

文章编号: 1007-4627(2016)04-0392-17

## 暗物质理论研究进展

李希国

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 评述了天体物理中暗物质的发现以及标准模型所面临的问题, 综述了解决这些问题及标准模型之外可能出现的新物理与暗物质的联系。介绍了暗物质粒子选择条件和可能的暗物质粒子的候选者; 对圆柱形暗物质表面密度与星系和星系团暗物质晕的晕核半径的关系进行了讨论, 与其他模型进行了比较, 得出暗物质晕的特征半径  $r_*$  的暗物质表面密度分布不是一个普适量; 并叙述了近几年暗物质研究中提出的新理论模型-**Hidden dark matter**, 最后叙述了中国暗物质实验探测研究的进展, 2016 年底 DAMPE 的第一批数据有可能给出; 中国锦屏地下实验室 (CJPL) 的 CDEX 和 PandaX 合作组的第一期实验没有发现暗物质粒子存在的信号, 期待他们下期的实验。

**关键词:** 暗物质; 暗物质粒子; 暗物质探测

**中图分类号:** 0572.3    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.392

### 1 引言

二十世纪末, 物理学家在探测大尺度宇宙中发现了暗物质和暗能量<sup>[1]</sup>, 威尔金森微波各向异性探测器 (WMAP) 观测和 Planck 卫星数据的结果表明<sup>[2-3]</sup>, 组成现今宇宙成分中重子物质的能量密度 (可见物质, 参与电磁、强、弱和引力相互作用) 是  $\Omega_B \simeq 0.0456 \pm 0.0016$ ; 冷暗物质能量密度 (参与引力相互作用, 可能参与弱相互作用) 是  $\Omega_{DM} \simeq 0.227 \pm 0.014$ ; 暗能量  $\Lambda$  密度是  $\Omega_\Lambda \simeq 0.728 \pm 0.015$ , 所以, 暗物质占宇宙总物质的 85% 左右。迄今, 人们对暗物质的物理属性一无所知。

暗物质物理属性的鉴别研究具有重要意义: 在天体物理方面, 暗物质的性质决定着宇宙过去是如何形成的和未来是如何演化的; 在粒子物理方面, 暗物质对标准模型之外的新粒子发现将起决定作用, 可以帮助粒子物理学家深刻理解弱电对称破缺的物理实质。暗物质的鉴别也是大尺度观测宏观宇宙与极小尺度观测微观宇宙相联系中的核心问题。暗能量有引力效应, 且暗能量使宇宙产生负压强, 是宇宙加速膨胀的根源, 其它自然属性不清楚。所以, 暗物质暗能量问题吸引了一大批科学家的注意力和研究热情。中国科学院也将暗物质暗能量作为优先发展和支持的研究领域, 已经成功发射了暗物质探测卫星 (DAMPE) (紫金山天文台)<sup>[4]</sup>, 中国有关部门

联合建成了锦屏山地下实验室 (CJPL) (锦屏山)<sup>[5]</sup>, 其目的就是要参与到国际暗物质探测研究中去。

目前, 越来越多的天文观测证据支持暗物质的存在, 其中, 最直接的证据之一是对星系和超大星系旋转曲线的观测, 其测量值与暗物质解释的理论值相符<sup>[6]</sup>, 2006 年, 钱德拉 X 射线望远镜对子弹星系团进行了观测, 发现发光物质的质量中心与由引力透镜测定的引力等势面给出的质量中心并不重合<sup>[7]</sup>, 只能用子弹星系中存在暗物质形成的晕来解释。对于暗物质, 文献[8]对目前天文观测和理论研究给出了一个较为全面的评述。另外, 宇宙大尺度结构形成理论和观测表明, 在 138 亿年的宇宙演化中, 仅靠恒星自身的引力完全无法聚成今天的星系; 星系群和星系团存在高温气体, 其温度可达上千亿度, 若无巨大暗物质引力场的束缚, 那么如此高温高能的热气体, 早已经逃逸瓦解。目前科学家急需知道的主要问题是暗物质的自然属性, 暗物质是如何产生的? 如何探测它们? 与可见物质有什么本质不同?

本文主要介绍来自标准模型和粒子物理中有关暗物质候选者。最近几年, 来自宇宙探测的丰富数据也对暗物质性质给出了一些限制, 例如它们的自相互作用, 物质辐射平衡温度等, 从大尺度角度讨论了暗物质晕的密度分布和结构。因此, 发现满足所有限制的暗物质新粒子仍然是一件非常困难的事情。暗物质粒子候选者提出的动机不但是宇宙学要求, 而且也可能是解决粒子物理

收稿日期: 2016-04-01;    修改日期: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11575254)

作者简介: 李希国(1961-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 从事理论物理与暗物质暗能量研究; E-mail: xgl@impcas.ac.cn.

学中一些突出问题的关键。

## 2 暗物质的候选者

尽管我们目前还不知道暗物质是如何形成的,但是,科学家们认为一个弱相互作用大质量粒子(Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs)的剩余密度是早期宇宙高温时期的副产品<sup>[9]</sup>。二十几年前,美国物理学家指出:暗物质可能是超对称场论中预言的超对称伴子(neutralino),即光子、 $Z_0$ 玻色子、希格斯玻色子的超对称伴子的组合体。由于在超对称中存在一个 $R$ 宇称,在 $R$ 宇称下,如果超对称伴子是奇数时,则标准模型的粒子数就是偶数,因此,最轻的超对称粒子不会衰变,暗物质粒子(WIMPs)的最佳候选者之一是neutralino<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1 暗物质粒子候选的条件

暗物质存在的天体观测证据无可置疑,但是,暗物质的自然属性仍然未知,按照我们对普通物质的认识推测,暗物质也应该是由微粒组成的,因此,科学家们提出了暗物质粒子的概念,如果自然界存在暗物质的组成粒子,那它们应该具备什么条件?暗物质粒子选取的条件是<sup>[11]</sup>:

(1) 暗物质粒子的寿命比宇宙年龄长,即

$$\tau_{\text{DM}} > \tau_0 \simeq 4.3 \times 10^{17} \text{ s},$$

(2) 能量密度要求

$$\Omega_{\text{DM}} \simeq 0.11.$$

上述这两条件是宇宙模型的要求,当然,从粒子物理角度看,暗物质粒子还应该是单色态。

### 2.2 粒子物理的标准模型

粒子物理中,标准模型是关于基本粒子及其相互作用非常成功的理论。标准模型中存在的缺陷和开放问题诱发了暗物质的主要候选者,也为暗物质研究指出了方向。

标准模型<sup>[12]</sup>的粒子可分为三类:

(1) 自旋 $\frac{1}{2}$ 费米子。物质粒子包括6个夸克(上、下、粲、奇异、底、顶),三味带负电荷的轻子(电子、 $\mu$ 子、 $\tau$ 子)和三味中微子(电子中微子、 $\mu$ 中微子、 $\tau$ 中微子),它们可以分成三代。

(2) 自旋1规范玻色子。相互作用承载粒子,光子 $\gamma$ 传递电磁相互作用;8个胶子 $g$ 传递强相互作用;规范玻色子 $W^\pm$ 和 $Z_0$ 传递弱相互作用。光子和胶子无质量,但 $W^\pm$ 的质量为80 GeV, $Z_0$ 的质量为91 GeV。

(3) 自旋0希格斯玻色子。希格斯玻色子是通过自发对称破缺机制使规范玻色子产生质量的源,在欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)上发现,其质量约为125 GeV。

每个夸克有3个色量子数,即夸克有18种,轻子有6种,每一种带质量的狄拉克费密子都有其反粒子,因此,带质量的基本费密子共计48种;传递相互作用的波色子共计12种,再加上一个西格斯玻色子,所以,标准模型认为组成普通物质的基本粒子有61种。标准模型粒子中没有一个是暗物质的最佳候选者,大多数带质量的基本粒子几乎都是不稳定的,其寿命都比宇宙的年龄短。剩余的6个最轻的粒子:电子、上和下夸克在原子核内形成稳定的质子和中子(注:夸克之间的弱相互作用就会出现电子);还有三代中微子。电子带电,与光子有电磁相互作用,因此,不可能是暗物质粒子的候选者。另外,来自粒子物理和宇宙学对中微子质量给出的上限暗示中微子的剩余密度 $\Omega_\nu \simeq \sum_i m_{\nu_i} / 47 \text{ eV} \leq 0.012$ <sup>[3]</sup>。因此,暗物质的证据要求暗物质粒子是标准模型之外的新粒子。

表1 缩写定义和符号

符号	物理含义
$\tilde{\chi}$	最轻的neutralino, 一个超对称暗物质候选者
$\tilde{G}$	Gravitino, 一个超对称暗物质候选者
$G_N$	牛顿引力常数
GMSB	规范介质超对称破缺
LKP	最轻的KK粒子
LSP	最轻的超对称粒子
NLSP	次轻的超对称粒子
$M_{\text{Pl}}$	普朗克质量 $\simeq 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$
$M_*$	约化普朗克质量 $\simeq 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$
$X$	一般的暗物质候选者
WIMPs	大质量弱相互作用粒子

### 2.3 标准模型中的问题和可能的新物理

除了暗物质之外,标准模型中存在的问题有两类:其一是不能解释实验上发现的中微子质量问题;其二是标准模型中的参数选取不是自然的。可以概括为如下的五个问题。

(1) 规范层次问题。规范层次问题<sup>[13-14]</sup>是什么西格斯玻色子质量 $m_h$ 如此的小,我们知道的3个基本常数:光速 $c$ 、普朗克常数 $h$ 和牛顿引力常数 $G_N$ ,它们的组合有一个质量维数,即普朗克质量 $M_{\text{Pl}} \equiv \sqrt{hc/G_N} \simeq 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$ 。物理学家们希望维数参数要么在对称下为零,要么是 $M_{\text{Pl}}$ 的数量级。由于在标准模型中,弱电对称破缺,西格斯玻色子质

量非零, 规范层次问题就等同: 为什么  $m_h \sim 125 \text{ GeV} \ll M_{\text{pl}}$ .

规范层次问题在弱的标度  $m_{\text{weak}} \sim 10 \text{ GeV} \sim \text{TeV}$  下暗指新的物理。许多企图改善规范层次问题还远没有暗指新粒子出现。所以, 暗物质候选者也可能是规范层次问题的主要动机, 例如, WINPS, super WIMPs 等等。

(2) 新物理味的问题。规范层次问题暗示了质量在  $m_{\text{weak}}$  左右的新物理, 这样一些典型的粒子产生了许多新问题, 它们也许破坏了重子数、轻子数、味或者 CP。这些对称性在标准模型中要么被完整地保留, 要么被轻轻地破坏, 但新  $m_{\text{weak}}$  粒子使保留这些对称性将不能保证。这就是所谓的新物理味的问题。

新物理味问题暗示对规范层次问题的所有解不是均等的。例如, 在超对称理论中, 物理味预言的 squarks 和 sleptons 通过不同的代而高度简并被支持。这也是诱发轻引力微子可能是暗物质和提出隐藏区暗物质模型<sup>[15-17]</sup>的原因。

(3) 中微子质量问题。在量子场论中, 费密子质量都是通过左右手场耦合在一起来描述的, 而标准模型中, 没有中微子右手场, 因此, 标准模型中所有中微子都是无质量的, 然而, 中微子的实验发现了中微子震荡的三种模式<sup>[18-20]</sup>, 也就是 3 种中微子是非退化的, 它们都具有质量, 而且不相同! 中微子质量和中微子混合强有力地说明了粒子物理的标准模型是不完整的。这个问题也是诱发惰性中微子可能是暗物质的原因。

(4) 强 CP 问题。标准模型的拉氏量中包含一项  $g_3^2 \theta_3 / (32\pi^2) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^\alpha G_{\rho\sigma}^\alpha$ , 式中  $g_3$  是强作用的耦合常数,  $\theta_3$  是角参数,  $G_{\mu\nu}$  是胶子场强,  $(32\pi^2) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}$  是个数。这个项对 CP 破缺和味守恒观测有贡献, 例如, 中子  $d_n$  的电偶极矩。当  $\theta_3 \sim 1$  时, 期望值是  $d_n \sim 10^{-16} \text{ ecm}$ 。中子的电偶极矩仍然没有观测到, 目前的上限是  $d_n < 2.9 \times 10^{-26} \text{ ecm}$ <sup>[21]</sup>。所以, 这是一个在  $10^{-10}$  量级中寻找零后 1 的极小微调问题。因此, 强 CP 问题诱发轴子可能是暗物质的候选者。

(5) 为什么不同费密子质量如此的不同? 标准模型味问题是为什么三代费密子之间的质量差别如此之大? 大统一理论模型试图给出强、弱、电磁相互作用在一个简单力下的不同表示。另外还有一个问题就是  $\mu$  轻子的反常磁矩, 尽管这些问题可能对暗物质的候选影响不大, 但有时候它们也应该被考虑。

$m_{h0}$  在标准模型中仅仅是两维数参数之一, 也就是  $\Lambda^4$  量级, 它主要对暗能量或宇宙常数贡献, 而总的暗能量密度是  $\Lambda \simeq (2.76 \text{ MeV})^4$ , 如果  $\Lambda$  的自然值

是  $M_{\text{pl}}^4$ , 从另一个角度, 因为  $\Omega_\Lambda = 73\%$ , 这相当宇宙的上限给出  $\rho_{\text{eff}} = 10^{-47} \text{ GeV}^4$ , 而真空期望理论值给出  $\rho_\Lambda = 10^{74} \text{ GeV}^4$ , 物理学家需要面对一个喜剧式的等式  $10^{-47} = 10^{74} + \Lambda$ , 如何调节宇宙常数  $\Lambda$  使这个等式成立, 也就是如何选择宇宙常数使得宏观宇宙与微观世界如此微妙地平衡, 这就是著名的一百二十次方的问题<sup>[22-23]</sup>, 它最后归结为规范层次问题。人们希望宇宙常数和暗物质有一个统一的解释。

(6) 扩展的问题——关于标量场。在标准模型中, 标量场引入后, 弱电对称破缺, 使规范玻色子 W 和  $Z_0$  产生质量<sup>[11]</sup>; 在规范场的整体拓扑性质研究中, 规范场可用标量场表达, 用其研究相关的整体拓扑性质<sup>[24-25]</sup>; 在暗能量的 Quintessence 模型<sup>[26]</sup> 中, 也是引入了一个标量场解释宇宙产生负压机制。所以, 标量场为什么无处不在? 它与暗物质及宇宙常数有何关联? 在隐藏区暗物质模型中也是标量场在起作用, 因此, 究竟标量场是什么? 值得深入研究。

暗物质的发现给物理学提出了新的物理问题, 目前, 理论上挑选暗物质粒子和从实验上鉴别, 是暗物质研究的首要问题。上面的分析说明, 标准模型预言的粒子不大可能是暗物质粒子, 而标准模型所存在的问题有可能给暗物质研究提供了线索。

### 3 暗物质粒子-WIMPs

暗物质粒子 (WIMPs) 的质量范围是  $m_{\text{weak}} \sim 10 \text{ GeV} \sim \text{TeV}$  的量级, 与  $W^\pm$  和  $Z_0$  规范玻色子之间存在相互作用, 但与胶子和光子没有相互作用。所以, WIMPs 是最具研究意义的暗物质候选者<sup>[8]</sup>。它们有适合的剩余密度, 在外太空<sup>[27]</sup>、在地下<sup>[5]</sup>和实验室<sup>[16]</sup>存在可能的探测方法。本节将由热冻结给出暗物质的剩余密度, 以及 Neutralino 和 KK (Kaluza-Klein) 暗物质候选者, 并一般叙述直接、间接和实验室探测方法。

#### 3.1 热冻结

##### (1) WIMPs miracle

如果暗物质粒子存在, 并且稳定, 它们自然产生的剩余密度就要与暗物质的要求一致。有时候用一个煽情的词 “WIMPs miracle”, 这意味着规范层次问题, 一个纯粹的微观物理世界的迷惑, 诱导的暗物质粒子是最好的暗物质粒子候选者。

暗物质也许通过简单和预言的方法产生, 例如, 宇宙大爆炸的热遗迹<sup>[28-29]</sup>。早期宇宙处于高密度高温, 所有粒子处于热平衡, 然后, 宇宙冷却到暗物质粒子质量  $m_X$  以下的温度  $T$ , 暗物质粒子的数变成 Boltzmann

抑制，是以指数  $e^{-m_X/T}$  形式下降。除了冷却，暗物质粒子数将下降为零，宇宙持续膨胀。在这个阶段，宇宙膨胀如此之大，暗物质粒子气体变得如此之稀薄以致它们之间不能互相发现而湮灭。那么暗物质粒子被冻结，即渐进趋于常数称之为热剩余密度。如图 1 所示。

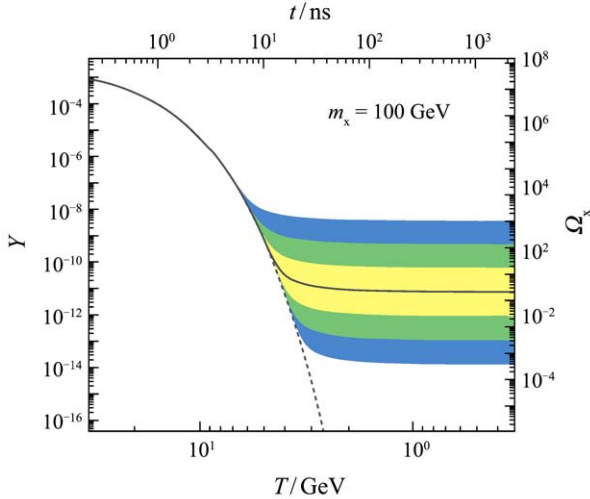


图 1 (在线彩图) 共动坐标数密度  $Y$  (左) 作为温度  $T$  (底) 和时间  $t$  (顶) 函数, 质量为 100 GeV,  $P$ -波湮没的暗物质粒子的热剩余密度。实线表示湮没截面产生合理剩余密度, 阴影区域是  $10^1, 10^2, 10^3$  对应的截面, 虚线是在热平衡下一个粒子的数目。来自文献[30]。

这个过程可以用 Boltzmann 方程描述

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma_{AV} \rangle (n^2 - n_{eq}^2), \quad (1)$$

式中  $n$  是暗物质粒子  $X$  的数密度;  $H$  是 Hubble 参数;  $\langle \sigma_{AV} \rangle$  热平均湮灭截面;  $n_{eq}$  是在热平衡下的暗物质数密度。方程式(1)的右边第一项是来自膨胀稀释引起的, 项  $n^2$  是来源过程  $X X \rightarrow SM$  (即暗物质粒子湮灭产生标准模型粒子过程), 项  $n_{eq}^2$  是来自逆过程  $SM SM \rightarrow X X$  (标准模型粒子反应产生暗物质粒子过程)。

热剩余密度通过数值解 Boltzmann 方程确定。然而, 一个粗糙分析具有很强的指导意义。当  $n < \langle \sigma_{AV} \rangle = H$  时, 定义冻结时间, 得到

$$n_f \sim (m_X T_f)^{3/2} e^{-m_X/T_f} \sim \frac{T_f^2}{M_{pl} \langle \sigma_{AV} \rangle}, \quad (2)$$

式中下标  $f$  标记在冻结处的量, 定义比值  $x_f \equiv m_X/T_f$ , 这个量对暗物质性质具有很强的指导意义, 可以考虑成常数值: 一个典型值  $x_f \sim 20$ , 则热剩余密度为

$$\Omega = \frac{m_X n_0}{\rho_c} =$$

$$\frac{m_X T_0^3 n_0}{\rho_c T_0^3} \sim \frac{m_X T_0^3 n_f}{\rho_c T_f^3} \sim \frac{x_f T_0^3}{M_{pl}} \langle \sigma_{AV} \rangle^{-1}, \quad (3)$$

式中  $\rho_c$  是临界密度, 下标 0 标记目前的量。我们看到热剩余密度对暗物质质量  $m_X$  和反比例湮没截面  $\langle \sigma_{AV} \rangle$  敏感。

尽管,  $m_X$  没有直接在  $\Omega_X$  中显示, 但在许多理论中, 仅仅是质量标度决定湮没截面, 基于维数, 截面可以写成如下形式

$$\sigma_{AV} = k \frac{g_{weak}^4}{16\pi^2 m_X^2} (1 \text{ or } v^2), \quad (4)$$

式中因子  $v^2$  缺失或者出现在暗物质粒子  $X$  的  $S$ - 或  $P$ -波湮没中, 忽略  $v$  高阶相。常数  $g_{weak} \simeq 0.65$  是弱相互作用规范耦合。  $k$  是这种估计中出现的偏差参数。

给出参数  $k$  的选定, 作为  $m_X$  函数的剩余密度就确定了[30]。让  $k$  从 1/2 到 2 变化, 考虑  $S$ - 和  $P$ -波湮灭时, 图 2 给出的是带的宽度。从图中看到预言的所有暗物质粒子的质量范围是:  $m_X \sim 100 \text{ GeV} \sim 1 \text{ TeV}$ ; 组成暗物质粒子百分之十的质量在  $30 \sim 300 \text{ GeV}$  之间。这就是暗物质粒子奇迹: 弱标度粒子成为最好的暗物质候选者。所以, 暗物质粒子奇迹也许预示许多粒子物理模型提供可望实现的暗物质候选者, 期待粒子物理和天体物理相关联的关键点变得如此强烈, 因此, 寻找规范层次问题和暗物质粒子的本质为在弱标度范围发现新物理提供了很好的机遇。

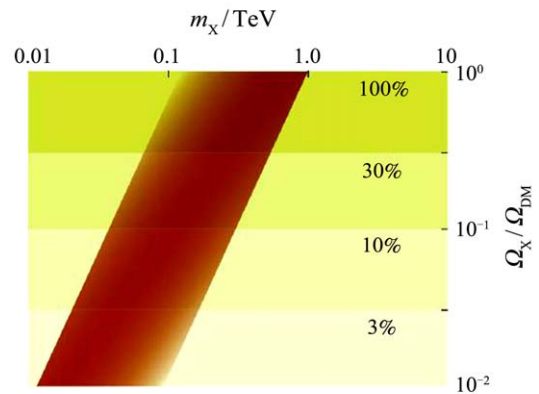


图 2 (在线彩图) 在  $(m_X, \Omega_X/\Omega_{DM})$  平面里, 热剩余  $X$  的自然值带(红黑色)来自文献[30]

### (2) 稳定性

如果弱标度下新粒子存在, 它们其中之一至少应该是稳定的, 这也是从 1989 年到 2000 年, 大电子-正电子 (large Electron-Positron collider, LEP) 碰撞的宇宙遗产。一般地, 为了解决规范层次问题而引入的新粒子

应该期待诱导新的相互作用。

$$\text{SMSM} \rightarrow \text{NP} \rightarrow \text{SMSM}, \quad (5)$$

这里 SM 和 NP 分别为标准模型粒子和新粒子, 如果新粒子重, 它们就不能产生, 不过它们的影响是对标准模型粒子性质产生干扰。为了寻找这些相互作用, LEP(Stanford Linear Collider) 限制新粒子的质量标度大致是  $1 \sim 10 \text{ TeV}$ , 这依赖于涉及的标准模型粒子, 与此同时, 为了解决规范层次问题, 新粒子不能是完整减弱, 至少, 对西格斯波色子质量而言, 新粒子应该改变了量子关联, 这就预示着新粒子必须与西格斯波色子通过如下耦合相互作用:

$$h \longleftrightarrow \text{NPNP}, \quad (6)$$

它们的质量应该比  $m_{\text{weak}} \sim 10 \text{ GeV} \sim \text{TeV}$  大一些。如果存在一个守恒离散宇称要求涉入的偶数新粒子的所有相互作用, 这些相互矛盾的要求就可以得到调和。当保留(5)式中适合的反应时, 这样的守恒定律排除了(4)式中有问题的反应。作为副效应, 离散宇称的存在暗示最轻的新粒子不能衰变, 因此, 是稳定的。这正是暗物质所要求的。

暗物质对湮灭仍然是允许的, 这个原始的离散宇称之一就是  $R$ -宇称, 即  $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$ , 其中,  $B$  是重子数,  $L$  是轻子数,  $S$  是自旋, 这是超对称场论提出的。离散宇称可以通过许多方法实现, 依赖于弱标度的新物理。

### (3) 探测方案

WIMPS 在弱标度下为暗物质提供了模型独立, 然而, 如何探测暗物质粒子是一个棘手的问题。对于 WIMP X 有一个可观测的剩余密度, 它们必须湮灭成另外的粒子。假定另外的粒子是标准模型粒子, 即  $\text{XX} \rightarrow \text{SMSM}$  中必要的相互作用, 建议 3 个有希望探测暗物质粒子方法。

间接探测: 如果暗物质在早期宇宙中湮灭, 而且必须通过方式  $\text{X X} \rightarrow \text{SM SM}$  湮灭, 具体而言是通过  $t$ -道的  $\text{X X} \rightarrow \text{q}\bar{\text{q}}, \bar{\text{l}}\text{l}$  和  $\text{X X} \rightarrow \text{W}^+\text{W}^-$ ,  $\text{ZZ}$  湮灭的产物就可以被探测。

直接探测: 暗物质通过方式  $\text{XSM} \rightarrow \text{XSM}$  与普通物质散射, 沉积能很敏感地被观测, 但如何排除复杂的背景射线?

粒子对撞: 暗物质也许通过方式  $\text{SMSM} \rightarrow \text{XX}$  在实验室产生, 这样的事件是不可探测的, 但它们通常伴随着相关的产生机制, 象过程  $\text{SMSM} \rightarrow \text{XX} + \text{SM}$ , 这些事件是可观测的, 提供了实验室对撞下可能可观测的暗物

质的信号。

WIMPS 奇迹暗示不仅暗物质相互作用存在, 而且暗物质与标准模型粒子的相互作用必须有效的, 尽管 WIMPS 不可能给出暗物质的巨大数量, 但它们一定不能有一个超过  $\Omega_{\text{DM}}$  的能量密度。因此, 宇宙对相互作用率提供了一个下线。这为实验探索 WIMPS 和它们的性质提供了多种多样的目标。

可实现的粒子物理理论的设计旨在自然确定规范层次问题: 预言新粒子: (I) 质量在  $\sim m_{\text{weak}}$  范围; (II) 稳定的; (III) 有一个暗物质的热剩余密度。粒子物理和宇宙学的结合要求新物质态为暗物质诱发出许多新的方案。

## 3.2 暗物质的候选者

### (1) Neutralinos

考虑量子修正, 标准模型中西格斯玻色子的物理质量是

$$m_h^2 = m_{h0}^2 + \Delta m_h^2, \quad (7)$$

其中,

$$\Delta m_h^2 \sim \frac{\lambda^2}{16\pi^2} \int^{\Lambda} \frac{d^4 p}{p^2} \sim \frac{\lambda^2}{16\pi} \Lambda^2 \quad (8)$$

是来自单圈图的量子关联贡献。式中参数  $\lambda$  是一个零阶无维耦合参数,  $\Lambda$  是能量标度<sup>[30]</sup>。

规范层次问题, 几乎被超对称完美解决。在超对称标准模型的超对称扩展中, 每个标准模型粒子还有一个没有被发现的伴随粒子, 即伴子, 它们有相同的量子数和规范相互作用, 但自旋相差  $1/2$ 。是来自对西格斯玻色子质量携带相反符号贡献的标准模型量子修正的已知补充<sup>[31]</sup>, 带有相反自旋统计的新粒子引入, 则有

$$\begin{aligned} \Delta m_h^2 &\sim \frac{\lambda^2}{16\pi^2} \int^{\Lambda} \frac{d^4 p}{p^2} |_{\text{SM}} - \frac{\lambda^2}{16\pi^2} \int^{\Lambda} \frac{d^4 p}{p^2} |_{\text{SUSY}} \\ &\sim \frac{\lambda^2}{16\pi^2} (m_{\text{SUSY}}^2 - m_{\text{SM}}^2) \ln \frac{\Lambda}{m_{\text{SUSY}}}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $m_{\text{SM}}$  和  $M_{\text{SUSY}}$  分别是标准模型质量和相应的超对称伴子质量。对于  $m_{\text{SUSY}} \sim m_{\text{weak}}$ , 这是一阶关联, 甚至  $\Lambda \sim M_{\text{pl}}$ 。这是对规范层次问题不可解, 即我们必须理解为什么  $m_{\text{SUSY}} \sim m_{\text{weak}} \ll M_{\text{pl}}$ 。关系(9)式意味着建立机制的量子效应将不能破坏层次, 并且规范层次问题可能被真地解决。

这并不奇怪, 标准模型粒子的加倍对宇宙有许多意义, 对暗物质, 列举电中性的所有新粒子是很自然的事。超对称模型要求两个西格斯玻色子。中性的超对称

粒子如下:

$$\text{Spin}3/2 \quad \text{Fermion: Gravitino } \tilde{G} \quad (10)$$

$$\text{Spin}1/2 \quad \text{Fermions: } \tilde{B}, \tilde{W}, \tilde{H}_u, \tilde{H}_d$$

$$\longrightarrow \text{Neutralinos } \chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4 \quad (11)$$

$$\text{Spin}0 \quad \text{Scalars: Sneutrinos } \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau. \quad (12)$$

正如所示, 中性自旋 1/2 费密子混合形成四个质量本征态: Neutralinos。它们中最轻的  $\chi \equiv \chi_1$ , 是 WIMP 暗物质候选者<sup>[31]</sup>。这些超中微子不是好的暗物质候选者, 它们的湮没和散射截面比较大, 所以它们是被排除的, 即对于所有质量接近  $m_{\text{weak}}$  的直接探测实验给出了零结果。Gravitino 也不是 WIMP, 但它是可观测的和迷人的暗物质候选者。

### (2) KK 暗物质

对于新弱标度物理而言, 一个替代的可能是额外维模型。额外空间维可以追本溯源到 1920 年代, 由 Kaluza 和 Klein 的工作<sup>[32]</sup>中提出的, 但现在已经被发展成为通用额外维模型 (Universal extra dimensions (UED))<sup>[33]</sup>。

在额外维模型中, 所有粒子在平直空间传播, 额外维紧致化为  $10^{-15}$  cm 或者更小的尺度。在最简单的 UED 即最小 UED 中<sup>[34]</sup>, 额外维是一维, 其紧致化为一个圆  $R$ , 圆上两个点分别用  $y$  和  $-y$  标记, 也就是  $y$  是额外维的坐标。每个标准模型的粒子都有无穷个伴随粒子, 每个 Kaluza-Klein(KK) $n$  级的粒子质量是  $\sim nR^{-1}$ 。相比超对称, 这些伴随粒子有同样的自旋。然而, UED 不能解决规范层次问题; 它们的耦合变得很大, 在远低于普朗克标度下的能量区是非微扰的。这促使考虑 UED 提供的相互作用和超对称的代替理论。所以, 如何解决规范层次问题和在普朗克标度区构造好的定义, 可能使 UED 在低能近似成一个更完整的理论。事实上, 额外维模型中隐藏着超对称<sup>[35]</sup>。

最小 UED 仅由两个参数决定, 即标准模型西格斯质量  $m_h$  和额外维紧致化半径  $R$ 。最小 UED 保持一个分离的宇称, 即 KK 宇称, 这意味着最轻的 KK 粒子 (LKP) 是稳定的, 是可能的暗物质候选者<sup>[36]</sup>。最轻的 KK 粒子也就是通常的粒子  $B_1$ , 一个超荷规范玻色子的一级伴子。也许在实验室可以通过衰变  $\eta \rightarrow \gamma + B \rightarrow \pi_0 + 2\gamma$  探测暗  $B$  矢量规范玻色子。对于 LKP, 适合的热剩余密度要求质量是  $600 \text{ GeV} \leq m_{B_1} \leq 1.4 \text{ TeV}$ 。LKP 是通过 S-波过程湮没的。期待给出 WIMP 奇迹。

最近, ATLAS 合作组<sup>[37]</sup>和 CMS 合作组<sup>[38]</sup>的实验数据暗示在 750 GeV 附近存在一个双光子共振态, 是一个自旋为 2 的质量粒子, 理论分析认为可能是 KK 引力子, 被解释成 KK-暗物质<sup>[39]</sup>。

### (3) 轴子 (action)

轴子是在研究强 CP 问题中引入的<sup>[40]</sup>, 轴子的解来自引入一个赝标量场  $a$  与如下耦合

$$\mathcal{L}_a = -\frac{g_3^2}{32\pi^2} \frac{a}{f_a} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^\alpha G_{\rho\sigma}^\alpha, \quad (13)$$

式中  $f_a$  是一个新的质量标度, 即轴子衰变常数。是  $\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^\alpha G_{\rho\sigma}^\alpha$  的动力学系数。真空能依赖于这个系数。对于轴子, 允许的参数意味着它是非常轻的和具有弱相互作用, 因此, 轴子也是一个不同的暗物质候选者<sup>[41]</sup>。

轴子的质量和相互作用由一个模型相关的常数  $f_a$  确定。即

$$m_a = \frac{\sqrt{m_u m_d}}{m_u + m_d} m_\pi f_\pi \frac{1}{f_a} \approx 6 \mu\text{eV} \left( \frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_a} \right), \quad (14)$$

这里,  $m_u \simeq 4 \text{ MeV}$ ,  $m_d \simeq 8 \text{ MeV}$ , 和  $m_\pi \simeq 135 \text{ MeV}$  分别是上夸克、下夸克和  $\pi$  介子质量,  $f_\pi \simeq 93 \text{ MeV}$  是  $\pi$  介子的衰变常数。

轴子与胶子通过式(13)发生相互作用, 在一圈水平上, 也与光子通过以下耦合相互作用

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -g_\gamma \frac{\alpha}{\pi} \frac{a}{f_a} \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \equiv -g_{a\gamma\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}, \quad (15)$$

这里,  $\alpha$  是精细结构常数,  $g_\gamma$  是模型依赖的参数。式(15)给出轴子的衰变寿命

$$\tau(a \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{64\pi}{g_{a\gamma\gamma}^2 m_a^3} \simeq \frac{8.8 \times 10^{23} \text{ s}}{g_\gamma^2} \left( \frac{\text{eV}}{m_a} \right)^5. \quad (16)$$

当  $m_a \leq 20 \text{ eV}$  和  $g_\gamma$  取  $-0.97$ <sup>[42]</sup>;  $0.36$ <sup>[43]</sup> 时, 式(16)给出轴子的寿命比宇宙的寿命长。

轴子也许在天体中产生, 然后逃离, 轴子导致能量损耗的新源, 这也是天体物理学的一个很强的限制。约束来自红巨星和超新星 1987a 中微子脉冲的长期观测, 考虑另外的天体物理的限制, 则要求  $f_a \geq 10^9 \text{ GeV}$ , 也就是  $m_a \leq 10 \text{ meV}$ <sup>[44]</sup>。轴子可能不是热产生的, 存在几种非热产生机制。当宇宙温度冷却到  $T \sim f_a$  时, 轴子场在不同地方取值, 这就是 Peccei-Quinn(PQ) 相变, 如果 PQ 相变后膨胀出现, 可观测的宇宙就是像补丁一样组成, 而每个补丁只有一个轴子场的简单值。在  $T \sim$

TeV 时, 轴子场趋于于最小值。这种“真空重排”产生了一个剩余密度<sup>[45]</sup>

$$\Omega_a \simeq 0.4\theta_i^2 \left( \frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.18}, \quad (17)$$

这里  $\theta_i$  是原始真空度角, 假定剩余密度不被后来宇宙熵产生稀释, 要求  $\Omega_a \leq \Omega_{\text{DM}}$ , 意味着  $f_a \leq 10^{12} \text{ GeV} \theta_i^{-2}$ 。

另一方面, 膨胀在 PQ 相变之前出现, 这导致两个效应, 可观测的宇宙由许多带有不同  $\theta_i$  的补丁组合而成, 来自真空重新校准的剩余密度由式(17)给出的, 具有有效的  $\theta_i \sim \mathcal{O}(1)$  (零阶近似)。加之, 许多不同的补丁是可观测, 在 PQ 相变中, 拓扑缺陷存在可观测效应, 影响到了真空重构。但剩余密度是相同的<sup>[46]</sup>。总之, PQ 相变后如果膨胀出现, 轴子允许的参数空间大致是

$$\begin{aligned} 10^{12} \text{ GeV} \theta_i^{-2} &\geq f_a \geq 10^9 \text{ GeV}, \\ 6 \mu\text{eV} \theta_i^2 &\leq m_a \leq 6 \text{ meV}, \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $\theta_i$  是小于 1 的任意常数。如果 PQ 相变前膨胀发生, 式(18)中的  $\theta_i \sim 1$ , 这对  $f_a$  的上限要求很强。

对  $m_a$  的下限要求来自轴子不能离宇宙太近。当这一下限饱和时, 轴子可能是暗物质的全部, 这是暗物质探测首选的靶区。相比较 WIMPs 和 Super-WIMPs, 轴子没有一个自然的正确剩余密度。

在实验室, 轴子可以通过与标准模型粒子散射直接探测<sup>[47]</sup>。

#### (4) 其他暗物质粒子

上面介绍了目前主要的 3 种暗物质粒子候选者, 它们都具有弱相互作用的特征, 而且它们的剩余密度很自然地有一个合理的值。然而, 最近的研究表明, 还有另外的两个机制也能导致暗物质粒子, 它们扩展了 WIMP 奇迹, 拥有正确的剩余密度。但具有很大不同的相互作用和探测方法。

#### 1) 超暗物质粒子 (SuperWIMPs-superweakly-interacting massive particles)

“超暗物质粒子” (superWIMPs) 有一个好的剩余密度, 但它的相互作用比标准模型中的弱相互作用还要弱得多。这种极弱超暗物质粒子被认为是探索暗物质的一场噩梦。事实上, 超 WIMPs 方案预言的信号, 来自实验室和天体物理中的宇宙射线远比 WIMP 方案引人注目, 非常适合实验研究“超暗物质粒子”<sup>[48]</sup>。

“超暗物质粒子”方案在许多粒子物理模型中可以实现, 原型的超暗物质粒子是引力微子  $\tilde{G}$ <sup>[49-50]</sup>, 引力微子是自旋 3/2 引力子的超对称伴子。它们存在在所有

超对称理论中, 其质量为

$$m_{\tilde{G}} = \frac{F}{\sqrt{3}M_*}, \quad (19)$$

这里  $F$  是超对称破缺标度的平方及  $M_* = (8N)^{-1/2} \simeq 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$  是约化普朗克质量。在最简单的超对称模型中, 标准模型的超对称伴子的质量为

$$\tilde{m} \sim \frac{F}{M_*}. \quad (20)$$

规范层次问题要求  $F \sim (10^{11} \text{ GeV})^2$ , 所以, 所有超对称伴子和引力微子具有弱标度的质量。引力微子的剩余密度和寿命也符合暗物质的条件。

#### 2) 轻引力微子 (Light Gravitinos)

轻引力微子也可能是暗物质的候选者, 它的质量在 eV ~ keV 范围, 对实验而言具有非常不同意义<sup>[51]</sup>。对暗物质剩余密度而言, 允许的值约为  $\Omega_{\text{DM}} \simeq 0.23$ 。相对弱标度引力微子, 轻引力微子的相互作用要比引力微子的强, 这是被自旋 1/2 纵向 Goldstino 部分增强的。

## 4 暗物质大尺度结构-晕的密度分布

在第 2 和 3 节中, 从粒子物理角度介绍了暗物质粒子的各种可能模型、探测方法及其对物理学的挑战, 尤其是对标准模型的冲击, 同时也为发现标准模型之外的新物理提供了机遇。越来越多的天体观测表明暗物质确实存在<sup>[8]</sup>, 而且暗物质影响星系的形成和演化。尽管我们不知道暗物质属性是什么, 但不影响我们根据星系的结构研究暗物质大尺度的密度结构和分布、运动, 如何影响星系架构。

### 4.1 星系中暗物质

为了方便讨论, 引入光度-质量比  $L/M$ 。另一方面, 由哈勃参数  $H_0 = 100h_0 \text{ km Mpc}^{-1} \text{ c}^{-1}$ 、光速  $c$  和引力常数  $G_N$ , 可以定义一个临界密度

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N} = 1.88 \times 10^{-29} h_0^2 g \text{ cm}^{-3}, \quad (21)$$

这里  $h_0$  是无维哈勃参数。如果星系的总光度为  $L$ , 则光度函数  $\phi(L)$  就是星系数密度。星系光度密度定义如下:

$$\mathcal{L} = \int L\phi(L)dL \simeq 0.29 \pm 0.20 \times 10^8 h_0 L_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}, \quad (22)$$

式中  $L_{\odot} = 3.8 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$  是太阳的总光度。



物质占宇宙成份总量为  $\Omega_M = \rho/\rho_c$  与光度-质量比  $L/M$  的关系为

$$\Omega_M = \frac{\rho}{\rho_c} = \left(\frac{M}{L}\right) / \left(\frac{M}{L}\right)_c, \quad (23)$$

如果定义一个临界质量-光度比:

$$\left(\frac{M}{L}\right)_c = \frac{\rho_c}{\mathcal{L}} \simeq 1390 h_0 \left(\frac{M_\odot}{L_\odot}\right). \quad (24)$$

在天体物理或者宇宙物理学里, 将太阳的质量-光度比  $M_\odot/L_\odot \equiv \gamma_\odot$  作为一个基本量, 其他星球或星系及星系团质量-光度比  $\gamma$  以太阳的  $\gamma_\odot$  为单位表示。星系和星团的比一般有特征  $\gamma \gg \gamma_\odot$ 。质量-光度比有三种典型的取值:

- (1)  $M/L = (10 - 20)h_0 \gamma_\odot$  ( $\Omega_M \simeq 0.01$ ), 星系中心部位;
- (2)  $M/L = (60 - 80)h_0 \gamma_\odot$  ( $\Omega_M \simeq 0.10$ ), 小星系群;
- (3)  $M/L = (200 - 250)h_0 \gamma_\odot$  ( $\Omega_M \simeq 0.30$ ), 星系团;

科学家还没有直接探测到暗物质, 但它通过引力作用影响宇宙的演化、星系和星系团的形成。在天体物理学中, 观测星系和星系团时, 人们发现了一些“反常”, 目前物理解释这些反常有两种方案(a)假定宇宙中包含大量的不可见物质; (b)人们给出的引力规律是不正确的。

1933年, 星系团的尺度下, Zwicky<sup>[52]</sup>测量了 Coma 星系团内八个星系的径向速度  $\simeq 1200$  km/s, 由此他发现质量-光度比  $M/L \simeq 400$  比最新的测量值大许多 ( $M/L \simeq 160$ )<sup>[53]</sup>。最典型的例子是螺旋星系的旋转曲线, 仙女星系  $M_{31}$  接近于银河系 (MW), 根据测量的速度  $v = -125$  km/s, 计算得到的总质量<sup>[8]</sup>为  $M_{\text{Tot}} = 4.8 \times 10^{12} M_\odot$ , 新的测量给出:  $M_{31}(\text{total}) = 1.23^{+1.8}_{-0.6} 10^{12} M_\odot$ <sup>[54]</sup>,  $MW(\text{total}) = (1.26 \pm 0.24) \times 10^{12} M_\odot$ <sup>[55]</sup>。Rubin 和 Ford<sup>[56]</sup>将观测仙女星系的范围扩大到 24 kpc, 如果观测体系处在维里 (粒子所受合力与位置的标积) 平衡, 它的圆周速度是  $v_c^2 = GM/r$ , 其中  $M$  是给定半径  $r$  内的质量。这意味着  $v_c \propto 1/r$ , 导致“开普勒沦陷”, 而他们未观测到“开普勒沦陷”。如果  $v_c = \text{常数}$ , 意味着  $M \propto r$ , 除了那些不发光的点之外, 那里存在人们没有观测到的大量的物质。星系的旋转曲线暗示在星系中存在大量的观测不到的不明物质, 名为暗物质。假定暗物质是球形分布的, 质量与半径成比例, 即  $M(r) \propto r$ , 这意味着在星系远离可见区域暗物质分布是一个奇异等温球 (SIS) 密度分布  $\rho \propto 1/r^2$ , 正好符合伪等温 (isothermal profile (ISO))  $\rho_{\text{ISO}} = \rho_0 / (1 + (r/r_0)^2)$ 。从

上述两个例子中, 看到 Coma 星系团和  $M_{31}$  的实际质量比探测到的质量大很多。那么多出的这些看不见的物质就是暗物质, 详细内容可参考文献[8]。

### 4.2 星系中暗物质分布

在螺旋星系中, 暗物质的信息来源于旋转曲线。螺旋星系有几个特征: 星球和星际物质旋转形成盘子状; 中央星际部分主要是老的星球组成类似一个椭圆星系; 一个近似于许多星球包括球状星团组成的球形晕; 在中央星际中心的地方存在一个巨大的黑洞。一个星系的旋转曲线 (RC) 由计算星球或气体踪迹的旋转速度给出, 而踪迹由测量沿星系长度的多普勒效应和绘制这些量与星系中心的各自距离。跟踪强度加权速度为

$$V_{\text{int}} = \frac{\int I(v) v dv}{\int I(v) dv}, \quad (25)$$

式中  $I(v)$  是给定半径的强度分布, 而且是给定半径的径向速度  $v$  的函数, 则旋转速度定义为

$$V_{\text{rot}} = \frac{(V_{\text{int}} - V_{\text{sys}})}{\sin i}, \quad (26)$$

这里  $i$  是倾角,  $V_{\text{sys}}$  是星系的质心速度。为了得到星系中暗物质的分布, 人们使用好几种技术, 其中首先使用的是“fit 技术”。可以将旋转速度写成<sup>[8]</sup>

$$V_{\text{rot}}^2 = V_{\text{disk},*}^2 + V_{\text{HI}}^2 + V_{\text{halo}}^2 + V_{\text{bulge}}^2, \quad (27)$$

这里  $V_{\text{disk},*}$  是星际盘子的速度;  $V_{\text{HI}}$  是与气体相关的观测速度;  $V_{\text{halo}}$  来自暗物质的理论密度分布。最常用的分布是: NFW (Navarro-Frenk-White) 分布、Einasto 分布、Burkert 分布或伪-Isotermal 分布。NFW 分布为

$$\rho(r)_{\text{NFW}} = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_0}\right)\left(1 + \left(\frac{r}{r_s}\right)\right)^2}, \quad (28)$$

式中  $\rho_0$  和“标量半径”  $r_s$  是从晕到晕的参数。Burkert 分布为

$$\rho(r)_{\text{Burkert}} = \frac{\rho_0}{\left(\frac{1+r}{r_0}\right)\left(1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)\right)} \quad (29)$$

和 Isothermal 分布

$$\rho(r)_{\text{ISO}} = \frac{\rho_0}{\left(1 + \left(\frac{r}{r_s}\right)\right)^2}, \quad (30)$$

这里的  $\rho_0$ ,  $r_0$  是晕中心密度和半径。式 (28), 式 (29) 或式 (30) 曲线如图 3 所示。



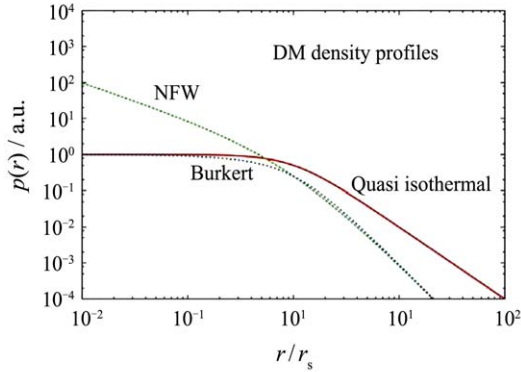


图 3 (在线彩图)NFW(绿色点线), Burkert(蓝色点线), Quasi ISO(红色实线)密度分布比较, 取自文献[8]

### 4.3 暗物质晕的表面密度

上面看到人们用“fit技术”, 给出了暗物质分布的简单关系。但问题之一是确定暗物质晕的总质量与密度分布, 关于密度分布问题中存在一个矛盾, 就是宇宙模型的预言与星系中心暗物质分布之间的矛盾, 在过去十到十五年间, 尽管理论模型和实验观测改善显著, 这个矛盾仍然没有解决<sup>[57]</sup>。在大尺度范围, 宇宙常数问题, 即前面提到的规范层次问题, 也影响模型。探索这种差异的源头是很复杂的, 主要归于人们对在高温等子离子体中复杂的流体力学的知识所造成的。解决这个问题有效的途径是确定暗物质晕参数与大量星际之间的关系。Kormendy和Freeman<sup>[58]</sup>在暗物质晕参数中发现了几个有益的关系, 关键是他们发现了量  $\mu_0 D = \rho_0 r_0 \simeq 100 M_\odot / pc^{-22}$ , 与任意核心晕分布的晕中心表面密度成比例, 而几乎不依赖于星系本身。下面介绍  $\mu$  的物理意义。

修改的牛顿第二定律-MOND: 引入一个具有加速度维数的常数  $a_0$ , 牛顿第二定律由  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  变成

$$\mathbf{F} = m\mu[a/a_0]\mathbf{a}, \quad (31)$$

式中  $\mu[x]$  是插值函数, 定义如下:

$$\mu[x] = \begin{cases} 1, & \text{for } |x| \gg 1 \\ x, & \text{for } |x| \ll 1 \end{cases}. \quad (32)$$

一般取  $a_0 = 10^{-10} \text{ m/s}^2$ , 称为万有常数。当粒子的加速度满足条件  $a \ll a_0$  时, 牛顿万有引力定律成立

$$\mathbf{F} = GM/r^2 = \mu(a/a_0)\mathbf{a}_N, \quad (33)$$

导致

$$\mathbf{a}_N = \sqrt{GMa_0}/r. \quad (34)$$

$a \gg a_0$  时, 牛顿第二定律成立。这就是修改了的牛顿定律-MOND理论<sup>[59]</sup>, 适用研究天体动力学。从方程(33)和(34)得出两个结论: (1) 远离星系总质量  $M$  环形轨道上的速度与半径无关; (2) 渐进旋转速度仅仅依赖于星系总质量。回到前面, Kormendy和Freeman<sup>[58]</sup>分析了近1000个螺旋星系的旋转曲线, 发现了星系中心存在稳定的圆柱形暗物质密度证据, 并且给出了  $\log \mu_0 D = 2.15 \pm 0.2$ , 以  $\log(M_\odot / pc^2)$  为单位。在此基础上, Boyarsky等<sup>[60]</sup>发现在  $\rho_{\text{Burkert}}$  分布下, 圆柱形暗物质密度  $S$  由下式给出

$$\log S = 0.21 \log \frac{M_{\text{halo}}}{10^{10} M_\odot} + 1.79, \quad (35)$$

这里,  $S$  是以  $M_\odot / pc^2$  为单位。

暗物质表面密度的稳定性和质量的依赖性对“fit”暗物质晕的观测特性是最基础的。我们使用DEI Popolo和Kroupa引入的方法<sup>[61]</sup>研究这个问题。这个方法被称为SIM, 考虑了角动量、动力摩擦<sup>[62]</sup>等概念。“fit”旋转曲线可以给出式(28)中的两参数  $r_0, \rho_0$ , 由此给出暗物质的分布, 然后, 由  $\mu_0 D = \rho_0 r_0$  可以计算出表明密度。

在矮星系的情况下, 许多研究表明暗物质密度分布的内部有一个像核一样的结构, 而椭圆星系的暗物质分布是尖牙形的。所以, 研究暗物质表面分布不但能“fit”核形密度, 而且也能“fit”尖牙形密度, 或者它们的中间状态。因此, 我们引入一个暗物质圆柱形密度<sup>[63]</sup>,  $S$ , 对中心部分作平均:

$$S = \frac{2}{r_*^2} \int_0^{r_*} r dr \int dz \rho_{\text{DM}}(\sqrt{r^2 + z^2}). \quad (36)$$

$Z$  的积分扩展到暗物质晕的边界。式(36)暗示表面密度  $S$  与暗物质密度  $\rho_*$  和  $r_*$  的乘积成正比例。这个表达式对任何暗物质密度分布都可用, 所以, 更有普遍性。针对星系和星系团, 使用3种不同的暗物质分布密度式(28)、式(29)和式(30), “fit”暗物质分布在图4中给出, 注意式(29)中的  $r_0$  对应ISO核半径; 式(27)中  $r_s$  对应典型的NFW特征半径。

图4显示我们的结果与Stadel等<sup>[64]</sup>的结果以及Governate等<sup>[65]</sup>的结果符合得很好。利用我们模型得到的暗物质密度<sup>[63]</sup>, 使用式(36), 确定  $S$ , “fit”关系  $S(r_s) = \log M_{200}$  是

$$\log S(r_s) = \begin{cases} 0.18 \log\left(\frac{M_{200}}{10^{10} M_\odot}\right) + 1.9, & \text{for } M_{200} \geq 5 \times 10^{10} M_\odot \\ 2.09, & \text{for } M_{200} \leq 5 \times 10^{10} M_\odot \end{cases}, \quad (37)$$

这里,  $M_{200}$  是暗物质晕的质量。对于文献[66]的情况有

$$\log S(r_s) = 0.16 \log\left(\frac{M_{200}}{10^{12} M_\odot}\right) + 2.11, \quad (38)$$

对于文献[60]的情况有

$$S(r_s) \simeq 0.21 \log\left(\frac{M_{200}}{10^{10} M_\odot}\right) + 1.79. \quad (39)$$

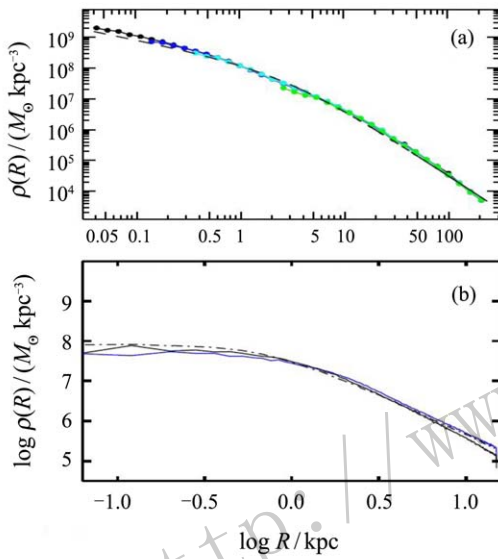


图 4 (在线彩图) 用我们的模型进行数据模拟暗物质密度的比较  
(a) Stadel 等<sup>[64]</sup>的结果(实线); 我们的结果(虚线)。 (b) 我们的结果(点-虚线); DG1<sup>[65]</sup>的结果(纯蓝线), 星系 DG2<sup>[65]</sup>的结果(纯黑线)。

Cardone 和 Tortora<sup>[66]</sup> “fit” 暗物质晕比我们<sup>[63]</sup>和 Boyarsky<sup>[60]</sup>结果要小。图 5 显示的是  $S(r_s)$  与  $M_{200}$  的依赖关系, 我们的结果与 Boyarky 的结果一致, 但除了在  $M_{200} \leq 5 \times 10^{10} M_\odot$  处。质量标度的不同是因为在我们的模型里考虑了重子, 而 Boyarky 仅仅考虑了暗物质。基于简单的 SIM, Boyarky 的另外一篇文章<sup>[67]</sup>的结果与其基本一致。

为了进一步与 Boyarky 等<sup>[60]</sup>和 Saburova 等<sup>[68]</sup>的结果比较, 我们使用式(27)和(35)分别得到 NFW 的暗物质分布的圆柱形表面分布为

$$S_{\text{NFW}}(R) = \frac{4\rho_s r_s^3}{R^2} \left[ \frac{\arctan \sqrt{R^2 + r_s^2 - 1}}{\sqrt{R^2/r_s^2 - 1}} + \log\left(\frac{R}{2r_s}\right) \right] \quad (40)$$

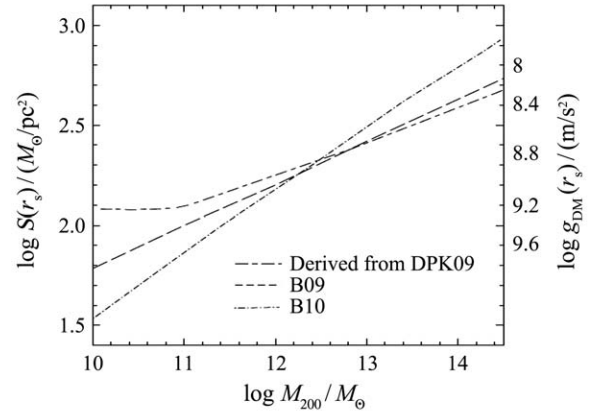


图 5  $S(r_s)$  作为暗物质质量  $M_{200}$  的函数  
我们的结果<sup>[63]</sup>(长的短划线); Boyarky<sup>[60]</sup>的结果(虚线)及文献[67]的结果(点-虚线);

和 ISO 的暗物质分布的圆柱形表面分布为

$$S_{\text{ISO}}(R) = \frac{2\pi\rho_c r_c^2}{R^2} [\sqrt{R^2 + r_c^2} - r_c]. \quad (41)$$

计算相关的旋转曲线以及 “fit” 式(40)和 NFW 的暗物质分布, 发现关系:  $r_s \simeq 6.1r_c$ ,  $\rho_s \simeq 0.11r_c$ 。对于 NFW 和 ISO 的暗物质密度分布, 得到它们的圆柱形表面分布之比为

$$\frac{S_{\text{NFW}}(r_s)}{S_{\text{ISO}}(6r_c)} \simeq 0.91. \quad (42)$$

同理, 对于式(41)和(39), “fit” 发现关系:  $r_s \simeq 1.6r_0$ ,  $\rho_s \simeq 0.37\rho_0$ , 对于 Burkert 和 NFW 的暗物质密度分布, 得到它们的圆柱形表面分布之比为

$$\frac{S_{\text{NFW}}(r_s)}{S_{\text{Burkert}}(1.6r_0)} \simeq 0.98. \quad (43)$$

从中看到, 圆柱形表面密度  $S_{\text{NFW}}$  与  $S_{\text{Burkert}}$  及  $S_{\text{ISO}}$  之间的差别少于 10%。我们有  $S_{\text{NFW}}(r_s) \approx 0.98 S_{\text{Burkert}}(1.6r_0) \approx 0.91 S_{\text{ISO}}(6r_c) \approx 1.89 r_0 \rho_0$ 。

图 6 是我们给出的不同情况下, 暗物质表面密度的结果, 图中实线表示, 仅仅考虑星系由暗物质组成时, 我们给出的暗物质表面密度结果; 虚灰色线表示, 考虑星系中所有物质成份因素时, 我们得到的暗物质表面密度的结果, 其它线是其他研究者的结果, 并与他人和天文观测结果进行了比较, 请看文献[63]。图 6 表明对于质量小于  $\approx 5 \times 10^{10} M_\odot$ , 星等小于  $M_B = -14$  时, 暗物质表面密度是一个常数。

使用 Del Popolo 引入的 SIM 模型, 我们研究了中央表面密度与星系晕核心半径和星系团暗物质晕之间的关联。发现晕里的圆柱状密度特征半径  $r_*$  不是普适量。得到的表面密度  $S \propto M^{0.18 \pm 0.05}$  允许在一个小的空间内是常数值。

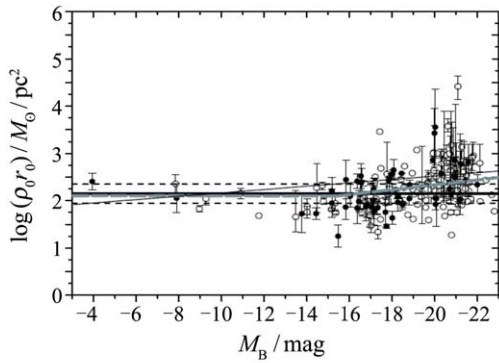


图 6  $\rho_0 r_0$  以  $M_\odot/\text{pc}^2$  为单位, 作为不同星系和哈勃型的星等函数。仅仅考虑星系由暗物质组成时, 我们给出的暗物质表面密度的结果<sup>[63]</sup> (实线); 考虑星系中所有成分因素时, 我们得到暗物质表面密度的结果<sup>[63]</sup> (虚灰色线)。图 6 取自文献<sup>[63]</sup>

## 5 暗物质研究中的新模型

尽管暗物质研究取得巨大的进展。但有两个基本事实需要牢记: 可信赖的暗物质存在的证据都来自引力; 另一个强烈的证据是暗物质没有强和电磁相互作用。一个自然而然的逻辑可能性是隐藏暗物质 (hidden dark matter), 也就是暗物质没有标准模型的规范相互作用。近二十年来<sup>[69–72]</sup>, 在隐藏暗物质探索过程中建立了许多模型重建自由度, 产生了大量的不同暗物质候选者。最初的模型中没有解决标准模型中几个基本问题, 但最近的研究已经在涉及尝试解决这些问题<sup>[16,72–73]</sup>。

### 5.1 隐藏区 (Hidden sector) 和可部分 (Visible sector)

暗物质可能在隐藏区, 而标准模型粒子在可见部分。隐藏区的热演化不同于可见部分的热演化, 然而, 隐藏区的温度, 随它的大小, 应该有个约束, 在一定程度上影响了可见部分宇宙的演化。隐藏区的约束之一由大爆炸核合成 (BBN) 提供, BBN 的成功对宇宙膨胀率在时间  $t_{\text{BBN}} \sim 1 \sim 1000 \text{ s}$  里高度敏感。隐藏区的轻自由度改变着宇宙的膨胀率, 即使没有标准模型相互作用, 也影响 BBN。

文献<sup>[16]</sup>探索了标准模型与隐藏区的联系问题, 设  $H$  是西格斯场,  $\phi$  是“隐藏”西格斯场, 它们之间可以通过西格斯桥门

$$V_{\text{portal}} = \lambda_{h\phi} H^+ H \phi^+ \phi \quad (44)$$

联系。隐藏西格斯场  $\phi$  对应隐藏区规范对称破缺。假定, 隐藏区赋予  $U(1)$  或  $SU(N)$  规范对称, 质量规范场相当自然地扮演了 WIMP 型的暗物质。事实上, 它们

与标准模型有弱耦合, 归功于固有的离散对称性, 也是稳定的。

能够描述暗物质的标准模型扩展方法就是在标准模型拉氏量的基础上增加隐藏区里场的拉氏量, 再考虑希格斯桥门和分离对称性, 就是比较完整的模型了。

### 5.2 标量暗物质模型

标量场的暗物质模型在 20 世纪 90 年代就提出了<sup>[74]</sup>, 也是研究比较广泛的一个暗物质模型。标量场暗物质模型是标准模型的一个简单的扩展, 考虑标量简单场  $\phi$ , 其总拉氏量可以写成如下形式<sup>[75–76]</sup>:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\text{Hidden}} + \mathcal{L}_{\text{Portal}}, \quad (45)$$

其中,  $\mathcal{L}_{\text{SM}}$  是标准模型的拉氏量, 而

$$\mathcal{L}_{\text{Hidden}} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{m_0^2}{2} \phi^2 - \frac{\lambda_\phi}{4} \phi^4 \quad (46)$$

是隐藏区标量场的拉氏量<sup>[74]</sup>, 对于单态的标量场, 其热平衡冻结能满足暗物质密度条件, 因此隐藏区标量场与标量暗物质相对应。希格斯桥门为

$$\mathcal{L}_{\text{Portal}} = \lambda_{h\phi} \phi^2 H^+ H, \quad (47)$$

其中,  $H$  是希格斯双态。这个拉氏量是重整的, 兼容  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范不变性, 并且存在一个分离对称性, 即  $\phi \rightarrow -\phi$  下, 拉氏量不变。

这是标准模型的一个标量单态的扩展, 包含 3 个新参数  $m_0$ ,  $\lambda_\phi$ ,  $\lambda_{h\phi}$ 。  $\lambda_\phi$  仅仅决定了单态自相互作用的强度, 与这个模型的唯一无关和约束。注意标量单态与标准模型的耦合仅仅通过希格斯玻色子实现, 其相互作用由  $\lambda_\phi$  决定。

利用真空自发破缺方法, 并且取  $\sqrt{2}H^+ = (h, 0)$ , 其中  $h$  是实的, 可以得到标量势为

$$V = \frac{1}{2} (m_0^2 + \lambda_{h\phi} v_{\text{EW}}^2) \phi^2 + \frac{\lambda_\phi}{4} \phi^4 + \lambda_{h\phi} v_{\text{EW}} \phi^2 h + \frac{\lambda_{h\phi}}{2} \phi^2 h^2, \quad (48)$$

其中,  $v_{\text{EW}} = 246 \text{ GeV}$  是标准模型的参数, 这里的希格斯质量为  $m_h^2 = \lambda_\phi v_{\text{EW}}^2$  和标量场  $\phi$  的质量为  $m_\phi^2 = m_0^2 + \lambda_{h\phi} v_{\text{EW}}^2$ 。重量  $m_\phi$  可能在几个 GeV 到几百 GeV 的能量标范围, 因此, 隐藏区的标量场可能就是暗物质候选者。

### 5.3 质量规范场暗物质

#### (1) $U(1)$ 规范矢量场暗物质模型

在隐藏区, 阿贝尔规范场是最简单的矢量暗物质模型, 赋予自然的  $Z_2$  对称性。这种情况下,  $Z_2$  相当于电

荷共轭对称。考虑一个携带单电荷标量场  $\phi$  的  $U(1)$  规范理论,

$$\mathcal{L}_{\text{Hidden}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + (D_\mu\phi)^\dagger D^\mu\phi - V(\phi), \quad (49)$$

式中  $F_{\mu\nu}$  是规范场  $A_\mu$  的场强张量,  $V(\phi)$  是标量场势。为了容易与非阿贝尔情况比较, 取  $\phi$  的电荷为  $+1/2$ , 假设标量势真空期望值的极小值为  $\langle\phi\rangle = 1/\sqrt{2}\tilde{v}$ 。  $\phi$  的虚部被规范场吸收后, 要求  $m_A = \tilde{g}\tilde{v}/2$ , 其中  $\tilde{g}$  是规范耦合量。  $\phi$  的实部作为一个自由度被保留, 用  $\rho$  表示, 正则化有  $\phi = 1/\sqrt{2}(\rho + \tilde{v})$ , 则得到下面的规范-标量相互作用:

$$\Delta\mathcal{L}_{s-g} = \frac{\tilde{g}^2}{4}\tilde{v}\rho A_\mu A^\mu + \frac{\tilde{g}^2}{8}\rho^2 A_\mu A^\mu. \quad (50)$$

这个理论中拥有  $Z_2$  对称

$$A_\mu \rightarrow -A_\mu, \quad (51)$$

这就是普通的电荷共轭对称。在原始标量项里, 这个对称是:  $\phi \rightarrow \phi^*$  和  $A_\mu \rightarrow -A_\mu$ , 被拉氏量和真空保留。  $Z_2$  对称使质量规范场稳定。

与可见区的相互作用通过西格斯桥门耦合

$$\mathcal{L}_{\text{portal}} = -\lambda_{h\phi}|H|^2|\phi|^2, \quad (52)$$

这也导致了西格斯与  $\rho$  的混合。在统一规范下, 西格斯场是  $H^T = (0, v+h)/\sqrt{2}$ 。场  $\rho$  和  $h$  可用质量本征态  $h_1, h_2$  表示如下:

$$\begin{aligned} \rho &= -h_1 \sin\theta + h_2 \cos\theta, \\ h &= h_1 \cos\theta + h_2 \sin\theta, \end{aligned} \quad (53)$$

这里的混合角  $\theta$  由实验给出, 最值得关注的是 LEP 和 LHC 实验。  $\sin\theta$  上限依赖较重的态  $h_2$  的质量。对于 TeV 量级的  $m_{h_2}$ ,  $\sin\theta$  的值大约是 0.3, 而较轻的态  $h_1$  与 125 GeV 的西格斯粒子相当。

当西格斯桥门必须保护  $Z_2$  对称时,  $A_\mu$  就是有望实现的暗物质候选者。通过交换  $h_1$  和  $h_2$  所有相关的散射过程方法, 包括 DM 湮没成标准模型粒子如同 DM 与与核子散射一样。

### (2) $SU(2)$ 规范矢量场暗物质模型

$U(1)$  很容易扩展到  $SU(2)$  中去, 然而, 稳定的对称性要改变。考虑  $SU(2)$  规范理论, 并且存在一个成双的标量场  $\phi$ , 则拉氏量为

$$\mathcal{L}_{\text{Hidden}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu\phi)^\dagger D^\mu\phi - v(\phi), \quad (54)$$

其中,  $a = 1, 2, 3$ 。假设  $\phi$  在真空期望值处取最小值形式

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \rho + \tilde{v} \end{pmatrix}, \quad (55)$$

式中  $\rho$  是实场,  $\tilde{v}$  是真空期望值, 规范耦合用  $\tilde{g}$  表示, 则规范玻色子质量  $m_A = \tilde{g}\tilde{v}/2$ 。标量-规范场, 规范场-规范场相互作用如下:

$$\Delta\mathcal{L}_{s-g} = \frac{\tilde{g}^2}{4}\tilde{v}\rho A_\mu^a A^{a\mu} + \frac{\tilde{g}^2}{8}\rho^2 A_\mu^a A^{a\mu}, \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{L}_{g-g} &= -\tilde{g}\epsilon^{abc}(\partial_\mu A_\nu^a A^{\mu b} A^{\nu c} - \\ &\frac{\tilde{g}^2}{4}((A_\mu^a A^{\mu a})^2 - A_\mu^a A_\nu^a A^{\mu a} A^{\nu b})), \end{aligned} \quad (57)$$

这个体系拥有  $Z_2 \times Z_2'$  对称,

$$\begin{aligned} Z_2: A_\mu^1 &\rightarrow -A_\mu^1, A_\mu^2 \rightarrow -A_\mu^2, \\ Z_2': A_\mu^1 &\rightarrow -A_\mu^1, A_\mu^3 \rightarrow -A_\mu^3. \end{aligned} \quad (58)$$

这就是所有 3 个  $A_\mu^a$  场是稳定的, 扮演了暗物质的角色。上述的对称性足够保证暗物质的稳定性。对于大的  $SU(N)$  群, 扮演关键角色的是离散对称群。  $Z_2$  涉及规范变换, 而  $Z_2'$  影响电荷共轭对称性。隐藏区与可见区的耦合通过西格斯桥门  $\lambda_{h\phi}|H|^2|\phi|^2$  实现。

### (3) $SU(3)$ 规范矢量场暗物质

$SU(2)$  的情况直接可以推广到  $SU(N)$  的情况, 但大的  $SU(N)$  展现了更复杂的破缺模式。在唯象切实可行的基础上, 对称必须完整地破缺, 为了躲避无质量场的存在。一个可能的方案是在基础表示中两个标量场多重态(三重态)破缺  $SU(3)$  对称群。

$SU(3)$  破缺和  $Z_2 \times Z_2'$ : 两个三重态的标量场可以完整破缺  $SU(3)$  对称性, 这样的反对称标量场的形式为

$$\phi = \begin{pmatrix} 0 & \phi_1 & 0 \\ -\phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (59)$$

这种破缺模式理解如下: 第一个三重态的真空期望值约化为  $SU(2)$  对称, 与此同时第二个三重态破缺保留  $SU(2)$  对称性。在  $SU(3)$  空间里真空期望值不重和代表了一般的情况, 这些形成具有  $SU(3)$  对称的一般标量势的极小值。因此, 这种破缺模式是唯象可实现的。

现在来确定李群的离散对称, 这重对称是确保暗物

质稳定性的。我们首先从结构常数开始讨论。

$$\begin{aligned} f^{123} &= 1, \\ f^{147} &= -f^{156} = f^{246} = f^{257} = f^{345} = -f^{367} = \frac{1}{2}, \\ f^{458} &= f^{678} = \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \quad (60)$$

根据规范场和生成元的变换性质，定义一特殊的变换

$$A_\mu^a \rightarrow \epsilon(a) A_\mu^a. \quad (61)$$

容易看到结构常数在如下的变换下不变。

$$\begin{aligned} Z_2 : \epsilon(a) &= -1 \quad \text{for } a = 1, 2, 4, 5, \\ \epsilon(a) &= +1, \quad \text{for } a = 3, 6, 7, 8, \end{aligned} \quad (62)$$

和

$$\begin{aligned} Z'_2 : \epsilon(a) &= -1, \quad \text{for } a = 1, 3, 4, 6, 8, \\ \epsilon(a) &= +1 \quad \text{for } a = 2, 5, 7. \end{aligned} \quad (63)$$

这些对称性被 Yang-Mills 拉氏量继承。如果 CP 守恒，他们在物质区也被保留，导致可实现的暗物质。

### 实例

在作为隐藏  $SU(3)$  规范的重态的两个复标量场的  $\phi_1$  和  $\phi_2$  的变换下，考虑标准模型的扩展，其拉氏量为

$$\mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}_{portal} + \mathcal{L}_{hidden}, \quad (64)$$

式(37)中，

$$-\mathcal{L}_{sm} \supset V_{SM} = \frac{\lambda_H}{2} |H|^4 + m_H^2 |H|^2 \quad (65)$$

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}_{portal} = V_{portal} &= \lambda_{H11} |H|^2 |\phi_1|^2 + \\ &\lambda_{H22} |H|^2 - (\lambda_{H12} |H|^2 \phi_1^\dagger \phi_2 + h.c.), \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{hidden} &= -\frac{1}{2} \text{tr}\{G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}\} + \\ &|D_\mu \phi_1|^2 + |D_\mu \phi_2|^2 - V_{hidden}. \end{aligned} \quad (67)$$

这里， $G_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + i\tilde{g}[A_\mu, A_\nu]$  是  $SU(3)$  规范场  $A_\mu^a$  的场强张量， $D_\mu \phi_i = \partial_\mu \phi_i + i\tilde{g} A_\mu \phi_i$  是  $\phi_i$  的协变微商， $H$  是西格斯双态。最一般的可重整化的隐藏区标量势为

$$V_{hidden}(\phi_1, \phi_2) = m_{11}^2 |\phi_1|^2 + m_{22}^2 |\phi_2|^2 -$$

$$\begin{aligned} &(m_{12}^2 \phi_1^\dagger \phi_2 + h.c.) + \frac{\lambda_1}{2} |\phi_1|^4 + \frac{\lambda_2}{2} |\phi_2|^4 + \\ &\lambda_3 i \phi_1^d m_2 \phi_2^d m_2 + \lambda_4 |\phi_1^\dagger \phi_2|^2 + \left[ \frac{\lambda_5}{2} (\phi_1^\dagger \phi_2)^2 + \right. \\ &\left. \lambda_6 |\phi_1|^2 (\phi_1^\dagger \phi_2) + \lambda_7 |\phi_2|^2 (\phi_1^\dagger \phi_2) + h.c. \right]. \end{aligned} \quad (68)$$

使用  $SU(3)$  规范自由度， $\phi_1$  有 5 个实的自由度， $\phi_2$  有 3 个自由度，因此，统一的规范  $\phi_1$  和  $\phi_2$  可重新写为

$$\phi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ v_1 + \varphi_1 \end{pmatrix},$$

$$\phi_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 + \varphi_2 \\ (v_3 + \varphi_3) + i(v_4 + \varphi_4) \end{pmatrix}, \quad (69)$$

式中  $v_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  和  $\varphi_j (j = 1, 2, 3, 4)$  是标量场的真空期望值。类似的，我们期望在统一规范下西格斯场变换为  $H^T = (0, v + H)/\sqrt{2}$ 。在标量势使 CP 不变和标量场  $\phi_1, \phi_2$  的真空期望值是实的两个条件下，矢量暗物质的稳定性得到保证。

规范波色子质量：当  $v_3 = 0$  时，规范波色子的质量<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} m_{A^1}^2 = m_{A^2}^2 &= \frac{\tilde{g}^2}{4} v_2^2, \quad m_{A^4}^2 = m_{A^5}^2 = \frac{\tilde{g}^2}{4} v_1^2, \\ m_{A^6}^2 = m_{A^7}^2 &= \frac{\tilde{g}^2}{4} (v_1^2 + v_2^2). \end{aligned} \quad (70)$$

标量场的质量：标量场质量本征值为

$$\begin{aligned} m_{h_1, h_2}^2 &\approx \frac{1}{2} (\lambda_2 v_2^2 + \lambda_H v^2) \mp \frac{\lambda_2 v_2^2 - \lambda_H v^2}{2 \cos 2\theta_{13}}, \\ m_{\mathcal{H}}^2 &\approx \lambda_1 v_1^2. \end{aligned} \quad (71)$$

式中  $\theta_{13}$  的表达式是  $\tan 2\theta_{13} \approx \frac{2\lambda_{H22} v v_2}{\lambda_2 v_2^2 - \lambda_H v^2}$ ，本征值  $h_1, h_2$  是典型的轻质量态，而  $\mathcal{H}$  是重质量态。在暗物质唯象分析中，相关的轻场是暗物质分量  $A^1, A^2$  和  $A^3 = \cos \alpha A_\mu^3 + \sin \alpha A_\mu^8$ ，其中， $\tan 2\alpha = \frac{\sqrt{3} v_2^2}{2v_1^2 - v_2^2}$ 。粒子  $h_1, h_2$  是将隐藏区的暗物质粒子与标准模型的费米子和规范波色子的相互作用承传。

## 6 中国的实验研究

暗物质虽然是在宇宙天体观测中发现的，但科学家们至今仍然没有真正发现暗物质粒子。为了直接探测暗物质粒子，地下实验室是适合直接探测暗物质粒子的首选方法。国外利用废弃矿井和坑道进行宇宙线探测



实验开展的比较普遍<sup>[5]</sup>。间接探测主要利用太空站和发射空间探测卫星, 国外开展的也比较早<sup>[4]</sup>, 我国主要从太空间接探测和地下直接探测两个方面寻踪WIMPS。

### 6.1 锦屏山地下实验室-CJPL

清华大学的兼职教授李金研究员(中国科学院高能物理研究所退休), 由于参加韩国地下暗物质实验室的工作, 从电视新闻上发现我国锦屏山二滩水电开发有限公司的坑道有两千五百米深, 是建立地下探测宇宙线的优良场所, 建议清华大学有关人员(岳骞教授), 与锦屏山二滩水电站联系, 在国家有关部门的支持下, 于2009年建成了我国第一个地下实验室(CJPL), 2010年12月12日正式投入运行。CJPL是目前世界上宇宙射线屏蔽条件最好的地下实验室, 比意大利国家实验室宇宙线通量小200倍, 比韩国地下实验室宇宙线通量小3000倍。目前, 两个合作组在CJPL已经开展了暗物质的实验研究。另外一个组正在探测器的研制阶段。

#### (1) 清华大学合作组-CDEX

目前, 清华大学合作组的成员单位<sup>[5,77]</sup>有清华大学、四川大学、中国原子能科学研究院、南开大学、雅砻江流域水电开发有公司、台湾中研院物理所、台湾新竹清华大学、韩国首尔大学, 一起组成了中国暗物质实验组(China Darkmatter Experiment-CDEX), CDEX的第一篇实验论文<sup>[78]</sup>利用低能量阈994 g点接触高纯锗探测器给出了7 GeV能区国际上最灵敏的暗物质探测区域。但没有发现暗物质粒子存在的确定信号。进一步实验方案是设计公斤级<sup>[79]</sup>和吨级高纯锗阵列探测器。期待CDEX组能够给出暗物质粒子探测信号。

#### (2) 上海交大合作组-PandaX

上海交通大学合作组的成员单位<sup>[80-82]</sup>有上海交通大学、山东大学、中国科学院上海应用物理研究所、密歇根州立大学(美国)、北京大学、马里兰大学(美国)、中国原子能研究院和雅砻江流域水电开发公司。他们组成了中国暗物质试验的另一合作组PandaX。PandaX-I的实验结果<sup>[80-81]</sup>已经发表, 利用公斤级的液体氙作探测器, 没有发现暗物质粒子。在PandaX-I基础上改进的PandaX-II的实验结果<sup>[82]</sup>也没有发现暗物质粒子信号。

#### (3) 中国科学院高能物理研究所合作组

高能物理研究所研究员杨长根组, 在国外地下实验室探测器的基础上, 提出了利用液态氙作探测器靶的方案<sup>[83]</sup>, 它有两个方面的优点, 探测器体积可以做大, 同时可能做到“零”本底, 有关氙探测器所需要的实验

数据也基本完成<sup>[84]</sup>, 期待他们的实验顺利进行。

### 6.2 中国暗物质粒子探测卫星-DAMPE

二十多年前, 物理学家从超对称场论预言的超对称伴子中, 列出的Neutralinos<sup>[9]</sup>是最可能的暗物质粒子(WINPS), 这些超对称伴子是马约拉纳费米子, 可以湮没产生标准模型中的夸克对、轻子对和玻色子对 $W^\pm$ , 这些标准模型粒子又可以产生正电子、反质子和一些反轻核, 这就为太空间接探测暗物质粒子提供了可能。其现象是在太空中这些反粒子数量会增加。太空卫星PAMELA<sup>[85]</sup>给出了反质子动能在50 GeV时增加的谱, 2014年, AMS-02又得到正电子增加的结果<sup>[86-87]</sup>, 解释这些实验结果, 可能是暗物质粒子所致<sup>[88]</sup>。中国暗物质粒子探测卫星(DAMPE)是根据这些实验结果提出的。参与建造的单位有中国科学院紫金山天文台、高能物理研究所、近代物理研究所、空间科学中心、中国科学技术大学、日内瓦大学、和意大利的Perugia大学及Bari大学。其设计指标如表2所列<sup>[27]</sup>。

表 2 DAMPE 的设计指标

类别	能量分辨率 /GeV	空间分辨率 /GeV	几何因子 / $(m^2 \cdot sr)$
电子	5~10 <sup>4</sup>	1.5% @800	0.3
$\gamma$	5~10 <sup>4</sup>	1.5% @800	0.2
核素	100~10 <sup>5</sup>	40% @800	0.2

从表2可以看出, DAMPE能对1~10 TeV的电子射线能谱探测和GeV~TeV伽玛射线线谱探寻; 而且DAMPE还有区分质子和电子的功能<sup>[27]</sup>, 设计寿命三年。DAMPE于2015年12月17日成功发射, 经过三个月的试运行, 探测器接受功能正常。预计2016年底观测数据结果就可能出现。期待DAMPE在暗物质和宇宙线探测方面取得重要贡献。

## 7 结论与展望

对暗物质的研究是物理学和天文学的重点和热点问题之一。从二十多年来的理论研究进展来看, 暗物质理论的研究有望解决标准模型中存在的基本问题、完善标准模型、为寻踪标准模型之外的新物理和新粒子提供物理基础, 然而, 许多暗物质模型的假设没有可信赖的实验支持, 我们无从选择。目前从直接探测、间接探测和LHC实验三方面的结果都没有给出确凿无疑的WIMPs证据。期望我国CJPL——这个世界上宇宙线屏蔽最好的地下实验室和暗物质粒子探测卫星(DAMPE)能够给出高显示度成果。

虽然, WIMP 目前还没有发现存在可靠的证据, 但天体观测的证据都指向星系和星系团中存在大量的暗物质, 并且是星系体和宇宙的演化的主要因素。星系和星系团的观测暗示暗物质存在晕形分布。在晕形分布中存在晕核结构和面密度分布, 面密度与暗物质的总质量相关联, 即  $S \propto M^{0.18 \pm 0.05}$ 。面密度也与星系和星系团暗物质晕的晕核心半径密切相关。随着天体观测数据的不断积累和精度的提高, 星系和星系团中暗物质晕的结构和分布将会得到进一步细化。

WIMPs 最初来自超对称模型, 由此可知 WIMP 可能参与弱相互作用, 但目前还没有实验支持。同时, 理论家们提出的隐藏区暗物质模型, 其暗物质相互作用是通过桥门, 即隐藏区标量场与标准模型的希格斯场(也是标量场的一种)耦合实现的, 目前, 隐藏区暗物质理论还处在完善中, 但是, 将希格斯场与暗物质相互联系, 这可能是研究暗物质的一个关键的线索<sup>[89]</sup>。探寻暗物质与重子类物质除引力之外的新型相互作用也是研究暗物质的重要问题之一, 这是确立标准模型之外新物理的基础。也可能为 LHC 实验室发现暗物质粒子提供关键线索<sup>[90]</sup>。

**致谢** 该文在写作过程, 陈旭荣研究员提供了许多会议报告、陈殿勇副研究员在成文的格式上提供了帮助, 在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] James Lindesay. Foundations of Quantum Gravity[M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 309.
- [2] LU Jianxin. Theoretical physics and its frontier I[M]. Beijing: Peking University press, 2014: 87; KOMATSU E. Astrophys J suppl. 2001, 192: 18, ArXiv: 1001: 1538[astro-ph.co].(in Chinese)  
(卢建新. 理论物理及其交叉学科前沿I[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 87.)
- [3] Planck Collaboration. 2014, arXiv: 1303.5076v3.
- [4] CHANG Jin. Space exploration dark matter satellite[C]. The twenty-eighth Conference on space technology science, Lanzhou, 2015. (in Chinese)  
(常进. 空间探测暗物质卫星, 第二十八届空间技术科学中心会议, 兰州, 2015.)
- [5] LI Jin, YUE Qian. New Progress of CJPL and CDEX[C]. The fifteenth Nuclear Physics Conference, shanghai, 2013.
- [6] BORRIELLO A, SALUCCI P. Mon Not Roy Astron Soc, 2001, **323**: 285. arXiv: astro-ph/0001082.
- [7] CLOWE D, BRADAE M, GONZALEZ A H, *et al.* Astrophysics J. 2006, **648**: 1009.
- [8] del POPOLO A. Modern Physics D, 2014, **23**: 1430005.
- [9] JUNGMAN G, KAMIONKOWSKI M, GRIESI K. Phys Rep, 1996, **267**, 195.
- [10] KAMIONKOWSKI M, MICHAEL K. Phys Rev D, 1991, **43**, 1774; JUNGMAN G, KAMIONKOWSKI M. Phys Rev D, 1994, **49**, 2316.
- [11] LI Tianjun. Review of dark matter models[C]. workshop on cosmology, dark matter, dark engery, Beijing, 2011.
- [12] HERRERO M. arXiv:hep-ph/9812242; BURGESS C P, MOORE G D. The Standard Model: A Primer[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [13] RANDALL L, SUNDRUM R. Phys Rev Lett, 1999, **83**: 3370.
- [14] JIA Bei, LEE Xiguo, ZHANG Pengming, Int J Theor Phys, 2008, **47**: 3391.
- [15] KOLINNIKOV S Y, KHLOPOV M Y. Sov J Nucl Phys, 1982, **36**: 472.
- [16] GROSS C, LEBEDEV O, MAMBRINI Y. JHEP, 2015, **08**: 158.
- [17] Gupta A, Primulando R, Saraswat P. JHEP, 2015, **09**: 079.
- [18] FUKUDA Y, HAYAKAWA T, ICHIHARA E, *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration) Phys Rev Lett, 1998, **81**: 1562.
- [19] AHMAD Q R, ALLEN R C, ANDERSEN T C, *et al.* (SNO Collaboration). Phys Rev Lett, 2002, **89**: 011301.
- [20] AN F P, BAI J Z, BALANTEKIN A B, *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **108**: 171803; ArXiv: 1202.6181v1.
- [21] BAKER C A, DOYLE D D, GELTENBORT P, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **97**: 131801.
- [22] SAURYA D, DEBAPRASAD M, SOUMITRA S. JHEP, 2008, **05**: 042; Dey P, Mukhopafhyaya B, SenGupta S. Phys Rev D, 2009, **80**: 055029.
- [23] LEE Xiguo, JIA Bei. Nuclear Physics Review, 2001, **28**(3): 276. (in Chinese)  
(李希国, 贾贝. 原子核物理评论, 2011, **28**: 276.)
- [24] LEE Xiguo, BALDO M, DUAN Yishi. GRG, 2002, **34**(10): 1569; DUAN Yishi, LEE XIGUO. Helv Phys Acta, 1995, **68**: 513.
- [25] LEE Xiguo, LIU Ziyu, LI Yongqing, *et al.* Modern Physics Letter A, 2008, **23**: 1055.
- [26] Reyes L M, AGUILAR J E M. Class Quantum Grav, 2011, **28**: 215007.
- [27] CHANG Jin, FENG Lei, GUO JianHua, *et al.* ACIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2015, **45**: 119510. (in Chinese)  
(常进, 冯磊, 郭建华, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2015, **45**: 119510.)
- [28] Scherrer R J, Turner M S. Phys Rev D, 1986, **33**: 1585.
- [29] RUBIN V C, THONNARD N, FORD W K, Jr, Astrophys J, 1980, **238**: 471.
- [30] JONATHA N, Feng L. Ann Rev Astron Astrophys, 2010, **48**: 495.
- [31] GOLDBERG H. Phys Rev Lett, 1983, **50**: 1419.
- [32] KLEIN O. Z Phys, 1926, **37**: 895.
- [33] APPELQUIST T, CHENG H C, DOBRESU B A. Phys Rev D, 2001, **67**: 055002.
- [34] DATTA A, DEY U K, SHAW A, *et al.* Phys Rev D, 2013, **87**: 076002.



- [35] DIMOPOULOS S, HOWE K, MARCH-RUSSELL J, *et al.* JHEP, 2015, **06**: 041.
- [36] CHENG H C, FENG J L, MATCHEV K T. Phys Rev Lett, 2002, **89**: 211301.
- [37] ATLAS Collaboration, ATLAS-CoNF-015-081.
- [38] CMS Collaboration, CMS PAS EXO-15-004.
- [39] HAN C, LEE H M, PARK M, *et al.* arXiv: 1512.0637v1[hep-ph].
- [40] PECCEI R D, QUINN H R. Phys Rev Lett, 1977, **38**: 1440.
- [41] ABBOTT L F, SIKIVIE P. Phys Lett, **B**, 1983, **120**: 133.
- [42] SHIFMAN M A, VAINSHTEIN A I, ZAKHAROV V I. Nucl Phys, **B**, 1980, **166**: 493.
- [43] ZHITNITSKY A R. Sov.J. Nucl Phys, 1980, **31**: 260.
- [44] RAFFELT G G. Lect Notes Pgs, 2008, **741**: 51.
- [45] BAE K J, HUH J H, KIM J E. JCAP, 2008, **0809**: 005.
- [46] YAMAGUCHI M, KAWASAKI M, YOKOYAMA J. Phys Rev Lett, 1999, **82**: 4578.
- [47] SIKIVIE P. Phys Rev Lett, 1983, **51**: 1415.
- [48] FENG J L, RAJARAMAN A, TAKAYAMA F. Phys Rev D, 2003, **68**: 063504.
- [49] WANG F, YANG J M. Eur Phys J C, 2004, **38**: 129.
- [50] ROSZKOWSKI L, RUIZ R, DE AUSTRI, *et al.* JHEP, 2005, **08**: 080. Nucl Phys B, 1982, **207**: 96.
- [51] DINE M, NELSON A E, NIR Y, *et al.* Phys Rev D, 1996, **53**: 2658.
- [52] ZWICKY F. Helvetica Physica Acta, 1933, **6**: 110.
- [53] FUSCO-FEMIANO R, HUGHES J P. Astrophys.J., 1994, **429**: 545.
- [54] EVANS N W, WILKINSON M I. Mon Not R Astron Soc, 2000, **316**: 929.
- [55] MCMillan P L. Mon Not R Astron Soc, 2001, **414**: 2446.
- [56] RUBIN V C, FORD W K. Astrophys J. 1970, **159**: 379.
- [57] SABUROVA A, DEL POPOLO A. 2014, MNRAS, **445**: 3512.
- [58] KORMENDY J, FREEMAN K C. Astronomical Society of the Pacific[C]. Sydney: IAU Symposium, 2004: 377.
- [59] Milgrom M. APJ, 1983, **370**: 371.
- [60] BOYARSKY A, RUCHAYSKIY O, LAKUBOVSKYI D, *et al.* 2009, arXiv: 0911.1774.
- [61] DEL POPOLO A, KROUP P. Astron, Astrophys, 2009, **502**: 733.
- [62] SILVA J M, LIMA J A S, SOUZA R E, *et al.* JCAP, 2016, **05**: 021.
- [63] DEL POPOLO A, LEE Xiguo. Baltic Astronomy, 2016, **25**: 195.
- [64] STADEL J. POTTER D, MOORE B, *et al.* 2009, Mon R Astron Soc, **398**: 21.
- [65] GOVERNATO F, BROOK C, MAYER L, *et al.* 2010, Nature, **463**: 203.
- [66] CARDONE V F, TORTORA C. MNRAS, 2010, **409**: 1570.
- [67] BOYARKY A, NERONOV A, IAKUBOVSKYI O, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **1301**.
- [68] SABUROVA A, DEL POPOLO A. MNRAS, 2014, **3512**.
- [69] BEREZHIANI Z G, DOLGOV A D, MOHAPATRA R N. Phys Lett B, 1996, **375**: 26.
- [70] IANATIEV A Y, VOLKAS R R. Phys Rev D, 2003, **71**: 023518.
- [71] FOOT R. Phys Rev D, 2004, **69**: 036001.
- [72] YANG W M. arXiv: 1309.1955v6.
- [73] YANG W M. Nucl Phys **B**, 2014, **885**: 505.
- [74] MCDONALD J. Phys Rev D, 1994, **50**: 3637.
- [75] BURGESS C P, Pospelov M, TER VELDHUIS T. Nucl Phys B, 2001, **619**: 709.
- [76] YAGUNA C E. JCAP, 2009, **0903**: 003.
- [77] YUE Qian, CJPL and CDEX of China[C]. Beijing, 2011. (in Chinese)  
(岳骞. 中国锦屏极深地下实验室(CJPL)和中国暗物质实验(CDEX)[C]. 北京, 2011.)
- [78] ZHAO W, YUE Q, KANG K J, *et al.* Phys Rev D, 2013, **88**: 052004.
- [79] YUE Qian, KANG Kejun, LI Jianming. arXiv: 1602. 024-62v1.
- [80] XIAO Mengjiao. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, **57**: 2024.
- [81] XIAO Xiang, CHEN Xun, TAN Andi, *et al.* Phys Rev D, 2015, **92**: 052004.
- [82] TAN Andi, XIAO Xiang, CUI Xiangyi, *et al.* arXiv: 1602. 06563v1.
- [83] YANG Changgen. Detection of dark matter RD in Institute of High Energy Physics[C]. Beijing, 2013. (in Chinese)  
(杨长根. 高能所暗物质探测[C]. 北京, 2013.)
- [84] GUO C, MA X H, WANG Z M, *et al.* arXiv: 1602.04923v1.
- [85] ADRIANI O, BARBARINO G C, BAZILEVSKAYA G A, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **105**: 121101.
- [86] ACCARDO L, AGUILAR M, AISA D, *et al.* Phys Rev Lett, 2014, **113**: 121101.
- [87] AGUILAR M, AISA D, ALVINO A, *et al.* Phys Rev Lett, 2014, **113**: 121102.
- [88] HUANG Xiaoyuan, SMING TSAI Yue-Lin, YUAN Qiang, arXiv: 1603.07119v1.
- [89] BISHARA F, CROLJO A, KAMENIK J F, *et al.* JHEP, 2015, **12**: 130.
- [90] BELANGER G, DELAUNAY C. arXiv: 1603: 03333v1.

## Progress of Theoretical Study on Dark Matter

LEE Xiguo<sup>1)</sup>

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** A review of the evidence of the dark matter found in universe and the problems faced by the standard model. To address these issues as well as the possible relationship between the new physics beyond the standard model and dark matter, and given the selection condition of dark matter and possible candidates of the weakly-interacting massive particles (WIMPs). The correlation between the column surface density and the halo core radius of the dark matter halos of galaxies and cluster of galaxies is discussed, and the other models are compared. We find that the surface density within the halo characteristic radius  $r_*$  is not an universal quantity; The new model (hidden dark matter) proposed in the study of dark matter is described. At last, the research progress of dark matter experiment in China is commented. At the end of 2016, the first batch of DAMPE data may be given; No significant excess events of WIMPS were found in the first stage of both the CDEX and PandaX experiments located in the China Jinping Underground Laboratory(CJPL). Look forward to their the next stage of these experiments in CJPL.

**Key words:** Dark matter; WIMPS; Detection of dark matter

<http://www.npr.ac.cn>

---

**Received date:** 1 Apr. 2016; **Revised date:** 21 Apr. 2016

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11205221)

1) E-mail: xgl@impcas.ac.cn.