第 37 卷 第 2 期
2019 年 06 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 37, No. 2
June., 2019

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.02.04

海量巡天数据在线可视化技术综述

张 磊[1,2]，樊东卫[1]，崔辰州[1]，何勃亮[1]，
许允飞[1,2]，崔 顺[1,3]，王川中[1,3]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100101； 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049；
3. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院，北京 100124)

摘要： 海量巡天数据在线可视化是多波段数据融合的应用之一，对大数据时代天文科研工作和科学普及具有重要意义。近年来，国外出现越来越多类似谷歌地图等互联网地图的天图在线可视化系统。为解决拼接生成的大巡天数据文件所导致的在线加载显示缓慢的问题，天文界普遍采用瓦片地图技术。该技术对数据进行分层保存，在浏览器端按需加载、分层显示。HiPS (hierarchical progressive survey) 和 TOAST (tessellated octahedral adaptive subdivision transform) 等分层可视化技术以及一些巡天数据拼接和瓦片生成工具，如 Hipsgen.jar 和 Montage 等，目前已应用于 Aladin Lite, ESASky, WWT (WorldWide Telescope) 等在线可视化系统的开发。海量巡天数据在线可视化也遇到一些需要解决的问题，如数据分层导致了数据量的再次增加，巡天图像拼接耗时较长，多信使数据融合显示等。综述了分层可视化技术、瓦片地图金字塔的创建等内容，并对几款主流的在线可视化系统进行了对比分析，讨论了在线可视化遇到的问题及发展方向。

关 键 词： 在线可视化；瓦片地图；海量巡天数据；HiPS

中图分类号： TP391 **文献标识码：** A

1 引 言

从古至今，天文学一直是一门与观测相关的科学[1]。数千年前的观测是用肉眼进行的；数百年前，望远镜的发明“武装”了人类的眼睛；20 世纪发明的相机和电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 记录装置进一步提高了人类的观测能力。在过去的几十年中，大面积的巡天已成为天文学家研究宇宙的最有力方法之一。斯隆数字化巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 为此类巡天奠定了基础，此外数字化巡天 (Digitized Sky Survey, DSS)、北京-亚利桑那巡天 (Beijing-Arizona Sky Survey, BASS)、郭守敬望远镜巡天 (Large Sky Area

收稿日期： 2018-06-29； **修回日期：** 2018-11-11

资助项目： 国家自然科学基金 (11503051)；天文联合基金 (U1531111, U1531115, U1531246, U1731125, U1731243)；科技部国家科技基础条件平台项目 (DKA2017-12-02-07)

通讯作者： 张磊，zhangl@nao.cas.cn

Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST)、盖亚天文卫星巡天 (GAIA) 等众多巡天项目也作出贡献。现代大型望远镜和世界级超级计算设备产生了非常好的图像和非常精确的测量结果，因此，天文学家面临着前所未有的海量数据集。此外，未来人们还将建设一批大型巡天设备，如大口径巡天望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope, LSST)、欧几里得空间望远镜 (Euclid Space Telescope)，人们将获得数量级更大的数据。这些海量数据集在数据探测和可视化方面对天文学家提出了新的挑战[2]。近些年，许多天文数据中心正在致力于满足天文学家对天文数据的直观、快速和可视化访问的需求，其主要目标是最大限度地利用海量的天文数据。天文学家在研究中遇到一些现实的问题，如天文数据每年呈指数级增长，需要通过整个电磁波段或时域数据来了解目标天体，需要从更多的天文观测台站获取数据，需要了解哪些天文仪器在天空的特定区域观测过[3]。随着数据集的复杂性和数量的增加，以及模块化、开源、易于实现和可视化工具等的发展，天文学家对数据可视化的需求也越来越 高[4]。

随着中国工业化、城镇化的高速发展，城市中及周围区域的光污染和空气污染对天文观测的影响越来越明显。人们很难在城市中看到璀璨的星空，而想要辨别星云、星团更是奢望，因此只能在家中看着书中的描述对着天空遐想。当人们读一篇关于天体的文章时，天体对于读者是比较抽象的。如果没有真正看到该天体，读者就不会真实地感受到天体的存在。假如人们想购买一架望远镜来观测天体，要获得比较好的观测效果，则人们投入资金较大，还要面临使用上的困难以及耗费较大的精力等现实问题。

因此，很多数据中心或企业机构都在努力绘制详细的天图，帮助人们更好地了解天体以及与这些天体相关的各种信息。然而，这些机构绘制出的天图的像素都比较大，不便于科研人员获取或向公众传播。如 2016 年 2 月欧洲南方天文台 (European Southern Observatory, ESO) 公布的银河系全景图①，文件大得惊人，达到 24.6 GB。利用 Aladin, DS9 和 SkyCat 等桌面应用程序，人们可以通过下载 FITS 数据实现对远程图像数据库的高效访问，并在本地读取和处理这些数据。所有的工作，包括图像缩放、动态范围压缩、颜色合成和伽马校正等，都可在客户端进行。由于人们在计算机和移动平台上广泛使用 Web 浏览器，Web 应用程序已成为实现可视化的极具吸引力的解决方案。现代 Web 浏览器具有更快、更高效的 JavaScript 引擎，支持 HTML5 和 CSS3 等高级标准。Web 应用程序现在已具有足够丰富的功能，能够与独立桌面应用程序的许多功能相匹配[5]。

基于 Web 的客户端或简单的 Web 应用程序在过去几年中的应用已呈爆炸式增长。为了便于公众使用地图，百度地图、高德地图、腾讯地图、谷歌地图等互联网软件均采用瓦片地图的方式进行在线可视化显示[6]。瓦片地图是根据图像金字塔规则，将一张大的地图图片切分成若干尺寸相同的小图片，这些小图片就是瓦片。在使用浏览器查看时，我们只需要加载感兴趣区域的瓦片，这样便可以大大加快显示速度。由于地球和天球均为球体，因此天图也可以采用与地图类似的方式进行在线可视化。

另一方面，天文学早已进入多波段时代，多信使天文学时代也已开启[7]。天文学家希望

①http://www.eso.org/public/images/eso1606a/zoomable/

对观测数据或计算结果进行快速判断，并以可视化方式提供多波段数据和多信使数据的下载，减少多方收集数据的麻烦。普通公众则希望可以在宇宙中自由遨游，并且能够具有一双“火眼金睛”，可以看到目标天体在不同波段的图像。显然，通过在浏览器中更改不同图层的透明度来全面观测目标天体，是一种方便可行的方法，因此，无论对于天文学家的科研工作还是面向普通公众的科普活动，人们都需要一个实用的在线可视化系统。

近几年，无论是在科研还是科普领域，在线可视化系统都发展迅速。首先是在科普领域出现了几款在线可视化系统，深受公众的喜爱。2006 年，加拿大的 Konstantin Lysenko 和 Sergei Goshko 创建并发布了 WikiSky①，最初的开发目的是方便儿童快速地找到自己喜欢的天体；2007 年，谷歌 (Google) 公司发布了 Google Sky②，这让人们不仅可以在 Google Earth 中俯察地理，更可仰观星空；2008 年，微软 (MicroSoft) 公司发布了 WWT③，这是一款界面十分酷炫的软件，可借助互联网把全世界的天文资源进行无缝透明的融合，很好地实现了虚拟天文台的理念。在美国《时代》杂志公布的 2008 年度、2009 年度最佳网站 50 强名单中，WikiSky、WWT 分别名列其中。很多组织也使用天文在线可视化工具来进行教育和科普工作[8]。如美国的 WWT 大使项目使用 WWT 创建宇宙的动态漫游，并在学校和公共场所进行在线分享；阿雷西沃遗珍快速 ALFA 巡天利用 Google Sky 作为传播射电天文数据的工具，用于教育和公众宣传。

接着，科研界也开发了主要有助于科研工作的在线可视化系统，广泛服务于科研工作。2010 年，斯特拉斯堡天文数据中心 (Centre de Données astronomiques de Strasbourg, CDS) 推出了第 7 版的 Aladin，这一版为全天模式，支持平移、缩放巡天图像和星表数据。2013 年发布在线版本 Aladin Lite④。2016 年，欧洲空间天文学中心 (European Space Astronomy Centre, ESAC) 下属的科学数据中心发布了第 1 版的 ESASky，目前版本为 ESASky2.2.1⑤，比之前版本增加了很多实用功能，如光谱可视化和相关文献查阅等。

这些海量巡天数据在线可视化系统除了对巡天图像进行分层显示，以底图的方式提供天体在各个波段的图像，还提供对星表、光谱等图层或星座名称、星座图案等信息层的叠加显示，大大丰富了在线可视化系统的内容。而 WWT 和 Google Sky 还可以通过改变不同图层的透明度来同时观察不同波段的图像，方便进行直观对比。这些系统虽然使用不同的分层可视化技术、采用不同的投影，以及具有不同的特点，但实现过程基本相同，主要环节包括巡天数据拼接、瓦片数据生成、浏览器端显示与交互。

第 2 章阐述全球各大天文数据中心使用的两种分层可视化技术；第 3 章介绍瓦片地图金字塔的构建；第 4 章介绍几个不同天文数据中心或企业机构基于不同分层可视化技术开发的在线可视化系统；第 5 章总结海量巡天数据在可视化过程中遇到的问题。

---

①http://www.sky-map.org/

②http://www.google.com.hk/sky/

③http://worldwidetelescope.org/webclient/

④http://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/

⑤http://sky.esa.int

2　分层可视化技术

随着越来越多大型巡天项目的立项及建设，观测数据以指数级增长，然而，人们通过网络传输信息的能力并没有相应迅速地增长。一种解决的办法是借鉴互联网地图，采用瓦片地图技术把大量巡天图像拼接生成的天图进行分层保存，在浏览器端分层显示、按需加载。图 1 显示了瓦片地图金字塔模型的结构。

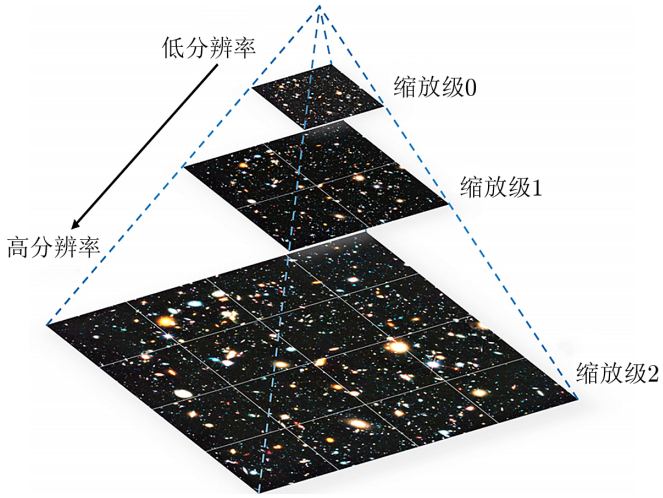


图 1　瓦片地图金字塔结构的 3D 图[2]

瓦片地图金字塔的每层分别对应某个视场大小的瓦片集合，每层的每个瓦片大小都一样。金字塔最底层的天图视场最小，最顶层的天图视场最大。这与我们使用互联网地图查看感兴趣的区域十分类似，随着手指或者鼠标的缩放操作，从最顶层瓦片开始，我们看到的范围逐渐变小，细节逐渐变多。采用瓦片地图技术可以逐层显示目标天体的更多细节 (见图 2)。

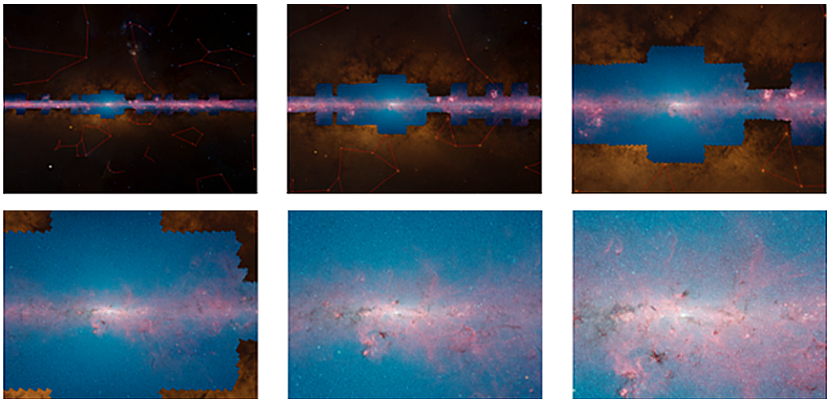


图 2　逐层显示目标天体的更多细节

全天巡天数据即时平移和缩放的交互式天图在 WikiSky/SKY-MAP, Google Sky, World-Wide Telescope, Aladin Lite 和 ESASky 等可视化系统中得到了实现。这些可视化系统都采用瓦片地图方法，目的是根据当前的用户观看的视场，以尽可能快的速度加载和绘制较高分辨率的天空瓦片。这些可视化系统的目标是相同的，但天空索引的解决方案不同，而且在性能、底层数据复杂性、可用投影、投影失真、像素值访问、图形叠加等方面的功能也不相同。这些可视化系统都必须处理四个主要问题：数据大小、客户端显示性能、数据结构和天空投影，其核心是划分天空的方法。这个问题将影响数据结构 (特别是这些可视化系统所需的空间索引)、客户端的显示性能和质量。各数据中心或企业机构已经探索的几种解决方案：Google Sky 采用圆柱形方法，WWT 使用 HTM (Heirarchical Triangular Mesh) 方案，Aladin 选择了 HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelisation)。

圆柱形方法、HTM 方案和 HEALPix 逐层划分方法是目前应用于海量巡天数据在线可视化的三种成熟技术，各大天文数据中心和企业机构分别采用了不同的在线可视化展示系统，在科学研究和天文科普领域取得了不错的效果。基于球面的矩形逐层划分方法是互联网地图中广泛使用的成熟方法，本文主要介绍另外两种在天文学领域应用较广的分层可视化技术。

2.1 HiPS

HiPS 是基于菱形的逐层划分方法，由多级等面积同纬度划分法 (HEALPix) 发展而来。HEALPix 最早被设计用于宇宙微波背景的数据处理和数值模拟[11,12]。Górski 等人描述了 HEALPix 详细的几何形状和特性[13]。HEALPix 具有等面积、不依赖于层次级别的快速和恒定的计算时间、可用库的准确性和性能以及 HEALPix 在多个巡天任务中广泛使用等优势[14]，如 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 和 LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)。图 3 为 HEALPix 0—3 层天球划分图。首先将天球分为 12 等分的菱形瓦片，然后将每个菱形瓦片继续递归为 4 等分。最终天球被划分为 12^n 个瓦片，每一层的瓦片均为 512×512 像素大小的图片。

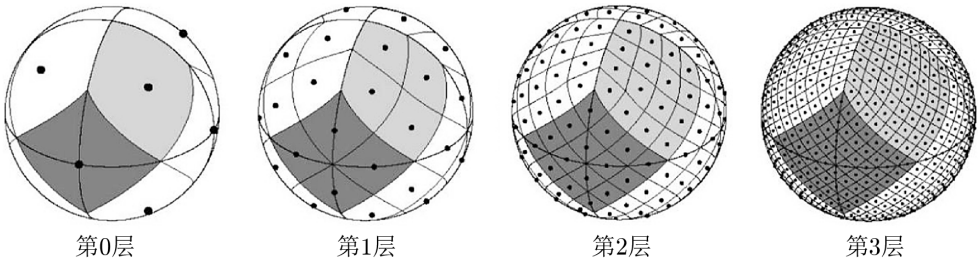


图 3 HEALPix 0—3 层天球划分图[14]

HiPS 是为了可视化 Aladin 所有天空图像的巡天数据而开发的。原则上，HiPS 可以管理在天球上定位和显示的任何类型的数据。只要数据位于 HEALPix 球体上，瓦片就可以存储任何类型的数据。因而最初的开发已由巡天图像数据扩展到星表数据和数据立方。HiPS 专为天文数据而设计，它考虑到原始数据的天文测量和光度属性，重点放在易用性上，而不需要特殊的服务器或数据库系统。HiPS 方案建立在巡天数据分层可视化概念的基础上，旨

在创建一个逐层使用不同数据类型的科学强大的系统，并以互操作的方式轻松地使用这些数据[15]。图 4 为 HiPS 的多分辨率瓦片结构。

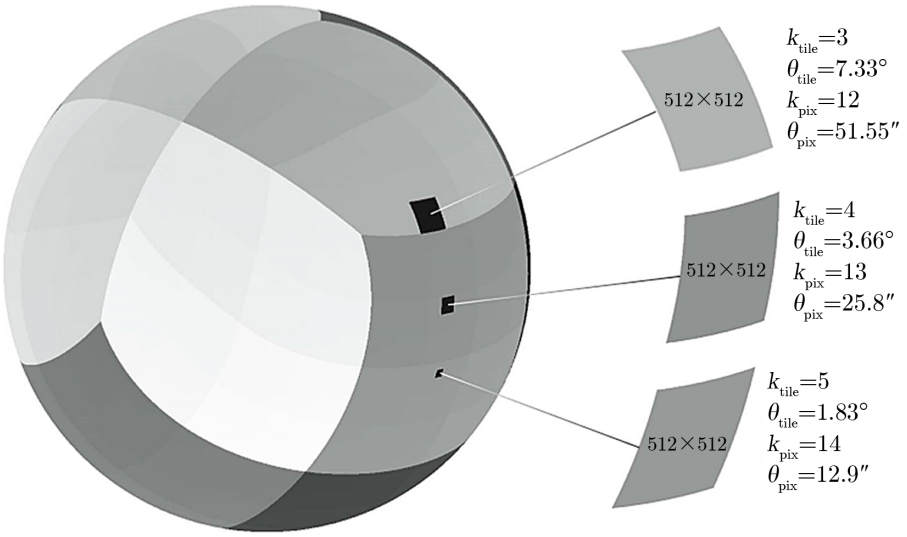


图 4　HiPS 的多分辨率瓦片结构[16]

HiPS 采用文件目录的方法对瓦片数据进行管理，将拼接生成的巡天图像进行瓦片切分，存储在对应层的目录中。HiPS 文件目录结构必须遵循层次结构：由层至瓦片，分别使用“Norder”作为层的前缀，“Npix”用于瓦片索引。为了避免目录变得太大，必须使用“Dir”作前缀的子目录将瓦片以 10 000 个为一组[17]。当使用者查看目标天区时，只需计算该天区的存储位置，该天区的瓦片将从服务器传输到客户端，这样便可实现按需加载数据。

本质上，HiPS 是一种用于包装、存储、查询和描述天文数据的通用方法。HiPS 依赖于一些 VO 标准，尤其是 MOC (Multi-Order Coverage)、资源元数据、IVOA (International Virtual Observatory Alliance) 标识符、ObsCoreDM 和 VOTable 等。HiPS 也基于其他非 IVOA 标准，特别是 HEALPix 和 FITS (Flexible Image Transport System)，以及 JPEG (Joint Photographic Experts Group) 和 PNG (Portable Network Graphics) 图像格式。自 2009 年推出以来，经过多年发展，HiPS 现在已经成为国际虚拟天文台联盟 (IVOA) 标准，并得到了广泛应用。使用 HiPS 技术发布的巡天数据系统数量不断增加，目前已经由多个数据中心公布了 550 多份 HiPS 巡天，比如 SDSS, HST (Hubble Space Telescope), DSS, 2MASS (Two Micron All Sky Survey) 等。此外，该方法不限于大数据中心，小团队或个人也可以根据自己的数据集来创建自己的 HiPS。

2.2　TOAST

TOAST 是基于三角形的逐层划分方法，由分层三角网格 (Heirarchical Triangular Mesh, HTM) 技术发展而来。HTM 是天文中另一种常用的球面索引方法。Szalay 等人描述了 HTM 详细的几何形状和特性[18]。图 5 为 HTM 天球网格划分示意图。最初被划分为一个正八面体，

形成上下各 4 个球面直角三角形，具有 6 个顶点。其中 2 个顶点位于南北两极，其余 4 个顶点分布在赤道上。接着将每个三角形等分为 4 个子三角形，逐层递归划分。

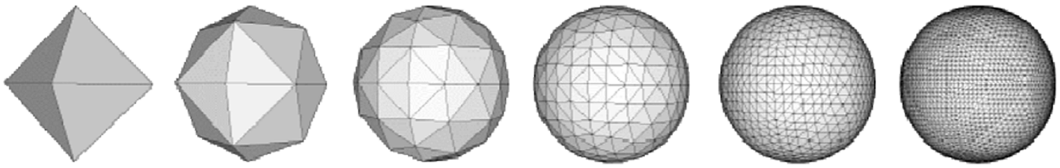


图 5 HTM 天球网格划分示意图[18]

HTM 使用每边的中点作为下一层三角形瓦片的顶点，将球面三角形细分为 4 个较小的三角形[19]。该过程迭代进行，命名方法只是将三角形的数字与父级的名称关联起来。根据这种划分方法，名字的长短也代表了其本身的层级。图 6 为 HTM 瓦片命名示例。

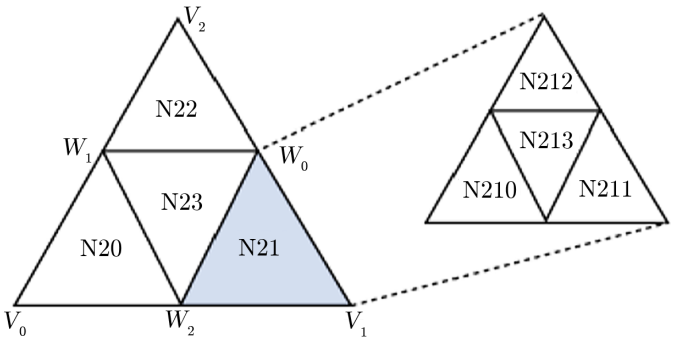


图 6 HTM 瓦片命名示例[18]

TOAST 是用于将全天数据导入 WWT 的地图投影，每个 TOAST 像素是一对 HTM 三角形。TOAST 的文件组织方式为：WWT 导入的所有 TOAST 数据都是 256×256 像素的瓦片，这些 TOAST 瓦片被存储为一个图像金字塔。表 1 显示了 TOAST 各层的瓦片数量和分辨率。第 0 层是单个瓦片，第 7 层有 128×128 (即 16 384) 个瓦片。

表 1 TOAST 各层的瓦片数量和分辨率 [1]

层数	瓦片的数量	整张图像像素/px	最大 TOAST 分辨率/(′)·px^{-1}	层数	瓦片的数量	整张图像像素/px	最大 TOAST 分辨率/(′)·px^{-1}
0	1	256	42.19	6	4 096	16 384	0.66
1	4	512	21.09	7	16 384	32 768	0.33
2	16	1 024	10.55	8	65 536	65 566	0.165
3	64	2 048	5.27	9	262 144	131 072	0.082 5
4	256	4 096	2.64	10	1 048 576	262 144	0.041 25
5	1 024	8 192	1.32	11	4 194 304	524 288	0.020 625

注：[1] http://www.worldwidetelescope.org/docs/WorldWideTelescopeProjectionReference.html

HTM 和 HEALPix 两种索引方式不仅是数据划分的基础，而且降低了计算复杂度并提高了数据的读取速度。赵青等人[11]经过分析发现，与简单网格划分相比，基于 HEALPix 和 HTM 索引的划分天区方式是比较有效的划分方法。下面从不同角度对 HiPS 和 TOAST 这两种不同的分层可视化技术的性能进行对比和总结：

1) 划分天区的面积相等 (HEALPix) 或接近 (HTM)；

2) 编码方式都为逐级递归，保证了物理位置上相近的点在编码空间上也相近；

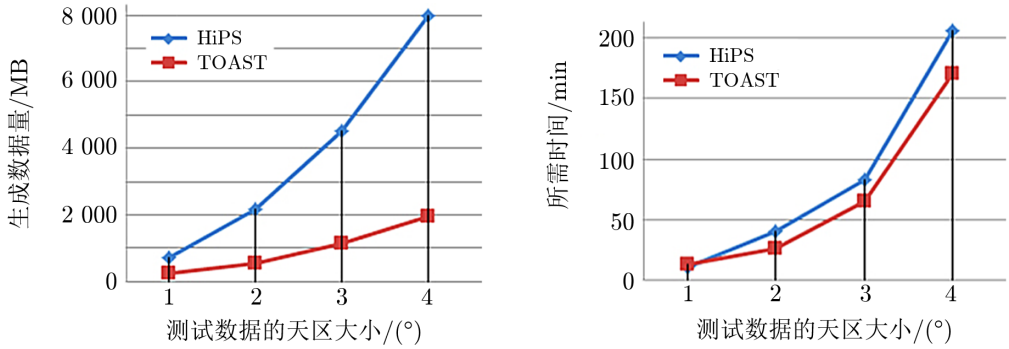
3) 经过多年发展，两种技术均较为成熟，且 HiPS 已成为 IVOA 标准；

4) 都有较成熟的工具用于拼接巡天图像及产生瓦片集；

5) 在线可视化展示均比较简单，如 HiPS 可以直接生成 index.html 文件，TOAST 只需将生成的瓦片放在可访问的 URL 位置；

6) HiPS 和 TOAST 都已广泛应用于全球各大天文数据中心。

为了对两种分层可视化技术在拼接、切分环节产生数据量及所需时间进行测试，本文使用 Hipsgen-cat.jar 和 Montage 将 2MASS 的 1, 2, 3, 4 平方度原始图像 (分别为 45, 144, 312, 583 张) 拼接成中心天体为 M17 的图像并生成 HiPS 和 TOAST 瓦片，结果如图 7 所示。由图 7 可知，HiPS 的生成数据量远大于 TOAST，这是由于在同一切分层级下 HiPS 生成的瓦片数量较多；在所需时间方面，两者相差不大。



a)　　b)

图 7　HiPS 和 TOAST 性能对比

虽然采用分层存储和按需加载的方式明显加快了图像的浏览，却再次增加了图像大小，因此部分天文学家使用 JPEG2000 来解决数据量增加的问题。一方面，JPEG2000 有非常好的压缩比[20]，笔者曾将一个 50 GB 的 FITS 文件无损压缩为 2 GB 的 JPEG2000；另一方面，JPEG2000 本身就可以逐层压缩图像，并分片存储。因此，JPEG2000 不仅具有分层存储功能，还可以减小数据大小。但是，JPEG2000 在专利方面有很多限制，相关软件的收费较高，图像压缩速度也有待提高。

3　瓦片地图金字塔的构建

大数据条件下全天图像拼接与瓦片数据生成也是海量巡天数据在线可视化的研究热

点。全天图像拼接就是将望远镜多次观测拍摄的具有重叠区域的图像合成为一张完整的大图，之后根据某种图像金字塔规则将这张大图切分为多层瓦片集，并将其在网页或者软件中展示。目前人们使用一些工具进行拼接巡天数据并生成瓦片，如 Aladin[①]桌面应用程序 (Aladin Desktop) 或命令行程序 Hipsgen.jar[②]可以生成图像 HiPS，使用命令行程序 Hipsgen-cat.jar[③]生成星表 HiPS，以及使用 Montage[④]或 WWT 官方工具 (WWT SDK) 生成 TOAST 瓦片。这些工具为构建海量巡天数据在线可视化系统提供了极大方便，节省了开发时间。

3.1 HiPS 瓦片地图金字塔的构建

我们主要使用 Aladin Desktop 或 Hipsgen.jar 来生成图像 HiPS。Aladin Desktop 是一个功能齐全的应用程序，是 HiPS 的主要展示平台。Aladin Desktop 提供 HiPS 的所有可视化功能，包括支持多个视图的同步缩放和平移、图层透明度调整以及与其他在线天文学服务的互操作性等。使用 Aladin Desktop 生成图像 HiPS 的操作并不复杂，只需打开 HiPS 对话框进行几步简单的操作，即可生成符合自己需求的 HiPS。为了便于传播和应用，hipsgen 内置于 Aladin Desktop，并可作为命令行程序使用。通过脚本命令[⑤]来运行 HiPS 的创建，此过程可能需要较长时间并且非常消耗 RAM 和 CPU。

为了在较短时间内生成星表 HiPS，人们需要使用 Hipsgen-cat.jar。与 Hipsgen.jar 一样，Hipsgen-cat.jar 也是作为命令行程序使用，只需一行代码便可以将 FITS、VOTable 或 CSV 格式的星表生成 HiPS。示例代码[⑥]可将 118 万行的依巴谷主星表 (I_239_hip_main.csv) 基于视差生成星表 HiPS。

生成 HiPS 文件之后，我们还需将其进行在线展示。Aladin Lite 是一款用于 Web 浏览器的 HiPS 简化在线可视化工具，我们利用该工具可轻松完成这一工作。它可嵌入到第三方网页上，只需复制并粘贴一小段 HTML 和 JavaScript 代码即可[⑦]。此外，它还带有一个应用程序接口 (API)，并提供必要的控件以根据不同的需求对系统进行定制。如，允许用户自定义界面、控制视图、更改巡天图像显示、创建星表和叠加图层以及开发网页与 Aladin Lite 之间强大的交互等[21]。

基于 HiPS 及 Aladin 相关工具，我们已经完成了 China-VO Sky 的初步工作，包括北京-亚利桑那巡天 (BASS) 数据的拼接、瓦片生成以及在线可视化系统的本地构建。图 8 中底图为 BASS DR2 巡天图像数据，在其上叠加了 BASS DR1 星表数据。下一步将完善在线可视化系统的功能，使之更好地服务中国天文学家及公众，为科学研究和科学普及做出贡献。

[①] http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading

[②] http://aladin.u-strasbg.fr/hips/HipsIn10Steps.gml

[③] http://aladin.u-strasbg.fr/hips/HipsCat.gml

[④] http://montage.ipac.caltech.edu/docs/download.html

[⑤] java-Xmx16000m-jar AladinBeta.jar-hipsgen maxthread=20 in=Data

[⑥] java-jar Hipsgen-cat.jar-cat I_239_main-in I_239_hip_main.csv-ra _RAJ2000-dec _DEJ2000-score Plx-desc-lM 5

[⑦] http://aladin.unistra.fr/AladinLite/doc/#embedding

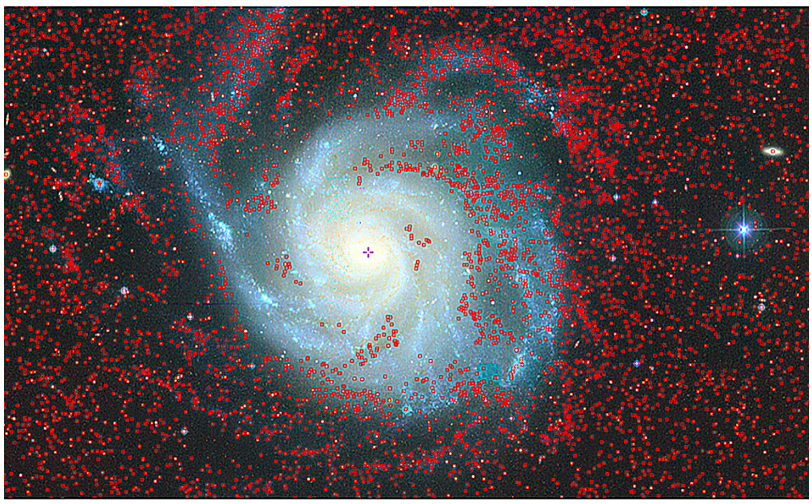


图 8　China-VO Sky 巡天图

3.2　TOAST 瓦片地图金字塔的构建

Montage[①]是将 FITS 图像进行拼接的工具包，其科学价值体现在其设计上的三个特点：1) 保留了输入图像的校准和天文测量精度，以满足拼接时用户指定的投影参数、坐标和空间尺度等要求；2) 包含独立的模块，用于分析天空图像的几何形状，以及创建和管理拼接；3) 使用符合 ANSI 标准的 C 语言编写，具有可移植性和可伸缩性[22]。该代码是免费使用的，并已广泛应用于天文学和 IT 领域的相关研究中。Montage 5.0 版 (2016) 支持处理在 WWT 中显示图像所需的 TOAST 和 HEALPix 数据[23,24]。

Montage 是一个命令行工具包，其中包含用于读取图像集合并进行拼接所需的模块。可以通过在命令行中依次运行相关程序来进行图像拼接，也可以在脚本中自动执行[25,26]。首先进行拼接工作，通过 mImgtbl、mProjExec、mAdd 等模块创建一个没有任何背景校正的图像，对该图像使用 mOverlaps、mDiffExec、mFitExec、mBgModel、mBgExec 等模块纠正图像中的差异，获得一张用于可视化的拼接图像。然后使用 mHdrWWTExec、mProjWWTExec、mHistogram、mPNGWWTExec、mProjectQL 等模块依次进行瓦片头文件、FITS 图像、PNG 图像、全天图像的缩略图等生成工作，最后得到 TOAST 瓦片文件 footnotehttp://montage.ipac.caltech.edu/docs/WWT/。使用 Montage 生成巡天数据的瓦片文件后，人们只需要将数据放在可访问的 URL 位置，即可在网页版 WWT 中在线显示自己的巡天数据。

作为 WWT 官方工具，WWT SDK (Software Development Kit) 是另一种可以生成 TOAST 瓦片的工具，但目前仅支持已拼接好图像的 TOAST 分层分割，并不具有进行巡天图像拼接的功能。安装好 WWT SDK 以后，在 WWT SphereToaster (Alpha) 面板里的各选

[①]http://montage.ipac.caltech.edu

项卡下进行几步简单操作即可创建 TOAST 瓦片[①]。完成后将创建以下内容：充满瓦片的文件夹、在本地使用的 WTML 文件、在浏览器端使用的 WTML 文件和缩略图。

目前基于 HiPS、TOAST 或球面矩形划分的天图拼接及瓦片生成，人们均可使用一些已有工具，但是发现存在拼接速度较慢或仅支持已经拼接好的图像的分层分割的问题。如我们在制作 BASS 巡天图像 HiPS 的过程中，发现 Hipsgen.jar 的性能达不到要求。当图像数量较多和像素较大时，我们即使执行十多个线程，也需要一个多月才能完成全天图像的拼接。因此，应对其开源工具进行二次开发，缩短全天图像拼接花费的时间。

4 在线可视化系统

基于不同分层可视化技术及瓦片生成工具，很多数据中心和企业机构都开发了各自的在线可视化系统。这些在线可视化系统有的仅用于简单的全天数据展示，有的则具有复杂的交叉识别及其他数据服务功能，还有一些则具有强大的科普教育功能。以上在线可视化系统不仅方便科研人员进行科学研究，同时也有助于对公众开展天文科普。

4.1 基于 HiPS 的在线可视化系统

各天文数据中心基于 HiPS 分层可视化技术开发了很多不同用途的在线可视化系统，如 CDS 开发的 Aladin 系统，旨在成为主要的交叉识别工具，包括桌面版 (Aladin Desktop) 和网页版 (Aladin Lite)。还有一些数据中心基于 Aladin Lite 进行了功能拓展，如 ESAC 开发了 ESASky，日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 开发了 JUDO2。更多的数据中心将 Aladin Lite 作为网页嵌入的形式使用，仅用于简单的数据展示，如 Simbad, VizieR, GLIMPSE360, ADS allsky, AstroDEEP, CDS portal v2 等。我们将分别介绍功能强大的在线可视化系统 Aladin Lite 和 ESASky，及作为网页嵌入形式使用的 Aladin Lite。

4.1.1 Aladin Lite

Aladin Lite 页面简洁明快，专为天文学家开发设计。打开 Aladin Lite，利用搜索框人们可以快速定位目标天体。最下方的缩略图显示了其他巡天项目中的该天体图像。在基本图像层选项下可以选择更多不同巡天项目拍摄的该天体图像，方便进行同一天体的对比判断。如果想知道 SIMBAD (Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data)、Gaia TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution) 或者 2MASS 项目对该天体附近的哪些点源或展源进行了观测以及观测源的详细信息，可以选择左侧叠加层或右侧星表选项，结果将以不同颜色和形状叠加在图像层之上。如果对预设不满意，人们还可以自行改变颜色、大小及形状，系统设计非常人性化。如图 9 所示，底图为 DSS 巡天图像，之上叠加了 2MASS (红色十字图形) 和 Gaia TGAS (蓝色矩形) 星表图层，Aladin Lite 简洁的风格为科研人员提供了高效的数据服务功能。

[①] http://worldwidetelescope.org/Learn/Exploring#processingallskyimages

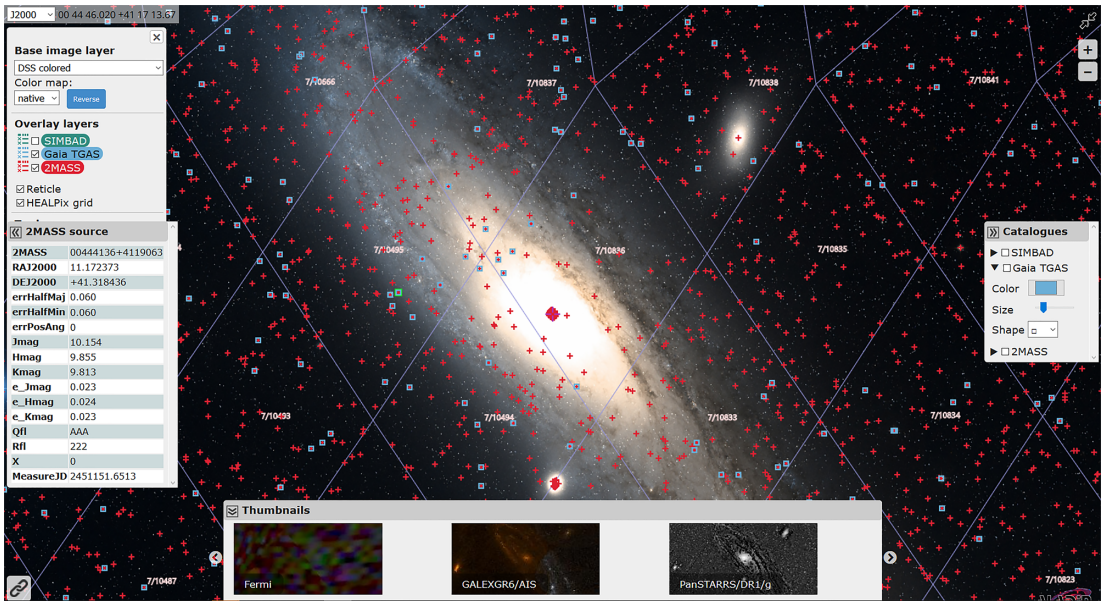


图 9　Aladin Lite 页面截图

Aladin Lite 已经被集成在主要的 CDS 服务中，如在 SIMBAD 的单个天体目标页面[①]上，它提供了一个交互式预览图像，而在 VizieR 结果页面[②] 则包含一个启动 Aladin Lite 按钮，用于定位可视化列出源。在 CDS 之外，根据各自需求，Aladin Lite 在很多项目中都有不同应用。这些应用主要可以分为两种：一种是基于 Aladin Lite 进行功能拓展；另外一种是将 Aladin Lite 作为网页嵌入的形式使用。

4.1.2　ESASky

ESASky 在 Aladin Lite 基础上进一步开发，并进行了功能扩展。该系统使得搜索更加方便，功能更加丰富，目前版本为 ESASky2.2.1[27,,28]。打开 ESASky2.2.1，我们发现与 Aladin Lite 类似，其页面十分简洁明快。在底图展示方面，可以在 Select Sky 下根据波段进行选择，也可以在某个确定波段下选择不同的巡天任务生成的图像。在搜索方面，Target List 选项提供了按照天体类别进行搜索的方法，如亮星系、亮星云、暗星云、球状星团、X 射线脉冲星、γ 暴和星系团等。如果没有目标天体，只想随便看看，可以点击 Explore random target，系统会随机加载不同类别的天体并显示该天体的基本信息。除了图像和星表展示，ESASky 还能显示当前区域的光谱数据和公开的数据，并以表格的形式列于下方。在表格的左侧还提供了定位、发送表格到虚拟天文台应用以及下载的功能，极大方便了科研人员。如图 10 所示，底图上叠加的不同颜色的图形分别代表了当前区域 HST 拍摄的图像、Gaia DR2 的星表、钱德拉 X 射线天文台 (Chandra) 光谱数据，并以表格的形式在下方依次列出。与 Aladin Lite

[①]http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=M1

[②]http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-4?-source=I/259/tyc2&-c=M45&-c.rm=30

相比，ESASky 的数据服务功能更加强大。

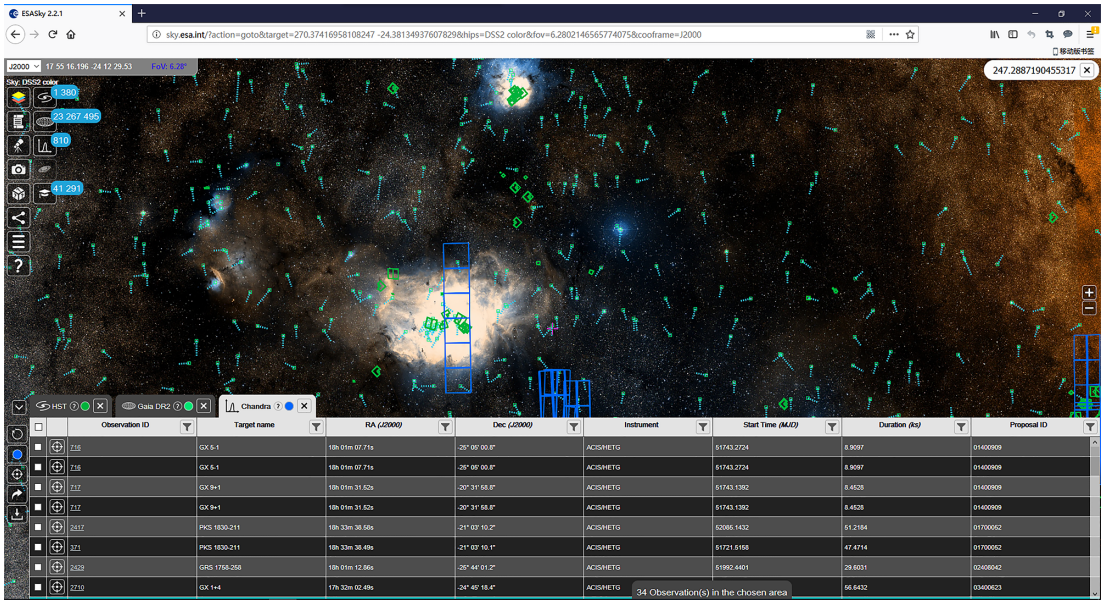


图 10 ESASky 2.2.1 页面截图

4.1.3 网页嵌入形式应用的 Aladin Lite

在很多项目中，人们将 Aladin Lite 作为网页嵌入形式使用，进行数据的简单展示。如图 11 所示，GW170814 interactive skymap[①]显示了 LIGO 和 Virgo 天文台共同检测到的引力波事件 GW170817 在天空中的位置；Skymap Viewer[②] 显示来自 LIGO 和 Virgo 的引力波事件的概率轮廓；CADE (Centre d'Analyse de Données Etendues) 使用 Aladin Lite 来提供他们发布的 HEALPix 天图的预览 (CGPS 数据为例[③])；ADS All-Sky Survey[④]使用 Aladin Lite 显示文献中引用的 SIMBAD 目标天体的热点图等。

值得关注的是，欧洲空间局对巡天卫星 Gaia 近期发布的第二批数据，同样使用 HiPS 技术进行可视化，以 Aladin Lite 嵌入的形式展示[⑤]。

4.2 基于 TOAST 的在线可视化系统

WWT 最初由微软亚洲研究院开发，包括桌面版 WWT (WWT Desktop) 和网页版 WWT (WWT Web Client)。2015 年 7 月，微软将 WWT 代码开源及所有权移交至美国天文学会。中国虚拟天文台基于 WWT 源代码开发适合中国公众使用的 WWT 版本，称为“万

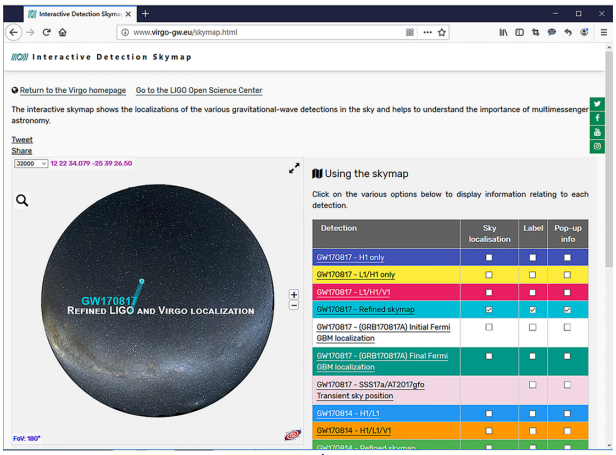
[①] http://www.virgo-gw.eu/skymap.html

[②] https://losc.ligo.org/s/skymapViewer/aladin/index.html#GW150914:LALI

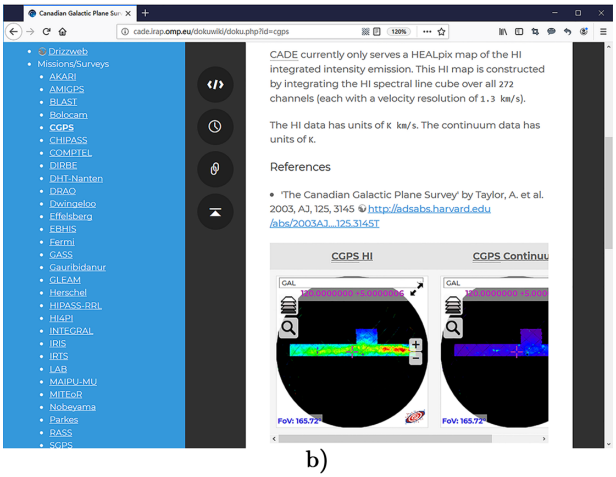
[③] http://cade.irap.omp.eu/dokuwiki/doku.php?id=cgps

[④] http://www.adsass.org/aladin/

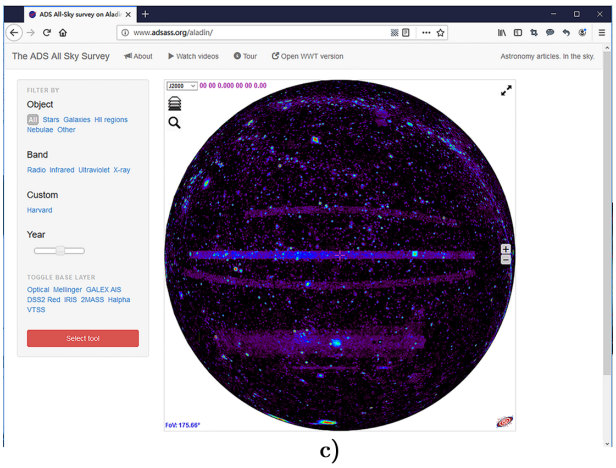
[⑤] http://gea.esac.esa.int/archive/visualization/



a)



b)



c)

图 11　几个使用 Aladin Lite 作为网页嵌入形式使用的项目

维望远镜”，并于 2018 年 2 月正式发布个人版万维望远镜。

WWT 的资源组织方式为“底图 + 信息层”[29]，其底图与 Aladin Lite、ESASky 等主要用于科学研究的在线可视化系统一样，集成了全球各大地基、空基的天文设施的科学数据。使用者可以在不同波段观察目标天体，但信息层更丰富。底图之上叠加了星座连线、星座图案、星座名称，以及各种天球坐标网格等图层，而在中国虚拟天文台版的 WWT 中还可叠加中国星空图层。如图 12 所示，与 Aladin Lite 和 ESASky 相比，WWT 具有更强大的面向科研人员的数据服务功能，体现了强大的面向公众的知识探索功能。

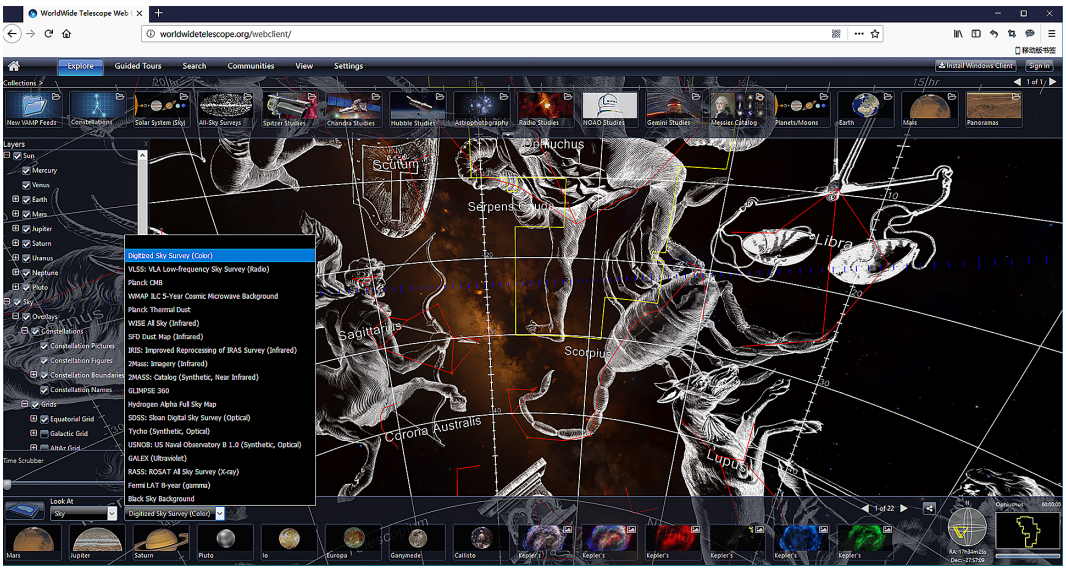


图 12 WWT 页面中的底图与信息层

Aladin Lite 和 ESASky 只对巡天数据进行展示，而 WWT 还加入了行星数据 (地球、月球、火星、太阳和木卫一等) 和全景数据 (月球探测和火星探测全景图) 展示。在 Look At 下更改观测指向，我们可以与玉兔号一起欣赏虹湾地区的风景，也可以凝视我们这颗蔚蓝色的星球以及她的兄弟姐妹。

面向公众的教育系统是微软对 WWT 的定位，因此其具有很多适合公众的功能[29,30]。向导漫游 (Guided Tours) 是 WWT 的最大特色，该菜单下有很多“漫游”(Tour) 可供使用者欣赏学习。WWT 还有其他一些特色功能，如通过更改观测地点和时间，我们可以重温 2008 年发生在我国大西北的日全食，重现 2012 年那世纪绝唱的金星凌日。

一些天文数据中心也将 WWT 作为网页嵌入的形式使用，比如 GLIMPSE360 就同时提供了斯皮策空间望远镜的红外银河图像在 WWT 和 Aladin Lite 模式下的可视化展示，如图 13 所示。WWT 不仅是一架桌面虚拟的望远镜，同时还是一个内容非常丰富的知识库，提供交互式的知识共享和学习环境。只需要轻轻点击鼠标右键，您便会得到目标天体相关的信息资料。由于其可以访问的大量数据以及它所连接的服务数量不断增加，WWT 为研究人员、教师和学生在无缝天文环境中使用提供关键技术[31]，WWT 也是天文学家和科学教育工作者

开展科研工作或科普教育的极佳平台[32,33]。

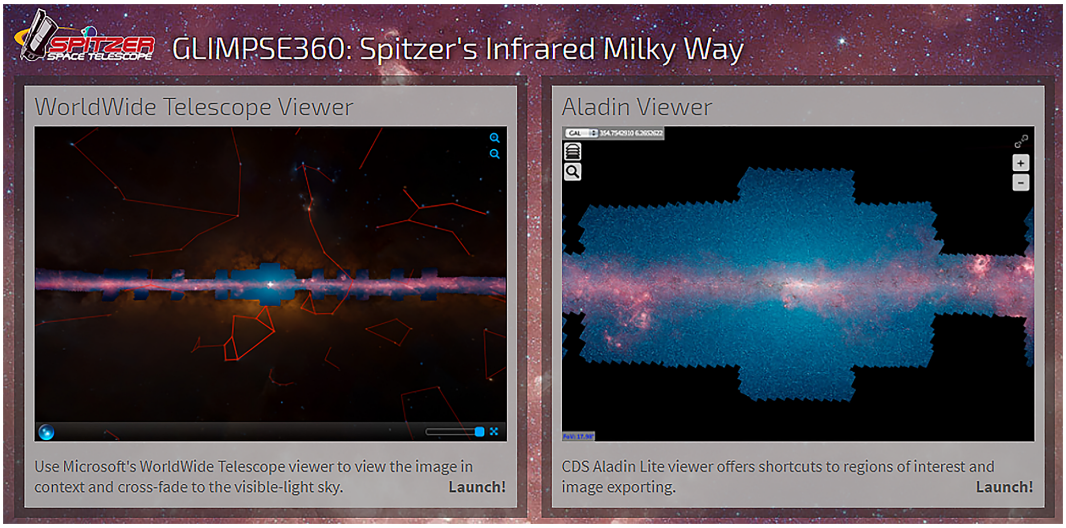


图 13　GLIMPSE360 同时提供了红外银河图像在 WWT 或 Aladin Lite 中的展示

4.3　基于球面矩形逐层划分的在线可视化系统

Google Sky 和 WikiSky 采用了与互联网地图一样的 Mercator 投影，基于球面矩形对巡天数据进行逐层划分，使用 Leaflet 等 JavaScript 库在浏览器端对巡天数据进行展示。这两个在线可视化系统拥有强大的科普功能，主要用于天文科普。

4.3.1　Google Sky

Google Sky 是 2008 年 3 月 13 日发布的一个基于浏览器的应用程序，由谷歌与空间望远镜科学研究所 (Space Telescope Science Institute, STScI) 合作开发。与 WWT 一样，Google Sky 使用“底图 + 信息层”的方式组织资源。底图由 SDSS, DSS 和 HST 所观测到的图像拼接而成。其他波段的图层来自钱德拉 X 射线天文台的 X 射线数据、GALEX 星系演化探测器的紫外图像、IRAS 的红外图像以及 WMAP 的微波图像[34]。Google Sky 不仅可以显示不同波段的星空，还能同时显示多个波段图像，如只需调整滑块位置即可同时观看 M81 在光学和红外波段的图像。Google Sky 的信息层比 WWT 略显单一，如星座图层只有黄道十三星座，不能显示赤道和黄道等坐标网格。历史星座图层是 Google Sky 的一个特色，该信息层由 David Rumsey 历史地图集中的历史地图创建，为使用者提供一个了解古代星座的窗口。

Google Sky 使用的标记语言为 KML (Keyhole Markup Language)[35]，因此其具有整合、显示和分享用户生成的数据 (图像、星表、时间变化数据、天空漫游以及课程计划) 的能力。由于 KML 完全独立于平台，因此 Google Sky 能轻松实现数据共享。

4.3.2　WikiSky

WikiSky 也被称为 Sky-Map，是具有互动性和非商业性的网站。该网站加载速度快，使用图形界面导航相当直观。与 WWT、Google Sky 等系统一样，WikiSky 的底图也使用

SDSS 以及其他巡天数据，允许用户选择不同的巡天、进行缩放以及选择天体目标[36]。但 WikiSky 的底图数据来源相对较少，并且只进行巡天数据展示，如图 14 所示。Wikisky 的信息层也较丰富，这是因为其允许用户为网站做贡献并互相交流。该网站允许访问者通过公开聊天或在论坛上发帖进行互动。使用者还可以通过编写文章、添加 Internet 链接、上传图像或为特定任务创建特殊兴趣组来编辑关于不同天体的信息。用户也可以上传星空区的照片，并将星图上的天体与照片上的天体结合在一起。

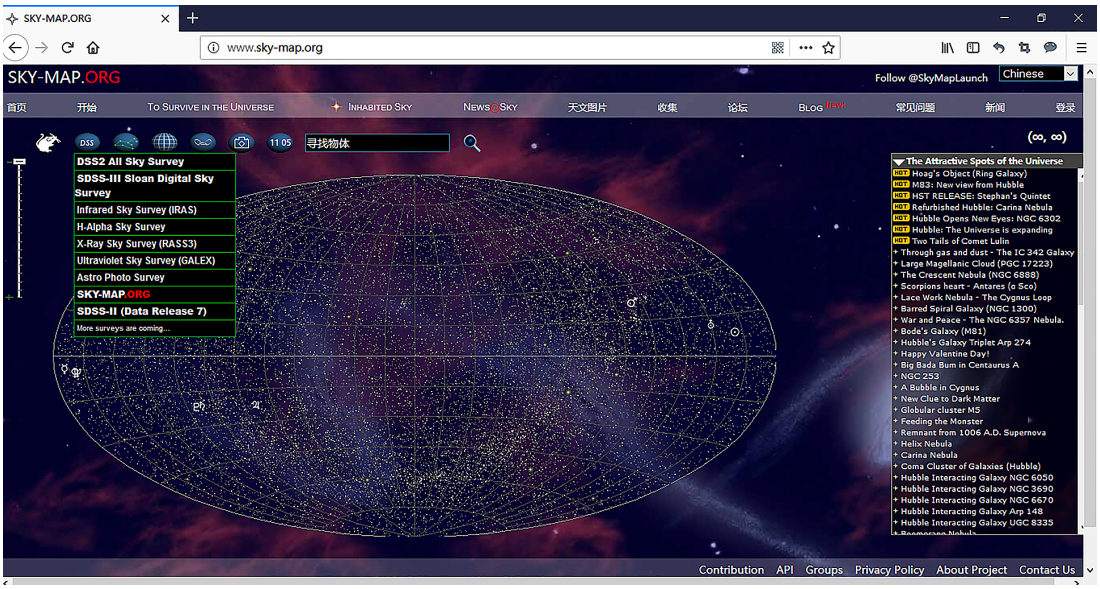


图 14 WikiSky/SKY-MAP

由于各在线可视化系统开发背景不同，因此服务的群体有所不同。Aladin Lite 从 Aladin 天空图集发展而来，ESASky 基于 Alaidn Lite 开发，都是基于各自数据中心的数据服务系统，底图上叠加了星表、光谱、观测区域、文献等图层，因而科研色彩浓厚。WWT、Google Sky 和 WikiSky/SKY-MAP 三款系统的最初开发目的就是建立科普教育系统，底图上叠加了星座连线、星座图案、天球坐标等图层，漫游或 KML 功能让知识更易于分享，因而系统有助于人们进行科普教育。各在线可视化系统在服务各自的目标群体的基础上，逐步完善、改进功能，以期为使用者提供更好的服务。

目前所有在线可视化系统均已实现多波段数据的融合显示，有利于天文学家进行证认。然而天文学目前已从多波段天文学时代进入多信使天文学时代，如何将多波段数据与引力波、中微子和宇宙线数据融合，使在线可视化系统实现多信使数据的融合显示是目前一个值得研究的方向。此外，实现这些在线可视化系统在手机端展示，方便用户随时随地使用，以及开发球幕、虚拟现实、增强现实显示功能，提升用户体验，也是研究的热点方向。

5 总 结

目前人们已开发出 Aladin Lite, ESASky, WWT 和 Google Sky 等多个成熟的在线可视化系统，并广泛应用于科学研究以及科学普及。海量巡天数据在线可视化系统仍有一些需要改进或者完善的地方。首先，分层存储导致了数据量的再次增加；其次，现有工具在拼接巡天图像和切分瓦片时性能欠佳，应对其开源的工具进行二次开发，缩短全天图像拼接所需时间；最后，应考虑将多波段数据与引力波、中微子、宇宙线数据融合，使在线可视化系统实现多信使数据的融合显示以及开发球幕、虚拟现实、增强现实等多种不同方式的展示功能。

随着我国巡天望远镜 LAMOST、大射电望远镜 FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) 相继建成使用，以及 12 m 光学/红外望远镜、110 m 射电望远镜的立项建设，国内望远镜产生的巡天数据将急剧增加。如何方便获取、快速分析和有效展示这些海量数据，是摆在国内天文学家面前的一个现实问题，因此开发一套在线可视化系统就显得十分必要。应采用多种技术相结合，实现在同一平台上分层显示数据融合结果及相关区域的多种不同观测数据，方便天文学家对观测数据或计算结果进行快速判断，并以可视化的方式提供多波段数据下载，减少天文学家多方收集数据的麻烦。另一方面，基于国内望远镜所设计的数据在线可视化系统，天文教育者可以充分利用虚拟天文台丰富的资源和先进的技术开展科学数据驱动的天文教育、教学和科学普及活动，同时倡导 e-Science、探究式学习和全民科学等先进的科学理念，有利于实现科技创新。

致谢

本论文得到中国虚拟天文台和中国天文数据中心提供的数据资源和技术支持。中国天文数据中心得到科技部国家科技基础条件平台项目“地球系统科学数据共享服务平台”和“国家基础科学数据共享服务平台”(DKA2017-12-02-07) 的资助。感谢国家天文台-阿里云天文大数据联合研究中心对本项工作的支持。

参考文献：

[1] Goodman A A. Astronomische Nachrichten, 2012, 333(5-6): 505
[2] Yu W, Kind M C, Brunner R J. Astronomy and Computing, 2017, 20: 128
[3] Baines D, Giordano F, Racero E, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017, 129(972): 028001
[4] Goodman A A, Borkin M A, Robitaille T P. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1805/1805.11300.pdf, astro-ph/1805.11300, 2018
[5] Bertin E, Pillay R, Marmo C. Astronomy and Computing, 2015, 10: 43
[6] 周侗, 龙毅. 地理与地理信息科学, 2012, 28(05): 1
[7] 曹周键. 大学物理, 2018, 37(02): 1
[8] Goodman A A, Udomprasert P S, Kent B, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2011, 442: 659
[9] Fernique P, Boch T, Pineau F, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2014, 485: 281

[10] Fernique P, Oberto A, Boch T, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2010, 434: 163
[11] 赵青, 孙济洲, 于策, 等. 计算机应用, 2010, 30(08): 2056
[12] 张海龙, 冶鑫晨, 赵青, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(05): 48
[13] Gorski K M, Hivon E, Banday A J, et al. Astrophysical Journal, 2004, 622(2): 759
[14] Fernique P, Allen M, Boch T, et al. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1708/1708.09704.pdf, astro-ph/1708.09704, 2017
[15] Allen M G, Fernique P, Boch T, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2017, 512: 61
[16] Fernique P, Allen M G, Boch T, et al. A&A, 2015, 578: 1161
[17] 梁青青, 李晖, 周彧, 等. 电子技术应用, 2017, 43(11): 116
[18] Szalay A S, Gray J, Fekete G, et al. https://arxiv.org/ftp/cs/papers/0701/0701164.pdf, astro-ph/cs/0701164, 2007
[19] 周彧, 李晖, 梁青青, 等. 计算机工程与应用, 2018, 54: 86
[20] Ouaret M, Dufaux F, Tescher A G, et al. Optical Engineering and Applications. 2007, 10.1117/12.746122
[21] Boch T, Fernique P. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2014, 485: 277
[22] Berriman G B, Good J C, Laity A C, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2008, 382: 179
[23] Berriman G B, Good J C. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017, 129(975): 058006
[24] Berriman G B, Good J C, Rusholme B, et al. https://arxiv.org/pdf/1608.02649.pdf, astro-ph/1608.02649, 2016
[25] Berriman G B, Good J C, Laity A C, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2004, 314: 593
[26] Jacob J C, Katz D S, Berriman G B, et al. International Journal of Computational Science and Engineering, 2010, 4(2): 73
[27] Merín B, Salgado J, Giordano F, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2017, 512: 495
[28] Merín B, Giordano F, Norman H, et al. https://arxiv.org/pdf/1712.04114.pdf, astro-ph/1712.04114, 2017
[29] 崔辰州. 天文爱好者, 2008, 7: 63
[30] 吴蕴豪. 中国国家天文, 2015, 4: 110
[31] Goodman A, Fay J, Muench A, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2012, 461: 267
[32] 崔辰州, 徐艳. 天文爱好者, 2009, 6: 71
[33] Rosenfield P, Fay J, Gilchrist R K, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2018, 236(1): 22
[34] Connolly A S R, Ornduff T. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2008, 400: 96
[35] Scranton R, Connolly A, Krughoff S, et al. https://arxiv.org/pdf/0709.0752.pdf, astro-ph/0709.0752, 2007
[36] Mattison D. Searcher, 2011, 19(7): 20

Overview of Online Visualization Technology of Massive Sky Survey Data

ZHANG Lei[1,2], FAN Dong-wei[1], CUI Chen-zhou[1], HE Bo-liang[1], XU Yun-fei[1,2], CUI Shun[1,3], WANG Chuan-zhong[1,3]

(1. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Mechanical Engineering and Application Electronic Technology, Beijing University of Tech-

nology, Beijing 100124, China)

Abstract: The online visualization of massive survey data is one of the applications of multi-band data fusion, which plays an important role in astronomical research work and scientific popularization in the era of big data. In recent years, there have been more and more online map visualization systems such as Google Maps and other Internet maps. In order to solve the problem of the huge online survey load caused by the huge survey data generated by stitching, the astronomical community generally adopts the tile map technology. It hierarchically saves the data, loads it on the browser and displays it hierarchically. Layered visualization technologies such as HiPS (Hierarchical Progressive Surveys) and TOAST (Tessellated Octahedral Adaptive Subdivision Transform), as well as some surveying data mosaic and tile generation tools, such as Hipsgen.jar and Montage, have been applied to the development of online visualization systems such as Aladin Lite, ESASky and WWT (WorldWide Telescope). The online visualization of massive survey data has also encountered some problems that need to be solved, such as data stratification leading to a further increase in the amount of data, long time-consuming image mosaics, and multi-message data fusion display. This article reviews the layered visualization technology, the creation of tile map pyramid, and compares several popular online visualization systems. This article also discusses the problems encountered in online visualization and the direction of development.

Key words: online visualization; tile maps; massive survey data; HiPS