

中国物理学会引力与相对论天体物理分会 青年学者优秀论文奖 获奖论文介绍

为进一步推动中国引力和相对论天体物理的研究，鼓励更多的年轻人从事引力理论、天体物理和宇宙学等的研究，中国物理学会引力与相对论天体物理分会从 2012 年开始设立青年学者优秀论文奖，并在每年的学术年会上颁发当年的优秀论文奖。参选学者必须是分会会员，且当年年龄不超过 35 周岁。2015 年的获奖者为北京师范大学的于浩然，其获奖论文为：*Method for Direct Measurement of Cosmic Acceleration by 21-cm Absorption Systems* (*Physical Review Letters* 113: 041303)；中国科学院理论物理研究所的杨润秋，其获奖论文为：*Paramagnetism-ferromagnetism phase transition in a dyonic black hole* (*Physical Review D* 90: R081901)；湖北第二师范学院的范锡龙，其获奖论文为：*A Bayesian approach to multi-messenger astronomy: identification of gravitational-wave host galaxies* (*The Astrophysical Journal* 795: 43)。下面是这三篇论文相关内容的介绍。

获奖论文 利用中性氢 21 厘米吸收线系统直接测量宇宙膨胀加速度

于浩然

(北京大学科维理天文与天体物理研究所 100871)

物理测量在方法和精度上的进步使得我们对物质世界和宇宙的本质有了越来越深刻的认识，特别是对宇宙学参数的精确测量把我们带进了精确宇宙学时代。自从 1998 年超新星观测间接发现宇宙加速膨胀以来，人们便提出了各种各样的“暗能量”模型来解释宇宙的加速膨胀。近 20 年来，人类斥巨资建造了各种天文仪器设备来探测暗能量的性质。在实验向着“更大”和“更贵”的方向走入瓶颈的时候，我们应该设计相对廉价的新方法解决问题——例如射电天文学的深长基线干涉 (VLBI) 技术在方法上大幅提高了天文成像的分辨率。对于暗能量和宇宙加速膨胀的问

题，本论文提出利用当前已有的技术直接测量的方法，如即将在加拿大建成的 CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment) 射电望远镜，在未来 10 年有望直接检验宇宙膨胀的加速度。

在宇观尺度物质只有吸引力 (万有引力) 而没有排斥力，这个不对称性使得宇宙不能维持稳恒态。爱因斯坦在场方程中引入了宇宙学常数 Λ ，作为宇宙大尺度对抗引力的排斥作用，以得到“静态”宇宙。天文学家哈勃对星系的观测发现越远的星系具有相对我们更快的退行速度，从而揭示了宇宙的膨胀状态。膨胀的宇宙表明宇宙不是静态的，因此我们不一定需要

纪念广义相对论创立 100 周年

“宇宙学常数”。在没有“宇宙学常数”时，膨胀一定由于引力的作用而减速——取决于当今宇宙膨胀的速率和宇宙物质的总量，在未来可能导致宇宙收缩，或一直膨胀下去。20 世纪末，天文学家对遥远星系中超新星的观测再次改变了人类对宇宙膨胀的认识。超新星的亮度和其退行速度的计算证明 Λ CDM 宇宙学模型，是当今最“正统”的宇宙学模型。目前各种天文观测结果均与此模型的预言相符。

然而，目前人类对“暗能量”没有直接的探测，甚至对宇宙加速膨胀的“事实”也没有直接的测量。超新星的亮度低于预期也可以用其他机理来解释。目前对这一现象的间接研究需要联合爱因斯坦场方程和哥白尼原理。间接研究包括宇宙结构引力演化的动力学计算或利用光度和角直径距离进行运动学计算。上述研究手段之所以被称为“间接”是因为它们涉及的是不同距离（红移）处的不同天体在同一观测时刻的计算，由此所得的加速度需满足宇宙学模型、运动方程的均匀和各向同性假设。我们

在此介绍一种“直接”测量宇宙膨胀加速度的手段的可行性。这种与模型无关的物理加速度定义为同一天体两次观测的时间积分内的速度变化——即 Sandage-Loeb 效应。根据标准的 Λ CDM 宇宙学模型，宇宙从红移 0.7 左右进入加速膨胀阶段，也就是说，由于光速有限，我们距红移 0.7 处的空间均在加速膨胀，我们观测到的更远的空间（更早期的宇宙）还处于减速膨胀阶段。由于加速度可以叠加，红移 2.5 或更近的天体和我们观测者的相对加速度为正，即加速远离我们。

在射电领域，中性氢的 21cm 谱线被认为是宇宙加速探测的最佳候选体。其物理机制为：遥远天体发出的射电辐射谱被位于观测者与射电源之间的中性氢吸收（超精细结构的吸收谱线），形成射电波段的吸收线，其静止波长为 21.106 cm，频率为

1420.4MHz。如果长期对同一中性氢云的 21cm 吸收线进行观测，便有机会探测到由于宇宙加速膨胀而引起的该谱线随时间红移的效应，这便是宇宙加速膨胀的直接证据。然而这种效应十分微小，每年产生的速度变化仅为 1 mm/s。10 年累计的最大效应也仅为 1 cm/s。这对实验的设计提出了很大的挑战。非宇宙均匀膨胀带来的本动加速度首先需要解决。银河系内脉冲星的观测和银河系外射电源的观测可以分别解决银河系内和星系之间的本动加速度。中性氢云的本动加速度可以由大量样本的平均而消除。剩下的最关键问题在于如何精确地测出谱线的长期移动。中性氢云的温度较低，热运动为 2 km/s 的量级，利用 CHIME 望远镜对大半天区进行彻夜扫描，可以有效测出谱线的轮廓，在长期（10 年）的分析中可以得到谱线轮廓的移动。

实验的可行性和精度取决于诸多因素。例如射电源和中性氢云的数量、大小（亮度）和空间（红移）分布，

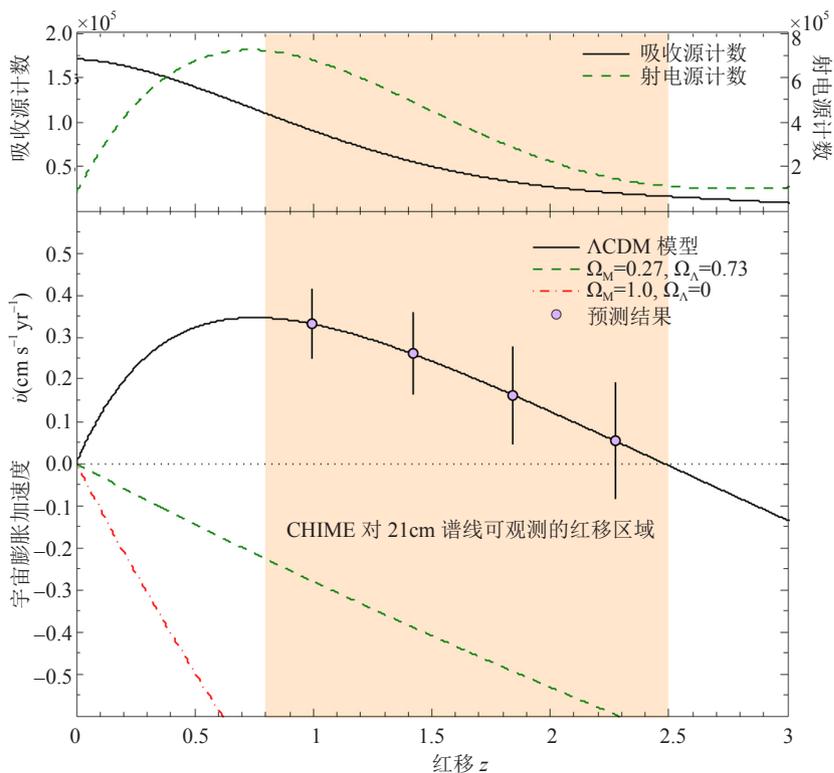


图 1 图中黑色实线表示北半球天区 21cm 吸收系统在每单位红移内的计数；绿色虚线表示 NVSS 巡天中的射电源计数。下半图所展示的是，使用类 CHIME 望远镜 10 年巡天计划观测的 21cm 吸收系统预测表征加速度及其误差的情况；黑色实线表示 Λ CDM 模型；绿色虚线表示 Ω_{CDM} 模型；橙色线表示 SCDM 模型。

以及 CHIME 的天空覆盖面积、精度和观测时间。我们对这些因素进行了定量的分析。简要结果见图 1。

以上方法提供了一种全新的直接探测宇宙膨胀加速度的方法，并通过计算给出该方法用于类似 CHIME 巡天的现实可能性。由于实际观测存在很多不确定的因素，包括 21 cm 中性氢和射电源的分布和性质，本文给出的观测精度只是定性的估计：若宇宙加速膨胀

的理论是正确的，那么通过 10 年的观测我们可以给出 5σ 的宇宙加速膨胀的置信度。尽管这样的结果还没有精确到可以精确的定量测量宇宙膨胀的历史，但一种低精度却直接的测量更能让人信服宇宙的加速膨胀状态。相对于间接地推测出暗能量的精确状态方程，通过直接的观测手段让人类信服宇宙加速膨胀的存在具有更重要的意义。



全息对偶

——理解强关联磁性体系的新途径

蔡荣根 杨润秋

(中国科学院理论物理研究所 100190)

磁性材料所表现出的磁力以及宏观的磁现象，在人类社会当中有着悠久的历史。然而磁性材料中磁性的起源却是在最近一百年、伴随着量子力学的诞生以及关于材料的量子理论的建立和完善而逐步被人们所了解。在 1928 年第一个描述自发磁化的量子模型由德国物理学家海森伯首先提出后，各种基于交换相互作用描述自发磁有序模型相继被提出。这些模型的共同特点是假设每个电子只与少量的电子发生关联，或者虽然每个电子都与大量电子发生关联，但是关联强度很弱。基于这些理论计算得到的结果和实验测量相符得非常的好。然而随着人们对材料加工和控制技术的不断进步、新型奇异磁性材料的涌现，传统的磁性理论日益面临挑战。尤其是在强关联巡游电子体系中，由于大量电子强烈的关联效应，使得传统基于微扰的计算手段基本失效。寻找一个合适的非微扰理论框架来理解强关联电子体系是当今凝聚态物理的重要问题之一。

为了理解强关联电子体系中自发磁有序相关的物理问题，根据由特霍夫特(G. 't Hooft)、威滕(E. Witten)和著名超弦物理学家马尔德斯纳(J. Maldacena)等人提出的“全息对偶原理”，我们在论文中首次提出了一个描述强关联电子体系中自发磁有序的全息对偶模型。这一全息对偶模型的关键点在于采用一个反对称

的张量场的空间分量来描述磁矩，而不是直接采用一个矢量来描述。这样做的原因在于，电场和磁场作为电磁场张量的分量、组成一个不可分割的整体，其对应的极化（即电偶极矩和磁矩）也应该组成一个不可分割的整体。因此在一个协变的理论中，我们需要采用一个反对称的张量场来整体地描述电磁场的极化。基于这一点考虑，作者在一个带磁荷和电荷的反德西特黑洞背景中引入一个和电磁场场强耦合的反对称张量场，从而实现强耦合体系中自发磁有序的全息对偶描述。

首先在没有外磁场的时候，这一个模型在低温的时候能够实现“时间反演”对称性的自发破缺与自发磁化，从而实现了“顺磁——铁磁”相变的全息描述。产生这一相变的原因是由于在黑洞视界附近引力的相互吸引和反对称张量场自身的排斥两种作用力之间竞争的结果。这和材料中热涨落导致的无序化和交换相互作用引起的有序化之间的竞争相对应。这一点可以由图 1 来定性的说明。根据黑洞热力学的相关理论，较高霍金温度的黑洞具有较大的表面引力。在高于相变临界温度的时候，黑洞的引力起主导作用。因此在黑洞外由于量子涨落而偶然凝聚起来的反对称张量场的空间分量会感受到黑洞较大的引力，从而迅速的落入黑洞消失掉。这对应于在材料中，在高于相变温度