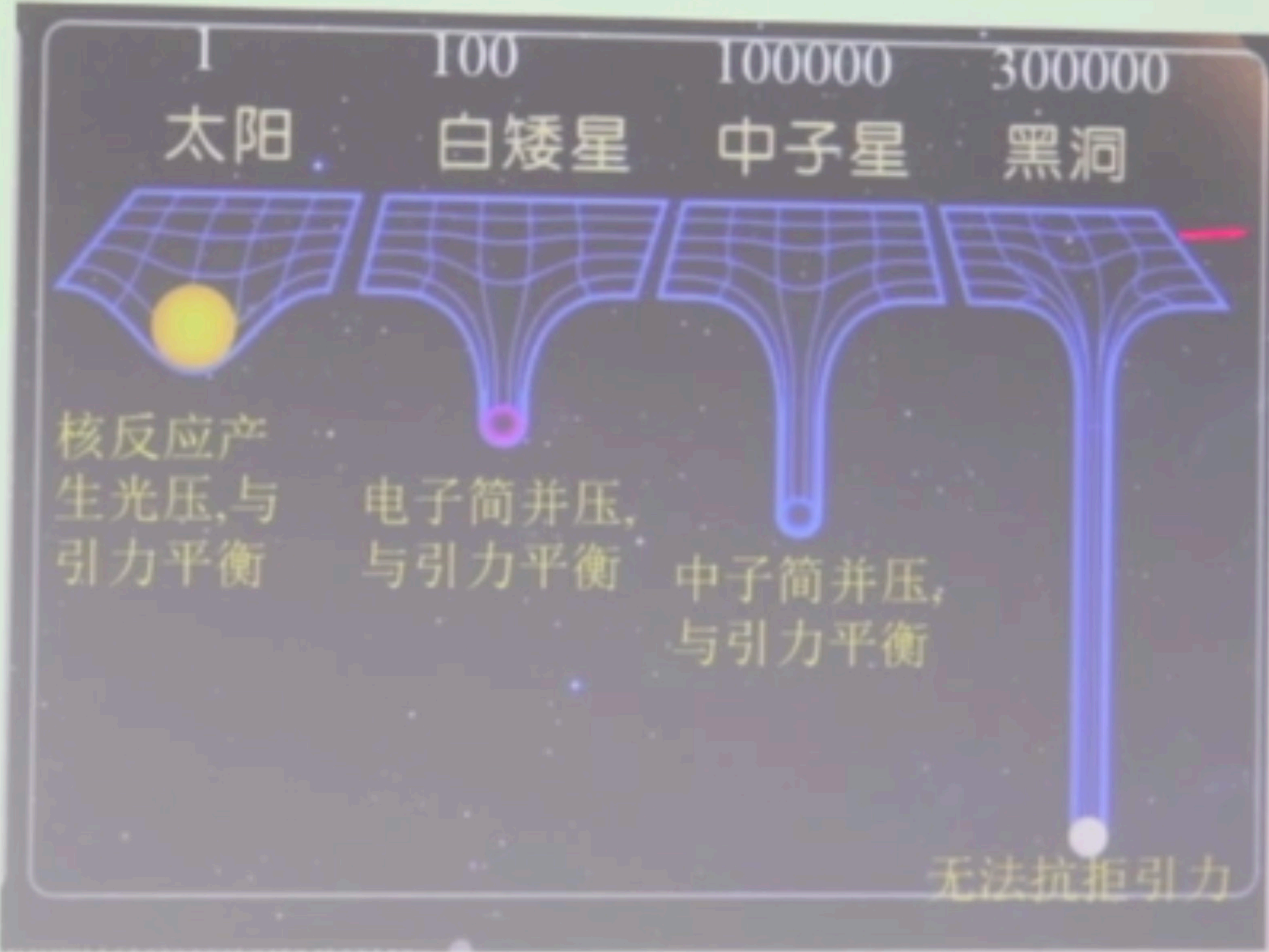


四种天体引力比较的示意图



吴学兵

北京大学



宇宙中的四类黑洞

- 按黑洞的质量来划分
 - 原初(Primordial)黑洞: 宇宙大爆炸后产生, 其中一些($\sim 10^{12}$ 千克)正在死亡(寿命 $t=10^{10}$ 年)
 - 恒星级(Stellar Mass)黑洞($\sim 10M_{\odot}$): 大质量恒星死亡的产物
 - 中等质量(Intermediate Mass)黑洞($\sim 10^3M_{\odot}$): 星团内部大质量恒星死亡的产物? 存在于近邻星系中的极亮X射线源(ULXs)
 - 超大质量(Supermassive)的黑洞($\sim 10^6-10^{10}M_{\odot}$): 存在于许多星系的中心
- 第1种难以观测, 后3种可以被观测!

你是谁鸭

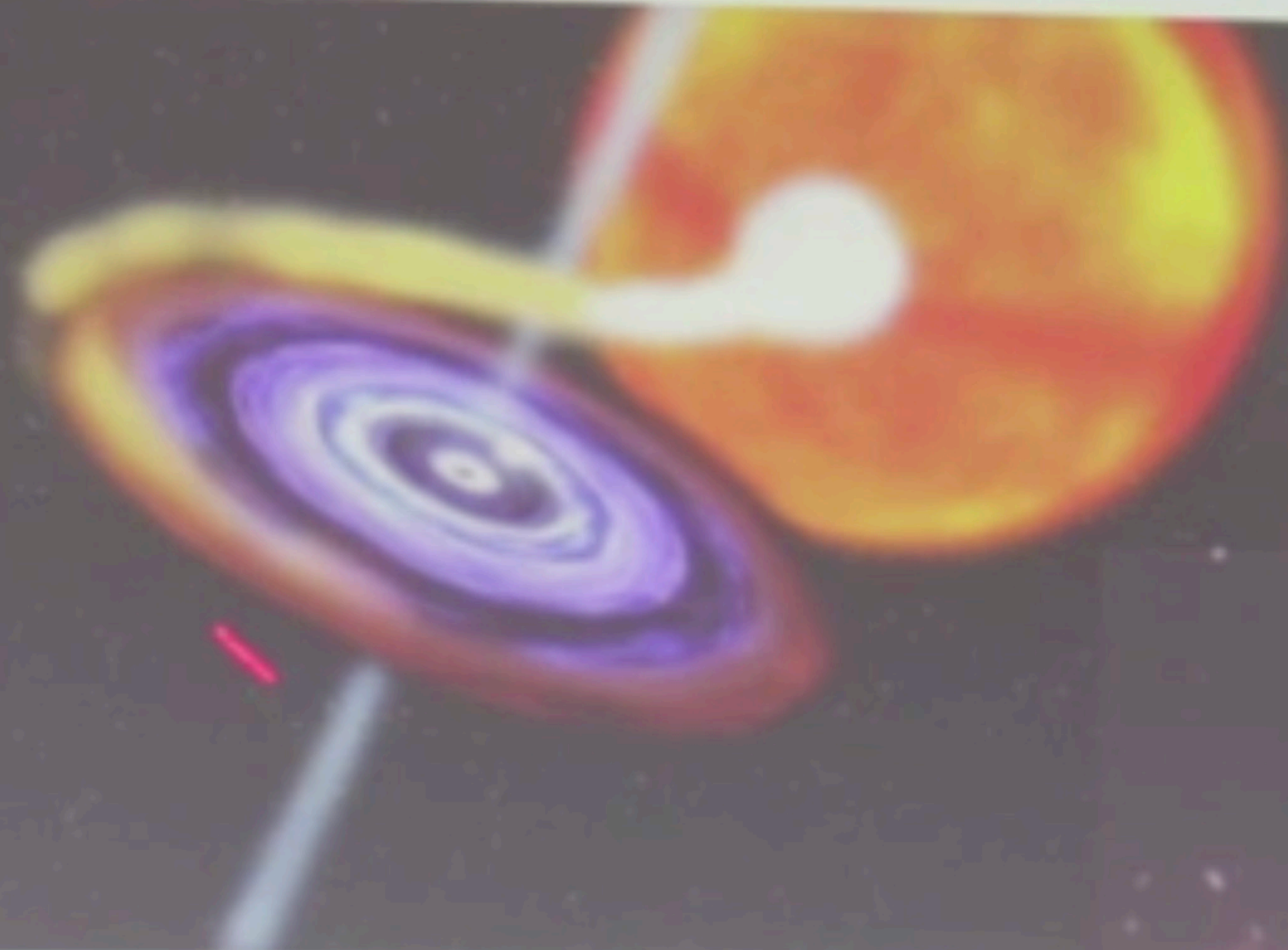
为何黑洞可以观测(黑洞不黑)?



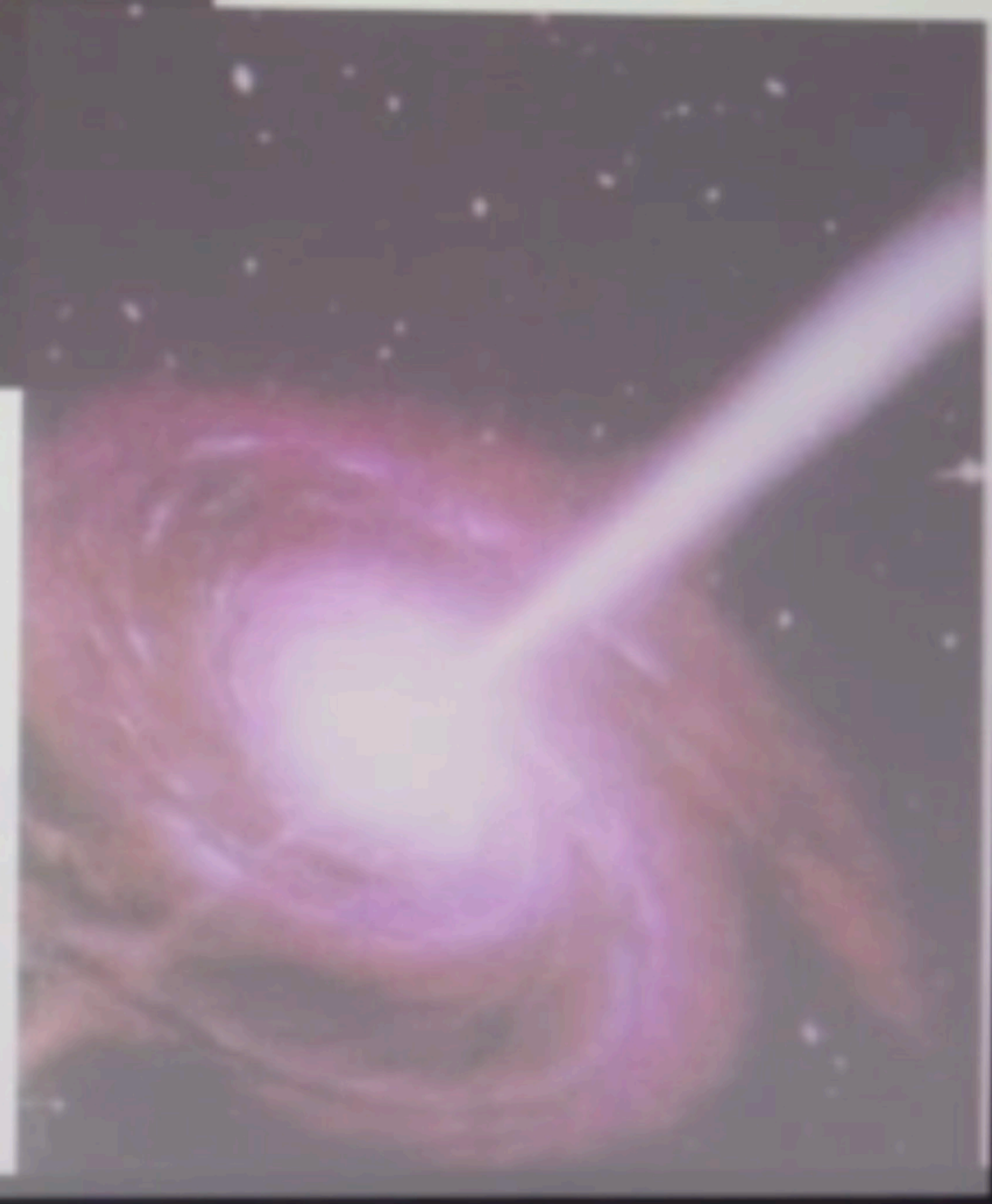
- 宇宙中的黑洞不是孤立的，黑洞强大的引力可以吸积周围的物质
- 连续吸积的物质的引力能可以转化为动能，部分动能可转化为辐射能(类似于摩擦生热)。吸积物质的释能效率是核反应的**20倍**！



吴学兵



有恒星级黑洞（约10个太阳质量）的X射线双星，从伴星吸积物质



中心为超大质量黑洞（百万到十亿个太阳质量）的类星体，从寄主星系吸积物质



吴学兵

黑洞的观测证据



• 恒星级黑洞

- 途径: 搜寻质量超过中子星质量上限($\sim 3 M_{\odot}$)的致密天体
- 确定致密天体性质: x射线辐射、时变
- 确定致密天体质量: 双星轨道运动
- --> **x射线双星**

Stephen Hawking

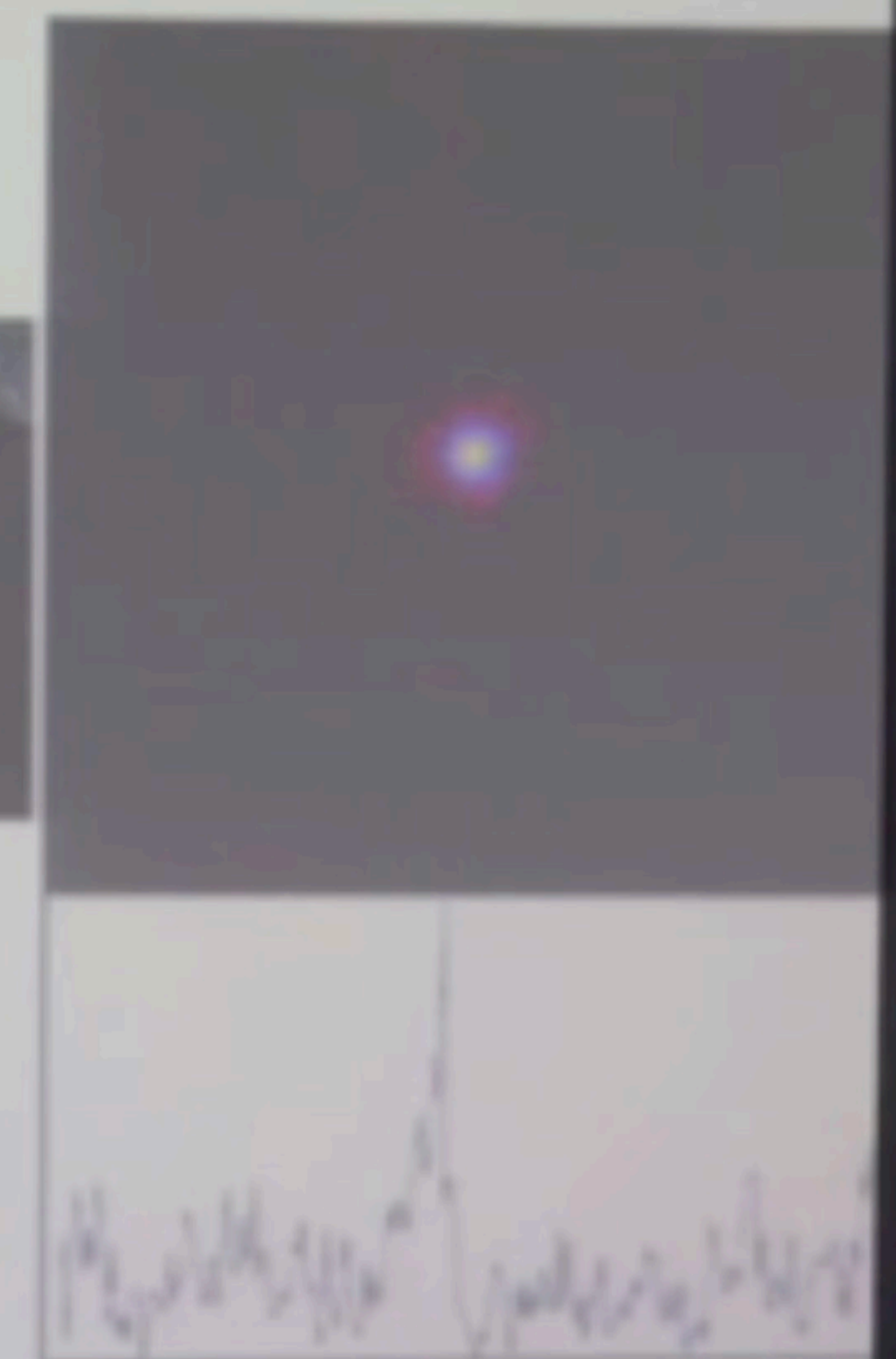
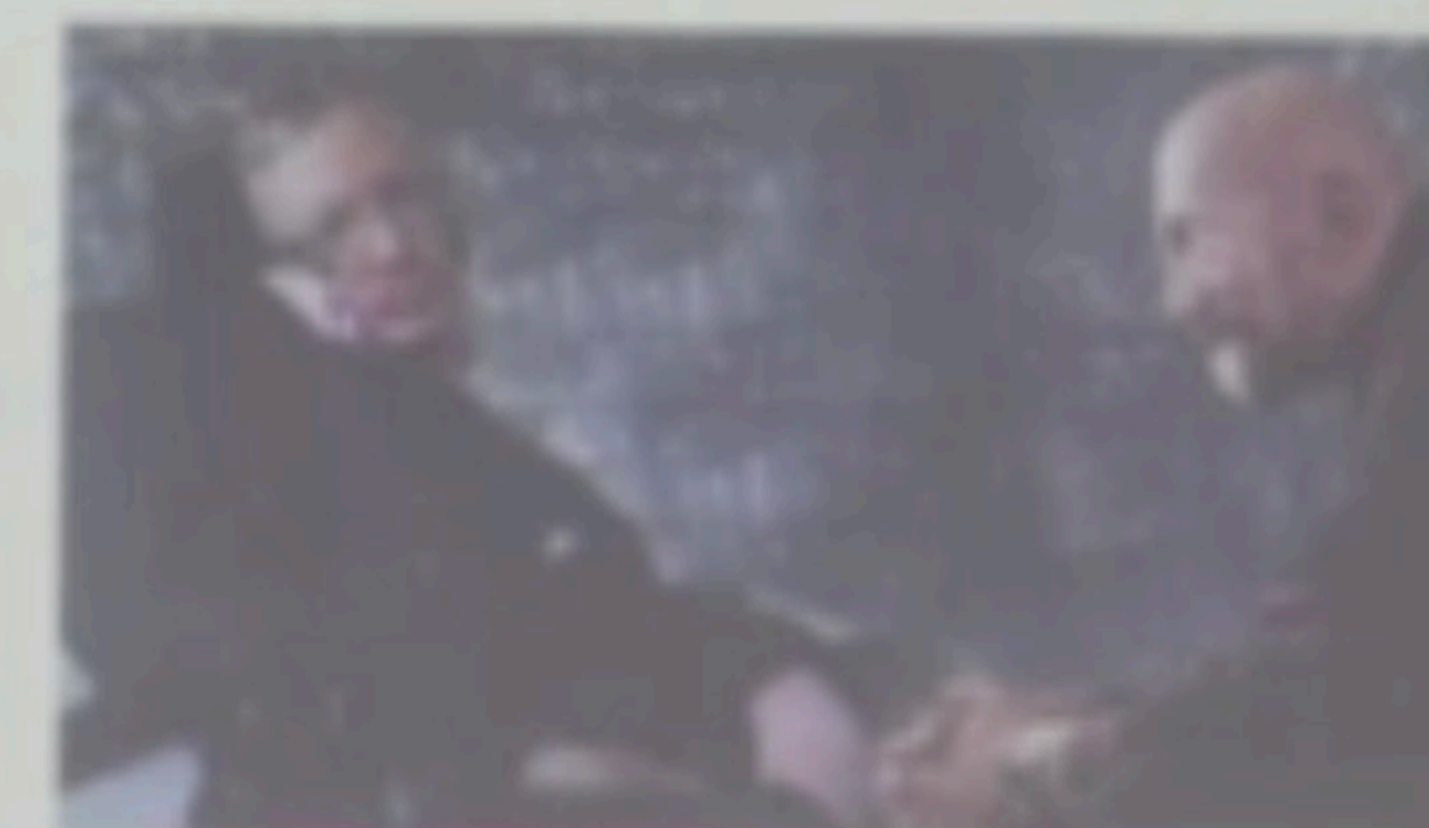
I don't believe astronomers can find black holes.

Kip Thorne

What about we bet for ...?

黑洞候选天体 **Cygnus X-1 (天鹅座X-1)**

- 强x射线源
- x射线辐射光变时标 ~ 1 毫秒
 - \rightarrow 辐射天体尺度 $< 10^8$ 厘米
 - \rightarrow 中子星或黑洞



吴学兵

直播 科普讲座“黑洞照片...” 娱乐·学习 小时总榜 周星榜 999+

UP 2 北京大学青年... 70 No. >1000

关注 61

奖吧!

星系级黑洞(超大质量黑洞)

- $M \sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$, 通常位于星系核心, 可利用恒星动力学和气体动力学测量其质量(间接探测)

$$M_{BH} \propto V^2 R$$

Gas Disk in Nucleus of Active Galaxy M87

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87

Approaching

Receding

Hubble Space Telescope - Faint Object Spectrograph

00:00

樱花 樱樱怪 么么哒 给大佬递茶 冰阔落 B坷垃 樱花雨 小电视飞船

0 0 首充有礼 礼包

开通特权

七日榜 舰队 友爱社 粉丝榜 房管

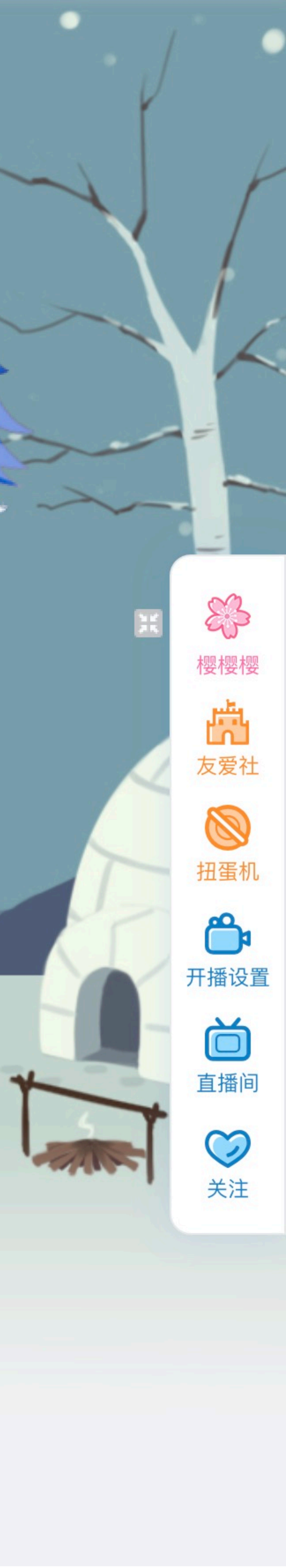
- 主播很孤单, 还没有人登船
- 全区广播: 清冷孤寒送给共... 中央1个樱花雨, 陪你去... 励都给你! 点击前往
 - 全区广播: 北鸢是个... 茫小树叶1个樱花雨, ... 雨, 奖励都给你! 点击... 播间
 - 全区广播: 娱加音之恋总指... 部送... 给湾湾的小千夜2个樱花雨, 陪你去... 看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间
 - 全区广播: 主播湾湾的小千夜的直播... 间樱树开花啦, 快去围观抽奖吧!
 - 全区广播: 女王的饭送给坂本叔1个... 小电视飞船, 点击前往TA的房间去... 抽奖吧
 - 娱乐区广播: 我是你的丑小鸭送给... 错我就是一心1个摩天大楼, 点击前... 往TA的房间去抽奖吧

请输入弹幕 DA☆ZE~ 0/20

舰 谷 勋 衔

发送

主播公告 1小时前 更新





3、类星体与超大质量黑洞

- 二次世界大战后，**雷达技术**用于天文观测，1950年代起发现几百个强射电源（剑桥射电源表，1C, 2C, 3C...）



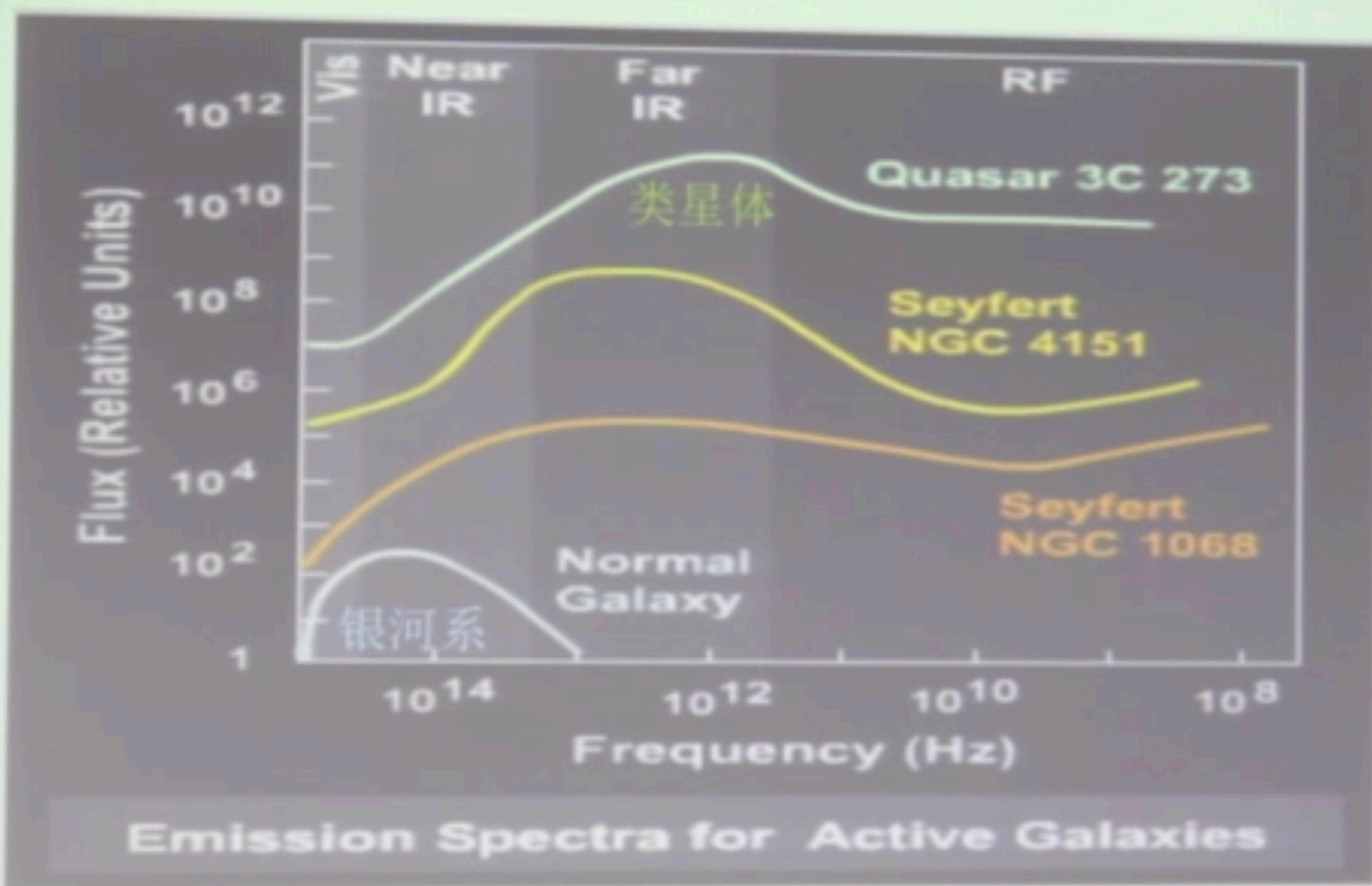
3、类星体与超大质量黑洞

- 二次世界大战后，**雷达技术**用于天文观测，1950年代起发现几百个强射电源（剑桥射电源表，1C, 2C, 3C...）
- 马休斯(T. Mathews)和桑德奇(A. Sandage) 1963年证认3C48有**恒星状**的光学对应体，且光谱观测发现其有**宽发射线**但波长无法识别
- 1963年施密特(Maarten Schmidt)证认出3C273光谱中强而宽的未知发射线实际上是**红移**了的氢、氧和其他元素的发射线。从而发现这些看起来类似恒星的天体实际上是非常遥远的天体 - 类星体(Quasar)
- 类星体是1960年代天文学**四大发现**之一





类星体发光比银河系大非常多，几乎全波段都有辐射！



吴学兵



- 类星体是遥远的天体，那它巨大的能量从何而来？！
- 不可能来源于核反应，与恒星与正常星系能源机制不同
- 泽尔多维奇(Y. Zel'dovich)和诺维可夫(I. Novikov) 1964年建议需引入大质量黑洞
- 林登贝尔(D. Lynden-Bell) 1969年提出超大质量黑洞的吸积作为类星体的能源
- 类星体是中心有超大质量黑洞的遥远天体！
- 类星体是最亮的活动星系核(其它类似的还有 Seyfert 星系、射电星系、耀变体等)



直播 科普讲座“黑洞照片...” 娱乐·学习 小时总榜 周星榜 999+

UP 2 北京大学青年... 70 No. >1000

关注 68

中国团队用丽江2.4米望远镜发现高红移最亮类星体

J0100+2802 (first spectrum on Dec. 29, 2013 with 2.4m) $z=6.30$

Wu, Wang, Fan, Yi, Zuo et al. (2015, Nature, 518, 512)

2.4m MMT (6.5米) LBT (2*8.4米)

Flux (10^{-17} ergs s^{-1} cm^{-2} \AA^{-1})

Wavelength (\AA)

弹幕: 00:00 樱花 樱樱怪 么么哒 给大佬递茶 冰阔落 B坷垃 樱花雨 小电视飞船 开通特权

七日榜 舰队 友爱社 粉丝榜 房管

主播很孤单, 还没有人登船

UL 0 新来滴啊: 老哥在吗? 呼叫黄老哥...

全区广播: 自闭式钢盔... の瑞希1个樱花雨, 陪你雨, 奖励都给你! 点击直播间

娱乐区广播: 主播五月病的直播间樱花雨开花啦, 快去围观吧!

全区广播: 大和腐子-由依送给BaoziHana1个小电视飞船, 点击前往TA的房间去抽奖吧

全区广播: 芒果和猫都喜欢送给猫不吃芒果1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

魔导王 4 UL 13 逃离大气层: 这是已经讲了1个半小时吗?

UL 6 又一碗鸡蛋面条: 45乙表示一卡一卡的

UL 0 peiyangium: 不到一个小时.....

UL 4 bessebla: 好奇现场有多少人耶

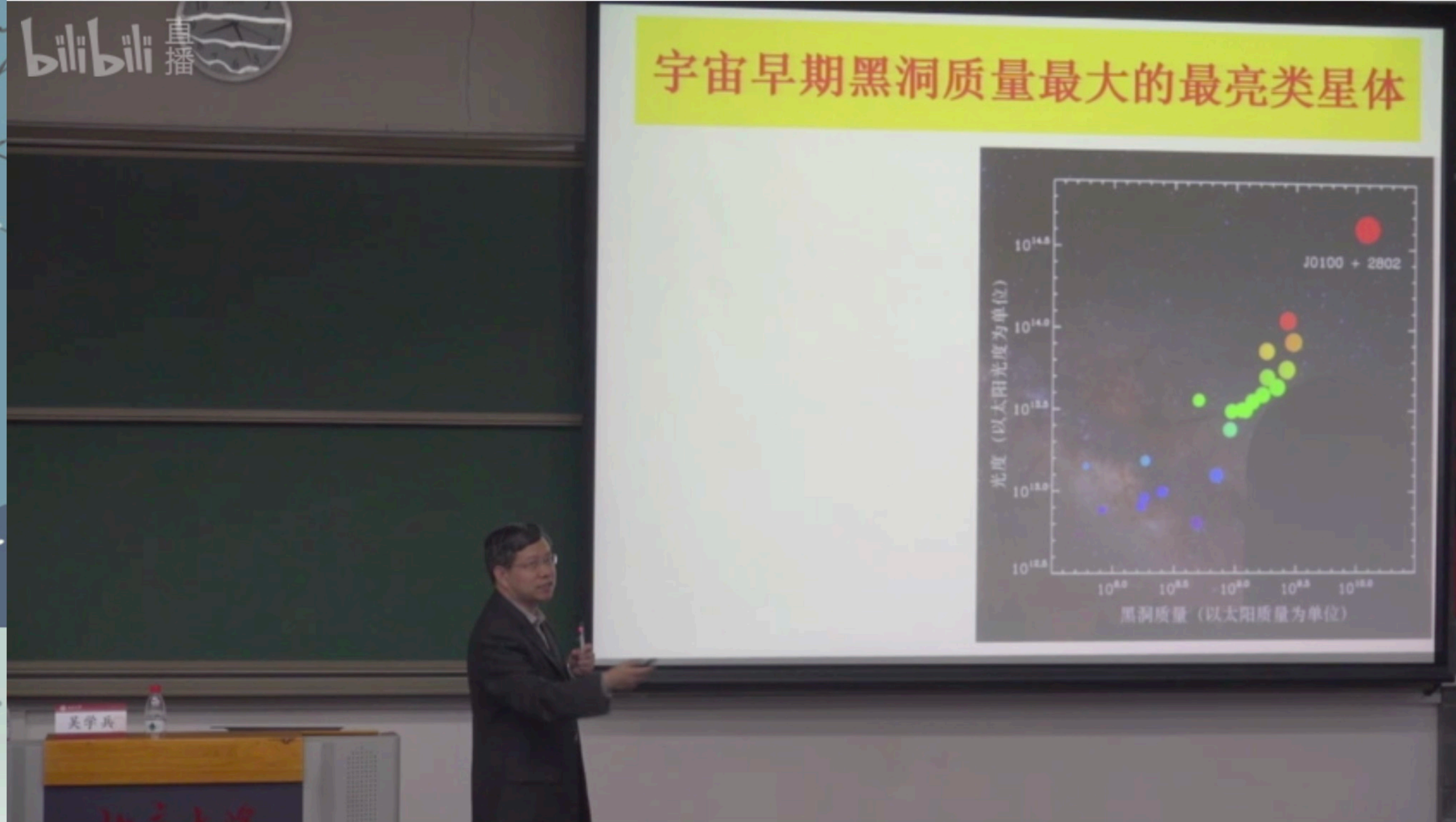
请输入弹幕 DA☆ZE~ 0/20

舰 谷 勋 街 发送

主播公告 1小时前 更新



 直播 科普讲座“黑洞照片...” 娱乐·学习 小时总榜 周星榜 999+ UP 2 北京大学青年... 70 No. >1000 关注 68 1980



00:00  樱花  樱樱怪  周星  给大佬递茶  冰阔落  B坷垃  樱花雨  小电视飞船 开通特权

0 0 首充有礼 包裹

七日榜 舰队 友爱社 粉丝榜 房管

主播很孤单, 还没有人登船

 の瑞希1个樱花雨, 陪你去看雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

 娱乐区广播: 主播五月直播间樱花开花啦, 快去看看吧!

 全区广播: 大和腐子-由依送 Ba... iHana1个小电视飞船, 点击前往TA的房间去抽奖吧

 全区广播: 芒果和猫都喜欢送给猫不吃芒果1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

魔导王 4 UL 13 逃离大气层: 这是已经讲了1个半小时吗?

UL 6 又一碗鸡蛋面条: 45乙表示一卡一卡的

UL 0 peiyangium: 不到一个小时.....

UL 4 bessebla: 好奇现场有多少人耶

UL 0 雪漫婉婉: 现场好少人的说

UL 1 水木银河: 现场有妹子

开播设置 直播间 关注

请输入弹幕 DA☆ZE~ 0/20

舰 谷 勋 衍 发送



主播公告 1小时前 更新

首张黑洞照片发布(M87星系黑洞)

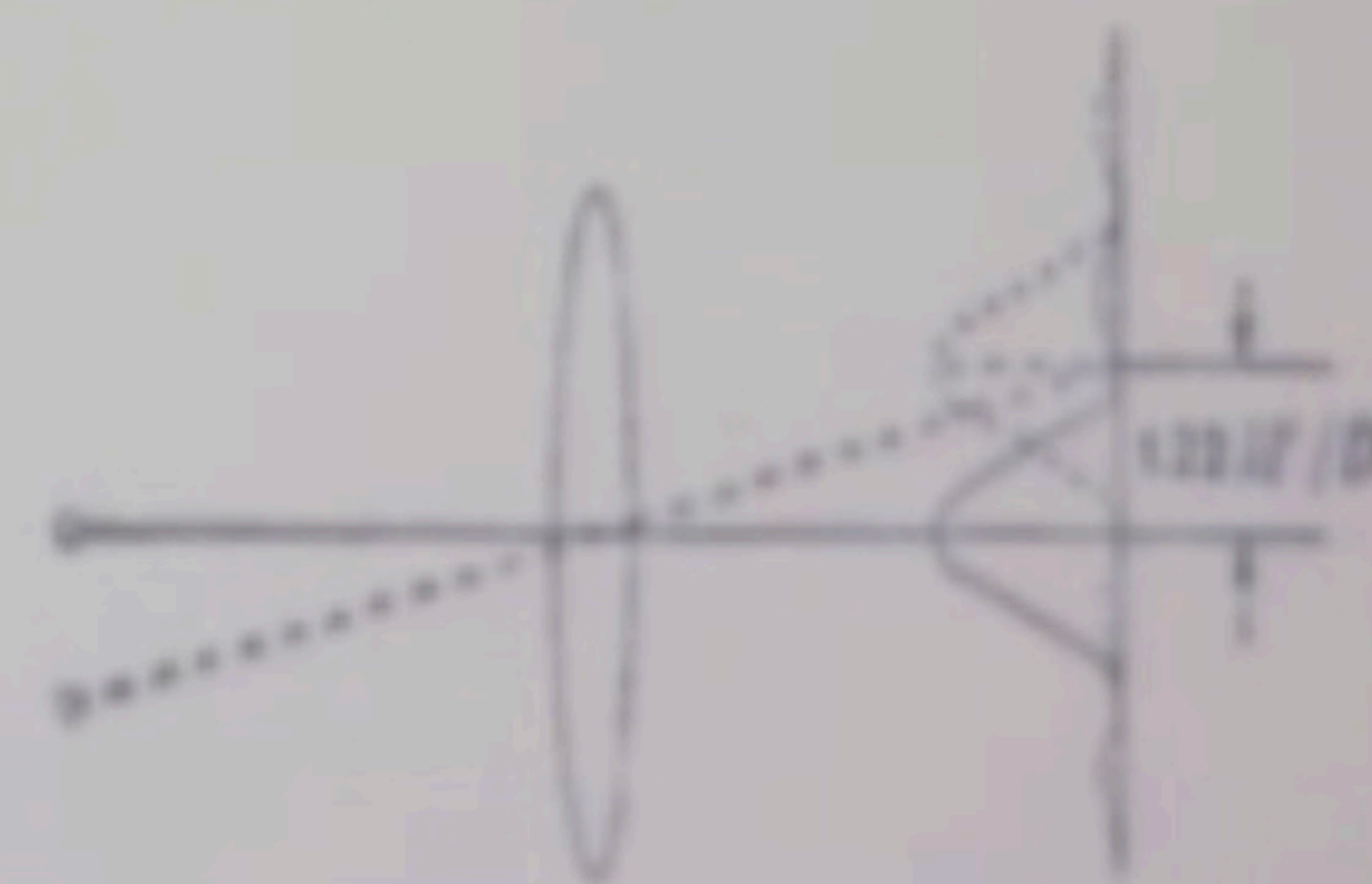


4、首张黑洞照片的科学奥秘

• 分辨率的挑战

– 理论极限：物体靠得多近还能被分辨？

- **瑞利判据**：由于衍射，光学系统中物体的像不是几何点像，而是有一定大小的光斑(爱里斑)。当两个物点过于靠近，其像斑重叠在一起，就分辨不出
- **最小可分辨角大小(弧度) = $1.22 \lambda / D$**
 λ 是光的波长， D 是探测器直径)
- 要提高分辨率，需要探测**波长短**的光，而且尽可能**增大探测器直径**！



黑洞视界的角大小

- 角大小 \sim 视界直径 / 离地球距离
- 银河系内恒星级黑洞(~ 10 倍太阳质量)
 - 史瓦西半径才 ~ 30 公里, 距离 \sim 上万光年(1光年= 9.5 百亿公里): 角大小 ~ 0.01 微角秒 (1微角秒= 36 亿分之一度) \rightarrow 无法探测!
- 很近的超大质量黑洞
 - 银河系中心黑洞: 质量 ~ 4 百万太阳质量, 史瓦西半径 ~ 1 千2百万公里, 距离 ~ 2.5 万光年, 角大小 ~ 20 微角秒
 - M87星系中心黑洞: 质量 ~ 60 亿太阳质量, 史瓦西半径 ~ 2 百亿公里, 距离 ~ 5 千万光年, 角大小 ~ 14 微角秒 (相当于分辨月亮上的一个乒乓球!)



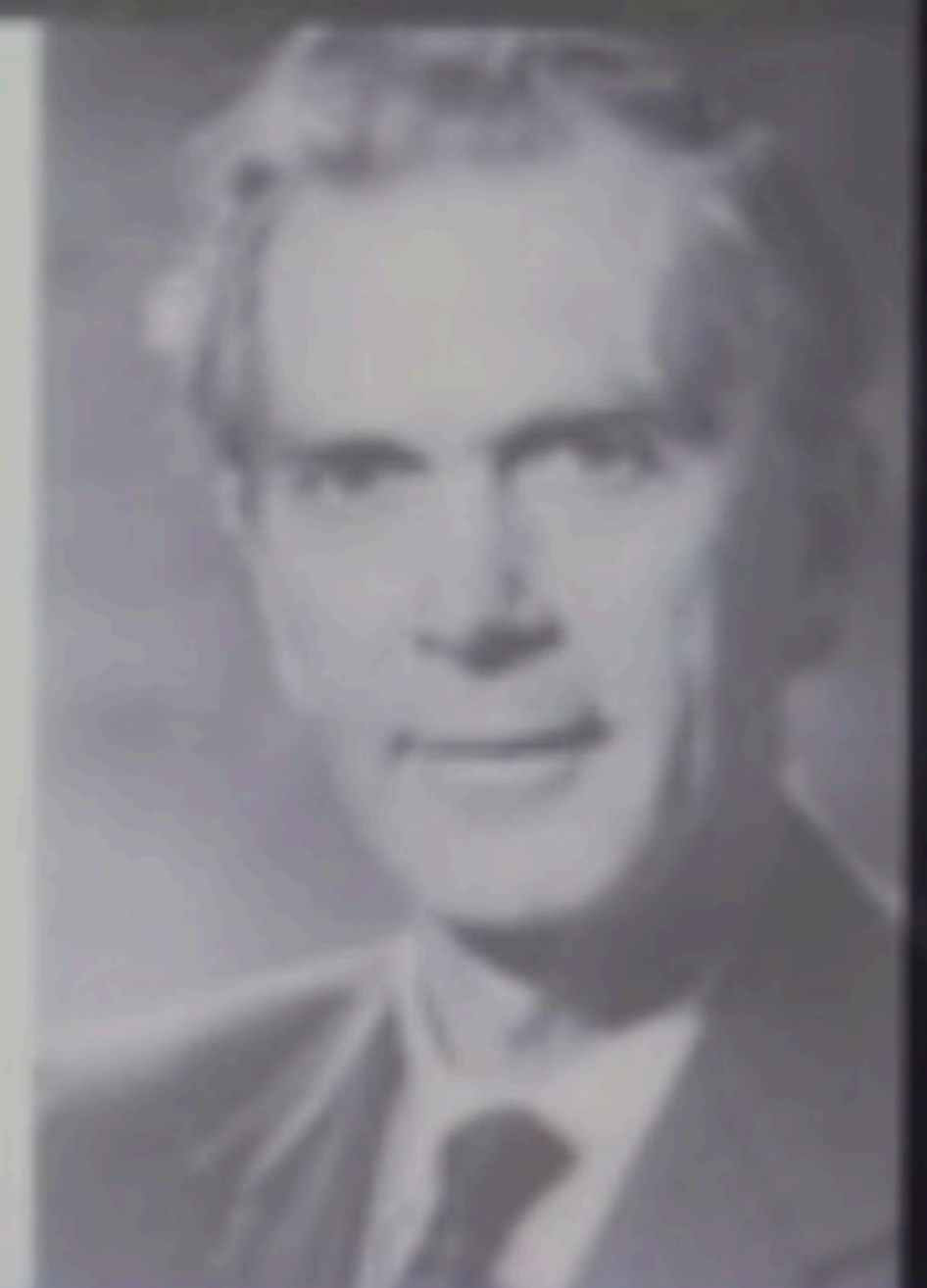
提高角分辨率的方法

- 可增大望远镜口径，如500米的中国天眼FAST，但提高有限 (FAST 在波长21cm时分辨率为3角分)



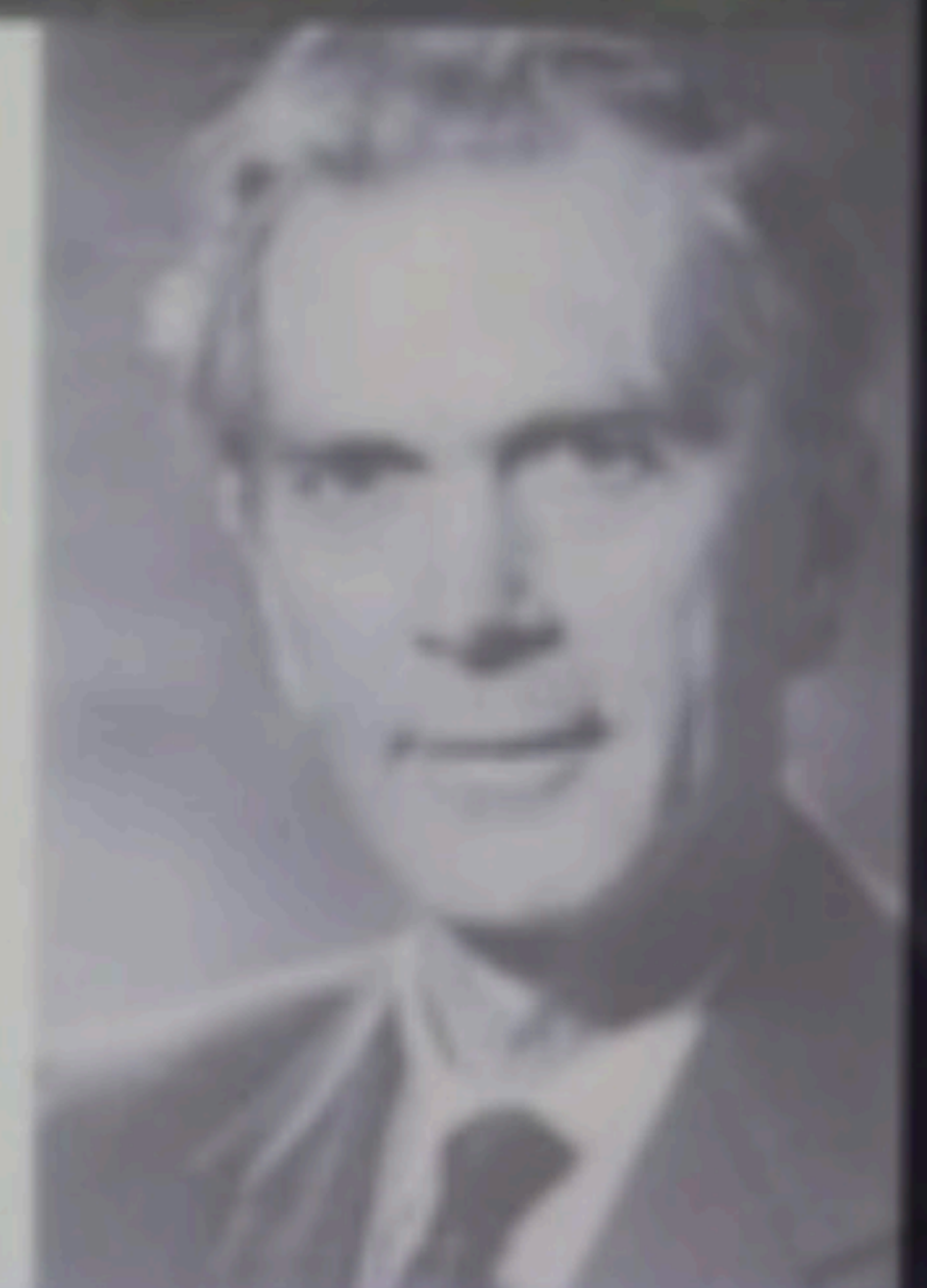
提高角分辨率的方法

- 可增大望远镜口径，如500米的中国天眼FAST，但提高有限 (FAST 在波长21cm时分辨率为3角分)
- 可由多个射电望远镜组成**综合孔径干涉阵**，由1974年诺贝尔物理学奖获得者马丁·赖尔爵士提出。
- 阵列望远镜分布范围越广 (**基线越长**)，角分辨率越高。如甚大阵 (VLA) 和甚长基线干涉 (VLBI) 等



提高角分辨率的方法

- 可增大望远镜口径，如500米的中国天眼FAST，但提高有限(FAST 在波长21cm时分辨率为3角分)
- 可由多个射电望远镜组成**综合孔径干涉阵**，由1974年诺贝尔物理学奖获得者马丁·赖尔爵士提出。
- 阵列望远镜分布范围越广(**基线越长**)，角分辨率越高。如甚大阵(VLA)和甚长基线干涉(VLBI)等
- 甚长基线干涉技术也成功用于我国**嫦娥探月**工程的测轨定位



事件视界望远镜EHT

- EHT采用全球不同地点**8个毫米波望远镜**，组成直径类似地球大小的干涉阵，分辨率达**20微角秒**!



EHT对M87黑洞的观测

- 8个望远镜，波长1.3毫米(227-229GHz)

| 望远镜 (阵) | 地点 | 有效口径 (米) |
|---|---------|----------|
| Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) | 智利 | 阵列 73 |
| Atacama Pathfinder Experiment (APEX) | 智利 | 12 |
| James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) | 美国夏威夷 | 15 |
| Large Millimeter Telescope (LMT) | 墨西哥 | 32.5 |
| IRAM 30-meter Telescope (PVI) | 西班牙 | 30 |
| Submillimeter Array (SMA) | 美国夏威夷 | 阵列 14.7 |
| Submillimeter Telescope (SMT) | 美国加利福尼亚 | 10 |
| South Pole Telescope (SPT) | 南极 | 6 |



吴宇兵

北京大学

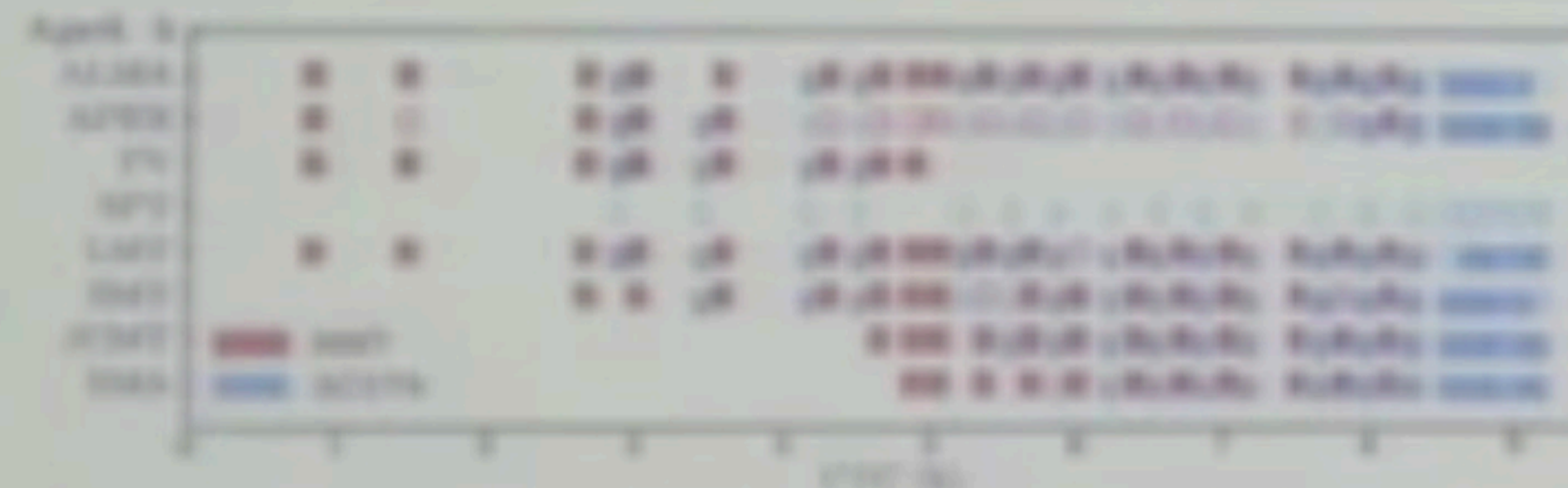


EHT对M87黑洞的观测

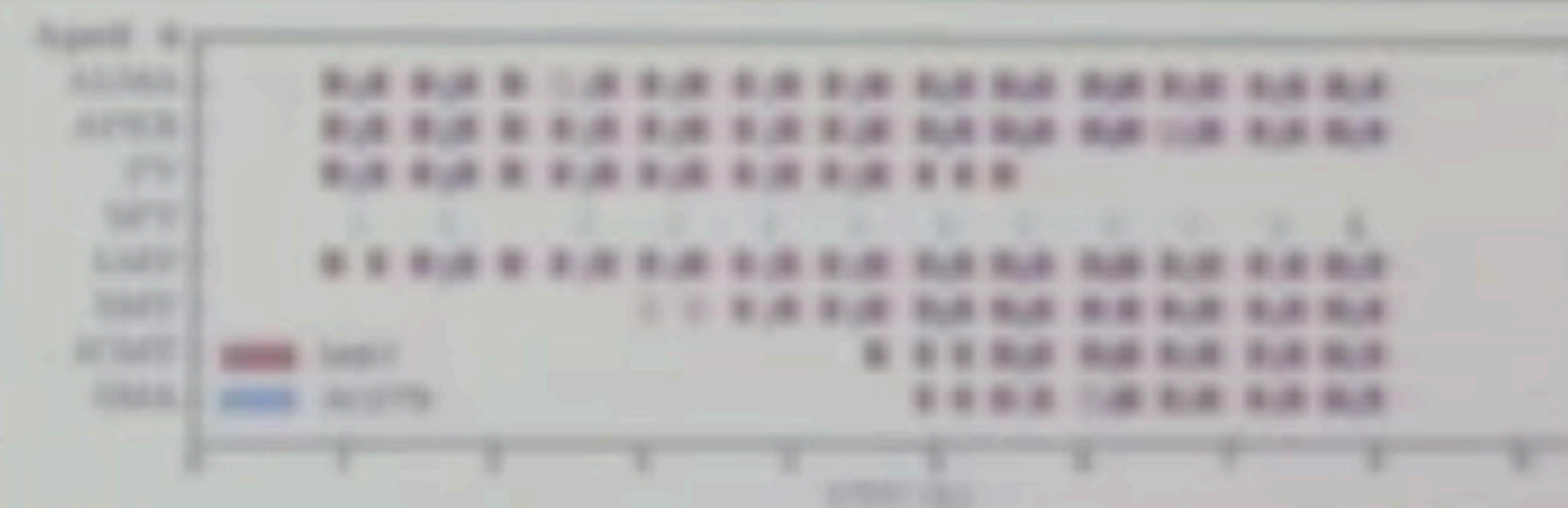
- 8个望远镜, 波长1.3毫米(227-229GHz)
- 观测4天(2017/04/05,06,10,11): **M87**、**3C279**
 - 数据量32G/s, 4天数据量达10PB (10240TB, 飞机运输!)

| 望远镜 (缩写) | 地点 | 有效口径 (米) |
|---|---------|----------|
| Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) | 智利 | 阵列 73 |
| Atacama Pathfinder Experiment (APEX) | 智利 | 12 |
| James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) | 美国夏威夷 | 15 |
| Large Millimeter Telescope (LMT) | 墨西哥 | 50.5 |
| IRAM 30-meter Telescope (PVI) | 西班牙 | 30 |
| Submillimeter Array (SMA) | 美国夏威夷 | 阵列 14.7 |
| Submillimeter Telescope (SMT) | 美国加利福尼亚 | 10 |
| South Pole Telescope (SPT) | 南极 | 6 |

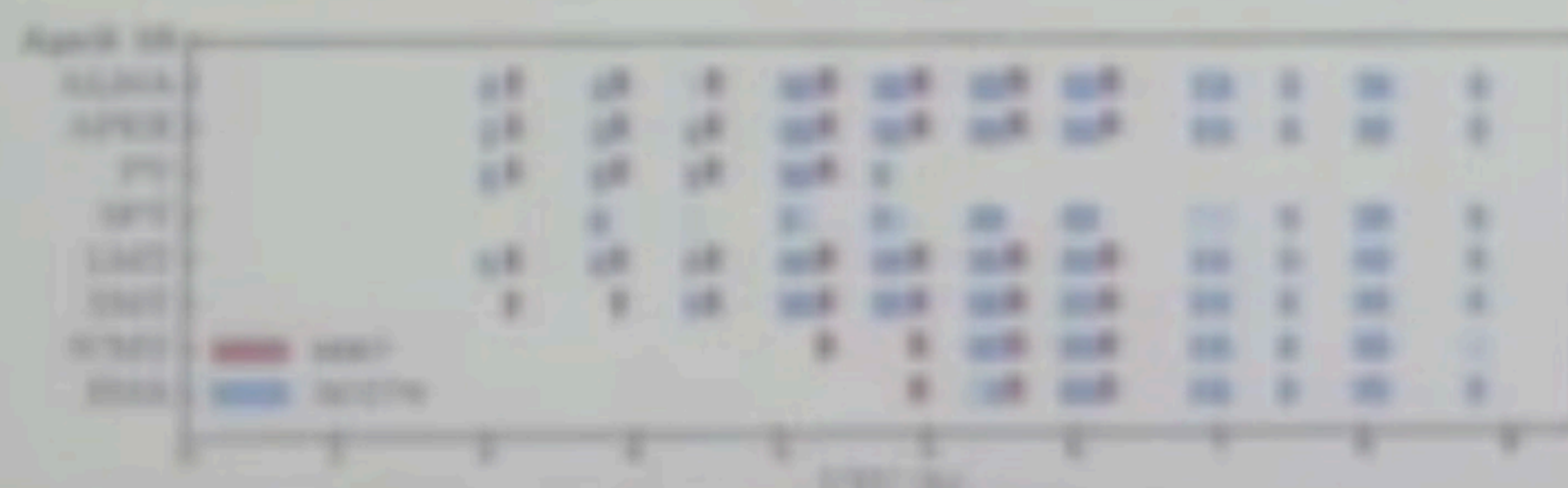
4月5日
日纪录



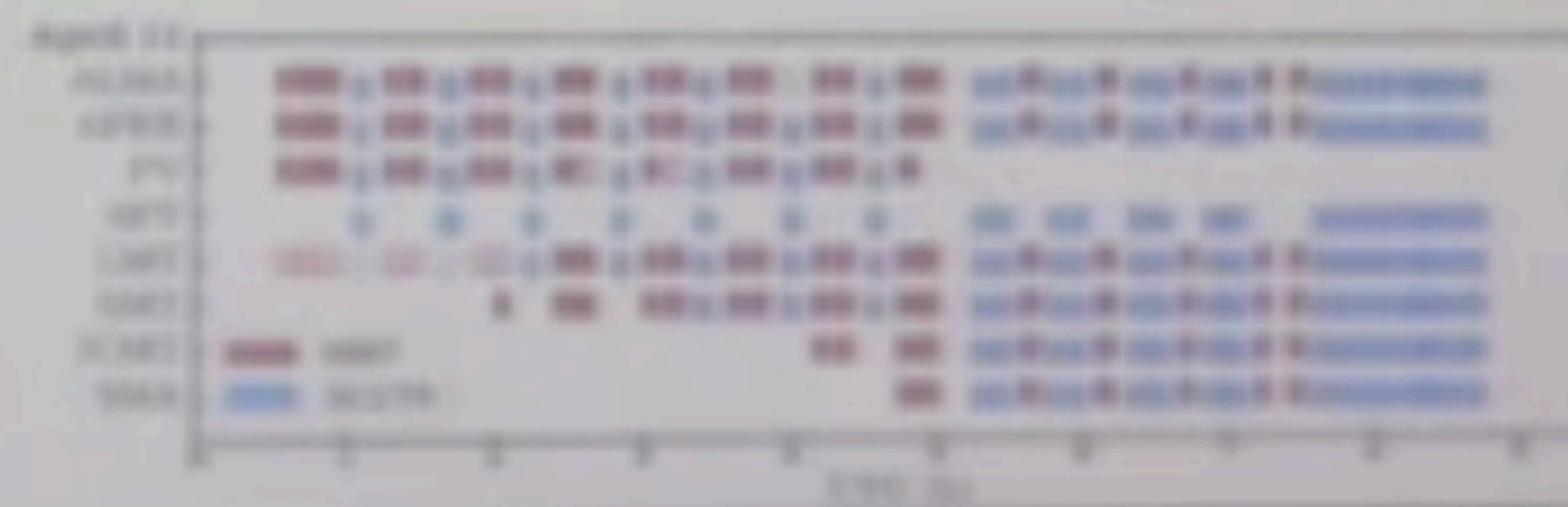
4月6日
日纪录



4月10日
日纪录



4月11日
日纪录

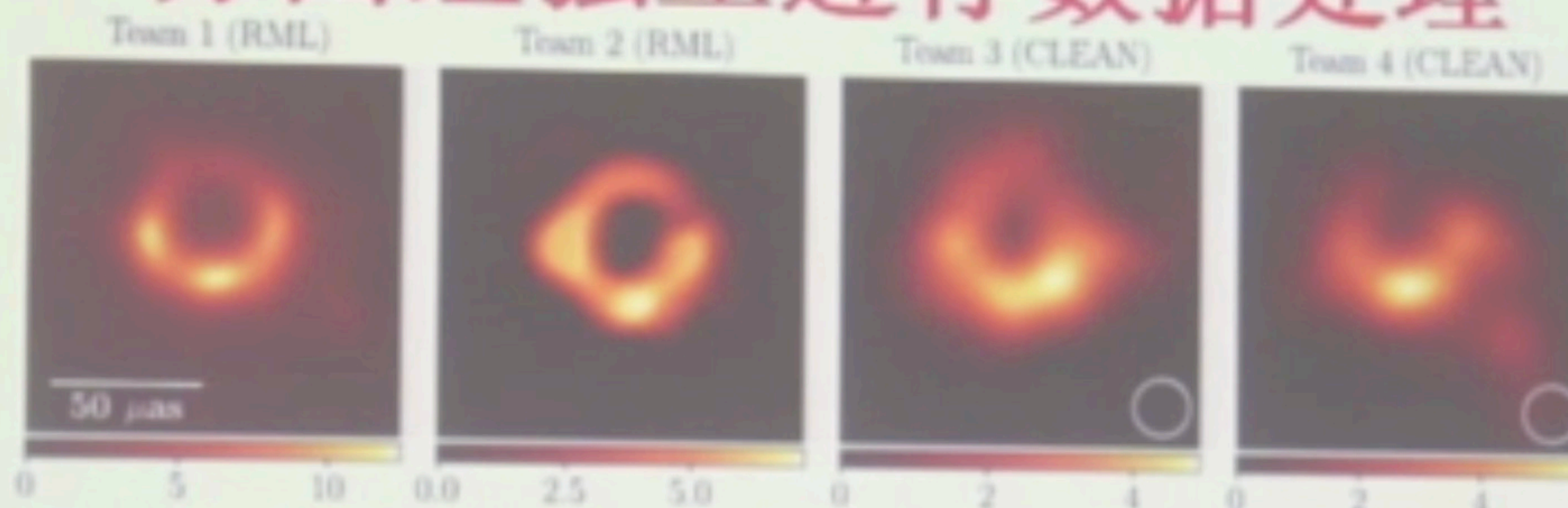


吴宇兵



分四组独立进行数据处理

04/11
数据
初始
处理



04/11
数据
最后
图像



吴宇兵

北京大学



全区广播: 生离_Hiraeth送给碳酸熊卡1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

与理论模拟图像的对比



吴宇兵

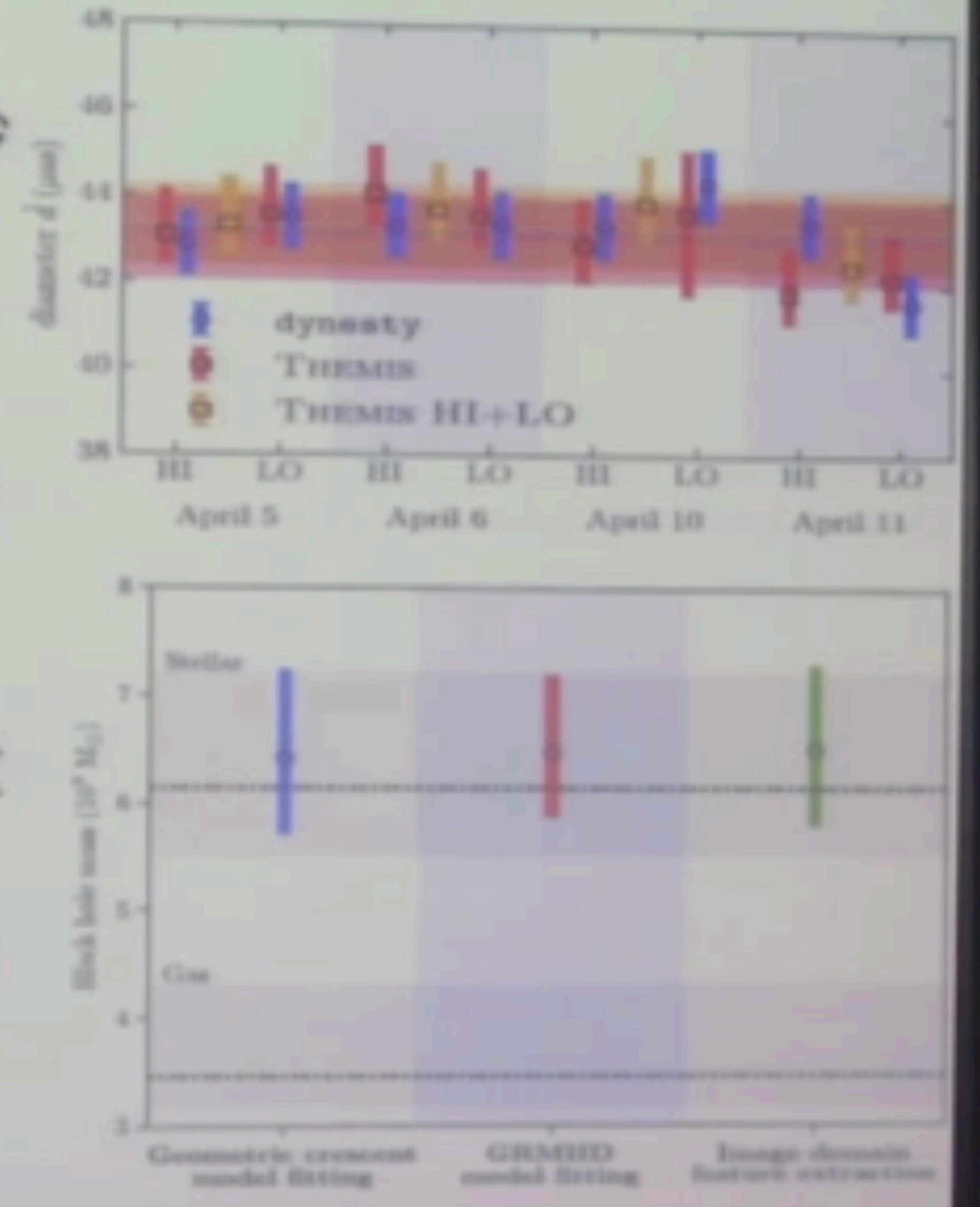
北京大学



全区广播: 小小粉丝空间的原子め送给猫不吃芒果め1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

测量黑洞阴影大小和黑洞质量

- 黑洞阴影直径~43微角秒
- 黑洞引力半径 $r_g = GM/c^2$
对应角大小~3.8微角秒
(史瓦西半径=2倍引力半径)
- 黑洞质量=65亿太阳质量
- 距离 $D = 16.8\text{Mpc} = 5.48$
千万光年




吴宇兵

北京大学



首张黑洞照片的科学意义



- 首次**直接探测**到黑洞阴影，证明了宇宙中黑洞的存在，为爱因斯坦广义相对论提供了在强引力场中的又一验证 



吴宇兵

北京大学



首张黑洞照片的科学意义



- 首次**直接探测**到黑洞阴影，证明了宇宙中黑洞的存在，为爱因斯坦广义相对论提供了在强引力场中的又一验证
- 黑洞阴影大小可给出**黑洞质量**的测量(目前65亿太阳质量的结果比以前哈勃空间望远镜对气体观测给出的质量大一倍)
- 发光亮环(“甜甜圈”)的不对称结构对理解黑洞附近物质**发光机制及吞噬物质**的过程非常重要





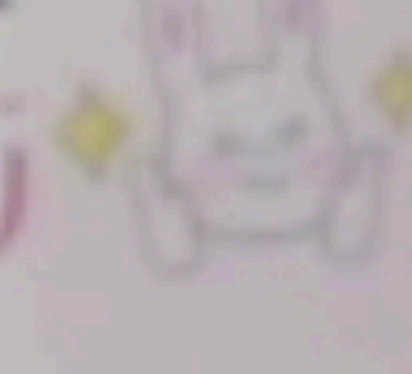


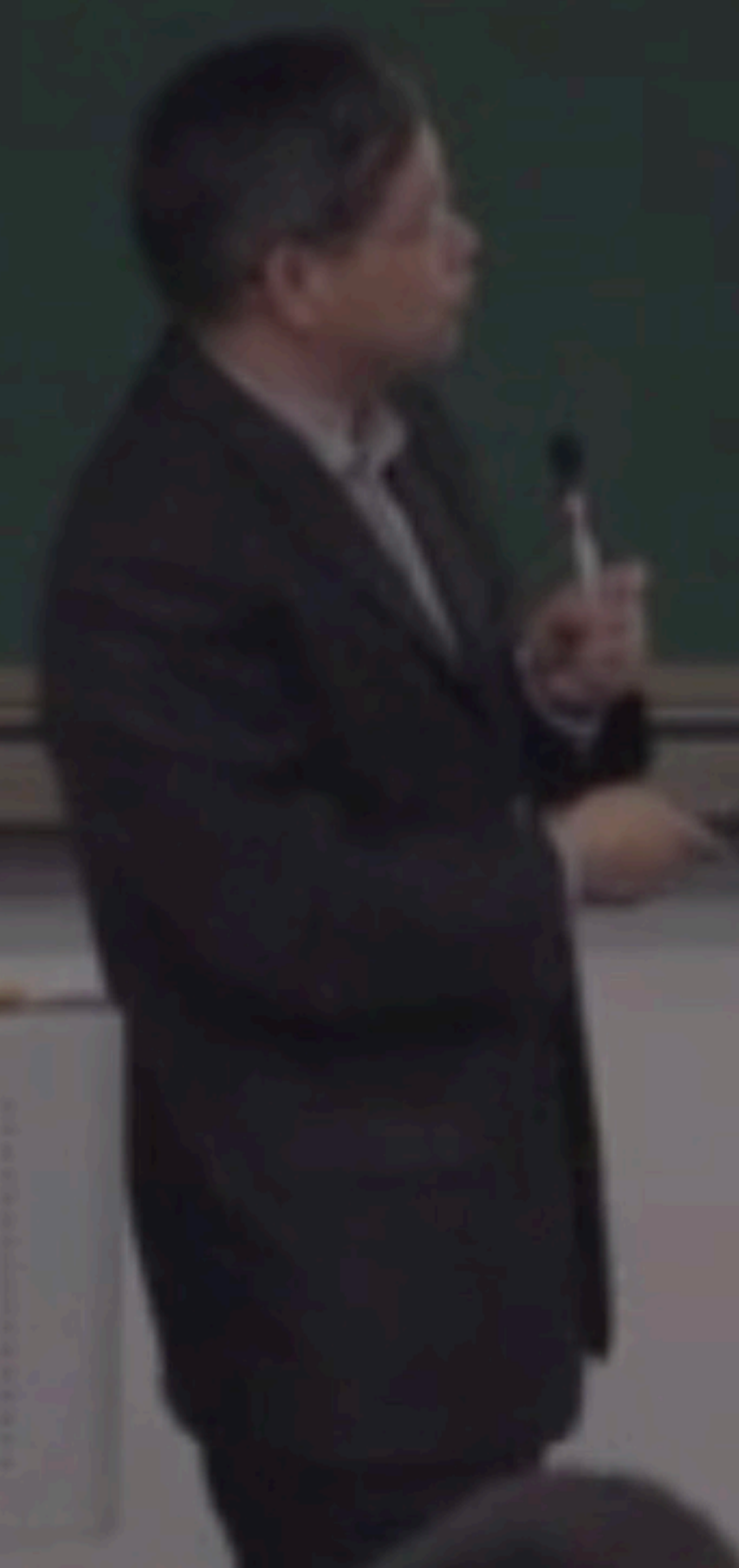
吴宇兵

北京大学

首张黑洞照片的科学意义



- 首次**直接探测**到黑洞阴影，证明了宇宙中黑洞的存在，为爱因斯坦广义相对论提供了在强引力场中的又一验证 
- 黑洞阴影大小可给出**黑洞质量**的测量(目前65个太阳质量的结果比以前哈勃空间望远镜对气体观测给出的质量大一倍) 
- 发光亮环(“甜甜圈”)的不对称结构对理解黑洞近物质**发光机制及吞噬物质**的过程非常重要 
- 最靠近黑洞视界的区域是产生M87射电星系大尺度喷流的根源，“知根知底”可更好理解**喷流** 
生机 



吴学兵

北京大学

 **直播** 科普讲座“黑洞照片...” 娱乐·学习 **娱乐小时榜 184** **周星榜 999+** **UP 2** 北京大学青年... **70** **No. >1000** **关注 74**

5、总结与展望

- 黑洞不仅是相对论的预言，而且是宇宙中真实的存在。黑洞可以被**探测**，不仅因黑洞周围被吸积的物质释放巨大的能量可间接探测，而且黑洞视界阴影还可直接成像
- 宇宙中的黑洞可分为**4类**：原初黑洞、恒星级黑洞、中等质量黑洞、超大质量黑洞。黑洞合并可产生**引力波**
- **类星体**是中心具有**超大质量黑洞**、能量巨大的遥远天体，**高红移类星体**是研究遥远宇宙的重要探针。发现更多的极亮高红移类星体对研究宇宙的演化非常重要
- 对射电星系M87中心**黑洞的直接成像**证明了黑洞的存在，为爱因斯坦相对论提供了在强引力场中又一验证，对理解黑洞周围物质的吸积和喷流过程至关重要
- 未来**更多亚毫米波望远镜**组成的干涉阵将为我们提供更清晰、更多的黑洞照片
期待未来我国率先建成**空间/月基毫米波望远镜干涉阵**

00:00 | 樱花 | 樱樱怪 | 么么哒 | 给大佬递茶 | 冰阔落 | B坷垃 | 樱花雨 | 小电视飞船 | 开通特权

七日榜 | 舰队 | 友爱社 | 粉丝榜 | 房管

主播很孤单，还没有人登船

吧!

全区广播: 小小粉丝空送给猫不吃芒果1个去看樱花雨, 奖励都给往TA的直播间

全区广播: 主播程笑哥哥的播樱树开花啦, 快去围观抽奖!

UL 0 jing31415926 : ppt上是个啥?

全区广播: 一夜知轻寒送给冷鸢you sa1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

全区广播: 没有昵称就不用送给丸丸-1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

全区广播: 极冬べ饭团送给Hanaso u轮子1个樱花雨, 陪你去看樱花雨, 奖励都给你! 点击前往TA的直播间

请输入弹幕 DA☆ZE~ 0/20

发送

领取樱花