



# 星系紫外深场巡天观测进展

袁方婷<sup>1,2\*</sup>, 郑振亚<sup>1,2</sup>, RAHNA P. T.<sup>1</sup>, 林如秋<sup>1,2</sup>, 朱帅儒<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院上海天文台, 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

\*联系人, E-mail: [yuantf@shao.ac.cn](mailto:yuantf@shao.ac.cn)

收稿日期: 2021-03-30; 接受日期: 2021-05-18; 网络出版日期: 2021-11-24

国家自然科学基金(编号: 11773051, 12022303)、中国科学院高层次人才青年、中国科学院国际人才计划(编号: E085201009)和上海天文台重点培育计划资助项目

**摘要** 紫外波段是星系能谱分布中的重要部分. 其包含大量原子、离子和分子的共振线以及研究重要物理过程的连续辐射, 提供了理论研究重要的观测限制. 在星系研究中, 紫外辐射追踪大质量恒星, 是测量和理解宇宙中恒星形成历史的重要工具. 紫外辐射也可追踪大质量黑洞吸积盘, 是理解吸积物理过程的重要手段. 其涉及的关键科学问题包括宇宙正午时期的恒星形成历史与星系演化、宇宙重子物质缺失、宇宙再电离能量来源以及星系吸积和外流反馈等. 本文重点阐述了紫外深场巡天观测的发展现状及其在星系科学研究中心发挥的作用. 主要介绍了深场仪器的基本参数、深场观测的目的和任务, 以及数据及科学产出, 并对国内外正在计划中的未来紫外观测进行了总结和展望.

**关键词** 紫外辐射, 巡天观测, 望远镜, 星系演化

**PACS:** 95.85.-e, 95.80.+p, 95.55.-n, 98.62.Ai

## 1 引言

随着天文观测技术水平的发展, 现代天文观测由传统的光学波段扩展到从 $\gamma$ 射线到射电的多波段, 提供了更丰富的天体能谱信息. 其中, 紫外波段具有大量原子、离子和分子的共振线, 其对于研究天体的化学组成及物理性质起到关键作用. 紫外连续谱可追踪恒星形成、尘埃消光、黑洞吸积等重要物理过程, 为天体物理理论研究提供了重要的观测限制. 对于恒星和星系的观测, 紫外波段光子不仅受到地球大气的散射和吸收, 还会被恒星中H原子吸收,

也就是莱曼极限. 考虑这两方面, 我们可以将紫外波段定义为由星际气体吸收极限决定的912 Å到由大气消光影响的3000 Å之间<sup>[1]</sup>. 近紫外波段可延伸到3500 Å的部分.

由于静止紫外波段受到大气影响, 其观测必须依赖空间设备. 早期, 由于紫外观测技术上的限制, 使得紫外天文研究进展较为缓慢. 尽管如此, 研究者们依然利用有限的观测设施进行了紫外观测, 并在科学上取得了一定的进展. 最早的紫外观测由火箭搭载探测器进行. Baum等人<sup>[2]</sup>利用V-2火箭载仪器在1946年获得了太阳的紫外光谱. Kup-

**引用格式:** 袁方婷, 郑振亚, Rahna P T, 等. 星系紫外深场巡天观测进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 229801  
Yuan F T, Zheng Z Y, Rahna P T, et al. Ultraviolet deep imaging surveys (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 229801, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0089

perian Jr.等人<sup>[3]</sup>在10年后获得了59颗恒星的远紫外观测. Stecher和Milligan<sup>[4]</sup>于1962年利用火箭载光谱仪获得了恒星的低分辨率紫外光谱; Morton和Spitzer<sup>[5]</sup>在之后获得了恒星及星际介质的中分辨率紫外光谱. 随后, 紫外观测卫星的成功发射使得紫外天文研究获得了较大的进展. 其中, 空间天文台OAO2<sup>[6]</sup>对明亮恒星、球状星团和近邻星系系统进行了紫外测光和光谱观测, 对新星、彗星和行星等不同类型的天体也进行了观测<sup>[7]</sup>; 荷兰天文卫星(ANS)<sup>[8]</sup>对恒星、球状星团、行星星云和星系进行了观测; Orion-2获得了900颗暗星的紫外光谱<sup>[9]</sup>; 国际紫外探测器IUE<sup>[10]</sup>在1200–3000 Å波段获得了数千个具有不同分辨率的目标光谱, 为建立星系紫外部分的星族合成模型奠定了基础.

在21世纪之前, 一些仪器已经开展了紫外巡天观测, 包括: 欧洲空间研究所TD1卫星的巡天观测, 这是首个紫外全天巡天观测, 提供了低分辨率光谱和测光数据<sup>[11]</sup>; Skylab<sup>[12]</sup>使用阿波罗16号宇航员安装的月球照相机<sup>[13]</sup>和Spacelab FAUST仪器<sup>[14]</sup>进行的大视场紫外巡天观测; 紫外线成像望远镜UIT<sup>[15]</sup>进行的大量紫外图像观测; 气球载FOCA望远镜<sup>[16]</sup>获得了近域宇宙中星系的第一个FUV光度函数<sup>[17]</sup>, 并得出了恒星形成历史图上的第一个静止紫外锚点.

随着空间科学技术的发展, 越来越多的紫外天文望远镜投入使用. 紫外波段出现了更大视场和更深的观测. 近年来, GALEX<sup>[18,19]</sup>, Swift<sup>[20]</sup>, 哈勃空间望远镜(HST)以及Astrosat<sup>[21,22]</sup>等空间设备提供的紫外观测数据, 为恒星和星系天文研究带来了大量的信息. 除了成像观测, 紫外光谱观测对于星系研究起到不可忽视的作用. HUT<sup>[23]</sup>, FUSE<sup>[24,25]</sup>, GALEX, HST/COS<sup>[26,27]</sup>等空间任务提供紫外光谱数据, 为星际介质、类星体、恒星以及彗星等各方面的科学研究带来了重要的观测证据.

紫外波段科学的涵盖范围包含从行星到宇宙学的各个层级. 我们可以根据研究对象类型将紫外波段科学研究大致分成以下几个类别. (1) 行星及恒星相关. 比如, 紫外光谱观测可以提供关于行星大气的结构信息, 也可以用于研究恒星的光球层、色球层以及过渡区的结构, 并提供与磁场相关的活动

结构及其动力学信息. 紫外波段也被用于研究超新星抛射物质的动力学及其前身的金属丰度, 初期恒星体(YSO)及双星的吸积过程, 奇异星族(如蓝离散星、毫秒脉冲星、X射线双星及灾变变星等)的形成和演化过程等.

(2) 星系相关, 主要包括星系和活动星系核的研究. 紫外波段可追踪恒星形成率及其随宇宙年龄的演化, 从而跟踪宇宙物质聚集过程, 可以追踪超大质量黑洞的吸积过程以及活动星系核的光变等. 紫外观测对于星系的结构和演化研究起到重要作用. 星系相关科学是本文重点关注的内容.

(3) 星际介质相关研究. 其中, 紫外波段可对尘埃消光进行追踪, 从而对尘埃性质进行研究. 通过窄带或光谱观测对紫外吸收线的测量, 我们可以探测星系晕中无法被X射线观测到的较为低温的温热气体, 为解决宇宙重子物质缺失问题提供关键信息.

(4) 紫外背景辐射相关研究. 主要研究紫外背景辐射的性质和来源, 以及通过紫外背景辐射研究银河系的尘埃颗粒性质等<sup>[28–30]</sup>.

此外, 注意到除了我们定义的912–3000 Å之间的紫外辐射, 极紫外波段(90–912 Å, EUV)也是紫外观测的重要部分. EUV的观测对恒星、星际介质等研究起到重要作用. 其仪器设备包括EXOSAT<sup>[31,32]</sup>, ROSAT-EUV<sup>[34]</sup>, EUVE<sup>[35]</sup>等. EUV辐射源包括由于离子和电子在热的光学薄等离子体中的复合而产生的发射线光谱(比如超新星遗迹、星系团等)以及热辐射连续谱(比如热白矮星和中子星等). Bowyer等人<sup>[33]</sup>以及Barstow等人<sup>[36]</sup>对EUV观测和科学进行了详细的总结.

综上所述, 紫外波段涉及的科学范围十分广泛, 本文将着重总结和探讨紫外深场成像观测(近紫外波段极限星等达25 mag)与星系科学相关的部分内容.

正文第2节总结现有的紫外深场观测及其科学目标和产出; 第3节简要介绍一些正在计划中的重要紫外观测项目以及这些项目关注的科学方向; 第4节介绍紫外观测对星系研究的作用及紫外星系科学的主要研究内容. 最后第5节对紫外星系研究的现状和未来发展作出总结.

## 2 现有的主要紫外深场巡天项目

### 2.1 GALEX深场

星系演化探测器(Galaxy Evolution Explorer, GALEX)<sup>1)</sup>是一颗以研究年轻恒星和星系及其形成和演化机制的紫外天文卫星。GALEX发射于2003年4月28日,于2013年6月28日停止使用,但它所获得的数据仍然被广泛使用。GALEX紫外巡天是星系紫外研究的一次重要革新,为紫外天文研究带来了大量的数据和科学进展。GALEX装载的望远镜口径为50 cm,其圆形视场直径为1.2°。这种大视场为其巡天观测带来了极大的便利,使得GALEX可以高效地完成全天巡天任务。GALEX成像波段为远紫外波段(FUV)和近紫外波段(NUV),其中心波长分别为1528和2271 Å。成像分辨率在FUV达到4.3'', NUV则达到5.3''<sup>[37]</sup>。

GALEX进行了大量的巡天观测,并且对于不同的科学目标设置了不同的巡天范围和深度。这些巡天包含了较低深度的全天巡天(AIS)、中深度巡天(MIS)以及深场巡天(DIS)。其中,DIS曝光时间为30000 s,面积80平方度。深度在FUV可达到24.8 mag,在NUV为24.4 mag。GALEX在其深场计划中还包含了极深场观测(UDIS),为7平方度,  $30 \times 10^4$  s曝光观测<sup>2)</sup>。但在其GR6/7释放的数据中,曝光时间大于 $20 \times 10^5$  s的数据仅有一个视场大小,约1.1平方度(图1)。值得注意的是,GALEX在近紫外波段的观测深度主要是由致混淆极限(Confusion Limit)所决定的。由于其分辨率不够高,当进行深度观测时,紫外源的密度随曝光时间不断增高,最终导致源和源之间无法分开。达到致混淆极限后,曝光时间的增加无法再提高探测深度。

GALEX的观测量十分庞大,除了主项目中的DIS,其Legacy巡天中也设置了深场项目,即Legacy Deep Survey。曝光时间和DIS相同,巡天面积达到100平方度。另外,除了成像数据,GALEX还提供了十分珍贵的紫外光谱数据,这些数据为星系中恒

星形成和尘埃消光等方面的研究提供了重要材料。

科学方面,GALEX深场数据不仅被用于研究近邻星系静止紫外波段的结构和形态,也为中高红移处星系结构和演化方面的研究带来了极大的进展。一些利用深场数据的研究工作包括: Arnouts等人<sup>[38]</sup>结合GALEX和VIMOS-VLT数据对1500 Å处的光度函数进行了分析,并根据紫外光度测算出恒星形成率密度随红移的演化。Zamojski等人<sup>[39]</sup>2007年的工作则利用GALEX深场数据结合HST数据对红移0.7处的星系形态进行了分析,为星系形态和结构演化的理论提供了进一步的证据。2010年Buat等人<sup>[40]</sup>利用深场数据结合Herschel远红外观测数据,准确测定了 $0 < z < 1$ 连续红移区域的恒星形成历史,并将其与仅由紫外或红外部分测得的恒星形成率进行了比较,证明对于远红外较暗的星系,必须结合紫外和红外波段准确测量恒星形成率。

GALEX的观测对于揭示星系如何由年轻而恒星形成活跃的初期阶段演化至成熟而较为稳定的系统起到了关键作用。特别是观测到年老星系中存在一些年轻恒星的环状结构,对星系形成和演化理论进行了有效的限制。然而,GALEX的成功依然局限于中低红移的星系。对于更高红移处( $1 < z < 3$ )的星系,我们需要观测2000–3500 Å的近紫外数据来获取静止坐标系下星系远紫外波段的信息<sup>[41]</sup>。

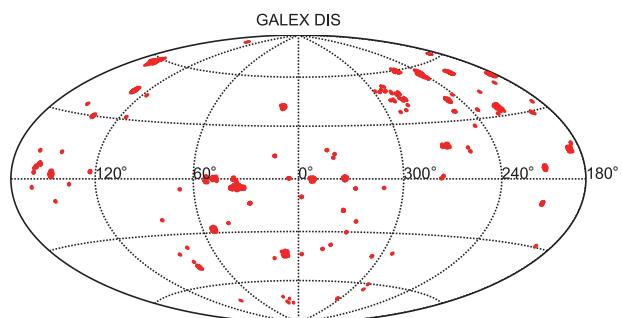


图1 (网络版彩图) GALEX深场巡天DIS观测覆盖范围(根据GALEX数据DR6/7中DIS观测绘制)。图为赤道坐标

**Figure 1** (Color online) Coverage of GALEX Deep Imaging Survey, in equatorial coordinates, according to the data from GALEX DR6/7.

1) <http://www.galex.caltech.edu/>

2) <http://www.galex.caltech.edu/researcher/techdoc-ch2.html#5>。而根据<https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/galex/surveys/index.html#DSF>, 为4平方度, $20 \times 10^5$  s曝光观测

## 2.2 Swift UVOT深场

雨燕卫星(*Swift*)全称伽马暴快速反应探测器,是一颗用于观测伽马射线暴的天文卫星. 其集成了不同波段的望远镜, 工作在伽马射线、X射线、紫外及可见光波段. *Swift*紫外光学望远镜(UV/Optical Telescope, UVOT)<sup>[42]</sup>也被用于紫外深场观测. UVOT观测波段范围为1700–6500 Å. UVOT的口径为30 cm, 视场为 $17' \times 17'$ . UVOT的空间分辨率比GALEX略高, 其图像PSF约在 $2.67''$ – $3.3''$ 之间.

UVOT的深场观测在CDFS天区(图 2). 其中包括三个NUV波段(uvw2: 1928 Å, uvm2: 2246 Å, uvw1: 2600 Å)以及一个u波段(3645 Å)的观测. *Swift* UVOT观测提供了GALEX未观测的大量紫外数据. 这些数据和CDFS中其他波段数据结合, 为星系演化研究提供了更丰富的信息. 然而, *Swift*的首要科学目标是追踪GRB以及GRB的afterglow观测, 受到星系研究的关注度较低. 而且由于其望远镜性能制

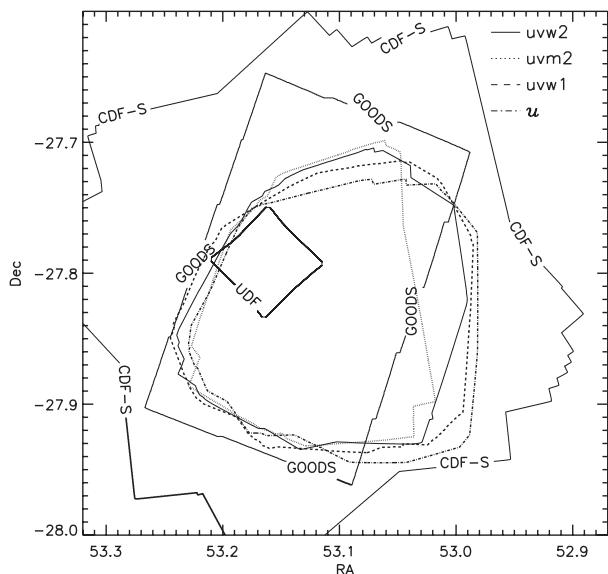


图 2 *Swift* UVOT CDF-S天区观测视场. 其中, uvw2, uvm2, uvw1和u分别表示为实线、点线、虚线和虚点线. 这些线标示了达到最大曝光时间98%的区域. 图片来自参考文献[43]

**Figure 2** Field of view for *Swift* UVOT CDF-S observations. The contours are the coverage of uvw2 (thin solid line), uvm2 (dotted line), uvw1 (dashed line), and u (dot-dashed line). These areas are observed with at least 98% of the maximum exposure time. The figure is taken from ref. [43]. ©AAS. Reproduced with permission.

约, 其深场观测没有达到很高的深度. Hoversten等人<sup>[43]</sup>关于深场星系计数的研究工作表明, UVOT在紫外波段最深可达约25 mag. 不过近年来, 一些研究结合UVOT数据和斯隆望远镜近邻星系巡天(SDSS-MaNGA)项目<sup>[44]</sup>的二维光谱信息, 对星系中恒星形成、尘埃消光和星系演化过程进行了研究. 由于UVOT观测的空间分辨率和MaNGA匹配, 未来这些数据可能对近邻星系结构和演化研究起到很好的辅助作用<sup>[45,46]</sup>.

## 2.3 HST中的紫外深场

著名的哈勃空间望远镜(HST)上加载了紫外观测终端, 可进行紫外波段观测. HST的口径为2.4 m, 远远大于GALEX和Swift UVOT的口径. 其空间分辨率在紫外波段约为 $0.1''$ . HST很早就加载了紫外模块, 比如在2004年ACS (Advanced Camera for Surveys)上即加载了SBC (Solar Blind Channel)和HRC (High Resolution Channel)这些可进行紫外波段观测的模块<sup>[47]</sup>. 还有STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph)<sup>[48,49]</sup>和COS (Cosmic Origin Spectrograph)等可进行紫外光谱观测的模块. 目前HST的紫外深场观测主要使用WFC3 (Wide Field Camera-3)的紫外/光学(UVIS)通道进行. 该仪器具备两块 $2k \times 4k$ 的CCDs; 像元尺度为 $0.04''$ ; 视场 $162'' \times 162''$ ; 波长覆盖200–1000 nm<sup>[50]</sup>.

HST利用其大口径、高分辨率的优势, 使用WFC3/UVIS仪器对近紫外波段进行深度观测, 希望弥补红移1–3处星系静止紫外波段观测的空缺. WFC3/UVIS仪器上天后不断进行观测, 积累了丰富的近紫外波段数据. 除了在较大型的多波段巡天项目ERS (Early Release Science)<sup>[51]</sup>和CANDELS (Cosmic Assembly Near-IR Deep Extragalactic Legacy Survey)<sup>[52,53]</sup>中包含了紫外深场观测外, HST中UVUDF (Ultraviolet Ultra Deep Field)<sup>[41]</sup>和Hubble Deep UV Legacy Survey)<sup>[54]</sup>项目还专门针对近紫外波段进行了深场观测. 这里我们整理了这些较为大型的HST紫外深场观测项目(图 3).

(1) ERS项目. 该项目是使用WFC3仪器观测的早期科学项目. ERS对一些星系进行了深度观测. 该

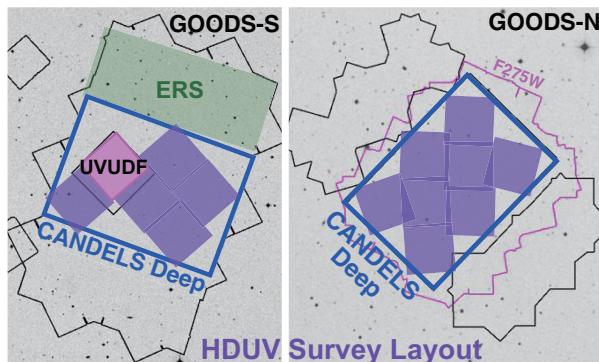


图3 (网络版彩图) HST紫外深场观测天区. 绿色表示ERS观测天区, 紫红色表示UVUDF天区. 蓝色方框为CANDELS深场区域, 紫色表示HDUV天区. 图片来自参考文献[54]

**Figure 3** (Color online) Coverage of Hubble Deep UV Legacy Survey (purple squares). The green represents the coverage of the ERS survey. The magenta represents the coverage of the UVUDF survey. The blue rectangles represent the coverage of CANDELS. The figure is taken from ref. [54]. ©AAS. Reproduced with permission.

深度观测的星系样本虽然比较小, 但非常具有代表性. 观测数据被用于研究红移1–3的星系形成和演化过程. ERS项目中包含了50平方角分的NUV图像数据, 在F225W, F275W和F336W波段分别有2, 2, 1轨道深度的观测. 可达AB星等深度26.9 mag.

(2) CANDELS项目. CANDELS项目主要针对星系和宇宙学研究, 其通过大样本和深度观测, 研究红移1.5–8的样本星系. 项目主要使用WFC3/IR和ACS进行观测. CANDELS的观测中也包含一些紫外数据. 在CANDELS-GOODS-N中包含了78平方角分的WFC3/UVIS F275W波段的观测数据. 深度可达27.2 mag (使用AB星等, 0.2''孔径下,  $5\sigma$ 深度).

此外, Teplitz等人<sup>3)</sup>利用哈勃空间望远镜对CANDELS覆盖的几个天区进行了WFC3/F275W和ACS/F435W波段的观测, 即UVCANDELS项目. 该项目包含164个轨道的观测, 覆盖GOODS-N, GOODS-S, EGS以及COSMOS四个天区, 总面积达到430平方角分,  $5\sigma$ 深度达到AB星等27 mag. CANDELS为研究星系演化和恒星形成带来了大量紫外数据, 并为JWST未来的观测预备了紫外部分的数据, 其相关科学结果正在不断发表<sup>[55, 56]</sup>.

(3) UVUDF项目. UVUDF对哈勃极深场(HUDF)天区进行了紫外深场观测, 丰富了哈勃极深场的数据. 通过深场紫外观测, UVUDF提供了星系中恒星形成及尘埃消光等信息, 对研究红移1–3处的星系演化过程起到了重要作用. UVUDF的深场包括90轨道HST观测项目, 使用F225W, F275W以及F336W波段进行观测, 故每个波段有30个轨道观测深度. UVUDF的紫外观测数据深度最高可达到29 mag.

(4) HDUV项目. HDUV对GOODS天区中心进行了紫外深度观测. HDUV对红移 $z \sim 0.5$ –2的大量低光度恒星形成星系进行了全面的观测, 为研究星系哈勃序列形成过程提供了重要的数据支撑. HDUV深场共包括132轨道观测, 主数据包括10轨道观测深度的F275W波段观测和8轨道观测深度的F336W波段观测. 共使用WFC3/UVIS观测13个指向位置, 覆盖包括GOODS-S和GOODS-N中央部分共约100平方角分的区域. 因为在GOODS-N可利用连续可见区(Continuous Viewing Zone, CVS), 所以和GOODS-S的观测模式有所区别. 其F275W波段观测在GOODS-N的观测深度达到27.4 mag, GOODS-S达到27.6 mag.

HST的紫外深场为星系研究提供了大量优质数据. 这些观测给星系研究带来了丰富的结果. 利用HST紫外深场数据, 研究者们对星系进行了多方面的探索. 首先, 紫外数据常用于消光研究. 利用UVUDF的数据, Walter等人<sup>[57]</sup>在2016年研究了星系的尘埃消光IRX- $\beta$ 关系, 即红外辐射和紫外辐射流量比与紫外光谱斜率之间的关系. 他们发现了这个关系和星系的恒星质量具有相关关系. 同样, Reddy等人<sup>[58]</sup>在2018年利用HDUV紫外数据探索了这个关系, 分析了观测所得的IRX- $\beta$ 关系对应的尘埃消光率, 并指出对于紫外暗的星系, 观测得到较蓝的紫外颜色可能并非由于其尘埃消光弱, 而是由于星族性质导致其光谱本身就更蓝.

HST紫外数据具有的高空间分辨率使得研究者们可以利用这些数据对星系结构进行分析. 如Wuyts等人<sup>[59]</sup>在2013年结合CANDELS多波段数

3) <http://uvcandeles.ipac.caltech.edu/>

据研究了红移0.7–1.5的恒星形成星系的图像, 通过比对H $\alpha$ 和紫外流量, 他们指出研究星系结构可能受到星系中消光和星族分布不均匀导致的选择效应的影响. Bond等人<sup>[60]</sup>2014年对红移0.5–1.5的星系的紫外结构进行了研究. 他们使用UVUDF和HUDF的数据, 得出星系有效半径 $R_{50}$ 和集中度 $C$ 随波长的变化, 以及这种变化和星系尺度是否相关. 发现集中度在不同波长的差别和星系大小相关. 大星系的集中度在远紫外波段下降更为明显. Soto等人<sup>[61]</sup>2017年利用UVUDF的数据对星系中的团块进行了研究. 这些团块的演化和星系中恒星形成及结构演化相关. 他们发现星系外围团块相比星系中心更加年轻而具有更高的恒星形成, 意味着团块形成于外围, 然后迁移至星系中心并与核球合并. 该结果和团块迁移理论相一致.

紫外数据是恒星形成率的测量指标. 大量工作利用紫外数据对星系的恒星形成性质进行了研究. 利用这些数据, Kurczynski等人<sup>[62]</sup>, Curtis-Lake等人<sup>[63]</sup>研究了恒星形成主序(即恒星形成率-恒星质量关系)的弥散程度受到哪些星系性质的影响. Tacchella等人<sup>[64]</sup>2018年研究了红移2左右的星系中的尘埃消光和核球形成; Carnall等人<sup>[65]</sup>2020年研究了高红移的大质量宁静星系(恒星形成活动弱). Mei等人<sup>[66]</sup>2015年利用HUDF光学近红外, UVUDF, CANDELS+3DHST WFC3/IR G141 grism光谱观测, 在两个星系团中心发现有恒星形成的早型星系(ETGs). 这些具有恒星形成活动的ETGs最有可能是现在宇宙中星系团中宁静星系的前身星系. 这些工作揭示了星系是如何从具有活跃的恒星形成演化成现在基本无恒星形成的熄灭(Quenching)过程. Rafelski等人<sup>[67]</sup>2016年发现恒星形成效率随红移变化不大, 认为恒星形成效率的改变主要是因为分子气体比例的减少. Morishita等人<sup>[68]</sup>2019年的工作则对金属丰度增丰过程进行了分析, 对恒星形成历史进行了一定的限制.

更直接利用紫外观测数据的研究是关于莱曼光子逃逸比例. 随着紫外深场数据的不断增多, 越来越多的研究着眼于寻找莱曼连续谱光子的观测证据. 由于HST在紫外达到极高的深度, 使得在探测中高红移处的莱曼连续谱光子研究取得了快速的进

展. 代表性工作包括Naidu等人<sup>[70–76]</sup>在红移2–4处的探测.

此外, 这些大量的紫外数据还被用于统计研究. 如Conselice等人<sup>[77]</sup>对紫外星系数密度的研究, 以及Alavi等人<sup>[78, 79]</sup>、Mehta等人<sup>[80]</sup>进行的紫外光度函数研究等. Driver等人<sup>[81]</sup>还利用HST的紫外数据对河外星系背景辐射(EBL)进行了限制.

最后, 结合紫外数据和其他波段数据对研究星系性质有极大的促进作用. 因此, 一些工作将紫外和其他波段信息统一起来, 整理成多波段数据表格. 这些表格在星系研究中具有极高的价值, 比如Rafelski等人<sup>[82]</sup>得到的紫外到近红外的数据, Nayyeri等人<sup>[83]</sup>对CANDELS数据的工作, 以及Williams等人<sup>[84]</sup>建立的JWST模拟星表等. 这些多波段数据对改进多波段能量光谱分布拟合方法也起到重要作用<sup>[85]</sup>. 这些工作都已经被多次引用.

## 2.4 Astrosat深场

印度Astrosat卫星装载了两台紫外光学望远镜(UVIT). 每台望远镜口径为37.5 cm. 其中一台用于FUV观测, 另一台用于NUV和光学观测. Astrosat UVIT的视场直径约28', 空间分辨率可达约1.2''. 波长覆盖范围为1300–3000 Å<sup>[86]</sup>. 不过, Astrosat的NUV通道2018年11月因故障停止使用. 目前FUV和光学观测仍可进行.

Astrosat UVIT也被用于深场观测. 其深场项目Astrosat Ultra-Deep Field (AUDF)的观测为研究LyC逃逸比例作出了比较重要的贡献. 在2020年最新的工作中, UVIT发现了红移为1.42的一个低质量星系中莱曼连续谱光子的逃逸比例超过20%, 首次探测到中高红移星系中的极紫外辐射. 为限制电离能谱形状作出了重要贡献<sup>[87]</sup>.

AUDF的观测和数据处理仍在进行, 未来有可能为宇宙正午时期具有莱曼连续谱逃逸现象的星系带来更多的数据和结果, 从而为宇宙再电离过程理论研究提供重要的依据.

## 2.5 小结

表1总结了用于紫外深场观测的望远镜及探测

器性质, 包括这些望远镜的使用时间、望远镜类型、焦比、口径等信息. 同时包含紫外探测器的探测机制、视场、点扩散函数(PSF)大小、观测波长范围等信息. 其中, GALEX的视场最大, 但空间分辨率最低. 而HST WFC3/UVIS的视场最小, 但分辨率最高. 望远镜和仪器的性质决定了观测所得深场数据的质量.

表2总结了现有的紫外深场巡天项目. 图4示意了深场巡天面积和深度. 可以看到, GALEX紫外深场的面积最大, 但深度不高. 而UVUDF观测的深度极高, 面积却仅有约6平方角分. HDUV达到了较高

的深度, 巡天面积也较为可观, 提供了比较理想的数据, 但HDUV最短波段仅到F275W提供的近紫外端, 无法提供更远紫外的信息. 随着科技发展, 紫外观测设备不断更新, 这些巡天的不足有望在将来的紫外观测计划中得到弥补.

### 3 下一代紫外望远镜计划

空间技术的迅速发展使得大量的观测计划开始涌现. 许多空间观测项目正在建设或筹备. 表3总结了目前收集到的紫外相关空间观测计划, 并对其中

**表1** 紫外深场观测望远镜仪器性质

**Table 1** Properties of telescopes used for UV deep-field observations

参数	GALEX	Swift UVOT	HST WFC3/UVIS	Astrosat UVIT
时间	2003-04-28–2013-06-28	2004-11-20至今	2009-05至今	2015-09-28至今
望远镜类型	RC	modified RC	RC	RC (两台)
焦比	6	12.7	31	12.7
口径	50 cm	30 cm	2.4 m	37.5 cm
探测器	MCP	强化CCD	CCD	CMOS
视场(FOV)	1.2° (直径)	17' × 17'	162'' × 162''	~28'
探测器单元	40962	虚拟2048×2048, 实际256×256	2×2051×4096	512×512
PSF	4.3''@FUV, 5.3''@NUV	2.67''–3.30''	~0.09''	< 1.8'' (1.2'')
波长范围	1344–2831 Å	1700–6500 Å	2000–10000 Å	1300–1800, 2000–3000 Å
灵敏度	–	B=22.3 白光1000s	–	FUV=20 200s
相元尺寸	1.5''	0.502''	0.0395''	0.41'' (JUDE处理管线格式)
亮度极限	–	v=7.4 mag	–	–
相机速度	–	11 ms	–	< 10 ms

**表2** 现有紫外深场观测总结

**Table 2** Current UV deep fields

巡天	波段(中心波长)	面积	天区	深度
GALEX DIS	NUV (1528 Å)	80平方度	全天	24.4
	FUV (2271 Å)			24.8
Swift	uvw2 (1928 Å)	132.7平方角分	CDF-S	~25
	uvm2 (2246 Å)	112.0平方角分		
	uvw1 (2600 Å)	143.2平方角分		
	u (3465 Å)	136.6平方角分		
HST ERS	F225W	~50平方角分	GOODS-S	26.3
	F275W			26.4
	F336W			26.1
CANDELS	F275W	78平方角分	GOODS-N	27.2
UVCANDELS	F275W	430平方角分	GOODS-S, GOODS-N, EGS, COSMOS	27
HST UVUDF	F225W	6.2平方角分	GOODS-S	28–29
	F275W			
	F336W			
HST HDUV	F275W	南: 43.4平方角分; 北: 56.5平方角分	GOODS-S, GOODS-N	南: 27.6; 北: 27.4
	F336W	南: 43.4平方角分; 北: 56.5平方角分	GOODS-S, GOODS-N	南: 28.0; 北: 27.8

和星系及深场相关的项目进行简要介绍。

### 3.1 中国空间站望远镜CSST

我国的空间站望远镜项目(China Space Station Telescope, CSST)口径为2 m, 和HST一样可进行在轨维护。CSST是21世纪20–30年代的旗舰级天文项目, 拟于2024年发射。CSST上配备了巡天模块、太赫兹模块、多通道成像仪、积分视场光谱仪、系外行星成像星冕仪等观测终端。CSST成像分辨率预计约为0.15'', 具有强大的观测能力。

CSST将包含紫外深场的观测。在CSST的主巡天(CSS-OS)项目中, 其相机视场可达1.1平方度。CSST主巡天中的大天区观测面积将达到17500平方度, 其NUV波段的深度将达到25.4 mag。CSST主巡

天中还设计了约400平方度的深场, 其在NUV波段可达26.7 mag。正在计划中的10 + 10平方度极深场深度可达27 mag。这些巡天不仅进行成像观测, 还将提供无缝光谱数据(光谱分辨率 $R \sim 200$ )。

除了主巡天, CSST还包含了后端仪器观测, 其中, 多通道成像仪(Multi-Channel Imager, MCI)将为我们提供更深的观测。MCI的视场约为 $7' \times 7'$ , 其核心科学目标之一为紫外光学超深场。超深场深度同HST极深场(XDF)相当, 预计在NUV波段可达到29 mag以上, 但其面积将远远大于XDF, 一幅超深场即可达到XDF面积的5倍。同时, MCI的三通道同时观测将为我们带来更高的观测效率和更精确的颜色测量。MCI在紫外波段还将设计中带、窄带波段滤光片的观测。

我们将CSS-OS和MCI深场的面积和深度画在

**表3** 未来针对或包括紫外波段观测的空间计划

**Table 3** Space telescopes for UV observations under construction or under study

项目名称	口径/视场	空间分辨率	光谱分辨率	科学目标	进展状况
空间站项目(CSST)	2 m/1.1平方度	0.15''	> 200	行星至宇宙学各个层级	预计2024年发射
WSO-UV	1.7 m/30'	0.1'' (115–176 nm)	高分辨率 $R \sim 50000$ , 低分辨率 $R \sim 1000$	行星至宇宙学各个层级	2025年升空
CETUS	1.5 m/17.4' × 17.4'	FUV 0.4'' NUV 0.3''–0.4''	LUV/FUV: 20000, NUV: 1000 (MOS), 40000 (阶梯光栅)	星系研究, 有紫外深场计划	2029年8月升空
CAFE	NA/20' × 20'	30''	NA	通过观测近邻星系 OVI, HI线, 研究宇宙 重子物质缺失问题	计划中
FIREBall-2	1 m/28' × 12'	7'' (In-flight)	展源1600, 点源 3500–4000 (测试)	CGM和IGM研究, 科学训练, 紫外仪器测试	2021第二次飞行
SPACS	9 cm/1° (像差改正后)	6'' (抖动极限)	NA	M型星光变	不早于2021年10月发射
CASTOR	1 m/0.44° × 0.56°	0.15'' (半高全宽), 紫外(150–300 nm), $u'$ (300–400 nm), $g$ (400–550 nm)	棱镜光谱UV和 $u'$ 分辨率300–420, UV波段二维光谱1500	行星到星系宇宙学等 各层级科学目标	2025年左右发射, 5年运行周期
INSIST	1 m望远镜/比HST 视场大两个量级	0.15'' FWHM (UV, $u$ 和 $g$ 三个波段)	NA	系外行星系统到 宇宙学的不同层级	2026年发射, 合作CASTOR
EUVO	6–10 m/15倍 HST接收面积	0.01''	20000–100000长缝, 500–1000 IFS	紫外到光学部分 的各层级科学	计划中
LUVOIR	15 m或8 m/NA	–	–	下一代HST, 行星 到宇宙学各层级	2030年建设
ARAGO	1.3 m/NA	NA	25000–35000 (1190–8880 Å)	偏振光谱观测	计划中
MESSIER	~50 cm/2° × 4°	~1''/pixel	NA	6波段全天区观测, 低表面亮度宇宙	2021年春完成Phase 0

图4中. 可见, 和现有深场数据比较, CSS-OS和MCI的观测将为研究恒星、星团及星系科学带来大量可贵的数据. 在星系研究方面, MCI超深场可达到比目前最深的UVUDF更高的观测深度, 其面积比UVUDF扩大了50倍. CSST的观测将同等面积紫外巡天深度提高了2 mag左右. CSST的紫外探测星系数目将获得大于1个数量级的提升, 将对探测紫外暗星系和莱曼光子逃逸比例的研究起到重要作用. 同时, CSST的空间高分辨率可提供红移1处约1 kpc尺度的结构信息, 将促进星系结构演化研究的发展. 这些高分辨率图像将和未来JWST的红外数据匹配, 从而为研究空间可分辨的星系尘埃性质及恒星形成性质提供关键的观测证据.

### 3.2 CETUS

CETUS (Cosmic Evolution Through UV Surveys)是NASA的紫外观测项目. 其望远镜直径设计为1.5 m, 焦比 $f/5$ . 加载的观测仪器包括照相机、

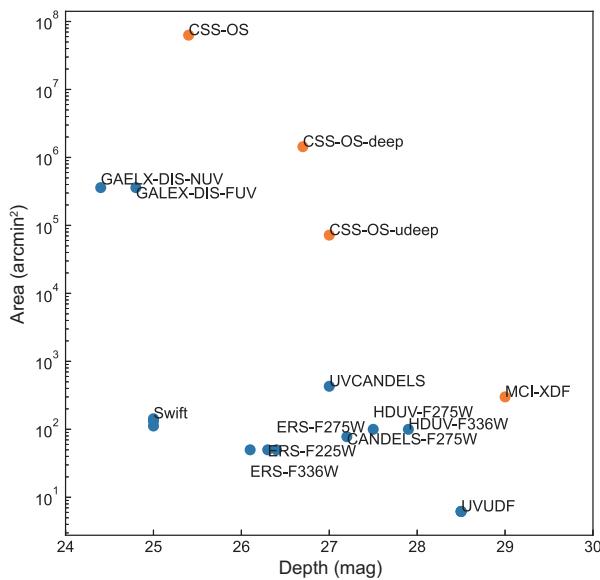


图4 (网络版彩图)现有紫外深场巡天整理(蓝色点), 以及与CSST计划的未来深场巡天(橙色点)的比较

**Figure 4** (Color online) Summary of current UV deep field surveys (blue dots). The depth and area of the deep fields planned by CSS-OS and MCI (orange dots) are over plotted.

多目标光谱仪及光栅光谱仪. CETUS的视场为 $17.4' \times 17.4'$ . 其成像可达到在FUV波段为 $0.4''$ 及NUV波段为 $0.3''$ – $0.4''$ 的空间分辨率. CETUS光谱观测覆盖的波长范围包括莱曼紫外和远紫外, 即LUV/FUV, 波长 $1000$ – $1800$  Å, 以及近紫外到蓝光波段, 即NUV-Blue, 波长 $1800$ – $4000$  Å. 其长缝光谱分辨率为LUV/FUV波段20000, NUV波段40000. 多目标光谱仪的分辨率为1000. CETUS的主要科学目标包括邻近宇宙星系研究, 红移1左右的恒星形成星系性质研究以及时域观测研究等. CETUS还将配合其他波段巡天进行多波段科学研究. CETUS将对多个天区进行紫外深场观测, 从而为包括HDF等天区提供重要的远紫外数据补充. 其预计升空时间为2029年8月<sup>[88]</sup>.

### 3.3 WSO-UV

另一个正在进行策划的大型紫外项目为World Space Observatory (WSO)<sup>4)</sup>. WSO目前由西班牙和俄罗斯参与. 其计划使用1.7 m口径,  $f/10$ 的仅限紫外观测的RC式望远镜. 其视场达到 $30'$ . 预计将携带成像仪和光谱仪(覆盖 $115$ – $315$  nm波长范围). 其中高分辨率光谱仪 $R \sim 50000$ , 低分辨率 $R \sim 1000$ . 其装载的成像仪预计将在 $115$ – $176$  nm范围达到 $0.1''$ 的空间分辨率.

WSO-UV预计于2025年升空. 如果WSO-UV能够成功获得观测数据, 其数据对于近邻星系远紫外测光和光谱观测的补充将是前所未有的. 这些远紫外数据和其他波段相结合可能为星系科学带来重要进展和突破.

### 3.4 EUVO和LUVOIR

随着空间技术的进步, 研究人员开始设计并建造接替HST工作的更大型望远镜, 其中包括EUVO项目和LUVOIR项目. LUVOIR<sup>5)</sup> (Large UV/Optical/IR Surveyor)将使用15 m或8 m望远镜. LUVOIR不仅包含紫外和光学部分, 同时对红外

4) <http://www.wso-uv.es/index.php?id=33>

5) <https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/>

波段进行观测。LUVOIR计划加载光谱分辨率500–56000的紫外多目标光谱仪, 可进行高精度天体测量的成像仪、星冕仪及偏振光谱仪等先进设备。科学目标涵盖广泛, 包括从寻找可居住行星到探索宇宙结构等各层级的研究范围。LUVOIR计划于2030年后启动。

类似地, EUVO (European Ultraviolet-Visible Observatory)是欧盟的大型空间站望远镜计划, 但其将重点放在紫外和光学部分。EUVO希望使用6–10 m的主镜, 具体大小由载荷能力和技术决定。加载仪器包括空间分辨率0.01”的大视场成像仪, 光谱分辨率20000–100000的紫外长缝光谱仪, 覆盖1000–7000 Å波段、光谱分辨率约80000的偏振光谱仪, 以及光谱分辨率500–1000的整体视场光谱仪等<sup>[89]</sup>。

这些大型望远镜目前的一个技术问题是, 火箭运载的极限使得目前只能到5 m级水平(主要在于火箭遮罩(Fairing)大小的极限), 需要设计改进以增大望远镜接收面积, 如偏轴椭圆镜设计、折叠镜设计等。正在建造的JWST使用折叠镜技术, 但该技术如果用在紫外和光学波段则需要进一步改进。LUVOIR计划使用折叠镜系统, 可以增大接收面积到HST的15倍左右。预计此技术将在未来十几年内得到完善和应用。

### 3.5 其他紫外观测项目

上述空间项目使用口径大于或等于1.5 m的望远镜进行高质量的观测。除了这些大型望远镜项目外, 一些中小型紫外观测项目也在有序地计划之中。其中, 加拿大的CASTOR<sup>6)</sup>项目希望结合JWST, Rubin, Euclid及Roman望远镜数据, 针对紫外部分进行全波段观测的补充。其采用1 m望远镜, 具有 $0.44^\circ \times 0.56^\circ$ 的大视场。图像分辨率(半高全宽)为0.15”。包括紫外(150–300 nm), u'(300–400 nm)和g(400–550 nm)三个波段。采取太阳同步轨道低轨(800 km)运行。CASTOR将进行大视场成像、棱镜光谱和二维光谱观测, 并进行精确测光。棱镜光谱在UV和u'波段分辨率为300–420, 视场面积达

到0.25个平方度。UV波段二维光谱具有1500分辨率, 视场 $207'' \times 117''$ 。CASTOR项目正在有序进行中, 预计2025年左右发射。其运行周期设定为5年。

与CASTOR相似的INSIST<sup>7)</sup>是印度的空间项目。项目同样计划采用1 m望远镜, 具有0.15”半高全宽的空间分辨率, 包含UV, u和g三个波段, 比HST视场大2个量级。加载大视场成像仪、无缝光谱仪及多目标光谱仪(MOS)。科学目标涵盖从系外行星系统到宇宙学的不同层级。INSIST计划在2026年发射, 可能和CASTOR进行合作。

巴黎天文台主导的MESSIER巡天<sup>[90]</sup>项目将进行从紫外到近红外(200–1000 nm)6个波段的全天区观测。其目标是观测低表面亮度宇宙, 希望在光学和紫外波段分别达到表面亮度34和37 mag每平方角秒的极限, 从而研究宇宙中度到高度非线性结构的形成, 如 $\Lambda$ CDM框架下卫星星系的数目以及宇宙网络中纤维结构(Filaments)的形成等。亦涵盖从恒星、星际介质到星系级别的各种科学。MESSIER预计使用口径50 cm级别的望远镜。

还有一些紫外项目针对特殊的科学目标进行观测, 比如CAS-ESA合作的小型空间项目CAFE (Census of warm-hot intergalactic medium, Accretion, and Feedback Explorer)<sup>[91]</sup>计划利用创新的光学设计和光子计数的MCP探测器对近邻宇宙星系(红移在0–0.05范围)进行OVI和HI的窄带观测。通过这些观测, 确定星系晕中这些重子物质的含量, 检验出数值模拟中的正确物理模型, 从而理解宇宙重子物质缺失问题。

除了科学研究, 一些项目还承担科研训练和仪器测试的任务。如球载暗弱星系际介质辐射天文台(Faint Intergalactic Medium Redshifted Emission Balloon, FIREBall)等。FIREBall由探空气球搭载1 m望远镜, 配置紫外整体光谱仪。除了探测观测中低红移处( $z \sim 0.7$ )星系际介质暗弱且弥散的发射线, 由此来限制星系际气体的温度和密度的科学任务外, FIREBall还承担测试平台的新指向控制系统、紫外优化的EMCCD探测器以及非球面光栅等的任务。

6) <https://www.castormission.org/>

7) [https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/02/India\\_2018-20-final\\_compressed.pdf](https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/02/India_2018-20-final_compressed.pdf)

FIREBall-2继承FIREBall任务, 对优化设计后的望远镜进行测试. FIREBall-2于2018年9月完成第一次飞行观测, 并将在2021年进行第二次飞行观测.

同样, SPACS (Star-Planet Activity Research CubeSat)<sup>8)</sup>利用立方卫星技术, 装载约9 cm口径的双镜RC式望远镜. 除了观测M型星的光变这个科学目标, SPACS还将对2D-doped探测器进行空间验证. 2D-doped技术即在CCD背面镀一层原子薄层, 从而防止形成Si/SiO<sub>2</sub>的缝隙, 达到理论最高的量子效率. 这种探测器在Palomar的WFPFC以及FireBall-2上使用, 而SPACS将成为首次利用该技术的长期空间项目.

值得关注的是, 美国科罗拉多大学设计了一系列的紫外研究项目, 合称CUSP (The Colorado Ultraviolet Spectroscopy Program)<sup>9)</sup>. 其中包括涵盖不同科学目标的空间观测项目, 如对星系和AGN电离光子逃逸比例的研究(SPRITE), 对系外行星大气结构和物质损失率的研究(CUTE, ESCAPE等), 对恒星的研究(SISTINE, DEUCE等), 以及对星际介质的研究(CHESS, INFUSE等). 还有如UMIS和UV Fibers这些针对紫外仪器技术的空间观测项目. CUSP也含有CTTS FUV和MUSCLES这些科研项目, 利用已有的紫外数据结合其他波段进行科学分析和研究.

#### 4 星系紫外相关科学

星系紫外深场成像观测的相关科学可以概括为, 在中低红移处对恒星形成率和尘埃消光关系的追踪, 以及在中高红移处对处于静止星系更短波段的紫外光子逃逸比例的追踪.

首先, 紫外深场数据在追踪星系的恒星形成和演化过程中起到重要作用. 宇宙学的一个重要目标是测量和解释星系中的恒星形成, 气体消耗以及化学演化的历史. 静止紫外波段由大质量的年轻恒星主导, 是测量恒星形成率的重要观测量. 目前大量高红移星系的恒星形成率测量都是基于静止紫外波段观测所得到的. 不久的将来, JWST项目将提供高

红移( $z > 5$ )星系的静止紫外波段信息. 但是, 目前低红移处的紫外数据仍然处于缺乏状态. 这是由于紫外波段观测缺乏所导致的, 急需在低红移处获得在数量和质量上可以与JWST匹配里程碑式数据.

紫外高分辨率图像为研究星系结构演化和哈勃序列形成提供了观测证据. 星系是如何从高红移处含不规则气体团块的盘演化为当前宇宙的哈勃序列, 以及星系中恒星形成如何停止是星系演化研究中仍不确定的问题. 紫外高分辨率图像可以提供星系子结构的恒星形成率等数据, 比如CSST的0.15''分辨率可以提供红移1处1 kpc尺度结构的观测数据, 从而为星系核球、旋臂及棒等结构形成和演化过程带来重要的信息.

恒星形成率测量中的一个重要不确定因素是尘埃消光. 尘埃不仅对光子造成散射, 而且其吸收短波部分的光子并在红外进行辐射. 尘埃的再辐射过程使我们可以通过红外辐射和紫外辐射的比值(IRX)测量出尘埃消光的大小. 而这个比值和UV波段谱指数 $\beta$ 相关( $f_\lambda \propto \lambda^\beta$ ), 该关系即IRX- $\beta$ 关系. 在计算高红移星系尘埃消光时, 由于缺乏可用的红外数据, 普遍使用紫外波段光谱斜率 $\beta$ 对尘埃消光进行修正, 需要利用IRX- $\beta$ 关系计算消光. 对这个关系的深入理解需要我们了解7–10 Gyr前星系中的消光性质. 研究表明, IRX- $\beta$ 随红移和星系种类均有一定的变化<sup>[80, 92]</sup>. 其中, 低紫外光度的星系消光改正是一个重要问题. 它们的低紫外光度可能是由本身质量决定, 也可能是由高尘埃消光所导致的, 极有可能偏离通常由星暴星系观测得出的IRX- $\beta$ 关系. 显然, 紫外更高深度的观测将提高这些星系的探测数目, 比如MCI的超深场观测将比UVUDF观测深0.5–1 mag, 面积比其大50倍左右, 探测紫外暗弱星系的数目将大大增加. 这些观测将帮助我们细致研究这些星系的尘埃性质. 另一方面, 随着波段观测空间分辨率的提升, 人们也开始研究尘埃消光关系在星系内部的变化<sup>[93]</sup>. 高分辨率紫外图像结合未来丰富的红外观测数据, 将为我们带来统计研究消光关系变化规律的机会.

8) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spacs>

9) <https://lasp.colorado.edu/home/cusp/>

紫外波段的观测对星系的全波段能量光谱分布是一个极大的补充。对于中低红移的星系, 紫外波段补充了其能量光谱分布中大质量恒星的辐射信息, 从而对恒星形成率及尘埃消光形成了有效的限制。对中高红移处的星系, 紫外波段观测提供了莱曼间断的信息, 因此为测定星系测光红移提供了重要的约束。

在更高红移的研究中, 紫外波段观测数据可以帮助我们理解宇宙再电离过程。恒星形成星系被认为是提供宇宙再电离时期所需要电离光子的有效来源, 然而有多少电离光子能够逃离星系对星系际介质进行再电离仍然不清楚。研究表明, 星系的电离光子在红移~3处的逃逸比例( $f_{\text{esc}}$ )必须大于10%, 才能有效完成宇宙再电离过程<sup>[94]</sup>。然而对 $f_{\text{esc}}$ 的直接测量需要观测处于远紫外的莱曼连续谱(LyC)。由于IGM的不透明性, 宇宙再电离时期的 $f_{\text{esc}}$ 难以被直接观测到。近年来, 依赖于HST, AstroSat等空间观测, 一些中低红移处恒星形成星系的LyC已经被直接探测到<sup>[95]</sup>。而 $f_{\text{esc}}$ 的大小仍然存在争议。为理解这些星系及其和宇宙再电离时期LyC星系的联系, 大样本和深度的紫外观测是必须的。未来的仪器设备(如CSST等)比现有观测深度高1–2 mag, 而且观测面积可达到同等深度巡天的50–100倍, 其提供的大量数据将是我们探测莱曼电离光子的重要途径。通过叠加这些海量观测图像, 这些稀有的莱曼电离光子被发现的概率将显著增加。莱曼电离光子的探测也是目前紫外观测计划关注的焦点。

除了本文重点讨论的紫外深场成像观测外, 紫外光谱观测对于测量星系周介质, 解决星际介质缺失问题起到关键作用。特别是在红移0–2这个宇宙90%恒星形成的关键时期, 需要静止波段1000–3000 Å的观测探测星系中的温/热弥散气体来研究恒星形成及重子物质聚集过程。在红移较低的宇宙中, 一些气体谱线仅在紫外可被观测到, 如HI1216, OVI1032等。紫外光谱或窄带(可以看作低分辨率光谱)观测将为相关研究提供重要的数据支持。

综上, 星系研究中紫外波段的观测数据是不可

或缺的。紫外观测进展将促进星系天文学理论研究进展。星系科学研究之外, 紫外观测对于星团、恒星及行星级别天体的科学研究所十分重要。未来观测设备的发展将同时为这些方向的科学带来长足进展。

## 5 总结和展望

静止紫外波段是测量和理解宇宙中恒星形成历史的重要工具, 对星系研究起到不可或缺的作用。然而, 由于紫外波段的观测必须利用空间设备进行, 直至20世纪70年代, 研究者们才开始对静止紫外波段宇宙的直接观测, 很大程度上落后于光学、近红外及射电等地面观测的发展水平。这也导致了相对于高红移处丰富的静止紫外波段数据, 低红移处的紫外数据较为贫瘠。随着近年来空间技术的飞速进步, 大量紫外观测得以进行, 一些大型的紫外空间观测设备正在有序开展, 如CSST-MCI, WSO等。中小型设备如CASTOR, MESSIER及CAFE等也在积极筹备中。

本文从星系科学的角度出发, 介绍了国内外紫外深场巡天项目。这些项目为星系科学带来了大量宝贵数据, 促进了星系全波段研究的进展。回顾这些工作, 我们可以看到紫外波段包含恒星形成和尘埃消光的大量信息, 为星系恒星形成理论带来了重要约束。同时, 紫外波段为研究宇宙再电离过程的能量来源提供了直接观测证据。此外, 紫外测光数据在有效提高星系测光红移的准确度以及星系结构形成研究中起到重要作用。紫外波段带来的信息不仅有助于我们重点讨论的星系科学, 也促进了行星、恒星及宇宙学等各层级的科学进展。我们对未来即将开展的紫外观测项目进行了整理。这些项目覆盖紫外科学的各个层面, 特别是我国即将发射的CSST, 将使同样面积的紫外巡天提高2 mag左右的深度。这些项目有望为我们带来丰富的科学数据, 帮助我们深入理解天体的性质和宇宙的演化, 为天文研究带来突破性的进展, 在各个领域发挥有力的作用。

## 参考文献

- 1 Wilson R, Boksenberg A. Ultraviolet astronomy. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1969, 7: 421–472
- 2 Baum W A, Johnson F S, Oberly J J, et al. Solar ultraviolet spectrum to 88 kilometers. *Phys Rev*, 1946, 70: 781–782
- 3 Kupperian Jr. J E, Byram E T, Chubb T A, et al. Far ultraviolet radiation in the night sky. *Planet Space Sci*, 1959, 1: 3–6
- 4 Stecher T P, Milligan J E. Stellar spectrophotometry from above the atmosphere. *Astrophys J*, 1962, 136: 1
- 5 Morton D C, Spitzer L. Line spectra of delta and pi Scorpii in the far-ultraviolet. *Astrophys J*, 1966, 144: 1
- 6 Code A D, Houck T E, McNall J F, et al. Ultraviolet photometry from the orbiting astronomical observatory. I. Instrumentation and operation. *Astrophys J*, 1970, 161: 377
- 7 Bless R C, Code A D. Ultraviolet astronomy. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1972, 10: 197–226
- 8 van Duinen R J, Aalders J W G, Wesselius P R, et al. The ultraviolet experiment onboard the Astronomical Netherlands Satellite (ANS). *Astron Astrophys*, 1975, 39: 159–163
- 9 Gurzadyan G A, Oganesyan D B, Rustambekova S S, et al. Catalogue of ultraviolet spectra of 900 faint stars. Observational Material of the Space Station Orion 2. 1985
- 10 Kondo Y, Wamsteker W, Boggess A. Exploring the Universe with the IUE Satellite. Dordrecht: Springer, 1987
- 11 Boksenberg A, Evans R G, Fowler R G, et al. The ultra-violet sky-survey telescope in the TD-IA satellite. *Mon Not R Astron Soc*, 1973, 163: 291–322
- 12 Henize K G, Wray J D, Parsons S B, et al. Skylab ultraviolet stellar spectra: Variation of intensity and structure of strong lines with temperature and luminosity. *Astrophys J*, 1975, 199: L119–L121
- 13 Carruthers G R. Apollo 16 far-ultraviolet camera/spectrograph: Instrument and operations. *Appl Opt*, 1973, 12: 2501–2508
- 14 Bowyer S, Sasseen T P, Lampton M, et al. In-flight performance and preliminary results from the Far Ultraviolet Space Telescope (Faust) flown on ATLAS-1. *Astrophys J*, 1993, 415: 875
- 15 Stecher T P, Cornett R H, Greason M R, et al. The ultraviolet imaging telescope: Instrument and data characteristics. *Publ Astron Soc Pacific*, 1997, 109: 584–599
- 16 Milliard B, Laget M, Donas J. Report on FOCA, a Ballons-Born Ultraviolet Imaging Telescope. *IAU Comm Instrum*, 1992, 2: 49
- 17 Treyer M A, Ellis R S, Milliard B, et al. An ultraviolet-selected galaxy redshift survey: New estimates of the local star formation rate. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 300: 303–314
- 18 Bianchi L. GALEX Team the Galaxy Evolution Explorer (GALEX): An All Sky Ultraviolet Survey. *Memorie della Soc Astron Ita*, 1999, 70: 365
- 19 Martin D C, Fanson J, Schiminovich D, et al. The galaxy evolution explorer: A space ultraviolet survey mission. *Astrophys J*, 2005, 619: L1–L6
- 20 Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. The *Swift* Gamma-Ray Burst Mission. *Astrophys J*, 2004, 611: 1005–1020
- 21 Agrawal P C. A broad spectral band Indian Astronomy satellite “Astrosat”. *Adv Space Res*, 2006, 38: 2989–2994
- 22 Singh K P, Tandon S N, Agrawal P C, et al. ASTROSAT mission. In: Proceedings Volume 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray. Montréal, 2014
- 23 Davidsen A F, Long K S, Durrance S T, et al. The Hopkins Ultraviolet Telescope: Performance and calibration during the Astro-1 Mission. *Astrophys J*, 1992, 392: 264
- 24 Moos H W, Cash W C, Cowie L L, et al. Overview of the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Mission. *Astrophys J*, 2000, 538: L1–L6
- 25 Sahnow D J, Moos H W, Ake T B, et al. On-orbit performance of the far ultraviolet spectroscopic explorer satellite. *Astrophys J*, 2000, 538: L7–L11
- 26 Osterman S, Green J, Froning C, et al. The cosmic origins spectrograph: On-orbit instrument performance. *Astrophys Space Sci*, 2011, 335: 257–265
- 27 Green J C, Froning C S, Osterman S, et al. The cosmic origins spectrograph. *Astrophys J*, 2012, 744: 60
- 28 Davidsen A, Bowyer S, Lampton M. Cosmic far ultraviolet background. *Nature*, 1974, 247: 513–516
- 29 Bowyer S. The cosmic far ultraviolet background. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1991, 29: 59–88
- 30 Henry R C, Murthy J, Overduin J, et al. The mystery of the cosmic diffuse ultraviolet background radiation. *Astrophys J*, 2015, 798: 14
- 31 Taylor B G, Andresen R D, Peacock A, et al. The EXOSAT mission. *Space Sci Rev*, 1981, 30: 479–494
- 32 White N E, Peacock A. The EXOSAT Observatory. X-ray Astronomy with EXOSAT. Mem S A It, 1988, 59: 7–31
- 33 Bowyer S, Drake J J, Vennes S. Extreme ultraviolet astronomy. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2000, 38: 231–288
- 34 Trümper J. The ROSAT mission. *Adv Space Res*, 1982, 2: 241–249
- 35 Bowyer S, Malina R F. The Extreme Ultraviolet Explorer Mission. *Adv Space Res*, 1991, 11: 205–215

- 36 Barstow M A, Casewell S L, Holberg J B, et al. The status and future of EUV astronomy. *Adv Space Res*, 2014, 53: 1003–1013
- 37 Morrissey P, Conrow T, Barlow T A, et al. The calibration and data products of GALEX. *Astrophys J Suppl S*, 2007, 173: 682–697
- 38 Arnouts S, Schiminovich D, Ilbert O, et al. The GALEX VIMOS-VLT deep survey measurement of the evolution of the 1500 Å luminosity function. *Astrophys J*, 2005, 619: L43–L46
- 39 Zamojski M A, Schiminovich D, Rich R M, et al. Deep GALEX imaging of the COSMOS HST field: A first look at the morphology of  $z \sim 0.7$  star-forming galaxies. *Astrophys J Suppl S*, 2007, 172: 468–493
- 40 Buat V, Giovannoli E, Burgarella D, et al. Measures of star formation rates from infrared (Herschel) and UV (GALEX) emissions of galaxies in the HerMES fields. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2010, 409: L1–L6
- 41 Teplitz H I, Rafelski M, Kurczynski P, et al. UVUDF: Ultraviolet imaging of the Hubble ultra deep field with wide-field camera 3. *Astrophys J*, 2013, 146: 159
- 42 Roming P W A, Kennedy T E, Mason K O, et al. The *Swift* ultra-violet/optical telescope. *Space Sci Rev*, 2005, 120: 95–142
- 43 Hoversten E A, Gronwall C, Berk D E V, et al. Ultraviolet number counts of galaxies from *Swift* ultraviolet/optical telescope deep imaging of the chandra deep field south. *Astrophys J*, 2009, 705: 1462–1468
- 44 Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby galaxies at apache point observatory. *Astrophys J*, 2015, 798: 7
- 45 Molina M, Ajgaonkar N, Yan R, et al. *Swift*/UVOT+MaNGA (SwiM) value-added catalog. *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 251: 11
- 46 Molina M, Ajgaonkar N, Yan R, et al. A cautionary tale of attenuation in star-forming regions. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 494: 4751–4770
- 47 STScI ACS Team, the ACS group at ST-ECF, the ACS IDT. Advanced Camera for Surveys Instrument Handbook for Cycle 15, [https://www.stsci.edu/itt/review/ihb\\_cy15/ACS/acs\\_ihbTOC.html](https://www.stsci.edu/itt/review/ihb_cy15/ACS/acs_ihbTOC.html)
- 48 Woodgate B E, Kimble R A, Bowers C W, et al. The space telescope imaging spectrograph design. *Publ Astron Soc Pac*, 1998, 110: 1183–1204
- 49 Kimble R A, Woodgate B E, Bowers C W, et al. The on-orbit performance of the space telescope imaging spectrograph. *Astrophys J*, 1998, 492: L83–L93
- 50 Anderson J, Baggett S, Bajaj V, et al. Wide Field Camera 3 Instrument Handbook for Cycle 29. <https://hst-docs.stsci.edu/wfc3ihb>
- 51 Windhorst R A, Cohen S H, Hathi N P, et al. The Hubble space telescope wide field camera 3 early release science data: Panchromatic faint object counts for 0.2–2 μm wavelength. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 193: 27
- 52 Grogin N A, Kocevski D D, Faber S M, et al. CANDELS: The cosmic assembly near-infrared deep extragalactic legacy survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 197: 35
- 53 Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. CANDELS: The cosmic assembly near-infrared deep extragalactic legacy survey—The Hubble space telescope observations, imaging data products, and mosaics. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 197: 36
- 54 Oesch P A, Montes M, Reddy N, et al. HDUV: The Hubble deep UV legacy survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 237: 12
- 55 Wang X, Teplitz H, Alavi A, et al. Constraining the Lyman continuum escape fraction at  $z \sim 2.4$  with UVCANDELS. American Astronomical Society Meeting Abstracts #53, 2021
- 56 Wang X, Teplitz H, Alavi A, et al. First science results from UVCANDELS. American Astronomical Society Meeting Abstracts #235, 2020
- 57 Walter F, Decarli R, Aravena M, et al. ALMA spectroscopic survey in the Hubble ultra deep field: Survey description. *Astrophys J*, 2016, 833: 67
- 58 Reddy N A, Oesch P A, Bouwens R J, et al. The HDUV Survey: A Revised assessment of the relationship between UV slope and dust attenuation for high-redshift galaxies. *Astrophys J*, 2018, 853: 56
- 59 Wuyts S, Förster Schreiber N M, Nelson E J, et al. A CANDELS-3D-HST synergy: Resolved star formation patterns at  $0.7 < z < 1.5$ . *Astrophys J*, 2013, 779: 135
- 60 Bond N A, Gardner J P, de Mello D F, et al. The rest-frame ultraviolet structure of  $0.5 < z < 1.5$  galaxies. *Astrophys J*, 2014, 791: 18
- 61 Soto E, Mello D F, Rafelski M, et al. Physical Properties of Sub-galactic Clumps at  $0.5 \leq z \leq 1.5$  in the UVUDF. *Astrophys J*, 2017, 837: 6
- 62 Kurczynski P, Gawiser E, Acquaviva V, et al. Evolution of intrinsic scatter in the SFR-stellar mass correlation at  $0.5 < z < 3$ . *Astrophys J*, 2016, 820: L1
- 63 Curtis-Lake E, Chevallard J, Charlot S, et al. Modelling the M\*-SFR relation at high redshift: Untangling factors driving biases in the intrinsic scatter measurement. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 503: 4855–4877
- 64 Tacchella S, Carollo C M, Schreiber N M F, et al. Dust attenuation, bulge formation, and inside-out quenching of star formation in star-forming main sequence galaxies at  $z \sim 2$ . *Astrophys J*, 2018, 859: 56
- 65 Carnall A C, Walker S, McLure R J, et al. Timing the earliest quenching events with a robust sample of massive quiescent galaxies at  $2 < z < 5$ . *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 496: 695–707
- 66 Mei S, Scarlata C, Pentericci L, et al. Star-forming blue ETGs in two newly discovered galaxy overdensities in the HUDF at  $z=1.84$  and 1.9:

- Unveiling the progenitors of passive ETGs in cluster cores. *Astrophys J*, 2015, 804: 117
- 67 Rafelski M, Gardner J P, Fumagalli M, et al. The star formation rate efficiency of neutral atomic-dominated hydrogen gas in the outskirts of star-forming galaxies from  $z \sim 1$  to  $z \sim 3$ . *Astrophys J*, 2016, 825: 87
- 68 Morishita T, Abramson L E, Treu T, et al. Massive dead galaxies at  $z \sim 2$  with HST grism spectroscopy. I. Star formation histories and metallicity enrichment. *Astrophys J*, 2019, 877: 141
- 69 Vasei K, Siana B, Shapley A E, et al. The Lyman continuum escape fraction of the cosmic horseshoe: A test of indirect estimates. *Astrophys J*, 2016, 831: 38
- 70 Naidu R P, Oesch P A, Reddy N, et al. The HDUV Survey: Six Lyman continuum emitter candidates at  $z \sim 2$  revealed by HST UV Imaging. *Astrophys J*, 2017, 847: 12
- 71 Japelj J, Vanzella E, Fontanot F, et al. Constraints on the Lyman continuum escape fraction for faint star-forming galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 468: 389–403
- 72 Sandberg A, Östlin G, Melinder J, et al. Limits on Lyman continuum escape from  $z=2.2$  H $\alpha$ -emitting galaxies. *Astrophys J*, 2015, 814: L10
- 73 Duncan K, Conselice C J. Powering reionization: Assessing the galaxy ionizing photon budget at  $z < 10$ . *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 451: 2030–2049
- 74 Smith B M, Windhorst R A, Jansen R A, et al. Hubble space telescope wide field Camera 3 observations of escaping Lyman continuum radiation from galaxies and weak AGN at redshifts  $z \sim 2.3$ –4.1. *Astrophys J*, 2018, 853: 191
- 75 Smith B M, Windhorst R A, Cohen S H, et al. The Lyman continuum escape fraction of galaxies and AGN in the GOODS fields. *Astrophys J*, 2020, 897: 41
- 76 Jones L H, Barger A J, Cowie L L. Candidate  $z \sim 2.5$  Lyman continuum sources in the GOODS fields. *Astrophys J*, 2021, 908: 222
- 77 Conselice C J, Wilkinson A, Duncan K, et al. The evolution of galaxy number density at  $z < 8$  and its implications. *Astrophys J*, 2016, 830: 83
- 78 Alavi A, Siana B, Richard J, et al. Ultra-faint ultraviolet galaxies at  $z \sim 2$  behind the lensing cluster A1689: The luminosity function, dust extinction, and star formation rate density. *Astrophys J*, 2014, 780: 143
- 79 Alavi A, Siana B, Richard J, et al. The evolution of the faint end of the UV luminosity function during the peak epoch of star formation ( $1 < z < 3$ ). *Astrophys J*, 2016, 832: 56
- 80 Mehta V, Scarlata C, Rafelski M, et al. UVUDF: UV luminosity functions at the cosmic high noon. *Astrophys J*, 2017, 838: 29
- 81 Driver S P, Andrews S K, Davies L J, et al. Measurements of extragalactic background light from the far UV to the far IR from deep ground- and space-based galaxy counts. *Astrophys J*, 2016, 827: 108
- 82 Rafelski M, Teplitz H I, Gardner J P, et al. UVUDF: Ultraviolet through near-infrared catalog and photometric redshifts of galaxies in the Hubble ultra deep field. *Astrophys J*, 2015, 150: 31
- 83 Nayyeri H, Hemmati S, Mobasher B, et al. CANDELS multi-wavelength catalogs: Source identification and photometry in the CANDELS COSMOS survey field. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 228: 7
- 84 Williams C C, Curtis-Lake E, Hainline K N, et al. The JWST extragalactic mock catalog: Modeling galaxy populations from the UV through the near-IR over 13 billion years of cosmic history. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 236: 33
- 85 Chevallard J, Charlot S. Modelling and interpreting spectral energy distributions of galaxies with BEAGLE. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 462: 1415–1443
- 86 Rahna P T, Murthy J, Safanova M, et al. Investigating the in-flight performance of the UVIT payload on AstroSat. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 471: 3028–3035
- 87 Saha K, Tandon S N, Simmonds C, et al. AstroSat detection of Lyman continuum emission from a  $z=1.42$  galaxy. *Nat Astron*, 2020, 4: 1185–1194
- 88 Heap S, Arenberg J, Hull T, et al. The NASA probe space mission concept, Cosmic Evolution Through UV Surveys (CETUS). arXiv: 1909.10437
- 89 Barstow M, Baudin F, Benneri S, et al. Closing gaps to our origins: EUVO, the UV window into the Universe. [https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/3219248/GomezdeCastroAI\\_WP\\_Emergence\\_of\\_life\\_GomezdeCastro.pdf/825574e0-5f4c-12c5-ae8a-76b6d75c0696?t=1565184636548](https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/3219248/GomezdeCastroAI_WP_Emergence_of_life_GomezdeCastro.pdf/825574e0-5f4c-12c5-ae8a-76b6d75c0696?t=1565184636548)
- 90 Valls-Gabaud D, MESSIER Collaboration. The MESSIER surveyor: Unveiling the ultra-low surface brightness universe. *Proc Int Astronom Union*, 2016, 11: 199–201
- 91 Ji L, Lou Z, Zhang J, et al. Mapping diffuse emission in Lyman UV band. In: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2020, 11444
- 92 Reddy N A, Kriek M, Shapley A E, et al. The MOSDEF Survey: Measurements of balmer decrements and the dust attenuation curve at redshifts  $z \sim 1.4$ –2.6. *Astrophys J*, 2015, 806: 259
- 93 Boquien M, Buat V, Boselli A, et al. The IRX- $\beta$  relation on subgalactic scales in star-forming galaxies of the Herschel Reference Survey. *Astron*

- Astrophys, 2012, 539: A145  
94 Grazian A, Giallongo E, Paris D, et al. Lyman continuum escape fraction of faint galaxies at  $z \sim 3.3$  in the CANDELS/GOODS-North, EGS, and COSMOS fields with LBC. *Astron Astrophys*, 2017, 602: A18  
95 Puschnig J, Hayes M, Östlin G, et al. The Lyman continuum escape and ISM properties in Tololo 1247-232: New insights from HST and VLA. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 469: 3252–3269

## Ultraviolet deep imaging surveys

YUAN FangTing<sup>1,2\*</sup>, ZHENG ZhenYa<sup>1,2</sup>, RAHNA P. T.<sup>1</sup>, LIN RuQiu<sup>1,2</sup> & ZHU ShuaiRu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Key Laboratory of Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences,  
Shanghai 200030, China;*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

The ultraviolet band is an important part of the spectral energy distribution of galaxies; this wavelength region is rich in resonance lines of common elements in their neutral and ionized states. The ultraviolet continuum is also related to several key processes in astrophysics, providing essential constraints for theoretical studies. In extragalactic studies, ultraviolet radiation can be used to trace massive stars, providing an important tool to measure the cosmic star formation history. It can also be used to trace the accretion disks of massive black holes, which is necessary for understanding the accretion process. The key scientific issues in ultraviolet astronomy include the lack of knowledge on the star formation history and galaxy evolution at cosmic noon, the missing baryon problem, the source of reionization, and feedback of galaxy accretion and outflow. We herein review the status of various ultraviolet deep-field observations and the scientific possibilities of these data in extragalactic astronomy. We present the instrument parameters, scientific goals, data products, and the main discoveries of ultraviolet deep-field surveys. We also outline future ultraviolet projects and the science to be carried out in this field.

**ultraviolet radiation, sky surveys, telescopes, galaxy evolution**

**PACS:** 95.85.-e, 95.80.+p, 95.55.-n, 98.62.Ai

**doi:** [10.1360/SSPMA-2021-0089](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0089)