

暗物质重点专项中期考核 吨级液氙暗物质探测器技术研发 (课题四)

杨长根

28/07/2018

1、课题目标

开展液氩探测器技术的模型研究，掌握相关探测器技术，并开展吨级液氩暗物质直接探测关键技术的研发，为未来百吨级液氩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

中期考核汇报内容

任务计划：

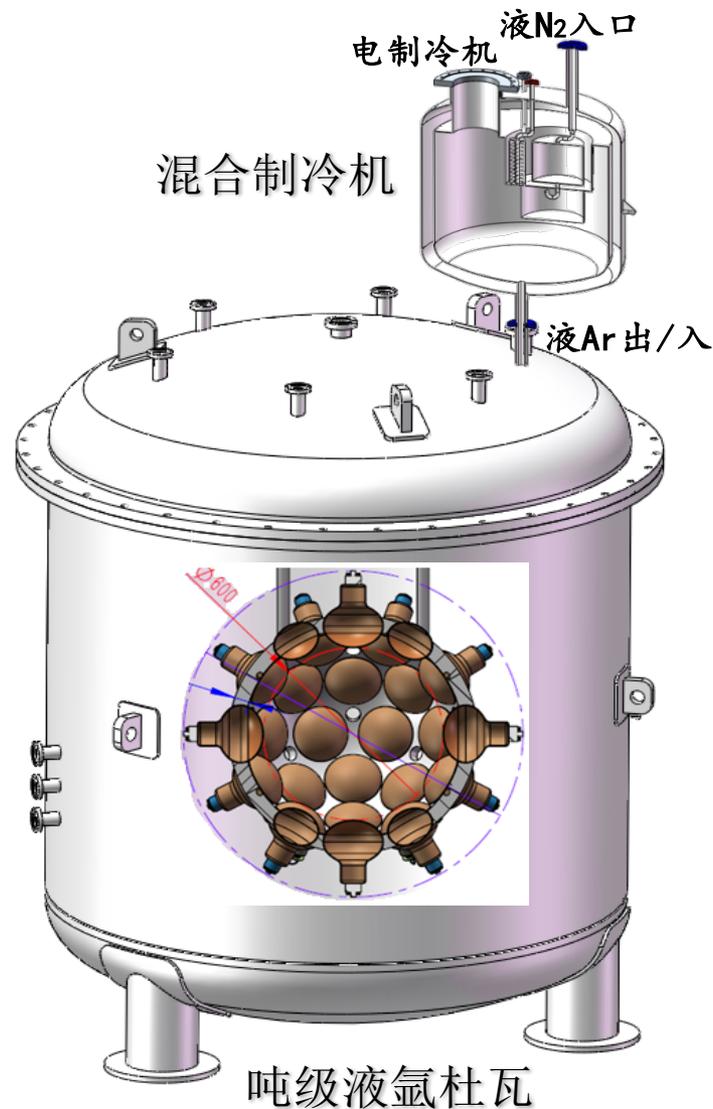
- 完成吨级液氩杜瓦设计、加工、验收。
- 完成电-液氮混合制冷机的设计、加工、验收。
- 完成TPB镀膜设备的采购、制定操作流程，产出镀膜样品
- 完成低温光电倍增管的单管测试，正在进行批量测试系统搭建

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 - 氩气纯度高精度测量
- 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。

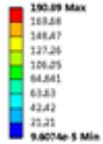
吨级液氦杜瓦进展

- 液氦杜瓦尺寸：内直径1.4米，高1.6米，充装液氦>3吨
- 设计要求：
 - 液氦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 $10^{-10}\text{Pa m}^3/\text{s}$
- 难点：
 - 漏热要低，强度要高；
 - 为降低漏热，液氦杜瓦设计成内罐悬挂于外罐顶盖上的结构；
 - 3吨液氦，需要靠内外罐之间的7根拉管承载；
 - 超长钢丝密封的可靠性。
- 为此，我们选择了合适的厂家(合肥聚能)，并且和厂方合作，做了详细的漏热、受力分析，以确定结构设计。



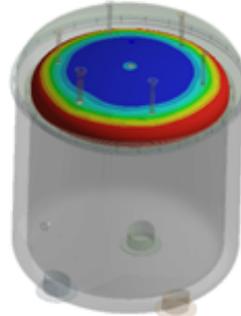
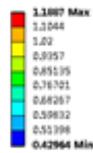
难点处理

C: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Units: MPa
Time: 1
2017/5/16 16:00



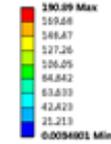
外罐整体应力图

C: Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Units: mm
Time: 1
2017/5/16 16:00

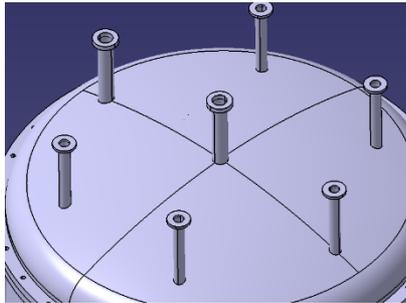


内罐上盖形变图

C: Static Structural
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Units: MPa
Time: 1
2017/5/16 16:00



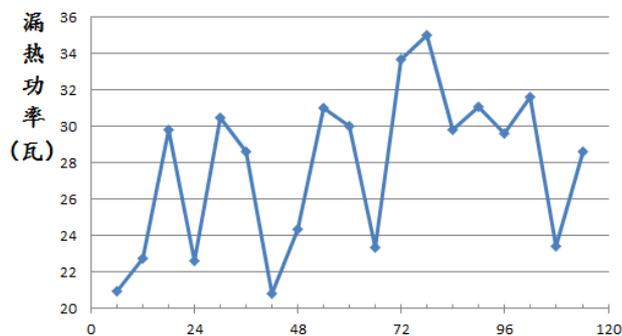
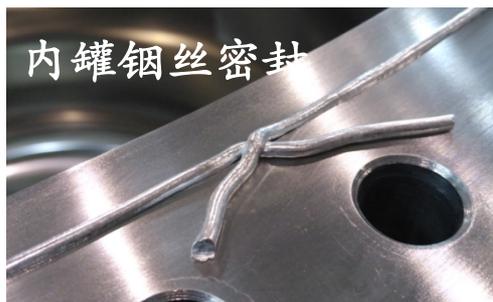
拉管应力图



传导漏热	15W	
辐射漏热	包多层绝热	20W
	表面处理 降低发射率至0.04	77W

- 按照计算结果，选择多层绝热方式减少漏热；表面做镜面处理以减小发射率成本很高（对放射性要求高时可选）
- 对钢丝进行压缩测试、断点压接方式测试以获得相关密封效果，最终固定工艺，并实现有效密封。

吨级液氦杜瓦验收测试



五天蒸发率测量



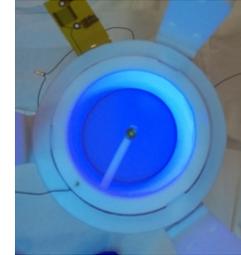
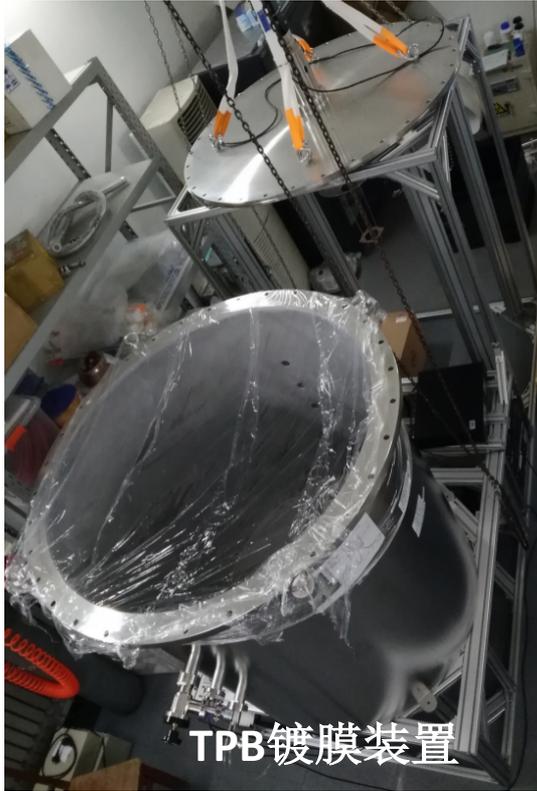
目前液氦大杜瓦已经加工完成，并通过验收，漏气率及漏热功率低于设计要求

电-液氮混合制冷机

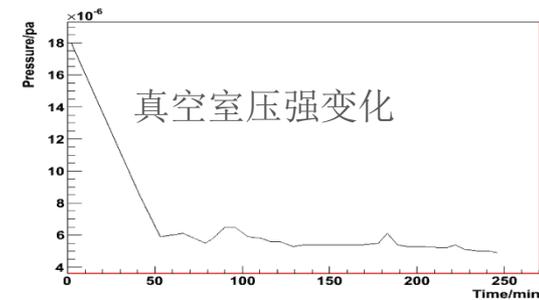
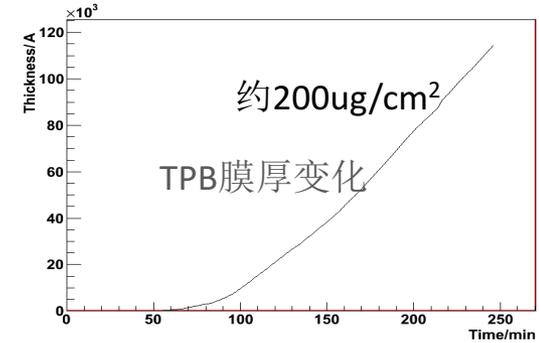
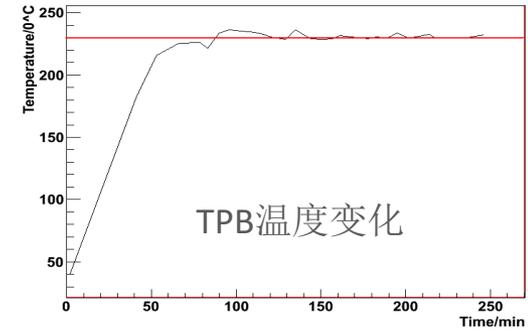
- 为防止停电的影响，使用电制冷+液氮制冷混合模式的制冷系统。
- 氦气循环流速100slm，设计最大制冷功率1000瓦；电制冷机提供平衡系统漏热的制冷功率。
- 制冷系统采用PID工控设备实现精确温度控制。
- 采用真空隔热软管连接液氮杜瓦。
- 初步的测试表明该设备性能符合设计要求。
- 该系统已完成设计、加工、验收，即将运输到货
- 和吨级液氮杜瓦联合测试即将开展。



TPB真空镀膜装置



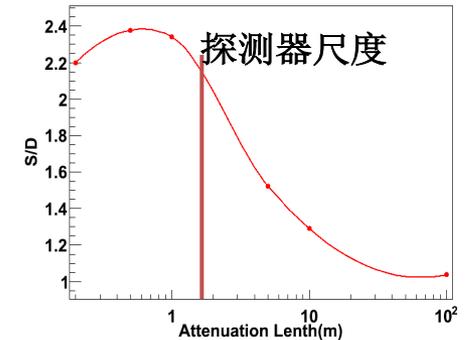
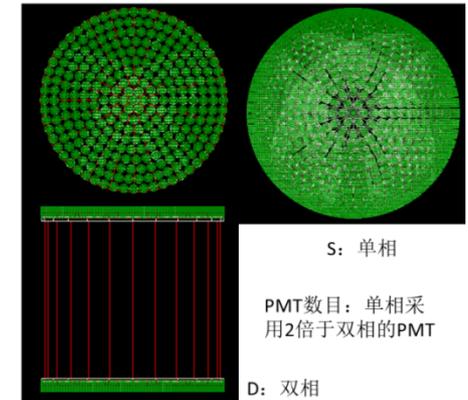
TPC内壁
镀膜在紫
外光下



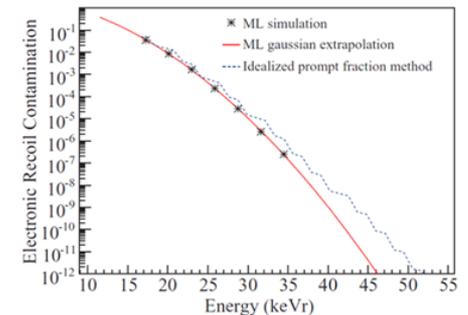
- 内直径、高1.2米，顶部全开口大法兰，真空室内部电抛光。
- 目前镀膜流程、工艺、镀膜产品均已成熟。
- 镀膜时真空度可达 10^{-6} Pa，温度控制达到 ± 1 度，膜厚可以控制到 $1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 精度。

单相液氙探测器 VS 双相

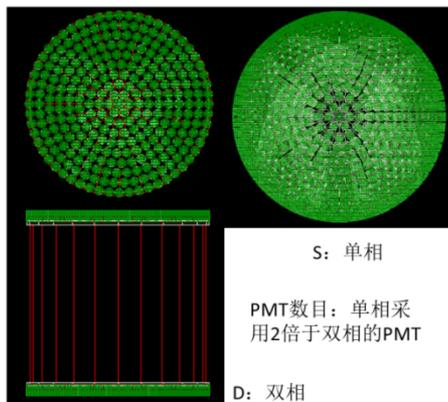
- 双相探测器靠电子的漂移和上下PMT的重心定暗物质事例位置的，扣除本底；（大尺寸）单相探测器同样可以重建事例的位置，达到扣除周围材料本底的目的，不需要双相探测器的位置重建；
- 单相探测器可以（比双相）排布更多的PMT，因此可以获取更多的光电子，提高能量分辨率和本底排斥比；足够补偿双相探测器 $S2/S1 \sim 100$ 倍的本底排斥能力
- 单相的探测器技术更成熟，运行更稳定，有更长的探测器曝光时间，事例的统计性更高，测量精度更高。



arXiv:0904.2930



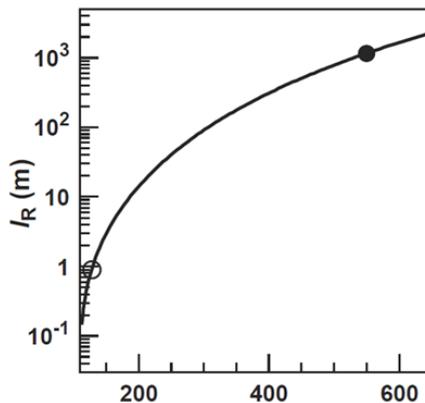
单相液氩探测器模拟：



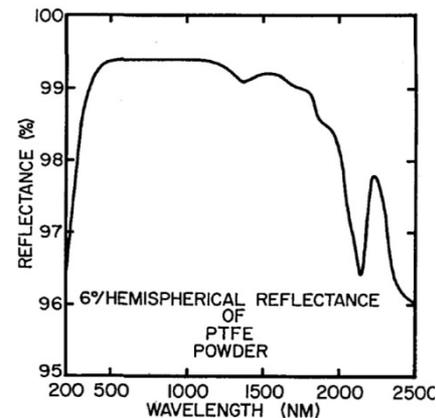
液氩光产额：40/keV,
光电转换：8PE/keV

吸收长度5米(?)

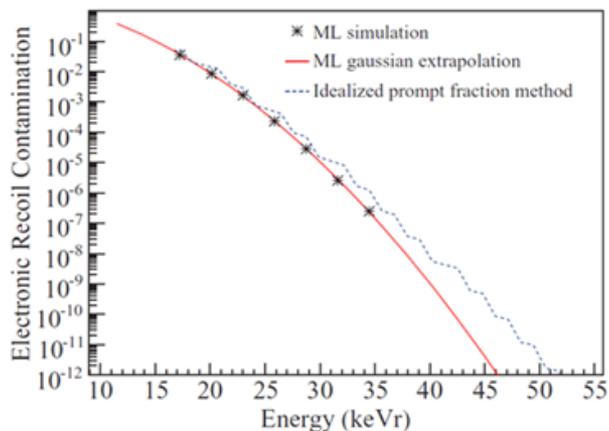
Rayleigh scattering:



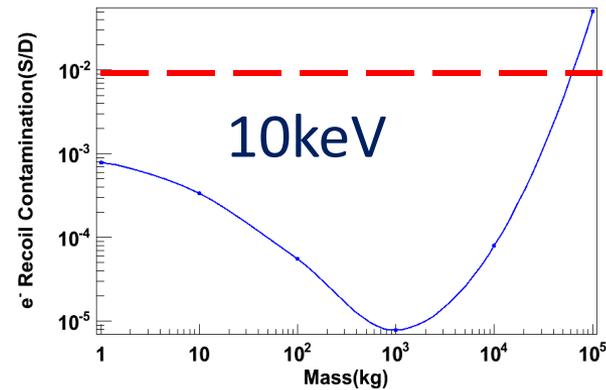
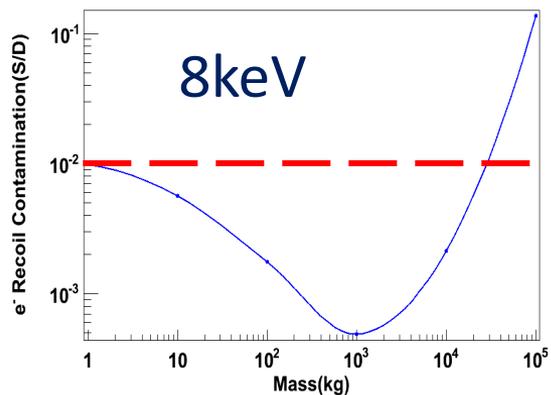
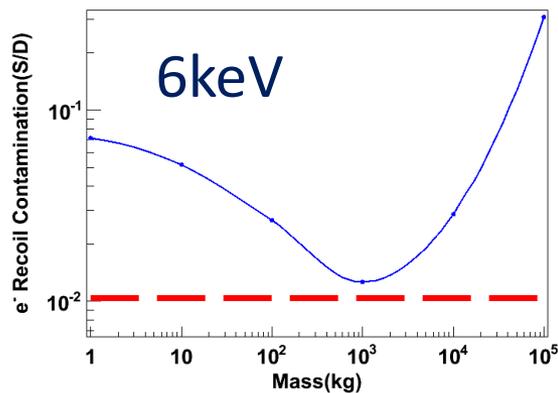
PTFE反射率



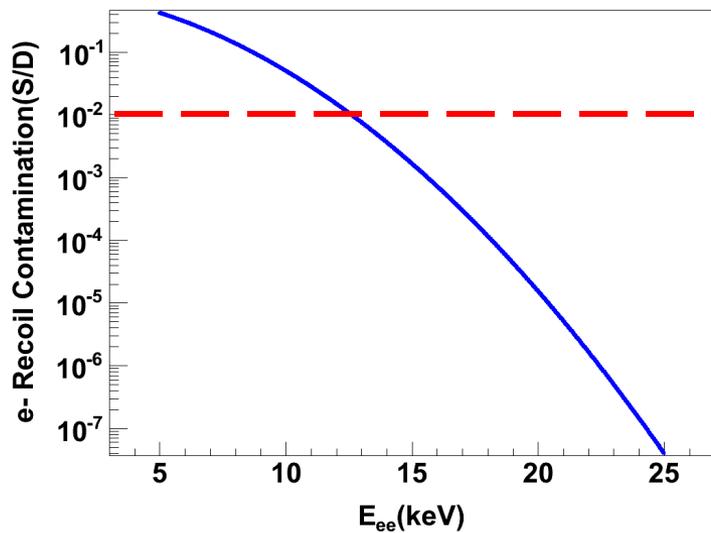
arXiv:0904.2930



单相VS双相液氙探测器



S/D (100t)

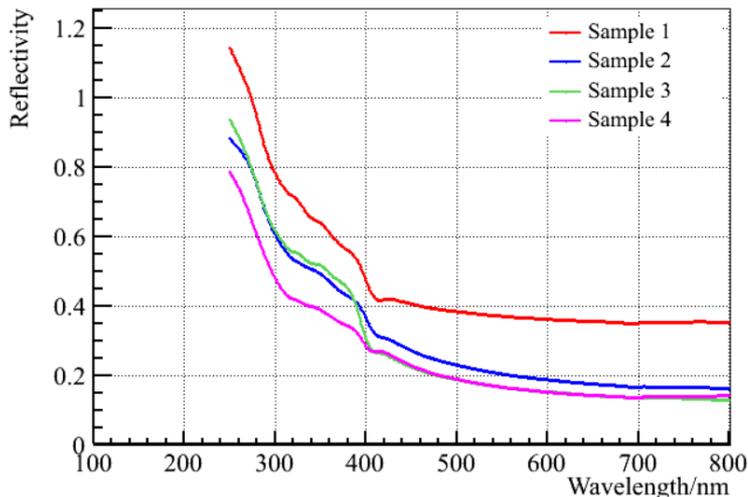
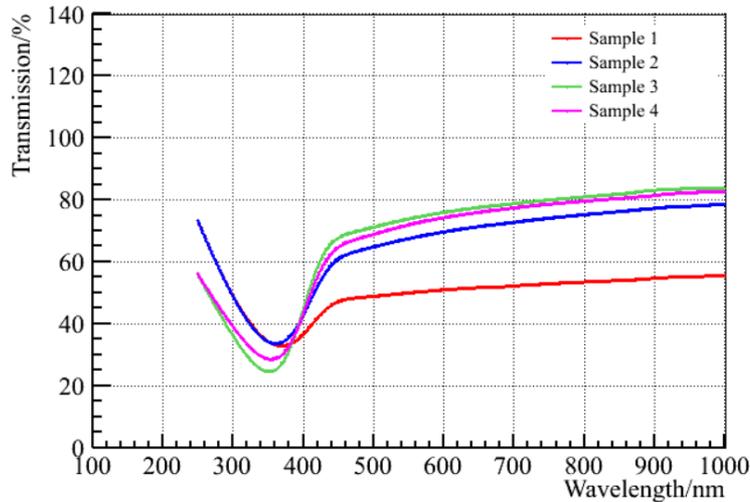
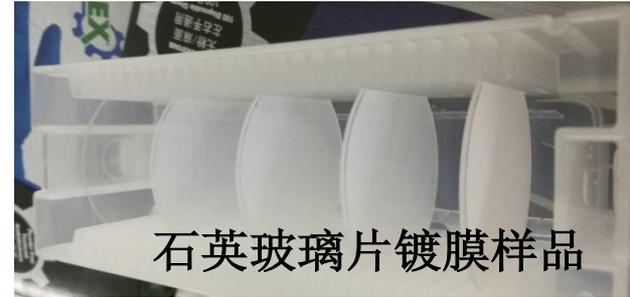


吨级液氙探测器研究内容

- 吨级液氙探测器的设计，制作，**稳定运行**
- 液氙探测器的**光产额**测量
- 液氙的纯化测量（衰减时间常数测量→提高**光产额**）
- 漂移电子寿命测量（氙气纯度→提高**光产额**）
- **TPB镀膜的优化**（PTFE上的厚度，PMT上的镀膜厚度）
- 建立液氙探测器模拟程序，对探测器设计优化；
- 对吨级探测器的测量结果与模拟进行对比，检验模拟的输入参数；调节模拟参数，给出探测器的**吸收长度，衰减长度等**
- 对探测器的**位置分辨**进行测量（未来采用更小单元的光灵敏器件）
- FADC获取慢信号事例的波形，信号传输（科大）

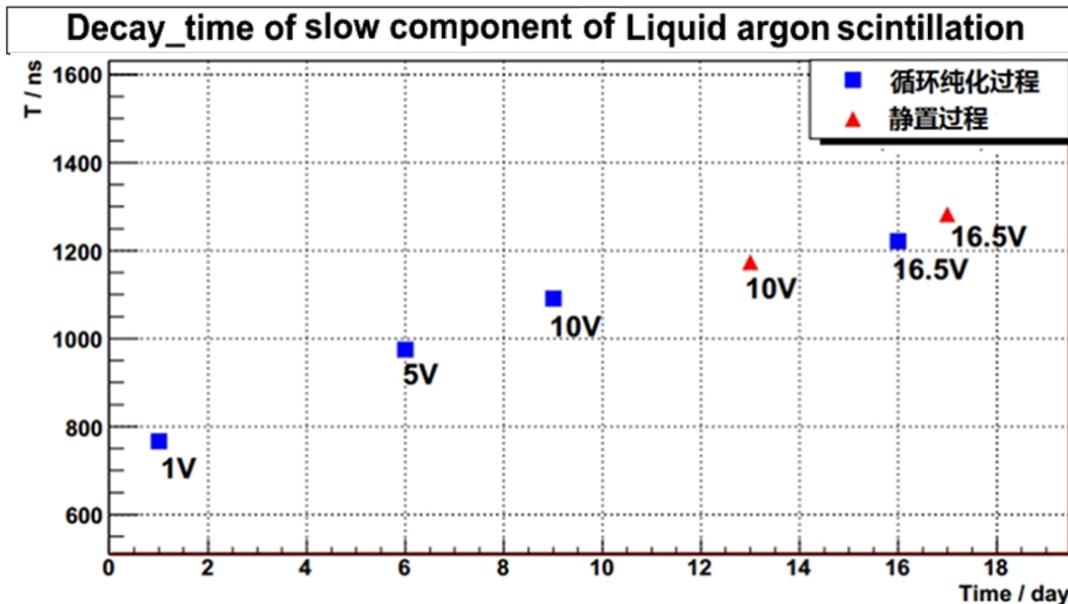
TPB镀膜厚度优化

样品编号	1	2	3	4
质量厚度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	75	105	230	575

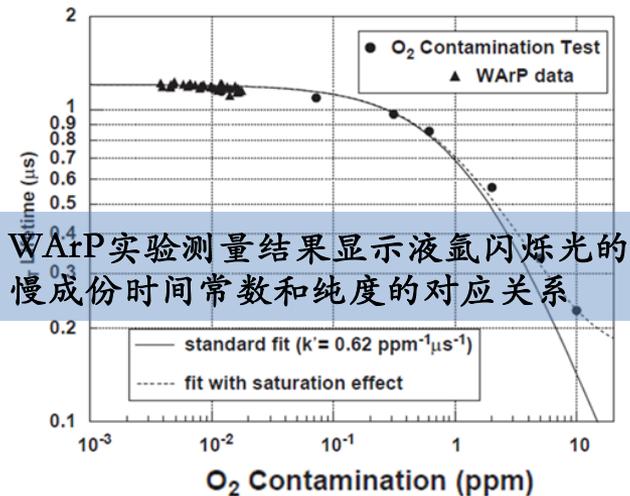


- TPB镀膜考虑透射 (PMT玻璃) 和反射 (PTFE反射板) 两种类型
- 通过测量不同TPB膜厚的石英玻璃镀膜样品 (透射样品) 的透射率和反射率, 寻找最合适的镀膜厚度, 如左图测量结果。
- 从数据看, 在PMT敏感的光谱波段, 透射膜厚 $230 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 为最合适。
- 下一步计划测量用作反射的TPB镀膜样品, 寻找合适的TPB反射膜厚。
- 基于透射和反射膜厚的测量, 联合考虑不同厚度的透射和反射膜, 通过测量或模拟的方法, 给出整体的最高光产额

氩气纯化过程的量化测量

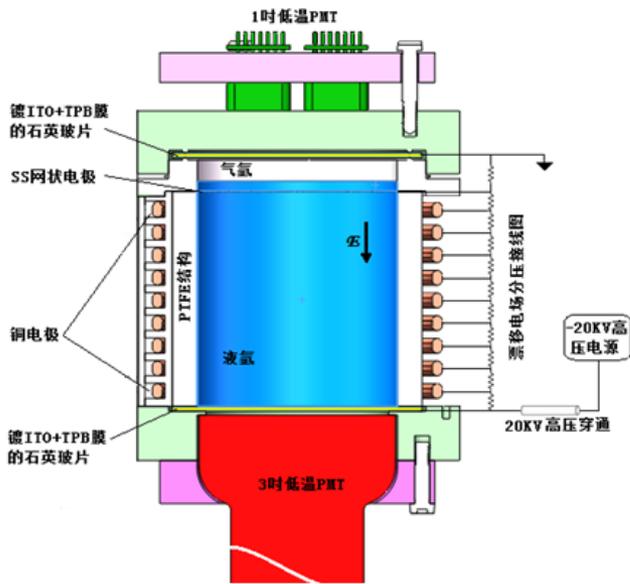


- 液氩探测器氩气循环纯化过程的量化测量可以保证探测器性能的可靠性、可重复性。
- 随累计循环纯化体积增加，液氩发光慢成分的时间常数呈现上升趋势；
- 纯化后，静置一段时间，所测得的时间常数有所增加

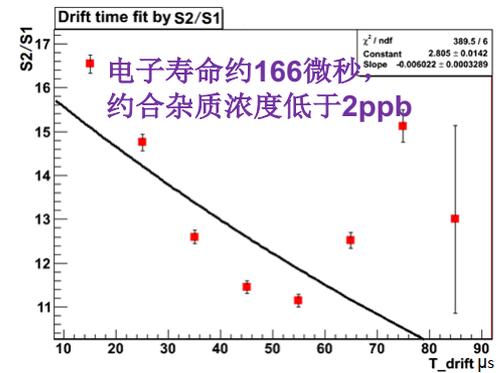
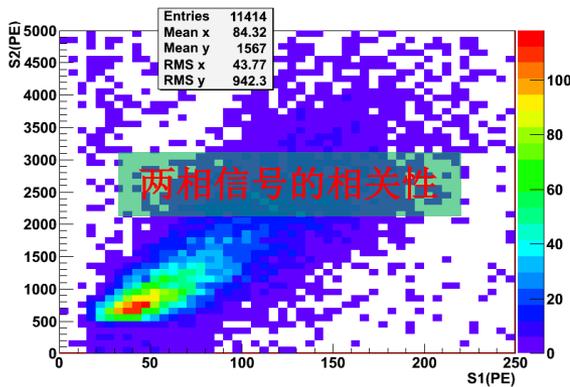
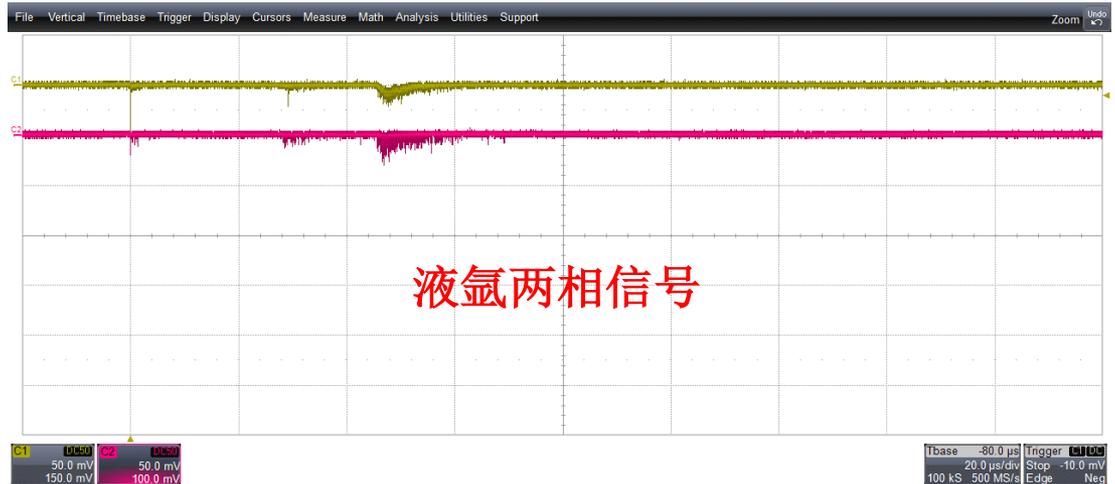


量化测量：液氩发光慢成份的衰减时间常数在约1微秒以下对液氩的纯度很敏感，而当液氩杂质浓度低于0.1ppm氧当量（约相当于3 μs 漂移电子寿命）后，慢成份的衰减时间常数基本不受影响。

氙气纯度的高精度测量

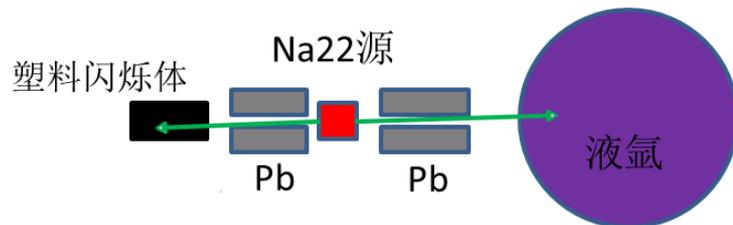


- ◆ 气层厚度1cm, 6.3kV/cm电场,
- ◆ 4.2kV/cm萃取电场, 360V/cm 漂移电场

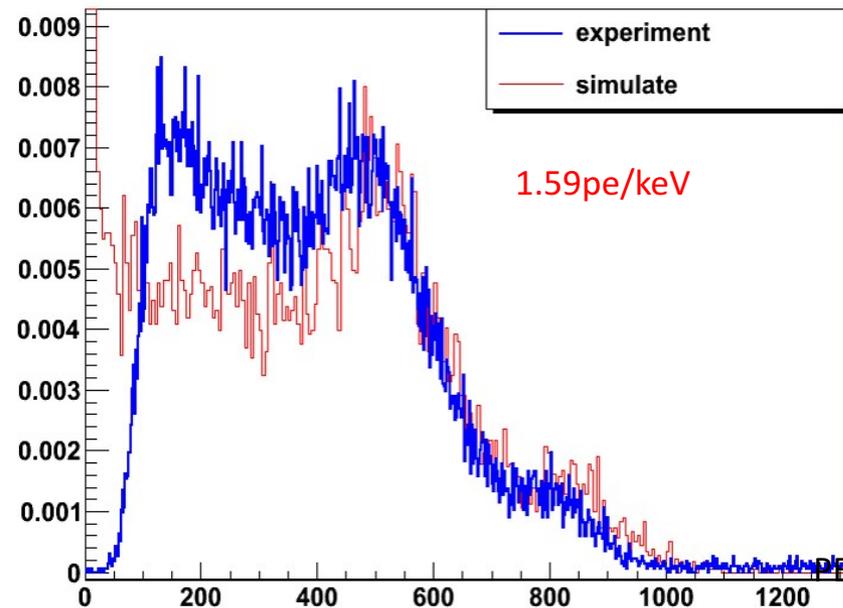
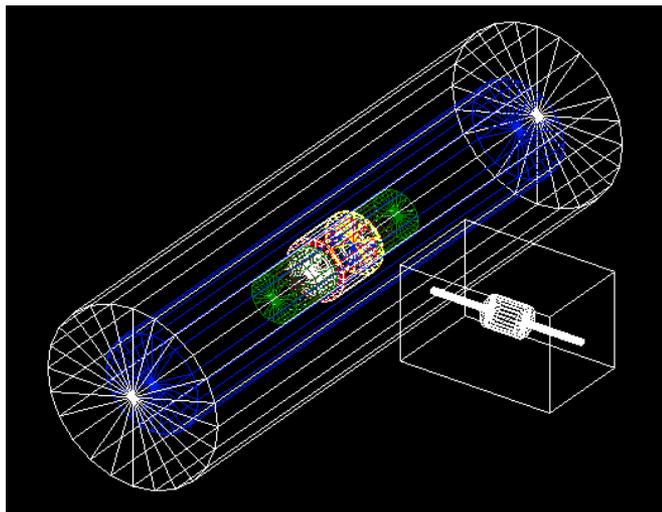


- 对液氙TPC的液氙闪烁光信号S1及随后电离电子漂移到气相中的场致发光信号S2的测量, 可以获得S2/S1和电离电子漂移时间的关系曲线, 拟合这个曲线得到漂移电子的寿命。
- 通过两相液氙探测器模型测量, 获得约166微秒的电子漂移寿命, 结果远好于任务书的目标值20微秒;
- 漂移电子的寿命可用于对氙气纯度进行高精度的测量。

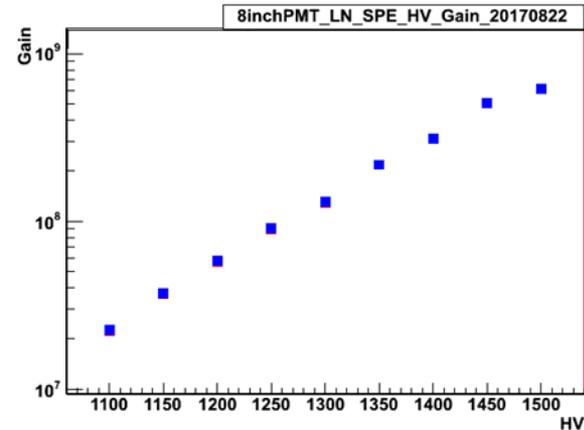
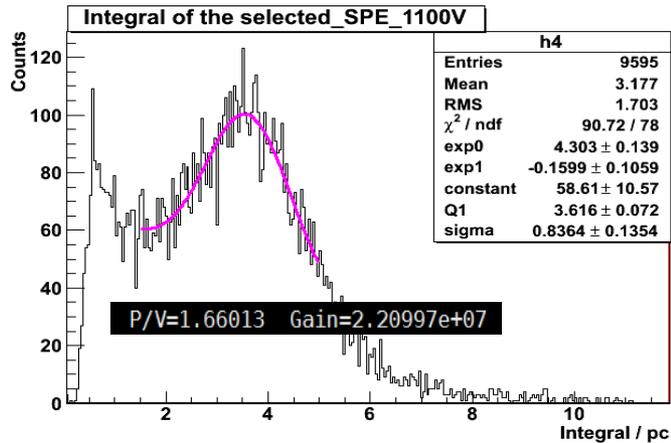
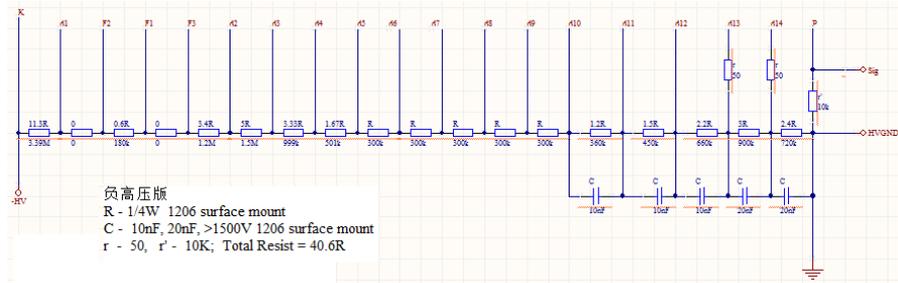
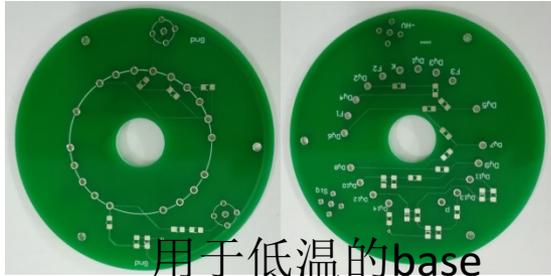
液氦探测器Geant4模拟



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

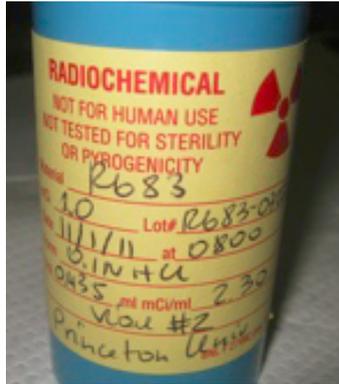


8寸低温PMT性能测量

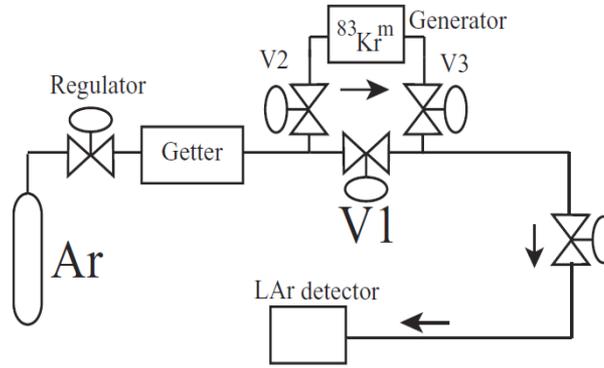


- 拟采用滨淞公司的R5912的低温型号PMT,
- 上图所示样品管子在液氮温度下的单光电子能谱、增益-高压曲线。显示良好的单光电子探测能力及动态范围。

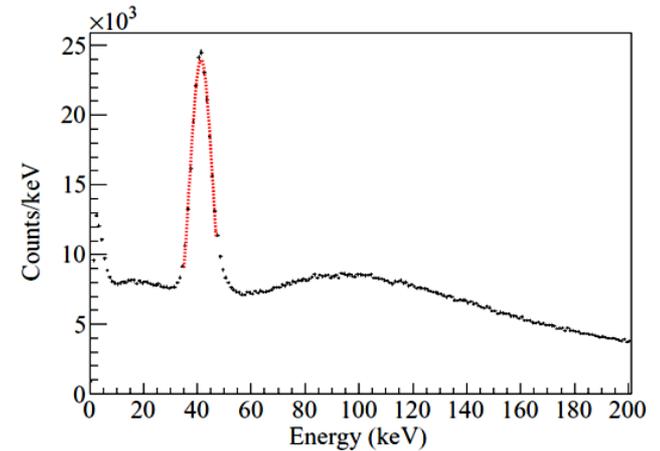
Kr⁸³标定用放射源



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、液氙的探测器标定。
- 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。
- 制备方法：使用质子束流辐照天然氪气。
 - 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]

希望能获得项目组支持，和401所合作使用质子束流制备Rb83

后三年的任务

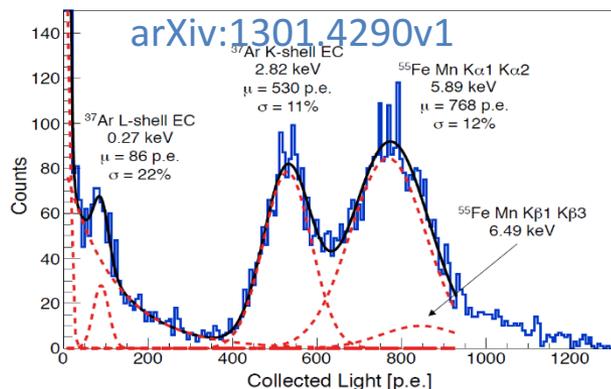
- 进行吨级液氦杜瓦和制冷机的联合测试，调试系统低温性能；批量测试低温光电倍增管性能；采购氦气循环纯化系统、高纯氦气；加工液氦探测器内部结构；进行吨级液氦探测器安装工作。试调试探测器系统。
- 全面调试液氦探测器系统，获得液氦纯度量化数据；使用电子学原型样机获取探测器数据，调试探测器，吨级液氦探测器实验室运行。
- 开展吨级液氦探测器的标定工作，分析探测器性能。优化探测器结构，获取大型液氦探测器的设计、安装、运行经验。

单相液氦探测技术的发展

1. SiPM替代低温PMT
 2. 贫氦
- ✓ 我们仍在努力开展LNG尾气提取地下氦气的工作，有一定的进展
 - ✓ 我们正在购买SiPM进行研究



利用优化的液氦TPC测量中微子相干散射等sub-keV 低能量阈值的物理



- 反应堆功率：2.9 GW；200kg液氦；距离20m；本底0.5/keV_{ee}/kg/day
- 理论计算：反电子中微子-氦核相干散射事例数为303个/天，本底数为290/天。

- 借助气相对漂移电子的放大效应，两相液氦探测器可以实现 $>100\text{pe/keV}$ 的有效光产额，从而使得S2优化的液氦TPC可以具备低探测阈值（DS-50获得 0.1keV_{ee} 阈值）。
- DS-50的贫氦可以得到 $< 0.2/\text{keV/kg/day}$ @ $<10\text{keV}$ 的低探测靶材料放射性本底。
- 对于这样的低能量范围，液氦(贫氦)TPC性能优于半导体探测器。而且液氦探测器可以比较容易的提高探测器靶质量。

总结

- 完成了吨级液氩杜瓦设计、加工、验收；完成了电-液氮混合制冷机的设计、加工、验收；具备了联合测试的条件，基本完成了课题中期任务
- 中期实验条件的建立为后期进行吨级液氩探测器的研究打下了坚实的基础；将开展更多优化单相探测器性能的研究工作；
- 积极开展百吨级液氩探测器及未来其它物理的研究

谢谢支持！