

What is the universe made of?

宇宙是由什么构成的?

张鹏杰

上海交通大学物理与天文系, 上海 200240

E-mail: zhangpj@sjtu.edu.cn

2016-02-02 收稿, 2016-02-17 修回, 2016-02-17 接受, 2016-04-15 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2015CB857000)资助

摘要 通过星系、星系团, 乃至宇宙整体的动力学行为, 天文学家发现宇宙中绝大部分物质是不发光的, 即暗的. 其中暗物质占宇宙中总物质和能量的27%, 暗能量占68%, 而普通物质(即粒子物理标准模型粒子)只占5%. 暗物质和暗能量是当代天文学和物理学的重大发现, 是主要研究前沿. 我们回顾暗物质和暗能量的发现历史、已知属性和待解决的问题.

关键词 暗物质, 暗能量, 宇宙学

宇宙是由什么构成的? 这是一个古老而深刻的问题. 20世纪70年代, 粒子物理标准模型建立. 人类见过的所有粒子, 尽数纳入囊中. 然而到世纪之交的时候, 天文学却令人震惊地发现: 粒子物理标准模型只能涵盖宇宙中5%的物质和能量. 宇宙中占95%的, 是暗物质(27%)和暗能量(68%)^[1].

暗物质、暗能量, 顾名思义, 不发光, 不是粒子物理标准模型所能涵盖的普通物质. 它们就分布在我们周围, 但是与普通物质几乎没有重力之外的相互作用, 因此从来没有在任何物理实验中显形, 也从来没有在太阳系中露面. 然而在十万光年量级的星系尺度上, 暗物质的力量展现无遗, 它们产生的引力束缚住千亿颗以几百公里每秒速度飞奔的恒星, 使得星系不至于分崩离析; 在百万光年量级的星系团尺度上, 暗物质产生的引力竟然能束缚住以上千公里每秒速度狂奔的庞大星系, 甚至扭曲时空, 把遥远星系发出的光拉成巨大的光弧.

但是, 在千万光年及更大的尺度上, 暗能量才是宇宙演化的主宰. 暗能量是一种神秘的未知场, 具有负的压强, 状态方程(压强与能量的比值)约等于-1,

因此产生排斥性的重力, 在宇宙中近乎均匀分布. 它产生的斥力使得宇宙的膨胀越来越快.

暗物质、暗能量颠覆了人类对宇宙构成的认知, 揭示了未知物理规律的冰山一角, 预示着新的物理学革命的到来. 但是, 目前所有的证据均来自天文学.

20世纪30年代, 天文学家兹威基(Fritz Zwicky)发现后发座(Coma)星系团中的成员星系运动得很快. 要束缚住这些星系, 就要求星系团中存在大量看不见的物质(即“暗物质”)来提供足够大的引力. 60年代以来, 女天文学家鲁宾(Vera Rubin)等人^[2]发现漩涡星系中恒星围绕星系中心的旋转速度远大于预期, 表明星系中存在大量的暗物质. 在这之后, 暗物质的存在成为天文学界的共识. 到了21世纪, 引力透镜的观测进一步表明, 星系之间的宇宙空间, 也存在大量的暗物质. 这些暗物质产生的引力透镜效应, 使得遥远星系的图像平均被扭曲了1%的量级.

这些看不见的暗物质是什么? 黑洞? 中子星? 白矮星? 其他由普通物质组成的致密但是不发光的物体? 都不是! 宇宙学尺度上的结构形成要求宇宙中的普通物质加暗物质占约30%. 而宇宙大爆炸核合

引用格式: 张鹏杰. 宇宙是由什么构成的? 科学通报, 2016, 61: 1754-1757

Zhang P J. What is the universe made of? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1754-1757, doi: 10.1360/N972016-00161

成则告诉我们普通物质约占5%。因此暗物质不是普通物质，而是超出粒子物理标准模型的未知物质，天文学上一般称为非重子暗物质，以区别于主要由重子组成的普通物质。另一个更加确凿的证据来自宇宙微波背景辐射。非重子暗物质的存在会调制宇宙早期辐射——物质流体中的声波振荡，从而在宇宙微波背景辐射中留下独特的印记。2003年以来，WMAP、Planck等^[1]宇宙微波背景辐射试验精确的测量了这些印记，发现非重子暗物质约是普通物质的6倍。

暗物质是决定宇宙结构形成的主导力量。与普通物质一样，暗物质的压强相对于其密度可以忽略不计。因此暗物质与普通物质的引力行为基本相同。因为暗物质远多于普通物质，所以暗物质是宇宙中结构形成的基石，是维系星系和星系团动力学稳定性的关键。在银河系中，太阳以约220 km/s的巨大速度运动。它之所以没有被巨大的离心力甩出银河系，暗物质起了重要作用；从物质分布极度均匀的早期宇宙演化出物质高度密集的星系，暗物质也起了核心作用。在引力作用下，暗物质逐渐聚集、成团，形成暗物质晕，星系就是在这些暗物质晕中形成的。星系巡天中发现了横亘十——20亿光年的巨大“星系长城”，暗物质正是其中的骨架。

至于暗能量，早在20世纪80年代，就有宇宙学家推测出了它的存在。但是，暗能量被天文和物理学界广泛接受则来自1998年Ia型超新星的观测结果。Ia型超新星是宇宙中的“标准烛光”，能够从它们的亮度测量出它们的距离，从而换算成宇宙大小随时间的演化。通过遥远超新星的观测，2个天文学团组发现宇宙的膨胀速度不仅仅没有在重力作用下变得越来越慢，反而变得越来越快^[3,4]！这是一项革命性的发现，因此3位负责人(Saul Perlmutter, Adam Riess, Fabian Schmidt)荣获2011年诺贝尔物理学奖。按照广义相对论，宇宙的加速膨胀表明宇宙中存在一种未知的能量场，即暗能量。它的状态方程约等于-1，从而其重力体现为排斥力，导致宇宙膨胀的加速。

超新星的证据之外，暗能量的存在也得到了多方位观测证据的支持。例如，2011年5月，阿塔卡马宇宙学望远镜(Atacama cosmology telescope)在宇宙微波背景中找到了暗能量的踪影。不同于以往的是，新的证据完全来自于宇宙微波背景观测数据，即不依赖于任何其他观测数据。原因在于，此前3月份该望远镜首次测量到了低红移处宇宙大尺度结构造成的

宇宙微波背景弱引力透镜现象(CMB lensing)。该测量打破了宇宙微波背景宇宙学中的一个几何简并，从而扫除了独立从宇宙微波背景中发现暗能量的障碍。而2013年以来，Planck卫星微波背景辐射试验则用同样方法更加确凿地证实了暗能量的存在。

因为暗能量的重力作用体现为排斥力，所以暗能量基本不成团，在宇宙空间中均匀分布。由于这个特性，很难从单个星系或星系团中找到暗能量的踪迹。那么，暗能量如何探测呢？除去导致宇宙加速膨胀之外，它减慢了宇宙结构增长的速率，因此在宇宙大尺度结构中留下独特印记。天文学家已掌握了多种方法来从海量天文数据中提取出暗能量的信息。

宇宙浩淼无垠、缤纷多彩，因此天文学家掌握着众多探测暗物质、暗能量的方法。值得一提的是，不同方法都给出了一致的结果：暗物质约27%，暗能量约68%。这些方法包括宇宙微波背景辐射、重子声波振荡、Ia型超新星、红移畸变、星系团计数、弱引力透镜等，相互独立，交叉验证，使得暗物质和暗能量的存在更加令人信服。基于此的宇宙学模型因此被称为协和宇宙学(concordance cosmology)，能够解释几乎所有宇宙学观测数据，因此已成为宇宙学标准模型。

然而，暗物质到底是什么？暗能量又是什么？我们所知甚少。暗物质可能是一种弱相互作用重粒子(weakly interacting massive particles)，有微小但不为零的概率与普通物质发生作用。目前有很多地下试验(例如上海交通大学主持的PandaX试验和清华大学主持的CDEX试验)正在搜寻暗物质造成的核反冲。暗物质粒子之间也可能发生湮灭，产生伽马射线(连续谱或谱线均有可能)、正电子等，是Fermi卫星、alpha磁谱仪、我国刚刚发射的“悟空”(DAMPE)暗物质卫星等搜寻暗物质的方法；暗物质粒子也可能发生衰变，从而改变宇宙早期微波背景辐射、黑暗时代和再电离过程。

暗能量则可能是宇宙学常数，由爱因斯坦在80多年前引入广义相对论场方程。但是，没有令人信服的机制能够解释其观测值的大小——基于真空零点能的估算值比观测值大了超过100个数量级；暗能量也可能是某种动力学场，其性质随着时间演化。动力学暗能量和宇宙学常数的区别在于其状态方程 w 一般不等于-1，而且随时间改变。甚至，这种动力学场存在所谓tracker解，有助于缓解所谓的巧合问题：为

什么暗能量和物质密度恰恰在近期差不多大小?甚至,有可能根本不存在暗能量,而是广义相对论在宇宙学尺度上出现了问题.近10年关于修改引力的研究取得了巨大进展,例如修改引力屏蔽机制的发现和修改引力数值模拟等,这又反过来促进了广义相对论的宇宙学检验、以及成团暗能量的研究.今后10年左右的时间,将开展多个规模宏大的第4代暗能量

巡天项目,包括Euclid卫星、WFIRST卫星项目、基于LSST 6 m地面望远镜的测光巡天、基于Mayall 4 m望远镜的DESI光谱巡天和基于8 m Subaru望远镜的PFS光谱巡天等.这些巡天将通过重子声波振荡、弱引力透镜、红移畸变等多种方法探索暗能量,有望精确测量暗能量状态方程、在宇宙学尺度上检验广义相对论,从而打开新物理的窗口.

参考文献

- 1 Planck C, Ade P A R, Aghanim N, et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2014, 571: A16–A81
- 2 Rubin V C, Ford Jr W K. Rotation of the andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions. *Astrophys J*, 1970, 159: 379–403
- 3 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron J*, 1998, 116: 1009–1038
- 4 Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586

What is the universe made of?

ZHANG PengJie

Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

From observations of dynamics of galaxy, galaxy cluster and the universe as a whole, astronomers found that most matter in the universe does not emit light and is therefore dark. Dark matter accounts for 27% of the total matter and energy budget of the universe. Dark energy accounts for 68%. Ordinary matter that can be explained by the standard model of particle physics only accounts for 5%. Dark matter and dark energy are among major discoveries of physics and astronomy, and are a major research frontier. We review the discovery of dark matter and dark energy, explain their basic known properties and address some unresolved problems.

dark matter, dark energy, cosmology

doi: 10.1360/N972016-00161



张鹏杰

上海交通大学物理与天文系特聘教授。1997 年北京大学本科毕业, 2003 年多伦多大学博士毕业, 2003~2005 年在费米实验室做博士后, 2005 年入选中国科学院百人计划, 任中国科学院上海天文台研究员, 2012 年 12 月加入上海交通大学。获得国家杰出青年科学基金(2010)、中国天文学会黄授书奖(2012)。研究领域是宇宙学, 重点是宇宙大尺度结构及其在基础宇宙学物理中的应用。