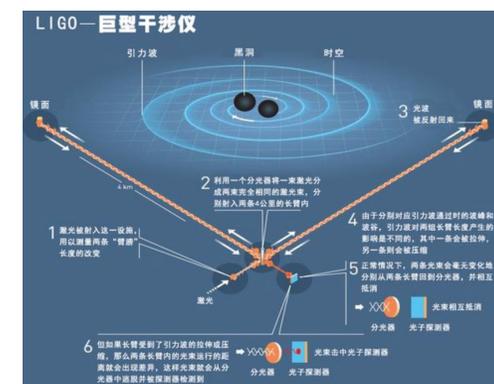
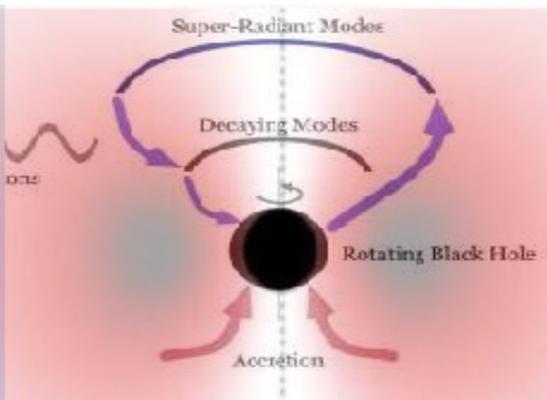


超轻暗物质的引力波效应

报告人：张云龙
引力波天体物理研究团组

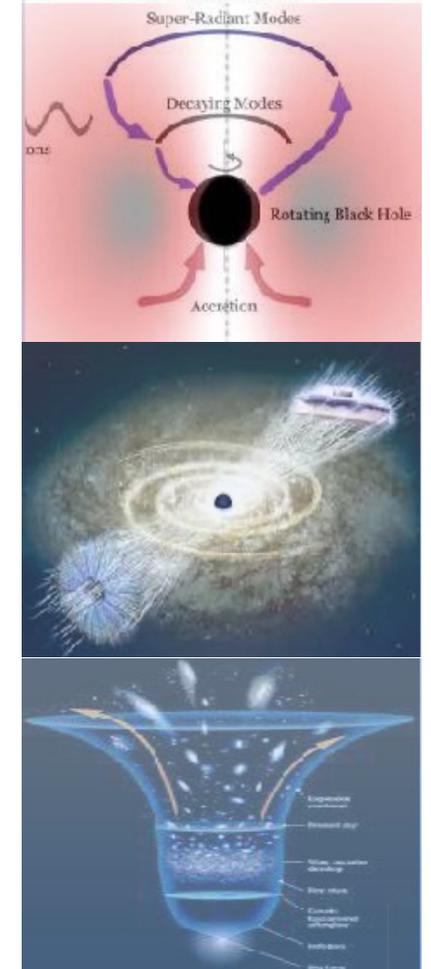
2023年4月16日



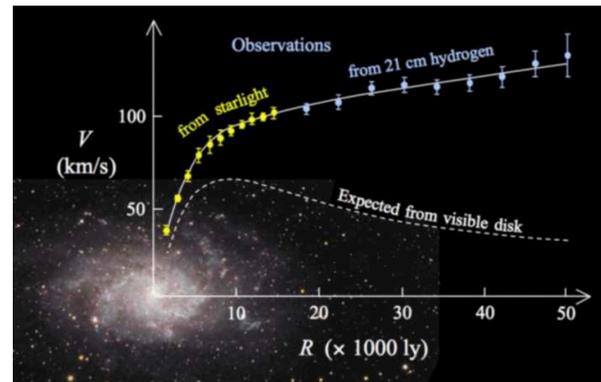
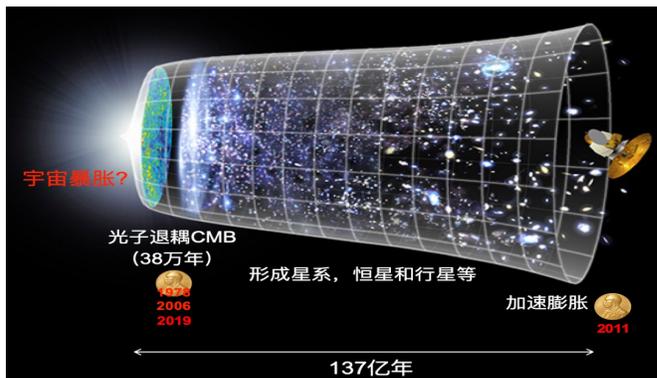
国家天文台青年学者学术交流活动(2023年度第一期)

报告内容

- 一、超轻暗物质-波动型
- 二、引力波探测-多波段
- 三、脉冲星计时-纳赫兹波动
- 四、黑洞超辐射-引力波信号
- 五、小结和展望



暗物质的多尺度效应



宇宙的演化?

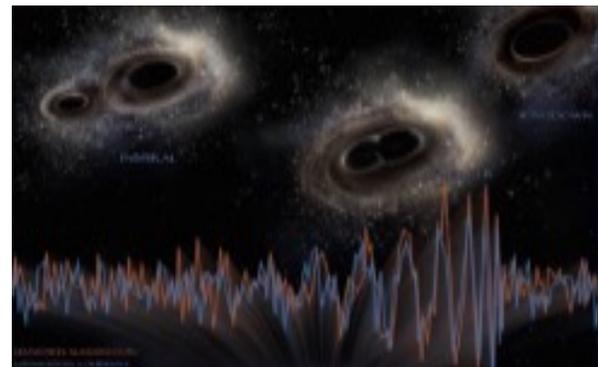
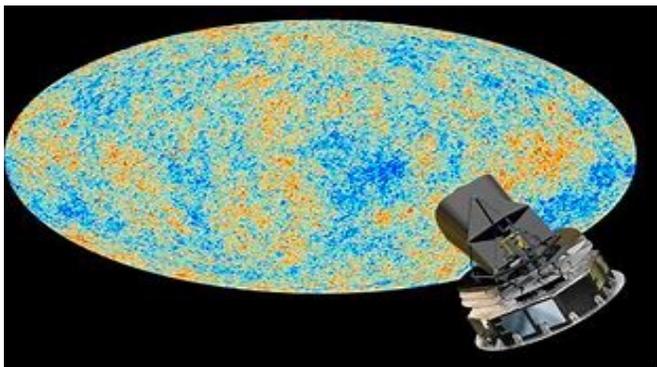
星系暗物质?

黑洞超辐射?

微波背景辐射

脉冲星计时

引力波探测



暗物质粒子的质量?

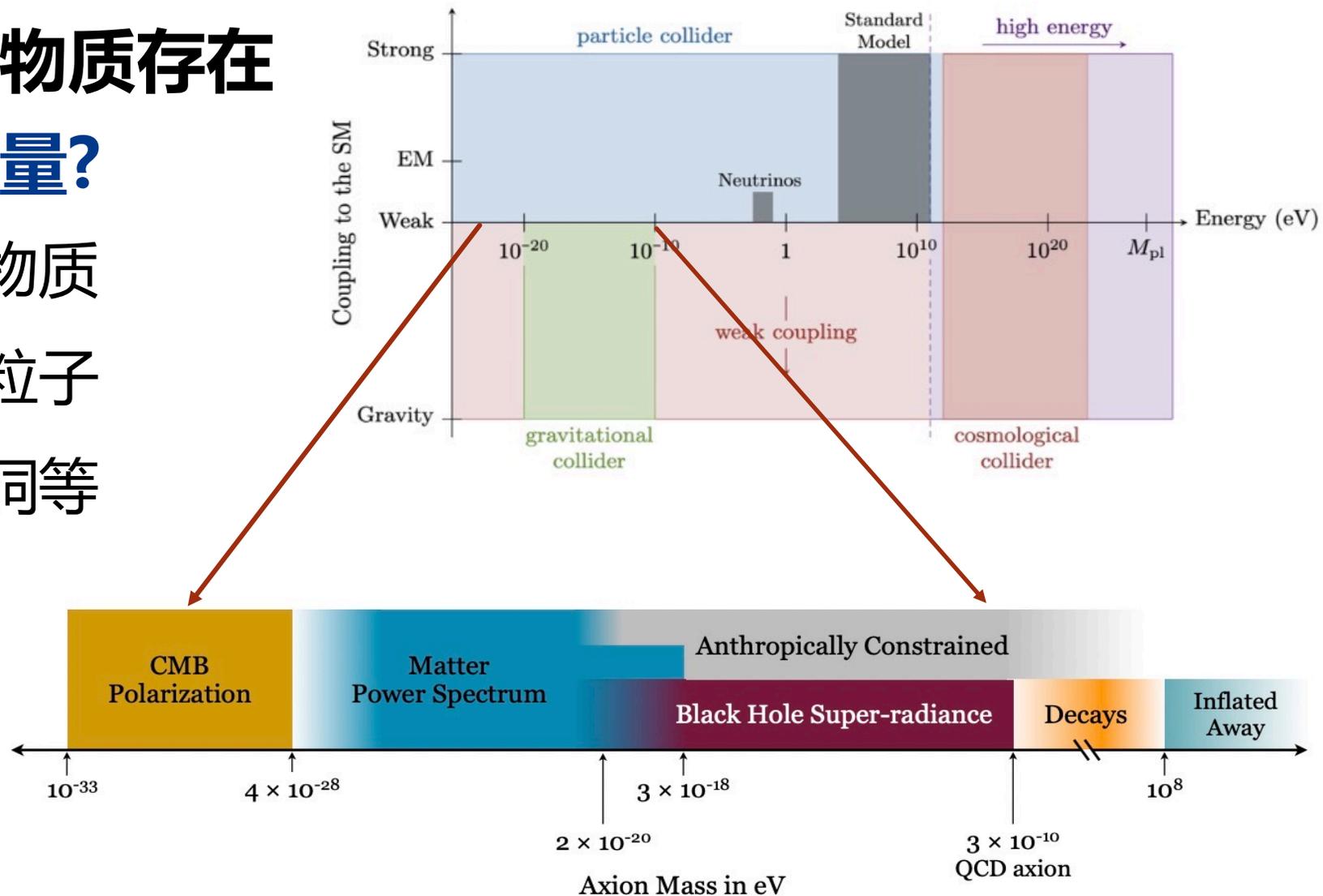
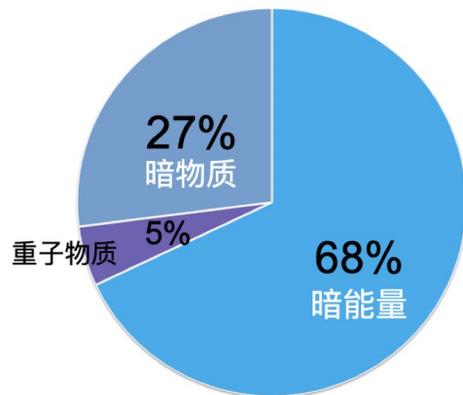
➤ 天文观测表明暗物质存在

➤ 暗物质粒子的质量?

➤ 波动型: 超轻暗物质

➤ 粒子型: 大质量粒子

➤ 宏观型: 原初黑洞等



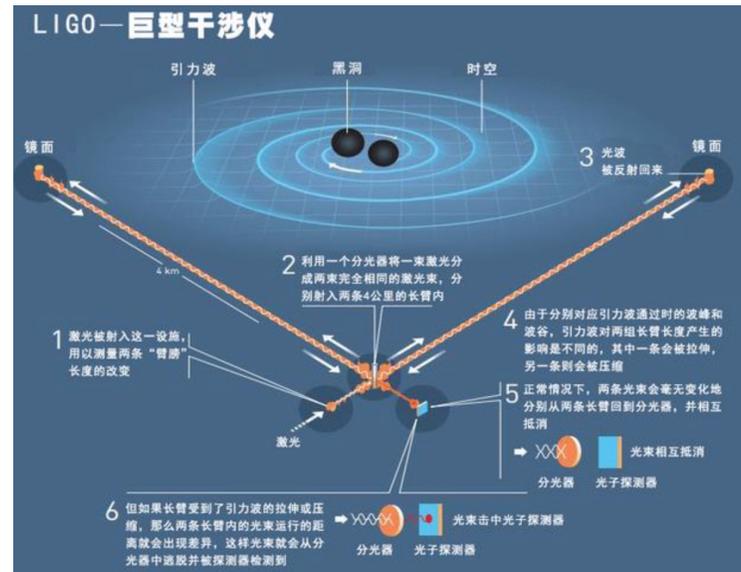
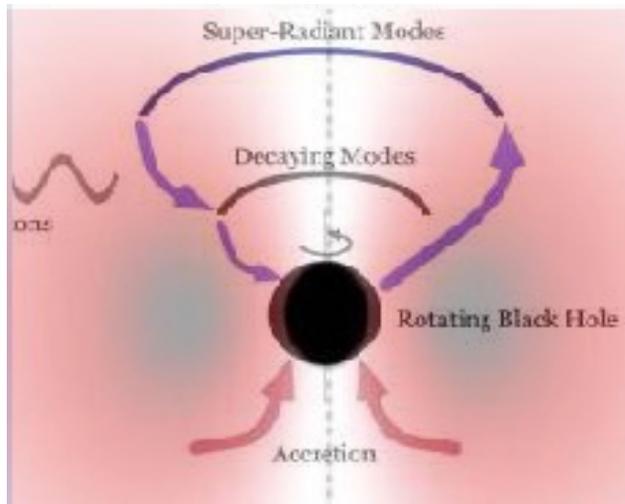
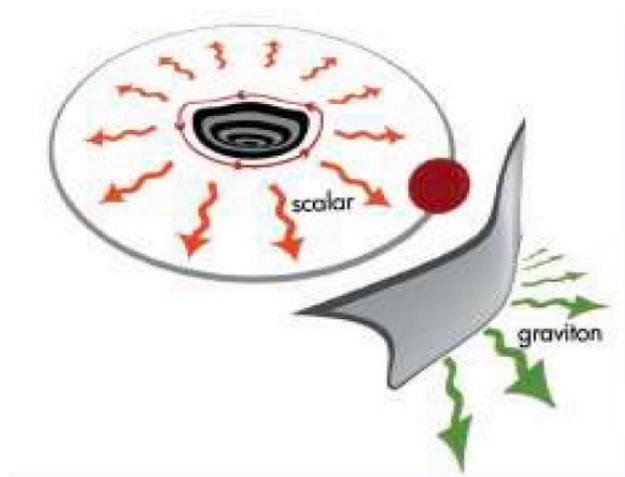
引力波探测暗物质

➤ 双黑洞并合引力波的首次探测

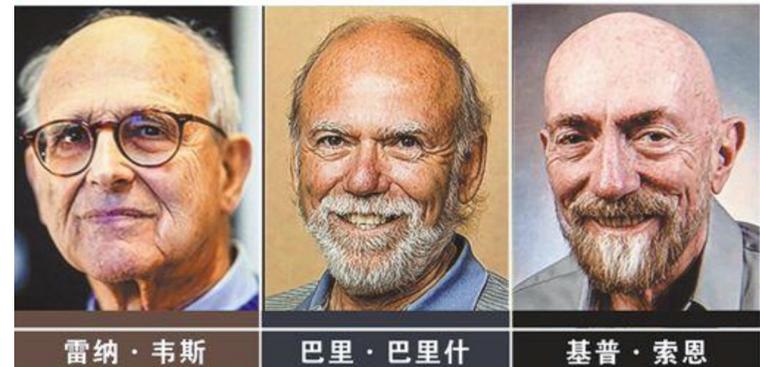
- 证实广义相对论百年前经典预言
- 开创了引力波物理天文学的新时代

➤ 引力波打开新窗口: 探测暗物质?

- 黑洞超辐射效应 → 引力波信号



分享2017年诺贝尔物理学奖

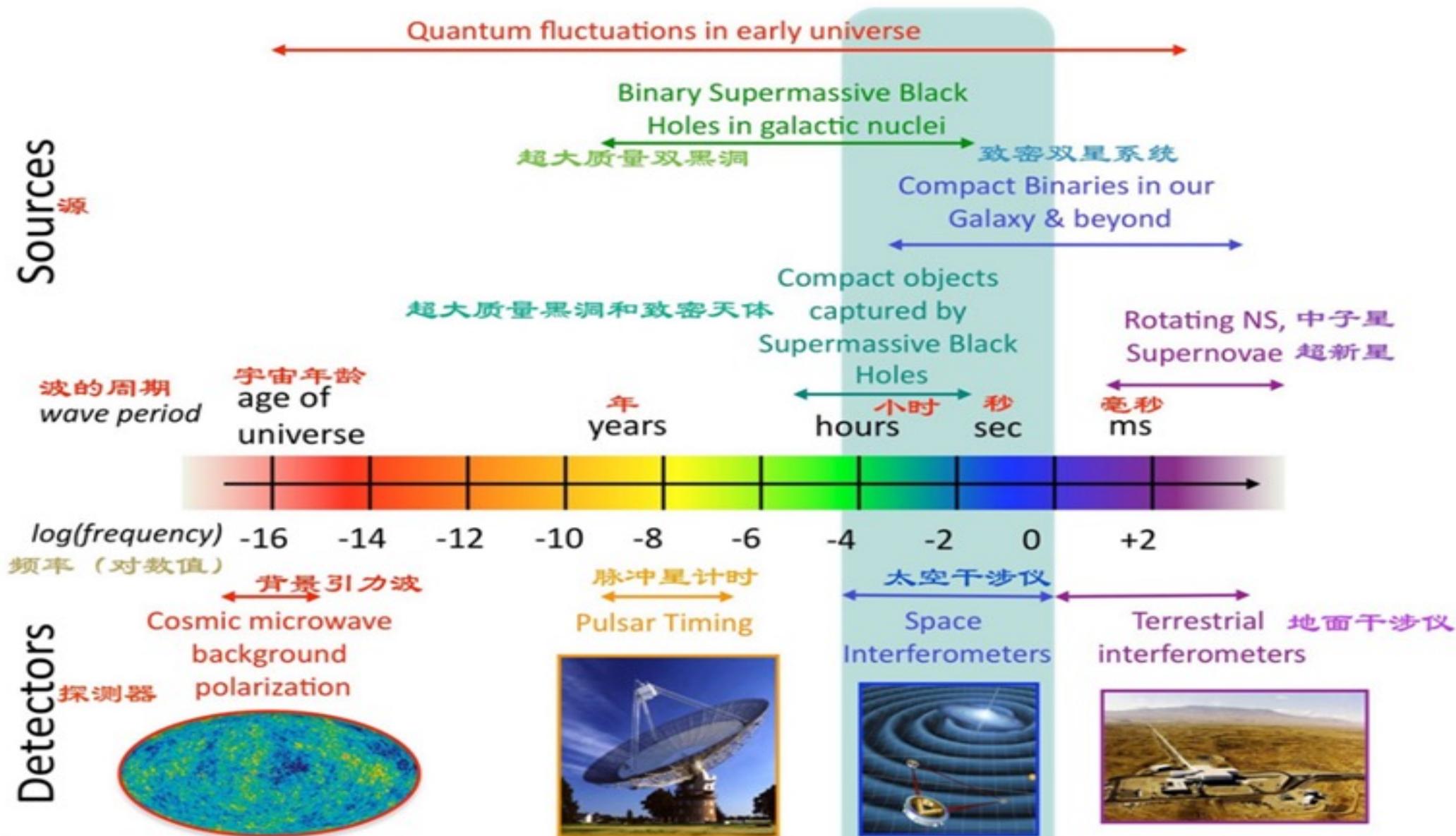


当地时间10月3日,瑞典皇家科学院宣布

将2017年诺贝尔物理学奖授予以上三名美国科学家,以表彰他们为发现引力波作出的贡献

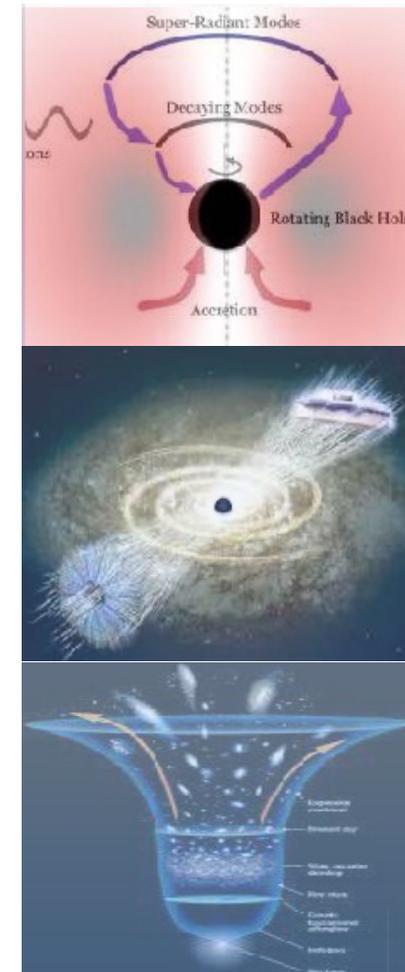
这些科学家创建和运行的“激光干涉引力波天文台”(LIGO)项目在

多波段引力波天文

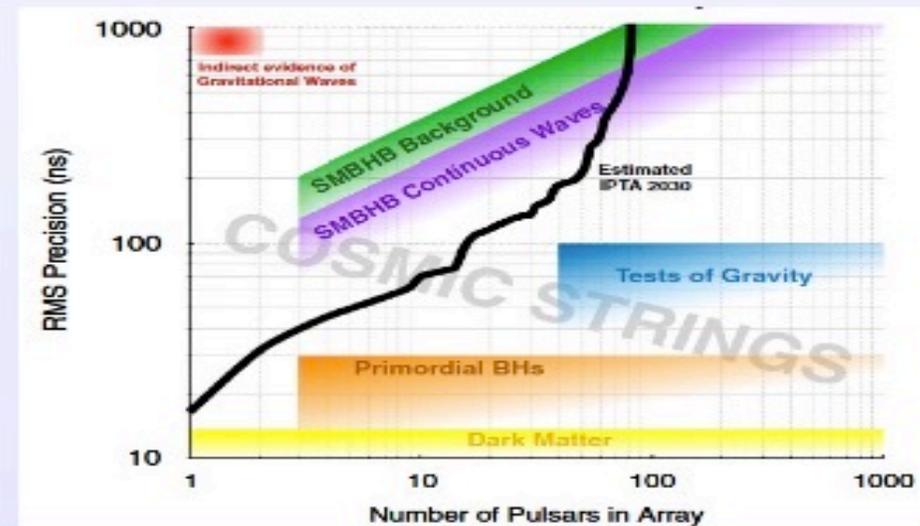
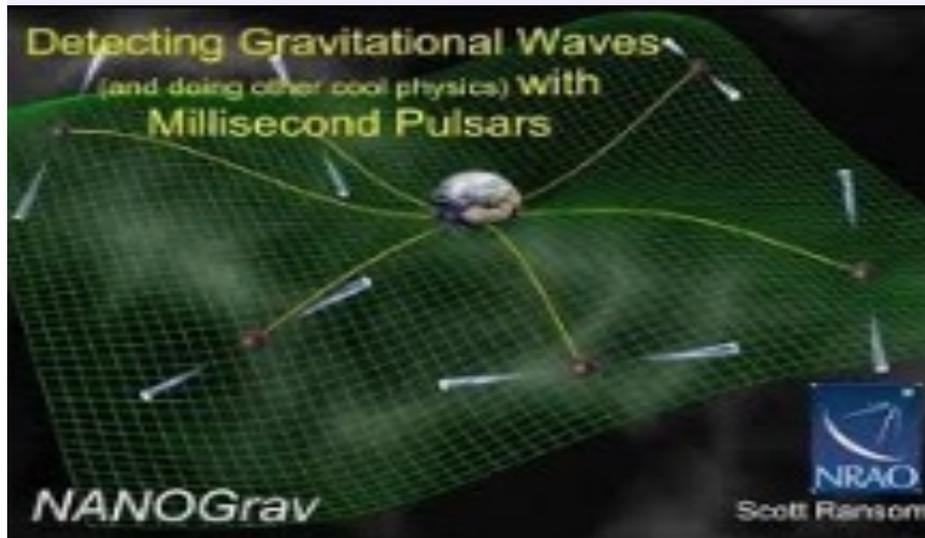
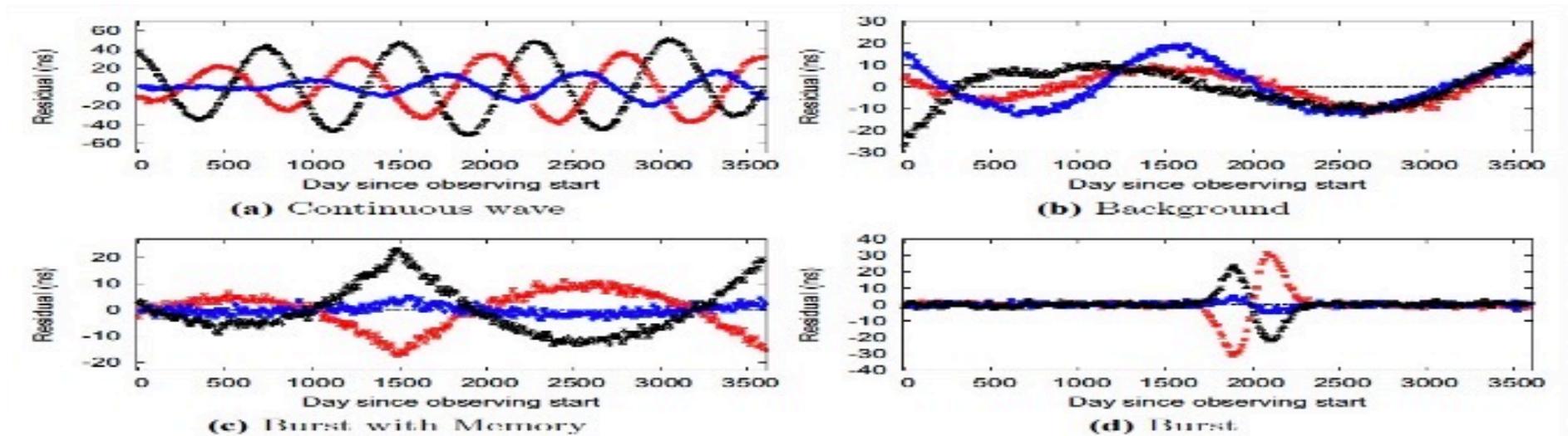


报告内容

- 一、暗物质质量-波动型
- 二、引力波探测-多波段
- 三、脉冲星计时-纳赫兹波动
- 四、引力波暴-黑洞超辐射
- 五、小结和展望



纳赫兹引力波的天文观测

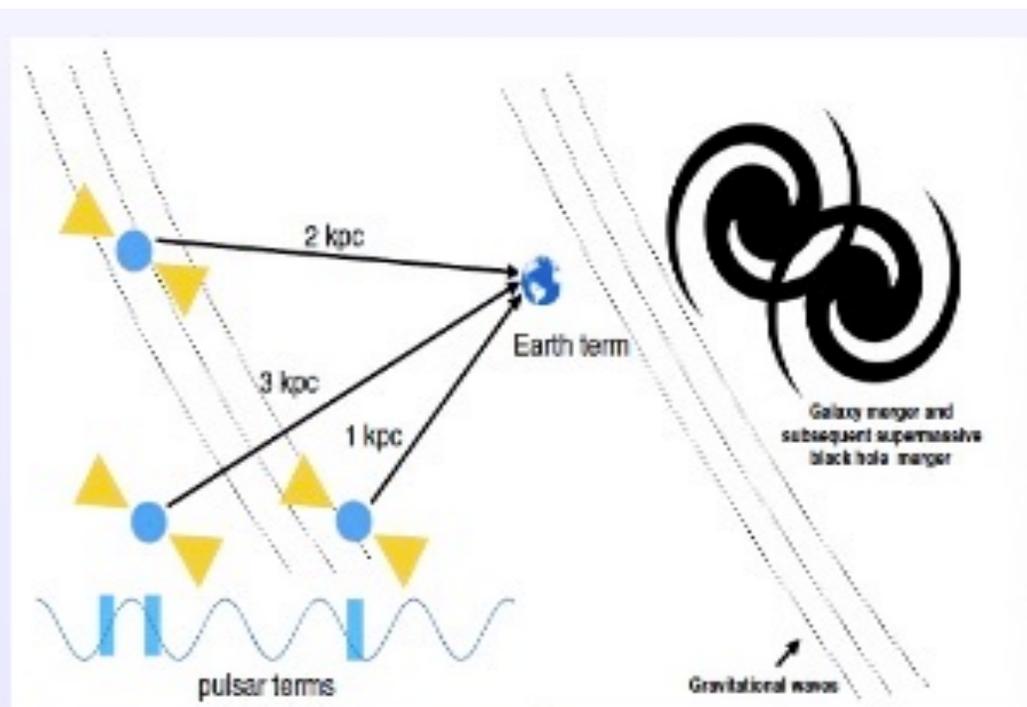
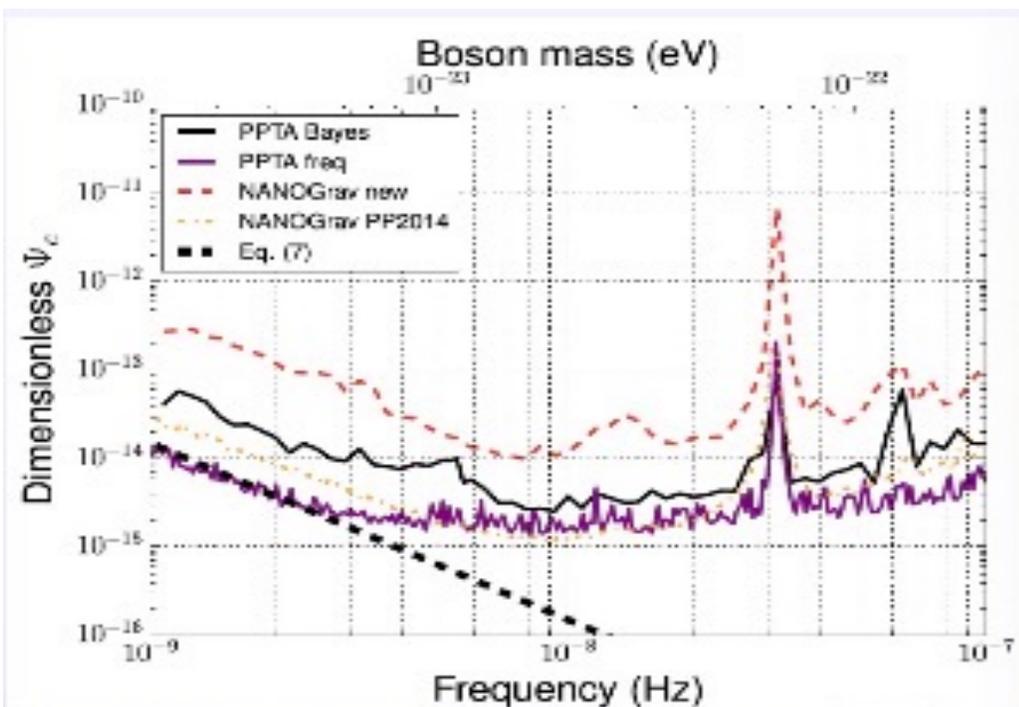


超轻暗物质的波动效应

- 超轻暗物质波动的窄频效应
- 引力波信号背景的宽频特征

$$\lambda_{\text{dB}} = \frac{2\pi\hbar}{mv} \simeq 4\text{kpc} \left(\frac{10^{-23}\text{eV}}{m} \right) \left(\frac{10^{-3}}{v} \right)$$

$$f_c = \frac{m}{\pi} \simeq 4.8\text{ nHz} \left(\frac{m}{10^{-23}\text{eV}} \right)$$



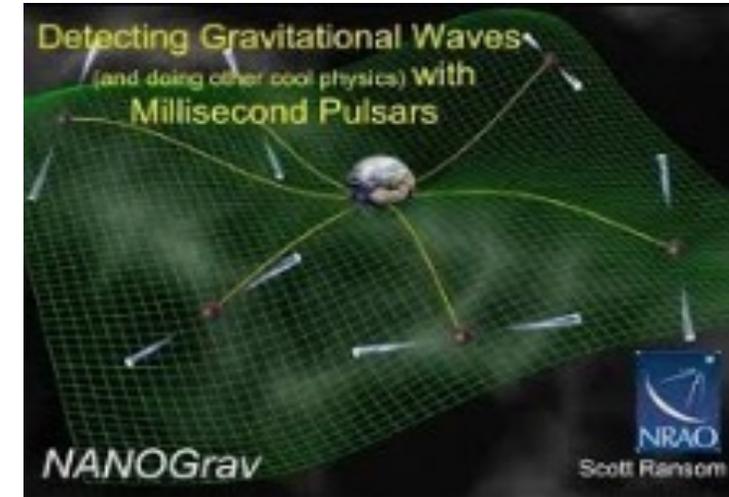
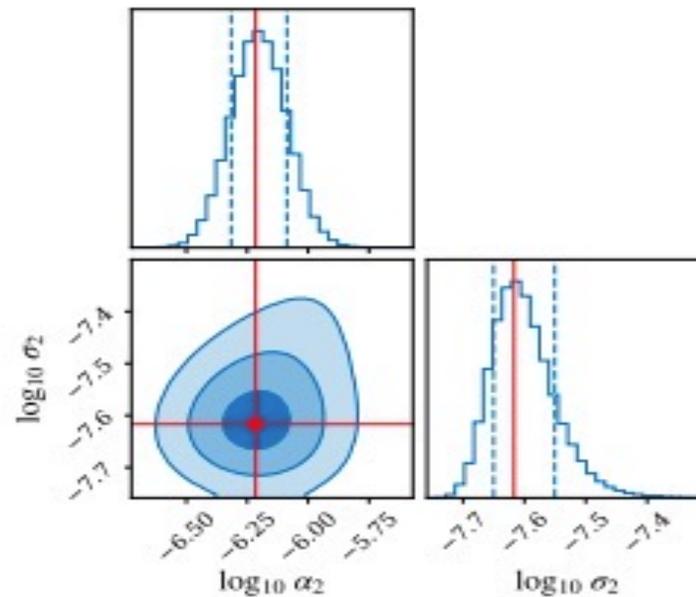
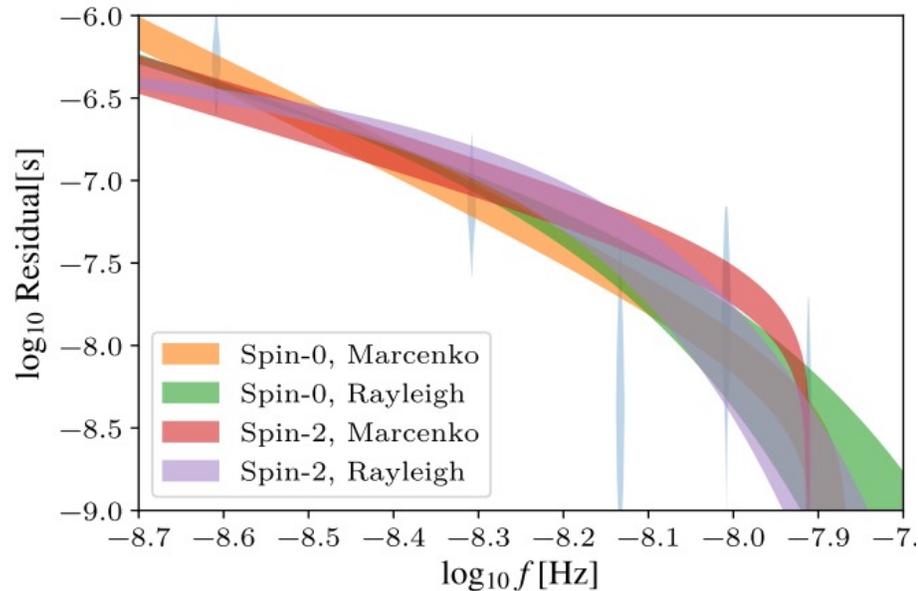
[cf. X. Xue, X. J. Zhu et al. 2018] & [cf. Burke-Spolaor, et al. 2019]

提出暗物质的宽频机制

➤ 北美纳赫兹引力波观测站NANOGrav

➤ 12.5年脉冲星计时信号观测-> 随机引力波背景?

➤ 引力波背景 vs 波动暗物质?



S. Sun, X.-Y. Yang, [Y.-L. Zhang*](#), Phys. Rev. D 106, 066006(2022)

宽频暗物质的学术评述

Snowmass 2021 White Paper

New Horizons: Scalar and Vector Ultralight Dark Matter

timing residuals $\delta t \sim 20 \left(\frac{m_\phi}{10^{-23} \text{ eV}} \right)^{-3} \left(\frac{\Omega_\phi}{0.3} \right)$ ns. The recent detection of a stochastic background by NANOGrav [250–252] can be associated with a wide-band spectrum of ultralight scalar and vector (and tensor) dark matter [253]. Temporal oscillations would disrupt the old star cluster in

[253] S. Sun, X.-Y. Yang and Y.-L. Zhang, *Pulsar Timing Residual induced by Wideband Ultralight Dark Matter with Spin 0, 1, 2*, 2112.15593.

➤ 美国高能物理学会未来10年研究规划白皮书

➤ NANOGrav随机背景可以伴随宽频超轻暗物质信号，包括标量矢量张量等[253]

➤ 获邀日本京都大学Yukawa研究所专题报告(2022)

Re: (Colloquium) YITP seminar on (23rd March, Speaker: Yun-Long Zhang (NAOC)

From: "博家蒐史" <ataruya@yukawa.kyoto-u.ac.jp> (Forward by ataruya@gmail)

To: collo@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

Cc: "ZHANG Yun-Long" <zhangyunlong@nao.cas.cn>

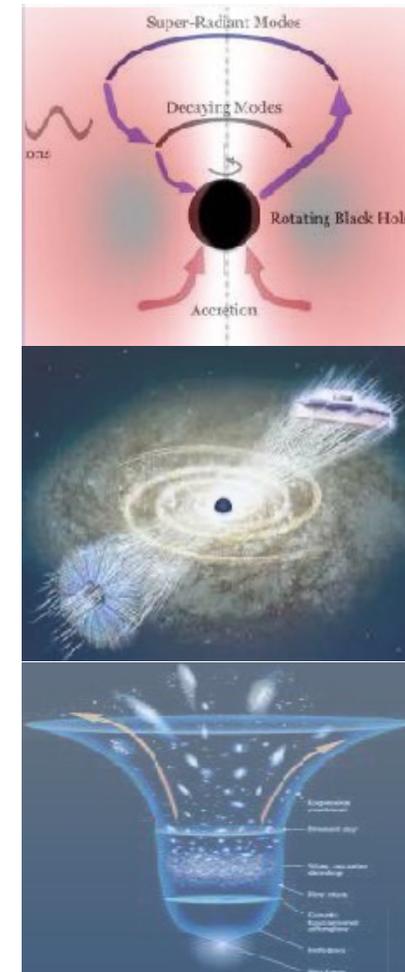
Date: 1:30 PM on 23rd March (Thu, JST)

Title: Pulsar Timing Residual induced by Wideband Ultralight Dark Matter with Spin 0, 1, 2

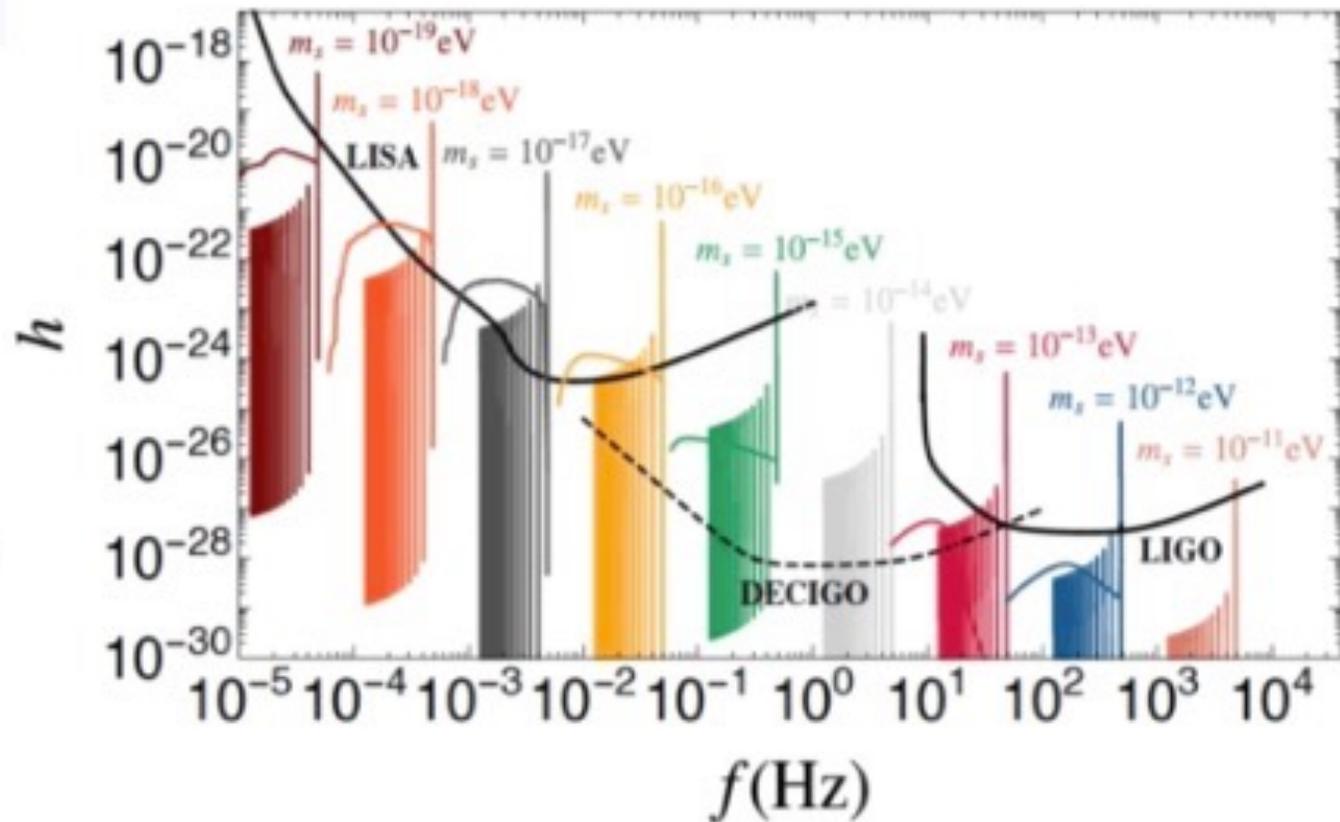
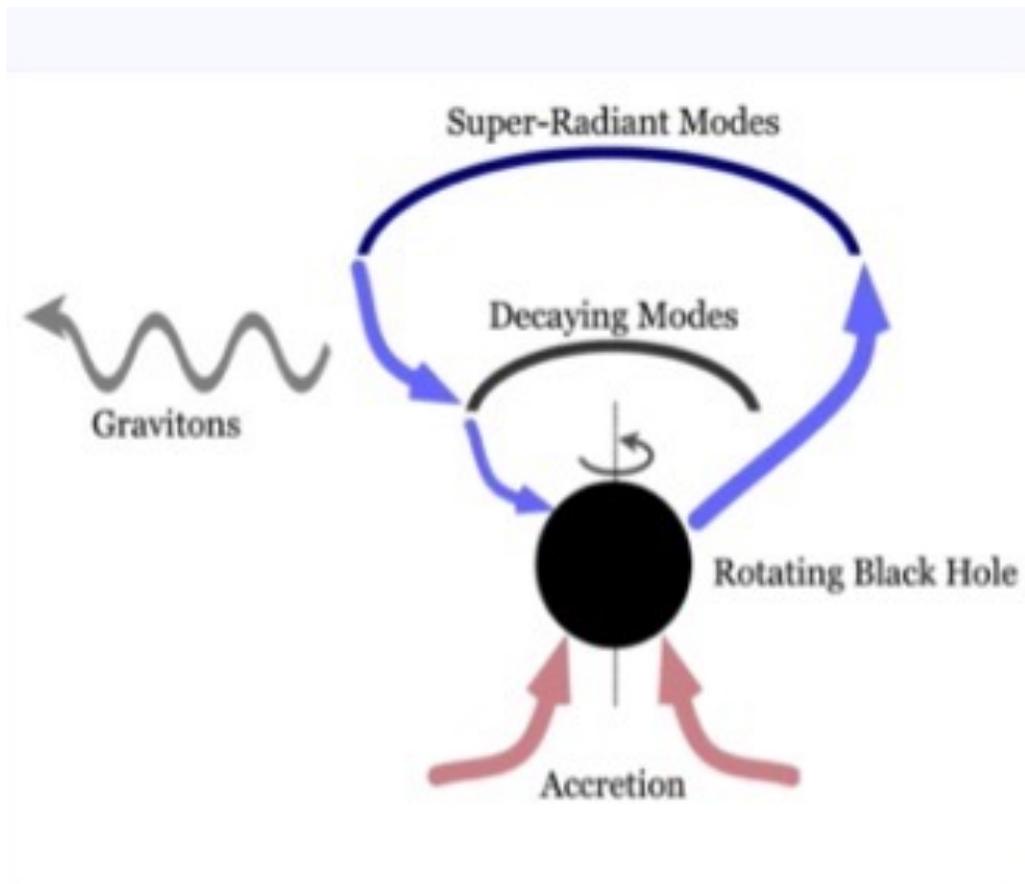


报告内容

- 一、暗物质质量-波动型
- 二、引力波探测-多波段
- 三、脉冲星计时-纳赫兹波动
- 四、黑洞超辐射-引力波信号
- 五、小结和展望



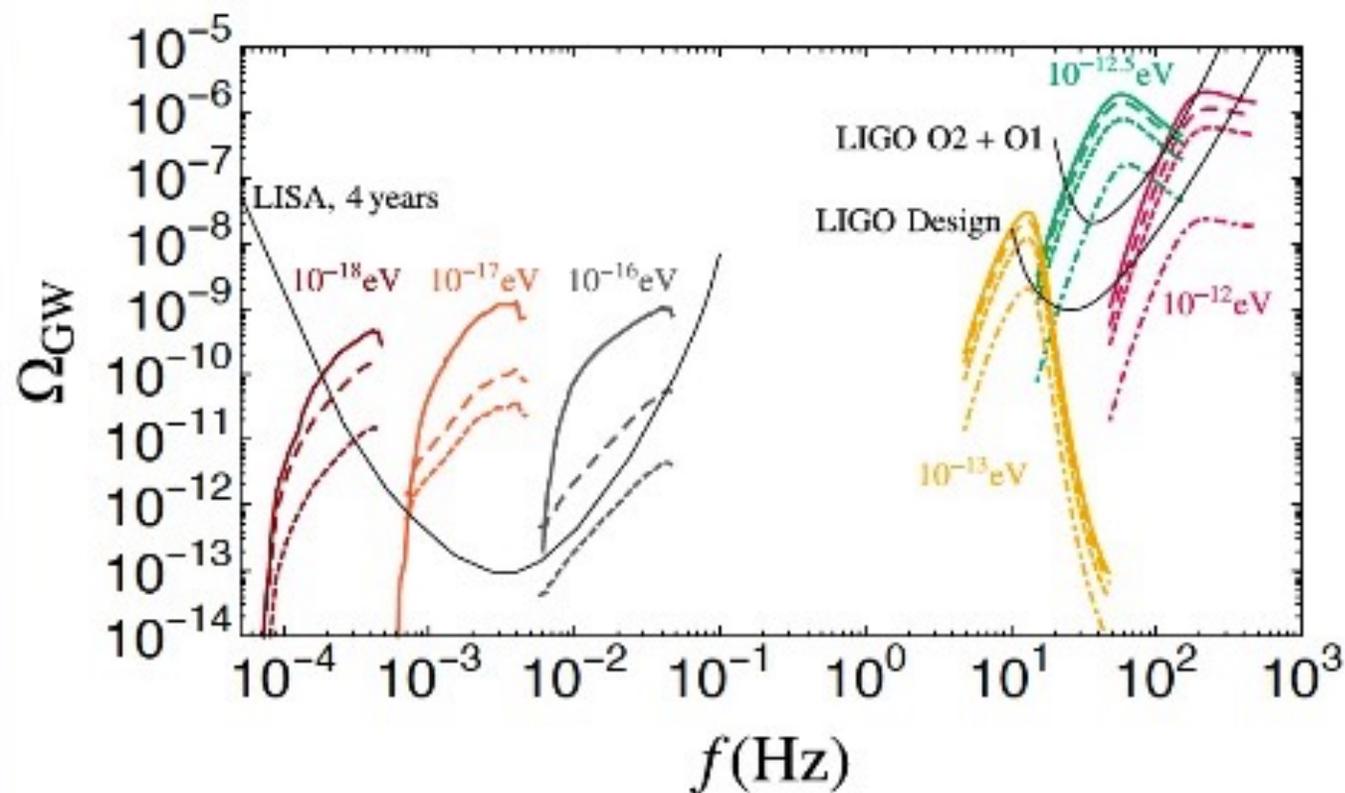
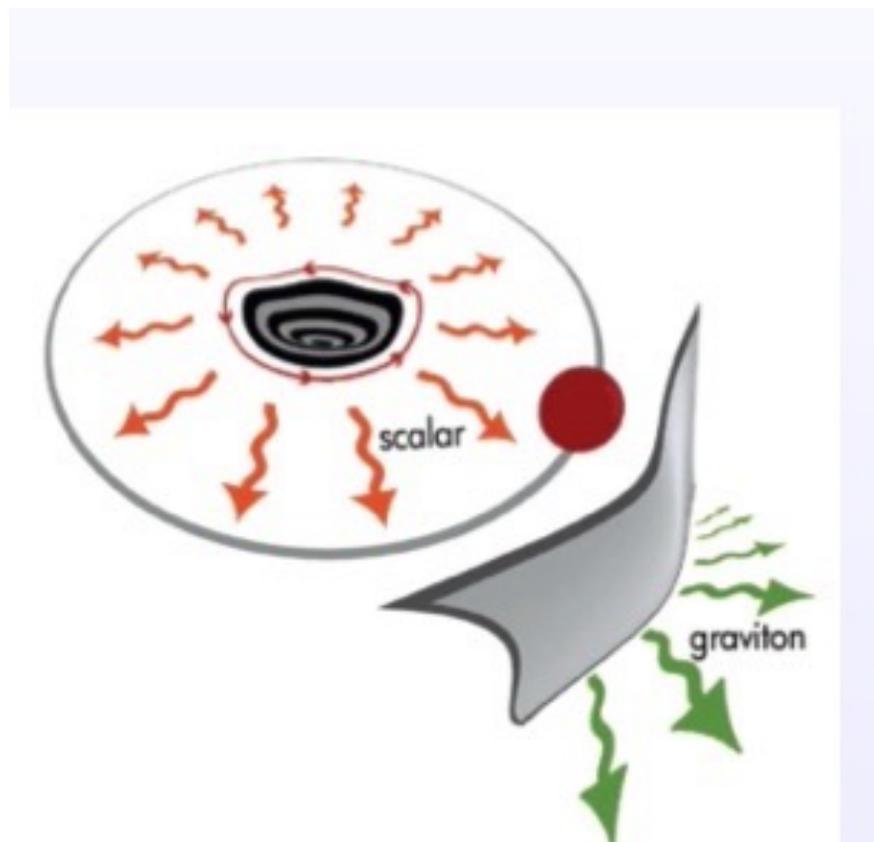
能级跃迁和单频引力波



能级跃迁 $\nu^+ \rightarrow \nu^- + h$, 信号 $h \sim 10^{-19} - 10^{-27}$

[cf. Brito-Cardoso-Pani, Superradiance 2020]

轴子湮灭和随机引力波



轴子湮灭 $\vartheta + \vartheta \rightarrow h$, 信号 $h \sim 10^{-21} - 10^{-32}$

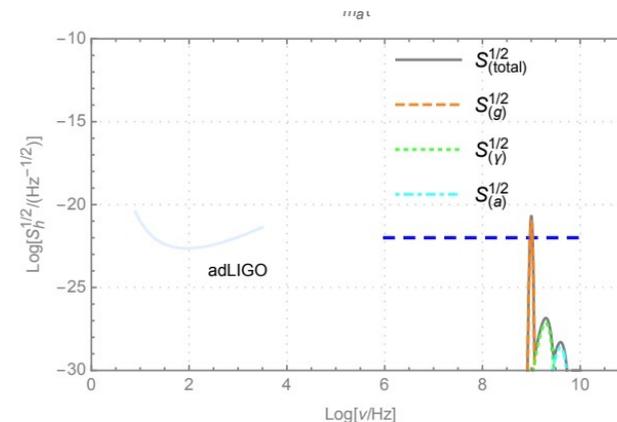
[cf. Brito-Cardoso-Pani, Superradiance 2020]

超辐射和快速引力波暴

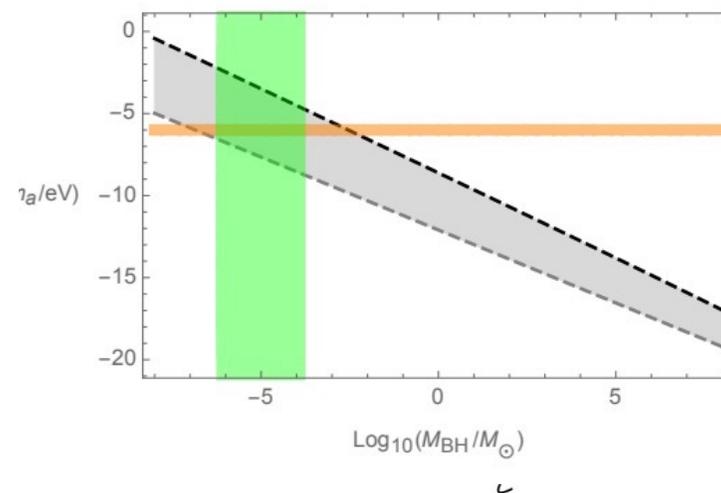
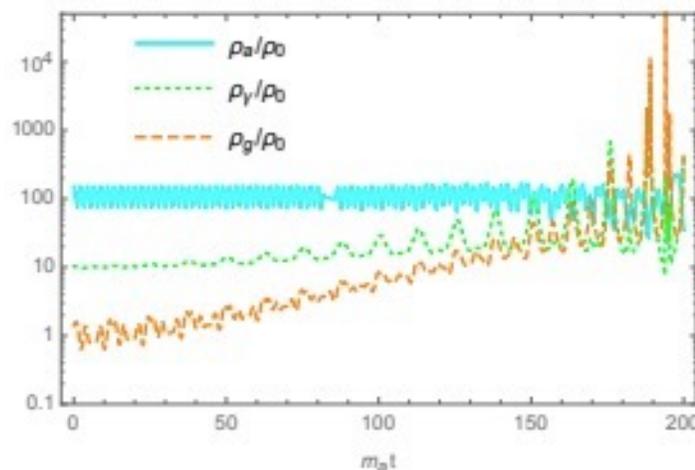
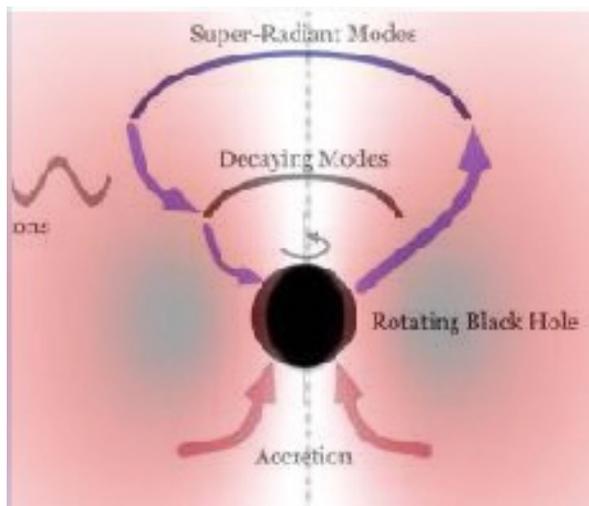
- 提出轴子暗物质通过黑洞超辐射产生参数共振

$$S_a = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2\kappa_4} R - \frac{1}{4} F^2 + \mathcal{L}_a + \mathcal{L}_{aF\tilde{F}} + \mathcal{L}_{aR\tilde{R}} \right)$$

- 参照快速射电暴强度, 估算出引力波信号振幅



$$h_{(g)} \sim 10^{-23} \left(\frac{1\text{GHz}}{\nu} \right) \left(\frac{\alpha_g/\alpha_\gamma}{10^4} \right) \left(\frac{1\text{kpc}}{L} \right).$$



S. Sun*, Y.-L. Zhang*, Phys. Rev. D 104, 103009 (2021)

GHz探测机制评述

- 该信号有望在北美超流引力波探测原型机上验证
 - 通过文献[32]公式(34) 估算了轴子衰变引力波的信号幅度
- 引力物理领域权威综述收录为新的引力波源
Living Reviews in Relativity(影响因子IF: 42.9)
 - 该文章提出轴子暗物质可以直接衰变产生引力波

Living Reviews in Relativity (2021) 24:4
<https://doi.org/10.1007/s41114-021-00032-5>

REVIEW ARTICLE

Challenges and opportunities of gravitational-wave searches at MHz to GHz frequencies

Finally, recently it has been postulated that axions might also decay into gravitons ($a \rightarrow hh$) (Sun and Zhang 2020). In such a process, the GW frequency would be half of the axion Compton frequency, i.e.

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{m_a}{10^{-9} \text{ eV}} \right) 10^6 \text{ Hz}. \quad (34)$$

The corresponding strain of the coherent signal has been calculated in Sun and Zhang (2020) to be

$$h_0 \sim 10^{-24} \left(\frac{1 \text{ MHz}}{f} \right) \left(\frac{\epsilon M_{\text{BH}}}{10^{-7} M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{10 \text{ kpc}}{D} \right), \quad (35)$$

where $\epsilon < 10^{-3}$ denotes the fraction the BH mass accumulated in the axion cloud.

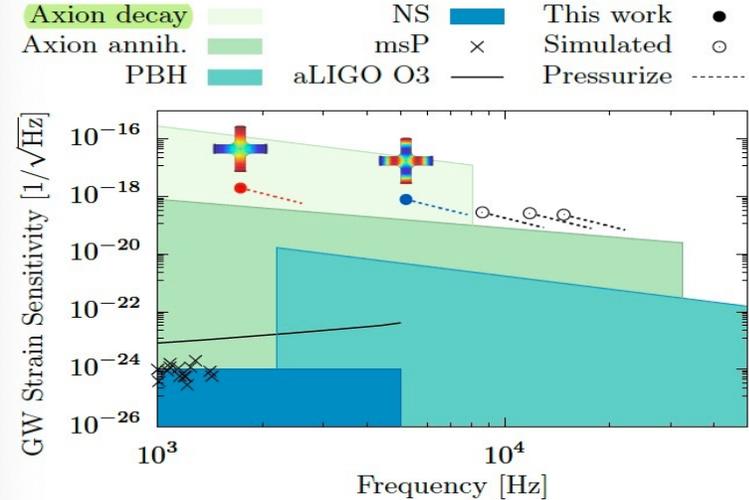
PHYSICAL REVIEW D 104, 082001 (2021)

Prototype superfluid gravitational wave detector

V. Vadakkumbatt¹, M. Hirschel¹, J. Manley², T. J. Clark¹, S. Singh², and J. P. Davis¹

¹Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2E9, Canada

²Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware 19716, USA



the Compton frequency. The GW amplitude from axion decay is estimated using Eq. (34) in Ref. [32], where the GW frequency is half the Compton frequency. For both [32] S. Sun and Y.-L. Zhang, Gravitational waves and possible fast radio bursts from axion clumps, arXiv:2003.10527.

超轻暗物质和多波段引力波

超轻暗物质的多波段引力波探测

- 引力波宇宙学观测：修改引力效应 (nnHz)
- PTA-SKA 脉冲星测时：Fuzzy 超轻暗物质 (nHz)
- LISA-Taiji-Tianqin & Ligo-Virgo-Kagra (mHz - kHz)
- 桌面实验 & 轴子星 & 引力波暴 (kHz - GHz)

超轻暗物质和黑洞超辐射效应

- 超辐射和轴子云： $\alpha \equiv \frac{R_{BH}}{\lambda_{\vartheta}} \simeq \left(\frac{M_{BH}}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_{\vartheta}}{10^{-10} \text{eV}} \right)$
- 能级跃迁： $\vartheta^+ \rightarrow \vartheta^- + h$ ，轴子湮灭： $\vartheta + \vartheta \rightarrow h$
- 轴子诱导的快速射电暴： $\sim \vartheta F\tilde{F}$ ($\vartheta \rightarrow \gamma\gamma$)
- 轴子诱导的引力波暴： $\sim \vartheta R\tilde{R}$ ($\vartheta \rightarrow hh$)

小结和展望：暗物质的引力波效应

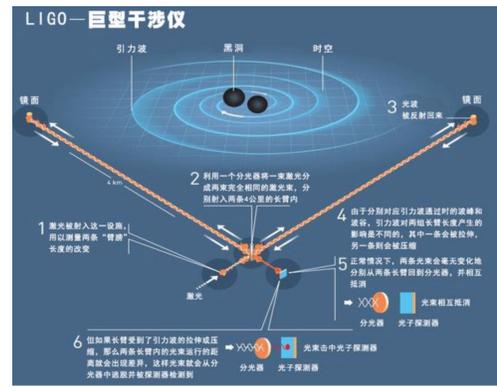
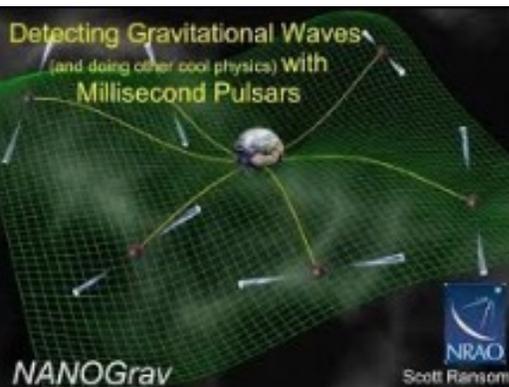
- 超轻暗物质：宇宙学起源
- 波动暗物质：脉冲星计时
- 黑洞超辐射：引力波效应



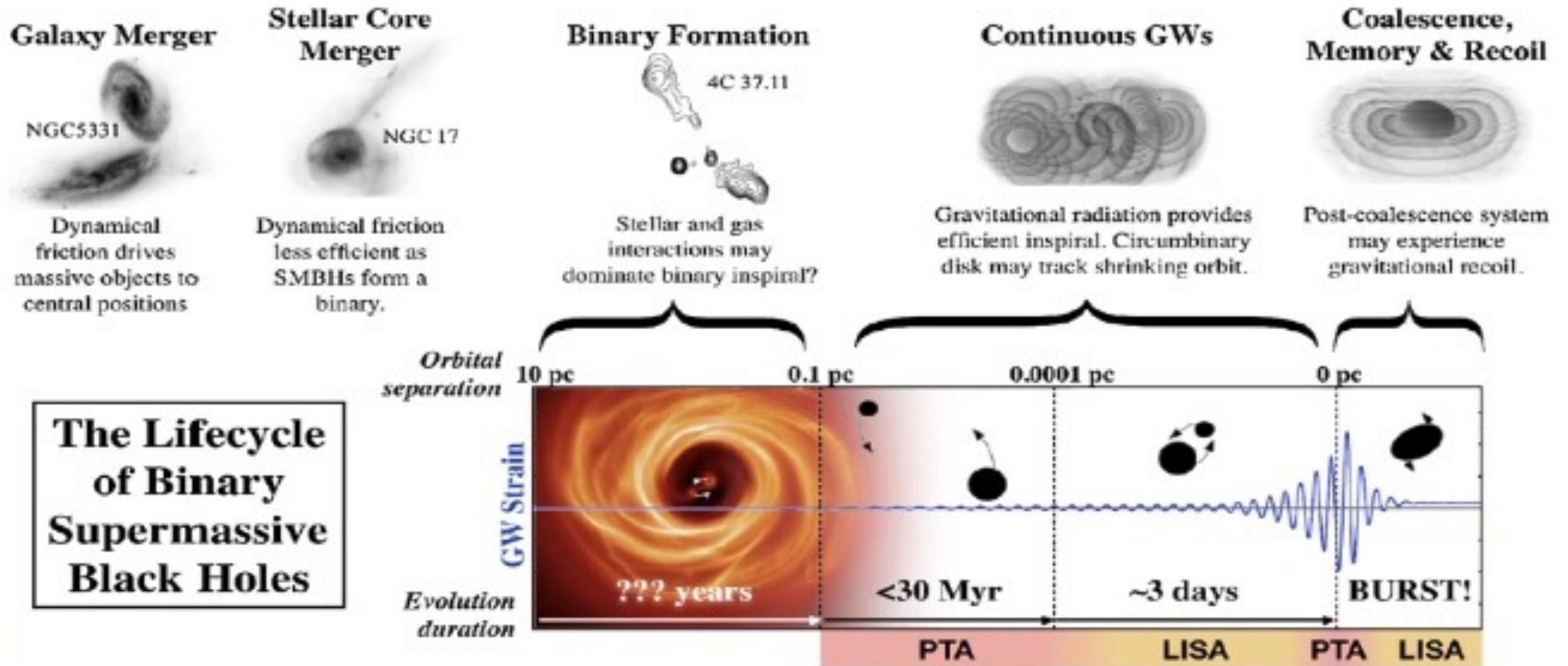
- 早期宇宙和暴胀：新物理效应
- 脉冲星计时阵列：宽/窄频搜寻
- 多信使联合观测：射电/引力波暴

暗物质粒子 高能天体物理
暗物质波动 引力波多信使
黑洞超辐射 天文观测约束

感谢各位评委, 敬请批评指正!

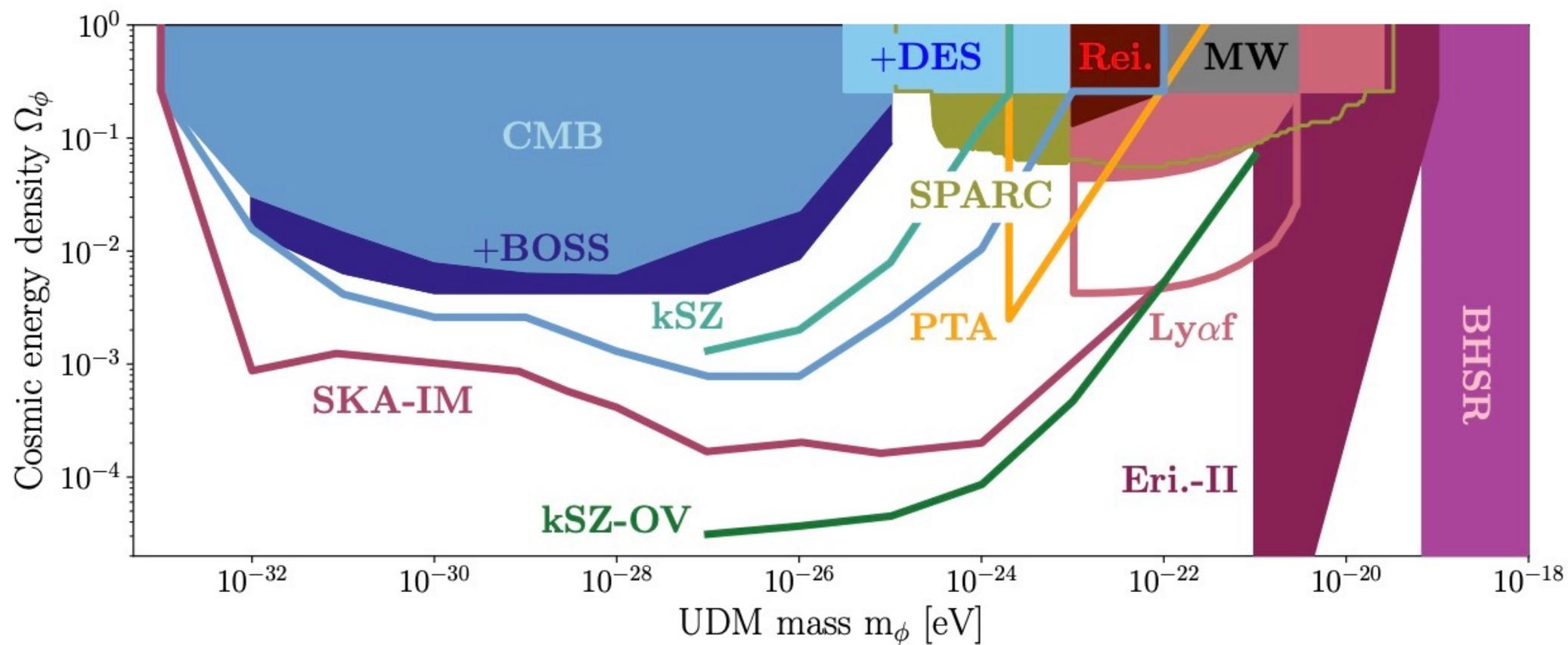


超大质量双黑洞的并合



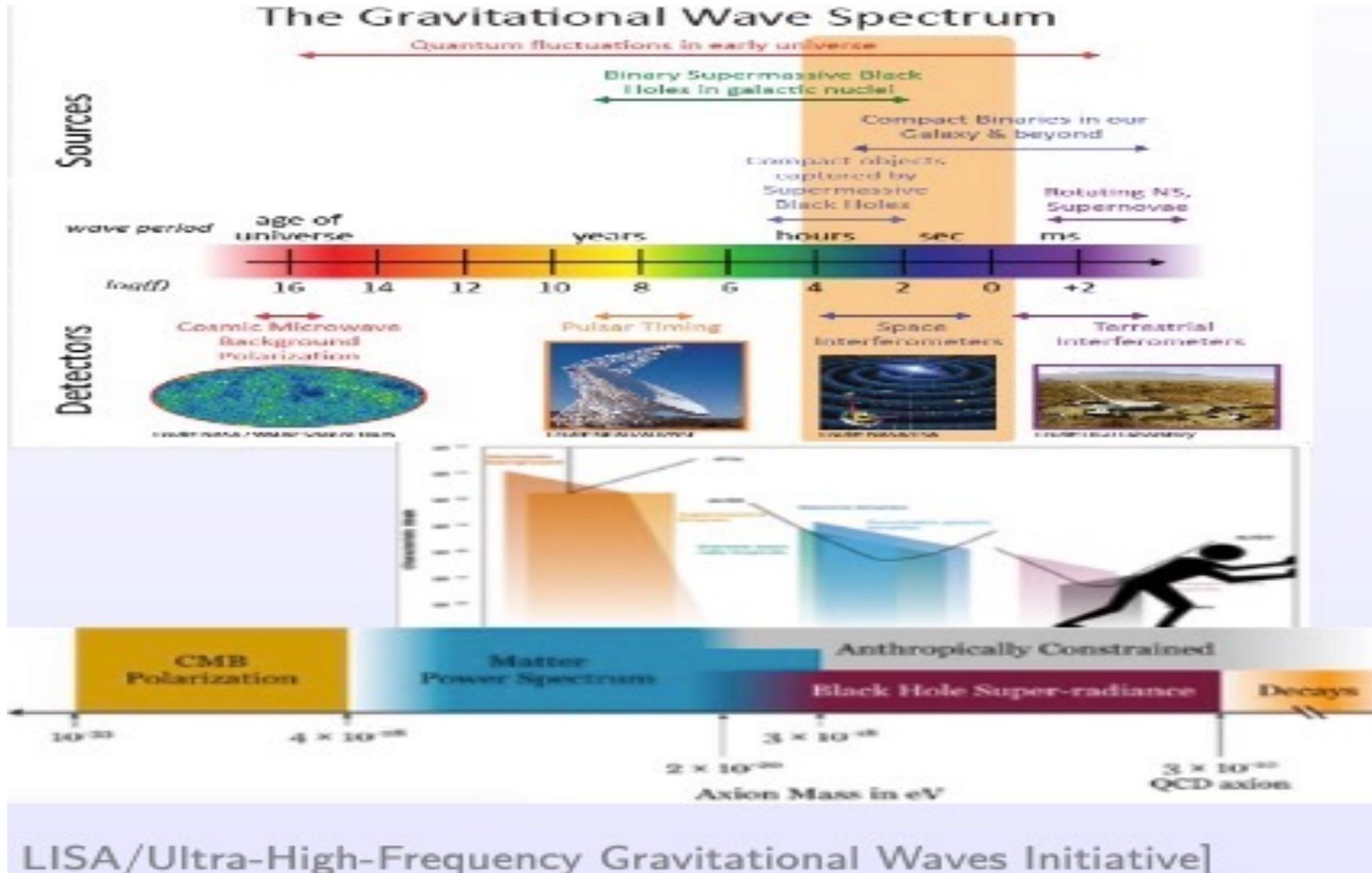
Burke-Spolaor, *et al.*, "The astrophysics of nanohertz gravitational waves

超轻暗物质的天文观测



Cf. New Horizons: Scalar and Vector Ultralight Dark Matter [arXiv:2203.14915]

轴子质量和引力波频率



个人基本情况

➤ 教育经历

- 2005 – 2009 兰州大学 物理学基地班 本科
- 2009 – 2014 中科院理论物理研究所 硕博
英国南安普顿大学访问学者
德国诺贝尔奖大会林岛学者

➤ 工作经历

- 2014 – 2016 中国台湾大学 物理系 博士后
- 2016 – 2018 韩国亚太理论物理中心 博士后
- 2018 – 2020 日本京都大学汤川物理所JSPS学者
- 2020 – 今 中国科学院国家天文台 (副)研究员



研究方向和背景

➤ 引力宇宙学和黑洞物理

- 2017诺贝尔物理学奖--引力波物理和仪器探测
- 2018狄拉克理论物理学奖--引力全息和量子物质
- 2019诺贝尔物理学奖--物理宇宙学和系外行星
- 2020诺贝尔物理学奖--黑洞物理学和天文观测

➤ 国家需求和中科院所规划(2016-2025)

- 科技部国家重点研发: 引力波探测专项
- 中科院重点培育方向: 引力波宇宙学研究
- 天文台十四五规划课题: 宇宙起源和演化

分享2017年诺贝尔物理学奖



雷纳·韦斯

巴里·巴里什

基普·索恩

当地时间10月3日, 瑞典皇家科学院宣布

分享2019年诺贝尔物理学奖

美国科学家
詹姆斯·皮布尔斯瑞士科学家
米歇尔·马约尔瑞士科学家
迪迪埃·奎洛兹

分享2020年诺贝尔物理学奖

当地时间10月6日

瑞典皇家科学院宣布将 2020年诺贝尔物理学奖 授予

英国科学家
罗杰·彭罗斯德国科学家
赖因哈德·根策尔美国科学家
安德烈娅·盖兹因证明黑洞是爱因斯坦
广义相对论的直接结果而获奖

因在银河系中央发现超大质量天体而获奖

资料来源: www.nobelprize.org
新华社记者 熊博 摄 编制