

## 【专款30周年文集】13. 引力与宇宙学领域发展态势

原创 蔡荣根等 理论物理专款 2023-12-28 16:18 发表于北京

### 编者按

1993 年，国家自然科学基金委员会设立理论物理专款，并成立学术领导小组。设立专款的目的是：促进我国理论物理学研究的发展，培养理论物理优秀人才，做出国际先进水平的研究成果，充分发挥理论物理对国民经济建设和科学技术在战略决策上应有的指导和咨询作用。理论物理专款是基金委在基金主体申请的主要框架下的一种特别设计，是对基础学科理论物理学支持的一种特别补充。30 年来，根据理论物理学学科的特点、中国经济发展状况和政府经费投入状况，学术领导小组和基金管理者不断地思考、探索和调整有特色的多元化资助模式，起到了促进创新、扶植薄弱、稳定队伍、鼓励交叉、均衡发展、高端引领学科布局、建设创新平台与人才高地、弘扬科学家精神等重要作用。

2023 年，为纪念理论物理专款设立 30 周年，学术领导小组特编写本文集，汇报成绩、总结经验、改进工作、展望未来，以期对从事理论物理研究的科研人员以及科研管理工作有所帮助。

### 作者简介



蔡荣根，中国科学院理论物理研究所研究员、博士生导师、所长、党委书记，中国科学院院士，国际广义相对论和引力学会会士，发展中国家科学院院士，十三、十四届全国政协委员。1985年本科毕业于杭州师范学院，1995年于复旦大学获得博士学位。获国家“杰出青年基金”资助，入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选，获得国务院政府特殊津贴，入选国家高层次人才特殊支持计划领军人才。研究方向为引力理论和宇宙学。曾获得国家自然科学二等奖、重庆市自然科学奖一等奖。现任第八届理论物理专款学术领导小组副组长。



李理，中国科学院理论物理研究所研究员。2009年本科毕业于中国矿业大学，2014年于中国科学院理论物理研究所获得博士学位，先后在希腊克里特大学和美国里海大学从事博士后研究。2019年入职中国科学院理论物理研究所。主要研究方向为黑洞物理、引力/规范对偶和宇宙学。获得2023年度亚太物理学会联合会-亚太理论物理中心“杨振宁奖”。



王少江，中国科学院理论物理研究所副研究员。2013年本科毕业于辽宁大学，2018年于中国科学院理论物理研究所获得博士学位，先后在美国Tufts大学和中国科学院理论物理研究所从事博士后研究。2023年入职中国科学院理论物理研究所。主要研究方向为引力理论和宇宙学（暴胀宇宙学、引力波宇宙学、粒子宇宙学、星系宇宙学等）。

## 导读

引力是自然界中的四种基本相互作用之一，广义相对论是目前描述引力最成功的理论，但它与量子理论还无法自治地统一起来。宇宙学是研究宇宙的起源、演化和它的命运的科学。随着理论物理的发展和现代科学技术的进步，这些年人们对引力本质和宇宙结构和演化的理解有了巨大的进步，引力理论和宇宙学成为理论物理非常活跃的、也是充满机遇和挑战的一个前沿领域。

## 一、引力宇宙学领域总体发展现状

### 1、引力领域总体发展现状

引力是人类知道最早的，也是目前认识最少的一种基本相互作用。近代以来，人类对引力的认识主要经过了三次飞跃：从牛顿万有引力定律到广义相对论提出，以及最近的引力全息性质的发现（见综述[1]）。近些年，由于观测技术的进步，人类不仅听到了双黑洞并合的引力波，也看到了黑洞的剪影，引力相关研究进入新时代。尤其是引力波的直接探测，更是打开了认识宇宙的新窗口。然而人类对引力的认识还是比较少，引力的本质仍然是一个重大问题。《科学》杂志创刊 125 周年列出了 125 个重要的科学前沿问题，引力的本质就是其中

之一。不仅如此，其他一些问题，比如什么驱动了宇宙加速膨胀？黑洞的本质是什么？时间为什么不同于其他维度？基本物理定律能否统一等，这些重要问题的解决都跟引力的本质密切相关。引力理论和宇宙学的研究涵盖黑洞物理、引力波物理、量子引力、引力实验、弯曲时空量子场论、相对论天体物理、暗物质与暗能量、早期宇宙，以及宇宙学探针等重要前沿，相关研究将会推进对自然和宇宙的深刻认识。

广义相对论的建立塑造了人类的时空观，启迪了一系列重大科学发现。到目前为止，爱因斯坦的广义相对论仍然是最成功的引力理论。它的两个最重要预言，黑洞和引力波，近些年得到了实验观测的直接验证。基于广义相对论建立的宇宙学标准模型也取得了巨大成功，解释了包括宇宙微波背景辐射、轻元素的合成，宇宙的结构和演化等大量观测事实。广义相对论甚至也深入到了人们的日常生活，比如导航所用到的全球定位系统，就必须考虑广义相对论效应的修正。需要强调的是，对于弱场低速情况，牛顿理论是广义相对论很好的近似，采用牛顿万有引力和弯曲时空的描述基本是一致的。这也是为什么在很多场合，比如天体物理和空间物理，牛顿引力仍然被广泛使用。但是对于强引力场和精度要求很高的情况，就需要采用广义相对论。

### 1) 引力波

引力波是时空的涟漪，通过波的形式从辐射源向外传播，就像石头丢进水里会激起波纹一样。广义相对论预言引力波存在两种独立极化模式（通常称为“+极化”和“×极化”），并以光速传播的横波。由于牛顿引力常数很小，所以引力波很微弱，这给引力波的探测带来了极大的挑战。1916年，爱因斯坦在理论上就预言了引力波，终于在2015年9月14日，美国的LIGO第一次直接探测到了恒星质量双黑洞并合的引力波信号（GW150914），不仅直接证明了引力波的存在，更直接证实了黑洞的存在，给科学界和公众都带来了极大震撼。2017年8月17日第一例双中子星并合的引力波（GW170817）也被观测到，开启了引力波和电磁信号协同观测的多信使时代。另外，产生强引力波信号的波源需要具有快速变化的质量四极矩，因此，理想的波源包括致密双星（黑洞、中子星、白矮星）、星体内核塌缩、早期宇宙的动力学过程等（图1）。这些强的引力波源大多是暗的，无法通过传统的电磁手段来探测。也正是由于引力很弱，引力波在传播过程中几乎不会受到其他物质的干扰，能够携带引力波源和宇宙膨胀的信息。因此引力波的直接探测提供了一种崭新的途径，成为人类窥探宇宙奥秘的利器（见综述[2, 3]）。

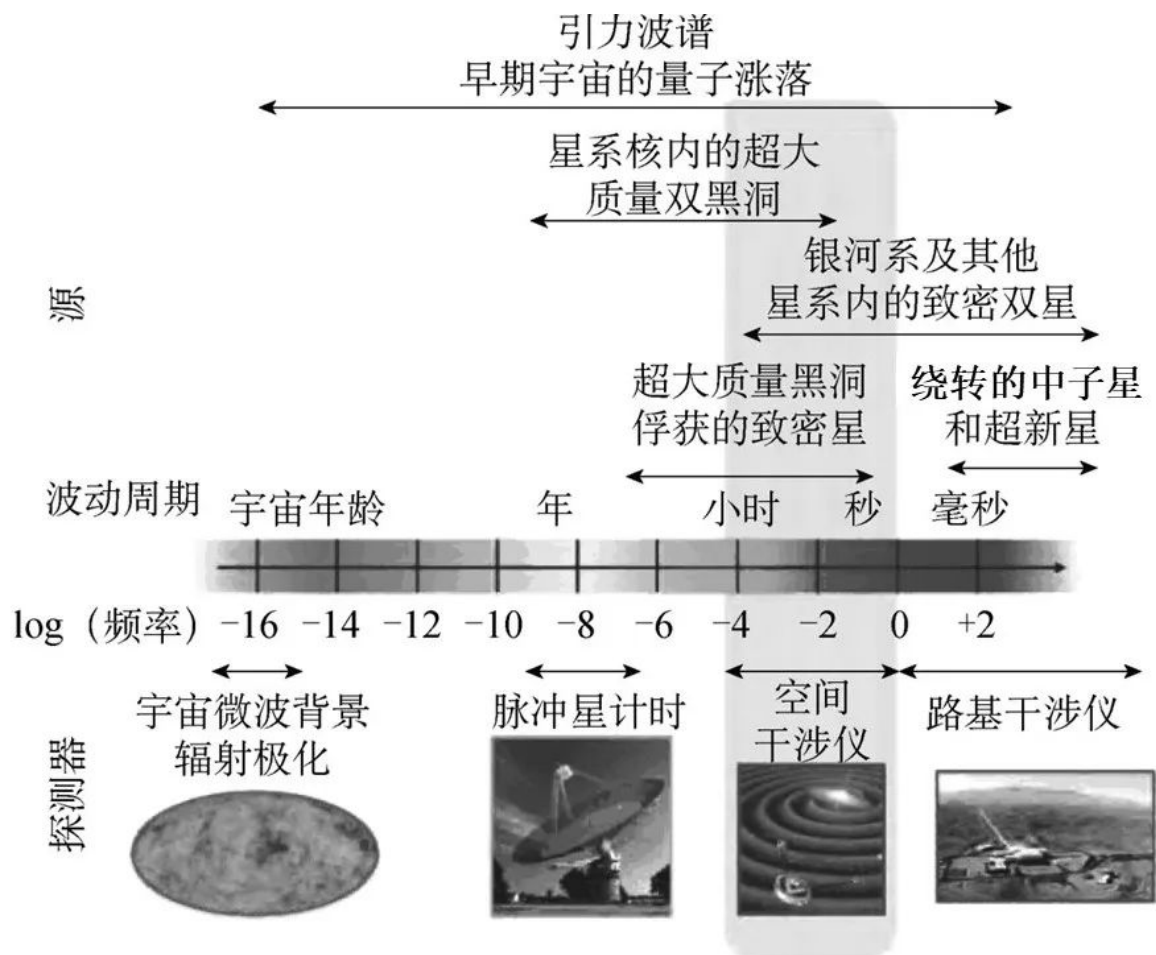


图 1. 不同引力波的波源及其相对应的探测方法

不同引力波源会给出不同频段的引力波，根据目前的探测能力和探测手段，通常把引力波的频段分为高频（几十到几千赫兹）、中低频（十万分之一到一赫兹）、低频（百万分之一到亿分之一赫兹）和超低频（小于亿分之一赫兹）。对应不同频段的引力波采用不同的探测方式（图 1）。对于高频和中低频波段，当前主流的手段是利用激光干涉来探测引力波。LIGO 项目正是利用了这一方法探测到了引力波，该项目的三位领导者美国麻省理工学院的 Rainer Weiss 教授、加州理工学院的 Barry Barish 教授和 Kip Thorne 教授被授予了 2017 年的诺贝尔物理学奖。由于引力波物理的重大意义，已经成为大国竞争的关注点。地面引力波探测器适合探测高频引力波，目前有美国的 LIGO、意大利的 VIRGO、日本的 KAGRA、德国的 GE600 和印度的 LIGO-India（在建），第三代地面引力波探测器计划有欧洲的 ET，美国的 CE；中低频波段主要通过空间引力波探测器来探测，在建以及规划中的有欧洲的 LISA、中国的太极计划和天琴计划和日本的 DECIGO 等。目前中国的太极计划和天琴计划的关键技术正在积极研发中，第一颗验证卫星已分别发射成功，关键技术得到了验证。我国也正在积极推进通过脉冲星计时探测纳赫兹波段的引力波（FAST）和通过宇宙微波背景辐射的 B 模极化探测来自宇宙早期量子涨落的原初引力波（AliCPT）。

## 2) 黑洞和引力基本性质

黑洞是一类非常致密的天体，存在一个称为事件视界的单向膜，事件视界以内任何物质（包括光）都无法逃逸。天文学家通过监测黑洞周边的吸积盘或者伴星来确定黑洞的存在。利用黑洞周围物质辐射出的电磁波，2019 年 4 月 10 日“事件视界望远镜（EHT）”合作组织正式发布了人类有史以来获得的第一张黑洞照片（图 2），2022 年 5 月 12 日 EHT 合作组织又发布了银河系中心黑洞人马座 A\* 的首张照片，为银河系中心超大质量黑洞的存在提供了直

接证据。在 2020 年，Reinhard Genzel 和 Andrea Ghez 通过长期监测人马座 A\* 周边恒星的运动“发现我们银河系中心有一个超大质量致密天体”而被授予了诺贝尔物理学奖。



图 2. 人类首张黑洞照片。黑洞位于室女座星系团中的星系 M87，距离地球 5500 万光年，质量为太阳的 65 亿倍。图片取自事件视界望远镜合作组

经典黑洞一个重要特征是内部存在一个奇点，这种时空奇性几乎与广义相对论同时诞生。彭罗斯以及随后和霍金的工作，在很一般的情况下证明了时空奇异性的形成在广义相对论中几乎是不可避免的，这就是著名的奇点定理。彭罗斯也因为对时空奇点的研究而被授予了 2020 年的诺贝尔物理学奖。由于奇点的普遍存在，研究时空奇性成为广义相对论中一个非常重要且棘手的问题。为了避免时空奇异性对物理理论带来的不良影响，彭罗斯提出了宇宙监督假设：弱宇宙监督假设要求远距离的观测者不会受到时空奇异性的任何影响，而强宇宙监督假设则希望能够保证经典理论的可预测性。这两个宇宙监督假设互相独立，互不包含。由于宇宙监督假设与时空的整体演化有着密切关系，这导致对宇宙监督的研究要比奇点更加困难。证明或证伪宇宙监督假设是一个相当困难的问题，到目前为止仍然没有获得完全解决（见综述[4]）。时空奇异性和宇宙监督假设成为广义相对论中的前沿研究领域，存在大量值得深入思考的问题。

考虑量子力学效应，基于弯曲时空量子场论可以发现黑洞具有一个确定的温度和正比于其视界面积的熵，因此黑洞也是一个热力学系统。黑洞的热力学熵由著名的贝肯斯坦-霍金熵公式给出

$$S_{BH} = \frac{k_B c^3}{4\hbar G} A$$

其中， $A$  是黑洞视界的面积， $k_B$  是玻尔兹曼常量，而  $\hbar$  表示约化普朗克常量， $c$  是光速， $G$  是牛顿万有引力常量。这一简洁优美的公式把物理学中最重要的几个基本自然常数都联系了起来，揭示了引力、热力学和量子理论之间深刻的联系。黑洞熵的面积律（而非体积律）预示着引力非常不同于自然界中的其他三类基本相互作用。它揭示了引力具有全息的性质：一个引力体系的自由度由该体系的表面面积测度，一个引力理论可与一个低一维的非引力理论等价描述。

1997 年底, Maldacena 基于超弦理论提出了 AdS/CFT 对应 (也称规范/引力对偶) [5], 给出了引力全息性的第一个具体实例。引力全息对偶具有重要的科学意义。一是对引力本质的深刻认识。著名理论物理学家威腾称为“对引力认识的概念性变革”; 二是基于该对偶性的强弱对偶性质, 提供了研究强耦合体系的重要方法, 引力全息性质已经被应用到量子色动力学、凝聚态物理、流体力学和量子信息在内的诸多学科, 成为引力理论及其相关领域在最近 20 年来研究最活跃的课题, 并取得了一些非常重要的成果。基于对全息对偶的研究, 人们认识到黑洞是宇宙中最快速的“量子计算机”, 也是最为“混沌”的量子系统, 而且揭示时空可能来自于量子纠缠。近期的一个重要进展是对黑洞信息佯谬的理解, 即黑洞在形成到相继蒸发的过程是否满足量子力学的么正性 (信息守恒)。基于引力全息, 一些研究者采用量子极端曲面的半经典方法解释了黑洞蒸发不会破坏信息守恒[6, 7]。但是半经典理论目前还无法给出信息具体如何从黑洞内部逃逸的机制。为了解决真正解决黑洞信息佯谬, 人们还需要量子理论和广义相对论的深入统一。

半经典的弯曲时空量子场论可以解释霍金辐射、霍金温度等, 但给不出黑洞熵的量子统计起源。能否真正解释黑洞熵成为量子引力的一块试金石。因此, 在谈及引力本质和黑洞本质时, 量子引力是绕不过去的话题。协变量子引力最突出的代表是超弦理论。该理论认为弦是物质组成的最基本单元, 所有已知的基本粒子都是弦的不同振动的激发, 是目前最有希望将自然界的基本粒子和相互作用统一起来的理论。正则量子引力的代表是圈量子引力, 它是在 Ashtekar 的联络动力学表述的基础上发展起来的, 正则变量是威尔逊圈 (和乐) 和其共轭动量。这种方式避免了使用度规场, 成为一种背景无关的量子引力理论。全息原理认为一个量子引力系统与其边界上某种量子理论等价描述, 因此不同于前面的两类量子化途径, 它可以看成是引力量子化的另外一种实现。在这种图像下, 黑洞自然应该对应于边界上的某种量子态。值得一提的是, 以上三种量子引力方案在解释黑洞熵的微观起源方面都取得了一定成功。人们还提出了一些其他量子引力方案。客观来说, 至今为止还没有一个公认的量子引力理论, 相关研究仍在继续中。

### 3) 类比引力

虽然人们预期在强引力场区域 (比如黑洞附近) 引力的量子效应将扮演着重要角色, 但是基于目前的技术水平, 直接探测强引力场区域的量子效应依然是遥不可及。1981 年 Unruh 提出了“类比引力 (analogue gravity)”的思想, 将弯曲时空中的经典或者量子场的运动规律转化到实验室系统的运动规律中来。经过几十年发展, 类比引力已经成为广义相对论、流体力学、量子信息和凝聚态物理等领域的交叉课题。

声学黑洞是最早被提出并被研究最多的类比引力系统: 在声波波速与流体流动速度大小相等但方向相反的地方会存在一个与黑洞事件视界相似的分界, 产生一个“哑洞”。类似于黑洞的霍金辐射, 这个声学视界预期会自发辐射声子。2011 年, 实验组[8]测量了声学视界的温度, 发现声学黑洞存在自发热辐射, 但是对该结果的解读仍存在争议。理论分析表明, 经典物理所主导系统本身的噪声和经典热涨落通常远大于声学视界的霍金辐射。为了更好地观察类比引力的量子性质, 人们尝试在量子系统中实现声学黑洞。2019 年 Jeff Steinhauer 领导的实验组在玻色-爱因斯坦凝聚体中的声学黑洞发现了明确的类霍金辐射的实验证据[9], 如果得到确认, 这将是首次在类比引力系统中直接观测到霍金辐射并测量了相应的温度。

类似于声学黑洞, 也可以在光学材料中实现“光学视界”: 通过改变介质折射率, 局部介质运动速度超过介质中的光速, 从而为介质中的电磁波提供了一个等效的视界。文献[10]报道了在

非线性电介质光纤中对霍金辐射的验证和测量结果，虽然发现了霍金辐射存在的证据，但是没能获得类似于霍金辐射的黑体能谱。反过来，类比引力也可以为人们开发新的光学超材料提供启发。比如，文献[11]受到施瓦西黑洞解的启发，提出了一类特殊的纳米光学结构，可以作为弯曲结构中纳米光学的基础，并可用于集成光子电路。

引力全息对偶也为类比引力的研究提供了广阔的前景。通过对所对偶的量子场论的模拟，可以在经典甚至量子计算系统中来模拟量子引力效应。目前被深入研究的一类系统是 Sachdev-Ye-Kitaev 模型（SYK 模型），它具有“近 2 维 AdS”引力的全息对偶性质，被认为是对偶于引力系统的最简单的量子多体模型[12]。文献[13]将 SYK 模型编码到一个多量子比特系统中，并从理论上展示如何利用量子电路系统和多项式计算资源有效地模拟其动力学，同时也指出了如何通过囚禁离子平台和超导电路来实现该模型。同样，基于 SYK 模型，文献[14]利用谷歌的量子处理器“悬铃木”（Sycamore）首次实现了对全息虫洞的量子模拟，朝着在实验室研究量子引力的目标迈出了一步。类比引力的研究不仅加深了人们对引力本身的理解，同时也为材料物理、凝聚态物理等实验科学带来了新的思想和动力。相信类比引力的研究会在将来取得更大的突破。

## 2. 宇宙学领域总体发展现状

我们可以粗略地将现代宇宙学分为热大爆炸宇宙学、暴胀宇宙学和精确宇宙学（标准宇宙学模型）三个历史阶段。其中，①热大爆炸宇宙学在观测上基于哈勃膨胀定律、原初核合成和宇宙微波背景三个观测事实，在理论上基于建立在宇宙学原理上的 FLRW 模型；②暴胀宇宙学在观测上解决了平坦性问题、均匀性问题和磁单极子问题，在理论上通过慢滚模型预言了宇宙大尺度结构和微波辐射背景来自于原初微小的量子涨落；③精确宇宙学在观测上基于以 Ia 型超新星距离阶梯测量、宇宙微波背景辐射探测卫星和大尺度结构星系巡天观测为代表的众多宇宙学观测，在理论上确立了一个包含极小的正宇宙学常数、冷暗物质以及能够产生原初高斯绝热近标度不变标量红谱的早期暴胀的六参数标准宇宙学唯象模型，即 Lambda-CDM（LCDM）模型，它能够大致拟合迄今为止从星系尺度到宇宙学尺度对长达百亿年的宇宙学历史的全部观测事实。但是，作为一个唯象模型，LCDM 模型无论在观测上还是在理论上目前都面临着迫切需要进一步研究的问题，而这些问题的（部分）解决将导致现代宇宙学的又一次认知变革（见综述[15]）。

观测上，标准宇宙学模型作为一个较为粗糙的六参数模型，并没有完全精确地拟合所有的宇宙学观测（见综述[16]），特别是近年来的哈勃常数危机以及相伴随的物质密度扰动参数  $S_8$  冲突。随着对哈勃常数的局域直接测量精度越来越高，最新的利用造父变星定标的 Ia 型超新星测量结果，与测量宇宙微波背景辐射（CMB）的普朗克（Planck 2018）卫星对标准宇宙学模型的全局拟合值之间存在 5 个标准差置信度的冲突。由于其他相互独立的晚期局部测量值也均大于早期全局模型拟合值，因而任何单一的系统误差似乎都无法解释该哈勃常数冲突，故而演变为哈勃常数危机（图 3）。类似地，对  $S_8$  参数的 Planck 2018 测量值也均大于其他晚期测量，如弱引力透镜、红移空间畸变以及星系计数观测等（图 4）。此外，纯 CMB 数据倾向于一个闭合宇宙，这与重子声学振荡（BAO）给出的平坦宇宙存在冲突，该冲突可能与 CMB 透镜参数有关，其物理起源或诠释暂不得而知。最后，其他诸如大冷斑、半球不对称性、积分 Sachs-Wolfe 效应大尺度异常、四极-八极平面排布异常、CMB 大尺度低极矩等 CMB 异常以及其他星系小尺度反常现象（如重子 Tully-Fisher 关系以及质量差异加速度关系）都暗示了标准宇宙学模型可能存在某些内部的不自治性。理论上，早期和晚期

加速膨胀以及暗物质的本质目前还不得而知，超出标准宇宙学模型框架的新物理要素是否存在及其存在形式也不甚明了。

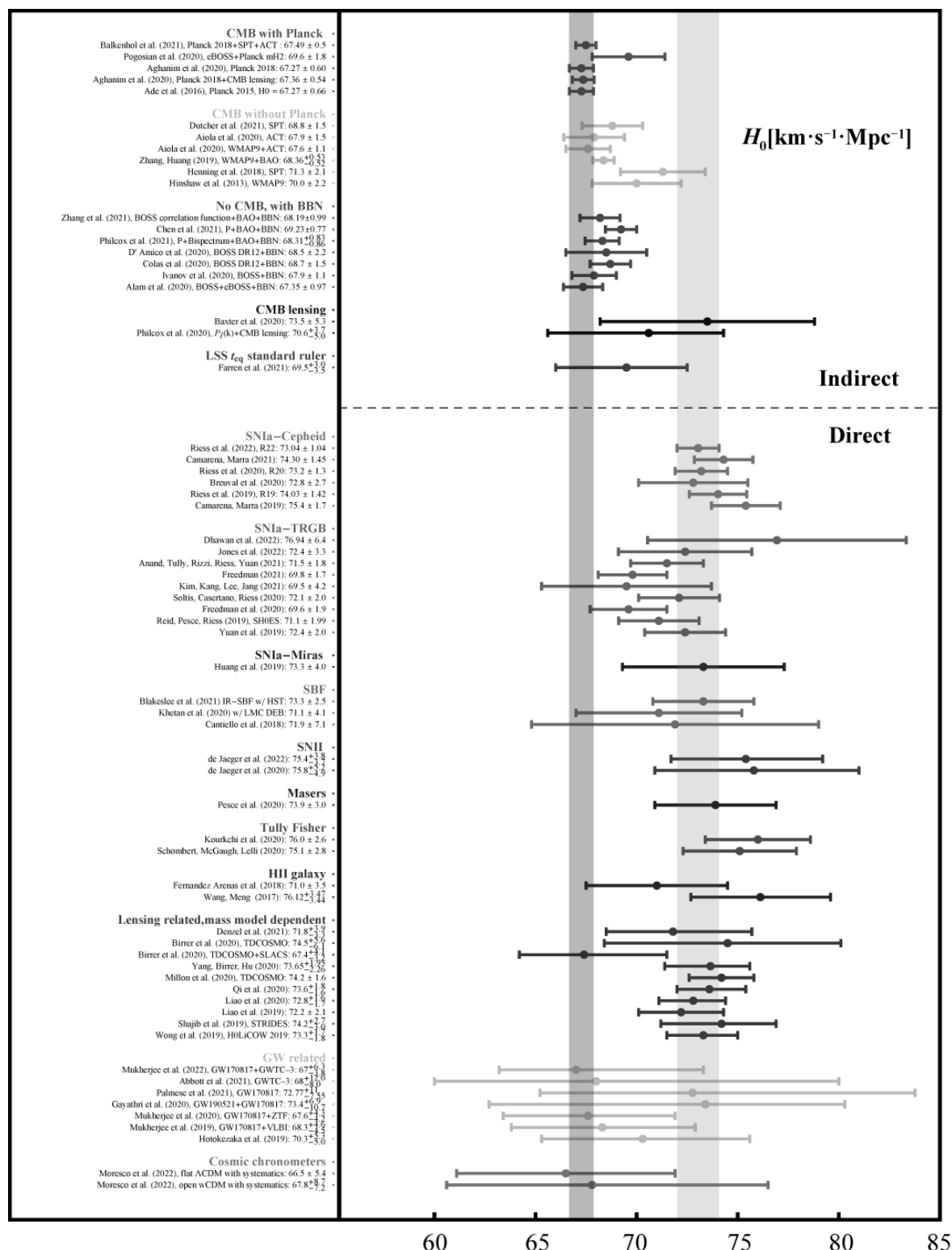


图 3. 哈勃常数危机——来自晚期宇宙的局部测量结果系统性地高于早期宇宙的全局拟合结果

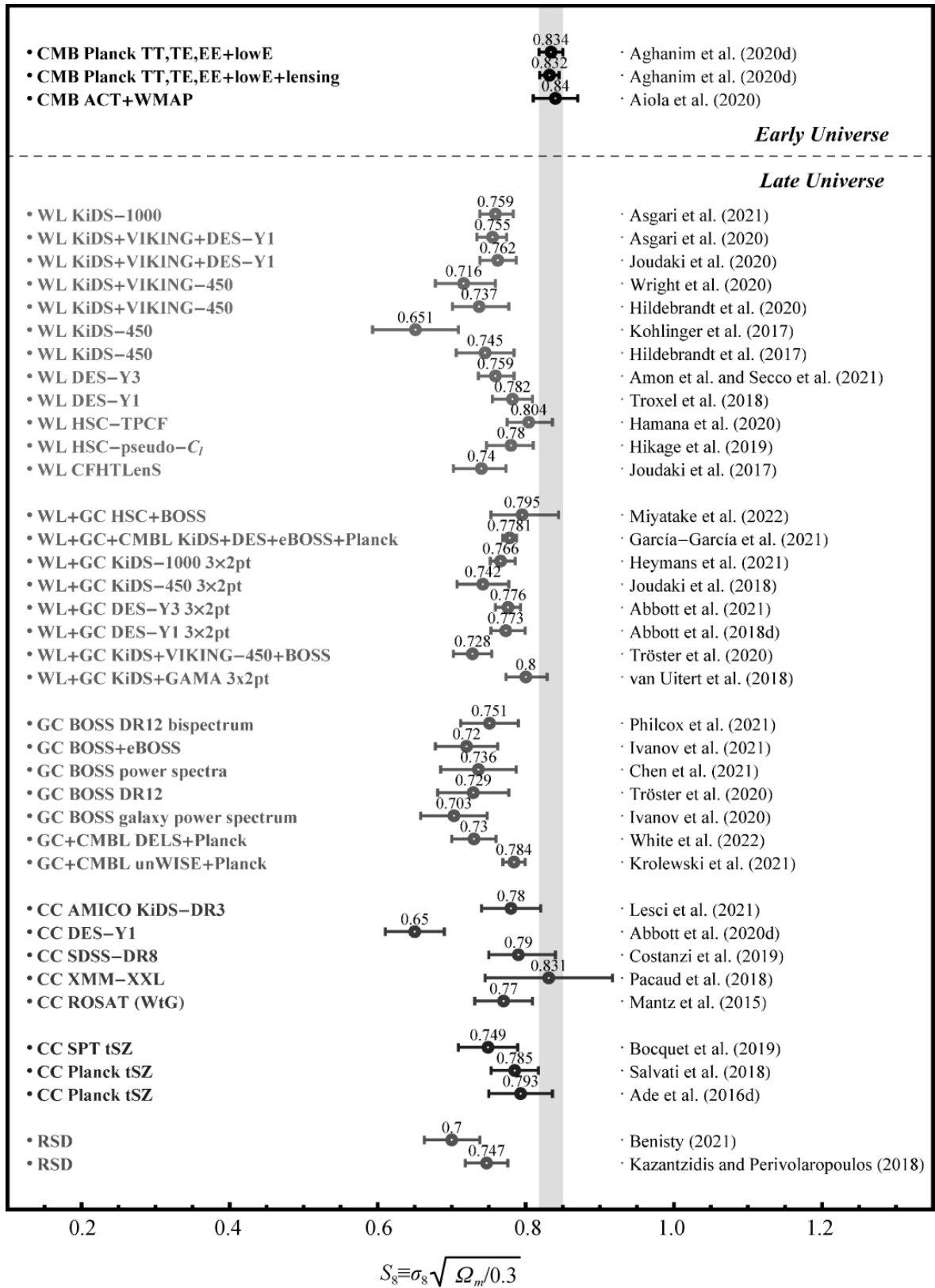


图 4.  $S_8$  冲突—来自晚期宇宙的局部测量结果系统性地低于早期宇宙的全局拟合结果

### 1) 早期加速膨胀

对早期加速膨胀的研究迫切需要回答的三个主要理论问题是：①是否存在前暴胀机制（给出暴胀的初始条件）？②暴胀方案的具体模型实现是什么（给出暴胀时期的强耦合能标和哈勃能标）？③暴胀模型和粒子物理标准模型是如何耦合的（给出重加热温度能标）？其中对第①个问题的研究，目前主要有无边界宇宙和量子隧穿方案、火劫 (ekpyrotic) 宇宙、弦气体模型、反弹宇宙等前暴胀机制，特别是最近由 Neil Turok 等在洛伦兹量子宇宙学框架下而非传统欧几里得路径积分框架下的研究以及最近重新复活的德西特 (dS) 时空的量子引力研

究。对第②个问题的研究，目前主要有吸引子暴胀模型和轴子暴胀模型，其中吸引子暴胀模型给出了一大类暴胀模型的一般共性结构，特别是它们在超引力模型中的紫外实现以及在与广义相对论等价的其他引力表述（如 Palatini 引力和超平行引力）中的类似构造，而轴子暴胀模型利用弦紧致化自然预言的类轴子粒子通过其微扰平移对称性特性实现暴胀并能自然地避免紫外修正带来的暴胀势函数的微调问题，从而成为检验量子引力理论的实验田：比如弱引力猜想就对轴子暴胀时期呈现的超普朗克跑动给出了强烈的限制。除了瞬子以外，虫洞也可以破缺轴子的平移对称性，因而也与最近讨论得颇为热烈的婴儿宇宙（baby universe）密切相关。此外，最近其他新提出的沼泽地猜想（swampland conjectures）也对标准（慢滚）暴胀宇宙学的物理图像提出了挑战。对第③个问题的研究，由于缺乏超出粒子物理标准模型新物理的线索，目前仅在希格斯暴胀模型中得到详尽研究，但是由于该模型面临严重的幺正性问题和稳定性问题，并由于其模型预言和 Starobinsky 暴胀几乎一致，因此现在一般认为需要额外的里奇曲率标量平方项构成双场暴胀来解决这些问题。

## 2) 暗物质

对暗物质的研究迫切需要回答的理论问题是：暗物质是否具有粒子物理起源？如果是，构成暗物质的组分是粒子性占主导还是波动性占主导？如果不是，构成暗物质的成分是宏观物体还是修改（涌现）引力效应？对该问题的不同回答将暗物质相应地划分为四个主要候选者：①粒子型暗物质，特别是弱相互作用大质量粒子，但是对它的直接或者间接探测以及加速器对撞机探测都没有发现任何暗物质粒子的迹象，因此最近对暗物质的粒子物理搜寻开始转向并主要集中于波动型暗物质。②波动型暗物质，即超轻标量粒子特别是 QCD 轴子以及其他类轴子粒子，它作为平移对称性自发破缺产生的赝 Nambu-Goldstone 玻色子以及弦维度紧致化的 modulus 场，最初是用来解决强 CP 问题，后来被用来作为冷暗物质候选者（特别是 fuzzy 暗物质和自相互作用暗物质）来解释大尺度结构以及小尺度反常问题（比如 cusp-core 问题、missing-satellite 问题、toobig-to-fail 问题）。此外，类轴子既可以作暴胀场用来驱动早期宇宙加速膨胀，也可以作暗能量用来驱动晚期宇宙加速膨胀，最近还有研究利用类轴子作 relaxion 场解决等级问题以及用来解释正反物质不对称性，因此类轴子本身的理论前景也十分广阔。③宏观的致密天体，比如原初黑洞特别是小行星质量区间的原初黑洞在目前的观测限制范围内仍然有可能构成全部暗物质（图 5），它的主要产生机制有暴胀模型小尺度增强机制（比如单场的超慢滚拐点、斜拐点、凹凸点、折返点模型以及双场的超慢滚拐点、曲率子模型和声速共振模型等机制）以及其他与拓扑缺陷相关的原初黑洞形成机制（比如暴胀时期产生的真真空泡泡在辐射时期变成假真空泡泡从而坍缩为原初黑洞，以及辐射主导时期发生的宇宙学一阶相变由于其随机异步特性诱导原初黑洞形成）。④修改（涌现）引力效应，其中纯粹的修改引力方案（特别是唯象的修改牛顿力学方案）与宇宙的大尺度观测不符，而且由于子弹星系团观测清晰地显示出引力质心和发光物质质心的偏离，因此基本排除了纯粹修改引力模拟暗物质方案。但是，最近一种被称为超流体暗物质的具有粒子物理起源的涌现引力方案引起了广泛关注，这种超流体暗物质除了在宇宙学尺度上表现为轴子暗物质的正常流体，还可以在星系尺度上凝聚为超流体并涌现修改牛顿力学行为，从而解释星系尺度动力学的一些半经验规律（如重子性 Tully-Fisher 关系、质量差异加速度关系等其他星系尺度上重子质量-引力质量的强关联关系）。

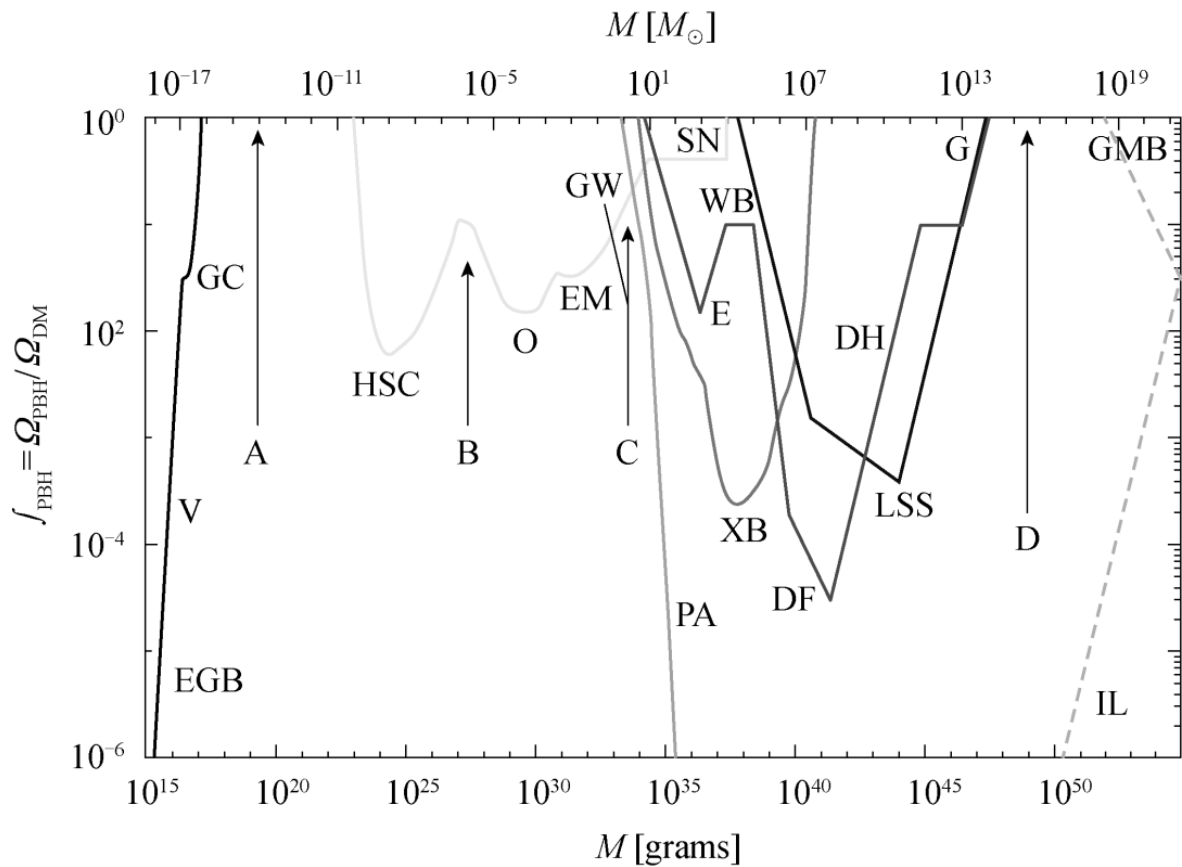


图 5. 当前天文和宇宙学观测对不同质量区间的原初黑洞的丰度限制

### 3) 晚期加速膨胀

对晚期加速膨胀的研究迫切需要回答的问题是：暗能量是否是宇宙学常数？如果是，那么需要解释宇宙学常数的精细调节问题（即如何避开温伯格的不可通行定理）。如果不是，需要继续回答暗能量的动力学行为，它是否会穿过宇宙学常数的状态参数  $w = -1$ ？另外，暗能量也可能是等效的修改引力效应。一般认为暗能量问题与量子引力问题密切相关，一方面，暗能量问题同时具有极大和极小两个尺度的背景，即对宇宙学常数的量子场论微观估计，只有在将其应用于满足宇宙学原理的宏观宇宙，才会出现与观测值的巨大偏差，这暗示了真空能量在小尺度上并非常数而时空在小尺度上并非均匀；另一方面，宇宙学常数（在普朗克单位制下）在量级上与哈勃视界的大小基本一致，因此可能存在直接联系宏观和微观物理的紫外-红外关系。最后，早期和晚期宇宙的加速膨胀特征、暗能量和暗物质的巧合性问题以及暗物质在星系尺度上涌现的加速度能标也和当前哈勃常数在同一量级，也暗示了暗能量和暗物质以及早期暴胀之间可能存在共同起源。总之，对标准宇宙学模型本质及其新物理的探索绝非单一要素的修补拼凑而是直接指向终极理论的一揽子解决方案。

## 二、引力宇宙学领域的发展趋势和展望

### 1. 引力领域的发展趋势和展望

不管是粒子物理的标准模型，还是广义相对论以及宇宙学标准模型，它们还都不是描述自然的最基本的理论。天文和宇宙学的大量观测指出，目前占宇宙主要成分的是暗物质和暗能量，而粒子物理标准模型所描述的重子物质仅占当今宇宙总成分的 5%。此外，粒子物理标准模型目前也无法解释观测到的物质和反物质的不对称性。广义相对论也不可能是关于引力

的最终故事，尤其是霍金和彭罗斯证明的奇点定理，宣告广义相对论将会在极小尺度极高能标下失效；此外，黑洞热力学和引力全息原理的发现，揭示广义相对论在考虑量子效应后会得到不同寻常的修正。更为重要的是，引力本身还是由经典的广义相对论描述的，它给出的经典时空特性与量子理论并不协调，建立一个完整的量子引力理论仍然是现在理论物理学家追求的终极目标之一。

人类经过 100 年的努力才成功探测到引力波，随着引力波探测器灵敏度的提高，引力波的观测已逐渐成为“新常态”，到目前为止人类已经观测到了 100 多个引力波事例。引力波为人类进一步探索宇宙的起源、形成和演化提供了一个全新的观测手段，也为深入研究超越爱因斯坦广义相对论的量子引力理论提供了实验基础。通过探测各个频段的引力波将开启引力波天文学、引力波物理以及宇宙学研究的新纪元。更进一步，科学家们可以同时观测电磁辐射、中微子、宇宙线和引力波去研究宇宙的基本自然规律，多信使天文学和宇宙学观测时代已经来临。

除了广义相对论，物理学家也提出了很多新的引力理论（见综述[17]），并由此衍生出一些新的预言，比如牛顿引力常数随空间或时间变化、等效原理破缺、存在“第五种力”等。因此，未来对现有理论的基本假设和规律进行更加精密的实验检验意义重大。除了传统的检验手段，引力波和冷原子精密测量是两种新的检测途径。前者使得人们得以在强引力场和动态时空对各种引力理论进行检验，后者是基于冷原子发展的原子钟和原子干涉仪等精密测量工具。冷原子采用量子物质作为引力测试对象，将量子力学和广义相对论直接联系在一起，有利于直接探索两大理论适用的边界。我国空间站提供的微重力环境为冷原子精密测量提供了理想的实验条件，未来可以在更高的精度对引力理论进行检验，寻找超越广义相对论的新物理。

近些年黑洞的存在性得到实验观测的决定性支持，因此理解黑洞的内部结构成为一个重要的科学问题。黑洞内部结构跟时空奇异性、宇宙监督假设等重要问题联系在一起，对于广义相对论的可预测性以及观察普朗克尺度物理学的可能性非常重要。进一步考虑量子效应，将如何对黑洞内部结构产生影响？奇异性是否还存在？宇宙监督假设的地位是什么？该如何表述？对这些重要问题的理解无疑会对认识黑洞和引力本质提供巨大帮助。

自从霍金辐射发现以来，黑洞就成为量子引力研究的中心对象。AdS/CFT 对应提供了量子引力对至少一类时空精确的非微扰定义，给出了高维引力和边界量子系统之间的字典对应，也揭示了量子引力和量子信息之间的深刻联系。典型的例子是时空的信息通过全息纠错码可以冗余地存储在边界理论中，以及最近半从经典方法解释黑洞蒸发不会破坏信息守恒[6, 7]。量子黑洞研究的进展暗示了量子引力与量子信息以及量子多体物理之间深刻的联系，未来的一些重要问题包括：①边界系统中一个典型态的引力对应是什么？②这种对应与火墙佯谬的关系是什么？③这种对应如何推广到超出 AdS 的时空，特别是真实的宇宙时空？④黑洞微观状态的起源是什么？⑤是否能够在实验室构造帮助理解量子引力问题的模型系统？

未来的研究将在理论和观测两个方面深入开展。一方面，人们将继续从理论上来进行对引力本质的深入研究，探索量子引力可能的实现方式。尤其是黑洞热力学研究所揭示出的引力、量子力学和热力学之间的深刻关系，为探究引力的本质属性提供了重要启示。另一方面，实验技术的快速进步和大科学装置的兴建，尤其是引力波天文学和引力波宇宙学的兴起，将会极大地促进人类对基本物理规律和宇宙的起源和结构的认识。理论和实验的相互促进，必将孕育着引力和宇宙学上的重大突破。

## 2. 宇宙学领域的发展趋势和展望

### 1) 极早期宇宙

对极早期宇宙（辐射主导之前）的探测包括原初引力波、原初非高斯以及其他原初特征信号在 CMB、星系大尺度结构以及随机引力波背景上留下的印记，其中：①原初引力波在 CMB 上产生的 B 模极化可以用来确定暴胀时期的哈勃能标（及其导数变化能标）以及标量扰动进入强耦合区域的能标；②原初非高斯性及其变化行为在 CMB 和大尺度结构的双频谱上留下的可观测信号，不仅可以反映暴胀的具体实现机制，还可以给出暴胀时期其他粒子及其相互作用的信息（轻标量自由度数目，重场自由度数目、质量和自旋），甚至有可能通过量子扰动的初始态、传播速度和相互作用帮助我们甄别前暴胀机制（如无边界宇宙、量子隧穿、火劫 (ekpyrotic) 宇宙、弦气体模型、反弹宇宙等），从而给出实现量子引力的关键信息；③超出最简单的单场慢滚暴胀模型的近尺度不变的原初功率谱的其他特征，比如来自偏离吸引子解的振荡行为（比如单场凹凸点和多场拐点以及声速共振等机制）、在吸引子解附近周期性振荡的背景量所导致的共振行为（比如轴子 monodromy 或者非 Bunch-Davies 真空）以及暴胀时期额外的物质主导或者宇宙学相变等其他前辐射主导时期，都将在 CMB 的各向异性谱、CMB 谱畸变、星系巡天、21cm 线和随机引力波背景（如标量诱导引力波）留下观测信号。最后，除了上述观测暴胀宇宙学研究外，理论暴胀宇宙学研究还包括：①暴胀宇宙学的场论研究（如有效场论参数化），②暴胀宇宙学的弦论研究（如弦论中对德西特解的构造、德西特空间的量子引力研究以及暴胀模型的紫外完备特征即沼泽地猜想等），③暴胀宇宙学的全息引力研究（如 dS/CFT、dS/dS、FRW/FRW、FRW/CFT 和在 AdS/CFT 内嵌入 dS 或者 FRW 解以及将 AdS/CFT 提升到宇宙的构造等），以及④暴胀宇宙学的量子信息研究（比如原初扰动的纠缠熵等），这些都是当下以及未来对理论暴胀宇宙学研究的发展方向。

### 2) 早期宇宙

对早期宇宙（辐射主导时期至 CMB 时期之前）的观测主要来自随机引力波背景以及其他辐射遗迹的观测，这是因为暴胀结束后但在 CMB 之前的早期宇宙对光是不透明的，因此主要的探测手段仍然是引力波，特别是来自宇宙学一阶相变的随机引力波背景，它将给出 Peccei-Quinn 相变（诸如 LIGO 等地面引力波探测实验）、电弱相变（诸如 LISA、太极和天琴等空间引力波探测实验）、QCD 相变（诸如脉冲星计时阵列和平方公里阵列等探测实验）以及其他对称破缺一阶相变模型（如 B-L 对称性破缺、大统一对称性破缺、超对称破缺、R-对称性破缺等）的模型细节，给出寻找超出粒子物理标准模型新物理（比如重子生成机制、禁闭-退禁闭机制等）的线索。此外，除了以上连续对称性破缺诱导的宇宙学一阶相变外，离散对称性破缺诱导的宇宙学一阶相变还将产生诸如畴壁 (domain wall)、宇宙弦、单极子、纹构体 (textures) 等拓扑缺陷，它们也将产生随机引力波背景，特别是宇宙弦产生的引力波背景横跨多个引力波探测区间，如能探测将可以直接检验弦理论。最后，对其他辐射遗迹的探测，除了对 CMB 的极化探测，还有对宇宙中微子背景等其他轻粒子遗迹背景的探测。目前原初核合成对 QCD 相变后其他轻粒子遗迹有效自由度数目的限制在 95% 置信度上不超过 3.3 个（其中标准模型中微子已经占了 3.046 个），未来 CMB-S4 探测实验将对 QCD 相变前 1GeV 的标量粒子敏感，这对于类轴子粒子和重费米子的耦合探测至关重要。未来更高精度的 CMB 探测实验将有可能限制重加热后任何与标准模型达到热平衡的新物理粒子。

### 3) 晚期宇宙

对晚期宇宙（CMB 之后至晚期加速膨胀时期）的观测主要来自射电观测（如 21cm 观测等）、红外观测（如詹姆斯·韦伯卫星等）、下一代星系巡天观测以及更高精度的距离阶梯测量。首先，对 21cm 线的观测可以重构宇宙从黑暗时代到黎明时期直至再电离时期结束的整个演化历史，给出暗能量状态方程参数的高红移演化，追踪物质密度涨落的分布及其物质功率谱指标的跑动，给出第一代发光天体及其结构的信息。特别地，最近发现的速度诱导声学振荡（velocity-induced acoustic oscillation, VAO）将有可能作为高红移时期一个干净的标准尺来测量高红移的哈勃膨胀率。其次，最近对局域宇宙的高精度距离阶梯测量，特别是利用造父变星定标的 Ia 型超新星的距离-红移测量，进一步加剧了此前发现的哈勃常数偏差冲突，因此未来利用其他超新星定标方法（如红巨星支顶端、Miras 星）以及其他与超新星无关的测距方法（如脉泽星、面亮度涨落、重子 Tully-Fisher 关系、强引力透镜时间延迟、引力波标准汽笛）将有助于厘清哈勃常数危机的实质。最后，对晚期宇宙的星系巡天项目未来将朝向更大天区更深红移持续推进（比如 DESI、Euclid、WFIRST、LSST，以及即将发射的中国空间站巡天望远镜），给出星系尺度上暗物质的精细性质，获得局域宇宙物质分布全貌，在更高精度检验宇宙学原理和大尺度结构形成理论，给出暗能量和暗物质本质的线索甚至是原初暴胀功率谱的非高斯特征信号。

对暗物质的研究，我们在此仅特别强调对原初黑洞的研究，特别是小行星质量区间范围内的原初黑洞作为全部暗物质的可能性。对原初黑洞的理论研究主要集中于原初黑洞的形成机制、产生机制和探测机制（见综述[18]），其中对原初黑洞的形成机制的研究主要通过数值相对论模拟，主要目标是给出原初黑洞形成的密度涨落超出的阈值，目前的理论兴趣是探究原初非高斯性对原初黑洞形成机制的影响；而对原初黑洞产生机制的研究主要是通过在小尺度上修改最简单的原初扰动功率谱，但是这种小尺度的增强机制往往需要精确微调才能保证原初黑洞的生成，最近有研究发现宇宙学一阶相变可以一般化地诱导原初黑洞形成，因此未来仍然值得继续研究；最后对原初黑洞的探测机制的研究主要通过霍金辐射、微引力透镜和原初黑洞并合的引力波背景给出，未来应当探索新探测机制来限制目前使原初黑洞作全部暗物质的开放窗口。

对晚期加速膨胀（暗能量）的研究，我们在此仅特别强调对哈勃常数危机的研究，这是因为：①对晚期宇宙的多种局域测量结果（无论是采用哪种对距离阶梯的定标方法，还是测量本身是否依赖于距离阶梯测距）都系统性地高于来自早期宇宙的全局拟合结果，由此基本排除了某种单一系统误差导致的可能性；②修改早期宇宙的方案虽然能够在一定程度上缓解哈勃常数危机，但是基本都会进一步加剧物质密度扰动参数  $S_8$  的冲突，因此仍然需要同时修改晚期宇宙；③单纯修改晚期宇宙特别是全局的均匀性修改（不涉及小尺度上非均匀性修改）会受到来自反向距离阶梯的强烈限制。因此目前解决哈勃常数危机可行的方案，要么偏向同时修改早期和晚期宇宙的混合方案，要么需要我们在扰动阶非均匀地修改极晚期宇宙。无论采用哪种方案都需要修改晚期宇宙，从而与驱动晚期加速膨胀的暗能量密切相关。

由于作者的知识所限，以上讨论的并不能反映引力和宇宙学领域的发展全貌，对未来研究方向和展望也并不一定完全正确。

### 参考文献 (滑动查看)

- [1] 蔡荣根, 王少江, 杨润秋, 等. 引力本质. 科学通报, 2018, 63(24): 2484-2498.
- [2] Cai R G, Cao Z, Guo Z K, et al. The gravitational-wave physics. Natl. Sci. Rev., 2017, 4(5): 687-706.
- [3] Bian L, Cai R G, Cao S, et al. The gravitational-wave physics II: Progress. Sci. China Phys. Mech. Astron., 2012, 64(12): 120401.
- [4] 蔡荣根, 曹利明, 李理, 等. 时空奇异性和宇宙监督假设. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 110401



理论物理专款

ID: lilunwulizhuankuan

文章已于2023-12-28修改