

宇宙热重子探寻计划

Hot Universe Baryon Surveyor (HUBS)

1. 科学目标及意义

研究表明恒星及星系中的重子物质（即非暗物质）只占宇宙中应有的重子物质的很小的比例（ $<10\%$ ），而更多的部分是分布在星系际低密度气体里。即使考虑了后者，还有大致一半的重子物质尚未被观测到；这就是星系宇宙学里长期未解决的“重子缺失”问题，也是我们对星系形成与演化的理解存在很大不确定性的一个主要原因。尽管细节有些差异，几乎所有理论模型都得出类似的结论：一部分“缺失”的重子物质分布在大尺度纤维状结构的热气体中，而另一部分则分布在星系周围的热晕里。由于预期的辐射在软 X 射线波段（ $<\sim 1\text{ keV}$ ）并且非常弱，现有的观测手段还无法提供数据来验证这个理论图像。

本项目（简称 HUBS）将围绕着“宇宙重子缺失”重大科学问题，通过研制发射卫星及大视场、高效率、高分辨 X 射线成像和光谱观测手段，探测宇宙大尺度纤维状结构及星系周物质分布，致力于发现宇宙中“缺失”的物质的空间分布及其物理与化学性质，以取得完善星系形成与演化理论的突破性成果，具有重要意义，并引领“以我为主”的国际大科学计划。与此同时，填补国内在超导转变边缘微量能器、极低温制冷、大视场 X 射线聚焦等先进技术领域的空白。

从国际长期空间规划来看，在未来的至少 20-25 年内，只有欧空局已立项（计划于 2028 年发射）的 Athena 卫星配备了一台高分辨率成像光谱仪（X-IFU），但其视场非常小（大致 5×5 平方角分），不适合用来观测空间大尺度分布的热气体（也不是它的核心科学目标）。X-IFU 可以用来做一些尝试性的相关工作，但它的灵敏度需要提高至少一个数量级才可能在宇宙重子缺失问题上取得实质性进展，这为中国强力推动天体物理及宇宙学前沿研究提供了一个契机。HUBS 将聚焦于“宇宙重子缺失”重大科学问题，与 Athena 卫星在核心科学目标及观测能力两方面形成互补。HUBS 的大视场（大致一个平方度）也将大大推动其它高能天体物理中许多其

它前沿科学问题的研究 (包括宇宙软 X 射线弥漫背景辐射的起源、超新星遗迹的物理及化学性质、活动星系核对星系演化的影响、活动恒星的特性、太阳风与地球周物质电荷转移辐射过程等) 。

2. 初步设计

本项目将建立在与国内外相关高校及研究所合作的基础上，充分发挥各单位在相关科学及关键技术领域的优势。从起初核心科学目标和技术需求的小规模讨论，到 2016 年 7 月份在清华举行的专题研讨会，再到 2017 年 6 月底在清华召开的第一次合作会议 (共有国内外 20 所高校和研究所参加，包括来自美国、荷兰及日本的代表)，本项目的科学目标和技术需求逐渐清晰。本项目将由一颗卫星组成，具体卫星科学载荷及轨道的技术指标初步定义如下：

- 工作波段：0.1–1.5 keV。这是热辐射谱线聚集的波段。
- 微量能器阵列：60x60 (0.5-1 mm) 像素，像素能量分辨率优于 2 eV。采用大尺寸像素可以减少所需像素数目，从而降低对读出电子学的要求。为了增强吸收线光谱观测能力，考虑用 9x9 更小的 (0.2-0.3 mm) 像素替代中心 3x3 正常像素，从而达到更好的谱分辨率 (<1 eV) 。
- 聚集光学系统：有效面积大于 1000 平方厘米 (@0.6 keV)，视场大致 1 角平方度，像分辨率 1-2 角分。
- 干式制冷系统：机械制冷从空间环境温度到~2 K，绝热去磁制冷从~2K 到探测器工作温度 (< 100 mK)。
- 载荷电功耗：< 1000 W。
- 卫星轨道：近地 (近赤道) 轨道, 5 年运行寿命。近地轨道的粒子本底比高轨 (例如 Athena 的 L2 轨道) 的要低一个量级，对测量弱信号非常有益。近赤道轨道有利于提高观测效率。
- 观测模式：小天区重叠定点观测、定点深度曝光及巡天。

3. 关键技术

HUBS 关键技术包括：超导 X 射线微量能器、超导信号读出电子学、低振动及长寿命干式（无液氦）机械制冷及大视场 X 射线聚焦光学，将分别由清华大学、上海微系统所、理化所及同济大学牵头研发工作。这些单位在各自领域已具备坚实的技术基础及成熟的国际合作。HUBS 所需指标要求各关键技术都能达到现在的国际先进水平，所以技术挑战性很高。卫星平台将有上海航天八院负责研发。

4. 科学工作组

HUBS 科学指标的进一步量化与论证将依赖于科学团队的支撑，为此国内外合作单位围绕着 HUBS 的主要科学目标成立了以下科学工作组（及负责人）：

- 星系际介质科学工作组（方陶陶，厦门大学）
- 星系周介质科学工作组（王青德，麻省大学，美国）
- 反馈物理科学工作组（袁峰，上海天文台）
- 理论科学工作组（莫厚俊，清华大学）
- 流体数值模拟科学工作组（康熙，紫金山天文台）
- 活动星系核科学工作组（王挺贵，中国科技大学）
- 超新星遗迹科学工作组（陈阳，南京大学）
- X 射线弥漫背景辐射科学工作组（纪丽，紫金山天文台）
- 星系团科学工作组（徐海光，上海交通大学）
- 恒星科学工作组（徐晓杰，南京大学）

5. 国际合作

HUBS 项目从开始就建立在国内外多所高校和科学院单位合作的基础上，已开始受到国际关注。在 2017 年 7 月份在日本举行的第 17 届低温探测器国际会议期间，会议主席 Kazuhisa Mitsuda 教授专门安排了一个小型讨论会，邀请清华团队负责人崔伟教授介绍了 HUBS。受邀请参会的代表来自日本 ISAS（及首都大学东京和东京理科大学）、美国 Goddard 和威斯康星大学、荷兰 SRON 及意大利 INAF。为了

进一步帮助凝练 HUBS 的科学目标以及优化载荷设计，崔伟教授将于今年 8 月在维也纳举行的国际天文组织总会期间主办一个专题会议

(<http://astronomy2018.univie.ac.at/focusmeetings/fm2/>)。另外，日本 ISAS 和厦门大学牵头，由来自日本、中国、美国、荷兰及意大利 12 位研究人员组成的团队正式向国际空间科学研究所 (ISSI) 提交了申请 (for International Teams in Space and Earth Science) 专题讨论与 HUBS 相关的科学。

在探测器和制冷技术领域清华已有良好的国际合作基础，计划充分利用这些资源。清华低温探测器实验室和美国威斯康星大学有着长期的合作 (包括博士研究生的联合培养)。此外，清华大学与荷兰空间研究所 (SRON) 于今年 6 月底正式签署了 TES 技术研发合作备忘录。SRON 在 TES 技术领域已有近 20 年的研发历史，是现在国际上三个领先单位之一 (包括美国的 Goddard 和 NIST)。它主要集中精力于超导器件及相关技术，瞄准其在远红外及 X 射线波段的应用。SRON 也是欧空局 Athena 卫星 X-IFU 仪器研究团队的主要成员。按照清华-SRON 备忘录的协议，清华团队将派一名博士后去 SRON 参加该所 TES 的研发 (基于不同的超导材料)。两条 TES 技术路线在研发期并行 (与竞争) 将为 HUBS 的探测器系统提供更好的技术保障 (这也是 Athena 卫星 X-IFU 仪器研发过程中走过的路)。

在绝热去磁制冷技术研发方向，清华低温探测器实验室与威斯康星大学物理系 Dan McMammon 教授研究组也有着多年的合作基础。威斯康星大学组在绝热去磁制冷机的设计与研制领域有着丰富的经验和研究基础 (包括其参与日本 Astro-E 卫星上绝热去磁制冷机的研制)。它曾经牵头的探空火箭项目 (XQC) 为 X 射线微量能器及绝热去磁制冷技术在空间的应用奠定了基础。理化所的主要项目参与人员今年 7 月份也访问了威斯康星大学组，希望拓展并进一步加强在制冷方面的国际合作。

微系统所与国内外多家科研机构在 TES 探测器及 SQUID 读出电路的研究与应用上保持着良好的合作关系。上海微系统所参加了由中国科学院高能物理研究所牵头的“阿里原初引力波探测项目”，负责 SQUID 读出电路的研究。微系统所与美国

斯坦福大学 Kent Irwin 课题组之间也有良好的合作。Irwin 教授长期从事 TES 探测器与 SQUID 读出电路研究，曾任美国国家标准技术研究所 TES 研究团队负责人。微系统所高波研究员于 2015-2016 年在 Irwin 课题组访问，学习 TES 探测器与 SQUID 读出电路。上海微系统所超导电子学研究团队负责人王镇研究员曾任日本情报通讯研究机构 (NICT) 的主任研究员，在日本超导电子学界有很高的知名度，与日本多个主要的超导电子学研究机构有着良好的合作关系。

在 X 射线聚焦光学系统集成方面，同济大学聘请了美国哥伦比亚大学的 Charles Hailey 教授经常来校访问，并进行 X 射线聚焦光学系统研制方面的讨论。Charles Hailey 教授是美国 NuSTAR 卫星 X 射线聚焦望远镜研制的负责人，具有丰富的光学系统集成方面的经验。还将聘请德国 MPE 研究所的 Vadim Burwitz 博士到同济来交流 X 射线聚焦光学系统性能测试方面的工作，他在 MPE 负责 PANTER X 射线望远镜性能测试系统的实验工作，有丰富的测试经验。与此同时，同济课题组将派遣博士生到 MPE 从事 X 射线望远镜性能有关的实验工作，这对于发展 HUBS 用 X 射线聚焦光学系统的测试具有重要价值。在国内，同济将与上海光源、北京光源开展反射镜镜片和 X 射线聚焦光学系统的测试工作。

6. 时间表

对星系际及星系周热介质的研究，HUBS 将提供现有设备无法提供的观测数据，预期希望解开“宇宙重子缺失”之谜，从而突破性地推动星系形成与演化理论的完善。本项目可以分为四个阶段：关键技术预研 (2018-2020)、关键技术深化研究 (2021-2023)、工程立项 (2023-2028) 和卫星发射及运行 (2029-2037)。

7. 近期进展

HUBS 于 2018 年正式入选中国科学院“空间科学 (二期)”战略性先导科技专项“空间科学预先研究项目(第一批)”，开始科学与技术预先研究工作。几乎没有什么经费，所以一直在探寻其它推进渠道。期间，航天八院表示出极大的合作热情，由研发部方保东部长带团 5 人来清华谈具体策略，保持与科工局联系。5 月 5 日航天

八院举办了第三届空间科学与深空探测论坛并成立了与 17 所高校成立了空间科学联合创新中心。主管空间科学的国防科工局系统一司副司长赵坚、教育部科技司副巡视员李渝红、科技部高新司副司长梅建平等领导出席会议。在讲话中，赵司长描述了包括“发现极端宇宙”在内的空间科学战略计划，确定继在轨运行的 HXMT（“探索”）与正在立项的 eXTP（“详测”）之后，HUBS 是该战略中的第三步（“深巡”）。希望通过科工局渠道，获得资源支持所有与 HUBS 相关的技术研发和科学研究（“umbrella funding”）。

8. 后续工作计划

- 1) 深化论证科学目标，继续加强宣传造势，扩大国内外影响力；
- 2) 深化论证形成主要有效载荷初步方案，梳理关键技术和攻关计划；
- 3) 深化论证载荷搭载，载荷研制，数据应用等多渠道国际合作；
- 4) 深化论证卫星方案，梳理关键技术和攻关计划；
- 5) 5月中，科工局赵坚副司长拟择机专项听取热重子探寻计划科学目标及后续计划；
- 6) 近期，八院孟光副院长专题听取热重子探寻卫星方案汇报及后续计划，明年拟按照责任令加强管理和推进。

具体来说，技术合作单位需要尽快制定技术研发计划，科学工作组编写科学白皮书。同时计划邀请国内外相关资深科学与技术专家成立一个“国际咨询委员会”（科工局的建议），拟于今年秋天召开第二届 HUBS 合作会议，完成科学目标与有效载荷技术的论证。