

暗物质重点专项年度评审 吨级液氙暗物质探测器技术研发 (课题四)

杨长根，关梦云

2017/09/25，上海交通大学

1、课题目标

开展液氦探测器技术的模型研究，掌握相关探测器技术，并开展吨级液氦暗物质直接探测关键技术的研发，为未来百吨级液氦暗物质终极探测和太阳中微子研究确定方案。

课题年度计划

年度	任务	考核指标	成果形式
2016年7月 2017年6月	进行吨级液氩探测器结构设计，并组织招标生产。完成探测器部件的采购。研制 TPB 镀膜装置。着手建立精确的探测器模拟程序包，对探测器结构设计进行优化。		吨级液氩探测器结构设计报告
2017年7月 2018年6月	完成大液氩杜瓦的加工及验收，联合测试制冷系统的性能。着手采购低温光电倍增管，建立低温光电倍增管的批量测试系统。着手建立液氩探测器在线、离线分析软件。	完成液氩探测器低温系统运行	大液氩杜瓦实物及测试报告
2018年7月 2019年6月	进行吨级液氩探测器的安装工作。充装液氩、循环纯化。进行液氩探测器运行参数的记录。与电子学小系统联调。继续开展相关软件工作。	探测器系统温度稳定性好于 0.2K；液氩纯度以漂移电子寿命计算优于 20 微秒（约等价于 6N 纯度）	测试报告
2019年7月 2020年6月	使用电子学原型样机系统调试探测器，吨级液氩探测器实验试运行。		液氩探测器系统实物
2020年7月 2021年6月	对吨级液氩探测器进行标定。分析探测器的性能。	液氩探测器光产额达到 4 光子/keV	测试报告

年度评审汇报内容

任务计划：

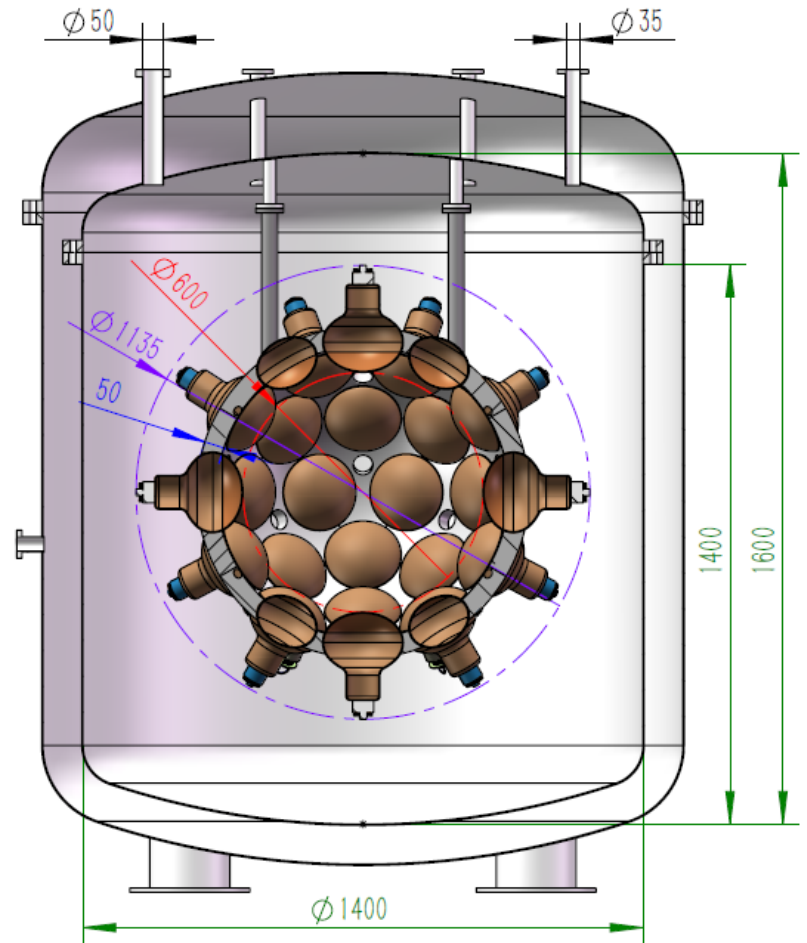
- 吨级液氩杜瓦结构设计，发标生产
- TPB镀膜装置采购
- 建立液氩探测器模拟程序，对探测器设计优化

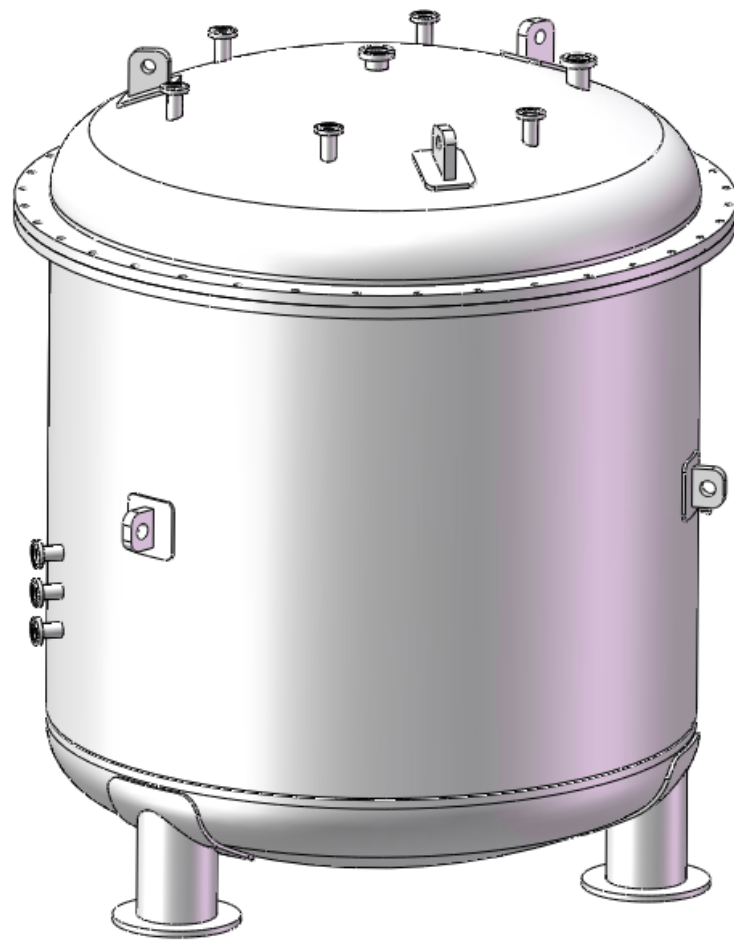
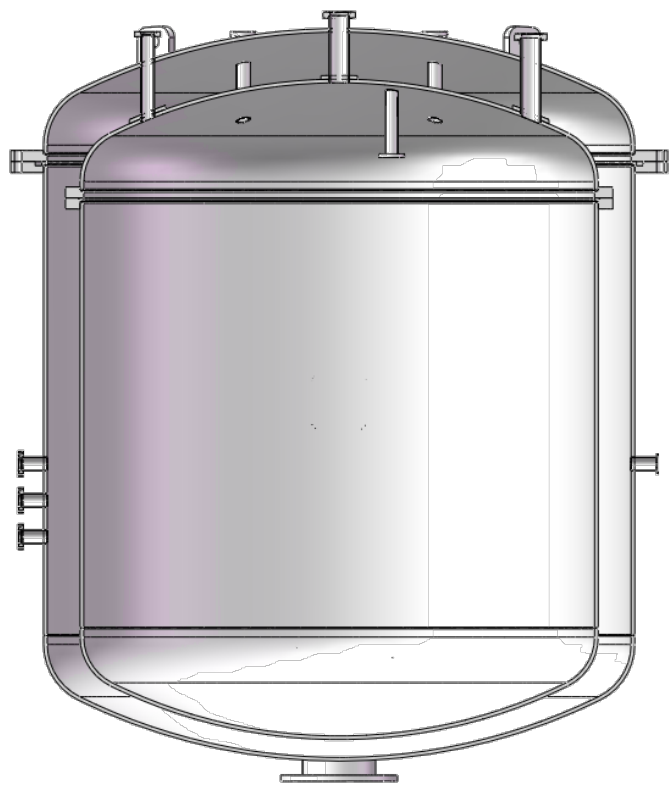
物理研究内容：

- 完成氩气纯化过程的量化测量（衰减时间常数测量）
- 完成漂移电子寿命测量实验规划 - 氩气纯度测量
- 基于2016年发表文章液氩探测器实验数据完成模拟 - 提供吨级液氩探测器模拟参数用于探测器优化。

吨级液氙杜瓦进展

- 液氙杜瓦尺寸：内直径1.4米，高1.6米，充装液氙>3吨
- 单相液氙探测器方案：使用8寸PMT和3寸PMT按照 4π 立体角密集排布，PMT光阴极包围球形直径为60cm。
- 光电倍增管支撑结构主体由PTFE材料加工。
- 目前详细工程图已经完成，已经签订加工合同(合肥聚能电物理高技术开发有限公司)。



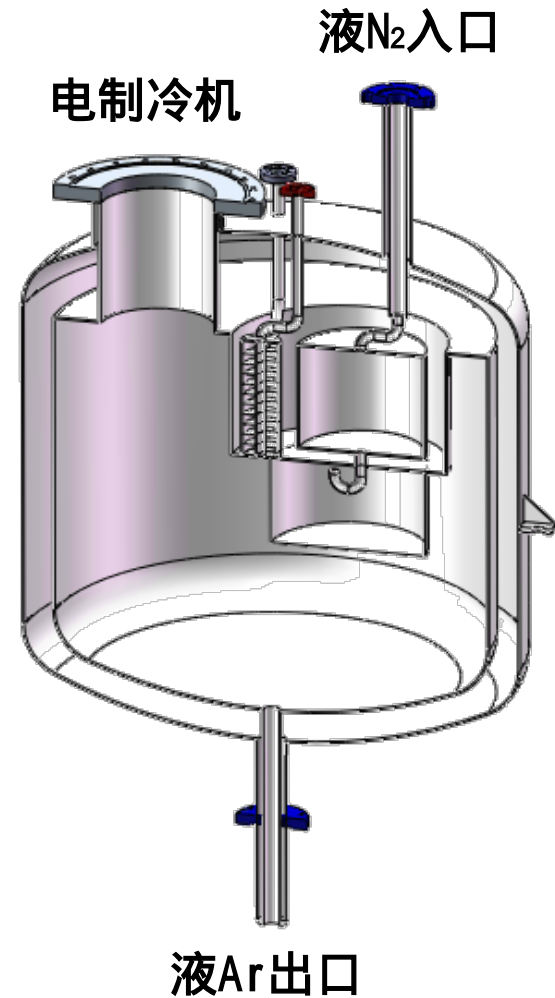


- 加工要求:

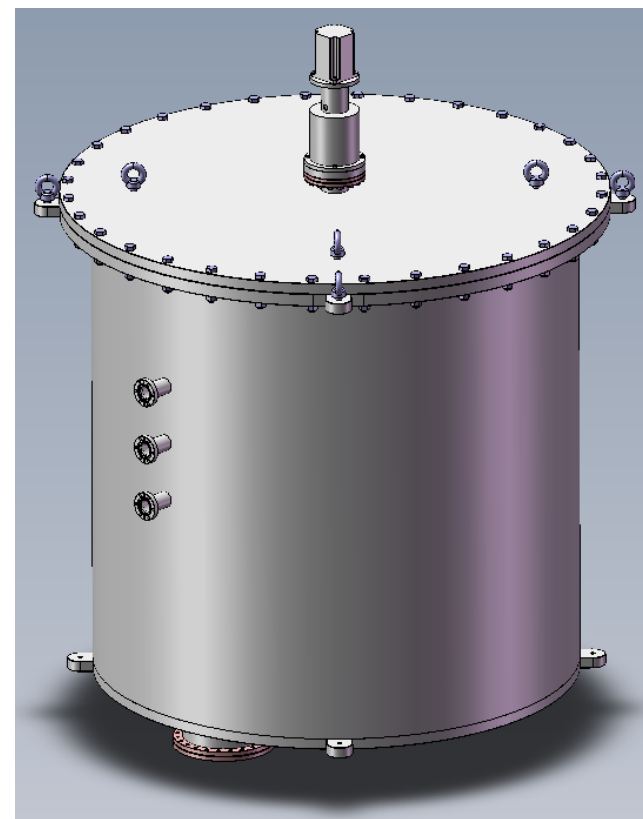
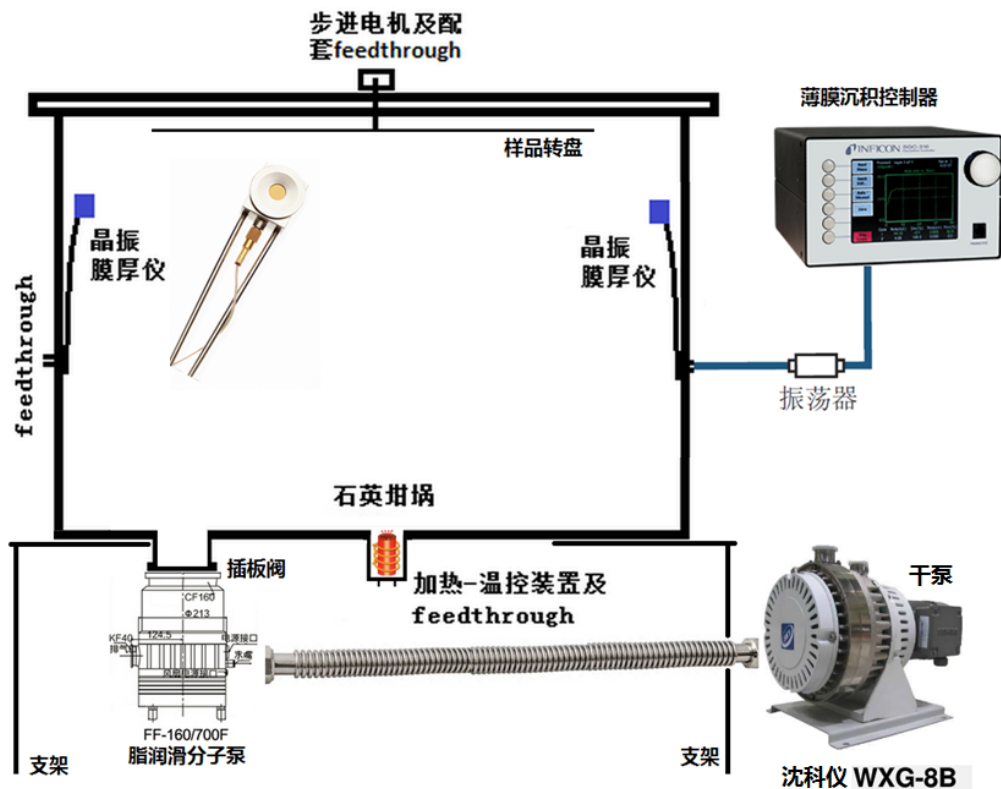
- 液氮杜瓦内罐内壁抛光处理;
- 内罐所有密封均采用金属材料;
- 总漏热小于50瓦, 漏气率小于 $10^{-10}\text{Pa m}^3/\text{s}$

电-液氮混合制冷机

- 为防止停电影响，使用电制冷+液氮制冷混合模式的制冷系统。
- 氦气循环流速100slm，设计最大制冷功率1000瓦；电制冷机提供平衡系统漏热的制冷功率。
- 制冷系统采用PID工控设备实现精确温度控制。
- 采用真空隔热软管连接液氮杜瓦。
- 准备好开始加工

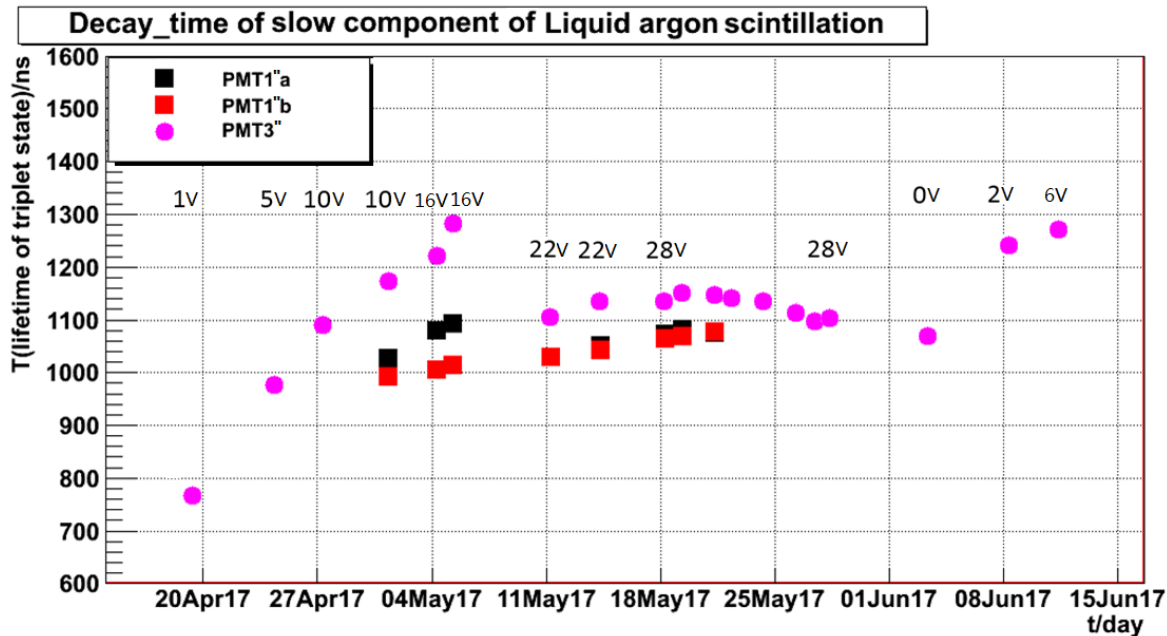


TPB真空镀膜装置

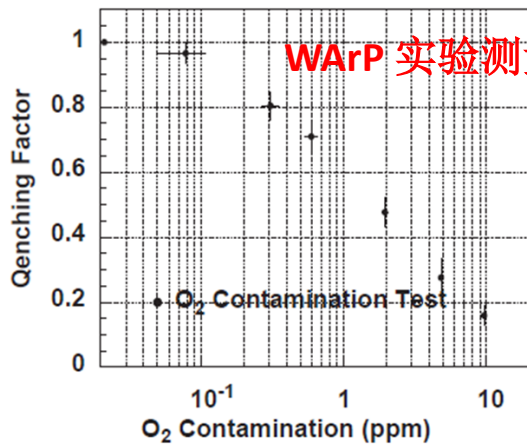


- 内直径、高1.2米，顶部全开口大法兰
- 技术参数：罐子内部要求电抛，氦检漏气率达到 $10^{-10}\text{Pa m}^3/\text{s}$ ，空抽真空度可达 10^{-5}Pa ；
- 由沈科仪加工，已经接近完工

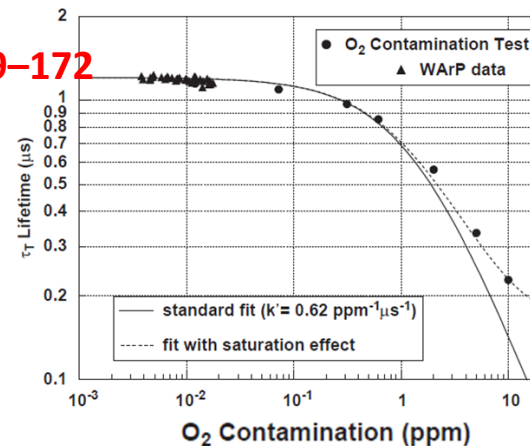
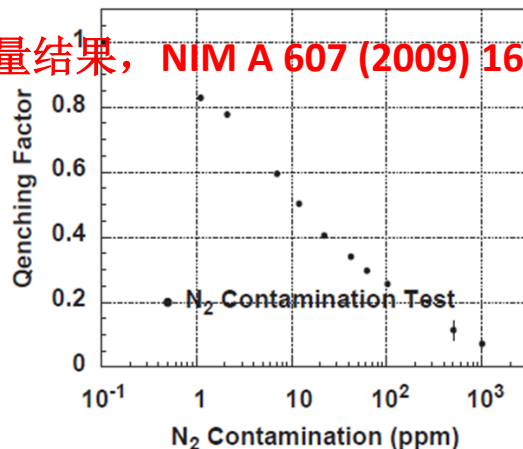
氩气纯化过程的量化测量



- 下图是WArP实验测量结果显示液氩闪烁光的慢成份时间常数和纯度的对应关系；
- 左图是我们的实验结果，气源使用工业99.999%纯度的气体，通过国产的净化器净化
- 实验显示衰减时间常数从770ns逐渐增加到1.265 μ s。



WArP 实验测量结果, NIM A 607 (2009) 169-172

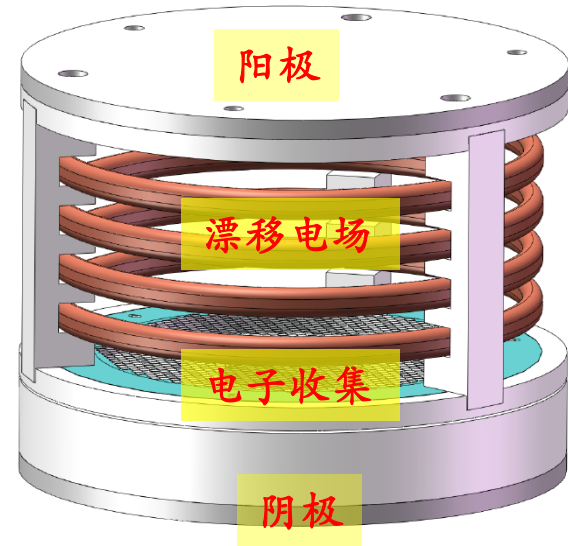
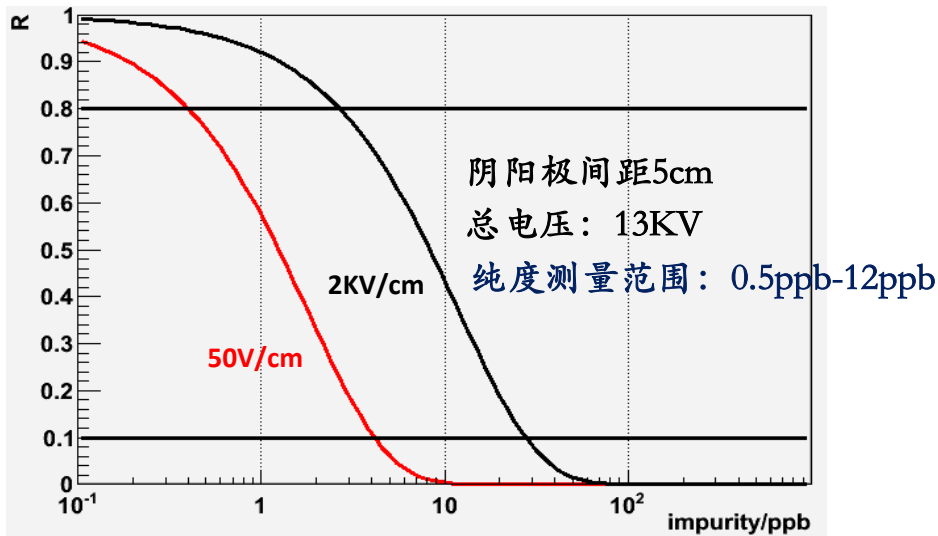


漂移电子寿命测量实验设计

原理：金靶逸出的电子在电场的作用下，从阴极漂到阳极，其按指数衰减

$$R = Q_A / Q_C = e^{-t/\tau} \quad \tau [\mu s] \sim 300 / \rho [\text{ppb}]$$

R与纯度、电场、两极间距有关，为保证R的精度，合理设计探测器的极间距和场强

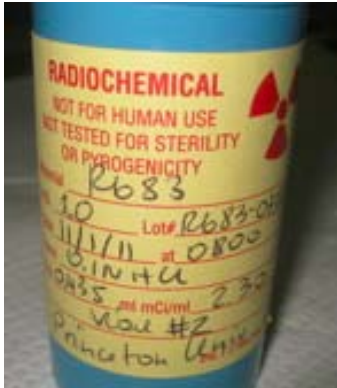


激光器光源：国产MQV-20-IV-10紧凑型纳秒激光器

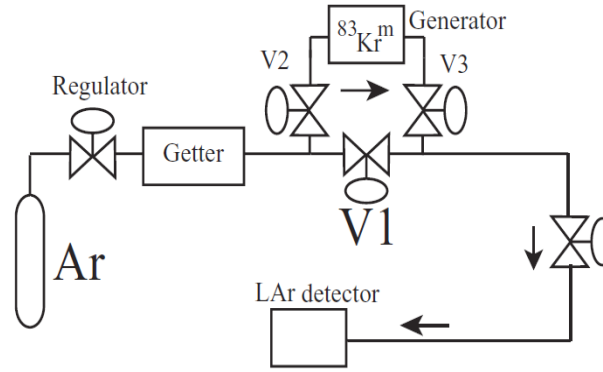
光纤：杜瓦罐内选用的石英光纤 (d=1mm)，用feedthrough引入

波长	266nm	光束发散角(1/e ²)	3mrad
重复频率	10-20Hz	光束指向稳定性	±30
模式	Stable	预热时间	<5分钟
能量	≥2mj	抖动	±0.5ns
脉冲脉宽(FWHM)	≤10ns	衰减	0-100%电控
能量稳定性	5%	光纤耦合头	耦合效率η≥70%
光斑直径(1/e ²)	2mm	电源	一体化风冷电源

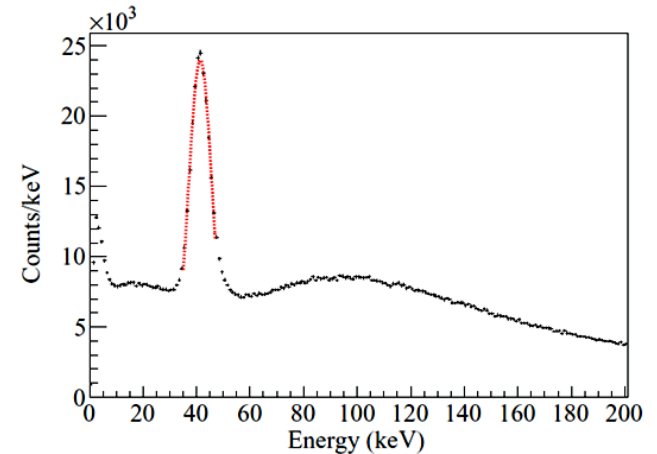
Kr⁸³标定用放射源



氪83源使用Rb83衰变的氪气获得，**美国国家实验室有制备**

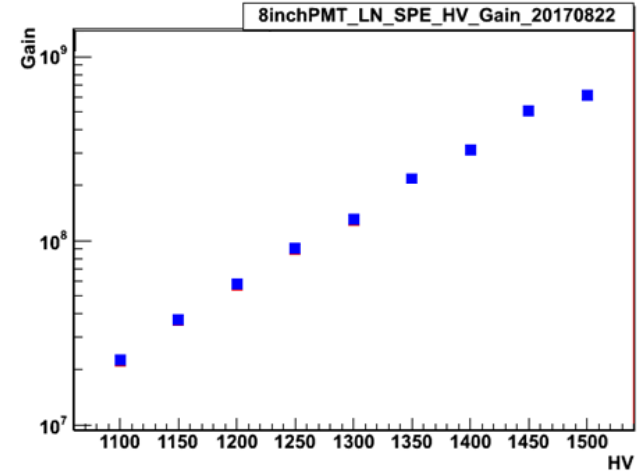
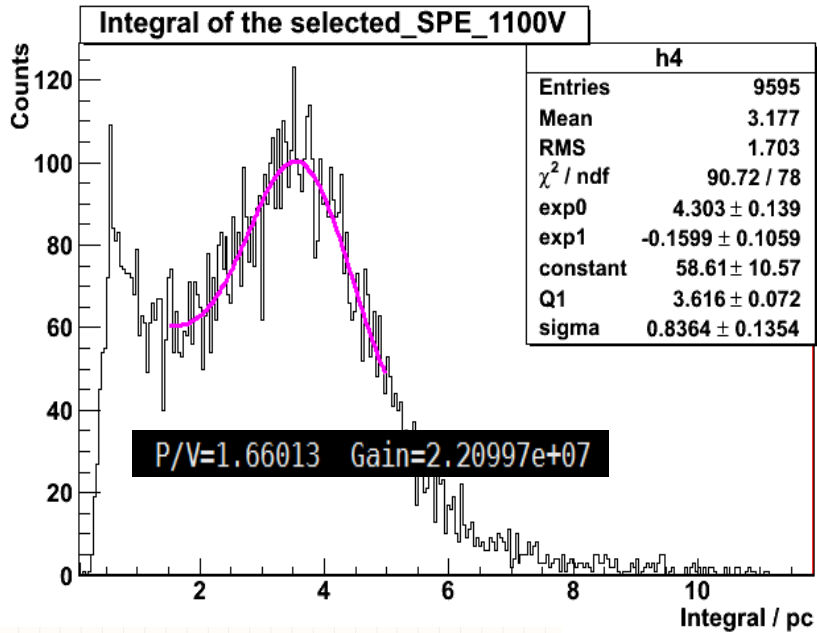
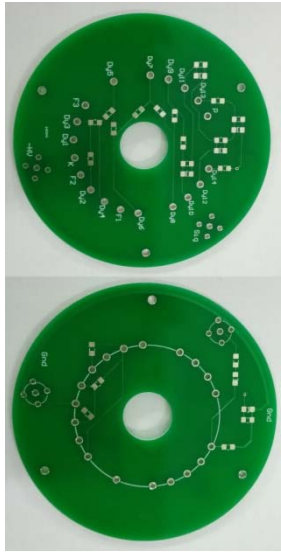


The gas-handling system for the ⁸³Kr^m

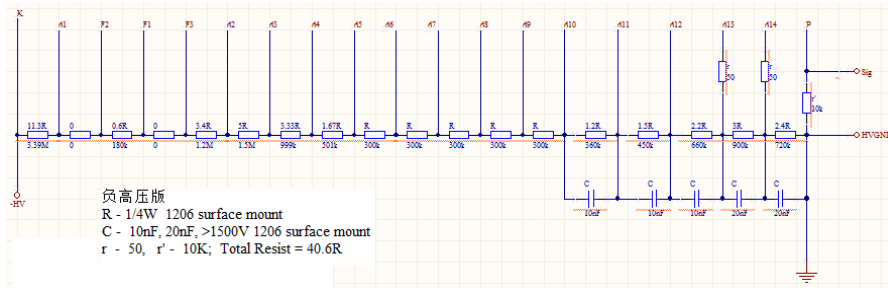


- 32.1keV+9.1keV为低能量的标定放射源，适合用作液氩、液氪的探测器标定。
- 气体的氪83的亚稳态放射源，半衰期只有1.83小时，由铷83（人工合成，半衰期86.2天）衰变产生。
- [PHYSICAL REVIEW C 80, 045809 (2009)]中制备了使用沸石(zeolite)作为载体的^{83m}Kr放射源；arXiv:0912.2337v2中同一拨人发展了使用活性炭作为吸附载体的^{83m}Kr放射源。
- ⁸³Rb was produced by **⁸³Kr(p,n) ⁸³Rb reaction** in external proton beam of the ORNL 86 in. cyclotron(proton E=14Mev). 27uA current and 1hour bombarding on 750ml natural krypton gas can produce about 0.18mCi of ⁸³Rb. [int. J. appl. Radiat. Isotopes V22, 1971 P218-220]
- **希望能和401所合作使用质子束流制备Rb83**

8寸低温PMT性能初步测量

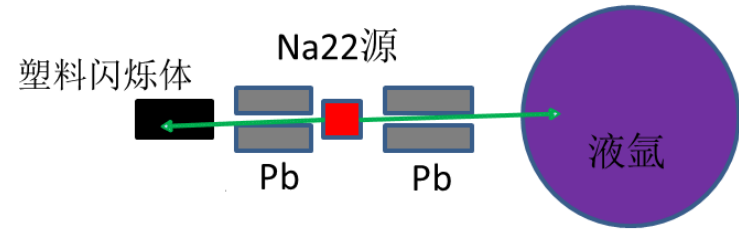
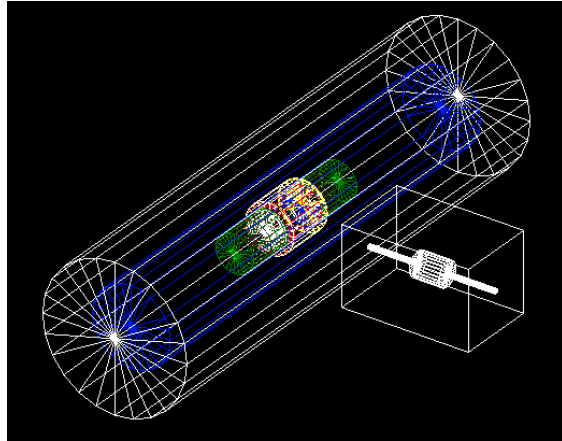


用于低温的base

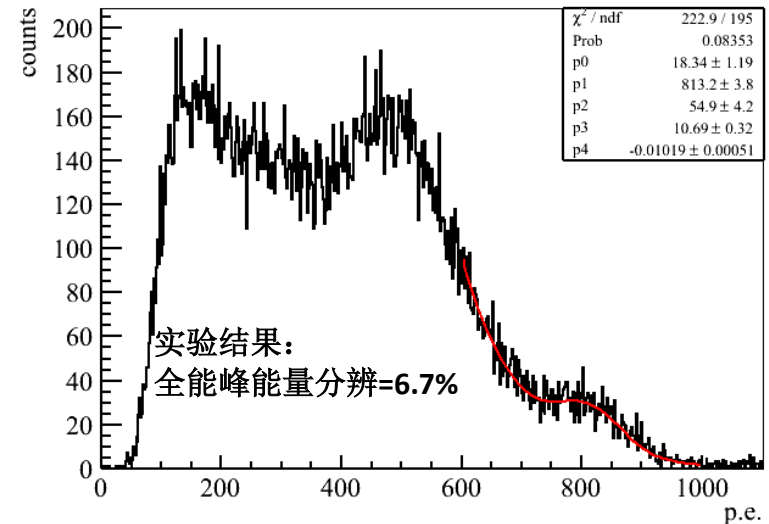
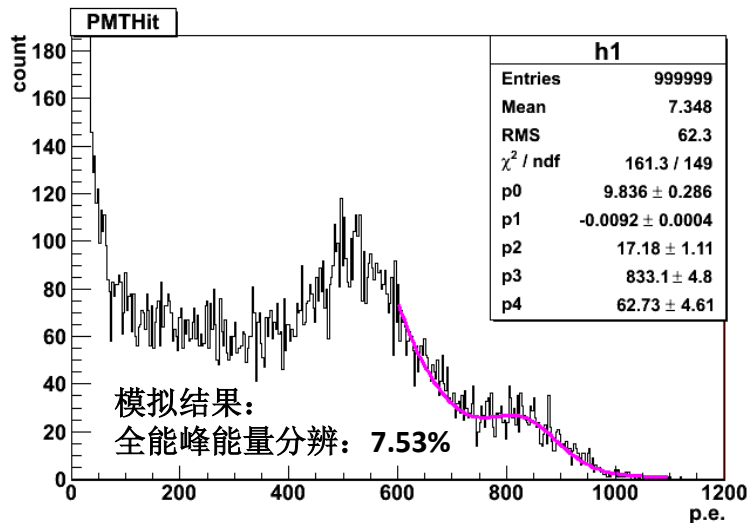


- 拟采用滨淞公司的R5912的低温型号PMT，
- 上图所示样品管子在液氮温度下的单光电子能谱、增益-高压曲线。显示良好的单光电子探测能力及动态范围。

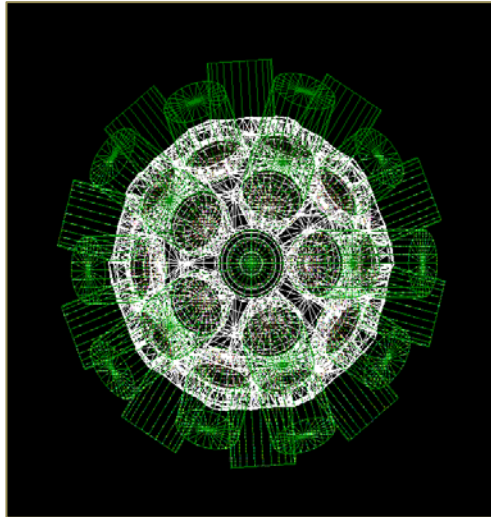
液氦探测器Geant4模拟



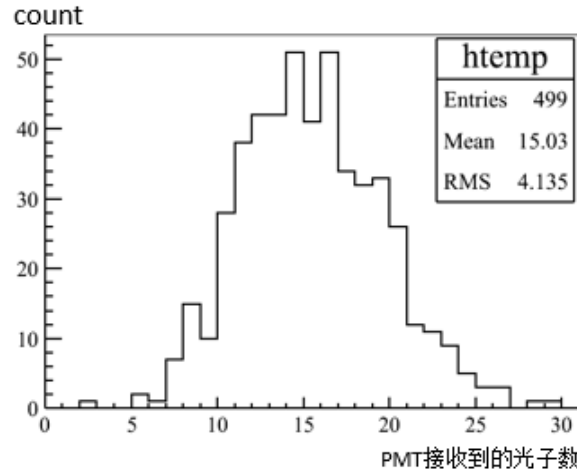
CPC Vol. 40, No. 11 (2016) 116005



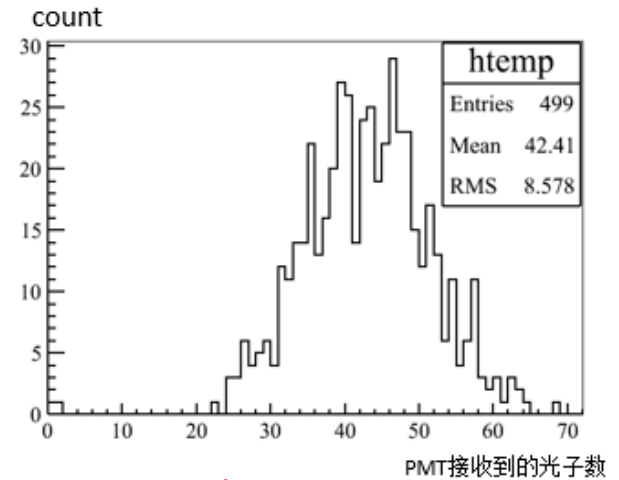
吨级液氦探测器模拟



Geant4模拟几何示意图，绿色为光电倍增管，白色为PTFE支撑结构，整体置于液氦中

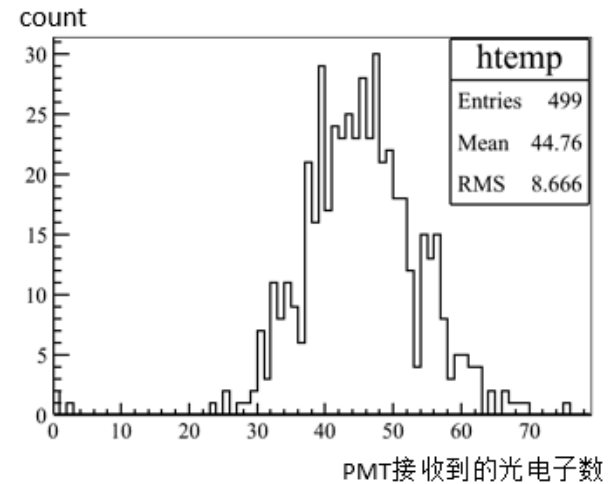


仅PTFE内表面镀TPB膜



仅PMT表面镀TPB膜

10keV电子源置于中心位置，探测器模拟



PTFE内面、PMT面均镀TPB膜

- Geant4探测器模拟结果表明：采用42只8寸PMT球状均匀排列，内部直径60cm的液氦为探测器灵敏物质。
- 光阴极覆盖率70%，滨松公司8寸低温PMT量子效率12%。
- 在内部PTFE表面和PMT外表面均镀上TPB波长位移剂时，可以获得设计值4.4pe/keV光产额。

谢谢支持！