



申请上海交通大学硕士学位论文

高纯锗伽马谱仪及放射性测量

姓 名： 姚玉坤

学 号： 119072910033

导 师： 孟月

学 院： 物理与天文学院

学科/专业名称： 粒子物理与原子核物理

学位类型： 学术型

申请学位层次： 硕士

2022 年 4 月

A Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for

Master Degree

**High-purity Germanium Gamma Spectrometry and
Radioactive Measurement**

Author: Yukun Yao

Supervisor: Yue Meng

School of Physics and Astronomy

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

April 19th, 2022

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全知晓本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文使用授权书

本人同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于：

公开论文

内部论文，保密 1 年 / 2 年 / 3 年，过保密期后适用本授权书。

秘密论文，保密 ____ 年（不超过 10 年），过保密期后适用本授权书。

机密论文，保密 ____ 年（不超过 20 年），过保密期后适用本授权书。

（请在以上方框内选择打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

摘要

星系速度分布曲线,引力透镜效应等天文观测现象揭示了宇宙中可能普遍存在暗物质。“大质量弱相互作用粒子”是热门的暗物质粒子候选者。中国的 PandaX-4T、美国 LUX-ZEPLIN 和意大利的 XENONnT 等实验都在以探测“大质量弱相互作用粒子”为主要内容之一。在暗物质实验中,本底水平是影响发现暗物质能力的重要因素。搭建探测器所用的材料,含 ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{232}Th 和 ^{238}U 等放射性核素。这些核素衰变时产生射线,当这些射线的在探测器中产生的能量沉积与实验所关注的能区重叠时,就会诱发实验的本底。精确测量探测器材料的放射性,挑选低放射性材料用来搭建探测器是控制这类本底的主要手段。高纯锗伽马谱仪具有极高的能量分辨率,是应用广泛的放射性测量技术。PandaX 合作组在锦屏地下实验室已搭建有两套高纯锗伽马谱仪 JP1 和 JP2,为暗物质实验作材料甄选和本底控制。最低可探测活度,也称灵敏度是高纯锗伽马谱仪的一个重要指标。暗物质探测器材料要求极低的放射性,当材料的放射性在灵敏度以下时,高纯锗伽马谱仪只能用统计方法,给出材料放射性的上限值,无法给出精确结果。随着暗物质实验对本底的要求更加严格,要求升级高纯锗伽马谱仪的灵敏度。高纯锗伽马谱仪的灵敏度由自身本底水平和探测效率决定,并和取数时间有关。PandaX 目前正计划从提升效率和降低本底两个方面,对灵敏度较好的 JP1 进行升级。本文主要介绍 PandaX 现有的两套高纯锗伽马谱仪的表现以及 JP1 的灵敏度升级方案,搭建双探头高纯锗伽马谱仪,灵敏度相比 JP1 预期可提升 2-4 倍。

关键词: 放射性测量, 高纯锗, 极低本底, 暗物质

ABSTRACT

Astronomical observations, for instance the galaxy velocity distribution curve, gravitational lensing effect, reveal that dark matter may be widespread in the universe. *Weakly interacting massive particles* are popular candidates for dark matter particles. Pandax-4T in China, LUX-ZEPLIN in the United States and XENONnT in Italy are all focusing on detecting *Weakly interacting massive particles*. In dark matter experiment, the background level is an important factor affecting the ability to detect dark matter. The materials used to build the detector include radionuclides ^{60}Co , ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U . When these nuclides decay, and produce rays, if the energy deposition of these rays in the detector overlaps with the energy region concerned by the experiment, it will induce the experiment background. The main means to control this background is to accurately measure the radioactivity of detector materials and select ultra-low radioactive materials to build detectors. High-purity germanium gamma spectrometry is a widely used radioactivity measurement technology because of its high energy resolution. PandaX cooperation has set up two high-purity germanium gamma spectrometry JP1 and JP2 in Jinping underground laboratory for material screening and background control. The minimum detectable activity, also known as sensitivity, is an important factor of high purity germanium gamma spectrometry. Dark matter detector material requires ultra-low radioactivity. If the radioactivity of the material is lower than the sensitivity, the high-purity germanium gamma spectrometry can only use statistical methods to give the upper limit of the material radioactivity, but can not give accurate results. As the dark matter experiment has more extremely requirements on the background, it is required to upgrade the sensitivity of high-purity germanium gamma spectrometry. The sensitivity of high purity germanium gamma spectrometry is determined by its own background level and detection efficiency, and is related to the counting time. PandaX is currently planning to upgrade JP1 sensitivity in terms of improving efficiency and reducing background. This paper mainly introduces the performance of JP1 and JP2, as well as the sensitivity upgrade plan of JP1, which is to build dual high-purity germanium gamma spectrometry. The expected sensitivity can be improved by 2-4 times compared with JP1.

Key words: radioactive measurement, HPGe, ultra-low background, dark matter

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论.....	1
1.1 暗物质的探测方式、本底来源和控制	1
1.2 材料放射性测量的方法	3
1.3 本章小结	5
第二章 PANDAX 实验高纯锗伽马谱仪.....	6
2.1 高纯锗伽马谱仪的原理	6
2.2 PANDAX 实验高纯锗伽马谱仪	7
2.2.1 JP1 和 JP2 的性能和探头结构	7
2.2.2 JP1 和 JP2 的刻度和探测效率模拟	8
2.2.3 JP1 和 JP2 的本底水平和灵敏度	15
2.3 JP1 测量腔室真空度和本底来源分析	18
2.3.1 JP1 测量腔室真空度	18
2.3.2 JP1 本底来源分析	21
2.4 高纯锗伽马谱仪测量材料放氦率	23
2.5 PMT R12699 放射性测量	26
2.6 本章小结	28
第三章 双探头高纯锗探测系统设计.....	30
3.1 JP3 型号选择和性能表现	31
3.2 屏蔽体设计	35
3.2.1 真空波纹管.....	35
3.2.1 铜腔体	36

3.2.3 移动机构	38
3.3 双探头高纯锗伽马谱仪安装	39
3.4 灵敏度预期提升效果	43
3.5 样品活度计算	46
3.6 伽马-伽马符合.....	47
3.7 本章小结	49
第四章 总结与展望.....	51
4.1 探测效率的提升空间	51
4.2 本底抑制空间.....	52
参 考 文 献.....	54
攻读硕士学位期间学术论文和科研成果目录	56
致 谢.....	57

第一章 绪论

1.1 暗物质的探测方式、本底来源和控制

星系速度分布曲线,引力透镜效应等天文观测现象揭示了宇宙中可能普遍存在暗物质,暗物质研究是现代物理的热门内容之一。观测表明普通物质可能只构成宇宙的4.9%,其余的26.8%为暗物质,68.3%为暗能量^[1-2]。暗物质与普通物质通过引力发生相互作用,没有电磁相互作用和强相互作用,有可能存在弱相互作用。“大质量弱相互作用粒子”(weakly interacting massive particles, WIMPs)是热门的暗物质粒子候选者。世界范围内,中国的 PandaX-4T、美国 LUX-ZEPLIN 和意大利的 XENONnT 实验都在以探测 WIMPs 为主要实验内容之一^[3-6]。实验上探测 WIMPs 按探测方式的不同可按图 1-1 分为三类:暗物质粒子湮灭产生标准模型粒子的间接探测;将标准模型粒子通过对撞机加速后碰撞产生暗物质粒子的加速器实验探测;测量暗物质粒子与标准模型粒子发生散射碰撞效应的直接探测。如位于中国锦屏山地下实验室的 PandaX-4T 是数吨量级气液二相氙暗物质探测器,用直接探测的方式探测暗物质。氙具有原子质量大、化学性质稳定、发光性能好、密度大等优势,是探测 WIMPs 的理想靶物质。图 1-2 是 PandaX-4T 暗物质探测器的主要结构,探测器的外罐和内罐材料是低放射性不锈钢,时间投影室(time projection chamber, TPC)放在内罐中,TPC 的上下部各有 169 和 199 支滨松公司生产的光电倍增管(photomultiplier tube, PMT) 阵列用来收集光信号,PMT 安装在铜板上,TPC 周围的 PTFE 反射板可以提高光收集效率^[3-4]。

在暗物质实验中,控制本底是一个重要环节。WIMPs 与标准模型粒子的碰撞微分散射截面小,因而 WIMPs 与普通物质发生相互作用的概率小,导致暗物质探测实验的真实信号率低。这要求暗物质实验的本底必须极低,否则将很难从大量的本底信号中分辨出真实的暗物质信号。实验的本底越低,探测到暗物质信号的潜力越大。暗物质的本底来源,可以分为三类。第一类是宇宙射线和太阳中微子;第二类是岩石、实验大厅的混凝土和空气中所含的放射性同位素衰变时所产生的射线;第三类是搭建探测器所用的材料,如 PMT、PTFE 反射板、内外罐和铜板等,含 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 、 ^{60}Co 和 ^{40}K 等放射性同位素。这些同位素在衰变时产生的射线在探测器中沉积的能

量，可能与暗物质的电子反冲本底和核子反冲本底能区 $1\text{-}30\text{ keV}_{ee}$ 重叠，因而诱发实验本底。

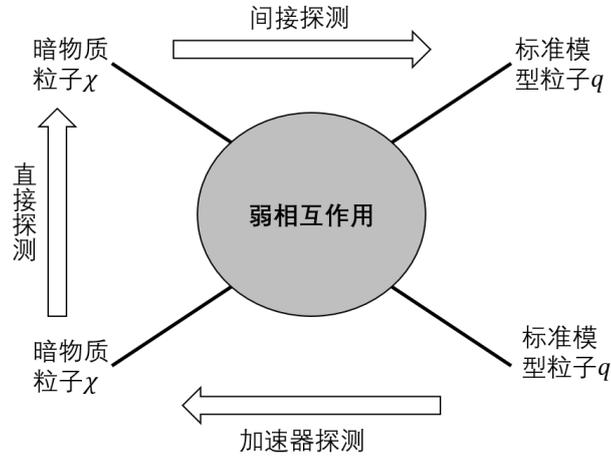


图 1-1 WIMPs 的探测方式^[7]。

Fig. 1-1 WIMPs detection methods.

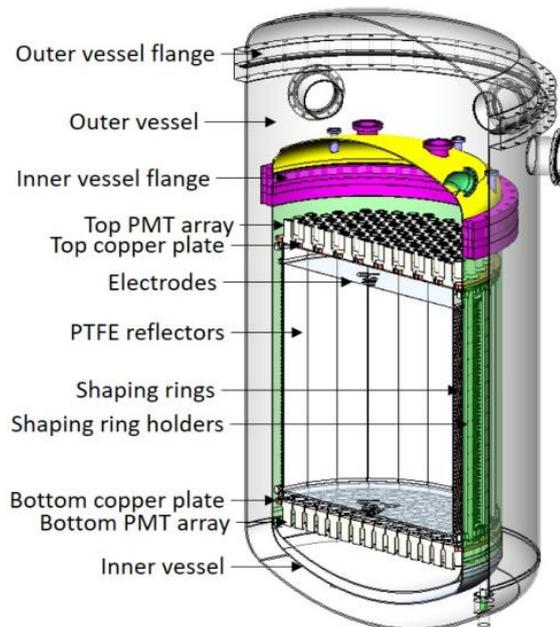


图 1-2 PandaX-4T 探测器^[3-4]。

Fig. 1-2 PandaX-4T detector.

针对不同的本底，有不同的控制方法。以 PandaX-4T 为例，针对第一类本底，探测器位于中国四川锦屏地下实验室，实验室上方覆盖有约 2.4 千米的岩层，有效的屏蔽了高能宇宙射线，实验室的缪子通量仅约 $3.53 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，大部分缪子是从山体

垂直入射^[8]。根据这个通量数据粗略计算,平均每周约有 2 个缪子打到 PandaX-4T 探测器外罐上。针对第二类本底,用直径约 10 m,高度约 11.5 m 的纯水屏蔽体,屏蔽岩石和空气中的放射性本底。根据伽马射线和物质的相互作用,材料的屏蔽能力和伽马射线能量有关,伽马射线能量越高屏蔽能力越弱。在 10-3000 keV 能区,材料的屏蔽系数大致反比于能量的 3.5 次方^[9]。常见核素衰变产生伽马射线能量最高的是 ²³²Th 链上的 2615 keV,水对这个伽马射线的指数屏蔽能力大约是 $1.52 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 。第三类由探测器材料产生的放射性本底靠近靶物质,是暗物质实验本底的重要来源之一,需要挑选放射性低的材料用来搭建探测器,这要求精确测量材料放射性。

1.2 材料放射性测量的方法

材料的放射性测量方法多种多样,商业上用得较多的是闪烁体探测器,如碘化钠探测器(NaI)和溴化镧(LaBr₃)探测器,还有半导体探测器如高纯锗伽马谱仪(high purity germanium detectors, HPGe)。高纯锗伽马谱仪能量分辨率高,对样品几何形状没有要求,不需要对样品进行破坏性加工,是应用广泛的方法之一。能量分辨率方面,在室温下,半导体材料的禁带宽度锗约 0.66 eV,硅约是 1.12 eV,砷化镓约是 1.42 eV,单位能量沉积下,锗可以产生更多数量的载流子,是制作高分辨率粒子探测器的理想材料^[9]。在几何形状方面,高纯锗伽马谱仪一般使用蒙特卡洛模拟获得探测效率,因而对样品的几何形状一般没有要求。一些方法在测量材料放射性时,需要对样品进行溶解或者切割,高纯锗伽马谱仪则一般不需要。能量分辨率高是高纯锗伽马谱仪的独特优势,图 1-3 是三种放射性测量技术的能谱图,表 1-1 对 ¹³⁷Cs 衰变产生的能量为 662 keV 的伽马射线的能量分辨率对比^[10],可见高纯锗伽马谱仪在能量分辨率方面优势极大。

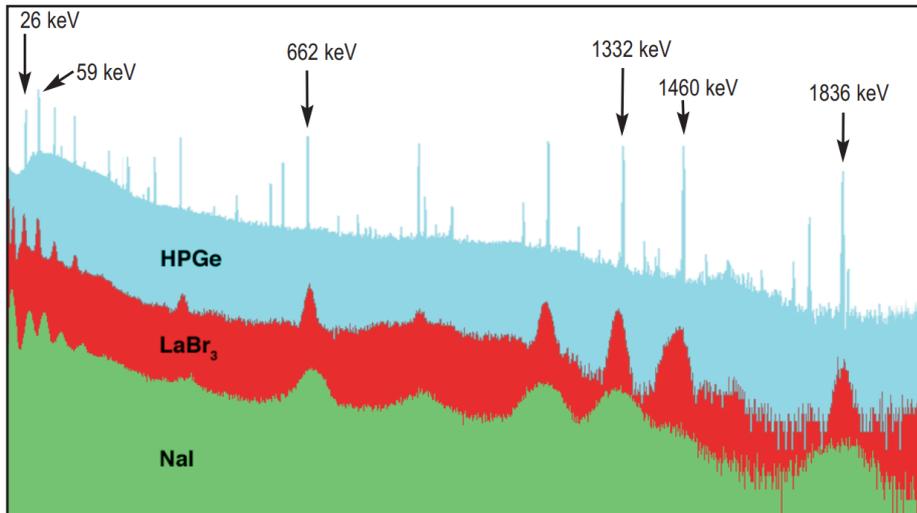


图 1-3 三种放射性测量方式能谱图。蓝色是高纯锗伽马谱仪，红色是溴化镧探测器，绿色是碘化钠探测器^[10]。

Fig. 1-3 Spectraums of three radioactive measure techniques. The blue one is HPGe, the red one is for LaBr₃ detector, the green one is for NaI detector.

表 1-1 三种放射性测量方式能量分辨率对比^[10]

测量方式	LaBr ₃	NaI	HPGe
能量分辨率 @ 662 keV (%)	2.8-4.0	7	0.2

高纯锗伽马谱仪测量材料放射性方面，能量分辨率高，但也有灵敏度限制。如果材料的放射性在灵敏度水平以下，则高纯锗伽马谱仪一般只能给出材料放射性的上限值，不能精确测量。如 PandaX 高纯锗伽马谱仪 JP1 对商用 PMTR12699 的测量结果，给出 ^{232}Th 前端链的放射性在 90%置信度下是 $< 0.46 \text{ mBq}\cdot\text{pcs}^{-1}$ ，但找到 PMT 的放射性本底来源，降低 PMT 放射性要求更精确的结果。为了提升发现暗物质的潜力，要求挑选放射等级低的材料用来搭建探测器。如果高纯锗伽马谱仪灵敏度不强，就无法满足暗物质实验的材料甄选要求。

PandaX 合作组正计划对 PandaX-4T 探测器做升级，放射性更低的探测器材料是一个重要要求。为满足暗物质实验的要求，需要升级高纯锗伽马谱仪的灵敏度，精确测量材料放射性，为暗物质实验甄选出更低本底的探测器材料。因而，我们计划对 PandaX 高纯锗伽马谱仪 JP1 做灵敏度升级。升级的主要内容有两部分：一是设计一台新的高纯锗伽马谱仪 JP3，和 JP1 形成对头放置的双探头高纯锗伽马谱仪，提升对

样品的探测效率；二是设计新的屏蔽体，降低屏蔽体对高纯锗伽马谱仪的本底贡献。从提升效率和降低本底两个方面，提升高纯锗伽马谱仪的灵敏度。

1.3 本章小结

章节 1.1 介绍了暗物质的 3 种主要测量方式：间接探测、加速器探测和直接探测。还介绍了暗物质实验的本底来源和控制方法：高能宇宙射线可以将实验室设在极深的地下，用天然岩层来屏蔽；岩石、实验大厅和空气中放射性同位素衰变产生的射线，可以用纯水屏蔽体屏蔽。对探测器的搭建材料中放射性同位素衰变产生射线，选择低放射性材料来搭建探测器，就要求对材料放射性进行测量。

章节 1.2 介绍了材料放射性测量常用的 3 种方法：溴化镧探测器、碘化钠探测器和高纯锗伽马谱仪，能量分辨率高是高纯锗伽马谱仪的极大优势。指出在暗物质实验的材料甄选和本底控制方面，高纯锗伽马谱仪的灵敏度水平是一个重要因素。为了选出更低放射性的材料用来搭建暗物质探测器，计划对 PandaX 实验高纯锗伽马谱仪 JP1 做灵敏度升级。

第二章 PandaX 实验高纯锗伽马谱仪

PandaX 合作组在锦屏地下实验室搭建好有两套高纯锗伽马谱仪 JP1 和 JP2，为暗物质实验做材料甄选和本底控制。自搭建好以来，两套伽马谱仪不间断运行，测定了材料的放射性。PandaX-4T 暗物质探测器的大部分材料，如 PMT、PTFE 反射板和内外罐材料等，都经过 JP1 或者 JP2 的测量^[4]。JP1 和 JP2 的测量结果，是 PandaX 实验本底分析的重要输入。本章内容将着重介绍 JP1 和 JP2 这两台探测器。

2.1 高纯锗伽马谱仪的原理

高纯锗伽马谱仪在原理上通过电子学设备收集电荷，确定入射粒子的能量。半导体锗构成 PN 结，在外电场作用下形成耗尽层，即灵敏区。锗晶体表面还会有非耗尽层即死层，不具有识别伽马射线的作用。常见高纯锗伽马谱仪工作时的灵敏体积可占锗晶体体积的 99% 以上，如 JP1 锗晶体表面的死层厚度小于 0.7 mm。材料中的放射性同位素衰变时产生伽马射线，伽马射线在穿过灵敏区时沉积能量，将锗原子中的电子激发的同时形成空穴，即锗晶体中的载流子是电子空穴对。电子空穴对沿外电场的不同方向漂移，最终被收集电荷的电子学设备收集到。激发形成的电子空穴对的数目，和伽马射线在锗晶体内沉积的能量成正比，因而收集到的电荷量也和沉积的能量成正比^[11]。单位沉积能量所激发的载流子数量由材料中的电离激发能所决定，服从泊松分布，材料的这一特性决定了探测器的能量分辨率。激发电子所需要的能量越低，则单位沉积能量所产生的载流子数量 N 就越多，相对统计误差 σ_N/N 就越小，能量分辨率就越高。能量分辨率高可以提升粒子探测器对伽马射线的识别能力，例如 ^{232}Th 链上有 338 keV， ^{238}U 链上有 352 keV 的伽马射线产生，能量相差仅 14 keV，能量分辨率不如高纯锗伽马谱仪的 NaI 探测器，较难区分这两个伽马射线。常温下半导体锗材料的禁带宽度仅 0.66 eV，是制作高分辨率粒子探测器的良好材料。

2.2 PandaX 实验高纯锗伽马谱仪

2.2.1 JP1 和 JP2 的性能和探头结构

表 2-1 总结了 PandaX 合作组两台高纯锗伽马谱仪 JP1 和 JP2 的型号、晶体尺寸、相对探测效率和能量分辨率等信息。JP1 的是 P 型同轴高纯锗伽马谱仪，锗晶体直径达 94 mm，厚度达 104 mm，对能量在 40-3000 keV 的伽马射线都具有极高的探测效率，是 JP1 的相对探测效率达 175%的重要原因。JP2 属于宽能型高纯锗伽马谱仪，锗晶体平面灵敏区达 3800 mm²，死层厚度薄，对低能伽马射线具有优良的探测效率。JP1 和 JP2 的探头的内部几何信息如图 2-1 所示。

表 2-1 JP1 和 JP2 的基本信息

谱仪名称	JP1	JP2
型号	ORTEC-GEM94100	CANBERRA-BE3830
锗晶体直径(mm)	94	35
锗晶体厚度(mm)	104	30
相对探测效率	175%	35%
半高全宽@ 662 keV (keV)	2.4	2.7
半高全宽@ 1332 keV (keV)	3.0	2.8

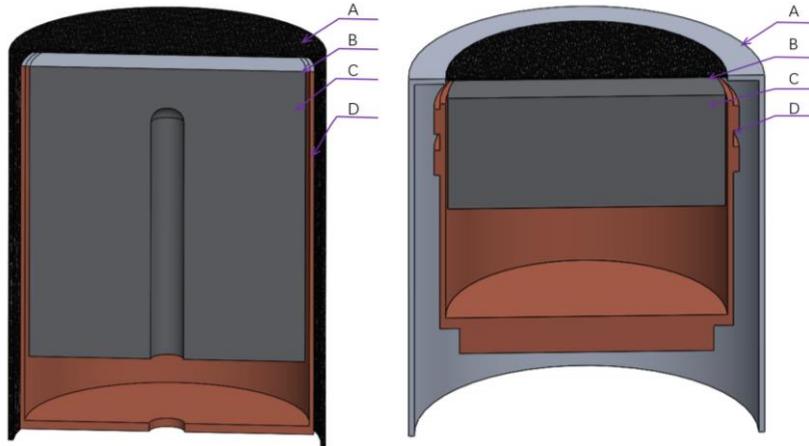


图 2-1 左图：JP1 的探头结构，其中 A 是外直径 108 毫米，顶部厚度 0.9 毫米，侧边厚度 1.6 毫米的碳纤维外壳；B 是厚度 0.9 毫米的麦拉膜片；C 是外直径 94 毫米，厚度 104 毫米的锗晶体，中心孔直径 11.2 毫米，总高度 89.9 毫米，距离外壳内表面 5 毫米；D 是外直径 100 毫米，高度 130 毫米，侧边厚度 1.5 毫米，底部厚度 3 毫米的铜支撑体。右图：JP2 的探头结构，其中 A 是厚度 1.5 毫米的铝外壳；B 是厚度 0.5 毫米的碳纤维窗口；C 是直径 71 毫米，厚度 31 毫米的锗晶体，距离外壳内表面 5 毫米；D 是侧边厚度 1.5 毫米的铜承载体，锯齿形状较厚的部分是 3 毫米。

Fig. 2-1 Left: JP1 detector head structure: A is the carbon fiber shell which outer diameter is 94 mm, top thickness is 0.9 mm, side thickness is 1.6 mm. B is a mylar film which thickness is 0.9mm; C is the Germanium crystal distanced 5mm to inner surface of the shell, which outer diameter is 94 mm, thickness is 104 mm, and the inner hole diameter is 11.2 mm, total height 89.9 mm. D is the copper holder which outer diameter is 100 mm, side thickness 1.5 mm, bottom thickness 3 mm. Right: JP2 detector head structure: A is the Aluminum shell which thickness is 1.5 mm; B is the carbon fiber window which thickness is 0.5 mm; C is the Germanium crystal distanced 5mm to inner surface of the shell, which outer diameter is 71 mm, thickness is 31 mm. D is the copper holder which side thickness is 1.5 mm, and the thicker part of the sawtooth is 3mm.

2.2.2 JP1 和 JP2 的刻度和探测效率模拟

高纯锗伽马谱仪在使用前，需要对仪器的关键参数进行刻度标定。高纯锗伽马谱仪用多道分析器记录取数数据，直接输出的文件是中的数据是计数-道址谱，需要转化为计数-能量谱。能量 E_i 的伽马射线激发的全能峰，在附近的计数分布如下

$$f(C) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{(C - C_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\} + q_0C + q_1, \quad (2-1)$$

其中 N 是全能峰总计数； E_i 所对应的多道道址是 C_i ； σ_i 是高斯分布的标准差，由高纯锗伽马谱仪的能量分辨率决定，且和能量 E_i 有关； q_0 和 q_1 是两个拟合常数，由本底或者其他更高能量的伽马射线在 E_i 附近的康普顿散射产生。图 2-2 是 JP1 和 JP2 取数时的全能峰计数分布用公式(2-1)拟合的结果，左图对应 ^{232}Th 衰变链中产生的 583 keV 的伽马射线，右图对应 ^{137}Cs 衰变产生的 662 keV 的伽马射线。能量 E 和道址 C 一般是线性关系，他们之间的关系如下

$$E = k \cdot C + b \quad , \quad (2-2)$$

其中 k 和 b 是表征能量和道址线性关系的两个常数。在时间 T^b 内取本底确定探测器的固本底计数 N^b ，在时间 T^s 内测量样品得到样品所产生的计数 N^s ，则样品的放射性活度 A 可以用下式计算

$$A = \frac{N^s/T^s - N^b/T^b}{Y_i \varepsilon_i m} \quad , \quad (2-3)$$

其中 Y_i 表示对应放射性同位素衰变时产生能量 E_i 的伽马射线的分支比， ε_i 表示高纯锗伽马谱仪对样品中产生的能量为 E_i 的伽马射线的探测效率， ε_i 可由蒙特卡洛模拟得到， m 表示样品质量， A 的单位是 $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

高纯锗伽马谱仪的刻度和蒙特卡洛模拟，可确定分辨率 σ 和能量 E 的关系，确定常数 k 和 b 的数值以确定能量和道址的对应关系，检验蒙特卡洛模拟得到的探测效率 ε 的准确性。按照经验总结^[7]，能量分辨率 $\sigma(E)$ 和能量 E 的关系一般服从公式下面公式

$$\sigma(E) = \sqrt{p_0 E^2 + p_1 E + p_2} \quad , \quad (2-4)$$

其中 p_0 、 p_1 和 p_2 是三个常数。应当指出，公式(2-4)只是经验规律，也有一部分文献使用其他的公式^[12]。测量经过标定的已知活度的放射源，对比高纯锗伽马谱仪的测量值和标定值之间是否一致，可以检验蒙特卡洛模拟得到的效率 ε 的准确性。

在高纯锗伽马谱仪稳定运行时，能量 E 和道址 C 的关系、能量分辨率 σ 和能量 E 的关系是固定的，和样品的几何形状、材料无关。对这两个关系的刻度不关心样品的放射性活度，既可以用标准放射源刻度，也可以用高放射性样品进行确定。图 2-3 和图 2-4 分别是 JP1 和 JP2 的能量-道址、能量分辨率-能量关系。在这两个图中 JP1 数据来源于 2021 年 2 月 2 号测量的 ^{238}U 、 ^{40}K 放射性高的灰尘样品，和 2021 年 2 月 4 号刻度的放射源 ^{60}Co 、 ^{137}Cs ，以及 2021 年 11 月 2 号测量的 PandaX 三号钍源 ^{232}Th ；JP2 数据来源于 2020 年 11 月 3 号测量的 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 放射性都高的碎屑类样品，和 2021 年 2 月 4 号刻度的放射源 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 。

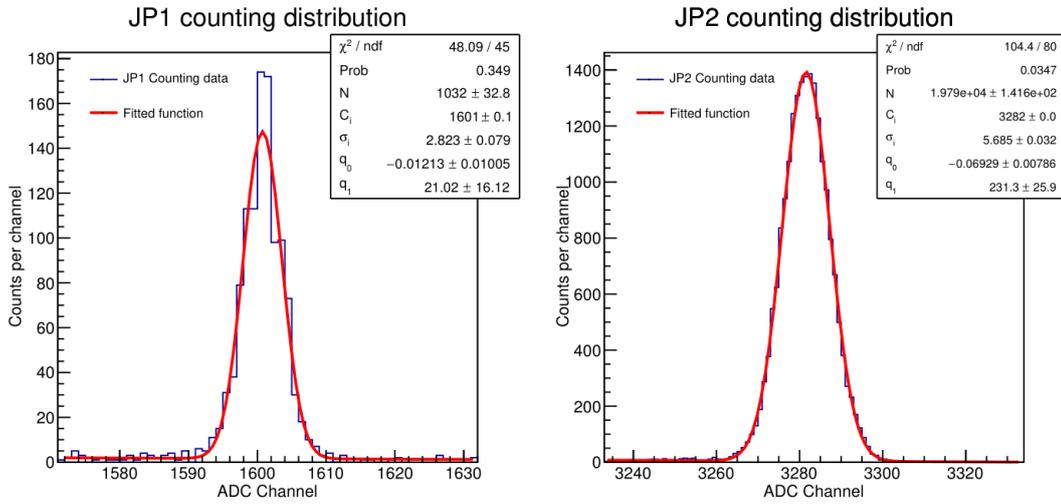


图 2-2 左图：高纯锗伽马谱仪全能峰用公式(2-1)拟合结果。左图：JP1，对应 ^{232}Th 的 583 keV 伽马射线。右图：JP2，对应 ^{137}Cs 的 662 keV 伽马射线。

Fig. 2-2 Fitting results of HPGe full absorption peak with formula (2-1). Left: JP1, corresponding to 583 keV gamma line from ^{232}Th . Right: JP2, corresponding to 662 keV gamma line from ^{137}Cs .

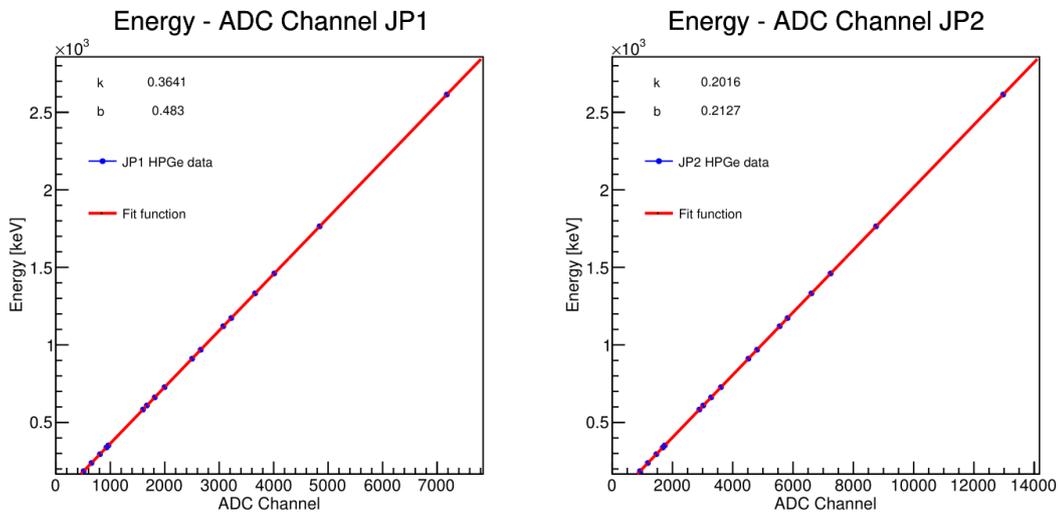


图 2-3 高纯锗伽马谱仪能量道址关系和用公式(2-2)拟合结果。左图：JP1。右图：JP2。

Fig.2-3 Fitting results of HPGe energy and ADC channel with formula (2-2). Left: JP1. Right: JP2.

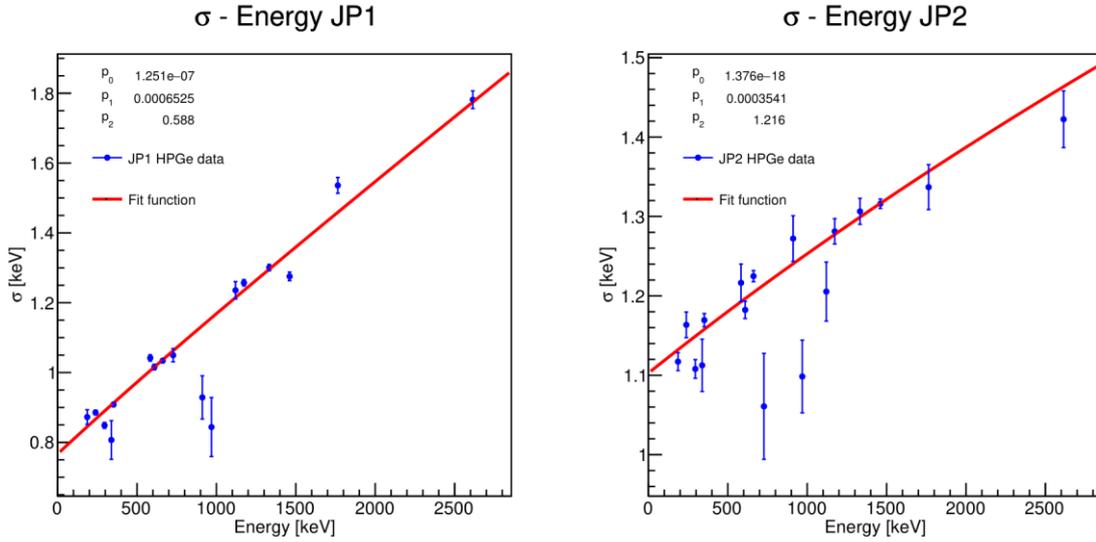


图 2-4 高纯锗伽马谱仪能量分辨率用公式(2-4)拟合结果。左图：JP1。右图：JP2。

Fig. 2-4 Fitting results of HPGe energy resolution with formula (2-4). Left: JP1. Right: JP2.

公式(2-3)中的效率 ε 是通过蒙特卡洛模拟得到的^[13]，蒙特卡洛模拟的准确性需要经过检验。可以通过测量放射性活度经过标定的标准放射源，对比高纯锗伽马谱仪给出的活度值和标定值是否一致来检验。蒙特卡洛模拟和几何位置密切相关，因而还要求标准放射源的几何结构是清晰的。在 2021 年 2 月 4 号，用标准放射源 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 和 ^{228}Th 对 JP1 和 JP2 进行刻度。三种刻度源的几何结构见图 2-5，标定的活度值见表 2-2。按图 2-5 建立蒙特卡洛模型进行模拟，本文的模拟软件均是建立在 Geant4 基础上的 BambooMC^[14]。JP1 和 JP2 的刻度结果见表 2-3，表 2-3 中的效率误差指相对误差 ε_r ，计算方法如下

$$\varepsilon_r = \frac{|A_i - A|}{A} , \quad (2-5)$$

其中 A_i 为用放射性同位素的一个伽马衰变模式用公式(2-3)计算出来的活度值， A 指表 2-2 中放射性同位素在刻度日期的标定活度值。由表 2-3 可知，JP1 效率误差最大约 6%，JP2 最大约 12%。

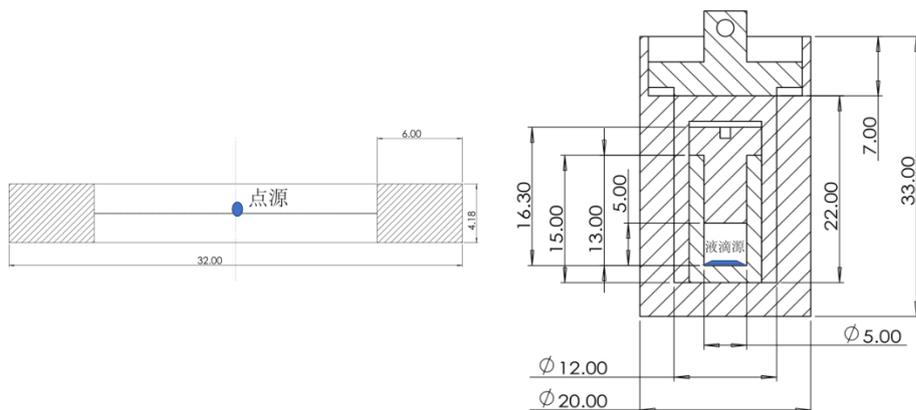


图 2-5 标准放射源几何。左图： ^{60}Co 、 ^{137}Cs 点源放在塑料载体上，其中 ^{137}Cs 源偏心 1.77 毫米。右图： ^{228}Th 液滴源装在含盖高 16.3 毫米的内芯筒中，外筒总高 33 毫米，内芯筒和外筒均为不锈钢，中间用树脂密封。

Fig. 2-5 Geometry of standard radioactive source. Left: point sources ^{60}Co and ^{137}Cs are placed on a nylon film and ^{137}Cs is 1.77 mm shift to the center. Right: liquid ^{228}Th source is placed on an inner barrel high 16.3 mm, the total height of outer barrel is 33 mm, the inner and outer barrel are both stainless steel material, they are sealed with a resin layer.

表 2-2 刻度用放射源标定活度值

核素	活度标定日期	标定活度 (Bq) (不确定度 2.5%)	刻度日期活度 (Bq)
^{60}Co	2011-12-1	8111	2425
^{137}Cs	2011-11-4	7684	6207
^{228}Th	2017-6-1	3148	829

表 2-3 JP1 和 JP2 效率刻度结果(日期 2021-2-4)

核素	伽马射线 能量(keV)	JP1 刻度结果		JP2 刻度结果	
		测量活度(Bq)	效率误差	测量活度(Bq)	效率误差
^{60}Co	1173	2469 ± 20	1.8 %	2558 ± 37	5.5 %
	1332	2458 ± 21	1.4 %	2507 ± 38	3.4 %
^{137}Cs	662	6364 ± 42	2.7 %	6930 ± 50	11.6 %
^{228}Th	239	611 ± 2	1.4 %	635 ± 2	1.2%
	583	591 ± 2	4.8 %	650 ± 1	3.4%
	2615	660 ± 3	6.2 %	707 ± 2	11.2 %

对几何复杂的样品,如图 2-6(a) 是 JP1 测量的 PandaX-4T 用螺丝,螺丝摆放方式过于复杂,由图片重建真实几何几乎是不可能的。为此,我们建立了如图 2-6 中(b)、(c)和(d)三种不同的摆放方式模拟探测效率,得到摆放方式引起的蒙特卡洛模拟误差小于 4%。对其他复杂几何的样品,也可以建立几种接近的几何模型模拟,分析因为几何无法真实重建时带来的误差。

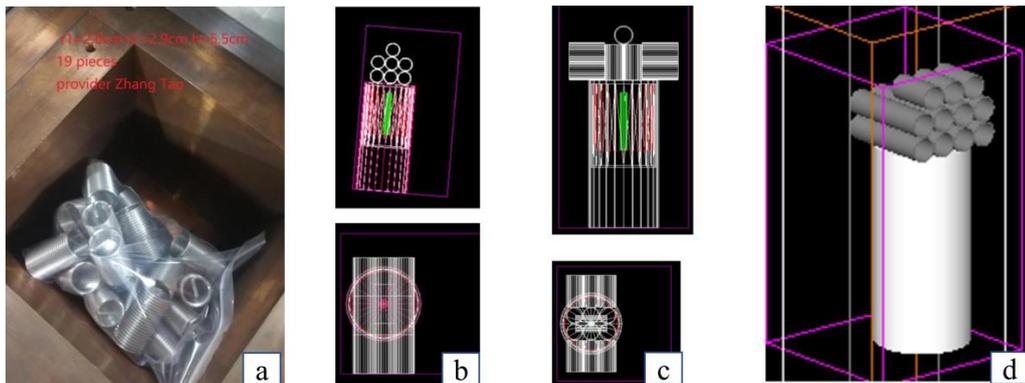


图 2-6 复杂几何样品。(a)是真实几何。(b)、(c) 和 (d)是蒙特卡洛模拟几何。

Fig. 2-6 Complex geometry sample. (a) is true geometry. (b), (c) and (d) are Monte Carlo geometry.

模拟探测效率时,可以使用能量固定的单能伽马射线去模拟,也可以直接模拟放射性同位素的衰变。两种方法得到的探测效率考虑分支比后应该是一致的,使用单能伽马射线在相同的模拟量下可以获得更大的统计量,减小统计误差。例如, ^{40}K 衰变

时以 10.66% 的分支比产生能量为 1461 keV 的伽马射线, 假设模拟 10^5 个能量为 1461 keV 的伽马粒子得到 10^3 个全能峰, 那么模拟同样模拟 10^5 个 ^{40}K 的衰变, 应该能得到 $10^3 \times 10.66\%$ 个全能峰。如果放射性核素存在伽马级联衰变^[12], 即在一次衰变时同时产生两个或者两个以上的伽马粒子, 两种方法的探测效率产生差异。对存在伽马级联衰变的核素, 同位素衰变产生的两个伽马粒子有可能同时在高纯锗伽马谱仪中产生全能峰, 这称为伽马-伽马符合(γ - γ coincidence)。使用单能伽马粒子将不能模拟伽马-伽马符合事例。根据刻度结果, 高纯锗伽马谱仪实际使用中存在伽马-伽马符合的情况。用 ^{60}Co 放射源刻度高纯锗伽马谱仪时, 在 2505 keV 处可以看到很明显的全能峰, 但 ^{60}Co 衰变产生能量为 2505 keV 的伽马射线的分支比仅是可忽略的 2.0×10^{-8} 。由此可见, 2505 keV 处的全能峰是 1173 keV 和 1332 keV 两个伽马射线的伽马-伽马符合造成的。

图 2-7 中, 左图中蓝色点是使用单能伽马粒子模拟的全能峰计数, 红色散点是使用放射性同位素模拟(考虑分支比)后得到的全能峰计数。两种情况大部分一致, 但是对由 ^{208}Tl 衰变产生的 583 keV、2615 keV, ^{214}Bi 衰变产生的 609 keV、1120 keV、1764 keV, ^{60}Co 衰变产生的 1173 keV、1332 keV 这些伽马射线, 存在明显差异, 而且使用放射性同位素模拟普遍比使用单能伽马射线模拟的低。经过分析, 这三个核素的共同点是存在伽马级联衰变模式, 其他一致的不存在伽马级联衰变, 把模拟到的伽马-伽马符合事例重新计算回去时, 得到的结果如图 2-7 中右图。

综合, 使用单能伽马射线去模拟探测效率, 优势是可以把分支比的影响忽略, 相同的模拟量下获得较大的统计数, 减小统计误差。但对存在伽马级联衰变的放射性同位素, 模拟放射性同位素的衰变更加准确。

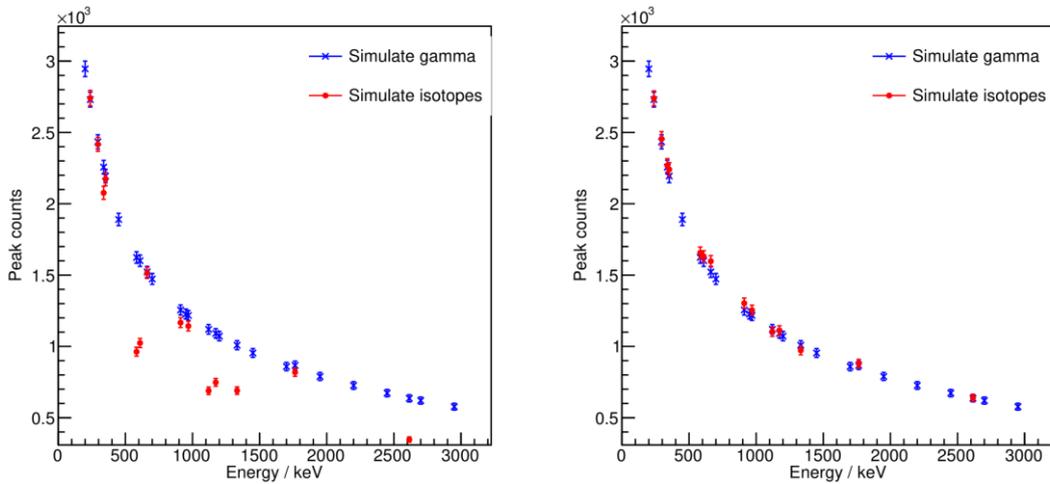


图 2-7 模拟单能伽马射线和模拟放射性同位素的差异。左图：蓝色点是使用单能伽马射线模拟得到的全能峰计数，红色点是考虑分支比后，用放射性同位素模拟得到的全能峰计数。右图：蓝色点和左图一样，红色点是把伽马-伽马符合的事例计算回去的计数。

Fig. 2-7 Differences between simulated single energy gamma lines and isotopes. Left: the blue dots are full absorption peaks simulated by single energy gamma lines, and the red dots are the full absorption peaks simulated by isotopes considering the branching ratio. Right: the blue dots are the same as the left one. The red dot is the counts that considered $\gamma - \gamma$ coincidence.

2.2.3 JP1 和 JP2 的本底水平和灵敏度

本底水平是是高纯锗伽马谱仪的重要指标，和高纯锗伽马谱仪的灵敏度密切相关。高纯锗伽马谱仪一般要配合屏蔽体使用，以降低本底。如果没有屏蔽体，则大厅中极高的环境本底，将导致高纯锗伽马谱仪只能测量高放射性的样品，无法为暗物质实验挑选低放射性的材料。图 2-8 是 JP1 的屏蔽体结构示意图，主要结构为：S1 是 5 毫米厚的不锈钢真空外壳，包裹整个屏蔽体；S2 是总厚度 20 厘米由铅砖堆砌而成的铅屏蔽体；S3 是总厚度 10 厘米由若干铜块堆叠而成的铜屏蔽体；S4 是长 20 厘米×宽 20 厘米×高 35 厘米的真空测量腔室；S5 是高纯锗伽马谱仪 JP1 的探头。20 厘米的铅屏蔽体，屏蔽大厅中的环境伽马射线。铅砖中的放射性同位素 ^{210}Pb 衰变会产生 46.5 keV 的伽马射线，10 厘米厚由高纯度的无氧电解铜组成的铜屏蔽体，进一步屏蔽大厅中穿过铅屏蔽体的伽马射线的同时屏蔽铅砖产生的伽马射线。高纯锗伽马谱仪的探头放在真空测量腔室中，取数时样品一般放在探头正上方。JP2

的屏蔽体结构和 JP1 类似。

根据资料^[15], 将 JP1 和 JP2 的本底水平和世界上各大实验室的高纯锗伽马谱仪做对比, 结果如表 2-4。可以看到两台高纯锗伽马谱仪的本底水平在世界范围内均有一定竞争力。

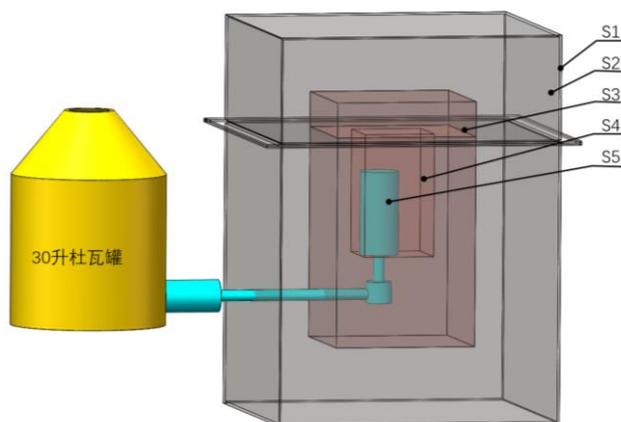


图 2-8 JP1 的屏蔽体结构。S1 是厚度 5 mm 的不锈钢真空外壳, S2 是厚度 20 cm 的铅屏蔽体, S3 是厚度 10 cm 的铜屏蔽体, S4 是长 20cm×宽 20 cm×高 35cm 的真空测量腔室, S5 是 JP1 探头。

Fig. 2-8 Shielding structure of JP1. S1 is the stainless-steel shell which thickness is 5 mm, S2 is the lead shielding structure which thickness is 20 cm, S3 is the copper shielding structure which thickness is 10 cm, S4 is the vacuum measuring chamber with 20 cm (length) × 20 cm (width) × 20 cm (height), S5 is the detector head of JP1.

表 2-4 各实验室高纯锗伽马谱仪本底水平对比 单位: Counts·kgGe⁻¹·Day⁻¹

实验室	HPGe	60-2700 keV 积分	²⁰⁸ Tl 2615 keV	²¹⁴ Bi 609 keV	⁶⁰ Co 1332 keV	⁴⁰ K 1461 keV
CJPL	JP1	640	2.6	3.6	0.8	5.3
	JP2	1039	< 2.9	6.5	< 1.1	9.0
Canfranc	GeOroel	165.3	0.4	2.9	0.1	0.4
	Asterix	189.2	0.2	2.1	0.5	0.3
	GeAnayet	473.3	3.2	1.9	0.1	0.6
	GeLatuca	342.0	3.9	2.8	0.2	0.8
	GeTobazo	491.7	3.8	2.8	0.4	0.7
	GeAspe	477.9	3.8	2.2	0.3	0.9
Kamioka	-	111.1	0.14	0.49	0.44	0.57
Boulby Underground	Belmont	150.0	0.3	1.8	1.1	0.9
	Merrybent	255.5	0.4	7.1	1.0	1.3
	Lunehead	674.6	2.8	8.5	2.0	8.8
实验室	HPGe	40-2700 keV 积分	²⁰⁸ Tl 583 keV	²¹⁴ Bi 352 keV	⁶⁰ Co 1332 keV	⁴⁰ K 1461 keV
CJPL	JP1	696	3.1	3.7	0.8	5.3
	JP2	1099	5.9	11.8	<1.1	9.0
Gran Sasso	GeBer	3686	1.5	3.3	-	4.6
	GeMi	611	2.1	5.6	-	5.2
	GePv	482	2.1	2.8	-	3.2
	GsOr	469	0.76	2.4	-	4.3
	GePaolo	226	0.38	0.83	-	1.4
	GeCris	87	< 0.29	< 0.39	-	1.0
	GeMPI	30	< 0.15	< 0.20	-	0.36
	GeBer	3686	1.5	3.3	-	4.6

除了本底水平外，探测效率也影响高纯锗伽马谱仪的灵敏度。最低可探测活度 (minimum detectable activity, MDA)，即灵敏度用下面公式计算^[16]

$$MDA = \frac{1.64\sqrt{2}\sigma_b}{Y\varepsilon T}, \quad (2-5)$$

其中 T 是样品的取数时间， σ_b 是在取数时间内本底的统计误差， ε 是高纯锗伽马谱仪的探测效率， Y 是对应伽马衰变模式的分支比，对存在多个伽马衰变模式的，灵敏度可用加权平均的方法计算。图 2-9 是 JP1 和 JP2 的两台探测器对直径 10 厘米，厚度 3 厘米的 PTFE 样品的灵敏度随时间变化曲线，其中 JP1 使用 12.6 天的本底取数数据计算，JP2 使用 12.2 天的本底取数数据计算。

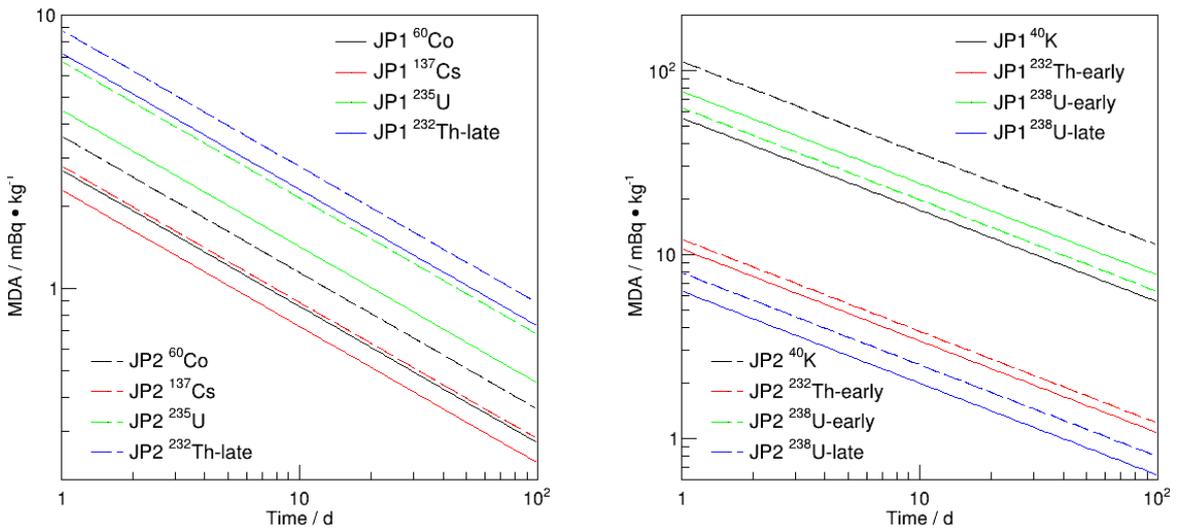


图 2-9 JP1 和 JP2 对直径 10 cm，高度 3 cm 的 PETF 样品，不同核素灵敏度随时间变化曲线，其中实线代表 JP1，虚线代表 JP2。

Fig. 2-9 JP1 and JP2 MDA curves of different isotopes for PTFE sample with diameter 10 cm and height 3 cm, where the solid lines are JP1 and the dash lines are JP2.

2.3 JP1 测量腔室真空度和本底来源分析

2.3.1 JP1 测量腔室真空度

测量腔体内残余氦气导致高纯锗伽马谱仪的本底。JP1 的不锈钢真空外壳连接有真空计，可以监测整个结构内部的真空度。经过约 3-4 小时的抽真空时间，真空计显示的真空度可达约几十帕左右的量级。由图 2-8 可以看到，真空测量腔室和不

锈钢外壳是通过 20 厘米厚的铅屏蔽体和 10 厘米厚的铜屏蔽体连接的，铅砖和铜块堆叠严实，缝隙小流阻大，内部的真空测量腔室的实际真空度是否能达到真空计显示的几十帕的量级是不确定的。铅砖和铜块的缝隙数量多，结构复杂，用真空理论计算出真实流阻是不现实的。做为直观上的概念，空心圆管的流阻反比于直径的 4 次方，且在接近管道的表面处上升很快。

由真空理论，一个腔体在真空度为 100 千帕到 200 帕，气体分子属于粘滞流状态时，经过抽真空时间 t 后，腔体内的压强 $P(t)$ 可以用下面公式描述

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left\{-\frac{S_e}{V}t\right\}, \quad (2-6)$$

其中 P_0 是开始抽真空时的腔体压强， V 是腔体体积， S_e 是作用在腔体内的有效抽速，单位是立方米每小时^[17-18]。假设腔体内的氦气被等比例的抽走，则腔体内的氦气浓度 $A(t)$ 可以用下式描述

$$A(t) = A_0 \cdot \exp\left\{-\frac{S_e}{V}t\right\}, \quad (2-7)$$

其中 A_0 是开始抽真空时空气的氦气浓度，单位是 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在测量低放射性样品时，JP1 探测到由氦气产生的伽马射线的计数率可以用公式

$$R(t) = R_0 \exp\left\{-\frac{S_e}{V}t\right\} + R_1, \quad (2-8)$$

描述，其中 R_0 是开始抽真空时空气氦的贡献， R_1 是包括样品在内的其他结构的贡献。放射性不同的样品，公式(2-8)中 R_0 和 R_1 的数值可能不一样，但指数衰减速率应该是一样的。我们选取 JP1 的三个低放射性样品，对其开始抽真空时一段时间内的 ^{222}Rn 子体衰变产生的 352 keV 的伽马射线的计数率做拟合，得到的指数衰减系数确实一致，如图 2-10 所示。

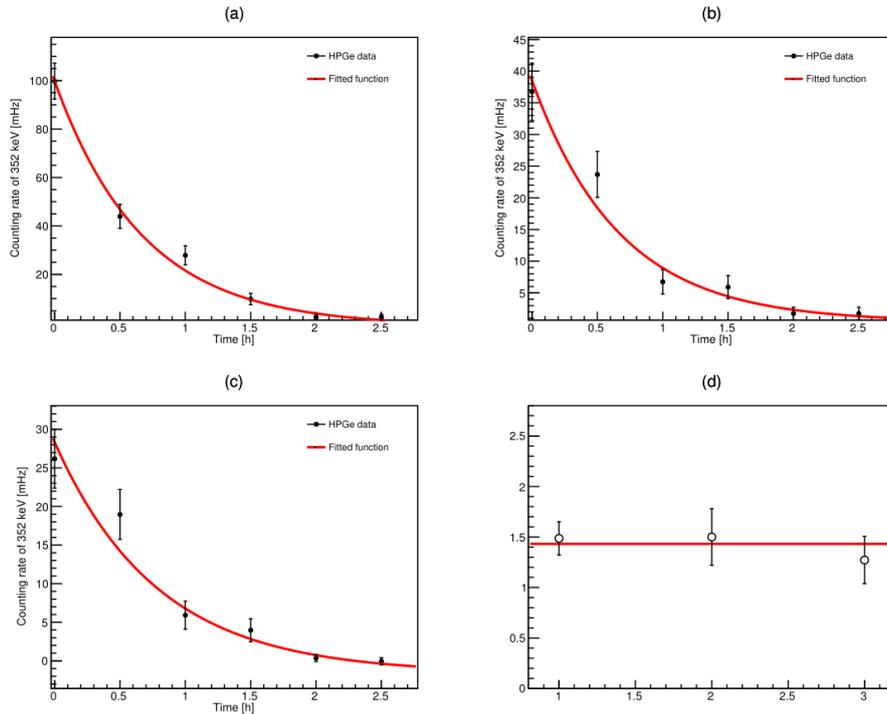


图 2-10 氡计数率衰减系数。(a)、(b)和(c)的 X 轴是抽真空时间，Y 轴是氡子体的 352 keV 的伽马射线的计数率，拟合函数是 $f(x) = p_0 e^{-kx} + p_1$ 。(a)图样品是 2020-5-3 测量的特氟龙样品。(b)图样品是 2020-7-31 测量的小铜柱。(c)图样品是 2020-9-19 测量的不锈钢绳。(d)图中数据点是 (a)、(b)和(c)拟合得到的衰减系数 k ，平均值是 $1.43 \pm 0.12 \text{ h}^{-1}$ 。

Fig. 2-10 Radon counting rate attenuation coefficient. For (a), (b) and (c), X axis is time of pumping vacuum, Y axis is the counting rate of 352 keV gamma line from radon daughter, the fitted function is $f(x) = p_0 e^{-kx} + p_1$. Picture (a) is Teflon sample counted on 2020/5/3. Picture (b) is small copper tube sample counted on 2020/7/31. Picture (c) is stainless steel cable counted on 2020/9/19. Data of picture (d) is the fitted results of attenuation coefficient k of picture (a), (b) and (c), its mean value is $1.43 \pm 0.12 \text{ h}^{-1}$.

图 2-10 中 k 的数值是 1.43 h^{-1} ，JP1 测量腔室的体积为 $1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，可算得对内腔体的有效抽速 S_e 值为 $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，JP1 所用真空泵抽速为 10 到 $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，可见其有效利用率仅千分之一到千分之二。原因就是铅砖和铜块的缝隙小，流阻大。一般抽真空时间 3.5 小时后，JP1 氡的计数率达到平衡不再变化，根据公式(2-6)可以推算 3.5 小时后的压强约 660 Pa。锦屏氡气浓度按 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 算，可以推算测量腔室在

3.5 小时后氦气浓度约 $1.2-1.3 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这个是后续对 JP1 的本底来源做分析的依据。当然，3.5 小时后腔体内的氦气仍然有可能继续被抽走，JP1 氦计数率不再变化的原因也有可能是氦气贡献比其他结构的贡献可忽略。但一方面，流阻和压强有关，其他条件不变时，压强越低，流阻越大，即 3.5 小时后缝隙的流阻将继续增大。另一方面，当腔体压强小于 200 帕时，气体分子不再属于粘滞流而是湍流状态，公式(2-6)将不再适用，压强下降的速度将更慢^[17-18]。基于此，下一小节对 JP1 的本底来源做分析时，假设内腔体氦气浓度在平衡时约 $1.2-1.3 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.3.2 JP1 本底来源分析

正确理解高纯锗伽马谱仪的本底来源，有助于在降低本底水平时找到正确的方向。用蒙特卡洛模拟各结构在高纯锗伽马谱仪内产生的能谱，和实际本底能谱比对，可以对高纯锗伽马谱仪的本底来源做合理分析。我们按照 JP1 的屏蔽体的放射性^[7]，和上一小节确定的 JP1 的真空测量腔室的氦气浓度，模拟得到 JP1 的各结构贡献能谱如图 2-11，从图 2-11 中提取主要能峰的计数率结果如表 2-5。表 2-5 中的结构代码对应图 2-8，S3 是 10 cm 厚的铜屏蔽体，S4 是腔体内的氦气贡献，S5 是高纯锗伽马谱仪的探头封装材料。由此可以确定，JP1 的 ^{60}Co 和 ^{40}K 本底主要来自于铜屏蔽体， ^{232}Th 本底铜屏蔽体和高纯锗伽马谱仪的探头封装材料的贡献在上限值内都不可忽略， ^{238}U 本底铜屏蔽体和腔体氦气在上限值内均不可忽略， ^{210}Pb 本底则几乎全部来自于探头封装材料。本节对 JP1 的本底分析，是下一章 JP1 灵敏度升级计划中，本底抑制方法的重要依据。

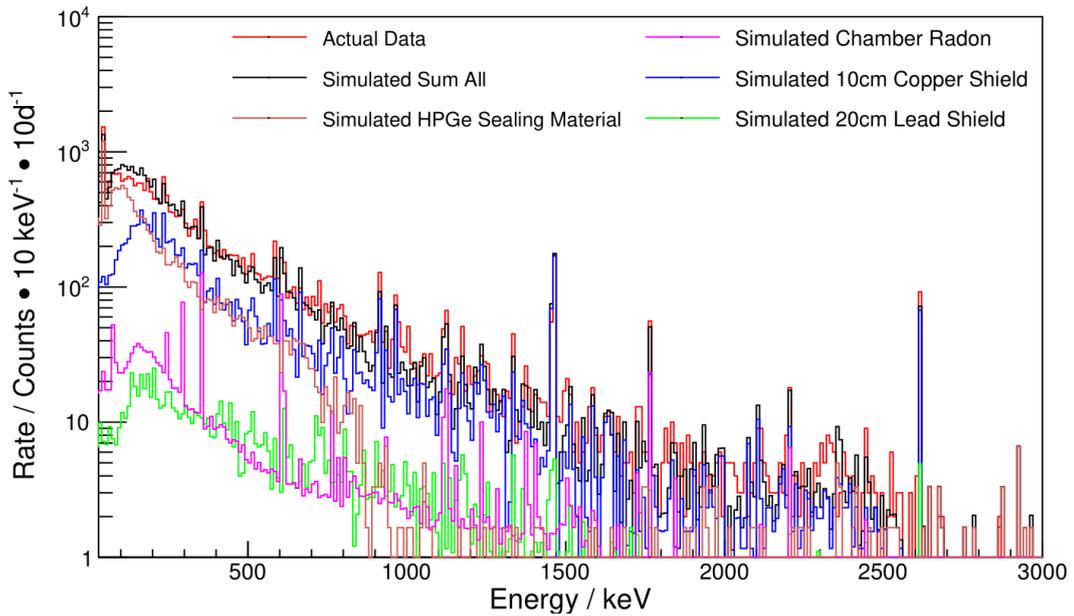


图 2-11 JP1 的本底来源蒙特卡洛模拟。红色直方图是实测本底，黑色是各材料贡献模拟之和。

Fig. 2-11 Monte Carlo simulation of JP1 background source. The red histogram is the actual background data, the black one is simulation sum of all material contributions.

表 2-5 JP1 放射性本底来源，表格中数据上限对应 90%的置信度

核素	伽马射线能量 (keV)	JP1 实际计数率	模拟材料贡献计数率
^{210}Pb	47	0.953 ± 0.040	S5: 0.916 ± 0.038
^{60}Co	1173	0.027 ± 0.007	S3: 0.020 ± 0.009
	1332	0.025 ± 0.007	S3: 0.019 ± 0.009
^{40}K	1461	0.220 ± 0.016	S3: 0.219 ± 0.055
$^{232}\text{Th-early}$	338	0.079 ± 0.016	S3: < 0.034 , S5: < 0.061
	911	0.113 ± 0.013	S3: < 0.072 , S5: < 0.077
	969	0.061 ± 0.01	S3: < 0.048 , S5: < 0.039

续表 2-5

核素	伽马射线能量 (keV)	JP1 实际计数率	模拟材料贡献计数率
$^{232}\text{Th-late}$	239	0.324 ± 0.023	S3: < 0.103, S5: < 0.219
	583	0.128 ± 0.015	S3: < 0.089, S5: < 0.077
	2615	0.107 ± 0.013	S3: < 0.048, S5: < 0.025
$^{238}\text{U-early}$	186	0.126 ± 0.018	S3: < 0.044, S5: < 0.058
$^{238}\text{U-late}$	295	0.086 ± 0.014	S3: < 0.065, S4: < 0.023
	352	0.154 ± 0.017	S3: < 0.092, S4: < 0.044
	609	0.148 ± 0.015	S3: < 0.064, S4: < 0.037

2.4 高纯锗伽马谱仪测量材料放氡率

^{226}Ra 和 ^{222}Rn 都是 ^{238}U 衰变链上的子体, ^{226}Ra 衰变产生 ^{222}Rn , 材料中的 ^{222}Rn 一部分会扩散到空气中。空气中的 ^{222}Rn 部分来源于材料中的 ^{226}Ra 衰变后以气体形式进入空气的 ^{222}Rn 。测量材料放出 ^{222}Rn 的比率, 不仅对暗物质实验重要, 同时因为 ^{222}Rn 是一种致癌性物质, 对环境监测也有意义^[19]。

材料中的 ^{222}Rn 原子数变化可以用下面方程描述

$$dN_{\text{Rn}} = -\lambda N_{\text{Rn}} dt + A_{\text{Ra}} dt, \quad (2-9)$$

在单位时间 dt 内, ^{222}Rn 原子数变化 dN_{Rn} 由两项构成: 一项是由于 ^{222}Rn 自身衰变减少 $\lambda N_{\text{Rn}} dt$, λ 是 ^{222}Rn 的衰变常数, 数值约是 $7.54 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$; 另一项是由 ^{226}Ra 衰变增加 $A_{\text{Ra}} dt$, A_{Ra} 是 ^{226}Ra 放射性活度, 单位为 Bq。 ^{226}Ra 的半衰期约 1600 年, 在测量时间内 A_{Ra} 可以认为是常数。方程(2-9)的解如下

$$N_{\text{Rn}}(t) = \left[N_{\text{Rn}}(0) - \frac{A_{\text{Ra}}}{\lambda} \right] e^{-\lambda t} + \frac{A_{\text{Ra}}}{\lambda}, \quad (2-10)$$

其中 $N_{\text{Rn}}(0)$ 表示 $t = 0$ 时材料中的 ^{222}Rn 原子数。相应的 ^{222}Rn 活度随时间变化 $A_{\text{Rn}}(t)$ 如下面公式

$$A_{\text{Rn}}(t) = [A_{\text{Ra}} - A_{\text{Rn}}(0)](1 - e^{-\lambda t}) + A_{\text{Rn}}(0), \quad (2-11)$$

用经过时间足够长时的平衡氡活度与初始氡活度差值，与材料中的 ^{226}Ra 活度之比来表征材料的放氡率 η ，即

$$\eta = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} A_{\text{Rn}}(t) - A_{\text{Rn}}(0)}{A_{\text{Ra}}} , \quad (2-12)$$

用高纯锗伽马谱仪测量材料中氡活度随的时间变化曲线，用公式(2-11)做拟合，就可以计算材料的放氡率。图 2-12 是用 JP2 的测量一种 ^{238}U 含量高的灰尘类样品时，得到的氡气活度变化曲线和拟合结果，由此可以得到这个材料的放氡率 η 约是 10.9%。图中的活度值，大约是取间隔 17 小时的平均数据来计算氡活度的瞬时值。这个灰尘类样品也在阿拉巴马大学(University of Alabama, UA)用高纯锗伽马谱仪 Ge-II 进行过同样的放氡率测量^[20]，表 2-6 是 JP2 和 UA Ge-II 的测量结果对比，表中 p_0 和 p_1 对应图 2-12 中氡活度随时间变化的拟合结果。两台高纯锗伽马谱仪对同一种材料测得的放氡率和 ^{226}Ra 及 ^{222}Rn 绝对活度接近，还有 $\lim_{t \rightarrow \infty} A_{\text{Rn}}(t) \approx A_{\text{Ra}}$ 这一结果，说明用高纯锗伽马谱仪测量材料的放氡率是可行的，图中样品是 JP2 在 2021-7-17 测量的。

材料中的 ^{222}Rn 以气体的形式释放到空气中，如果用高纯锗伽马谱仪测量放氡率时不对样品作密封处理， ^{222}Rn 将会扩散到真空测量腔室中，并随空气被真空泵抽走。这样高纯锗伽马谱仪只能测量到被束缚在样品中的 ^{222}Rn ，而不能得到公式(2-11)所描述的指数增长曲线。处理的方法是先把样品放到真空烤箱中，在烘烤的同时抽真空 24 小时，确保样品中能释放到空气中的 ^{222}Rn 都排干净。然后，样品应该快速放入专门的隔氡膜中密封好，以确保材料中的 ^{222}Rn 不会扩散到空气中。同时记录好密封时间，公式(2-11)中 $t = 0$ 的时刻应该从密封时间开始算起。最后将密封好的样品放入高纯锗伽马谱仪中测量。整个流程如图 2-13。

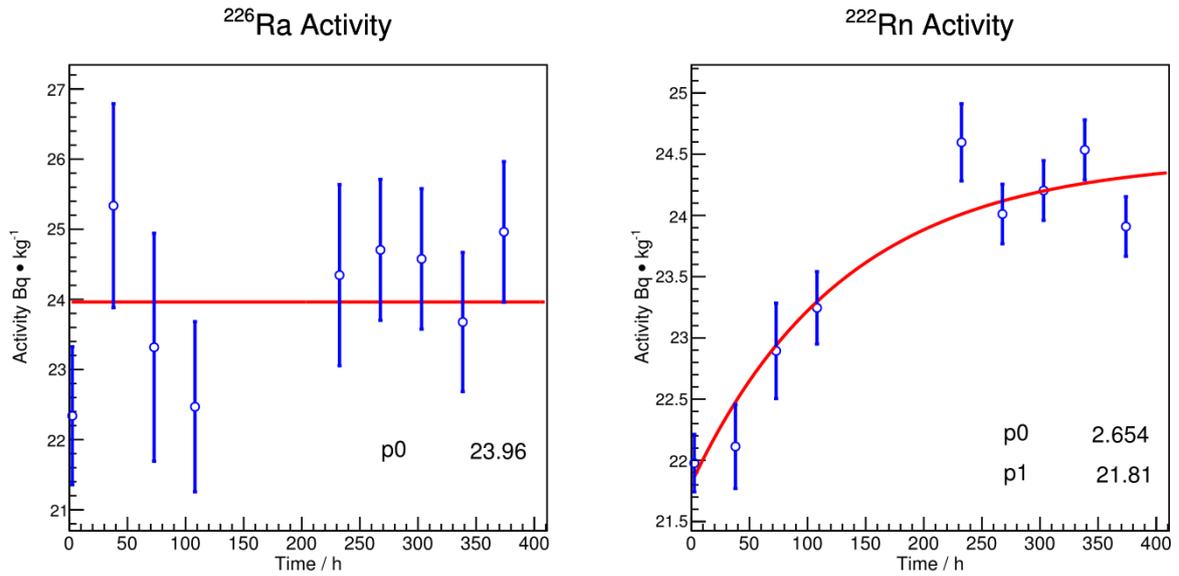


图 2-12 JP2 测量灰尘类样品的活度随时间变化。左图：²²⁶Ra 放射性活度，蓝色散点是测量数据，红色直线是用常函数拟合结果。右图：²²²Rn 放射性活度。蓝色散点是测量数据，红色曲线是用函数 $f(t) = p_0 \cdot [1 - \exp(-t/132.3)] + p_1$ 拟合的结果，数字 132.3 是 ²²²Rn 的衰变常数。

Fig. 2-12 Activity curve of dust sample measured by JP2. Left: ²²⁶Ra activity, blue dots are measured data, red straight line is the result fitted with constant function. Right: ²²²Rn activity, blue dots are measured data, red curve is the result fitted by function $f(t) = p_0 \cdot [1 - \exp\{-t/132.3\}] + p_1$, where the number 132.3 is the decay constant of ²²²Rn.

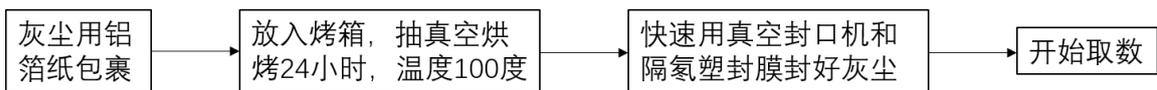


图 2-13 测量材料放氡率的样品处理流程。

Fig. 2-13 Sample processing flow for radon emanation rate measurement of materials.

表 2-6 同一个灰尘样品不同高纯锗伽马谱仪测量结果

高纯锗伽马谱仪	²²⁶ Ra 活度(Bq·kg ⁻¹)	²²² Rn 活度(Bq·kg ⁻¹)		
		p_0	p_1	放氡率 η
JP2	24.0 ± 0.4	2.7 ± 0.3	21.8 ± 0.2	10.9 ± 0.7 %
UA Ge-II	29.1 ± 0.4	3.3 ± 0.3	22.8 ± 0.2	12.7 ± 1.1 %

2.5 PMT R12699 放射性测量

PandaX-4T 用 PMT 收集光信号，在 TPC 上下部，各有着多达 169 和 199 个滨松光电管 R11410^[3-4]。PandaX 合作组计划升级 4 吨氙探测器，升级后的 PandaX 探测器，不仅可以做为暗物质探测器，也可以做为无中微子双贝塔衰变($0\nu\beta\beta$)探测器。在新的探测器中，可能会使用如图 2-14 中滨松公司生产的 2 英寸光电管 R12699 收集光信号。R12699 与 R11410 相比具有更快的时间响应可以得到更细致的波形信息、更紧凑的结构可以集成化安装、更小的探测单元以进行更好的位置重建。

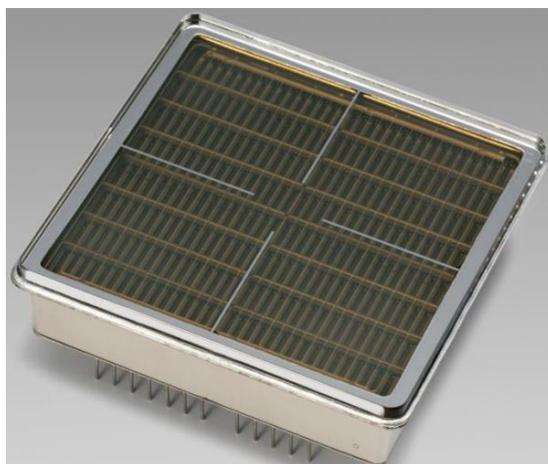


图 2-14 滨松 PMT R12699。

Fig. 2-14 Hamamatsu PMT R12699.

PMT 本身含放射性同位素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{60}Co 、 ^{40}K 可以在暗物质或者 $0\nu\beta\beta$ 能区诱发本底。降低 PMT 的放射性本底，是 PandaX 探测器升级需要达成的重要目标之一。为此，我们对整支 PMT R12699 及其加工原材料都用 JP1 进行了不同批次的放射性测量，测量结果如表 2-7 和表 2-8 中，两个表的放射性值都是指单个 PMT 中，该材料的放射性。在表 2-7 中，PMT 栏位指测量的 PMT 数量和类型，S 指标准商用 PMT，R 表示用 42 Alloy 替换掉 Kovar 的测试用 PMT，如 4-S 表示 4 支标准商用 PMT 一起测量，2-R 表示 2 支用 42 Alloy 替换掉 Kovar 的测试用 PMT 一起测量。在表 2-8 中，测量时为了提升灵敏度，一次性测量公斤量级的原材料，再按照单个 PMT 用量归一化到单个 PMT 的放射性。对比两个表格可知， ^{60}Co 来源于材料 Kovar， ^{232}Th 和 ^{238}U 则来源于 PMT 的封装玻璃 STD Glass。为确认 ^{60}Co 确实来源于 Kovar，滨松公司使用材料 42Alloy 替换掉 Kovar，前后生产了两个批次的测试 PMT。第一个批次

2 支，第二个批次 4 支，即表 2-7 中的 2-R 和 4-R。由表格可知，替换 Kovar 后的测试 PMT ^{60}Co 的确有显著性下降， ^{60}Co 确实来源于 Kovar。对 ^{232}Th 和 ^{238}U 高的 STD Glass，滨松公司找到一种可能替换的低放射性玻璃，即表格 2-9 中的 New Glass。最后指出，在测过的原材料中，均没有找到 ^{40}K 的来源，PMT 中 ^{40}K 最主要来源，可能是目前还没有经过测量的 PMT 光阴极材料。

表 2-7 整支 PMT R12699 放射性

测量日期	PMT	放射性活度($\text{mBq}\cdot\text{pcs}^{-1}$)					
		^{60}Co	^{40}K	$^{232}\text{Th}(\text{e})$	$^{232}\text{Th}(\text{l})$	$^{238}\text{U}(\text{e})$	$^{238}\text{U}(\text{l})$
2020-12-27	4-S	0.76 ± 0.10	26.42 ± 1.78	< 0.46	< 0.12	< 6.35	0.60 ± 0.14
2021-8-8	4-S	0.74 ± 0.09	30.93 ± 2.09	< 0.26	< 0.20	< 3.88	< 0.50
2021-9-10	4-S	1.01 ± 0.10	31.54 ± 2.17	< 0.26	< 0.64	< 5.05	0.61 ± 0.15
2021-12-28	4-S	0.69 ± 0.12	25.65 ± 2.03	< 0.32	< 0.16	< 5.78	< 0.52
2021-6-23	2-R	< 0.15	36.91 ± 2.45	< 0.92	< 1.28	< 9.44	< 1.07
2021-11-29	2-R	< 0.26	37.29 ± 2.95	< 0.63	< 1.30	< 3.92	< 0.69
2022-4-27	4-R	< 0.07	38.50 ± 2.86	< 0.19	< 0.14	< 1.88	0.42 ± 0.11

表 2-8 PMT R12699 原材料放射性

材料	批次	放射性活度($\text{mBq}\cdot\text{pcs}^{-1}$)					
		^{60}Co	^{40}K	$^{232}\text{Th}(\text{e})$	$^{232}\text{Th}(\text{l})$	$^{238}\text{U}(\text{e})$	$^{238}\text{U}(\text{l})$
Kovar	2009E T0007	0.14 ± 0.01	< 0.20	< 0.06	< 0.03	< 0.41	< 0.05
	2009E T0009	0.22 ± 0.03	< 0.46	< 0.20	< 0.06	< 0.57	< 0.10
STDGlass	2004E T0002	< 0.02	0.67 ± 0.14	0.13 ± 0.03	0.11 ± 0.01	1.69 ± 0.17	0.64 ± 0.02
Quartz	2009E T0011	< 0.05	< 0.71	< 0.21	< 0.04	< 1.87	< 0.13
Aluminum	2103E T0005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01
SS	2009E T0010	< 0.01	< 0.04	< 0.01	< 0.01	< 0.04	< 0.01
42Alloy	2009E T0001	< 0.07	< 0.75	< 0.22	< 0.06	< 0.79	< 0.15

续表 2-8

材料	批次	放射性活度(mBq·pcs ⁻¹)					
		⁶⁰ Co	⁴⁰ K	²³² Th(e)	²³² Th(l)	²³⁸ U(e)	²³⁸ U(l)
42Alloy	2009E T0002	< 0.06	< 0.54	< 0.20	< 0.09	< 0.43	< 0.11
	2009E T0003	< 0.06	< 0.56	< 0.15	< 0.05	< 1.46	< 0.13
	2009E T0004	< 0.07	< 0.61	< 0.30	< 0.06	< 1.15	< 0.16
	2009E T0005	< 0.005	< 0.55	< 0.15	< 0.05	< 0.61	< 0.14
	2009E T0006	< 0.06	< 0.84	< 0.26	< 0.06	< 1.68	< 0.07
Ceramic	2103E T0003	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03 ± 0.01	< 0.01
Ceramic	2103E T0004	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01
NewGlass	2004E T0003	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.02	< 0.01

2.6 本章小结

章节 2.1 介绍了高纯锗伽马谱仪测量材料放射性的基本原理和优势。放射性同位素衰变后产生伽马射线，伽马射线穿过锗晶体时沉积能量产生电子空穴对，电子空穴对在电场作用下向不同方向漂移最终被电荷收集装置收集，这是高纯锗伽马谱仪的基本原理。锗原子的电离激发能低，单位沉积能量可以产生更多的电子空穴对，因而高纯锗伽马谱仪能量分辨率高。高纯锗伽马谱仪利用伽马射线测量材料放射性，伽马射线穿透力强，用蒙特卡洛模拟获取探测效率，对样品几何形状一般没有要求，也不需要样品进行破坏性加工。

章节 2.2 从性能结构、本底水平、刻度和蒙特卡洛模拟方法、本底水平和灵敏度几个方面，介绍了 PandaX 实验室的两套高纯锗伽马谱仪 JP1 和 JP2。JP1 是 ORTEC 生产的 P 型同轴高纯锗伽马谱仪，锗晶体质量大，具有 175% 的极高相对探测效率。JP2 是 CANBERRA 生产的宽能型高纯锗探测器，锗晶体质量虽然不大，但有 3800 mm² 的高灵敏面积，对低能伽马射线有着良好的探测效率。高纯锗伽马谱仪在全能峰附近的多道计数分布如公式(2-1)，伽马射线能量和多道分析器道址的对应关系如公式(2-2)，用公式(2-3)对本底谱和样品谱分别拟合即可获得全能峰计数，再用公式(2-3)计

算样品的放射性。公式(2-4)是高纯锗伽马谱仪的能量分辨率和能量关系的经验公式。用放射源或者高放射性样品刻度，可以确定一台高纯锗伽马谱仪在公式(2-1)到公式(2-4)中的各项常数。高纯锗伽马谱仪的探测效率用蒙特卡洛模拟得到，其准确性需要用活度经过标定、几何已知的标准放射源检验。用蒙特卡洛模拟探测效率时，对存在伽马级联衰变的情况，应该用放射性同位素去模拟，而不能用单能伽马射线去模拟。JP1 和 JP2 的本底水平在世界范围内处于中等水平，本底水平、探测效率和测量时间都影响高纯锗伽马谱仪的灵敏度，图 2-9 是 JP1 和 JP2 对暗物质实验所关系的放射性同位素对代表性样品的探测灵敏度随测量时间变化曲线。

章节 2.3 分析了 JP1 测量腔室的真空度和本底来源，这是对升级灵敏度的重要依据。JP1 的真空计接在外层的不锈钢腔体中和内层的真空测量腔室通过流阻极大的铅砖缝隙和铜块缝隙连接，根据氦计数率随时间变化曲线和平衡时间可以推算 JP1 的测量腔室平衡时氦气浓度约 $1.2-1.3 \text{ Bqm}^{-3}$ 。接着对 JP1 的本底来源作蒙特卡洛模拟，发现 ^{60}Co 和 ^{40}K 的本底主要来自于铜屏蔽体， ^{232}Th 本底在上限值内铜屏蔽体和探头封装的贡献均不可忽略， ^{238}U 本底在上限值内铜屏蔽体和腔体氦气的贡献均不可忽略， ^{210}Pb 本底则绝大部分来自于探头封装材料。

章节 2.4 分析了材料中 ^{222}Rn 的活度随时间变化如公式(2-11)，介绍了用高纯锗伽马谱仪测量材料放氦率的方法。用 UA Ge-II 和 JP2 测量同一种样品给出一致的结果，说明用高纯锗伽马谱仪测量材料放氦率是可行的。介绍测量材料放氦率过程中，样品的特殊处理流程。

章节 2.5 介绍了 JP1 测得滨松 PMT R12699 的整支光电管放射性和加工原材料的放射性，得到 R12699 的 ^{60}Co 放射性主要来源于光电管中的 Kovar 材料， ^{232}Th 和 ^{238}U 放射性主要来源于封装玻璃，找到了降低 PMT R12699 的放射性的改善方向。

第三章 双探头高纯锗探测系统设计

第一章和第二章指出，探测器搭建材料中的放射性同位素衰变产生的射线，是暗物质实验的本底来源之一。测量材料的放射性，挑选低放射性材料用来搭建探测器，可以降低暗物质实验的本底，提升发现暗物质的潜力。高纯锗伽马谱仪也有灵敏度限制，对放射性在灵敏度以下的样品，无法精确测量材料的放射性。PandaX 合作组正计划对 PandaX-4T 暗物质探测器升级，其中甄选低本底材料就是一项重要内容。为满足暗物质实验的本底甄选要求，需要升级高纯锗伽马谱仪的灵敏度，以精确测量材料的放射性。JP1 和 JP2 中，总体上灵敏度较好的是 JP1。我们计划选择 JP1 做灵敏度升级，添加一台新的高纯锗伽马谱仪 JP3，和 JP1 形成对头放置的双探头高纯锗伽马谱仪(dual HPGe detectors, DHPGe)。

由公式(2-5)，高纯锗伽马谱仪的灵敏度和本底水平、探测效率和取数时间有关。高纯锗伽马谱仪的本底服从泊松分布，取数时间 T 增加，则统计误差 σ_b 也增加，大致正比于 \sqrt{T} 。所以，灵敏度随时间的变化实际上大致反比于 \sqrt{T} 。这意外着想要把灵敏度升 2 倍，需要增加 4 倍的取数时间，亦即灵敏度的提升倍数，需要用倍数平方的取数时间来获得。除了取数时间外，提升样品的探测效率，降低高纯锗伽马谱仪的本底，是提升高纯锗伽马谱仪灵敏度的两个重要方法。

高纯锗伽马谱仪对样品的探测效率，由诸多因素决定，如锗晶体灵敏区对样品所张的立体角，锗晶体厚度、样品材料的密度以及几何形状等。和高纯锗伽马谱仪本身有关的主要是锗晶体灵敏区对样品所张的立体角和锗晶体厚度。测量时样品正放在高纯锗伽马谱仪的探头上，样品中的伽马射线各向同性，只有直射向灵敏区的伽马射线会穿过锗晶体的灵敏区。对约 1 cm 的小尺寸样品，大约只有一半的伽马射线会射向锗晶体，大尺寸的样品浪费的伽马射线会更多。如果能够在样品的另一侧，再增加一个半径接近的高纯锗伽马谱仪，则锗晶体对样品所张立体角增大一倍。但在本底方面，另一台高纯锗伽马谱仪也有固有本底，只增加一台高纯锗伽马谱仪，总本底会上升，灵敏度的提升效果减弱。因此，需要对高纯锗伽马谱仪的本底来源做分析，在升级后的系统中做相应的抑制。综合提升效率和降低本底，最大化灵敏度的提升效果。

3.1 JP3 型号选择和性能表现

为找到合适的高纯锗伽马谱仪和 JP1 组合成对头放置的双高纯锗伽马谱仪，我们分析了不同型号的高纯锗伽马谱仪做为 JP3 时，获得的灵敏度提升效果。商用高纯锗伽马谱仪不同型号的区别以及影响探测效率的主要因素是锗晶体的直径和厚度。我们建立了半径为 70 mm、85 mm、94mm 和厚度为 30 mm、44 mm、58 mm、72 m、86 mm、100 mm 的 18 种典型锗晶体尺寸，和 JP1 对头放置的蒙特卡洛模型，模拟所得的双探头高纯锗伽马谱仪的灵敏度相对于 JP1 获得的提升倍数。蒙特卡洛模型如图 3-1，其中左边是 JP1 固定不变的几何，右边的锗晶体直径和厚度按不同商用高纯锗伽马谱仪的锗晶体尺寸变化，中间的样品是直径 10 cm、厚度 1 cm 的 PTFE 样品。模拟的放射性同位素是 ^{60}Co 、 ^{232}Th 和 ^{238}U ， ^{40}K 的伽马射线能量和 ^{60}Co 的相当，可参照类比。模拟的结果如图 3-2，在计算灵敏度时，总本底假设随锗晶体质量等比例增加。我们选择直径 85 mm 厚度 30mm 的锗晶体做为 JP3，这个选择和模拟的最优结果之间的差异在表 3-1 中，可见由于锗晶体尺寸变化带来的灵敏度提升效果差异小于 13%。综合考虑性价比，将资源用在本底抑制方面对灵敏度的提升效果更好。

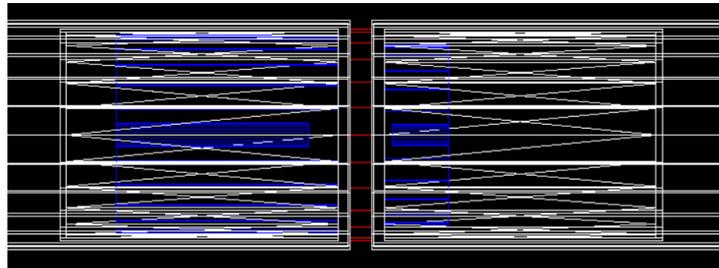


图 3-1 双探头高纯锗伽马谱仪的蒙特卡洛模型。蓝色部分是锗晶体，红色部分是位于中间的样品，其余部分为封装材料。左边 JP1 锗晶体直径厚度固定不变，右边 JP3 锗晶体直径厚度可变。

Fig. 3-1 Monte Carlo model of DHPGe. The blue part is germanium crystal, the red part is the sample in the middle of two detectors. Other parts are sealing material. The diameter and thickness of JP1 germanium crystal on the left are fixed, and that of JP3 germanium crystal on the right can vary.

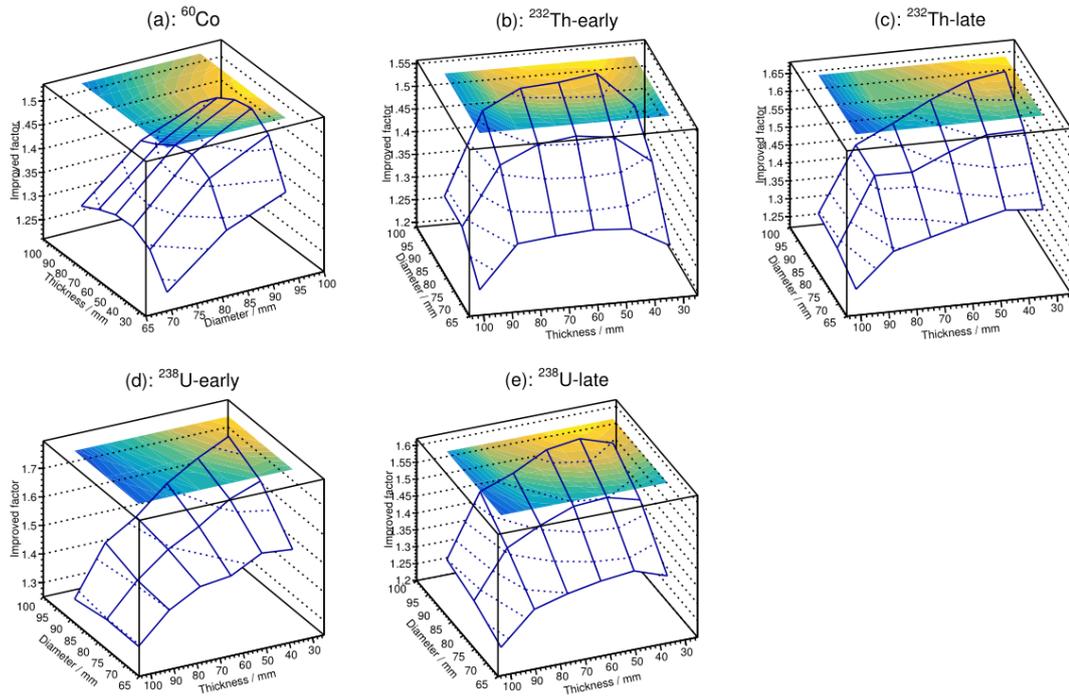


图 3-2 不同尺寸的锗晶体和 JP1 搭配成双探头高纯锗伽马谱仪的灵敏度提升效果。X 和 Y 轴分别是锗晶体的直径厚度，Z 轴是双探头高纯锗伽马谱仪的灵敏度相对于 JP1 的提升倍数。(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别对应 ^{60}Co 、 $^{232}\text{Th-early}$ 、 $^{232}\text{Th-late}$ 、 $^{238}\text{U-early}$ 和 $^{238}\text{U-late}$ 。

Fig. 3-2 MDA improvements of DHPGe used different size germanium crystals comparing with single HPGe detector JP1. X and Y axis are germanium diameter and thickness. Z axis is the improved factor of DHPGe relative to JP1. (a), (b), (c), (d) and (e) correspond to ^{60}Co , $^{232}\text{Th-early}$, $^{232}\text{Th-late}$, $^{238}\text{U-early}$ and $^{238}\text{U-late}$ respectively.

表 3-1 JP3 最优选择和选定型号的灵敏度差异

核素	最优锗晶体尺寸			选定型号提升倍数	最优和选定型号差异(%)
	直径 (mm)	厚度 (mm)	提升倍数		
^{60}Co	94	58	1.50	1.33	12.9
$^{232}\text{Th-early}$	94	44	1.53	1.39	9.8
$^{232}\text{Th-late}$	94	30	1.64	1.60	5.2
$^{238}\text{U-early}$	94	44	1.73	1.66	3.8

续表 3-1

核素	最优锗晶体尺寸			选定型号 提升倍数	最优和选定 型号差异(%)
	直径 (mm)	厚度 (mm)	提升倍数		
$^{238}\text{U-late}$	94	44	1.58	1.48	7.2

选定的 JP3 型号是 ORTEC GEM-SP8530, 和 JP1 同属于 P 型同轴高纯锗伽马谱仪, 目前工厂已经制造完成。实际锗晶体直径 83.9 mm, 厚度 31.5 mm。JP3 的探头具体结构如图 3-3 所示。表 3-2 是 JP3 的出厂数据, 当前还未经过我们实际刻度。

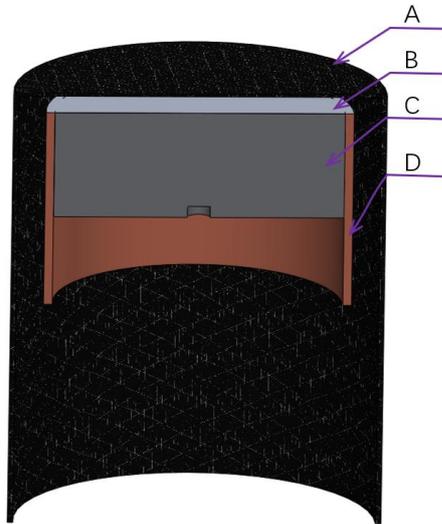


图 3-3 JP3 的探头结构。A 是直径 108 mm, 侧边厚度 1.6 mm, 顶部厚度 0.9 mm 的低本底碳纤维端盖。B 是厚度 0.03 mm 的铝麦拉。C 是直径 83.9 mm, 厚度 31.5 mm 的锗晶体, 底部小孔直径 6 mm, 深度 3 mm。D 是铜支撑体, 侧边厚度 2.5 mm。

Fig. 3-3 JP3 detector structure. A is a low background carbon fiber end cap with a diameter of 108 mm, a side thickness of 1.6 mm and top thickness of 0.9 mm. B is an aluminum Mylar which thickness is 0.03 mm. C is a germanium crystal with a diameter of 83.9 mm and a thickness of 31.5 mm, where the bottom hole diameter is 6 mm and depth is 3 mm. D is a copper support with a side thickness of a 2.5 mm.

为配合下一小节介绍的屏蔽体设计, JP3 并非工厂的完全标准件。冷指长度比工厂标准件长 46 cm 加长约 26 cm, 且在冷指上焊接一个密封法兰^[21], 以实现~10 Pa 真

空度的密封效果。为了降低高纯锗伽马谱仪的本底，JP3 的前端电子学外放到靠近 30 升杜瓦罐处，冷指加长增加了前端电子学和锗晶体之间的距离，有降低能量分辨率的风险。幸运的是，在我们要求的冷指长度下，工厂评估对能量分辨率的影响可控。表 3-2 出厂数据中的 JP3 的能量分辨率，和 JP1 和 JP2 的相当。JP3 的整体结构如图 3-4 所示。

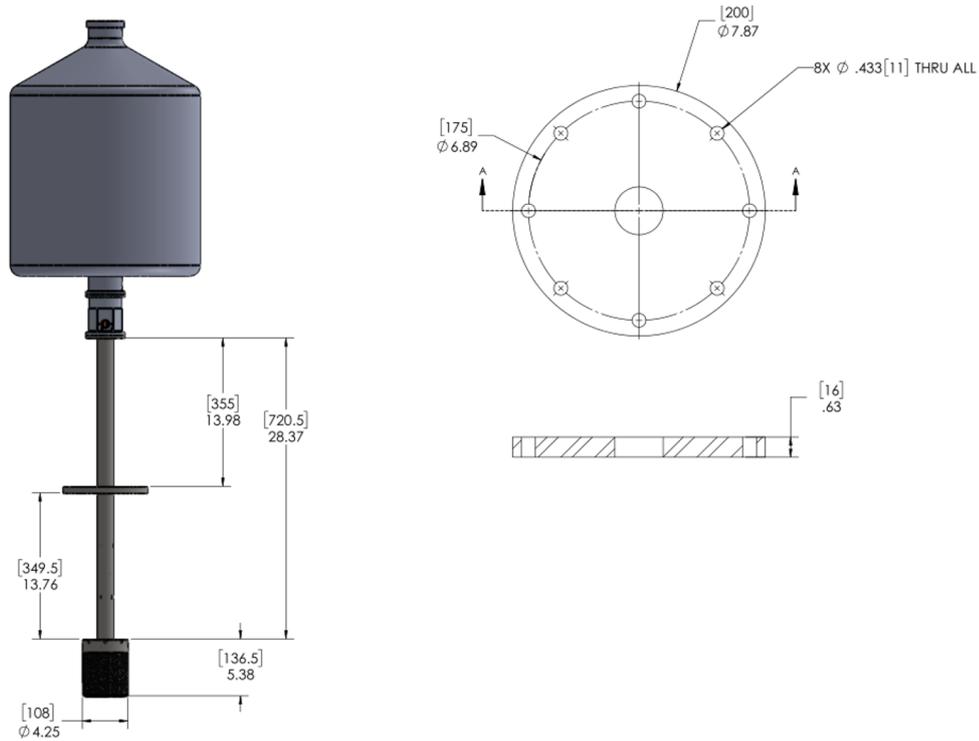


图 3-4 JP3 的整体结构，图中长度单位是英寸，中括号内为对应的以毫米为单位的长度值。冷指总长 720.5 mm，焊接的法兰为 DN-200 标准法兰^[22]。法兰直径 200 mm，厚度 16 mm，有 8 个直径为 11 mm 的密封螺孔。

Fig. 3-4 JP3 overall structure, the length unit in the figure is inch, and the corresponding length in millimeters is in brackets. The total length of cold finger is 720.5 mm, and the welded flange is a standard flange DN-200. The flange diameter is 200 mm and thickness is 16 mm, and has 8 sealing screw holes which diameter is 11 mm.

表 3-2 JP3 的出厂信息

谱仪名称	JP3
型号	ORTEC-GEM-SP8530
锗晶体直径(mm)	83.9
锗晶体厚度(mm)	31.5
相对探测效率	51%
半高全宽@ 122 keV (keV)	0.61
半高全宽@ 1332 keV (keV)	2.1

3.2 屏蔽体设计

3.2.1 真空波纹管

双探头高纯锗伽马谱仪的屏蔽体设计，有两个问题需要解决。样品的形状特别是高度是不确定的，为了获得最大的探测效率，JP1 和 JP3 探头取数时都需要紧贴着样品，所以两个高纯锗伽马谱仪的探头距离必须可以调整，否则因为距离样品过远将极大的降低探测效率，这就失去了设计双探头的本来意义。使用抽真空的方法除去腔体的氦气，必须保证两个探头的距离调整的不影响腔体的真空度。在 JP3 的冷指上焊接一个密封法兰，结合一个真空波纹管可以解决以上两个问题。真空波纹管两端均焊接密封法兰，一端和 JP3 冷指上的法兰连接，另一端和真空腔体连接，改变真空波纹管的伸缩长度，就可以在调整两个探头位置的同时保持腔体内的真空。真空波纹管的结构如图 3-5 所示。JP3 的探头直径 108 mm，因此波纹管两端的法兰选择通径稍大的标准件 DN-200^[22]。

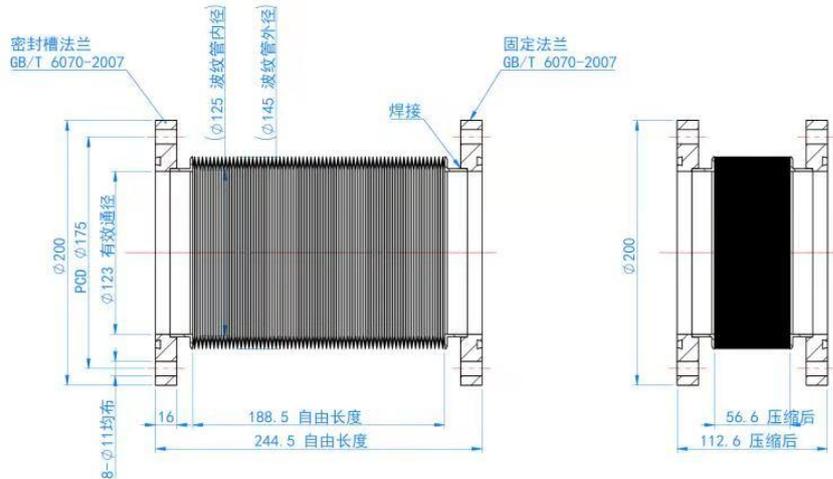


图 3-5 真空波纹管结构。

Fig. 3-5 Bellow structure.

3.2.1 铜腔体

章节 2.3.1 中介绍了 JP1 的真空除氦系统，主要是 5 mm 厚的不锈钢外腔体把整个屏蔽体结构包裹住。真空泵作用在外腔体上，真空测量腔室和不锈钢外腔体间，通过 20 cm 厚的铅屏蔽体和 10 cm 厚的铜屏蔽体的缝隙连接。缝隙的流阻大，有可能造成内外腔体的压强不平衡，导致内腔体的实际真空度具有不确定性。新的屏蔽体系统中对这一点进行改进。铜屏蔽体不再由若干个铜块堆叠而成，而是把整个铜屏蔽体加工成空心的腔体，同时保留 10 cm 厚的铜屏蔽体厚度。

但铜腔体的设计，不能是简单的一个长方体铜块，内部再挖一个空心的长方体。首先按照 JP1 和 JP3 探头的长度和最大调整距离，以及 10 cm 的屏蔽厚度要求，铜块的外尺寸是长 40 cm × 宽 40 cm × 高 84 cm 的铜块。整个铜块体积较大，内部的机械加工不方便，在满足屏蔽和真空要求的条件下，设计上应该使得加工越简单越好。其次，为了将 JP1 和 JP3 的探头放入内部的腔体，铜块必须在相应的位置切出一定大小的孔，在这些开孔的地方，需要保证 10 cm 的屏蔽厚度以及真空要求。最后，为了更换样品，铜块必须可以方便的打开和关闭。

在方便加工的问题上，我们和铜块加工厂沟通，将铜腔体设计成如图 3-6 的结构，图中真空腔室边上的倒角半径 25 mm。机械加工时只需要 A、B、C 三个孔所在平面垂直伸入刀头做切割，工程上难度不大。B 和 C 是两个放入 JP1 和 JP3 的探头让位孔，在放入探头后，还需要用一些特殊形状铜块填塞，以保证各方向 10 cm 的铜屏蔽厚度。这些特殊铜块的结构如图 3-7 所示，这些特殊铜块的用途将在章节 3.3 中介绍。

其中，A 和 B 两个孔所在平面涉及真空法兰密封，表面粗糙度需要达到 $1.6 \mu\text{m}^{[23]}$ ，其他位置不涉及真空法兰密封，表面粗糙度没有要求，一般是 $3.2 \mu\text{m}$ 。

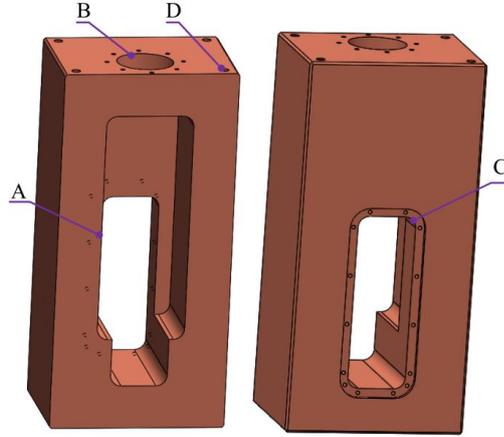


图 3-6 铜腔体结构,整个铜块各向厚度不小于 10 cm。A 是内部的真空测量腔室。B 是将 JP3 放入真空测量腔室时的让位孔，旁边 8 个螺孔和真空波纹管的密封法兰上的螺孔对应。C 是将 JP1 放入真空测量腔室时的让位孔，周围的螺孔用于固定两个铜板用。D 是 4 个 M20 承重螺孔，用于整个铜块的吊装起重。

Fig. 3-6 Copper chamber structure, the thickness in all directions is not less than 10 cm. A is the inner vacuum measuring chamber. B is the hole which is used to put JP3 into chamber, the 8 screw holes corresponds to the screw holes at flange of bellows. C is the hole which is used to put JP1 into chamber, the surrounding screw holes are used to fix two copper plate. D is 4 M20 bearing screw holes which are used for hoisting of the whole copper block.

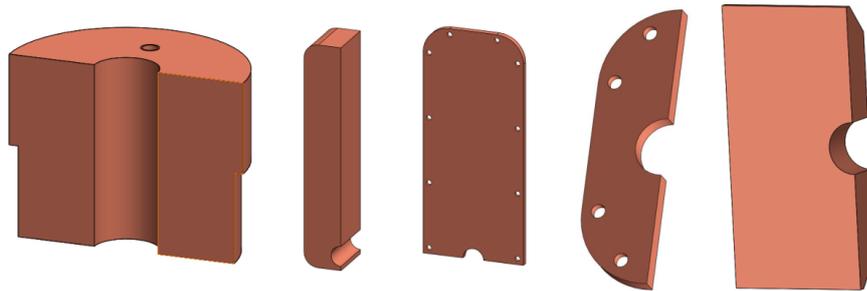


图 3-7 铜腔体上让位孔填塞铜块。

Fig.3-7 The filled copper blocks for the holes of copper chamber.

铜腔体需要有一个能够方便打开和关闭的结构，以方便更换样品。为此我们设计一块厚度 10 cm 的铜门，铜门在移动结构的控制下，水平方向最大可移动 50 cm，和

铜腔体之间用 O 型氟胶圈密封，真空泵通过波纹管连接铜门上的气孔 A，直接对测量腔室抽真空。铜门的结构如图 3-8 所示。

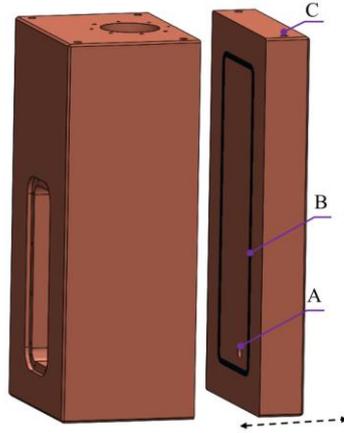


图 3-8 铜门结构，铜门在移动机构控制下，可沿虚线的水平方向最大移动 50 cm。A 是抽真空的气孔，外部连接波纹管和真空泵。B 是 O 梯形沟槽，和铜腔体之间用 O 型氟胶圈密封。C 是两个 M20 承重螺孔。

Fig. 3-8 Copper door structure, The copper door can move up to 50 cm horizontally along the dotted line under the control of the moving mechanism. A is the air hole for vacuumizing which connects to the bellows and vacuum pump externally. B is a trapezoidal groove which is sealed with O-type fluor ring with the copper chamber. C is two M20 bearing screw holes.

3.2.3 移动机构

铜腔体中的铜门需要打开和关闭，JP3 的探头位置需要垂直方向可调整，要求屏蔽体需要搭配移动机构，移动机构如图 3-9 所示，A 是 JP3 的 30 升杜瓦罐，安装在一个水平不锈钢支架 C 上，支架 C 在手摇控制轮的作用下，可以连带着 JP3 整体垂直移动，为防止距离调整过度导致两个探头碰撞设计有限位功能，且搭配有精度为毫米的直尺可以记录位置信息；B 是 JP1 的 30 升杜瓦罐，整个高纯锗伽马谱仪 JP1 固定不动；铜腔体 10 cm 厚的铜门，以及 20 cm 厚的铅屏蔽体的一个侧面，都安装在不锈钢支架 D 中，D 在数控电机的控制下，水平方向可沿导轨移动最大距离 50 cm；10 cm 厚的铜腔体和 20 cm 厚的铅屏蔽体的主体部分，都安装在不锈钢支架 E 中；JP1 和 JP3 的探头位于真空测量腔室 F 中。铜门所在的不锈钢支架 D 重量约数吨，移动距离没有精度要求，使用数控电机控制操作方便省力。JP3 的探头位置作为蒙特卡罗

模拟输入流，精度要求较高，且机构重量不大~100kg，使用移动速度较慢的手摇控制轮控制。

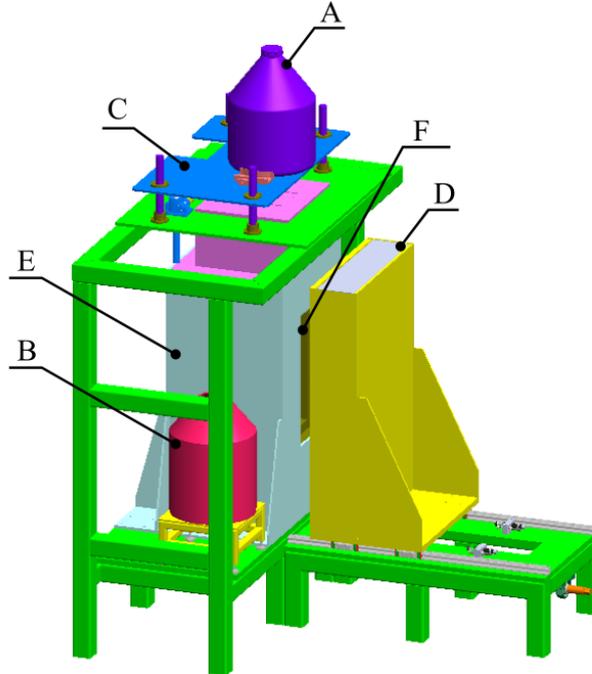


图 3-9 屏蔽体的移动机构。A 是 JP3 的 30 升杜瓦罐；B 是 JP1 的 30 升杜瓦罐；JP3 整体可随不锈钢支架 C 垂直运动；D 是不锈钢支架，铜门和铅一起安装在 D 中；E 是不锈钢支架，铜腔体主体和铅屏蔽体一起安装在 E 中；F 是真空测量腔室，JP1 和 JP3 的探头安装在 F 中。

Fig. 3-9 Shielding layer moving mechanism. A is a 30 liter dewar of JP3; B is a 30 liter dewar of JP1; JP3 can move vertically with stainless steel support C; D is a stainless steel bracket, the copper door and lead shielding are installed in D together; E is a stainless steel support, and the copper chamber and the lead shielding are installed in e together; F is the vacuum measuring chamber, and the detector heads of JP1 and JP3 are installed in F.

3.3 双探头高纯锗伽马谱仪安装

章节 3.2 中介绍了屏蔽体的组成零部件，其中铜腔体有 7 个零部件。所有零部件都因为特殊的作用而设计，有些是为了真空密封而设计，有些是为了屏蔽厚度而设计，有些是为了位置调整设计。本节将介绍双探头高纯锗伽马谱仪的组装的主要过程，从中可以了解每一个零部件的设计目的。

双探头高纯锗伽马谱仪的系统安装过程总结如下：

- 在移动机构的不锈钢支架底部平面上，用铅砖铺设 20 cm 厚的铅屏蔽层，铜腔体和铜门都安装在这层铅砖上，应该尽量选择完整无变形的铅砖用来铺设，以确保地基的平整且稳固，满足铜腔体和铜门支撑面的平整度和稳定性要求。为方便安装，此时移动机构水平方向的两个支架分开最远距离 50 cm。
- 在铅砖上用记号笔标记好铜腔体和铜门的位置后，用起重设备将铜腔体和铜门移动到划定好的位置。铜门在起重前，可预先将和抽真空口连接的带法兰的真空波纹管 and 密封用的 O 型橡胶圈安装好。铜腔体和铜门放到指定位置后，应该检查其平整度和稳定性，尤其需要注意铜门和铜腔体的密封面的平行，否则可能影响铜门和铜腔体之间的真空密封性能。前两个步骤的过程如图 3-10 所示。

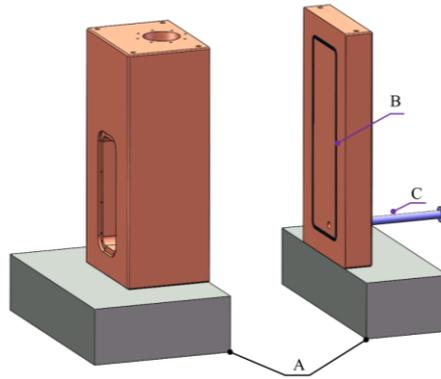


图 3-10 系统安装第一步和第二步示意图。选择平整完好的铅砖，在移动机构的支架平面上铺好厚 20 cm 的铅层(图中 A)。在 A 上用记号笔划分好铜腔体和铜门的放置位置。将铜腔体和铜门用起重设备移动到指定位置后，检查平整性和稳定性，尤其注意铜门和铜腔体密封面的平行。铜门上的 O 型橡胶圈和抽真空的波纹管(图中 B 和 C)可在起重前预先安装好。

Fig. 3-10 System installation diagrammatic sketch of the first two steps. Select flat and intact lead bricks to set up a 20 cm thick lead layer (A) on the support plane of the mobile mechanism. Use the marking pen to mark the copper chamber and door positions on A. Check the flatness and stability, especially the parallelism the sealing surface of the copper chamber and door after lifted and moved the copper chamber and door to the designated positions. The O-ring and the vacuum bellows (B and C) on the copper door can be pre-installed before lifting.

- 把 JP1 的探头放入铜腔体中，位置固定好在移动机构上的固定支架中。再把用来保证 10 cm 屏蔽厚度的填塞铜块和铜板在铜腔体上安装好，铜板用螺丝

固定。JP1 的冷指处的缝隙，铜板和铜腔体之间的缝隙，以及铜板上螺孔的缝隙用真空封泥密封好。由于 JP1 冷指上没有密封法兰，这个位置只能沿用 JP1 的现有方案，用真空封泥密封。JP1 的整个安装过程如图 3-11 所示。

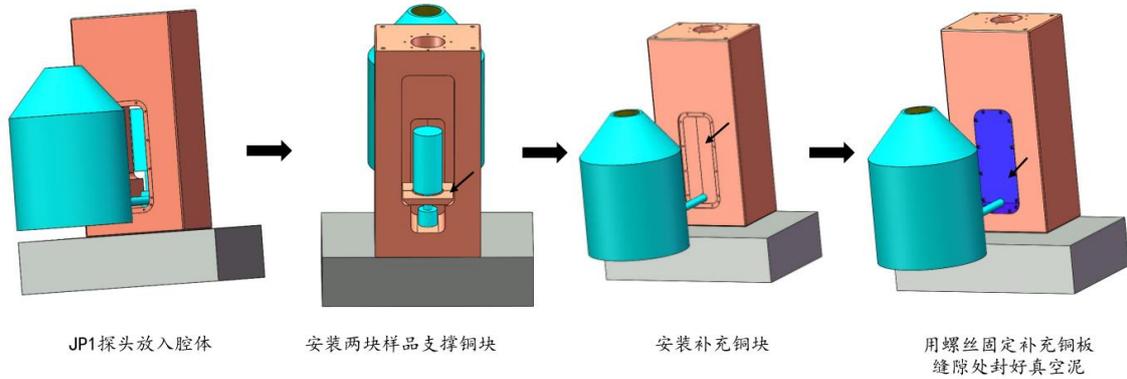


图 3-11 JP1 安装过程。安装样品支撑铜块时，探头需要先往里移动，完成后再复原到腔体中心位置。整个过程完成后 JP1 固定不动。

Fig. 3-11 JP1 installation process. When installing the sample support copper blocks, the detector head needs to move inward first, and then return to the center of the chamber. JP1 location is fixed after installation.

- 把 JP3 放置在移动机构的支架上，调整好位置。真空波纹管一端和 JP3 的法兰用螺丝固定密封好。为了方便安装两块 10 cm 屏蔽厚度的补充铜块，波纹管需要先压缩到最短长度，让出 10 cm 的空间。铜块安装完成后，释放波纹管的长度压缩，波纹管下端的密封法兰和铜腔体用螺丝固定密封好。JP3 的安装过程示意图如图 3-12 所示。
- 关闭铜门，开始抽真空检漏。由于 JP1 冷指和铜腔体处的缝隙使用真空泥密封，真空泥密封效果的稳定性不如密封法兰好。真空检漏应该在安装铅砖前完成，避免重复拆卸。如果检漏过程中发现真空密封性不好，应该对 JP1 冷指处的真空泥、真空波纹管的密封法兰、铜腔体和铜屏蔽体的平行度以及所有的密封 O 圈是否有破损、和真空泵连接的真空波纹管管路这几个位置逐一检查。

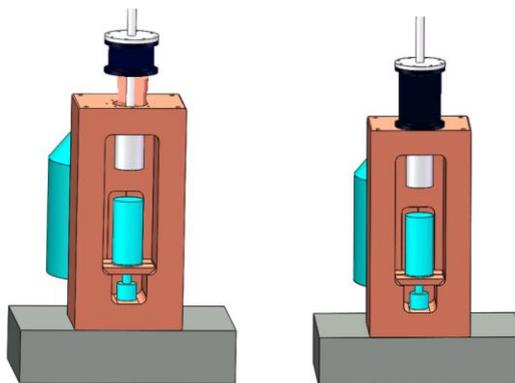


图 3-12 JP3 安装过程。左图：安装 10 cm 屏蔽厚度的补充铜块时，先把波纹管压缩到最短长度。右图：补充铜块安装完成后，释放波纹管长度，并把底部法兰和铜腔体密封。

Fig. 3-12 JP3 installation process. Left: When installing the 10cm shielding thick supplementary copper block, first compress the bellows to the shortest length. Right: After the installation of the supplemental copper block, release the length of the bellows and seal the bottom flange to the copper chamber.

- 真空检漏通过后，在铜腔体和铜门的四周，依次铺上 20 cm 厚的铅屏蔽体，如图 3-13 所示。JP1 和 JP3 的冷指，以及和真空泵连接的波纹管，均需要用预设堆叠方式来防止干涉。图 3-14 给出了这几个位置的铅砖堆叠方式示意图。其他位置对堆叠方式没有特殊要求，可在不影响稳定性的条件下自由选择铅砖的堆叠方式。图 3-14 中，黄色的是 20 cm × 10 cm × 1 cm 的标准铅砖，粉色部分是 20 cm × 10 cm × 2 cm 中间切开冷指让位孔的非标准铅砖，蓝色部分是 40 cm × 10 cm × 2 cm 的特殊加工的不锈钢承重板。整个 20 cm 厚的铅屏蔽层，共需要用到 20 cm × 10 cm × 5 cm 的标准铅砖 727 块，JP1 原屏蔽体系统共有 572 块这样的铅砖，需要额外增加 155 块。另外需要用到 20 cm × 10 cm × 1 cm 的标准铅砖 64 块。上海交通大学锦屏地下实验室的中的铅砖库存可以满足以上标准件需求。另外，还需额外加工一些为冷指让位的铅砖。
- 铅砖安装完成后，装上移动机构上的不锈钢板块，整个双高纯锗伽马谱仪即安装完成。

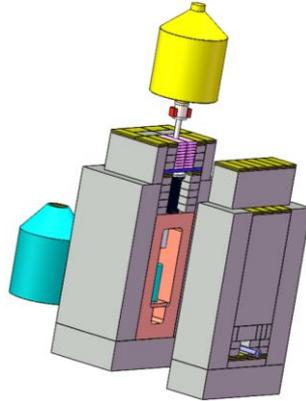


图 3-13 20 cm 厚的铅屏蔽层安装。

Fig.3-13 20 cm thick lead shield installation.

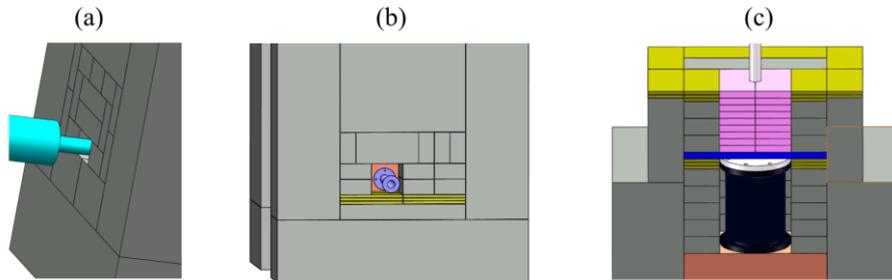


图 3-14 特殊让位孔处铅砖堆叠方式。(a) JP1 冷指让位孔。(b) 抽真空波纹管让位孔。(c) JP3 冷指和真空波纹管让位孔，黄色部分是 $20\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的标准铅砖，粉色部分是 $20\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 中间切开冷指让位孔的非标准铅砖，蓝色部分是 $40\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的特殊加工的不锈钢承重板。

Fig. 3-14 Lead bricks stacking method at special holes. (a) JP1 cold finger hole. (b) Vacuum bellows hole. (c) JP3 cold finger and vacuum bellows hole, the yellow part is $20\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ standard lead brick, the pink part is $20\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ non-standard lead brick with cold finger hole cut in the middle, and the blue part is $40\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ specially machined stainless steel bearing plate.

3.4 灵敏度预期提升效果

根据 JP3 的探头结构，建立蒙特卡洛模拟，可以模拟双探头伽马谱仪所能获得的效率提升。对 JP1 的本底来源做分析后，预估新系统中所能达到的抑制效果，可以对高纯锗伽马谱仪的本底做预期评估。结合效率提升和本底抑制，可以对新系统所能获

得的灵敏度提升效果做系统的评估。

JP1 的锗晶体直径 94 mm，厚度 104 mm，JP3 的锗晶体直径约 85 mm，厚度约 30 mm，两个高纯锗伽马谱仪的探头封装材料大体相似。由于锗晶体并非不对称，直径和厚度均不相等，可以肯定双探头高纯锗伽马谱仪的效率提升不是绝对的两倍。我们假设一个直径 10 cm 厚度 1 cm 的塑料样品正放在两个探头中间，两个探头都紧贴着样品，模拟对不同能量的伽马射线所能获得的效率提升，得到的结果如图 3-15。对能量低于~500 keV 的能区，效率提升接近两倍，能量升高，效率提升效果下降，在能量接近 3000 keV 时，效率提升效果接近于 1.4 倍。能量低的伽马射线，更容易在锗晶体内沉积能量，JP3 30mm 的锗晶体厚度已经可以很好的沉积伽马射线的能量。锗晶体的厚度的差异对探测效率影响不大，效率主要由锗晶体的平面对样品所张立体角，或者锗晶体直径决定。JP3 的锗晶体直径 85 mm，和 JP1 的 94 mm 区别不是很大，因此在低能区效率提升接近于两倍。当伽马射线的能量提高时，锗晶体厚度对效率的影响上升。对暗物质实验所关心的放射性同位素，在低能区， ^{232}Th 链上有分支比分别为 11.3%、43.6%和 30.1%，能量分别为 338 keV、239 keV 和 583 keV 的伽马射线， ^{238}U 链有分支比分别为 3.6%、18.4%、35.6%和 45.5%，能量分别为 186 keV、295 keV、352 keV、609 keV 的伽马射线，可以用来提升高纯锗伽马谱仪的效率。

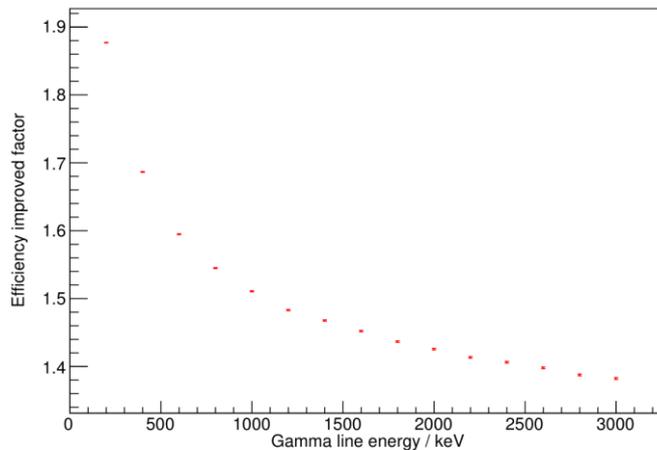


图 3-15 双探头高纯锗伽马谱仪效率提升效果。X 轴是伽马射线的能量，Y 轴是双探头高纯锗伽

马谱仪相对于 JP1 的效率提升倍数。模拟的样品是直径 10 cm，高度 1 cm 的塑料样品。

Fig. 3-15 The efficiency improvement of DHPGe. X-axis is the gamma line energy energy, and the Y-axis is the efficiency improved factor of the DHPGe relative to JP1. The simulated sample is a plastic cylinder which diameter is 10 cm and height is 1 cm.

选定 JP3 的高纯锗伽马谱仪型号后，还需要降低本底进一步提升高纯锗伽马谱仪

的灵敏度。章节 2.3.2 中分析出, JP1 的现有本底中, ^{60}Co 和 ^{40}K 主要来自于铜屏蔽体, ^{232}Th 的本底铜屏蔽体贡献也不可忽略, ^{238}U 的本底则铜屏蔽体和腔体氦气贡献均不可忽略。据此, 在新系统中, 提升铜屏蔽体的纯度, 降低腔体氦气的浓度可以有效的抑制本底。新的铜屏蔽材料, 我们在北京大学的帮助下, 使用 ICP-MS 和树脂交换法测量了其中的 ^{238}U 和 ^{232}Th 的含量^[24], 结果是 $^{238}\text{U} < 0.018 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}$, $^{232}\text{Th} 0.948 \pm 0.164 \text{ }\mu\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。JP1 现在所用的铜屏蔽体, 经过意大利 Gran Sasso 实验室的高纯锗探测器测量, 结果分别是 $^{238}\text{U} < 0.38 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}$, $^{232}\text{Th} < 0.51 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。做为预期效果估计, 我们假设铜的放射性强度整体上降低 10 倍。对腔体内的残余氦气, 新系统真空泵直接作用在测量腔室上, 测量腔室体积减小约 6 倍, 表面积减小大于 200 倍, 预期可达到真空泵的极限真空度 $\sim 10 \text{ Pa}$, 预期腔体内的氦气浓度可减小 60 倍。综合考虑效率提升、铜的纯度和腔体真空度提升和锗晶体质量上升, 对双探头高纯锗伽马谱仪的预期本底估计和灵敏度提升估计如表 3-3 中, 对不同核素的灵敏度可提升约 2-4 倍, 表中模拟的样品是直径 10 cm, 高度 1 cm 的塑料样品。

表 3-3 双探头高纯锗伽马谱仪预期本底和灵敏度

核素	伽马射线能量(keV)	JP1		双探头			灵敏度提升倍数
		探测效率(%)	灵敏度($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	预期本底(mHz)	探测效率(%)	灵敏度($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
^{210}Pb	47	0.99	90.07	1.144	1.86	53.00	1.72
^{60}Co	1173	4.95	2.41	0.011	7.39	1.13	2.14
	1333	4.60		0.022	6.78		
^{40}K	1461	0.61	59.46	0.028	0.87	14.72	4.04
$^{232}\text{Th-early}$	338	1.49	11.38	0.058	2.54	5.13	2.22
	911	1.68		0.058	2.53		
	969	1.06		0.021	1.57		
$^{232}\text{Th-late}$	239	6.95	6.66	0.277	12.47	3.28	2.03
	583	2.02		0.057	3.29		
	2615	0.89		0.049	1.26		

续表 3-3

核素	伽马射线能量(keV)	JP1		双探头			灵敏度提升倍数
		探测效率(%)	灵敏度(mBq·kg ⁻¹)	预期本底(mHz)	探测效率(%)	灵敏度(mBq·kg ⁻¹)	
²³⁸ U-early	186	0.82	47.63	0.103	1.54	23.03	2.07
²³⁸ U-late	295	2.64	5.68	0.007	4.57	1.43	3.98
	352	4.50		0.035	7.56		
	609	3.10		0.066	4.96		

3.5 样品活度计算

单探头高纯锗伽马谱仪在计算样品活度时,通常不需要考虑样品对本底的屏蔽效应。两个高纯锗伽马谱仪对头放置,在样品的高度、面积和密度都较大,且如同 JP1 的 ²¹⁰Pb 本底一样主要来自于探头本身,则样品会对本底产生屏蔽效应^[25],如图 3-16 所示。这时,如果仍然用公式(2-3)计算样品的放射性活度,因为不存在样品时的本底比存在样品屏蔽时的本底高,扣除本底时减去一个较大的数值,结果低估了样品的活度。另外,如果本底贡献主要来自于铜屏蔽体和腔体氦气,经过蒙特卡洛模拟发现,JP3 的探头在移动时,铜屏蔽体和腔体氦气对 JP3 的贡献也有变化。因此,在双探头高纯锗伽马谱仪,应该正确分析样品厚度和两个探头之间的距离变化,对本底带来的变化,以正确计算样品活度。



图 3-16 样品对来自于探头自身的本底的屏蔽效应。

Fig. 3-16 Sample Shielding effect of intrinsic background created by HPGe.

假设铜屏蔽以外的铅屏蔽体和实验大厅的环境伽马射线对系统的本底影响不随距离变化,则高纯锗伽马谱仪的本底 N_{JP1}^b 可以用下面公式描述

$$N_{JP1}^b(d) = A_{Cu} \cdot \varepsilon_{Cu}(d) \cdot T^b + A_{Rn} \cdot \varepsilon_{Rn}(d) \cdot T^b + A_{JP3} \cdot \varepsilon_{JP3}(d) \cdot T^b + B_{JP1} \cdot T^b \quad , \quad (3-1)$$

其中 A_{Cu} 、 A_{Rn} 、 A_{JP3} 分别是铜屏蔽体、腔体氦气、JP3 探头的放射性活度，单位 Bq； $\varepsilon_{Cu}(d)$ 、 $\varepsilon_{Rn}(d)$ 、 $\varepsilon_{JP3}(d)$ 是相应的贡献效率(含分支比)，都和探头距离 d 有关； B_{JP1} 和 T^b 分别是不随距离变化的本底贡献和取数时间。在 4 个距离取本底，结果写作如下的矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{Cu}(d_1) & \varepsilon_{Rn}(d_1) & \varepsilon_{JP3}(d_1) & 1 \\ \varepsilon_{Cu}(d_2) & \varepsilon_{Rn}(d_2) & \varepsilon_{JP3}(d_2) & 1 \\ \varepsilon_{Cu}(d_3) & \varepsilon_{Rn}(d_3) & \varepsilon_{JP3}(d_3) & 1 \\ \varepsilon_{Cu}(d_4) & \varepsilon_{Rn}(d_4) & \varepsilon_{JP3}(d_4) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{Cu} \\ A_{Rn} \\ A_{JP3} \\ B_{JP1} \end{bmatrix} = \frac{1}{T^b} \begin{bmatrix} N_{JP1}^b(d_1) \\ N_{JP1}^b(d_2) \\ N_{JP1}^b(d_3) \\ N_{JP1}^b(d_4) \end{bmatrix}, \quad (3-2)$$

可以把需要待解的各结构贡献 A_{Cu} 、 A_{Rn} 、 A_{JP3} 和 B_{JP1} 解出。对 JP3 再运用同样的方法，仍可再解出一次 A_{Cu} 、 A_{Rn} ，对比两次解出的值是否一致，可以检验蒙特卡洛模拟的准确性。现在，公式(3-1)中的本底解耦合，可以通过蒙特卡洛模拟计算任意距离的本底，并和实际本底取数比对，以验证公式(3-1)的准确性。

以上的本底分析是不存在样品时的情形，当存在样品时，如果各结构的贡献都已经确定，不难通过蒙特卡洛模拟得到考虑样品屏蔽效应时的真实本底，即可计算出样品的活度下

$$A = \frac{(N_{JP1}^s - N_{JP1}^b) + (N_{JP3}^s - N_{JP3}^b)}{(\varepsilon_{JP1} + \varepsilon_{JP3}) \cdot T^s}, \quad (3-3)$$

其中 N_{JP1}^s 、 N_{JP3}^s 和分别是 JP1 和 JP3 测量样品时的计数， ε_{JP1} 、 ε_{JP3} 分别是 JP1 和 JP3 对样品的探测效率， N_{JP1}^b 和 N_{JP3}^b 是通过蒙特卡洛模拟得到的考虑样品屏蔽效应的本底。应该指出，对探头放射性不占主要贡献的核素，公式(3-3)和(2-3)的结果应该一致。

3.6 伽马-伽马符合

章节 2.2.2 中介绍了伽马-伽马符合，即存在伽马级联衰变的放射性同位素衰变时，同时产生两个或者两个以上的伽马粒子，并且被高纯锗伽马谱仪同时探测到。在单探头的情形下，发生伽马-伽马符合事例的概率比较小，基本上不能用这种方法去测量低放射性的样品，而高放射性的样品普通的伽马测量方式已经足够，又不需要用到伽马-伽马符合方法。对双探头的情形，发生伽马-伽马符合事例的概率变得更大，有可能用伽马-伽马符合的方法测量材料放射性，这种方法的优势是外来本底的极大降低。图 3-17 中，样品正放在 JP1 和 JP3 的探头中间，放射性同位素发生伽马级联衰变，两个伽马射线分别被 JP1 和 JP2 同时探测到，即发生了伽马-伽马符合，外来本底也有概率发生这种情况。粗略的对比，高纯锗上的面元 dS 对距离为 r 的某一位置所张立体角 $d\Omega = \frac{dS \cdot r}{r^3}$ ，样品与锗晶体的平面中心的距离约是 5 mm，铜腔体约是 100 mm，

由距离导致的概率差异达 400 倍。伽马-伽马符合要求两个探测器同时接收到信号，最后的倍数差异还要平方一次，可达 10^5 倍。

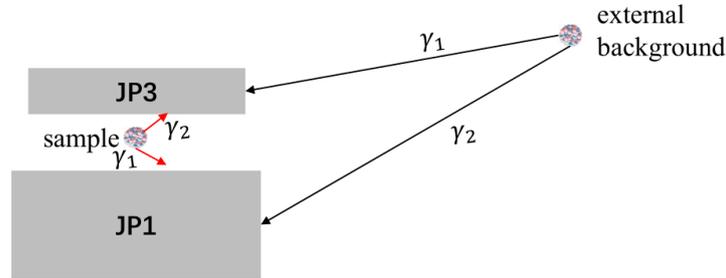


图 3-17 双探头高纯锗伽马谱仪的伽马-伽马符合。样品发生伽马-伽马符合(红色箭头)的几率远大于外来本底(黑色箭头)。

Fig. 3-17 γ - γ coincidence of DHPGe. The probability of γ - γ coincidence of the sample (red arrow) is much higher than that of the external background (black arrow).

JP1 和 JP3 同时探测到伽马事例的能谱是二维能谱。两个高纯锗伽马谱仪相互独立，各自的全能峰计数按公式(2-1)分布，则二维能谱的计数分布如下

$$f(E_1, E_2) = \frac{N}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left\{-\frac{(E_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(E_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right\} + q_0E_1 + q_1E_2 + q_2, \quad (3-4)$$

其中 N 是伽马符合事例的总数， μ_1 、 μ_2 分别是两种伽马射线的能量， σ_1 、 σ_2 分别是两个高纯锗伽马谱仪对应的能量分辨率， q_0 、 q_1 、 q_2 是三个拟合常数^[12]。对正放在两个探头中间的 ^{60}Co 点源做蒙特卡洛模拟，可得到的二维能谱如图 3-18，模拟总数是 10^7 ，可得对点源的在二维能谱中两个点(1173, 1332) keV 和(1332,1173) keV 的探测效率分别约是 0.35% 和 0.37%。在本底方面，蒙特卡洛模拟也发现即使铜屏蔽体和腔体氦气的放射性上升 200 倍，仍然可以在 1 个月内的取数时间内保持零本底。除了 ^{60}Co 之外，暗物质所关心的核素中， ^{232}Th -链上的 ^{208}Tl 和 ^{238}U 链上的 ^{214}Bi 均存在分支比较高的伽马级联衰变。综合评估探测效率和本底，模拟伽马-伽马符合方式的灵敏度，和双探头伽马谱仪的非伽马-伽马符合方式以及 JP1 的灵敏度对比如图 3-19，图中伽马-伽马符合方式用 Feldman-Cousin 方法计算零本底零观测值时样品放射性上限值^[26]。可见，约 15 天左右的取数时间，伽马-伽马符合方式比单探头高纯锗伽马谱仪的限制效果好，约 35 天左右的取数时间比双探头高纯锗伽马谱仪的非伽马-伽马符合方法效果好。随着取数时间增加，伽马-伽马符合方法所能做出的限制效果更强。图中模拟的是直径 1 毫米，高度 1 毫米的小尺寸样品。

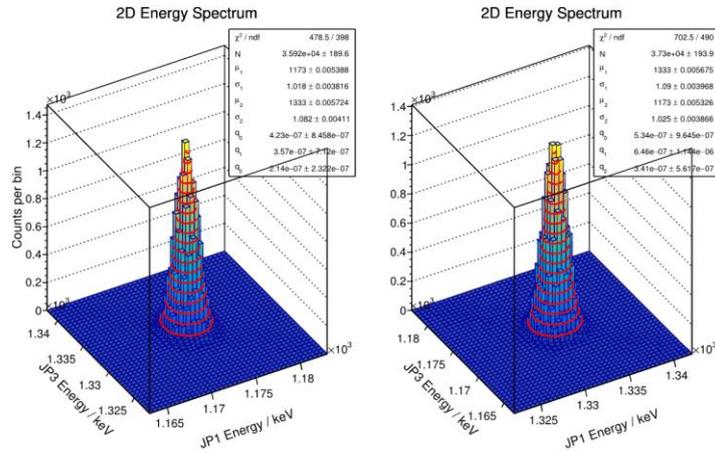


图 3-18 双探头高纯锗伽马谱仪中点源 ^{60}Co 的二维能谱图。

Fig. 3-18 2D spectrum of ^{60}Co point source on DHPGe.

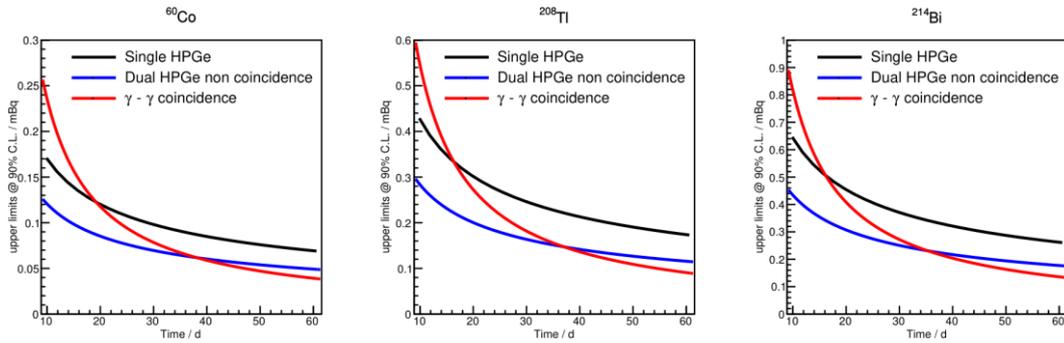


图 3-19 低放射性样品三种测量方法在 90%置信度的上限值. X 轴是测量时间, Y 轴是样品放射性活度的上限值。

Fig. 3-19 γ - γ upper limits @ 90 C.L. for low radioactive sample using three measurement methods. X-axis is measured time, Y-axis is the upper limit.

3.7 本章小结

本章主要介绍了用第二台高纯锗伽马谱仪 JP3 和 JP1 形成对头放置的双探头高纯锗伽马谱仪的灵敏度升级计划。

章节 3.1 介绍了 JP3 的型号选择过程, 分析了 18 种不同的锗晶体尺寸做为 JP3 时获得的灵敏度提升效果差异, 最终 JP3 选择锗晶体直径 85 mm 厚度 30 mm 的高纯锗伽马谱仪 ORTEC SP8530, 它与其他商用高纯锗伽马谱仪的灵敏度差异小于 13%。

章节 3.2 介绍了双探头高纯锗伽马谱仪的屏蔽体设计。在 JP3 的冷指上焊接法兰,

利用真空波纹管实现在 JP3 探头位置调整的同时，保持腔体内的真空。在升级后的新系统中，把铜屏蔽体做成一个 10 cm 厚的空心腔体，可以极大的减小腔体的体积和表面积，以增加腔体的真空度和除氦效果。根据 ICP-MS 和树脂交换法测量结果，估计铜屏蔽体整体放射性可降低 10 倍。真空测量腔体体积减小 6 倍，表面积减小大于 200 倍，预计可达泵的极限真空度~10 帕，腔体内氦气浓度减小 60 倍。

章节 3.3 介绍了双探头高纯锗伽马谱仪的安装过程，熟悉安装过程可以加快施工进度且方便日后的维护检查。

章节 3.4 结合效率提升和本底抑制，估计高纯锗伽马谱仪的所能达到的灵敏度水平。预期对不同的核素，比 JP1 有 2-4 倍的提升效果。

章节 3.5 分析了考虑样品对探头自身产生的本底产生屏蔽效应后样品的活度计算方法。利用在不同的距离取本底，结合蒙特卡洛模拟得到任意距离的本底，最后得到样品屏蔽效应不可忽略时的活度计算公式。

章节 3.6 介绍了用伽马-伽马符合方法测量材料放射性的原理和优势。伽马-伽马符合方法的本底比常规方法极大降低，对尺寸较小的样品有优势。随着测量时间的增加，伽马-伽马符合方法对低放射性样品的灵敏度可提升至 μBq 。

第四章 总结与展望

天文观测现象揭示了宇宙中可能普遍存在暗物质,但目前为止还没有从实验上直接探测到暗物质。PandaX 经历了 PandaX-I/II, 到如今的 PandaX-4T, 在暗物质探测领域取得了丰富的成果。PandaX-II 的实验结果曾在 2016 年, 在《物理评论快报》上以封面论文的形式发表^[27], PandaX-4T 试运行的结果再次发表在《物理评论快报》^[3]。本底水平是影响实验上探测到暗物质能力的重要因素, 各大暗物质实验室都在寻求低放射性材料用来搭建暗物质探测器^[28-29]。PandaX 实验如果能在材料的本底控制方面领先, 那么就可能对 WIMPs 的微分散射截面给出更强限制。高纯锗伽马谱仪在暗物质实验的本底甄选上发挥着重要作用, 但受灵敏度限制, 高纯锗伽马谱仪不能给出极低放射性材料的精确值, 这种材料的真实放射性可能会比上限值有数量级的差距。提升高纯锗伽马探测器的灵敏度, 能够增强对低本底材料的上限值限制, 且精确测量材料放射性也有助于挑选更低本底的材料用来搭建探测器。

由 JP1 升级而成的双探头高纯锗伽马谱仪, 对暗物质实验关心的不同核素, 预期可以有 2-4 倍的灵敏度提升。灵敏度总是越强越好, 世界上灵敏度较好的高纯锗伽马谱仪是 Gran Sasso 实验室的 GeMPI, 可达 $\sim \mu \text{Bq/kg}$ ^[10, 30], 升级后的双探头高纯锗伽马谱仪和 GeMPI 仍然有一定的差距。这也说明 PandaX 实验室的高纯锗伽马谱仪的灵敏度, 仍然有较大的提升空间。进一步提升高纯锗伽马谱仪的灵敏度, 为暗物质实验甄选出更低本底的探测器材料, 有着很大的研究意义。

用常规的方法测量材料放射性, 高纯锗伽马谱仪的灵敏度提升在设计上总离不开提升探测效率和降低本底两种方法。研究效率提升和本底抑制的空间, 有助于了解下一步灵敏度升级的方向。

4.1 探测效率的提升空间

暗物质实验和中微子实验均关心材料中放射性同位素 ^{238}U 和 ^{232}Th 的含量, 这两个核素的衰变链上, 均可以产生分支比较高的能量小于 500 keV 伽马射线。在章节 3.4 中曾发现, 对能量小于 500 keV 的伽马射线, 锗晶体的厚度影响不大, JP3 30 mm 左右的锗晶体已经可以很好的沉积这些伽马射线的能量, 和 JP1 的 104 mm 厚度区别不

大。因此对锗晶体而言，影响这些伽马射线的探测效率的因素，更大的的是其对样品所张立体角或者直径。如图 4-1，考虑一个尺寸远小于锗晶体半径的样品正放在 JP1 和 JP3 的探头中间，JP1 和 JP3 的锗晶体平面对样品所张立体角均约是 2π ，它们之和已经接近 4π 。但锗晶体厚度对 ^{238}U 和 ^{232}Th 的探测效率影响又不大，因此对小尺寸样品，在探测效率上的提升空间已经不大。

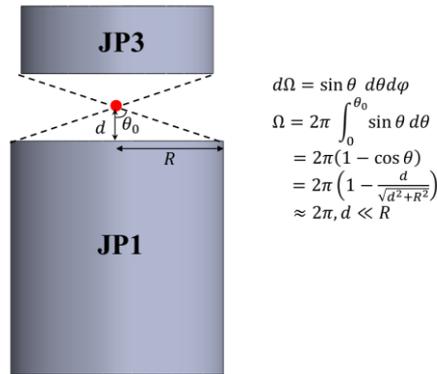


图 4-1 锗晶体对尺寸远小于锗晶体半径的样品所张立体角计算。

Fig. 4-1 Calculation of solid angle of germanium crystal to sample which size is much smaller than the radius of germanium crystal.

当然，对尺寸接近或者大于锗晶体半径的样品，在探测效率上仍然有提升空间，仍然可以通过再增加锗晶体数量的方法来提升探测效率。但对大尺寸样品，再增加一台高纯锗伽马谱仪，锗晶体对样品所张的立体角提升的效果可初略认为是 3:2，和双探头高纯锗伽马谱仪的 2:1 对比，性价比略低。

4.2 本底抑制空间

在章节 2.2.3 中对比世界上一些实验室的高纯锗伽马谱仪的本底水平，JP1、JP2 和世界上本底最低的仍然有着不小的差距。这也说明了在本底抑制上，JP1 和 JP2 的提升空间较大。正确分析高纯锗伽马谱仪的本底来源，才能找到针对性的控制方法。JP1 最高的本底是 ^{210}Pb 达 0.9mHz， ^{210}Pb 及其子核 ^{210}Bi 均可发生 β 衰变，因而会在高纯锗伽马谱仪的本底中产生一段连续谱。幸运的是，分析发现这段连续谱对其他核素的自底影响并不大，其他核素的自底仍然主要来自于自身衰变的伽马全能峰，但 ^{210}Pb 本底比第二高的 ^{232}Th 的 239 keV 本底 0.3 mHz 高 3 倍多，如此高的本底存在，对提升高纯锗伽马谱仪的灵敏度必定是无帮助的。 ^{210}Pb 最大的可能性是来自于探头

封装材料在加工前,长时间暴露在空气中吸附的氦子体。如何用有效的方法去除 ^{210}Pb 是一个值得研究的内容。

对其他核素,如果在双探头伽马谱仪中,确定了铜屏蔽体的纯度提升 10 倍,且腔体真空度确定达到了 $\sim 10\text{ Pa}$ 的水平,高纯锗伽马谱仪仍然有较高本底的话,那么剩下的可能性就只能和 ^{210}Pb 一样来自于探头本身了。另外,在提升铜屏蔽体纯度方面,清华大学目前正在使用由德国进口的高纯度铜做为高纯锗伽马谱仪的屏蔽材料,可以关注其本底改善效果,加以借鉴。

总而言之,双探头高纯锗伽马谱仪在灵敏度提升方面不是终点。

参 考 文 献

- [1] Lotty Ackerman, Matthew R. Buckley, Sean M. Carroll *et al.* Dark matter and dark radiation[J]. Phys. Rev. D, 2009-01: 023519.
- [2] P. A. R. Ade *et al.* Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results[J]. Astron. Astrophys. 2014, 571: A1.
- [3] Y. Meng *et al.* Dark matter search results from the PandaX-4T commissioning run[J]. Phys. Rev. Lett. 127, 261802.
- [4] Zhicheng Qian *et al.* Low Radioactive Material Screening and Background Control for the PandaX-4T Experiment [arXiv]. arXiv:2112.02892v2.
- [5] D. S. Akerib, S. Alsum, H. M. Araújo *et al.* Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure [J]. Phys.rev.lett, 2017, 118(2):021303.
- [6] E. Aprile, J. Aalbers, F. Agostini *et al.* Dark Matter Search Results from a One Tonne×Year Exposure of XENON1T [J]. Phys. Rev. Lett, 2018.
- [7] 王旭明, PandaX 实验放射性本底控制与分析[博士论文]. 上海:上海交通大学. 2017.
- [8] Z. Guo *et al.* Muon Flux Measurement at China Jinping Underground Laboratory[J]. Chin. Phys. C 45 (2) (2021) 025001. arXiv:2007.15925.
- [9] 汪晓莲, 李澄, 邵明等, 粒子探测技术[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2015.
- [10] 溴化镧闪烁探测器宣传册[DB].
<https://www.ortec-online.com.cn/products/radiation-detectors/scintillation-detectors/>
- [11] Gordon R. Gilmore. Practical Gamma-ray Spectrometry 2nd Edition[M]. John Wiley & Sons Ltd
- [12] R.H.M. Tsang *et al.* GEANT4 models of HPGe detectors for radioassay[J]. Nucl.Instrum.Meth.A 935 (2019) 75-82.
- [13] Hardy J C , Iacob V E , Sanchez-Vega M , *et al.* Precise efficiency calibration of an HPGe detector: source measurements and Monte Carlo calculations with sub-percent precision[J]. Appl Radiat Isot, 2002, 56(1-2):65-69.
- [14] X. Chen *et al.* BambooMC -- A Geant4-based simulation program for the PandaX experiments[J]. JINST 16 (2021) 09, T09004.
- [15] Paul Scovell. Review of Gamma-ray spectrometry for Material Radio-assay in Current and Future Generation Rare Event Search Experiments [R]. 2019.

- [16] Currie, L. A. Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination[J]. *Analyt. Chem.* 40 (1968) 586.
- [17] 刘玉魁, 杨建斌, 肖祥正. 真空工程设计[M].北京: 化学工业出版社. 2017.
- [18] 徐成海. 真空工程技术[M].北京: 化学工业出版社. 2006.
- [19] F. Jörg, G. Eurin, H. Simgen, *et al.* Production and characterization of a ^{222}Rn -emanating stainless steel source[arXiv]. arXiv:2205.15926.
- [20] Y. Meng, J. Busenitz, A. Piepke, *et al.* Radon Emanation from Dust of Varying Composition and Size [arXiv]. arXiv:2201.00699.
- [21] 张涛, 季向东. 测量 γ 光子的真空式谱仪探测器[P]. 中国专利: ZL201820412593.6, 2018-11-09.
- [22] GB/T 6070-2007. 真空技术 法兰尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 徐大方. 表面粗糙度参数的选取方法[J]. *机械工艺师*, 1990(04):38.
- [24] 袁影, 王思广. 电感耦合等离子体质谱法测定单晶铜中痕量放射性核素钷和铀的含量[J]. *核技术* 2018年第41卷第9期.
- [25] M. Thiesse, P. Scovell, L. Thompson. Background Shielding by Dense Samples in Low-Level Gamma Spectrometry[arXiv]. arXiv:2204.06792.
- [26] G.J. Feldman, R.D. Cousins. Unified approach to the classical statistical analysis of small signals [J]. *Phys. Rev. D* 57 (1998) 3873.
- [27] Xiangyi Cui *et al.* Dark Matter Results from 54-Ton-Day Exposure of PandaX-II Experiment [J]. *Phys. Rev. Lett.* 119, 181302.
- [28] Aprile E, Arisaka K, Arneodo F, *et al.* Material screening and selection for XENON100[J]. *Astroparticle Physics*, 2012.
- [29] Finnerty P, Macmullin S, Back H O, *et al.* Low-Background gamma counting at the Kimballton Underground Research Facility[J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2010, 642(1):65-69.
- [30] D Budjáš, Cattadori C, Gangapshv A, *et al.* Highly Sensitive Gamma-Spectrometers of GERDA for Material Screening: Part 2[J]. arxiv cornell university library, 2008.

攻读硕士学位期间学术论文和科研成果目录

- [1] 付孟婷, 王思广, 程晨等. 铜表面氦原子体去除方法研究. 核技术 2021 年第 44 卷第 2 期.
- [2] PandaX Collaboration, Zhicheng Qian *et al.* Low Radioactive Material Screening and Background Control for the PandaX-4T Experiment [arXiv]. arXiv:2112.02892v2.
- [3] X. Chen, C. Cheng, M. Fu *et al.*, BambooMC -- A Geant4-based simulation program for the PandaX experiments [arXiv]. arXiv:2107.05935.
- [4] Y. Meng, J. Busenitz, A. Piepke, *et al.* Radon Emanation from Dust of Varying Composition and Size [arXiv]. arXiv:2201.00699.

致 谢

三年的硕士生涯眨眼即逝，三年的生活和学习难忘且快乐。感谢我的导师孟月老师，在三年的时间里对我的学习给予了极大的帮助。孟月老师对高纯锗探测器伽马谱仪有着丰富的经验，对我的样品分析结果给出了重要的建议，她认真负责的工作态度也是我学习的榜样。感谢张涛老师，他在粒子探测器的设计和搭建方面经验丰富，双探头高纯锗伽马谱仪的屏蔽体设计就是在他的指导和参与下完成的。感谢刘江来、赵力、周宁和韩柯老师，他们对双探头高纯锗伽马谱仪以及屏蔽体设计方面给出了宝贵建议。与低本底组的小伙伴们相处愉快且融洽，感谢钱志成、司琳、武蒙蒙、程晨和付孟婷，他们帮助我从一个研究生新生快速融入低本底组中，在平时的学习中也时常提供重要的帮助。感谢 PandaX 合作组的所有成员，和他们一起在锦屏实验室的生活印象深刻，气势恢宏的葛洲坝水电站留下了我们快乐的足迹，锦屏二号营地的美食以及四号营地的“锦屏沃尔玛”让我们念念不忘。

最后，特别感谢我的父母和挚爱的妻子，没有他们在背后默默的支持，我不可能完成三年的研究生学业。