



高纯锗探测器在粒子物理与天体物理中的应用

岳骞*

清华大学工程物理系, 北京 100084

*E-mail: yueq@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-09-07; 接受日期: 2011-10-31; 网络出版日期: 2011-11-25

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10935005, 11075090, 11055002)

摘要 本文介绍了近年来高纯锗探测器技术的发展和新型高纯锗探测器在粒子物理、天体物理领域的应用, 特别是高纯锗探测器在暗物质直接探测、双 β 衰变实验等极低本底的重要基础前沿研究方面的应用. 中国已经建成了世界垂直岩石覆盖最深的地下实验室——中国锦屏地下实验室. 中国科学家组成的 CDEX 研究团队拟利用吨量级的点接触电极高纯锗探测器阵列系统, 在中国锦屏地下实验室开展暗物质直接实验研究, 本文也介绍了这一实验计划.

关键词 高纯锗探测器, 暗物质, 双 β 衰变, 地下实验室, 暗物质, 本底, 中国锦屏地下实验室, CDEX

PACS: 29.40.Wk

1 引言

高纯锗探测器(High Purity Germanium, HPGe)是 20 世纪 70 年代左右发展起来的一种新型半导体探测器, 因其优越的能量分辨率、高的探测效率、较宽的能量测量范围、极低的内部放射性水平、稳定的性能等优点, 高纯锗探测器成为核素识别、活度测量及 X 射线分析领域的关键设备, 大量地应用于材料科学、环境科学及核技术应用等领域的低本底测量, 微量元素分析等方面, 并且在基础研究、环境监测、安全监控等领域得到了广泛而重要的应用.

2 高纯锗探测器技术的发展

随着新的高纯锗晶体处理工艺和高纯锗探测技术的发展, 逐步出现了基于点接触电极的极低能量

阈高纯锗探测器(Point-Contact Ultra-Low Energy Threshold HPGe Detector, ULE-HPGe)^[1], 以及具有一定位置分辨能力的电极分区高纯锗探测器(Segmented HPGe Detector)^[2]等新型高纯锗探测器, 正是这些新技术的开发和应用, 使得高纯锗探测器的优势得到发挥, 在双 β 衰变实验、暗物质直接探测实验研究等极低本底实验中得到进一步应用.

同轴型高纯锗探测器与点接触电极高纯锗探测器的结构如图 1 和 2 所示(图 1 和 2 中高纯锗晶体以 N 型为例, 实际应用中高纯锗探测器的晶体可以是 N 型, 也可以是 P 型, 信号引出电极可以是 N⁺结, 也可以是 P⁺结). 同轴高纯锗探测器的电极较深, 面积较大, 因而图 1 中的 n⁺电极的电容大. 这类同轴型高纯锗探测器的噪声水平较大, 能量阈值相对较高, 一般在几个 keV 水平. 为了减少电容, 降低噪声和测量阈, 20 世纪 80 年代又发展出了点接触电极高纯锗探测器,

引用格式: 岳骞. 高纯锗探测器在粒子物理与天体物理中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1434–1440

Yue Q. The application of high purity germanium detector in particle and astroparticle physics (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 1434–1440, doi: 10.1360/132011-965

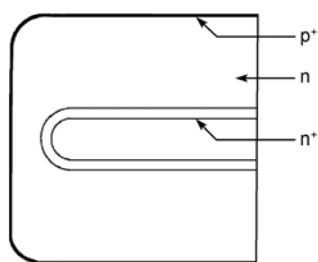


图 1 同轴型高纯锗探测器结构示意图

Figure 1 The structure layout of co-axial HPGe detector.

将标准的同轴高纯锗探测器的信号读出电极缩小成为一个很小的点, 使得该电极的电容大大减小, 进而降低高纯锗探测器的噪声水平和能量阈. 目前基于点接触电极技术的极低能量阈高纯锗探测器的能量阈值已经可以达到小于 300 eV 的水平, 扩展了其中微子、暗物质实验研究中的应用前景.

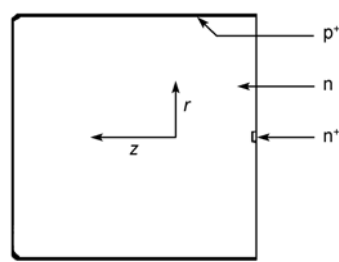


图 2 点接触电极极低能量阈高纯锗探测器结构示意图

Figure 2 The structure layout of point-contact ultra-low threshold HPGe detector.

点接触电极高纯锗探测器还提供了分辨单次事件和多次事件的能力, 并可以提供一定的位置分辨能力, 因而进一步增强了点接触电极高纯锗探测器的信号甄别能力. 图 3 给出了入射伽马射线在同轴高纯锗探测器和点接触电极高纯锗探测器灵敏体积中

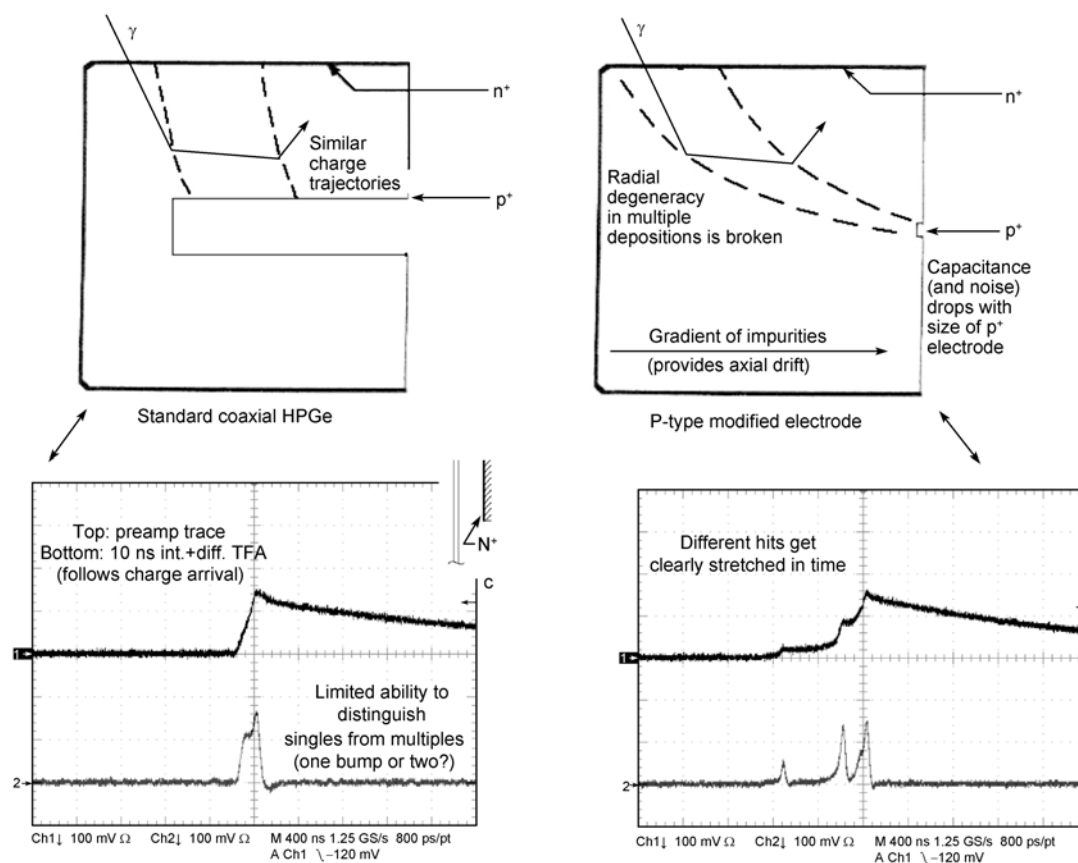


图 3 入射伽马射线在同轴高纯锗探测器和点电极高纯锗探测器灵敏体积中发生多次散射作用的示意图和各自探测器的读出电压和电流信号波形示意图

Figure 3 The layout of multi-hit gamma event in co-axial and point-contact HPGe detector and the readout voltage and current pulse shape, respectively.

发生多次散射作用的示意图和各自探测器的读出电压和电流信号波形示意图。从读出电压信号和电流信号波形图可以看出, 同轴高纯锗探测器信号不能很好地反映入射伽马射线在高纯锗探测器灵敏体积中的三次作用(两次康普顿效应和一次光电效应过程)。点接触电极高纯锗探测器信号可以很好地反映入射伽马射线在探测器灵敏体积中的三次作用过程。因而, 点接触电极高纯锗探测器能够区分单次事件和多次事件, 比同轴高纯锗探测器具有较强的信号甄别能力。

点接触电极高纯锗探测器还可以粗略提供伽马射线在探测器中发生作用的位置信息。图 4 中就是比较伽马射线在不同位置处入射到同轴高纯锗探测器和点接触电极高纯锗探测器的输出电压信号波形。可以看出, 点接触电极高纯锗探测器的输出电压波

形可以更好地反映入射伽马射线的位置。

电极分区高纯锗探测器的基本结构如图 5 所示(图 5 中将一个同轴型高纯锗探测器的外电极分成 6 块), 是采用一种新的高纯锗电极分割和加工技术, 将同轴高纯锗探测器的单一外部电极分成独立的两个或多个区域, 使得由单一高纯锗晶体构成的探测器在工作电场方面形成了几个相互独立的灵敏区域, 这样就可以甄别入射伽马射线、电子等的单次散射和在不同灵敏区域形成的多次散射, 提高高纯锗探测器对不同来源信号的甄别能力。图 5 中给出了中子在探测器中的非弹性散射过程、伽马射线在一个和两个探测器灵敏单元中的多次散射过程以及电子在一个探测器灵敏单元中的单次事例。电极分区的高纯锗探测器可以将电子的单次事例与其他几种多次散射事例很好地区分开。

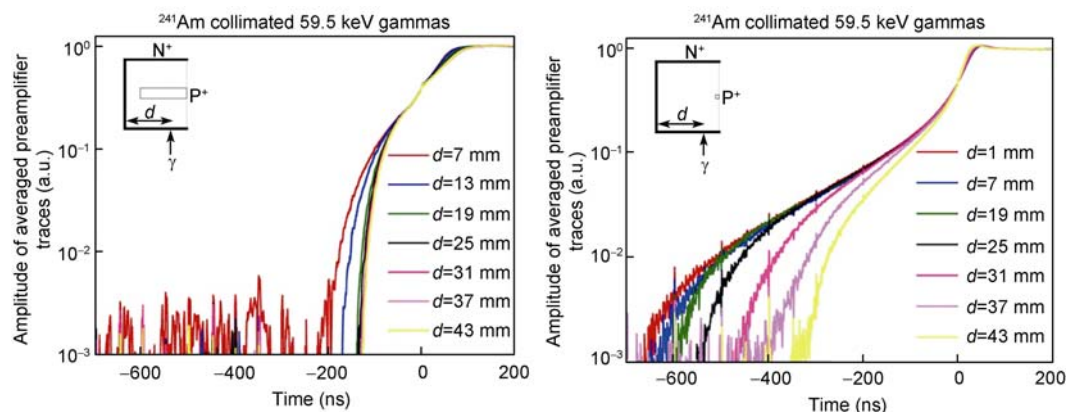


图 4 伽马射线在不同位置处入射到同轴高纯锗探测器和点接触电极高纯锗探测器的输出电压信号波形

Figure 4 The output voltage pulse shapes from the different place of a co-axial HPGe detector and a point-contact HPGe detector.

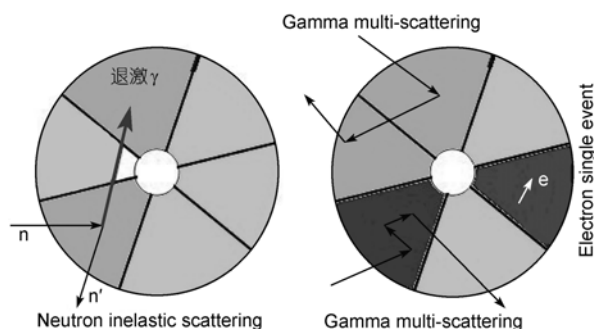


图 5 电极分区高纯锗探测器的基本结构

图中给出了中子在探测器中的非弹性散射过程、伽马射线在一个和两个探测器灵敏单元中的多次散射以及电子在一个探测器灵敏单元中的单次事例

Figure 5 The structure of segmented HPGe detector. The plot shows one neutron non-elastic process, one gamma multi-scattering events and one single-hit event from electron.

另外一种在暗物质实验中使用的高纯锗探测器是基于低温量热技术的极低温高纯锗探测器(图 6)^[3,4]. 采用这种高纯锗探测器技术的研究组包括美国的 CDMS 实验组和法国的 EDELWEISS 实验组. 这两个实验组都是将高纯锗探测器的工作温度降到 20~50 mK 的极低温区, 然后通过测量暗物质粒子在高纯锗探测器中引起的锗核反冲在探测器中沉积的热信号和电信号来直接探测暗物质. 这样的高纯锗探测器技术可以通过同时测量热和电离信号实现对反冲重核和电子等信号的甄别, 在高能区可以得到极低的本底水平, 可以实现对暗物质的高灵敏度探测. 但此类探测器由于在极低温环境下工作, 使得探测器配套系统复杂、昂贵, 不利于增加高纯锗探测器的质量和降低探测器能量阈值来进一步提高对暗物质探测的灵敏度.

3 高纯锗探测器的应用

高纯锗探测器在暗物质直接探测实验、双 β 衰变实验等极低本底实验中的重要应用, 对于人类深入理解和认识所处其中的物质世界以及中微子的基本特性都具有重要作用, 开展这些研究工作物理意义非常重大.

在中微子研究方面, 我国台湾中研院物理所的 TEXONO 实验组利用 ULE-HPGe 探测器测量反应堆中微子磁矩以及中微子与核的相关散射作用^[5]. 由于反应堆中微子能量较低, 其与靶核及核外电子的相互作用在探测器中产生的能量沉积很小, 通常在 keV 及以下区间. 因此 TEXONO 实验组采用基于点电极技术的低能量阈高纯锗探测器开展这方面的研究

工作.

暗物质研究方面, 我国清华大学的 CDEX 实验组^[6]和美国芝加哥大学的 CoGeNT 研究组^[7]都采用了基于点接触电极技术的极低能量阈高纯锗探测器系统来直接探测和研究暗物质粒子. 我国清华大学在 2003 年通过详细的理论分析, 提出利用低能量阈高纯锗探测器开展暗物质直接探测实验研究的计划, 并于 2004 年正式发表了相关研究论文^[8]. 2005 年开始, 清华大学牵头, 联合台湾中央研究院、韩国首尔大学等单位利用韩国的一个小型地下实验室 Y2L, 采用质量为 5 g 的小型高纯锗探测器, 率先探索了低能量阈高纯锗探测器用于直接探测暗物质的实验研究. 台湾中央研究院也一直采用高纯锗探测器开展反应堆中微子与电子散射以及核相干散射(ν -Nucleus Coherent Scattering)的实验研究, 并在台北国圣核电站的堆芯不远处建立了一套屏蔽系统^[5]. 因此 2006 年, 清华大学牵头的合作组定制了另一个质量为 20 g 的高纯锗探测器在台湾靠近核电站堆芯的地面实验室的屏蔽体中开展暗物质之间探测相关研究工作. 经过几年时间的研究, 基于 20 g 高纯锗探测器的暗物质研究成果正式发表在 2009 年的 *Physical Review D* 杂志上(Phys Rew D, 2009, 79: 061101). 这是清华大学领导和参与的暗物质研究组得到的第一个暗物质实验结果. 同时清华大学在我国国内联合二滩水电开发有限责任公司, 利用锦屏山隧道建设地下实验室的计划也于 2009 年正式启动. 因此 2009 年清华大学牵头, 联合国内的四川大学、中国原子能科学研究院、南开大学以及二滩水电开发有限责任公司等单位, 正式成立了中国暗物质实验(China Dark Matter Experiment, CDEX)合作组, 计划利用吨量级

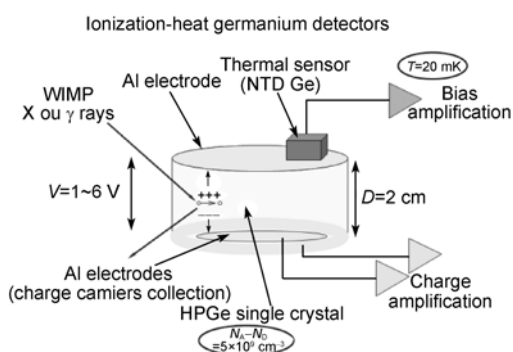


图 6 低温量热高纯锗探测器工作原理示意图和单个探测器内部结构

Figure 6 The principle of the ionization-heat germanium detector and the internal structure of a real detector.

低能量阈高纯锗探测器开展暗物质直接探测实验研究工作^[6]. CDEX 吨量级高纯锗探测器及液氩反符合系统的概念图见图 7.

双 β 衰变实验方面, Heidelberg-Moscow 实验组采用 ^{76}Ge 丰度为 86% 的高纯锗探测器测量得到国际上中微子质量的最低下限^[9]. 目前, 在 Heidelberg-Moscow 实验组以及另一个采用高纯锗探测器的 IGEX^[10] 实验组的前期研究基础上, 国际上新组建了两个双 β 衰变实验组: GERDA¹⁾ 和 MAJORANA²⁾, 这两个实验组都计划采用重达 1000 kg 的高纯锗探测器开展无中微子双 β 衰变实验.

当前, 双 β 衰变实验测量方面最灵敏的实验结果就是由 Heidelberg-Moscow 实验组采用 ^{76}Ge 丰度为 86% 的高纯锗探测器测量得到的. 在前期 IGEX 实验组和 Heidelberg-Moscow 实验组对高纯锗探测器用于双 β 衰变实验的研究基础上, 国际上新建立了两个实验组 GERDA 和 MAJORANA, 拟利用富集 ^{76}Ge 的高

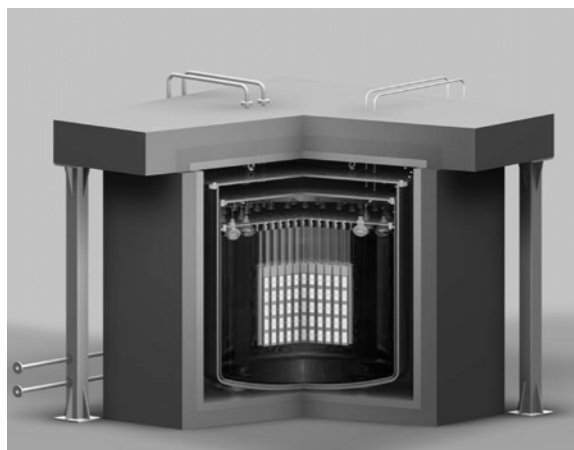


图 7 CDEX 实验组吨量级高纯锗探测器直接探测暗物质实验计划的高纯锗探测器阵列示意图

每十公斤高纯锗探测器单元封装在一个真空腔体中, 将多个这样的真空腔体进入高纯液氩介质中, 用液氩为高纯锗探测器提供工作低温环境, 同时液氩也可作为反符合探测器介质, 做成液氩反符合探测器, 作为高纯锗探测器的主动屏蔽体

Figure 7 The layout of ton-scale CDEX detector array system with LAr cooling and anti-compton detector. One vacuum tube encapsules 10 kg point-contact germanium detectors and will be immersed into liquid argon for cooling down. At the same time, liquid argon will be served as an anti-compton active shielding detector for the germanium detectors.

纯锗探测器开展无中微子双 β 衰变测量实验. 这两个实验组都计划采用质量为 1000 kg 的高纯锗探测器, 采用电极分区技术和点接触电极技术, 降低探测器能量阈值, 提高探测器信号甄别能力, 希望取得无中微子双 β 衰变实验的重大进展, 探测到马约喇纳中微子的质量. 目前, GERDA 实验组已经利用重约 18 kg 的 ^{76}Ge 丰度达 86% 的高纯锗探测器实验开展研究, 为未来开展“吨”量级的双 β 衰变实验积累经验, 探索探测器设计方案和一些实验技术细节.

高纯锗探测器在中微子实验、暗物质实验、双 β 衰变实验等领域的应用已经从探测器预研阶段开始向小规模探测器系统建造阶段过渡. 但是, 中微子实验、暗物质实验、以及双 β 衰变实验都是超低本底的实验, 需要在较深的地下实验室开展这类实验, 同时需要建设良好的主动被动相结合的屏蔽体系统进一步降低各种外部辐射产生的本底信号. 在地下实验室开展中微子实验、暗物质实验、双 β 衰变实验, 可以有效降低探测器空间的宇宙线通量, 进而降低宇宙线在探测器系统中产生次级本底信号的几率. 环境天然放射性核素产生的伽马、电子以及中子等信号可以通过良好的伽马、中子复合屏蔽体降低其对实验的本底贡献. 因此, 在对这类低本底实验的外部放射性本底进行很好屏蔽的同时, 另一个关键问题是研究探测器靶材料本身放射性杂质对极低本底实验的影响.

清华大学联合二滩水电开发有限责任公司, 在四川省凉山州的锦屏隧道中部建设了一个国际上垂直岩石覆盖最厚的地下实验室——中国锦屏极深地下实验室(China JinPing Underground Laboratory, CJPL), 该实验室已于 2010 年 12 月 12 日正式投入使用(图 8). 有了中国锦屏极深地下实验室这样的国际一流的地下实验室, 就为我国未来开展暗物质实验、双 β 衰变实验等这些重要基础前沿研究课题提供了极好的条件和机会. 在我国自己的极深地下实验室开展自主的暗物质实验、双 β 衰变实验等重要前沿课题的研究工作是提升我国粒子物理、天体物理等相关领域基础研究水平的必然选择.

高纯锗探测器是由纯度达 12~13 N(即杂质浓度小于 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)的高纯锗单晶制作而成. 这样高纯度的锗单晶是目前人类可以得到的最高纯度的半导

1) www.mpi-hd.mpg.de/ge76/

2) <http://majorana.npl.washington.edu/>

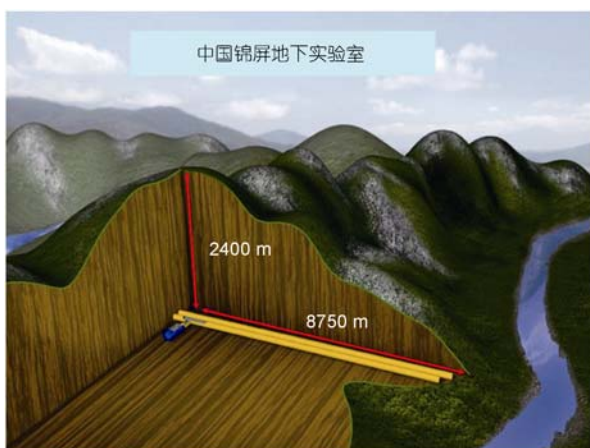


图 8 中国锦屏地下实验室岩石覆盖示意图

Figure 8 The layout of the rock overburden of China JinPing Underground Laboratory.

体材料, 其自身放射性核素含量很小, 对暗物质、双 β 衰变等实验的本底贡献很小. 但是高纯锗单晶在地面生长、运输, 以及制作高纯锗探测器的过程中, 由于高能宇宙线的轰击, 锗晶体中会产生寿命长短不一的放射性核素. 这些放射性核素, 特别是长寿命的放射性核素, 会对探测器本底水平造成重要影响, 需要对这个问题的实验研究, 评价锗核的内部宇生放射性对利用高纯锗探测器开展双 β 衰变、暗物质、

中微子等极低本底实验的影响. 由于对地下实验室条件、超低本底放射性核素测量平台的要求苛刻, 国际上开展探测器材料中宇生放射性核素的种类、活度等方面的研究工作较少. 开展高纯锗探测器内部宇生放射性核素的种类、活度的测量和研究工作以及地面和地下实验室两种环境条件下宇生放射性核素活度平衡状态的变化等的实验研究, 是非常重要的基础性工作, 对于利用高纯锗探测器开展暗物质、双 β 衰变实验、中微子等极低本底实验具有重要意义.

4 结论

总而言之, 高纯锗探测器作为一种先进的探测技术, 在几十年的发展过程中, 在粒子物理和天体物理的前沿实验中得到了越来越广泛的应用. 目前, 我国在高纯锗探测器的前沿应用方面已经开始了多方面的工作, 但还没有深入开展高纯锗探测器的自主研制, 以及高纯锗晶体的生长研究, 而正是高纯锗探测器的自主研制以及高纯锗晶体的生长这些关键的工艺和技术对于高纯锗探测器在基础前沿领域的应用具有极大影响. 随着我国科学技术水平的不断发展, 希望我国能够在这些方面取得长足的发展.

参考文献

- 1 Luke P N, Goulding F S, Madden N W, et al. Low capacitance large volume shaped-field germanium detector. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1989, 36(1): 926–930
- 2 Varnell L S, Callas J L, Mahoney W A. Segmented Ge detector rejection of internal beta activity produced by neutron irradiation. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1991, 38(2): 218–220
- 3 The CDMS II Collaboration. Dark matter search results from the CDMS II experiment. *Science*, 2010, 327: 1619–1621
- 4 The EDELWEISS Collaboration. Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes. *Phys Lett B*, 2011, 702: 329–335
- 5 Wong H T. Ultra-low-energy germanium detector for neutrino-nucleus coherent scattering and dark matter searches. *Mod Phys Lett A*, 2008, 23: 1431–1442
- 6 Kang K J, Cheng J P, Chen Y H, et al. Status and prospects of a deep underground laboratory in China. *J Phys-Confer Ser*, 2010, 203: 012028
- 7 Aalseth C E, Barbeau P S, Bowden N S, et al. Results from a search for light-mass dark matter with a P-type point contact germanium detector. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 131301
- 8 Yue Q, Cheng J P, Li Y J, et al. Detection of WIMPs using low threshold HPGe detector (in Chinese). *High Energy Phys Nucl Phys*, 2004, 28(8): 877–880 [岳嵩, 程建平, 李元景, 等. 低能量阈 HPGe 探测器测量 WIMPs. *高能物理与核物理*, 2004, 28(8): 877–880]
- 9 Klapdor-Kleingrothaus H V, Krivosheina I V, Dietz A, et al. Search for neutrinoless double beta decay with enriched ^{76}Ge in Gran Sasso 1990–2003. *Phys Lett B*, 2004, 586: 198–212
- 10 Aalseth C E, Avignone III F T, Brodzinski R L, et al. Recent results of the IGEX Ge-76 double-beta decay experiment. *Phys Atom Nucl*, 2000, 63: 1225–1228

The application of high purity germanium detector in particle and astroparticle physics

YUE Qian*

Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

This article reviews the development of new technologies related with High Purity Germanium (HPGe) detector and the application of the new type HPGe detector on particle physics and astroparticle physics, especially the application of HPGe detector on the topics of ultra-low background experiments such as dark matter search experiment, double beta decay experiment and so on. China has established an underground laboratory for particle and astroparticle physics which has the deepest rock overburden in the world until now and name after China Jinping Underground Laboratory (CJPL). CDEX collaboration in China will search directly the dark matter particle with ton-scale ultra-low threshold HPGe array detector based on the point-contact technology in CJPL. This article also gives a brief review about the CDEX collaboration.

high purity germanium detector, dark matter, doublebeta decay, underground laboratory, background, CJPL, CDEX

PACS: 29.40.Wk

doi: 10.1360/132011-965