

精确宇宙学时代的暗物质问题

秦波

所谓暗物质、暗能量就是非常稀奇的事物,这里面我想是可能引出基本物理学中革命性的发展来的……假如一个年轻人,他觉得自己一生的目的就是要做革命性的发展的话,他应该去学习天体物理学。——杨振宁

处于变革之中的宇宙学

当今的宇宙学正处于一场重大变革的前夜。回顾不到 10 年前的情形,并与今天宇宙学的现状作一比较,就会清楚而深刻地感受到,在这短短的不到 10 年的时间里,宇宙学经历了多么大的变化。我们大家正有幸见证这场深刻的变革。

例如,过去多少年人们一直都在谈论宇宙膨胀的减速并引入宇宙学基本参量 q_0 (减速参量) 来描述这种减速。在我还是学生时(10 年前),教科书、文献及我们的教授都告诉我们宇宙的膨胀在不断减速,具体如何减速,即 q_0 到底是多少呢?“观测表明”, q_0 可能接近 $1/2$ 。但根据 1998 年底以来的高红移超新星观测等结果,人们惊奇地发现 q_0 居然为负值!即宇宙在加速膨胀!同时不为零的宇宙学常数的引入也改变了人们对宇宙的认识。

有谁还记得后来发现宇宙加速膨胀的“超新星宇宙学项目”的首篇论文?他们利用最先发现的 7 颗高红移超新星,得出的结论可是爱因斯坦-德西特(Einstein-de Sitter)宇宙!即 $q_0 = 1/2$ 的减速膨胀宇宙(Perlmutter et al. 1995, ApJL, 440, L41)!这不禁让我想起了爱因斯坦的那句名言:“Subtle is the Lord(上帝是微妙的,但并不是不怀好意的)”。又如 1994~1995 年引起天文界轰动的宇宙比古老恒星还年轻的“宇宙年龄佯谬”(有当时中央电视台新闻联播的报道为证),在今天看来则迎刃而解。

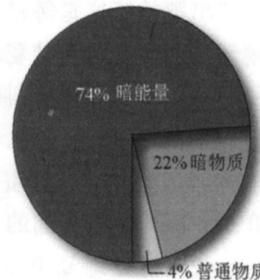
今天,宇宙学正步入“精确宇宙学”(Precision Cosmology)的时代,过去数十年争执不休的宇宙学基本参量,如宇宙的几何及平均密度、宇宙年龄、哈勃常数等等,随着新一代天文设备的投入运行(如 WMAP),已可比较精确地确定下来,其误差范围甚至可低至百分之几!这在过去难以想象。这无疑是



人们认识宇宙过程中的一次重大进步。俗话说“画鬼最易”,盖鬼无定型也。宇宙学如不能精确测量、精准预言,难免被人揶揄为“画鬼”。图 1 和封底图 1 (宇宙发展史示意图,取自 <http://wmap.gsfc.nasa.gov>) 大致画出了宇宙演化史以及今天宇宙的基本组分,这是目前人们对宇宙的大体了解。

经过人类上百年的不懈努力,宇宙学模型的大厦基本建立起来,但是这一切仅仅是另一件事情的开端。随着宇宙学模型的最终确立,一个更加重大、更加根本性的问题展现在人们面前,那就是暗物质问题。宇宙的各种组分中约 22% 是暗物质,它很可能是一种不参与电磁相互作用的、我们已知的粒子(如质子、电子、中子等)之外的一种全新粒子。而组成我们所熟知的周围物质世界(包括我们人类自身)的基本单元——质子、电子和中子,在宇宙中却是稀有的。让粒子物理学家引以自豪的、集人类认识微观世界之大成的粒子物理学标准模型,描述的竟是宇宙中名副其实的“少数派”!

图 1 今天宇宙的基本组分;在所有“物质-能量”组分中,暗能量占主导地位,而在所有物质组分中,暗物质占了绝大部分;组成我们看得见摸得着的世界(包括我们人类自己,以及人类所有的科学探测仪器)的普通物质,只占极少数



目前人们对暗物质的本质几乎一无所知。揭开暗物质之谜将是继哥白尼的日心说、牛顿的万有引力定律、爱因斯坦的相对论以及量子力学之后,人类认识自然规律的又一次重大飞跃。

李政道教授曾多次指出:“暗物质是笼罩 20 世纪末和 21 世纪初现代物理学的最大乌云,它将预示着物理学的又一次革命。”2004 年 8 月,美国国家科学与技术委员会(National Science and Technology Council)公开发表的物理与天文学发展战略中,列出了新世纪要解答的 11 个难题,排在第一位和第二位

的分别是“什么是暗物质”“暗能量的本质是什么”。报告同时建议美国政府研究机构加强协调,集中资源为这些难题寻找答案。

其实,很多物理学家和天文学家都开始有这样的预感:今天物理学的情况与19世纪末20世纪初(诞生相对论和量子论)时非常类似。历史经过百年轮回,人类对物质世界的认识又一次处在了十字路口,暗物质问题便是一个关键突破口。若要将宇宙学、暗物质、暗能量等问题交代得清清楚楚,大概要写一本书、讲一门课了。在此我不想面面俱到,如果能为读者抛砖引玉,那么我的目的就达到了。

神秘的暗物质

暗物质问题是个天文学问题,也是个物理学问题,它源于天文,其最终解决也离不开天文。揭示暗物质的本质,是粒子物理与天文学的交叉课题。

天文学家从最初发现暗物质存在至今已有70年的历史了。在这70年中,尤其是最近数年,天文学家已经比较准确地知道暗物质整体上在宇宙中所占比例,能用各种动力学方法比较准确地测量出由暗物质组成的体系(暗物质晕)当中空间各点的物质密度分布,这是了不起的成就。

我们比较清楚地知道在我们周围(地球、太阳系周围),每立方厘米有0.4倍氢原子质量的暗物质存在,我们清楚地知道我们周围的这些暗物质粒子以每秒200千米的高速在运动(记得56式半自动步枪子弹出膛的速度是每秒700米),我们也知道每时每刻都有大量的这些神秘粒子,以如此高的速度穿过我们的身体以及所有科学仪器,却从未留下任何痕迹!!!《北京青年报》几年前就曾在头版头条,以《中国科学家发现神秘物质,穿过人脑不留痕迹》为题,介绍中国科学家参加的DAMA项目的发现。

我们清楚地知道宇宙各种组分中的22%是暗物质,我们清楚地知道宇宙空间中各处暗物质的密度分布,但是,对于暗物质到底是什么,我们几乎一无所知!甚至对于暗物质粒子的质量是多少这样看似最简单的问题,我们在几十个数量级上不确定(请注意,不是几十倍)!在物理学史上,这种事情实属罕见!

暗物质有诸多基本粒子候选者:最被粒子物理学家看好的是WIMPs(Weakly Interacting Massive Particles,弱作用重粒子)冷暗物质,一般认为其质量比质子重得多;最著名的WIMP是中性伴随子

(neutralino),典型质量 10^2 GeV(即 10^{-22} 克);其他冷暗物质,如通过非热机制产生的轴子(Axion),典型质量 10^{-6} eV,即 10^{-39} 克。当然还有质量再小很多很多数量级的fuzzy cold dark matter,其他如MeV冷暗物质、SuperWIMP及非常重的WIMPzillas(质量大于 10^{10} GeV)。

暗物质也可能不是基本粒子,而是宇宙大爆炸之初(至少是宇宙大爆炸核合成之前)就已形成的宇宙原初黑洞,其质量下限为霍金蒸发极限,即 10^{15} 克。

“观测”暗物质——用天文学家的眼睛望远镜

其实,暗物质问题对于天文学家一点也不新鲜。暗物质存在的最早证据是70年前兹维基(F. Zwicky, 1898~1974,图2)研究星系团中的星系运动时发现的。他发现星系团中的星系运动速度实在太,光靠所看到的这些发光物质(当时人们还没发现星系团中大量存在X射线气体,它们才是星系团中普通物质的主体)所产生的引力场根本无法束缚住它们。

暗物质的最直观、最具说服力的证据当然是旋涡星系的旋转曲线。旋涡星系的星系盘绕着星系中心作“较差转动”,其各个半径处的圆周运动速度取决于当地的引力场强度,即内部物质的多少。如果星系只有发光物质(普通物质),那么其转动速度将随半径很快下降。而观测所有旋涡星系均发现实际转动速度并未随半径急剧下降,而是维持在一个很高的速度,一直到很远的半径处(图3)。这表明宇宙中像我们银河系这样的星系中存在着比普通物质多得多的大量暗物质。

为使大家对星系结构以及星系中的暗物质分布有一个直观印象,图4给出了银河系这类星系的结构示意图,图中分别画出了银盘(disk)、核球(bulge)、暗物质、球状星团(globular cluster)及太阳系的位置。

当然,没有人能够直接“看到”暗物质。天文学家对暗物质的“观测”,全部是利用动力学方法,通过对发光物质的观测,反推出暗物质产生的引力场,从而间接描绘暗物质在宇宙空间中各点的分布。目前天文学家有许多“观测”暗物质的成熟手段。例如:



图2 兹维基

(1) 引力透镜方法(主要包括强引力透镜方法、弱引力透镜方法),封底图 2 是哈勃空间望远镜拍摄的 A2218 星系团产生的引力透镜现象(这是哈勃空间望远镜拍摄的一幅著名引力透镜天图:星系团 A2218 的引力场使背景星系的图像严重畸变,这幅图对应于星系团 A2218 的中心区域,图中星系大部分为此星系团中的星系), (2) 旋涡星系的旋转曲线, (3) 星系中的恒星或星系团中的星系的速度弥散, (4) 星系团(及椭圆星系)的 X 射线气体的流体静力学平衡方法, (5) 星系团的苏尼亚耶夫 - 泽尔多维奇效应(SZ 效应, Sunyaev - Zeldovich effect)方法等。

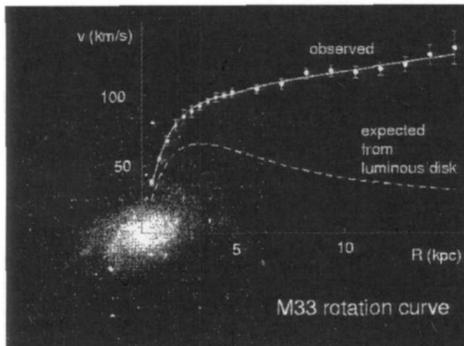


图 3 旋涡星系 M33 的转动曲线

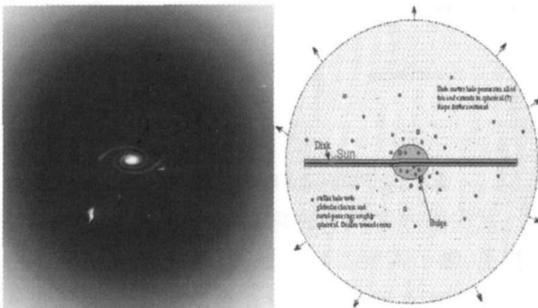


图 4 银河系结构的示意图:我们看到的普通物质镶嵌在巨大的暗物质晕当中,暗物质分布在比普通物质大得多的范围

“捕捉”暗物质粒子——用物理学家的仪器

研究暗物质一方面可以通过上述天文观测,研究暗物质的空间分布并推测暗物质的基本属性;另一方面,物理学家可通过加速器及非加速器实验直接或间接探测暗物质粒子。国际上的暗物质探测实验正在蓬勃发展,未来 10 年、20 年将是暗物质探测的黄金时代。

加速器实验 在加速器上找到这种神秘新粒子,似乎是最终揭开暗物质之谜最具说服力的方法。目前,人们对计划于 2007 年 10 月投入运行的欧洲核子中心的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)寄予厚望,希望能找到人们所预言的质量

约为几百 GeV 的暗物质的最热门候选者中性伴随子(LHC 将产生 7TeV-7TeV,即相对 14000GeV 的极高能碰撞质子束)。不过,不论 LHC 能否最终找到中性伴随子,对粒子物理学家都至关重要。

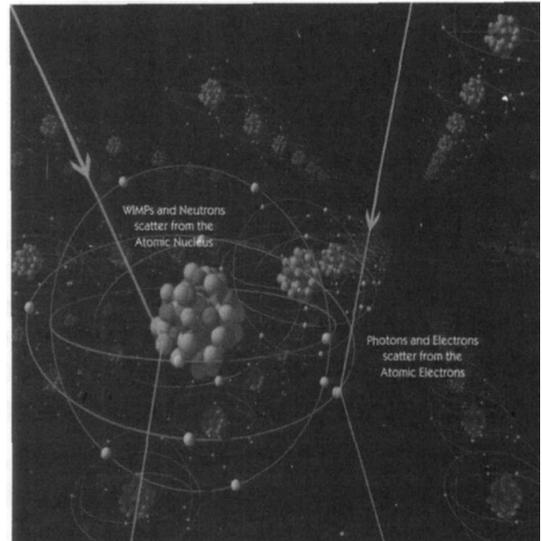


图 5 暗物质直接探测的原理示意图(WIMP 类暗物质)

非加速器实验——暗物质的直接探测(WIMP 类) 暗物质直接探测是测量暗物质粒子与探测靶粒子(普通物质)之间的反冲(图 5)。诚然,暗物质与普通物质之间的相互作用极其微弱,但如果暗物质是 WIMP 的话,那么暗物质粒子是弱相互作用粒子。即暗物质粒子之间,以及暗物质粒子与普通物质之间,都存在弱相互作用。暗物质与普通物质之间总有一定的散射截面,尽管非常小,但仍可等到暗物质粒子打到探测器上的极其罕见的信号,当然如果加大探测器,也许可以做到一年有一个事例。

封底图 3 是目前国际上暗物质直接探测实验(WIMP 类)的地理分布图(WIMP 暗物质, Courtesy of Dan Akeribe)。欧洲与美国处于领导地位。比较著名的有在美国的 CDMS、在法国的 Edelweiss、在意大利的 DAMA 和 Xenon 等实验。在暗物质的直接探测研究方面,我一直对意大利做出的贡献充满敬意。罗马以东 120 千米的穿山隧道中的 Gran Sasso 国家实验室,是当今世界最大的粒子物理、粒子天体与核天体物理地下实验室,这里云集了来自 22 个国家的 15 项实验。

图 6 给出了目前实验的结果。为简单起见,只画出了几个实验的结果。其他实验的结果大体类似。除了 DAMA 实验宣布探测到了暗物质粒子的信号以外,其他所有实验均未得到正结果,即每个实

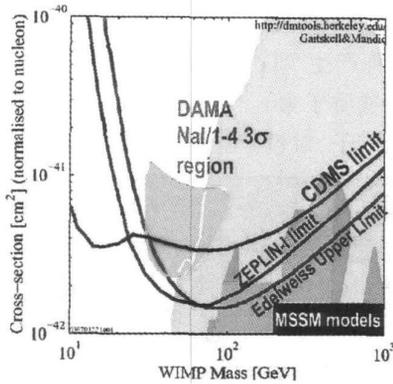


图 6 WIMP 暗物质探测的实验结果:横坐标为暗物质粒子的质量,纵坐标为暗物质 - 普通物质的散射截面;图中的几条曲线是几个实验分别给出的“排除范围”,即曲线以上的参数空间已被实验排除;图中深色阴影区是 DAMA 实验发现的参数区间(多数人对此持怀疑态度),右边的大片浅色阴影区是超对称模型预言的参数区间,实验都限定出一条暗物质 - 普通物质相互作用截面的上限。事实上,绝大多数人怀疑 DAMA 的结果,因为后面的实验在更高灵敏度上均未探测到暗物质信号。当然也可能是因为 DAMA 独特的年调制(Annual Modulation)方法。但无论如何,在 DAMA 的实验结果公布之后,国际上暗物质直接探测实验如雨后春笋般涌现。所以 DAMA 的积极意义还是值得肯定的。

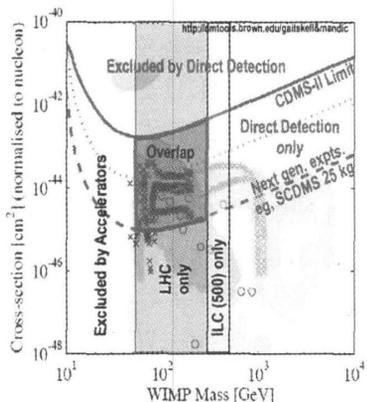


图 7 (WIMP) 暗物质直接探测实验结合加速器实验的一些结果或实验预期(Courtesy of Dan Akeribe)

加速器 - 非加速器实验的交叉互补 如果将暗物质直接探测实验(非加速器物理)与加速器物理(LHC、ILC)结合,我们发现两者探测的参数空间(质量和截面范围)有非常好的重合(图 7)。即加速器实验和非加速器实验可形成非常好的互补和交叉认证。这一点非常重要,因为这是用两种完全不同的实验,用两种完全不同的方法,去独立地研究同一个问题。所以我们期待着 LHC 将要唱的这出精彩“大戏”。

非加速器实验 —— 暗物质的直接探测(轴子暗物质) 轴子是粒子物理学家为解决 QCD 中的强 CP 破坏问题而引入的(关于轴子物理的详细讨论请参阅 Kolb & Turner 1990, *The Early Universe*, Chapter 10)。相对于 WIMPs 几百 GeV 的典型质量,轴子非常非常轻,其典型质量为 μeV ,即 10^{-6} eV。目前国际上直接探测轴子暗物质的实验已在进行。

μeV 能量对应于电磁波谱中的微波或将近 1 GHz 的频率。如果暗物质是轴子的话,根据我们周围暗物质的质量密度为 0.4 GeV ,可知轴子的数密度是极其巨大的。利用微波空腔使其频率接近轴子的能量(或说质量),则轴子会与电磁场耦合,发生共振而转化为同频率的光子。如果轴子的质量为 μeV 的话,那么这一共振频率接近 1 GHz。

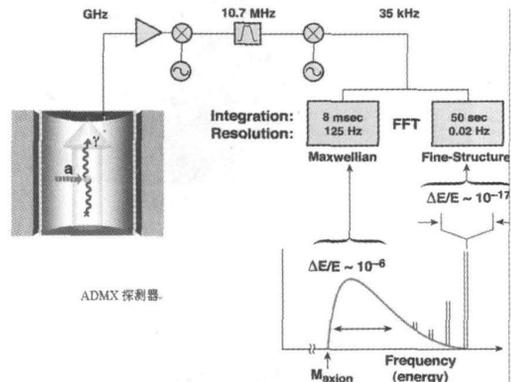


图 8 轴子暗物质直接探测实验方案示意图

此实验方案最初由席基维(P. Sikivie)在 1983 年提出,轴子探测实验 ADMX(轴子 DarkMatter Experiment)正在进行中。图 8 是实验原理的示意图,图 9 是目前包括微波空腔实验在内的各种方法对轴子性质(质量)所做出的限制。

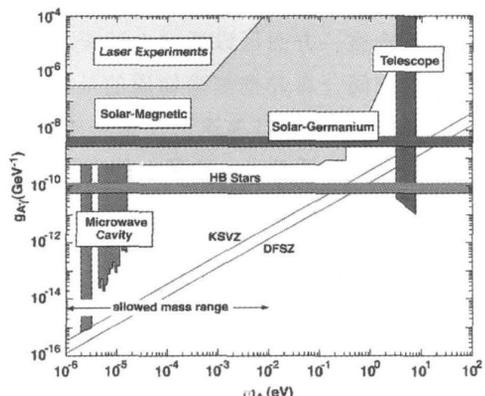


图 9 目前各种实验与观测方法对轴子暗物质作出的联合限制

非加速器实验 —— 暗物质的间接探测 暗物质

如果是 WIMPs,那么它们可能彼此湮灭。暗物质的间接探测就是去探测暗物质湮灭所产生的次级粒子,如 光子、中微子、正负电子对、质子、反质子等。由于暗物质湮灭信号的流强正比于暗物质数密度的平方,所以最可能探测到湮灭信号的地方是暗物质最集中的地方,如星系中心、暗物质晕的大量子结构(图 10)的中心,甚至太阳中心和地球中心(因为太阳和地球中心可能有大量被俘获的暗物质粒子,从而产生湮灭,而它们又离我们这么近)。封底图 4 列出了当今世界地面和空间的暗物质间接探测实验,图中有 光子、宇宙线、中微子等不同的探测信号(Courtesy of G. Gerbier)。



图 10 暗物质晕及标准冷暗物质模型所预言的暗物质子结构:暗晕中心以及大量子结构都是暗物质数密度最高的地方,因而也是暗物质湮灭信号最强的地方

中国在暗物质粒子探测方面的研究 我们从上文已经看到,暗物质探测实验在国际上已是遍地开花,欧洲和美国领导了这一潮流。在暗物质的直接探测上,在亚洲也有实验在进行,包括日本、韩国、中国台湾以及乌兹别克斯坦(封底图 3)。但遗憾的是,在中国大陆本土还是一片空白!

中国高能所的科学家(戴长江教授等人)参加了在意大利的 DAMA 实验,清华大学工程物理系参加了韩国的 KIMS 实验(KIMS 的优势在低能端,即图 6 的最左侧,它在低能端是世界上最灵敏的)。在暗物质的间接探测上,情况稍好一些。中国科学院高能物理研究所的西藏羊八井宇宙线实验基地有 ARGO 实验(图 11),可用来探测暗物质湮灭产生的 光子。尚处于酝酿中的暗物质实验方案,有高能



图 11 中国科学院高能物理所的西藏羊八井宇宙线基地(海拔 4300 米)的壮观景象

所提出的 AMS 暗物质空间实验(陈国明教授等人)以及紫金山天文台(常进等人)提出的暗物质探测小卫星计划。

暗物质基本属性的天文学研究及标准 冷暗物质模型面临的困难

前面我们更多的是从粒子物理的角度去探索暗物质的本质。事实上,对暗物质基本特性的研究,天文学家走得更远些。通过天文观测,特别是通过研究暗物质晕的形态、分布等特征,可推断暗物质粒子的特性;通过已知各种天体现象、天体过程来限定暗物质的基本性质。这种方法巧妙、经济,有时会达到事半功倍的效果。这将与粒子物理实验探测形成很好的互补。

天文观测为解决基本物理问题巧妙提供答案或重要线索,这样的例子在物理学发展史上比比皆是。一个著名的范例是大爆炸核合成理论早在 20 世纪 60 年代便给出了中微子种数为 3.0 的结果,而当时加速器给出的种数上限为几百。其他如氦元素的首先发现、精细结构常数可能随时间的演化、广义相对论的验证等等……

具体到暗物质本质的研究上,人们根据今天宇宙的大尺度结构特征,发现暗物质粒子应是“冷”的粒子,即“冷暗物质”(即宇宙早期退耦时粒子是非相对论性的),同时排除了热暗物质,如中微子作为暗物质候选者的可能。因为热暗物质运动速度很快,很容易将较小尺度的结构“抹掉”,因此不易形成结构,这与大尺度结构的观测是矛盾的。这一源自天文观测而得到的“冷暗物质”模型,一直是指导粒子物理学家构造暗物质模型的最重要依据之一。

通过各种动力学手段(引力透镜、恒星运动、气体运动、光学、X 射线、射电、SZ 效应等),可以比较准确地描绘暗物质在这些体系中的空间分布。而暗物质的空间分布蕴涵了暗物质粒子的基本属性。因为冷暗物质、热暗物质、温暗物质的空间分布不同,甚至标准无碰撞冷暗物质 WIMPs 与有自相互作用

的冷暗物质的分布也很不一样,这正是用天文方法限定暗物质基本属性的特色。

封底图 5 是人们在标准的冷暗物质模型(即无碰撞的冷暗物质模型)下,对宇宙大尺度结构的数值模拟(请注意这里演示的是纯暗物质的结构,而不含普通发光物质)。这是当今世界最大的关于宇宙大尺度结构的 N 体数值进行“千年长积分模拟(Millennium Simulation)”的一张展示图。千年长积分模拟了宇宙暗物质从几千 Mpc 一直跨越到几十 kpc 的各个尺度的分布。读者可访问网站 <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>, 了解更详细的信息,或者下载千年长积分模拟所做的宇宙结构与演化的高清晰电影(文件超过 100MB)。封底图 6 是宇宙大尺度结构巡天观测结果(2dF,SDSS,CfA)与 N 体数值模拟(千年长积分模拟)结果的比较:左侧图是 2dF 的观测结果、右侧图是千年长积分模拟对同样尺度内的数值模拟,上下两幅图是在更小的尺度上与 Sloan 和 CfA 巡天观测的对比,每两幅镜像对称的图的尺度是完全一样的;我们发现,标准的冷暗物质模型的数值模拟结果与实际观测符合得非常好。这表明,冷暗物质模型描述宇宙在大尺度上的行为是非常成功的。

但是,近些年人们发现,冷暗物质模型在描述宇宙在 Mpc 以下的小尺度时,遇到了比较严重的问题,这也许暗示我们过去的标准的冷暗物质模型也许要作重大的修改。主要有两个突出的问题。

首先是暗晕的卫星星系问题(Satellite Halo Problem)或子结构问题。标准冷暗物质的数值模拟发现,一个大的暗物质晕周围存在着大量的小暗晕(或称作卫星晕,图 10 或封底图 5 或图 12)。例如,对于银河系这样的质量为太阳质量 10^{12} 倍的大星系来说,其周围的卫星星系应该在 1000 个左右,而实际上,人们只发现了 20 个!这种差异是如此巨大而明显。

其次是暗物质的中心密度分布问题(Dark matter density profile)。通过对标准的冷暗物质的大量的数值模拟,人们发现,暗物质体系,大到星系团,小到星系及最小的矮星系,它们中的暗物质的空间分布都遵从同样的规律,人们用密度轮廓曲线来表示,被称为普适密度曲线(Universal Density Profile)或 NFW Profile(图 12),以 3 位发现者的名字来命名(Navarro、Frenk 和 White)。NFW 密度分布的特点

是,在暗物质晕的中心区,密度呈 r^{-1} 变化,即随着 r 趋于 0,密度急剧增加,从而形成一个密度随半径一次方反比变化的尖峰,称作“cusp”。而实际上,对暗晕的大量动力学测量表明,实际系统中,尤其是星系和矮星系中,密度在 r 趋于 0 时,上升是平缓的,甚至有迹象表明,密度上升到一定的值后差不多会停下来。这显示,暗物质体系的中心可能有一个密度恒定的球状结构。最近剑桥大学的吉尔摩(Gerry Gilmore)等人对银河系周围的矮星系中暗物质分布的观测进一步证实了早先人们的发现(吉尔摩等,2007,ApJ,663,948)。暗物质的这样一种密度恒定的球形结构是非常关键的问题,因为这是与标准的无碰撞的冷暗物质模型格格不入的。

以上两点尖锐矛盾显示,我们一直沿用的标准无碰撞冷暗物质模型也许需要重大改动。如引入暗物质的自相互作用(Spergel & Steinhardt 2000, *Phys. Rev. Lett.*,84,3760),或暗物质有很大的自湮灭截面(Kaplinghat 2001, *Phys. Rev. Lett.*),或暗物质是典型质量为 1keV 的温暗物质(Bode & Ostriker 2001,ApJ),或冷暗物质的起源可能是非热的(林文斌等 2001, *Phys. Rev. Lett.*)……这又是天文学家给物理学家出的一道难题。为解决这个难题,天文学家和物理学家又走到了一起。

是否修改牛顿动力学与暗物质

到目前为止,人类努力寻找了几十年暗物质,从未找到。随着时间的推移,利用各种越来越好的探测器、越来越多的方法,在越来越高的灵敏度上却得到越来越多的负结果,对暗物质存在性的怀疑也与日俱增。这是非常自然的,因为这是人类对自然进行认识的最自然的阶段性反应。一种声音从来没有停止过在物理学家和天文学家的耳边回响:“也

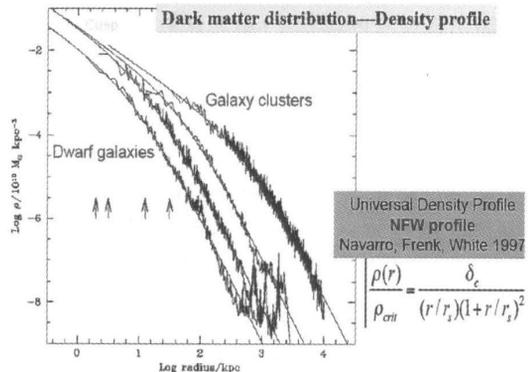


图 12 暗物质的普适密度曲线或称为 NFW-profile: 大量数值模拟发现,从大到星系团,小到矮星系的各种尺度的暗物质体系,其暗物质分布均遵从同样的规律,如图中公式所示

许暗物质根本就不存在！”

在物理学史上,令人意外的事情实在太多了。实际上,物理学的发展,难道不是一个又一个的“出乎意料”所推动的吗?比如100年前寻找的“以太”,以及对经典力学完全决定论的否定。所以任何事情都可能发生,物理学家当然应当保持开放的头脑,而不是固步自封。

事实上早在1983年,一个叫米尔格若姆(Mordehai Milgrom)的以色列物理学家就提出暗物质可能不存在(Milgrom, 1983, ApJ),我们之所以认为有暗物质,那是因为我们赖以“探测”暗物质的手段牛顿动力学是不完备的。具体地说,牛顿动力学得以充分检验的地方,是我们的地球附近和太阳系内(地球表面的重力加速为 980cm/s^2),而宇宙中的引力场强度往往非常微弱,例如银河系中太阳系处(即离银河系中心8.5kpc的地方)的引力场强度为 10^{-8}cm/s^2 。事实上, 10^{-8}cm/s^2 倒是宇宙中一个比较典型的引力场强度,星系、星系团中的引力场大部分是在此范围附近。米尔格若姆认为,牛顿动力学应作如下修改:在强引力场情况下为通常的牛顿引力;而引力场弱到 10^{-8}cm/s^2 时,引力将不再是牛顿的平方反比律,而变成一次方反比律。这自然解释了星系的旋转曲线问题而不需要暗物质。米尔格若姆的这一理论被称为修改牛顿引力理论(Modified Newtonian Dynamics, MOND理论),其中没有暗物质。

MOND理论提出后,将近20年未引起重视(甚至没人太把它当回事)。近年来,越来越多的人开始重视它,MOND理论的相对论形式也被提出来,被称为TeVeS理论(Bekenstein, 2004, Phys. Rev. D)。人们一直在试图检验MOND理论(或者说“排除”更为确切,因为绝大多数人压根就不信它)。

这种努力在去年(即2006年)似乎有了结果。人们通过对一个非常特殊的星系团,1E 0657 - 56(又被称为“Bullet Cluster”,即子弹星系团)的X射线(用来测普通物质分布)和弱引力透镜(用来测暗物质分布)观测,发现这一星系团实际上是两个子星系团以高速相互碰撞后正在彼此远离(封底图7, Clowe et. Al, 2006, ApJL)。尤其重要的是,人们首次非常清晰地看到这两块碰撞星系团中,暗物质与普通物质是明显分离的!封底图7子弹星系团中蓝色的是暗物质、红色的是X射线气体(它是星系团中普通物质的主要成分),是否预示着MOND理论

的终结?

子弹星系团的观测结果,是对MOND理论的致命打击。因为按照MOND理论,发光物质即是物质的全部,引力场一定是跟随发光物质的分布的,即“所谓的暗物质”,其分布一定是跟随普通物质的。现在清楚地观测到暗物质与普通物质的分离,强有力支持了暗物质的存在。所以,有些新闻媒体把子弹星系团的观测列为2006年的世界科学十大进展之一(虽然我个人觉得不至于如此)。

另外,今年对星系团Cl0024 + 17的观测又吸引了科学界的目光(封底图8)。Cl0024 + 17也是一个著名星系团,哈勃空间望远镜利用弱引力透镜效应发现了星系团Cl0024 + 17中暗物质的环状结构,这是由于星系团的两个子团沿着我们的视线方向在10亿年前发生过碰撞,而且正在彼此远离。碰撞过程中引力场变化巨大,使暗物质被拉进、推出,从而形成一个环状结构。而这样的环状结构在X射线气体(普通物质)的分布中并未发现。这是又一个暗物质-普通物质在空间上被分离的例子,进一步表明存在暗物质以及MOND理论的严重问题。

后记

如前所述,暗物质问题是个天文问题,也是个物理问题,它需要物理学家和天文学家的智慧和共同努力。国内宇宙学界有这样一则趣事。10多年前,当国内物理学家和天文学家聚集一堂在北京召开宇宙学会议时,使用的语言彼此难以理解,当时武向平为此作了语惊四座的尖锐发言。黄涛先生在大会总结时不得不发明了“张新民的宇宙学”(物理学家)和“武向平的宇宙学”(天文学家)来加以区分,以致成了圈内的典故。10多年过去了,如今天文界和物理界的同行们不仅是同事和朋友,而且有着越来越多的共同语言……

自然界本就是一个整体,只是人类为了图方便,对自然界的研究分成了数理化天地生。暗物质问题是大自然给人类出的最大谜题——暗物质明明存在(如果MOND理论是错的),可是大自然却不准许它在人类的任何科学仪器面前现身(截至目前为止),这实在是对人类智慧的莫大考验。

爱因斯坦说:“宇宙中最难以理解的事情,是宇宙是可以被理解的”。可是,宇宙为什么不让他演化出来的智慧(人类)去理解组成宇宙的主体——暗物质呢?莫非要让物理学家忍受九九八十一道煎熬,

方能体会到“Subtle is the Lord”吗？

何时、何人能够最终揭开这个谜底呢……

(北京市国家天文台 100012)

作者简介

秦波,1968年生于陕西西安,1990年在西安交通大学物理系本科毕业,1993年获兰州大学理论物理专业硕士学位,1997年在中国科学院北京天文台

获得博士学位。现在中国科学院国家天文台从事暗物质、宇宙学研究。



*秒差距(pc)是测量遥远星系时使用的长度单位,1kpc = 3.08568025 × 10¹⁹ m,为3.26164光年,但由于秒差距单位太小,所以常用千秒差距(kpc)和百万秒差距(Mpc)为单位。

科苑快讯

宇宙中惊现巨型空洞

宇宙中存在着一个巨大空洞,其他任何空洞都相形见绌,

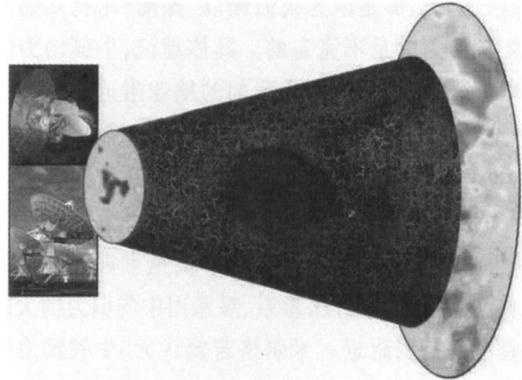
这一发现令天文学家大为吃惊,该空洞直径近10亿光年。空洞不同于黑洞:黑洞是由致密物质构成的小型球体,而空洞中几乎没有任何恒星、气体和其他普通物质。奇怪的是,其中也没有遍布宇宙的神秘暗物质。以前也发现过其他空洞,但根本没有这么大。

天文学家不知道该空洞存在的原因。明尼苏达大学的研究人员劳伦斯·鲁德尼克说:“以往不曾有人发现这么大的空洞,而且我们也不曾料到会发现这么大的空洞。”对鲁德尼克的同事莉莉雅·R·威廉姆斯来说,该发现也是她始料不及的。她说:“不管是根据我们的观测研究,还是根据宇宙这种大规模演化的计算机模拟,都说明我们的发现不同寻常。”该发现将在《天体物理学杂志》(*Astrophysical Journal*)上详细报道。

宇宙中分布着可见的恒星、气体和尘埃,但绝大多数物质是不可见的。科学家能够观测到所谓“暗物质”造成的引力影响。空洞也是存在的,但通常较小。

天文学家利用巨阵射电望远镜(Radio Telescope, VLA)仔细观测,发现了该巨型空洞,巨阵射电望远镜项目由美国国家科学基金会资助。鲁德尼克指出:在波江座的一个天区,星系数量急剧减少。以前该天区被称为“WMAP冷区”,因为在宇宙微波背景(CMB)辐射图中,该天区尤其突出,而这种辐射图由美国航空航天局威尔金森微波各向异性探测卫星(WMAP)绘制。宇宙微波背景辐射是宇宙大爆炸留下的痕迹,从理论上讲,宇宙大爆炸又是宇宙的开端。鲁德尼克说:“尽管这一令人吃惊的发现还需要独立证明,但宇宙微波背景辐射在这个天区中的较低温度好像是由一个巨大空洞造成的,空洞中

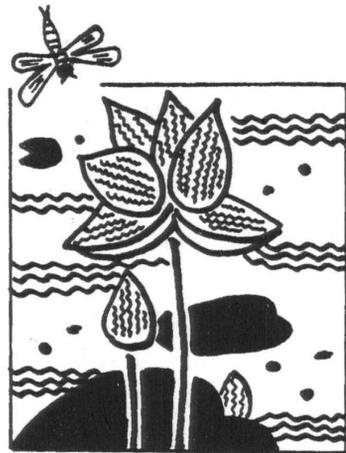
几乎没有任何物质,距地球大约60亿~100亿光年。”



物质对宇宙微波背景辐射的影响示意图

宇宙微波背景辐射中的光子通过含有物质的普通太空区域时会捕获少量能量,而通过空洞时会散失能量,使太空中该区域的宇宙微波背景辐射显得温度较低。

(胡德良译自太空网 <http://www.space.com/> 2007年8月23日消息)



精确宇宙学时代的暗物质问题

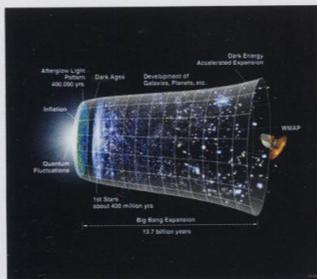


图1



图2



图3

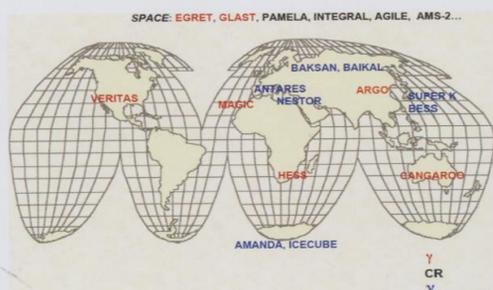


图4

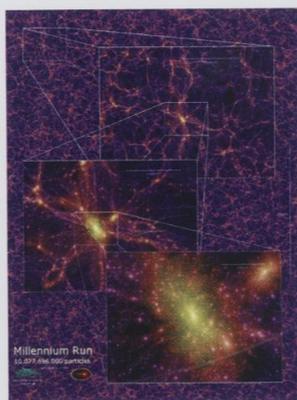


图5

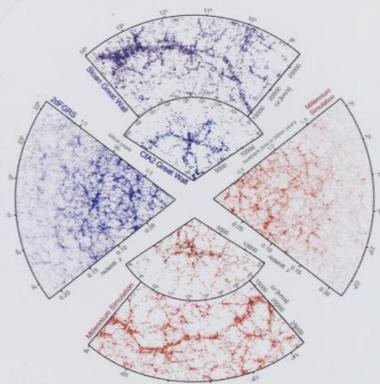


图6



图7



图8