

暗物质直接探测实验现状*

余钊焕^{1,2}, 陈璟锬¹, 姚道新¹, 王青³, 张宏浩¹

(1. 中山大学物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 清华大学物理系, 北京 100084)

摘要: 综述了暗物质直接探测实验现状, 并对现有主要实验的最新结果和限制进行归纳总结。有些实验已经声称找到了暗物质的疑似信号, 但这些疑似信号相互矛盾, 而且有些实验又将这些信号区域排除了, 需要更进一步的实验才能给出确切的答案。

关键词: 暗物质; 直接探测; 弱相互作用大质量粒子

中图分类号: 0572.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2012) 03-0001-07

Status of Dark Matter Direct Detection Experiments

YU Zhaohuan^{1,2}, CHEN Jingkun¹, YAO Daoxin¹, WANG Qing³, ZHANG Honghao¹

(1. School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The current status of dark matter direct detection experiments and their main results is briefly reviewed. Some experiments have claimed that some possible dark matter signals have been found, but the results of these experiments are inconsistent to each other. On the other hand, other experiments have excluded these possible signal regions. Further experiments are needed to give a convincing statement.

Key words: dark matter; direct detection; weakly interacting massive particle

近十几年来, 各种天文学和宇宙学的精确观测结果已经无可异议地证明, 除了可见 (发出电磁波) 物质外, 宇宙中还包含着许多隐藏着的组分^[1-3]。其中不发光的、仅表现出万有引力效应的物质, 被称为暗物质。当前某些观测结果表明, 暗物质广泛存在矮星系、星系、星系团、宇宙大尺度结构中, 而且其当前丰度约为普通可见物质丰度的5倍^[2-3]。

各种天文学观测初步揭示出的暗物质特性有:

①暗物质是稳定的, 即使会衰变, 其衰变时间也应该超过或者相当于宇宙年龄尺度的时间, 否则我们

能很容易地接收到暗物质衰变信号; ②由于暗物质具有引力效应, 又从未在光学、射电望远镜中被发现到, 我们推测暗物质应该是电中性的, 即不能与光子有直接的耦合; ③暗物质主要是非重子物质; ④暗物质主要是冷的, 即暗物质退耦时的宇宙温度应该远小于其质量 (自然单位制下)。

目前理论研究中最有可能的一类暗物质粒子候选者统称为 WIMP (Weakly Interacting Massive Particle, 弱相互作用大质量粒子)。理论研究倾向于 WIMP 的原因是, 如果有一种粒子, 它的质量约在几个 GeV 到 TeV 之间, 相互作用强度在弱作用尺

* 收稿日期: 2012-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11005163, 11074310, 11075085); 教育部博士点专项基金资助项目 (200805581030, 20110002110010, 20110171110026); 高校基本科研业务费专项资助项目; 中山大学物理学基地资助项目; 中山大学教学改革资助项目

作者简介: 余钊焕 (1988年生), 男, 博士研究生; **通讯作者:** 张宏浩; E-mail: zhh98@mail.sysu.edu.cn

度上,则可以很好地同时解释观测到的暗物质遗迹密度和宇宙大尺度结构形成等问题。这是一种理论上的巧合,通常被称为“WIMP 奇迹”。另一方面,在粒子物理标准模型中在弱作用能标上出现的各种疑难(规范等级、精细调节等问题),一般可以经由一些超出标准模型的新物理模型来解释,而这些新物理模型通常会自然地包含一些可能构成暗物质的 WIMP。

据此,当前暗物质研究的主要精力集中在对 WIMP 的研究上,而当前的实验技术水平也已经发展到了能够探测 WIMP 的程度。验证 WIMP 存在可能性的各种实验主要可分为三类:①间接探测实验,寻找 WIMP 自湮灭或衰变的产物粒子信号;②直接探测实验,探测 WIMP 与原子核相互作用产生的光学、声学、电子学信号;③对撞机探测实验,在对撞机上寻找 WIMP 的产生事例。这三种探测方式具有很好的互补性,在唯象学研究中联合应用不同探测实验的结果可对暗物质参数空间给出更严格的限制^[4-5]。本文主要综述当前的暗物质直接探测的实验研究,对于间接探测和对撞机探测实验将另文介绍。

1 暗物质直接探测实验基本原理

按照天文学和宇宙学的观测结果推断,银河系有一个暗物质构成的晕,这个晕的净角动量可能接近于零。银河系内部处处存在着暗物质。因此,地球以及其它发光天体和物质如同大海中的鱼一样“浸泡”在由暗物质构成的“海洋”中,而且,地球附近的暗物质能量密度不小,达到约 0.4 GeV cm^{-3} 。假定 WIMP 与核子所含夸克或胶子之间具有弱作用尺度上的相互作用, WIMP 就可以与原子核发生碰撞作用。因而,在地球上放置一些探测物质,则 WIMP 与这些物质的碰撞可能会产生能够测量到的信号。直接探测实验的核心思路就是探测 WIMP 与原子核发生弹性碰撞或非弹性碰撞时所产生的核反冲信号^[6-7]。一般说来,非弹性碰撞造成的反冲核能量要比弹性碰撞造成的小一些,因而会更难以探测到,故实验上大多先以弹性碰撞为假设处理实验数据。

单个 WIMP 与单个核子发生弹性碰撞的概率(散射截面)主要取决于被碰撞原子核的质量和自旋。对于与自旋无关的相互作用,原子核中的各个核子对散射截面的贡献是可以累加的,从而随着原子核质量数的增大,散射截面也会跟着增大,因此在绝大多数直接探测实验均采用大质量数原子核作为

探测物质,但这也可能导致对自旋相关相互作用的探测或排除能力远低于自旋无关的。对于自旋相关的相互作用,散射截面除与原子核质量数相关之外,还取决于原子核内质子和中子各自在原子核总自旋上贡献的平均净含量。由于原子核内各个质子(或中子)的自旋大多相互抵消,对总自旋的净贡献一般不大。而且对于实验上采用的不同原子核,质子和中子的自旋贡献也经常相差甚大,故各实验组一般会分开发布 WIMP - 质子和 WIMP - 中子的散射截面测量结果。由于 WIMP 与原子核的相互作用很弱,实验时可能的真实事例率相当低,背景事例非常多。为了增加事例数,必须制造更多的探测物质,并寻求能够提高信噪比的探测技术,这是所有直接探测实验的目标。

直接探测的最大障碍来源于各种背景事例,主要包括来自太空的 γ 射线、 μ 子,以及来自材料污染和同位素的 α 衰变、 β 衰变和中子流。即使经过屏障的抵挡和材料的提纯之后,这些背景事例仍然远远多于 WIMP 微弱的信号事例。当然,屏障并不会减少 WIMP 的事例数,因为对于如此小的弱作用散射截面,屏障对 WIMP 来说几乎是透明的。而且,地球周围的 WIMP 在空间中的分布被认为是均匀的。为此,直接探测实验均安置在地下深处,同时还建造厚重的复合防御壁垒,从而达到屏蔽多数背景事例的目的。但是,实验材料本身产生的背景事例是不可能屏蔽的,这就对材料的纯度要提出很高的要求。

WIMP 与探测物质的相对速度也会影响到碰撞事例率。因为地球绕太阳的公转,银河系中的 WIMP 与地球的相对速度会出现了一个年度性的变化,从而导致测量信号的年度调制现象。有的直接探测实验就是基于这一调制现象设计的,如 DAMA。由于背景噪声事例总是随机出现的(对此有些人有不同意见,见后面的讨论),不可能有年度调制现象,因此基于调制现象的实验不需要进行排除本底的分析,这类实验的关键在于将类似于周期为一年的正弦函数分布的事例数的时间变化测量出来。这种调制现象完全独立于 WIMP 的模型,但同时也存在一些争议。

另一方面,当 WIMP 与探测材料发生碰撞时,被碰撞的既有可能是电子,也有可能是原子核。因为原子核的质量远大于电子,所以 WIMP 被认为只会与核子发生碰撞。但在实际的实验过程中,电子造成的事例数一般远大于原子核造成的。因此,在实验上还必须设计出利用反冲效应有效地区分电子

事例和原子核事例的技术手段。

2 直接探测实验简述

当前暗物质直接探测实验繁多，所探测的核反冲信号一般通过声子、光和电荷这三类信号为载体收集起来。以声子为收集信号的有 PICASSO、COUPP 和 SIMPLE 等；以光为收集信号的有 DAMA、KIMS、XMASS 和 DEAP/CLEAN 等；以电荷为收集信号的有 CoGeNT、TEXONO 和 CDEX 等。此外，还有通过同时收集两种信号以期更好地辨认暗物质信号的实验，例如，CDMS 和 EDELWEISS 收集声子和电荷两种信号，CRESST 收集声子和光两种信号，ZEPLIN、XENON、LUX、ArDM、WARP 和 PANDAX 等收集电荷和光两种信号。在这些实验中，CDEX 和 PANDAX 是正在进行的我国自主实验。下面简要介绍几类主要实验。

2.1 年度调制信号实验

年度调制信号实验的典型代表是 DAMA/LIBRA^[8]，该实验位于意大利的 Gran Sasso 国家实验室，LIBRA 是 DAMA 的后续发展实验，由 25 个 9.7 kg 的 NaI 晶体组成探测阵列（其中 9 个来源于 DAMA）。在探测器外部还包裹着由铜、铅、镉、聚乙烯、石蜡以及混凝土组成的防辐射层。所有材料在使用前均经过去除放射性元素的处理。经过 7 年的数据收集（其中 LIBRA 收集了 4 年）发现在 2~6 keV 能量间隔内的事例数存在近似年度性的调制，实验者认为这就是暗物质存在的证据。他们的理由为：放射性元素的衰减不具有年度调制性；而对于 > 6 keV 的事件以及二次碰撞的事件（一般认为 WIMP 在短时间内不可能发生两次碰撞），都不具有调制性；蒙特卡罗模拟显示，背景辐射透过防御层后无法引发这种量级的事件数；实验温度的波动也不会引起调制；拟合周期接近 1 年并且总是在每年 6 月达到峰值。

对此，也有人提出质疑。首先是作者没有对 2~6 keV 的事件加以区分，过早地认为这种调制由 WIMP 引起的理由并不充分。其次，其他具有足够探测能力的实验在相同的能量范围内都无法找到 WIMP 存在的证据。最后，如果用其他实验的数据处理方式对 DAMA 的数据进行处理，会得出与 DAMA 实验组的数据处理方式相矛盾的结果。也有人称看到这个调制与 μ 子的调制及中子的调制有关联。目前，这种争论还在持续，尚无明确定论。

2.2 低温实验

在几 K 温度下，一些物理现象可用于设计实

验信息传感器：事例对应的反冲能可以通过收集到的热量或声子数来推算；加载电场使电荷载体发生漂移并被捕获；对巨大的声子信号采用电离测量；一些具有临界温度的物理效应提供了精确的声子测量法。利用这些现象进行的暗物质直接探测实验必须先将温度探测材料的温度降到 1 K 的量级，属于低温实验。

低温实验的典型代表是 CDMS^[9]，它利用硅和锗作为暗物质探测器。位于苏丹地下实验室的 CDMS II 实验，由 19 个锗和 11 个硅固态探测器组成。探测器为碟状，直径 7.6 cm，厚 1 cm，工作温度约 40 mK，平均安装在 5 个“塔”中。实验装置放置在多层复合壁垒中。

电子或原子核反冲导致的电离辐射会在半导体晶体中产生电子-空穴对和一系列高频率的无热声子。通过对晶体加载电场，让电子和空穴漂移到相反的同轴电极上，被电荷放大器捕获并测量。高频声子到达探测器表面后被超导薄膜电路所接收。在相同的反冲能下，电子与原子核具有完全不同的电离能力，但在探测器表面附近反冲的粒子的电离能力会被抑制而造成误判。通过分析声子信号的上升沿时间，可以判断事例的位置并排除表面事例。在实验前，通过人为加入电子源和中子源定标出电子与原子核事例的分布区域，再以 WIMP 假设估计出最低反冲能。只有通过时间参数切割并位于原子核事例区域的信号才会被认为是疑似 WIMP 信号。

CDMS II 的改进实验 SuperCDMS 制造出全新的直径 7.62 cm、厚 2.54 cm 的晶体，质量约为 CDMS-II 的 2.54 倍。2008 年底，苏丹地下实验室建成 2 个各含 6 个探测单元的超级“塔”，在不久的将来将会发布新的实验结果。

与 CDMS 类似的低温实验还有 EDELWEISS-II，CRESST，ULTIMA，原理是类似的，但采用的探测物质不同，因此实验技术上有一定的差别。

2.3 稀有气体实验

利用氩（CLEAN），氙（ArDM，WARP，DEAP）和氙（XENON100，ZEPLIN-III，LUX，XMASS，PANDAX）等稀有气体液化后性质，可以架设一系列优秀的直接探测实验。可以通过对贵液体（noble liquid，液态稀有气体）连续不断的循环和提纯有效地抑制内部背景事例，而且容易建立大质量的探测器，扩建时只需将探测器容积和数据读取系统放大。

反冲粒子与探测物质的相互作用会导致探测物质在发生离子化的同时进入激发态。这种激发态有

可能是单态,也可能是三重态,它们具有不同的衰变时间^[10]。电子和原子核的反冲所产生的单重态与三重态数目比值上的差异足以区分事例种类。衰变所释放的光子被仪器上下平行的光电倍增管阵列所吸收。

在液体上方充满气态的同类元素。因离子化产生的电子被漂移电场萃取出液体,到达上方气体时发生场致发光现象。这个光信号大小正比于电子数。与 CDMS 的数据切割类似,利用衰变和场致发光的两种光信号以及电子倍增管阵列得到的 XY 坐标,去除表面事例和电子事例^[11-12]。

2.4 我国的直接探测实验

我国当前正在进行的两个直接探测实验是 CDEX 和 PANDAX,均位于四川省的中国锦屏地下实验室(CJPL)。从屏障宇宙线的角度来说,CJPL 拥有当前世界上最深的岩石负载量,为降低直接探测实验本底提供了极其有利的条件。

CDEX 实验由清华大学主导开展,采用超低能量阈高纯锗探测器进行探测^[13]。屏蔽系统的最外层用 1 m 厚的聚乙烯对背景快中子进行慢化和吸收,然后用一个 20 cm 厚的铅层降低环境 γ 射线背景,再下一层是 15 cm 的钢铁支撑结构,再里面是一层 20 cm 厚的掺硼聚乙烯以吸收热中子,最里的一层是用来吸收残留 γ 射线的 10 cm 厚无氧高导电铜。铜层里面的长方体内部空间,宽长高为 2 m \times 2.5 m \times 2 m,用于安放超低能量阈高纯锗探测器,这个空间足以安放一个吨级质量的高纯锗探测器阵列。为了消除氦气背景,内部空间用持续更新的高纯度氮气进行屏蔽保护。

当前 CDEX 的目标是用一个具有超低能量阈(<400 eV)的吨级点接触锗阵列探测器进行暗物质直接探测。目前,已经用 20 g 高纯锗完成了首次运行,得到了超过 60 d 的数据。一个 1 kg 的点接触锗探测器正在测试运行,并同时开展 10 kg 的探测器的研究。按照目前的计划,用 1 t 的探测物质运行 1 年后,有望在暗物质低质量区域(约 1 至 10 GeV)获得比其它实验高得多的实验精度(对 WIMP-核子自旋无关散射截面的探测精度 $\leq 10^{-42}$ cm^2)。

PANDAX 实验由上海交通大学主导开展,采用双相氙时间投影室进行探测,属于 2.3 节所述稀有气体实验。实验准备设计为三个阶段:第一个阶段用 120 kg 的靶物质运行,需要 300 kg 的氙,使用 143 + 37 个光电倍增管;第二个阶段用 500 kg 的靶物质运行,需要 1.3 t 的氙,同样使用 143 +

37 个光电倍增管;第三个阶段用 1.5 t 的靶物质运行,需要 3 t 的氙,并增加光电倍增管的数目。第一阶段与第二阶段采用相同的内外容器,可以从第一阶段直接升级到第二阶段。第三阶段采用与前两个阶段不同的内外容器,但外部屏障层不变。

目前,PANDAX 的内外容器均已制作出原型,并与制冷和净化系统装配运行,正在进行各种测试。实验预期在 2012 年第一季度投入试运行,并在 2012 年下半年发布首批结果。对于 WIMP-核子自旋无关散射截面,PANDAX 第一阶段的精度预期将比 2011 年的 XENON100 结果提高约 1 个量级,而第二阶段的预期精度还将再提高约 1 个量级。

3 当前直接探测实验结果

当前,有许多暗物质直接探测实验已经发布了它们的直接探测结果^[14-28],比较新、限制比较强的实验结果分别展示在图 1、图 2 和图 3 中。各图中 DAMA/LIBRA 的 3σ 和 5σ 疑似信号区域来自于文献[22]的分析结果,其使用数据来自文献[21],标有(chan.)的区域是考虑了隧道效应的,未标明的则没有考虑隧道效应。值得注意的是,对 DAMA/LIBRA 数据的不同分析方法给出的分析结果可能会不尽相同。

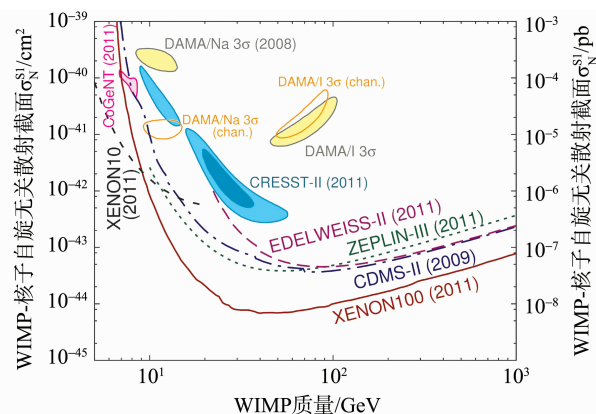


图 1 当前暗物质直接探测实验给出的 WIMP-核子自旋无关散射截面的排除线和疑似信号区域

Fig. 1 Upper limits and favored signal regions of WIMP-nucleon spin-independent cross section given by current dark matter direct detection experiments

图 1 展示了当前暗物质直接探测实验给出的 WIMP-核子自旋无关散射截面的排除线和疑似信号区域^[14-22]。从图中可以看出,到 2011 年,已有 DAMA/LIBRA、CoGeNT 和 CRESST-II 三个实验组

给出有 WIMP 疑似信号区域的结果，但它们各自给出的区域几乎没有交迭之处。而且，其它几个零信号的实验把它们的疑似信号区域都排除了，最强的排除线来自 XENON 实验组。这些疑似信号在目前的暗物质探测研究中争议颇大，对暗物质粒子是否已经找到还不能有一个定论。另外，CDMS-II 还曾在 2010 年声称找到了两个 WIMP 信号的疑似事例^[14]，但这两种事例所处位置与非信号事例很接近，不能完全确证。可以说，现在各个直接探测实验的给出的结果有些相互矛盾。

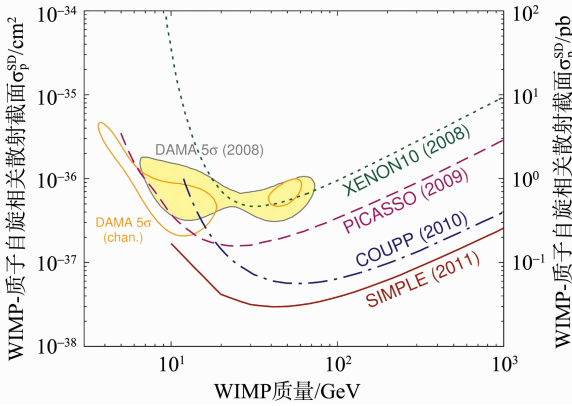


图 2 当前暗物质直接探测实验给出的 WIMP - 质子自旋相关散射截面的排除线和疑似信号区域
Fig. 2 Upper limits and favored signal regions of WIMP-proton spin-dependent cross section given by current dark matter direct detection experiments

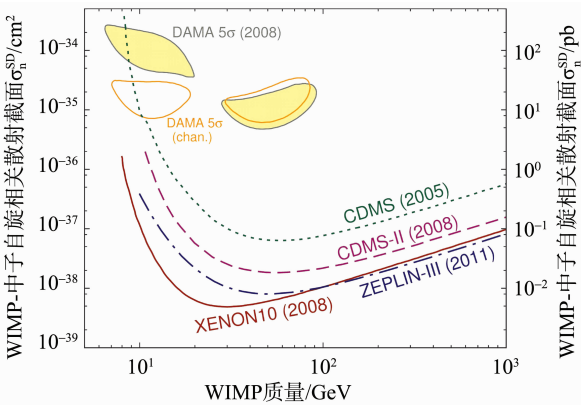


图 3 当前暗物质直接探测实验给出的 WIMP - 中子自旋相关散射截面的排除线和疑似信号区域
Fig. 3 Upper limits and favored signal regions of WIMP-neutron spin-dependent cross section given by current dark matter direct detection experiments

对于声称发现 WIMP 疑似信号的实验，目前有如下一些质疑。DAMA/LIBRA 测量到的信号是年度调制信号，而受地球公转影响呈现出年度调制现

象的因素很多（例如，一年四季实验所处地区的温度就会呈现出年度变化），这些年度调制因素也很可能会造成实验背景信号的年度调制现象，从而造成假信号。CoGeNT 的信号是在低能区（电离能在 0.3 到 2.5 keV 电子等价能量处）发现的。实验组在考虑了所有他们能想到的系统背景事例，还需要加入一个额外的峰状结构才能拟合实验数据，如果将此峰状结构视为 WIMP 所造成的，则可得出疑似信号。但这种情况也可能是某个未知的系统因素所造成的，毕竟低能区更容易受到干扰。CRESST 实验的方法与 CDMS 相当类似，但 CRESST-II 却在 CDMS-II 的已排除区域中找到疑似信号，这种信号也容易令人怀疑是否有某些系统因素没有顾及到。

图 2 和图 3 展示了当前暗物质直接探测实验给出的 WIMP - 核子自旋相关散射截面的排除线和疑似信号区域，图 2 是 WIMP 与纯质子发生散射时的结果，最强的排除线来自 SIMPLE 实验组^[21-26]。图 3 是 WIMP 与纯中子发生散射时的结果，最强的排除线由 XENON 和 ZEPLIN 给出^[17,21-23,27-28]。与图 1 对比，可以明显看出，当前实验对 WIMP - 核子自旋相关相互作用的排除能力是远不如自旋无关相互作用的，差了好几个量级。这主要是因为如前所述，对自旋无关相互作用的探测能力可以通过使用质量数较大的原子核来提高，而自旋相关相互作用无此优势，实际实验过程对后者的探测能力就差了很多。

4 总结

当前，关于暗物质的研究已经成为物理学和天文学前沿研究的热点问题，引起实验界和理论界的广泛关注。在世界范围内，暗物质直接探测实验很多，实验探测能力也逐渐达到探测 WIMP 的水平，而且探测能力还在随着一年年的发展逐步提高。各个实验组采取的探测手段，有的类似，有的截然不同，可以说，相互之间具有很好的互补性。毕竟，暗物质直接探测实验是一种高背景低信号的实验，系统和统计上的不确定性都很大。如果各个手段不同的实验组能够给出相对一致的 WIMP 探测结果，才能比较确切地证实或证伪 WIMP 的存在性。

现在有的直接探测实验已经声称发现了 WIMP 的疑似信号，但有的实验却将这些疑似信号区域完全排除了。这是一个明显的矛盾，需要在下一步的实验中进行确证。理论研究者一般选取其中一些实验结果进行唯象学研究，例如文献[4-5]用到的是 XENON 合作组的结果。

近几年来直接探测实验的发展非常迅速, 我国的实验者也已经投入到研究的潮流之中, 相信在不久的将来能够对 WIMP 假设作出决定性的判定。然而, WIMP 假设毕竟只是解决暗物质疑难的一种途径, 即使 WIMP 假设不成立, 也需要有其他途径来解释暗物质现象。从这方面来说, 暗物质研究可能还将在物理学前沿上继续发展很多年。

参考文献:

- [1] TEGMARK M, EISENSTEIN D J, STRAUSS M A, et al. SDSS collaboration. Cosmological constraints from the SDSS luminous red galaxies [J]. *Physical Review D*, 2006, 74: 123507 [arXiv:astro-ph/0608632].
- [2] KOMATSU E, DUNKLEY J, NOLTA M R, et al. WMAP collaboration. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2009, 180: 330 – 376 [arXiv:0803.0547 [astro-ph]].
- [3] KOMATSU E, SMITH K M, DUNKLEY J, et al. WMAP collaboration. Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, 192: 18 [arXiv:1001.4538 [astro-ph.CO]].
- [4] ZHENG Jia-ming, YU Zhao-huan, SHAO Jun-wen, et al. Constraining the interaction strength between dark matter and visible matter: I. fermionic dark matter [J]. *Nuclear Physics B*, 2012, 854: 350 – 374 [arXiv:1012.2022 [hep-ph]].
- [5] YU Zhao-huan, ZHENG Jia-ming, BI Xiao-jun, et al. Constraining the interaction strength between dark matter and visible matter: II. scalar, vector and spin – 3/2 dark matter [J]. *Nuclear Physics B*, 2012, 860: 115 – 151 [arXiv:1112.6052 [hep-ph]].
- [6] JUNGMAN G, KAMIONKOWSKI M, GRIEST K. Supersymmetric dark matter [J]. *Physics Reports*, 1996, 267: 195 – 373 [arXiv:hep-ph/9506380].
- [7] BERTONE G, HOOPER D, SILK J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints [J]. *Physics Reports*, 2005, 405: 279 – 390 [arXiv:hep-ph/0404175].
- [8] BERNABEI R, BELLI P, BUSSOLOTTI A, et al. The DAMA/LIBRA apparatus [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 2008, 592: 297 – 315.
- [9] AKERIB D S, ALVARO-DEAN J, ARMEL-FUNKHOUSER M S, et al. CDMS collaboration. First results from the cryogenic dark matter search in the Soudan Underground Lab [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 211301 [astro-ph/0405033].
- [10] HITACHI A, TAKAHASHI T, FUNAYAMA N, et al. Effect of ionization density on the time dependence of luminescence from liquid argon and xenon [J]. *Physical Review B*, 1983, 27: 5279 – 5285.
- [11] MCKINSEY D N. The XENON Dark Matter Search [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 870: 202 – 204.
- [12] ANGLE J, APRILE E, ARNEODO F, et al. XENON collaboration. First results from the XENON10 dark matter experiment at the gran sasso national laboratory [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 021303 [arXiv:0706.0039 [astro-ph]].
- [13] LI Lei, YUE, Qian, TANG Chang-jian, et al. CDEX/TEXONO collaboration. A Monte Carlo study for the shielding of γ backgrounds induced by radionuclides for CDEX [J]. *Chinese Physics C*, 2011, 35: 282 – 287.
- [14] AHMED Z, AKERIB D S, ARRENERG S, et al. CDMS-II collaboration. Dark matter search results from the CDMS II experiment [J]. *Science*, 2010, 327: 1619 – 1621 [arXiv:0912.3592 [astro-ph.CO]].
- [15] ARMENGAUD E, AUGIER C, BENOIT A, et al. EDELWEISS collaboration. Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4 – kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes [J]. *Physics Letters B*, 2011, 702: 329 – 335 [arXiv:1103.4070 [astro-ph.CO]].
- [16] APRILE E, ARISAKA K, ARNEODO F, et al. XENON100 collaboration. Dark matter results from 100 live days of XENON100 data [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 131302 [arXiv:1104.2549 [astro-ph.CO]].
- [17] AKIMOV D Y, ARAUJO H M, BARNES E J, et al. ZEPLIN-III collaboration. WIMP-nucleon cross-section results from the second science run of ZEPLIN-III [J]. *Physics Letters B*, 2012, 709: 14 – 20 [arXiv:1110.4769 [astro-ph.CO]].
- [18] ANGLE J, APRILE E, ARNEODO F, et al. XENON10 collaboration. A search for light dark matter in XENON10 data [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 051301 [arXiv:1104.3088 [astro-ph.CO]].
- [19] AALSETH C E, BARBEAU P S, COLARESI J, et al. CoGeNT collaboration. Search for an annual modulation in a P-type point contact germanium dark matter detector [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 141301 [arXiv:1106.0650 [astro-ph.CO]].

利于晶化。

参考文献:

- [1] GALL S, BECKER C, CONRAD E. Polycrystalline silicon thin-film solar cells on glass [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(6/7): 1004 – 1008.
- [2] FOCSA A, GORDON I, AUGER J M. Thin film polycrystalline silicon solar cells on mullite ceramics [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(2): 267 – 272.
- [3] 艾斌, 沈辉, 班群, 等. 外延晶体硅薄膜太阳电池的量子效率和特性研究 [J]. *中国科学: E 辑*, 2004, 34(11): 1300 – 1312.
- [4] FALLER F R. Epitaxial silicon thin-film solar cells [M]. Freiburg: Ph. D. Thesis of Albert-ludwigs University, Germany, 1998: 12 – 14.
- [5] OH C H, MATSUMURA M. A proposed single grain-boundary thin-film transistor [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2001, 22(1): 20 – 22.
- [6] CROWDER M A, CAREY P G, SMITH P M, et al. Low temperature single crystal Si TFTs fabricated on Si films processed via sequential lateral solidification [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, 19(8): 306 – 308.
- [7] IM J S, KIM H J, THOMPSON M O. Phase transformation mechanisms involved in excimer laser crystallization of amorphous silicon films [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(14): 1969 – 1971.
- [8] ANGELIS C T, DIMITRIADISA C A. Effect of excimer laser annealing on the structural and electrical properties of polycrystalline silicon thin film transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(8): 4600 – 4606.
- [9] 言益军, 戴永兵, 王俊, 等. 准分子激光晶化制备 TFT 多晶硅薄膜的研究进展 [J]. *微电子学*, 2006, 36(1): 71 – 74.
- [10] 张世斌. 氢化非晶/纳米晶相变硅薄膜的研制和特性分析 [D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2002: 35 – 40.
- [11] 庞宏杰, 王存山, 张凯舒, 等. 非晶硅薄膜激光晶化及其结构分析 [J]. *应用激光*, 2007, 27(1): 21 – 24.
- [12] GOGOTSI Y, BAEK C, KIRSCHT F. Raman microspectroscopy study of processing-induced phase transformations and residual stress in silicon [J]. *Semiconductor Science Technology*, 1999, 14(10): 936 – 944.
-
- [20] ANGLOHER G, BAUER M, BAVYKINA I, et al. CRESST-II collaboration. Results from 730 kg days of the CRESST-II dark matter search [J/OL]. arXiv: 1109.0702 [astro-ph. CO]. 2011 – 09 – 04 [2012 – 04 – 18]. <http://arxiv.org/abs/arXiv:1109.0702>.
- [21] BERNABEI R, BELLI P, CAPPELLA F, et al. DAMA collaboration. First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI [J]. *The European Physical Journal C*, 2008, 56: 333 – 355 [arXiv:0804.2741 [astro-ph]].
- [22] SAVAGE C, GELMINI G, GONDOLO P, et al. Compatibility of DAMA/LIBRA dark matter detection with other searches [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2009, 0904: 010 [arXiv:0808.3607 [astro-ph]].
- [23] ANGLE J, APRILE E, ARNEODO F, et al. XENON10 collaboration. Limits on spin-dependent WIMP-nucleon cross-sections from the XENON10 experiment [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 091301 [arXiv:0805.2939 [astro-ph]].
- [24] ARCHAMBAULT S, AUBIN F, AUGER M, et al. PICASSO collaboration. Dark matter spin-dependent limits for WIMP interactions on F – 19 by PICASSO [J]. *Physics Letters B*, 2009, 682: 185 – 192 [arXiv:0907.0307 [hep-ex]].
- [25] BEHNKE E, BEHNKE J, BRICE S J, et al. COUPP collaboration. Improved limits on spin-dependent WIMP-proton interactions from a two liter CF₃I bubble chamber [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 021303 [arXiv:1008.3518 [astro-ph. CO]].
- [26] GIRARD T A, MORLAT T A, FELIZARDO M, et al. SIMPLE collaboration. New limits on WIMP interactions from the SIMPLE dark matter search [C]. *Proceedings of Science (IDM2010)*, 2011, 055 [arXiv:1101.1885 [astro-ph. CO]].
- [27] AKERIB D S, ARMEL-FUNKHOUSER M S, ATTISHA M J, et al. CDMS collaboration. Limits on spin-dependent wimp-nucleon interactions from the cryogenic dark matter search [J]. *Physical Review D*, 2006, 73: 011102 [astro-ph/0509269].
- [28] AHMED Z, AKERIB D S, ARRENBORG S, et al. CDMS collaboration. Search for weakly interacting massive particles with the first five-tower data from the cryogenic dark matter search at the soudan underground laboratory [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 011301 [arXiv:0802.3530 [astro-ph]].

(上接第6页)