

# 以天为则：从弱场到强场的引力检验

姬佩祥<sup>1</sup> 梁迪聪<sup>2</sup> 邵立晶<sup>1</sup>

(1. 北京大学 100871; 2. 南方医科大学 510515)

在现代基础物理学的研究中,人们日益发现对引力与时空的理解存在若干突出的问题,对引力的进一步理解甚至可能蕴含着通往新物理的重要启示。对爱因斯坦的广义相对论及其修改理论的实验探索是理解引力的必要途径。本文简要介绍了基于天文学与宇宙学的诸多观测对引力理论的实验检验。太阳系中弱引力场环境下的四大经典检验构成了广义相对论建立后半世纪的重要经验证据,而新近的基于脉冲星、黑洞和引力波的强场实验大大地拓展了引力检验的参数空间,宇宙学又进一步地提供了大尺度下引力行为的观测事实。迄今为止,广义相对论通过了上述所有的观测检验,但更进一步高精度的探索有望给人们提供新物理的证据,是基础物理学领域至关重要的前沿课题。

## 一、引言：引力的特殊性

物理学对物质世界的本质及其相互作用的深入理解是 20 世纪最伟大的科学成就之一。根据现代物理学的认识,物质世界由简单的组分构成,也就是基本粒子(或称为基本场),各粒子之间存在着四种基本的相互作用。这些基本粒子和相互作用构成了纷繁多变的万千世界。从最本原的理论角度来说,物理世界由粒子物理的标准模型和爱因斯坦的广义相对论共同描述。其中,粒子物理的标准模型在量子场论的框架下描述了三种基本相互作用(即强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用),而广义相对论则另辟蹊径,通过弯曲时空的动力学刻画了引力相互作用。

现代物理学通过标准模型和广义相对论成功解释了诸多的实验与观测现象,极端精密的测量和

极端环境下的全新探索都与理论预言符合得很好,获得了很大的成功。但是,基础物理学仍旧面临着若干重要问题。在理论层面,一方面量子场论与广义相对论存在不可调和的矛盾。尽管人们对称为“终极理论”的量子引力进行了长期的探索,但迄今仍旧对其知之甚少,引力相互作用尚难以被成功量子化。另一方面,广义相对论的部分预言也存在奇点疑难、信息缺失悖论等突出问题。在观测层面,我们对暗物质与暗能量的本质问题尚不能彻底理解,宇宙早期的暴胀也需要超出标准模型和广义相对论的额外驱动因素来解释。

倘若静心深思,诸多疑难似乎都与引力有关。为什么四种基本相互作用仅有引力不用量子场论描述?广义相对论能否在现有框架下量子化、抑或需要一套全新的数学工具?为什么已有暗物质和暗能量的观测证据都来自于引力相互作用?有没有可能所谓的暗物质和暗能量疑难起源于人们对引力理解上的偏颇?物理学究其本质是门实验科学,这些基础物理问题亟需人们从经验观测的角度对其有个完整的审视。本文从唯象学的角度,对引力理论早期的经典检验和近些年强引力场、大时空尺度下的引力实验做个初步的宏观介绍。引力相互作用由于其耦合常数小和不可屏蔽的原因,天然的舞台常常涉及天文学与宇宙学,这也是本文介绍的侧重点——以“天”为则,检验引力。

## 二、太阳系的弱场引力检验

爱因斯坦刊登在 1919 年底《泰晤士报》的信件中写到,“这个理论(广义相对论)的主要吸引力在于它逻辑上的完备性。如果从中得出的结论中有一

个被证明是错误的,就必须放弃。”爱因斯坦提及的从广义相对论得出的结论分别是水星轨道进动、光线偏折和引力红移,它们构成了引力的三大经典检验;夏皮罗在 1964 年提出了引力时延效应,与前三个检验并称为引力的四大经典检验(参见图 1)。早期对经典检验的测量结果让人们逐渐接受了爱因斯坦广义相对论中对引力全创新的诠释。

**水星近日点进动** 开普勒第一定律告诉我们,行星绕太阳运动的轨迹是一个椭圆。然而,由于受到其他行星引力等因素的影响,一个行星后一周期的椭圆轨道并不与前一周期的椭圆轨道重合,这种现象叫作轨道进动。19 世纪下半叶,天文学家就发现水星近日点每百年进动的角度比牛顿引力理论的预言值多出了 43 角秒。直到 1916 年,爱因斯坦通过计算,表明这 43 角秒起源于广义相对论效应,提供了广义相对论的有力证据<sup>[1]</sup>。

**光线偏折** 牛顿引力借助光的微粒说预言光在通过太阳表面时其轨迹会发生偏折,而广义相对论中的光子在弯曲时空走测地线,同样会发生偏折,但偏折的角度是牛顿引力给出的两倍。1919 年爱丁顿带领了两支考察队分别在日全食时对星光进行了观测,通过对比太阳在与不在该区域的照片,发现恒星位置产生了与广义相对论预言自洽的偏离<sup>[2]</sup>。进入 21 世纪后,受益于甚长基线干涉测量技术<sup>[3]</sup>,光线偏折在更高精度上被证实与广义相对论

相符。

**引力红移** 爱因斯坦早在 1907 年就根据等效原理预言光子在逃离引力场的过程中频率降低、波长增大,该现象称为引力红移。50 多年后物理学家借助穆斯堡尔效应,测量到了在几十米的垂直高度差异上引力造成的谱线移动<sup>[4]</sup>。随着时代的发展,人们利用火箭、全球定位系统和原子钟,进一步证实了引力红移效应。

**引力时延** 在一个静态观测者看来,当电磁信号经过一个大质量天体时,信号发射到指定目标和从目标返回的时间都要比不存在大质量天体时所需的更长<sup>[5]</sup>,这就是引力时延。夏皮罗构想了一个实验方案:从地面上发射雷达信号并通过行星表面的反射回到地面,测量行星被太阳遮挡前后的相对时间延迟。针对水星和金星的实验结果在 95% 的水平上符合广义相对论的预言<sup>[6]</sup>。卡西尼航天器在飞往土星的旅途中对引力时延的测量则在更高精度上验证了该预言<sup>[7]</sup>。

上述四大经典检验取得了巨大成功,但它们仅仅检验了广义相对论中近似描述太阳系时空的球对称真空解。其实,在太阳系内也可以对广义相对论的基本原理作出高精度的检验。厄缶设计了扭秤平衡实验来测试两个秤砣在地球引力场中是否具有相同的加速度以检验等效原理。现在利用月球激光测距技术,我们不仅可以探测地球和月球在

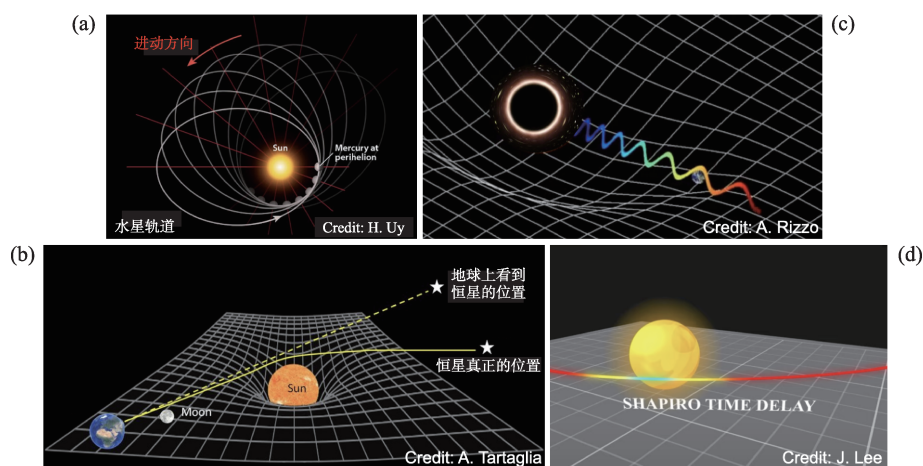


图 1 太阳系内四大经典引力检验示意图:水星近日点进动(a)、光线偏折(b)、引力红移(c)、引力时延(d)

太阳引力场中的自由落体是否一致,而且还能探测它们的自引力能对运动的影响,从而验证了更强版本的等效原理<sup>[8]</sup>。此外,对局域洛伦兹不变性、局域位置不变性和牛顿引力常量不变性的检验也通过地月系统得到了实现<sup>[9]</sup>。所有这些在太阳系内的实验和观测结果都符合广义相对论的预测,坚定了人们对引力理论的信心。

### 三、致密星的强场引力检验

广义相对论在弱引力场、低速的情形下与牛顿引力十分相像,但在强场、高速时与牛顿引力有本质的差异。尽管太阳具有很大的质量,但远远称不上致密,因此在太阳系内我们只能检验所谓的“弱场引力”。幸运的是,宇宙中还存在各种致密星体,例如白矮星、中子星和黑洞。这些致密星的结构、形成和演化更依赖于相对论性的引力理论,是“强场引力”检验的理想场所。此外,太阳系内星体的运动速度较慢,难以检验引力的动态性质,例如引力相互作用的有限传播速度等,相关的检验也往往需要借助致密星或宇宙学来完成。图2分别展示了目前常用的利用致密星来检验引力的办法:脉冲星计时、黑洞成像以及引力波观测。

#### 1. 脉冲星

脉冲星是高度磁化的旋转中子星,从它的磁极发出的电磁辐射束间隔性地扫过地球,并在射电望远镜上留下周期性的脉冲信号。脉冲星的辐射包括多个频段,从长波长的无线电波到短波长的伽马

射线都可被探测到,进而用来推断脉冲星的性质并用于检验引力。

在中子星物态方程给定的情况下,利用广义相对论可以计算出中子星质量、半径、转动惯量和潮汐形变参数等物理量。对于孤立脉冲星,其质量和半径可以通过分析X射线脉冲轮廓特征得到,对脉冲星强场引力的检验可以通过检验质量和半径是否在广义相对论预言的质量-半径曲线上来实现。可由于核物理并不能完全确定中子星的物态方程是什么,对引力的检验常常受到来自物态不确定性的干扰。为此,天体物理学家们找到了许多与物态关联很小的中子星普适关系,试图打破简并<sup>[10]</sup>。但要同时从观测上得到某颗特定脉冲星用于验证普适关系所需的所有物理量并非易事。

另一种更为精确的检验引力的方法来自脉冲星计时,特别是对双星系统的计时。由于脉冲星的自转极端稳定,其在望远镜上留下一连串的“脉冲到达时间”数据可以用来推断双星轨道以及脉冲星质量等信息。在计时信号质量高的情况下,可用来检验强场引力。1974年赫尔斯和泰勒使用阿雷西博望远镜在天鹰座天区探测到来自脉冲星的脉冲信号,并辨认出首个双中子星系统<sup>[11]</sup>。广义相对论所预测的双星轨道运动和相对论带来的各种时间延迟项都会以不同形式反映在脉冲到达时间序列上<sup>[12,13]</sup>,而实际观测到的脉冲序列很好地检验了基于广义相对论建立的计时模型的有效性<sup>[14]</sup>。在广义相对论正确的前提下,测量三个及以上描述双星轨道的后开普勒参数还可以进行引力理论自洽性

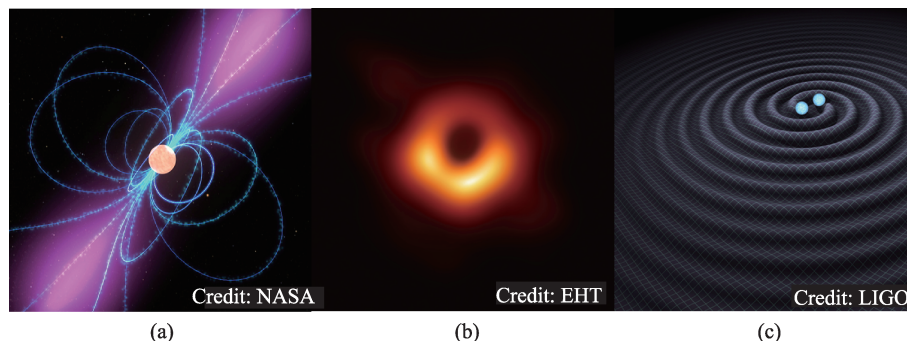


图2 致密星引力检验示意图:脉冲星(a),M87星系中心黑洞的照片(b),致密双星绕转辐射引力波(c)

的检验<sup>[14]</sup>。得到计时模型推测的双星质量后,可以计算出由于引力波辐射造成的脉冲星轨道周期的衰减率,这个结果与扣除运动学效应的观测量相符,也为引力波存在提供了第一个间接证据<sup>[15]</sup>。现今的脉冲星计时更为精确,且有了更多的脉冲星系统。这些系统由于轨道大小和椭率、伴星质量、所处环境等因素的不同,可用于检验多方面引力与时空的特性,包括强等效原理、时空对称性、引力子的质量、替代引力理论等<sup>[16]</sup>。

## 2. 黑洞

与中子星一样,黑洞也是恒星演化的产物。尽管黑洞作为数学形式解早在 1916 年由史瓦西求得,但直到 1964 年,才有了黑洞存在的证据。天鹅座 X-1 作为一个黑洞,与超巨星构成双星系统。超巨星的外围气体旋转着掉入黑洞,并在黑洞周围形成较为稳定的盘状结构,即吸积盘。这些气体落入更低轨道的过程中,释放出大量可被探测的 X 射线。如果气体的角动量足够大,那么形成的吸积盘会很薄,而且气体处在局域热平衡,从而辐射类黑体的热谱。在更靠近黑洞的地方,吸积盘会形成冠冕结构,其主要成分是温度更高的等离子体。来自吸积盘的热光子与冠冕结构的电子发生康普顿散射后,构成了吸积盘的反射光谱。

吸积盘辐射的这些光子,在黑洞强大的引力场下运动。由于在不同的引力理论下,描述黑洞的时空是不一样的,光子的运动轨迹也会有差别,因此呈现不同的光谱特征。在广义相对论中,旋转的黑洞由克尔度规描述。因此,对克尔度规的检验是常见的一种对广义相对论的检验。目前,利用吸积盘的 X 射线特征来检验广义相对论主要有两种方法:连续谱拟合法<sup>[17]</sup>和 X 射线反射光谱法<sup>[18]</sup>。在反射光谱中,铁  $K\alpha$  线是最显著的谱线,其由于引力红移及多普勒效应等而被加宽。对铁  $K\alpha$  线的分析,同样可以用来检验克尔黑洞假设。未来,随着观测精度的提高,人们还可以利用 X 射线的偏振、准周期性震荡等性质,以及反响映射、X 射线成像等技术手

段来研究黑洞的性质,进而对引力理论进行检验。

除了上面提到的恒星级质量黑洞,星系的中心还存在超大质量黑洞,其质量为太阳的十万到百亿倍。尽管超大质量黑洞周围环境的组分复杂,但毫米波长的光从星系中心传播到地面望远镜的过程中,受到的影响最小,因此我们可以利用射电望远镜进行观测。射电望远镜的角分辨率受到望远镜尺寸大小的限制,但如果利用地球上的多台射电望远镜对同一个源进行观测,并把各个望远镜的数据结合起来,就可以得到一个等效的大望远镜。利用这样的甚长基线干涉技术,事件视界望远镜合作组在 2019 年发布了对 M87 星系中心的超大质量黑洞成像的图片<sup>[19]</sup>,并在 2022 年发布了银河系中心黑洞的照片<sup>[20]</sup>。

黑洞本身不会发光,我们看到的图像来源于黑洞的吸积盘(包括潜在的喷流区域)的相对性电子在黑洞引力场中运动时的同步辐射。这些光子有一部分落入黑洞,有一部分在黑洞周围形成束缚轨道,还有一部分围绕黑洞旋转数圈后摆脱黑洞引力的束缚而抵达地球。这些光子的轨迹由黑洞时空决定,其抵达像平面时,呈现有多重结构的光环。根据光子围绕黑洞圈数次数不同,可以再分为次光环,其干涉特征可以用来检验引力<sup>[21]</sup>。除了光环的强度,光环的偏振特征、形状、自关联函数等性质也与黑洞的度规密切相关,因此同样可以用来区分引力理论。随着技术的发展,新一代的技术将可以拍摄超大质量黑洞的实时影像,从而帮助我们更好地检验引力理论。

## 3. 引力波

除了电磁波,我们还可以通过引力波来对中子星、黑洞等致密星进行观测。爱因斯坦早在 1916 年就预言了引力波,但其存在性一度受到质疑。前面提到赫尔斯-泰勒双星系统的轨道衰减与广义相对论的预言一致,间接地证明了引力波的存在。2015 年 9 月 14 日,激光干涉引力波天文台(LIGO)更是利用两个大型干涉仪装置,直接探测到了引力

波<sup>[22]</sup>。到目前为止, LIGO、Virgo 和 KAGRA 合作组, 已经公布了约百例引力波事件。这些引力波都是由恒星级致密双星系统并合产生, 其频率在赫兹到千赫兹之间。

如果双星的质量越大, 其辐射的引力波频率就越低。对于由中等质量双黑洞或低质量端的超大质量双黑洞来说, 辐射的引力波信号在毫赫兹频段。此外, 由超大质量黑洞与恒星级致密星体组成的极端质量比旋近系统也会辐射毫赫兹引力波。我国的天琴项目、太极计划, 以及欧美合作的激光干涉空间天线(LISA)将通过多颗卫星组阵来探测毫赫兹引力波。而超大质量双黑洞的早期绕转, 会产生纳赫兹引力波, 可以通过脉冲星计时阵列、借助不同脉冲星的计时残差的关联来寻找其存在的证据。

单颗中子星自转产生的连续引力波信号与超新星核坍缩时产生的爆发式引力波信号, 都是地面引力波探测器的搜寻目标, 但目前还没有被观测到。除此以外, 还存在大量微弱的、不可单独分辨的引力波信号, 共同构成随机引力波背景。随机引力波背景横跨多个频段, 其来源包括不同的天体物理过程和宇宙学过程。目前, 地面探测器仍未观测到引力波背景存在的证据, 而在 2023 年 6 月, 北美纳赫兹引力波天文台、欧洲脉冲星计时阵列、帕克斯脉冲星计时阵列和中国脉冲星计时阵列同时宣布, 他们发现了纳赫兹引力波背景存在的证据<sup>[23-26]</sup>。

引力波是引力场的微扰, 其性质可以用来检验引力理论。在广义相对论中, 引力波以光速传播, 而在洛伦兹对称性破缺的理论或引力子有质量的引力理论中, 引力波的传播速度会偏离光速。根据观测到的第一例双中子星并合产生的引力波信号 GW170817 以及成协的伽马射线暴 GRB170817A, 人们对引力波的传播速度做出一个非常强的限制<sup>[27]</sup>。另一方面, 在广义相对论中, 引力波只有两种张量偏振模式, 也就是“+”模式和“×”模式。在一般的度规引力理论中, 最多可以有六种偏振模式。比如, 在标量-张量引力理论中, 标量场可以激发呼吸模式或者纵向模式; 而在矢量-张量引力理论中,

矢量场可以激发矢量- $x$ 模式和矢量- $y$ 模式<sup>[28]</sup>。引力波探测器记录的信号, 实际上是各种偏振模式在探测器的投影之和。因此, 如果要检验广义相对论中不存在的额外偏振模式, 就需要三台或以上的探测器。由于 LIGO 的两个探测器朝向近乎反平行, 而 Virgo 探测器的灵敏度尚不高, 所以目前对额外偏振的限制并不强<sup>[29]</sup>。引力波的速度和偏振特性同样反映在引力波背景中, 也可以用引力波背景来检验引力理论。

与电磁波探测不同, 引力波由于其振幅极小而被淹没在噪声中。因此要分析引力波的波形, 需要采取特殊的数据分析手段: 首先要精确构建不同参数下的引力波波形, 并用该波形模板库与数据匹配, 从而筛选出信号并进行参数估计。由于引力方程的高度非线性, 其求解并不容易。特别是在并合阶段的波形, 需要通过数值相对论来进行求解。目前广义相对论下的波形计算最为完整和成熟, 而其他修改引力理论下的波形计算仍在不断发展中。致密双星辐射引力波的过程分为三个阶段, 分别是旋近、并合和铃宕。在不同的阶段, 引力波信号有不同的波形特征, 我们可以对比广义相对论下的引力波波形与观测数据来检验理论是否与数据一致。探测器记录的数据, 包括引力波信号和噪声。如果引力波信号可以用广义相对论的波形来刻画, 那么我们从数据中减去广义相对论的波形, 得到的残差应该具有与噪声一致的统计特性。反之, 如果广义相对论波形与真实信号有偏离, 那么残差中将仍包含引力波信号。残差检验通过在不同的探测器残差之间搜寻是否存在有关联的引力波信号来检验引力<sup>[29]</sup>。此外, 我们可以分别利用旋近的信号, 和并合-铃宕的信号来对并合后黑洞的自旋与质量做参数估计, 检验是否能得到一致的结果, 这就是旋近-并合-铃宕一致性检验<sup>[29]</sup>。如果单看铃宕阶段的引力波信号, 理论上应该为一系列的准简正模的叠加, 对其分析也可以用来检验黑洞的性质, 进而检验广义相对论<sup>[30]</sup>。

由于缺乏修改引力理论下的波形模板, 目前人

们在广义相对论波形的基础上,加上一些参数化的修正项。由于数据分析方法对引力波的相位更加敏感,我们通常只考虑相位上的修正。特别地,如果引力波的传播速度偏离光速,也会在相位上引起调制。检验这些额外的非广义相对论参数是否为零构成了对广义相对论的检验。随着探测到的引力波事件的增加,我们不仅可以利用单个引力波事件来对偏离广义相对论的参数进行限制,还可以通过分层检验法,结合多个高信噪比事件给出更强的限制<sup>[31,32]</sup>。未来,随着探测器数量的增加,以及设备灵敏度的不断提高,人们将在更高的精度上检验广义相对论。

#### 四、宇宙学

“上下四方曰宇,往古来今曰宙”,宇宙即所有物质、时间和空间的总和。人类对宇宙的探索自古已有,并且经过了从地心说到日心说的思想进步、从固定“恒星天”到动态演化的重新认识、从减速膨胀到加速暴涨的惊奇转变。如今的宇宙学,已经是一门精确的学科。将广义相对论应用到整个(可观测)宇宙,便可知晓宇宙演化的历史,预测宇宙未来的归宿。利用望远镜和卫星收集的反映宇宙性质和演化的观测数据,可以检验广义相对论在宇宙大尺度上的有效性,提供前面介绍的“弱场”和“强场”之外新的检验。

大自然提供了两类探测宇宙的手段,其中一类限制宇宙的膨胀历史,另一类则约束宇宙中结构的形成和聚集<sup>[33]</sup>。哈勃在 1929 年对遥远星系的观测发现了宇宙的膨胀<sup>[34]</sup>,进而否定了爱因斯坦的静态宇宙模型。用 Ia 型超新星作为标准烛光,宇宙加速膨胀的真相在 1998 年揭开,彻底颠覆了人们原先对宇宙的理解<sup>[35,36]</sup>。广义相对论作为引力的动力学理论,天然地适合描述动态演化的宇宙。弱引力透镜效应<sup>[37]</sup>的统计研究和星系巡天项目<sup>[38]</sup>的光谱红移调查等方法可以探测宇宙大尺度结构的分布进而限制其形成与后续演变。宇宙微波背景辐射作为最重要的宇宙学探针之一,与重子声波振荡一起可以

推断宇宙的演化历史,而利用其各方向的不均匀性又能研究宇宙中结构的形成<sup>[39]</sup>。

宇宙由古至今的演化涉及从大到小不同能标和不同层级上的物理,因此仅靠广义相对论是无法完全描述整个宇宙的。我们还需要主导不同时期宇宙演化的粒子物理、核物理、星系物理等等内容,这些理论共同搭建了宇宙学的标准模型。标准宇宙学模型含有描述宇宙组分和初始状态的若干参数,它们可以通过多种方法来估计。多种方法在相差上万倍尺度的系统上估计的宇宙中物质的能量占比都在 15% 到 30% 之间<sup>[40]</sup>,这些基于理论的不同方面和广泛的天文学方法的估计排除了系统误差造成的误导,结果的一致性表明以广义相对论为基础的宇宙学模型是合理的。

根据宇宙学的标准模型,整个宇宙由大约 5% 的普通物质,27% 的暗物质和 68% 的暗能量构成。由于表明暗物质和暗能量存在迹象的天文观测都来自于引力层面——人们并没有在任何实验中发现暗物质粒子,更缺乏引入暗能量的其他佐证——于是一部分物理学家怀疑广义相对论并不在大尺度上适用,进而提出了各种引力的替代理论<sup>[41,42]</sup>。尽管其中的某些理论可以解决广义相对论中存在的疑难和问题,但都不具备驳倒广义相对论的最终证据。这些修改引力的自洽性,也需要通过各类的强、弱场检验。

现在我们对宇宙的了解几乎全部都建立自电磁波的观测,观测结果把检验引力的尺度范围外推了 15 个数量级。然而这些观测无法检验早期的强场宇宙,因为那时光子与重子耦合无法自由地传播。但是随着引力波天文学的蓬勃发展,我们有机会探测到来自宇宙早期的引力波<sup>[43]</sup>,这将进一步丰富引力检验的范围。在新一代的宇宙学星系巡天和引力波探测器的加持下,宇宙学对广义相对论的限制将会得到大幅度的提升<sup>[44]</sup>。

#### 五、结语

我国古代文化有两个重要的理念:“以史为鉴”

和“以天为则”。在人们探索引力本质的道路上,“天”(包括天文学和宇宙学)给予了莫大的指引。正因为引力相互作用耦合系数小,我们需要巨大的质量(或能量)来增大引力的信号,从而使得高精度探测变得可能。太阳系的近平坦时空提供了探测广义相对论对牛顿引力的领头阶偏离效应,并取得了早期的重要成果,使广义相对论为物理学界普遍接受。但是为了探索广义相对论预言的真正意义上的高度弯曲、非线性的时空动力学,人们需要诉诸于天体物理中的致密星体。中子星和黑洞提供了天然的理想实验室。特别是在脉冲星计时、黑洞照片、引力波等新型探测手段的最新发展下,强场引力检验变得可能且量化。此外,宇宙学的最新观测提供了全新的大尺度、长时标的引力检验。所有这些观测都大大地拓展了引力检验的特征性参数

空间(如图3所示)。

“以天为则”,利用高精度的天体物理与宇宙学观测,为人们提供了引力相互作用多方面的信息。但是,迄今为止引力实验的结果都与爱因斯坦广义相对论的预言相一致。一百余年来,广义相对论取得了极大的成功。与此同时,正如引言中所述,基础物理学中人们仍旧面临诸多难题,似乎都与引力与时空有关。“以史为鉴”,纵观近代物理学的发展,我们可以看到,持续不断地检验物理学的基本原理是基础物理学进步的最终源泉,而对时空的革新性认识,多次提供了物理学发展史中的范式转变。在未来的探索与释疑中,我们仍将借助于“天”,以天为则,充分利用天体物理与宇宙学中的天然引力实验室,进一步发展引力检验的新方法与新技术,从而挑战人们对时空性质认识的最终极限。

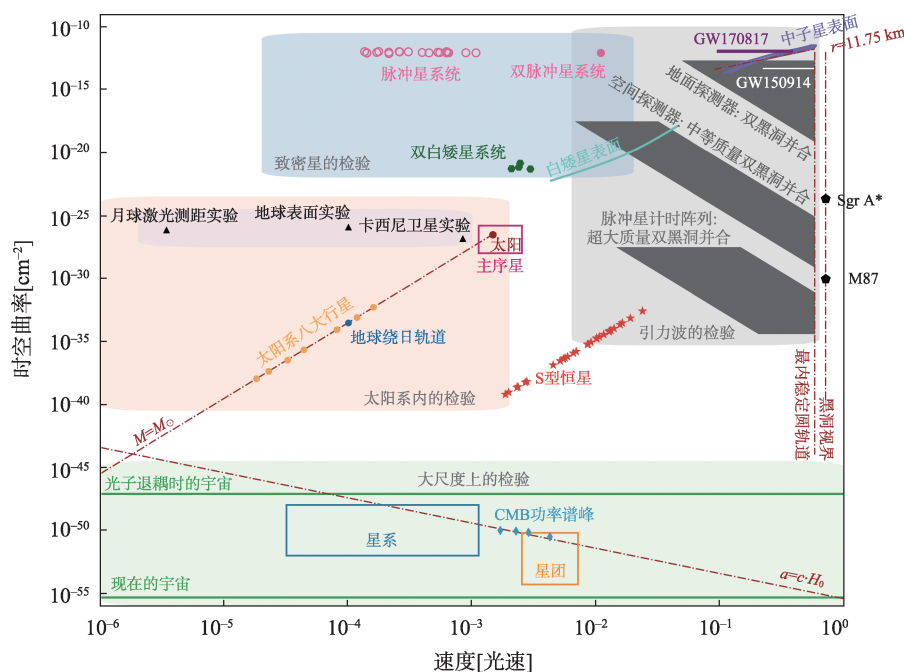


图3 各种引力检验的参数空间

## 参考文献

- [1] A. Einstein. The foundation of the general theory of relativity[J]. Annalen Phys. 49 (1916) no.7, 769-822.
- [2] F. W. Dyson, A. S. Eddington, C. Davidson. A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919[J]. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 220 (1920), 291-333.
- [3] E. Fomalont, S. Kopeikin, G. Lanyi et al. Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA[J]. Astrophys. J. 699 (2009), 1395-1402.
- [4] R. V. Pound, G. A. Rebka. Apparent Weight of Photons[J]. Phys. Rev. Lett. 4 (1960), 337-341.
- [5] I. I. Shapiro. Fourth Test of General Relativity[J]. Phys. Rev. Lett. 13 (1964), 789-791.

- [6] I. I. Shapiro, G. H. Pettengill, M. E. Ash, et al. Fourth Test of General Relativity: Preliminary Results[J]. *Phys. Rev. Lett.* 20 (1968), 1265-1269.
- [7] B. Bertotti, L. Iess, P. Tortora. A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft[J]. *Nature* 425 (2003), 374-376.
- [8] K. Nordtvedt. Testing relativity with laser ranging to the moon[J]. *Phys. Rev.* 170 (1968), 1186-1187.
- [9] C. M. Will. The Confrontation between General Relativity and Experiment[J]. *Living Rev. Rel.* 17 (2014), 4.
- [10] L. Shao, K. Yagi. Neutron stars as extreme laboratories for gravity tests[J]. *Sci. Bull.* 67 (2022), 1946-1949.
- [11] R. A. Hulse, J. H. Taylor. Discovery of a pulsar in a binary system [J]. *Astrophys. J. Lett.* 195 (1975), L51-L53.
- [12] T. Damour, N. Deruelle. General relativistic celestial mechanics of binary systems I the post-Newtonian motion[J]. *Ann. Inst. H. Poincaré Phys. Théor.* 43(1) (1985), 107-132.
- [13] T. Damour, N. Deruelle. General relativistic celestial mechanics of binary systems II the post-newtonian timing formula[J]. *Ann. Inst. H. Poincaré Phys. Théor.* 44(3) (1986), 263-292.
- [14] J. M. Weisberg, Y. Huang. Relativistic Measurements from Timing the Binary Pulsar PSR B1913+16[J]. *Astrophys. J.* 829 (2016) no.1, 55.
- [15] J. H. Taylor, L. A. Fowler, P. M. McCulloch. Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR 1913+16[J]. *Nature* 277 (1979), 437-440.
- [16] Z. Hu, X. Miao, L. Shao. Tests of Classical Gravity with Radio Pulsars. In: Bambi, C., Cárdenas-Avendaño, A. (eds) *Recent Progress on Gravity Tests*[M]. Springer Series in Astrophysics and Cosmology. Springer, Singapore. (2024).
- [17] D. F. Torres. Accretion disc onto a static nonbaryonic compact object[J]. *Nucl. Phys. B* 626 (2002), 377.
- [18] C. Bambi, A. Cardenas-Avendano, T. Dauser, J. A. Garcia, and S. Nampalliwar, Testing the Kerr black hole hypothesis using X-ray reflection spectroscopy, *Astrophys. J.* 842 (2017), 76.
- [19] Event Horizon Telescope. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole[J]. *Astrophys. J. Lett.* 875 (2019), L1.
- [20] Event Horizon Telescope. First Sagittarius A\* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way[J]. *Astrophys. J. Lett.* 930 (2022), L12.
- [21] M. D. Johnson, A. Lupsasca, A. Strominger, et al. Universal interferometric signatures of a black hole's photon ring[J]. *Sci. Adv.* 6 (2020) no.12, eaaz1310.
- [22] LIGO Scientific, Virgo. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger[J]. *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016), 061102.
- [23] NANOGrav. The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background[J]. *Astrophys. J. Lett.* 951 (2023), L8.
- [24] EPTA, InPTA. The second data release from the European Pulsar Timing Array - III. Search for gravitational wave signals[J]. *Astron. Astrophys.* 678 (2023), A50.
- [25] D. J. Reardon, A. Zic, R. M. Shannon, G. B. Hobbs et al. Search for an Isotropic Gravitational-wave Background with the Parkes Pulsar Timing Array[J]. *Astrophys. J. Lett.* 951 (2023) no.1, L6.
- [26] H. Xu, S. Chen, Y. Guo et al. Searching for the Nano-Hertz Stochastic Gravitational Wave Background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I[J]. *Res. Astron. Astrophys.* 23 (2023) no.7, 075024.
- [27] LIGO Scientific, Virgo, Fermi-GBM, INTEGRAL. Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A[J]. *Astrophys. J. Lett.* 848 (2017), L13.
- [28] D. M. Eardley, D. L. Lee, A. P. Lightman. Gravitational-wave observations as a tool for testing relativistic gravity[J]. *Phys. Rev. D* 8 (1973), 3308.
- [29] LIGO Scientific, VIRGO, KAGRA. Tests of General Relativity with GWTC-3[J]. *arXiv:2112.06861* (2021).
- [30] N. Franchini, S. H. Völkel. Testing General Relativity with Black Hole Quasi-Normal Modes[J]. *arXiv:2305.01696* (2023).
- [31] A. Zimmerman, C.-J. Haster, K. Chatziioannou. On combining information from multiple gravitational wave sources[J]. *Phys. Rev. D* 99 (2019), 124044.
- [32] M. Isi, K. Chatziioannou, W. M. Farr. Hierarchical test of general relativity with gravitational waves[J]. *Phys. Rev. Lett.* 123 (2019), 121101.
- [33] M. Ishak. Testing General Relativity in Cosmology[J]. *Living Rev. Rel.* 22 (2019) no.1, 1.
- [34] E. Hubble. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae[J]. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 15 (1929), 168-173.
- [35] Supernova Search Team. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant[J]. *Astron. J.* 116 (1998), 1009-1038.
- [36] Supernova Cosmology Project. Measurements of Omega and Lambda from 42 High Redshift Supernovae[J]. *Astrophys. J.* 517 (1999), 565-586.
- [37] M. Bartelmann, P. Schneider. Weak gravitational lensing[J]. *Phys. Rept.* 340 (2001), 291-472.
- [38] SDSS Collaboration. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary[J]. *Astron. J.* 120 (2000), 1579-1587.
- [39] Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters[J]. *Astron. Astrophys.* 641 (2020), A6.
- [40] P. J. E. Peebles. Probing general relativity on the scales of cosmology[J]. *arXiv:astro-ph/0410284* (2004).
- [41] M. Li, X. D. Li, S. Wang et al. Dark Energy[J]. *Commun. Theor. Phys.* 56 (2011), 525-604.
- [42] P. Ji, L. Shao. Scalar dark energy models and scalar-tensor gravity: theoretical explanations for the accelerated expansion of the present Universe, *Commun. Theor. Phys.* 76 (2024) no.10, 107401.
- [43] M. Maggiore. Gravitational wave experiments and early universe cosmology[J]. *Phys. Rept.* 331 (2000), 283-367.
- [44] P. G. Ferreira. Cosmological Tests of Gravity[J]. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 57 (2019), 335-374.