



爱因斯坦探针探测keV能段暗物质信号的展望

李志远*

南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023

*联系人, E-mail: lizy@nju.edu.cn

收稿日期: 2018-01-03; 接受日期: 2018-01-11; 网络发表日期: 2018-01-29

国家自然科学基金(编号: 11473010, 11133001)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFA0402703)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052100)资助项目

摘要 探索暗物质的物理本质是当前天体物理学与粒子物理学的共同核心任务之一. 质量落在keV能区的惰性中微子是热门的暗物质候选粒子之一, 在粒子物理、天体物理和宇宙学中均扮演重要的角色. 通过辐射衰变, keV惰性中微子释放出一个单色光子, 其能量恰为惰性中微子能量的1/2, 这一性质对惰性中微子的探测提供了可行的途径. 2014年, 一个国际合作团队利用XMM-Newton卫星数据在近邻星系团中探测到了峰值能量为3.5 keV的弱发射线信号, 并提出这是惰性中微子暗物质的衰变信号. 然而, 对此发现的后续研究由于现有X射线数据信噪比的限制无法得到一致的结论. 爱因斯坦探针卫星独特的大视场巡天将覆盖若干近邻大质量星系、星系团, 对3.5 keV信号获得高置信度的探测或有效排除, 并可对暗物质在keV能段的可能信号开展高灵敏度搜寻.

关键词 暗物质, 惰性中微子, 星系团

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

1 引言

近半个世纪以来的大量天文观测证据确立了宇宙的主要组分是暗物质(Dark Matter)与暗能量(Dark Energy)^[1]. 尽管其不参与电磁相互作用也不直接产生电磁信号, 暗物质通过引力作用主导了宇宙不同阶段、不同尺度物质结构的形成与演化. 基于暗物质与暗能量的大爆炸宇宙学模型在定量解释微波背景辐射、重子声波振荡、轻元素丰度、星系大尺度结构等观测结果上获得了巨大的成功, 成为当前人们认识宇宙的标准图像. 然而, 粒子物理标准模型无法对暗物质和暗

能量的物理本质提供解释, 因此它们被公认为是“笼罩在21世纪物理学上空的两朵乌云”. 对暗物质、暗能量进行实验和理论上的探索将大大深化人们对微观世界和宏观宇宙的理解, 并极有可能带来物理学基础理论革命性的突破^[2].

迄今为止, 人们对暗物质的认识仍停留在唯象的层面, 集中在通过天文学观测或数值模拟的手段重构暗物质在宇宙中不同尺度上的空间分布. 为了进一步认识暗物质的物理本质, 以下问题亟待回答: (1) 暗物质是不是一种基本粒子? (2) 暗物质是否具有单一组分, 还是由不同的粒子组成? (3) 暗物质的粒子属性如

引用格式: 李志远. 爱因斯坦探针探测keV能段暗物质信号的展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039512

Li Z Y. Probing dark matter signals with Einstein Probe (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039512, doi: [10.1360/SSPMA2018-00005](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00005)

何决定宇宙大尺度结构形成过程? (4) 是否存在粒子物理标准模型以外的第四代中微子——惰性中微子, 其对暗物质的贡献如何? 破解这些谜团是当前天体物理学与粒子物理学研究的共同核心任务之一.

国际上对开展暗物质的空间探索非常重视. 美国通过费米(Fermi)伽玛射线卫星和位于国际空间站上的阿尔法磁谱仪(AMS-02)进行暗物质的间接探测; 欧洲利用普朗克(Planck)卫星于2016年初给出了最新的宇宙学参数测量结果, 包括迄今为止最为精确的暗物质组分的测量^[3], 并计划在2020年前后发射欧几里得(Euclid)卫星, 通过观测海量星系的空间分布来精确测量宇宙学基本参数, 从而揭示暗能量和暗物质的物理本质. 而日本与美国合作也于2015年8月将CALET探测器成功放置在国际空间站开展暗物质探测. 我国于2015年12月发射了“悟空”暗物质探测卫星(Dark Matter Particle Explorer, DMAPE)^[4], 探测质量在GeV–TeV能区的暗物质粒子在湮灭或衰变过程中可能产生的伽玛射线和正负电子信号, 具备国际上最优的能谱分辨率及高能区覆盖能力.

上述伽玛射线能区的暗物质探测目标均为所谓的弱相互作用大质量粒子(Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs), 是众多暗物质假想粒子中最为热门的候选者之一, 也是过去20年国内外重点探索的方向, 但迄今未能找到其存在的确凿证据^[5]. 这促使粒子物理学家与天体物理学家转而考虑其他可能性.

除了伽玛射线能区, X射线能区也是暗物质搜寻的一个重要方向, 并越来越受到领域内的关注, 其科学目标包括几类具有广泛基础物理学背景的暗物质模型, 以惰性中微子(Sterile Neutrino)为代表. 于1970年代确立的粒子物理标准模型包含3种具有不同味(Flavour)但均为零质量的中微子(即电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子). 然而, 自80年代以来的众多中微子探测实验, 包括2012年我国主导的大亚湾中微子实验^[6], 确立了不同味的中微子之间可以相互转换. 被称为“中微子振荡”的这一现象确切表明中微子具有非零质量, 标准模型需要修正或扩充. 为此, 理论工作者引进了第四种中微子——惰性中微子, 其具有右旋特性, 与左旋中微子(即已知的3种“正常”中微子)的相互作用几率非常低, 但可以通过所谓see-saw机制使左旋中微子获得质量^[7].

理论研究表明, 惰性中微子在重子不对称性、轻

子不对称性、大爆炸核合成等粒子物理基本问题中均可能扮演重要的角色^[8]. 尤为重要的是, 质量落在keV能区的惰性中微子是一种理想的暗物质粒子^[7], 并具有“温暗物质”(Warm Dark Matter, WDM)的属性. 在温暗物质主导引力的宇宙模型中, 小于kpc尺度的物质结构很难形成, 这一特性为基于冷暗物质(Cold Dark Matter, CDM)的标准宇宙学模型所遇到的若干疑难提供了合理的解释. 这些涉及星系结构的疑难包括^[9,10]: 观测到的银河系卫星星系的数目较少(Missing Satellite Problem), 并缺少致密的、大质量的卫星星系(Too-big-to-fail Problem); 矮星系中心的径向质量分布较为平坦(Cusp-core Problem). 受此启发, 基于温暗物质宇宙学的数值模拟研究方兴未艾^[11–13].

惰性中微子在粒子物理、天体物理和宇宙学中的重要价值引起了天文学家与实验物理学家的广泛注意, 目前国际上多个团队正致力于惰性中微子的探测^[14]. 如能实现, 将不仅是宇宙学研究的重大突破, 更是粒子物理学的里程碑式进展. 本文介绍了以惰性中微子为代表的暗物质粒子在keV能段的可观测信号与相关研究进展, 并讨论爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)卫星对此领域的可能贡献.

2 惰性中微子暗物质的X射线探测

惰性中微子的内禀属性决定了它们非常稳定, 满足作为暗物质粒子的基本要求. 然而理论预言惰性中微子仍有一定的几率发生衰变, 其途径有两种: 主要途径是衰变为3个正常中微子, 次要途径是衰变为一个正常中微子加上一个单色光子, 后者的能量恰好为惰性中微子静质量的1/2. 对于keV惰性中微子来说, 其衰变产生的光子将落在X射线波段, 在能谱上展现为类似于窄发射线的轮廓. 这一性质为惰性中微子的天文探测提供了一个简洁而明确的途径: 通过X射线卫星瞄准暗物质聚集的天区对此衰变信号进行搜寻, 预期的X射线流量为

$$F_s = \frac{\Gamma_{N \rightarrow \gamma \nu} M_{\text{DM,FOV}}}{4\pi D_L^2 m_s} \approx 1.4 \times 10^{-7} \left[\frac{m_s}{7 \text{ keV}} \right]^4 \left[\frac{\theta^2}{10^{-11}} \left[\frac{D_L}{100 \text{ Mpc}} \right]^2 \right] \times \left[\frac{M_{\text{DM,FOV}}}{10^{13} M_{\text{sun}}} \right] \frac{\text{ph}}{\text{cm}^2 \text{s}}, \quad (1)$$

其中 $\Gamma_{N \rightarrow \gamma \nu}$ 是辐射衰变几率, 由惰性中微子质量(m_s)和表征惰性中微子-正常中微子相互作用的混合角(θ)决定; $M_{DM, FoV}$ 是X射线望远镜视场内包含的暗物质质量, D_L 为目标距离. 有效的探测将直接给出惰性中微子的质量以及衰变几率.

利用X射线观测搜寻keV惰性中微子衰变信号的对象包括近邻宇宙中的星系团、大质量星系、贫气体的矮星系等, 这些目标在天球上往往具有 1° 或更大的延展, 超过了已有X射线望远镜的典型视场(小于 1°); 银河系暗物质晕或宇宙学红移上的暗物质所产生的信号则来自于天球所有方向(后者由于不同红移信号的叠加, 将形成类似于连续谱的能谱), 对视场要求更高. 2013年以前的工作并未能探测到明确的惰性中微子信号, 但仍对惰性中微子的某些产生机制给出了有效的限制, 其中较有代表性的是本课题组与合作者^[15]利用钱德拉望远镜数据对大质量星系M31中惰性中微子信号的搜寻(图1).

2014年, Bulbul等人^[16]利用XMM-Newton望远镜运行十多年来所累积的总计约6 Ms数据, 从英仙座星系团(Perseus Galaxy Cluster)以及其他数10个近邻星系团的叠加光谱中发现了一个疑似发射线信号(置信度约为 3σ), 其峰值能量约为3.55 keV (为表述方便, 以下统称为3.5 keV信号), 与任何已知元素的特征发射线能级均不相符. Bulbul等人据此提出此信号很可能是 $m_s \approx 7.1$ keV的惰性中微子衰变后产生的X射线光子. 假设星系团中的暗物质完全由惰性中微子组成, 根据发射线的平均强度可推出 $\sin^2(2\theta) \approx 7 \times 10^{-11}$ (图1).

此发现立即引起天文与物理学界的强烈关注. 许多国际合作组陆续利用不同X射线望远镜对不同目标进行了跟踪研究, 其中部分结果支持3.5 keV信号. 例如, 利用XMM-Newton数据在M31核球区域探测到了3.5 keV弱信号^[17]; 利用Suzaku数据在Perseus Cluster也找到了相似能量的发射线信号, 并与Bulbul等人的结果吻合. 然而, 针对近邻星系暗物质晕的一些工作并未能预期的流量水平上(即假定一个普适的惰性中微子混合角)探测到3.5 keV信号^[18,19]. 特别值得指出的是, 日本Hitomi望远镜的高分辨率光谱仪对Perseus cluster核区进行了约300 ks的曝光, 但未能Bulbul等人对该星系团测得的3.5 keV信号水平上探测到显著的信号(但与除Perseus以外的其他星系团的叠加信号水平仍相容)^[20].

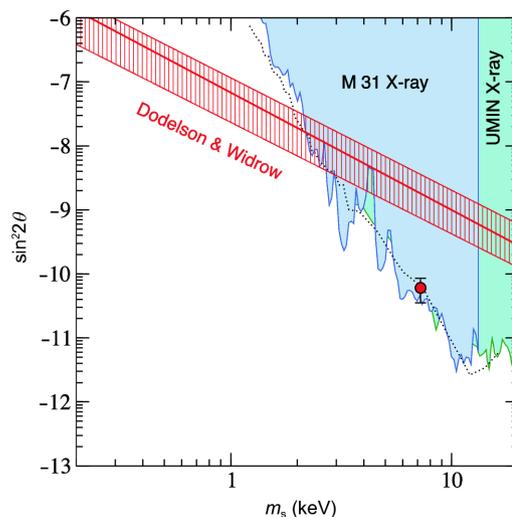


图1 (网络版彩图)惰性中微子的质量-混合角参数空间. 着色的区域被现有观测排除; 产生惰性中微子的一种理论机制——Dodelson-Widrow机制所预言的红色阴影区与观测基本不相容. 质量约在7.1 keV的橙色数据点对应XMM-Newton卫星探测到的来自近邻星系团的疑似发射线信号^[16]

Figure 1 (Color online) The phase space for sterile neutrino mass and mixing angle. The color-coded regions are excluded by X-ray observations. The red shaded strip, predicted by the Dodelson-Widrow mechanism of sterile neutrino production, is incompatible with X-ray observations. The orange data point represents the possible detection by XMM-Newton stacked spectra of nearby galaxy clusters ^[16].

还需指出的是, 3.5 keV信号的起源存在其他物理解释. 例如, 在起源于暗物质的框架里, 另一种较流行的暗物质候选粒子——轴子(Axion), 也可以通过衰变产生3.5 keV光子^[21,22]. 此外, Gu等人^[23]提出, 完全电离的硫离子与中性气体(如氢)进行电荷交换后的退激发过程可以产生能级约为3.5 keV的跃迁发射线. 此物理过程能否在星系团和星系中有效进行仍有待进一步研究.

3 keV能段暗物质探测的前景与机遇

上述围绕3.5 keV信号彼此不一致的结果, 究其原因主要是受限于当前数据的信噪比, 无论所报告的是有信号或无信号, 其统计置信度均只有 3σ 左右. 这给进一步的探索留下了相当大的空间. 从探测手段来说, 具备一定光谱分辨能力的X射线探测器均可用来搜寻keV惰性中微子(或其他暗物质粒子)的信号. 我们在此扼要评述未来5–10年的前景(图2):

(1) 已在轨工作十多年的XMM-Newton和Chandra

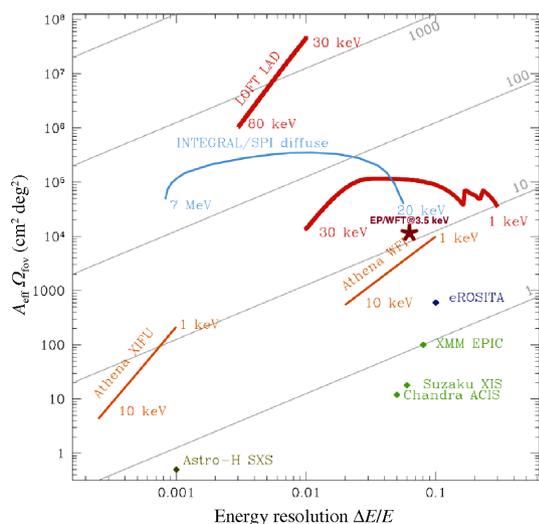


图 2 (网络版彩图)国际上在轨工作或计划中的X射线望远镜对暗物质信号探测能力的比较. 横坐标表示探测器的能量分辨本领, 纵坐标表示探测器的光子捕获能力(即视场乘以有效面积)^[14], EP在此图中的位置为本文添加

Figure 2 (Color online) The detection capability of existing or planned X-ray missions for sterile neutrino dark matter signals ^[14], with EP added.

卫星提供了上述的探测结果或限制, 但它们未来的潜力极有限, 这是因为二者的观测时间只有较小的比例会被分配给星系团等有效目标.

(2) 于2016年初发射的Hitomi卫星, 由于其搭载了高分辨率光谱仪, 本有能力在短时间内以较高灵敏度对暗物质keV能段信号进行搜寻, 但Hitomi因操作失误而导致解体. 尽管日本正在计划制造二代Hitomi望远镜, 但至少在未来5年时间内不会有任何X射线天文卫星搭载高分辨率光谱仪.

(3) 由德国和俄罗斯联合研制、预计在2018年发射的eROSITA卫星将在4年时间内完成人类历史上第二次软X射线波段的全天巡天^[24]. 预计eROSITA能对银河系暗物质晕(来自全天各方向的叠加)进行有效探测或限制, 但其对星系团或河外星系的keV暗物质探测能力与已有数据相比, 很难有实质性的提升.

迄今为止, 国际上尚未有以暗物质探测为专门目标的X射线卫星计划. 某种程度上, Hitomi任务的失败给我们提供了一个“十载难逢”的机遇: 利用周期短而针对性强的小型空间X射线卫星, 能够确定上述3.5 keV信号是否真实存在, 并在keV能区进行有史以来最灵敏的暗物质探测.

4 EP探测惰性中微子暗物质X射线信号

如前所述, 传统X射线望远镜的视场不到 1° , 不利于高效率地覆盖近邻星系团、星系晕等在天球上具有较大延展的目标. EP使用龙虾眼聚焦光学, 单次曝光所能覆盖的天区可达3600平方度, 同时角分辨可达 $5'$ 左右; 其配备的半导体探测器具有不亚于传统CCD的能量分辨率^[25]. 因此, EP理论上具有探测暗物质X射线信号的极佳能力, 在此举例说明.

对惰性中微子暗物质产生的衰变信号, 探测的信噪比可由式(2)估算(仅考虑统计误差, 并暂时忽略探测器本底噪声):

$$\frac{S}{N} = \frac{F_s \times A \times \tau}{\sqrt{F_b \times A \times \tau}}, \quad (2)$$

其中 F_s 由式(1)决定, F_b 为背景噪声水平(单位 $\text{ph}/\text{cm}^2/\text{s}$); A 为宽场望远镜(WXT)的有效面积, 假如同时考虑龙虾眼成像焦斑与十字臂的光子, 则 $A(E=3.5 \text{ keV}) \approx 3 \text{ cm}^2$; τ 为曝光时间, 假设EP工作寿命为3年, 保守估计以巡天模式对某个固定目标的有效曝光时间为1 Ms/年, 则 $\tau \approx 3 \text{ Ms}$. 作为对比, eROSITA^[21]在4年巡天任务中对固定天区的曝光时间约2 ks, 平均有效面积($E=3.5 \text{ keV}$)约 300 cm^2 (即 $A\tau$ 乘积仅为EP的1/15).

首先考虑距离最近($D_L=0.8 \text{ Mpc}$)的大质量星系M31, 其暗物质晕的投影位力半径约为 15° , 总质量约为 $8 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$. 对惰性中微子衰变信号而言, 宇宙X射线背景(Cosmic X-ray Background, CXB, 主体为活动星系核)主导了背景噪声. 根据典型的CXB幂律能谱, 并假定WXT能量分辨率为200 eV, 由式(2)可得到理想情况下的 $S/N \approx 20$, 远高于现有观测的 3σ 水平. 在探测到信号的基础上, 可进一步比较信号的空间分布与暗物质理论分布以明确两者之间的物理联系.

其次考虑近邻大质量星系团. 星系团的典型质量为 $10^{14} - 10^{15}$ 太阳质量, 其中约16%为重子物质, 主要成分是温度介于 $10^7 - 10^8 \text{ K}$ 的弥散热气体, 即星系团际介质(Intra-cluster Medium, ICM)^[26,27]. ICM产生可观的X射线波段热辐射(由韧致辐射和一系列原子谱线组成), 对惰性中微子衰变信号而言, 这构成了主要的背景信号. 以Coma Cluster为例, 该星系团距离约100 Mpc, 投影位力半径约 1.2° , 暗物质总质量约 $2 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$, 是近邻宇宙中质量最大的星系团之一. 我们根据已有观测^[28]估算在3.5 keV附近ICM对连续谱背景的贡献约为

CXB的4倍(我们排除了星系团中心约 $10'$ 的区域, 此区域中暗物质含量低, 但ICM信号最强). 因此, 在与M31同样的观测条件下对Coma Cluster可得到 $S/N \approx 10$, 显著高于XMM-Newton所得的信噪比.

需要强调的是, 式(2)忽略了系统误差与本底噪声, 因此上述信噪比的估算是理想情形. 我们预计EP的实际观测将比较接近这一理想情形, 原因是: (1) 对星系团而言, 背景由ICM占绝对主导; 对M31或大质量星系而言, 背景由CXB主导, 正常情况下也显著高于本底噪声; (2) 由于EP采用近地轨道, 宇宙线被地球磁层有效屏蔽, 其本底噪声将会显著低于Chandra, XMM-Newton这些高轨卫星, 而与Suzaku相仿. 另一方面, 系统误差(特别是3.5 keV附近连续谱的定标水平)有可能影响测量结果. 现阶段尚无法对EP实际运行中的系统误差作精确的估计, 但可以期待其能谱定标接近Chandra等卫星的水平(优于1%). 因此, 实际观测所得的信噪比将低于但不显著低于上述最优估算.

还值得指出的是, 对目标星系团的深度曝光将自然获得ICM的空间分解的高信噪比光谱, 这将允许深入研究ICM的整体物理性质, 特别是温度和密度的梯度以及金属丰度的空间分布等. 测量位于星系团边缘的ICM的热力学性质, 能够有力地检验大尺度结构形成的理论模型, 这是当前天体物理研究中的一个重要问题, 但有针对性的X射线观测仍非常匮乏^[28–30]. EP巡天数据将有助于此领域的深入研究.

5 结论

本文讨论了keV惰性中微子暗物质的粒子物理与天体物理基础, 并介绍了利用X射线卫星数据对惰性中微子衰变信号进行探测的研究进展. 我们认为, 爱因斯坦探针卫星的巡天数据将可以在前所未有的灵敏度下, 对包括惰性中微子在内的暗物质候选粒子在keV能段上可能产生的信号进行探测.

致谢 感谢苏萌博士、袁为民博士的有益讨论.

参考文献

- Bertone G, Hooper D. A history of dark matter. arXiv: 1605.04909
- Ji X D, Zhang X M, Chen X. 5–10 years perspective of research on dark matter and dark energy in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1181–1187 [季向东, 张新民, 谌勋. 中国暗物质与暗能量研究5–10年展望, 科学通报, 2016, 61: 1181–1187]
- Planck Collaboration. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2016, 594: 13–75, arXiv: [1502.01589](#)
- Chang J, Feng L, Guo J H. An introduction to dark matter search in space (in Chinese). *Physics*, 2015, 44: 707–713 [常进, 冯磊, 郭建华. 空间探测暗物质简介. 物理, 2015, 44: 707–713]
- Feng J L. Dark matter candidates from particle physics and methods of detection. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 495–545, arXiv: [1003.0904](#)
- An F P, Bai J Z, Balantekin A B, et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 171803, arXiv: [1203.1669](#)
- Asaka T, Blanchet S, Shaposhnikov M. The ν MSM, dark matter and neutrino masses. *Phys Lett B*, 2005, 631: 151–156
- Abazajian K N, Acero M A, Agarwalla S K, et al. Light sterile neutrinos: A white paper. 2012, arXiv: [1204.5379](#)
- Perivolaropoulos L. Lambda-CDM: Triumphs, puzzles and remedies. *J Cosmol*, 2011, 15: 6054–6064
- Weinberg D H, Bullock J S, Governato F, et al. Cold dark matter: Controversies on small scales. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 12249–12255, arXiv: [1306.0913](#)
- Kang X, Macciò A V, Dutton A A. The effect of warm dark matter on galaxy properties: Constraints from the stellar mass function and the Tully-Fisher relation. *Astrophys J*, 2013, 767: 22, arXiv: [1208.0008](#)
- Lovell M R, Frenk C S, Eke V R, et al. The properties of warm dark matter haloes. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 439: 300–317, arXiv: [1308.1399](#)
- Wang L, Gonzalez-Perez V, Xie L, et al. The galaxy population in cold and warm dark matter cosmologies. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 468:

- 4579–4591, arXiv: [1612.04540](#)
- 14 Adhikari R, Agostini M, Ky N A, et al. A white paper on keV sterile neutrino dark matter. *J Cosmol Astropart Phys*, 2017, 2017: 025–025, arXiv: [1602.04816](#)
- 15 Watson C R, Li Z, Polley N K. Constraining sterile neutrino warm dark matter with *Chandra* observations of the Andromeda galaxy. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 2012: 018, arXiv: [1111.4217](#)
- 16 Bulbul E, Markevitch M, Foster A, et al. Detection of an unidentified emission line in the stacked X-ray spectrum of galaxy clusters. *Astrophys J*, 2014, 789: 13, arXiv: [1402.2301](#)
- 17 Boyarsky A, Ruchayskiy O, Iakubovskiy D, et al. Unidentified line in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and Perseus galaxy cluster. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 1301, arXiv: [1402.4119](#)
- 18 Anderson M E, Churazov E, Bregman J N. Non-detection of X-ray emission from sterile neutrinos in stacked galaxy spectra. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 452: 3905–3923, arXiv: [1408.4115](#)
- 19 Ruchayskiy O, Boyarsky A, Iakubovskiy D, et al. Searching for decaying dark matter in deep *XMM-Newton* observation of the Draco dwarf spheroidal. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 460: 1390–1398, arXiv: [1512.07217](#)
- 20 Aharonian F A, et al. (Hitomi Collaboration). *Hitomi* constraints on the 3.5 keV line in the perseus galaxy cluster. *Astrophys J*, 2017, 837: L15, arXiv: [1607.07420](#)
- 21 Jaeckel J, Redondo J, Ringwald A. 3.55 keV hint for decaying axionlike particle dark matter. *Phys Rev D*, 2014, 89: 103511, arXiv: [1402.7335](#)
- 22 Higaki T, Jeong K S, Takahashi F. The 7 keV axion dark matter and the X-ray line signal. *Phys Lett B*, 2014, 733: 25–31, arXiv: [1402.6965](#)
- 23 Gu L, Kaastra J, Raassen A J J, et al. A novel scenario for the possible X-ray line feature at ~ 3.5 keV. *Astron Astrophys*, 2015, 584: L11, arXiv: [1511.06557](#)
- 24 Merloni A, Predehl P, Becker W. eROSITA science book: Mapping the structure of the energetic universe. arXiv: [1209.3114](#)
- 25 Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039502 [袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502]
- 26 Markevitch M, Vikhlinin A. Shocks and cold fronts in galaxy clusters. *Phys Rep*, 2007, 443: 1–53
- 27 Gonzalez A H, Zaritsky D, Zabludoff A I. A census of baryons in galaxy clusters and groups. *Astrophys J*, 2007, 666: 147–155, arXiv: [0705.1726](#)
- 28 Simionescu A, Werner N, Urban O, et al. Thermodynamics of the COMA cluster outskirts. *Astrophys J*, 2013, 775: 4, arXiv: [1302.4140](#)
- 29 Simionescu A, Allen S W, Mantz A, et al. Baryons at the edge of the X-ray-brightest galaxy cluster. *Science*, 2011, 331: 1576–1579, arXiv: [1102.2429](#)
- 30 Urban O, Werner N, Simionescu A, et al. X-ray spectroscopy of the Virgo Cluster out to the virial radius. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 414: 2101–2111, arXiv: [1102.2430](#)

Probing dark matter signals with Einstein Probe

LI ZhiYuan*

School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Determining the physical nature of dark matter is central to contemporary astrophysics and particle physics. The hypothetical sterile neutrinos with a mass of order keV are one of the most promising candidate particles for dark matter, which can play an important role in particle physics, astrophysics and cosmology. In radiative decay, a keV sterile neutrino releases an X-ray photon that has an energy half of the neutrino's rest mass, which facilitates its indirect detection. In 2014, using stacked XMM-Newton spectra of nearby galaxy clusters, researchers reported the detection of a weak line-like feature at 3.5 keV, which was interpreted as the decaying signal of sterile neutrino dark matter. However, follow-up studies did not reach a consensus on the reality of this signal, chiefly due to the limited quality of current X-ray data. The Einstein Probe, with its unique wide-field telescopes, has the great potential of confirming or rejecting the 3.5 keV signal from nearby massive galaxies and galaxy clusters, and will effectively conduct a highly sensitive search for dark matter over the keV energy range.

dark matter, sterile neutrino, galaxy cluster

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA2018-00005](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00005)