

天籁计划： 暗能量的射电探测及平方千米阵(SKA)*

陈学雷[†] 施许立

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

2012-08-27收到

[†] 通讯联系人.Email: xuelei@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130101

摘要 暗能量约占宇宙总密度的3/4,但其与普通物质的相互作用非常微弱,因此对它的探测主要是通过对宇宙膨胀历史和结构形成的精密观测间接进行的.为了提高研究的精度和可靠性,需要综合多种观测手段.目前的大部分暗能量观测实验采用光学方法,而射电观测提供了一种不同的、有独特优势的方法,但目前还处在起步阶段.我国在射电天文及相关技术方面有一定基础,且国内已有电磁环境良好的站址,有很好的条件开展这方面的研究,并有可能在这一领域中取得领先.文章介绍了作者已开始进行的天籁计划实验以及这一实验中积累的经验 and 研发的技术,这有助于中国参与国际上空前巨大的平方千米阵(SKA)射电望远镜项目,并在其中发挥作用.

关键词 暗能量,射电天文学,21cm,天籁,平方千米阵(SKA)

The Tianlai project: radio detection of dark energy and the Square Kilometre Array

CHEN Xue-Lei[†] SHI Hu-Li

(National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract Dark energy makes up about three quarters of the total cosmic density, but its interaction with ordinary matter is very weak, hence its detection is indirect, i. e. through precise observation of the history of the cosmic expansion and the formation of its structure. To improve the accuracy and reliability of measurements, diverse ways of observation are necessary. At present, most dark energy observations are in the optical wavelength regime, while radio detection provides an alternative method with its own niche, although at present it has only just started. China has some basis in radio astronomy and related technology, and there are sites with a good electromagnetic observation environment, so it is possible for her to take the lead in this area. This article describes the Tianlai experiment, which should help China gain experience and develop the necessary technology to participate and play a role in the colossal international Square Kilometre Array radio telescope project.

Keywords dark energy, radio astronomy, 21 cm, Tianlai, Square Kilometre Array

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA121701)资助项目;中国科学院国家天文台预研项目; Templeton基金会与中国科学院国家天文台新视野基金资助项目

1 引言

2011年的诺贝尔物理学奖授予了三位科学家, 珀尔马特(S. Perlmutter), 施密特(B. Schmidt)和瑞斯(A. Riess). 1998年, 他们所在的两个研究小组, 通过观测 Ia 型超新星, 发现了宇宙膨胀加速^[1, 2](关于这一发现的过程, 可参阅文献[3]). 我们所有已知的物质, 由于万有引力的作用, 都会使宇宙的膨胀减速, 然而宇宙的膨胀并未减速而是在加速, 因此这意味着宇宙中还存在着人类完全未曾认识的物质形式, 并且据估计其密度约占宇宙总密度的3/4. 这种物质形式被称为“暗能量”, 但它究竟是什么, 我们仍然并不清楚. 这被公认为是当前自然科学中最大的问题之一, 其解决有可能会引起新的科学革命!

为了使宇宙膨胀加速, 暗能量必须具有一些奇特的性质. 例如, 它的有效“压强”是负的, 这是因为在广义相对论中压强和能量密度一样, 都可以影响时空的曲率, 因此负压强的影响如果超过能量密度的影响, 就可以导致宇宙膨胀加速. 此外, 也有一些人提出可能是引力理论与我们通常假定的标准理论(即爱因斯坦广义相对论)不同, 导致宇宙的加速膨胀, 等等. 对这些不同的可能性, 人们都提出了很多不同的模型, 但究竟哪一种是正确的, 现在还难以回答.

解决这一问题的关键在于精确地测定暗能量的性质, 以检验和区分暗能量的不同模型. 暗能量与一般物质的相互作用极其微弱, 因此很难在实验室内直接进行探测. 不仅如此, 与普通物质甚至暗物质不同, 暗能量的成团性也很弱, 尽管在宇宙尺度

上暗能量是最主要的成分, 但在星系中其密度也远低于一般物质的密度, 所以目前主要是考虑根据其宇宙尺度上的引力效应探测暗能量. 具体来说, 首先需要测量不同时期宇宙膨胀的速度 $H(z)$, 即哈勃参数.

我们前面提到过, 暗能量的压强 p 对宇宙膨胀加速起重要的作用. 因此, 通过 $H(z)$ 的测量可得到暗能量的状态方程 $w=p/\rho$, 其中 ρ 为暗能量密度, w 为状态方程参数. 例如, 最简单的暗能量模型是爱因斯坦提出的宇宙学常数模型, 这种模型在广义相对论方程中加入了一个常数 Λ , 等效于一种真空能. 现在的标准宇宙模型 Λ CDM 即以此为暗能量, 这也是和当前的各种观测比较符合的模型. 宇宙学常数模型的状态方程是 $w=-1$. 另一方面, 其他的暗能量模型中 w 一般不等于 -1 , 且往往随红移而变化. 因此精确测量状态方程可以帮助我们区分暗能量的性质^[4]. 其次, 一些修改引力的暗能量模型除了影响宇宙膨胀率外, 对于宇宙中物质密度不均匀性的增长也有一些影响, 导致增长率偏离广义相对论的预言, 因此测量不同红移的大尺度结构增长因子也有助于确定暗能量模型^[5].

现有的暗能量观测数据主要来自 Ia 型超新星观测, 现在的观测样本已包含几百颗 Ia 型超新星的数据. 但是超新星观测也有一定的局限性, 因为每颗 Ia 型超新星的绝对亮度并非完全相等, 而且亮度测量也容易受到沿视线方向的尘埃消光作用等的影响, 因此其观测精度是有一些限制的. 即使未来 Ia 型超新星的数据继续增加, 也很难完全消除这种系统误差的影响. 因此, 在 2006 年美国的一些暗能量

研究人员经过讨论提出的研究报告中^[2], 主张用几种不同的观测手段对暗能量进行研究, 包括重子声学振荡 (baryon acoustic oscillation, BAO)、弱引力透镜、星系团计数等.

国际上已提出了多种针对暗能量观测的未来实验设想, 其中比较重大的项目有欧洲的 Euclid 空间望远镜^[6], 美国的大视场望远镜 LSST^[7]和 WFIRST 卫星^[8]等, 此外还有一些较小规模的实验, 如美国的 BIGBOSS^[9]

红移: 由于宇宙的膨胀, 我们观测的遥远星系的光波其波长都变长了, 这被称为红移现象, 被观测到的谱线其波长是原来的 $(1+z)$ 倍, z 称为该天体的红移, z 越大, 说明该天体离我们越远, 而它发出这些光波的时间也越早. z 可以从天体光谱观测中直接测出, 因此在天文学中通常用 z 表示宇宙的时间, $z=0$ 对应今天的宇宙.

Ia 型超新星: 超新星是一些突然发生剧烈爆炸的恒星, 其光度可达一百亿个太阳光度. 根据其光谱的谱线特征, 它可以分为 Ia, Ib, Ic, II 型等不同类型. 一般认为 Ia 型超新星是一些质量接近钱德拉塞卡极限的白矮星吸积物质后发生核爆炸. 它们具有近似相等的绝对亮度, 可以作为“标准烛光”, 而其观测亮度与其光度距离成反比, 据此就可以测定其距离. 如果画出不同超新星的红移与其距离的对应关系, 则这样画出的曲线被称为哈勃图, 不同的暗能量模型将产生不同的哈勃图, 通过哈勃图可以确定 $H(z)$, 进而确定暗能量的状态方程.

等。目前大部分的实验设想是基于光学观测，在技术上有相当的难度，耗资较多。一种新的实验设想是利用射电天文学方法，通过21cm巡天观测暗能量。这一方法提出时间较短，方案还不成熟，但已日益引起国内外天文学界的重视。

对于我国来说，由于科研和技术总体水平上的差距，要在暗能量研究这样的前沿领域超越国外是相当不易的。对于许多实验所需的技术，我们目前还没有掌握，而即便掌握了相关技术，如果国外已在这方面有较深入的研究，要追上也是比较困难的。暗能量射电探测为我国的暗能量研究提供了一个难得的突破口！我国在射电天文和微波技术、计算机技术等方面都有一定的研究基础，有能力在这一方向上开展自主实验，且我国也有适合开展此项实验的站址。另一方面，国际上暗能量射电探测的研究刚刚起步。因此，在这一领域，我们是有可能参与竞争的。在科技部863项目的支持下，国家天文台目前已开始进行暗能量射电探测实验的预研，并命名为天籁计划^[10, 11]。本文介绍暗能量射电探测的基本原理以及天籁计划的初步设想。

当前国际射电天文界的最重要的大型望远镜项目是平方千米阵(Square Kilometer Array, SKA)^[12]，这一项目的规模远远超过现有的任何射电望远镜，很可能会带来整个射电天文学领域的巨大跃进。应该指出的是，针对暗能量射电探测的天籁计划项目尽管比较简单，但它与SKA也存在很多相似之处，因此对于我国未来参与SKA，这一研究将是非常好的技术准备。本文也将简要地介绍SKA，并讨论我国参与SKA研究的一些问题。

2 暗能量射电探测原理

射电观测是光学观测之外人类探索宇宙的另一有力手段。结合重子声学振荡方法，射电观测也可以用于暗能量的探测¹⁾。

所谓重子声学振荡(BAO)，指的是宇宙大爆炸时期电离态的重子物质与背景辐射光子形成的耦合流体中的声波振荡，这种流体中的声速接近光速的 $1/\sqrt{3}$ 。但是，当大爆炸结束、宇宙中的等离子体复合成中性的氢和氦原子时(这时 $z \approx 1100$)，光子与重

子就退耦了，光子改为自由流动，不再参与声波振荡，而重子中的声速变得远远小于光速，粗略地说，重子声学振荡这时就停止了，而振荡中有些波长的振荡模式这时正达到极大值，因此在这些波长上就有更强的不均匀性。如果我们精确地测出不同红移处物质分布大尺度结构的功率谱，在这些BAO特征尺度上就会有一些峰和谷，类似于在宇宙微波背景辐射(CMB)温度各向异性角功率谱中看到的振荡峰(见图1)。它可以用作宇宙距离测量的标准尺，根据不同的红移，还可以得到BAO数据的哈勃图，用于限制暗能量。与超新星观测相比，重子声学振荡的物理依据清晰，可以较严格地计算而无需依赖经验关系，因此有望实现较小的系统误差。与另一种重要的暗能量观测手段——弱引力透镜观测相比，BAO观测对观测条件的要求较低，并不要求实现很高的角分辨率，而后者往往需要在空间或条件极好的地面站址(例如南极的Dome A)进行，因此技术复杂，耗资巨大。由于这些优点，BAO为暗能量观测提供了一种极其有力的手段。

现在，通过光学波段的星系红移巡天，国外的SDSS及其后续实验BOSS，以及2dF, 6dF, WiggleZ等实验^[16-21]，已在一些红移上观测到了BAO信

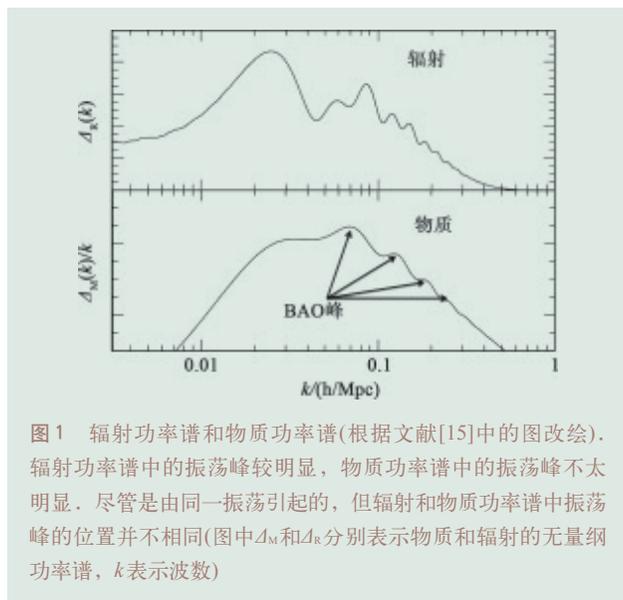


图1 辐射功率谱和物质功率谱(根据文献[15]中的图改绘)。辐射功率谱中的振荡峰较明显，物质功率谱中的振荡峰不太明显。尽管是由同一振荡引起的，但辐射和物质功率谱中振荡峰的位置并不相同(图中 Δ_m 和 Δ_r 分别表示物质和辐射的无量纲功率谱， k 表示波数)

1) 除了重子声学振荡外，如有其他方法可以确定宇宙距离尺度，射电观测也都可以用于暗能量研究。例如，文献[13]就曾以一些射电星系尺寸作为标准尺进行过宇宙学分析。此外，对一些红移较低的星系，用脉泽观测可以测量其距离^[14]。不过，对大尺度结构特别是重子声学振荡的观测仍是现在射电暗能量探测最主要的方法

号,并用于限制宇宙学参数.从原则上说,我国已建成的郭守敬望远镜(LAMOST)也可进行类似观测^[22].美国计划中的BIGBOSS实验^[9],将进一步提高BAO观测的红移.但是,利用光学实验观测红移0.8—3的星系来进行BAO测量还是有一定的难度,这是因为在这个红移段上星系光谱的大部分被移到了红外波段,大气吸收较为严重.

用射电方法观测红移后的中性氢21cm辐射,是实现这一红移段BAO观测的较好方法.宇宙中不同时期产生的21cm射电信号经过红移后具有不同的波长,因此通过观测不同波长的射电信号,可以观测不同时期的宇宙.在再电离时期以后(红移6以下),星系际介质中的氢已被电离,中性氢主要在星系中存在.不过,由于射电观测的角分辨率比较低,同时星系的中性氢信号又很微弱,要如光学巡天那样逐个观测每个星系难度较大,因此人们一度认为,只有等SKA建成之后才能进行这样的巡天.不过,近来人们认识到,对于大尺度结构观测,可以不必逐个观测单个星系,而可直接观测中性氢在较大尺度上的三维分布(每个分辨率体积元内可以有成百上千的星系),这就是所谓强度映射(intensity mapping)^[23, 24]方法,这一方法特别适用于角度分辨率相对较低的射电频段,而对于频率较低的21cm辐射来说,干扰谱线少,最便于用此方法进行观测^[25].通过射电观测这些红移过的21cm波长信号,就可以描绘出物质的三维大尺度结构分

布.利用世界最大口径的可动射电望远镜——美国的GBT(110m口径)进行的红移21cm观测,与光学观测互相关,证实了中性氢的分布与星系分布是一致的,从而初步验证了这一方法的原理正确性^[26].我们目前进行的观测,已能得到这一红移中性氢的功率谱,并可据此推断中性氢的含量^[27].

3 天籁项目简介

重子声波振荡观测需要观测大天区面积,而现有的射电望远镜视场较小,且一般都负担了许多不同的观测任务,难以在合理的时间内进行大天区面积、高灵敏度的巡天观测,实现暗能量的高精度观测.为此,我们拟研制一种针对上述暗能量观测科学目标进行优化设计的专用射电望远镜,这对我国未来的暗能量研究具有重要的意义.当然,此望远镜的观测数据除了用于暗能量探测外,也可以用于其他科学研究,例如,宇宙起源、星系间介质、类星体、星系团、银河系磁场、脉冲星,甚至寻找外星生命等.

天籁计划的射电望远镜拟采用天线阵列的形式.阵列设计是由科学目标决定的.对于暗能量射电观测来说,观测0—2.5的红移比较有利,因为暗能量主要是在较低的红移上才占主导地位,因此这一红移段的观测对暗能量更为敏感.特别是红移在1—2.5之间,地面光学观测有一定困难,是较能发挥射电观测效果的波段.红移0—3对应的21cm辐射频率为400—1400MHz.

阵列尺寸的大小决定了合成光束的角分辨率.在我们拟进行的强度映射观测中,没有必要分辨单个星系,因此角分辨率不必太高.对于红移为1的大尺度结构观测来说,为了看到前几个重子声波振荡峰,角分辨率达到15角分就足够了.另一方面,阵列应基本上是填满的,以提高对巡天天区单个像素的信噪比,几何尺寸更大但稀疏排列的阵列不适合我们的科学目标.对于

21cm辐射:在宇宙的普通物质中,氢的丰度最高,约占总质量的3/4.中性(未电离)氢原子基态上的超精细结构跃迁可以导致氢原子发射或吸收波长为21cm(频率1.42GHz)的光子,这一辐射被称为21cm辐射,是射电天文学中最重要的谱线辐射之一.通过对21cm辐射的观测,可以绘出中性氢的分布.

射电望远镜的组成:现代射电望远镜一般由一个或多个天线组成,天线上的馈源将信号馈入接收机电路,经过放大、变频、滤波等处理后的模拟信号,由模数转换器转换为数字信号,再经过实时数字信号处理后保存下来,供天文学研究使用.

干涉阵与综合孔径成像:在射电波段,由于波长较长,单天线的角分辨率比较差,因此为了提高角分辨率,经常采用多个天线组阵,天籁项目也计划采用干涉阵列.对阵列中不同天线接收的信号进行互相关,这种互相关的结果经短时间积分后保存下来,这叫做天线对的干涉显示度(visibility).早在上世纪40—50年代,英国天文学家Martin Ryle等人就发明了综合孔径成像(aperture synthesis imaging)方法,通过对显示度数据做逆傅里叶变换,就可以获得天空射电源的图像.

红移为1(波长42cm)的大尺度结构观测,大约100m长的阵列即可满足此要求.当然,对于更高的红移,相应的几何尺寸要大一些.考虑到在两个方向上取得大致相等的角分辨率,我们建议的整个阵列大小大致为100m×100m.在前期实验时,也可以适当缩小规模,这样仍有可能观测到功率谱中尺度最大的BAO第一振荡峰.

我们设想的阵列为固定式,依靠地球的自转巡天,从而避免了移动部件.这样可以降低成本,性能也比较稳定.目前考虑了由多个平行的抛物柱形反射面天线组成的阵列和碟形反射面天线组成的阵列.碟形天线技术较为成熟,且两个极化的响应比较对称.柱形天线的优点是,它在一个方向上聚焦波束,便于接收信号,降低干扰,而在另一个方向上不聚焦,提供了一个比较均匀的视场.通过近距排列多个接收器形成阵列,可以获得更大的视场,从而可以提高巡天的速度.限于篇幅,下面我们仅简介一种基于柱形天线阵列的实验方案.

该阵列由若干个并排放置的柱形抛物反射面构成,柱形沿南北方向延伸,接收机馈源沿着柱面的焦线排布.图2显示了两种抛物柱面的构想.一种采用对称的设计,馈源放在位于柱面中心上方的焦线上.另一种方案采用非对称的设计,即只用半个抛物面反射,将馈源放置在一侧,这样安装和维修馈源比较方便.由于波长较长,可以采用金属网作为反射面,整个柱形固定在地面上.综合考虑观测的需求和成本,我们目前设想的全规模实验采用的柱形反

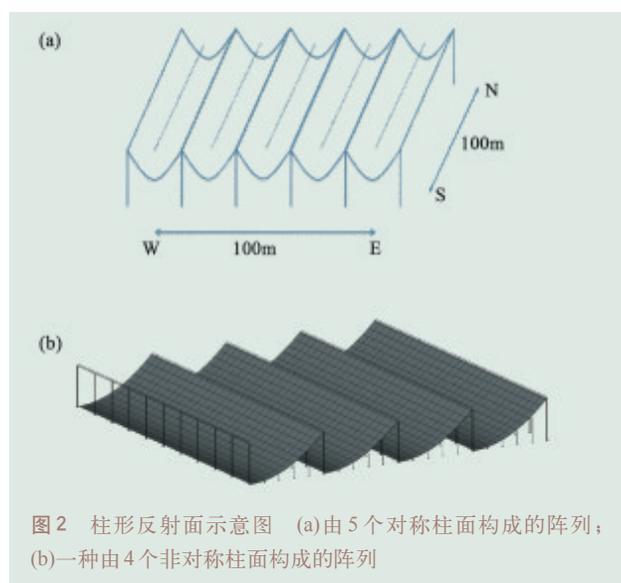


图2 柱形反射面示意图 (a)由5个对称柱面构成的阵列;(b)一种由4个非对称柱面构成的阵列

射面宽度为12—20m,由5—8个柱面组成.

在某一时刻,柱形反射面的波束是一个经过天顶沿南北方向延伸的窄条,如图3所示.随着地球的旋转,该窄条会扫过天球的可见部分.不同次观测的天图可以逐渐累加起来以提高信噪比.实际上,视场并不能真正延伸到地平线,而且靠近地平线的部分数据质量变差,此外,银盘和银河旋臂产生较强的前景辐射,这些部分的噪声大.我们预期可以获得10000平方度以上可用于宇宙学观测的数据.

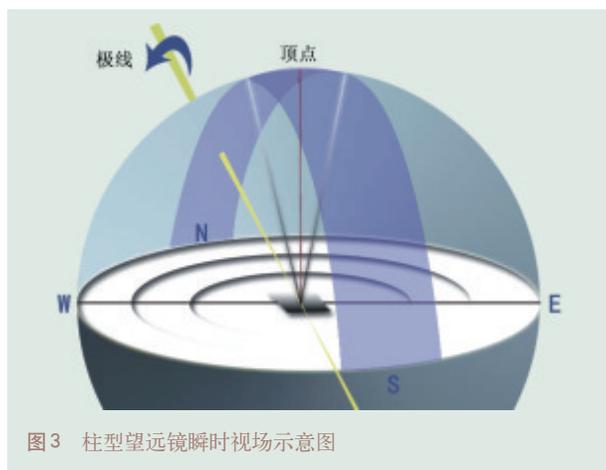


图3 柱型望远镜瞬时视场示意图

如果每半波长设一个接收单元,可以完全避免阵列合成波束存在多个主瓣的问题,这样,上述长100m、由5个柱形组成的阵列就需要约2560个接收单元.不过,通过适当安排阵列布局和数据处理,对于更长的接收单元间距,也有可能消除多主瓣问题,我们正在对此进行试验.目前,在第一期的关键技术研发中,我们拟先建造长度约40m的三个柱面,同时适当增大单元间距,因此总共包括96个双极化单元.

天空中的电波首先由反射面汇聚到馈源上.为了降低接收机损耗造成的噪声,低噪声放大系统集成在馈源上.信号经低噪声放大后与本振信号混频,经过滤波后得到中频信号,此信号传输到模数转换器(AD)所需的电压后转成数字信号.根据Nyquist定理,此AD的采样频率应等于或大于中频带宽的两倍.目前考虑到实际的技术可行性和成本,我们将首先完成 $z=1$ (对应频率约700MHz)、带宽约50MHz的观测.在第二期则将考虑大大增加阵列的带宽.

阵列信号处理拟采用FX体制,即首先对数字信号做快速傅里叶变换(FFT)转为频域信号,然后

传送到相关器进行互相关计算，得到干涉显示度(visibility)数据。不同频率间的数据其相关为零，因此只需计算相同频率的数据之间的相关。此数据经过一段时间的积分后被保存起来。一般每次积分时间为几秒，不过为了增强去除干扰能力，也可采用更短的积分时间。

由于阵列包括大量的接收单元，将产生海量的数据。为此，我们拟采用分布式的数据采集和处理系统。如果我们有 N 个数据采集/计算单元，我们可以把数据等分成 N 个频率块(每个频率块可以有多个频道)，每个计算单元负责计算一个频率块内所有频道的各个单元之间的相关。可以证明，无论阵列的规模 N 有多大，通过适当的设计，每个单元的输入或输出数据流总小于或等于单元采样率(忽略数据包报头(header)的数据量)，因此这一设计适用于任意大规模的阵列。不同单元之间数据的交换可以采用通用的交换机(包括采用级联形式以实现较大的总流量)，也可以考虑采用专用交换机。随着干涉阵列单元数 N 增大，一般阵列的互相关对的数量按 N^2 增长，如果这些互相关计算被按照分时、分频原则分配到各个单元进行计算，每个单元所需完成的计算量按 $O(N)$ 增长，由于单个单元所能完成的计算量有限，这将限制阵列的规模。但是，对一些特殊构型的阵列，例如我们设想的柱形阵，可以利用沿同一柱面的1维空域快速傅里叶变换，使所需计算的互相关对数减慢为按照 $O(N \log N)$ 增长，这样单个单元的计算量将以 $O(\log N)$ 缓慢增长。

本实验对站址的主要要求是具有良好的电磁环境，避免人工电磁辐射的干扰。在上述频段，主要的干扰源有电视、手机、雷达、卫星等。一般在人

烟比较稀少并有山体屏蔽周边辐射的地方较易找到满足电磁环境要求的站址。当然，站址最好还能满足交通便利、容易得到后勤支持，便于实验人员生活等条件，以方便建设和运行。我国幅员辽阔，特别是西部地区人口密度低，可以找到很好的站址。经过前期的踏勘，我们已发现了基本符合要求的站址，同时也还在开展进一步的选址调查，以兼顾电磁环境和方便运行的需求。

天籁计划是一个以我国为主的国际合作项目。国内目前有中国科学院国家天文台及新疆天文台、中国电子技术集团54所、中国科学院自动化研究所、北京大学、国防科技大学、内蒙古大学和内蒙古师范大学等单位参与了相关的研究工作，而海外则有加拿大多伦多大学、美国卡耐基—梅隆大学、威斯康星大学、费米实验室、约翰霍普金斯大学、加州大学、法国巴黎第十一大学、台湾中央研究院等单位与我们进行合作。我们正在进行进一步的仿真模拟和优化阵列的布局设计，以提高其性能，预期在2013年开始该阵列天线的建设。

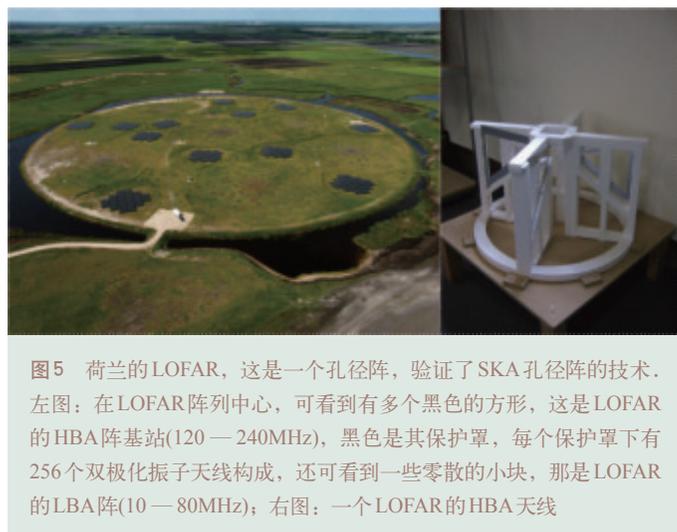
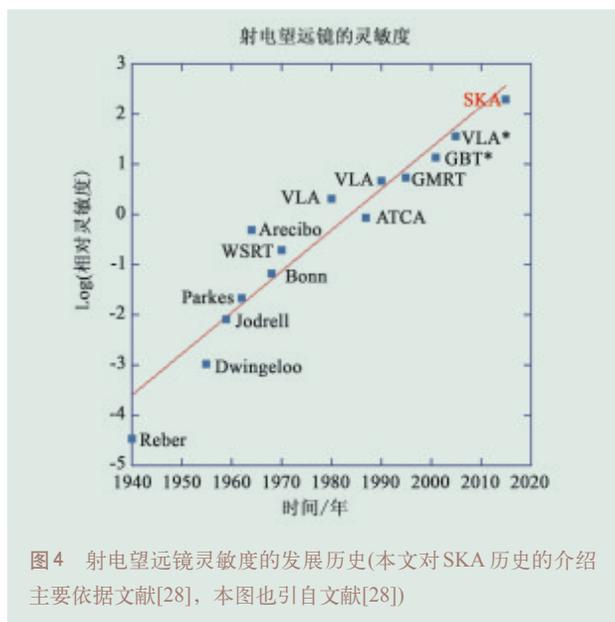
4 平方千米阵(SKA)

上面我们简单介绍了天籁计划，但是，它与国际上正在研制的望远镜阵列相比怎么样？它对我国未来射电天文学的发展有什么意义呢？在本节中，我们介绍一下当前国际上正在研发的SKA望远镜的情况。

20世纪80年代末至90年代初，一些射电天文学家开始考虑如何发展下一代射电望远镜，使射电天文观测的能力再上一个台阶。考虑到高红移中性

氢观测等科学需求以及对技术发展速度的预期，提出了建造总接收面积为 1km^2 的射电望远镜阵列的设想，这一阵列的接收面积将比VLA高两个数量级(见图4)。1993年，由包括中国在内的10个国家在国际无线电科学联合会的会议上，正式提出了建造这一望远镜。1998年，这一计划被命名为SKA，由于规模巨大，单一国家难以承担，因此从一

射电天文学历史：射电天文学始于上世纪30年代央斯基(Jansky)、雷伯(Reber)等人的探索，在二战后进入了飞速发展的年代，上世纪60年代的四大天文发现(类星体、脉冲星、宇宙微波背景辐射、星际有机分子)都与射电天文学密切相关，在技术方面，60年代末至70年代发展了甚长基线干涉(VLBI)技术，使射电天文学的角分辨率大大提高。进入80年代以后，最为活跃的是探测宇宙微波背景辐射的实验，不过这与典型的射电天文学特别是中低频射电天文观测大不相同，因此主要由一些专门的研究小组进行，而射电天文学的主流则渐渐转入稳步发展的阶段。1980年，由27个25m抛物面天线组成的美国的甚大阵(very large array, VLA)射电望远镜建成，成为当时最大规模的射电望远镜阵，这也是迄今为止最大规模的射电望远镜阵列之一。



开始, SKA 就被确定为一个多国合作的计划. 2000 年, 签署了理解备忘录(MOU). 2001 年, 组织科学家对 SKA 的科学目标进行了论证, 为此建立了银河系与近邻星系、射电变源与恒星结局产物(包括脉冲星)及搜寻地外智慧生命、早期宇宙(再电离)和大尺度结构、星系形成、活动星系核与超大质量黑洞、恒星生命周期(行星胚系统)、太阳与太阳系、星系际介质、航天器跟踪和大地测量等一系列研究小组, 研讨相关的科学应用对 SKA 的技术要求.

对于 SKA 的设计, 各国的射电天文学家们开动脑筋, 提出了多种富有创意的方案. 这些方案大致可以分为三类: 第一类是由数量相对较少(几十个)的大型反射面天线(口径 50m 以上)组阵, 我国提出的利用贵州、广西的喀斯特地貌天坑建造固定式球形天线阵的方案也属于这一类(参见文献[29]); 第二类由大量(几千个以上)的小型反射面天线(口径从几米到十几米)组阵; 第三类则是孔径阵(aperture array), 这种阵列不使用反射面, 而直接使用大量的振子天线组阵²⁾. 当年提出的这些方案, 有些后来已建成了相应的技术示范或先导项目, 如我国的 500m 口径球形望远镜(FAST), 荷兰的 LOFAR (见图 5), 美国的 ATA, 澳大利亚的 ASKAP³⁾, MWA, 南非的 MeerKAT 等.

以上几种方案各有优缺点. 由数量(N)较少的大口径(D)反射面天线组阵在技术上比较成熟. 但是, 天线越大, 其波束就越窄(由波束宽度 $\theta \approx \lambda/D$ 给出, 其中 λ 为观测波长, D 为口径), 因此大天线不利于观测大面积的天区⁴⁾. 其次, 望远镜的动态范围是一个重要的技术指标, 这指的是望远镜同时观测亮目标和暗目标的能力. 阵列的动态范围与阵元的数量有关, 阵元的数量越多, 越容易实现较高的动态范围, 而大口径(D)、小数量(N)的阵列, 其动态范围相对较低. 最后, 从未来技术发展和成本的角度考虑, 大口径的望远镜其机电结构上的成本

孔径阵(aperture array): 在孔径阵中不使用抛物反射面汇聚电波, 而是直接采用大量的振子天线. 振子天线方向性弱, 可以接收来自各个方向的电波, 但每个振子由于所处位置不同, 因此来自不同方向的电波相对于阵列相位中心有不同的延迟, 当把多个振子接收的信号加起来时, 其总和信号就具有了方向性. 因此, 孔径阵用多个振子代替了反射面, 本质上这就是被动相控阵雷达.

较高, 而且这方面的技术比较成熟, 未来难有大的改进, 价格也不会下降.

由大量小口径反射面天线组成的第二类方案和由大量振子组成的第三类方案在提出时都没有先例(不过现在 LOFAR, MWA 等孔径阵已经建成), 需要在技术上进行新的探索. 但这些方案的优点是视场大, 容易实现高动态范围, 这对于中性氢巡天观测优势很大. 另外, 这类天线的机电结构比较简单, 这方面的成本较低, 其主要费用是花在接收机和数字信号的采集、传输和处理上. 电子技术和计算机技术一直在迅速发展, 单位成本的数字信号处理能力按照摩尔定律以每 18 个月翻一番的高速不断增长, 因此在未来, 这种设计的成本会降低, 而性能则会不断提高. 考虑到 SKA 作为大型项目具有相当长的研制和建造周期, 选择大 N 小 D 的设计是有利的.

经过评估后, SKA 选择的阵列设计同时包括上面的第二类和第三类方案(见图 6), 包括一个中/高频的碟形天线阵, 一个低频的孔径阵, 还可能包括一个用于巡天的中频孔径阵. SKA 产生的大量数据将用光纤信号系统传送到中央处理中心, 在专用的超级计算机上完成实时处理.

由于系统非常复杂, 费用高昂而技术又在不断发展, SKA 将分期研发. 2011 年, 成立了独立法人机构 SKAO, 组建了董事会, 进入建设准备阶段. 计划在 2012—2015 年开始建设准备阶段, 完成选址、基础设施建设、详细设计、招标和合同等工作, 在 2016—2019 年间完成第一阶段建设, 2018—2023 年间进行第二阶段建设. 首先进行的第一期 SKA-1 计划于 2016 年开始建造, 2020 年建成, 在中低频形成全系统的 1/5 的接收面积,

2) 有些 SKA 方案介于这些类别之间, 如柱形望远镜阵, 其反射面只有少数几个柱形, 但接收单元数很多, 仍可划归第二类. 还有一种由 Luneburg 透镜组成的阵列, 就其具有全向视场而言, 类似于孔径阵. 这些计划最后都没有被采用, 因此这里就不进一步介绍了

3) ASKAP 的天线由中国电子技术集团 54 所研制

4) 采用多波束馈源可以增加大型天线的视场, 目前的大型天线一般最多有十几个波束, 正在发展中的相位阵馈源(phased-array feed, PAF)将有更多的波束, 但目前这一技术尚未成熟. SKA 有可能在其碟形天线阵上采用 PAF 技术

预期费用约4亿欧元，将包括碟形天线阵和低频孔径阵。第二期SKA-2计划将在2018—2023年间建设，预期费用约11亿欧元。第三期SKA-3计划则在2022年以后建设，针对更高的频率。

SKA碟形天线阵将包括3000多个15m口径的碟形天线，其中第一期将先建250个。观测频率为300MHz—10GHz，将包括0.45—1GHz和1—2GHz两个单像素双极化馈源/接收机系统，但以后也有可能采用PAF多像素馈源。天线反射面精度则按10GHz观测要求设计，以便在未来可以用于高频观测。第一期中大约一半的天线分布在半径0.5km的区域，构成一个高覆盖率的核心，约1/5的天线分布在半径为0.5—2.5km的内圈，其余则5个一组，分布在半径为2.5—100km的外圈，以提供较长的基线。

SKA低频孔径阵工作频率为70—450MHz，总共将包括250个基站，其中第一期将包括50个基站，每个基站将包括11200个双极化振子天线，这些天线接收的信号将在每个基站合成为480个波束。与中频阵类似，其中一半的天线将分布在半径为0.5km的核心内，约1/5的天线分布在1—2.5km的内圈，其余则分布在半径为2.5—180km的范围内。

SKA的总部建在英国的曼彻斯特。经过漫长的站址评估过程和利益权衡后，2012年5月SKA宣布采用双站址方案，即低频阵和中频阵建在不同站址。第一阶段的碟形天线阵建在南非，而低频孔径阵则建在澳大利亚。今后为了延长基线，还将有部分阵列建在其他非洲国家和新西兰。

5 讨论:天籁与SKA

上面介绍了我们的天籁计划和SKA。天籁计划与SKA的指导思想有相当的不同。SKA技术先

波束合成：孔径阵的天线数量极多，因此设计上不是对每一对天线产生的信号都进行数字采集、传输和相关计算，而是把一定数量的天线集成为一个基站(station)，并将基站内天线的信号叠加起来，形成合成的波束，然后在不同基站间进行干涉(相关)。如果对同一个基站内的各个天线给出不同的相位延迟，那么这一合成波束的方向将会发生相应变化，这就是相位阵(phased-array)的工作原理。还可以采用不同的相位延迟同时得到多个合成波束。

进，规模庞大，多国参与，耗资巨大，有多方面的科学应用，因此设计和立项过程都很复杂，从1993年正式提出到现在已经过去了近20年的时间，而第一期建成还要等到2020年。天籁计划则是针对一个特定的科学目标即暗能量观测而设计的，因此比较简单，成本很低，我们计划到2016年建成第一期的实验阵列。

不过，天籁计划和SKA也有共同之处，即都采用大量的小型接收单元组阵，其数量都远远超过了过去的阵列。美国在20世纪80年代初建成的VLA和在印度90年代建成的GMRT都只有27个天线，而天籁计划第一期的双极化接收单元为96个，信号有192路，SKA碟形天线阵第一期有碟形天线250个，信号有500路。全规模的SKA碟形天线阵将有3300个阵元，而天籁计划是2560个。这是射电天文学发展的一个趋势：在射电阵列中，每个阵元接收的信号需要放大、转换成数字信号，并进行傅里叶变换和相关等运算，在过去这些都花费不少，特别是相关运算的数量随着阵元数 N 的平方增长，在过去要完成这样的计算是困难的，往往需要专门的硬件，因此限制了阵元的数量。现在，随着技术的快速发展，这已不成问题，人们可以用低廉的费用实现海量的信号数字处理，建成所谓“软件望远镜”。用大量小天线组阵，能够以较低的成本获得与大天线一样的接收面积，还可以同时获得较宽的视场和较高的角分辨率，且随着阵元数量增多，有更多的干涉基线，能够实现更好的uv平面覆盖，获得更高的动态范围，因此具有巨大的优势。

由于天籁计划与SKA的这些相似之处，笔者认为，天籁计划的一些研究可以为我国参与SKA计划提供技术和人才上的准备。例如，天籁计划所需的低成本接收机数字后端设备、高速数据传输技术、相关计算技术等，都与SKA的需求有很大的类似性。而且在数据处理方法、软件研制以及培养相关的专业人才方面，天籁计划与SKA有更大的共同性。因此，笔者建议，可以考虑在进行天籁计划关键技术研究的同时，对SKA的相关方案进行研究，争取参与SKA在这些方面的研发工作。

我国自SKA提出之始就是其成员之一, 理应在这一规模空前的科学项目中发挥更大的作用. 目前, 中国科学院国家天文台、中国电子技术集团54等单位在SKA碟形天线的研制中已取得了相当的成绩. 虽然我国此前在天文望远镜的接收机和数字信号处理方面并没有太多的经验, 但就相关的工业技术而言, 我国已经具备了一定的技术实力和基础, 例如国防科技大学研制的天河计算机曾在世界超级计算机前500名中排名第一, 华为技术有限公司和中兴通讯股份有限公司等也已在国际市场上成为具有很强竞争力的厂家. 如果以天籁计划等项目为基础, 整合我国天文界和工业界的相关技术力量, 我们有可能在SKA的技术和科学研究中发挥更大的作用, 并成为国际上射电天文学领域的强国.

致谢 感谢彭勃研究员、张翔博士向我们介绍SKA的有关情况. 天籁计划获得了北京大学高能物理中心的支持, 谨此表示感谢.

参考文献

- [1] Riess A *et al.* *Astronomical Journal*, 1998, 116: 1009
- [2] Perlmutter S *et al.* *Astrophysical Journal*, 1999, 517: 565
- [3] 陈学雷. *科学杂志(上海)*, 2011, 63(6): 59
- [4] Albrecht A *et al.* (DETF); Report of the Dark Energy Task Force. arxiv: astro-ph/0609591(2006)
- [5] Albrecht A *et al.* (FOMSWG); Findings of the Joint Dark Energy Mission Figure of Merit Science Working Group. arxiv: 0901. 0721
- [6] <http://www.euclid-imaging.net/>
- [7] <http://www.lsst.org>
- [8] <http://wfirst.gsfc.nasa.gov/>
- [9] Schlegel D *et al.* The BigBOSS experiment. arxiv: 1106. 1706 (2011)
- [10] 陈学雷. *中国科学: 物理、力学、天文学*, 2011, 41: 1358
- [11] Chen X. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 2012, 12(01): 256
- [12] <http://www.skatelescope.org>
- [13] GUERRA E J, Daly R A, Wan L. *Astrophysical Journal*, 2000, 544: 659
- [14] Greenhill L. Estimation of the Hubble Constant and Constraint on Descriptions of Dark Energy. ASTRO2010 White Paper. arxiv: 0902. 4255
- [15] White M. *Astroparticle Physics*, 2005, 24: 334
- [16] Eisenstein D J *et al.* *Astrophysical Journal*, 2005, 633: 560
- [17] Cole S *et al.* *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 362: 505
- [18] Percival W J *et al.* *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 401: 2148
- [19] Blake C C *et al.* *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 418: 1707
- [20] Beutler F *et al.* *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 416: 3017
- [21] Anderson L *et al.* The Clustering of Galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey; Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 9 Spectroscopic Galaxy Sample. arxiv: 1203. 6594
- [22] Wang X *et al.* *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 394: 1775
- [23] Chang T, Pen U, Peterson J B *et al.* *Physical Review Letters*, 2008, 100: 1303
- [24] Peterson J B *et al.* 21cm Intensity Mapping, White Paper for Astro 2010 Astronomy Decadal Survey. arxiv: 0903. 3091
- [25] Gong Y, Chen X, Silva M *et al.* *Astrophysical Journal Letters*, 2011, 740: 20
- [26] Chang T, Pen U, Bandura K *et al.* *Nature*, 2010, 466: 463
- [27] Masui K W *et al.* Measurement of 21cm Brightness Fluctuations at $z \sim 0.8$ in Cross-Correlation. arxiv: 1208. 0331
- [28] Ekers R. The History of the Square Kilometer Array. Presentation at the Conference on "Resolving the Sky-Radio Interferometry: Past, Present and Future", April 2012, Manchester.
- [29] Nan R *et al.* Kilometer-square Area Radio Synthesis Telescope KARST, SKA memo 17(2002)
- [30] Dewdney P *et al.* SKA Phase 1: Preliminary System Description, SKA Memo 130(2010)

读者和编者

为充分体现物理科学的独特之美, 本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材. 封面素材要求图片清晰, 色泽饱满, 富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵. 被选用的封面素材提供者, 均有稿酬及全年《物理》杂志相送.

《物理》有奖征集封面素材

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029
期待您的参与!

《物理》编辑部