

WIMPs 暗物质

李明哲 毕效军 张新民

暗物质是 21 世纪宇宙学和粒子物理研究的热点问题。WIMPs 是一种流行的暗物质粒子候选者，即 weakly interacting massive particles 的缩写，译为“弱作用重粒子”。目前我国计划中的暗物质粒子探测实验项目都是围绕着 WIMPs 暗物质开展的。本文将详细地阐述与 WIMPs 暗物质相关的基本问题，并力图澄清一些易于误解的概念。



早在七十多年前，天文学家通过天文观测已经推测到暗物质的存在。之后，大量的天文观测不断积累的数据证实了暗物质的存在。那么什么是暗物质呢？简单来说，暗物质是通过天文观测发现的、不发光的一种物质，它有显著的引力效应。

从粒子物理的观点出发，有质量的中微子是一种暗物质粒子，但它是热暗物质。威尔金森微波各向异性探测器（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe，简称 WMAP）和斯隆数字巡天（SDSS）等天文观测的结果说明，有质量的中微子的质量应当非常小，在暗物质中只能占微小的比例，绝大部分应是所谓的冷的或温的暗物质。那么这些暗物质粒子究竟是什么呢？目前还不清楚。理论物理学家有多种猜测，例如，惰性中微子（Sterile neutrino）温暗物质，引力微子（Gravitino）温暗物质，轴子（Axion）冷暗物质等。文献中，一种比较流行的是 WIMPs，例如，超对称理论中最轻的超对称伴子——中性伴随子（Neutralino）。取决于产生机制，WIMPs

可以为冷的也可以为温的暗物质。目前世界各国科学家，正在进行各种加速器和非加速器实验，试图找到这种 WIMPs 暗物质粒子。在国内，近几年对暗物质暗能量问题大家表现了非常高涨的热情，我国科学家经过多年的研究和探讨，并通过认真调研国际上相关领域的研究现状和发展趋势，特别是结合我国的具体情况已初步绘制了我国

开展暗物质暗能量探测的“地面，地下，空间，极地”的路线图。就暗物质而言，计划中的实验项目包括羊八井暗物质粒子间接探测实验，空间小卫星，空间站暗物质粒子间接探测实验以及在四川锦屏山隧道建设的世界上埋深最大的地下实验室的暗物质直接探测实验。值得指出的是这些实验项目都是针对 WIMPs 而言的，因此本文将重点阐述与 WIMPs 暗物质相关的基本问题，例如：冷的 WIMPs 暗物质；温的 WIMPs 暗物质；超 WIMPs 暗物质；衰变的 WIMPs 暗物质以及正反不对称 WIMPs 暗物质。文章的最后将简单地介绍国际上 WIMPs 暗物质的实验研究状况以及我国开展 WIMPs 暗物质探测的计划。

冷 WIMPs 暗物质

为什么相信 WIMPs 是暗物质呢？其原因有下面几点。（1）就粒子物理而言，WIMPs 是一些流行的新理论（如超对称、额外维空间等理论模型）中一个自然的预言。大家知道，在过去的几十年内我

（MicroPattern）气体探测器（Gas Detector），简称 MPGD。与 20 世纪七八十年代发展的丝室相比，具有极快的时间响应、高计数率（可达 $\sim 10^6/\text{mm}^2$ ）、抗辐射、抗磁场、极限空间分辨率小至亚毫米级，多路读出方便且价格相对低廉，较易于自制等优点，因此近十几年来发展很快，并各有其特点。例如 GEM 和极小的阳极条（X-Y strip）或片（pad）配

合，可做到最小 ~ 40 微米的位置分辨率；MicroMegas 的输出信号可达到很好的时间性能，脉冲上升时间和宽度可分别小于 1 纳秒和 10 纳秒。这三类探测器都在向大面积、高精度（包括能量分辨率和位置分辨率好）、高探测效率等方面发展，目前已应用到许多方面，我们在以后将有专文介绍。

（中国科学院高能物理研究所 100049）

们建立了粒子物理的标准模型，这一模型可以成功地描述目前所有的对撞机实验现象。虽然这一模型取得了辉煌的成就，但人们认为它只是对低能微观现象的一种唯象描述，而在更高的能标应该还存在着更基本的理论。尤其是，目前描述电弱对称性破缺的 Higgs 机制仍然没有得到实验证实，同时这种机制存在着一些理论问题，如规范等级 (hierarchy) 问题等。为了解决这些问题人们提出了如超对称理论、额外维空间理论等多种模型。为了使得这些新的理论模型不违反重子数守恒、轻子数守恒等，一般需要引入一些新的对称性，如超对称模型中的 R 宇称。其结果使得模型中自然而然地给出了一种中性的而且是稳定的粒子，如最轻的中性伴随子。一般来说，中性伴随子质量大约在弱标度 (100GeV 左右)，具有弱相互作用，根据定义，它属于 WIMPs。(2) 就宇宙学而言，WIMPs 能自然地解释现在观测到的宇宙暗物质的密度。由于 WIMPs 具有弱相互作用，在宇宙早期当温度高于 WIMPs 质量时，WIMPs 与宇宙中的其他成分，如光子、电子、中微子等快速反应并达到了热平衡。然而随着宇宙膨胀温度下降，WIMPs 与其他粒子的反应速率也降低，当温度低于 WIMPs 粒子的质量时，WIMPs 无法与宇宙中的其他成分保持热平衡的状态，这一过程被称为 WIMPs 暗物质的退耦。物理上，这一过程可以通过求解 WIMPs 暗物质粒子的玻尔兹曼方程来严格描述。通过理论计算得知，对于 WIMPs 来说，它的剩余丰度(relic density)与今天宇宙学观测所得到的暗物质密度一致，这被称为 WIMPs 奇迹 (WIMPs miracle)。(3) 就实验而言，WIMPs 的粒子性质如质量和相互作用可以在欧洲核子研究中心 (CERN) 的大型强子对撞机 (LHC) 上来直接检验，而我国中科院高能所的正负电子对撞机实验可以通过测量稀有衰变来探测轻的 WIMPs 及其相关的粒子。WIMPs 作为暗物质粒子，由于与普通物质具有弱相互作用，具有可探测性 (详见本文最后两节)。相比之下，对于许多其他的暗物质模型，由于其与普通物质的相互作用更弱，在目前的实验水平下探测它们的可能性更小。

总而言之，WIMPs 是理论物理学家“喜欢”的新理论中预言的新粒子，同时宇宙学家发现它正好给出宇宙中所需的暗物质密度，而在基于加速器和非加速器的实验上对于 WIMPs 的探测都具有可

行性。正因为如此，人们预期对于 WIMPs 暗物质的研究在不久的将来会有重大的突破。

温 WIMPs 暗物质

上面我们谈到的 WIMPs 暗物质是在宇宙演化过程中通过热过程产生的。这种 WIMPs 自产生以后就一直处于非相对论状态，所以是冷暗物质。

宇宙学上，根据结构形成理论一般来说可以将暗物质分为三类：热暗物质，冷暗物质和温暗物质。对于这三种不同性质的暗物质，可以通过自由流动尺度 (free streaming) λ_F 来加以区分。

λ_F 在结构形成理论中起着非常重要的作用。小于 λ_F 尺度上的密度扰动将被抹平，因此成团性被压低。由于其重要性，我们下面将用一些数学公式对其做一些较严格的讨论。

在背景为均匀各向同性的膨胀宇宙中，时空的度规只依赖于宇宙标度因子 $a(t)$ ，而它只是时间的函数，即 $ds^2=dt^2-\alpha^2dx^2$ (这里我们假设了空间平直性，这和目前的观测是一致的)。就暗物质粒子而言，其共动的 λ_F 表示为如下的积分

$$\lambda_F = \int_{t_i}^{t_{eq}} v dt = \int_{t_i}^{t_{eq}} \frac{p}{a\sqrt{p^2+m^2}} dt. \quad (1)$$

这里 $v=|dx/dt|$ 表示暗物质粒子自由流动的坐标速度， m 是粒子质量， p 是其动量，它随着宇宙膨胀递减 $p \propto a^{-1}$ ，因此有 $p = \frac{p_i a_i}{a}$ ，这里 p_i ， a_i 为暗物质产生时刻的动量和宇宙标度因子。公式 (1) 中的积分是从暗物质粒子产生 t_i 开始，到物质为主时期开始的时刻 (即结构形成的起点，宇宙温度约为 1eV) t_{eq} 。由于自由流动发生在辐射为主时期，由大爆炸宇宙学我们知道辐射为主时期标度因子与时间的关系为

$$a = a_{eq} \sqrt{t/t_{eq}}, \quad (2)$$

我们可以很容易计算出自由流动尺度

$$\lambda_F = 2r_c t_{eq} (1+z_{eq})^2 \times \ln \left[\frac{1}{r_c (1+z_{eq})} + \sqrt{1 + \frac{1}{r_c^2 (1+z_{eq})^2}} \right]. \quad (3)$$

在上式中我们定义了常数 $r_c = p_i a_i / m$ ，而且考虑了标度因子和红移的关系 $1+z = 1/a$ ，另外在最后的计算结果中我们取了近似 $a_i \approx 0$ ，但是由于初始动量可以非常大，足以保持 r_c 为非零的常数。如前所述 λ_F 是

共动尺度，但由于今天的标度因子已经归一，它也是今天的宇宙中所测到的物理距离。由方程(3)我们可以看出，对不同暗物质模型来说，自由流动尺度仅仅依赖于 r_c 。将 t_{eq} 和 z_{eq} 的观测值代入(3)式我们得到

$$\lambda_F \approx 4.6 \times 10^5 r_c \ln \left[\frac{6.5 \times 10^{-4}}{r_c} \right] \text{Mpc}, \quad (4)$$

这里 Mpc 即兆秒差距，是长度单位，1Mpc 为 326 万光年。

对于热暗物质粒子(如有质量中微子)来说，它的自由流动尺度一般都在 10Mpc 以上。在热暗物质模型中结构形成的次序是从上而下的，先形成比较大的结构，如超星系团、星系团等，然后通过碎裂的方式形成星系以及更小的结构，因而星系团比较古老，而星系却非常年轻，几乎不会有红移大于 1 以上星系存在，这是与观测矛盾的。

然而对于上一节谈到的热产生的 WIMPs 来说， r_c 近似为零，它的自由流动尺度非常小，相对于宇宙结构形成来说其效应可以忽略。在这种冷 WIMPs 暗物质模型中，由于不存在自由流动的效应，非均匀分布的物质在结构形成开始时可以立即在引力作用下坍缩成团。但是成团只能在哈勃视界以内进行，由于宇宙早期的哈勃视界很小，所以最先形成比星系小得多的结构。随着宇宙膨胀，许多率先形成的小尺度结构通过合并的方式逐步形成越来越大的结构。这称为冷暗物质模型中结构形成的自下而上的方式，它导致在很大的尺度或者质量范围内形成的结构成等级排列。这种结构形成的图像在星系以上的尺度，从 1Mpc 到 1000Mpc 范围内基本上与观测是相符的。但是在 1Mpc 以下的尺度范围内，冷暗物质模型与观测相比较有两个较大的矛盾：(1) 星系晕尖点问题。对冷暗物质的计算机 N 体模拟显示形成的星系晕中心密度成尖状分布，也就是说星系包括我们的银河系的中心密度比其他区域的密度都要高很多。然而，从通过观测星系旋转曲线推算出来的星系晕中的密度分布中心区域却非常的平坦；

(2) 矮星系问题。模拟显示冷暗物质模型预言的矮星系(一种低质量的小星系，一般由几十亿颗恒星组成，相比银河系有几千亿颗恒星少了许多，通常矮星系都围绕大星系转，因此也称作卫星系)在星系中大量存在，但这同样与观测不符。观测得到本星系群中矮星系的数目比模拟给出的小了一两个量

级。这些问题都显示了冷暗物质模型在星系以下的尺度上有过大的成团性。

由于冷 WIMPs 暗物质模型在小尺度上与观测的矛盾，十年前中科院高能所张新民等人提出了温 WIMPs 暗物质模型。温暗物质介于热暗物质和冷暗物质之间，其自由流动尺度没有热暗物质的那么大，但是也不可忽略。为了解决冷暗物质模型在较小尺度上的问题，一般温暗物质的自由流动尺度约为 0.1~1Mpc。实现温 WIMPs 要求在宇宙演化过程中 WIMPs 是通过非热过程产生的，比如通过宇宙相变产生的宇宙弦或不稳定的重粒子衰变成 WIMPs。对于非热产生的 WIMPs，产生时它可以是接近相对论的，那么就可以产生足够大的自由流动尺度。目前这种非热产生的 WIMPs 暗物质已引起了广泛的关注，文献中许多工作探讨了这类暗物质的性质。值得关注的是，由于温 WIMPs 暗物质是非热产生的，它的相互作用强度不受暗物质剩余丰度的理论计算要求的限制，这对暗物质的直接和间接探测是有利的。由于这一特性近年文献上称非热产生的 WIMPs 是提供暗物质间接探测中的所谓“boost factor”的一种重要的物理机制。

超 WIMPs 暗物质

超 WIMPs 表示暗物质粒子与普通物质之间的相互作用要远远小于弱相互作用的强度。这类暗物质粒子本身无法通过通常的直接探测和间接探测实验进行探测，但是这类暗物质模型通常具有其他一些独特的预言，以此可能验证这类模型。这类模型讨论最多的是引力子的超对称伴子(Gravitino)，此外还有由本文作者提出的暗能量精质标量场(Quintessence)的超对称伴子(Quintessino)，以及轴子的超对称伴子(Axino)等作为暗物质候选者的讨论。

虽然超 WIMPs 不能被探测到，但这类暗物质有一些特点，使得人们对于这类模型仍然感兴趣。这些特点都和超 WIMPs 的非热产生机制有关。因为这类暗物质作用非常弱，所以，它们不能通过宇宙早期的热产生给出正确的暗物质密度。通常这类暗物质通过一个相对稳定的母粒子衰变产生，而这个母粒子一般要求具有弱作用，可以热产生，比如超对称模型中的中性伴随子或 τ 轻子的标量伴子 Stau 作为超 WIMPs 的母粒子。由于超 WIMPs 和母粒子的作用非常弱，所以衰变寿命非常长。这会带

来两个效应，一个是改变标准的大爆炸核合成的预言，一个是使得暗物质具有大的自由流动尺度。对于第一个效应，如果模型的参数合适，它可以改进标准大爆炸核合成所预言的 ${}^7\text{Li}$ 元素的丰度以至于与观测符合得更好。对于第二个效应，如上一节谈到的，在某些模型参数选取下，这类暗物质可以有效地压低小尺度上的结构形成，从而解决冷暗物质在小尺度上的问题。在文献中的一些关于 Gravitino 和 Quintessino 模型的讨论中，这两个效应可以同时实现，既同时解决标准大爆炸核合成的 ${}^7\text{Li}$ 问题，也压低暗物质在小尺度上的结构形成。

此外，这类暗物质模型还有另外一个有趣的预言，即 Stau 通常是最为自然的产生超 WIMPs 的母粒子。这使得 Stau 具有很长的寿命，可以从几天到若干年。因此，一个非常有趣的预言就是在 LHC 上可能探测到这种稳定的、很重的（几百 GeV）带电粒子。这是一种明确无误的标准模型以外的新粒子。除了在对撞机 LHC 上探测这类粒子，还有广泛的研究其他方面探测的可能性，例如在空间宇宙线探测如 AMS，大型的中微子探测如 IceCube 装置上通过高能宇宙线相互作用产生并探测这类带电稳定重粒子的研究。总之，超 WIMPs 是一类具有独特性的模型，近年除了 WIMPs 之外对这类模型的研究也是非常广泛的。

衰变 WIMPs 暗物质

通常认为暗物质是一种稳定的粒子，但并不存在确切的理论依据说明暗物质绝对稳定。在某些大统一的模型中，暗物质粒子有可能衰变，但它的寿命非常长，至少可以与宇宙的年龄相比拟，这样才能符合观测的要求。值得注意的是，近些年的研究发现衰变的 WIMPs 暗物质能很好地解释近年宇宙线实验观测到的一些反常现象。另外，与湮灭 WIMPs 暗物质不同的是，衰变产物的流量和暗物质的密度成正比，而湮灭暗物质和暗物质密度的平方成正比，这样衰变暗物质在银河系中心产生的伽马射线流量一般要远小于湮灭暗物质，这也可以和 HESS 等伽马射线望远镜的观测一致。衰变 WIMP 也是目前研究较多的一类暗物质模型。

正反不对称 WIMPs 暗物质

近几年，正反不对称 WIMPs 暗物质引起了大家一定的关注。其基本想法是假设 WIMPs 暗物质粒子间存在着一个正反粒子的不对称性。研究这一

类暗物质模型的主要动机是，人们注意到数值上宇宙中的暗物质大约是重子物质的 5 倍，而宇宙中的重子物质来源于正反不对称性。如果 WIMPs 像重子一样具有同样大小的不对称性，质量约为 5GeV 的 WIMPs 正好给出宇宙中观测到的暗物质的密度。相反地，在这个理论框架下，基于重子物质和暗物质密度的观测值，人们可以从理论上预言 WIMPs 的质量，不过一般来说其预言的质量的大小依赖于模型本身。

实际上，大爆炸宇宙学模型预言了不同的余晖，如背景光子，背景中微子，重子物质，暗物质和暗能量。背景光子和中微子是通过热过程产生的。前面谈到的冷的 WIMPs 的产生就是类似的过程。这一节谈到的正反不对称 WIMPs 的产生类似于重子物质的产生，存在着一种不对称性。在粒子宇宙学中，产生重子物质不对称的机制被称作重子数或轻子数产生。关于这一物理机制详细的描述，请参看相关资料（如 *Phys. Rev. D*83: 055008），这里不再赘述。另外，在宇宙核合成过程中，质子和中子退耦后，自由中子衰变是一个非热过程。前面谈到的温 WIMPs 就来源于非热产生过程。由此可见，我们本文谈到的关于 WIMPs 的各种产生机制（如热产生，非热产生以及不对称性）在经典大爆炸宇宙模型中都能找到相应的过程，具有很强的类比性。正基于此，理论上不光有 WIMPs 奇迹，同样有非热 WIMPs 奇迹。

WIMPs 暗物质的实验研究

目前，关于 WIMPs 暗物质所开展的实验大致可以分为两类。其一称为直接探测实验，这类实验就是采用高灵敏度的探测器，直接探测暗物质粒子和探测器物质发生碰撞后所产生的信号。通常暗物质和探测器物质碰撞会产生三类信号：电离、发光和声子信号。直接探测实验在世界各国开展已经非常广泛，灵敏度迅速提高。探测电离信号的实验如 CDEX、CoGENT、TEXONO 等，探测发光信号的实验包括 DAMA、KIMS、XMASS 等，测量声子信号的实验有 PICASSO、COUPP 等。探测单一信号的优越之处在于探测器设计和运行相对简单，有时候可以实现大质量或低阈能，从而大大提高事例率，但为此所付出的代价是不能有效区分本底和真正的信号。为了更有效地区分本底，通常需要探测如上三种信号中的任意两种，比如 XENON、

WARP、LUX 等同时探测暗物质碰撞后产生的发光和电离信号，CDMSII、EDELWEISS 等同时探测电离和声子信号，而 CRESST 则同时探测声子和发光信号。从探测介质区分，目前的直接暗物质探测实验有采用常温晶体的实验，如 DAMA、KIMS 等；有目前广泛采用的双相惰性元素气体实验，如 XENON、WARP 等；此外则是采用超低温高纯锗探测器，如 CDMS 等。

直接探测实验大部分没有探测到任何的暗物质信号，从而给暗物质与普通物质的作用强度给出限制。当前最强的限制来自于百千克液氙实验 XENON100，在 100 天的观测实验里它探测到三个事例，但预期本底有 1.8 个，因此它给一个排除限。在最灵敏的区间它给出的限制是暗物质与核子的自旋无关作用截面小于 10^{-44}cm^2 。CDMSII 在 2009 年底给出的暗物质与核子的自旋无关的作用截面小于 $4 \times 10^{-44}\text{cm}^2$ 。与此相反的，DAMA 实验观测到探测器的年调制信号，置信度水平高达约 9σ 的标准偏差，这一信号被解释为轻的暗物质（8GeV 左右）与探测器物质的散射造成的。另外一个实验 CoGeNT 同样探测到多出本底的信号，并用轻的暗物质做了解释，但这些解释要求暗物质与核子的散射截面高达 10^{-40}cm^2 ，与 XENON 等的实验结果有着明显的矛盾。理论工作者围绕这些问题进行了仔细的研究，力图找出可能缓解这个矛盾的理论模型。

另一类实验称为间接探测实验，这类实验主要是通过探测暗物质自湮灭或衰变的产物来研究暗物质的本质。由暗物质所产生的湮灭信号会叠加到普通的宇宙线本底上，一般其能谱不同于宇宙线本底的能谱，因此高灵敏度的实验有可能探测到这样的信号。我们通过探测伽玛射线、中微子、正电子、反质子等信号探测来自于暗物质的信号。

间接探测方面，目前开展的实验有 2006 年升空的 PAMELA 卫星探测带电粒子，有 2008 年升空的 Fermi 卫星探测伽玛射线。2011 年 5 月升空的阿尔法磁谱仪（AMS02）将把各种带电粒子的能谱和能量范围测量到前所未有的程度。在地面上，即将于 2012 年左右完成的，在南极的 IceCube 中微子探测器也将开展高灵敏度的中微子探测。加上已经在对撞取数的大型强子对撞机（LHC）的运行，人们对

于暗物质的认识有可能很快取得突破性的进展。尤其是自 2008 年以来，PAMLEA，ATIC，Fermi-LAT 等宇宙线测量结果都显示了一些反常的迹象。这些迹象都可能是来自于暗物质的信号，但目前还无法区分其他天体物理的来源，如脉冲星。人们期望来自 AMS02 的精确测量对最终解释目前的反常给出有用的线索。

上面我们详细地介绍了 WIMPs 暗物质的基本概念，以及实验研究现状。目前世界各国积极开展各种针对 WIMPs 暗物质的理论和探测实验研究。我国近年来对于暗物质的研究也给予了极大的关注，理论研究和实验研究方面都取得了很大的进步。在 WIMPs 暗物质直接探测方面，正在建造的四川锦屏山地下实验室将成为目前国际上埋深最深的实验室，是开展暗物质实验理想的实验室。清华大学等合作单位基于高纯锗的 CDEX 实验，以及上海交通大学等合作单位基于液氙的 PANDAX 实验将成为这个实验室首批开展的两个暗物质直接探测实验。在 WIMPs 间接探测方面，我国西藏羊八井宇宙线地面观测站随着实验的升级和灵敏度的提高，特别是未来 LHAASO 项目的开展，将具有一定的潜力。在空间 WIMPs 暗物质粒子间接探测方面，我国空间站暗物质粒子探测项目以及较近期的由紫金山天文台等单位提出的小卫星暗物质实验，都将对暗物质的研究作出重要的贡献。

鉴于 WIMPs 暗物质性质的研究与天文学紧密相关。比如，对于暗物质的直接探测和间接探测，其信号的预言或解释都依赖于暗物质的密度及空间分布，依赖于它是冷 WIMPs 还是温 WIMPs，因此，这些研究必须和天文研究紧密结合。在这方面，我国的 LAMOST 望远镜，特别是南极 DOME A 大型望远镜将起重要的作用。

总之，暗物质暗能量的研究需要理论和实验相结合，更重要的是物理和天文等多学科的交叉研究，同时要开展国际合作。这是一个系统工程，只有多学科多部门的合理协调统筹安排及科学规划，我们才能不失时机地参与国际竞争，为人类文明的进步和科技的发展作出应有的贡献。

（李明哲，南京大学物理学院 210093；毕效军，张新民，中国科学院高能物理研究所 100049）