

# 暗物质研究述评

## Review on Dark Matter Research

陈学雷/CHEN Xue-lei

中国科学院国家天文台, 北京 100012

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

[摘要] 近年来的天文观测表明, 宇宙中只有约 5% 的物质是我们所了解的重子物质, 其余约 25% 是暗物质, 约 70% 是暗能量。暗物质和暗能量已成为现代科学中最重要的问题之一。介绍了当前暗物质研究的进展。

[关键词] 暗物质, 宇宙学 [中图分类号] P145.9

[文献标识码] A [文章编号] 1000-7857(2006)01-0015-04

Abstract: Recent astronomical observations show that only about 5% of the Universe were made of the baryonic matter which we understand, about 25% were dark matter, and the rest 70% were dark energy. Dark matter and dark energy has become one of the most important problems in modern science. In this article we review the progress in dark matter research.

Key Words: dark matter, cosmology CLC Number: P145.9

Document Code: A Article ID: 1000-7857(2006)01-0015-04

### 1 引言

19 世纪末, 随着经典力学、电磁理论、热力学和统计物理等经典物理学理论的建立, 当时的一些物理学家如开尔文曾乐观地认为物理学已告完成, 今后的工作将只是把常数测得更精确一些。但是, 当时他也提到, 还有两朵乌云漂浮在物理学的天空, 即以太漂移和黑体辐射的实验。然而, 谁也不曾料到, 随之而来的是物理学的革命, 这所谓两朵乌云竟分别预示着经典物理的破灭和相对论与量子力学的伟大发现。

经过一个世纪之后, 以相对论和量子力学为基础的现代物理学取得了巨大的进展。今天, 粒子物理的标准模型可以相当好地解释所有已知的基本粒子的性质, 也为凝聚态物理、光学、量子化学等理论奠定了坚实的基础。然而在 20 世纪末, 人们发现, 物理学的天空中, 又漂浮着两朵新的乌云, 这就是暗物质和暗能量问题。这两个问题都无法用现在已知的物理学知识加以解释, 那么它们是否预示着新的物理学革命? 通过对这两个问题的研究, 是否能帮助我们找到比粒子物理标准模型更基本、更深刻的物理理论? 是否能使我们认识宇宙的起源? 由于这些原因, 暗物质和暗能量问题已经成为现代物理学和天文学中最有吸引力的研究课题。

笔者在本文中介绍暗物质被发现的历史、研究的现状, 以及近期的研究前景。关于暗能量的研究进展, 读者可参看《科技导报》2005 年第 12 期蔡荣根教授的述评。

### 2 暗物质与暗能量的发现历史

所谓暗物质, 指的是目前我们可以通过其万有引力推知其存在, 但却未能直接观测到的物质。早在 70 年前, Zwicky 就发现<sup>[1]</sup>, 星系团中星系的随机运动速度相当快。根据位力定理, 随机运动的动能应等于势能的一半, 这说明星系团的引力势能相当强, 但是根据观测到的其中星系的亮度推测星系团的质量, 引力势能似乎不应该这么高, 这说明星系团中存在着大量未被观测到的物质。1970 年以后, 人们获得了银河系和一些邻近星系的旋转曲线 (即距离星系中心不同距离处恒星或气体绕星系中心旋转的速度)。根据力学原理, 其旋转运动向心力应等于所受引力。在距离星系中心较远处, 星系的吸引力应该逐渐减弱, 因此旋转速度应该下降。但是实际观测到的星系旋转曲线, 有许多在可观测到星系盘的边缘仍是平的 (也有一些星系其旋转曲线是下降的, 但下降的也比没有暗物质的理论预期缓慢), 证明在星系盘外仍存在着大量未被观测到的物质, 即暗物质<sup>[2-4]</sup>。另外,

对于许多观测到的星系盘, 必须假定盘周围有球型分布的质量很大的暗物质 (暗物质晕), 才能解释这些星系在动力学上的稳定性<sup>[5]</sup>。自此暗物质的存在性被大多数天文学家接受。此后, 在天文学上又发现了暗物质存在的许多其它证据。例如, 引力透镜、星系团 X-射线、大尺度结构等观测也证实了暗物质的存在<sup>[6-9]</sup>。

暗物质的密度, 常用宇宙的临界密度的分数来表示。根据 Friedman 方程, 宇宙膨胀的 Hubble 速度  $H$  与宇宙总密度  $\rho$  的关系是:

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

这里  $a$  是宇宙的标度因子 (对封闭宇宙来说, 即宇宙半径), 对于平直, 封闭和开宇宙,  $k=0, 1, -1$ 。如果方程左边取现在观测到的 Hubble 常数并令  $k=0$ , 则右边对应的密度称为临界密度  $\rho_{\infty}$ 。暗物质的相对密度为  $\Omega_m = \rho_m / \rho_{\infty}$ 。大部分观测表明  $\Omega_m$  在 0.2-0.3 之间。相比之下, 目前观测到的星系中的恒星密度  $\Omega_*$  仅 0.005 左右<sup>[10]</sup>, 因此暗物质远远超过发光物质。

暗物质是什么呢? 人们首先想到的当然是不发光的普通物质 (重子物质), 如气体、行星、冷却的白矮星等。但是, 经过多方面的研究, 发现它们只能占暗物质的一小

收稿日期: 2005-12-15

基金项目: 国家自然科学基金委员会杰出青年基金 (10525314)、重点项目基金 (10533010)

作者简介: 陈学雷, 男, 北京市朝阳区大屯路甲 20 号中国科学院国家天文台, 研究员 (百人计划), 主要研究方向为宇宙学;

E-mail: xuelei@bao.ac.cn

部分,而不足以构成暗物质的主要部分。例如,如果暗物质是大质量致密暗晕天体(Massive Compact Halo Object, MACHO)如行星、冷却的白矮星、黑洞等,则当它们经过大小麦哲伦星云、仙女座星云等近邻星系的恒星前时,它们将产生微引力透镜效应,改变恒星的亮度。通过监视这些星系中恒星的亮度,基本可以排除 MACHO 作为星系中暗物质的可能性<sup>[11-12]</sup>。气体也可以通过射电、X-射线等方法观测到。在星系中,仅有少量的重子物质以气体的形式存在<sup>[13]</sup>,但这可以用氢原子的 21 cm 线观测到。在星系群周围可能存在着温度为  $10^5 \sim 10^6$  K 的气体,称为温热星系间介质,其总质量大于恒星中重子质量,但也可以通过 UV 和 X-射线观测到<sup>[14-21]</sup>。那么,是否有我们还没有想到的重子物质存在的方式呢?根据大爆炸核合成理论,宇宙中重子物质的密度对于氦的丰度有很大的影响。重子物质的密度越大,氦的丰度越小。由于在大爆炸以后没有一种环境可以大量合成氦,因此观测到的氦丰度使我们可以得到重子密度的一个上限,这样得到的  $\Omega_b$  仅约 4%<sup>[22]</sup>。

在标准模型中已知的物质粒子包括重子和轻子。在轻子中稳定的中性粒子中微子是否可能是暗物质?由于中微子的质量很轻,其运动是相对论性的,因此中微子被称为热暗物质。由于中微子的自由运动,星系团尺度以下的原初扰动将被抹平。这样,宇宙中最先形成的应该是星系团,星系团再进一步分裂为星系。实际的观测表明星系很早形成,而星系团形成较晚,排除了这种可能性<sup>[23]</sup>。为了解释星系的形成,暗物质应是冷暗物质(cold dark matter),在已知的标准模型粒子中,没有哪一个具有暗物质的性质。

20 世纪 80 年代,以暗物质的存在和宇宙早期的暴涨为基础假设,建立了标准冷暗物质模型(SCDM),应用这一模型可以定量的解释大尺度结构和星系的形成过程<sup>[24-25]</sup>。但是,一个始终存在的问题是暗物质的多少。一般的暴涨模型预言宇宙是平坦的,即  $\Omega_m=1$ ,远高于观测值<sup>[26-28]</sup>。此外,还有一些其它问题也困扰着宇宙学家们,例如某些球状星团的年龄达 120 亿年,而如果取 Hubble 常数为 70 km/s/Mpc,则 SCDM 模型的宇宙年龄仅 93 亿年,存在着矛盾。COBE 卫星观测了微波背景辐射并从而测量了原初扰动功率谱的大小,如果和大尺度结构的测量相比较,则表明引力导致的扰动增长速度比 SCDM 的预期要慢<sup>[29]</sup>。如果放弃宇宙平直的要求,可以解决这些问题,但是又和暴涨宇宙理论相矛盾。一些科学家因此提出了带宇宙学常数的冷暗物质模型<sup>[30-33]</sup>。

宇宙学常数是爱因斯坦 1920 年构建静止宇宙模型时引入的,他假设引力场方

程为

$$G_{\mu\nu}=8\pi GT_{\mu\nu}+g_{\mu\nu}\Lambda$$

这里,  $G_{\mu\nu}$  是爱因斯坦张量,  $T_{\mu\nu}$  是物质的能冲张量,  $g_{\mu\nu}$  是度规张量,  $\Lambda$  即宇宙学常数。我们可以把  $g_{\mu\nu}/8\pi G$  作为宇宙学常数的能冲张量,与通常物质的能冲张量相比较,定义其到其能量密度  $\rho$  和动量密度(压强)  $p$ ,两者由物态方程相联系,  $p=w\rho$ , 对于宇宙学常数,  $w=-1$ , 也即宇宙学常数可以视为具有负压力。根据相对论,不仅物质的质量产生引力,物质的动量或压力也产生引力,对于(正)宇宙学常数来说,负压力产生的引力超过质量产生的引力,因此导致一种类似于斥力的效果,爱因斯坦正是利用这种斥力在大尺度上平衡引力从而得到静止宇宙的。宇宙学常数由于与一般的物质或辐射性质不同,因此可以说是一种暗能量。在 Hubble 发现宇宙膨胀之后,爱因斯坦就抛弃了宇宙学常数。此后,当遇到一些难以解释的观测数据时,人们就往往在模型中引入  $\Lambda$ , 但当数据改进或有其它解释时便放弃。带宇宙学常数的冷暗物质模型(CDM)假定宇宙是平直的,  $\Omega_m+\Omega_\Lambda=1$ , 因此在这一模型中宇宙大部分密度是宇宙学常数。由于宇宙学常数随着宇宙的膨胀不发生改变,而物质或辐射的密度会降低,因此宇宙学常数密度最终会超过物质和辐射。

CDM 的突出特点是,宇宙的膨胀最终将加速。

出乎意料的是,1998 年,两个观测 Ia 型超新星的小组发现,宇宙的确在加速膨胀<sup>[34-35]</sup>。Ia 型超新星的绝对亮度都比较接近,特别是利用光变曲线校正后,可以作为标准烛光,因此通过测量不同红移处 Ia 型超新星的亮度得到光度距离随红移的变化,从而区分不同的宇宙学模型。观测与 CDM 相一致。另一方面, CMB 各向异性可以用来测定宇宙的几何<sup>[36]</sup>。2000 年, Boomerang 和 MAXIMA 小组的高空气球观测初步宇宙是平直的<sup>[37-38]</sup>。2002 年, WMAP 卫星的观测更进一步肯定了这一结果<sup>[39-40]</sup>,至此,暗物质和暗能量的存在被普遍接受。宇宙年龄、原初扰动的增长等问题也就迎刃而解。

从微波背景辐射中还得到了另一个暗能量存在的证据。在暗能量存在的情况下,大尺度结构的引力势会随时间发生改变,因此当 CMB 光子经过它们时受到影响,我们可以看到 CMB 各向异性与大尺度结构之间的关联,称为 ISW 效应<sup>[41-42]</sup>,这也在 WMAP 和 SDSS<sup>[43]</sup>数据中被观测到<sup>[44-45]</sup>。

### 3 研究进展

如前所述,暗物质粒子不可能是标准模型中已知的粒子,因此它的存在要求新的物理。目前已有一些结合粒子物理的模型,例如超对称暗物质。超对称是不同自旋

粒子间的对称性,如果这一对称性存在,则每个已知粒子都有超对称伙伴粒子。标准模型粒子和它们的超对称伙伴粒子具有不同的 R-宇称,因此不能相互转化,具有最小质量的超对称粒子将可以稳定存在,如果这个粒子是中性的,就可以作为暗物质粒子候选者。目前已知的这样的粒子,可以是 Higgs 玻色子的超对称伙伴,也可以是光子或 Z-规范玻色子的伙伴,或者是上述粒子的量子力学叠加态,这就是所谓中性超对称粒子(neutralino)<sup>[47-48]</sup>。作为暗物质, neutralino 有一些很好的性质,它只参与弱作用和引力作用。它的质量是超对称破缺能标(TeV)左右,退耦时为非相对论运动,符合冷暗物质的特点。对于这样只参与弱作用的重粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMP),在宇宙早期其密度由热平衡决定,  $n \sim g (mT/2\pi)^{3/2} e^{-m/T}$ 。当  $H \sim \sigma_A v$  ( $\sigma_A$  是粒子湮灭截面,  $v$  是速度,尖括号表示热平均),其粒子数目不再发生变化,这样  $\Omega h^2 \sim 3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} / \langle \sigma_A v \rangle$ , 对于弱相互作用来说,这样的暗物质密度恰与观测值是同一个数量级(除了从热平衡产生外,粒子也可以通过衰变等非热机制产生,这时上述关系不再成立<sup>[49]</sup>)。另一种讨论甚多的暗物质候选者是轴子(axion)<sup>[50]</sup>,这是一种为了解决强相互作用 CP 守恒问题提出的粒子<sup>[51-52]</sup>,它的质量小于  $10^{-2}$  eV,但是由于产生机制的原因(非热产生),仍属于冷暗物质。此外,还有一些其它的暗物质粒子候选者,如超对称理论中的 gravitino 和 sneutrino<sup>[53]</sup>,轴子的超对称粒子 axino<sup>[54]</sup>,高维空间紧缩化的 Kaluza-Klein 粒子<sup>[55-57]</sup>, Q-ball<sup>[58]</sup>, crypton<sup>[59]</sup>, mirrow dark matter<sup>[60-61]</sup>等等。

如何探测这些粒子呢?以 neutralino 为例,目前有两类探测实验。在直接探测实验中<sup>[62-64]</sup>,人们建立一些高度灵敏的(冷冻)、屏蔽的(放在地下深处)探测器。由于暗物质只有弱相互作用,因此可以穿过屏蔽,有一定的几率与探测器内的原子碰撞。在这一碰撞中,原子可能被电离、激发或产生晶格振动,实验者设法探测这些信号。碰撞事例的多少取决于暗物质的密度、质量、碰撞截面和探测器工作介质的质量,噪声主要来自宇宙线和自然放射性产生的中子。目前 DAMA 小组声称用 NaI 晶体测到了信号<sup>[65]</sup>,但是 CDMS 和 Edelweiss 等小组则声称在更高的灵敏度上排除了这种可能性<sup>[66-67]</sup>。下一代的探测器如 XENON<sup>[68]</sup>, ZEPLIN<sup>[69]</sup>等将使灵敏度提高几个数量级。由于超对称模型有较多的自由参数,暗物质探测实验只能排除参数空间的一部份。

Neutralino 粒子是其本身的反粒子,两个 neutralino 可以湮灭。因此另一类探测方法是间接探测湮灭产生的中微子、光子、宇宙线等<sup>[70-72]</sup>。当暗晕中的 neutralino 与太阳或地球相遇时,有一个很小但不为零的几



率发生碰撞并在碰撞中丧失动能从而被引力俘获<sup>[73-74]</sup>, 在长时间中经多次碰撞沉积到太阳或地球的中心, 因此那里的 neutralino 密度较高, 湮灭可产生 GeV 以上的高能中微子。一种探测这些中微子的办法是, 这些中微子可以穿透地球, 其中极小的一部分在穿出地面之前与地壳中的原子发生散射产生  $\mu$  子, 继续沿动量方向飞行, 其 Cerenkov 辐射可被探测到, 从而间接探测到这种中微子。目前, 已有 DUMAND<sup>[75]</sup>, Lake Baikal<sup>[76]</sup>, ANTARES<sup>[77]</sup>(利用水为 Cerenkov 工作介质) 和 AMANDA<sup>[78]</sup>, ICECUBE<sup>[79]</sup>(利用南极冰层为工作介质) 中微子探测器<sup>[80-83]</sup>。在银河系中心及暗晕子结构中 neutralino 湮灭可产生伽玛光子和宇宙线, 特别是如果银河系中心或银河系子结构暗物质密度有尖峰的话这种信号就更明显<sup>[80-83]</sup>。在湮灭中产生的单色光子谱线(能量等于 neutralino 质量)将是最明确的暗物质信号<sup>[84-85]</sup>。此外, 湮灭产生的粒子衰变也可产生连续谱光子。宇宙线的大部分可能来自超新星遗迹等常规天体物理过程, 但是暗物质湮灭产生的高能粒子在能量和空间分布上有一定特征, 因此可以用将于 2007 年发射的 GLAST 卫星以及 HESS, HEGRA, VERITAS 等地面高能光子观测实验<sup>[87-88]</sup>进行研究。暗物质湮灭可以产生的反物质粒子(反质子、正电子等)较多, 因此也可以通过反物质观测来间接探测暗物质。实际上, 目前 HEAT 气球实验发现宇宙线中正电子偏多<sup>[89]</sup>, 在银河系中心也发现较多的正电子<sup>[90]</sup>, 这可能是暗物质的信号。PAMELA, AMS 等下一代反物质探测实验将得到更多的数据<sup>[91]</sup>。暗物质湮灭产生的正负电子在银河系磁场中运动还可产生射电辐射, 也是一种可探测的信号, 甚至可能比伽玛光子更灵敏<sup>[92-93]</sup>。总的说来, 对于 neutralino 来说, 间接探测的灵敏度不如直接探测<sup>[6-9]</sup>, 但对于较轻的暗物质粒子, 由于湮灭速率正比于数密度, 因此间接探测就较有希望。

除了寻找根据粒子理论提出的暗物质候选者外, 从天文观测, 特别是根据暗物质的分布, 也可以推测暗物质的性质。20 世纪 90 年代末, 星系形成的数值模拟有了很大进步, 可以得到暗物质晕的一些详细信息, 结果发现数值模拟与观测有矛盾。例如, 模拟得到的暗物质质量密度分布可以写成如下式:

$$\rho = \frac{\rho_0}{(r/R)^{\gamma} [1 + (r/R)^{\gamma}]^{(2-\gamma)/\alpha}}$$

$\gamma$  在 1 到 1.5 之间<sup>[94-95]</sup>, 因此, 在接近中心部分密度有一个尖峰(cusp), 但是对低面亮度星系旋转曲线的观测似乎表明在这些星系的中心有一个常密度的核<sup>[96-97]</sup>。另外, 模拟结果表明, 在银河系大小的暗晕中有达几百个小的子暗晕, 而目前在银河系周围只发现了十几个矮星系<sup>[98]</sup>。由于这两个模拟与观测矛盾的情况都发生在小尺度上

(小于 1 Mpc), 因此被称为冷暗物质模型的小尺度危机<sup>[99]</sup>。为了解决这一问题, 人们提出了一些非冷暗物质模型, 如温暗物质(WDM)<sup>[99-101]</sup>, 自相互作用暗物质(SIDM)<sup>[102]</sup>, 强相互作用粒子(SIMP)<sup>[103-104]</sup>等。WDM 模型假定暗物质质量为 1-10 keV, 介于冷暗物质和热暗物质之间, 它会抹平小尺度的原初扰动, 从而缓解小尺度危机。SIDM 假定暗物质除引力之外, 没有电磁相互作用, 也不与普通物质相互作用, 但本身之间有有较强的相互作用, 这样在一定的时间范围内暗晕会由于暗物质相互作用而形成核。由于为了解决小尺度问题所需的暗物质相互作用强度接近粒子物理中的强相互作用(QCD), 因此也有可能暗物质除自相互作用外也有强相互作用, 只是没有电磁相互作用。与 CDM 相比, 这些模型也有一些自身的问题, 如 SIDM 预言星系团的中心将很圆<sup>[105]</sup>, SIMP 导致大尺度结构有较强的压低<sup>[106]</sup>, 这些都与观测有矛盾。此外, 在 CDM 模型框架内也有可能解决小尺度危机, 例如子暗晕可能存在, 只是由于某种原因(例如再电离导致的气体加热<sup>[107]</sup>)使其中没有形成恒星。某些强引力透镜两个像的亮度相差很大, 对于平滑的物质分布来说这很难解释, 因此这可能表明没有恒星的子暗晕确实存在<sup>[108-111]</sup>。此外旋转曲线观测的和数值模拟结果本身的可靠性也仍是需要研究的课题<sup>[112-116]</sup>。

一些其它难以解释的天文现象也有可能由暗物质引起的。例如, 超过 GZK 截断的超高能宇宙射线, 有可能是极重的暗物质粒子 Wimpzilla 衰变产生的<sup>[117]</sup>。又如, 暗物质的衰变也曾被用于解释星系边缘的电离层<sup>[118]</sup>。WMAP 观测到的宇宙再电离发生较早也有可能是因为暗物质的衰变<sup>[119]</sup>。从天文学观测上研究暗物质的性质, 可能填补加速器实验的不足, 成为探索新物理规律的手段, 例如, 如果暗物质引力相互作用在短距离上变强(类似 SIDM), 也许是高维空间存在的证据<sup>[120]</sup>。

#### 4 讨论

自 20 世纪 70 年代初期暗物质的存在被普遍接受以来, 宇宙学取得了巨大的进展, 理论工作者对暗物质的粒子物理基础、产生机制、在宇宙演化和各类天体物理过程中的作用、检验方案等方面作了大量深入的研究, 使冷暗物质模型成为一个可以作出高精度预言的理论, 而实验工作者则把探测的灵敏度提高了好几个数量级。虽然还不能完美地解释所有观测, 并且也存在一些有力的竞争者, 但是迄今为止冷暗物质模型成功地通过了多方面检验。

在粒子物理基础方面, 与暗能量问题不同, 有许多从粒子物理角度看相当可行的暗物质候选者。目前, 对于较被看好的几种候选者如 neutralino, Kaluza-Klein 粒子

等, 在今后的 10 年内, 有望利用直接或间接手段探测到。而且, 目前正在建造的对撞机 LHC 以及计划中的 ILC 等也可能直接检验超对称理论。当然, 即使在直接或间接实验中发现了暗物质, 要弄清它究竟是什么, 也还需要大量的研究。反之, 如果这些探测没有发现暗物质, 排除了现在流行的各种暗物质候选者, 则将对我们的理论产生更大的挑战。

#### 参考文献(References)

- [1] ZWICKY F. *Helv. Phys. Acta* [J]. 1933, 6: 110.
- [2] ROBERTS M S, ROTS A H. *Astron. Astrophys*[J]. 1973, 26: 483.
- [3] EINASTO J, KAASIK A, SAAR E. *Nature*[J] 1974, 250: 309.
- [4] RUBIN V C, FORD W K Jr. *Astrophys. J. Lett*[J]. 1978, 225: 107.
- [5] OSTRICKER J P, PEEBLES P J E, YAHIL A. *Astrophys. J. Lett*[J]. 1974, 193: 1.
- [6] JUNGMAN G, KAMIONKOWSKI M, GRIEST K, *Phys. Rept.*[J]. 1996, 267: 195.
- [7] BERGSTROM L, *Rept. Prog. Phys.* [J]. 2000, 63: 793.
- [8] GONDOLO P, et al. *J. Cosmo. Astrophys.* [J]. 2004, 07: 008.
- [9] BERTONE G, HOOPER D, SILK J. *Phys. Rept*[J]. 2005, 405: 279.
- [10] FUKUGITA M, HOGAN C J, PEEBLES P J E. *Astrophys. J*[J]. 1998, 503: 518.
- [11] ALCOCK C, et al. *Astrophys. J*[J]. 2000, 542: 281.
- [12] AFONSO C, et al. *Astron. Astrophys.*[J]. 2003, 400: 951.
- [13] SCODEGGIO M, GAVAZZI G. *Astrophys. J*[J]. 1993, 409: 110.
- [14] CEN R, OSTRICKER J P. *Astrophys. J.* [J]. 1999, 514: 517.
- [15] DAVE R, et al. *Astrophys. J* [J]. 2001, 552: 473.
- [16] TRIPP T M, et al. *Astrophys. J. Lett*[J]. 2001, 534: 1.
- [17] SAVAGE B D, et al. *Astrophys. J.* [J]. 2002, 564: 631.
- [18] HELLSTEN, et al. *Astrophys. J.*[J]. 1998, 509: 56.
- [19] FANG T, et al. *Astrophys. J.* [J]. 2002, 504: 64.
- [20] CHEN X et al. *Astrophys. J.* [J]. 2003, 594: 42.
- [21] MATHUR S, WEINBERG D H, CHEN X. *Astrophys. J*[J]. 2003, 582: 82.
- [22] STEIGMAN G. *astro-ph/0511534*.
- [23] BOND J R, SZALAY A S. *Astrophys. J.* [J]. 1983, 274: 443.
- [24] PEEBLES P J E. *Astrophys. J. Lett.* [J]. 1982, 263: 1.
- [25] BLUMENTHAL G R, et al. *Nature* [J]. 1984, 311: 517.
- [26] GUTH A H. *Phys. Rev. D*[J]. 1981, 23:

- 347.
- [27] LINDE A D. Phys. Lett. B [J]. 1982, 108: 389.
- [28] ALBRECHT A, STEINHARDT P J. Phys. Rev. Lett[J]. 1982, 48: 1 220.
- [29] DODELSON S, GATES E, TURNER M S. Science[J]. 1996, 274: 69.
- [30] KRAUSS L, TURNER M S. Gen. Rel. Grav[J]. 1995, 27: 1 137.
- [31] OSTRICKER J P, STEINHARDT P J. Nature[J]. 1995, 377: 600.
- [32] BALGA J S, PADMANABHAN T, NARLIKAR J V. Comments. Astrophys.[J]. 1996, 18: 275.
- [33] LIDDLE A R. Mon. Not. Roy. Astro. Soc. [J]. 1996, 282: 281.
- [34] REISS A, et al. Astron. J.[J]. 1998, 116: 109.
- [35] PERLMUTTER S, et al. Astrophys. J[J]. 1999, 517: 565.
- [36] KAMIONKOWSKI M, SPERGEL D N, SUGIYAMA N. Astrophys. J. Lett[J]. 1994, 426: 57.
- [37] BERNARDIS P de, et al. Nature[J]. 2000, 404: 955.
- [38] HANANY S, et al. Astrophys. J. Lett[J]. 2000, 545: 5.
- [39] BENNETT C L, et al. Astrophys. J. Supp. [J]. 2003, 148: 97.
- [40] SPERGEL D N, et al. Astrophys. J. Supp. [J]. 2003, 148: 175.
- [41] SACHS R K, WOLFE A M. Astrophys. J. [J]. 1967, 147: 73.
- [42] HU W, DODELSON S. Ann. Rev. Astro. Astrophys.[J]. 2002, 40: 171.
- [43] <http://www.sdss.org>.
- [44] FOSALBA P, GAZTANAGA E, CASTANDER F. Astrophys. J. Lett. [J]. 2003, 597: 89.
- [45] SCRANTON R, et al. astro- ph/0307335.
- [46] AFSHORDI N, LOH Y- S, STRAUSS M A. Phys. Rev. D[J]. 2004, 69: 083 524.
- [47] GOLDBERG H. Phys. Rev. Lett.[J]. 1983, 50: 1 419.
- [48] ELLIS J, et al. Nucl. Phys. B [J]. 1984, 238: 453.
- [49] LIN W, et al. Phys. Rev. Lett [J]. 2001, 86: 954.
- [50] ROSENBERG L J, BIBBER K A van. Phys. Rept.[J]. 2000, 325: 1.
- [51] WEINBERG S. Phys. Rev. Lett.[J]. 1978, 40: 223.
- [52] WILCZEK F. Phys. Rev. Lett. [J]. 1978, 40: 279.
- [53] ELLIS J, et al. Nucl. Phys. B [J]. 1984, 238: 453.
- [54] COVI L, KIM J E, ROSZKOWSKI L. Phys. Rev. Lett.[J]. 1999, 82: 4 180.
- [55] KOLB E W, SLANSKY R. Phys. Lett B[J]. 1984, 135: 378.
- [56] CHENG H C, et al. Phys. Rev. Lett.[J]. 2002, 89: 211 301.
- [57] FENG J L, et al. Phys. Rev. Lett. [J]. 2003, 91: 011 302.
- [58] KUSENKO A, et al. Phys. Rev. Lett [J]. 1998, 80: 3 185.
- [59] ELLIS J, et al. Phys. Lett. B [J]. 1990, 247: 257.
- [60] HODGES H M. Phys. Rev. D [J]. 1993, 47: 456.
- [61] FOOT R. Phys. Rev. D [J]. 2004, 69: 036 001.
- [62] DRUKIER A, STOLDOLSKY L. Phys. Rev. D[J]. 1984, 30: 2 295.
- [63] GOODMAN M W, WITTEN E. Phys. Rev. D[J]. 1985, 31: 3 059.
- [64] WASSERMAN I. Phys. Rev. D [J]. 1986, 33: 2 071.
- [65] BERNABEI R, et al. astro- ph/0305542.
- [66] AKERIB D S, et al. Phys. Rev. D [J]. 2003, 68: 082 002.
- [67] BENOIT A, et al. Phys. Lett. B [J]. 2002, 545: 43.
- [68] <http://www.astro.columbia.edu/~lxe/lxegrit/>
- [69] <http://www.physics.ucla.edu/wimps/>
- [70] SILK J, OLIVE K, SREDNICKI M. Phys. Rev. Lett.[J]. 1985, 55: 257.
- [71] KRAUSS L M, et al. Astrophys. J. [J]. 1985, 299: 1 001.
- [72] KRAUSS L M, et al. Phys. Rev. D [J]. 1986, 33: 2 079.
- [73] PRESS W H, SPERGEL D N. Astrophys. J.[J]. 1985, 296: 697.
- [74] GOULD A. Astrophys. J.[J]. 1991, 388: 338.
- [75] GRIEDER P K. Nucl. Phys. B Proc. Supp. [J]. 1995, 43: 145.
- [76] BALKANOV V A, et al. astro - ph/ 0001145.
- [77] ASLANIDES E, et al. astro- ph/9907432.
- [78] ANDREAS E, et al. Nature[J]. 2001, 410: 441.
- [79] AHRENS J. astro- ph/0305196.
- [80] ULLIO P, ZHAO H, KAMIONKOWSKI M. Phys.Rev.[J]. 2001, D64: 043 504.
- [81] HORNS D. Phys.Lett. [J]. 2005, B607: 225.
- [82] KOUHIAPPAS S M, ZENTNER A R, WALKER T P. Phys.Rev. [J]. 2004, D69: 043 501.
- [83] BI X astro- ph/0520714.
- [84] BERGSTROM L. Nucl. Phys. B [J]. 1989, 325: 647.
- [85] RUDAZ S. Phys. Rev. D [J]. 1989, 39: 3 549.
- [86] GIUDICE G F, GRIEST K. Phys. Rev. D [J]. 1989, 40: 2 549.
- [87] MORSELLI A, et al. astro- ph/0211327.
- [88] VOELK. astro- ph/0202421.
- [89] COUTU S, et al. Astropart. Phys. [J]. 1999, 11: 429.
- [90] HOOPER D, et al. Phys. Rev. Lett. [J]. 2004, 93, 161 302.
- [91] HOOPER D, SILK J. Phys. Rev.[J]. 2005, D71: 083 503.
- [92] BERTONE G., SIGL G., SILK J. Mon. Not. Roy. Astro. Soc.[J]. 2001, 326: 799.
- [93] BALTZ E A, WAI L. Phys. Rev.[J]. 2004, D70, 023 512.
- [94] NAVARRO J F, FRENK C S, WHITE S D. Astrophys. J.[J]. 1996, 462: 563.
- [95] MOORE B, et al. Mon. Not. Roy. Astro. Soc.[J]. 1999, 310: 1 147.
- [96] BOSCH F C Van den, SWATERS R A. astro- ph/0006408.
- [97] BLOK W J de, et al. astro- ph/0103102.
- [98] OSTRICKER J P, STEINHARDT P. Science [J]. 2003, 300:1 909.
- [99] COLIN P, AVILA - REESE V, VALENZUELA O. Astrophys. J. [J]. 2000, 542: 622.
- [100] BODE P, OSTRICKER J P, TUROK N. Astrophys. J.[J]. 2001, 556: 93.
- [101] ZENTNER A, BULLOCK J. Astrophys. J. [J]. 2003, 598: 49.
- [102] SPERGEL D N, STEINHARDT P J. Phys. Rev. Lett.[J]. 2000, 84: 3 760.
- [103] WANDEL T B D, et al. astro - ph/ 0006344.
- [104] QIN B, WU X- P. Phys. Rev. Lett. [J]. 2001, 87: 1 301.
- [105] MIRALDA- ESCUDE J. Astrophys. J.[J]. 2002, 564: 60.
- [106] CHEN X, HANNESTAD S, SCHERRER R J. Phys. Rev. D[J]. 2002, 65: 123 515.
- [107] BULLOCK J S, KRAVTSOV A V, WEINBERG D H. Astrophys. J. [J]. 2000, 539: 517.
- [108] METCALF R B, MADAU P. Astrophys. J.[J]. 2001, 563: 9.
- [109] DALAL N, KOCHANNEK C S. Astrophys. J.[J]. 2002, 572: 25.
- [110] KOCHANNEK C S, DALAL N. Astrophys. J.[J]. 2004, 610: 69.
- [111] MAO S, et al. Astrophys. J. Lett [J]. 2004, 604: 5.
- [112] POWERS C, et al. Mon. Not. Roy. Astron. Soc[J]. 2003, 338: 14.
- [113] JING Y P, SUTO Y. Astrophys.J. Lett. [J]. 2000, 529: 69.
- [114] TASITSIOMI A, et al. Astrophys. J. [J]. 2004, 607: 125.
- [115] SALUCCI A, BORRIELL P, astro - ph/ 0203457.
- [116] RHEE G, KLYPIN A, VALENZUELA O. astro- ph/0311020.
- [117] KOLB E W, CHUNG D J, RIOTTO A. hep- ph/9810361.
- [118] SCIAMA D W. Modern Cosmology and the Dark Matter Problem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [119] CHEN X, KAMIONKOWSKI M. Phys. Rev. D[J]. 2004, 70: 043 502.
- [120] QIN B, PEN U, SILK J. astro - ph/ 0508572. (责任编辑 黄永明)