第九章
宇宙学—宇宙的起源和演化

本章内容

- 几个代表性的宇宙观/模型
- 人们如何认识到宇宙是膨胀的？
- 热大爆炸宇宙学如何提出、有何观测证据？
- 暗物质与暗能量是什么？
- 什么决定了宇宙适合智慧生命的生存？
- 宇宙的命运是怎样的？
- 《天文学导论》课程结语


New Scientist
2021 PREVIEW
When will life get back to normal?
A year of climate action
Onwards to Mars
Microplastic risk exposed
The books you mustn't miss
WEEKLY 2 January 2021
How old is it?
How big is it?
What does it weigh?
THE STATE OF THE UNIVERSE
A SPECIAL ISSUE
What shape is it?
How fast is it growing?
How long will it last?
No3315 £5.95 CAN$7.99
PLUS
INSIDE DEEPMIND: EXCLUSIVE INTERVIEW WITH DEMIS HASSABIS ON USING AI TO SOLVE HUMANITY'S BIGGEST PROBLEMS

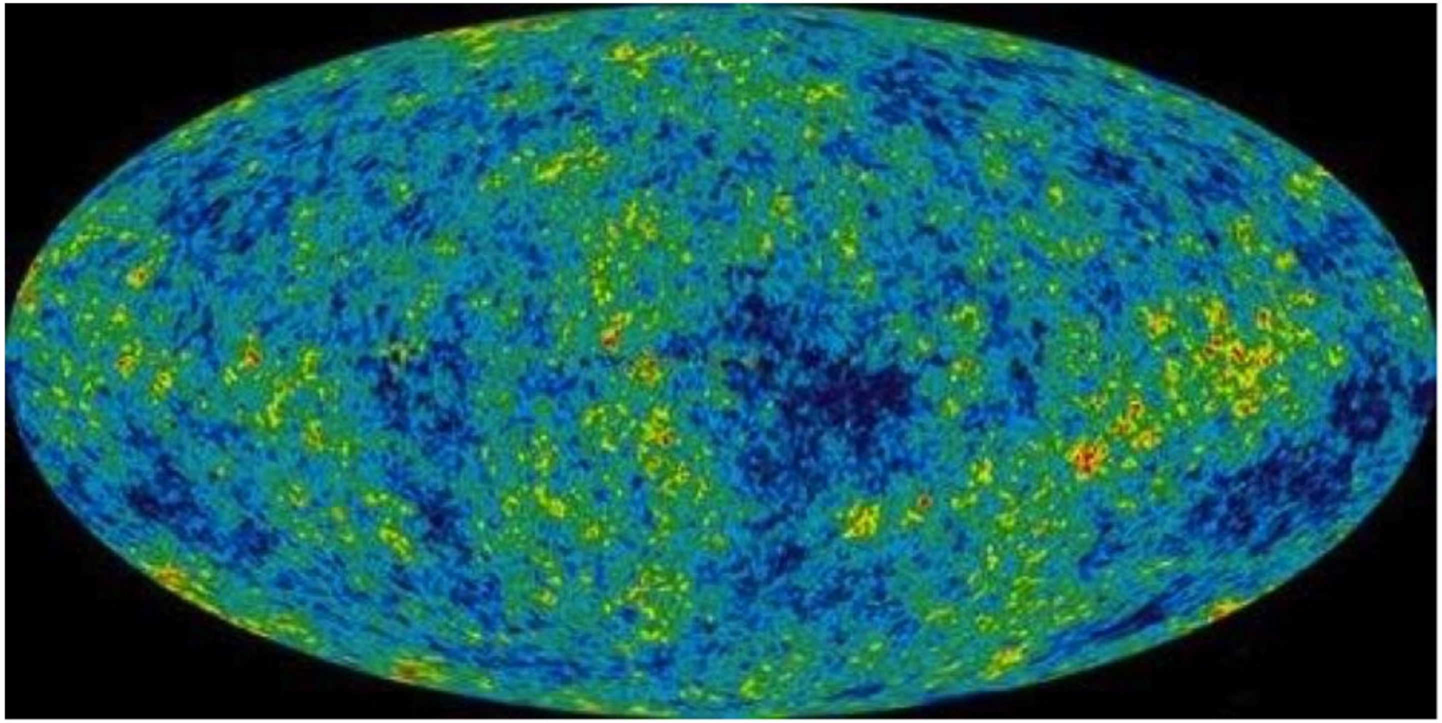
我们都是好奇宝宝，想要知道万事万物源于何方，又将终于何处。

The Universe, yours to discover!

宇宙那么大，我想去看看！

宇宙学发展到今天，已经成为一门精确科学。从1964年发现宇宙微波背景辐射以后，我们迎来了探索宇宙演化的黄金时期。国际上，把很多望远镜的项目，或者说很多经费投入到了观测宇宙中来。而这之后40多年的时间，我们确实已经把一门非常猜测性的科学转化为了一门非常定量的科学。

（上海交大景益鹏院士）



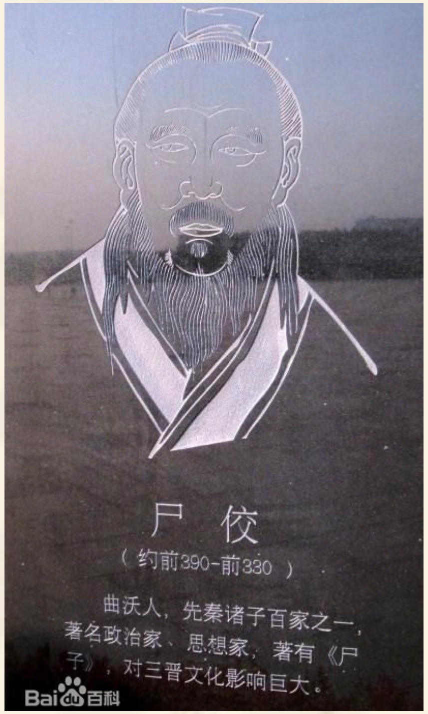
天文考古：CMB是最古老的一本书！泄露天机！

我们现在所谓的精确宇宙学，就是说我们的很多高精度观测使得我们能够在1%，甚至更好的精度上来描述宇宙。在如此高的精度上，我们能够通过一个统一的宇宙模型，描述宇宙从最初不到1秒钟直至现在以及遥远未来的状态变化。

为精确宇宙学干杯！

上下四方曰宇
往古来今为宙

——战国·尸佼



盖天说、浑天说、宣夜说

牛顿宇宙观

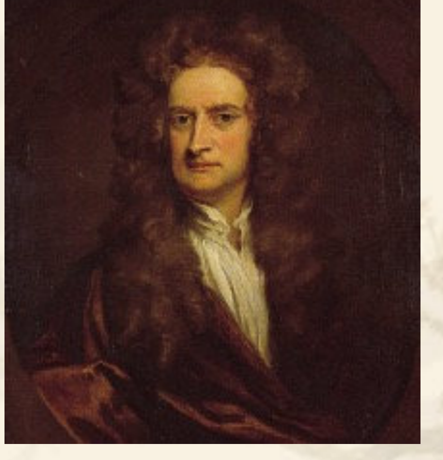
受牛顿力学规律支配的宇宙，在时间和空间上都是无限的；宇宙是永恒的、稳定的；宇宙中的物质分布是不均匀的。

问题：物质不均匀、存在中心→宇宙不稳定→引力→宇宙坍缩

(均匀球体(R,rou)边缘处单位质量的引力势：
-GM/R=-4/3*pi*G*rou*R^2)

解决办法：修改牛顿理论

放弃经典时空概念



Isaac Newton

宇宙是静态的吗？

奥伯斯佯谬有四个假设：

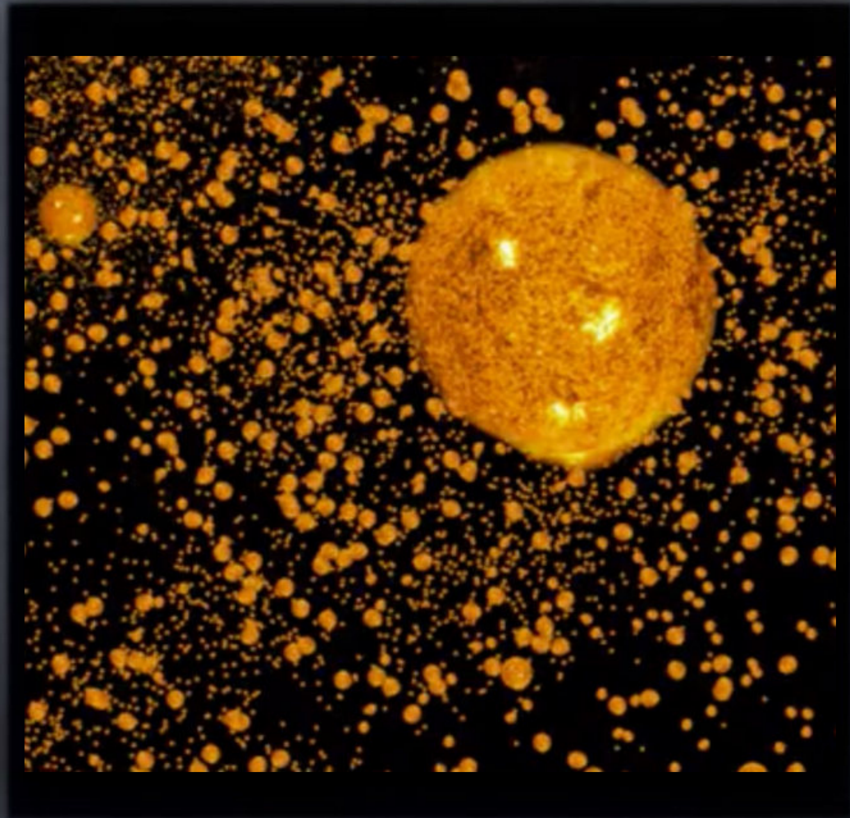
宇宙是无穷大的

宇宙是永恒的

宇宙空间是平坦的

宇宙构成是静止的

我们的夜空应该是无限亮的……



Einstein的相对论宇宙学模型

- 1915年爱因斯坦的广义相对论发表

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R=-8\pi GT_{\mu\nu}$$

（里奇张量：空间弯曲状况；
时空度规张量：基本特性，时空间隔；
能动应力张量：物质分布与运动状况）

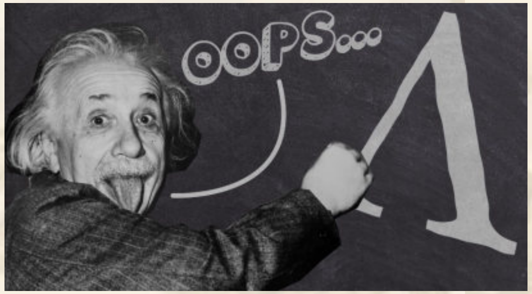
- 1917年Einstein将广义相对论引力场方程应用于宇宙的结构

Einstein发现方程的解是不稳定的，表明宇宙在膨胀或者收缩。

- 静态的宇宙←加入起斥力作用的“宇宙学常数”项

爱因斯坦的宇宙观：静态、有限无边，没有中心

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R+\Lambda g_{\mu\nu}=-8\pi GT_{\mu\nu}$$



Einstein稳态解是不稳定的！ Einstein’s greatest blunder?

费曼是美国著名的物理学家，也拿过诺贝尔物理学奖。

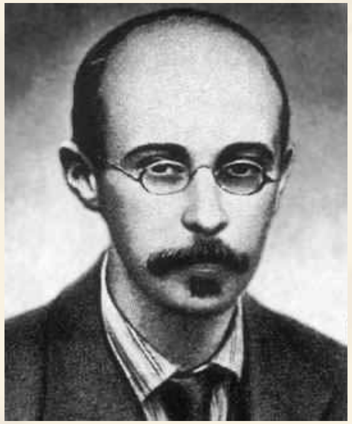
有一次，他去开一个相对论的会，到了会场，下了飞机以后忘记了地址。

他就找到一个出租车司机问：**你有没有看到这样一群人，他们脑袋抬得高高的，对周围的事和人都不关心，嘴巴里总是说着gee-mu-nu,gee-mu-nu,...?**

那个司机一听，马上把他送到了正确的地方。

Friedman膨胀宇宙模型

- 1922年，俄国气象学家、数学家A. Friedman求得不含“宇宙常数”项的引力场方程的均匀的和各向同性的通解。
- 宇宙从一个**“奇点”**开始膨胀，膨胀宇宙的演化取决于宇宙中的物质自引力或密度ρ的大小



A. Friedman

宇宙的命运

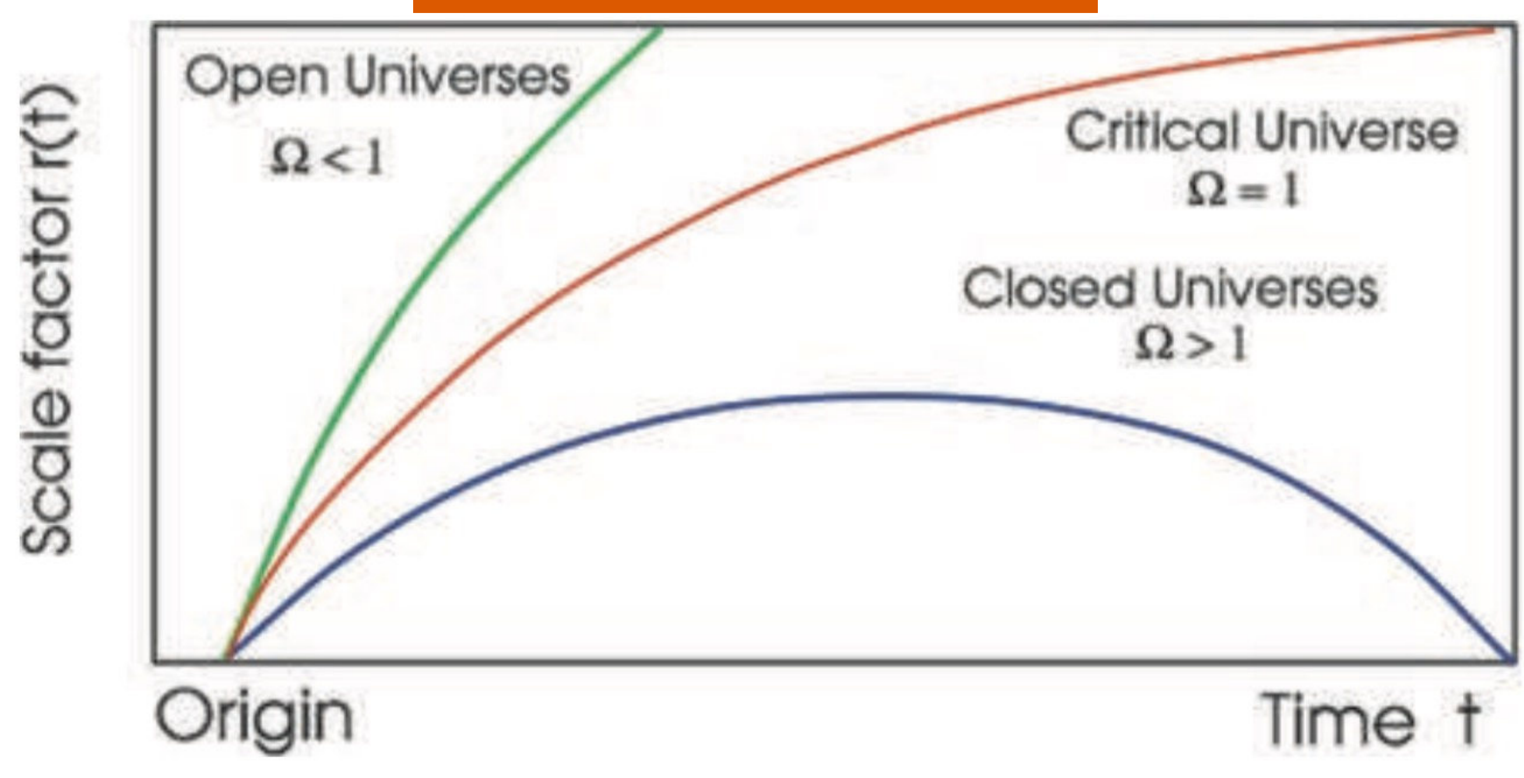
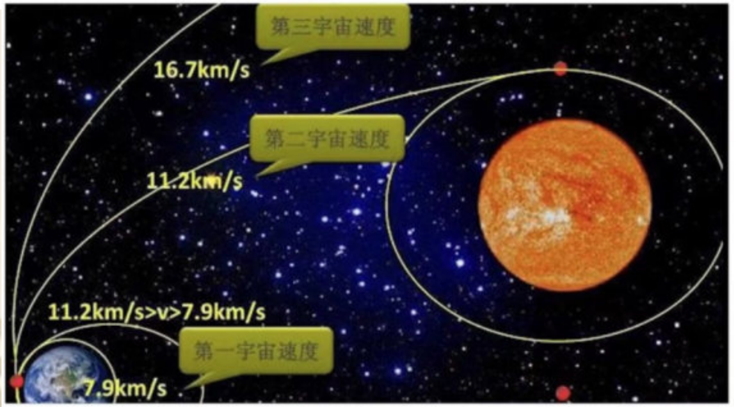
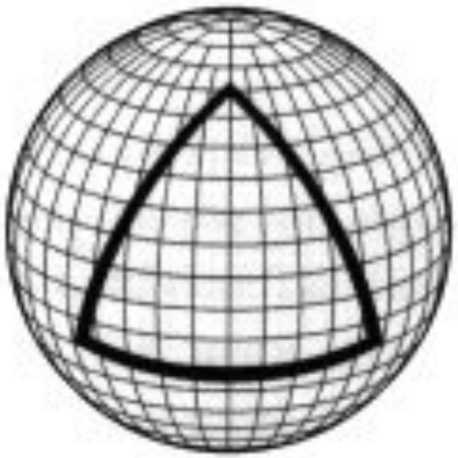


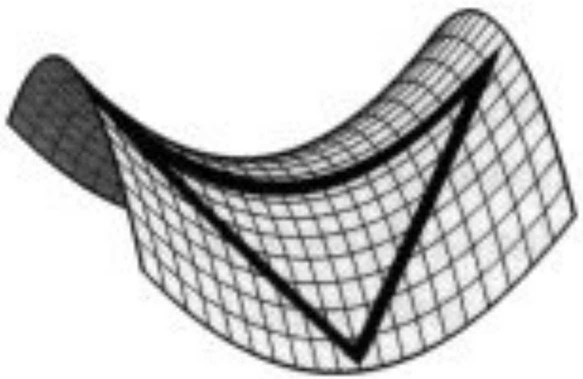
Figure 9.2 The Friedmann models of an expanding universe.





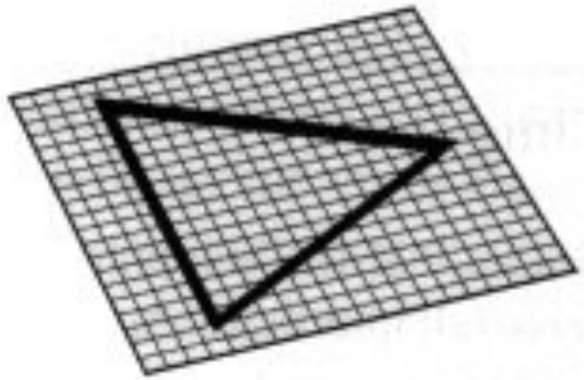
Closed Geometry

$\Omega > 1$



Open Geometry

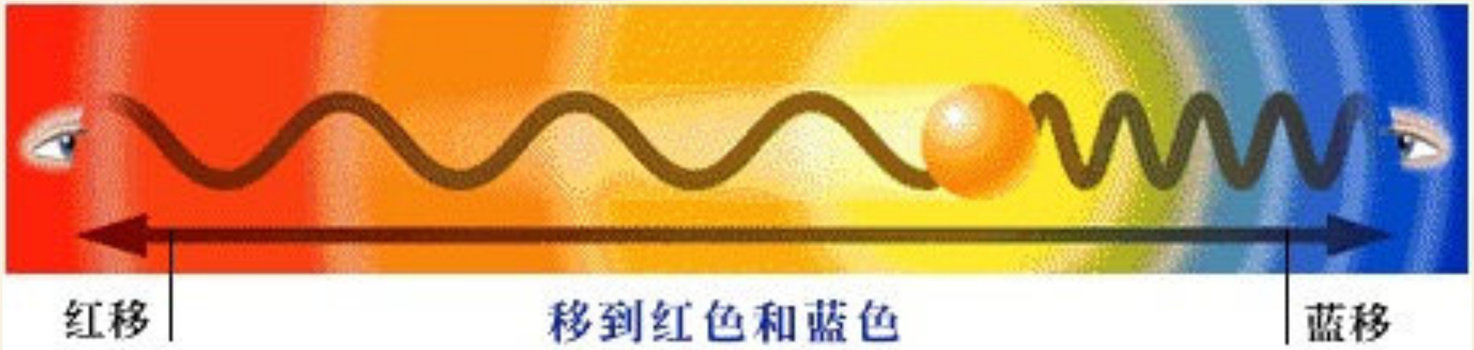
$\Omega < 1$

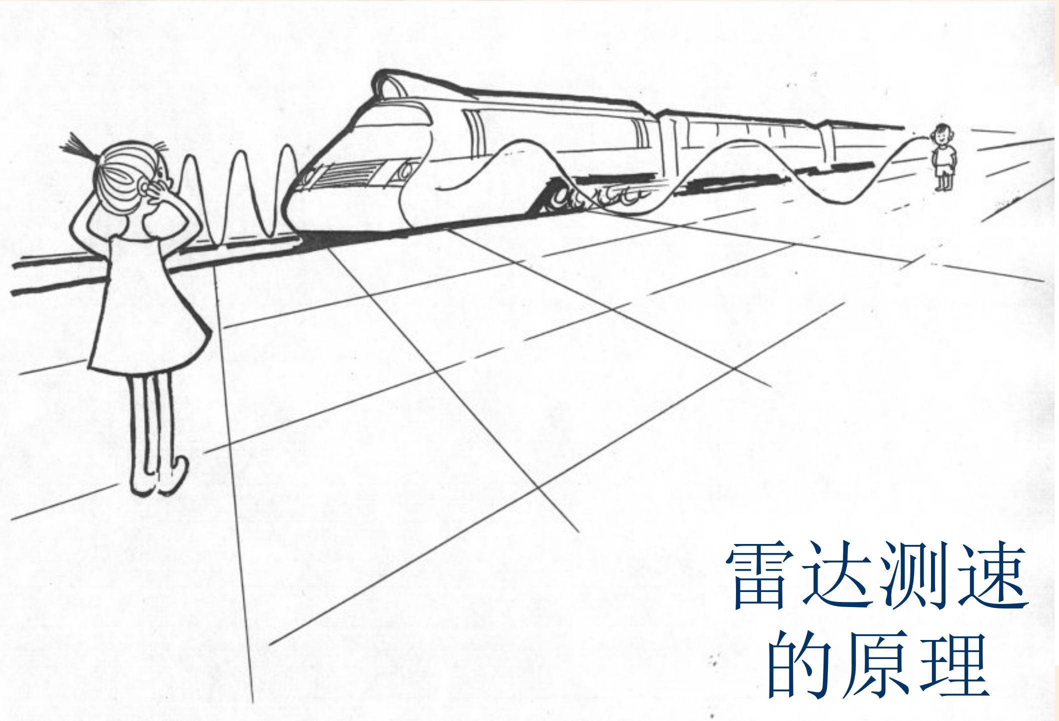


Flat Geometry

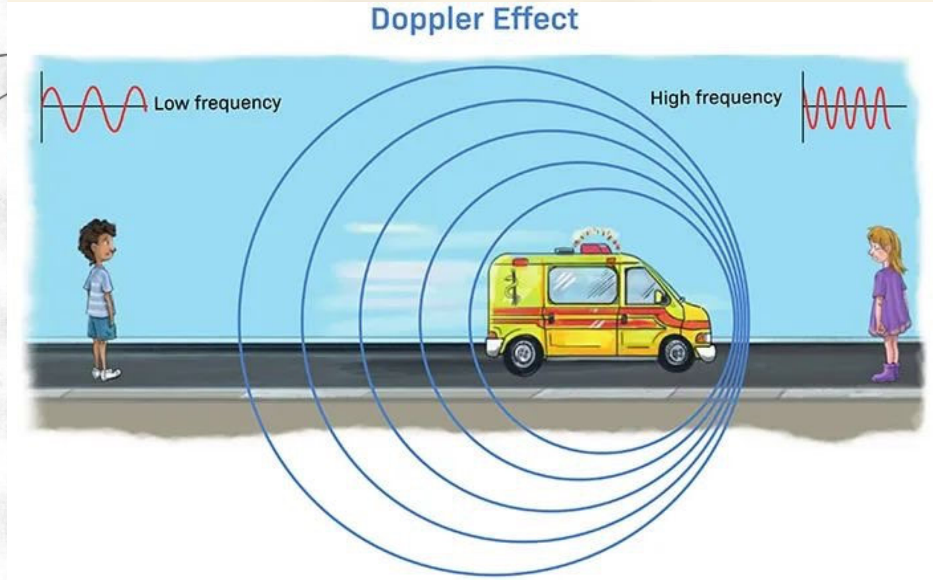
$\Omega = 1$

星系的红移和蓝移

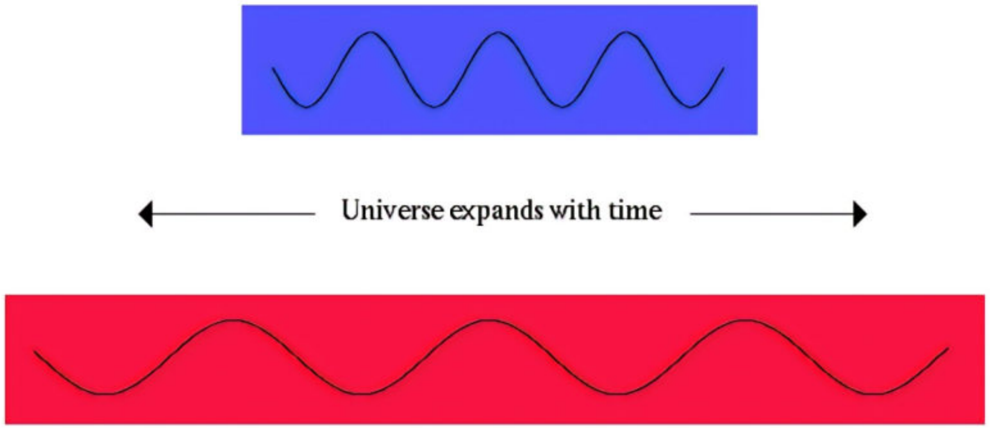


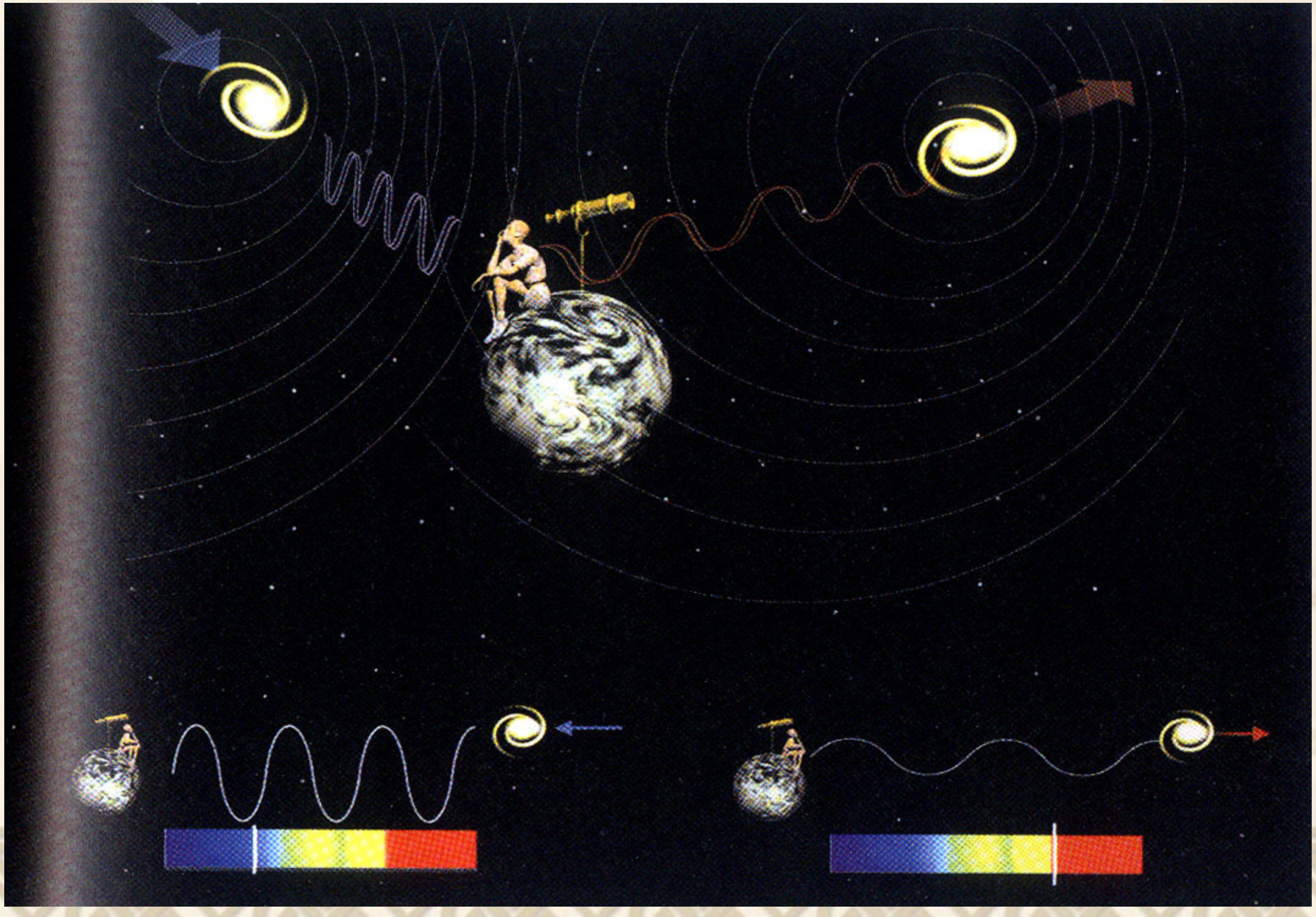


雷达测速
的原理



❖ 红移—速度测量（多普勒红蓝移vs.宇宙学红移）


Universe expands with time



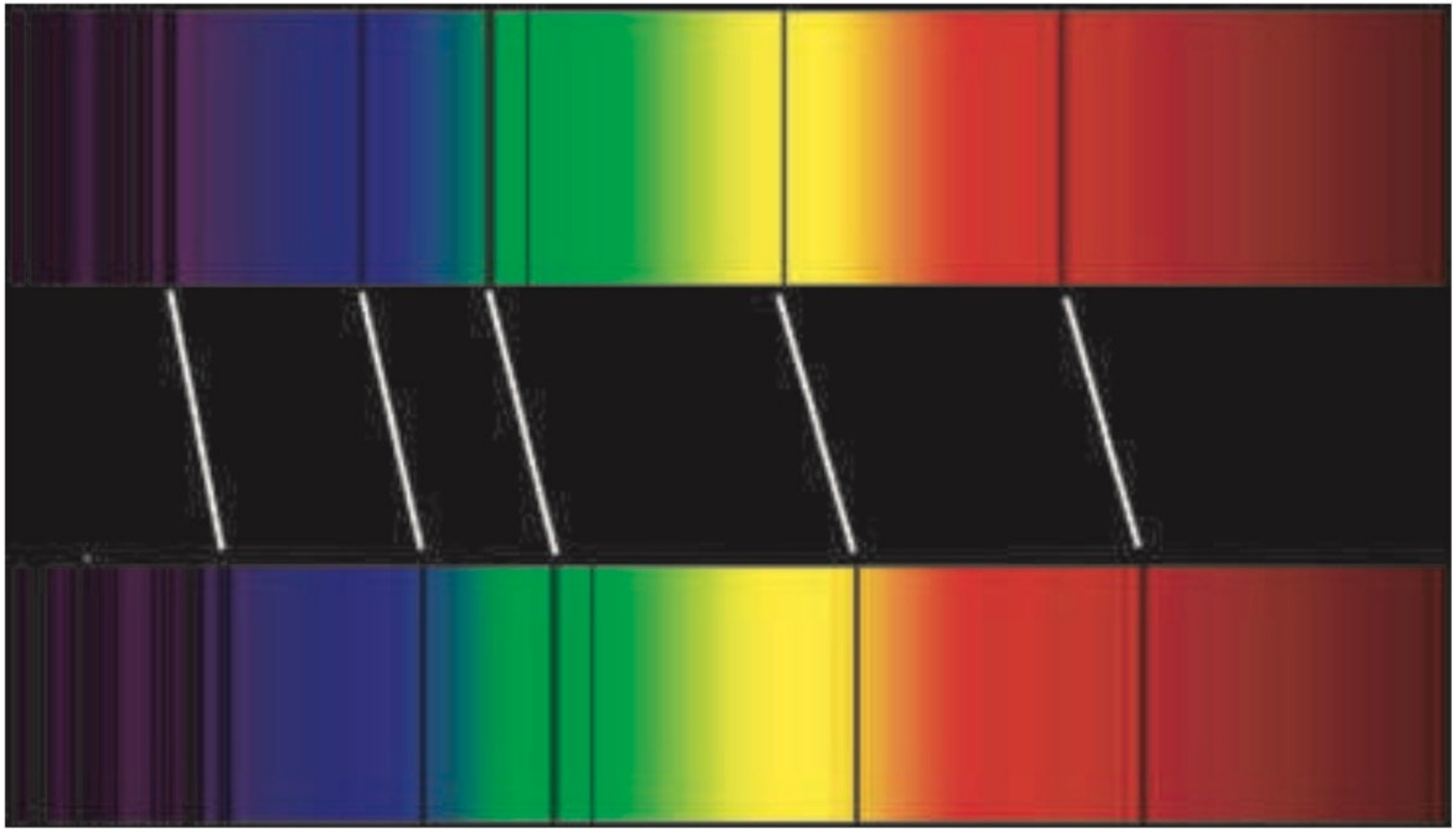


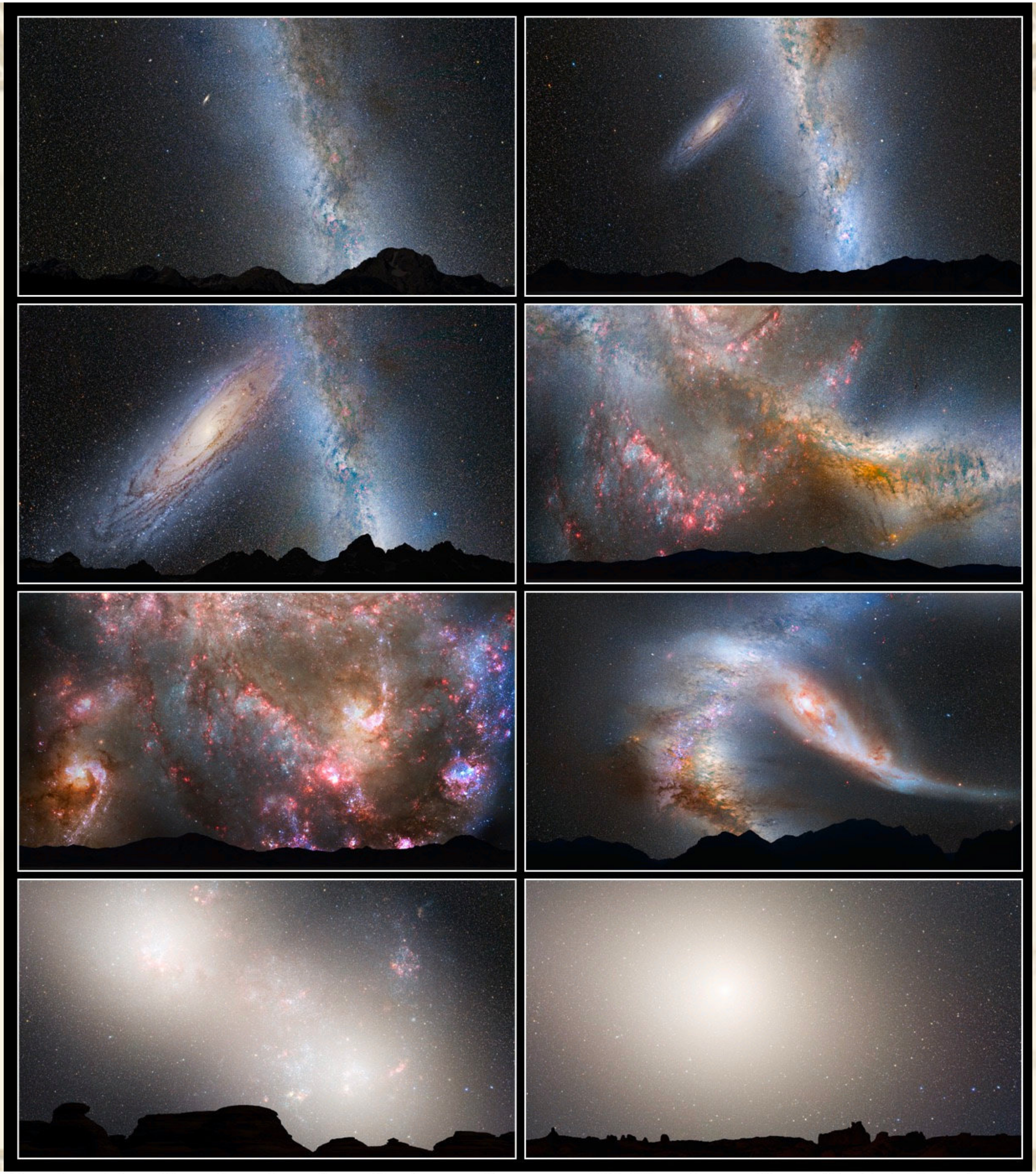
Figure 9.3 The redshift in the spectral lines from a distant galaxy (below) relative to those observed in our Sun (above). Image: Wikipedia Commons.

$$\Delta f/f = \Delta\lambda/\lambda = v/c$$

（退行或接近的v远小于c时，z=v/c）

星系红移和蓝移早期观测

- 美国天文学家：Vesto Slipher
- 1913年，Slipher发现Andromeda（仙女座星系）的蓝移为：~300km/s，太阳绕银河系中心的速度为：~220km/s，仙女座星系与银河系的靠近速度约为：~100km/s
- 1915年，Slipher测量了15个星系，其中11个红移，两年以后，发现另外6个星系存在红移
- 基本结论：仅近邻星系（本星系群之内）显示蓝移；给出星系退行或接近的速度



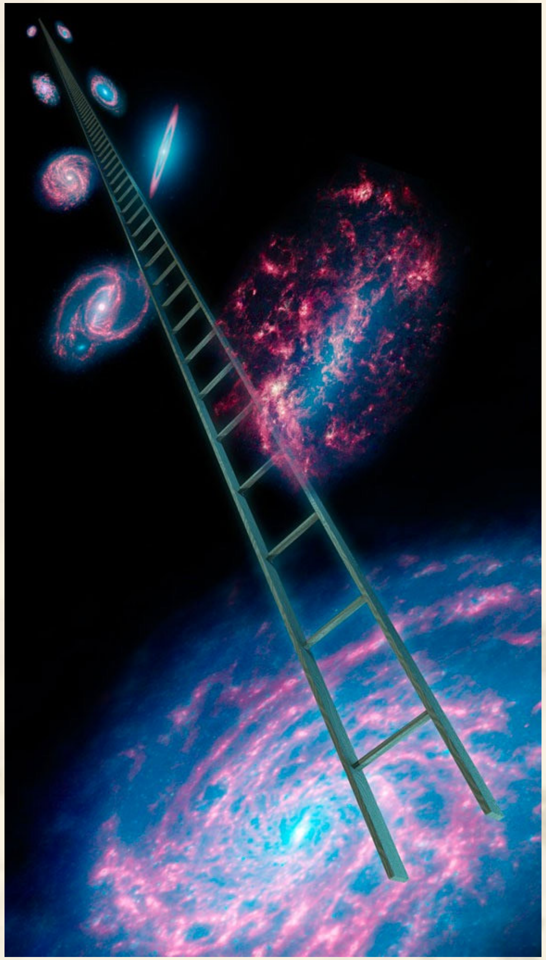
This series of photo illustrations shows the predicted merger between our Milky Way galaxy and the neighboring Andromeda galaxy.

Credit: NASA; ESA; Z. Levay and R. van der Marel, STScI; T. Hallas, and A. Mellinger –

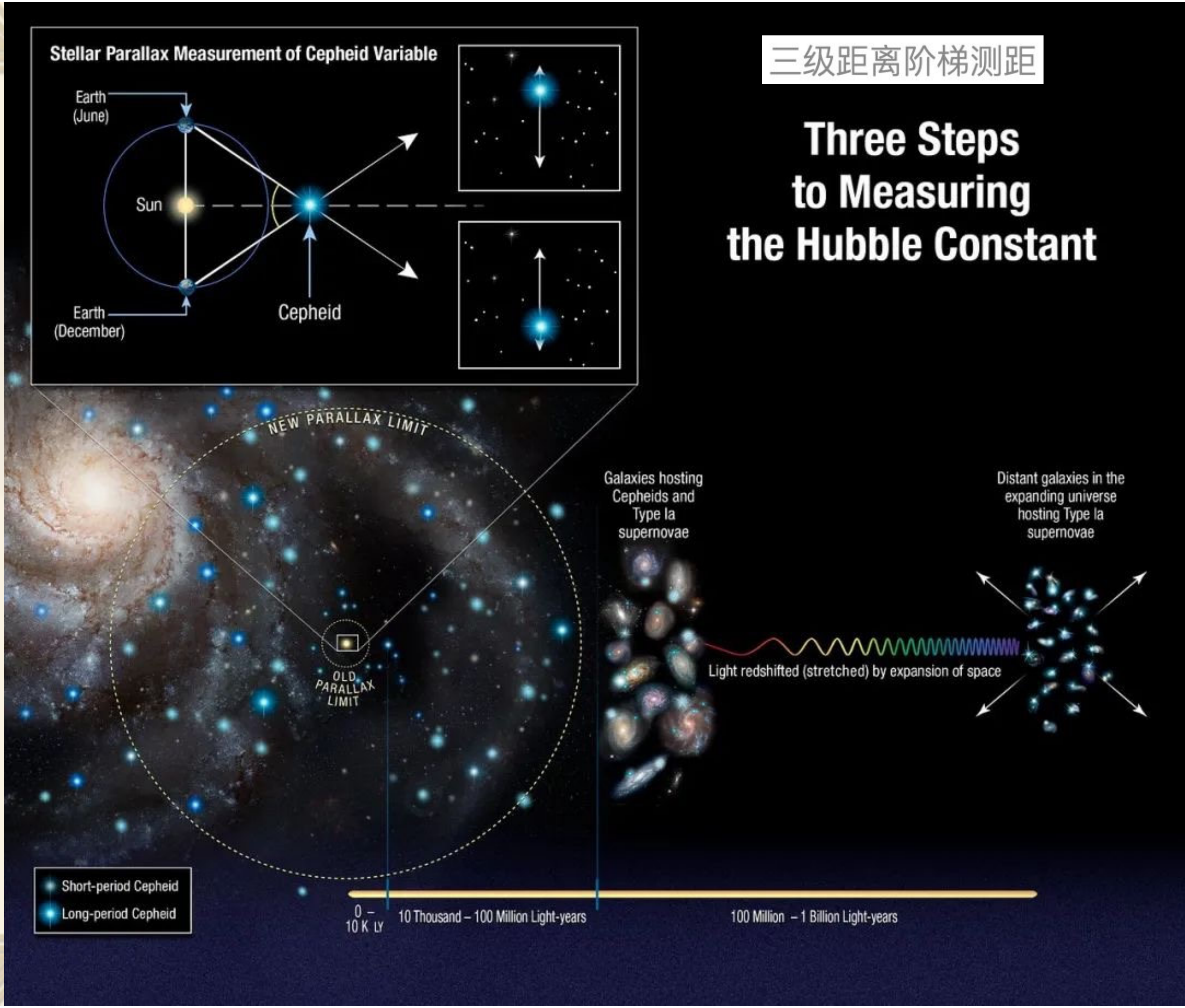
河外星系

- “星云”的发现
- 哈勃测定了星云的距离
  - 利用造父变星
  - 发现星系在退行

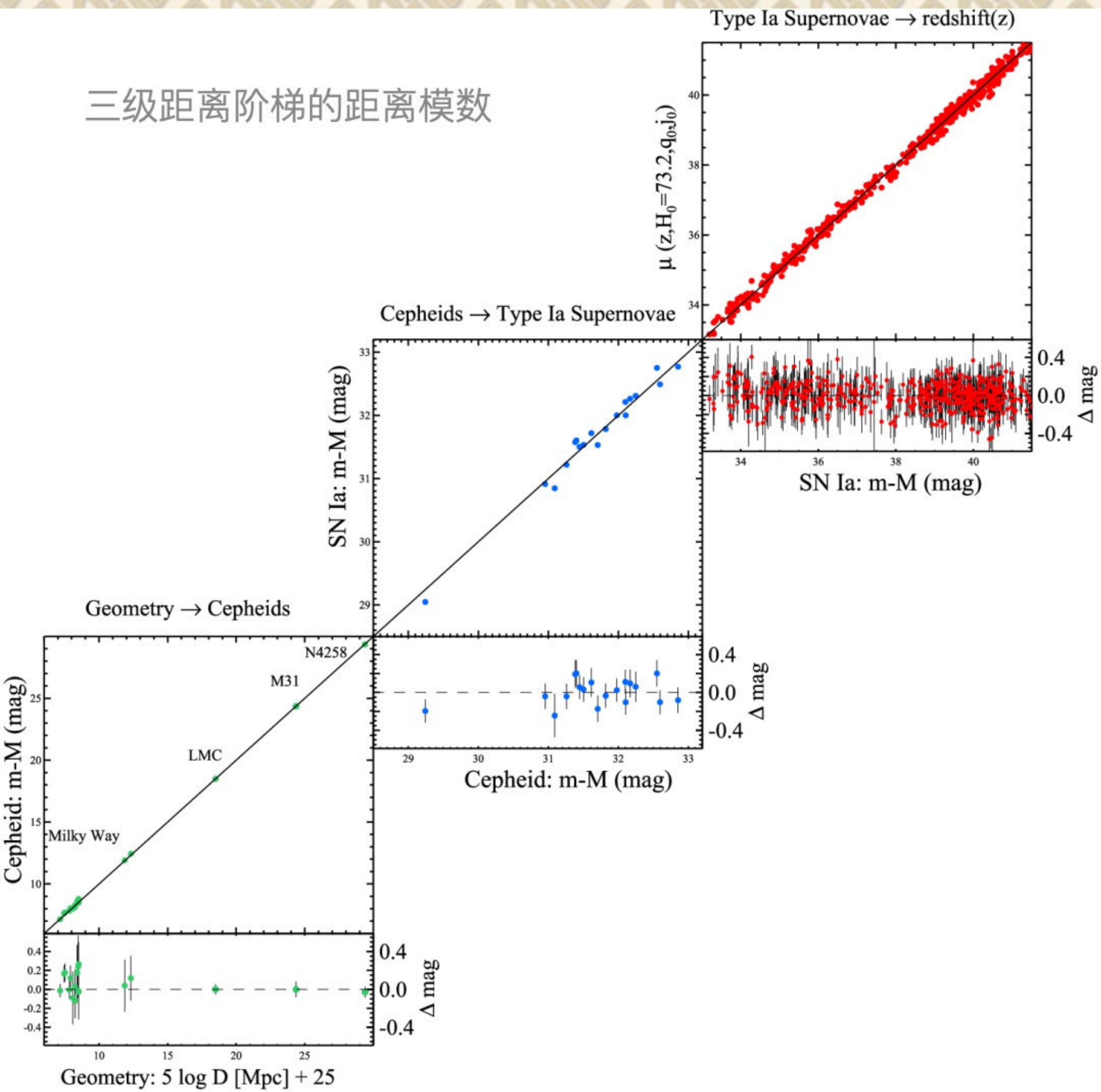
宇宙在膨胀！！



三级距离阶梯测距


Stellar Parallax Measurement of Cepheid Variable
Earth (June)
Sun
Earth (December)
Cepheid
Three Steps to Measuring the Hubble Constant
NEW PARALLAX LIMIT
OLD PARALLAX LIMIT
Galaxies hosting Cepheids and Type Ia supernovae
Distant galaxies in the expanding universe hosting Type Ia supernovae
Light redshifted (stretched) by expansion of space
Short-period Cepheid
Long-period Cepheid
0 – 10 K LY
10 Thousand – 100 Million Light-years
100 Million – 1 Billion Light-years

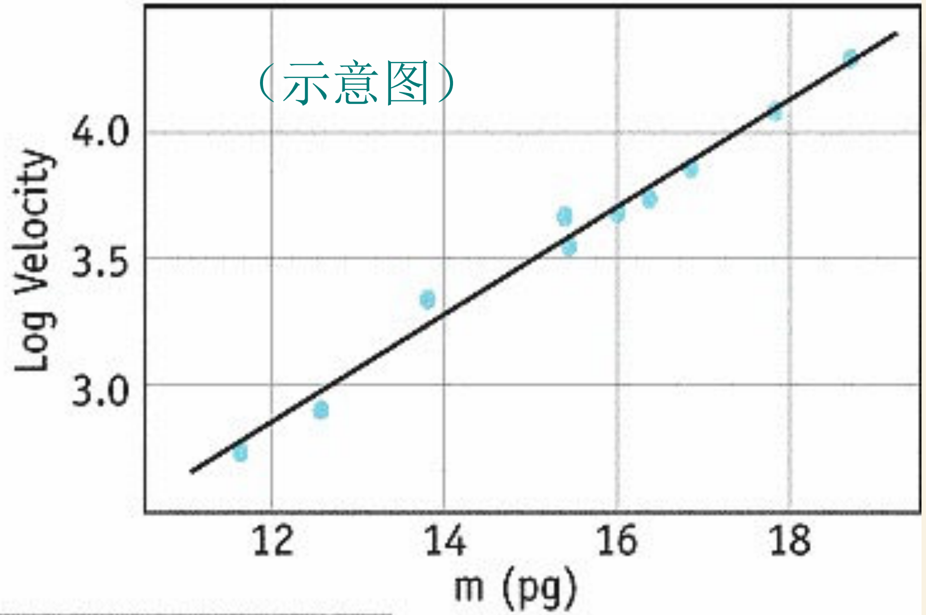
三级距离阶梯的距离模数



宇宙的膨胀

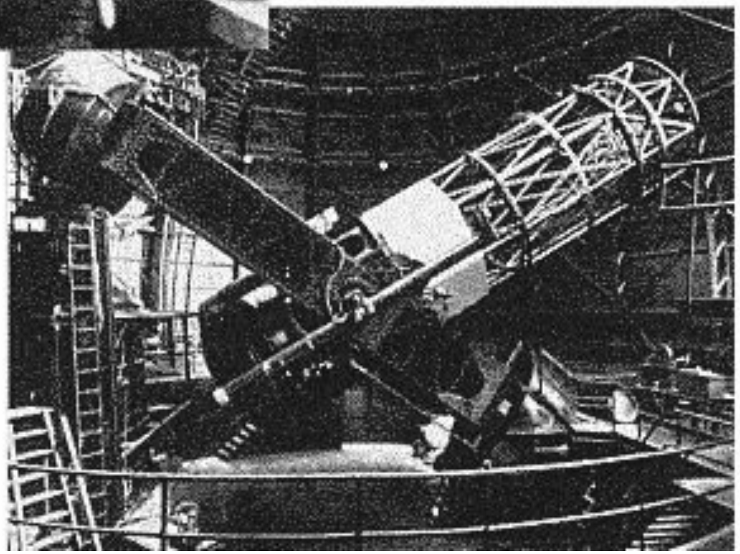
DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE

Edwin Hubble



速度

星等（距离）



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

宇宙膨胀是如
何被发现的？

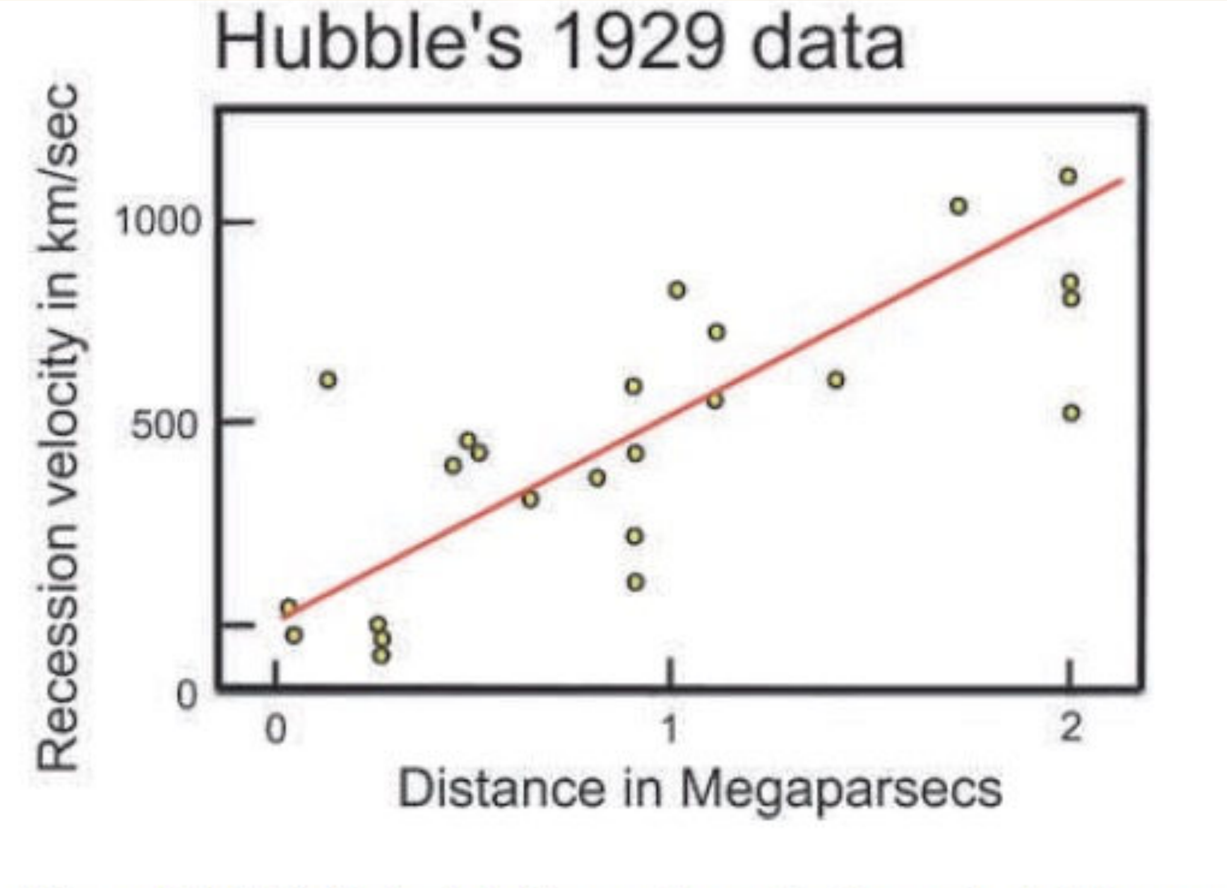


Figure 9.4 Hubble's plot of recession velocity against distance.

$V=H_0D$, H_0~500km/s/Mpc

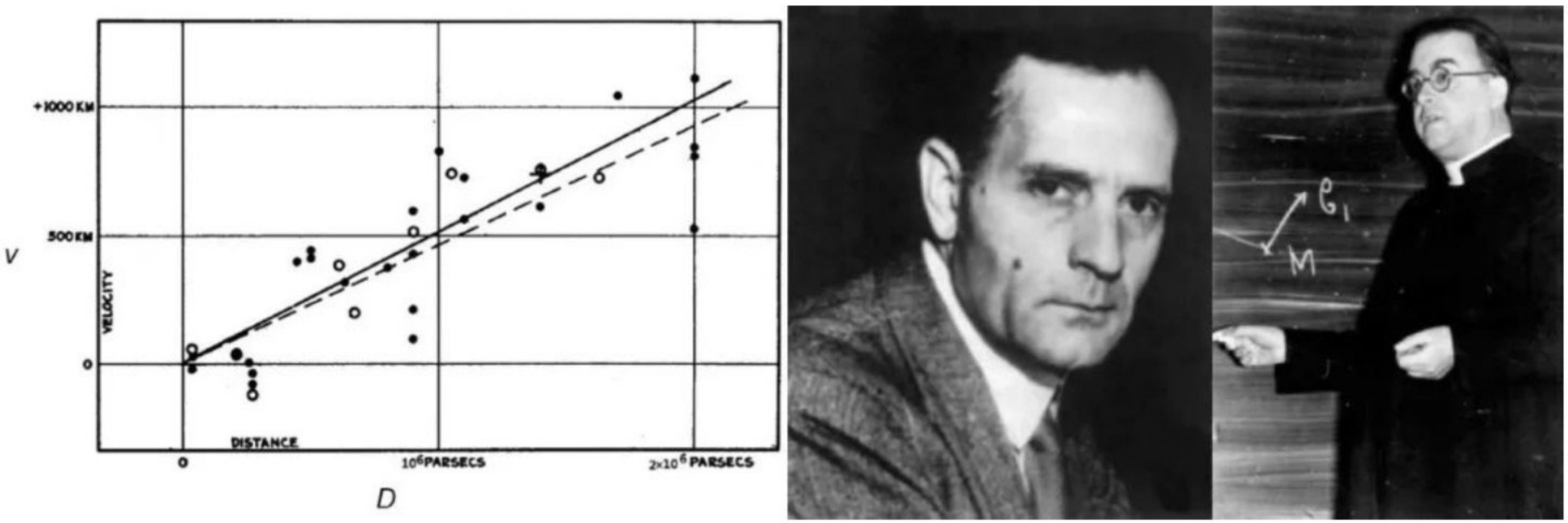
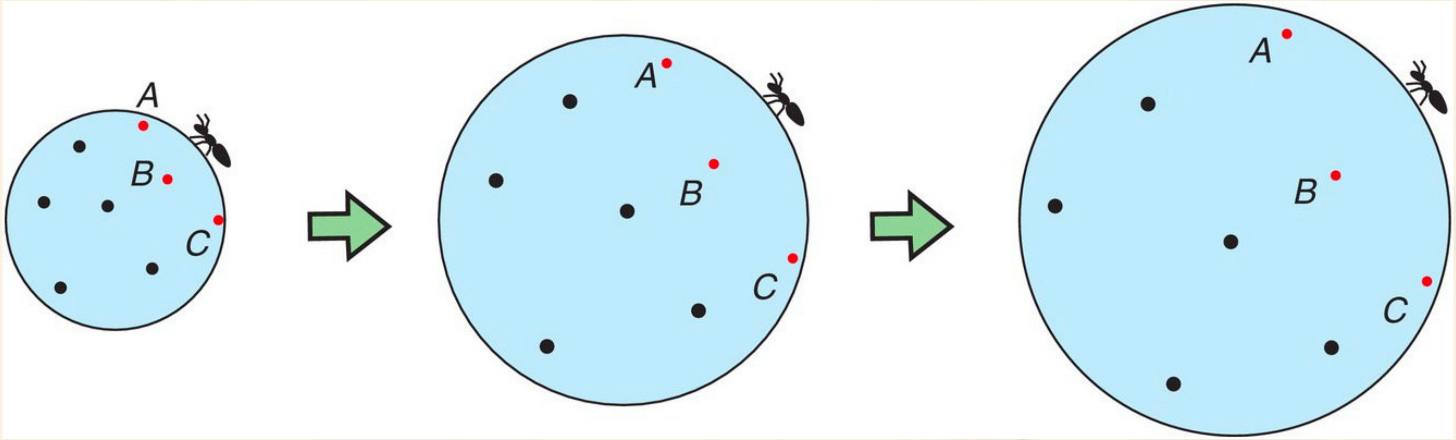


图1. 反映遥远星系的退行速度v与它们离地球的距离D成正比关系的定律，$v = H_0 \times D$（左图，来自参考文献[1]），在2018年10月经国际天文联合会表决通过由原名哈勃定律改为哈勃（中图）–勒梅特（右图）定律，以表示认可梅勒特在发现这一定律方面的贡献。

Figure 9.5 A simple 'universe' to demonstrate Hubble's Law.



Hubble年龄：~20亿年

$$
\begin{aligned}
1/H_0 &= 1\,\mathrm{Mpc}/500\,\mathrm{km\,s^{-1}} \\
&= 3.26 \text{ million light years}/500\,\mathrm{km\,s^{-1}} \\
&= 3.26 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 3 \times 10^5\,\mathrm{s}/500 \\
&= 3.26 \times 10^6 \times 3 \times 10^5 \text{ years}/500 \\
&= 1.96 \times 10^9 \text{ years} \\
&= \sim 2 \text{ billion years}
\end{aligned}
$$

宇宙的实际年龄应该小于Hubble年龄，
因为宇宙在过去膨胀速度更快。

对平坦宇宙：

$$\boxed{t = \frac{2}{3H_0} \sim 13亿年}$$

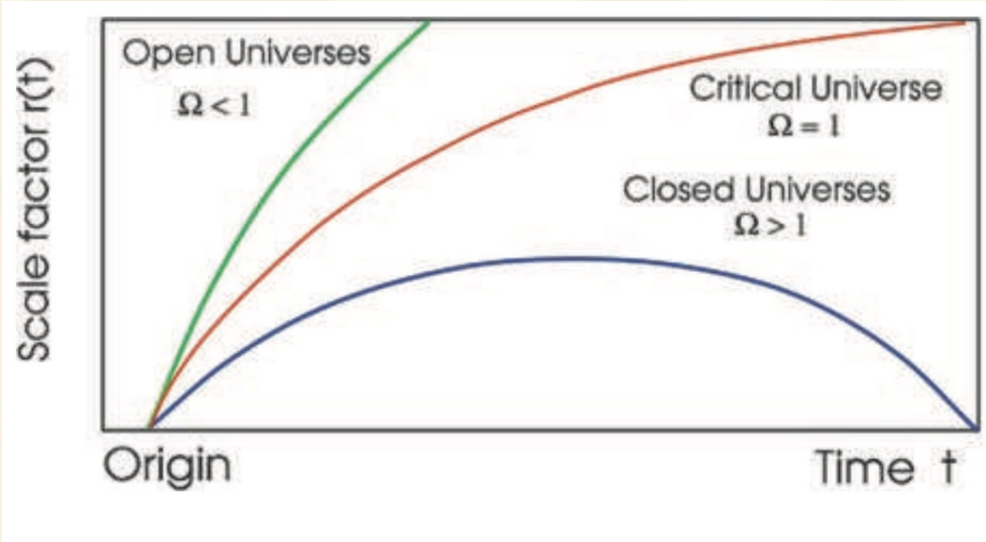


Figure 9.2 The Friedmann models of an expanding universe.

宇宙的年龄问题：

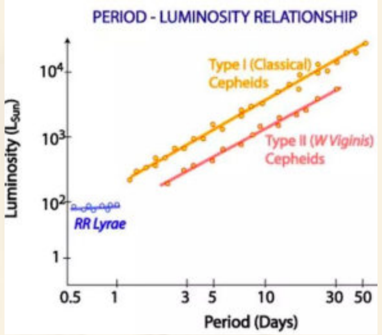
- 太阳系的年龄：~45亿年
- 一些恒星的年龄：~100-120亿年（Hoyle等）
- 球状星团的年龄：~120亿年

Hubble常数的测定

✓Walter Baade用Mt Wilson 100in Hooker 望远镜，发现仙女座星系中存在两类造父变星，Hubble观测到的造父变星比那些用于距离定标的造父变星亮四倍（实际距离应变大两倍）：➔ H_0~250km/s/Mpc

✓HST：观测到19个星系（最远：t~1.08亿光年）中～800个造父变星：➔ H_0~72 +/- 8 km/s/Mpc

✓引力透镜观测：➔ H_0~71 +/- 6 km/s/Mpc

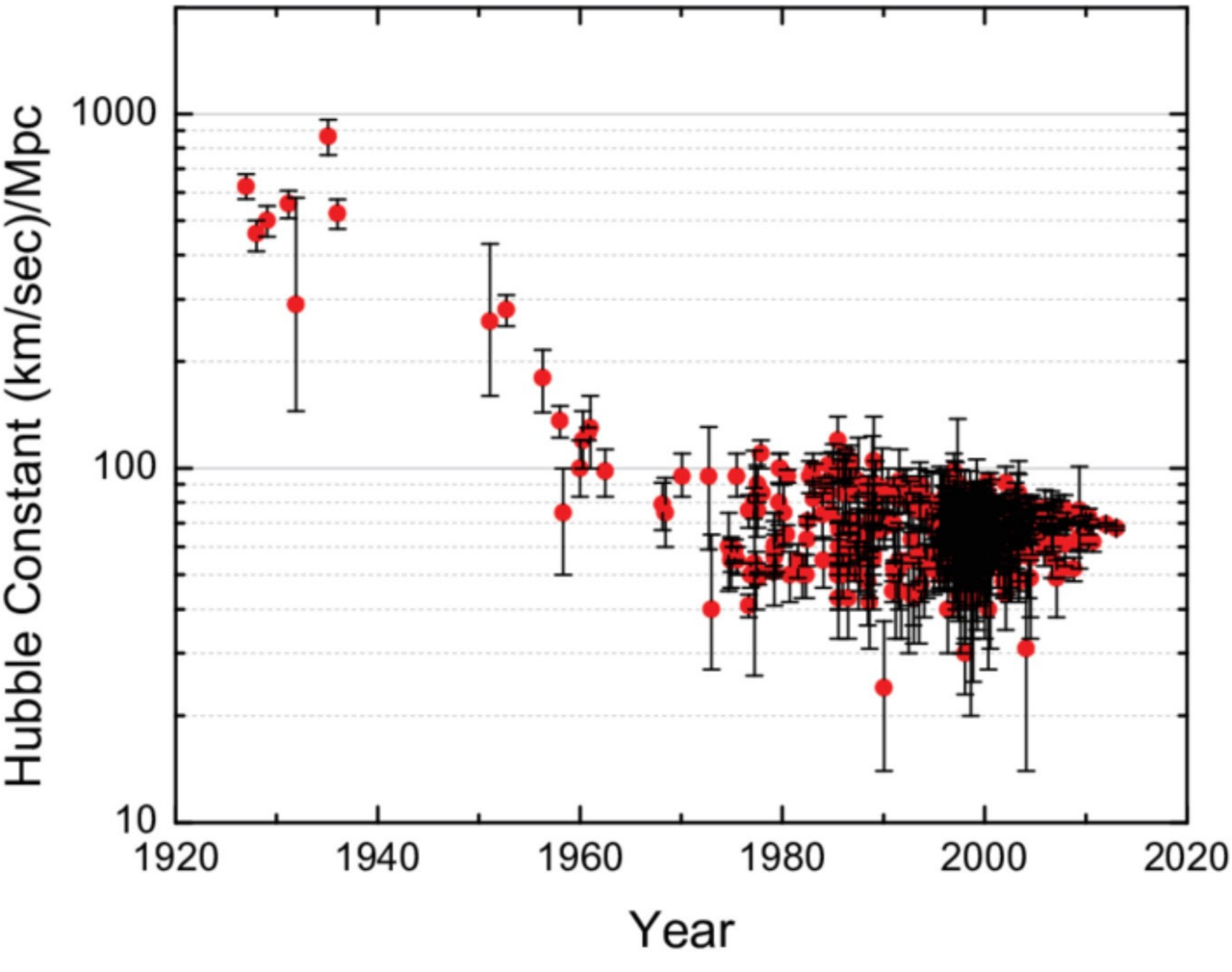


✓WMAP：➔ H_0~73.5 +/- 3.5 km/s/Mpc

✓WMAP+其它观测：➔ H_0~70.8 +/- 1.6 km/s/Mpc

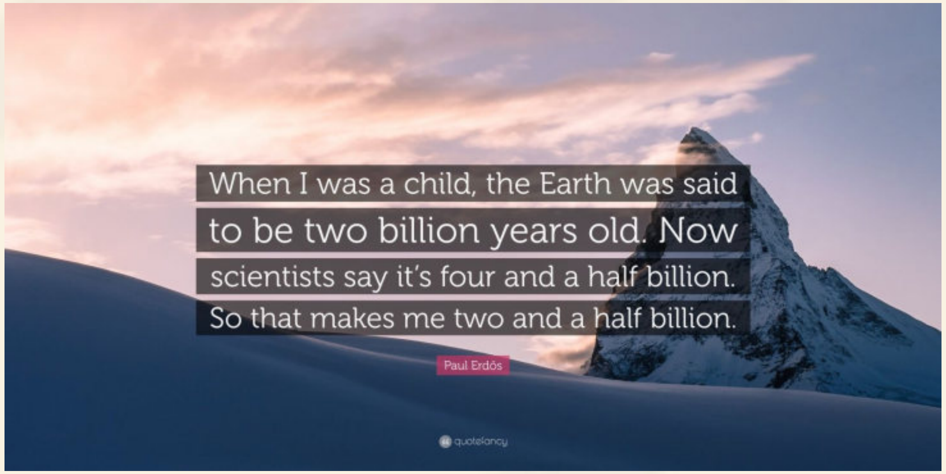
✓PLANCK（2013)：➔ H_0~67.3 +/- 1.2 km/s/Mpc

Hubble年龄：~140亿年，平坦宇宙年龄：~93亿年



Hubble Constant (km/sec)/Mpc
1000
100
10
1920
1940
1960
1980
2000
2020
Year

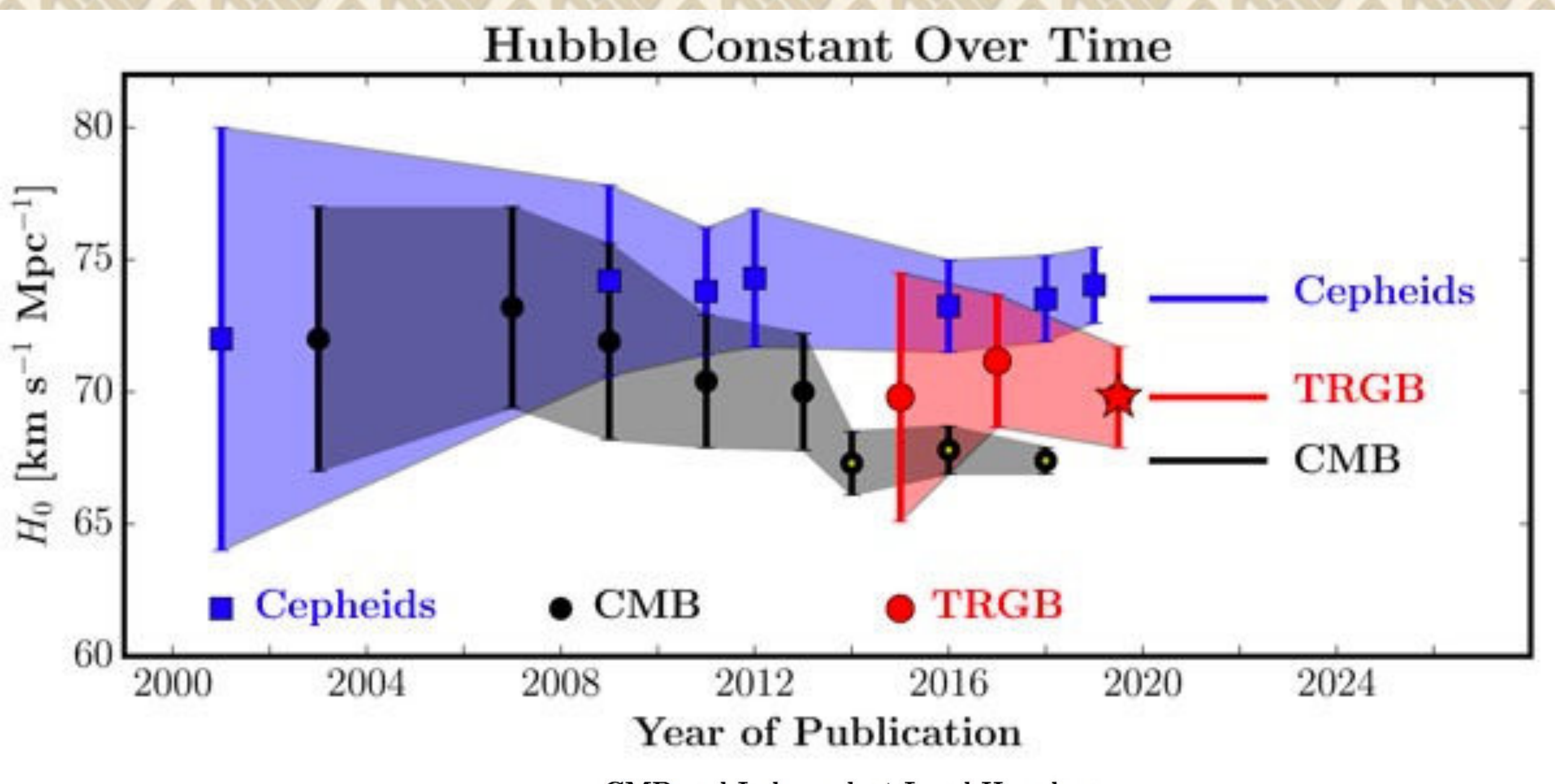
Erdős was a mathematical prodigy. At three he could multiply three-digit numbers in his head, and at four he discovered negative numbers. "I told my mother," he recalled, "that if you take 250 from 100, you get −150. My second great discovery was death. Children don't think they're ever going to die. I was like that too, until I was four. I was in a shop with my mother and suddenly I realized I was wrong. I started to cry. I knew I would die. From then on, I've always wanted to be younger. In 1970, I preached in Los Angeles on 'my first two and a half billion years in mathematics.' When I was a child, the Earth was said to be two billion years old. Now scientists say it's four and a half billion. So that makes me two and a half billion. The students at the lecture drew a timeline that showed me riding a dinosaur. I was asked, 'How were the dinosaurs?' Later, the right answer occurred to me: 'You know, I don't remember, because an old man only remembers the very early years, and the dinosaurs were born yesterday, only a hundred million years ago.' "

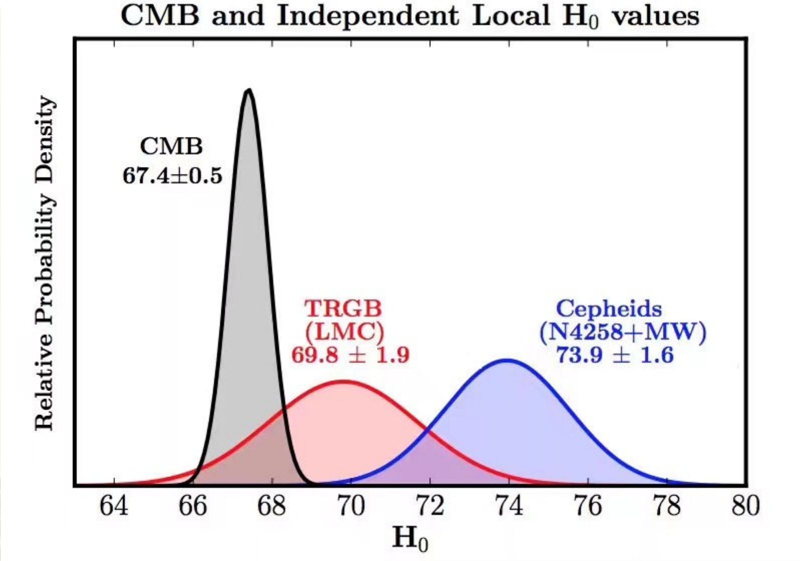


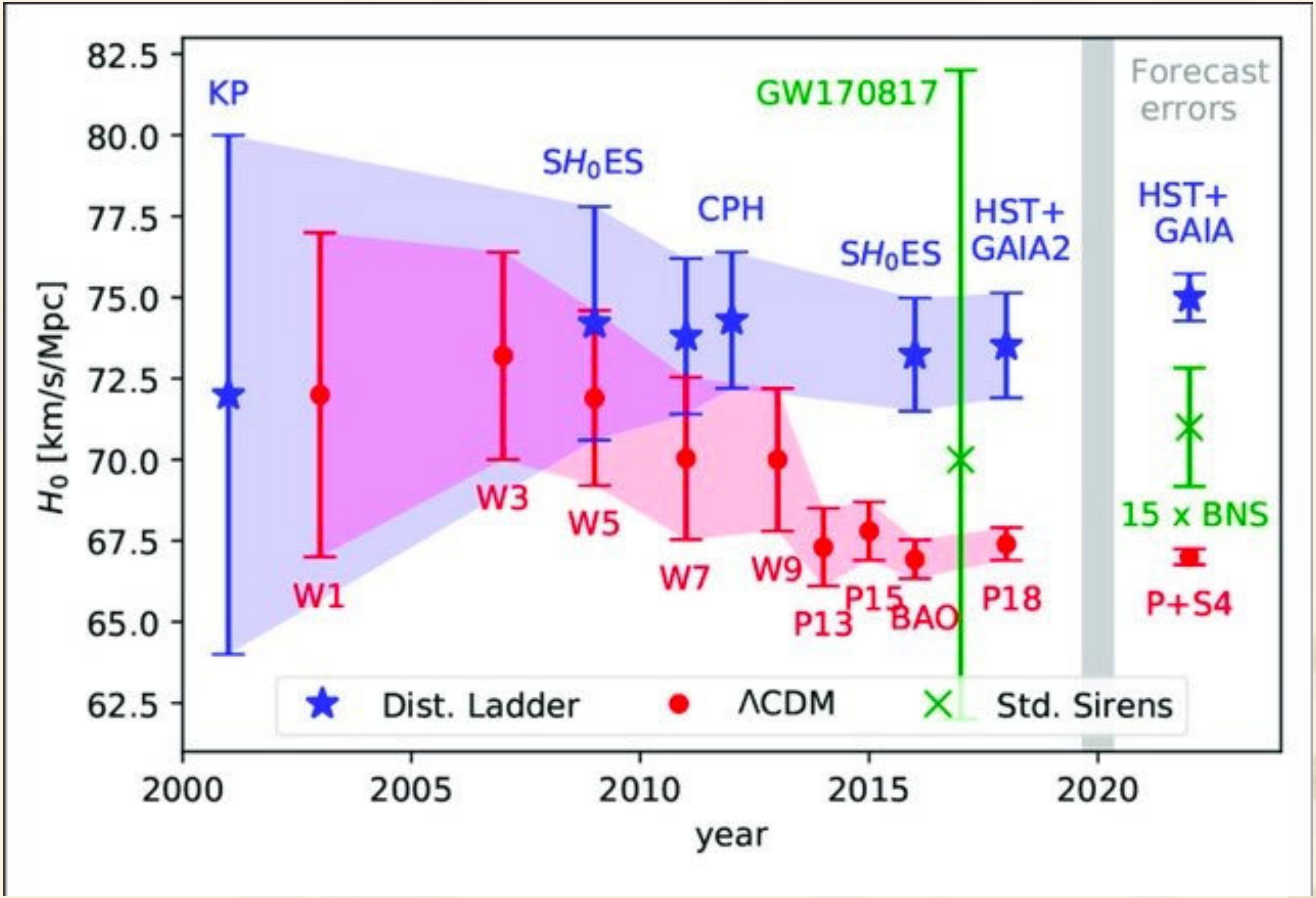
匈牙利数学家保罗·爱多士：“当我是个孩子的时候，人们说地球的年龄是20亿年。现在，科学家说地球的年龄是45亿年。所以，这使得我的年龄是25亿岁了。”

宇宙的哈勃年龄：
20亿年 → 140亿年

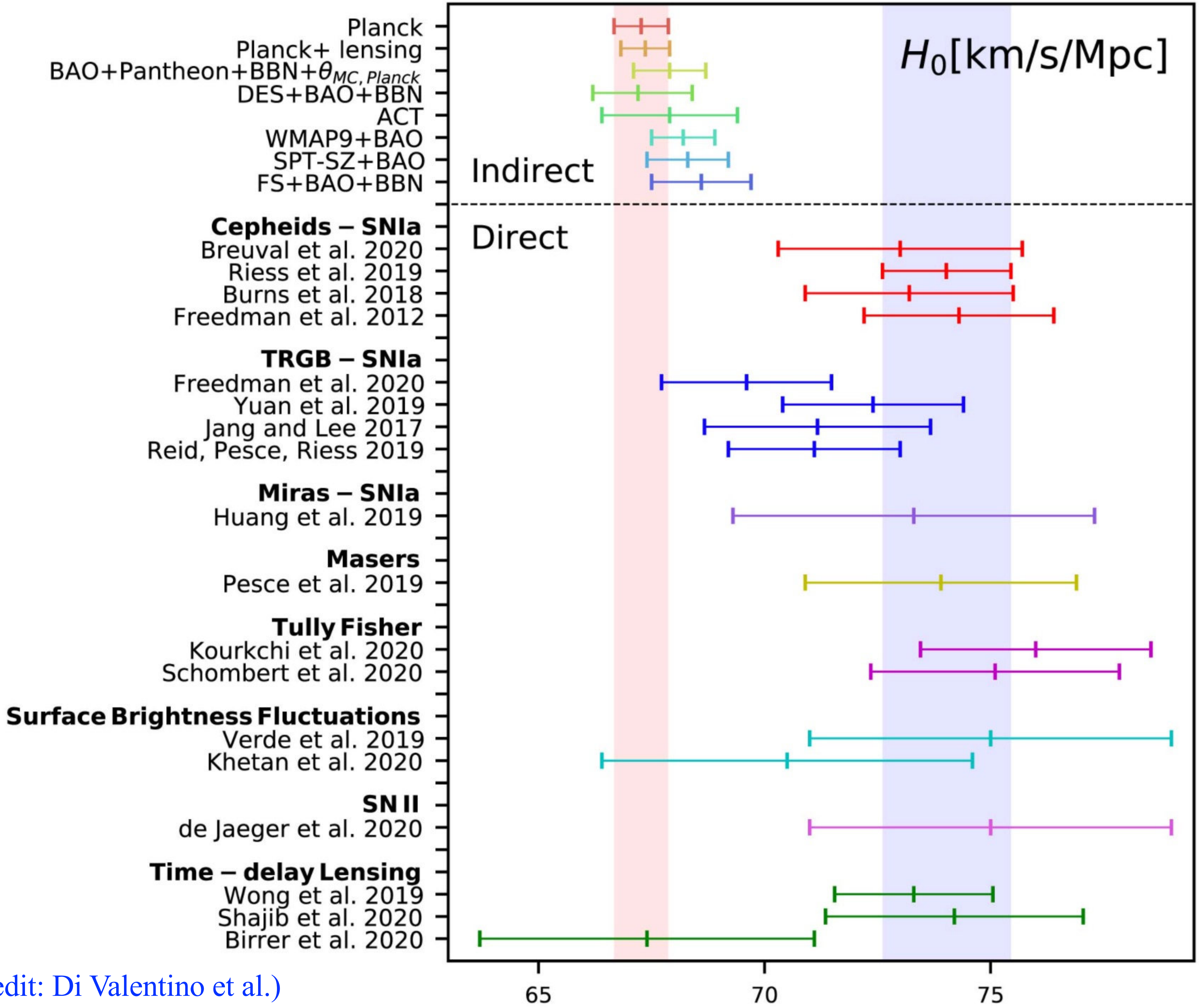
(internet)


Hubble Constant Over Time
H_0 [km s^{-1} Mpc^{-1}]
80
75
70
65
60
2000
2004
2008
2012
2016
2020
2024
Year of Publication
Cepheids
TRGB
CMB
Cepheids
CMB
TRGB


CMB and Independent Local H_0 values
Relative Probability Density
CMB
67.4±0.5
TRGB
(LMC)
69.8 ± 1.9
Cepheids
(N4258+MW)
73.9 ± 1.6
64
66
68
70
72
74
76
78
80
H_0



82.5
80.0
77.5
75.0
72.5
70.0
67.5
65.0
62.5
H_0 [km/s/Mpc]
2000
2005
2010
2015
2020
year
KP
W1
W3
W5
SH_0ES
CPH
W7
W9
P13
P15
BAO
SH_0ES
GW170817
HST+ GAIA2
P18
Forecast errors
HST+ GAIA
15 x BNS
P+S4
Dist. Ladder
ΛCDM
Std. Sirens



(Credit: Di Valentino et al.)

Late Route

a. Gravitational Lensing (H0LiCOW)

b. Surface Brightness Fluctuations in Galaxies

c. Masers

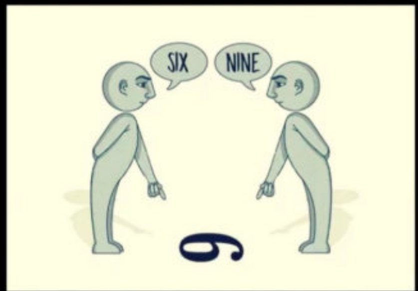
d. Mira variables

e. Tip of Red Giant Branch 1

f. Tip of Red Giant Branch 2

g. Cepheid variables

Cosmological "Rashomon"



哈勃常数危机？！

Early Route

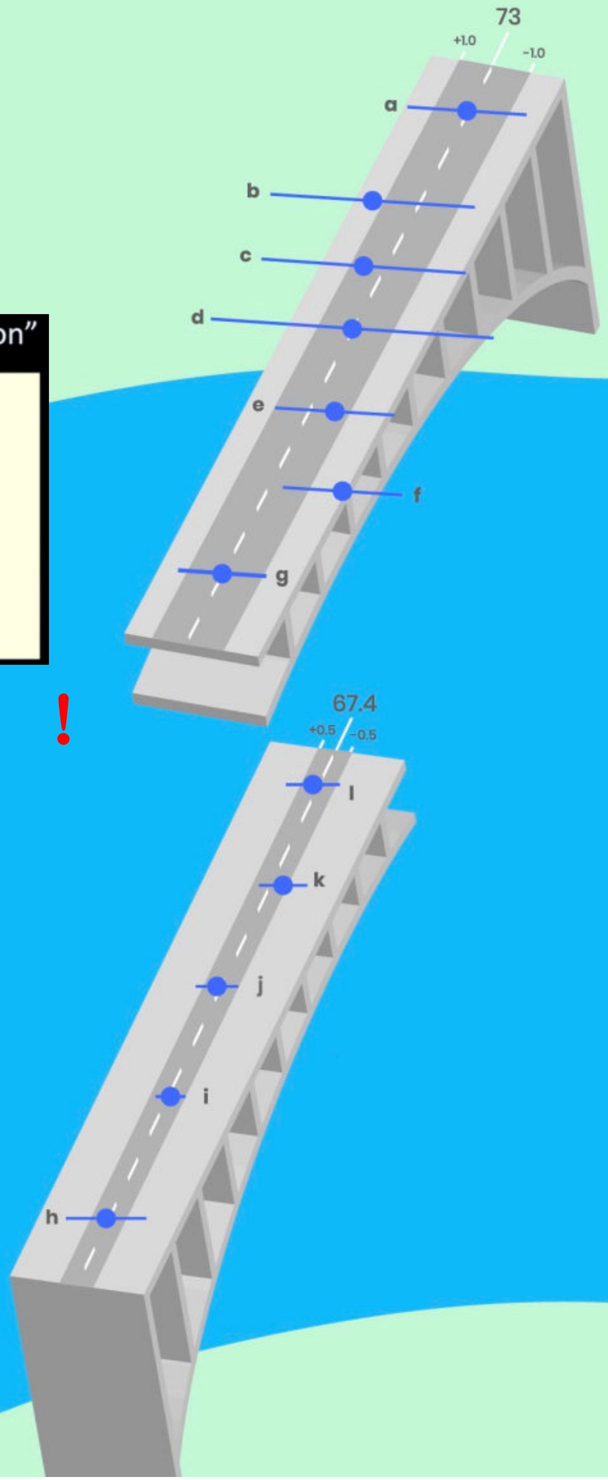
h. Baryon Acoustic Fluctuation + Big Bang nucleosynthesis

i. Cosmic Microwave Background (Planck)

j. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (CMB) + Baryon Acoustic Oscillations

k. Atacama Cosmology Telescope Polarimeter (CMB) + Baryon Acoustic Oscillations

l. South Pole Telescope Sunyaev-Zel'dovich effect survey (CMB) + Baryon Acoustic Oscillations



光干涉测量：宇宙学距离和大质量双黑洞

强引力透镜为解决哈勃常数测量矛盾带来的深刻见解

宇宙学红移

✓红移的定义：

（多普勒效应）

$$z = \frac{\lambda_{observed} - \lambda_{emitted}}{\lambda_{emitted}} \qquad z = \frac{f_{emitted} - f_{observed}}{f_{observed}}$$

$$1+z = \frac{\lambda_{observed}}{\lambda_{emitted}} \qquad 1+z = \frac{f_{emitted}}{f_{observed}}$$

✓宇宙学红移的解释：宇宙在膨胀，尺度在增加

$$1+z = \frac{a(t_{obs})}{a(t_{em})}$$

例：z=6.4 QSO，$a \sim a_{obs}/(1+6.4)$

✓退行速度（z比较小的时候）：$v = cz$

例：3c273@z=0.158，v~cz~47000km/s，$d \sim v/H_0 \sim$ 650Mpc，比仙女座星系远1000倍

稳恒态宇宙学模型

- 出发点：膨胀宇宙学模型中的年龄问题；不喜欢宇宙起源于某瞬时
- 1948：Herman Bondi, Thomas Gold, Fred Hoyle
- 完美的宇宙学原理：在任何时刻，在宇宙的任何位置，宇宙都是一样的，宇宙没有中心
- 宇宙在膨胀，星系在分离，新的物质（氢原子）不断在中间产生，最后形成新的星系，星系的密度不变
- 宇宙既没有开始，也没有结束

稳恒态还是大爆炸？

- ✓60年代，观测检验：比较不同红移处星系的密度
- ✓剑桥大学的Martin Ryle，发现过去射电星系的密度要高于现在射电星系的密度，不支持稳恒态模型
- ✓1963年，宇宙微波背景的发现，支持宇宙的大爆炸模型

大爆炸宇宙学

- 1940s Gamov和Alpher首先提出宇宙起源于约100-150亿年前一次猛烈的巨大爆炸
- 宇宙的爆炸是空间的膨胀，物质则随着空间膨胀（宇宙是无中心的）
- 随着宇宙膨胀和温度降低，构成物质的原初元素相继形成
- t~38万年，光子与电子退耦，那时，z~1100，T~3000K，目前：~3K温度的宇宙背景辐射（Gamov：~5k)

George Gamov

宇宙微波背景的发现
(138亿年前宇宙的化石)

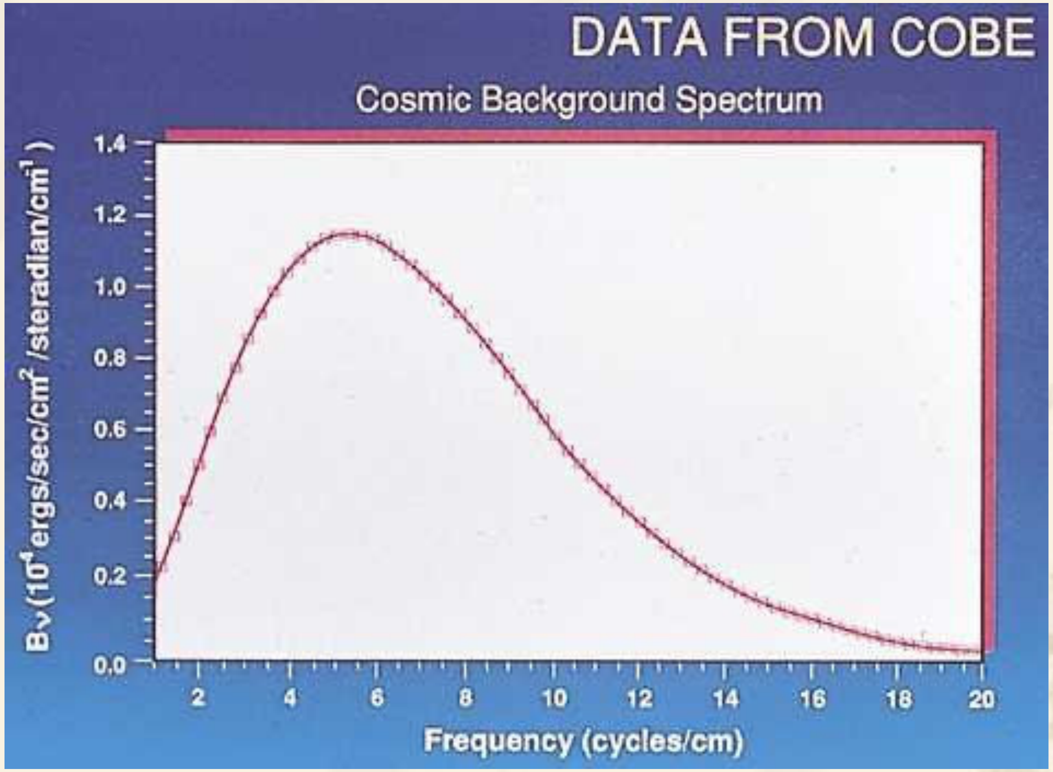
- R.H迪克60年代寻找5K CMB
- 1963年，彭齐亚斯、威尔逊探测到信号
- 1964年，排除噪声
- 1965年，确认为宇宙的背景辐射(～3.5+/-1.0K)
- 1978年获诺贝尔物理学奖

有心栽花花不开，无心插柳柳成荫

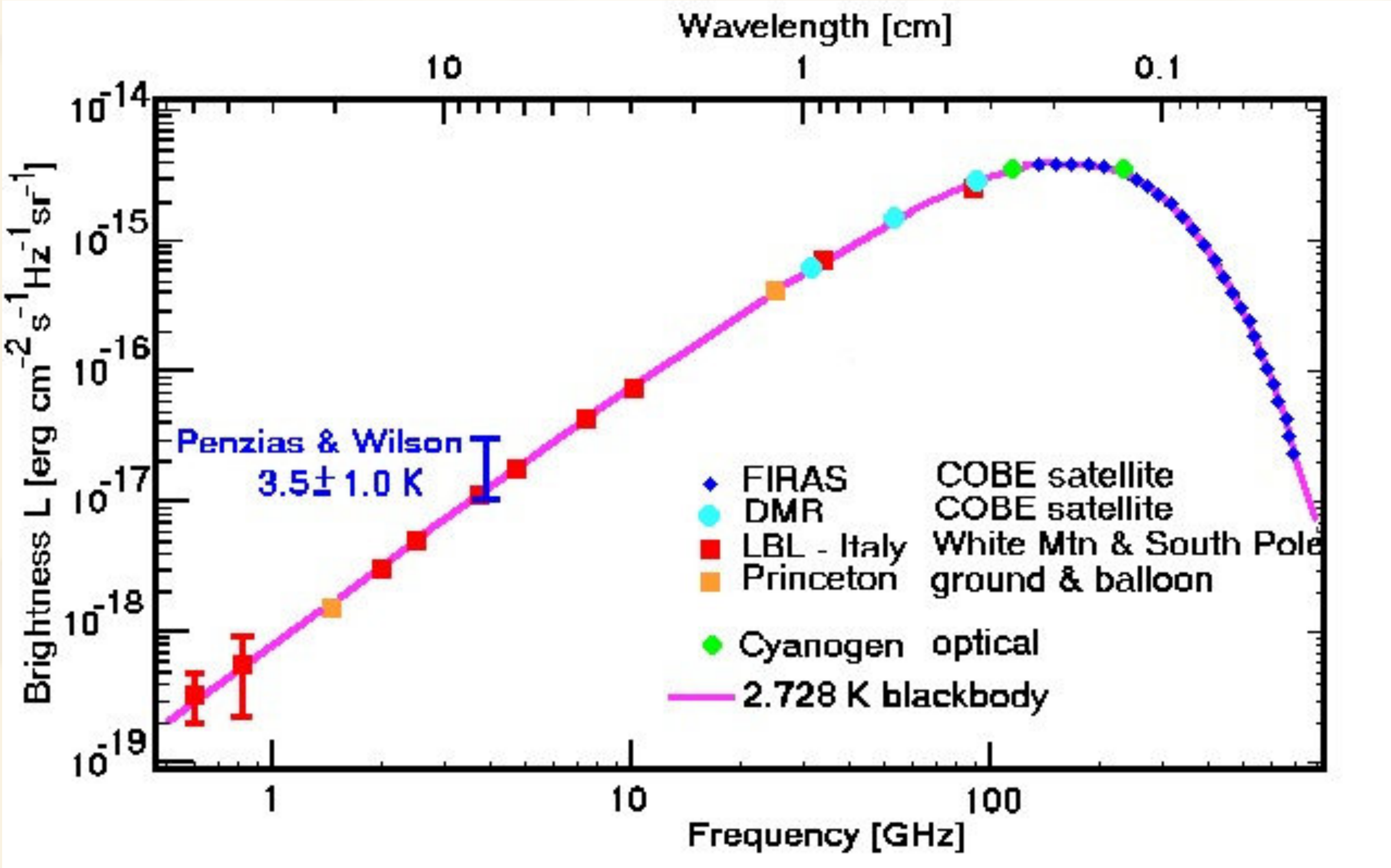
COBE卫星

- 1989年发射的宇宙背景探测仪（COBE）对0.5毫米-10厘米波段的宇宙背景辐射进行观测
  →高度各向同性
  →2.73 K黑体辐射

Cosmic Background Explorer



宇宙微波背景辐射的谱



Wavelength [cm]
10
1
0.1
10^{-14}
10^{-15}
10^{-16}
10^{-17}
10^{-18}
10^{-19}
Brightness L [erg cm^{-2} s^{-1} Hz^{-1} sr^{-1}]
Penzias & Wilson
3.5±1.0 K
FIRAS COBE satellite
DMR COBE satellite
LBL - Italy White Mtn & South Pole
Princeton ground & balloon
Cyanogen optical
2.728 K blackbody
1
10
100
Frequency [GHz]

暴涨（Inflation）

✓ 1970s，发现大爆炸宇宙学模型存在一些问题

1. 平坦性问题
2. 视界问题

图1 从左到右分别是阿兰·古斯（Alan Guth），安德烈·林德（Andrei Linde）和阿列克谢·斯塔罗宾斯基（Alexei Starobinsky）

✓ 暴涨模型（能量标量场主导）：Alan Guth 1979

1. 可见的宇宙起初的大小和质子差不多大
2. 10^{-35}秒之后，开始指数膨胀，10^{-32}秒时，宇宙尺度约为1米，增长了10^{26}倍（原初扰动→大尺度结构的种子）！
3. 暴涨之前，可见宇宙足够小，热平衡；暴涨使得空间“变平”（类比膨胀气球表面）、粒子视界指数膨胀

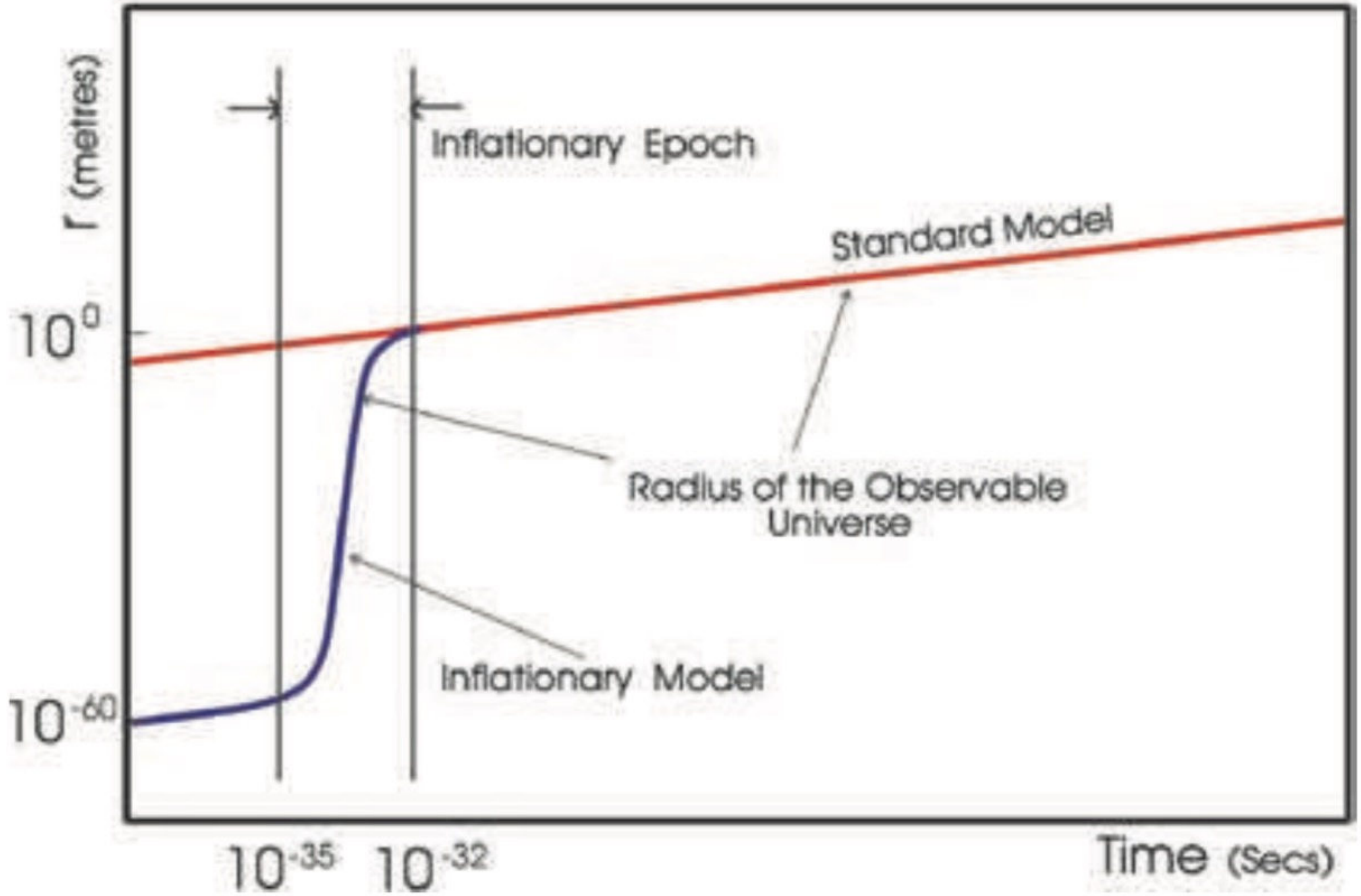


Figure 9.7 The inflationary epoch in the early universe.

大爆炸与原初轻元素的合成

- 暴涨是大统一破缺引起的宇宙真空态相变（假真空态→真真空态），释放大量能量，过程中能量密度基本不变，驱动宇宙尺度因子指数膨胀，再转化为基本等量的物质和反物质粒子

$$\boxed{\frac{n_B - \bar{n}_B}{n_B} \sim 10^{-9}}$$

- 随着宇宙的膨胀，正反物质湮灭：少量的重子物质（主要以夸克形式存在），处于高温辐射场中
- t～1s，夸克形成基本等量的质子和中子
- 自由中子不稳定，随着宇宙膨胀，中子数会少一些
- t～三分钟，质子和中子形成He核+剩余的质子+电子
- 原初核合成：质量丰度25%He+75%H（“原初”孤立小星系）

Nature封面：宇宙物质起源的证据找到了！12国团队耗时十年，中微子不对称揭示宇宙秘密

CP表示电荷共轭和宇称联合变换

关注前沿科技 量子位 4月16日 2020/04/16

人们已经找到了正物质最终如何击败反物质的原因之一。

来自日本、美国、俄罗斯等12国的**T2K团队**，经过**十年**的累计观察发现，是**中微子**打破了这种对称性，而宇宙终极的不对称性可能就藏在中微子的不对称中。

前苏联原子物理学家安德烈·萨哈罗夫（Andrei Sakharov）曾就宇宙物质起源问题提出过一种机制。

他猜想的原因之一，就是物质和反物质的对称性并不完美，分子表现出的特性略有不同。这种差异可能导致宇宙大爆炸后的冷却过程中，物质过剩。如果宇宙后来的正反物质不一样多，就需要满足“萨哈罗夫条件”，其中的重要一条就是CP对称性的破坏。

CP对称性的意思是，把一个粒子的电荷换成与之相反的电荷，同时把粒子的**自旋**（自转方向）翻转过来，物理定律应该保持不变。

如果正反物质不一样多，必须在宇宙诞生初期CP对称性被破坏。

其实1960年代以来，物理学家已经发现了CP对称性破坏，但多是其他一些较少见的粒子。

科学家们期望着有更大的CP不对称被发现，直到最新中微子实验结果的发表。

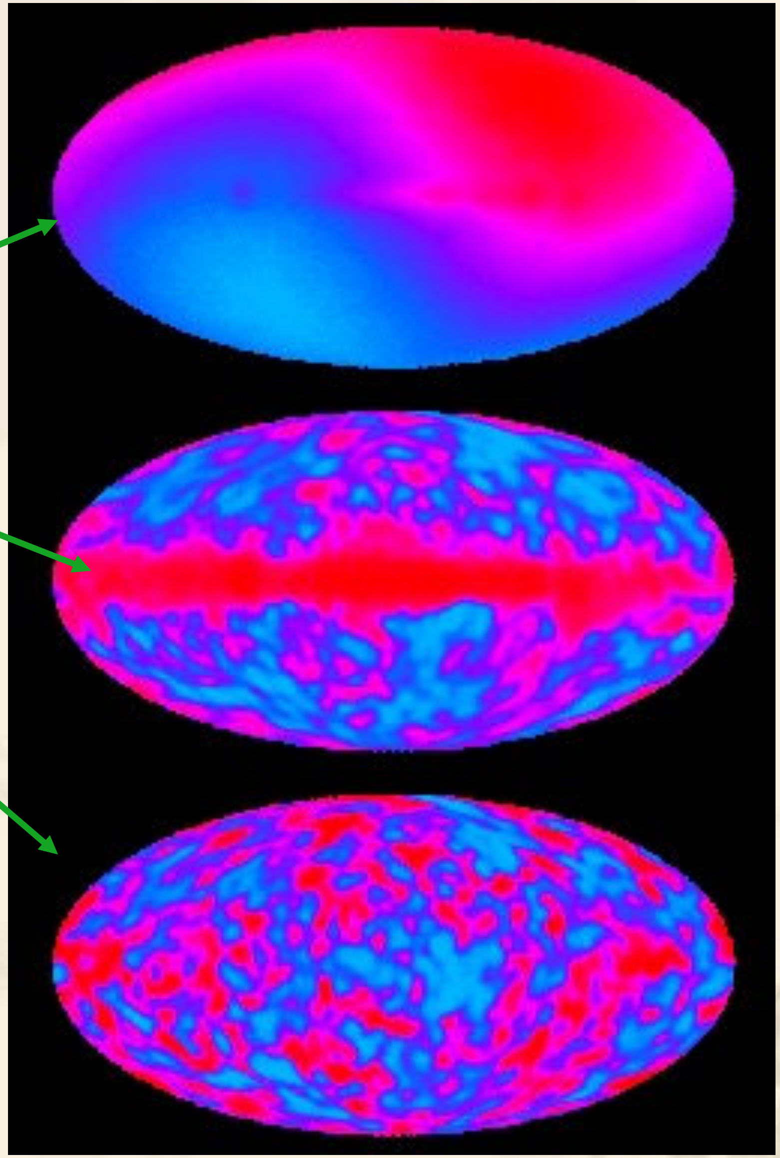
而来自T2K合作组织的这项最新研究成果，在极大程度上满足了这一假设条件。

这是人类首次捕捉到中微子中的CP破坏现象。在中微子中发现CP对称性破坏，暗示着更大的不对称性正在早期的宇宙中发挥作用。但中微子本身还是太渺小了，无法完成这项工作。

但是三种“味道”的中微子都可能与一种叫做“惰性中微子”的暗物质联系在一起，它们之间的相互作用会打破宇宙的平衡。

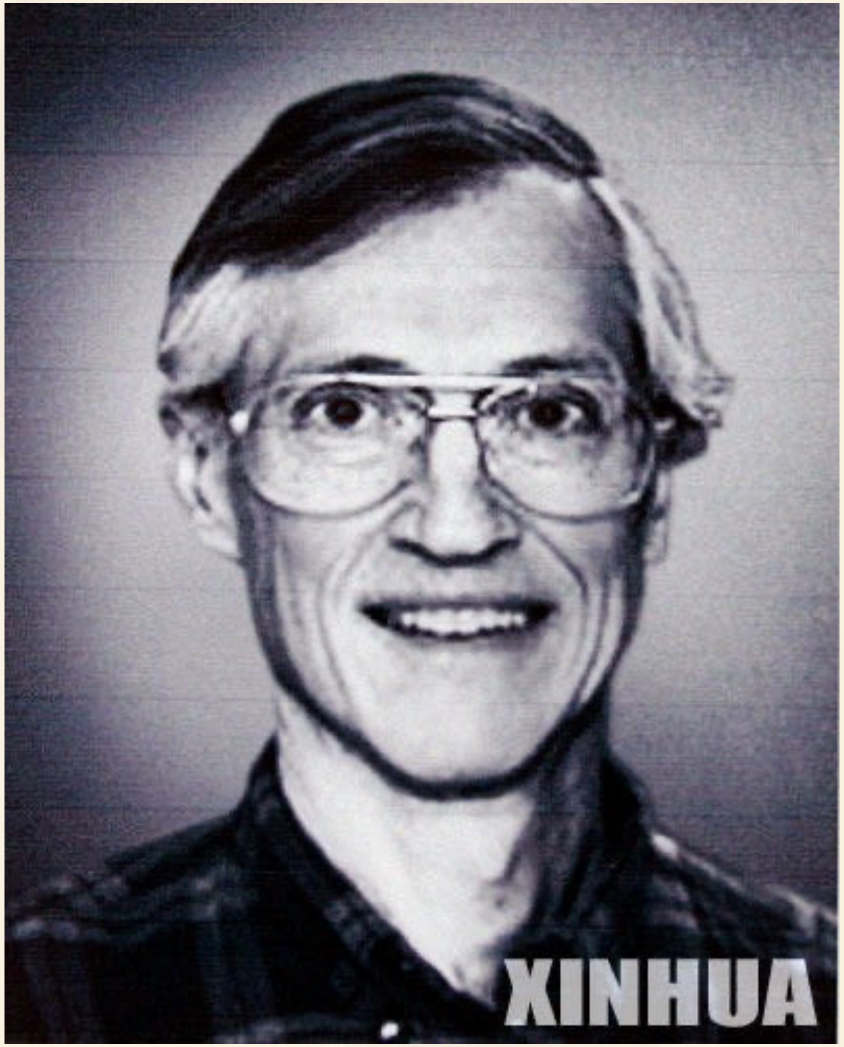
微波背景辐射的各向异性

- 扣除微波背景辐射的偶极不对称和银河系尘埃辐射的影响后，微波背景辐射表现出大小为十万分之几的温度变化：~6x10^{-5}k。
- 这种细微的温度变化表明宇宙演化早期存在微小的不均匀性，正是这种不均匀性导致了星系的形成。



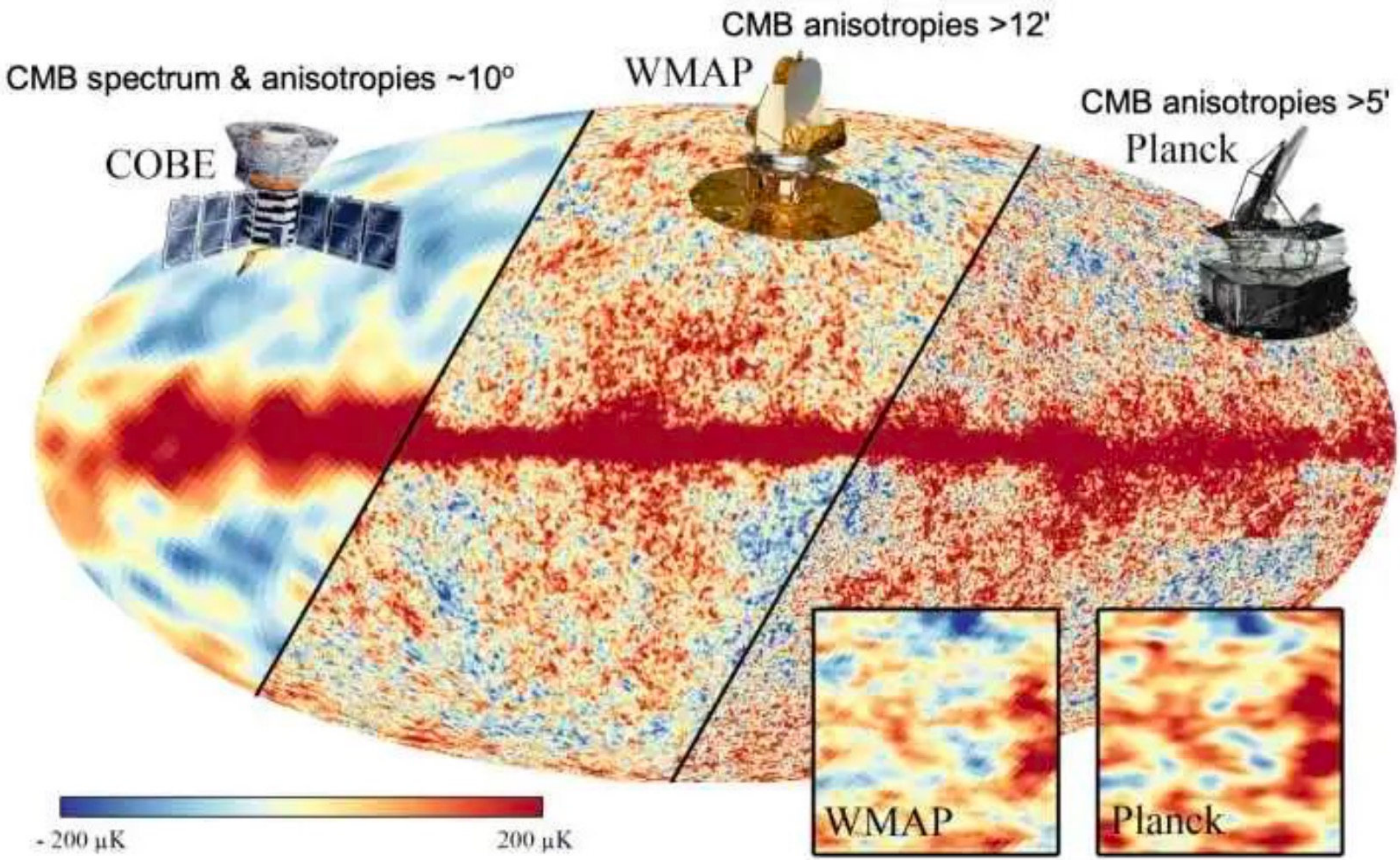
ΔT~6x10^{-5}K

2006诺贝尔物理学奖：　约翰·马瑟和乔治·斯穆特　宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性



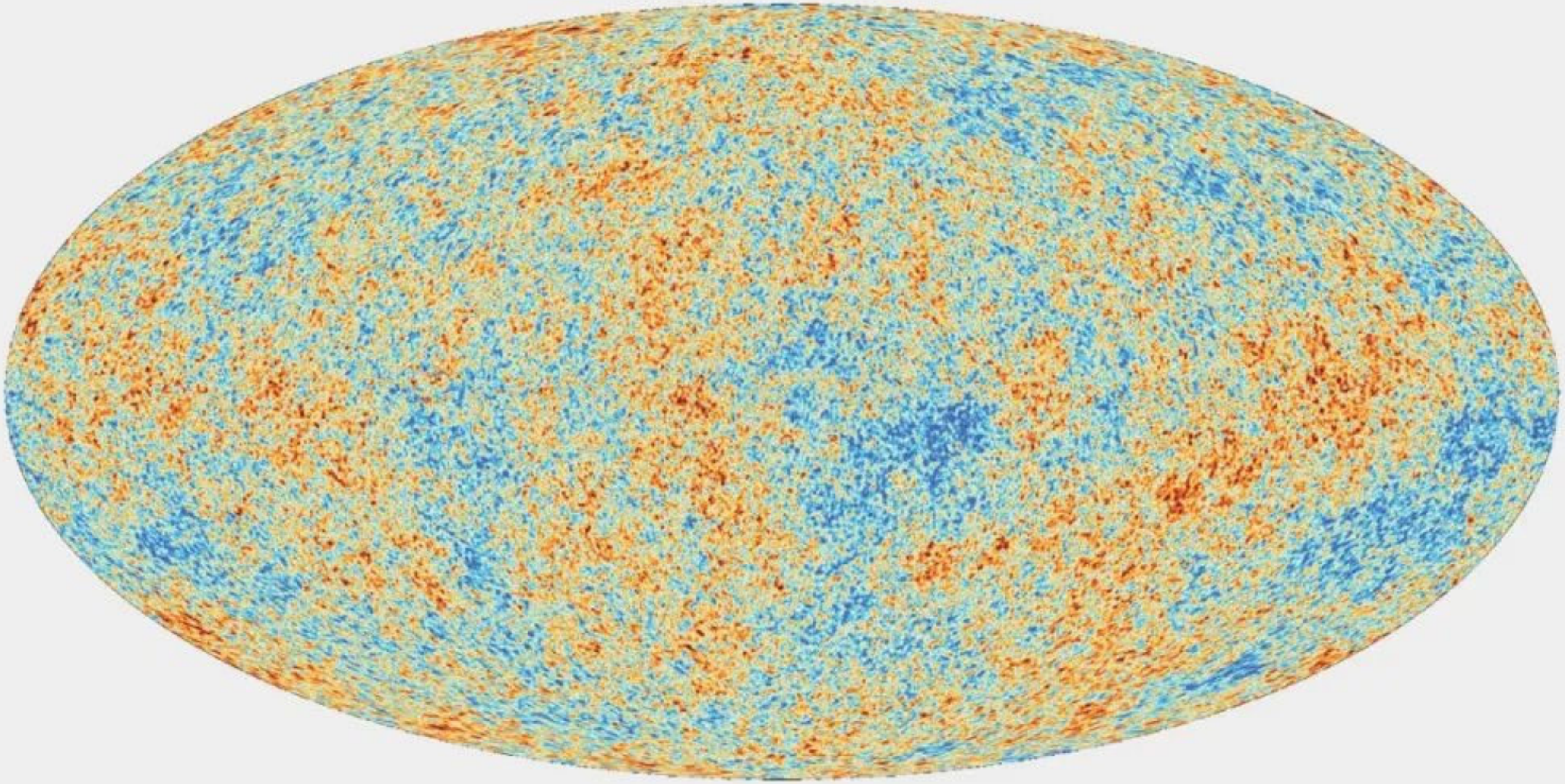
约翰·马瑟

乔治·斯穆特



COBE卫星第一次测量出CMB各向异性，此后WMAP、Planck卫星又进行了更精细的测量

(Nabila Aghanim)



利用空间超导边缘相变探测器探索宇宙

将微波背景辐射实验作为广域天体物理巡天

- ✓ t~38万年，光子能量足以电离原子，等离子态
  1. 辐射场与物质处于热平衡，辐射场为黑体谱
  2. 等离子体非常均匀，因为光子“搅拌”
- ✓ 冷却，氢原子形成，光子退耦。开始时物质均匀分布，均匀物质在引力的作用下开始成团，形成恒星和星系（6E-5→需要t~80-100亿年）。但实际上，星系在t~4亿年的时候（甚至更早时）已经存在！
- ✓ 暗物质—非重子物质，与辐射场无相互作用，大爆炸之后就开始在引力的作用下成团，重子物质和辐射场退耦之后，重子物质开始在暗物质的引力势阱中快速成团，形成星系

CMB的不均匀性—暗物质的影响

- ✓ Sachs-Wolfe效应(1967)：CMB光子在暗物质引力势阱中的引力红移效应
- ✓ 对应毫米波观测，受水蒸汽吸收影响。卫星：COBE、WMAP、Planck；气球观测：Boomerang和Maxima；高海拔的沙漠：CBI和VAS；南极：DASI、SPT

Figure 9.9 The cosmic background imager in the Atacama Desert, Chile. Image: CBI/Caltech/NSF.

观测CMB可以给出宇宙曲率的信息

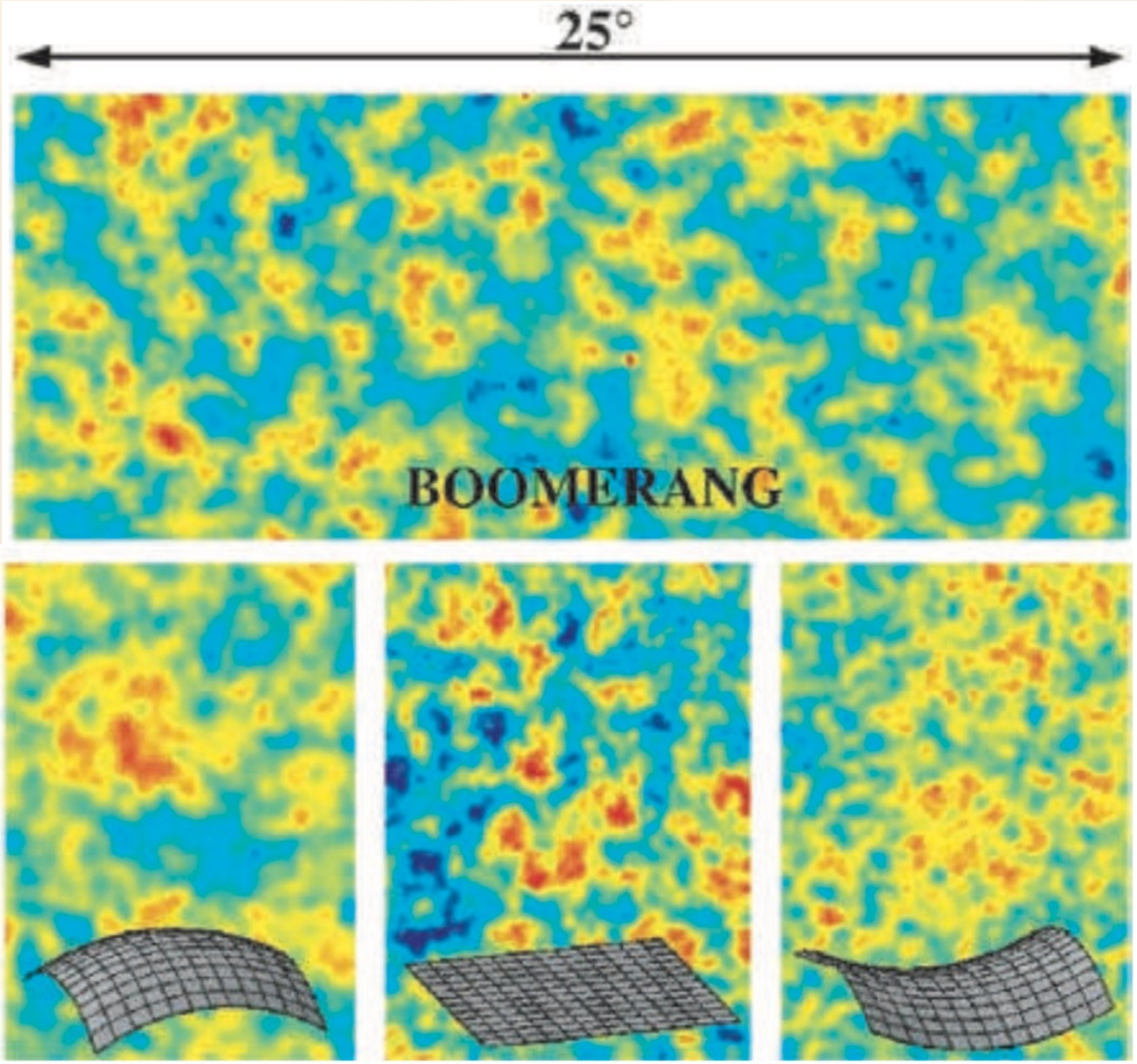


Figure 9.10 Boomerang observed fluctuations in the CMB that are consistent with space being 'flat'. –(Above) Boomerang map. (Below) What would be observed with positively curved, flat and negatively curved space. Image: The international BOOMERANG consortium.

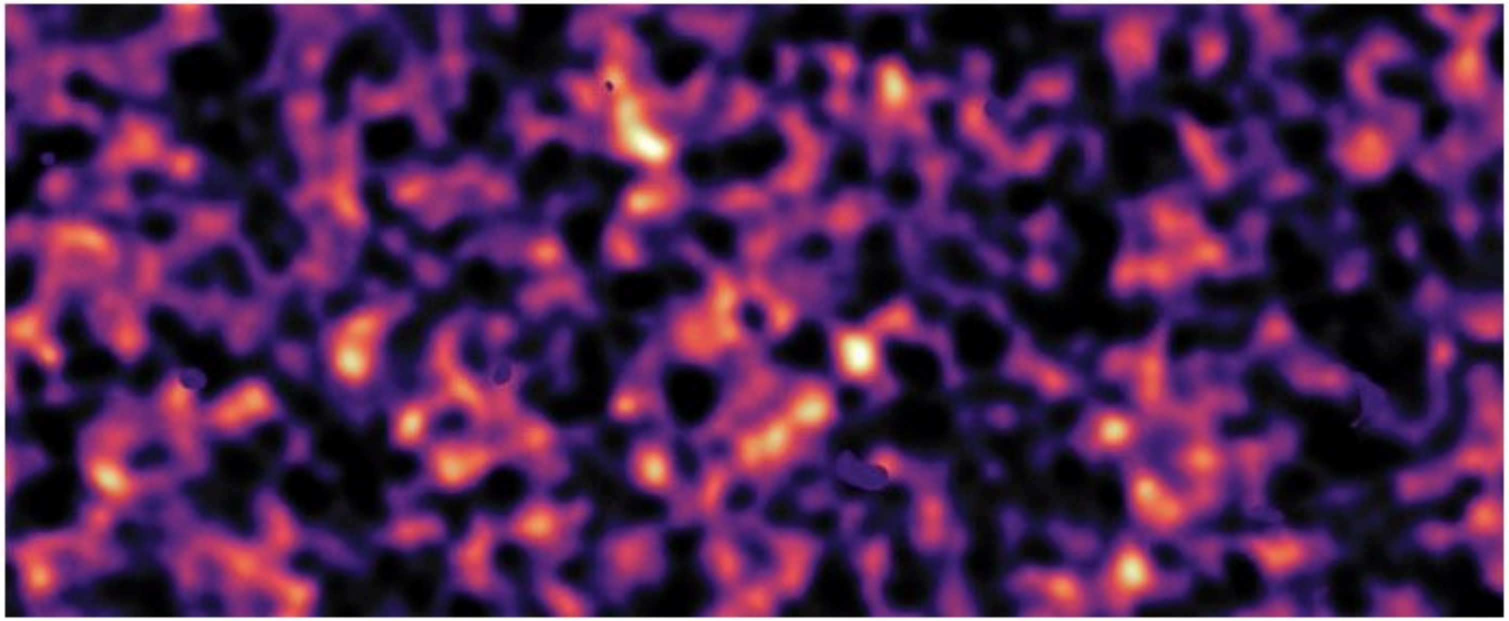
European
Southern
Observatory

eso1642 — Science Release

Dark Matter May be Smoother than Expected

Careful study of large area of sky imaged by VST reveals intriguing result

7 December 2016

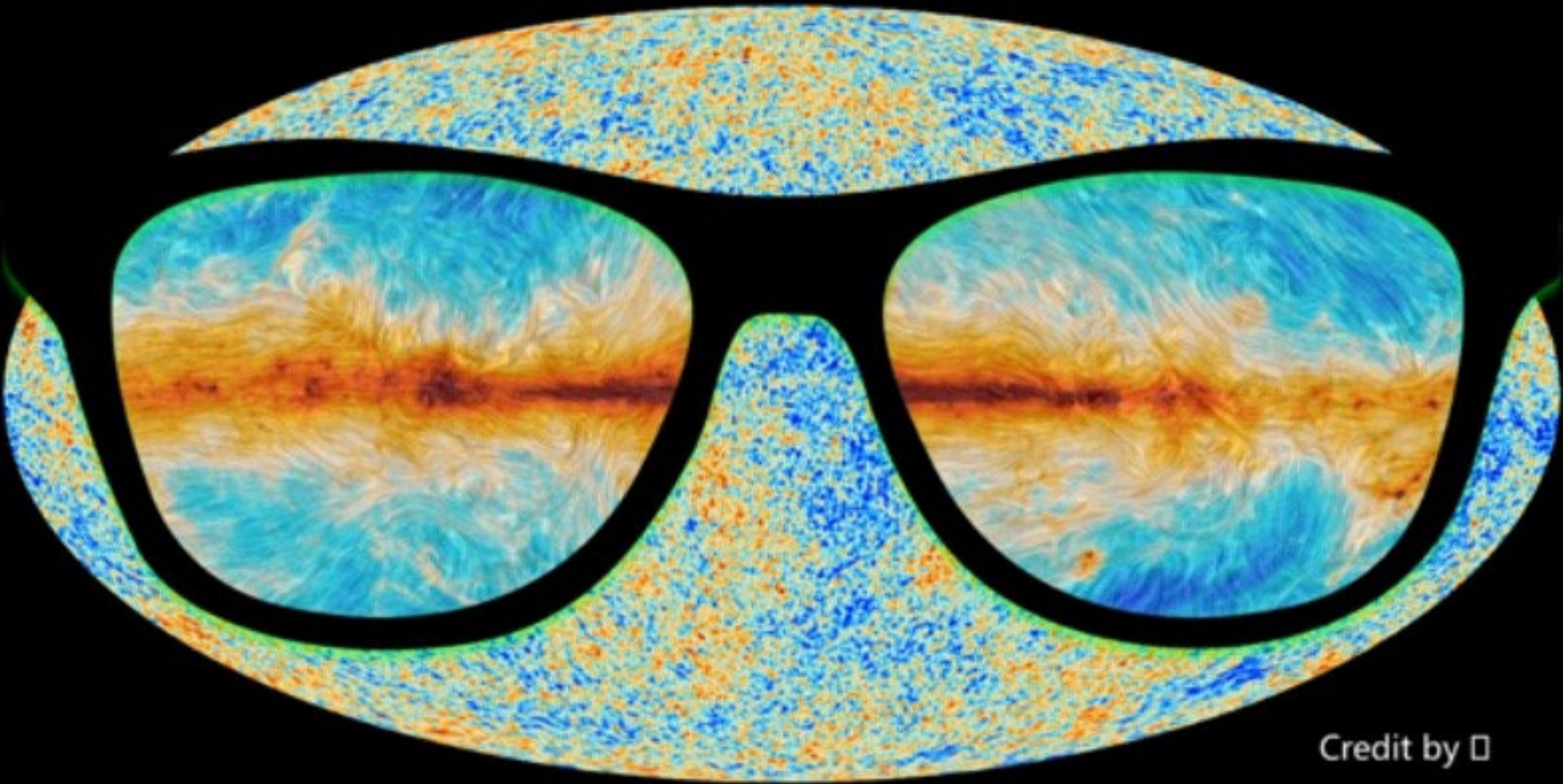


Analysis of a giant new galaxy survey, made with ESO's VLT Survey Telescope in Chile, suggests that dark matter may be less dense and more smoothly distributed throughout space than previously thought. An international team used data from the Kilo Degree Survey (KiDS) to study how the light from about 15 million distant galaxies was affected by the gravitational influence of matter on the largest scales in the Universe. The results appear to be in disagreement with earlier results from the Planck satellite.

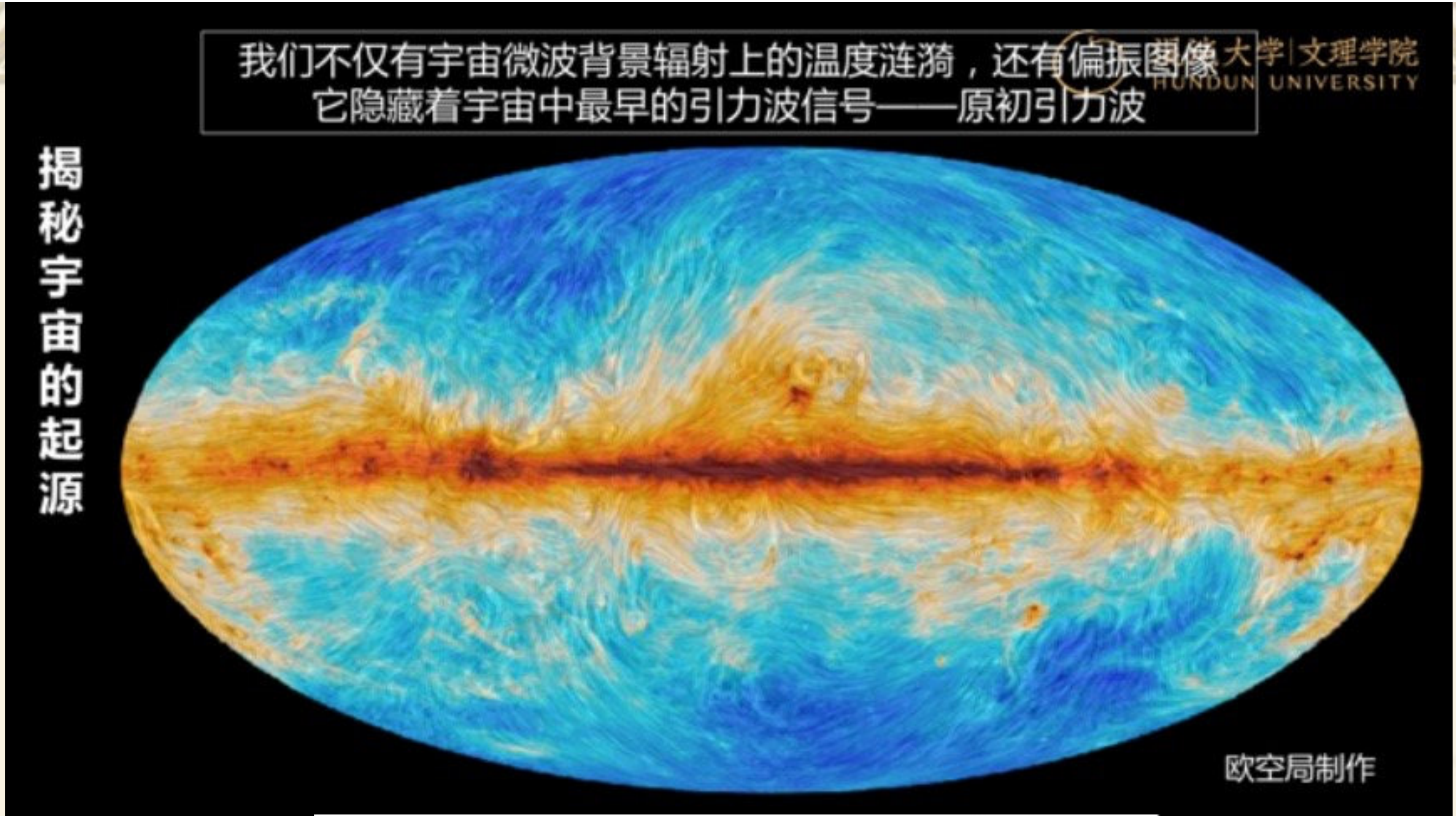
Hendrik Hildebrandt from the Argelander-Institut für Astronomie in Bonn, Germany and Massimo Viola from the Leiden Observatory in the Netherlands led a team of astronomers [1] from institutions around the world who processed images from the Kilo Degree Survey (KiDS), which was made with ESO's VLT Survey Telescope (VST) in Chile. For their analysis, they used images from the survey that covered five patches of the sky covering a total area of around 2200 times the size of the full Moon [2], and containing around 15 million galaxies.

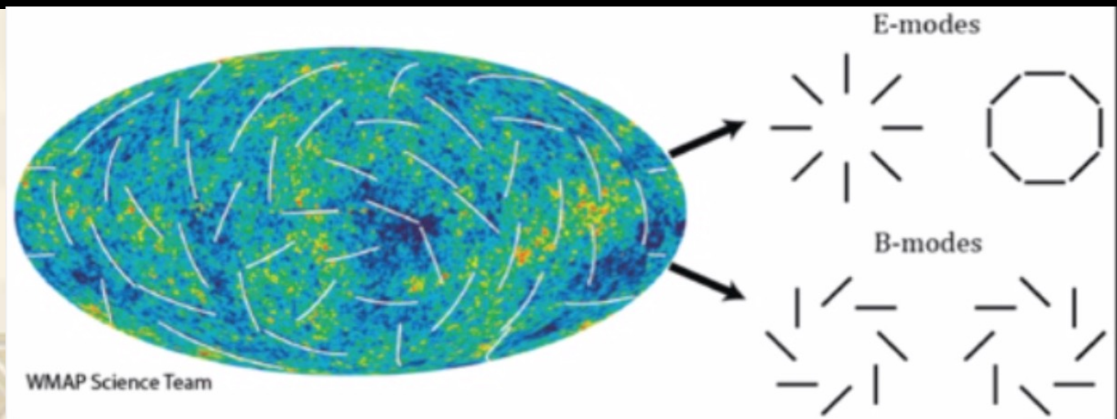
我们不仅有宇宙微波背景辐射上的温度涟漪，还有偏振图像

揭秘宇宙的起源



Credit by □

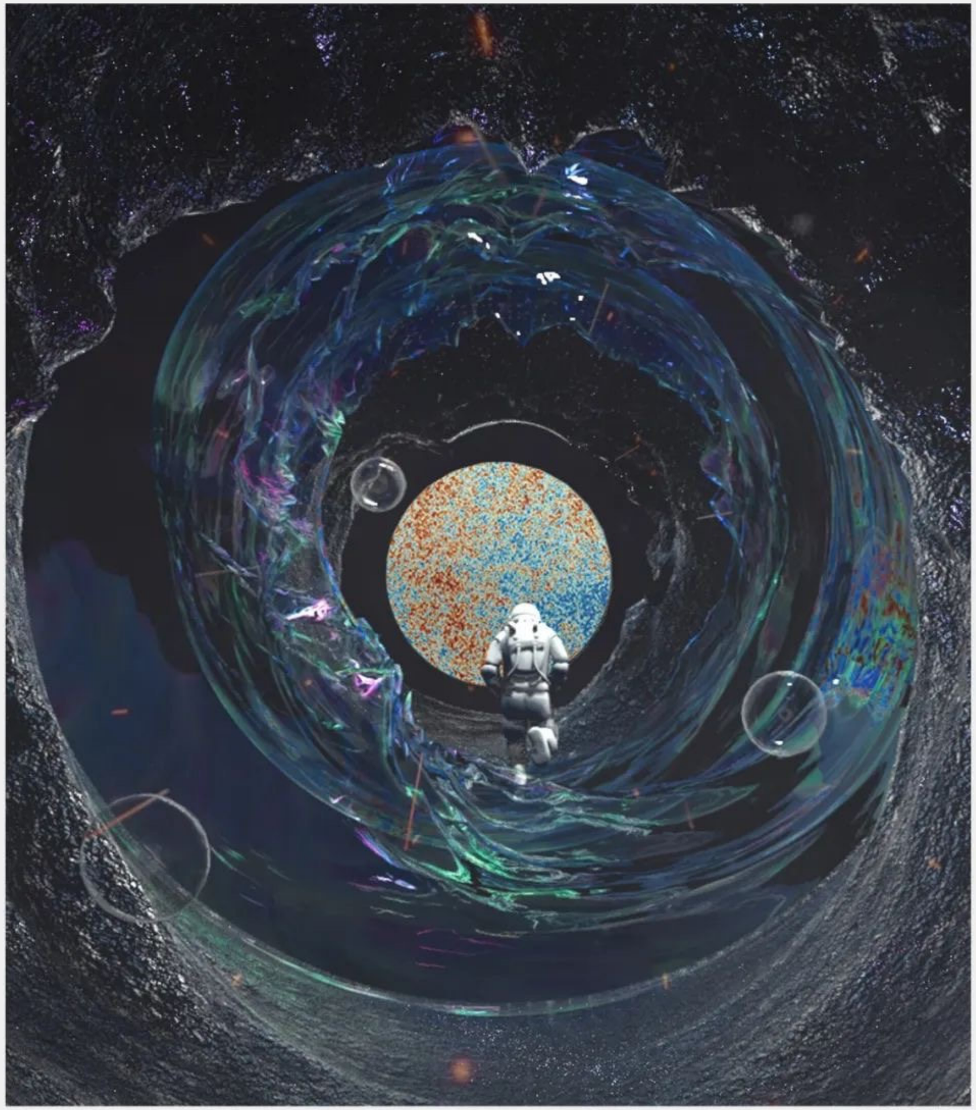

我们不仅有宇宙微波背景辐射上的温度涟漪，还有偏振图像
它隐藏着宇宙中最早的引力波信号——原初引力波
揭秘宇宙的起源
欧空局制作


E-modes
B-modes
WMAP Science Team

原初引力波 偏振的星空

混沌大学|文理学院
HUNDUN UNIVERSITY

Credit by
Medium.com



新原理研究所

NEW PRINCIPIA INSTITUTE

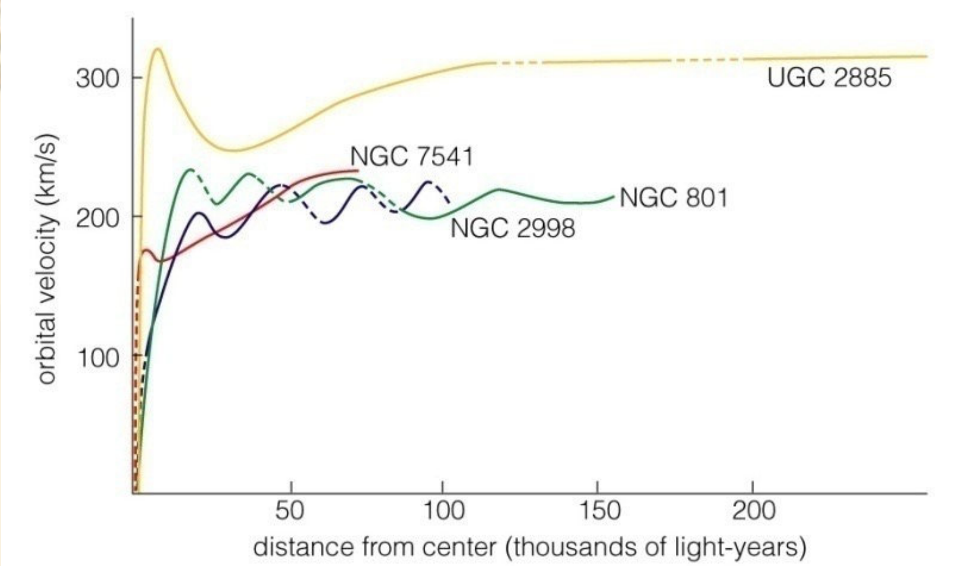
暗物质

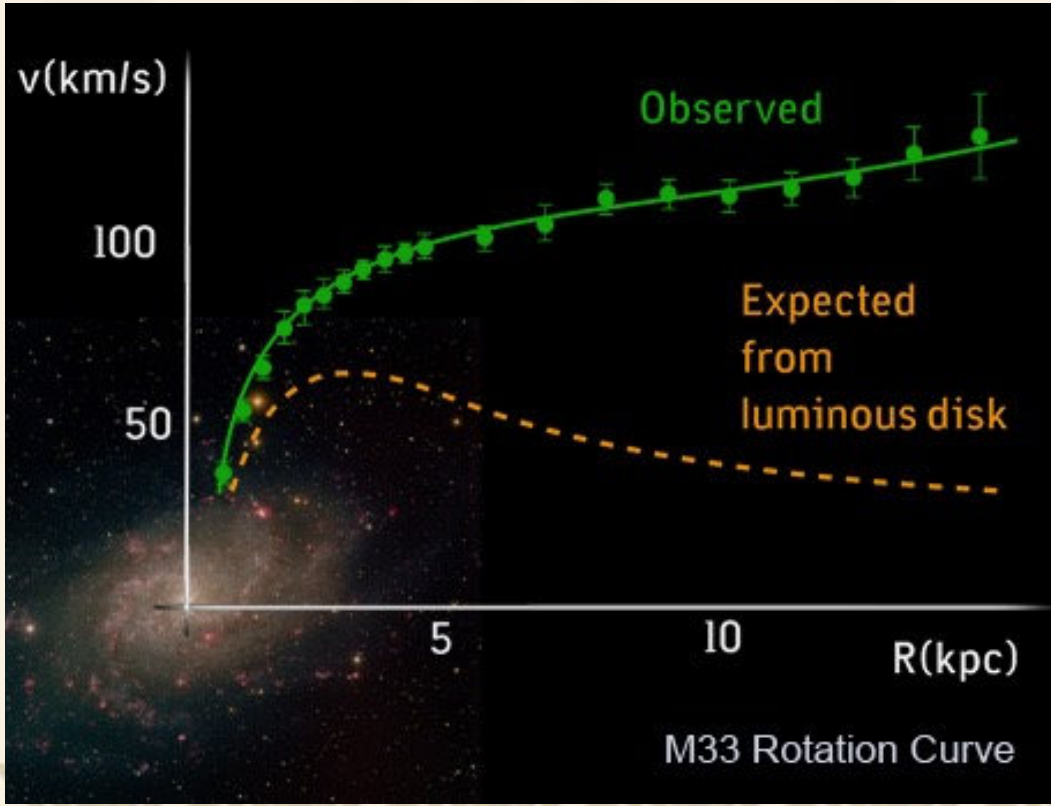
- 暴涨和CMB观测给出宇宙是平坦的，如果精确测量H_0，就可以给出可见宇宙的平均密度和总质量
- 宇宙中总的发光物质只占总质量的～1%!99%看不见！
- Massive Astronomical Compact Halo Objects（不发光的重子物质褐矮星、中子星、黑洞等?）？
- 重子物质只占：~4%

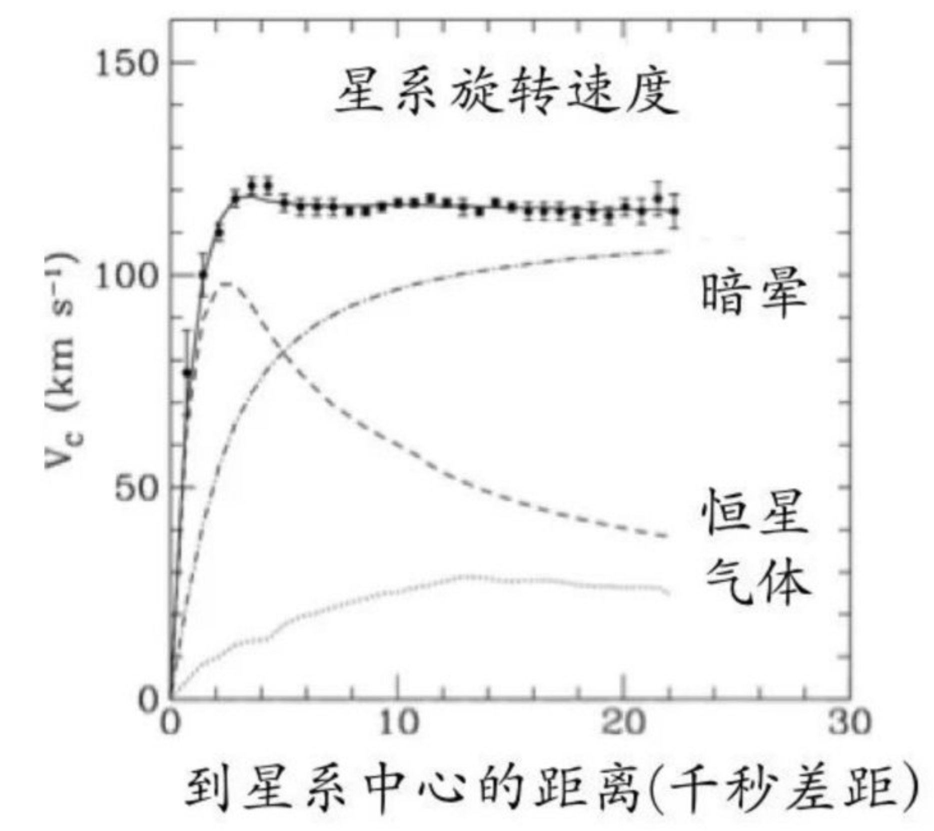
1. 大爆炸产生的轻元素（氢、氦、锂及其同位素）的相对丰度依赖于重子/光子比，给出～4%上限
2. 如果有大量MACHOs，会产生微引力透镜，最终被观测到（但是没有）；无法解释missing matter。

暗物质的证据

✓漩涡星系的旋转曲线

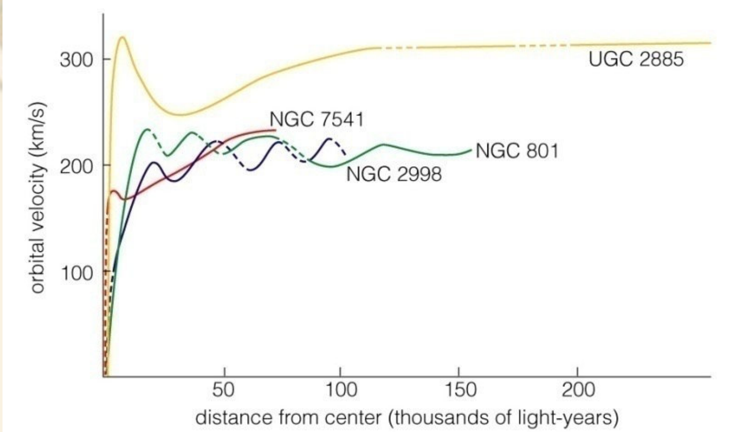






暗物质的证据

✓漩涡星系的旋转曲线



✓星系团的动力学（Zwicky 1930s，Coma）

✓星系中的热气体俘获：椭圆星系NGC4555中的总质量10倍于恒星的质量，300倍于气体云的总质量

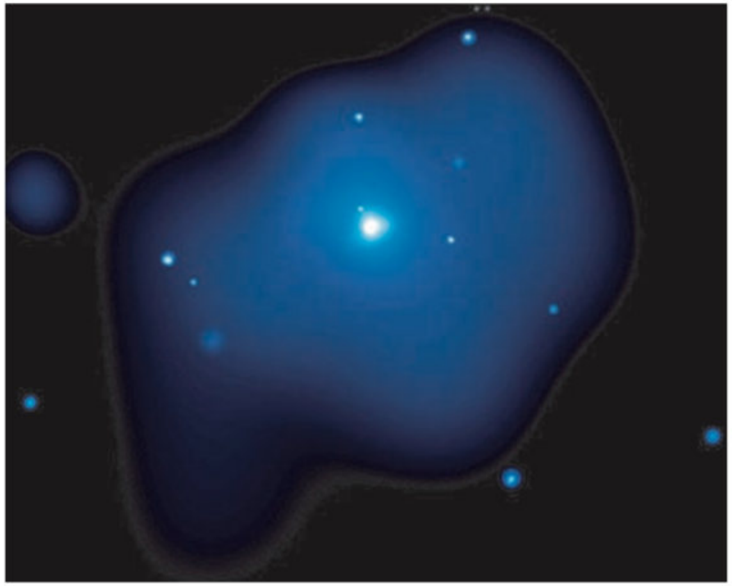


Figure 9.11 NASA'a Chandra X-ray satellite image of hot gas surrounding the galaxy NGC 4555. Image: NASA/CXC/E.O'Sullivan et al.

✓引力透镜

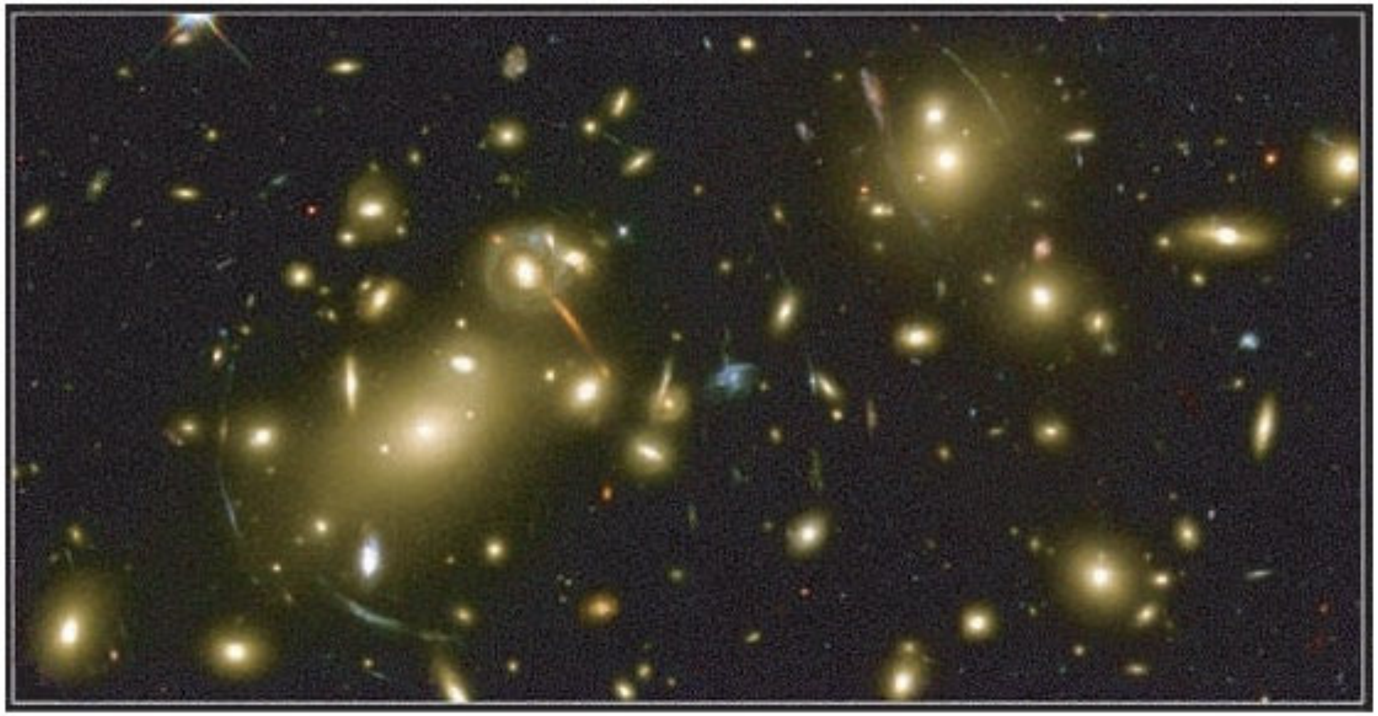
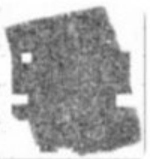


Figure 9.12 The Abell 2218 cluster imaged by the Hubble Space Telescope. Image: NASA, A. Fruchter and the ERO team, STScI.

✓暗物质的比例：最直接的方法为分析CMB fluctuations，~23%；剩下的～73%是什么？

CFHT U band image



程诚

终于看到了这个引力透镜星系对应的石像#眉间放一字宽，看一段世间风光，谁不是把悲喜在尝#

red: two clouds of hot x-ray emitting gas, whose mass >> total mass of individual galaxies based on optical data
blue: DM, whose mass > optical+X-ray mass

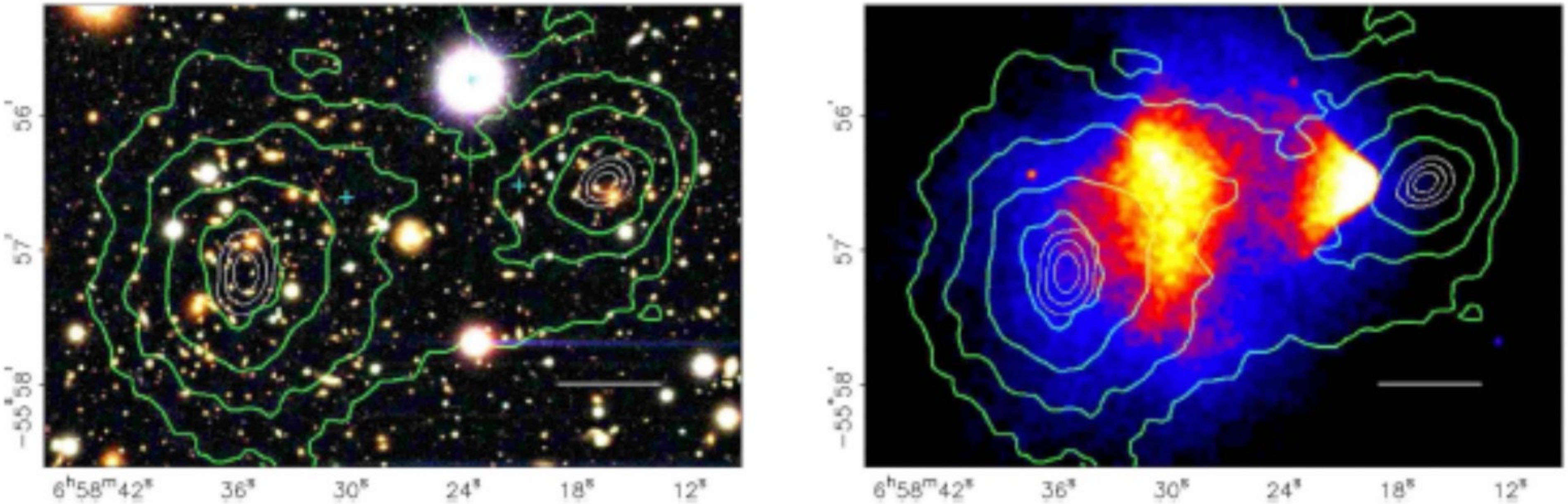


图7：子弹头星系团(bullet cluster)(1E0657-56)：左图为光学图象，右图为X-射线图象。曲线表示根据引力透镜效应测出的投影密度分布。

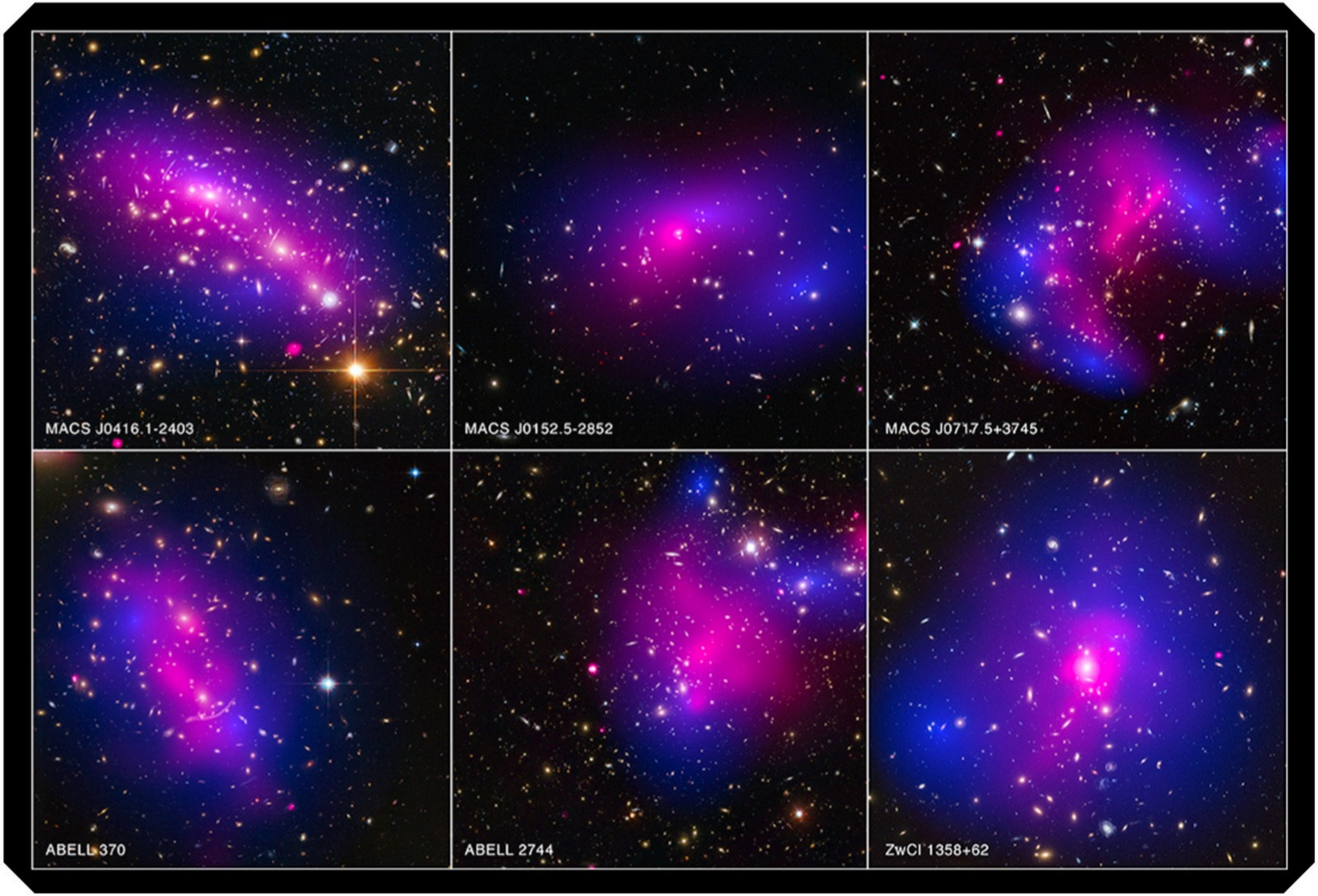


Fig. 2.4—1. Dark Matter in Merging Clusters. *Superposed images of galaxies (yellow / multicolor, from ground-based observatories), X-ray gas (magenta, from the Chandra X-ray Observatory), and dark matter (blue, from Hubble Space Telescope weak lensing observations) associated with six actively merging galaxy clusters. These coordinated observations by two Great Observatories have set world-leading constraints on dark matter self-interactions (Harvey et al. 2016). Image from Chandra X-ray Center.*

中德等国科学家耗时5年成功“绘制”暗晕内部结构清晰图

邱晨辉/中国青年报

神秘的暗物质晕究竟长啥样？科学家有了最新发现。

来自中国科学院国家天文台的研究员王杰领衔的国际研究团队，利用中国和欧洲的超级计算机，采用一项全新的多重放大模拟技术，在当前标准宇宙学模型下，首次获得了宇宙中全尺度暗物质晕（以下称暗晕）内部结构的清晰图像。

这一重要发现，已于北京时间2020年9月3日凌晨由国际顶级学术期刊《自然》发表。

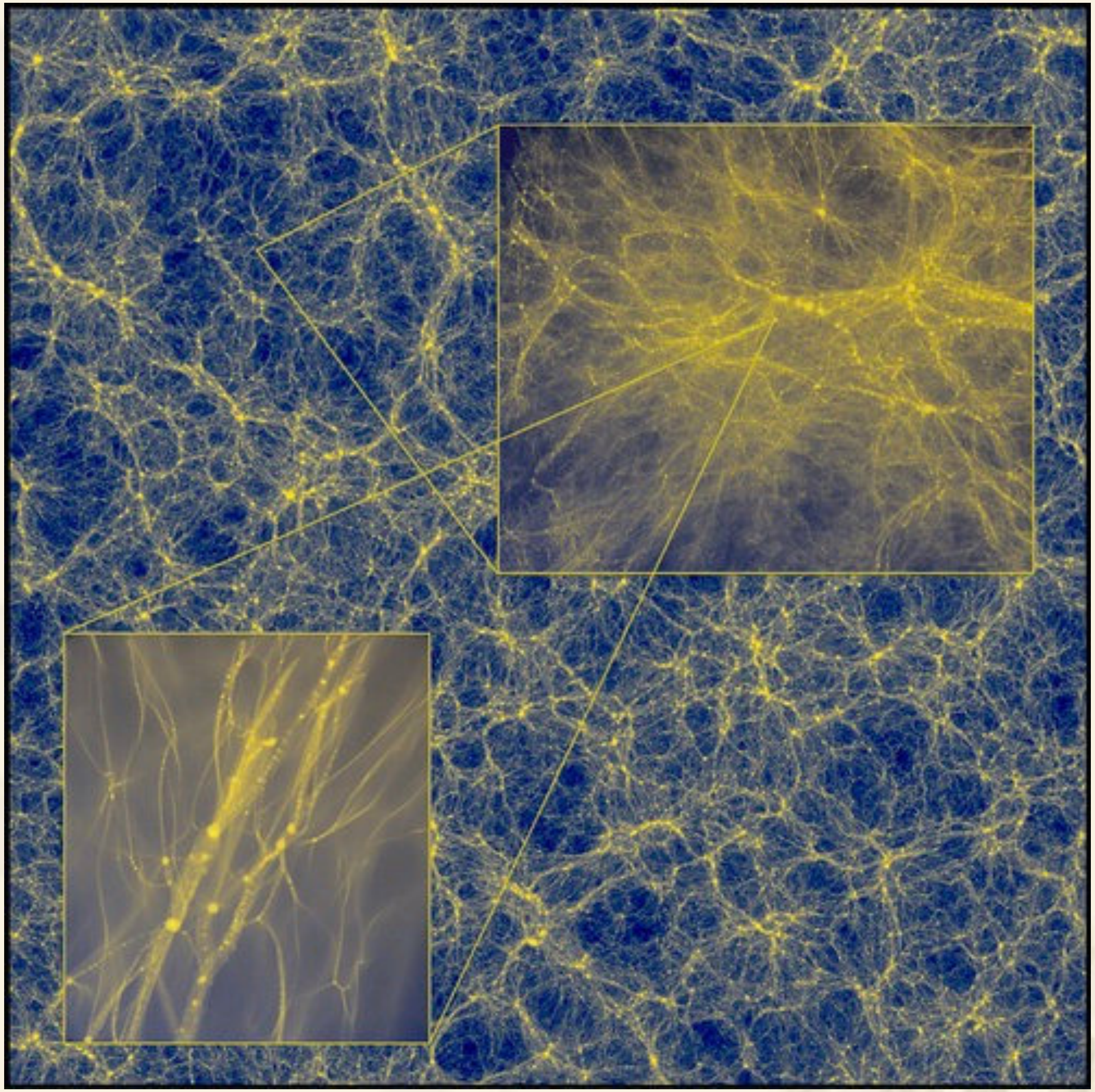
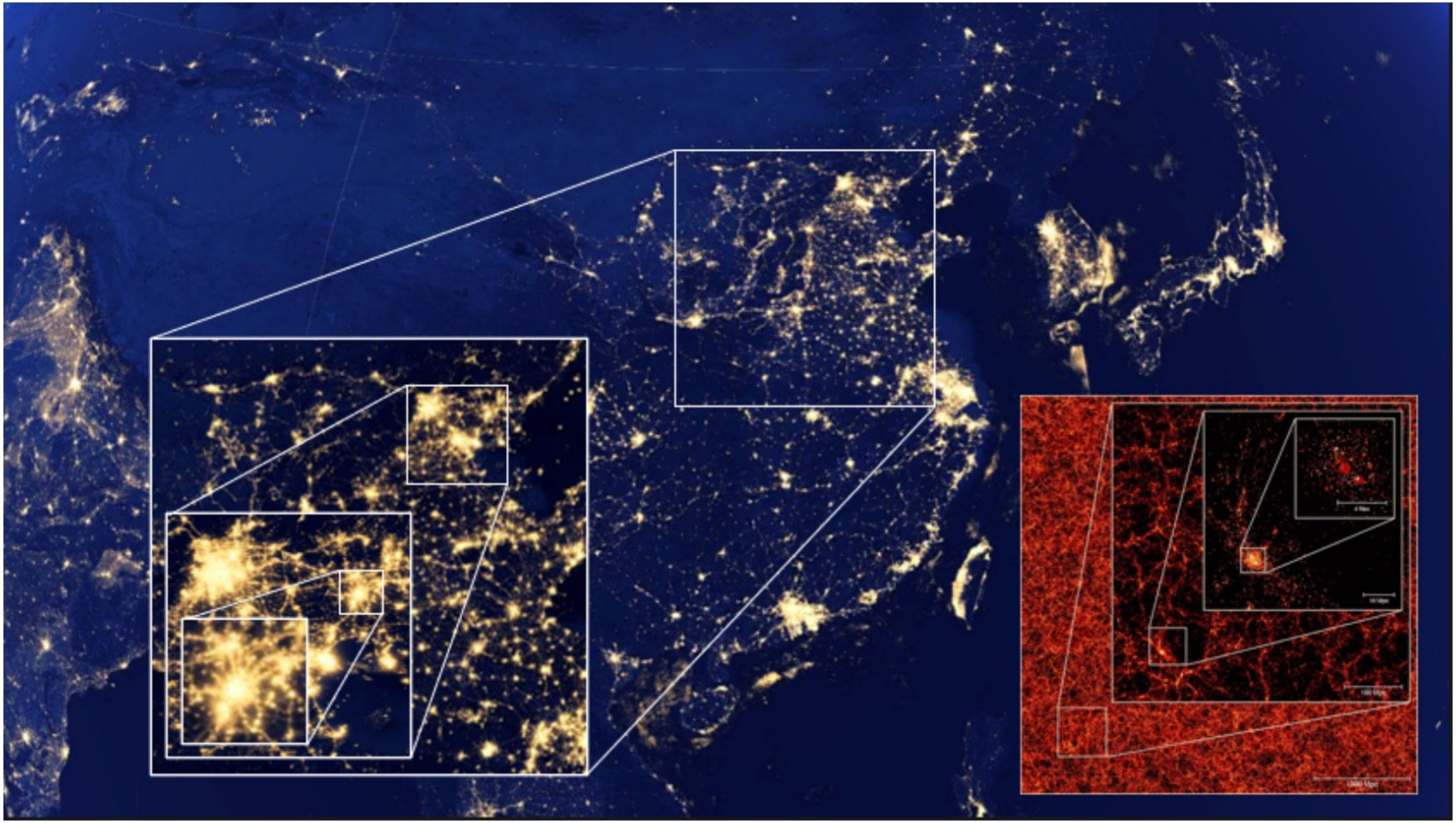


Fig. 2: Simulations of formation of dark matter haloes ranging in size from Earth mass to clusters of galaxies find a universal halo density structure spanning 20 orders of magnitude in mass (Credit: Sownak BOSE, Center for Astrophysics, Harvard University)



城市灯光 | NASA/Max Planck Institute

图9. NGC-1052-DF2 (https://hubblesite.org/contents/media/images/2018/16/4139-Image.html?news=true)

暗物质缺失的矮星系

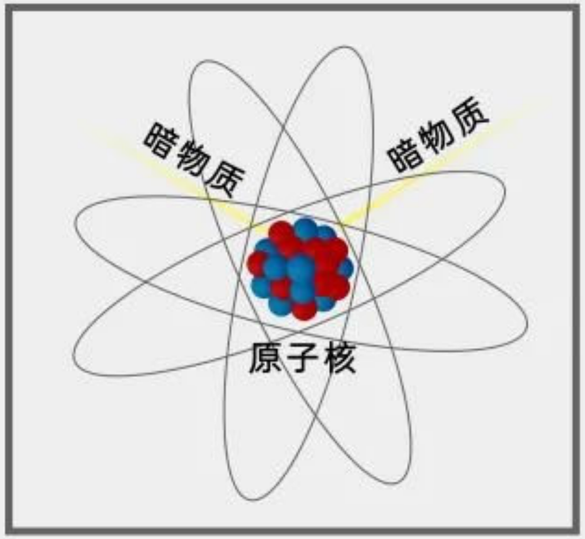
基于大规模星系巡天刻画暗物质分布天图

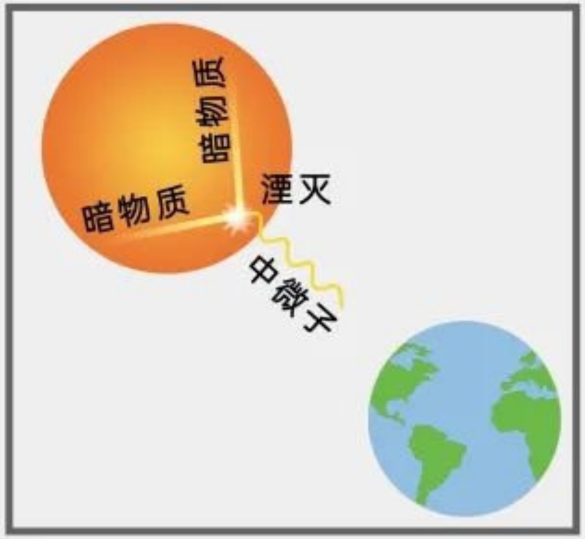
2016年，耶鲁大学的Van Dokkum等人发现了一些面积不小但面亮度却很低的星系，他们称之为超暗星系（ultra faint galaxy）。在测量了这些星系的质量后发现，NGC1052-DF2 和NGC1052-DF4 这两个星系很奇特——它们的质量几乎等于其中发光恒星的质量，也就是说其中并没有暗物质。暗物质理论可以假设这些星系在之前的某种相互作用中丢失了暗物质晕，从而导致了这一现象。

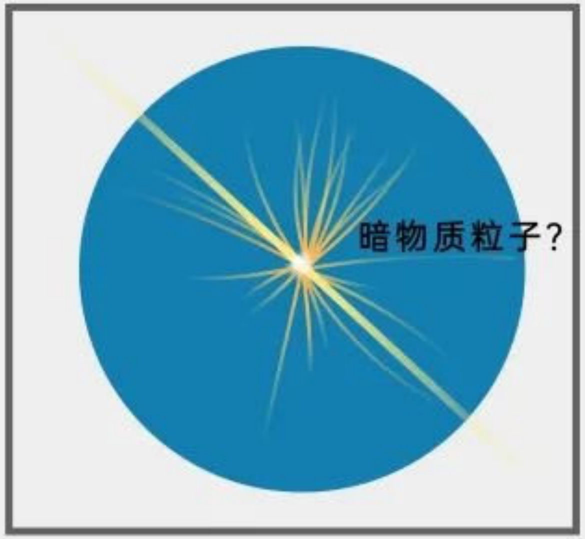
暗物质是什么？

- ✓目前仍然不清楚！
- ✓粒子物理的标准模型没有预言暗物质的存在，新物理？
- ✓热暗物质（中微子？）和冷暗物质
- ✓宇宙结构形成的模拟与CMB的不均匀性都需要冷暗物质占主导
- ✓轴子（？）：轻、中性，Peccei-Quinn理论预言（1977），数密度：~$10^{13}/cm^3$,在强磁场中可以与光子相互转化
- ✓WIMP（？）: Weakly Interacting Massive Particles（例如：neutralino未被发现）

探测暗物质粒子的三种途径







直接探测:
在地下实验室捕捉暗物质与原子核碰撞的证据

间接探测:
在伽马射线和中微子等数据中寻找暗物质粒子的湮灭或衰变的产物

对撞机探测:
在对撞机中让高能粒子束对撞，直接产生暗物质粒子

LETTER

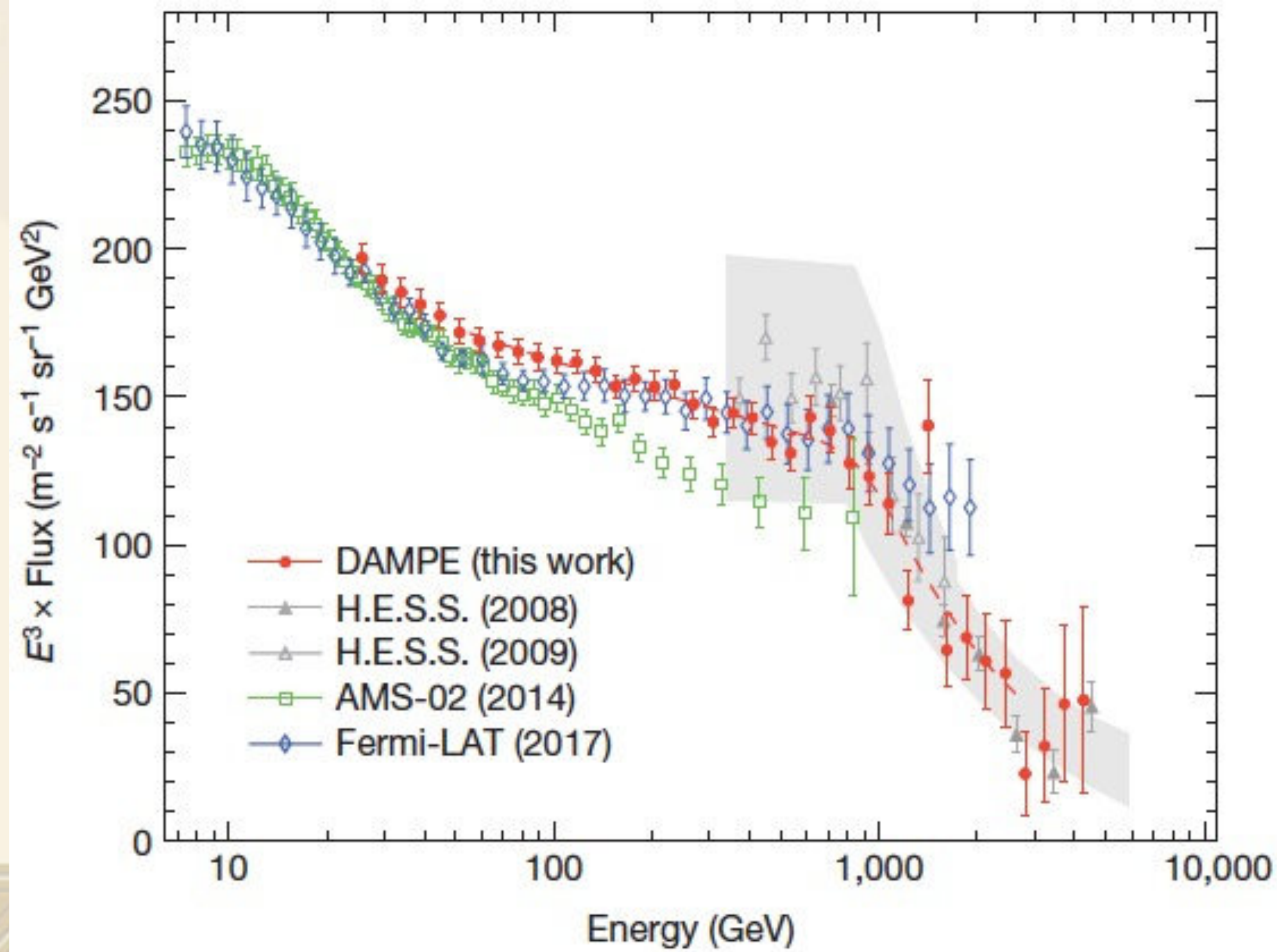
“悟空”获最精确高能电子宇宙射线能谱

doi:10.1038/nature24475

2017.11

Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons

DAMPE Collaboration*

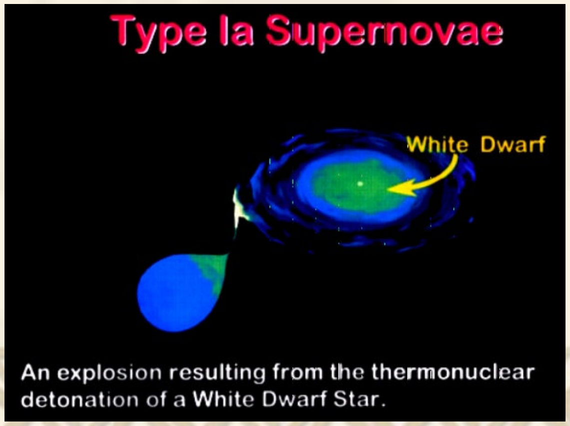


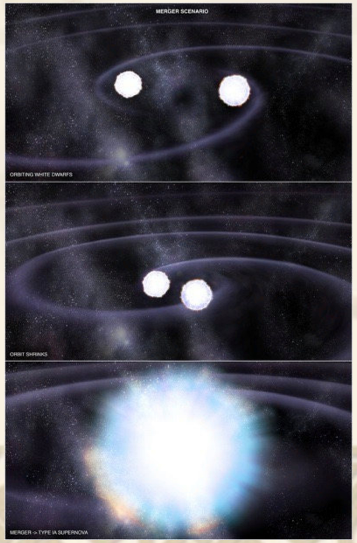
宇宙结构形成
与暗物质属性

被上天入地全宇宙通缉的暗物质也是蛮可怜的呢

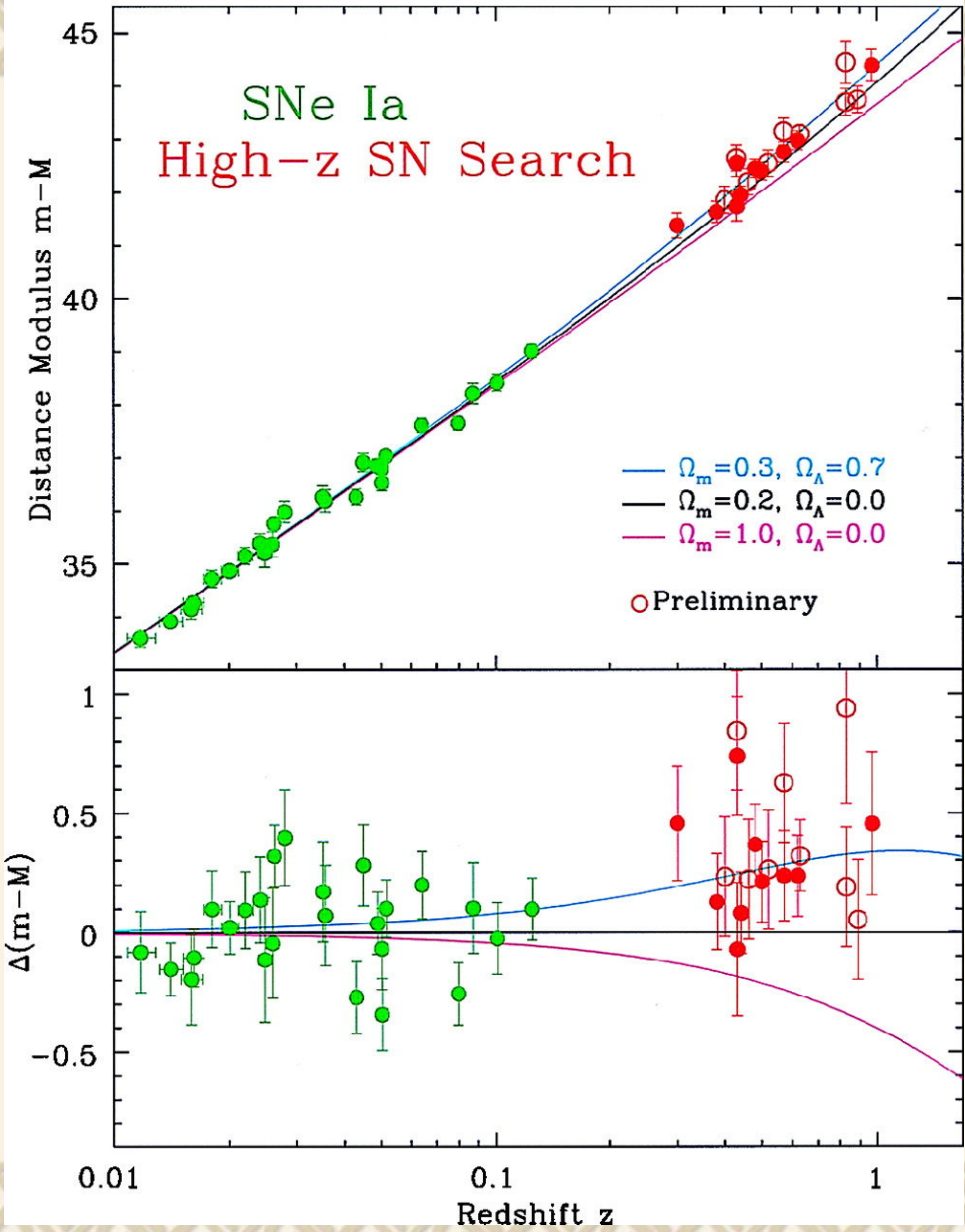
暗能量

- 宇宙中~70%是暗能量：斥力，会使宇宙加速膨胀
- 开始时，辐射场占主导，接着物质占主导，在这两个阶段，宇宙减速膨胀。再接着暗能量占主导（近~60亿年以来），宇宙加速膨胀
- 暗能量存在的证据：用SNIa作为标准烛光定距离（SNIa具有基本确定的绝对光度和光变曲线），SNIa光度很大，可以测量~1000Mpc的距离（造父变星：~10-20Mpc ）





2011诺奖：观测遥远超新星发现宇宙加速膨胀



珀尔马特

施密特

里斯

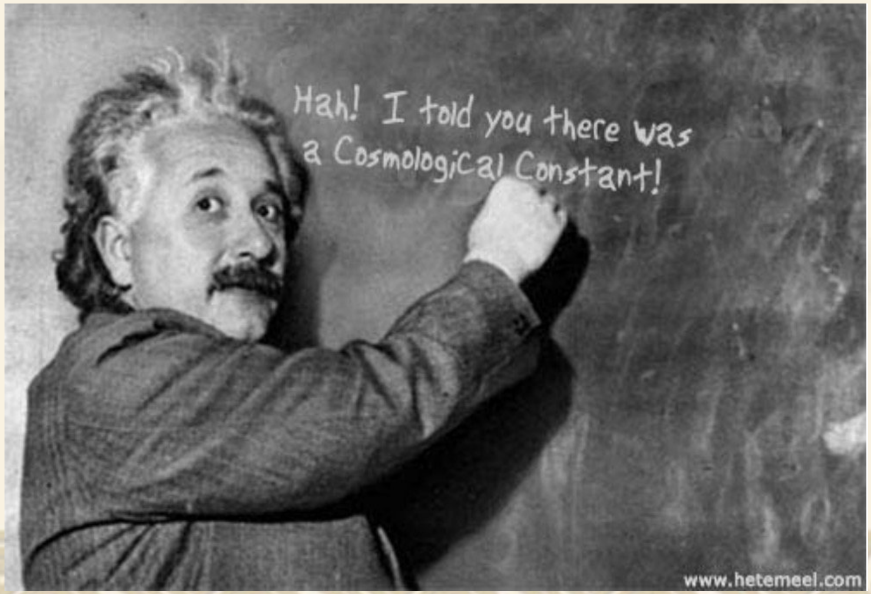
THE ACCELERATING UNIVERSE

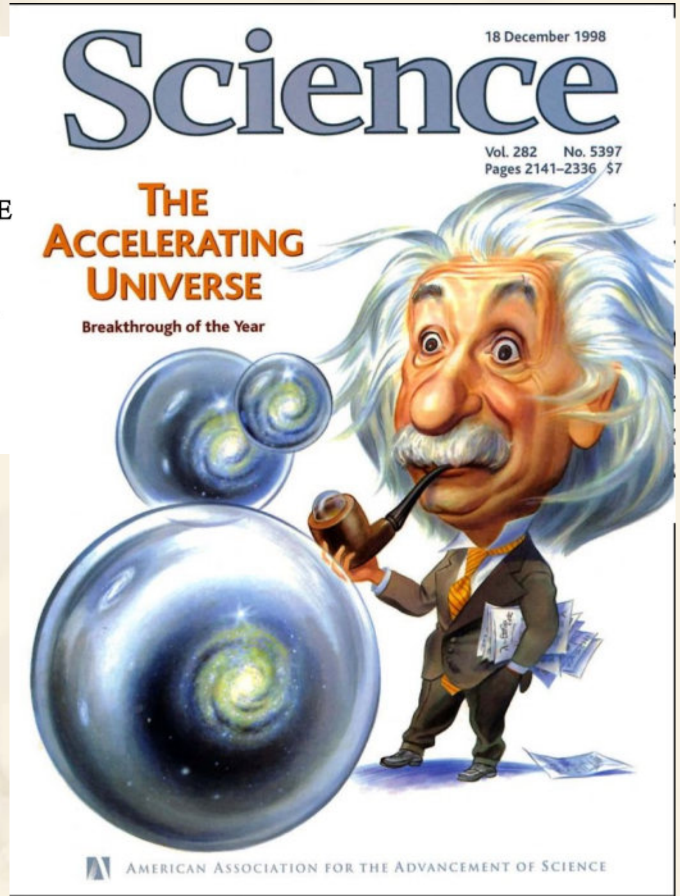
SNe Ia near and far indicate acceleration equating to ~70% dark energy in Universe!

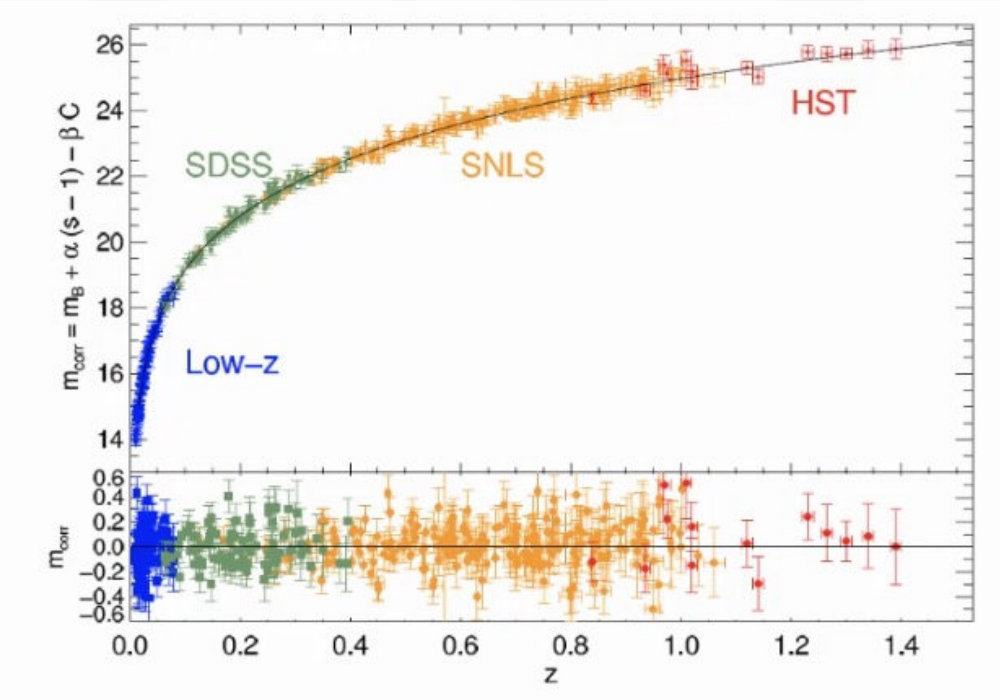
THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 116:1009–1038, 1998 September

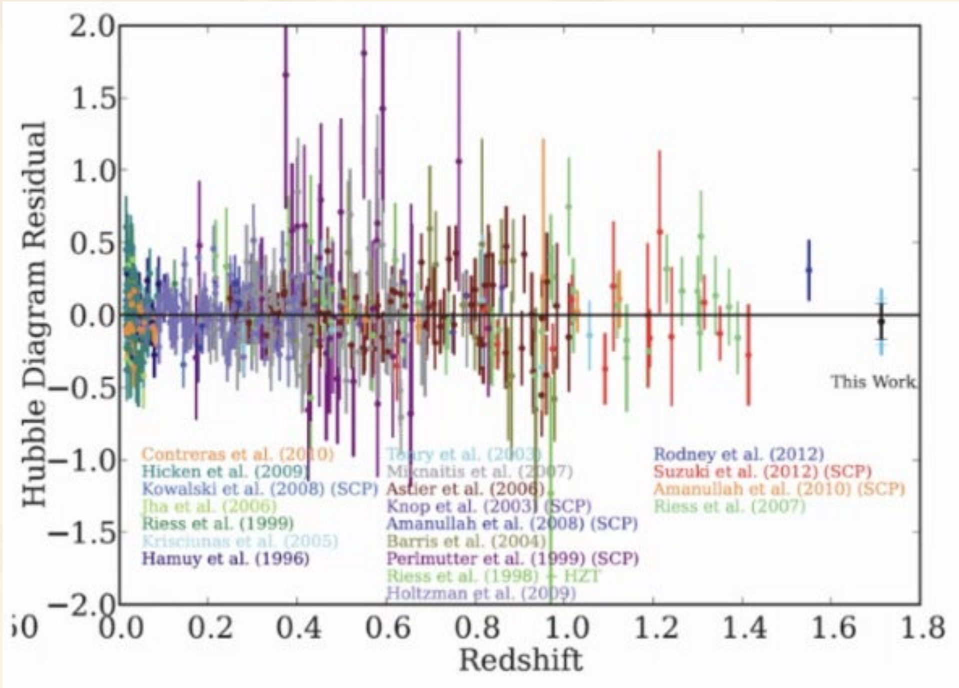
OBSERVATIONAL EVIDENCE FROM SUPERNOVAE FOR AN ACCELERATING UNIVERSE AND A COSMOLOGICAL CONSTANT

ADAM G. RIESS,[1] ALEXEI V. FILIPPENKO,[1] PETER CHALLIS,[2] ALEJANDRO CLOCCHIATTI,[3] ALAN DIERCKS,[4]
PETER M. GARNAVICH,[2] RON L. GILLILAND,[5] CRAIG J. HOGAN,[4] SAURABH JHA,[2] ROBERT P. KIRSHNER,[2]
B. LEIBUNDGUT,[6] M. M. PHILLIPS,[7] DAVID REISS,[4] BRIAN P. SCHMIDT,[8,9] ROBERT A. SCHOMMER,[7]
R. CHRIS SMITH,[7,10] J. SPYROMILIO,[6] CHRISTOPHER STUBBS,[4]
NICHOLAS B. SUNTZEFF,[7] AND JOHN TONRY[11]







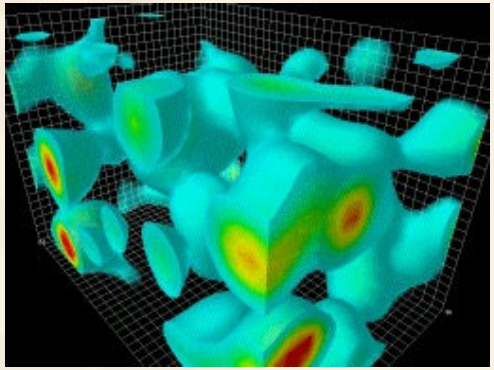


系统误差：消光、红化、标准化、距离阶梯

光度更大的标准烛光？

暗能量的本质

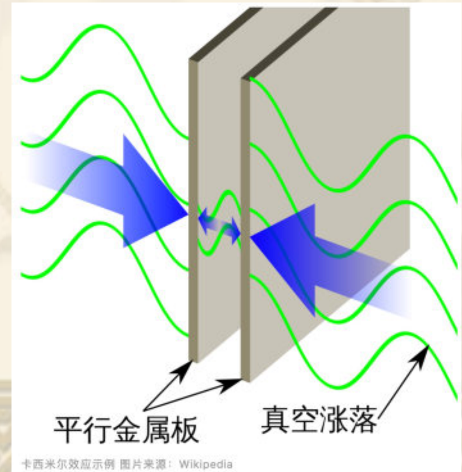
- ✓ 暗能量均匀，密度极低~10^{-30}g/cm^3，仅有重力（斥力）作用，很难探测
- ✓ 真空能？Heisenberg不确定原理允许粒子不断产生和消失，真空不是一无所有，而是充满虚粒子对！理论值超过观测值120个数量级！



$\Delta E \times \Delta T$ is of order $h/2\pi$

where h is Planck's constant ($6.626 \times 10^{-34}\,\mathrm{m^2\,kg\,s^{-1}}$).

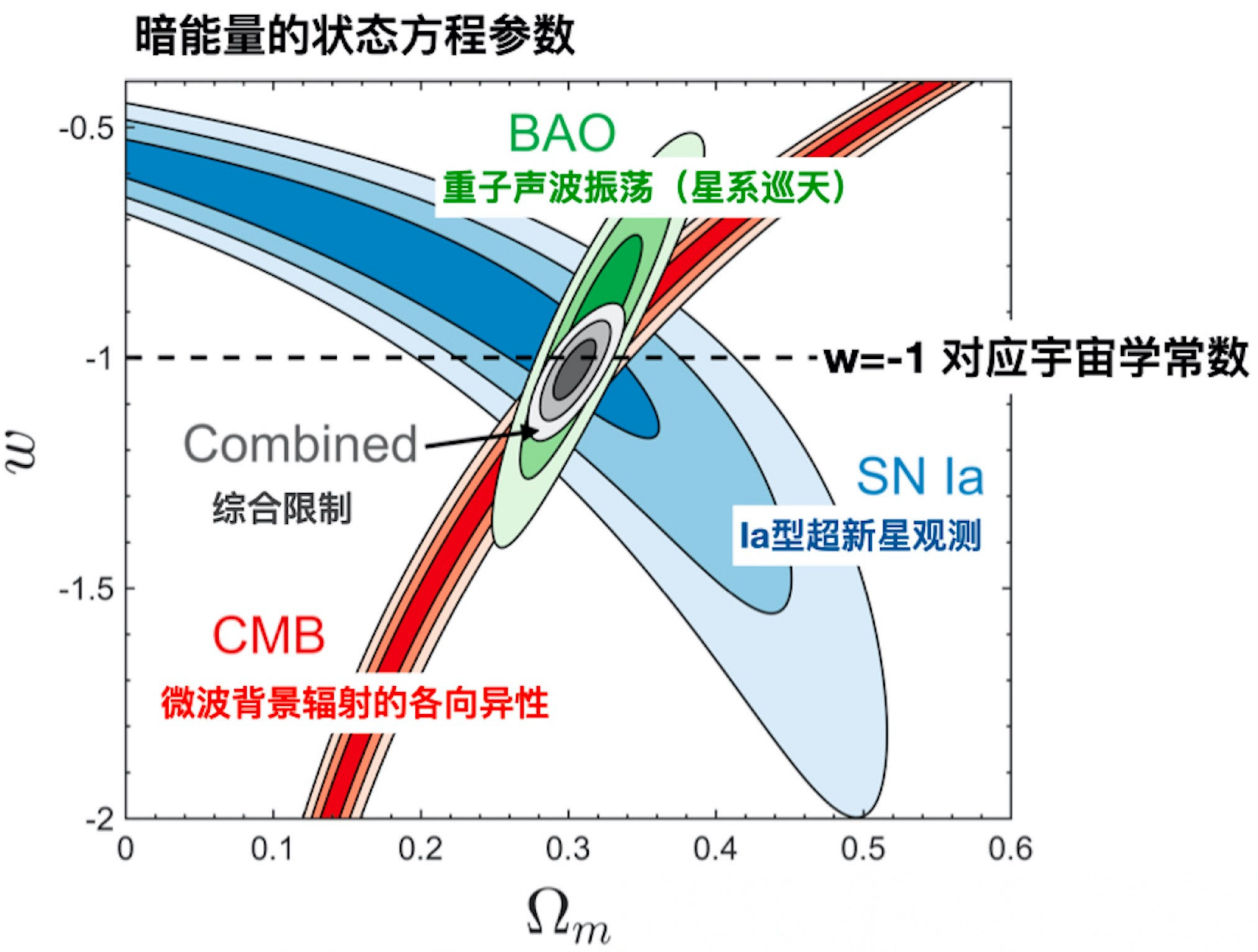
1. 例如：虚质子对，E=3x10^{-3}erg,t~3x10^{-25}s
2. 真空能实验：Casimir效应，真空中两金属板足够近，小于虚粒子对的波长，两金属板之间相互吸引



- ✓ 最简单的解释-真空能就是宇宙学常数：

Λ CDM模型

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$



需要更多更好的天文观测来限制暗能量状态方程及其演化

暗能量之谜是众多宇宙学观测项目的主要驱动之一

更精确地限制暗能量参数

- **通过探测宇宙的膨胀历史（距离-红移关系）**

  标准烛光（Ia型超新星）

  标准尺子（重子声波振荡）

  标准汽笛（双星合并引力波）

  ……

- **通过探测宇宙的结构形成历史（成团性-红移关系）**

  大尺度结构的弱引力透镜效应

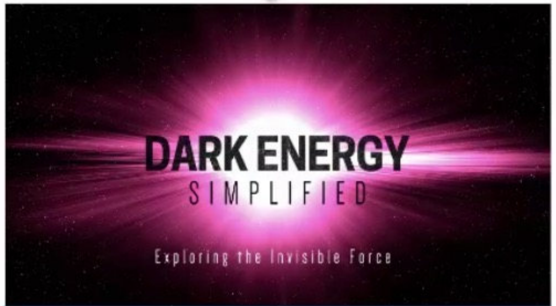
  星系成团性的红移畸变效应

  ……

(credit: Zheng Zheng)

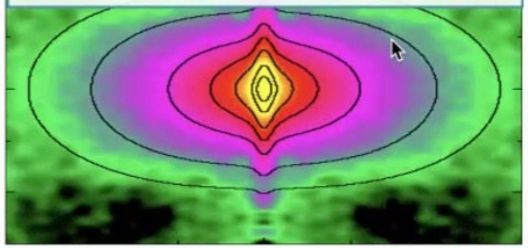
光谱星系巡天：关键的宇宙探针

时空膨胀历史
（大尺度）



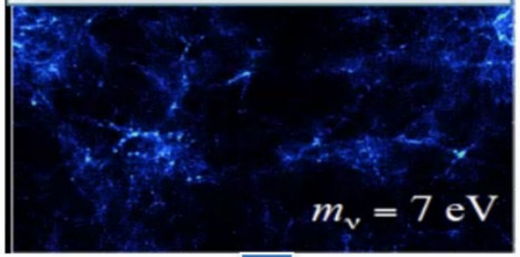
暗能量

结构增长历史
（中尺度）



修正引力

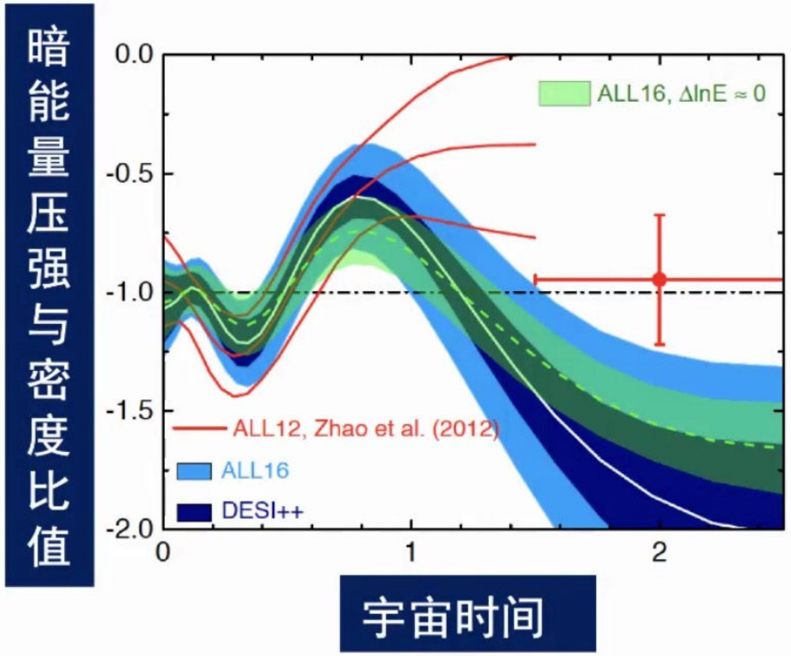
小结构丰度
（小尺度）



中微子质量

（赵公博）

首次在国际上发现暗能量动力学观测证据



nature astronomy

LETTERS

DOI: 10.1038/s41550-017-0216-z

Dynamical dark energy in light of the latest observations

Zhao *et al*, 2017, Nature Astronomy, 1, 627

Gong-Bo Zhao[1,2*], Marco Raveri[3,4], Levon Pogosian[2,5], Yuting Wang[1,2], Robert G. Crittenden[2], Will J. Handley[6,7], Will J. Percival[2], Florian Beutler[2], Jonathan Brinkmann[8], Chia-Hsun Chuang[9,10], Antonio J. Cuesta[11,12], Daniel J. Eisenstein[13], Francisco-Shu Kitaura[14,15], Kazuya Koyama[2], Benjamin L'Huillier[16], Robert C. Nichol[2], Matthew M. Pieri[17], Sergio Rodriguez-Torres[9,18,19], Ashley J. Ross[2,20], Graziano Rossi[21], Ariel G. Sánchez[22], Arman Shafieloo[16,23], Jeremy L. Tinker[24], Rita Tojeiro[25], Jose A. Vazquez[26] and Hanyu Zhang[1]

首次发现暗能量动力学性质

(3.5 σ)

引用 300+ 次

目前 引用最高 的BOSS一作论文

（赵公博）

First Results from DESI Make the Most Precise Measurement of Our Expanding Universe

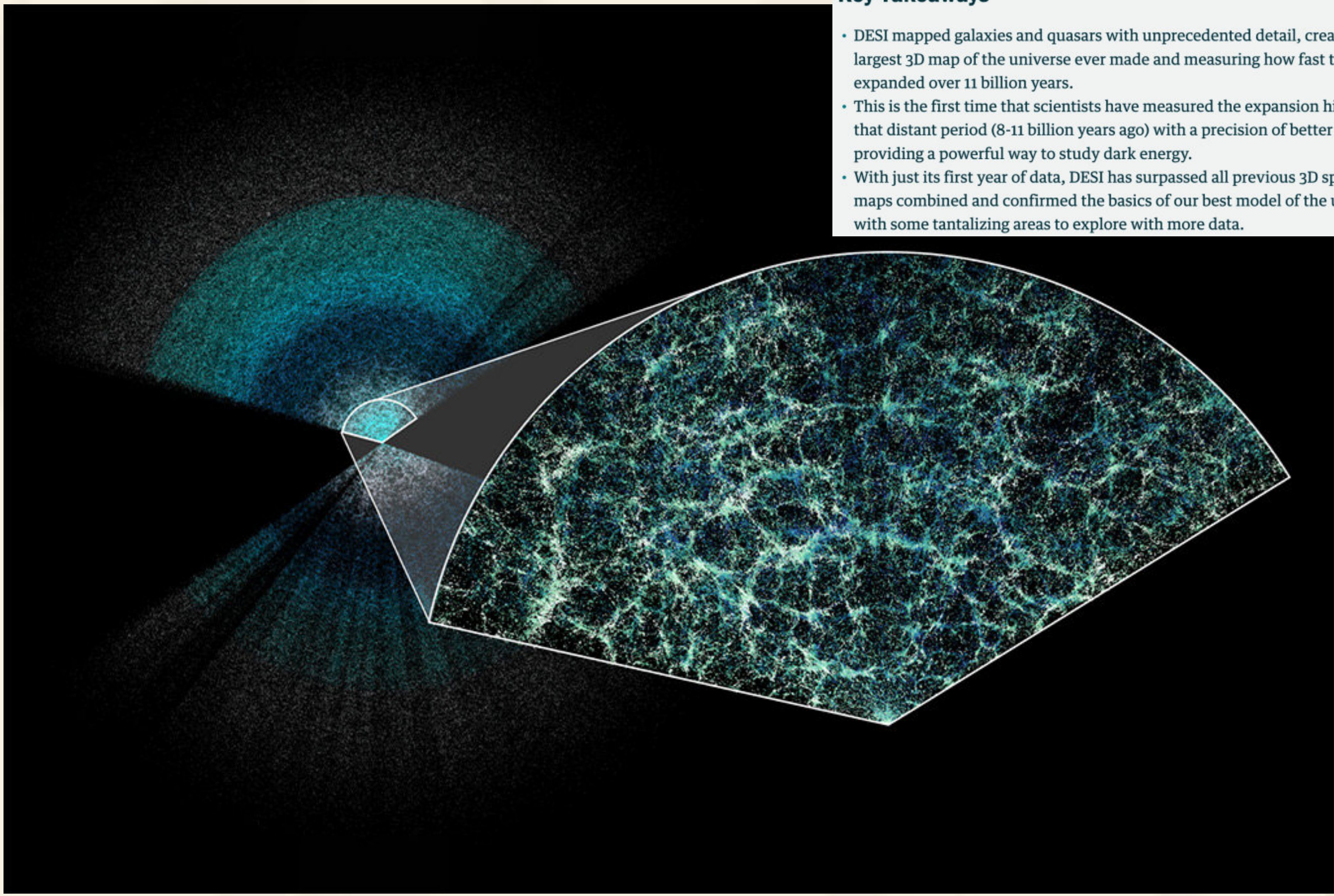
By Lauren Biron

April 4, 2024

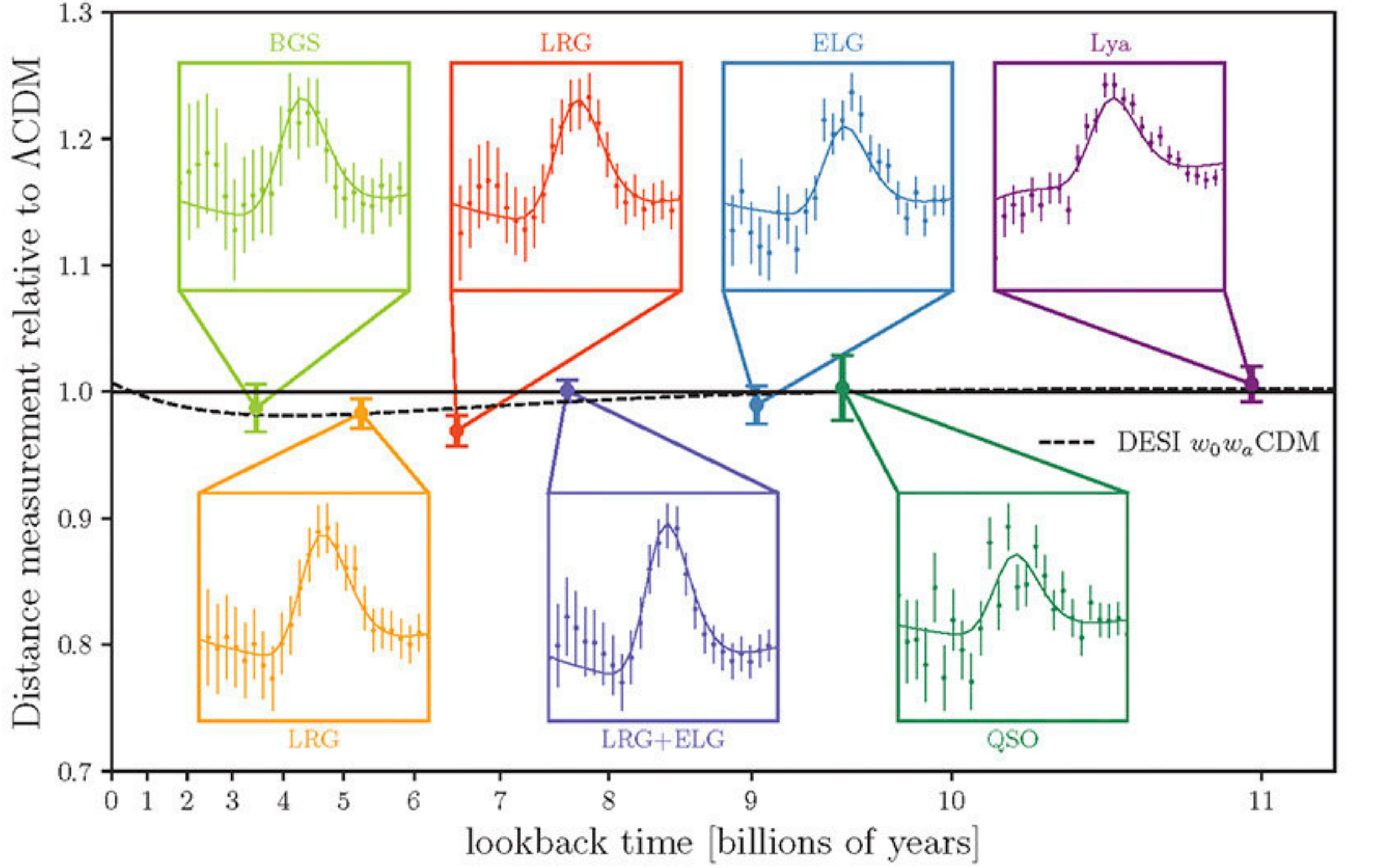
Researchers have used the Dark Energy Spectroscopic Instrument to make the largest 3D map of our universe and world-leading measurements of dark energy, the mysterious cause of its accelerating expansion

Key Takeaways

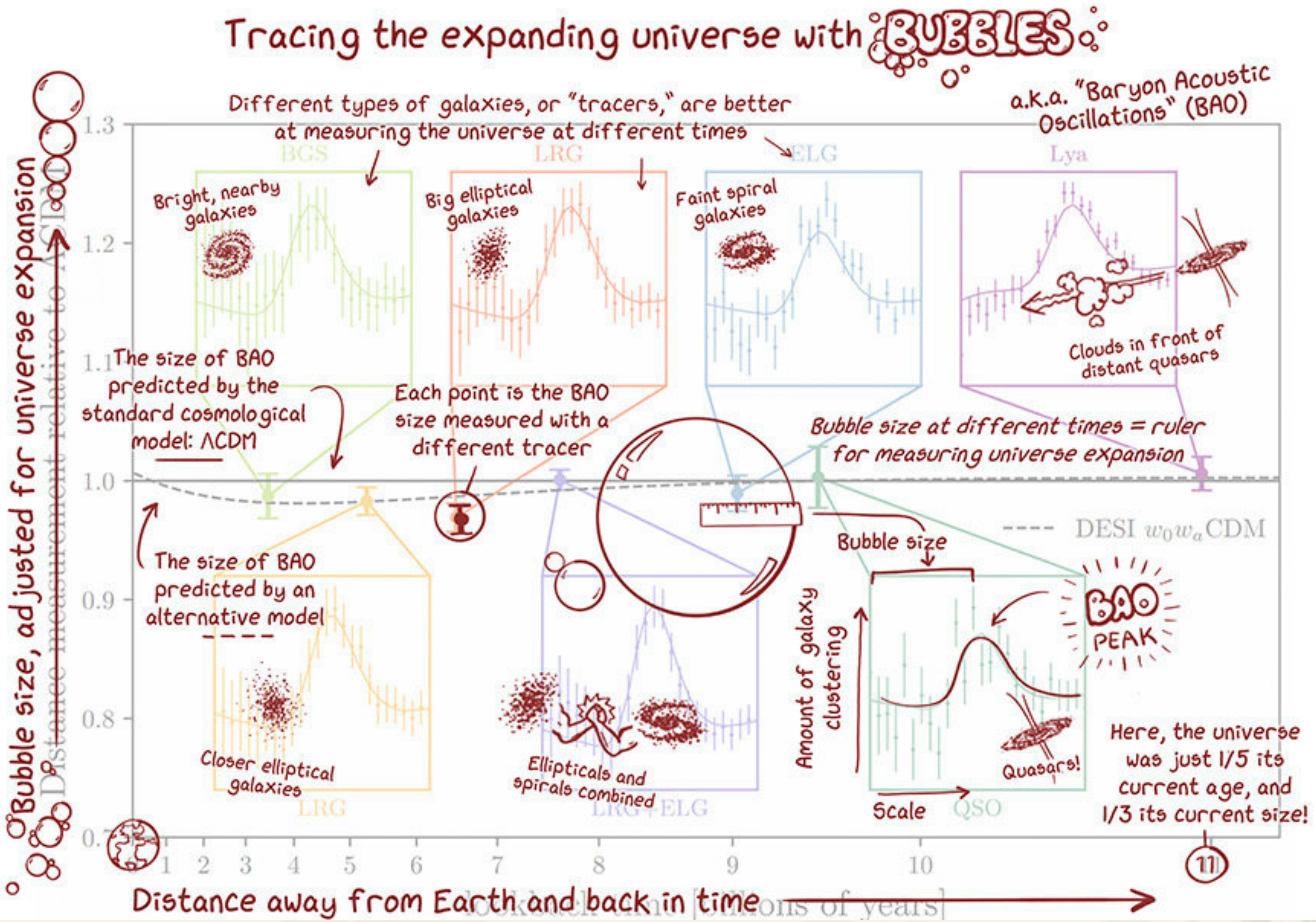
- DESI mapped galaxies and quasars with unprecedented detail, creating the largest 3D map of the universe ever made and measuring how fast the universe expanded over 11 billion years.
- This is the first time that scientists have measured the expansion history of that distant period (8-11 billion years ago) with a precision of better than 1%, providing a powerful way to study dark energy.
- With just its first year of data, DESI has surpassed all previous 3D spectroscopic maps combined and confirmed the basics of our best model of the universe - with some tantalizing areas to explore with more data.



DESI has made the largest 3D map of our universe to date. Earth is at the center of this thin slice of the full map. In the magnified section, it is easy to see the underlying structure of matter in our universe. Claire Lamman/DESI collaboration; custom colormap package by cmastro



DESI's Hubble diagram plots a characteristic pattern – baryon acoustic oscillations, or BAO "bubbles" – at different ages of the universe. The amount of dark energy determines how fast the universe grows, and therefore the size of the bubbles. The solid line is how big Lambda CDM predicts the bubbles will be, while the dashed line shows the prediction from a different model where dark energy evolves with time. DESI will gather more data to determine which model is a better description of the universe. (Credit: Arnaud de Mattia/DESI collaboration)

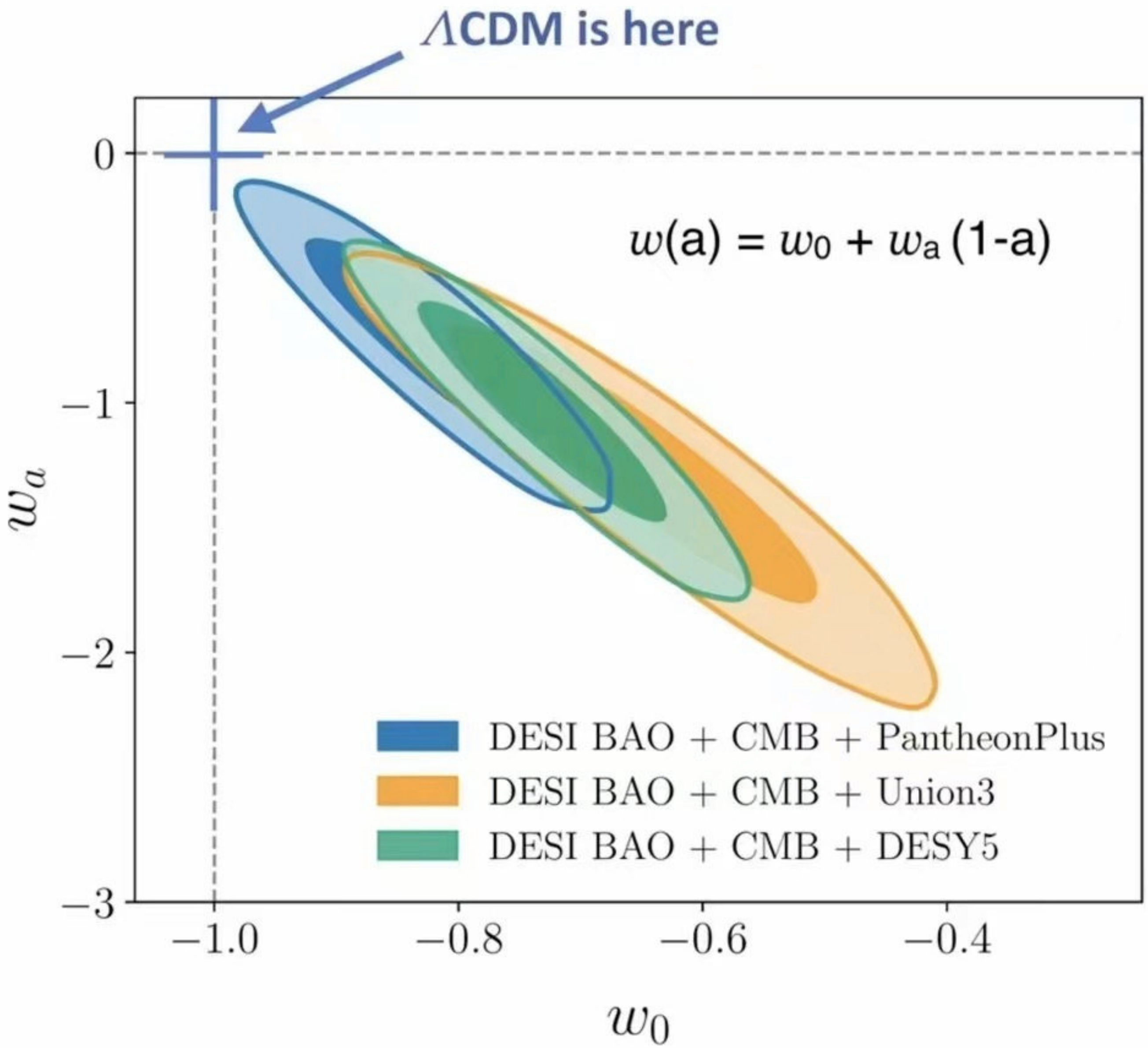


A simplified explanation of the different parts of DESI's Hubble diagram. (Credit: Claire Lamman/DESI collaboration)

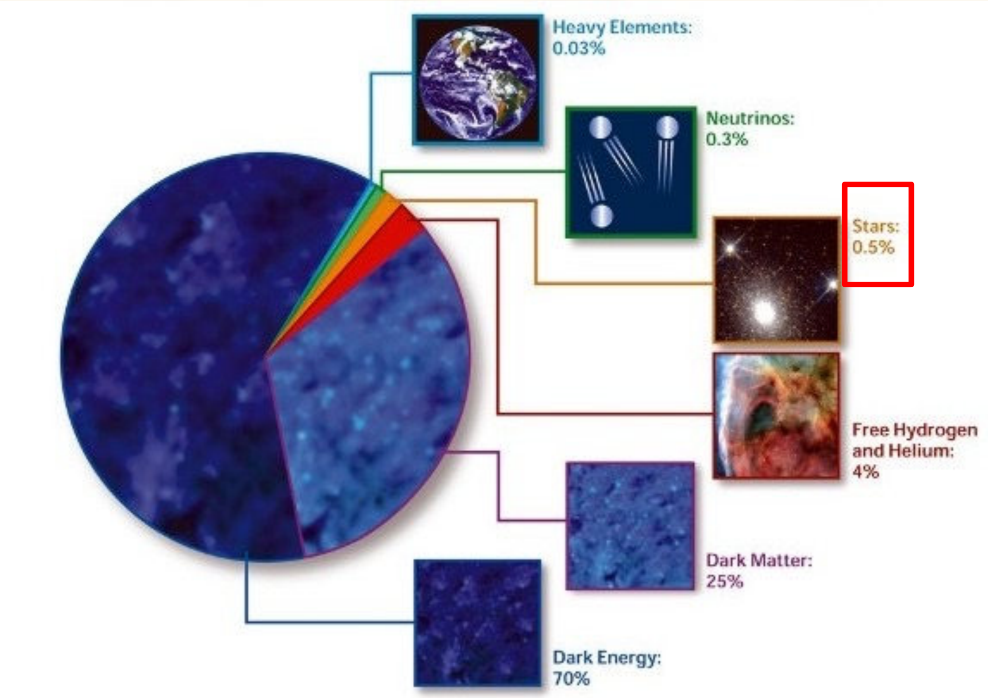
DARK ENERGY SPECTROSCOPIC INSTRUMENT

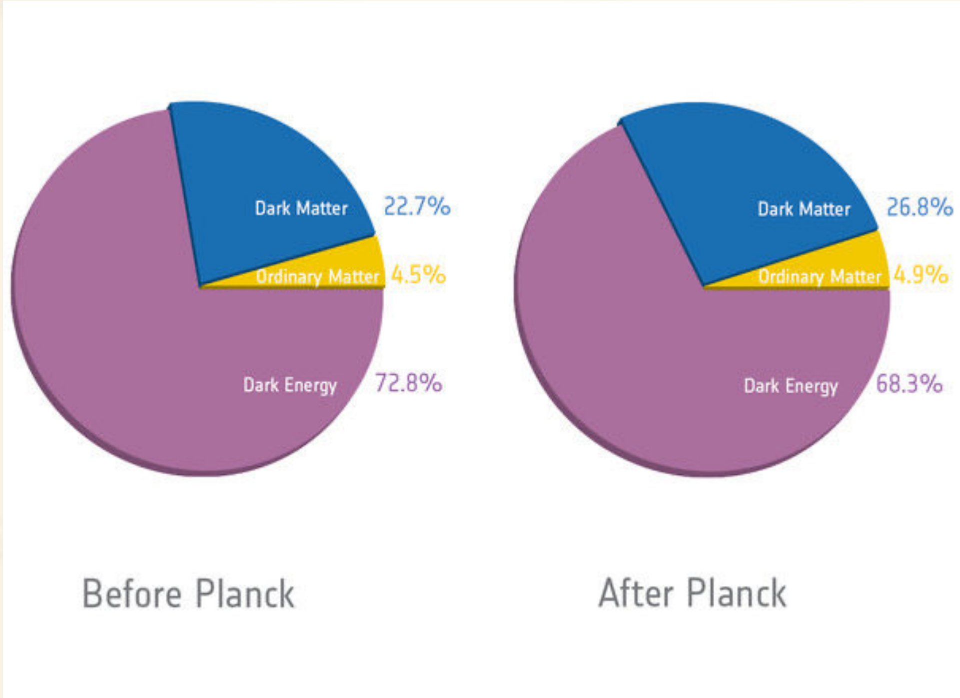
U.S. Department of Energy Office of Science

DESI BAO and Dark Energy



宇宙的组成





宇宙成分：

源于CMB、SNIa、H0、星系空间分布等观测结果

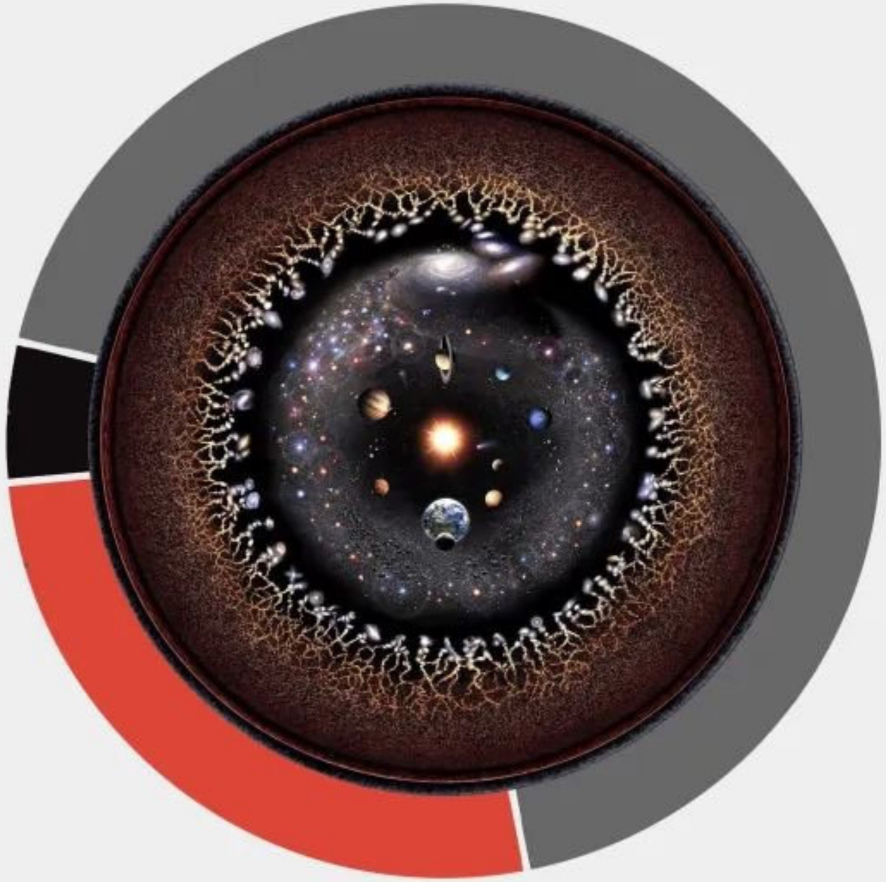
宇宙平均质量/能量密度：5.7质子每立方米


Dark Matter & Energy
The biggest mystery of
the Universe.

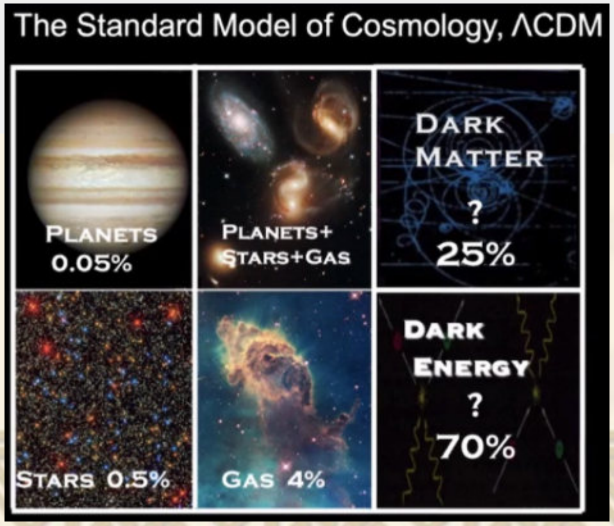
宇宙的成分

根据爱因斯坦著名的方程$E=mc^2$，能量（E）和质量（m）有着深刻的联系。因此，天文学家通常会用**质量和能量密度**来描述宇宙的成分。

- 暗能量：69%
- 普通物质：5%
- 暗物质：26%

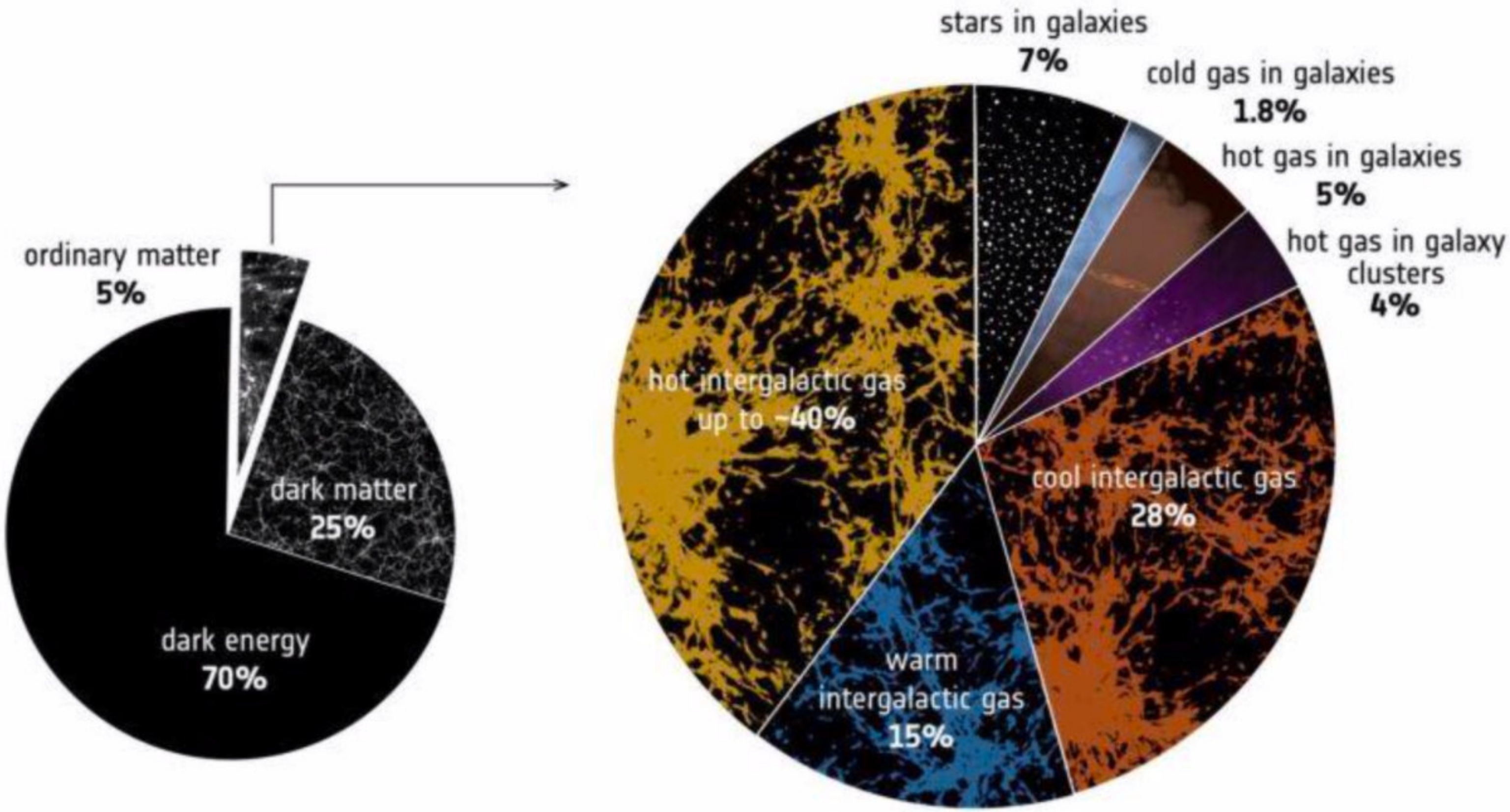


图片素材来源：Wikimedia commons user Unmismoobjetivo

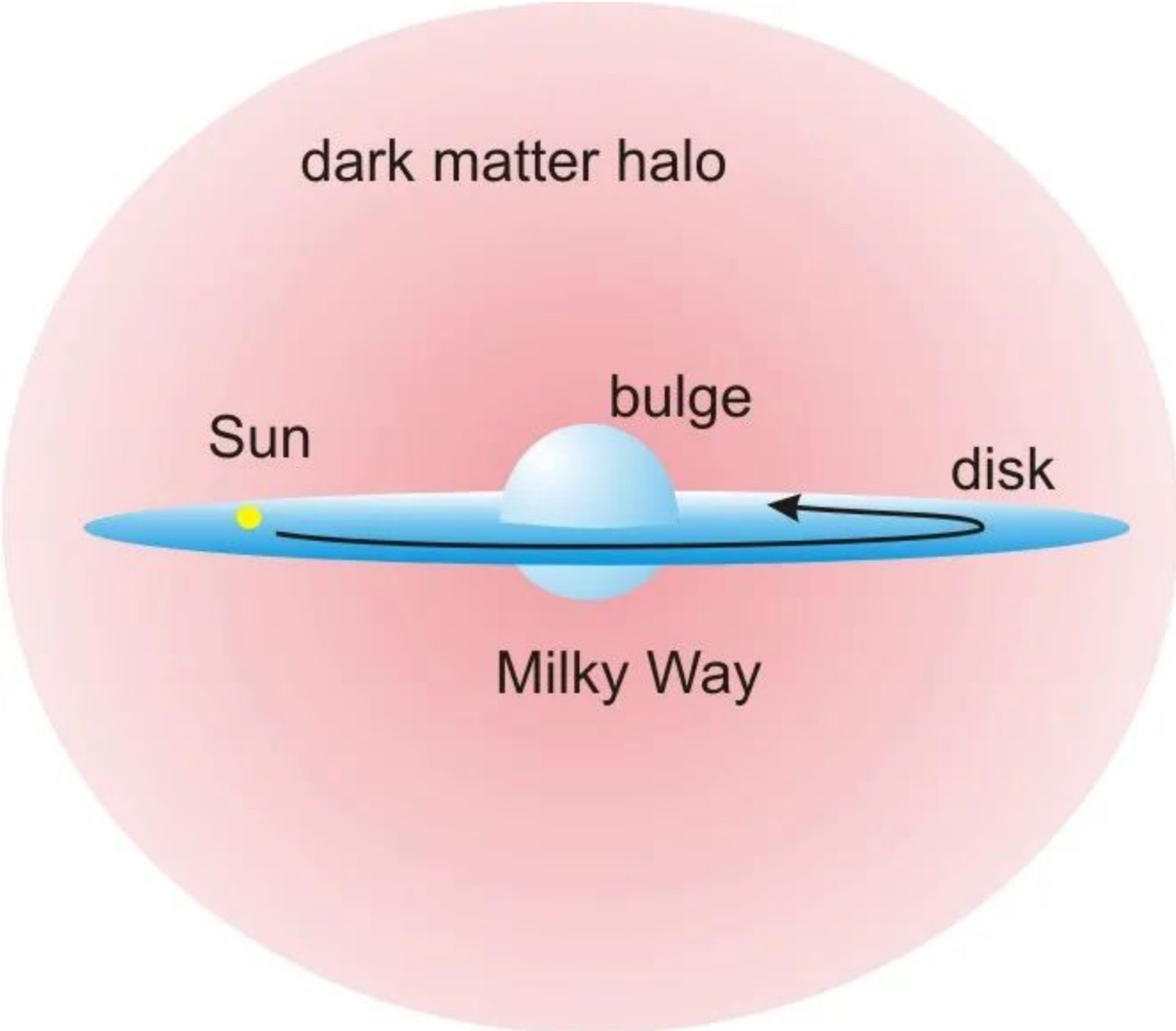


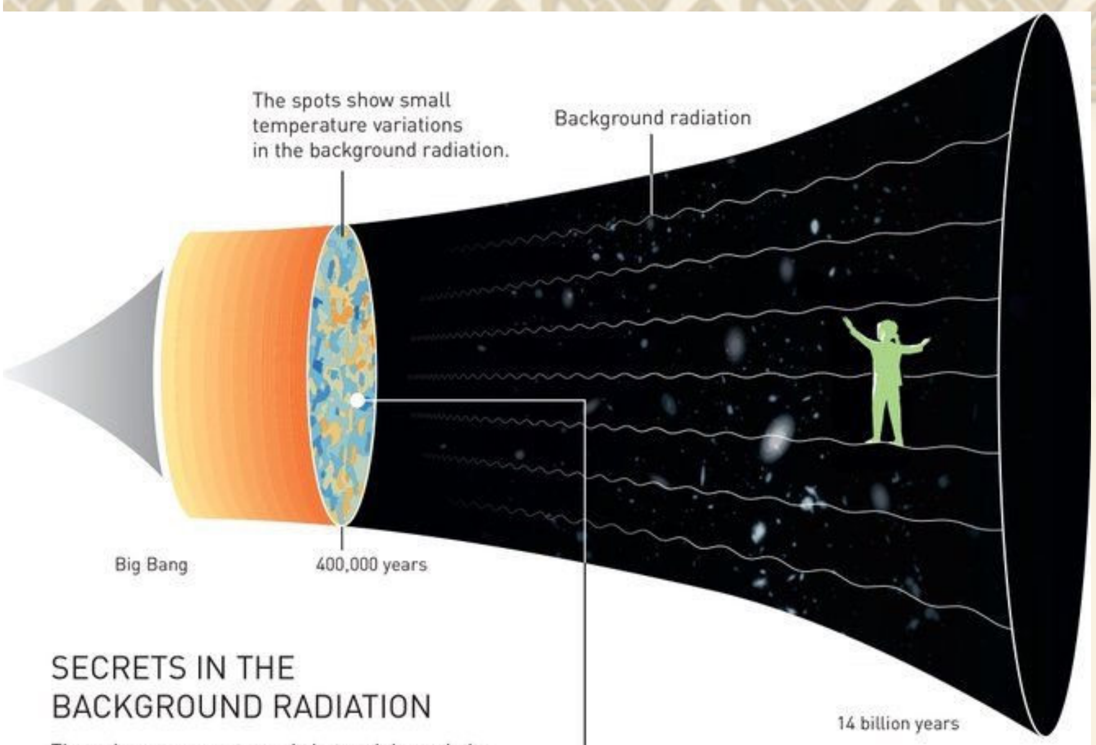
宇宙中的随机场与BINGO望远镜（Filipe Batoni Abdalla 伦敦大学学院）

Gaseous Universe



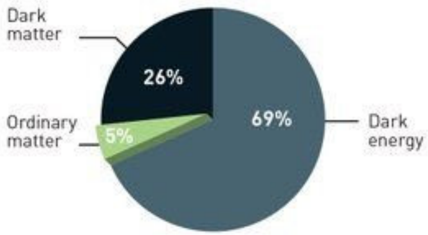
https://sci.esa.int/web/xmm-newton/-/60430-the-cosmic-budget-of-ordinary-matter

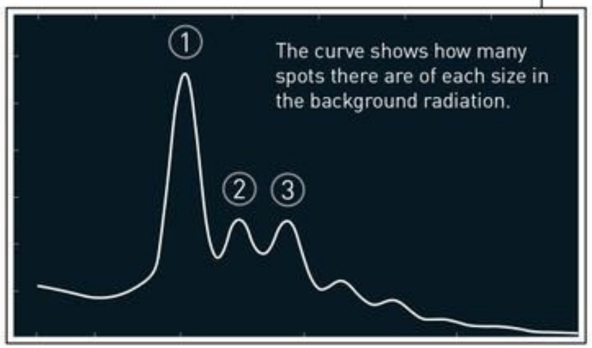

dark matter halo
bulge
Sun
disk
Milky Way



SECRETS IN THE BACKGROUND RADIATION

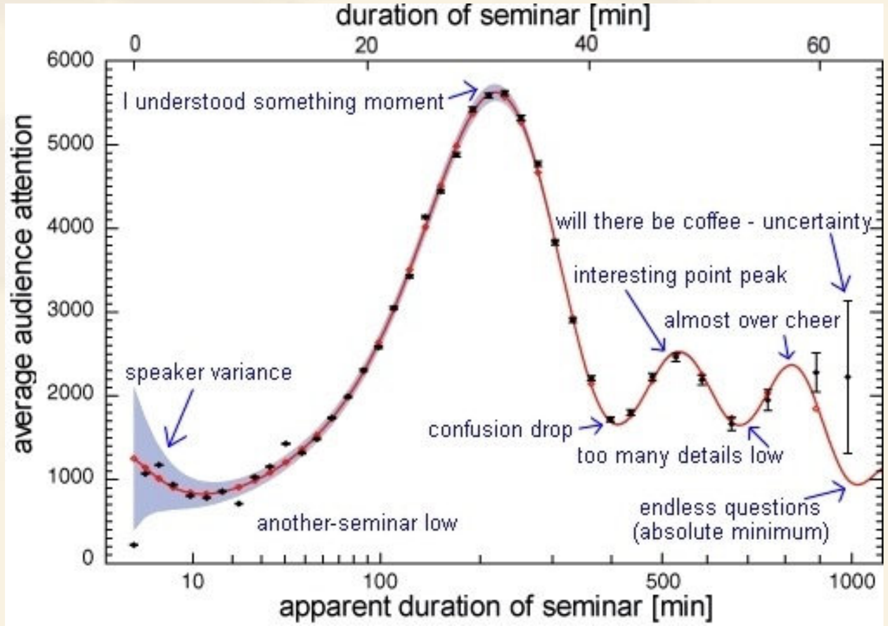
The universe was extremely hot and dense in its earliest moments, the Big Bang. Since then, the universe has been expanding, getting larger and colder. Almost 400,000 years after the Big Bang, the initial radiation began to travel through space. This radiation still fills the cosmos and, coded into it, many of the universe's secrets are hiding. Using his theoretical models, James Peebles was able to predict the shape of the universe and the matter and energy it contains (the below curve). His calculations were a good match with later measurements of background radiation.

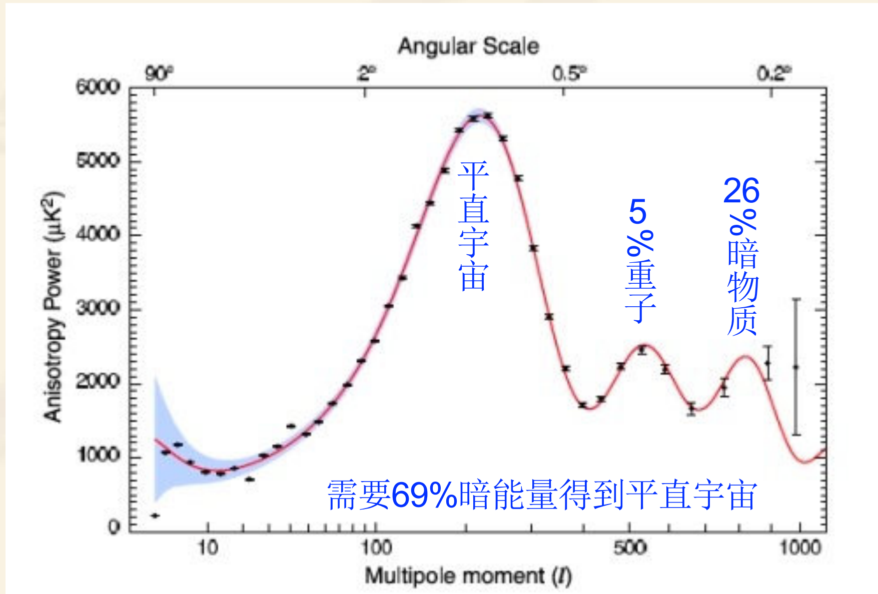




1. The first peak shows that the universe is geometrically flat, i.e. two parallel lines will never meet.
2. The second peak shows that ordinary matter is just 5% of the matter and energy in the universe.
3. The third peak shows that 26% of the universe consists of dark matter.

From these three peaks, it is possible to conclude that if 31% (5%+26%) of the universe is composed of matter, then 69% must be dark energy in order to fulfil the requirement for a flat universe.





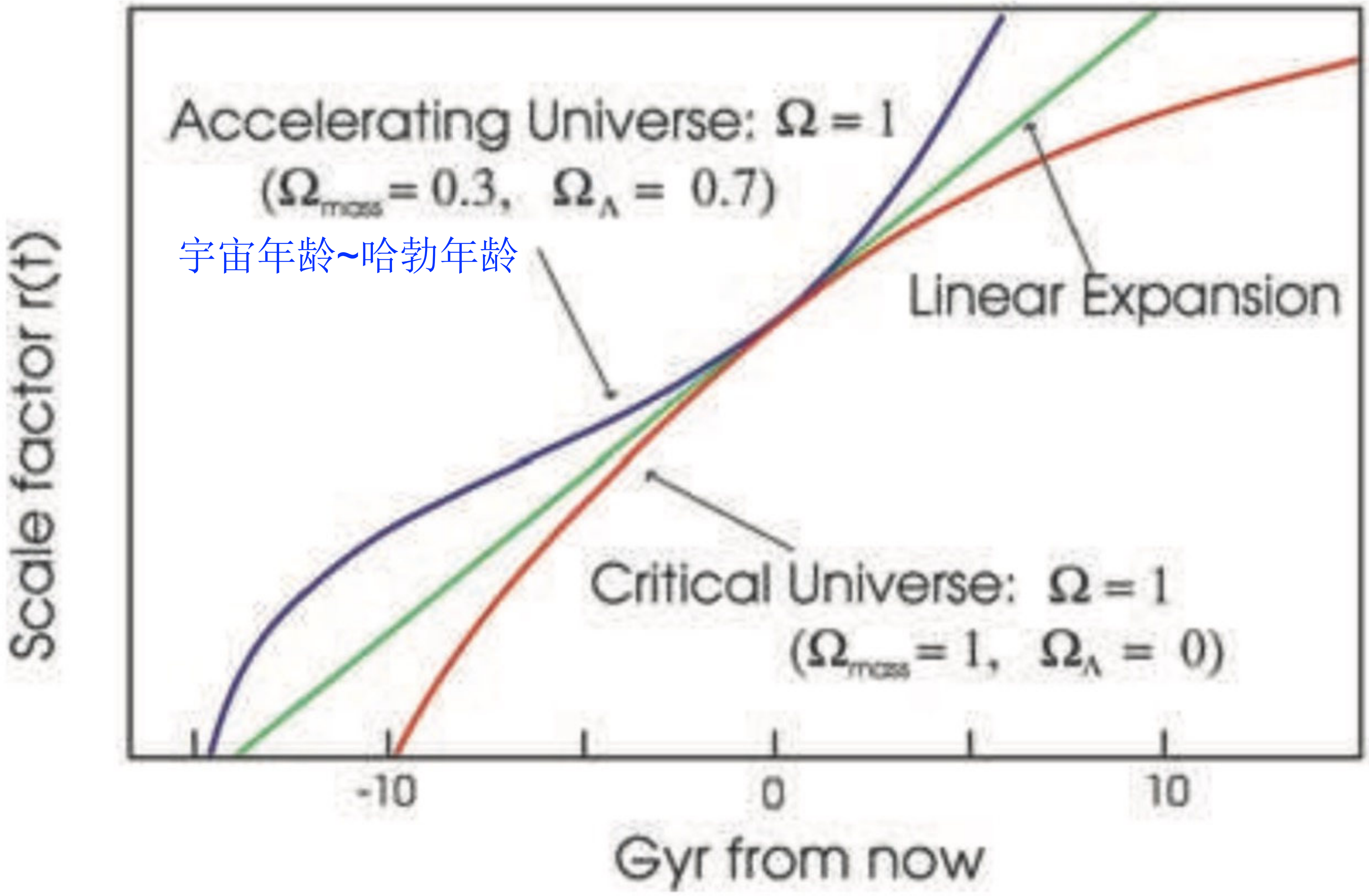
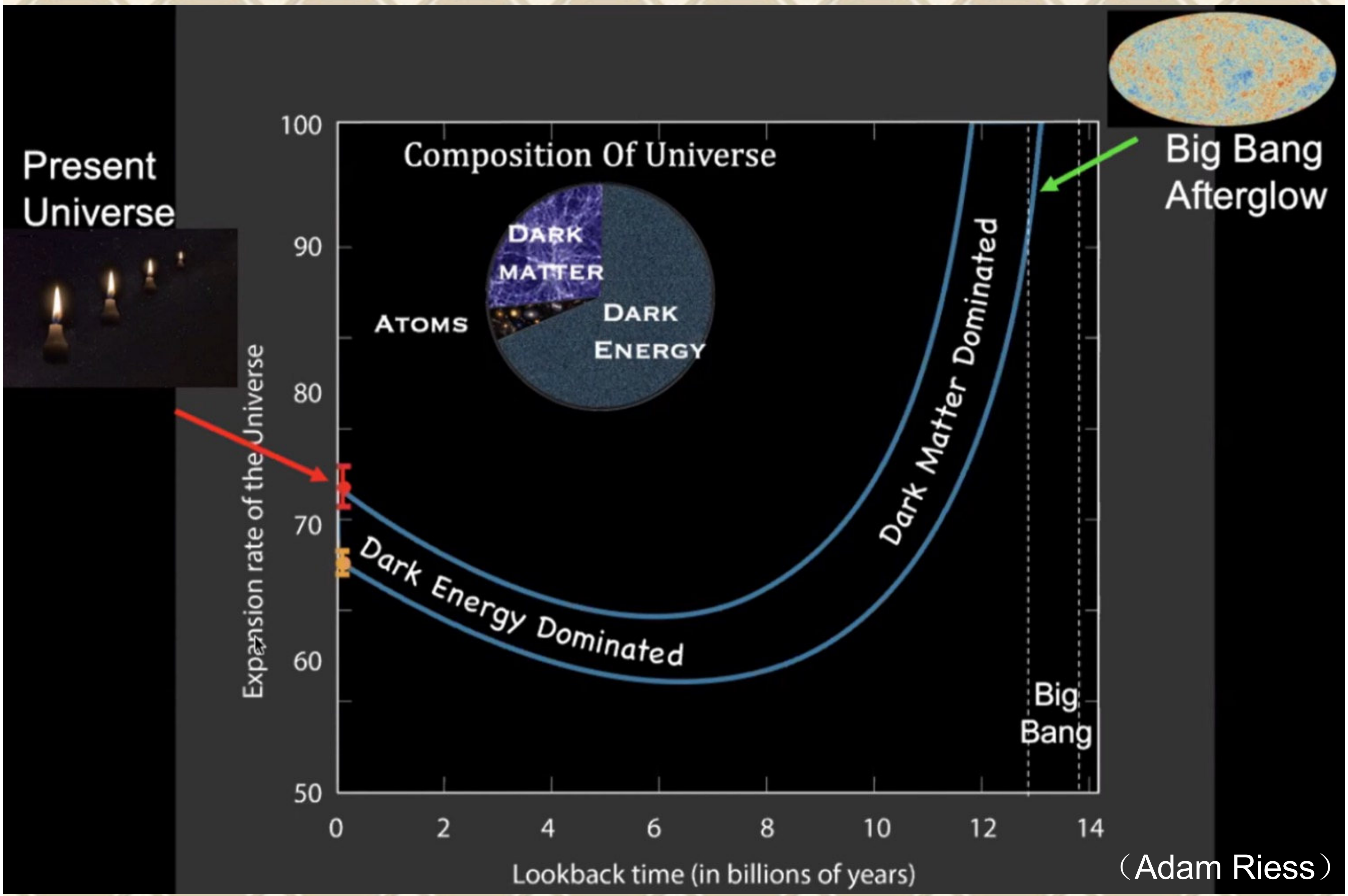
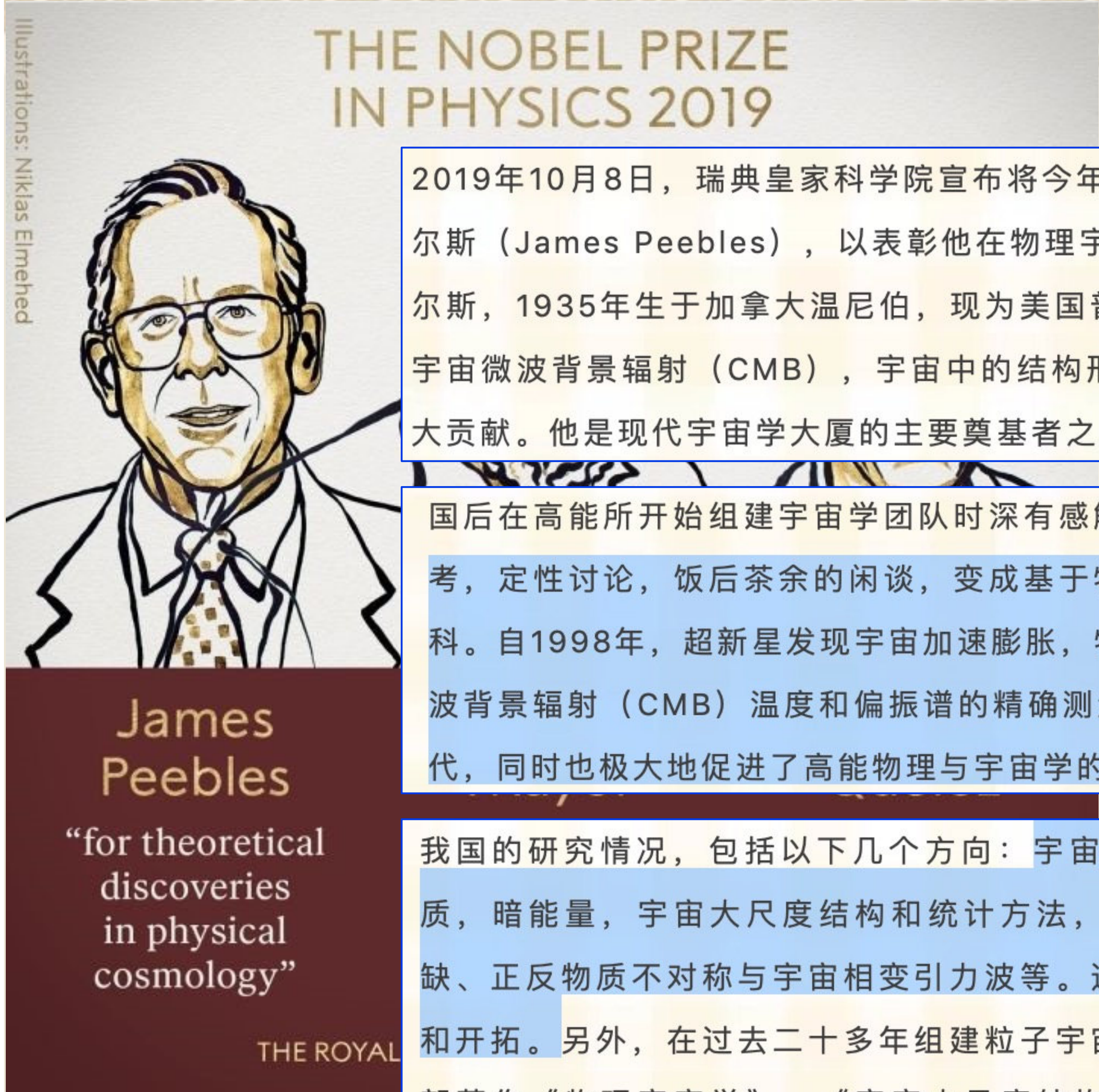


Figure 9.14 The scale size of the universe with time.


Present Universe
Composition Of Universe
Dark Matter
Atoms
Dark Energy
Big Bang Afterglow
Dark Matter Dominated
Dark Energy Dominated
Big Bang
Expansion rate of the Universe
Lookback time (in billions of years)
100
90
80
70
60
50
0
2
4
6
8
10
12
14
（Adam Riess）



2019年10月8日，瑞典皇家科学院宣布将今年的诺贝尔物理学奖的一半授予詹姆斯·皮布尔斯（James Peebles），以表彰他在物理宇宙学方面的理论贡献和发现。詹姆斯·皮布尔斯，1935年生于加拿大温尼伯，现为美国普林斯顿大学教授。在过去几十年中，他在宇宙微波背景辐射（CMB），宇宙中的结构形成，暗物质和暗能量等众多方向做出了重大贡献。他是现代宇宙学大厦的主要奠基者之一。

国后在高能所开始组建宇宙学团队时深有感触。皮布尔斯教授的工作使宇宙学从哲学思考，定性讨论，饭后茶余的闲谈，变成基于物理规律的具有理论和实验两方面的定量学科。自1998年，超新星发现宇宙加速膨胀，特别是本世纪WMAP，Planck卫星实验对微波背景辐射（CMB）温度和偏振谱的精确测量极大地推动了宇宙学进入到一个精确的时代，同时也极大地促进了高能物理与宇宙学的交叉研究。

我国的研究情况，包括以下几个方向：宇宙大爆炸及起源，CMB与原初引力波，暗物质，暗能量，宇宙大尺度结构和统计方法，精确宇宙学与基础对称性，弱电对称性破缺、正反物质不对称与宇宙相变引力波等。这些研究工作都离不开皮布尔斯教授的奠基和开拓。另外，在过去二十多年组建粒子宇宙学研究团队的过程中，皮布尔斯教授的三部著作《物理宇宙学》，《宇宙大尺度结构》，和《物理宇宙学原理》，使我（张新民）和我的学生博士后们得益匪浅。在此，我们8人联合写此文，向皮布尔斯老先生致敬。

适合智慧生命生存的宇宙

- 人择原则：*Just Six Numbers* by Martin Rees

（蔡一夫 中科大）

适合智慧生命生存的宇宙

- 人择原则：*Just Six Numbers* by Martin Rees
- 1、Ω:如太大，宇宙很快塌缩，生命没时间演化；如太小，星系与恒星不能够形成
- 2、Λ：如太大，阻止恒星与星系的形成
- 3、CMB的不均匀性-涨落（$\sim 10^{-5}$）：如太小，暗物质的聚集度更小更松散导致星系的结构比较松散，恒星的形成不有效，行星系统就不能形成;如$<10^{-6}$,星系就根本不能形成！如太大，比星系更大的结构将随处形成，并塌缩成超大质量黑洞（没有生存处）！
- 4、空间的维数3维：2维/4维度都不适合生命存在

- 5、引力常数G：引力/电磁力~10^{-36},如太大，太阳和行星变小，星系很小、挤满恒星，恒星相互作用，不适合行星的形成；小恒星很快耗尽核燃料，生命来不及演化

- 6、氢聚变产能率~0.007；如太小，~0.006，氘不稳定！反应进行不下去；如太大，~0.008，核力比电磁力强，质子-质子在一起，不能留下氢原子，作为恒星的燃料；影响3 alpha过程，从而影响C的形成，生命需要碳！

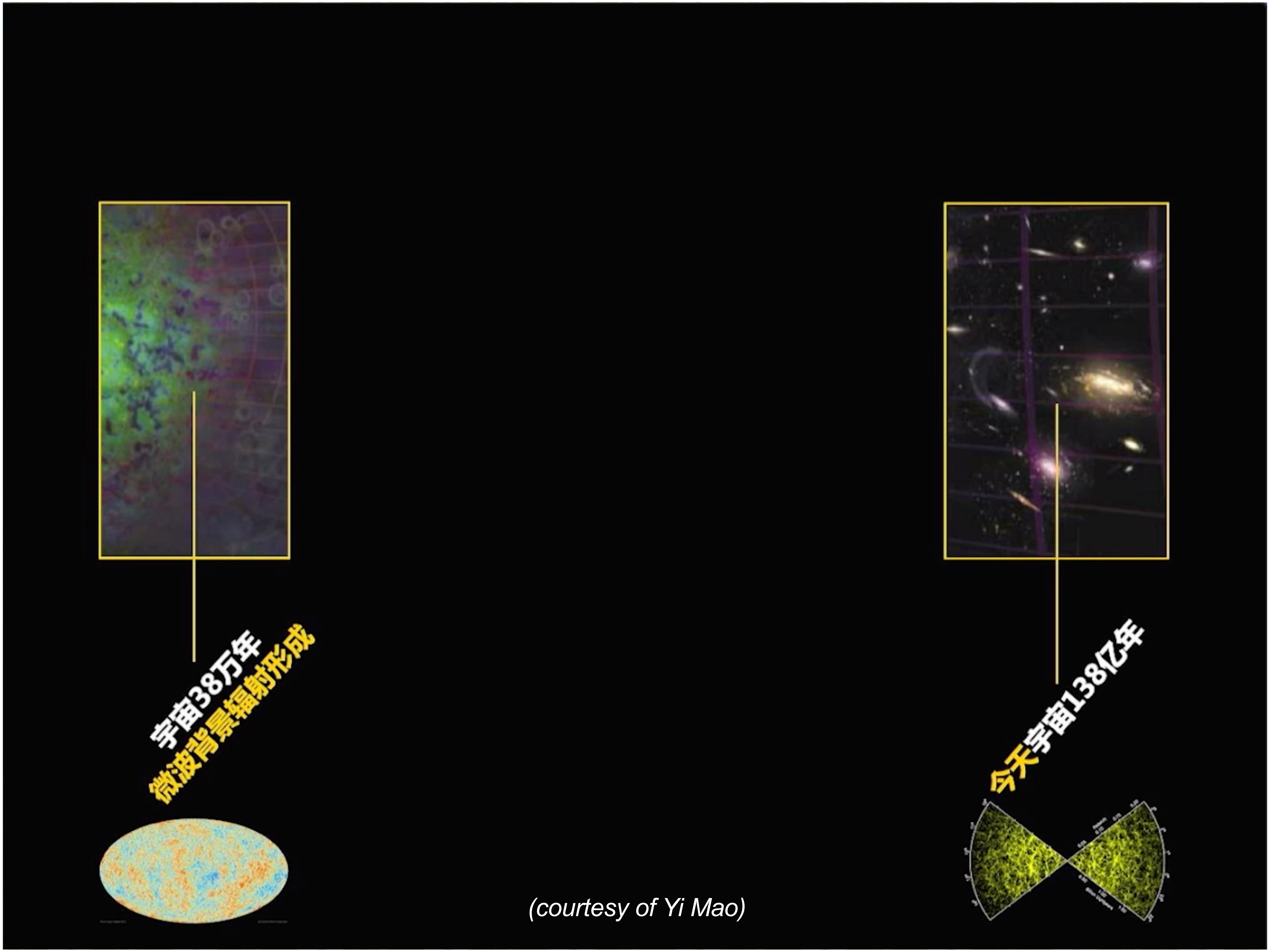
- 多重宇宙（尚无观测证据）？为什么物理常数恰好适合生命的演化？多重宇宙，在我们宇宙的视界之外，我们的宇宙是其中最幸运的一个！

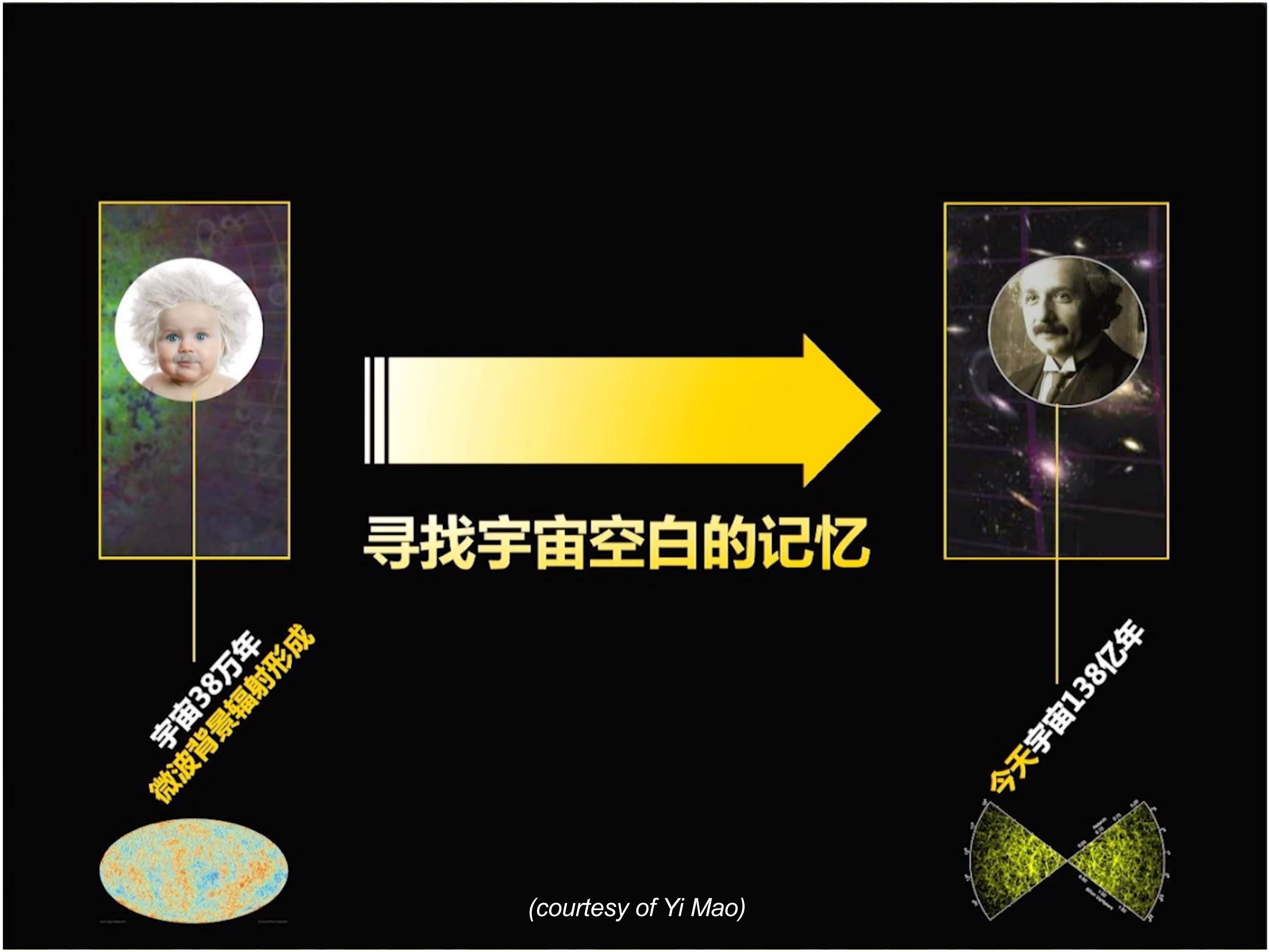
"解释不通，穿越时空。逻辑不够，平行宇宙。☺"

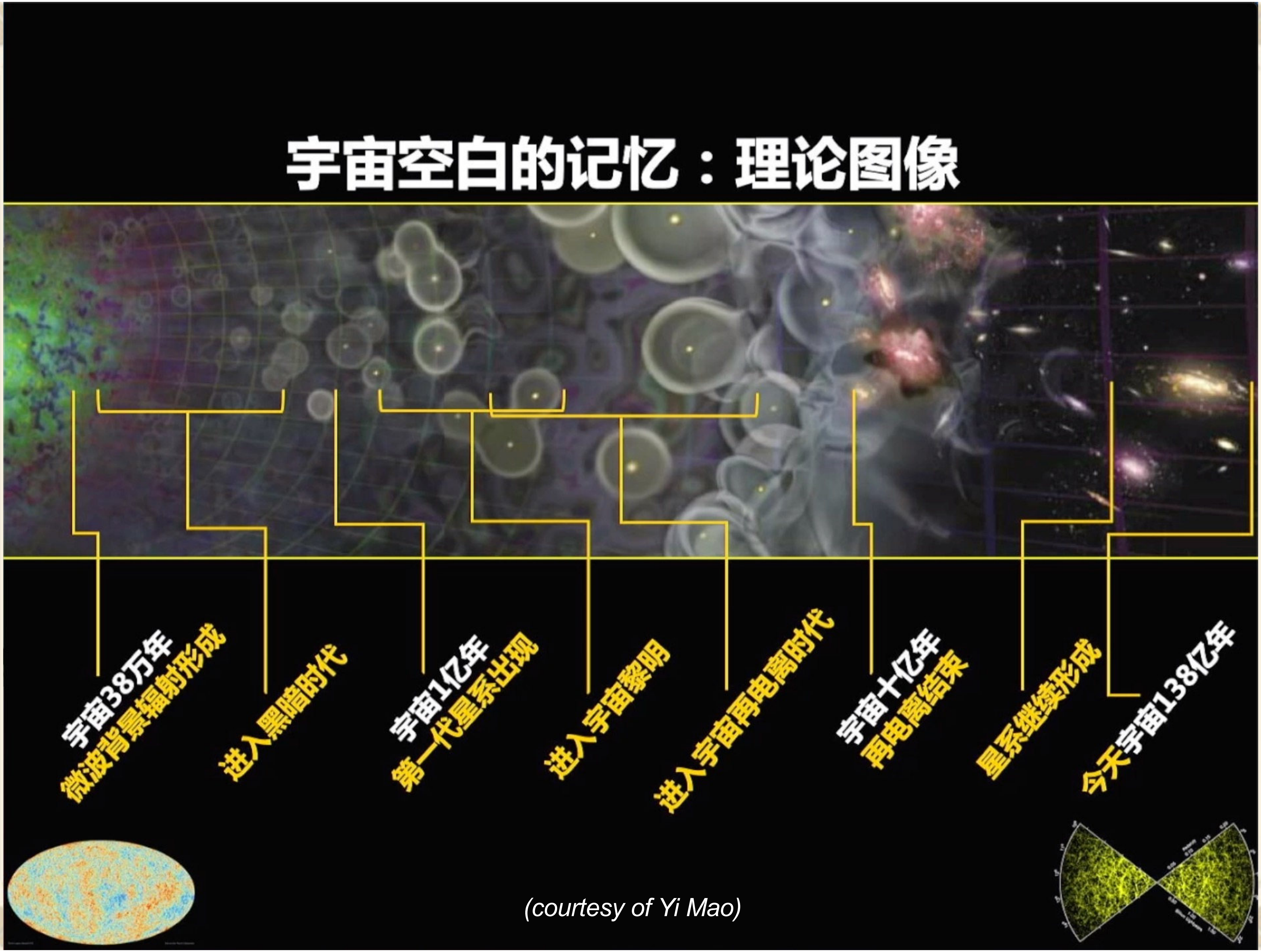

上限


宇宙的命运

- 目前宇宙加速膨胀
- 假设在t～1000亿年，我们将看到更远处，但其它星系由于宇宙加速膨胀早已移出我们的视界，除了自己的星系（本星系群合并成一个星系），宇宙空无一物！
- 那个时候无法了解宇宙的信息：CMB温度太低、信号太弱，无法探测
- 可以从星系的化学丰度知道星系的年龄，但是，无法知道宇宙的演化（仅有自己的星系），如是否起源于Big Bang
- 目前暗物质和暗能量相当，且CMB易测，我们从而推知暗能量存在及宇宙从大爆炸以来的演化和将来失控膨胀的命运
- 如果宇宙太年轻，暗能量不起主要作用，无法知道暗能量的存在；如果太老，无法知道宇宙的膨胀及暗能量的存在，恒星都已死亡，关于宇宙形成与演化的所有证据都已消失！


宇宙38万年
微波背景辐射形成
今天宇宙138亿年
(courtesy of Yi Mao)


寻找宇宙空白的记忆
宇宙38万年
微波背景辐射形成
今天宇宙138亿年
(courtesy of Yi Mao)



(courtesy of Yi Mao)

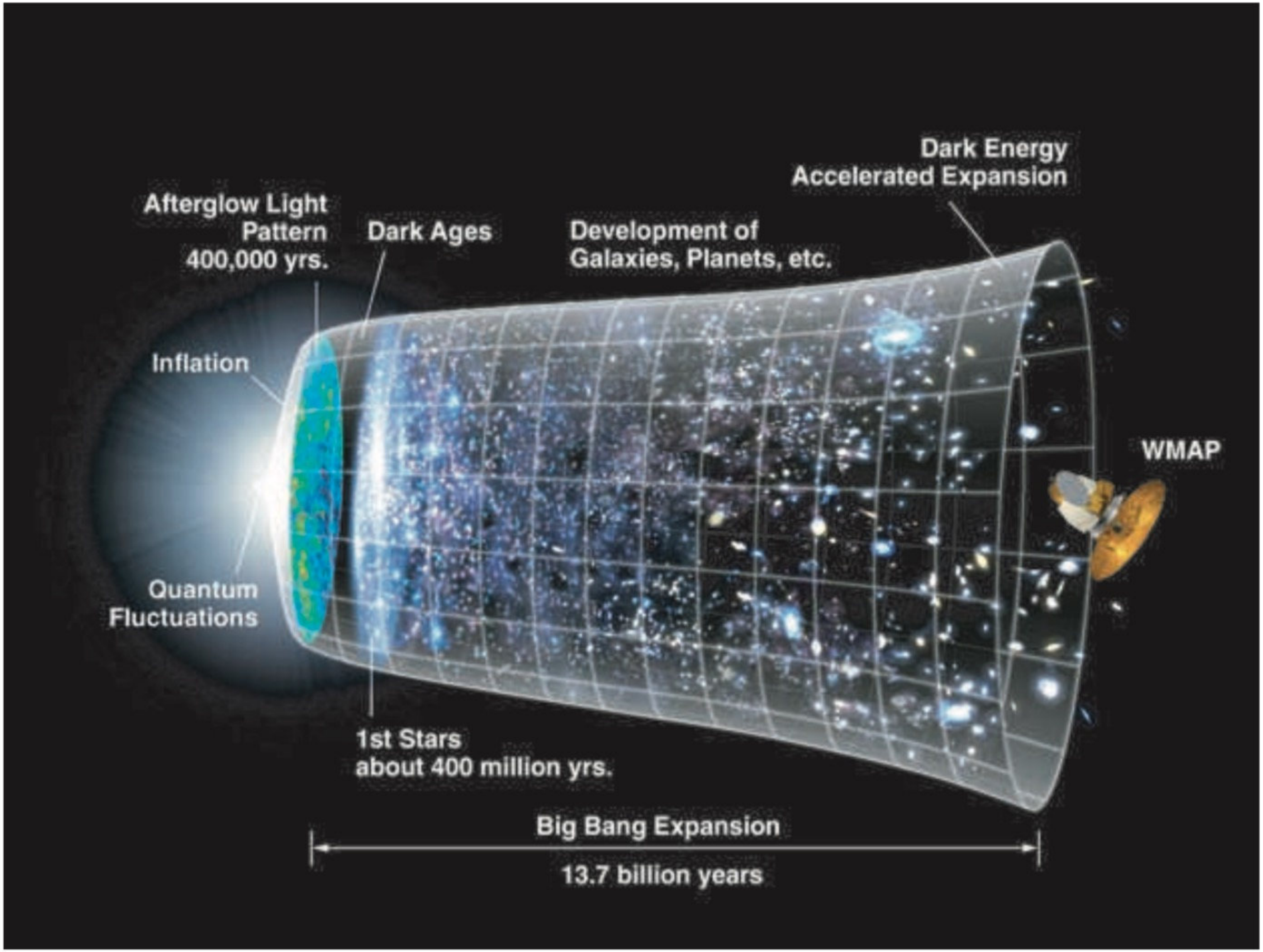
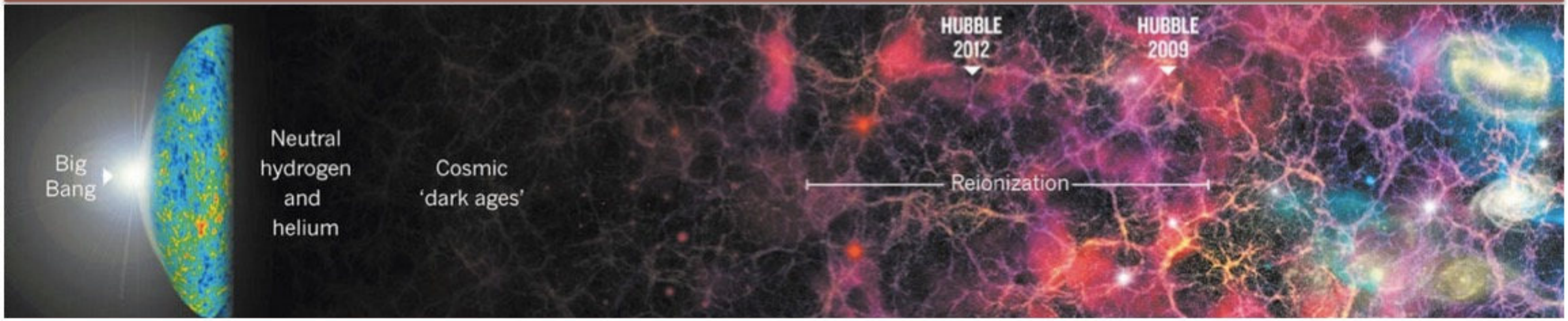


Figure 9.15 A time-line of the universe. Image: NASA/WMAP Science Team.

时间：	137亿年	137～134亿	134～128亿年	100～80亿年	现在
红移：	z～1100	z = 1100～15	z = 15～6	z = 2～1	z = 0

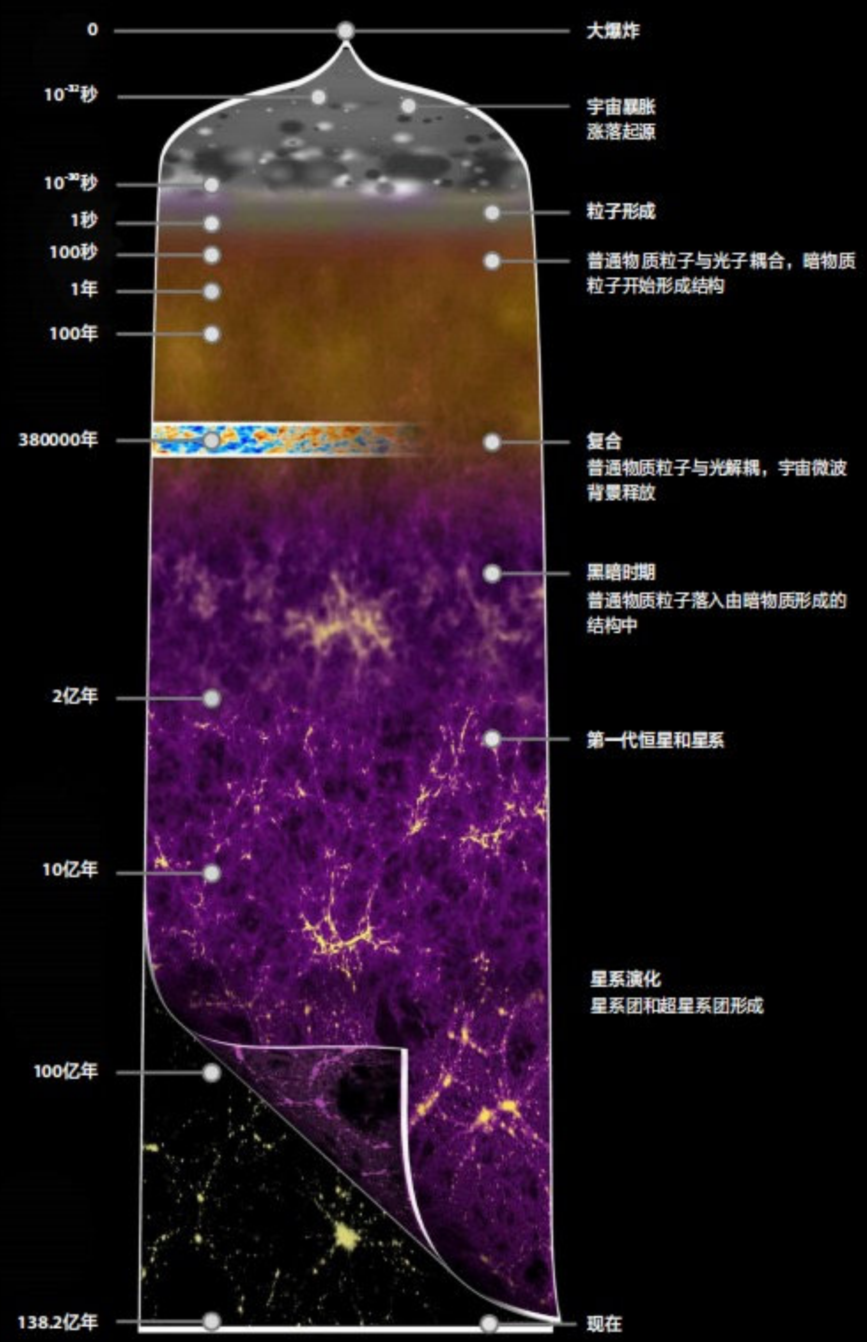


宇宙：	诞生	黑暗时代	第一代结构、宇宙再电离	转折期 ⟶	加速膨胀
星系：			第一批星系、大质量黑洞	高峰期 ⟶	快速演化

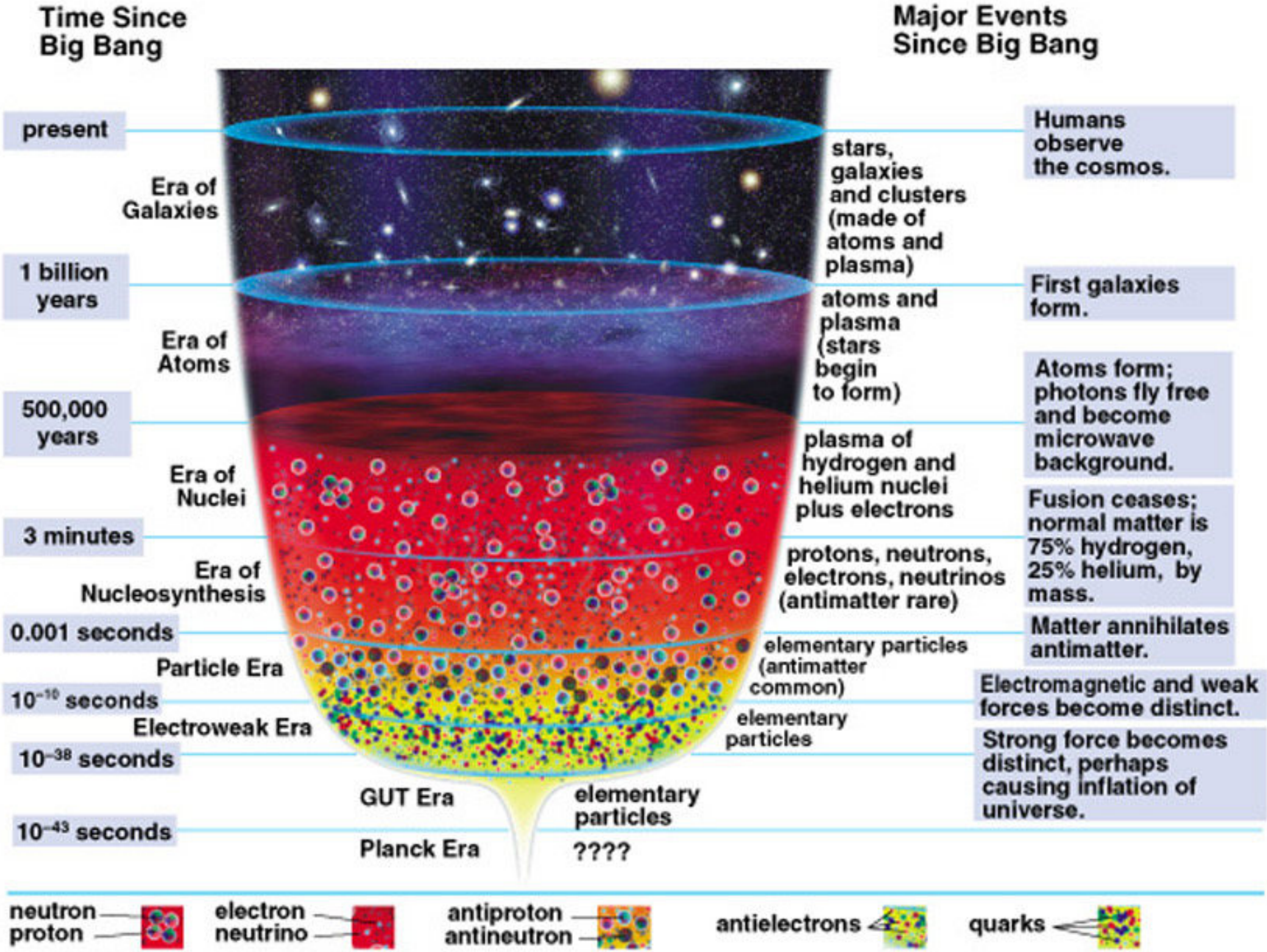
用詹姆斯·韦布望远镜探测宇宙再电离

基于发射线星系巡天探索宇宙再电离

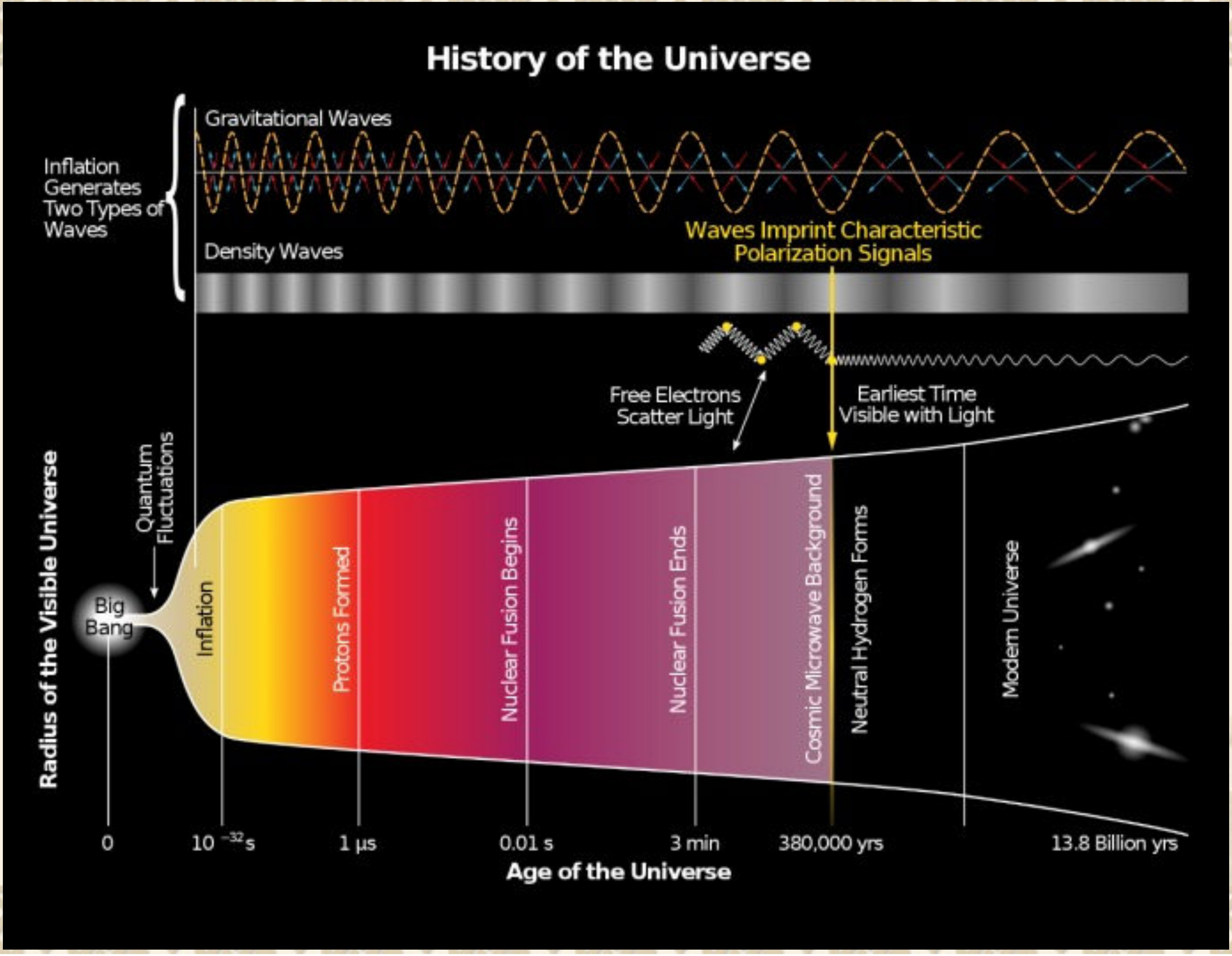
结合了极早期暴胀和热大爆炸过程的宇宙演化历史



来源 / ESA



Time Since Big Bang
Major Events Since Big Bang
present
Humans observe the cosmos.
Era of Galaxies
stars, galaxies and clusters (made of atoms and plasma)
1 billion years
First galaxies form.
Era of Atoms
atoms and plasma (stars begin to form)
500,000 years
Atoms form; photons fly free and become microwave background.
Era of Nuclei
plasma of hydrogen and helium nuclei plus electrons
3 minutes
Fusion ceases; normal matter is 75% hydrogen, 25% helium, by mass.
Era of Nucleosynthesis
protons, neutrons, electrons, neutrinos (antimatter rare)
0.001 seconds
Matter annihilates antimatter.
Particle Era
elementary particles (antimatter common)
10^{-10} seconds
Electromagnetic and weak forces become distinct.
Electroweak Era
elementary particles
10^{-38} seconds
Strong force becomes distinct, perhaps causing inflation of universe.
GUT Era
elementary particles
10^{-43} seconds
Planck Era
????
neutron
proton
electron
neutrino
antiproton
antineutron
antielectrons
quarks


History of the Universe
Gravitational Waves
Inflation Generates Two Types of Waves
Density Waves
Waves Imprint Characteristic Polarization Signals
Free Electrons Scatter Light
Earliest Time Visible with Light
Radius of the Visible Universe
Quantum Fluctuations
Big Bang
Inflation
Protons Formed
Nuclear Fusion Begins
Nuclear Fusion Ends
Cosmic Microwave Background
Neutral Hydrogen Forms
Modern Universe
0
10 $^{-32}$s
1 µs
0.01 s
3 min
380,000 yrs
13.8 Billion yrs
Age of the Universe

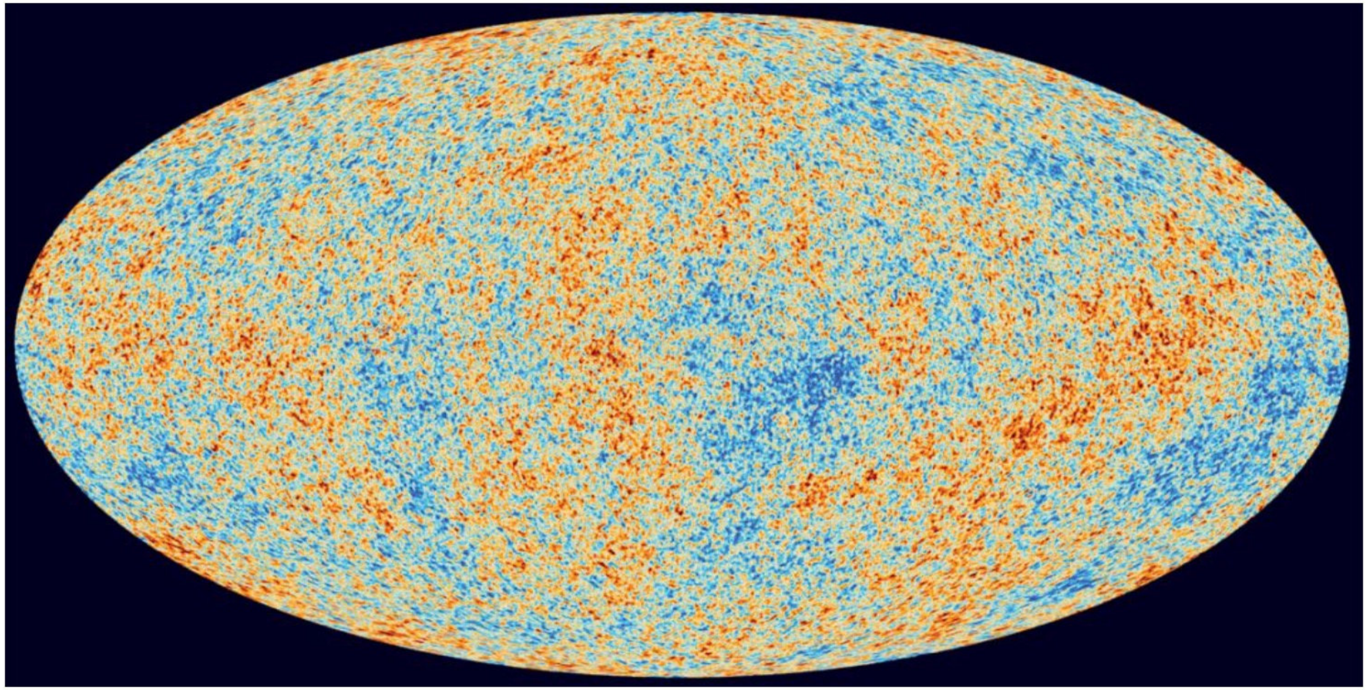
论文标题：Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology

作者：Eleonora Di Valentino, Alessandro Melchiorri, Joseph Silk

期刊：*Nature Astronomy*

发表时间：2019/11/04

瓦伦蒂诺等人最近的论文分析了观测宇宙微波背景辐射的普朗克卫星的数据。普朗克卫星的望远镜测量了过去138亿年中，宇宙微波背景辐射**“引力透镜化”**的程度，以此测量宇宙的平均密度。具体而言，他们研究的是这些宇宙微波背景辐射光子。这些光子在飞向地球的过程中，遇到的物质越多，它们的方向就愈加无法清晰地反映它们在早期宇宙中的起点。在卫星观测数据中，这样的现象呈现的是模糊的效果。根据他们对数据的分析，宇宙的平均密度可能比以前估计的临界密度高5%。也就是说，**在宇宙中平均每立方米有6个质子质量，而不是5.7个。**



宇宙微波背景辐射

根据这项研究，宇宙空间可能是一个封闭的三维球面。而在此之前，基于WMAP卫星对宇宙微波背景辐射的观测结果，以及2013年普朗克卫星的第一批数据，物理学家建立了名为LAMDA-CDM的宇宙学标准模型。在那个模型中，宇宙是平坦的。因此我们可以说，**最新的研究提出的结论是颠覆性的。**

- **大撕裂：宇宙中的所有物质最终将瓦解为不受束缚的基本粒子和辐射**

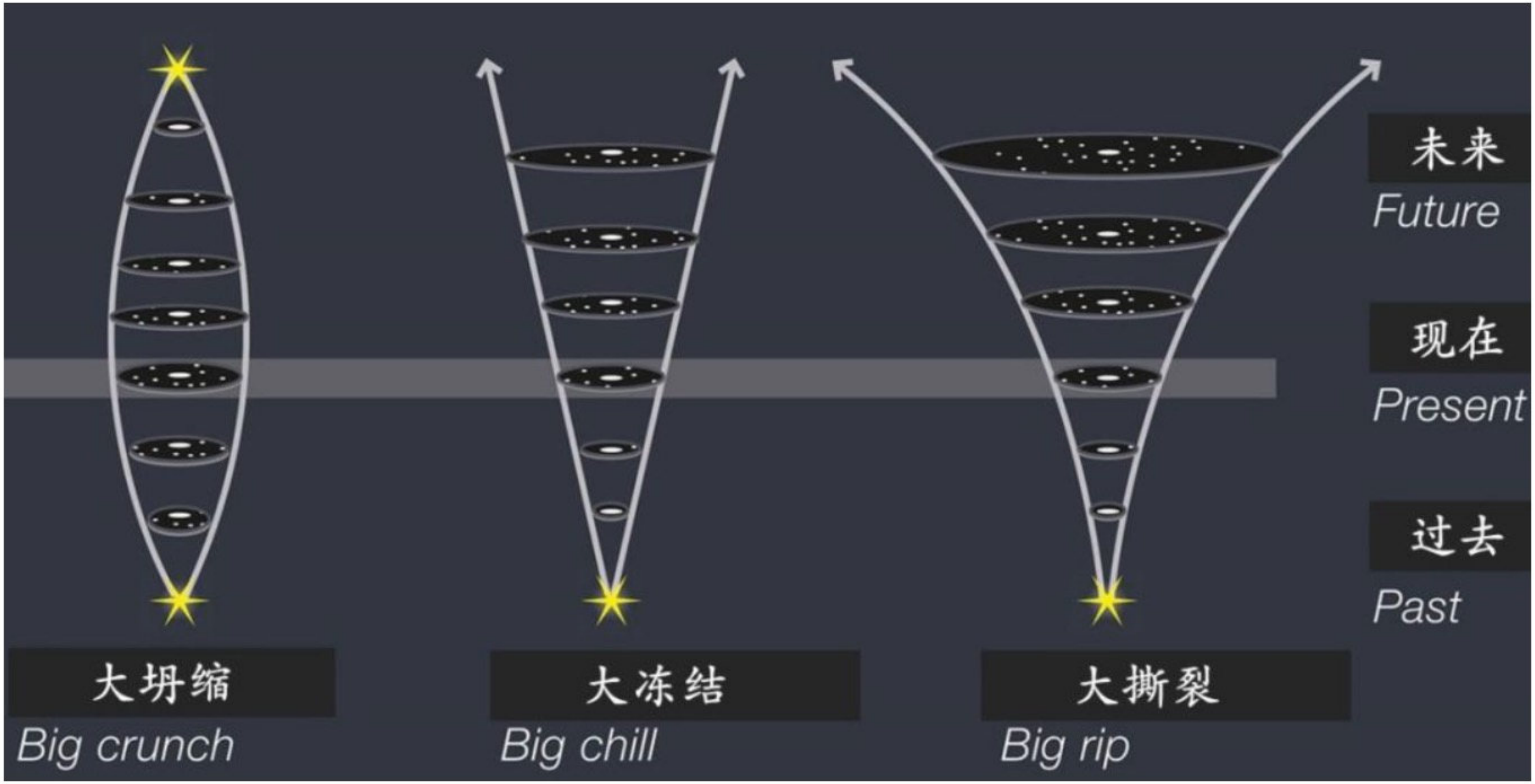
“大撕裂”（Big Rip）假说认为如果暗能量的密度随着时间增加而增加，不管宇宙的空间结构是闭合、平直还是开放的，随着宇宙的不断膨胀所有物质（甚至时空本身）最终都会被逐渐撕碎。如果暗能量是状态方程小于-1的“幽灵暗能量”（phantom dark energy），那么它的密度随着时间的推移而不断增加，从而导致宇宙膨胀的速度越来越快，最终就会使得宇宙中的所有物质都瓦解为不受束缚的基本粒子和辐射。

- **大冻结：宇宙温度最终将趋于绝对零度**

“大冻结”（Big Chill/Big Freeze）也被称为“热寂”（heat death）。这种假说认为随着宇宙的膨胀，气体作为恒星形成所必需的材料，变得越来越稀薄，最终会不足以支撑新的恒星形成。随着恒星形成的停止，宇宙温度越来越低，并最终演化到一种没有热力学自由能的状态，也就是达到热力学平衡 （即具有最大熵），同时宇宙温度也将趋近（但并未达到）绝对零度（零下273.15摄氏度），从而任何宏观物理过程和生命都不复存在。

- **大坍缩：物质的引力作用使得宇宙最终停止膨胀并发生坍缩**

“大坍缩”（Big Crunch）假说认为由于物质的引力作用宇宙的膨胀速度会不断变慢，从而终将停止膨胀并发生坍缩。然而在坍缩之后又将发生什么尚不能确定。其中一种可能性就是宇宙坍缩到它的初始状态并再次发生大爆炸，从而使得宇宙处于“大爆炸”到“大坍缩”再到“大爆炸”这样一种循环的状态。从目前的宇宙学观测来看，产生负压的暗能量肯定存在，而且它的密度高于物质的，因此宇宙的膨胀不会停止，“大坍缩”是不太可能发生的。



示意图展示了宇宙终结的三种可能方式。

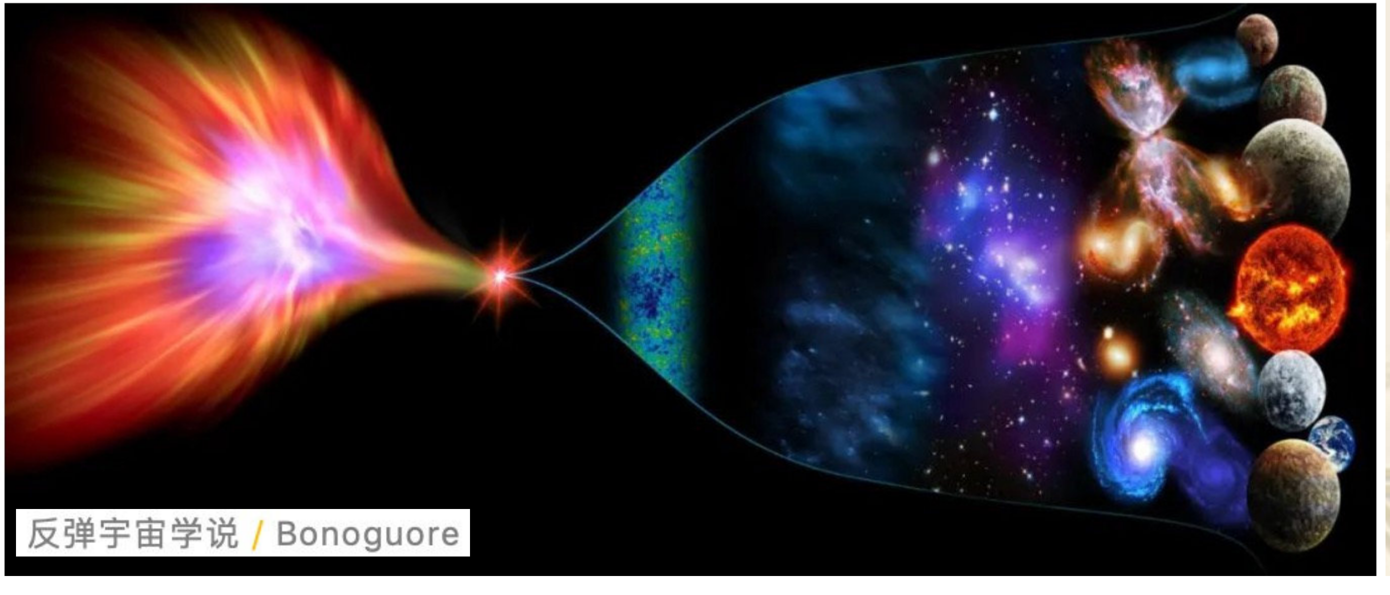
反弹宇宙学

（马潇汉、蔡一夫 中科大）

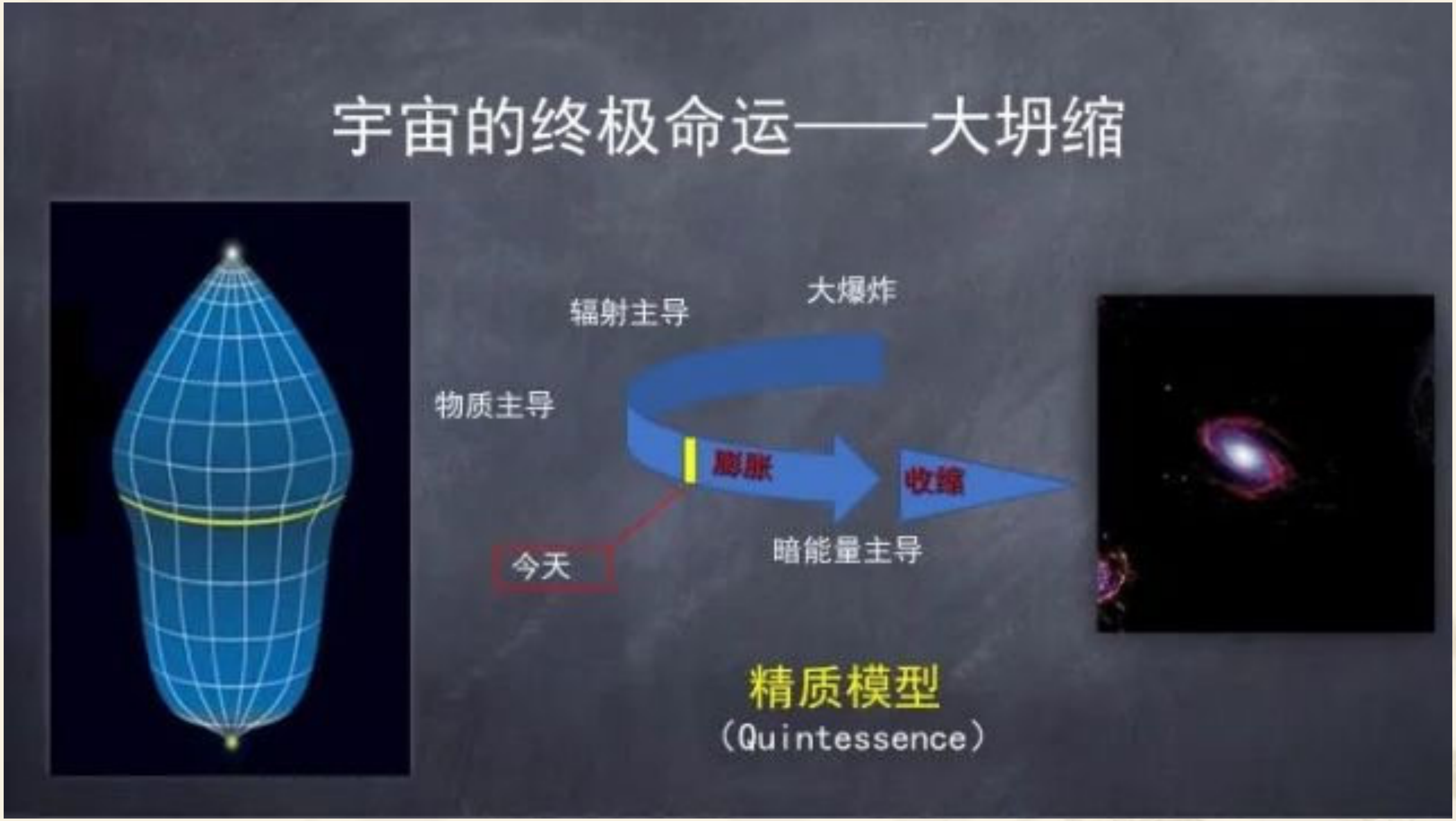
扰动理论在暴胀宇宙学的研究过程中不断发展，在宇宙学理论中扮演着至关重要的角色，是连接理论与观测的重要桥梁。此外，随着对暴胀的深入理解，物理学家逐渐意识到，在这个学说中，大爆炸奇点依然是不可避免的。这意味着**暴胀本身是不完整的理论**，我们不知道暴胀如何开始，也不知道在此之前又发生了什么。同时，人们也开始反思，暴胀是不是描述极早期宇宙的唯一可能?

在这个背景下，一系列的替代图像应运而生，其中最具代表性的就是**反弹宇宙学**。实现反弹宇宙图像的理论模型有很多，例如加拿大麦吉尔大学的罗伯特·布兰登伯格（Robert Brandenberger）教授与英国朴茨茅茨大学的大卫·沃兹（David Wands）于1999年提出物质反弹模型、中国科学院高能所的张新民研究员及团队于2007年提出的精灵反弹模型等。

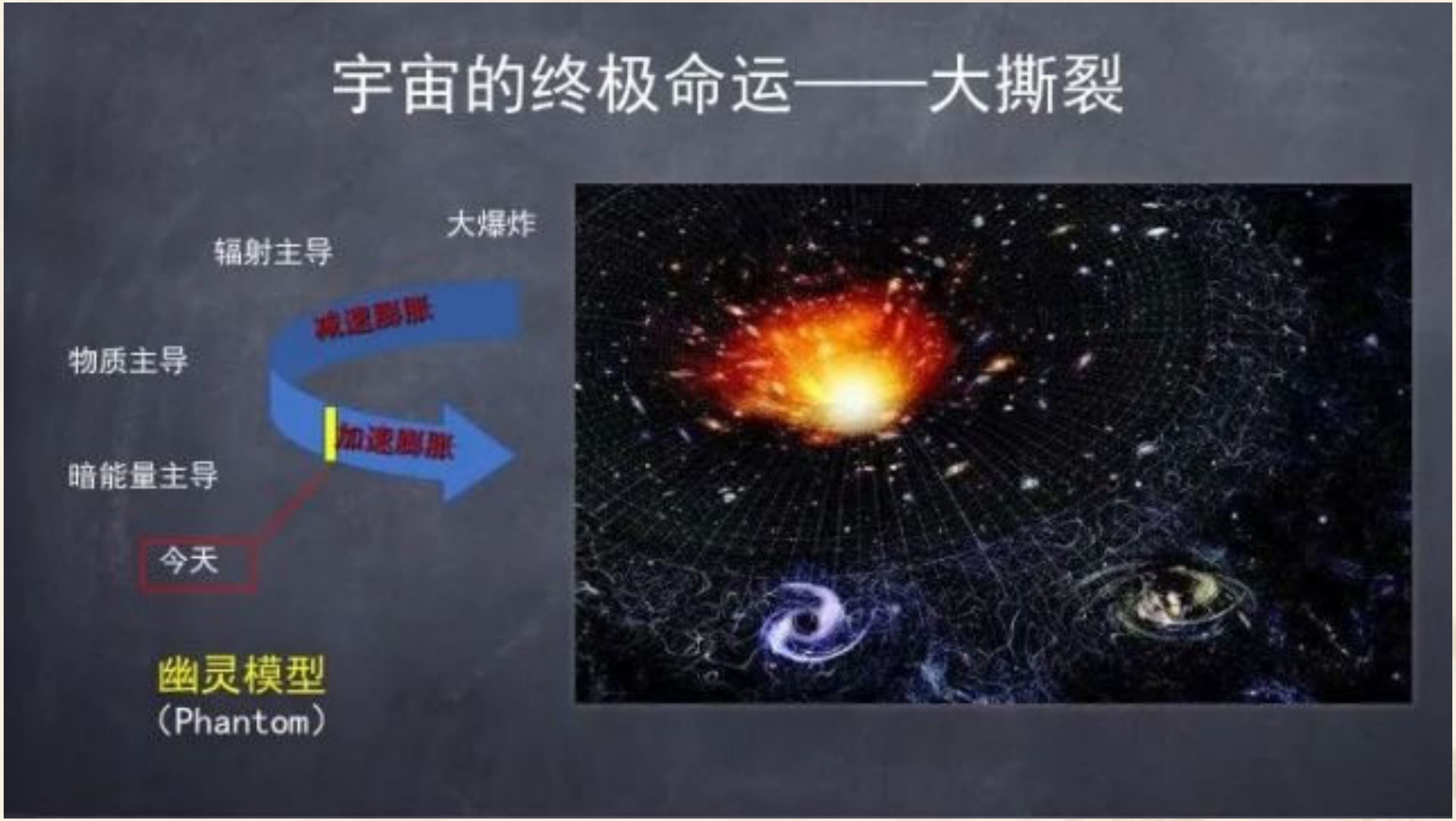
反弹学说同样可以解释热大爆炸宇宙学所面临的初始条件疑难。在这类理论图像中，**大爆炸之前的宇宙处于一个收缩过程**，体积越来越小，直到某一时刻宇宙收缩到一个极小值，然后反弹进入标准的热大爆炸膨胀阶段。由此可见，反弹学说不仅继承了热大爆炸宇宙学的成功之处，还避免了那个会让宇宙学家头皮发麻的时空奇点，进一步推动了热大爆炸宇宙学的理论发展。



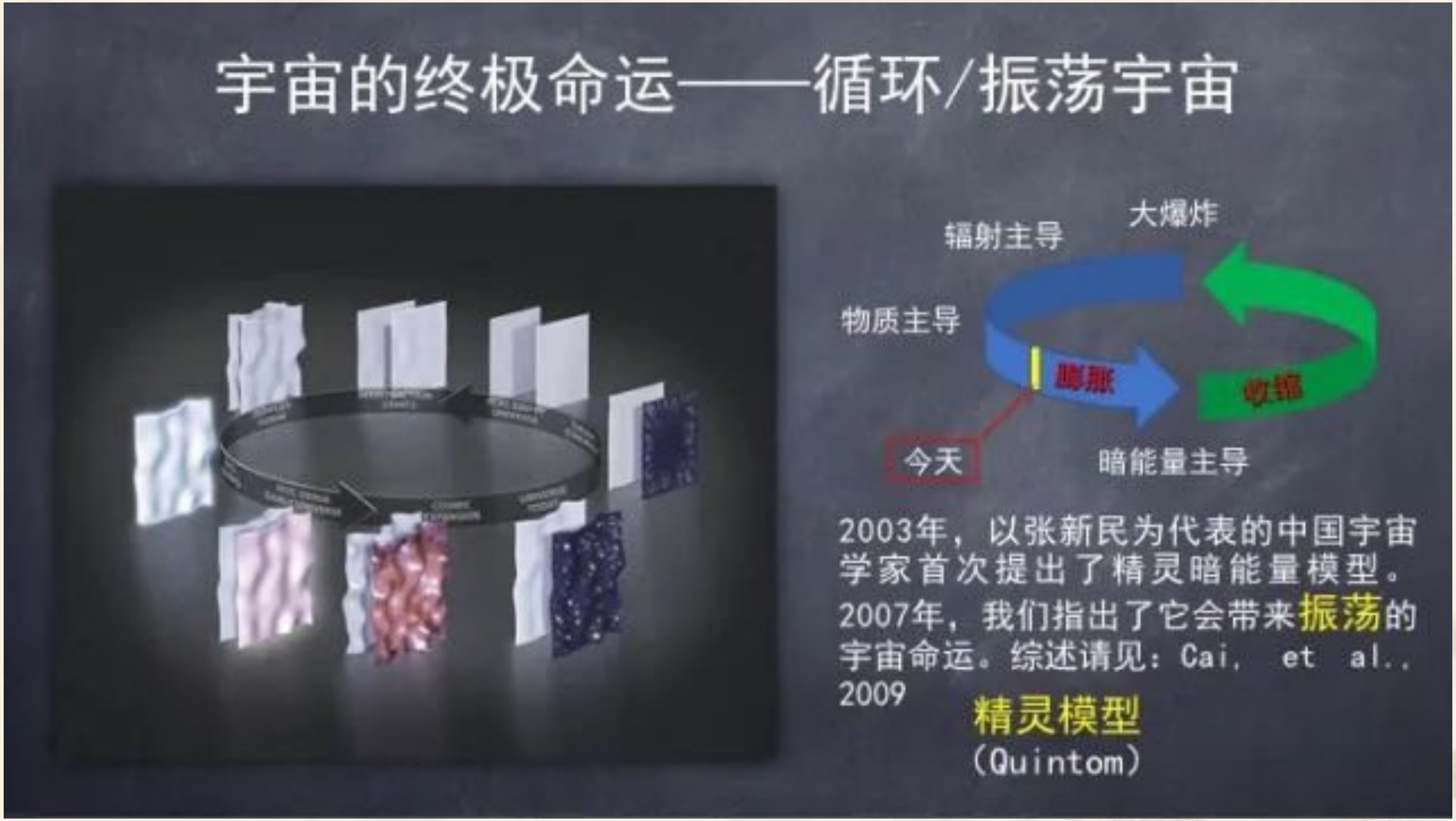
反弹宇宙学说 / Bonoguore



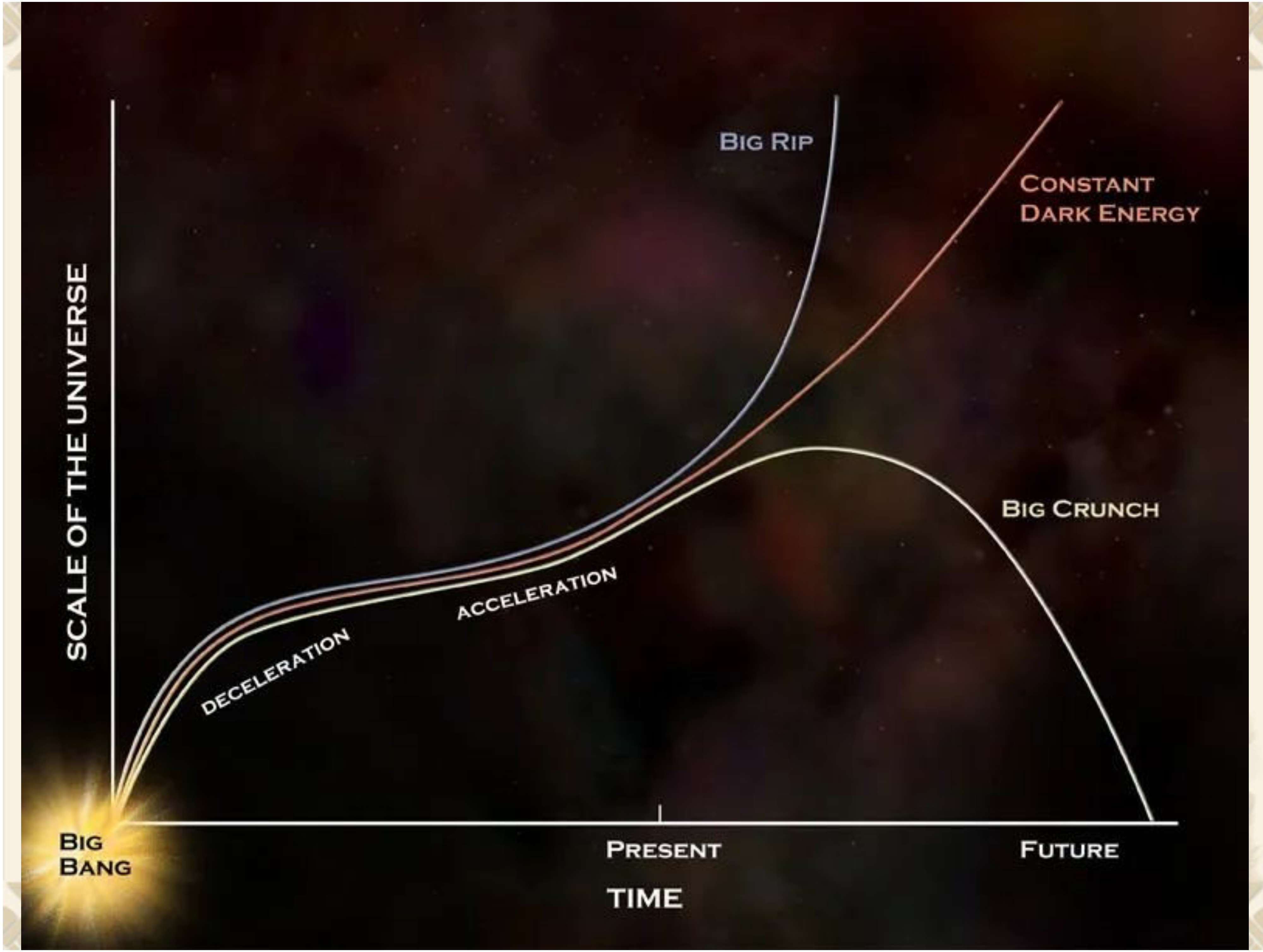
（蔡一夫 中科大）

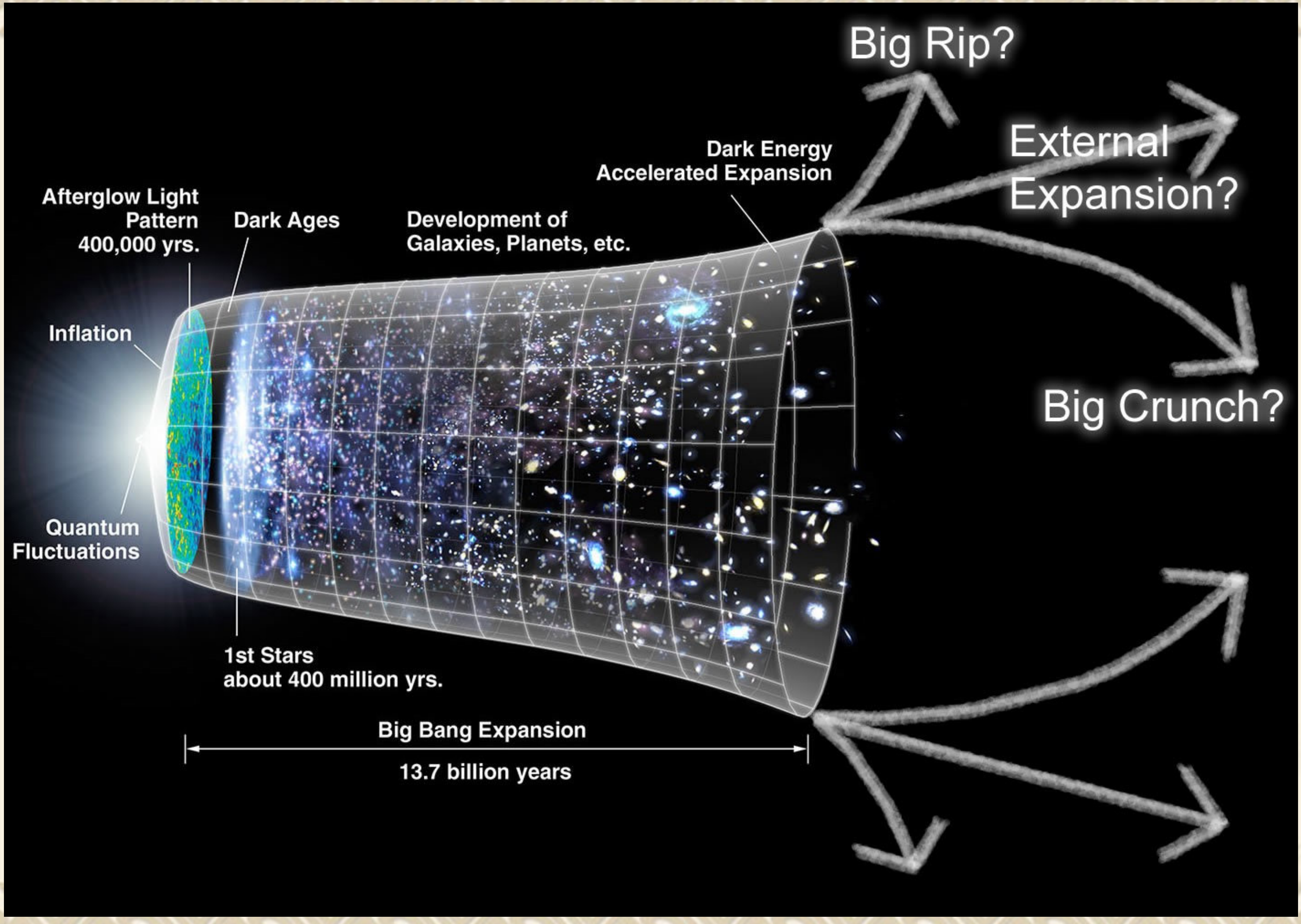


（蔡一夫 中科大）


宇宙的终极命运——循环/振荡宇宙
大爆炸
辐射主导
物质主导
膨胀
收缩
今天
暗能量主导
2003年，以张新民为代表的中国宇宙学家首次提出了精灵暗能量模型。
2007年，我们指出了它会带来振荡的宇宙命运。综述请见：Cai, et al., 2009
精灵模型
(Quintom)

（蔡一夫 中科大）


Big Rip
Constant
Dark Energy
Big Crunch
Scale of the Universe
Acceleration
Deceleration
Big
Bang
Present
Future
Time


Big Rip?
External
Expansion?
Big Crunch?
Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

Astronomy Picture of the Day

Discover the cosmos! Each day a different image or photograph of our fascinating universe is featured, along with a brief explanation written by a professional astronomer.

2018 October 7

The Scale of the Universe - Interactive
Animation Credit & Copyright: Cary & Michael Huang

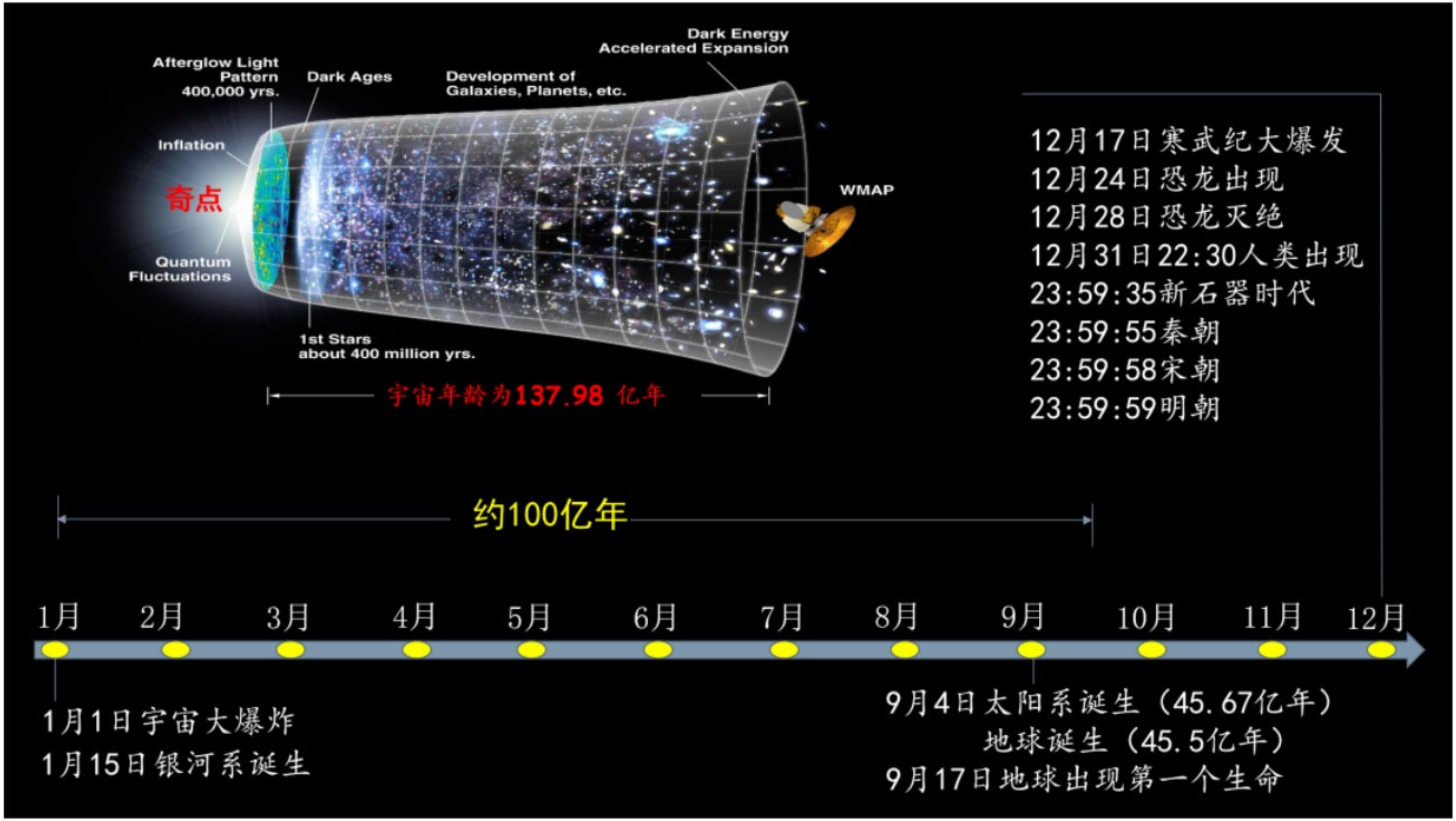
The Scale of the Universe 2

震撼你的视野：宇宙尺度大比拼

Our Story in One Minute

Video Credit & Copyright: MelodySheep, Symphony of Science, John Boswell; *Music Credit:* Our Story

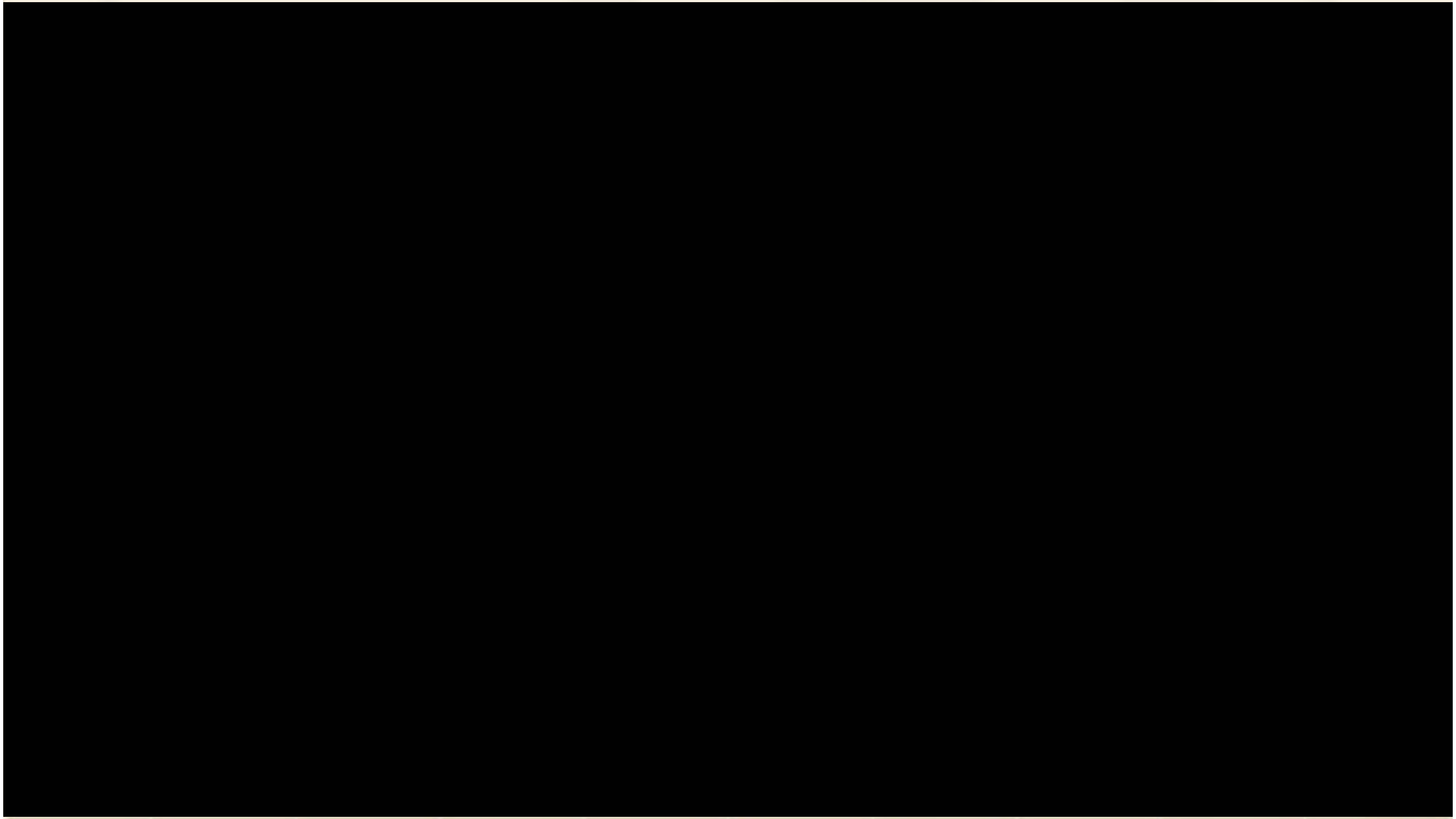
Explanation: Do you have a minute -- to see the entire backstory of human existence? This thrilling video culls together multiple teasing video snippets in an attempt to succinctly summarize our history. And sets it to music. Briefly depicted, from start to finish, is an artistic animation of the Big Bang, a trip across the early universe, the formation of the Earth and Moon, the emergence of multi-celled life and plants, the rise of reptiles and dinosaurs, a devastating meteor strike, the rise of mammals and humans, and finally the rise of modern civilization. The minute movie ends with a flyover of the modern skyscraper and a human standing atop a snow covered mountain.



宇宙的形成演化时标示意图 | 图源：改编自NASA

（蒋云 紫金山天文台）

Cosmic Origins



世界上有两件东西能够深深地震撼人们的心灵，一件是我们心中崇高的道德准则，另一件是我们头顶上灿烂的星空。

------ 康德

爱因斯坦：宇宙最不可理解的是它是可以理解的。

追逐梦想

探索宇宙

Albert Einstein: The most incomprehensible thing about the world is that it is comprehensible.
Yongquan Xue: The most incomprehensible thing to me is that I can go with you side by side. :)

The Universe, yours to discover!

宇宙那么大，我想去看看！