

星际穿越的科学问题

--黑洞、白洞和虫洞

张双南

中国科学院高能物理研究所
粒子天体物理中心

2014-11-30

21世纪展览馆



免责声明DISCLAIMER

- ✓ 本报告是科普报告，因此对于有关的科学理论和背景的介绍是非常不完备的，没有反映所有最新的研究进展和学术观点的全貌。
- ✓ 本报告重点介绍了有关基本概念和所谓“主流”的观点，但是这并不表明“主流”的观点是正确的。科学的发展就是非主流不断取代主流的过程。
- ✓ 在本报告中，应主办方的要求也介绍了我自己（以及合作者）的相关研究工作，但是这并不表明我们的工作比其它学者的更好、更重要或者更加正确。
- ✓ 本报告的所有内容都只能用于非商业的科普和教育目的，不能用于商业或者其它任何目的。
- ✓ 在任何场合使用本报告的内容都需要注明来源。

电影大师和科学大家的对话



电影科学顾问
物理学家索恩教授

电影导演
诺览先生

《星际穿越的科学》（索恩，2014）

科学顾问和导演的约定

- ✓ 电影的任何内容都不能违反确立的物理规律和宇宙的知识。
 - ✓ 确保了电影的科学严谨。
- ✓ 对于尚未理解的物理规律和宇宙的推测必须来自真正的科学，而且至少有些“受人尊敬”的科学家认为是可能的。
 - ✓ 给艺术创作留下了空间。

以人类的命运为主题，以父女亲情为主线，普及了科学知识，激发了社会对科学探索的热情，既宣传了正能量，也获得了商业成功！

详情 情 情



张双南

刚刚看完“星际穿越”回来。震撼，感动，折服！科学science，艺术art，人性humanity，完美结合！也不禁感叹为什么这么多高度原创的东西都来自于地球的那边？我们的大师们哪儿去了？

11月17日 23:58 删除

11月18日 06:41

我看了不少《科幻世界》的作品，觉得中国不乏好的作者和灵感，问题是我们整体电影工业的落后。软实力也是要通过硬实力体现啊。

11月18日 08:24

穿越了一把呀👉不要温和地走进那个良夜

11月18日 08:25

美国人地球呆腻了老想穿越，中国人还是恋恋红尘，情国家园啊

张双南回复 11月18日 10:53

要是还没有看，就赶紧去看吧

11月18日 10:55

已经推荐你参加采访，讲这个科普。

张双南回复 11月18日 11:03

由美国重的时候可以带上

11月18日 14:25

11月18日 15:12

他们理解科学是什么

11月18日 18:26

因为在中国，懂艺术又懂科学的大师还没有出现！

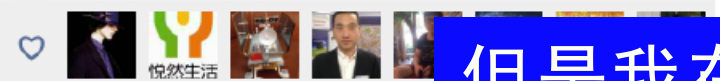
张双南回复 11月18日 18:34

艺术家不一定要懂科学，但是需要理解科学是什么。

回复张双南 11月18日 18:38

能拍出科学大片的导演还是懂一些科学知识吧

但是我在这个报告里面只和大家分享《星际穿越》中的主要科学背景



也去学习学习

11月18日 01:17

呵呵，我就说张老师不可能看不懂

11月18日 03:23

哈哈，感慨吧！👍

11月18日 06:09

昨晚与儿子一起看的这个电影。两个字：震撼！

11月18日 06:41

我看了不少《科幻世界》的作品，觉得中国不乏好的作者和灵感，问题是我们整体

10个问题

1. 黑洞是什么、黑洞存在吗、黑洞在哪里？
2. 黑洞如何形成、黑洞会干什么？
3. 进入黑洞揭秘的后果严重吗、能够从里面出来吗？
4. 什么是白洞、白洞和黑洞是什么关系？
5. 白洞存在吗？
6. 什么是虫洞、虫洞存在吗？
7. 虫洞和黑洞、白洞是什么关系？
8. 这些洞和时间旅行是什么关系？
9. 五维时空是怎么回事、和这些洞以及时间旅行又是什么关系？
10. 上面这些问题哪些是科学问题、哪些是哲学问题、哪些是宗教问题？

穿越回去请教爱因斯坦？



爱因斯坦显然也被这些问题困扰，
我们只好自己动手开展科学研究。

什么是黑洞？

- ✓ 经典物理：如果连自己的光都不能逃出去的话→“暗”星
 - ✓ 提供中心引力场的天体的逃逸速度为：

$$V = \sqrt{\frac{2GM}{R}} > c$$

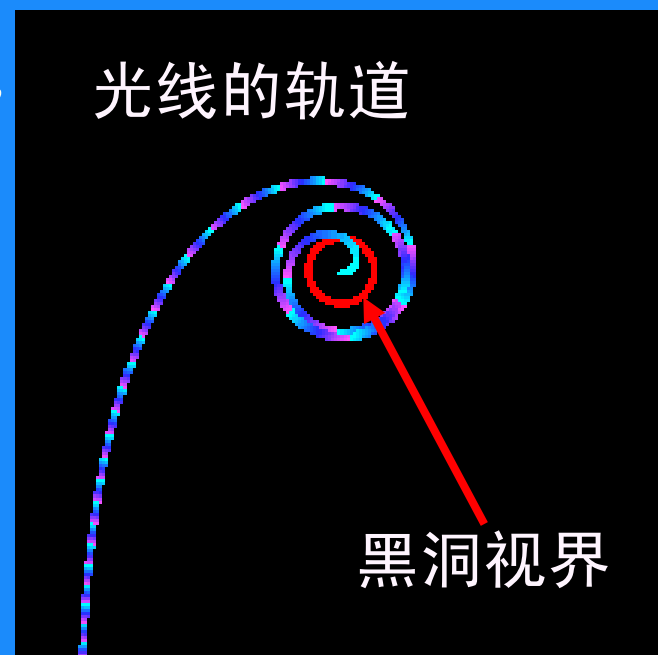
$$R < R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

(对于太阳, $R_s=3$ km)

- ✓ 广义相对论: Schwarzschild的 ‘奇点’
物质接近 R_s 的时候.

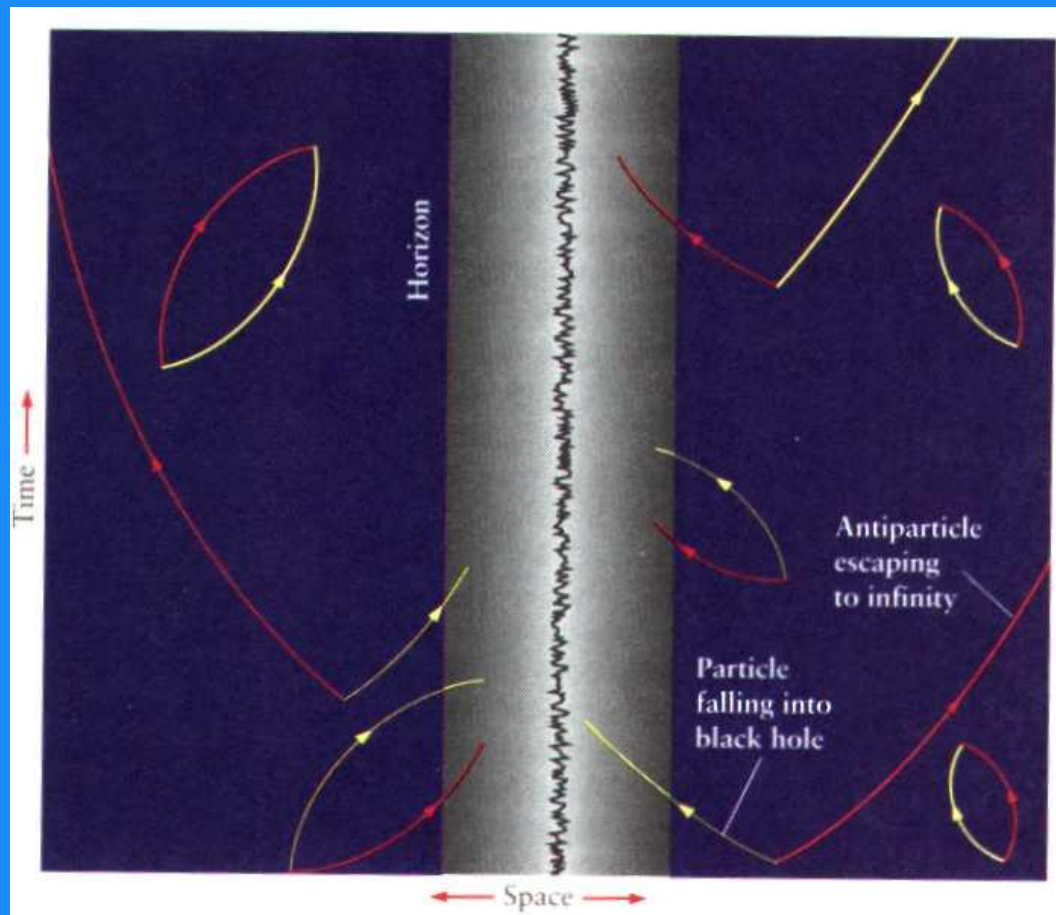
- ✓ 等效引力 $\rightarrow \infty$ “洞”
- ✓ 光线红移 $\rightarrow \infty$ “黑”

- ✓ Wheeler 1976年把这种天体命名为 ‘黑洞’：最好的天文术语



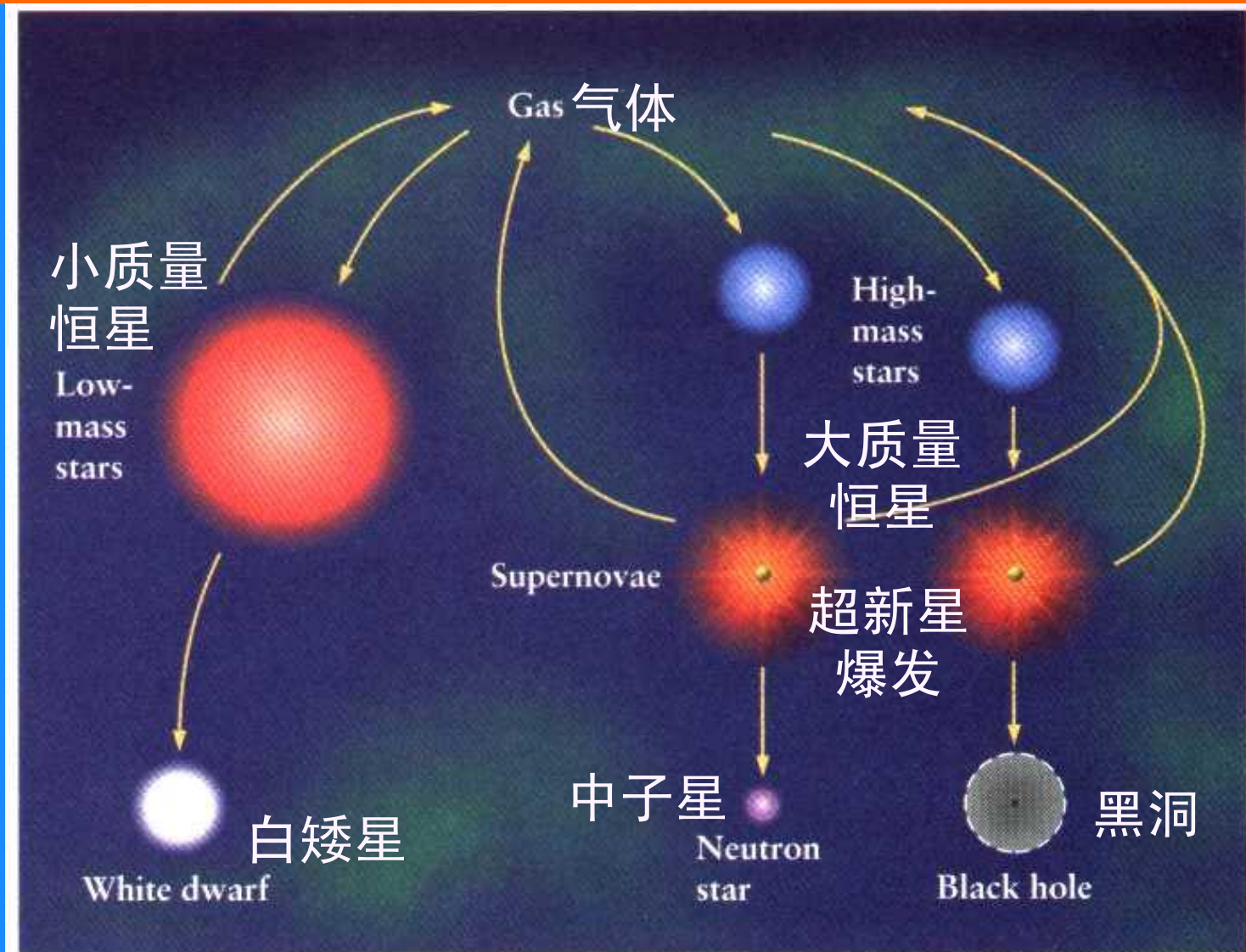
自我毁灭的微小质量（量子）黑洞？

- ✓ 霍金提出的
- ✓ 质量: 10^{15} grams
 - ✓ 更小的已经消亡了
- ✓ 半径: 10^{-13} cm
- ✓ 密度: 10^{53} grams/cm³
- ✓ 温度: 10^{12} K
- ✓ 寿命: 10^{10} years
 - ✓ 有些正在消亡
- ✓ 命运: 蒸发导致最后爆炸
 - ✓ 产生强烈伽玛射线
 - ✓ 目前还没有观测证据
 - ✓ 霍金得不到诺奖

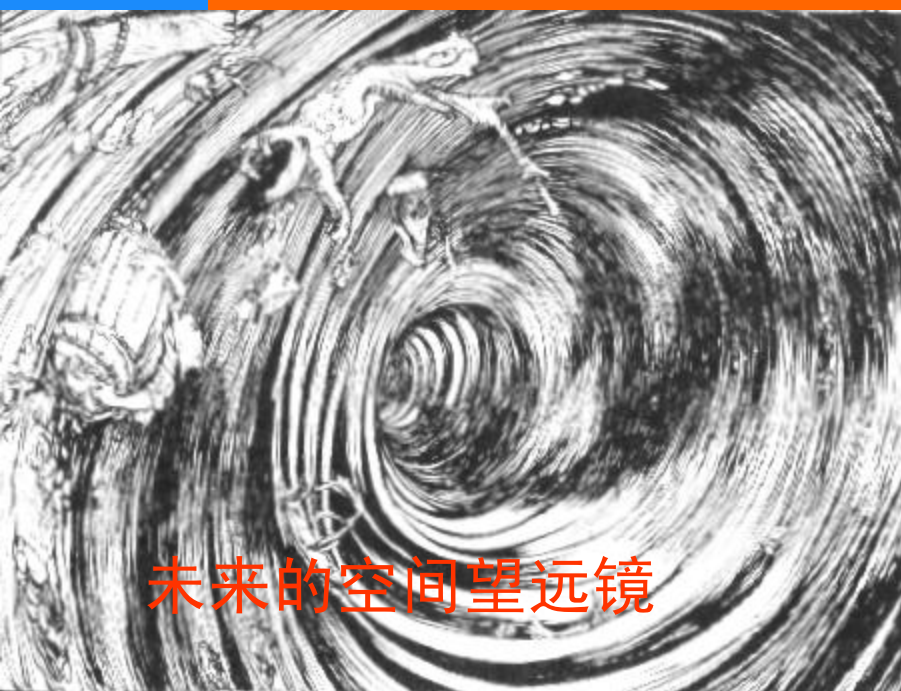


而且：杨荣佳、张双南，2009，PRD：
量子黑洞蒸发到最后不会爆炸！

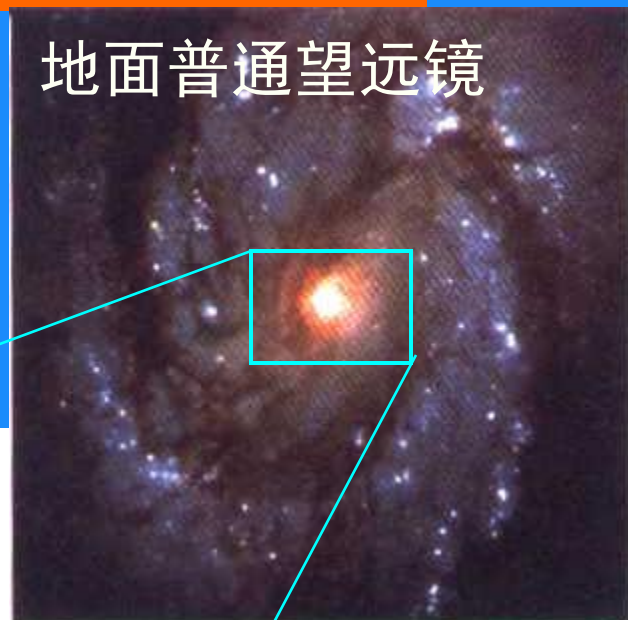
作为恒星遗骸的恒星质量黑洞



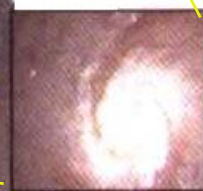
星系中心吞噬万物的超大质量黑洞



未来的空间望远镜



地面普通望远镜

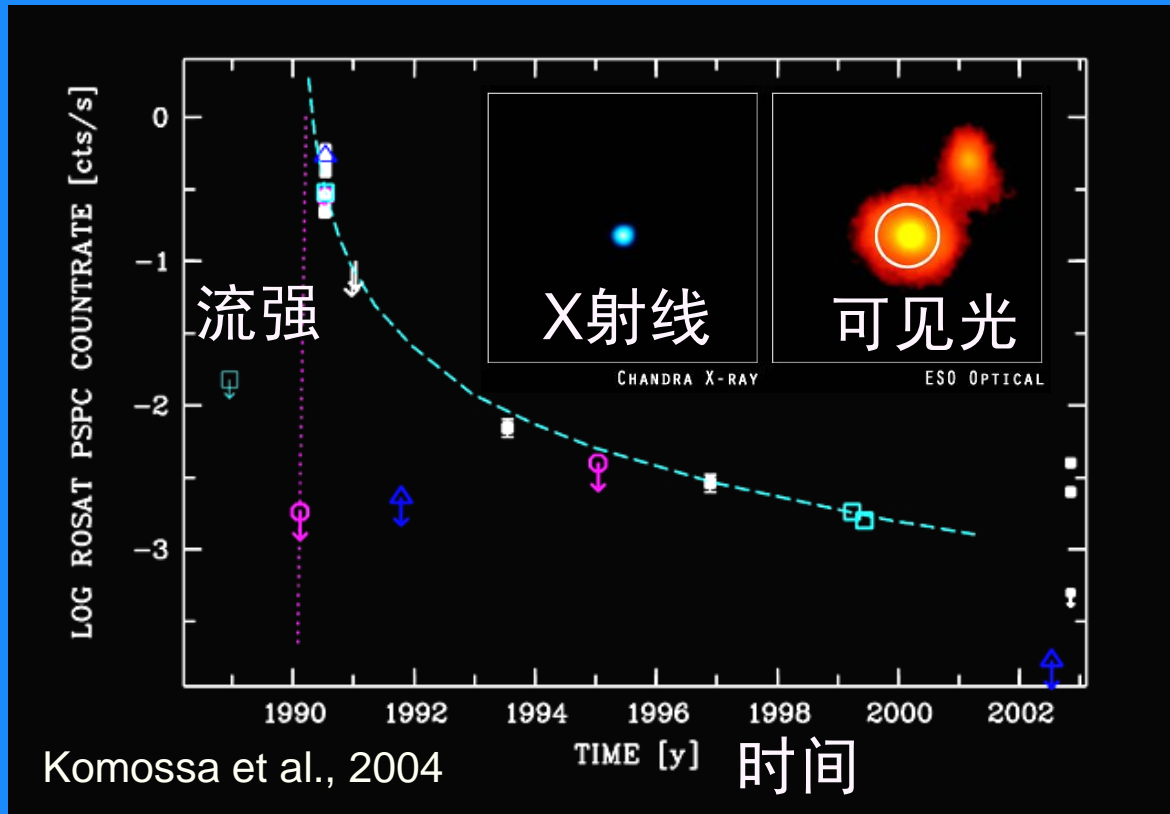


哈勃空间望远镜

超大质量黑洞吞噬恒星的例子



恒星会掉向普通星系中心的黑洞。在下落过程中，恒星被黑洞强烈的潮汐力撕裂成碎片，形成绕黑洞的吸积盘，表现出像类星体的强烈X射线辐射。



有些星系中心的X射线辐射表现出快速上升、缓慢衰减的特性→黑洞正在吞噬恒星

吞噬恒星可能是类似银河系中心的百万太阳质量黑洞增长的主要模式（郑、陆、黄、张，2007）

各种不同质量的黑洞： 中学物理

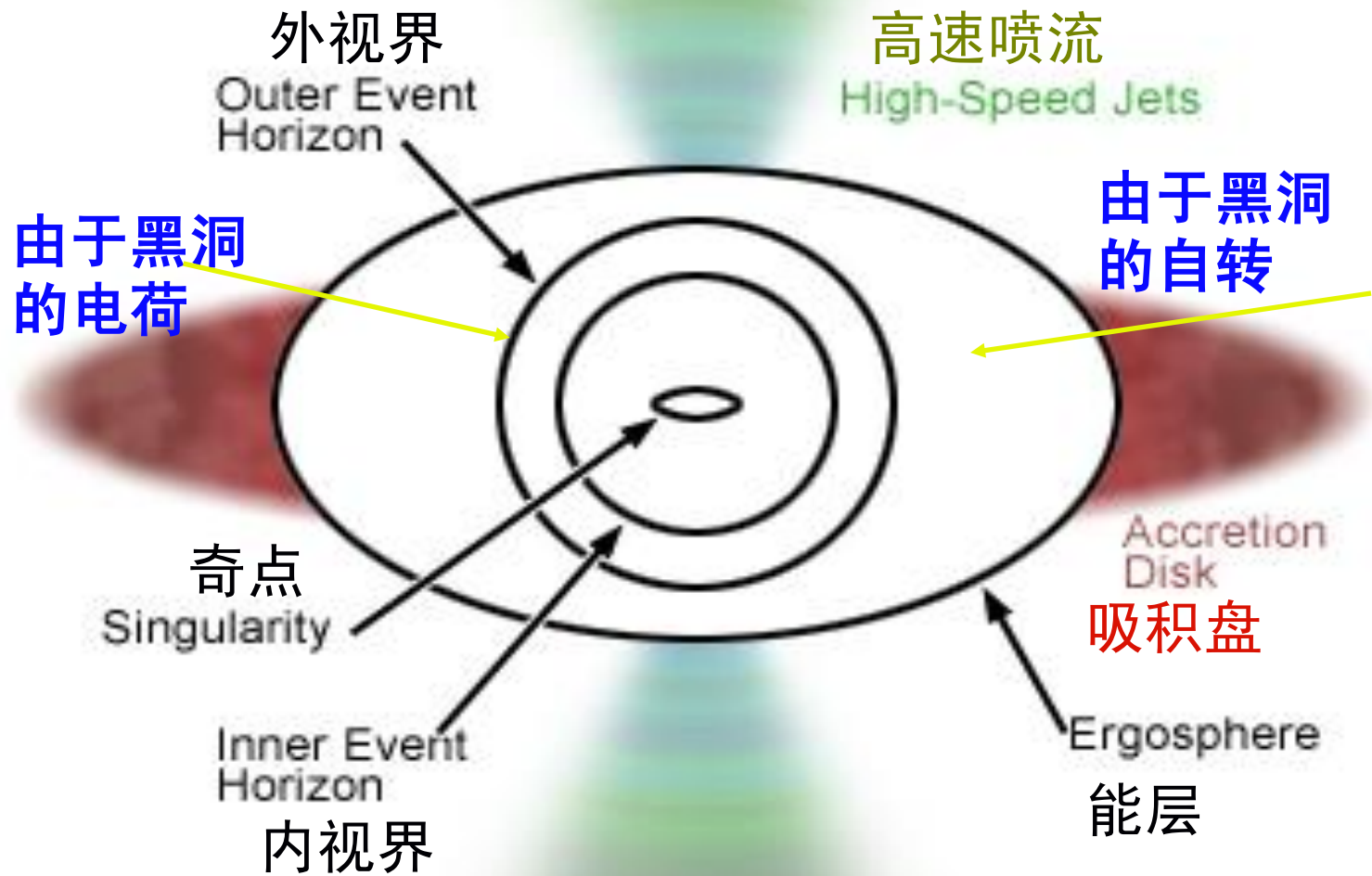
半径	密度	温度	寿命
$R \propto M$	$\rho \propto 1/M^2$	$T \propto 1/M$	$\tau \propto M^3$

黑洞的种类	质量 太阳	半径 cm	密度 g/cm ³	温度 Kelvin	寿命 Year	评论
微小质量？	10 ⁻¹⁸	10 ⁻¹³	10 ⁵³	10 ¹²	10 ¹⁰ ?	大爆炸时形成；正在死亡？
恒星质量	10	10 ⁶	10 ¹⁵ 原子核	10 ⁻⁷	10 ⁶⁷	单个大质量恒星死亡
中等质量？	10 ²⁻⁵	10 ⁸	10 ⁵⁻¹¹	10 ⁻⁹	无穷长	单个巨大第一代恒星死亡；或者星团塌缩
超大质量	10 ⁶⁻¹⁰	10 ¹⁴	10 ^{-5-10³}	10 ⁻¹⁵	无穷长	星系中心；持续增长之中

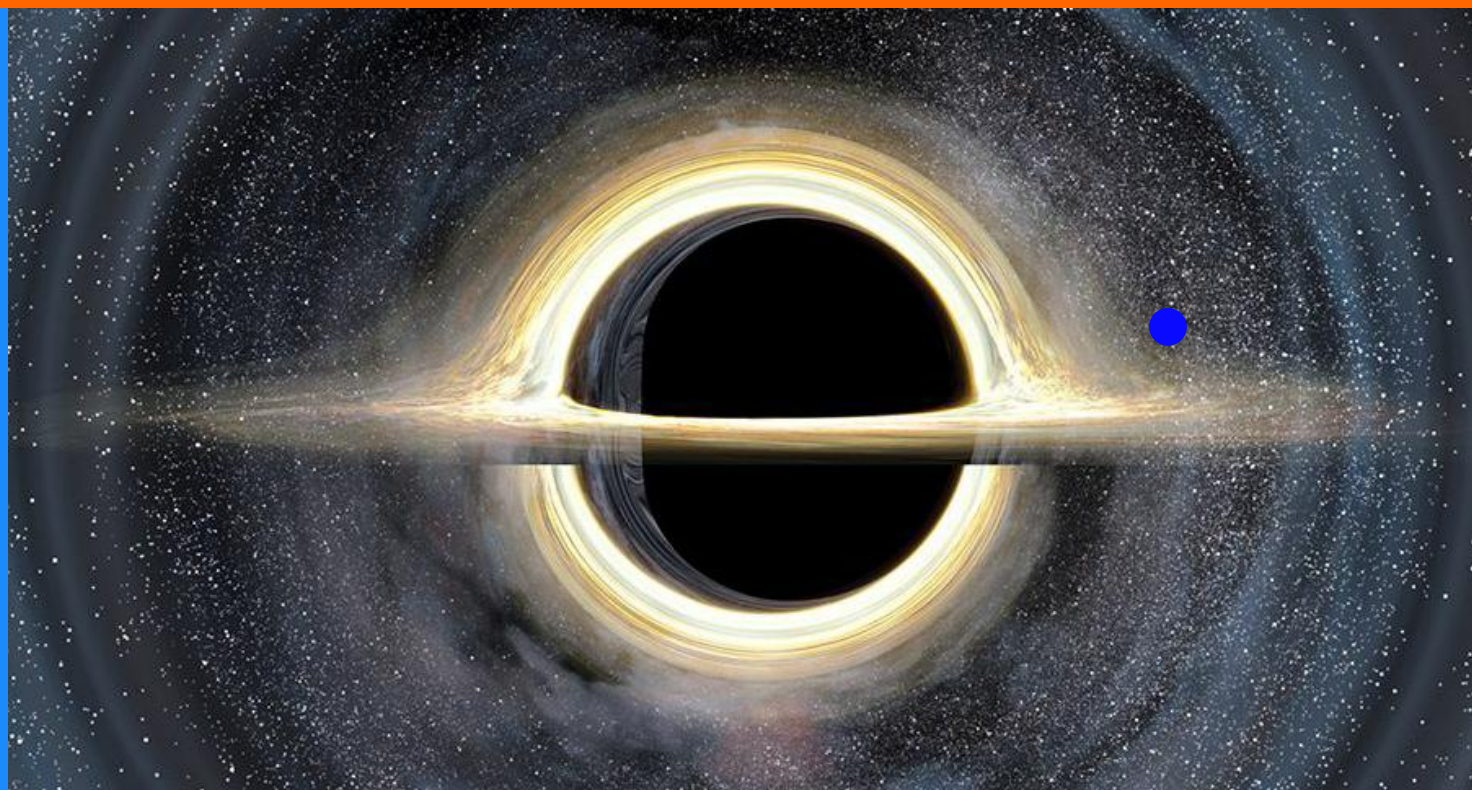
太阳质量 2×10^{33} gram

Kerr Black Hole

高速自转的黑洞



高速自转黑洞的“照片”



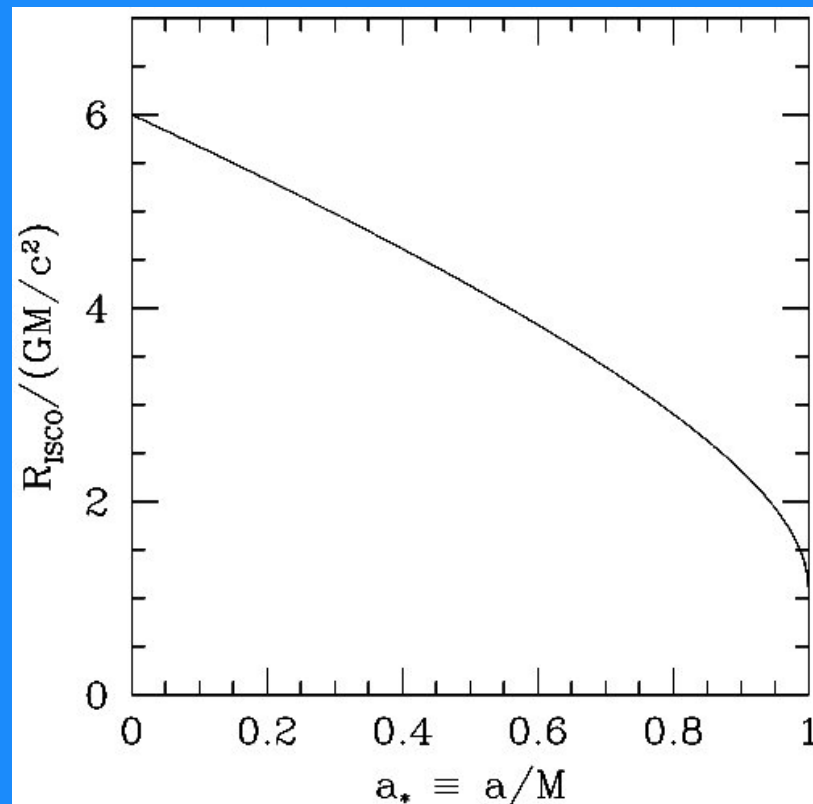
《星际穿越》的黑洞必须同时具有1亿倍的太阳质量和高速的自转，才能产生1小时=7年的效果，而且宇航员不被黑洞的潮汐力所撕碎、吸积盘辐射不太强等。

测量黑洞的自转



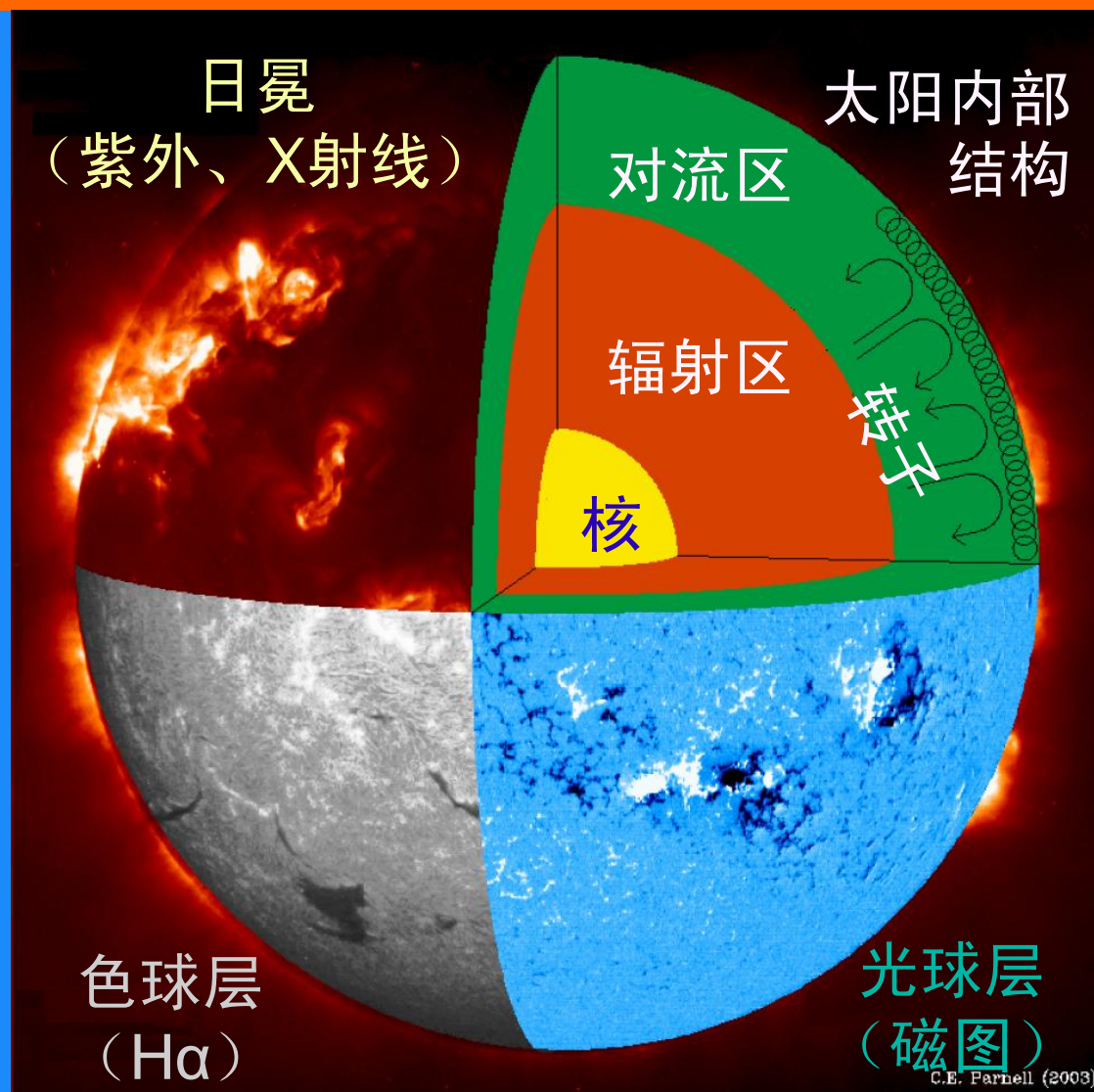
$$L = 4\pi D^2 F = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$\left(\frac{R}{D}\right)^2 = \frac{F}{\sigma T^4}$$

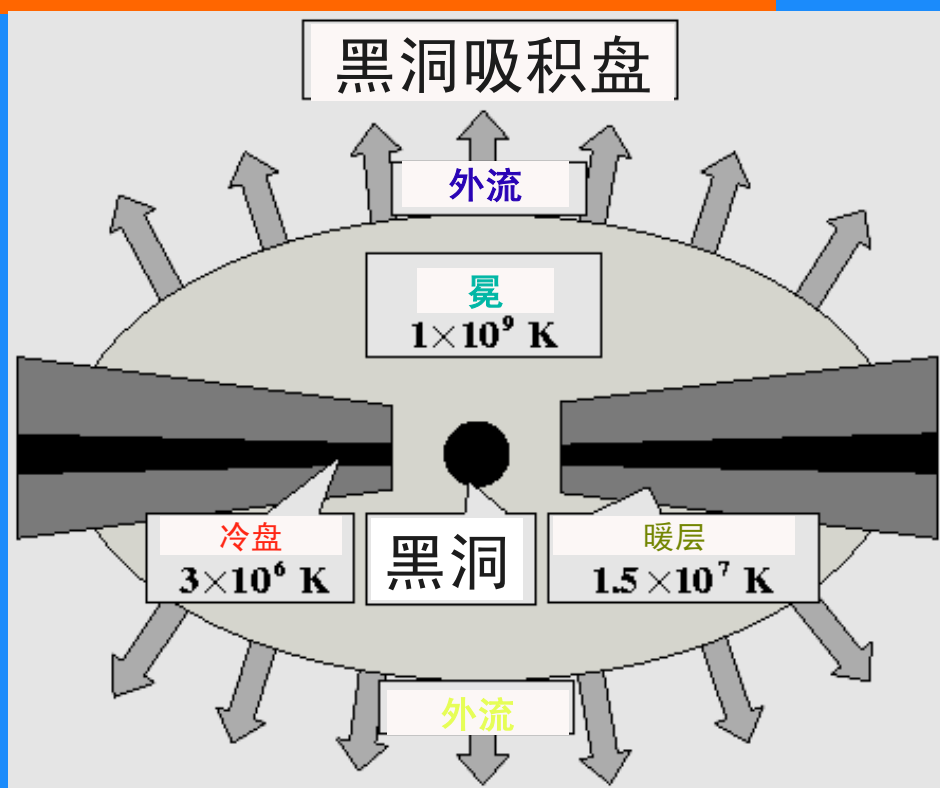
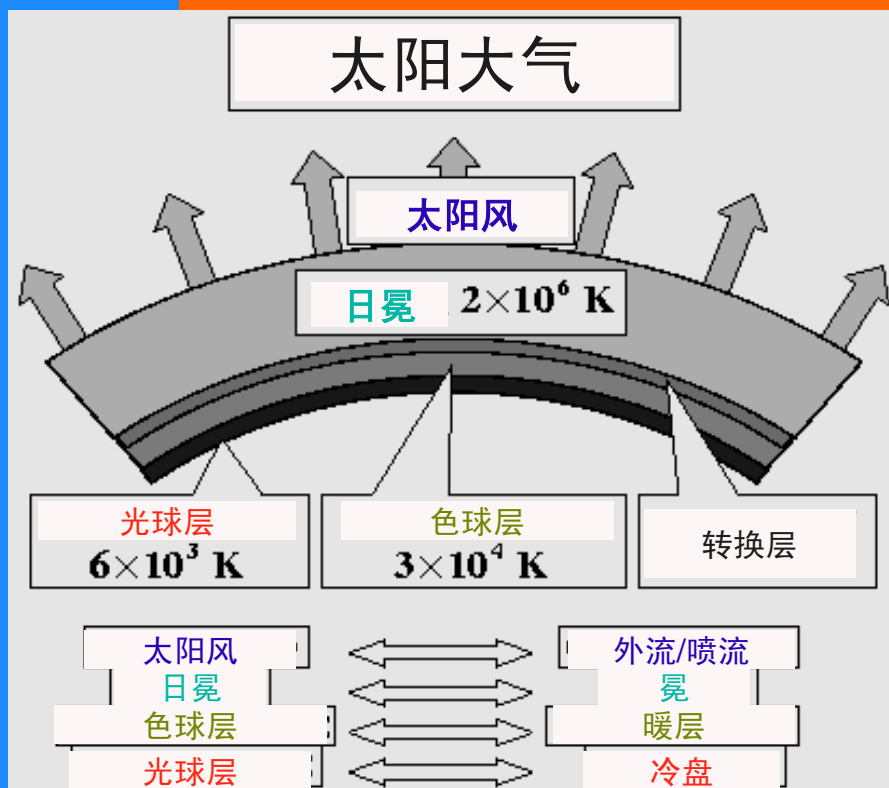


张双南、崔伟和陈莞1997年提出了利用黑洞X射线辐射连续谱测量黑洞自转的方法，目前得到了广泛的应用（被300多篇论文引用），发现很多黑洞高速自转。

万物生长靠太阳



黑洞的形态类似太阳



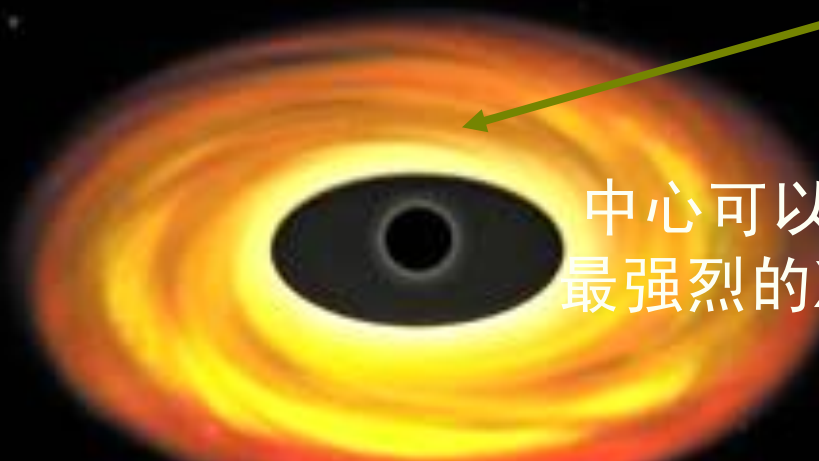
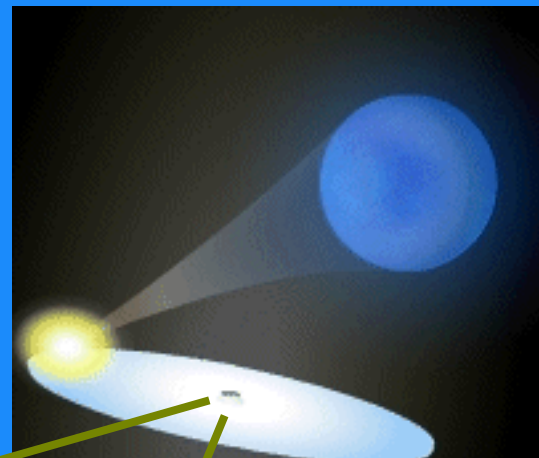
$500 \times \text{太阳大气的温度} = \text{黑洞吸积盘的温度}$

$$T \propto E^{1/4} \propto B^{1/2} \Rightarrow \frac{T_{\text{DISK}}}{T_{\text{SUN}}} \approx \left(\frac{B_{\text{DISK}}}{B_{\text{SUN}}} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{10^8 \text{ G}}{500 \text{ G}} \right)^{1/2} \approx 500$$

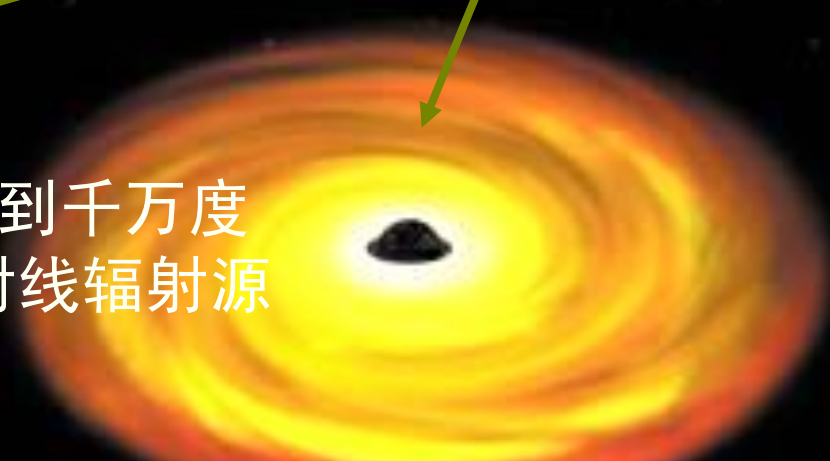
张双南 等, *Science*, Feb. 18, 2000

黑洞远远比太阳能干

- ✓ 强引力场吸引物质形成吸积盘
- ✓ 引力势能转化为辐射：已知辐射效率最高的辐射
 - ✓ 核聚变：p-p 链 把 0.7% 的物质静止质量转化为辐射（太阳能源）



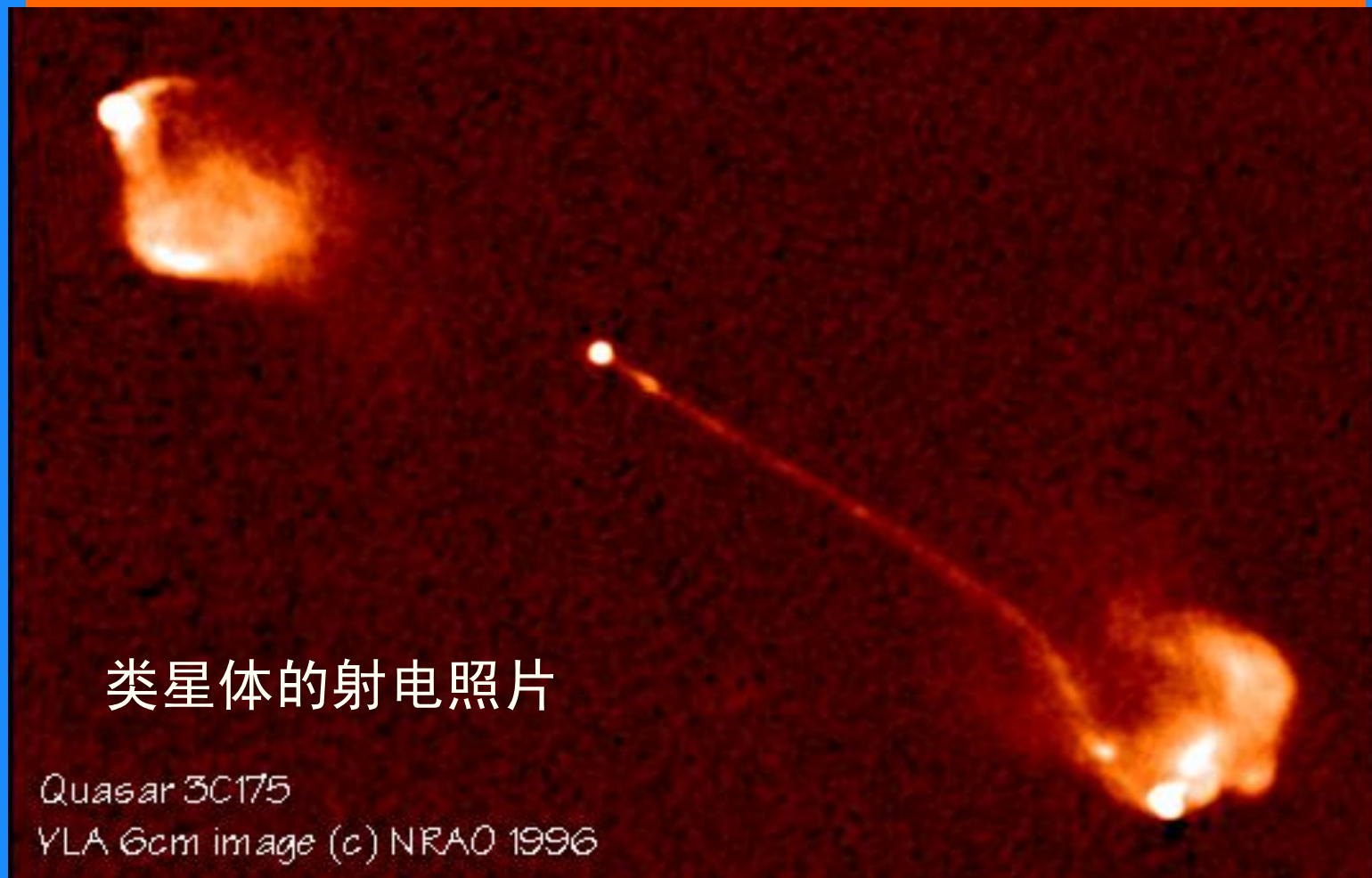
不转动黑洞：辐射效率 $\sim 6\%$



转动黑洞：辐射效率 $\sim 40\%$

中心可以达到千万度
最强烈的X射线辐射源

黑洞会产生强烈的喷射

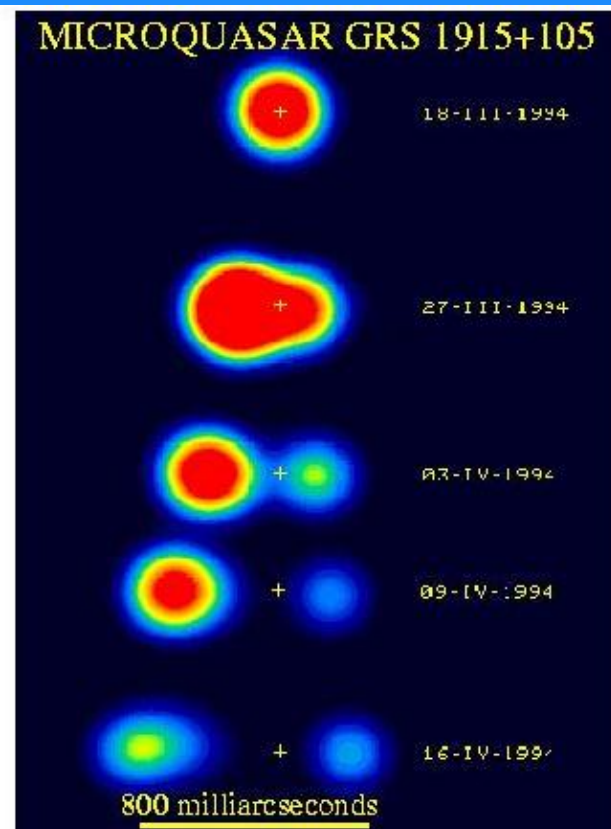
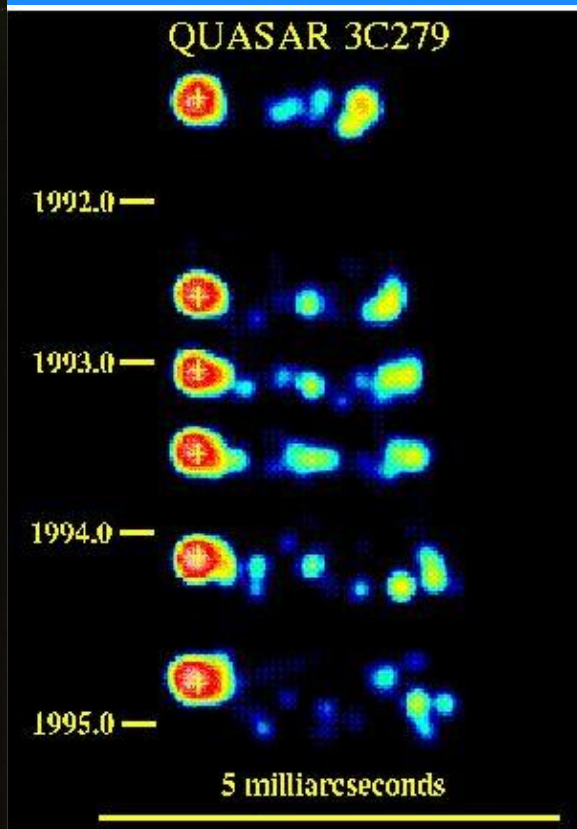


类星体的射电照片

Quasar 3C175

YLA 6cm image (c) NRAO 1996

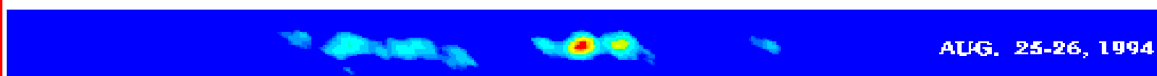
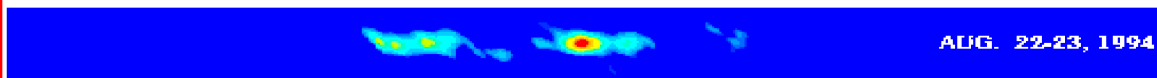
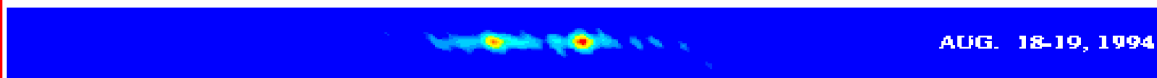
有些恒星级黑洞是微类星体



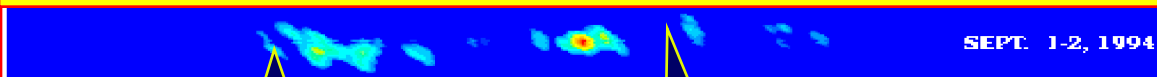
Mirabel & Rodriguez, 1994

第二个微类星体：GRO J1655-40

NRAO 18cm VLBA IMAGES
GRO J1655-40

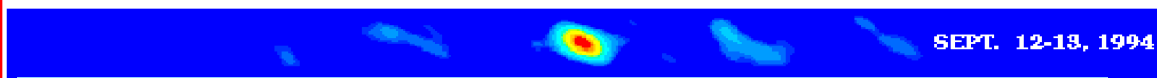
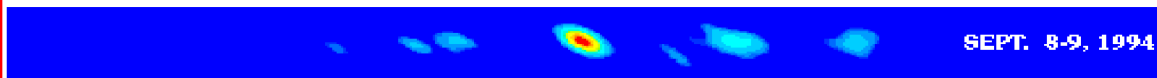


张双南等于1994年发现。研究最充分的恒星质量黑洞，质量是太阳的7倍，通过超新星爆发形成。

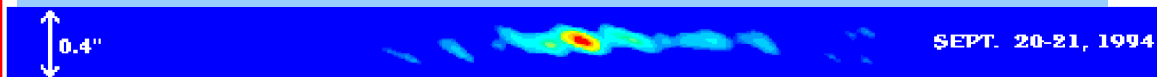


1.2c

0.7c



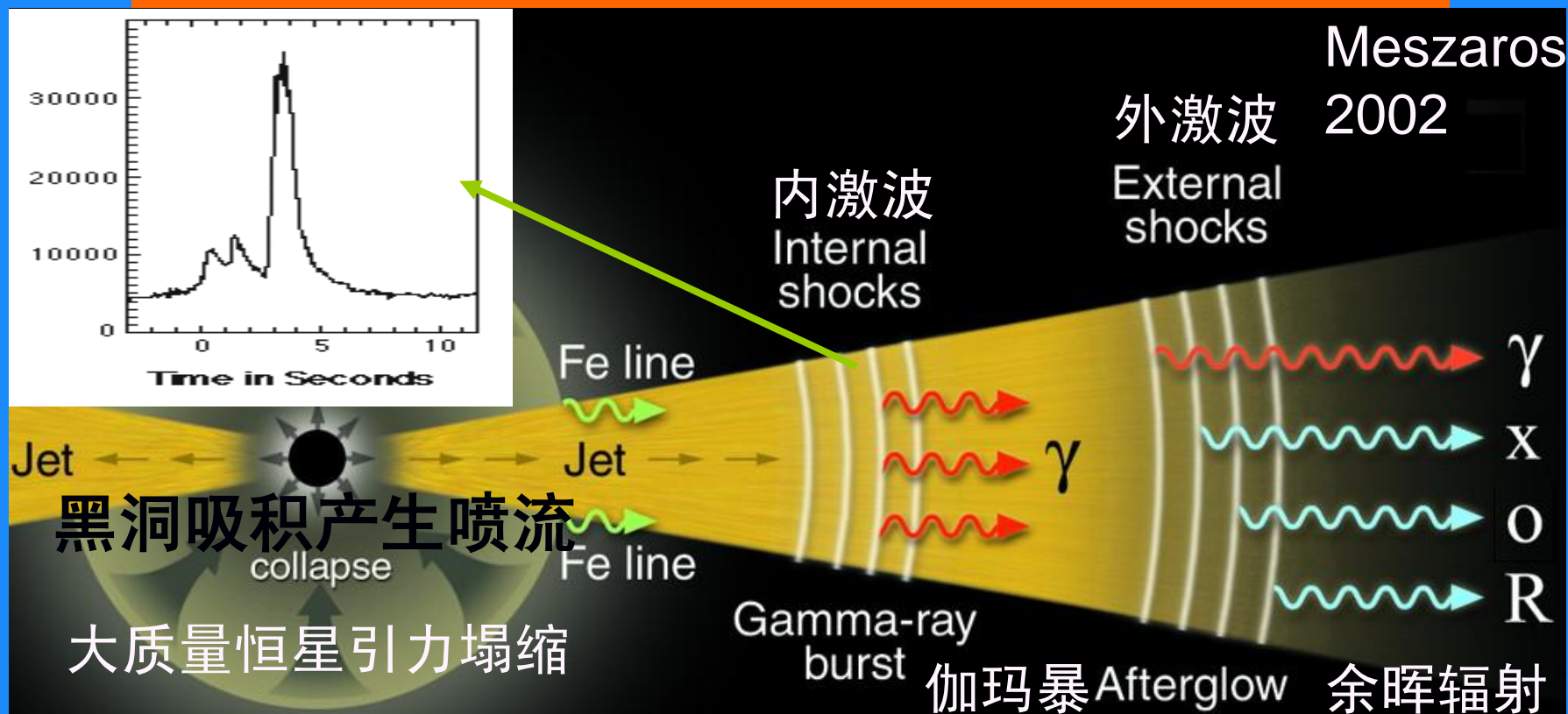
$$V_{a,r} = \frac{V \sin \theta}{1 \mp \frac{V}{c} \cos \theta} \Rightarrow V = 0.95c, \theta = 70^\circ$$



0.4"

Hjellming
et al.
1994

黑洞会照亮整个宇宙：伽玛暴



宇宙大爆炸以后最剧烈的爆发事件：十年来探测到3000多个

林、张和李（2004）指出：已经探测到红移高于10（~宇宙年龄的4%）的伽玛暴。

黑洞是如何形成的？

- ✓ 根据广义相对论，在空间某个区域，如果质量密度过大，具体说如果该天体是不转动的，而且它的半径满足下面的关系（史瓦西半径），它就是一个黑洞

$$R < R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

- ✓ 所以如果能够找到一个天体物理机制，使某个天体的质量都集中到它的史瓦西半径以内，我们就找到了形成黑洞的天体物理机制。

On Continued Gravitational Contraction

When collapse. radiation, indefinite which de behavior approaches gressively analytic solution of the field equations confirming these general arguments is obtained for the case that the pressure within the star can be neglected. The total time of collapse for an observer comoving with the stellar matter is finite, and for this idealized case and typical stellar masses, of the order of a day; an external observer sees the star asymptotically shrinking to its gravitational radius.

库波

事件视界

初始塌缩

继续塌缩

形成黑洞

$R \leq R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$

1) 大质量恒星内部核燃料耗尽就会永远塌缩；2) 对于随物质下落的共动观测者，物质穿越了视界到达奇点，形成黑洞。

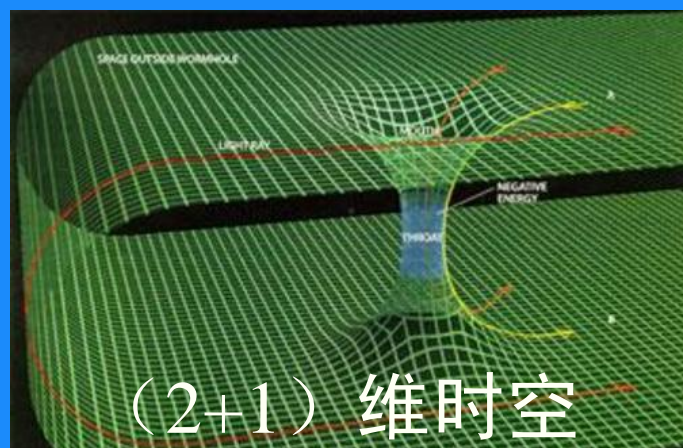
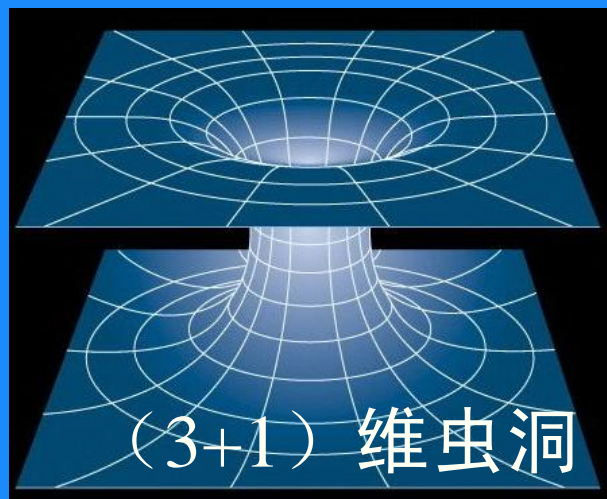
库波准备进入黑洞获取量子数据



对于等待收到库波的数据的女儿墨菲，爸爸是否能够到达遥远的黑洞、安全进入黑洞并且顺利出来？



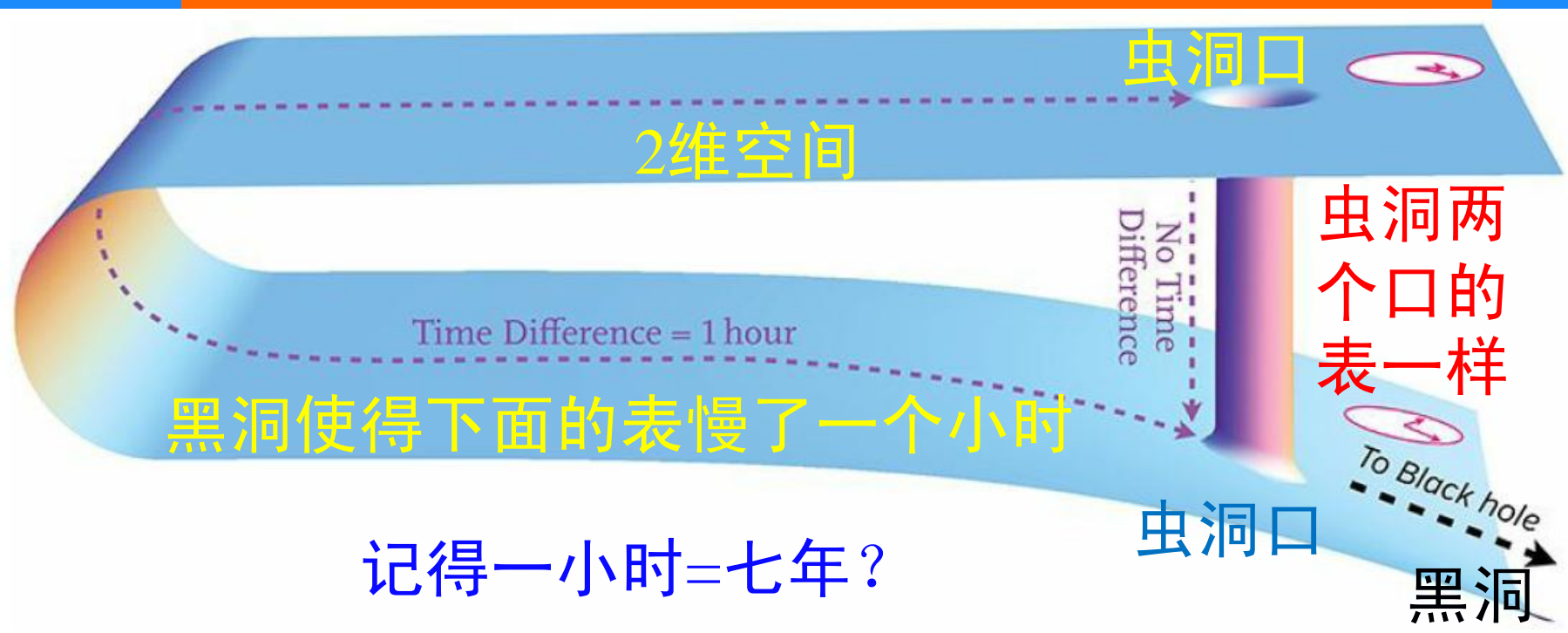
什么是虫洞？



虫洞就是时空隧道，可以把低维空间很远的点在高维空间建立近路，而且可以实现时间旅行。

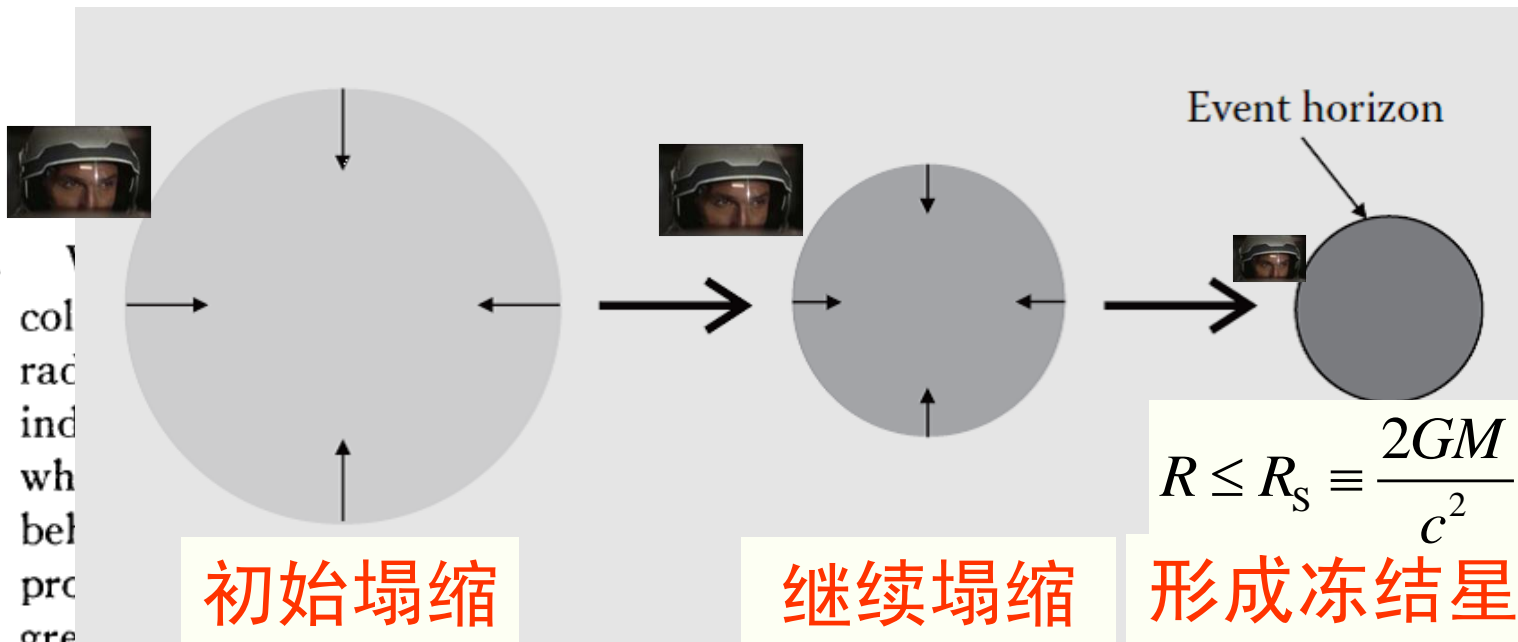
但是穿越虫洞非常危险，而且目前没有证据表明虫洞存在，也没有发现虫洞形成的机制。

如何做时间旅行？ 虫洞+黑洞



- 1) 2点从上面出发沿着2维空间花5分钟到达下面，下面的时间是1:05，上面的时间是2:05；
- 2) 从虫洞花1分钟到达上面，时间是1:06分，比出发的时候年轻了54分钟！

On Continued Gravitational Contraction



analytic solution of the field equations confirming these general arguments is obtained for the case that the pressure within the star can be neglected. The total time of collapse for an observer comoving with the stellar matter is finite, and for this idealized case and typical stellar masses, of the order of a day; an external observer sees the star asymptotically shrinking to its gravitational radius.

- 1) 对于随物质下落的共动观测者，物质穿越了视界到达奇点，形成黑洞; 2) 对于外部观测者，物质无限逼近视界，只能形成“冻结星”

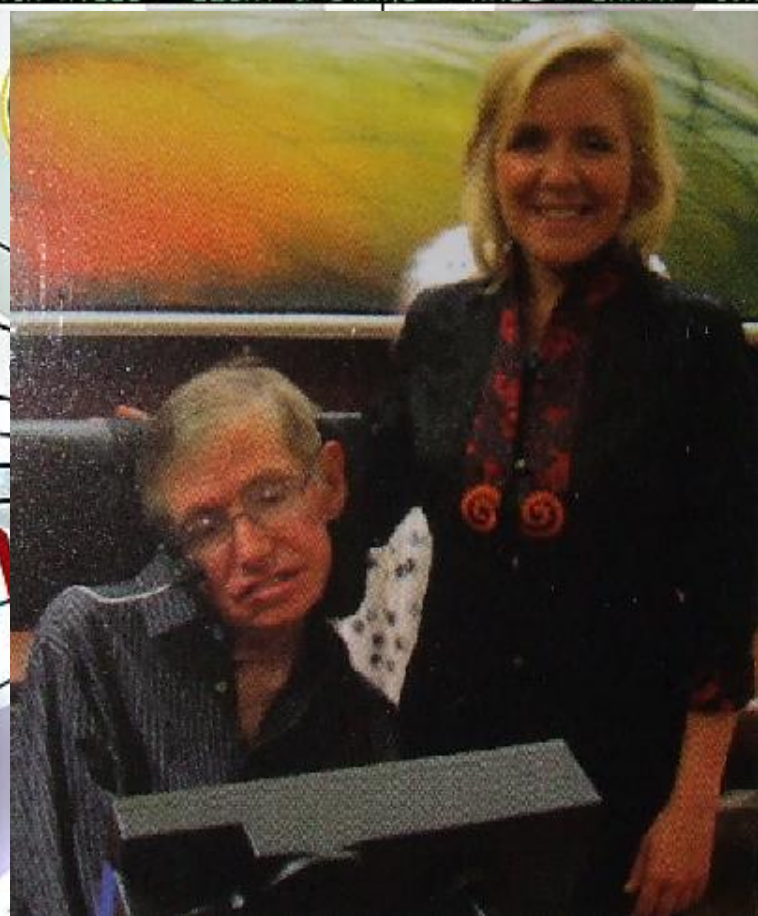
“冻结星”佯谬

- ✓ “外部观测者”布岚：库波没有落入黑洞。
- ✓ “随动观测者”库波：我已经落入了黑洞。
- ✓ 由于库波无法将他的观测信息返回给布岚，布岚无法通过和库波通讯而获知他是否落入了黑洞，只能得到库波不能落入黑洞的结论。

对于同一个物理事件，两个观测者
得到了截然不同的结论！

In "George's secret key to the universe": 2007-10-23

BLACK HOLES • LIGHT & STARS • MASS • EARTH • COMETS



• ASTEROID BELT • THE SOLAR SYSTEM • MATTER • NEUTRON STAR • TEMPERATURE

LUCY & STEPHEN
HAWKING

hole. To them you will appear to slow down as you approach the horizon and get dimmer and dimmer. You get dimmer because the light you send out takes longer and longer to get away from the black hole. If you cross the horizon at 11:00 according to your wristwatch, someone looking at you would see the watch slow down and never quite reach 11:00.



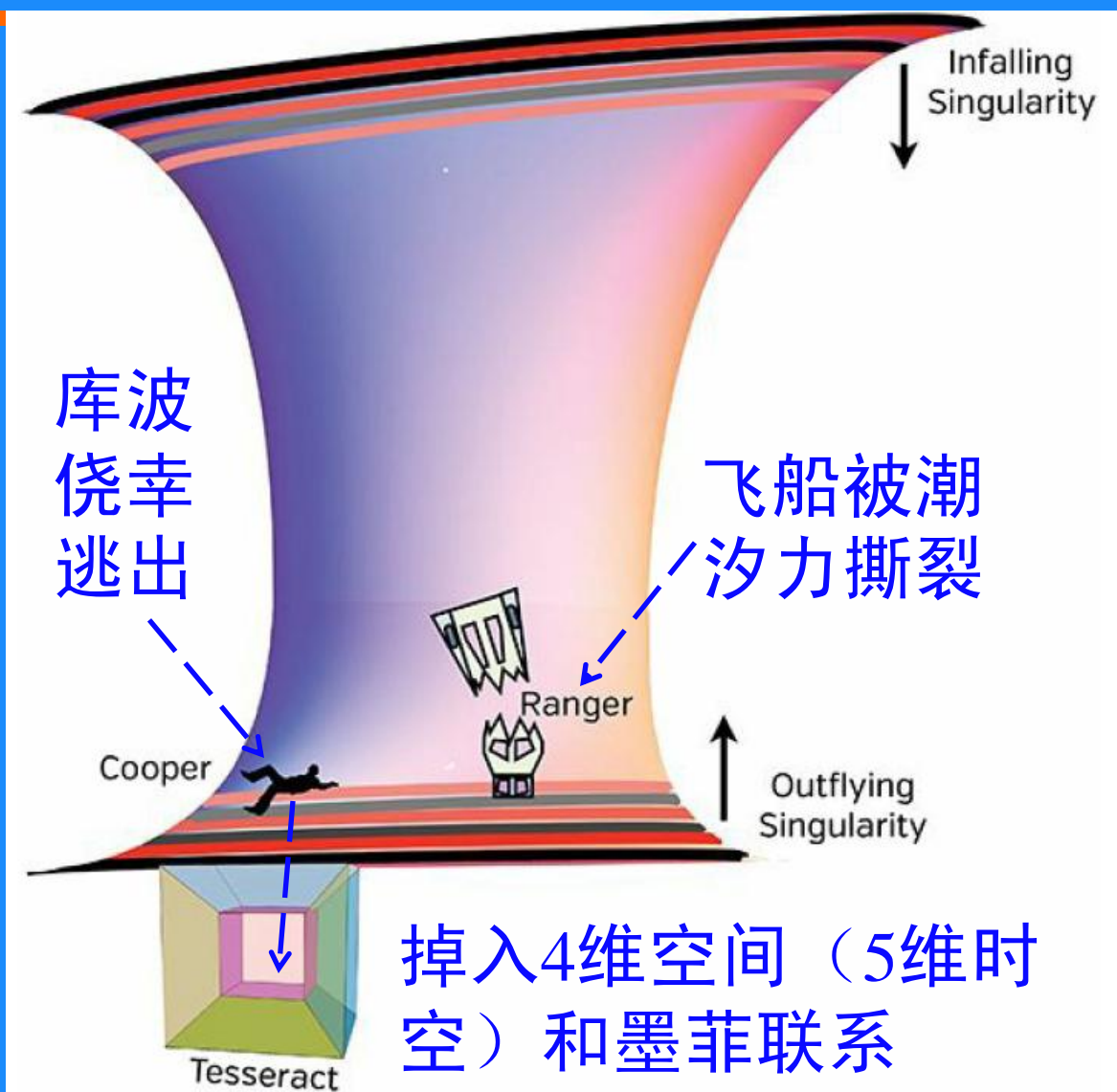
库波

索恩

不管外面怎么看，库波反正进入了黑洞，那么如何出来？

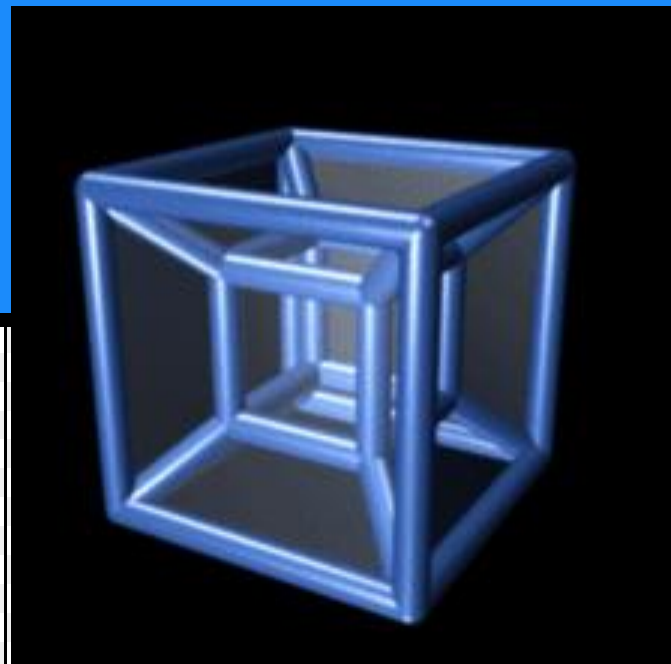
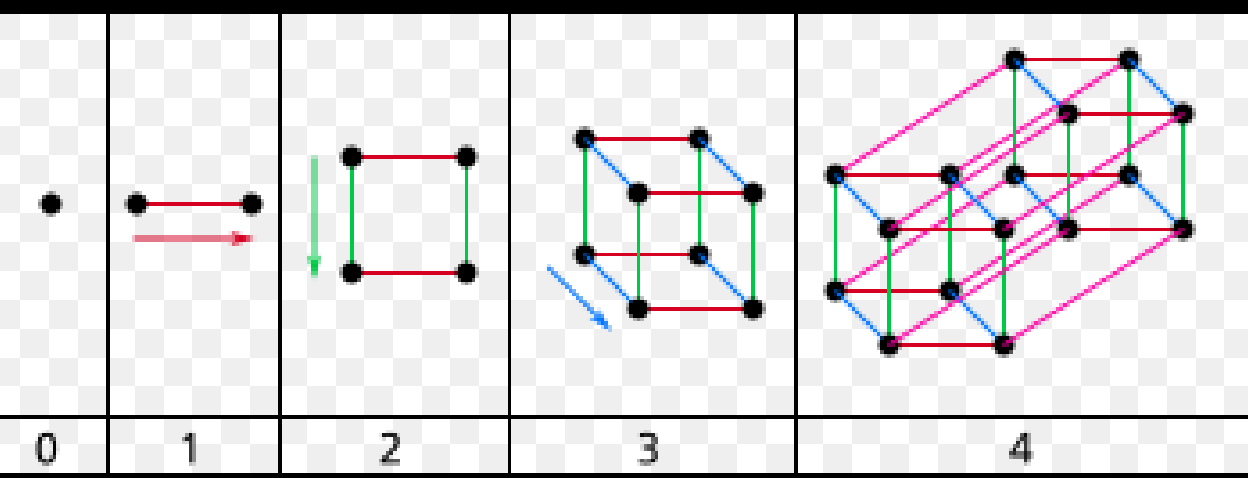
《星际穿越》 如何救出库波？

《星际穿越的科学》（索恩，2014）

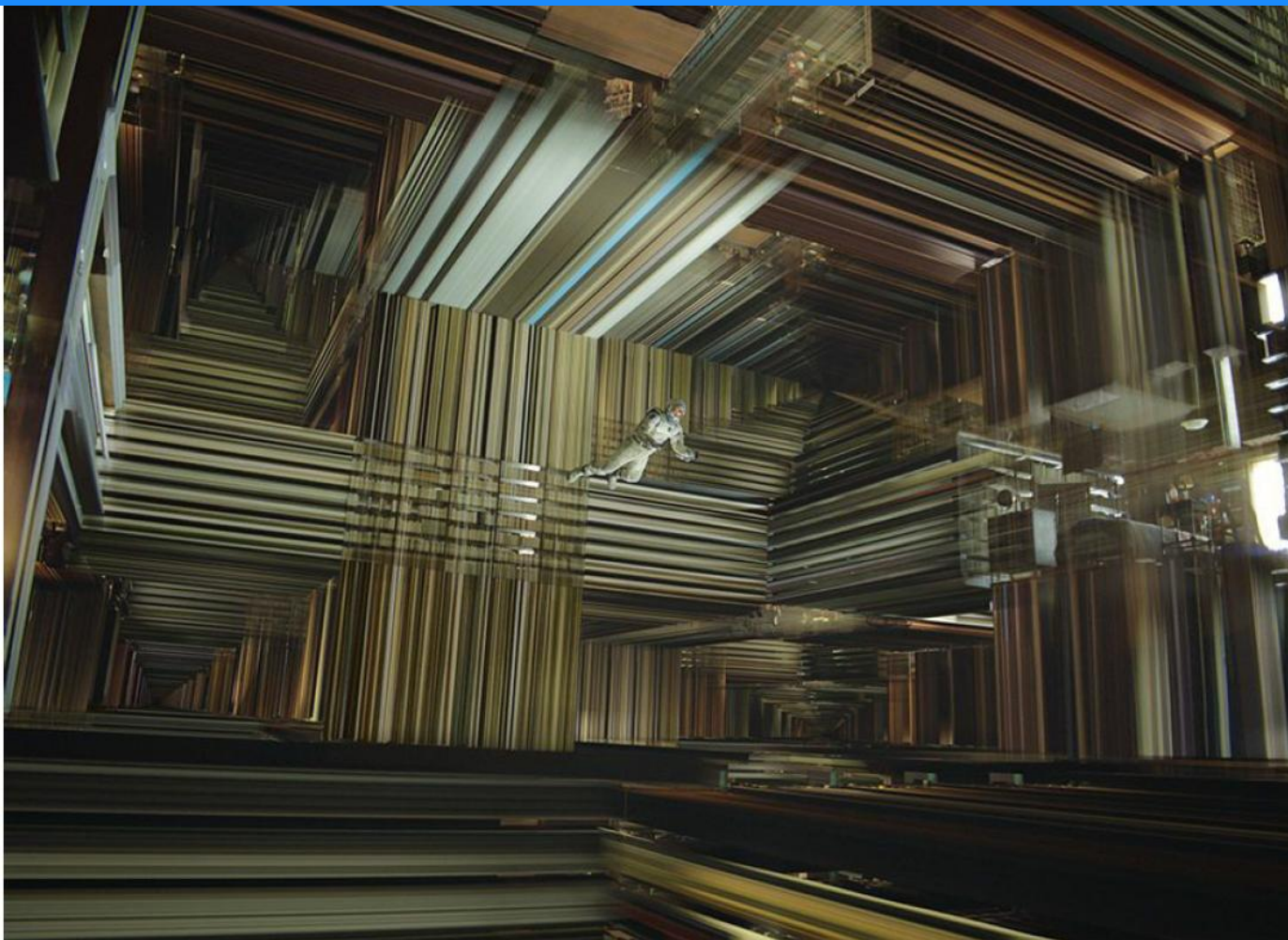


五维时空是怎么回事？

由于宇航员旅行的时空是 $3+1=4$ 维的，
只能利用 $4+1=5$ 维时空做时间旅行。

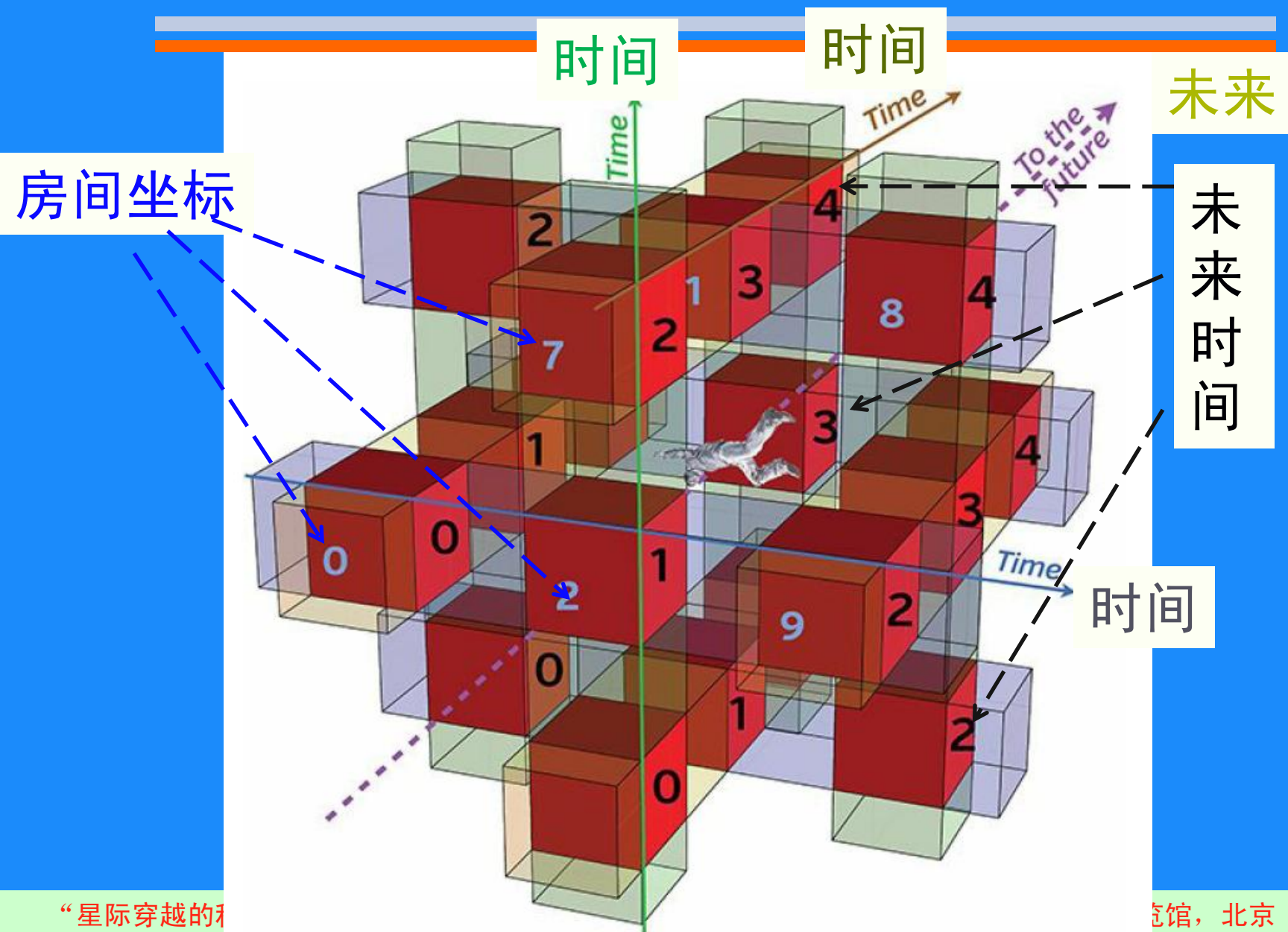


库波飘在墨菲的“5维”时空



通过引力向不同年龄的墨菲传递从黑洞里面获得的数据，帮助墨菲破解了电影开始时的“引力异常”之谜，从而拯救了人类，父女团圆！

库波在墨菲房间的时间旅行原理



《星际穿越的科学》（索恩，2014）

《星际穿越》的救援方案是否靠谱？

- ✓ 我认为这个救援方案比较不靠谱：
 - ✓ 库波在黑洞“奇点”附近活着离开被撕裂的飞船的可能性非常小；
 - ✓ 库波如何掉入4维空间很不清楚；
 - ✓ 从4维空间回到3维空间需要通过虫洞，这也非常危险。
- ✓ 但是索恩不知道还有更好的选择，而且这么做非常刺激和震撼！
 - ✓ 所以导演就在遵守“约定”的前提下，让电影里面的库波为了拯救人类并且最后和女儿团聚，义无反顾地冲进了黑洞！



Exact solutions for shells collapsing towards a pre-existing black hole

Yuan Liu^{a,*}, Shuang Nan Zhang^{a,b,c}

^a Physics Department and Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

^c Physics Department, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 February 2009

Received in revised form 12 July 2009

Accepted 14 July 2009

Available online 21 July 2009

Editor: S. Dodelson

PACS:

04.20.Jb

04.70.Bw

Keywords:

Black holes

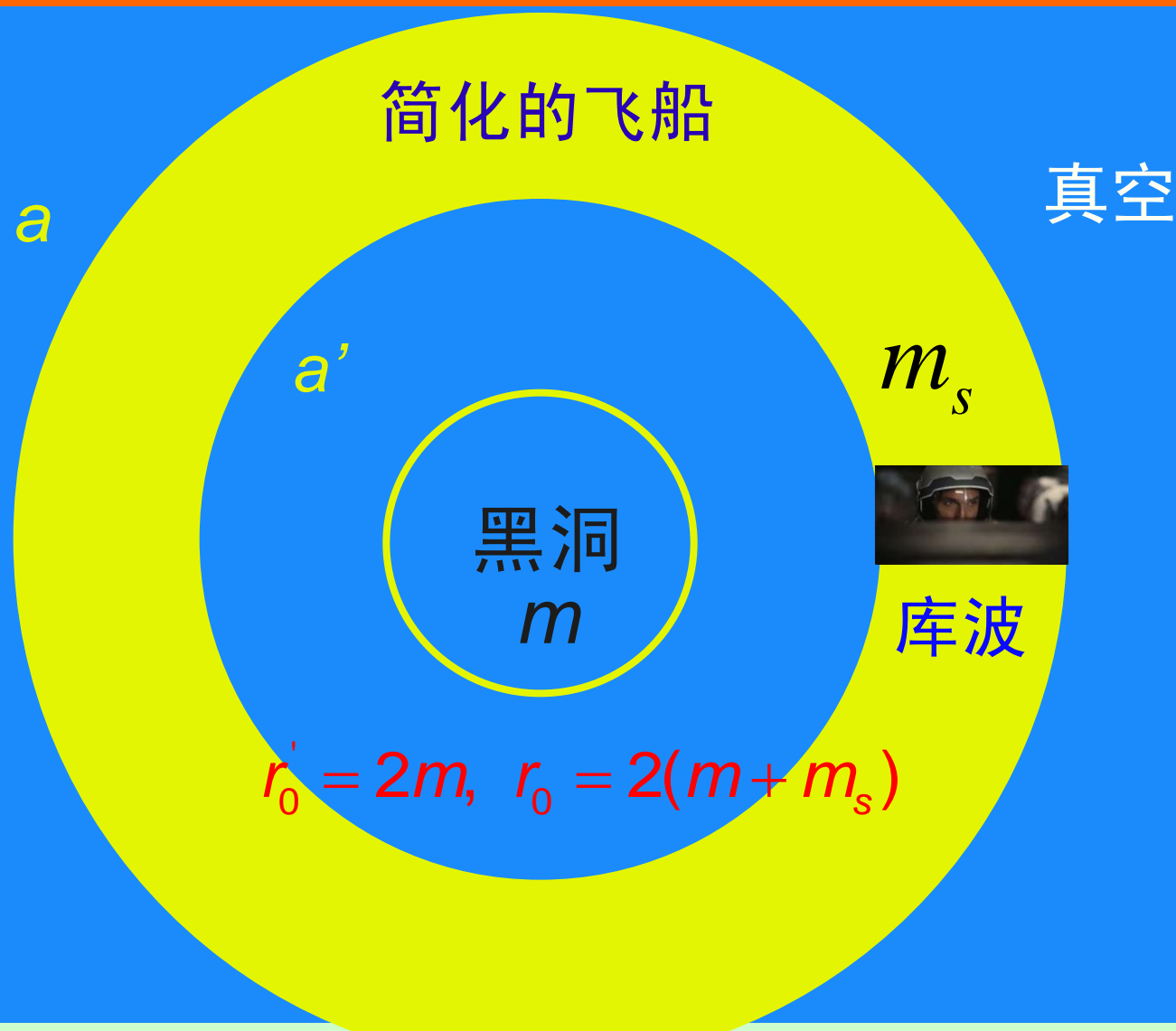
Classical theories of gravity

Space–time singularities

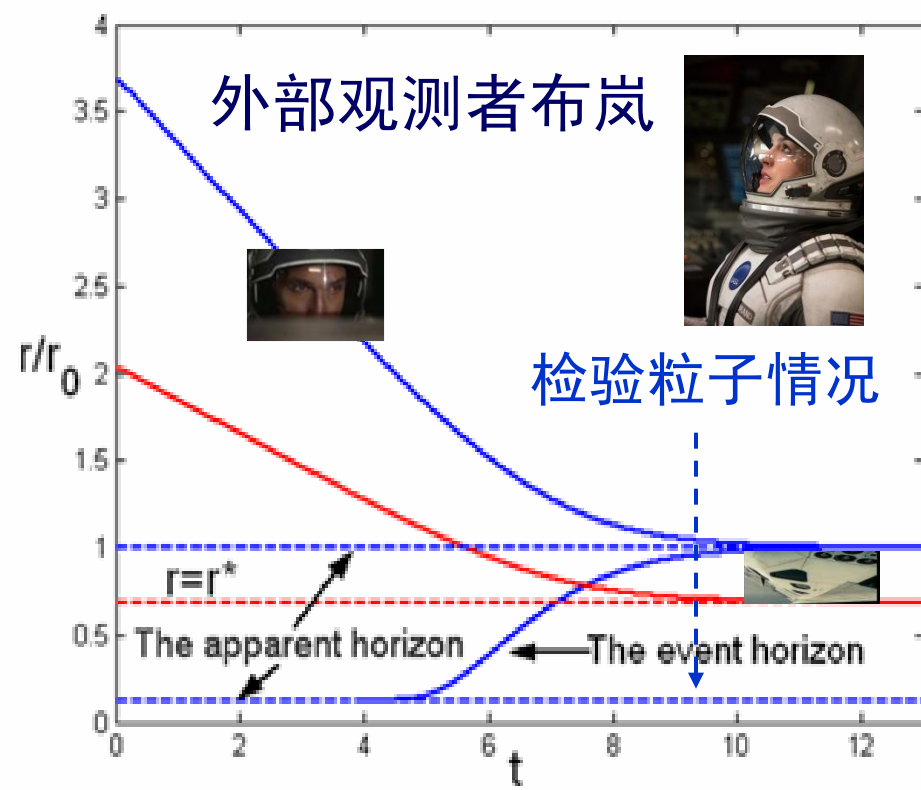
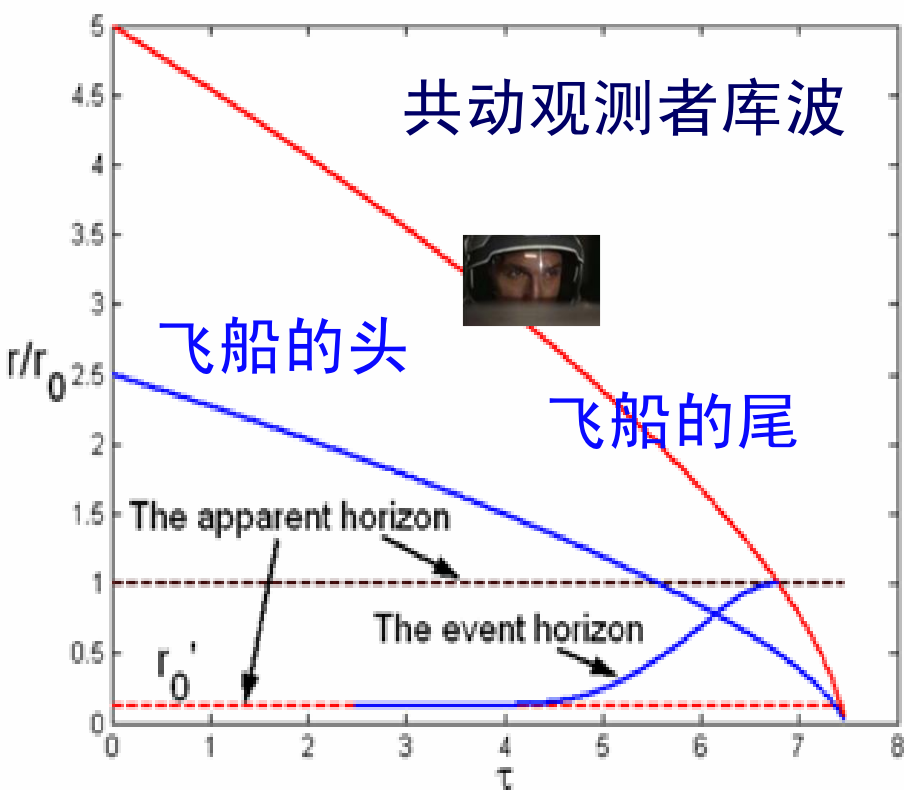
ABSTRACT

The gravitational collapse of a star is an important issue both for general relativity and astrophysics, which is related to the well-known “frozen star” paradox. This paradox has been discussed intensively and seems to have been solved in the comoving-like coordinates. However, to a real astrophysical observer within a finite time, this problem should be discussed in the point of view of the distant rest-observer, which is the main purpose of this Letter. Following the seminal work of Oppenheimer and Snyder (1939), we present the exact solution for one or two dust shells collapsing towards a pre-existing black hole. We find that the metric of the inner region of the shell is time-dependent and the clock inside the shell becomes slower as the shell collapses towards the pre-existing black hole. This means the inner region of the shell is influenced by the property of the shell, which is contrary to the result in Newtonian theory. It does not contradict the Birkhoff’s theorem, since in our case we cannot arbitrarily select the clock inside the shell in order to ensure the continuity of the metric. This result in principle may be tested experimentally if a beam of light travels across the shell, which will take a longer time than without the shell. It can be considered as the generalized Shapiro effect, because this effect is due to the mass outside, but not inside as the case of the standard Shapiro effect. We also found that in real astrophysical settings matter can indeed cross a black hole’s horizon according to the clock of an external observer and will not accumulate around the event horizon of a black hole, i.e., no “frozen star” is formed for an external observer as matter falls towards a black hole. Therefore, we predict that only gravitational wave radiation can be produced in the final stage of the merging process of two coalescing black holes. Our results also indicate that for the clock of an external observer, matter, after crossing the event horizon, will never arrive at the “singularity” (i.e. the exact center of the black hole), i.e., for all black holes with finite lifetimes their masses are distributed within their event horizons, rather than concentrated at their centers. We also present a worked-out example of the Hawking’s area theorem.

单球壳向黑洞的下落过程

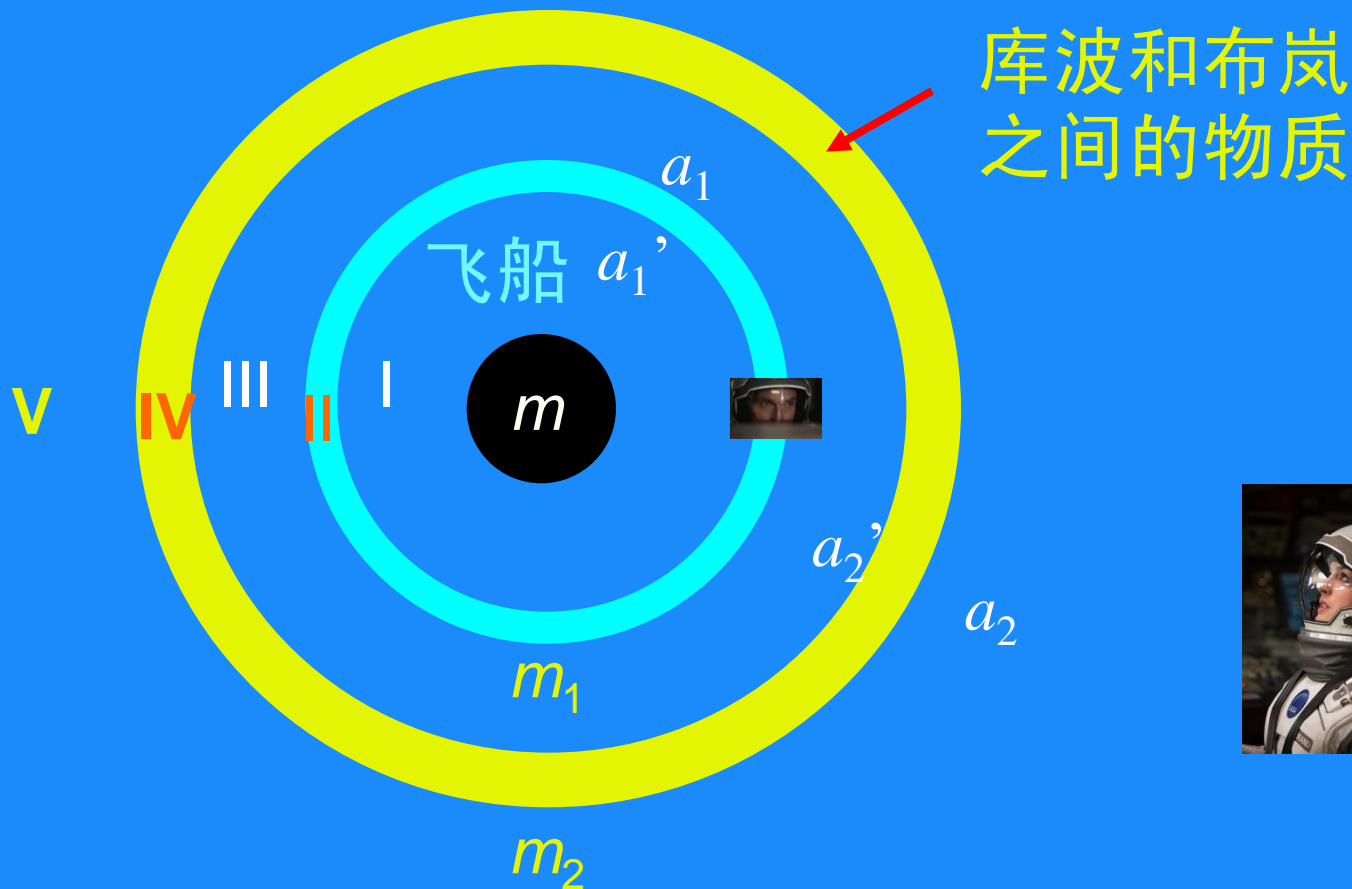


单球壳下落的广义相对论计算结果

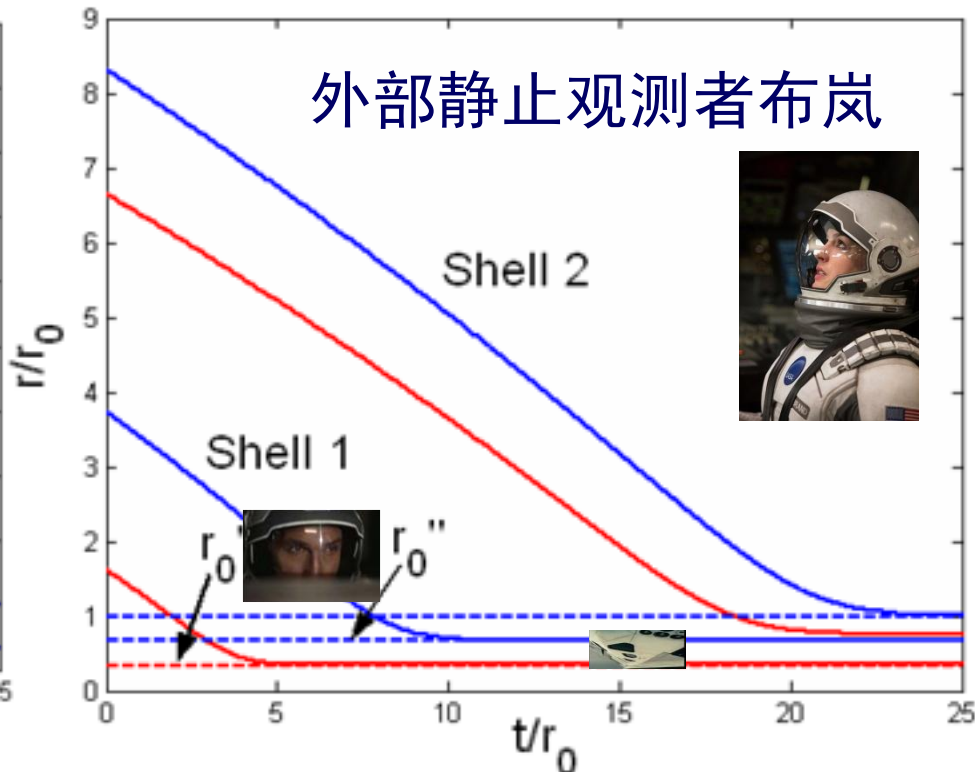
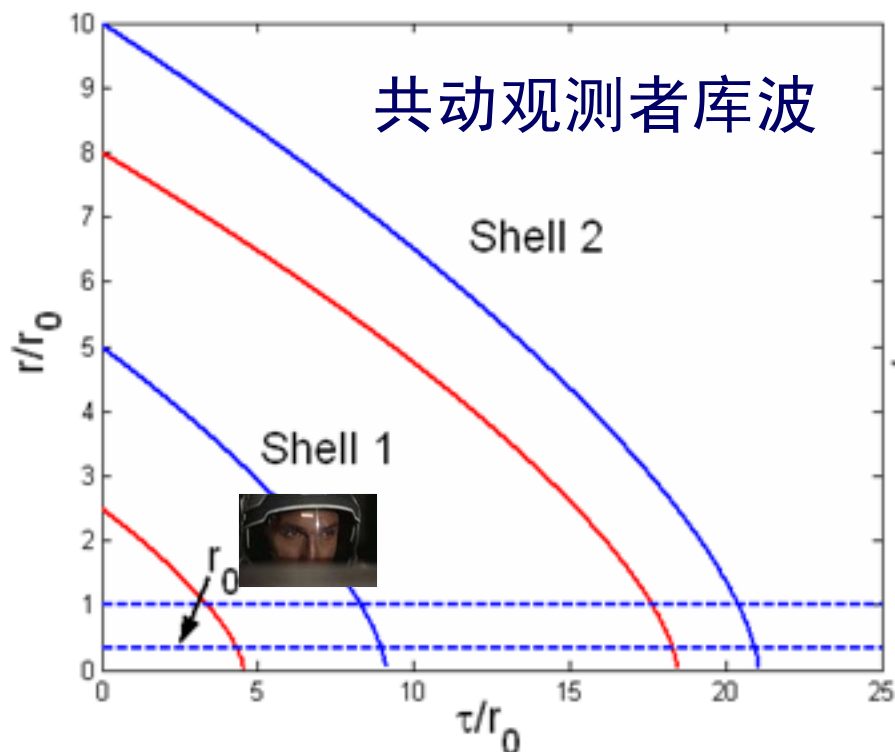


布岚的结论：1) 除了球壳的外表面，球壳能够穿越视界；2) 球壳永远不能到达中心的奇点；3) 是膨胀的视界吞噬了物质，而不是物质落入了视界！这就是检验粒子不能进入视界的原因：检验粒子不能影响视界！

双球壳下落更接近真实宇宙中物质向黑洞的下落



双球壳下落过程



外部观测者的结论：“库波”整体上能够穿越视界（进入黑洞），因此不会停留在视界外面，也就是“冻结星”不存在。但是“库波”仍然不能到达中心的奇异点！ $\rightarrow r=0$ 处的奇异性没有物理意义？

论文中引用并批评的著名专著、教科书和科普书

1. C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, Gravitation (1973)
2. S.W. Hawking, G.F.R. Ellis, The large scale structure of space-time (1973)
3. S. Weinberg, Gravitation And Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity (1977)
4. S.L. Shapiro, S. A. Teukolsky, Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars (1983)
5. V.P. Frolov, I.D. Novikov, Black Hole Physics (1998)
6. B.F. Schutz, A first course in general relativity (1990)
7. D. Raine, E. Thomas, Black Holes - An Introduction (2005)
8. J.P. Luminet, Black Holes (1992)
9. K.S. Thorne, Black Holes & Time Warps - Einstein's Outrageous Legacy (1994)
10. M.C. Begelman, M.J. Rees, Gravity's fatal attraction - black holes in the universe (1998)

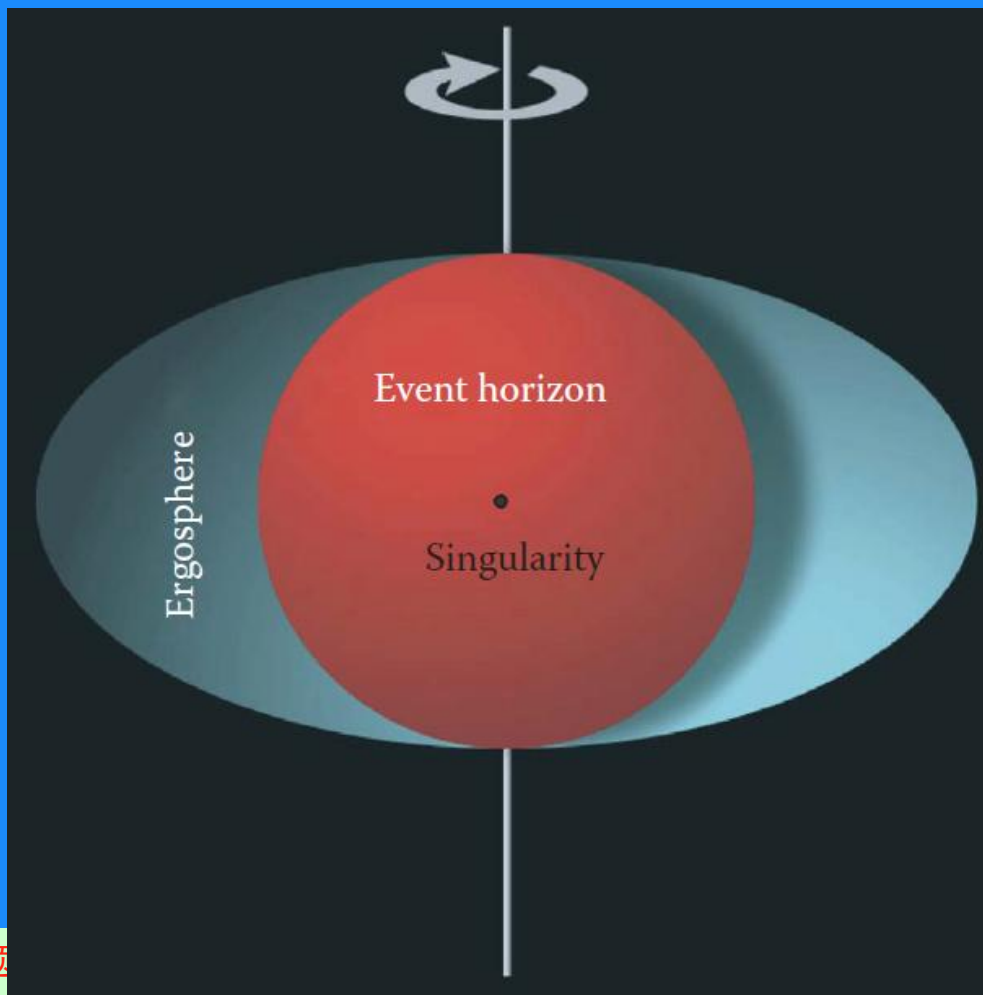
什么是黑洞？取决于问谁！

- ✓ 数学黑洞：爱因斯坦场方程的点质量的解
- ✓ 物理黑洞：所有引力质量都在事件视界以内
- ✓ 天文黑洞：有明确天体物理形成机制的物理黑洞。

Astrophysical black holes in the physical universe
（物理宇宙中的天文黑洞），张双南, in “The
Astronomy Revolution: 400 Years of Exploring the
Cosmos”（天文学革命：仰望星空400年），2011（
中文版2013年出版）

数学黑洞

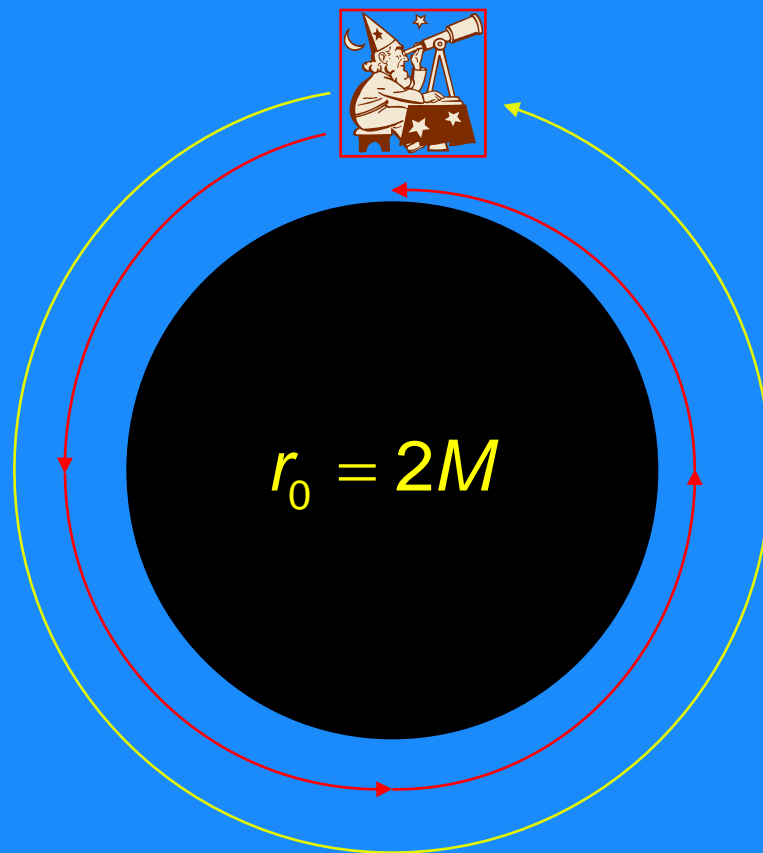
- ✓ 点质量（可以带电和角动量）的广义相对论场方程的解，所有质量都在奇点处。



物理黑洞

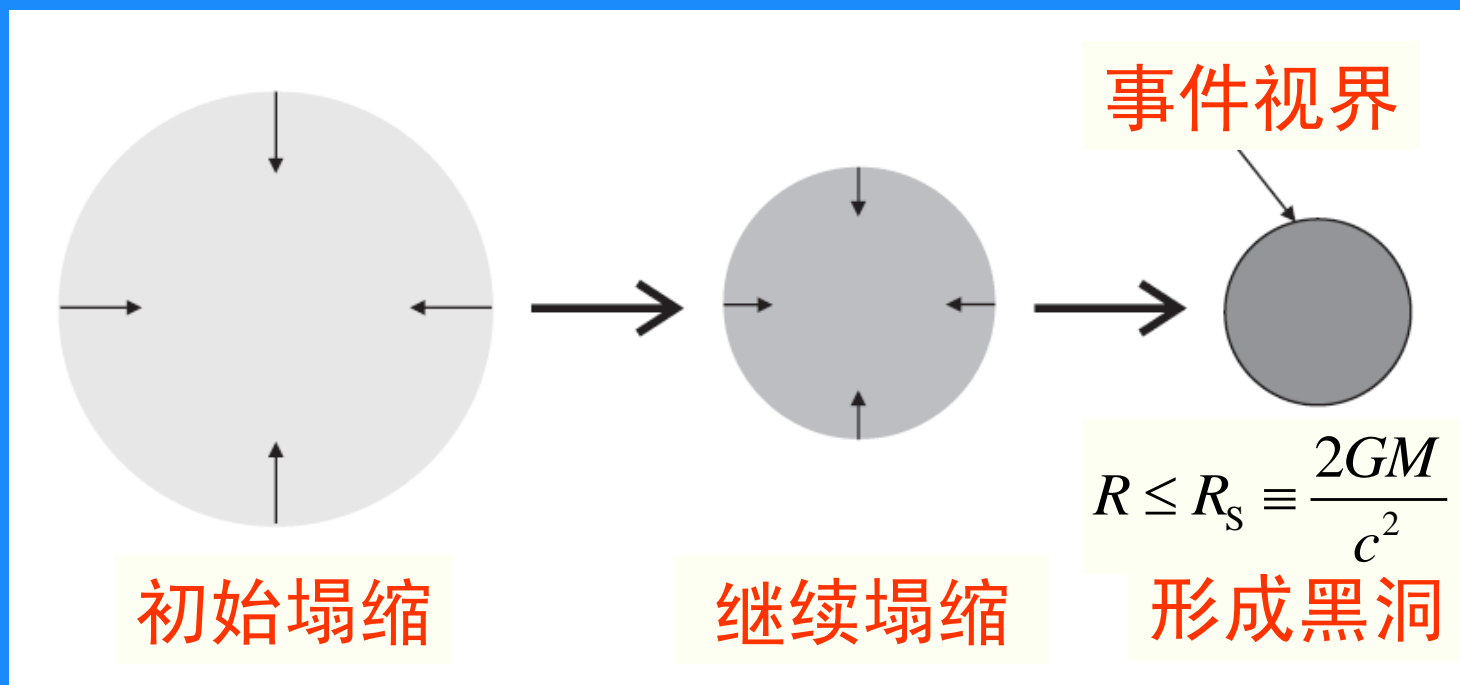
- ✓ 所有的引力质量都在事件视界以内，但是不一定在奇点处。

然而，根据Birkhoff定理，外部观测者无法区分物理黑洞和数学黑洞。



天文黑洞

✓ 有明确天体物理形成机制的物理黑洞，比如，通过引力塌缩形成的黑洞。



几个新的广义相对论效应和理解

- ✓ “冻结星”佯谬的本质：忽略了检验粒子本身的引力
 - ✓ 有质量物质的下落导致膨胀的动态视界吞噬了下落的物质
- ✓ 单球壳：静止观测者看到球壳外边界趋向于视界，内边界在有限时间内穿过了视界。
 - ✓ 物质不会在黑洞外部堆积，黑洞可以形成和增长。
- ✓ 双球壳：内壳在静止观测者的有限时间内穿过了视界
 - ✓ 物理宇宙中不存在“冻结星”。
- ✓ 在静止观测者的有限时间内，物质不可能到达黑洞的“数学”奇点
 - ✓ 物理宇宙中没有黑洞的“奇点”问题！

库波的命运？

- ✓ 根据我们的计算，布岚看到库波在很短的时间内全部进入黑洞，而不会被“冻结”在黑洞视界的外面。
- ✓ 但是进入黑洞之后库波的命运如何？
 - ✓ 如果库波进入的是恒星级黑洞，在进去之前黑洞的潮汐力就会把他撕碎。幸好库波没有去错黑洞！
 - ✓ 由于库波进入的是超大质量黑洞，潮汐力很小，他会顺利（活着）进入然后停留在黑洞里面的某个地方，但是不会最终到达中心的奇异点而粉身碎骨。
 - ✓ 但是我们将永远和库波失去联系！
 - ✓ 布岚和墨菲又哭了！

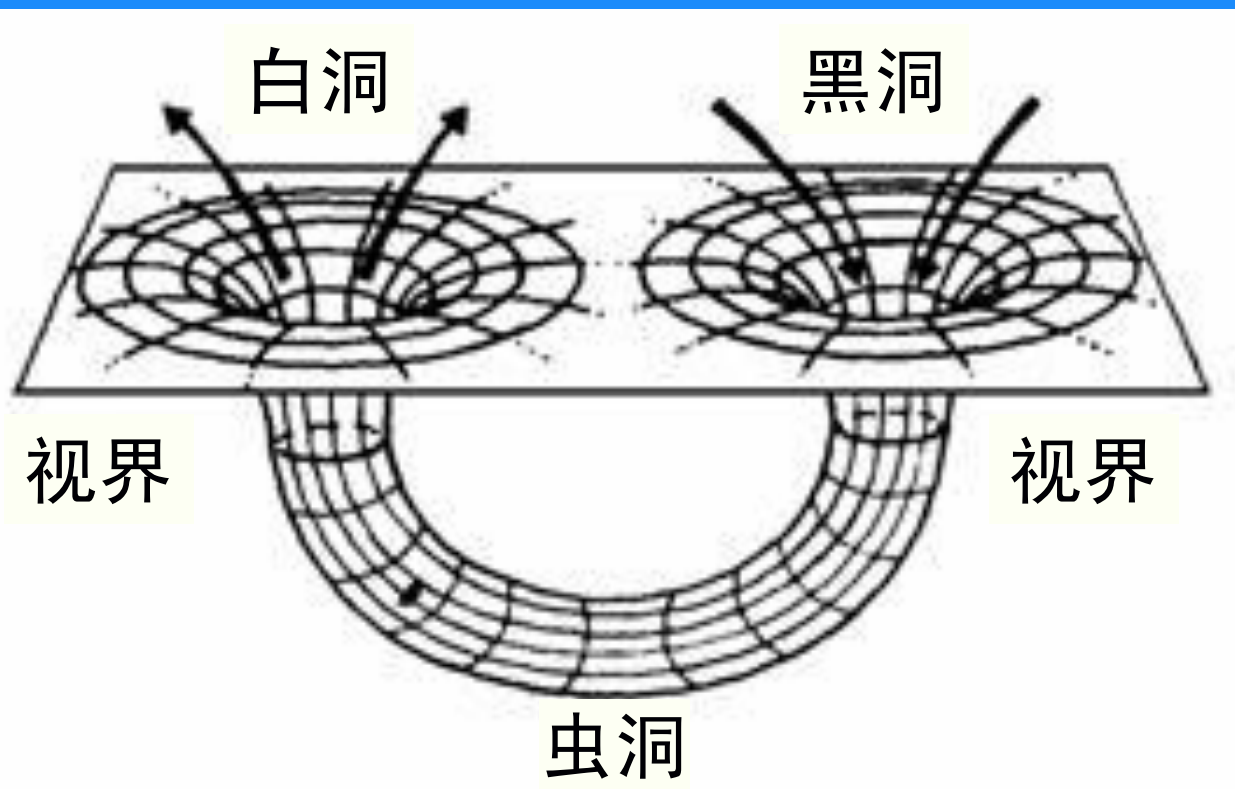
那么我们如何救出库波？

什么是白洞？



白洞是具有质量、电荷和转动，但是物质和能量只出不进的时空“奇点”。
目前没有证据表明白洞存在，也没有发现白洞形成的机制。

库波可以从黑洞进去、白洞出去？



(1) 按照传统的观点，库波将会落到奇点，粉身碎骨。

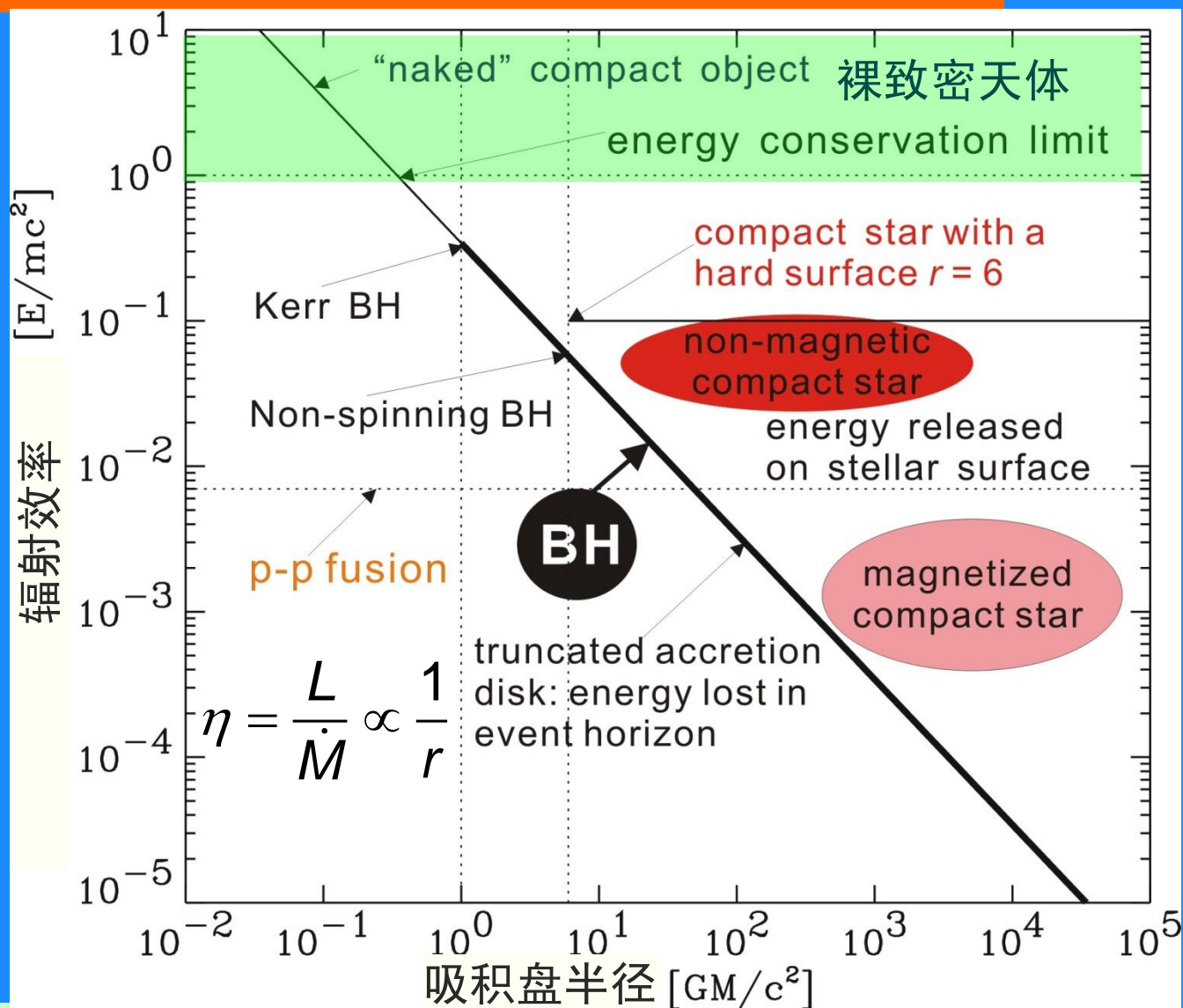
(2) 按照我们的观点，库波不会到达奇点，因此无法穿越虫洞从白洞出来。

如何让库波安全出来？

“裸”致密天体再循环猜想（张双南2011）

“裸”致密天体的辐射效率可以超过100%：吐出的东西超过吃进去的东西。

因此它可以把这个黑洞以前吃进去的东西吐出来，实现宇宙物质的再循环。



“裸”致密天体：剥掉视界的天文黑洞



吸积黑洞：东西只进不出

吸积“裸”致密天体：东西可以出来

需要寻找“裸”致密天体存在的证据：
辐射效率 $>100\%$.

透过天文望远镜看李约瑟难题 ——中文版序（张双南）



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

引进系列 · 31

**The Astronomy Revolution:
400 Years of Exploring the Cosmos**

天文学革命
——仰望星空400年

〔美〕唐纳德·G. 约克 (Donald G. York)

〔美〕欧文·金格里奇 (Owen Gingerich) 主编
张双南 (Shuang-Nan Zhang)

涂泓 方伟 译

冯承天 译校

张双南 校

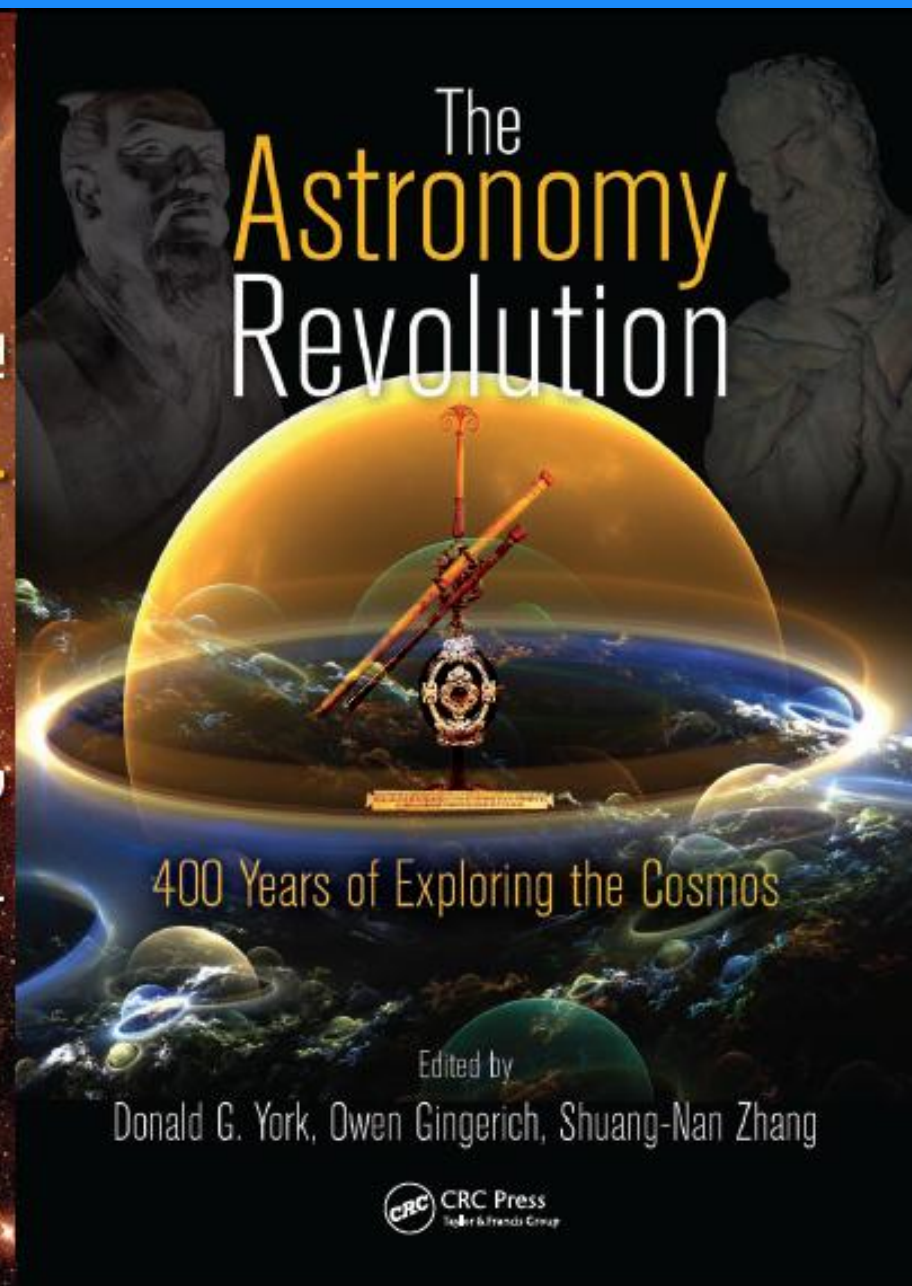
第10章 物理宇宙中的
天文黑洞（张双南）



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

York
Gingerich
Zhang

The Astronomy Revolution



第10章 物理宇宙中的天文黑洞

- ✓ 什么是黑洞？
- ✓ 在物理宇宙中能否形成天文黑洞？
- ✓ 如何证明我们称之为天文黑洞的天体是真正的黑洞？
- ✓ 我们是否有足够的证据说明物理宇宙中存在天文黑洞？
- ✓ 宇宙中的所有物质最终都会落入黑洞吗？

但是我们的方案是否更好？

- ✓ 我们的计算表明库波在天文黑洞里面没有危险。
 - ✓ 但是我们也没有找到可靠的办法把视界“剥开”救出库波和女儿团聚。
 - ✓ 而且里面没有量子数据，进入黑洞就很难和拯救人类的高大上目标联系起来了。
- ✓ 但是库波仍然可以为了理解天文黑洞的性质而进入黑洞，为科学献身。
 - ✓ 不过这就是另外一个电影了，搞不好就平淡无奇。

因此我叹服《星际穿越》是
科学、艺术和人性的完美结合！

回顾：（9+1）个问题

1. 黑洞是什么、黑洞存在吗、黑洞在哪里？
2. 黑洞如何形成、黑洞会干什么？
3. 进入黑洞揭秘的后果严重吗、能够从里面出来吗？
4. 什么是白洞、白洞和黑洞是什么关系？
5. 白洞存在吗？
6. 什么是虫洞、虫洞存在吗？
7. 虫洞和黑洞、白洞是什么关系？
8. 这些洞和时间旅行是什么关系？
9. 五维时空是怎么回事、和这些洞以及时间旅行又是什么关系？
10. 上面这些问题哪些是科学问题、哪些是哲学问题、哪些是宗教问题？