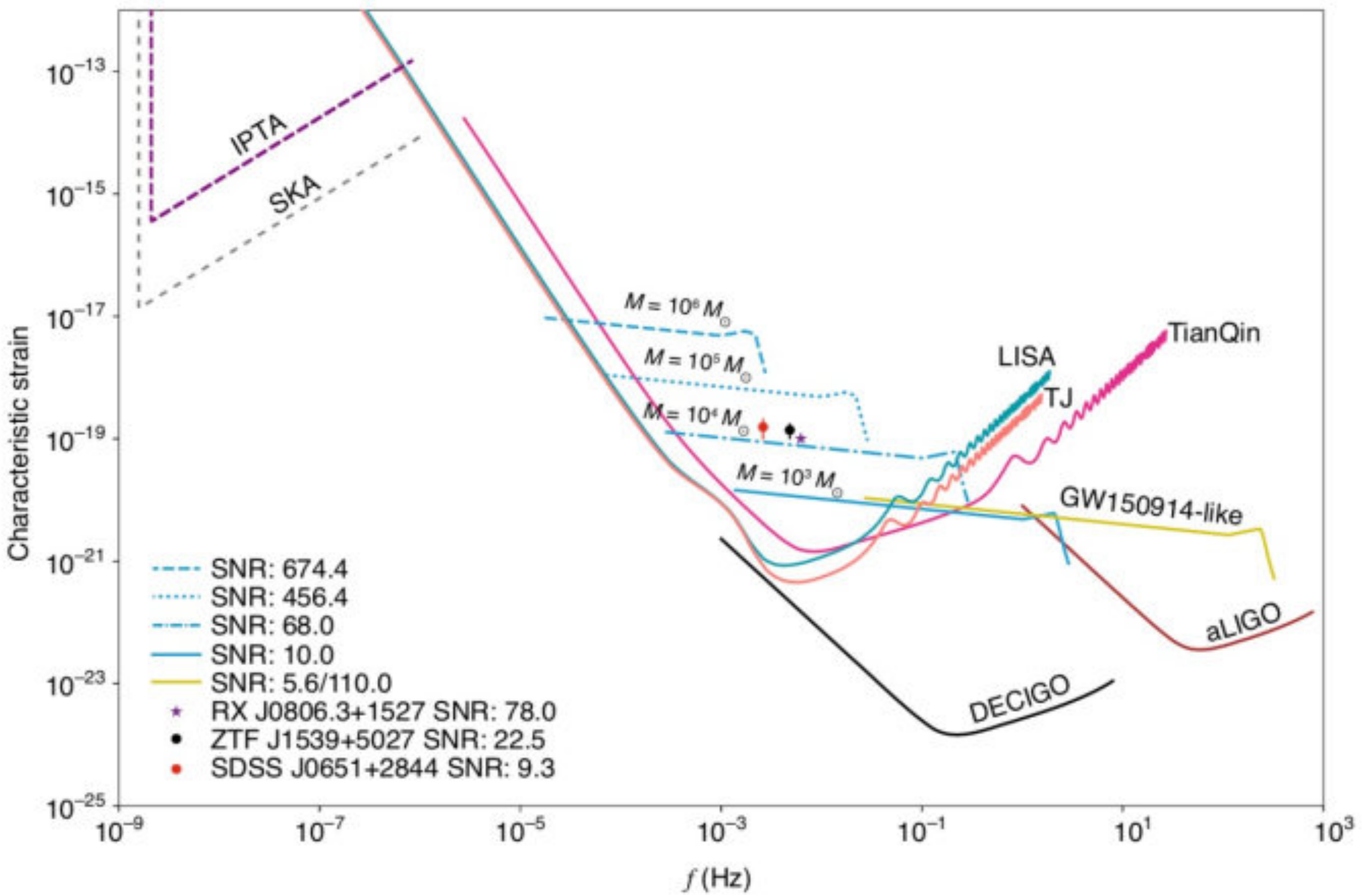


Fig. 2 | Noise curves along with various sources. We use fitted sensitivity curves for DECIGO[102] and the noise curves for PTAs from ref. [103]. The blue lines denote the signals from BBHs with equal masses at $z = 3$. All of the signals start from 1 yr before the merger. The SNRs of these sources in TianQin were calculated with 1 yr observation time. For the GW150914-like source, the SNRs in TianQin and advanced LIGO (aLIGO) are about 5.6 and 110, respectively. TJ, Taiji.

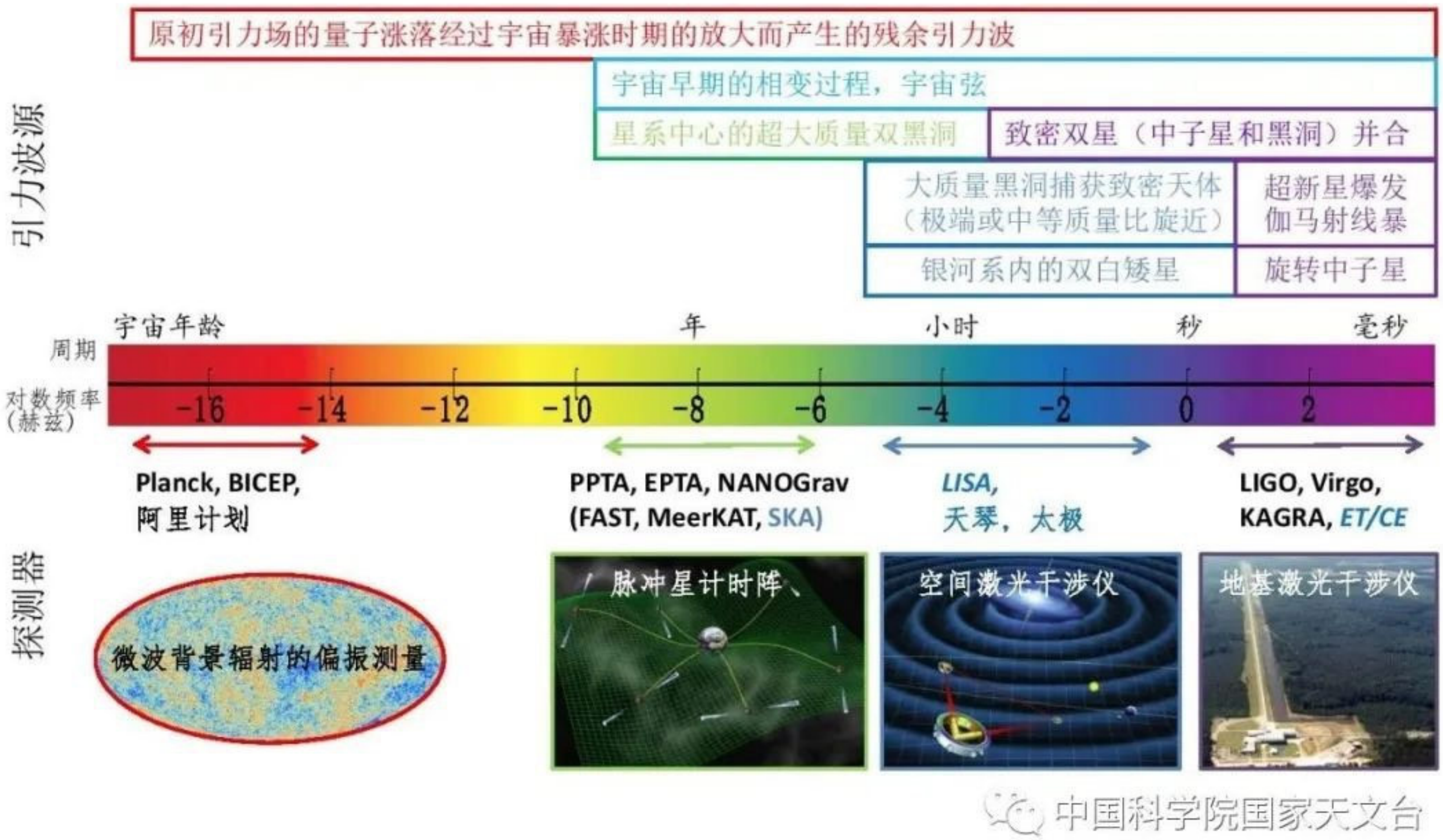
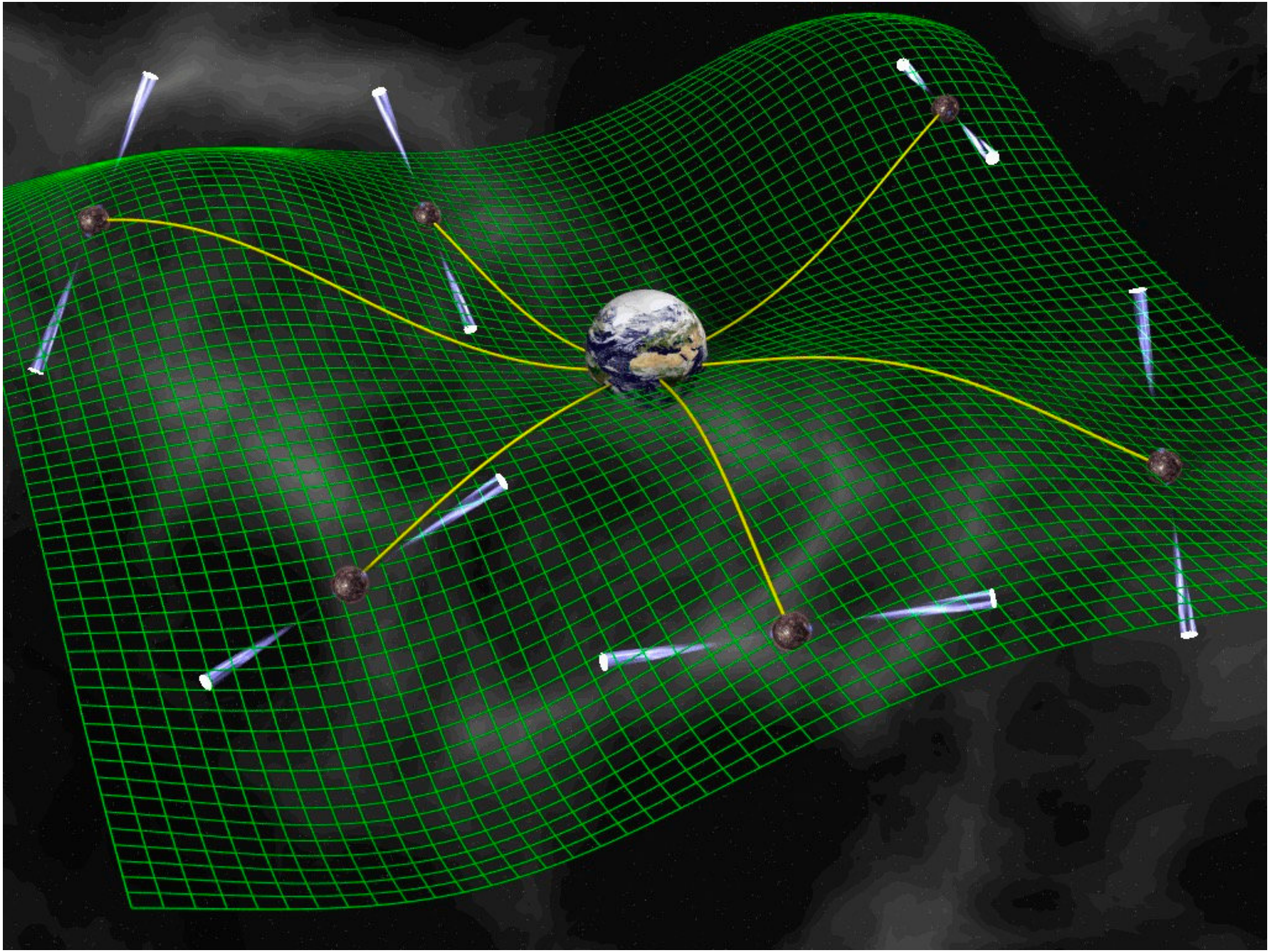
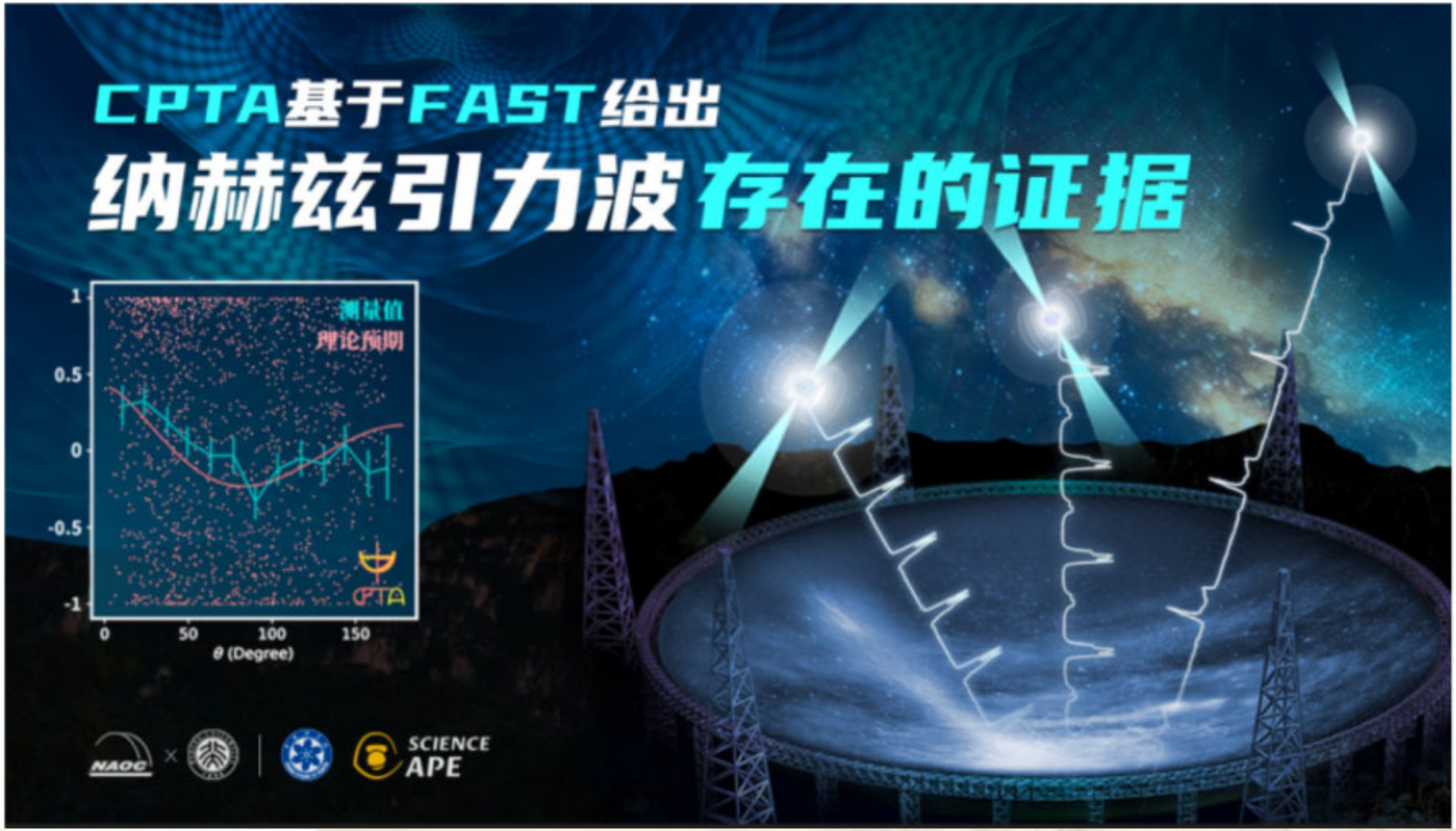

引力波源
原初引力场的量子涨落经过宇宙暴涨时期的放大而产生的残余引力波
宇宙早期的相变过程，宇宙弦
星系中心的超大质量双黑洞
致密双星（中子星和黑洞）并合
大质量黑洞捕获致密天体（极端或中等质量比旋近）
超新星爆发
伽马射线暴
银河系内的双白矮星
旋转中子星
周期
宇宙年龄
年
小时
秒
毫秒
对数频率（赫兹）
-16
-14
-12
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
Planck, BICEP,
阿里计划
PPTA, EPTA, NANOGrav
(FAST, MeerKAT, SKA)
LISA,
天琴，太极
LIGO, Virgo,
KAGRA, ET/CE
探测器
微波背景辐射的偏振测量
脉冲星计时阵、
空间激光干涉仪
地基激光干涉仪
中国科学院国家天文台

图1. 引力波谱：四个主要的引力波观测窗口、引力波源和引力波探测器（图源：改编自朱兴江，“脉冲星计时阵探测引力波”,《现代物理知识》, 2016, 28, 10-14）

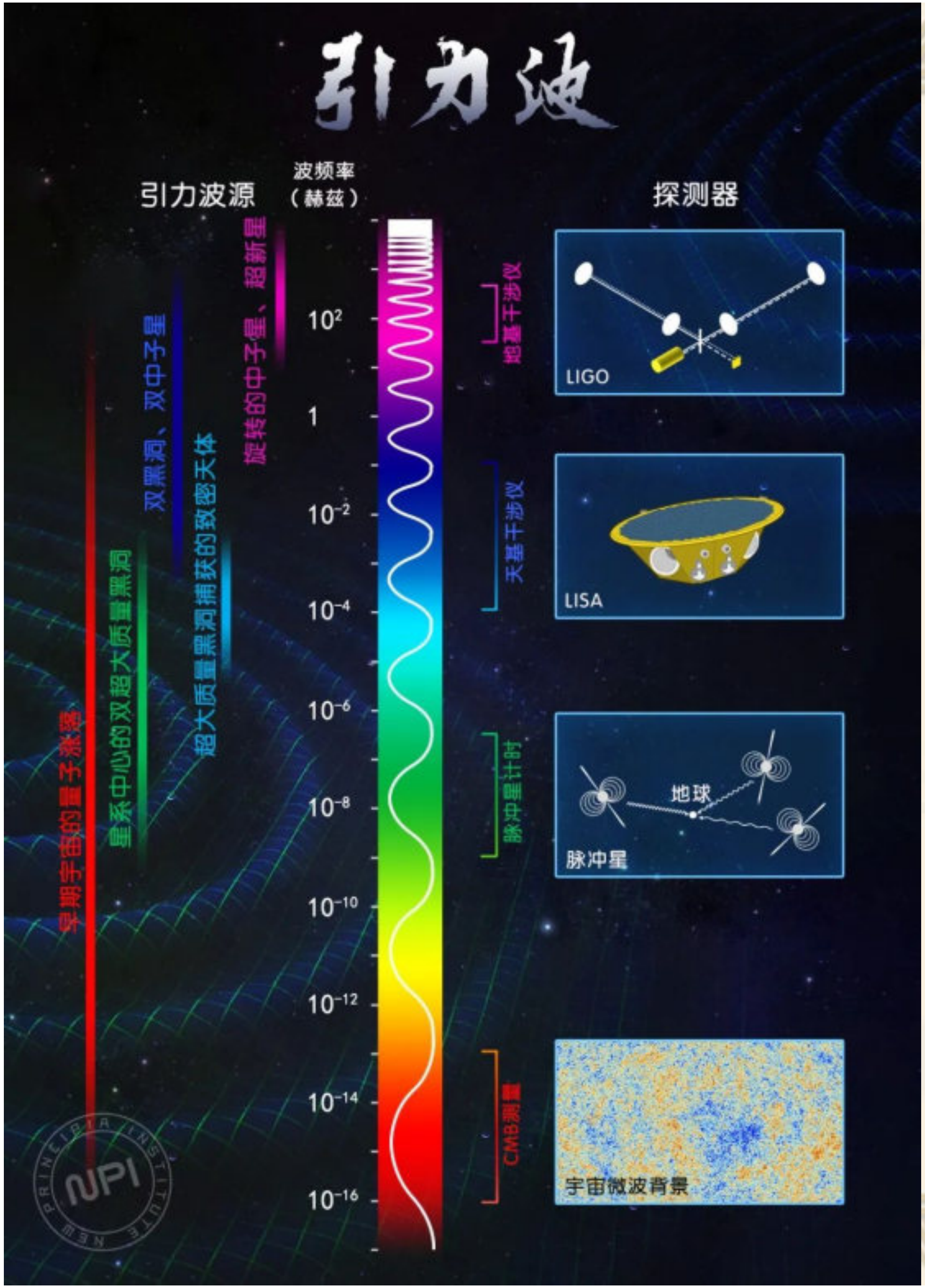


中国天眼发现纳赫兹引力波存在的关键证据


CPTA基于FAST给出
纳赫兹引力波存在的证据
测量值
理论预期
1
0.5
0
-0.5
-1
0
50
100
150
θ (Degree)
CPTA
NAOC
SCIENCE APE

利用下一代伽玛射线观测设备探索引力波背景

通过降低天体物理前景提高对原初随机引力波的探测灵敏度


引力波
引力波源
波频率（赫兹）
探测器
早期宇宙的量子涨落
星系中心的双超大质量黑洞
双黑洞、双中子星
超大质量黑洞捕获的致密天体
旋转的中子星、超新星
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
地基干涉仪
LIGO
天基干涉仪
LISA
脉冲星计时
地球
脉冲星
CMB测量
宇宙微波背景

光学Dirac方程、自旋–轨道耦合及引力波的极化探测（冯珑珑 中山大学）

极端质量比螺旋系统：形成、动力学和天体物理应用（杨桓 圆周理论物理研究所）

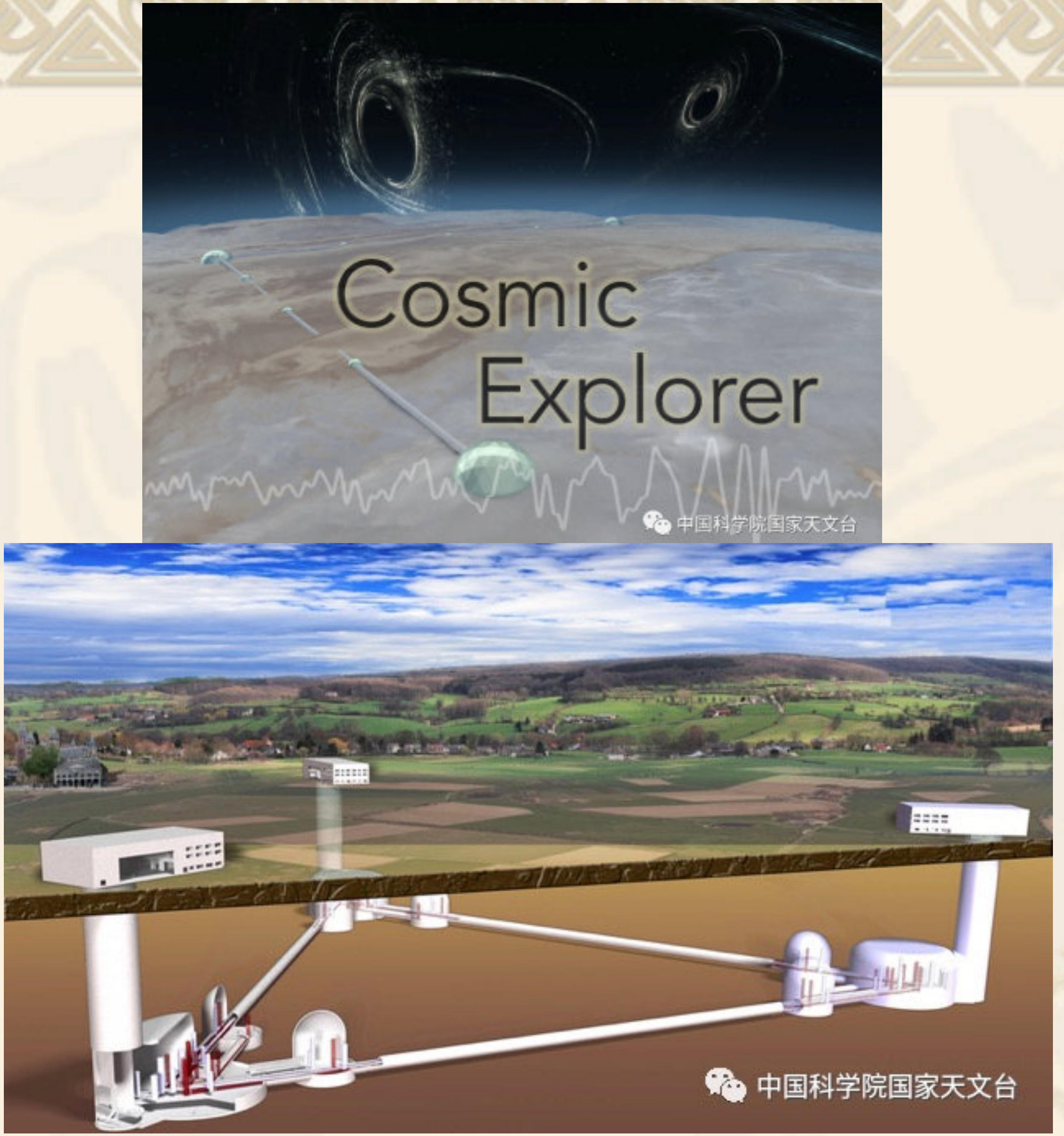
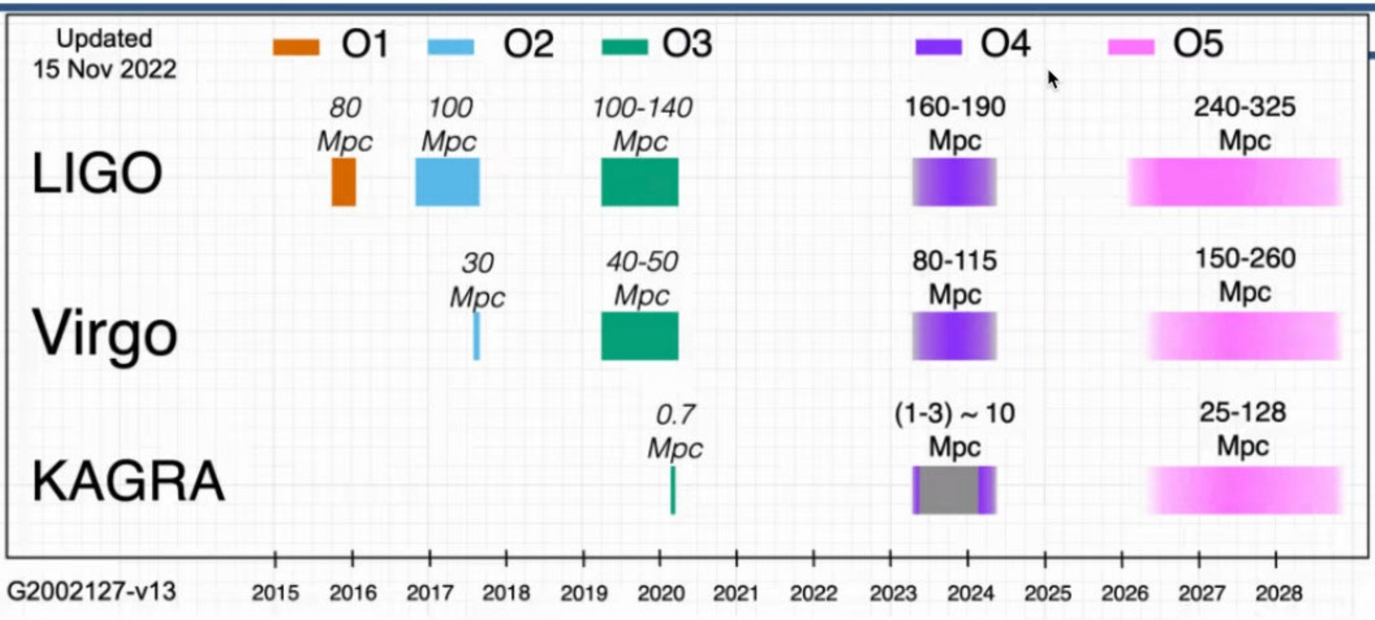
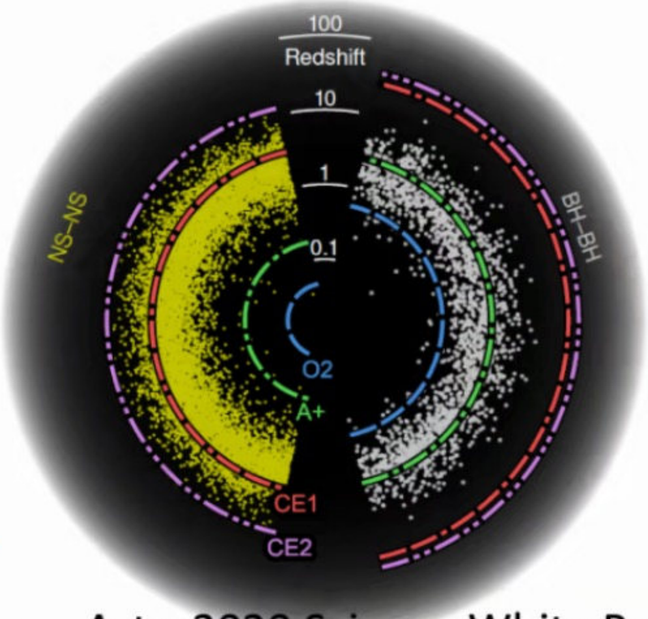

Cosmic
Explorer
中国科学院国家天文台
中国科学院国家天文台

图5. 计划中的第三代地基引力波探测器概念图。上图为Cosmic Explorer，40公里臂长的L型探测器（图源：https://cosmicexplorer.org/），下图为爱因斯坦望远镜，位于地下的10公里臂长的三角型探测器（图源：ET Design Study team）

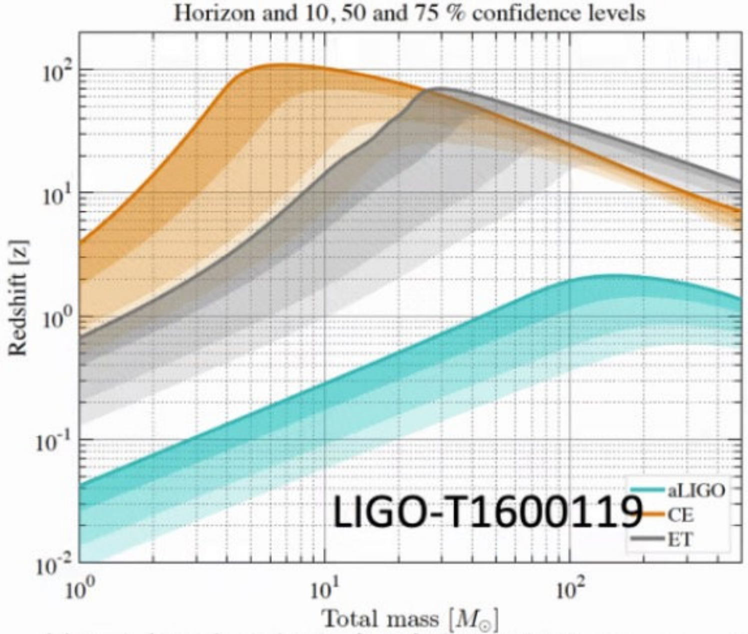
未来2020s观测计划 （探测距离~x3）





Astro2020 Science White Paper

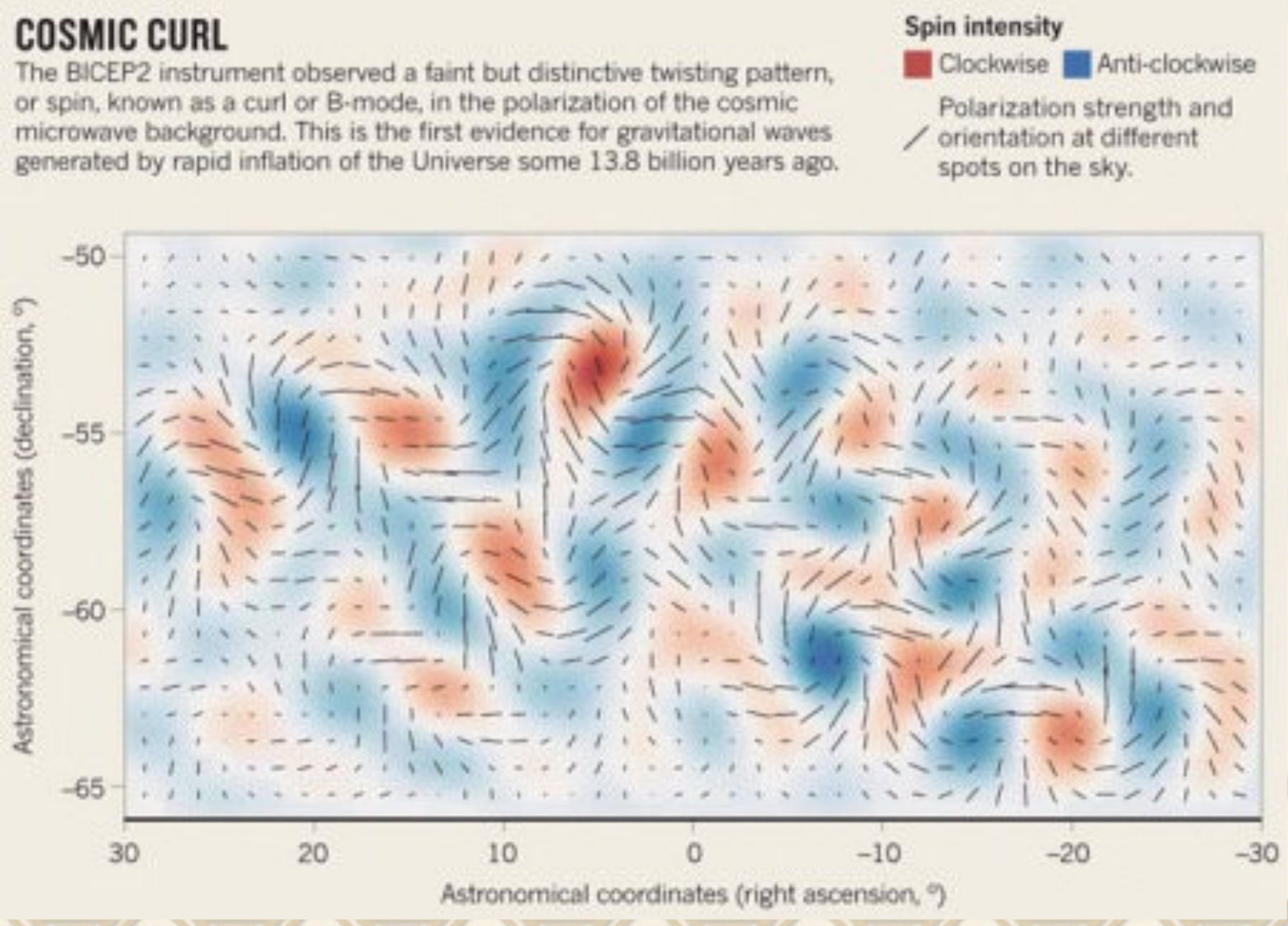
（范锡龙）



第三代地面引力波探测器 (2030s?)

Figure 8: Astrophysical reach of Cosmic Explorer for equal-mass (non-spinning) compact

原初引力波的存在证据（201403）？



COSMIC CURL

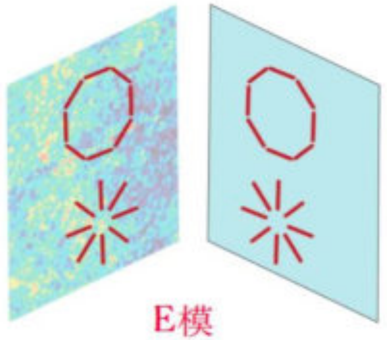
The BICEP2 instrument observed a faint but distinctive twisting pattern, or spin, known as a curl or B-mode, in the polarization of the cosmic microwave background. This is the first evidence for gravitational waves generated by rapid inflation of the Universe some 13.8 billion years ago.

Spin intensity

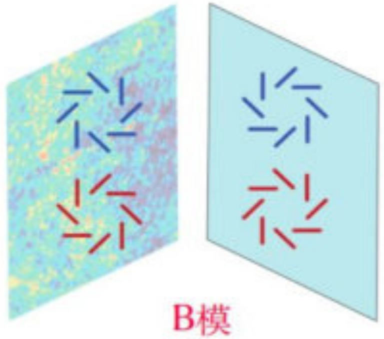
🟥 Clockwise 🟦 Anti-clockwise

/ Polarization strength and orientation at different spots on the sky.

-50
-55
-60
-65
Astronomical coordinates (declination, °)
30
20
10
0
-10
-20
-30
Astronomical coordinates (right ascension, °)

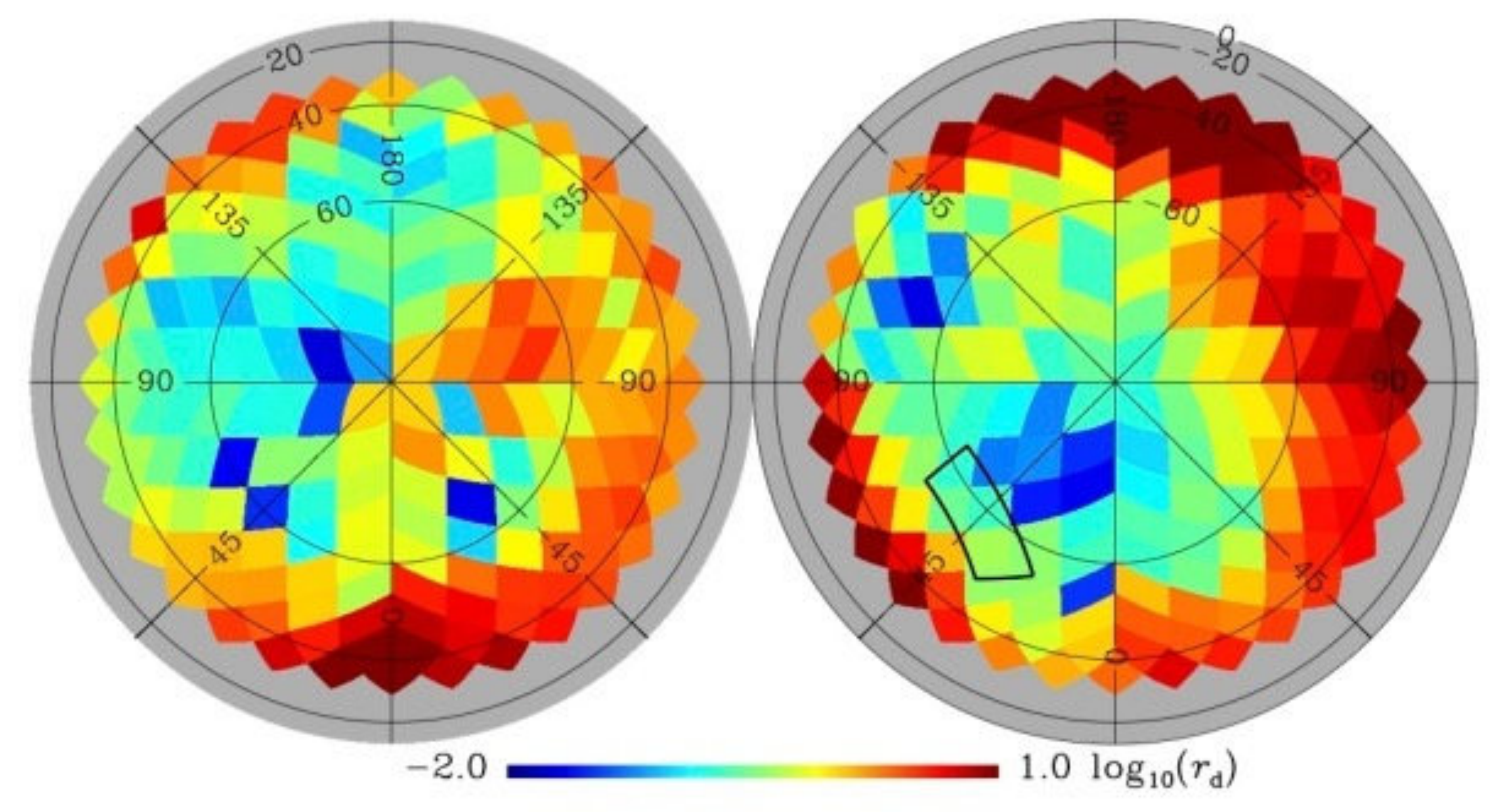


E模

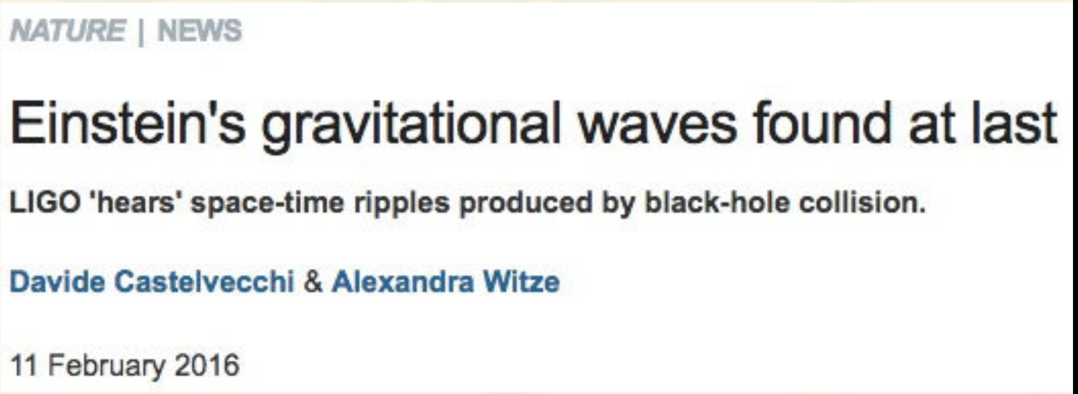


B模

原初引力波的存在证据（201501）？



GW150914



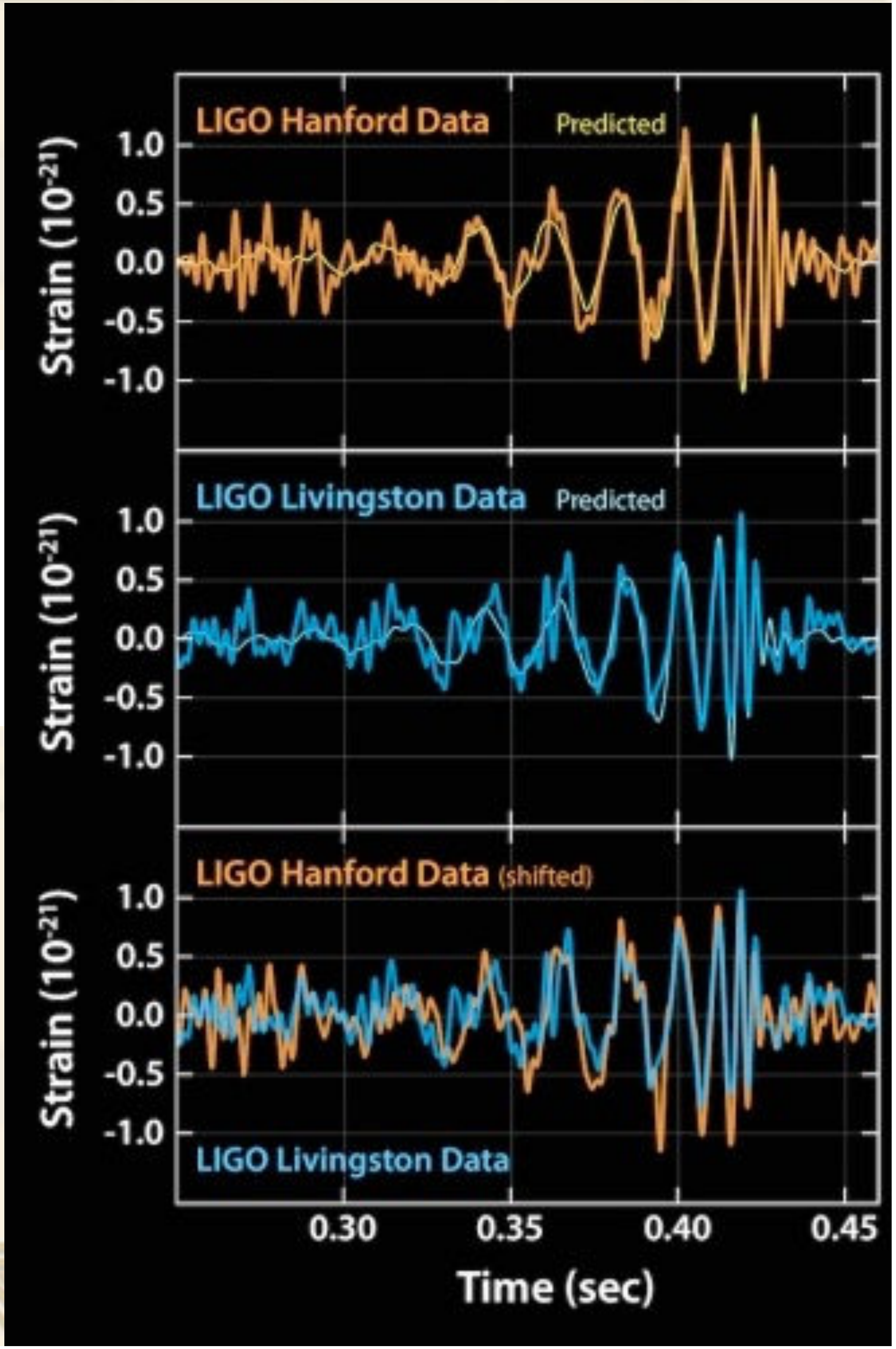
NATURE | NEWS

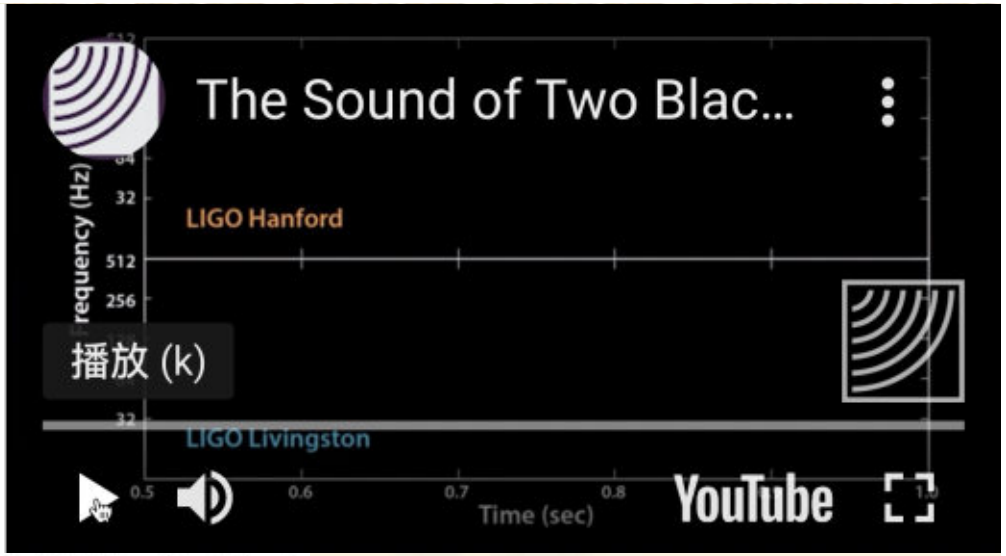
Einstein's gravitational waves found at last

LIGO 'hears' space-time ripples produced by black-hole collision.

Davide Castelvecchi & Alexandra Witze

11 February 2016





Computer simulation showing the collision of two black holes and lensing of the background star light. LIGO detected gravitational waves, or ripples in space and time generated as the black holes spiraled in toward each other, collided, and merged. This simulation shows how the merger would appear to our eyes if we could somehow travel in a spaceship for a closer look. It was created by solving equations from Albert Einstein's general theory of relativity using the LIGO data.

The two merging black holes are each roughly 30 times the mass of the sun, with one slightly larger than the other. Time has been slowed down by a factor of about 100. The event took place 1.3 billion years ago. The stars appear warped due to the incredibly strong gravity of the black holes. The black holes warp space and time, and this causes light from the stars to curve around the black holes in a process called gravitational lensing. The ring around the black holes, known as an Einstein ring, arises from the light of all the stars in a small region behind the holes, where gravitational lensing has smeared their images into a ring.

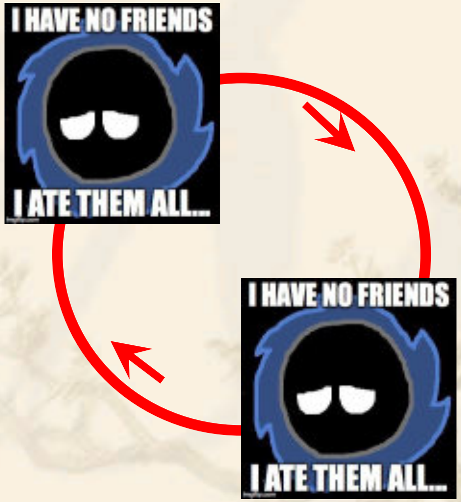
The gravitational waves themselves would not be seen by a human near the black holes and so do not show in this video, with one important exception. The gravitational waves that are traveling outward toward the small region behind the black holes disturb that region's stellar images in the Einstein ring, causing them to slosh around, even long after the collision. The gravitational waves traveling in other directions cause weaker, and shorter-lived sloshing, everywhere outside the ring.(Credit: SXS, the Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project.)

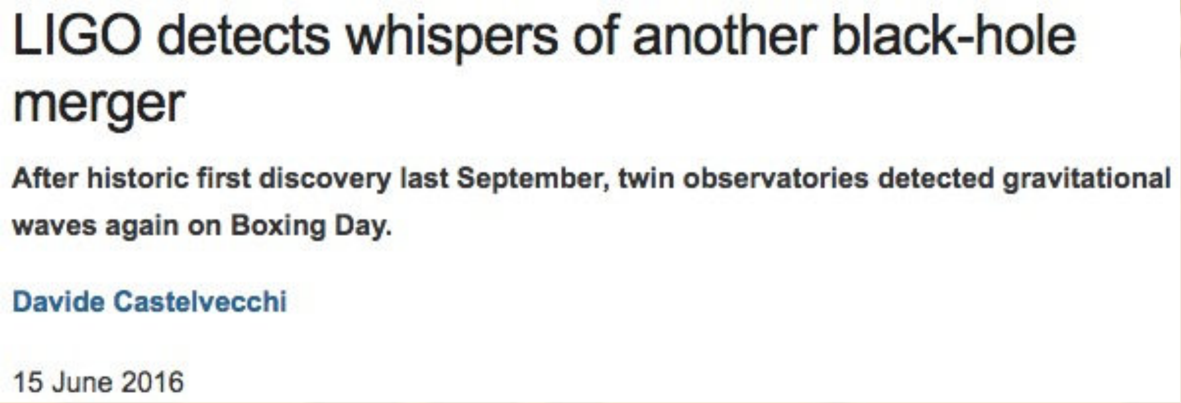
The Sound of Two Black Holes Colliding. Gravitational waves sent out from a pair of colliding black holes have been converted to sound waves, as heard in this animation. On September 14, 2015, LIGO observed gravitational waves from the merger of two black holes, each about 30 times the mass of our sun. The incredibly powerful event, which released 50 times more energy than all the stars in the observable universe, lasted only fractions of a second.

In the first two runs of the animation, the sound-wave frequencies exactly match the frequencies of the gravitational waves. The second two runs of the animation play the sounds again at higher frequencies that better fit the human hearing range. The animation ends by playing the original frequencies again twice.

As the black holes spiral closer and closer together, the frequency of the gravitational waves increases. Scientists call these sounds "chirps," because some events that generate gravitation waves would sound like a bird's chirp. (Audio Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab.)

GW150914


I HAVE NO FRIENDS
I ATE THEM ALL...
I HAVE NO FRIENDS
I ATE THEM ALL...

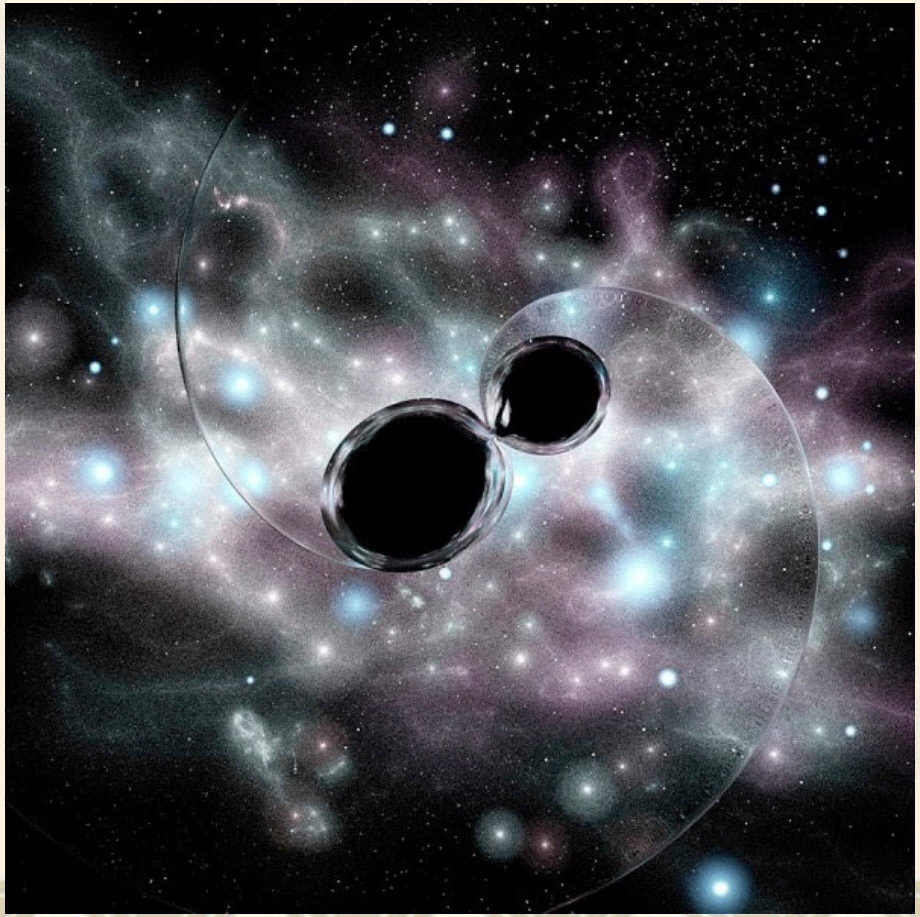


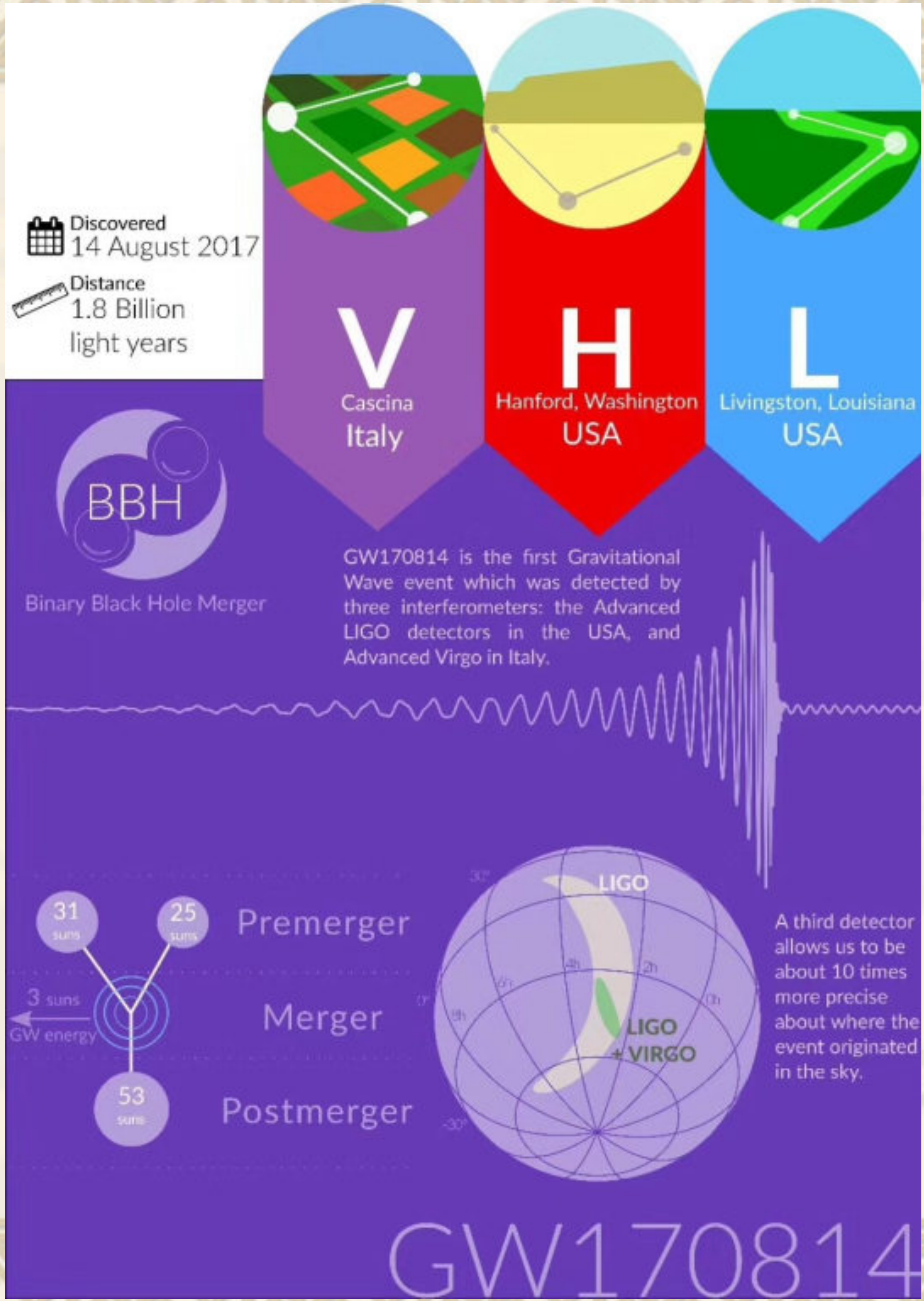
LIGO detects whispers of another black-hole merger

After historic first discovery last September, twin observatories detected gravitational waves again on Boxing Day.

Davide Castelvecchi

15 June 2016





Discovered
14 August 2017

Distance
1.8 Billion
light years

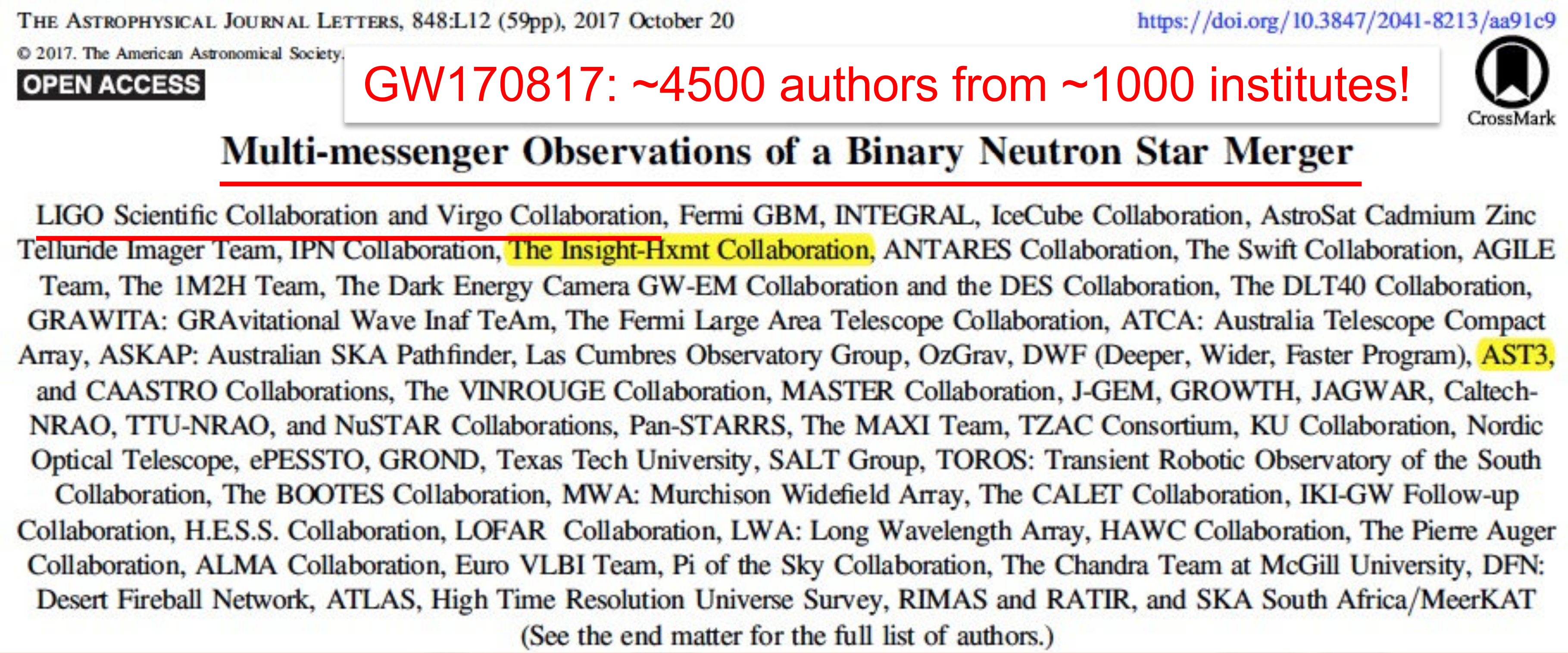
V
Cascina
Italy
H
Hanford, Washington
USA
L
Livingston, Louisiana
USA
BBH
Binary Black Hole Merger

GW170814 is the first Gravitational Wave event which was detected by three interferometers: the Advanced LIGO detectors in the USA, and Advanced Virgo in Italy.

31
suns
25
suns
Premerger
3 suns
GW energy
Merger
53
suns
Postmerger
LIGO
LIGO
+ VIRGO

A third detector allows us to be about 10 times more precise about where the event originated in the sky.

GW170814



The Astrophysical Journal Letters, 848:L12 (59pp), 2017 October 20 https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9

© 2017. The American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

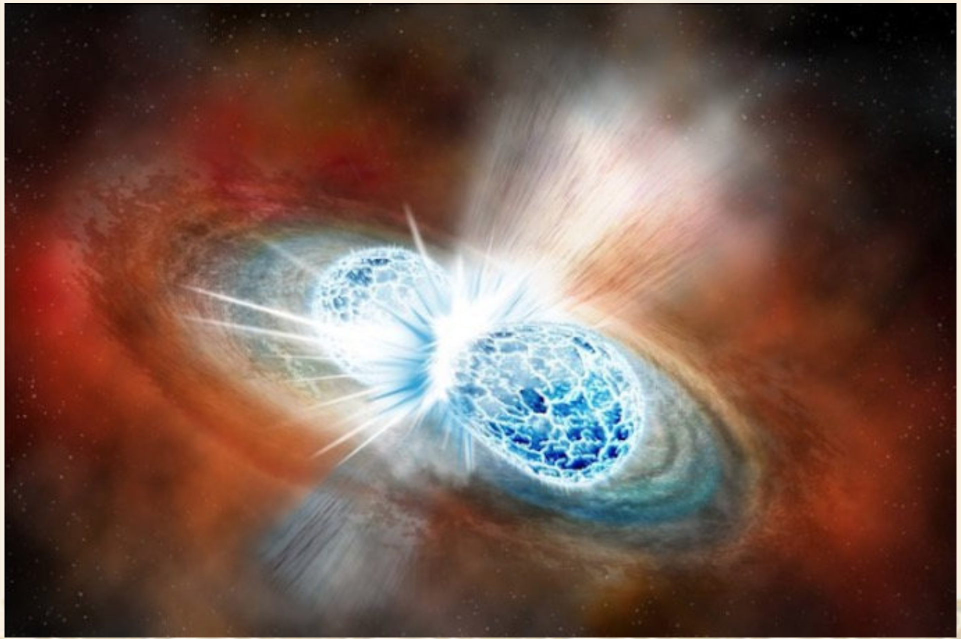
GW170817: ~4500 authors from ~1000 institutes!

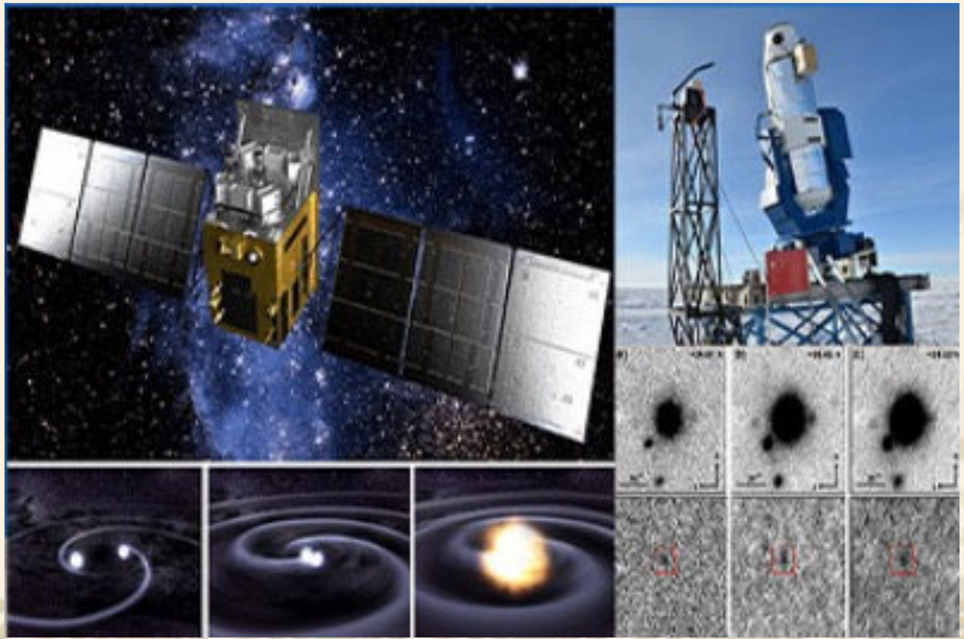
CrossMark

Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger

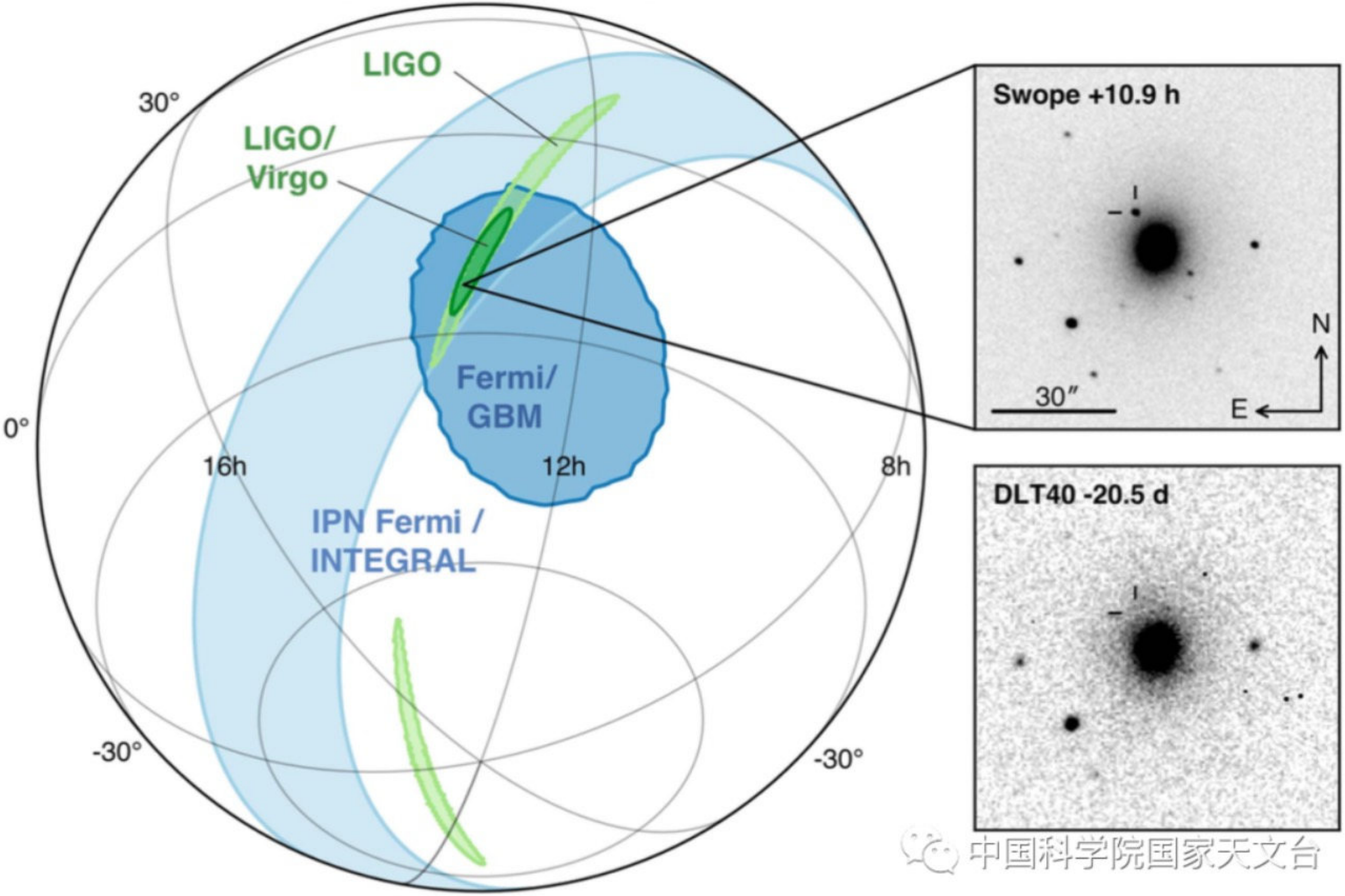
LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube Collaboration, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN Collaboration, The Insight-Hxmt Collaboration, ANTARES Collaboration, The Swift Collaboration, AGILE Team, The 1M2H Team, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, GRAWITA: GRAvitational Wave Inaf TeAm, The Fermi Large Area Telescope Collaboration, ATCA: Australia Telescope Compact Array, ASKAP: Australian SKA Pathfinder, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper, Wider, Faster Program), AST3, and CAASTRO Collaborations, The VINROUGE Collaboration, MASTER Collaboration, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, Caltech-NRAO, TTU-NRAO, and NuSTAR Collaborations, Pan-STARRS, The MAXI Team, TZAC Consortium, KU Collaboration, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS: Transient Robotic Observatory of the South Collaboration, The BOOTES Collaboration, MWA: Murchison Widefield Array, The CALET Collaboration, IKI-GW Follow-up Collaboration, H.E.S.S. Collaboration, LOFAR Collaboration, LWA: Long Wavelength Array, HAWC Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, ALMA Collaboration, Euro VLBI Team, Pi of the Sky Collaboration, The Chandra Team at McGill University, DFN: Desert Fireball Network, ATLAS, High Time Resolution Universe Survey, RIMAS and RATIR, and SKA South Africa/MeerKAT

(See the end matter for the full list of authors.)





(Credit: Robin Dienel etc. & Internet)

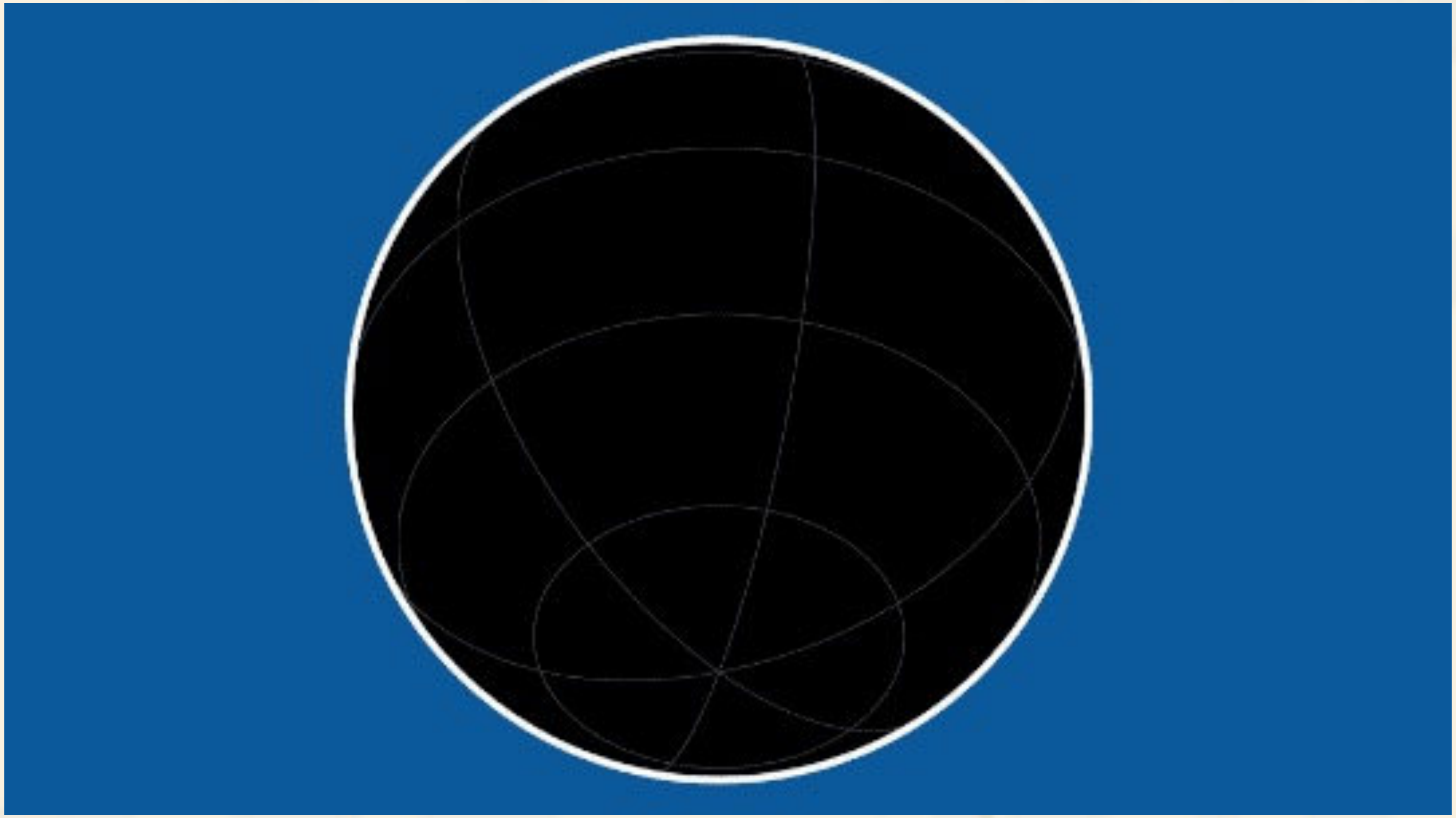

LIGO
30°
LIGO/
Virgo
Fermi/
GBM
0°
16h
12h
8h
IPN Fermi /
INTEGRAL
-30°
-30°
Swope +10.9 h
30″
N
E
DLT40 -20.5 d

中国科学院国家天文台

图4：通过引力波和伽马射线对GW170817的天空定位，以及光学对应体的发现

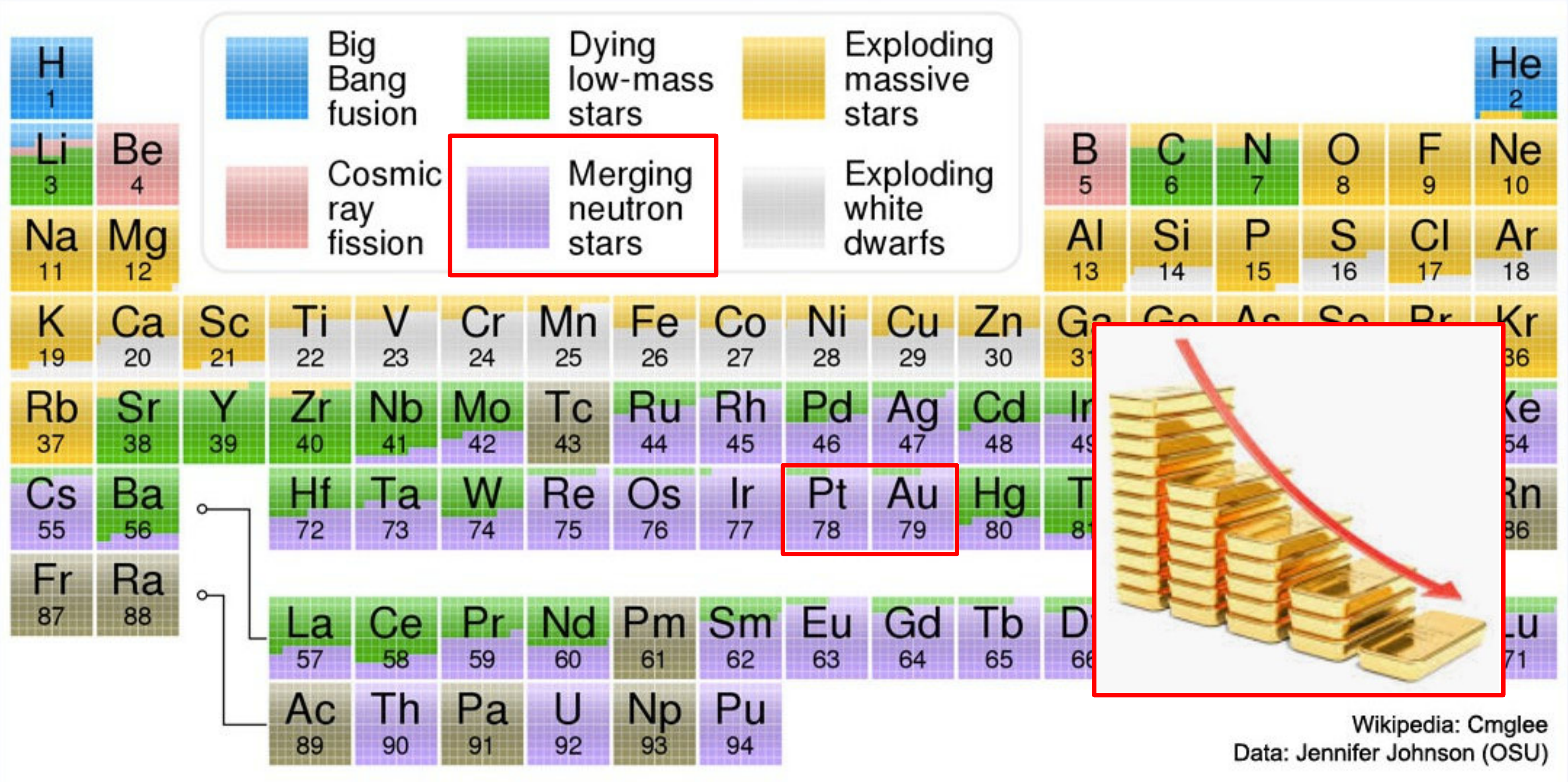
（图源：B. P. Abbott et al 2017, ApJL, 848, L12）

寻找GW170817的引力波电磁对应体



引力波/伽马射
线相关的多信使
高能天体物理

2017 October 24


Big Bang fusion
Dying low-mass stars
Exploding massive stars
Cosmic ray fission
Merging neutron stars
Exploding white dwarfs
Pt 78
Au 79

Wikipedia: Cmglee
Data: Jennifer Johnson (OSU)

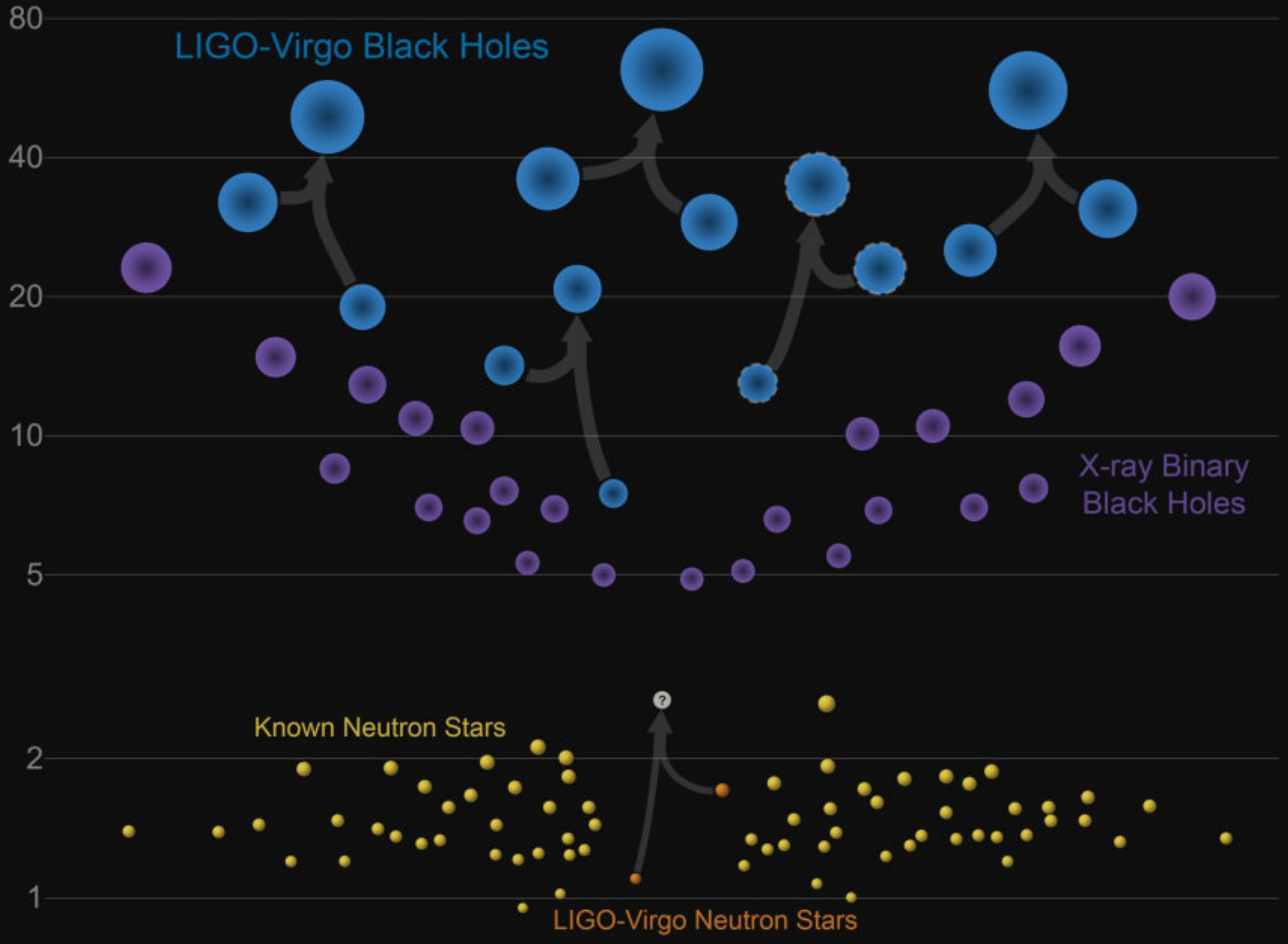
Where Your Elements Came From
Image Credit & License: Wikipedia: Cmglee; **Data:** Jennifer Johnson (OSU)

Explanation: The hydrogen in your body, present in every molecule of water, came from the Big Bang. There are no other appreciable sources of hydrogen in the universe. The carbon in your body was made by nuclear fusion in the interior of stars, as was the oxygen. Much of the iron in your body was made during supernovas of stars that occurred long ago and far away. The gold in your jewelry was likely made from neutron stars during collisions that may have been visible as short-duration gamma-ray bursts or gravitational wave events. Elements like phosphorus and copper are present in our bodies in only small amounts but are essential to the functioning of all known life. The featured periodic table is color coded to indicate humanity's best guess as to the nuclear origin of all known elements. The sites of nuclear creation of some elements, such as copper, are not really well known and are continuing topics of observational and computational research.

(APOD)

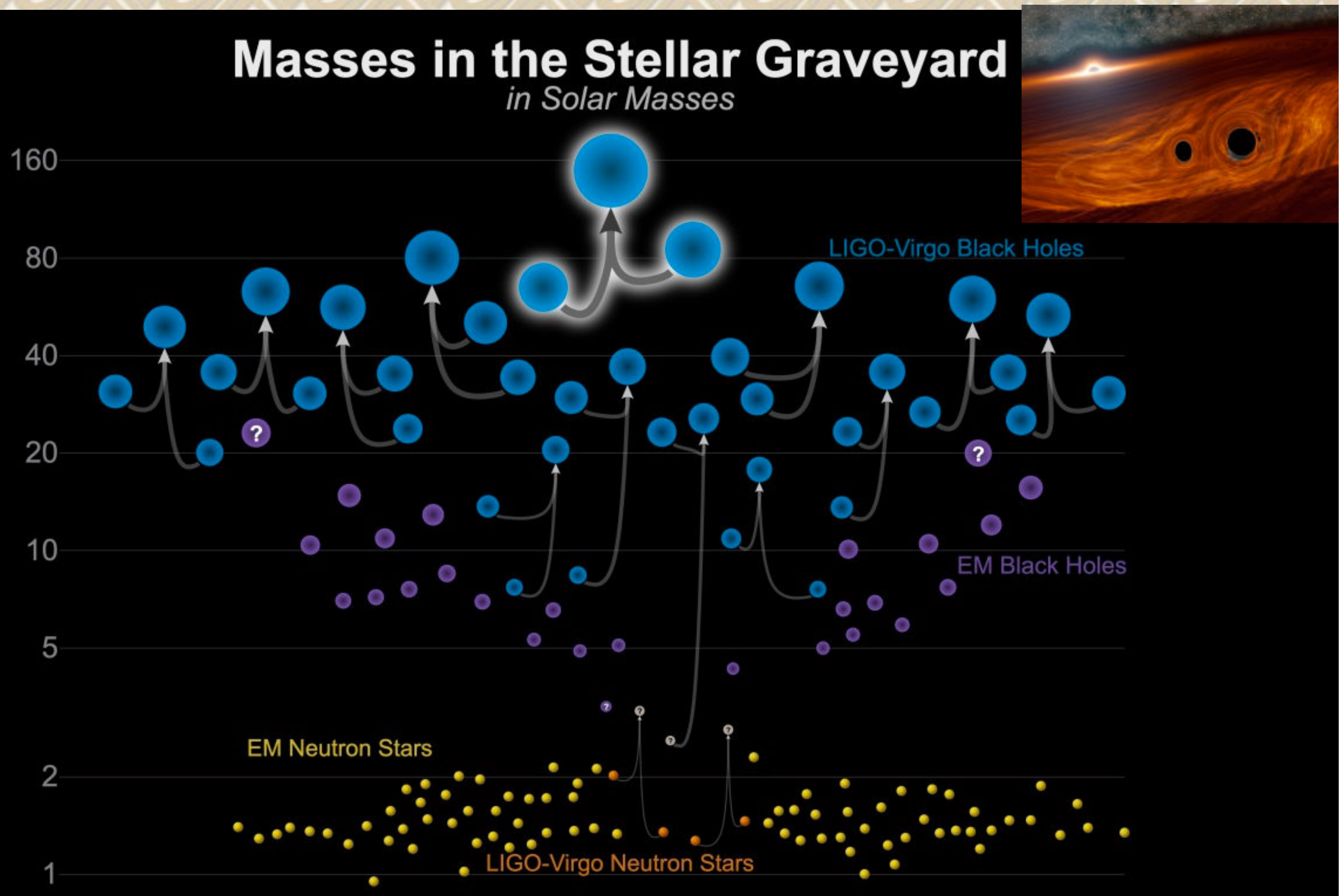
Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses

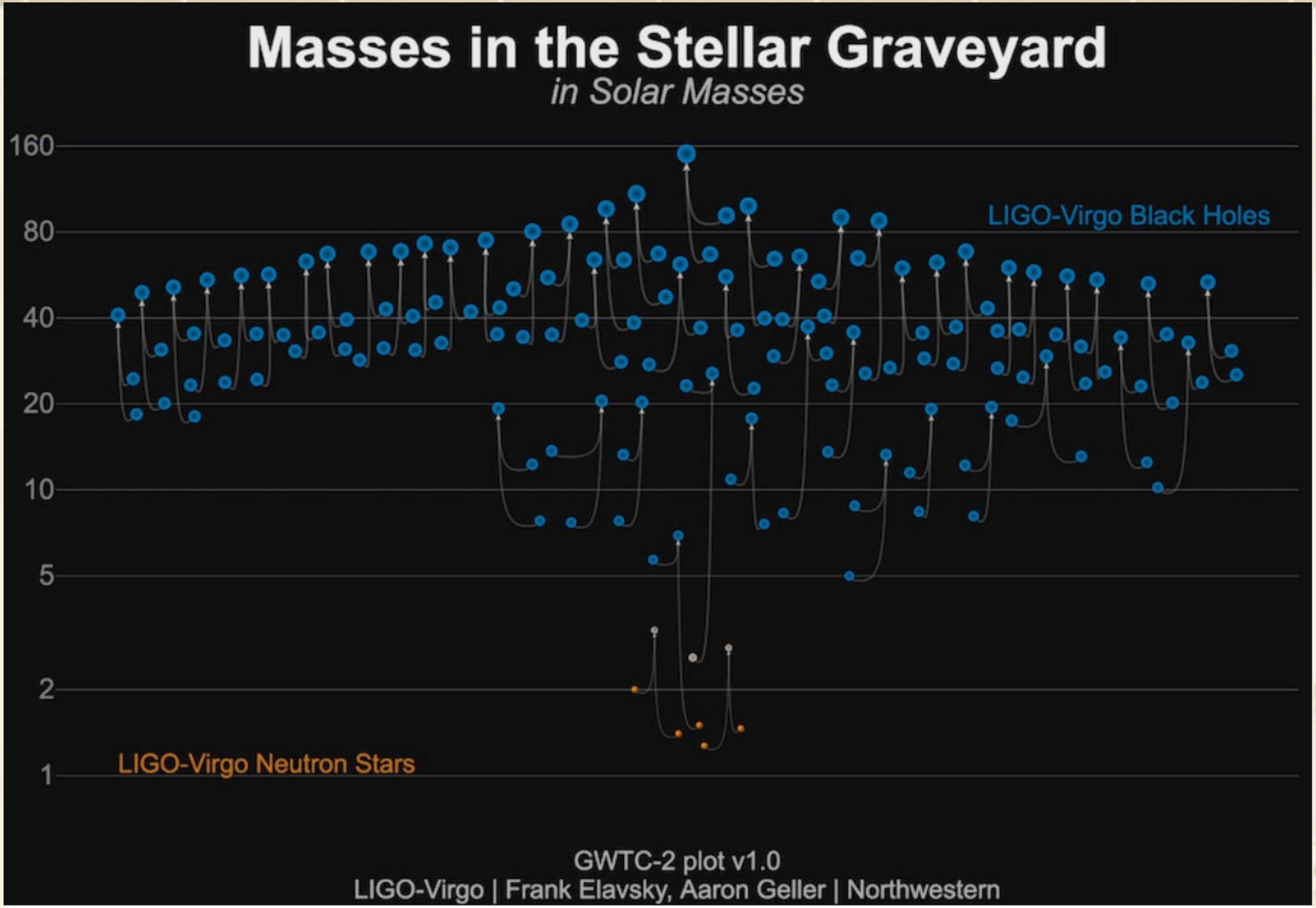


Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



Updated 2020-09-02
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern


Masses in the Stellar Graveyard

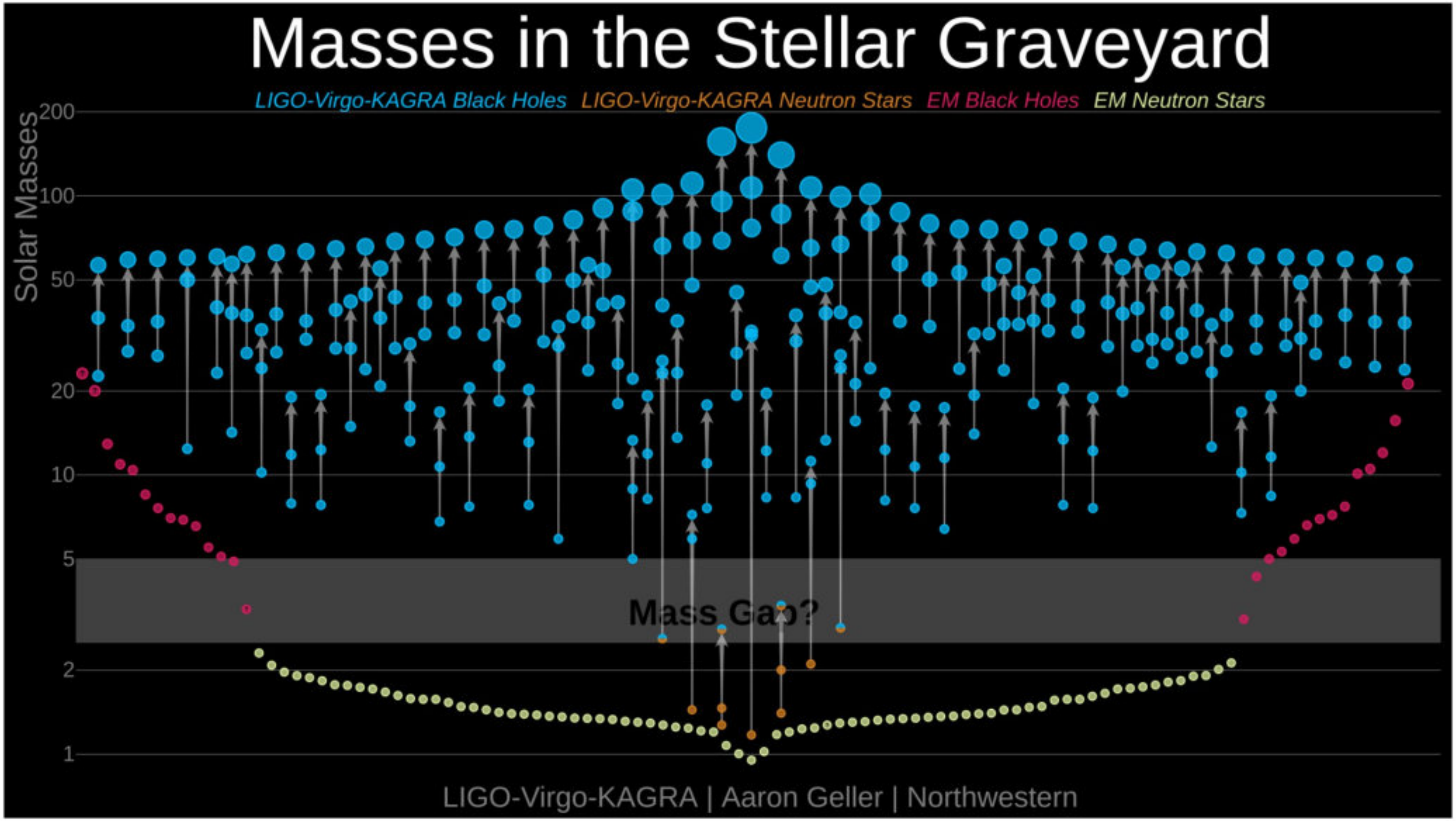
in Solar Masses

GWTC-2 plot v1.0

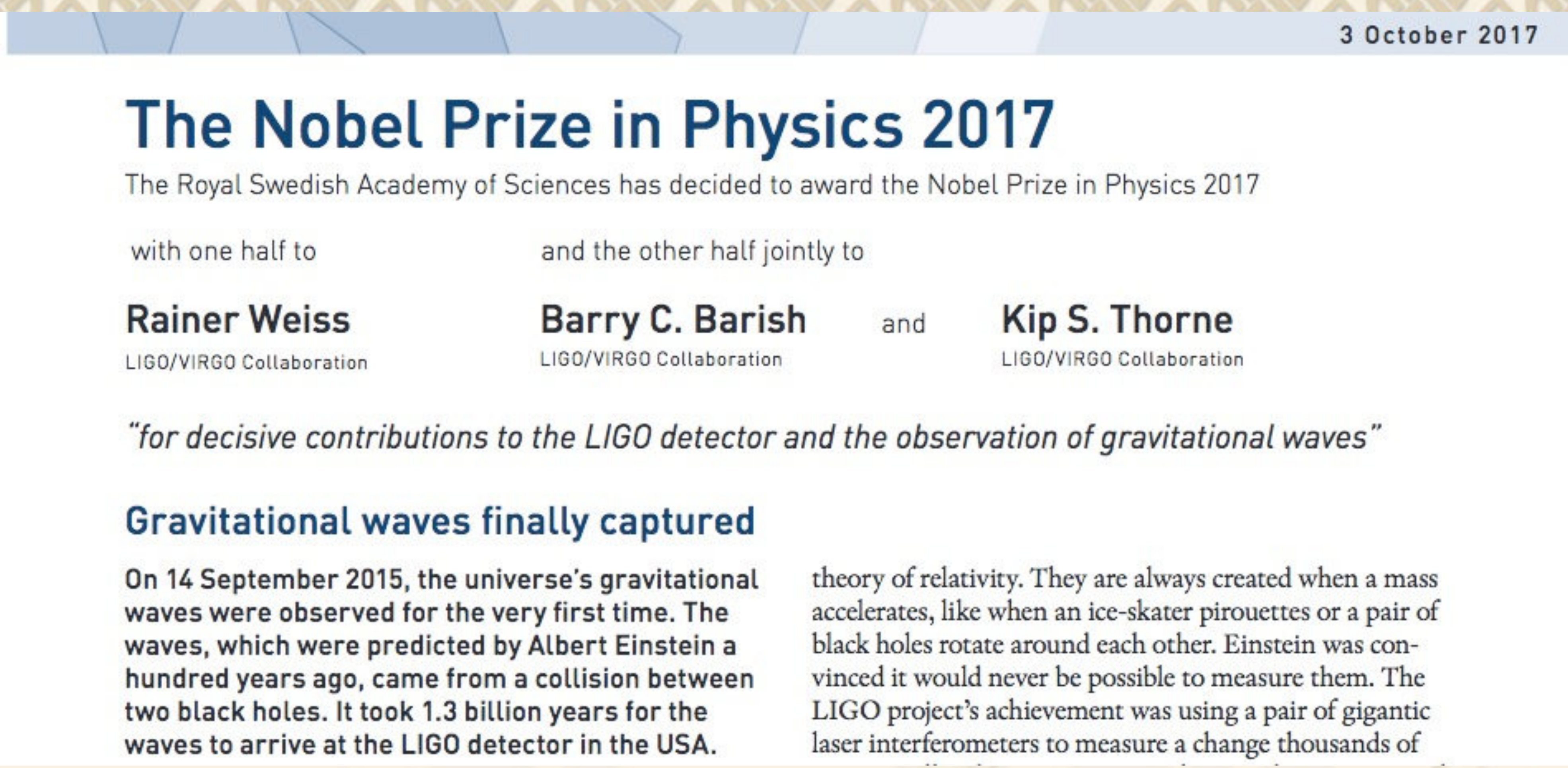
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

封面图：目前LIGO-Virgo官方证认的50个引力波信号，包含了GWTC-1和GWTC-2，图片来源：LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

(2021.01)



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



3 October 2017

The Nobel Prize in Physics 2017

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017

with one half to

Rainer Weiss
LIGO/VIRGO Collaboration

and the other half jointly to

Barry C. Barish and **Kip S. Thorne**
LIGO/VIRGO Collaboration
LIGO/VIRGO Collaboration

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

Gravitational waves finally captured

On 14 September 2015, the universe's gravitational waves were observed for the very first time. The waves, which were predicted by Albert Einstein a hundred years ago, came from a collision between two black holes. It took 1.3 billion years for the waves to arrive at the LIGO detector in the USA.

theory of relativity. They are always created when a mass accelerates, like when an ice-skater pirouettes or a pair of black holes rotate around each other. Einstein was convinced it would never be possible to measure them. The LIGO project's achievement was using a pair of gigantic laser interferometers to measure a change thousands of

连续引力波源的研究