

暗物质粒子属性和宇宙结构形成

高亮[†]

(中国科学院国家天文台 中国科学院计算天体物理重点实验室 北京 100012)

2015-09-15 收到

[†] email:lgao@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151001

Dark matter and the formation of cosmic structures

GAO Liang[†]

(National Astronomical Observatories, Key Laboratory for Computational Astrophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

摘要 暗物质是宇宙的主要物质成分,但其本质是什么仍然是现代科学亟待解决的一个重大问题。粒子物理学提供了多种暗物质粒子的候选者,不同的暗物质模型在宇宙小尺度结构方面有迥然不同的预言,所以原则上人们可以通过天文观测来限制暗物质粒子的属性。文章首先综述了暗物质粒子属性对宇宙结构形成的影响,然后阐述目前流行的冷暗物质宇宙学模型面临的一些困难,最后讨论用天文学区分冷、温暗物质模型的天文学方面研究进展情况。

关键词 宇宙学,暗物质,星系

Abstract Dark matter is the dominating component of our universe; however, the nature of dark matter remains unknown. There exist many candidate constituents from particle physics which give very different predictions of the formation of small scale cosmic structures, so in principle we can distinguish the nature of dark matter through astronomical observations. In this article we first review the impact of different dark matter modes on cosmic structure formation, and then describe some apparent problems in the current standard cold dark matter model. Finally, we discuss recent progress in using astronomy to distinguish between cold and warm dark matter.

Keywords cosmology, dark matter, galaxy

1 引言

现代天文学大量证据表明,我们宇宙的主要物质成分由一种尚不为人所知的暗物质粒子组成。根据最近欧洲航天局发射的普朗克卫星最新结果,宇宙中的暗物质比我们通常所了解的由原子分子组成的重子物质多5倍。暗物质的概念首先由瑞士天文学家茨威格在1933年提出。他通过分析我们邻近的后发星系团(COMA)的成员星系的运动发现,可观测到的物质远不足以提供一个来维持其成员星系高速运动的势场。当时他估计

应该有400倍于已知物质的未知物质未被探测到。之后天文学家又通过多种天文观测,比如盘星系的旋转曲线、星系团X射线观测、引力透镜等多种方式证实了暗物质的存在。然而迄今为止,我们除了知道暗物质和重子物质仅仅具有引力作用之外,暗物质粒子究竟是什么,我们尚一无所知。

粒子物理学家们对暗物质提出很多模型,例如基于超对称理论的弱相互作用重粒子(WIMPs)模型,轴子(Axion)模型,中微子模型,惰性中微子(sterile neutrino)模型,引力子(Grautino)模型

等。不同模型下的暗物质粒子自身的内禀速度弥散不同，天文学家按照暗物质粒子的内禀速度将这些暗物质粒子大致分为三类(在天文学上速度常常和温度联系在一起)：(1)冷暗物质，包括弱相互作用重粒子、轴子等；(2)温暗物质，如惰性中微子、引力子等；(3)热暗物质，如有质量的中微子。值得一提的是，中国科学院高能物理研究所张新民研究员等发现，超对称理论的WIMPs如果由非热机制产生的话，它也可以是一种温暗物质。虽然暗物质粒子和宇宙结构分别对应着物理上极小和极大尺度，但宇宙结构形成和暗物质粒子的属性是息息相关的。这三类暗物质粒子会在宇宙的小尺度上形成不同的结构，所以原则上我们可以通过对宇宙小尺度结构的天文观测来区分暗物质的属性。

2 宇宙物质功率谱和宇宙结构形成

宇宙虽然拥有极其丰富的天体和结构，但其结构形成的基本物理却非常简单。宇宙暴涨阶段的量子涨落会导致均匀的宇宙物质密度场产生极其微小的涨落。在引力作用下，这些微小的涨落幅度会随时逐渐增长。而最小尺度的涨落会首先发展到非线性阶段而塌缩为小的、引力自束缚的系统——暗晕。这些小暗晕之后会通过并和以及吸积过程发展成越来越大的暗晕。在这个过程

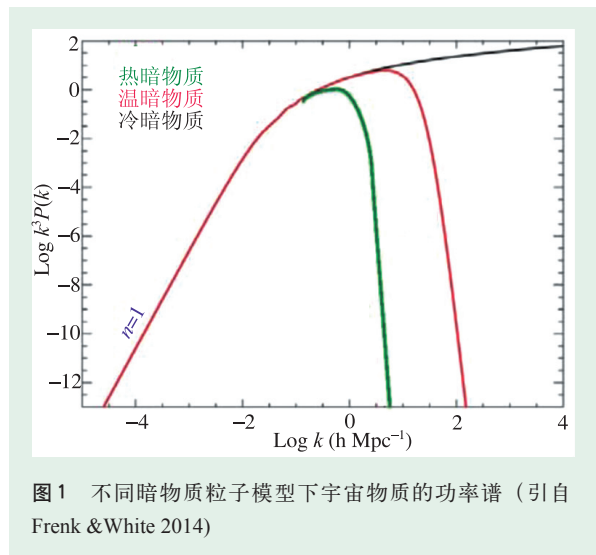


图1 不同暗物质粒子模型下宇宙物质的功率谱(引自Frenk & White 2014)

中，气体最初将和暗物质粒子一起成团塌缩，然后由于引力作用被加热到高温，形成一个压强和引力平衡的系统。但高温气体会通过辐射能量而降温，压强和引力平衡被打破故逐渐向暗晕中心塌缩。在塌缩过程中，气体保持角动量守恒，所以在暗晕中心形成一个薄的高密度气体盘，因为引力不稳定性，气体盘会碎裂进而形成星系。宇宙就是通过这个简单的物理图像，逐渐形成和演化到了我们今天看到的具有丰富天体的宇宙。当然基本物理图像虽然很简单，但宇宙究竟是如何从一个近于均匀的状态演化到现在是一个非常复杂的过程。

在标准宇宙学里，宇宙原初物质密度涨落在各个尺度都存在。但暗物质粒子因为内禀运动而导致的暗物质粒子自由穿越(free-streaming)会消除 R_s 尺度以下的密度涨落。这里 R_s 是一个典型粒子运动距离。没有密度涨落便意味着 R_s 尺度以下不会有结构形成。 R_s 的大小依赖于暗物质的属性，所以在不同属性的暗物质粒子模型下的宇宙，宇宙中形成的最小天体结构不同。宇宙物质密度场涨落可以由宇宙物质密度的功率谱描述，其反映宇宙物质密度涨落强度和物理尺度的关系。图1显示不同暗物质粒子模型下宇宙物质功率谱的不同。宇宙中不同暗物质功率谱的高频截断位置， $k_s=2\pi/R_s$ ，不同，意味着在 R_s 尺度之下没有密度涨落。如果暗物质粒子是冷暗物质的WIMPs， R_s 非常小，宇宙最小暗晕的质量和地球相当。但如果是热暗物质的中微子， R_s 极大，所以导致宇宙形成最小的暗晕类似后发星系团，它的质量大约是 10^{15} 个太阳质量，这和天文观测严重不符，所以在上个世纪80年代被排除。而温暗物质粒子自由穿越尺度 R_s 约为100 kpc，所对应的最小暗晕和我们能直接观测到的最小星系——矮星系相当。所以在流行的冷暗物质模型外，温暗物质也是一种有竞争力的暗物质模型。

宇宙物质功率谱可以由天文观测来测量。图2显示不同尺度宇宙物质原初功率谱的天文观测手段。最大尺度上宇宙物质的功率谱是通过宇宙微波背景辐射来测量，中间尺度的宇宙物质功率

谱可以通过星系团计数、大型星系红移巡天、弱引力透镜来测量。宇宙物质密度场可能在非常小的尺度上都存在涨落，但目前天文测量功率谱的最小探测尺度大约在 100 kpc，这是通过测量星际间气体拉曼—阿尔法吸收线获得的。幸运的是这个尺度的功率谱正好可以用来区分一些冷、温暗物质模型。但局限于目前天文观测数据和理论理解，目前用拉曼—阿尔法谱线来区分冷、温暗物质模型的可信度还有待提高。

3 冷、温暗物质模型下宇宙大尺度结构形成

上节谈到宇宙结构形成决定于宇宙物质密度功率谱，在目前流行的冷暗物质宇宙中，地球质量大小的暗晕先形成，然后它们通过并和吸积过程形成越来越大的暗晕。所以在冷暗物质模型下，今天的宇宙中充满了无数个从地球到星系团在质量上跨越 21 个数量级的暗晕。

最近几十年的现代望远镜飞速发展，使得人类可以看到宇宙的更远处和更暗的天体；而超级计算机的发展使我们在理解宇宙结构形成和演化方面也上了一个新层次。由于暗物质数量远比重子物质多，所以宇宙大尺度结构形成主要是由暗物质的引力作用导致。由于物理上的简单性而使算法易于实现，我们现在已经可以通过超级计算机来精确模拟宇宙大尺度结构的形成和演化了。另外，不同暗物质模型下的宇宙的结构形成也已得到精确的预言。将不同属性暗物质预言的宇宙结构与天文观测进行比较，为我们提供了从天文观测上区分暗物质性质的途径。

图 3 显示数值模拟中预言冷、温暗物质模型中宇宙暗物质分布情况。从图中可以很明

显看到，在宇宙大尺度上，冷、温暗物质模型的预言非常相似。它们都存在暗晕、纤维结构、空洞等等。不同的是温暗物质模型下宇宙空洞更空，纤维结构也更光滑。图 4 比较了冷、温暗物质模型在预言类银河系的暗晕的不同。我们可以发现，两者预言的银河系暗晕的大尺度结构也相似，但其中子结构(图中密度高的暗物质团)成分非常不同。由于冷暗物质模型存在更小的结构，所以其下的银河系存在无数个子结构。与之相反的是，温暗物质预言下的银河系只存在有限的、大的子结构。这一特征对解决冷暗物质模型下的一个难题(见下节)有重要意义。

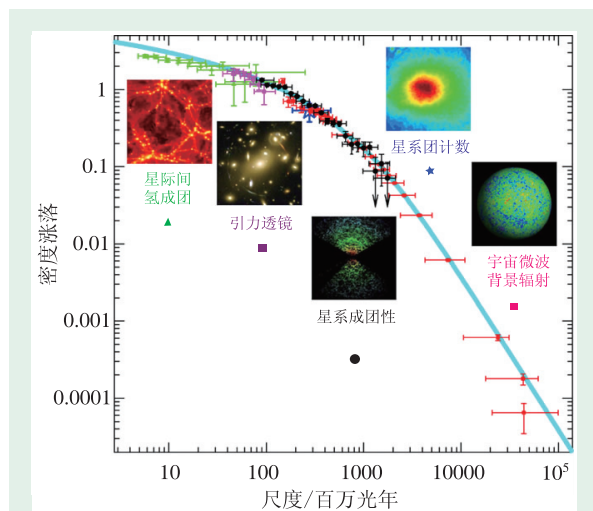


图 2 不同尺度的宇宙物质功率谱天文观测手段示意图 (引自 <http://space.mit.edu/home/tegmark/sdss.html>)

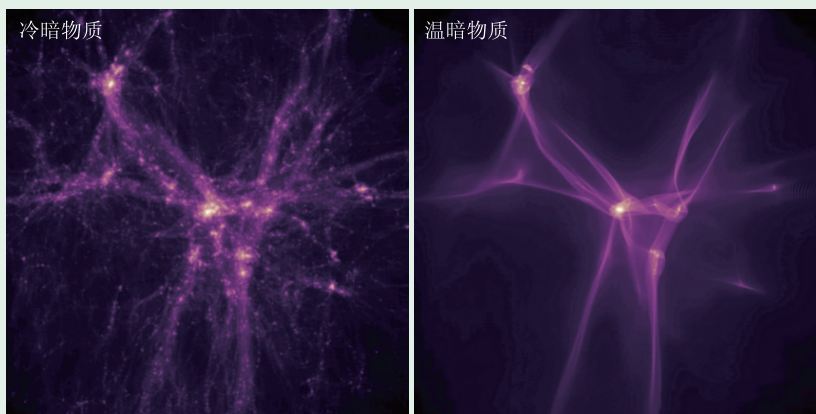


图 3 计算机模拟冷、温暗物质模型下的宇宙大尺度结构(左图为冷暗物质，右图为温暗物质)

4 标准冷暗物质模型的“两朵乌云”

银河系是我们生存的家园，也是距离我们最近的星系，所以在很多方面利于对其开展详尽研究。标准冷暗物质模型在近些年在解释宇宙大尺度结构方面取得巨大的成功，但在解释银河系卫星星系方面还存在两朵乌云。在过去，温暗物质模型常常被认为是驱散这两朵乌云的解决方案。

4.1 银河系“丢失”卫星星系问题

在我们家园的银河系中央存在一个巨大的星系盘，我们大概处于星系盘的边缘附近，即距银心大约 8 kpc。从银河系中心到外围 200 kpc 区域，存在比可见物质重 100 倍的暗物质。它们和银河系重子物质共同组成一个自引力系统——银河系暗晕。在这个系统里天文学家还发现存在一些子系统——卫星星系，比如大、小麦哲伦星系等等。经过多年努力，直到本世纪初，天文学家们在银河系仅仅发现了 11 个卫星星系。

而冷暗物质宇宙学数值模拟预言，银河系应存在成千上万个和银河系卫星星系质量相当的暗物质子结构。是我们的探测能力不够或者是冷暗物质模型不正确？这个问题首先由瑞士和美国的理论天文学家提出，提出后在学术界引起巨大的反响。

银河系缺失星系提出以后，天文学家们在冷

暗物质框架下提出了一些解决方案，最合理的解释是宇宙再电离作用。宇宙再电离时期大约发生在红移 6，在之前因为宇宙的膨胀导致气体温度很低，所以各种重子元素如氢和氦均处于中性状态。但随着宇宙演化形成了越来越多的星系和类星体，它们发射的紫外光子会电离宇宙的中性氢。同时气体在电离过程中被加热到 10^4 K 以上。在电离发生前暗晕内的气体和暗物质成恒定比例并维持着压强引力平衡。但宇宙电离后，不同质量暗晕中的气体有极其不同的命运。大质量暗晕因为其势阱深所以宇宙再电离对其气体不会产生任何影响。但小暗晕因为其本身势阱浅，在再电离过程中，气体被加热，所以压强引力平衡状态被打破，进而气体便被“蒸发”出暗晕，使得小暗晕仅仅含有非常少的气体。气体是形成星系的原材料，缺乏了原材料所以这些暗晕不会形成任何发光天体。如此这样，人们发现，如果仅仅允许宇宙在再电离前形成的暗晕形成星系的话，就会大致解释观测到的银河系卫星星系数目。

但在这个问题上，有很多事实需要注意：在观测中，银河系卫星星系非常难于辨识；另外，由于我们人类所处的位置(银河系盘遮挡)使得我们很难确定银河系卫星星系的绝对数目。目前最强大的银河系巡天也只覆盖了 1/5 的天区，因此尚有非常多的卫星星系待发现。就在最近，DES 巡天又发现了 10 多个卫星星系。所以我认为，在目前利用卫星星系数目来检验宇宙学不太可靠。

然而银河系中心距离我们非常近，在附近区域我们的观测完备度更高，所以利用银河系中心的卫星星系数目来限制宇宙学更现实。我在 2011 年利用银河系的数值模拟发现，在距离银心 30 kpc 内区域，如果标准宇宙学是正确的话，人类应该发现超过 30 个卫星星系。然而截止今天为止我们仅仅观测到 4 个。这个结果对标准宇宙学来说是一个更难解决的挑战。

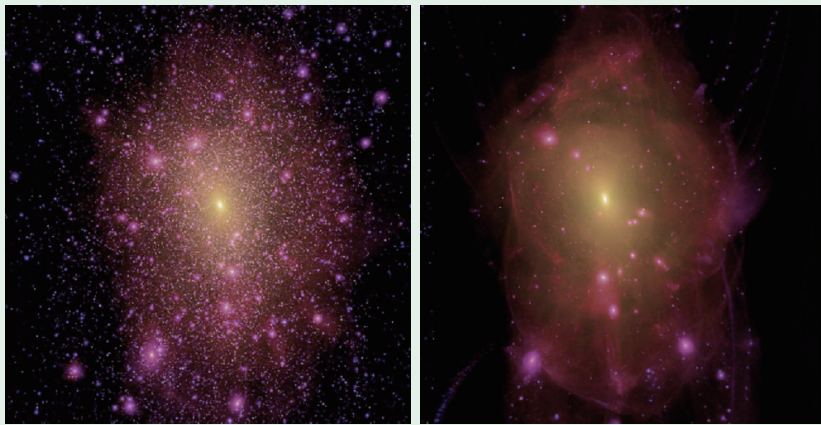


图4 计算机模拟冷、温暗物质模型下的银河系暗物质分布(左图为冷暗物质，右图为温暗物质)

如果银河系确实存在“卫星星系丢失”问题，温暗物质模型可以很自然地解释它。如图4所示，冷、温暗物质模型下，银河系子结构的数目非常不同，暗物质粒子越温，子结构越少，这也意味着卫星星系越少，很自然地解释了银河系卫星星系数目问题。

4.2 银河系卫星星系中心密度轮廓问题

除了在数目之外，冷暗物质模型在解释银河系卫星星系内部暗物质密度也存在明显的困难。银河系卫星星系因为非常暗弱，所以天文学家相信，一些天体物理过程对其暗物质密度分布影响很小。实际观测也证实这一点，即在卫星星系最中心依然是暗物质占主导的。冷暗物质宇宙学模型对星系中心暗物质密度轮廓有非常确定的预言，即越靠近中心暗物质密度越大。天文学家们可以通过测量卫星星系内部恒星的运动，然后利用动力学模型来推测卫星星系内部物质结构。许多观测结果表明，卫星星系中心暗物质密度轮廓呈现核球结构，即到一定小的尺度后暗物质密度成为一个常数，这和标准的冷暗物质模型相冲突。

与之相关的另一项研究强化了这个问题。运用位于夏威夷的10 m口径凯克望远镜，美国Boylan-Kolchin等在2012年测量了卫星星系在一定半径内物质总质量。与标准宇宙学数值模拟相比，他们发现，测量到的总质量远远小于冷暗物质模型预言。这个效应被称作“矮星系中心暗物质太少问题(Too big to fail)”。运用冷暗物质模型解决这个问题的方案是超新星爆发。在这个观点下，卫星星系中心的大质量恒星在死亡时形成的超新星爆发会产生巨大的喷流。由于引力作用，喷流会把周围的暗物质带出去，从而降低了中心暗物质密度。但一个反对的观点是，目前我们在非常暗的卫星星系也发现了同样的现象。这些非常暗弱的卫星星系的恒星数目是如此少，所以是否能提供足够多的超新星是个大问题。因此冷暗物质宇宙学是否能解释这个现象

尚存在争议。

温暗物质模型曾经被认为可以很自然地解释矮星系内部核球问题，其物理图像非常容易理解。对于一个无碰撞暗物质粒子组成的系统，根据刘维尔定律，其时间演化需保持相空间(6维)守恒。对于内禀速度弥散几乎为0的冷暗物质来说，该系统相空间密度几乎没有上限，所以当这个粒子系统塌缩后可以形成无限高密度的区域。但温暗物质粒子具有较高的内禀速度弥散，它在动量空间遵循费米—狄拉克方程，所以一个由温暗物质粒子组成的系统存在一个细粒度相空间密度极大值。其塌缩后的系统同样存在这样一个相空间密度最大值，因而该系统的塌缩必然在中心形成一个核球结构。但如何联系天文观测中恒星的运动速度和温暗物质粒子质量是一个有广泛争议的难题。我和学生在2013年最终解决了这个问题，我们进而发现矮星系暗物质核球结构需要0.5 keV的温暗物质来解释。然而在这个质量的温暗物质模型中，宇宙中形成的最小的天体是银河系类大小的星系，其内的矮星系根本无法形成。所以这里就形成一个悖论，如果矮星系内部暗物质核球结构由温暗物质导致的话，矮星系自身无法形成。值得一提的是，温暗物质宇宙中结构因为形成晚，所以其内部结构密度相对于冷暗物质要低一些，可以很自然解释“矮星系中心暗物质太少”问题。

5 区分暗物质属性新观测量

上述两种经典的区分暗物质方法很难用于区分暗物质性质，所以必须发展新观测量。我在2007年注意到，冷、温暗物质模型下宇宙结构在纤维结构上的一个显著不同，即温暗物质下的纤维结构是连续、光滑的，而冷暗物质的纤维结构是离散、碎裂的。纤维结构由于也是暗物质的集聚区，有可能可以提供形成恒星的势场。为验证此，我和合作者用计算机模拟来验证这个想法。结果显示温暗物质模型下的纤维结构的确可以提供足够大的势场来加热气体。加热后的气体可以

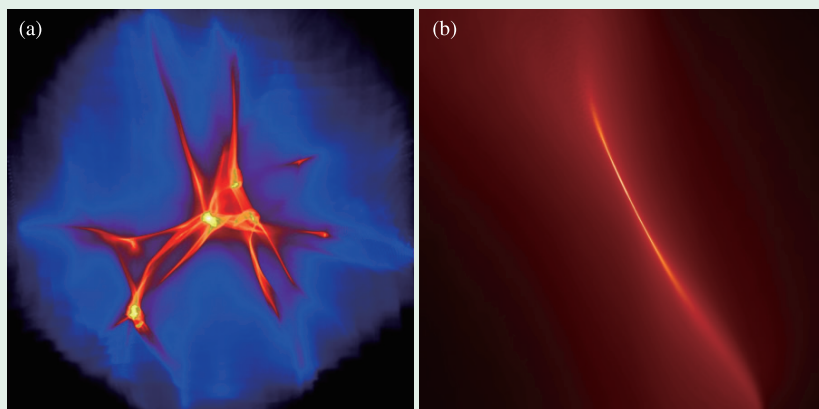


图5 如果我们宇宙的暗物质由温暗物质粒子组成, 宇宙第一代恒星将在暗物质纤维(a)中诞生, 它们将以星爆方式产生, 并排列为规则的、如闪电一样点亮暗黑的宇宙(b)

快速形成分子氢, 分子氢可以释放光子丢失能量而冷却, 气体因而失去引力压强平衡而在纤维结构上塌缩到高密度。由于一维引力不稳定性, 高密度的气体纤维会碎裂成众多质量的气体团块, 这些气体团块将以快速爆发方式各自几乎同时形成恒星, 并在几何上排列为丝弦状, 像闪电一样划破遥远的宇宙(见图5(b))。而在冷暗物质模型下, 第一代恒星只能依次逐渐在球形的暗晕里面形成, 星星点点地点缀着宇宙。所以理论上如果我们的望远镜足够大、看得足够远, 并能看到像闪电排列的恒星群的话, 我们就可以排除两种暗物质模型。

然而在可以预期的将来, 人类或许非常难研发出足够大的望远镜来利用此现象限制暗物质性质。所以在2014年, 我们对此工作延伸到距离我们更近的宇宙, 来考察温暗物质模型下是否还存在此种类型的恒星形成事件。没有详细的数值试

验的话是无法回答这个问题的, 因为在较近邻的宇宙紫外背景场非常强, 其对气体的电离过程会产生加热效应, 所以很难估计势阱很浅的宇宙纤维结构是否能束缚其中的气体。我们后来的数值试验表明, 直到红移为2.5时, 这种恒星形成机制可以持续在温暗物质宇宙中发生。而之后的宇宙, 由于气体密度更低并且宇宙紫外背景更强, 所以此效应不再发生。对于我们目前已有

的望远镜来讲, 红移2.5的暗弱天体是非常难于探测的, 但很可能是人类正在发展的下一代望远镜的探及范围。所以让我们期待正在夏威夷建设的30 m口径以及哈勃望远镜的继任者韦伯望远镜的落成。如果他们真的能在遥远的宇宙看到像闪电一样排列的恒星群, 我们将排除冷暗物质模型。

6 结束语

本文综述了不同暗物质粒子对结构形成的影响, 并讨论了近年来用天文学手段限制暗物质属性的研究进展。随着下一代空间、地面大型望远镜的落成, 利用天文学手段限制暗物质粒子属性有光明的前景, 相信它将与其它空间、地下暗物质粒子探测手段形成互补, 在不远的将来共同解决暗物质本质这一重大科学问题。

参考文献

- [1] 秦波. 现代物理知识, 2007, 19(5): 17
- [2] 毕效军. 科技导报, 2006, 24(0609): 8
- [3] Lin W B, Huang D H, Zhang X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 954
- [4] Frenk C S, White S D M. Annalen der Physik, 2012, 524: 507
- [5] Moore B, Ghigna S, Governato F *et al.* Appl. Phys. Jour., 1999, 524: 19
- [6] Okamoto T, Gao L, Theuns T. MNRAS, 2008, 390: 920
- [7] The DES collaboration. eprint, arxiv: 1508.03622, 2015
- [8] Gao L *et al.* MNRAS, 2010, 403: 1283
- [9] Gilmore G *et al.* Appl. Phys. Jour., 2007, 663: 948
- [10] Boylan-Kolchin M, Bullock J S, Kaplinghat M. MNRAS, 2011, 415: 40
- [11] Shao S, Gao L, Theuns T *et al.* MNRAS, 2013, 430: 2346
- [12] Lovell M *et al.* MNRAS, 2012, 421: 2553
- [13] Gao L, Theuns T. Science, 2007, 317: 1527
- [14] Gao L, Theuns T, Frenk C S. MNRAS, 2015, 450: 2703