

高纯锗探测器系统的研制进展

吴晓光 王朝辉

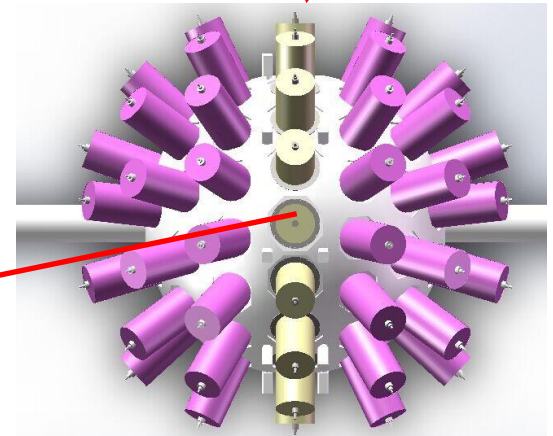
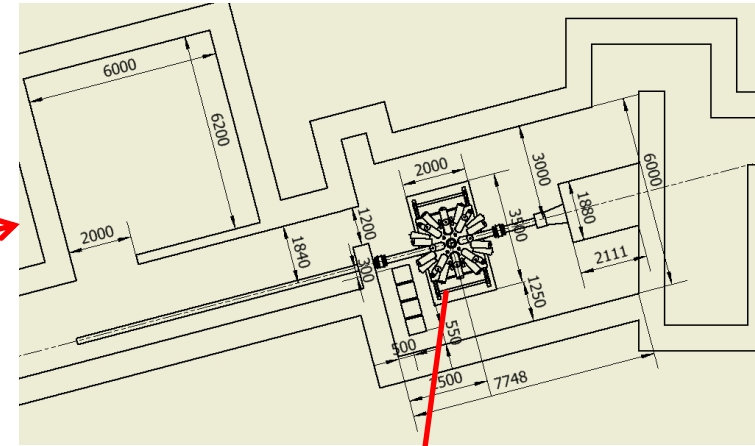
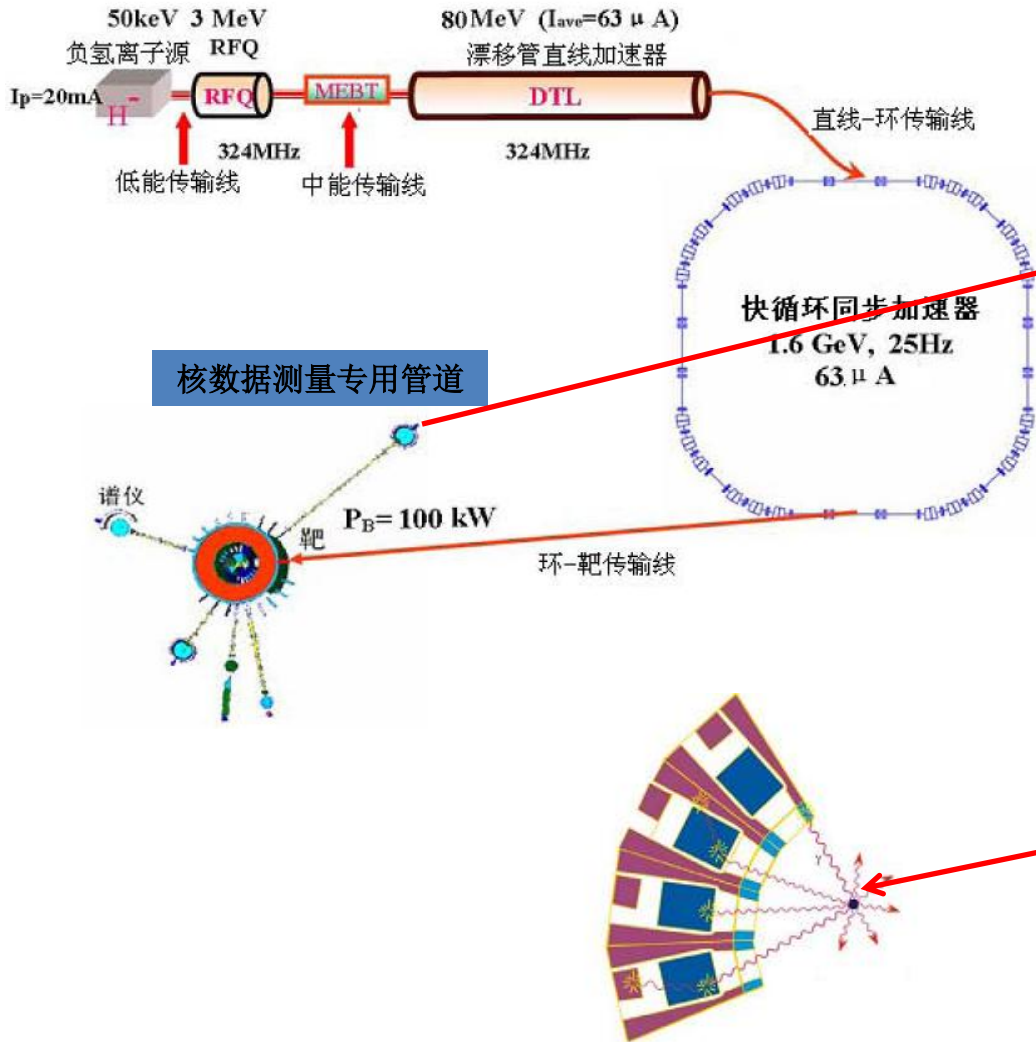
中国原子能科学研究院

Contents

- 研制背景与物理目标
- 总体设计方案和主要性能参数
- 研制计划和进展情况
- 总结和展望

研制背景

在CSNS上建设新一代的伽马探测器阵列来开展核数据测量及其他相关的核谱学测量工作，如中子核反应截面测量，裂变核谱学和丰中子核结构研究等



研制需求

- ▶ 以往只有14MeV单能中子源，需白光中子源进行连续能点测量。在CSNS白光中子源实验终端建成后，利用高纯锗探测系统可对不同能量点的 $(n,2n\gamma)$ 及 $(n,n'\gamma)$ 等中子核反应截面数据进行测量，特别是能给出一些重要反应截面的数据，如重要的 $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$ 截面测量.....
- ▶ 以往受实验条件的限制，对一些远离稳定线的丰中子核素很难对其进行核结构研究，现利用CSNS提供的高强度中子束流，通过 $^{241}\text{Pu}(n,f)$, $^{235}\text{U}(n,f)$ 等裂变反应来产生丰中子核即可深入的开展丰中子核结构研究
- ▶ 以往只能对自发裂变和裂变后的衰变谱学进行测量，该装置建成后可进行在束裂变谱学研究，对核数据测量和核结构研究有重要意义。如可对一些以前很难测量和无法测量的核素展开测量，给出更好更全的核数据测量数据，同时对原子核结构的认识也会更加深入。
- ▶ 国内原有的探测器个数少，效率低，误差大。该装置建成后将有100多个探测单元，大大提高了探测效率，将会得到更好更精确的实验测量值，将会取得更好的研究成果。

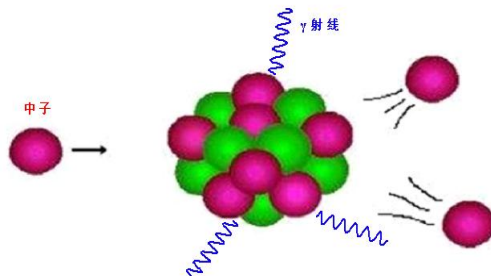
物理目标

高纯锗探测器系统建成后拟开展的工作：

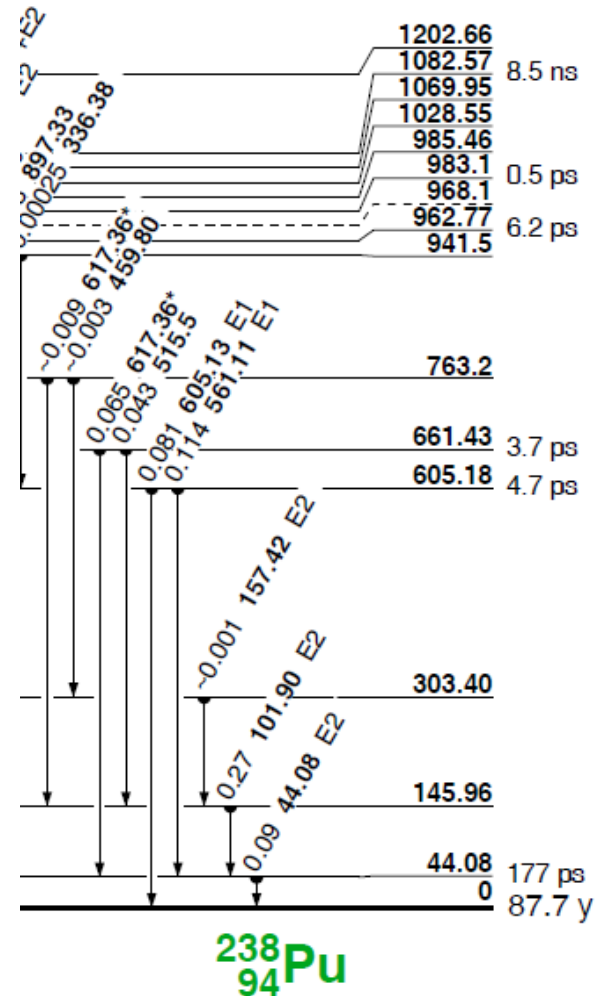
- 裂变核、结构材料核等的 $(n,2n\gamma)$ 及 $(n,n'\gamma)$ 等中子核反应截面测量，例如：重要的 $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$ 截面测量.....
- 丰中子核核结构研究,如通过 $^{241}\text{Pu}(n,f)$, $^{235}\text{U}(n,f)$ 等裂变反应来产生丰中子核，对其核结构性质进行深入研究
- 裂变产物核的能级纲图和衰变纲图测量

重要裂变核素的 (n, 2n γ) 等反应截面测量

(常用(n,2n)测量方法: 直接测量法、活化法、瞬发 γ 射线法)



举例: $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$



直接测量法: 样品中有高自发裂变率 ^{240}Pu , 裂变中子造成干扰, 去除困难;

(n,f) 反应对 $\sigma_{n,2n}$ 不确定度贡献为0.14 - 0.56, 很难确定;

(n,3n)反应亦有一定影响。

活化法: ^{238}Pu 核素在 ^{239}Pu 样品中总是存在, 对测量造成干扰。

直接法和活化法均有一定难度。瞬发 γ 射线法避开了这些困难。

瞬发 γ 射线法: HPGe阵列测量余核 ^{238}Pu 放射出的瞬发特征 γ 射线, 得出 $\sigma_{n,2n\gamma}$ 。

用核理论计算程序计算 $\sigma_{n,2n\gamma} / \sigma_{n,2n}$, 进而得出(n,2n)反应截面。

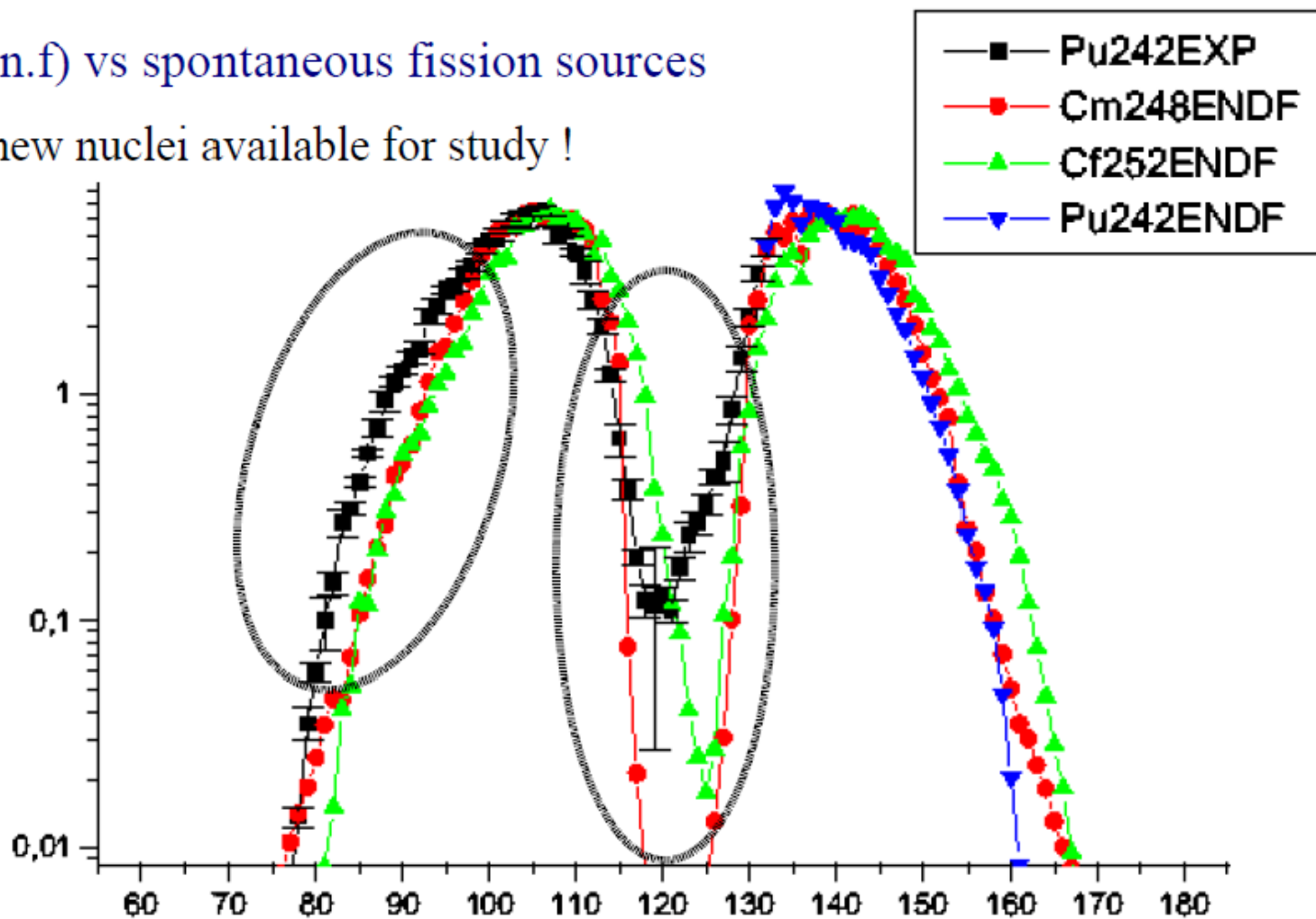
丰中子核核结构研究



$^{241}\text{Pu}(n,\text{fission})$

▶ $^{241}\text{Pu}(n,\text{f})$ vs spontaneous fission sources

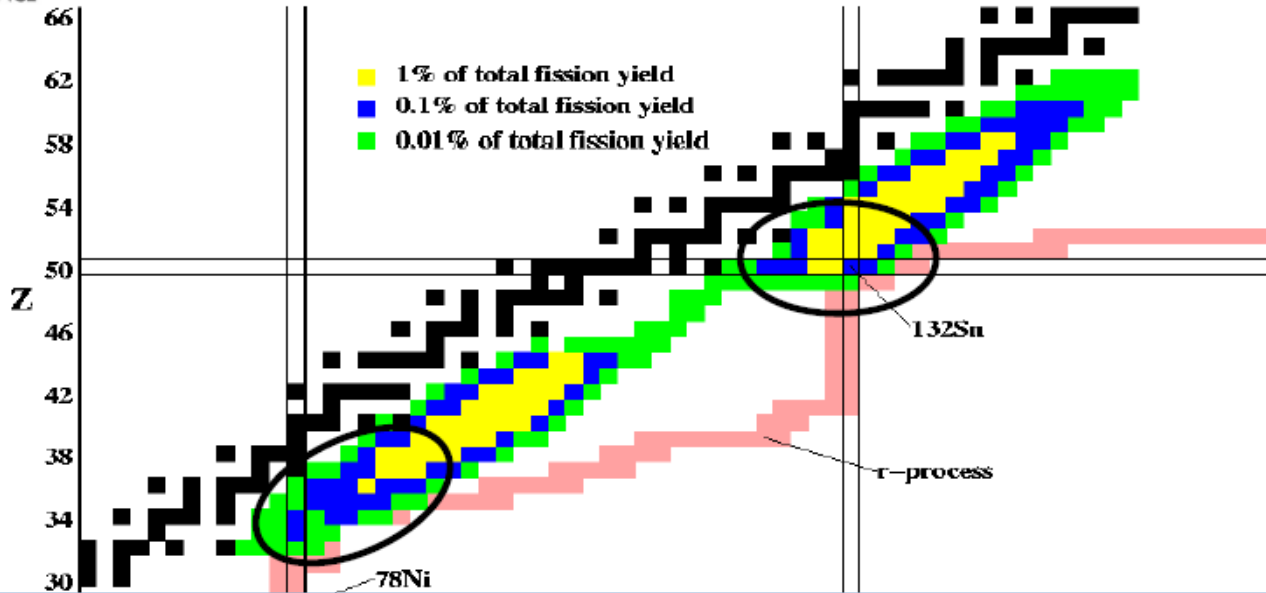
~30 new nuclei available for study !



丰中子核核结构研究



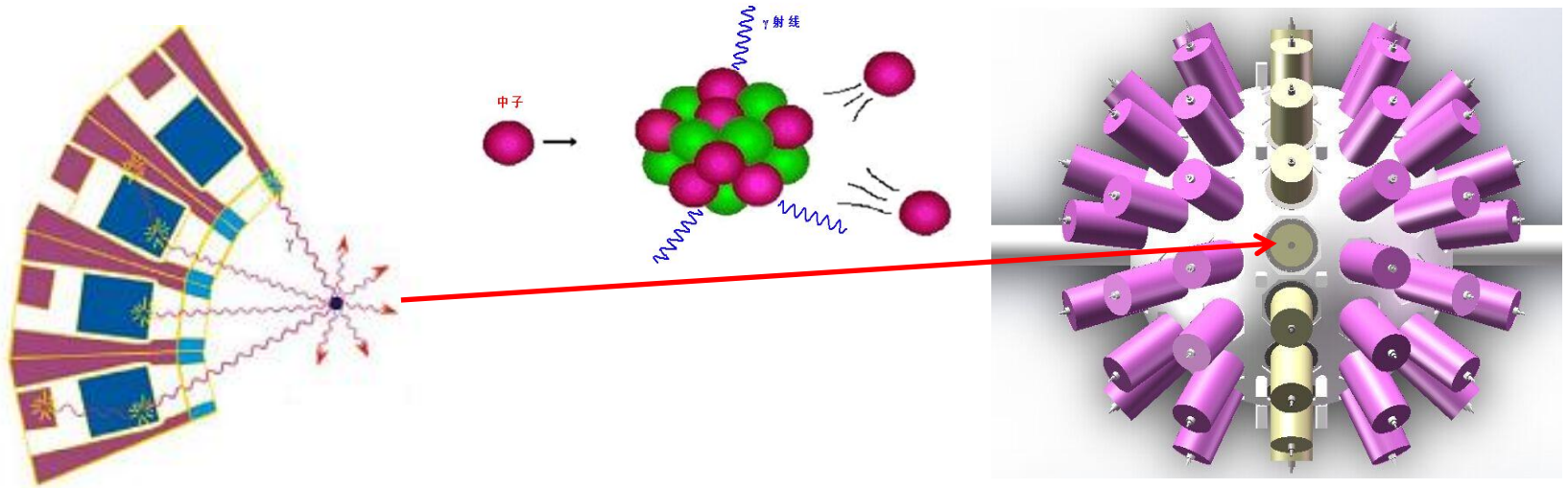
Thermal neutrons on ^{241}Pu



- 1) , 在 $A \sim 100$ Zr 同位素周围核素中的大形变带研究
- 2) , $Z=38, N=60, 62$, 附近的原子核超形变研究
- 3) , $Z=56, N=88$ 附近的原子核中八级形变研究
- 4) , $A=96-102$ 区域的原子核形状共存结构研究
- 5) , 双幻核 ^{132}Sn 附近原子核的形状共存, 单粒子激发与集体激发自由度相互竞争研究
- 6) , $A \sim 110$ 区丰中子原子核的核结构现象研究, 例如, 1声子和多声子的Gamma震动带, 原子核手征转动行为, 和原子核基态三轴形变研究

总体设计方案

新一代探测器阵列的设计思想是计划建设一个由100个高纯锗探测单元组成的球型探测器阵列,用于在 4π 空间内高效的探测 γ 射线,这个探测器阵列还包括 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器等辅助探测器。这个探测装置将会被安装在CSNS(中国散裂中子源)的实验终端上,用于进行核数据测量等核物理实验工作。



其基本原理如上图所示,散裂中子源的中子打到靶室中心的实验靶上发生核反应,发射的伽玛射线被靶室周围的高纯锗探测器探测到,由于该探测阵列是由很多台探测器组成,可以高效率的探测靶源发射的伽玛射线,还可以做 γ - γ 符合测量以挑选反应中感兴趣的目标核,并能通过对开窗谱的分析有效的降低测量本底。同时为了去除康普顿散射的影响,需要和BGO探测器测到的康普顿散射峰做反符合测量,提高所测伽玛能谱的峰康比。通过该探测装置能得到更好伽玛能谱信息,会为核数据测量等工作取得更好的实验数据。

主要性能参数

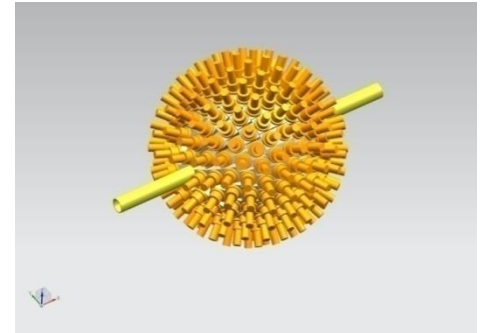
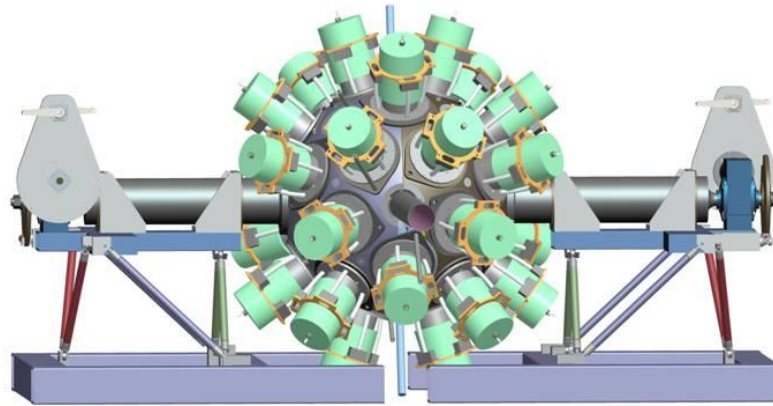
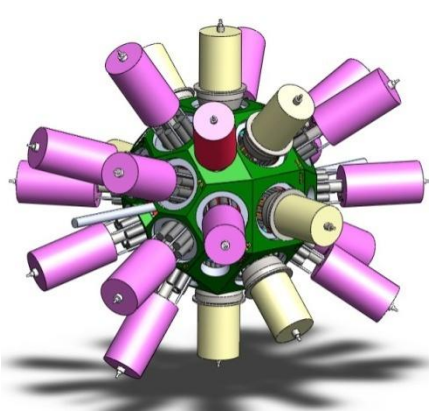
1, 探测阵列对1MeV能量的 γ 探测效率接近10%。这主要是满足高探测效率的需求而设计的, 根据蒙卡模拟及实验样品量的分析, 对于放射性样品而言, 在这样的探测效率下才能得到统计较好的测量数据。同时也是因为目前国际上最好的探测装置也在10%左右, 这样我们才有能力做出国际水平的工作。

2, 探测阵列的时间分辨, 对于高纯锗探测器要好于15 ns, 这主要是为了满足飞行时间测量的需要而设计的, CSNS的质子脉冲宽度为50 ns, 我们设计的谱仪时间分辨好于15 ns, 这样在中子飞行时间测量中, 由于谱仪时间分辨引起的能量展宽较小。对于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器要好于0.3ns, 这主要是为了满足一些核素能级寿命测量的需要而设计的。同时时间分辨好也可在很大程度上减少测量本底。

3, 探测阵列的能量分辨, 对于高纯锗探测器1332keV 的 γ 射线分辨率优于2.2keV, 对于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器661 keV的 γ 射线分辨率好于3%。这主要是为了测量得到更精细的伽玛能谱, 从而得到更准确和丰富的核数据和核结构信息。例如这样可以把瞬发特征 γ 射线和复杂的本底 γ 射线区分开, 从而得到精确的 γ 射线产生截面。

大型伽玛探测阵列

大型伽玛探测阵列具有探测效率高，能进行多重符合测量，降低测量本底，能进行角分布测量和修正，有良好的空间位置分辨能力等，很适合对中子核反应和中子诱发裂变实验中的复杂伽马谱线进行在束测量



核数据测量：中子核反应截面测量等重要核数据测量

裂变核谱学研究：自发裂变和诱发裂变核谱学研究

其他应用：

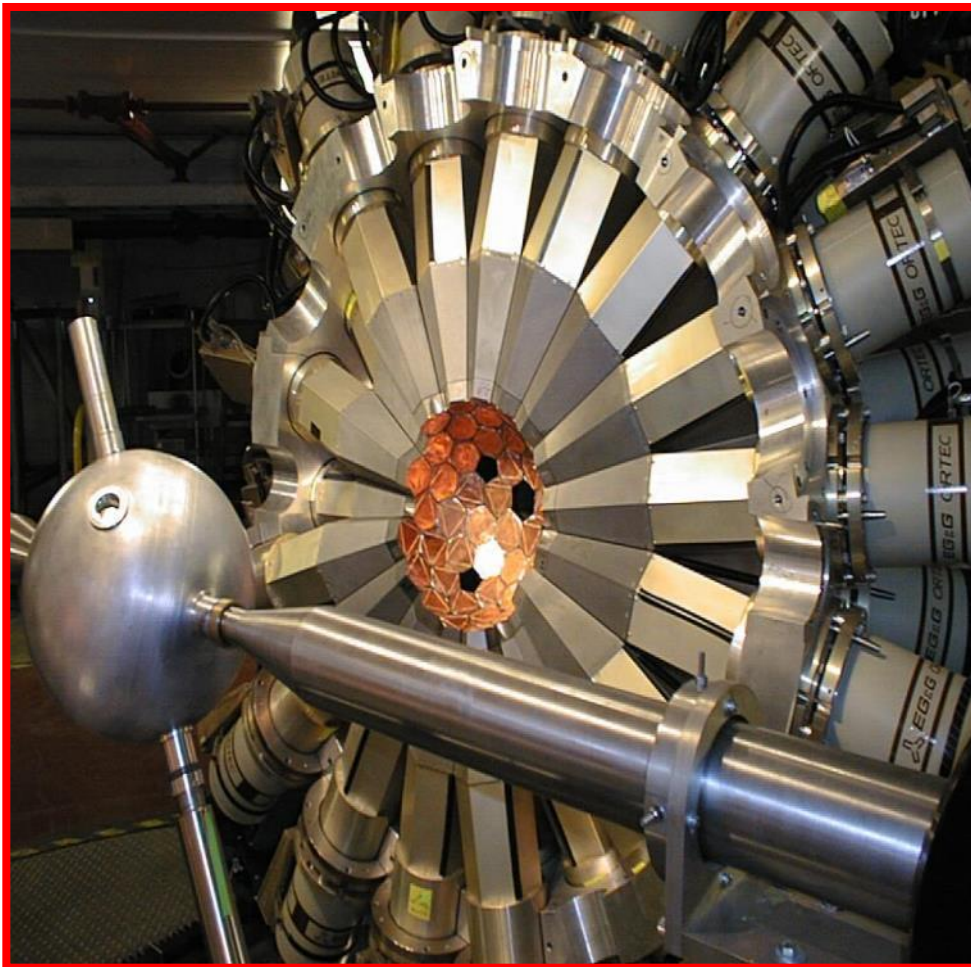
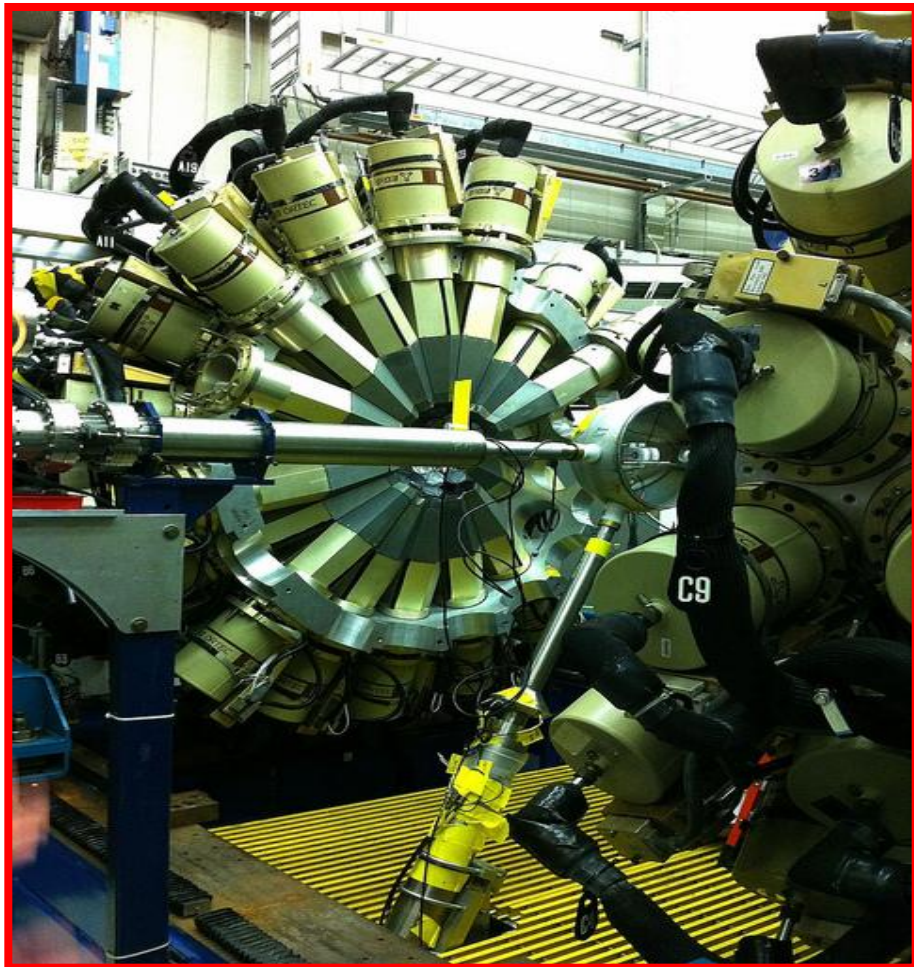
- 核物理基础研究
- 核技术
- 高能物理
- 天体物理
- 核医学
- 核安全

.....

国内外高纯锗探测阵列实验装置现状



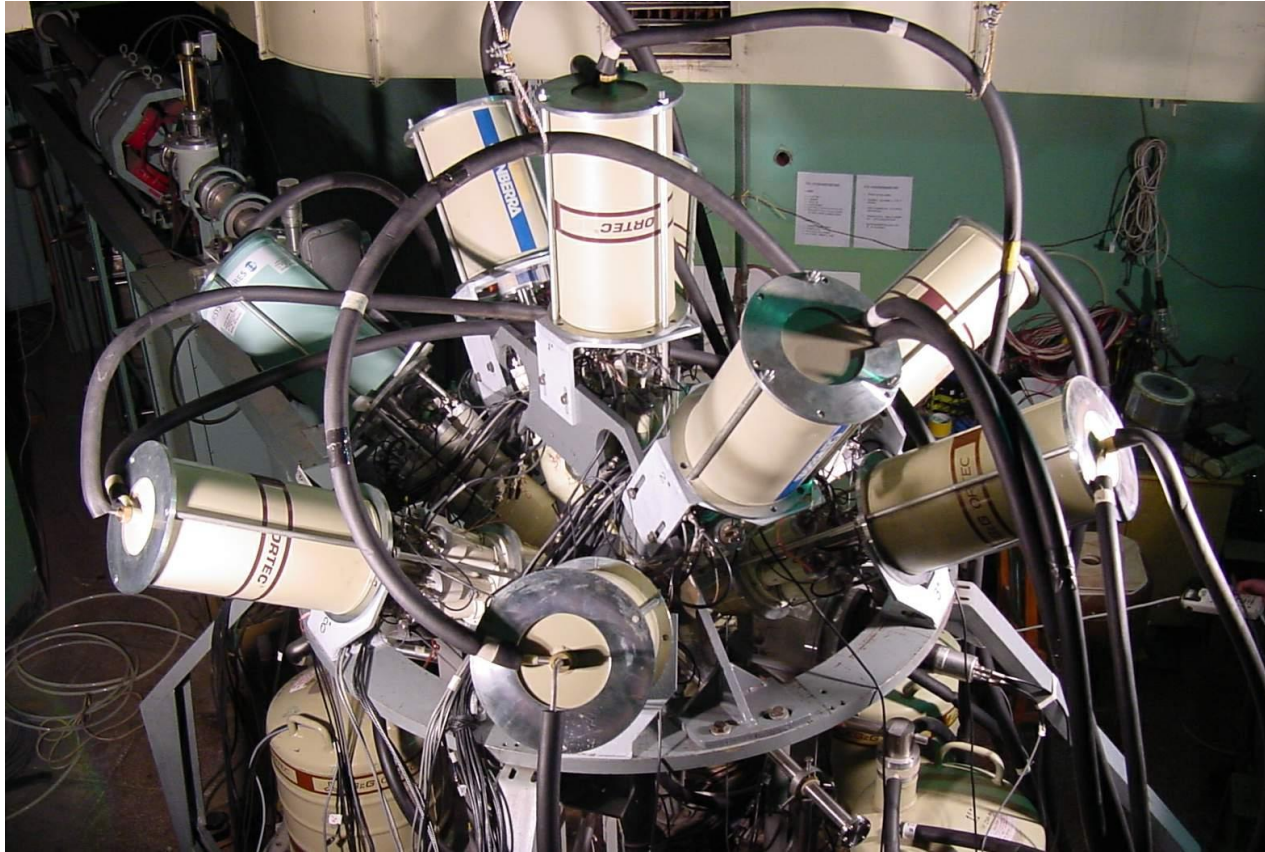
目前国际上研究 γ 谱学的主要实验室



Gammaspere- 110 反康高纯锗

CIAE高纯锗探测器系统

由12个带BGO反康的同轴HPGe探测器和2个平面锗探测器组成的高纯锗探测器系统

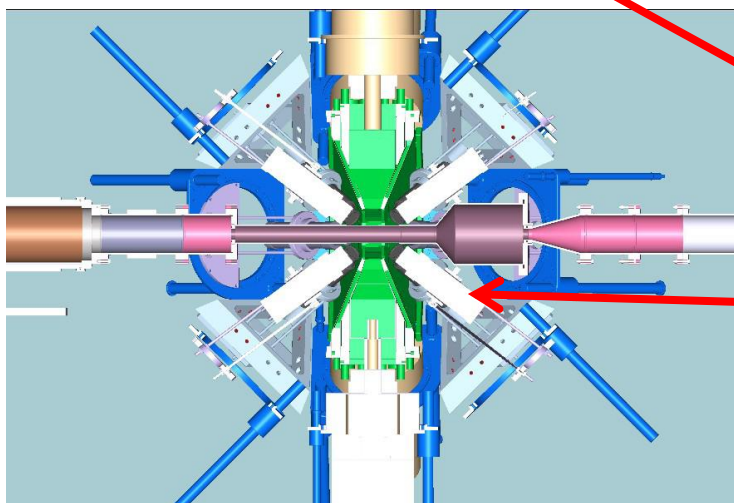
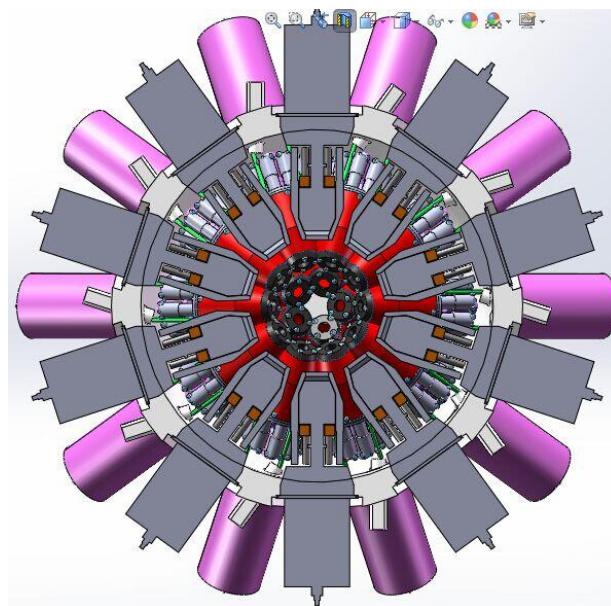
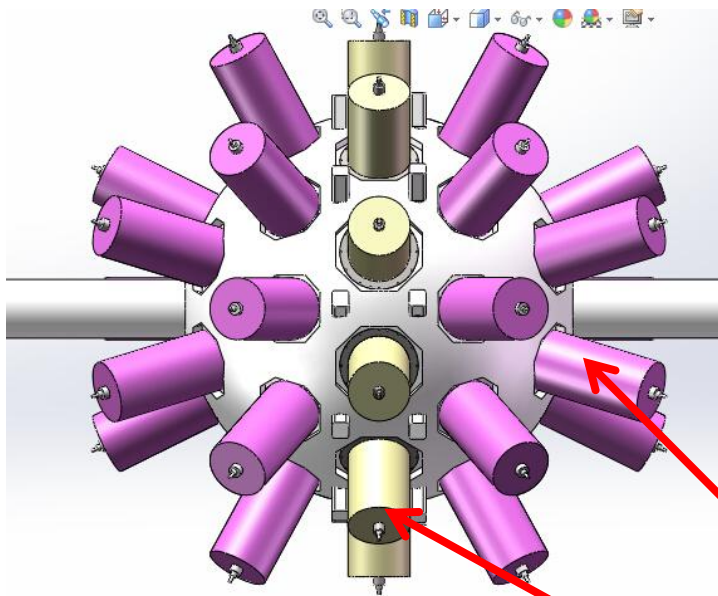


原子能院在束伽玛谱学实验终端是国内核谱学研究的重要基地，合作单位有原子能院，兰州近物所，深圳大学，吉林大学，北京大学，清华大学，山东大学，北京航空航天大学，东北师范大学等

研制计划

- 1, 探测器系统研制的前期调研, 给出研制方案。
- 2, 进行探测器阵列的结构设计, 给出降低在束测量本底的方案。
- 3, 对BGO反康谱仪, LaBr_3 探测器以及微桔谱仪等辅助探测装置进行预研和测试。
- 4, 进行低温制冷部分和探测阵列支架的设计。
- 5, 订购探测器和电子学插件等, 并进行相应的验收和测试。
- 6, 对整个探测阵列进行组装和调试, 并研制数据获取系统及相应的数据分析软件
- 7, 根据散中子源的束流计划安排进行在束测试, 并开展相应的物理实验工作。

设计方案

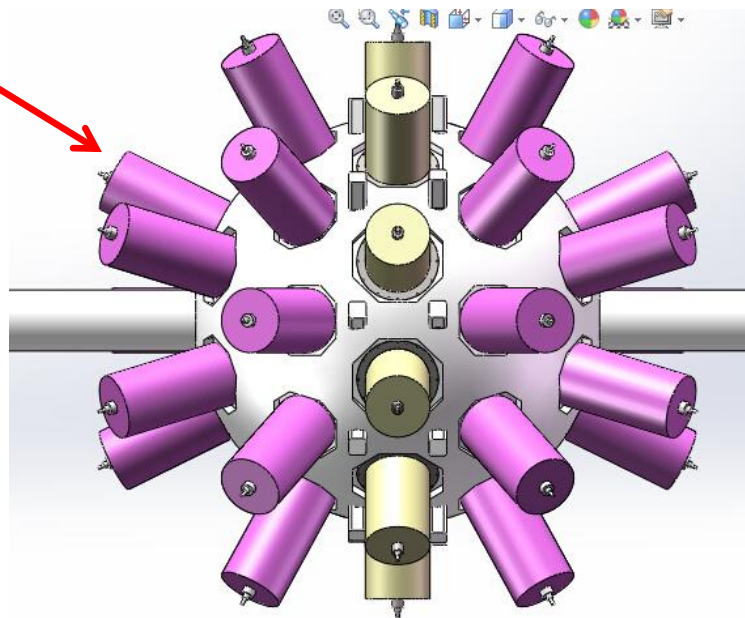
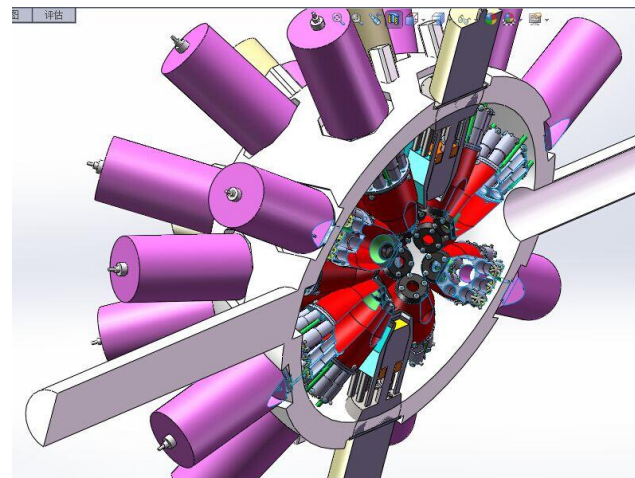
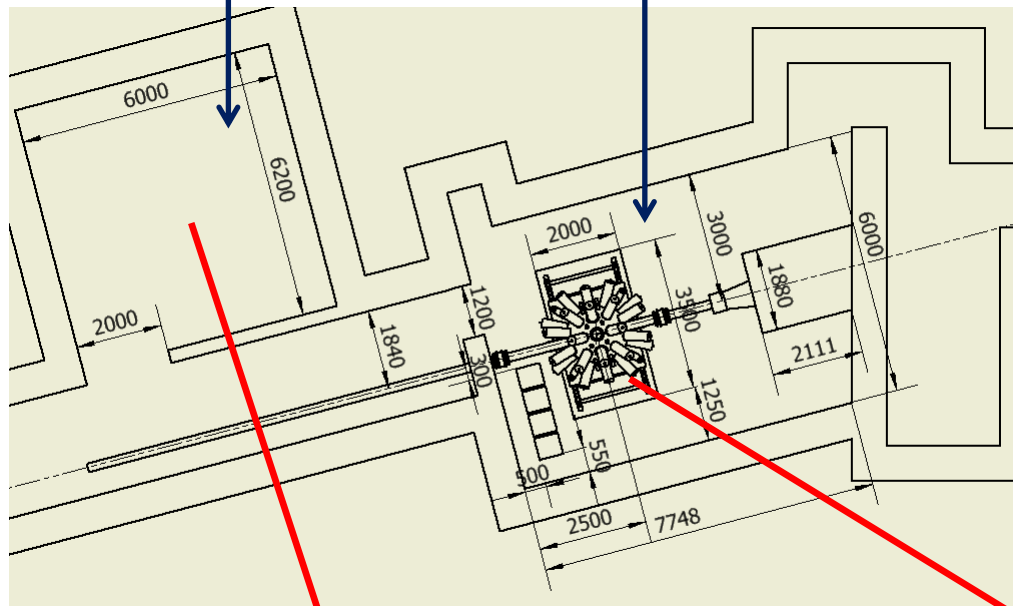


50个HPGe反康探测器
+10个分割 Clover (反康)
+10小平面探测器
+ 20LaBr₃(Ce)探测器

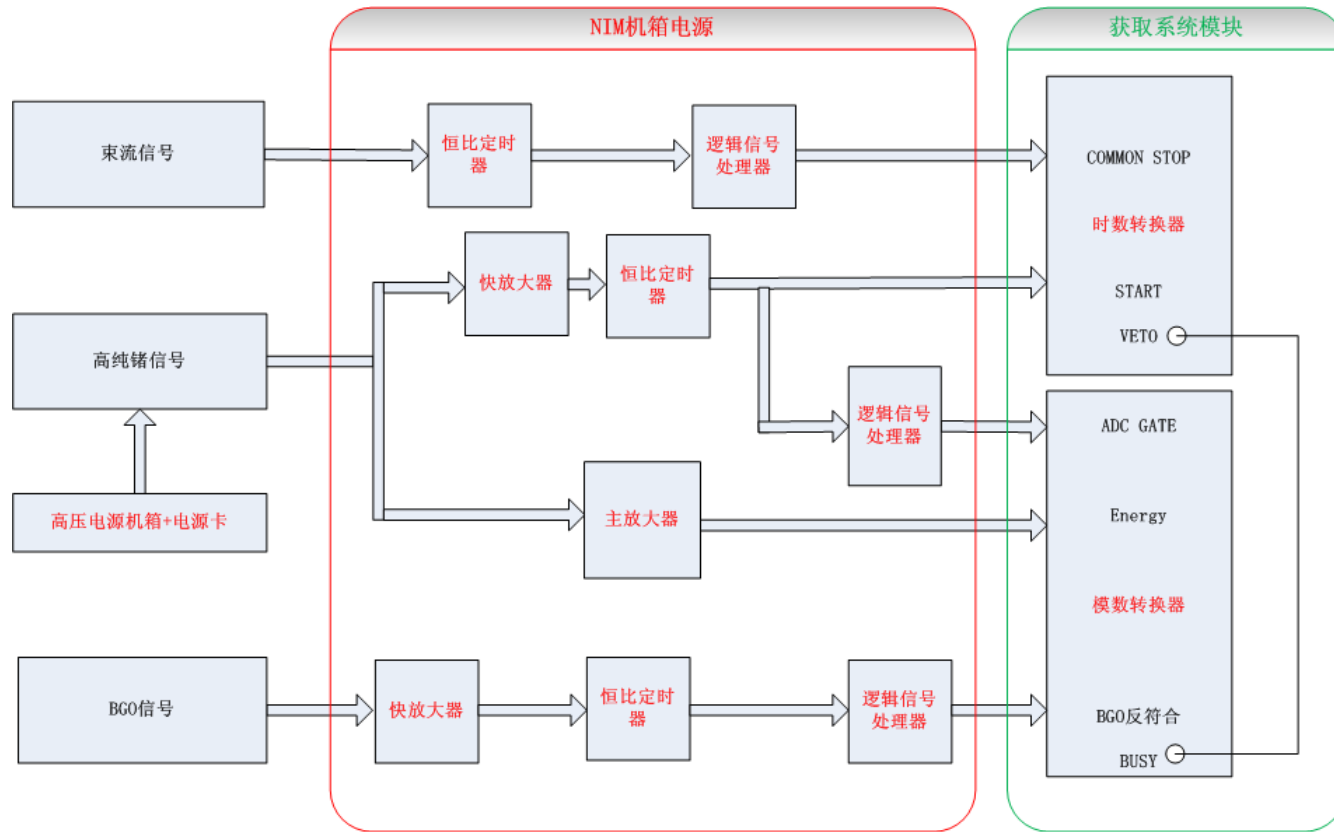
- 探测阵列支架
- 低温制冷部分
- 屏蔽体等

实验准备间

2号实验厅



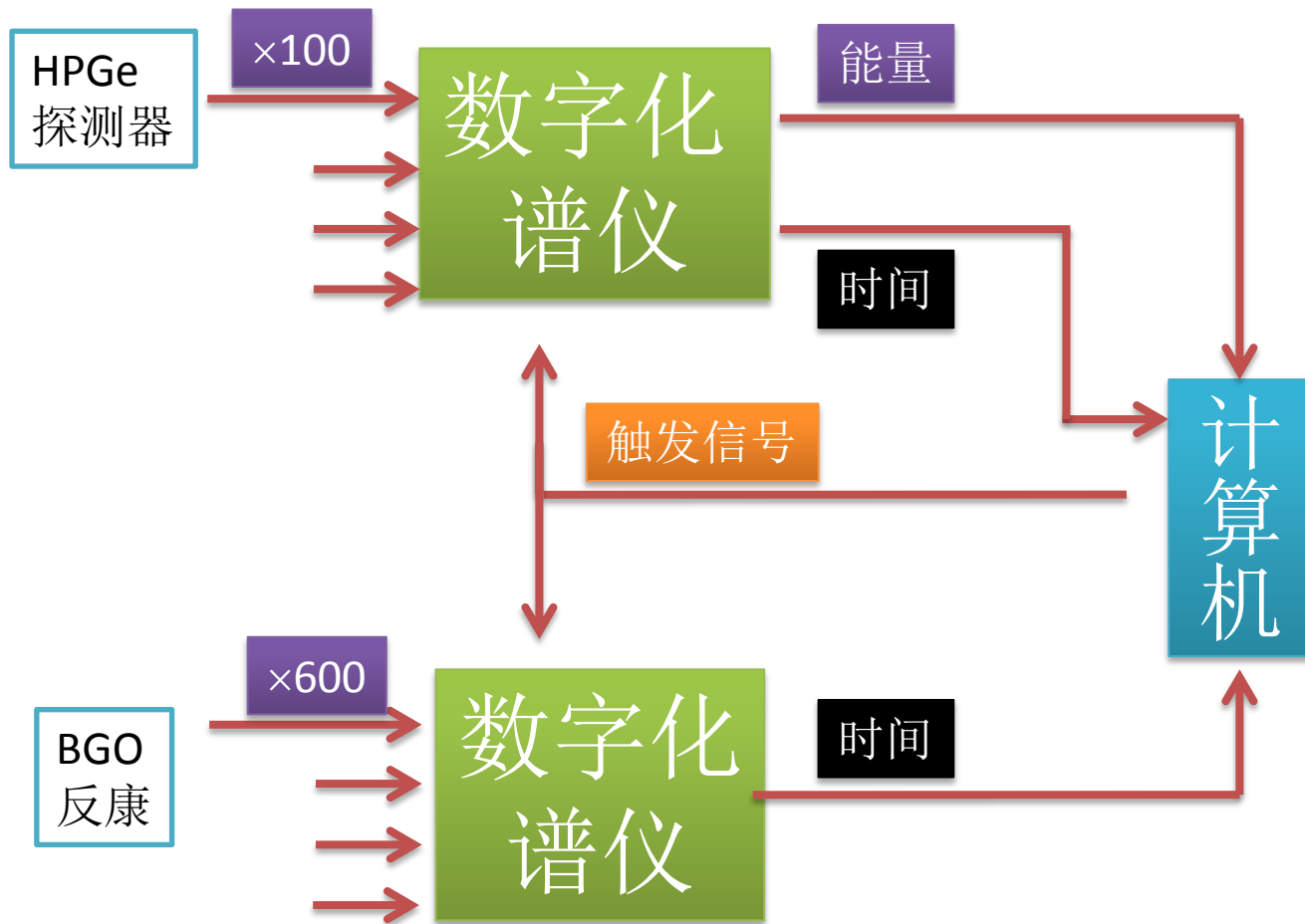
电子学与数据获取



电子学系统：由高压电源、探测器前端电子学、伽玛信号符合电子学测量系统等组成。具体包括用于给探测器提供高压的多路高压电源，测量伽玛能谱的多路主放（AMP）和多路ADC，用于测量时间路的多路恒比定时（CFD），多重逻辑单元和多路TDC等。

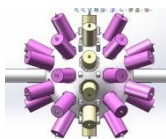
数据获取系统：将电子学处理后的探测器信号进行AD变换，转化为数字信号后保存到计算机中，供后面的分析使用，包括VME机箱及相应的数据获取系统插件，高性能计算机及相应的数据获取程序与分析软件。

数字化线路设计方案



本装置建成后相对国际水平的先进性

H-HPGe C-Clover L-LaBr₃



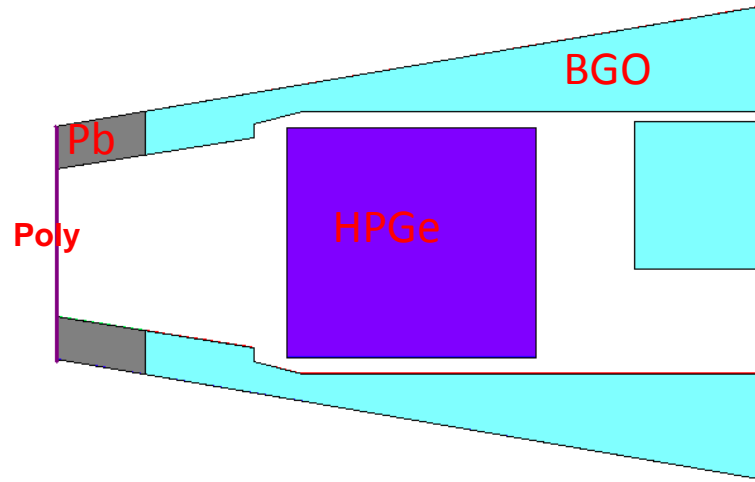
	Gamma sphere	JURO GAM	GASP	CSNS	INGA	Yrast Ball	Exogam	Gemini	Afrodite
NO.	110H	60	40H	60H+10 C+20L	24C(+8)	28	16C+8 (no AC)	16H+8	16(8C8H)+8
Conf.		5-10-10-5-5-10-10-5	6-6-4-8-4-6-6	25-10-5-10C-5-10-25	4-4-(4)-8-(4)-4-4	3-8-9-8	4-(4)-8-(4)-4	4-(4)-8-(4)-4	4-(4)-8-(4)-4
Shelf	球面	拼接	球面	拼接	拼接	拼接	拼接	拼接	拼接
Dis.	26cm		20cm	~25cm	24cm	21cm	14.7cm	>13cm	17cm
Ω	70%		36%	80%	25%		42%	< 30%	23.5%
1.3MeV eff.*	9.4 %		5.8%	10 %	5.0%	3.3%	12%	2.0%	
n=2	1		37%	1.1	6%	9%	20%	32%	11%
n=3	1		22%	1.1	1.5%	2.6%	8%	16%	3%

与国外探测阵列性能比较

降低在束测量的本底

- 1, 束流管道和探测阵列的屏蔽
- 2, 利用大型伽马探测器阵列的符合测量与开窗来降低和扣除本底
- 3, 利用BGO反康谱仪来降低康普顿本底
- 4, 利用LaBr₃探测器进行在线快时间线路符合测量降低本底
- 5, 利用内转换电子与伽玛射线的多重符合测量技术来降低测量过程中的本底。

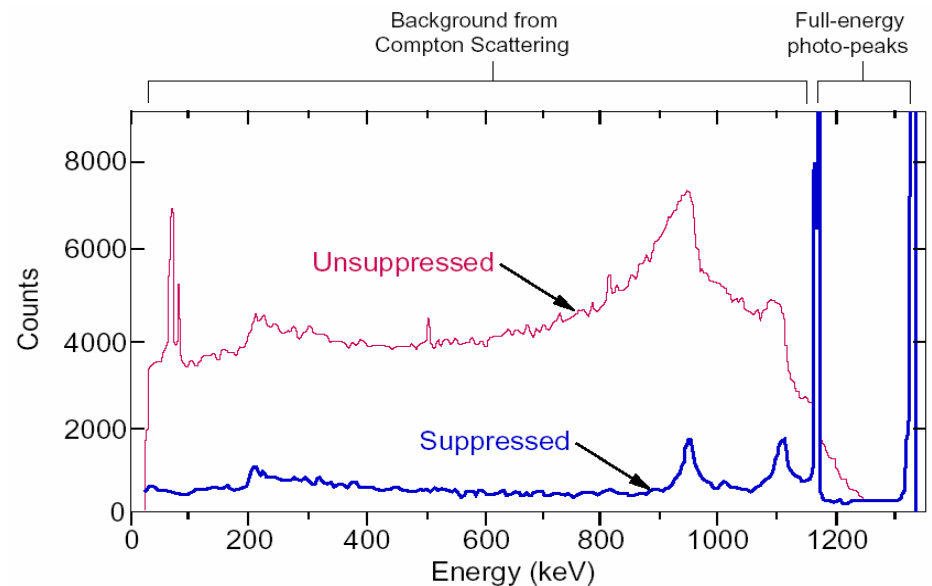
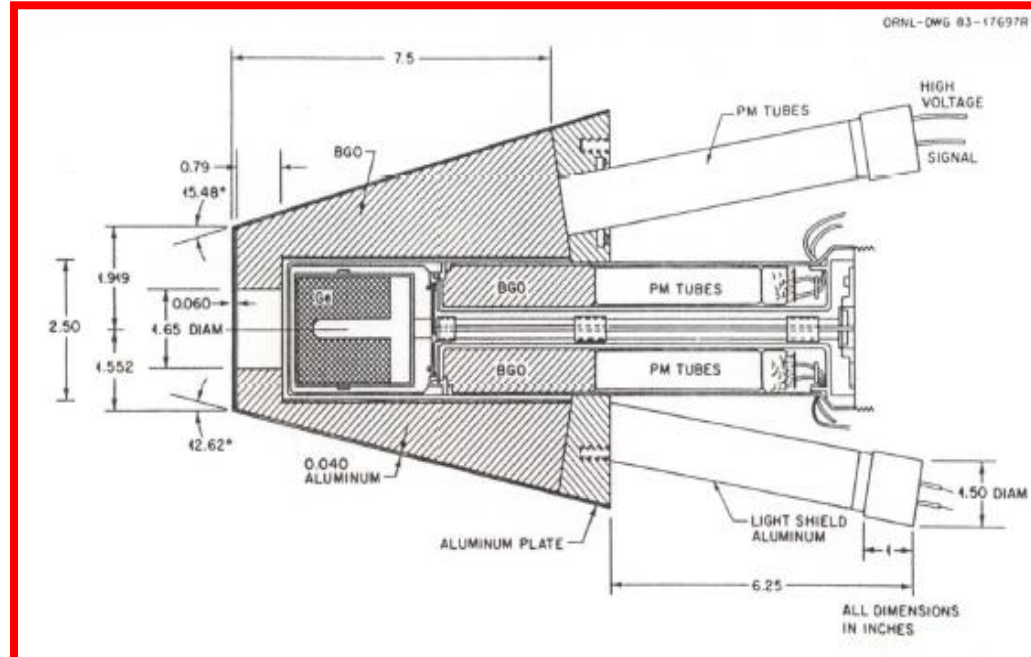
探测器屏蔽设计



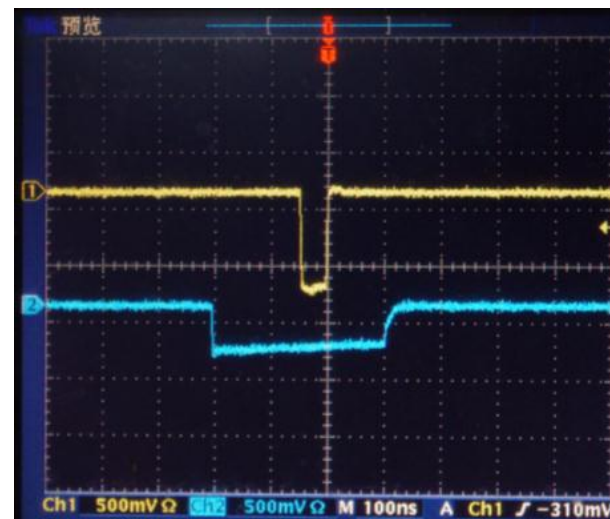
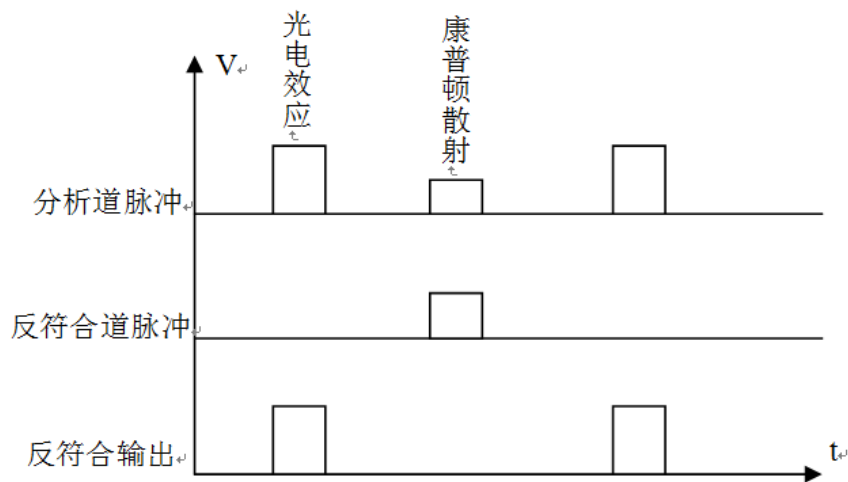
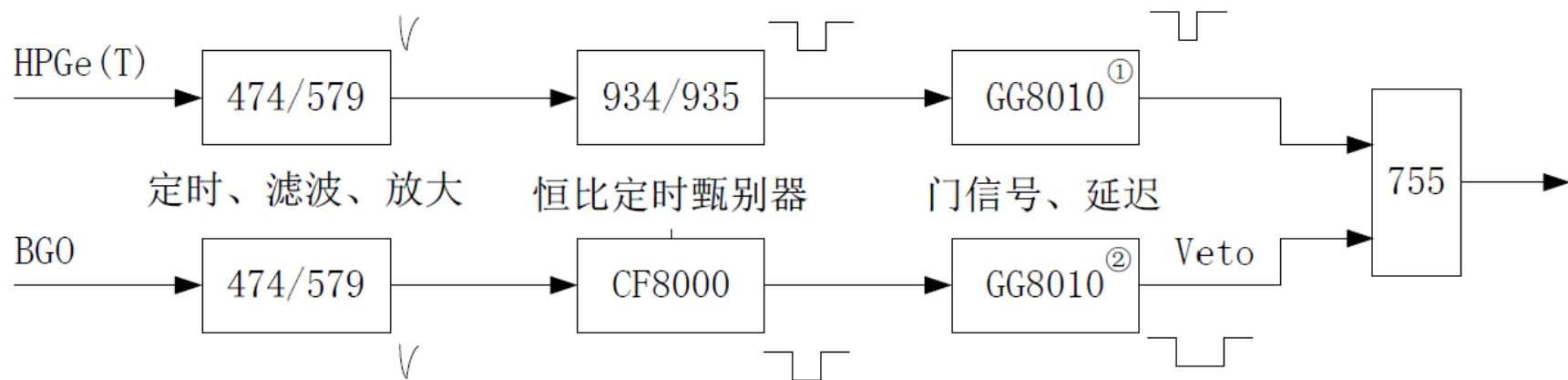
- 探测器前端屏蔽：**BGO**前端有铅屏蔽层，起准直和屏蔽作用。
HPGe前端可放置屏蔽中子材料，如含硼聚乙烯薄片，以吸收从样品上发射过来的中子。

Ge反康普顿谱仪阵列

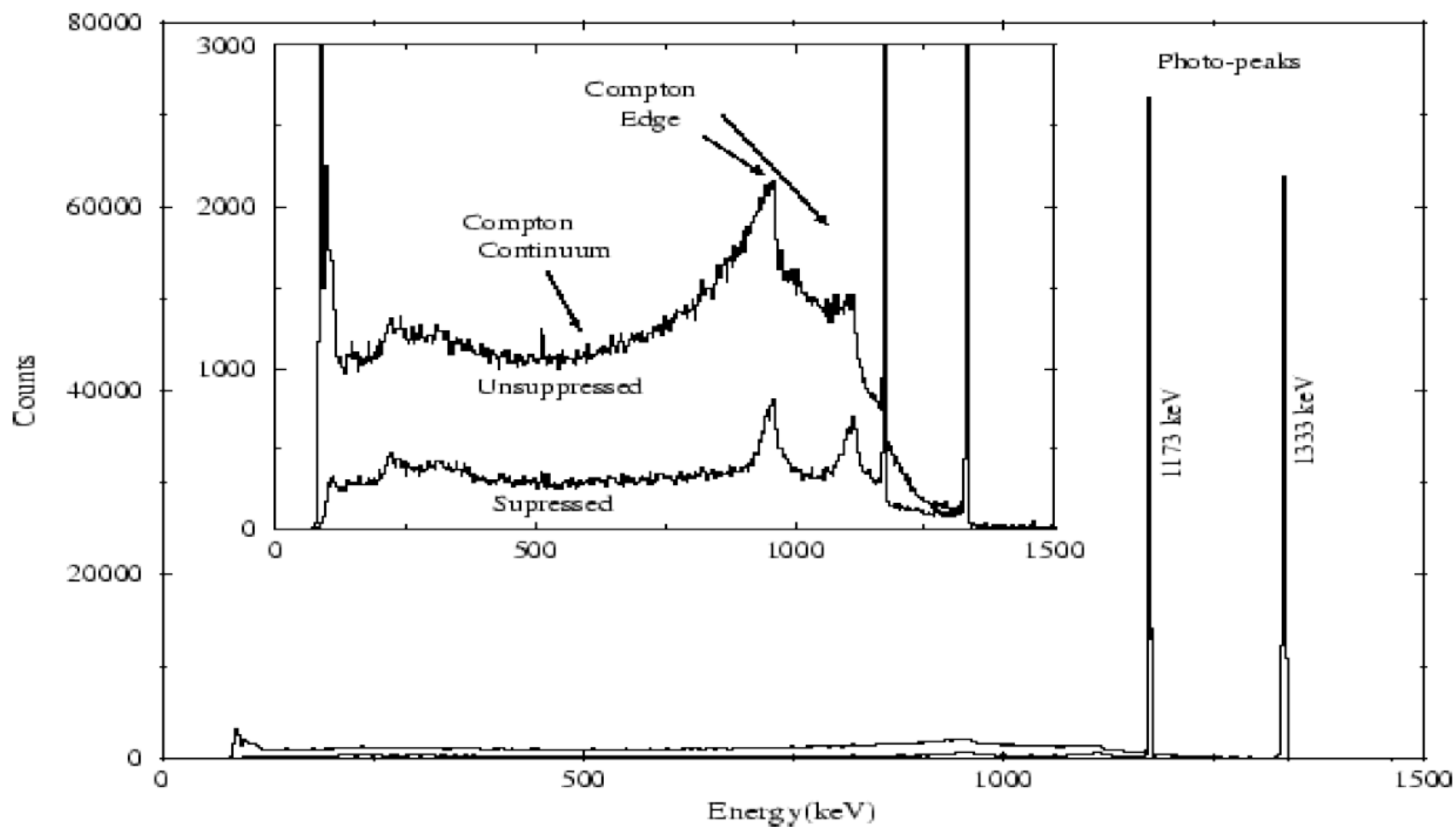
反康谱仪是利用围绕在HPGe主探测器周围的NaI(Tl)或BGO晶体来探测在HPGe中经康普顿散射逃逸出来的 γ 射线，用以反符合掉HPGe中的低能连续谱，因而提高了峰总比P/T (Peak to Total Ratio)。



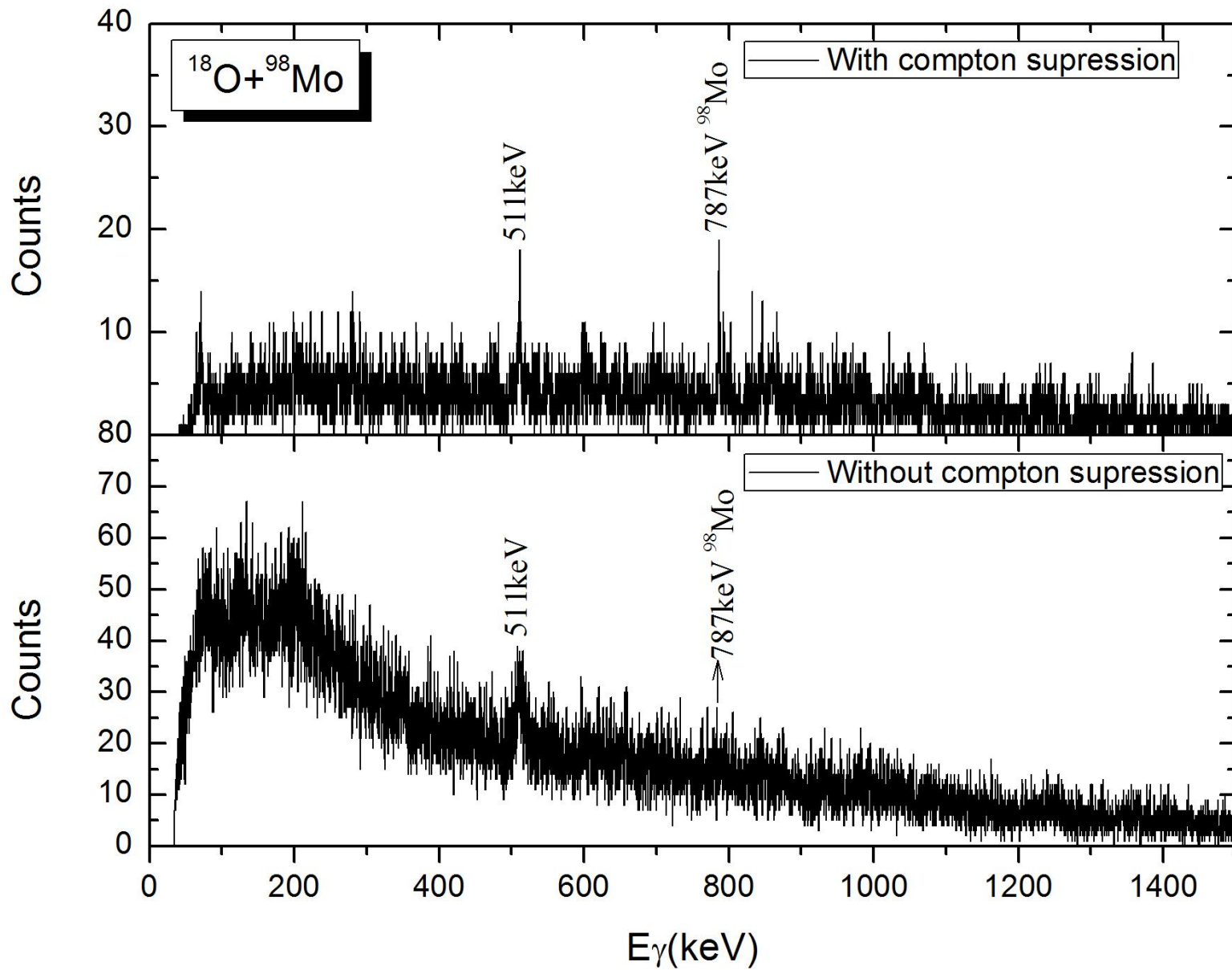
反康谱仪电子学线路部分



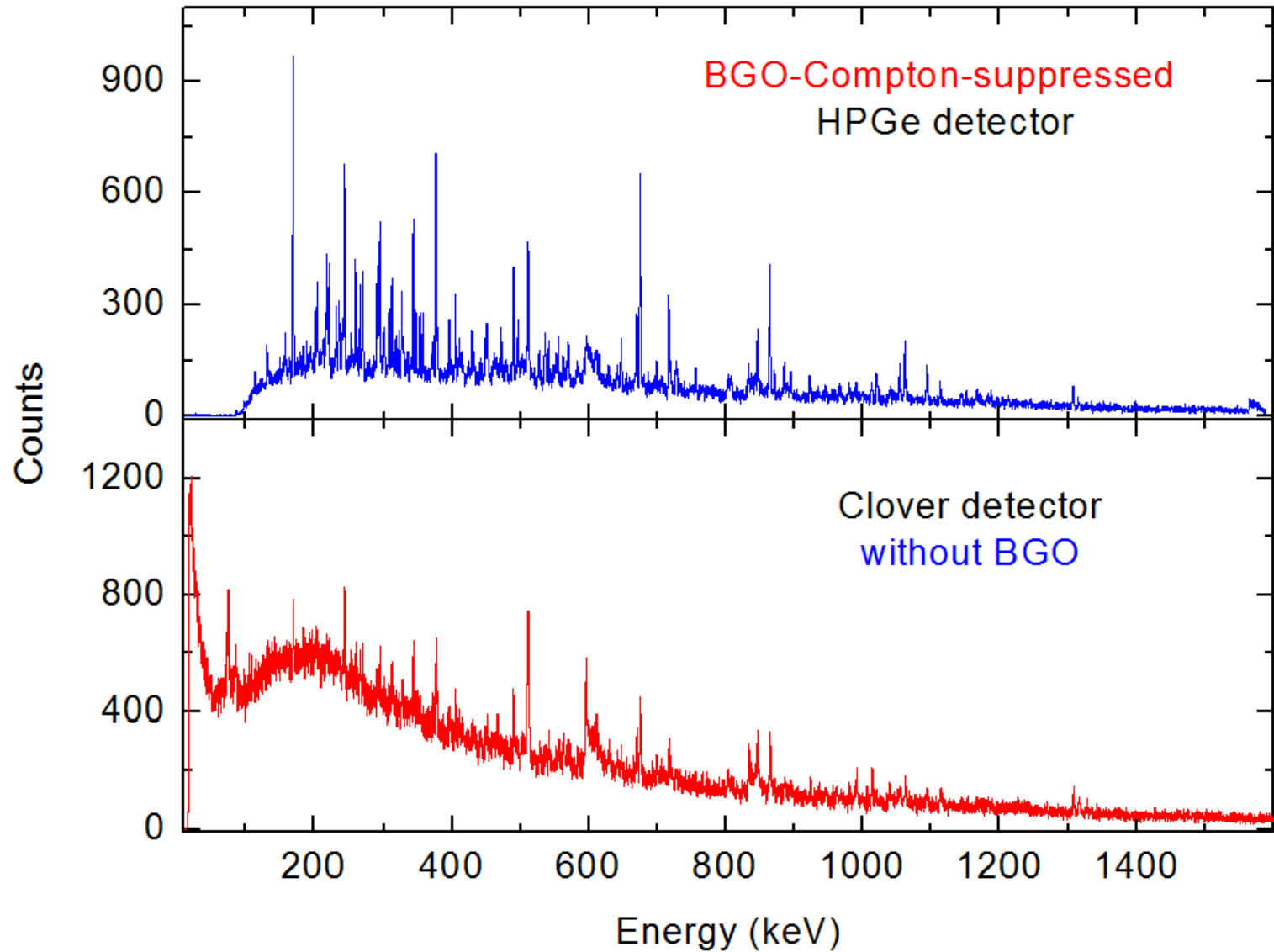
实验上用标准源 ^{60}Co 测得的反康效果图



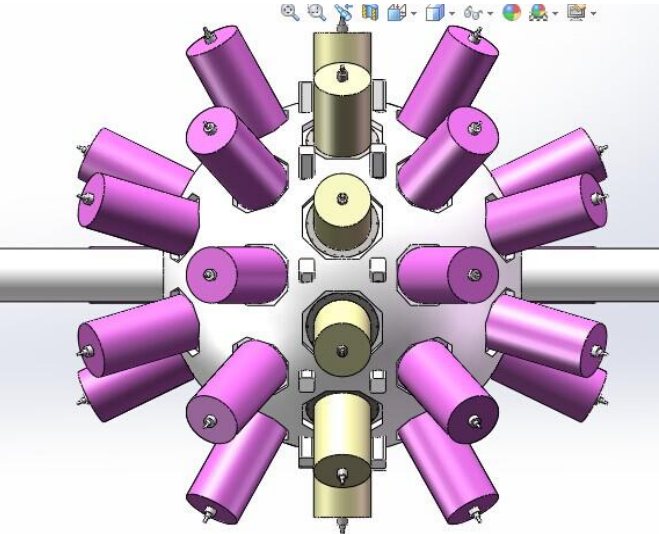
在束实验时测量得到的反康效果比较



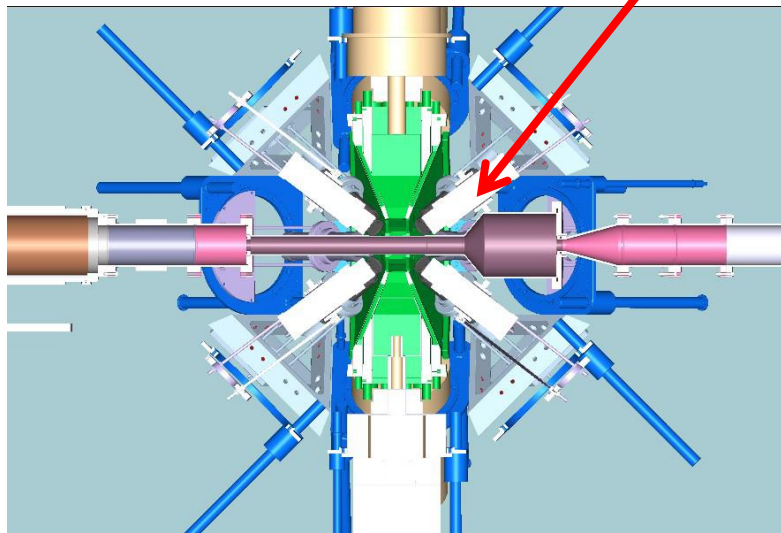
在束实验时测量得到的反康效果比较



新一代伽马探测器阵列中的反康谱仪结构设计

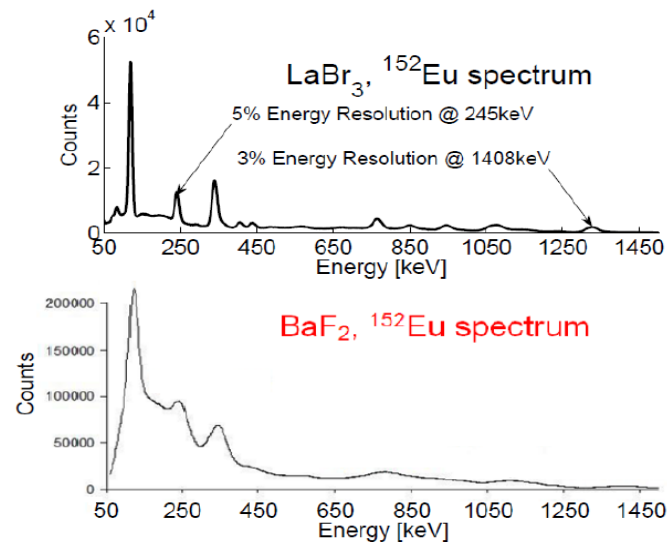
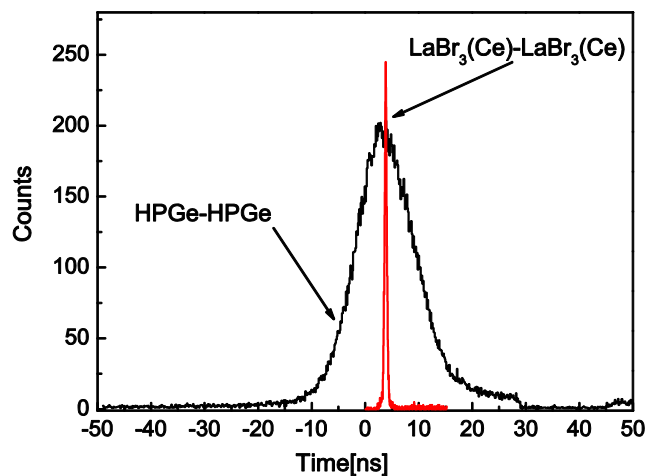


LaBr₃探测器



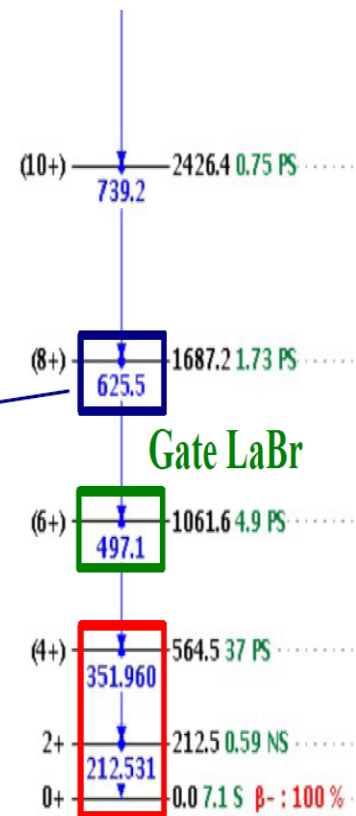
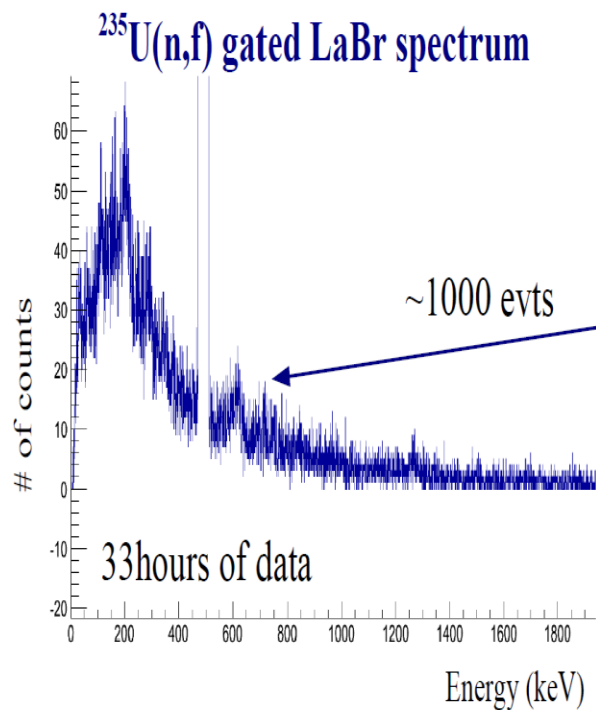
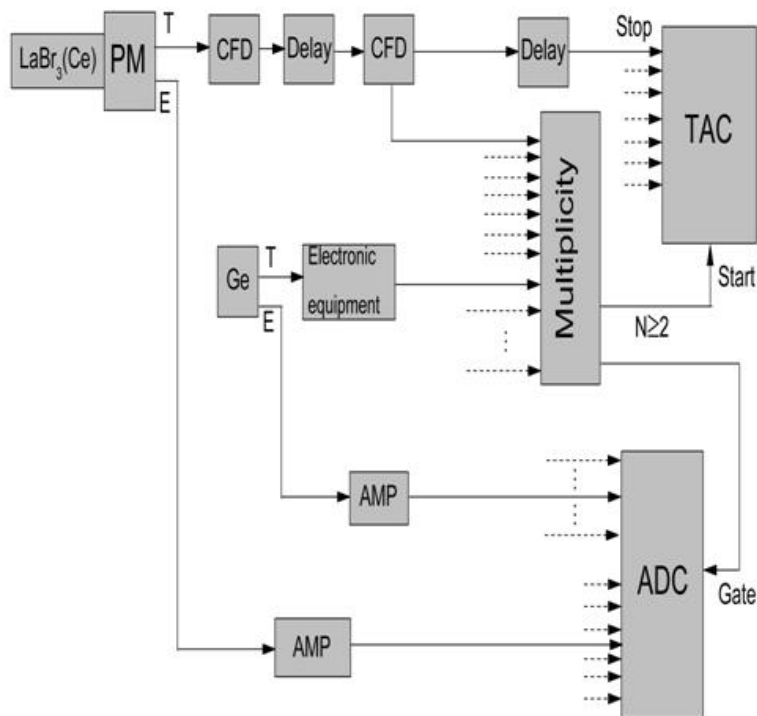
LaBr₃(Ce) 探测器是最近新出现的伽马探测器，具有效率高、能量分辨率好、时间分辨率很好的特性。应用LaBr₃(Ce) 探测器有以下优点

- 增加探测系统的探测效率
- 快时间线路符合测量降低本底
- 裂变产物核寿命测量



- 利用LaBr₃进行时间测量，时间分辨大于200ps。
- 利用MSCD方法修正，测量精度可达10ps量级。

在线快时间线路符合测量

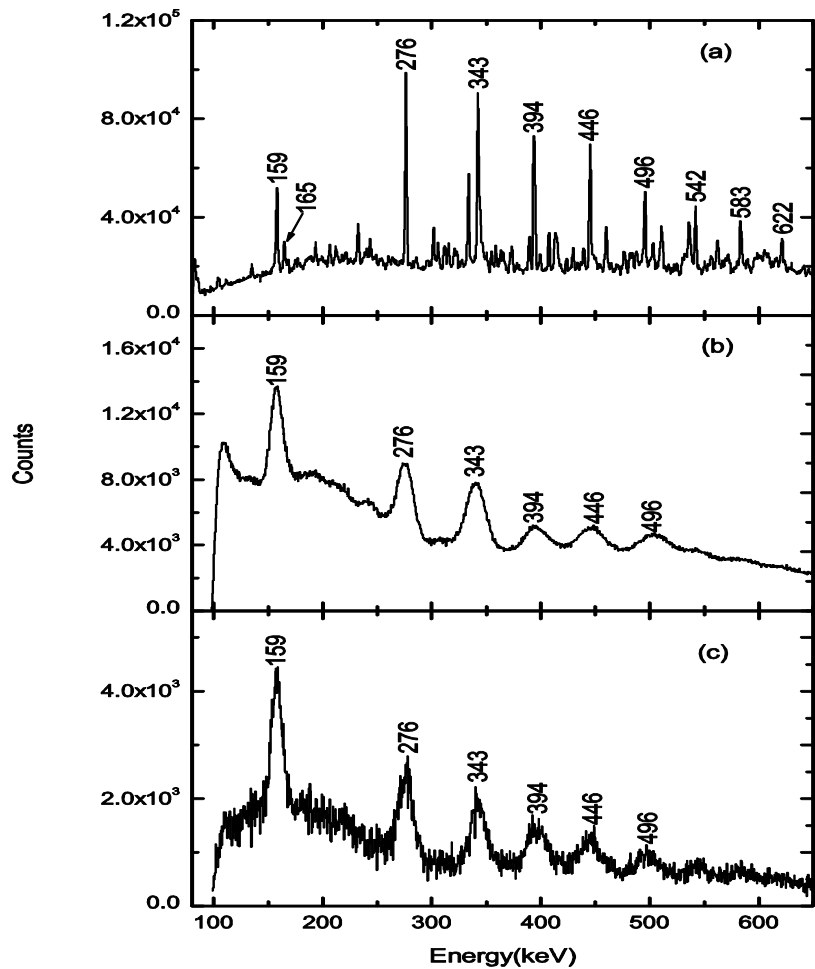


42 000 Ge-Ge-LaBr-LaBr coincidences

Gates Ge

^{100}Zr

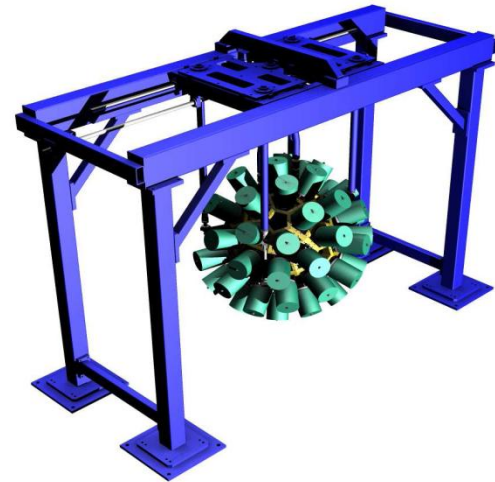
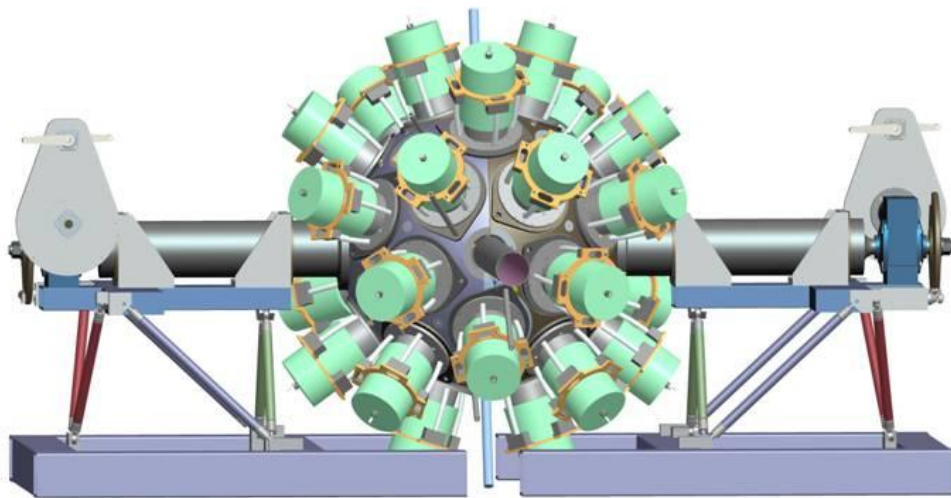
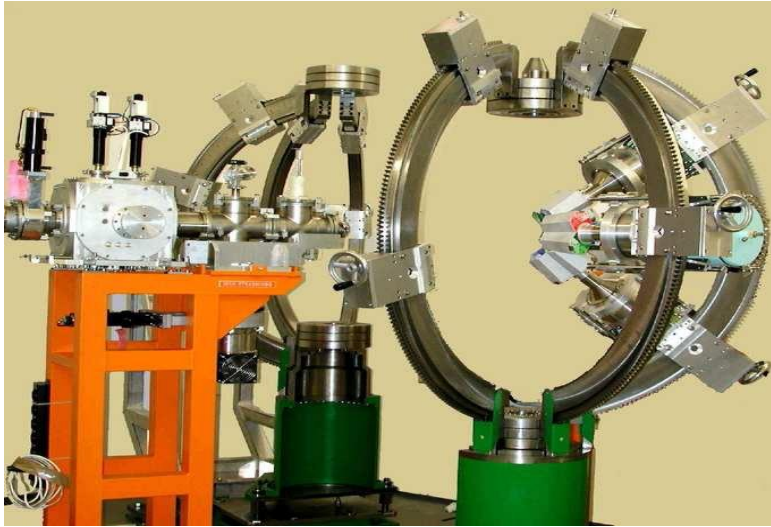
LaBr₃ 探测器和高纯锗探测器阵列组成的探测系统



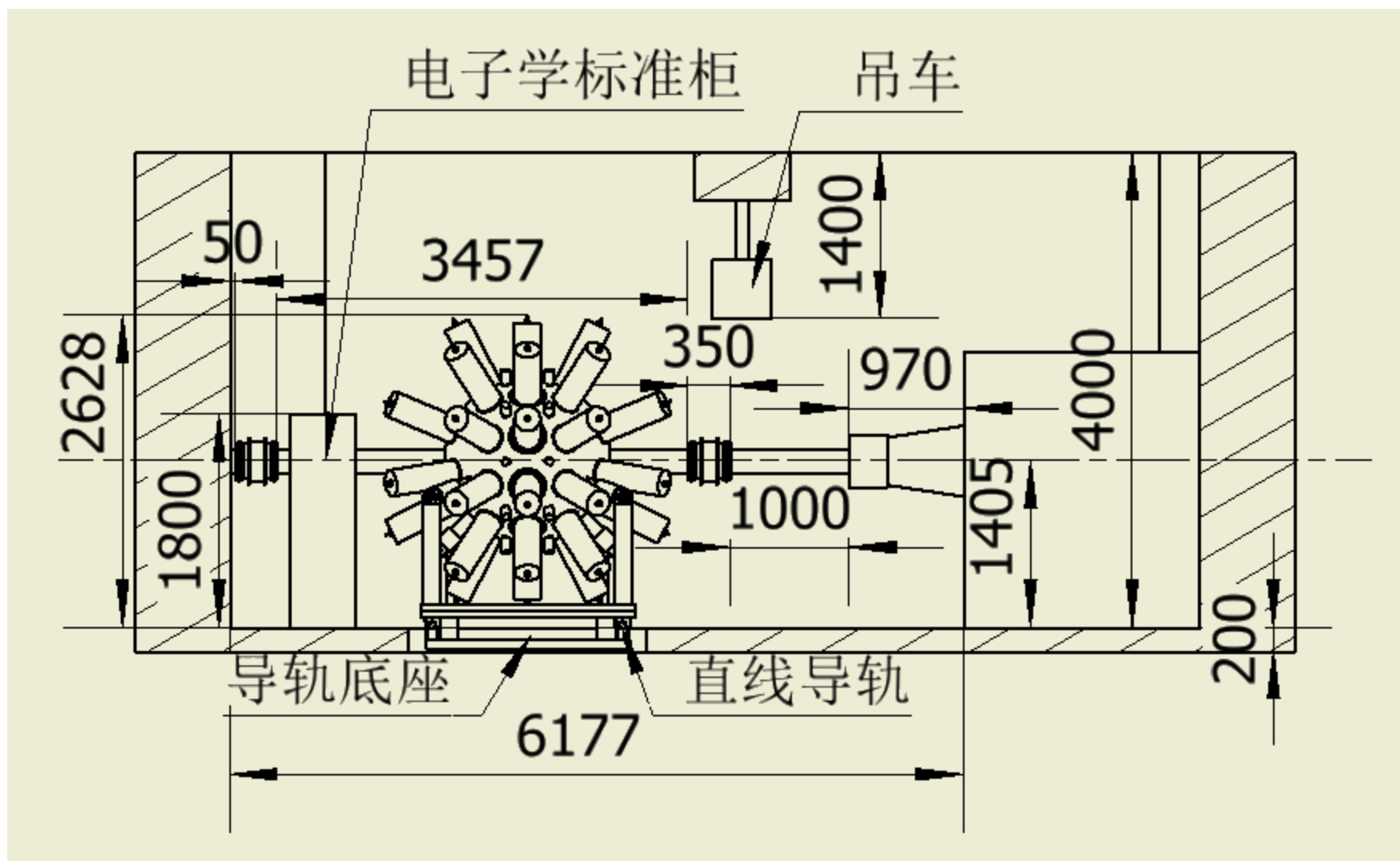
**11 HPGe-BGO , 2 Planar HPGe
and 6 LaBr₃(Ce)**



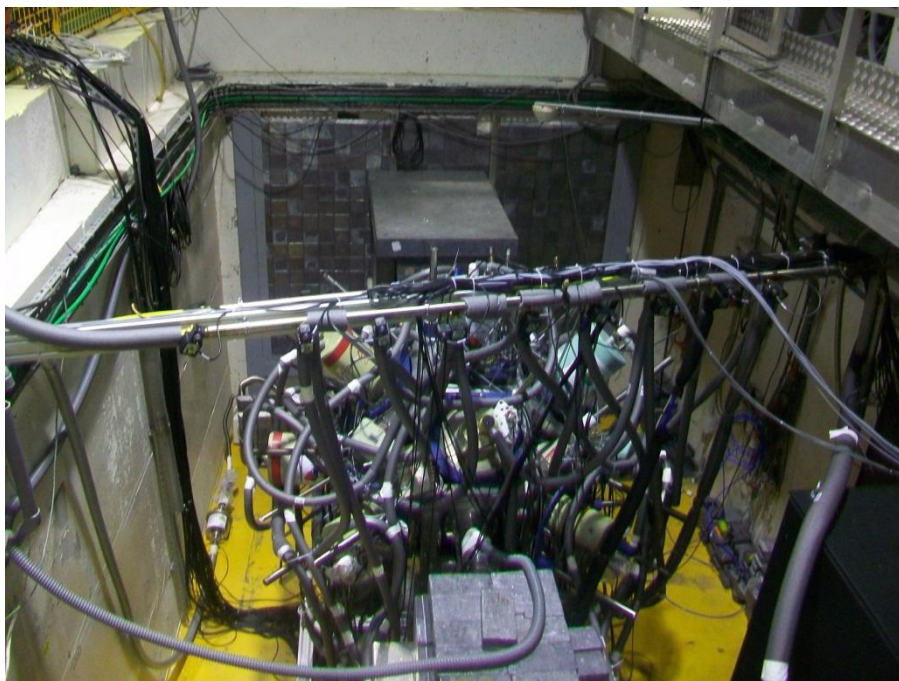
探测器支架方案



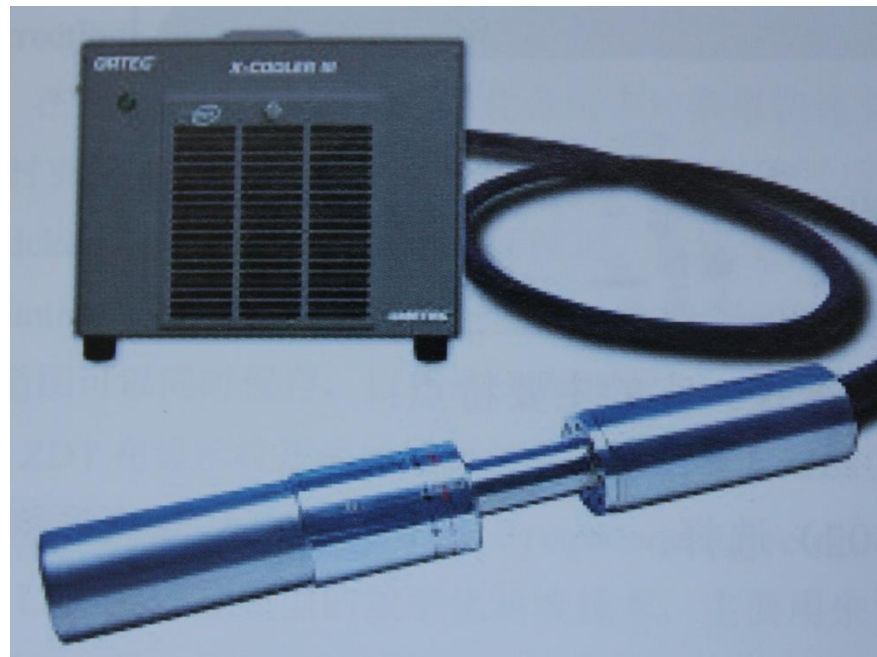
探测阵列直径大约为2.5米



低温制冷部分



液氮制冷



电制冷

液氮制冷与电制冷比较

- 液氮制冷是传统的制冷技术，电制冷是新近发展起来的制冷技术
- 电制冷购买时需要多加些购置成本，但液氮制冷日后长期使用会消耗更大的成本，还包括人员投入的成本，维修和检测的成本等。
- 新型的ICS电制冷探测器已具备了无需回暖即可随时制冷的功能，和液氮制冷相比就具有了更好的技术优势。
- 液氮制冷探测器隔段时间需中断测量补充液氮，电制冷则可以使探测器一直处于稳定工作状态，取得更好更稳定的测量值，特别是对一些核的衰变寿命测量，和一些关键反应的截面数据测量更加重要。
- ORTEC新型的ICS电制冷探测器具有优异的性能和技术优势，已在各种环境下得到很好的应用和验证，特别是已应用到美国的GF和航天领域。
- 如能得到经费支持借这次探测阵列研制的机会购置新型的ICS电制冷探测器将会使我国的高纯锗探测器阵列达到国际最先进的水平，高纯锗探测器阵列在CSNS的实验终端上会更好的发挥作用，取得质量更好的实验数据和研究成果，同时在其它很难进行液氮制冷测量的环境下也可使用这种新型探测器，特别是可应用到GF和核能领域的一些特殊环境下的测量工作中。

新一代电制冷HPGe探测器

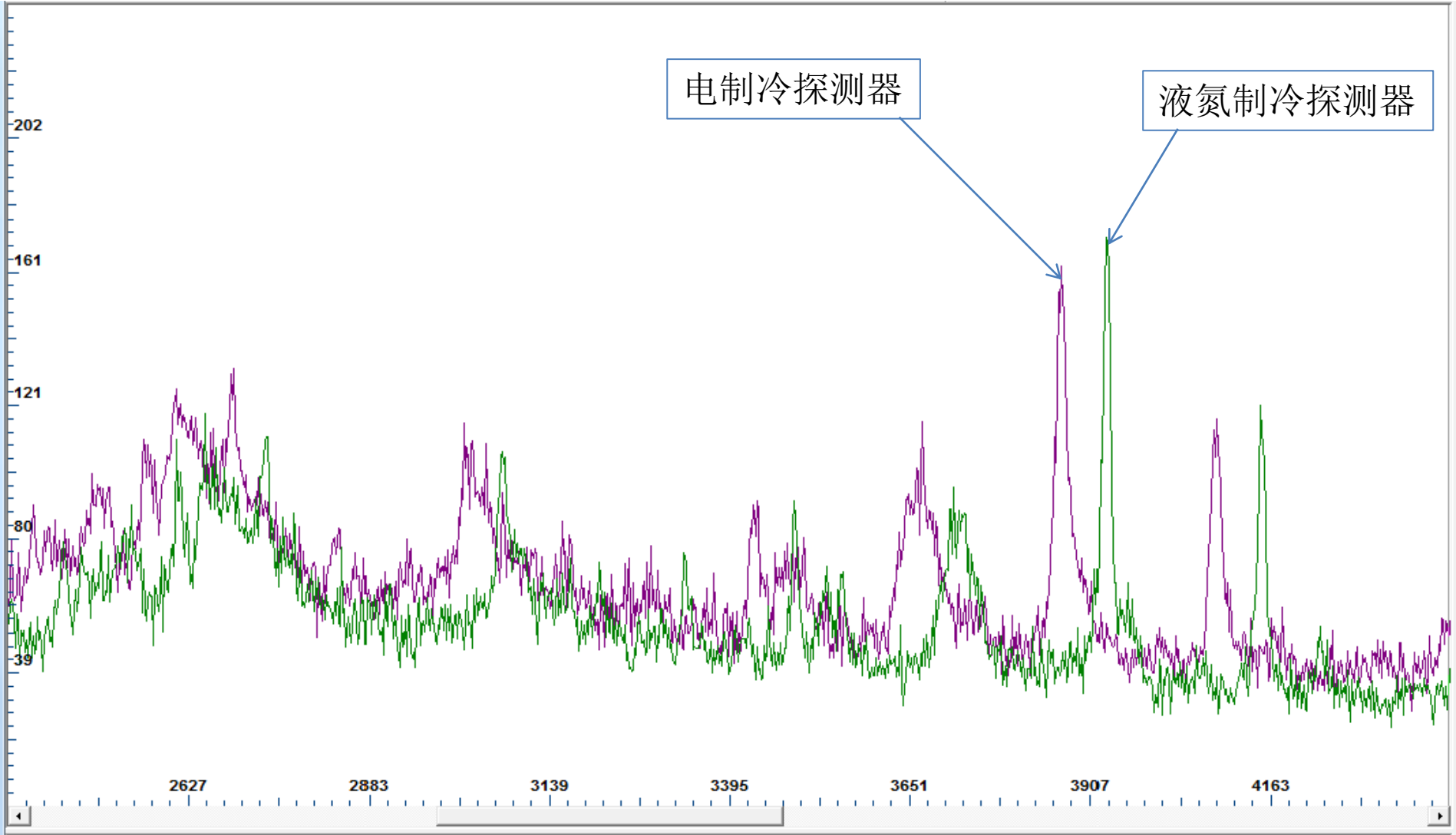


- 一体化电制冷HPGe谱仪，采用斯特林制冷技术
- 易于移动与组装，可以在局部回温下随时启动制冷
- 正常维持时功耗70W，制冷时130W，对于CLOVER探测器240W，整个探测器阵列的功耗小于4500W，制冷时小于9000W

ICS电制冷探测器和液氮制冷探测器组成的探测器阵列



电制冷探测器和液氮制冷探测器在在束测量时得到的能谱比较图



总结与展望

- 计划在CSNS上建设新一代的伽马探测器阵列来开展核数据测量及其他相关的核谱学测量工作，如中子核反应截面测量，裂变核谱学和丰中子核结构研究等
- 介绍了该装置的设计方案和技术参数，同时介绍了研制计划和进展情况。特别介绍了如何降低在束测量的本底，可以说由高纯锗探测器为主组成的大型伽玛探测阵列很适合对中子核反应和中子诱发裂变实验中的复杂伽马谱线进行在束测量。
- 该装置建成后大大提升了我国核谱学装置的探测能力,并结合CSNS中子束流的特点开展相关研究工作，将改变我国核谱学研究的面貌，为我国核数据测量和核物理研究开创一片新天地，促进我国核数据,核物理基础研究，以及核能与核技术的发展

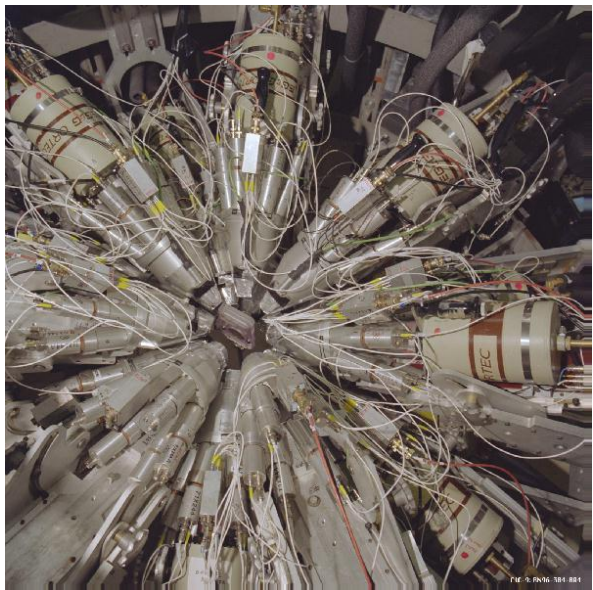
谢谢!

The image features the Chinese characters '谢谢!' (Xièxiè!) rendered in a vibrant, multi-colored font. The characters are arranged horizontally. The first character '谢' is colored with a gradient from purple to red. The second character '谢' is colored with a gradient from orange to green. The exclamation mark '!' is a solid purple. Below the characters, there are several grey, semi-transparent shadows that appear to be cast from the characters, giving them a 3D effect. The background is plain white.

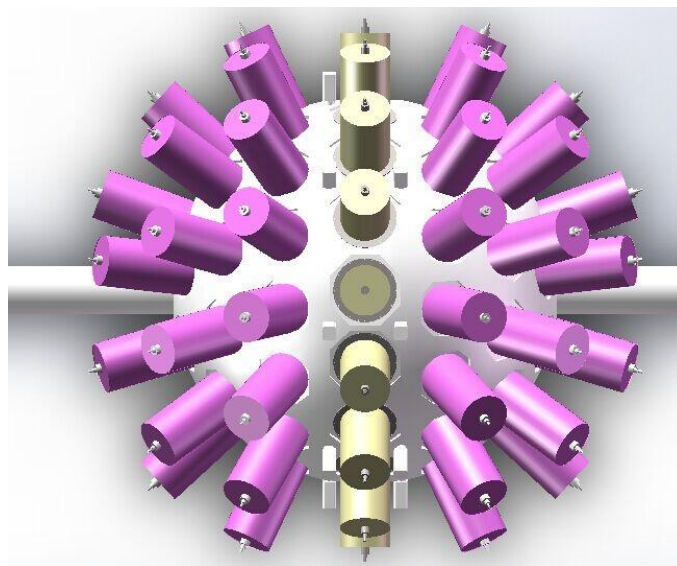
中子核反应截面测量实验装置性能比较

性能	GEANIE	GAINS	CSNS
中子产额 (n/s)	1×10^{15} , 距离20米; 质子加速器散裂中子源; LANSCE/WNR	3.4×10^{13} , 距离200米; 电子加速器白光中子源; GELINA	2.0×10^{16} , 距离80米; 质子加速器散裂中子源; CSNS
探测器	30个HPGe探测器	12个HPGe探测器	~100个HPGe晶体
本装置优势	中子产额高, 探测效率高, 能得到更好的截面测量值, 同时也可开展多方面的研究工作。		

(n,2n γ)等中子核反应截面测量



GEANIE, 中子产额 1×10^{15}
20个带BGO反康的同轴锗HPGe探测器和10个平面锗探测器, 液氮制冷



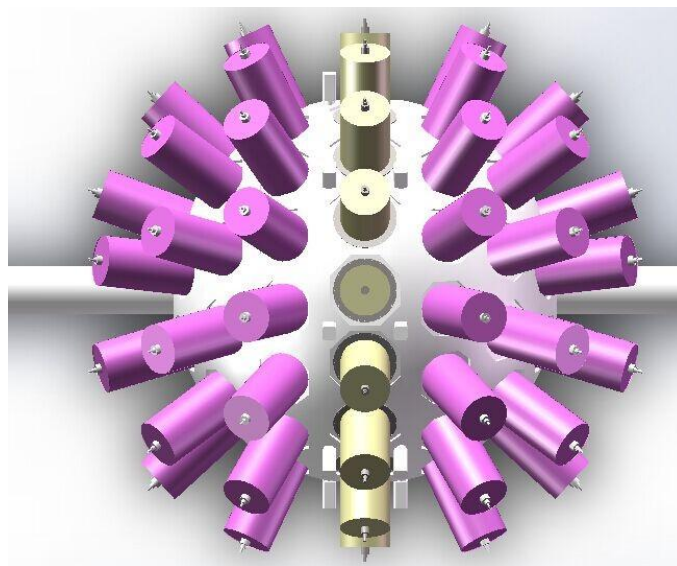
CSNS, 中子产额 2×10^{16}
90个BGO反康HPGe探测单元和10个平面锗探测器, 20个LaBr₃(Ce)探测器, 最新ICS电制冷技术

在GEANIE装置上采用测量受激子核的特征伽玛射线截面的新方法, 对Pu同位素的反应截面开展了新的测量方法研究, 但给出的反应截面最好的数据误差在10%以上, 在阈($E_n \sim 6\text{MeV}$)附近的误差约为30%。主要误差来源是产物核能级结构数据的精度, 以及模型程序所包含的结构信息是否完全, 如其伽玛射线强度, 伽玛跃迁分支比的测量精度不高等。因此核结构信息等对结果的可信度有很大的影响。因此, 需要在CSNS上利用我们新建的大型高纯锗探测系统对(n,2n γ)等中子核反应截面进行测量(如重要的 $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$ 截面测量), 以便得到更好的核数据测量成果。

裂变核谱学研究



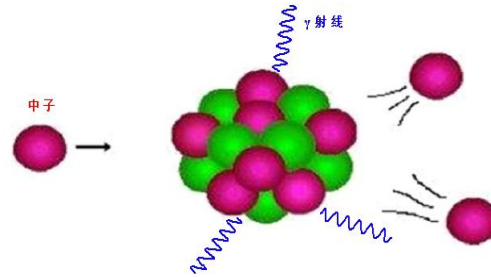
Gammaspere, 自发裂变
110 反康高纯锗, 液氮制冷



CSNS, 中子诱发裂变
90个BGO反康HPGe探测单元和10个平面锗探测器, 20个LaBr₃(Ce)探测器, 最新ICS电制冷技术

在Gammaspere上利用²⁵²Cf自发裂变开展了丰中子核结构研究工作, 取得了很好很丰富的研究成果, 迄今已发表了上百篇SCI文章, 更多的成果还有待发表。但限于自发裂变的限制, 一些丰中子核素的生成截面很低, 而中子诱发裂变则对这些核素相对生成截面高很多, 因此在CSNS上利用新建成的高纯锗探测系统对中子诱发裂变核谱学进行研究会取得更丰富的研究成果

瞬发伽玛法测量反应截面测量



举例： $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$

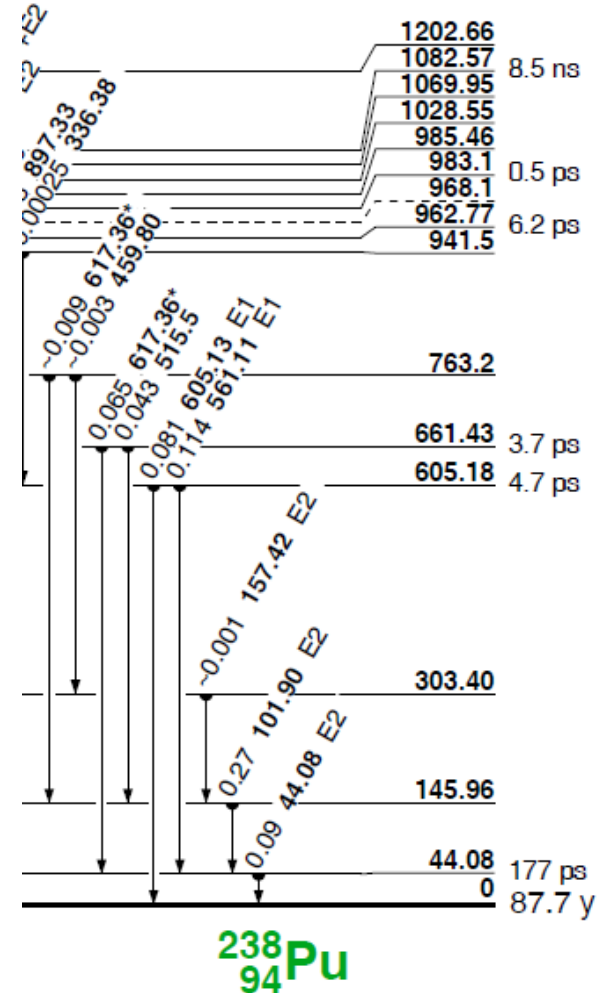
瞬发伽玛法测量 $^{239}\text{Pu}(n,2n)^{238}\text{Pu}$ 截面应用的公式如下：

$$\sigma_{n,2n}(E^n) = \sigma_{n,2n}(E_\gamma, E_n) / K(E_\gamma, E_n)$$

其中， E_γ 是 ^{238}Pu 退激的 γ 射线能量， $K(E_\gamma, E_n)$ 可借助耦合预平衡和Hauser-Feshbach的GNASH程序和标准参数计算，或者用FUNF程序计算得到。利用以上公式可从伽玛分截面推出 $(n,2n)$ 总截面。

以前核数据测量中得到的截面误差较大有以下几个原因：

- 1, 探测器个数有限，所以测量精度不高
- 2, 理论计算程序和标准参数有待完善和修正
- 3, 核结构信息不全，如能级纲图，伽玛跃迁分支比、跃迁多极性等



1, 新的探测装置建成后, 可提高测量精度, 进而得到更精确的(n , $2n$) 截面测量值。

2, 同时利用新的探测技术精确测量内转换电子, 给出内转换系数, 进而修正计算结果, 减少测量误差。因为Pu及其附近核素都是高 Z 核, 加上低位能级间距小, 甚至第一激发态能级能量小于50keV, 所以存在很强的内转换, 因此要进行包括内转换电子在内的多举测量, 才能给出其能级结构全部信息。

3, 同时该装置建成后能测量得到更全面精确的核结构信息以便完善和修正计算程序和标准参数, 进而能通过计算公式更得到更准确的 $(n, 2n)$ 截面测量值。具体内容包括:

为确保伽玛退激谱理论计算的可靠性, 对于伽玛退激过程, 剩余核的能级纲图的准确性是至关重要的。如果分立能级纲图给的不全, 或者分立能级间的伽玛退激分支比不准确, 都会造成伽玛退激特征谱的不准确。同时理论计算程序要包含预平衡发射及多种电磁模式的伽玛退激理论, 提高计算精度, 确保可靠性。这就需要对裂变核的计算结果, 在较宽的中子入射能区, 对各种截面, 角分布, 总中子双微分截面谱等都要与实验测量有很好的一致性, 在此基础上计算的伽玛退激过程的结果才有可靠性。

在散裂中子源上进行对多个能量点的 $^{238}\text{U}(n, 2n)$ 或者已知截面的 $^{207}\text{Pb}(n, 2n)$ 等反应伽玛分截面测量, 给出相关的精确核结构信息, 并改进理论模型计算 $(n, 2n)$ 反应截面, 检验模型程序的可靠性。

和理论家合作, 进行模型理论研究, 发展包含预平衡发射, 多种电磁模式伽玛退激理论, 改进FUNF或者GNASH程序, 提高计算精度, 建立适合裂变核 $(n, 2n)$ 截面计算的方法。

(n, 2n)截面测量探测能力估算

以 ^{238}Pu 157.4keV γ 截面的测量为例进行可行性分析(其截面数据在 $^{238}\text{Pu}(n,2n)$ 截面推导中占有很重要的地位):

典型样品量: ~ 2 克($\Phi 30\text{mm} \times 0.14\text{mm}$), 靶核数 5.04×10^{21}

中子通量: $\sim 10^4$ n/cm²/s/(0.2MeV)

γ 产生截面: 最小考虑到 $\sim 1\text{mb}$

γ 射线截面精度需求: $\sim 5\%$ 以内

由于样品很薄, 其中子通量衰减可以忽略(3%), 则根据公式:

反应数 $N = \text{反应截面} \sigma \times \text{单位面积入射粒子数} I \times \text{靶核数} N_s$

100小时内, 样品上产生的157.4keV γ 射线个数为

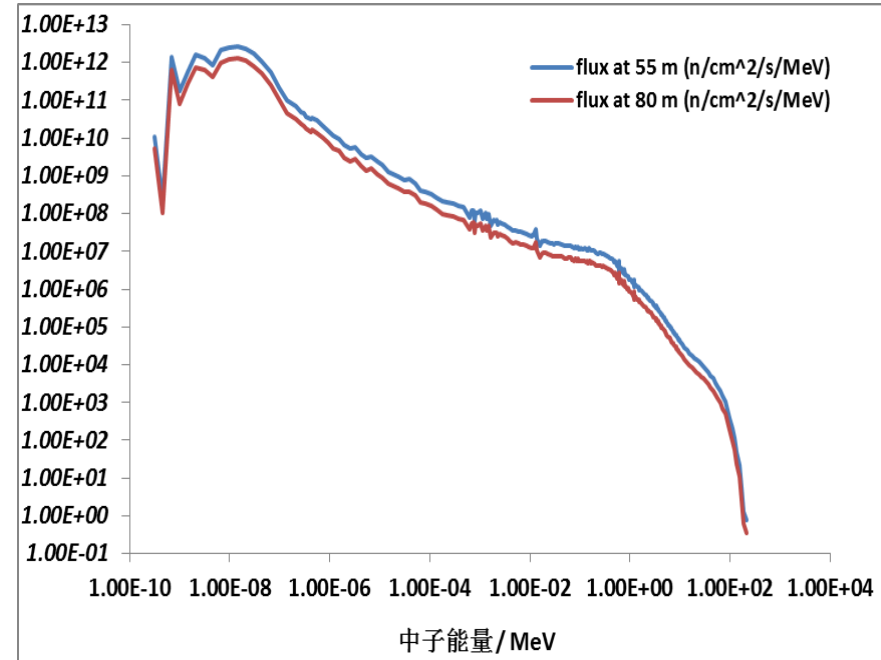
$$N = 0.001 \times 10^7$$

$$24 \times 1 \times 10^4 \times 100 \times 3600 \times 5.04 \times 10^{21} = 18144$$

其样品自吸收剩余率为50%, 探测效率 $\sim 40\%$ (目前设定的探测阵列配置), 则探测阵列的157.4keV γ 射线全能峰计数为 ~ 3600 。

按以往测量经验及参考他人数据, 本底一般比效应计数高1个量级以上。且此157.4keV γ 射线有数量相当的 γ 射线干扰, 形成和峰。因此其误差估算至少约为:

$$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{\sqrt{N + N + 10 \times N}}{N} \approx \frac{3.46}{\sqrt{N}} = 5.7\%$$



散裂中子源中子通量分布

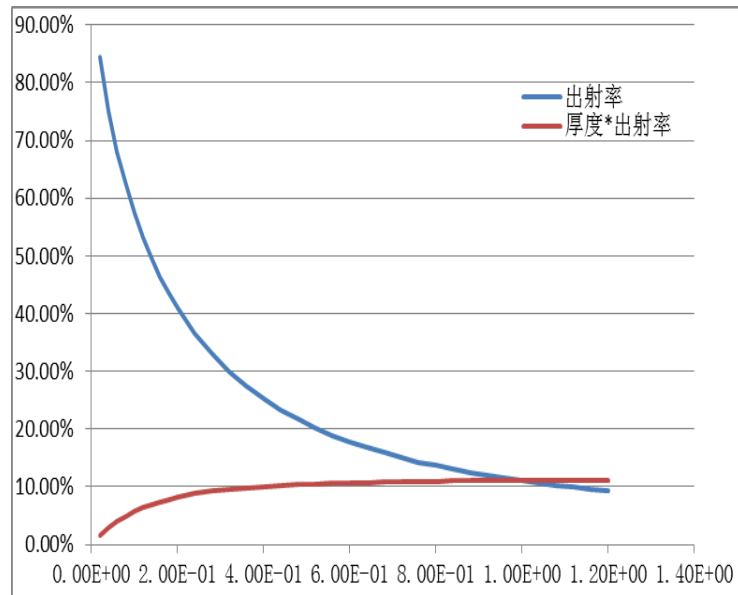
(n, 2n)截面测量探测能力估算

很显然若提升样品量则计数率应该会有提升，因此需分析样品量的上限条件。首先模拟计算了157.4keV γ 射线出射率随样品厚度的变化，从左图可以看出：随着厚度增加，代表样品量的<厚度*出射率>的值逐步增加，但当样品厚度达到0.4mm以后，随厚度增加 γ 射线出射增加很少。样品厚度为0.4mm时：直径 $\Phi 30\text{mm}$ 对应样品量为6克，57.4keV γ 射线出射率是典型样品的1.46倍；直径 $\Phi 50\text{mm}$ 对应样品量为16克，157.4keV γ 射线出射率是典型样品的3.88倍。

由于测量方法的限制，样品直径不能太大，若样品直径太大，相应的中子束流孔道变大，则本底增高且探测器需放置更远，效率会降低，得不偿失；且大样品会增加角分布测量的误差。根据实验测量经验，样品直径 $\Phi 50\text{mm}$ 几乎达到可接受的尺寸上限。对于上限样品量： $\Phi 50\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ (16克)样品，上述误差值变化为：

$$\frac{\sigma_N}{N} \approx 2.93\%$$

根据测量经验及实际情况，其它误差来源(中子通量、探测效率、各种修正项等)贡献通常大于3%，则二者相加总误差约为4.2%，基本满足要求。



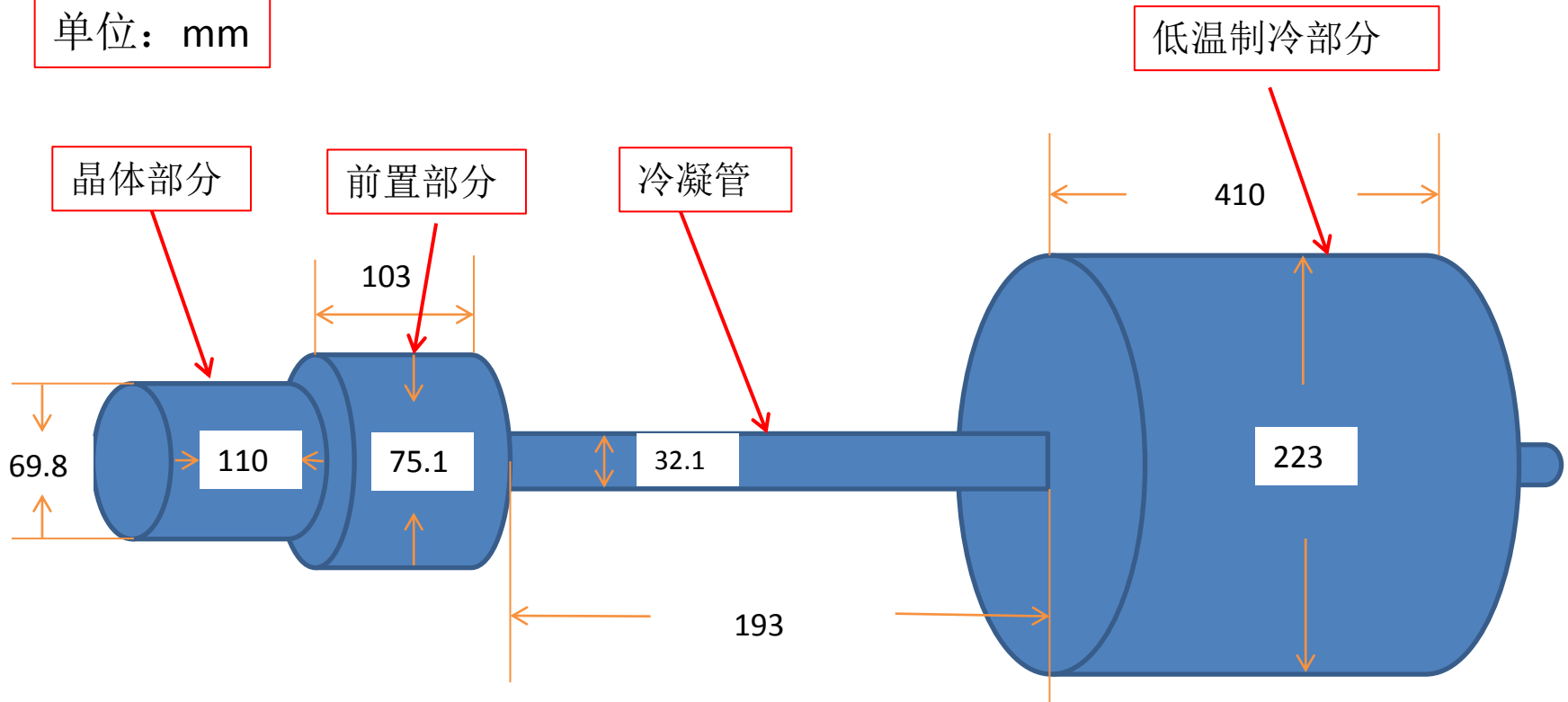
157.4keV γ 射线出射率随样品厚度的变化

γ - γ 符合方法测量(n, 2n)截面估算

- 以 $^{239}\text{Pu}(n, 2n)^{238}\text{Pu}$ 为例，计算 ^{238}Pu 的157keV和210keV的符合计数反推反应截面。假设新探测阵列有100个探测单元。则根据公式计算结果如下：
- $$N_c = \sigma \cdot n_s \cdot N_s \cdot M_\gamma \cdot (M_\gamma - 1) \cdot \varepsilon^2 \cdot C_n^2 = (1 \times 10^{-27}) \cdot (1 \times 10^4) \cdot (7 \times 10^{20}) \cdot (2 \times 1) \cdot (0.4/100)^2 \cdot (100 \times 99/2) \sim 112 \times 10^{-5}/s$$
- 其中 $\sigma \approx 1\text{mb}$ ($^{239}\text{Pu}(n, 2n)$ 截面最小为1mb)，中子流强为 $n_s = 1 \times 10^4 \text{n/cm}^2/\text{s}$; N_s 是靶核数，采用 280mg/cm^2 的 ^{239}Pu 靶， $N_s = N_A \cdot d/A = 6 \times 10^{23} \times 280 \times 10^{-3}/239 \text{cm}^{-2} = 7 \times 10^{20}/\text{cm}^2$; M_γ 是反应产物发射伽玛射线的多重性，假设 $M_\gamma = 2$; $n = 100$ 是探测器阵列中伽玛探测器个数; $\varepsilon = 0.4\%$ 是单个探测效率。
- 如在散裂中子源上做100小时实验，得到的符合计数是， $100 \times 60 \times 60 \times 112 \times 10^{-5} = 403$ 个符合计数，则统计误差可到5%
- 如流强提高到 10^5 ，则符合计数将达到4000。

高纯锗探头的结构设计

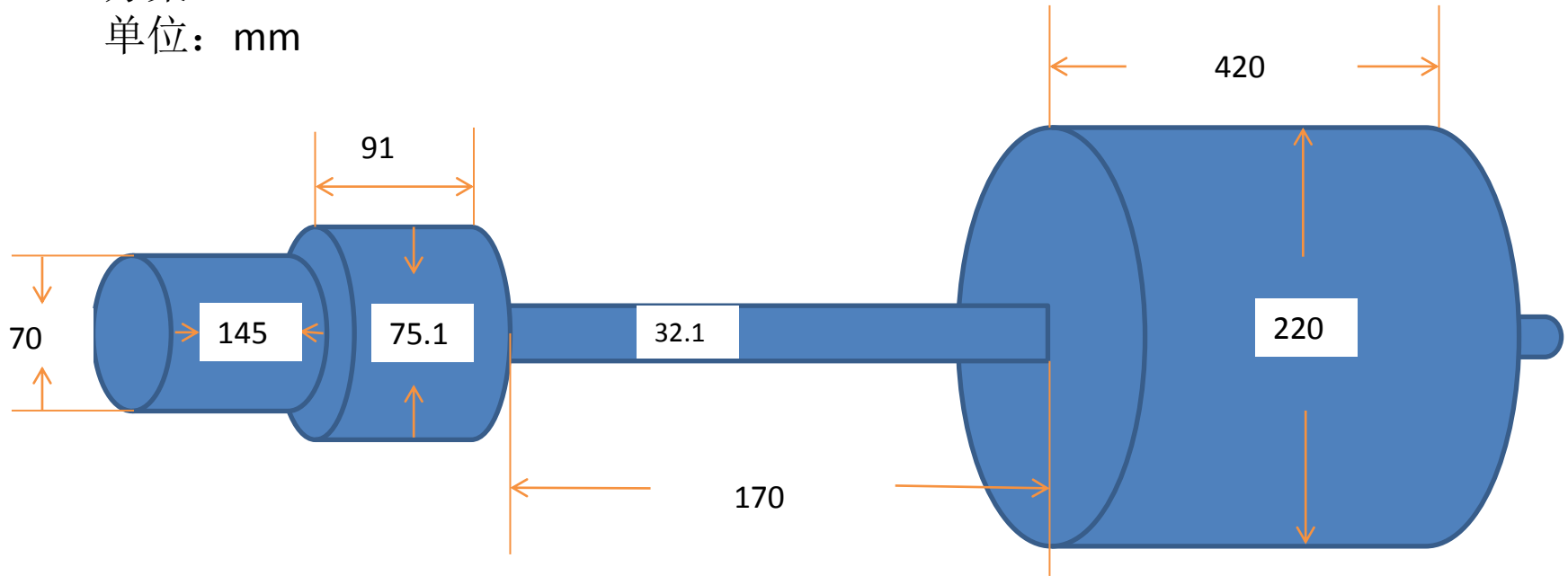
方案1
单位: mm



高纯锗探头的结构设计

方案2

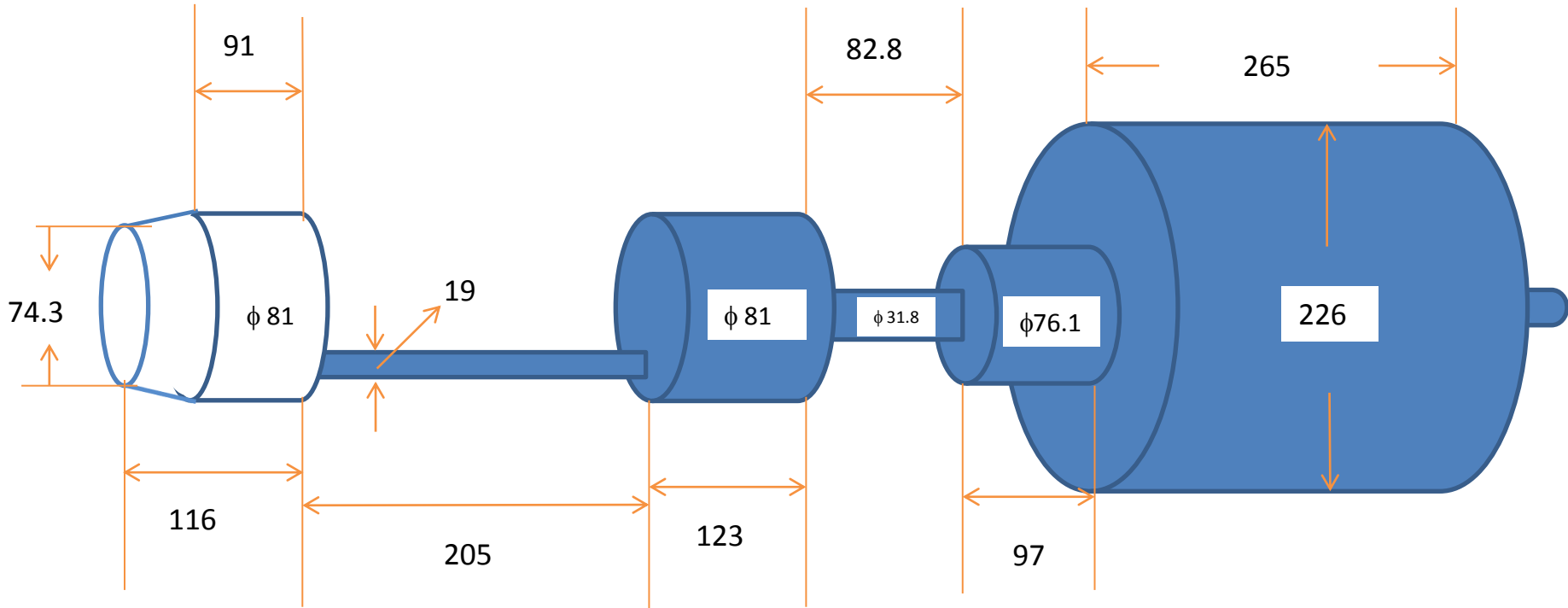
单位: mm



高纯锗探头的结构设计

方案3

单位: mm

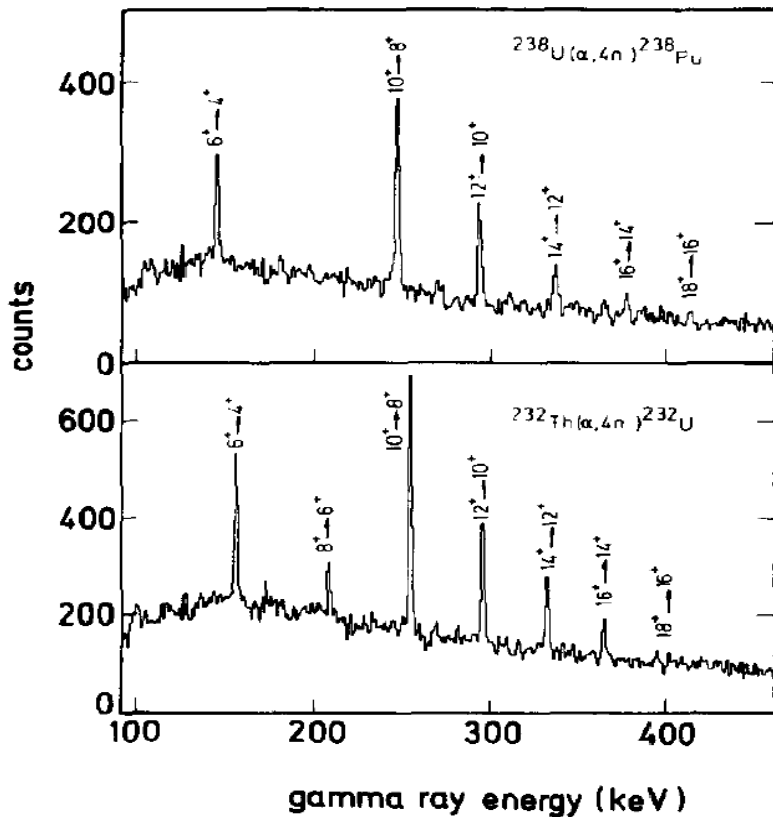


技术效果比较

	方案1	方案2	方案3
反康效果	4.0	3.0	5.0
探测效率	70%	80%	60%
在束测量效果	较好	一般	更好
技术难度	一般	一般	复杂

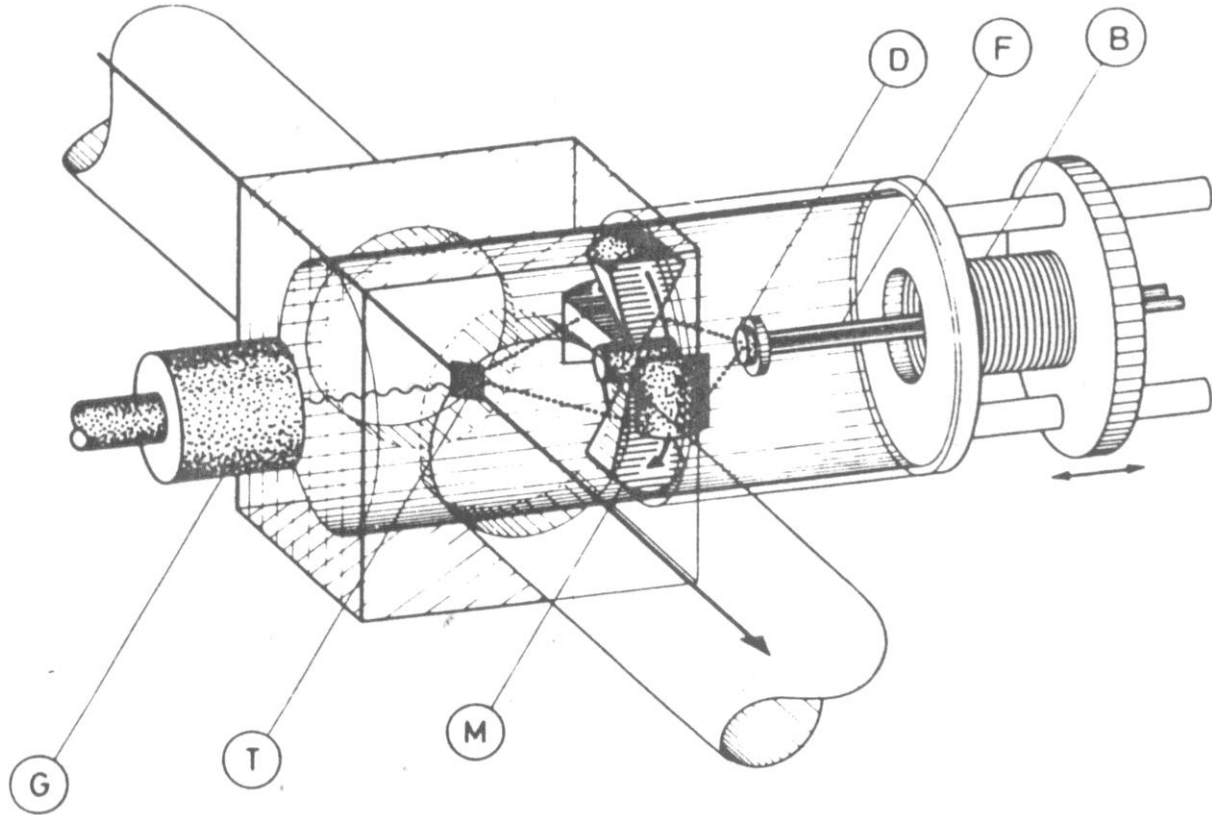
内转换电子与伽玛射线的符合测量

在束谱的测量中，利用和相对应的内转换电子符合开窗能有效地去除反应中其他本底峰的干扰，例如在采用瞬发伽玛分截面测量法进行Pu同位素的反应截面测量时，因为实验测量中会有很强的本底谱，处理起来非常复杂。而采用该方法就能有效的去除干扰，得到我们想要的Pu同位素核相关谱线。



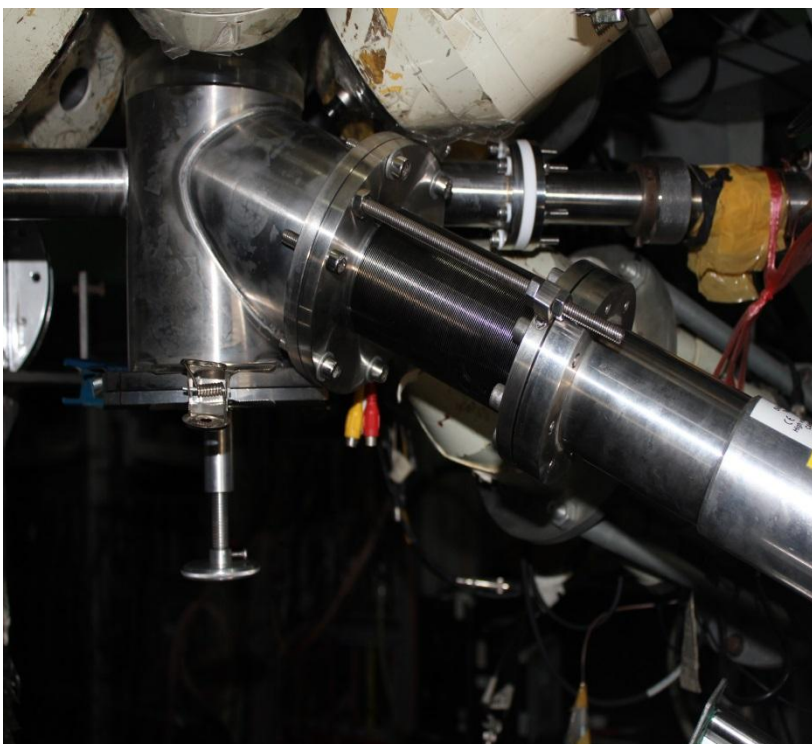
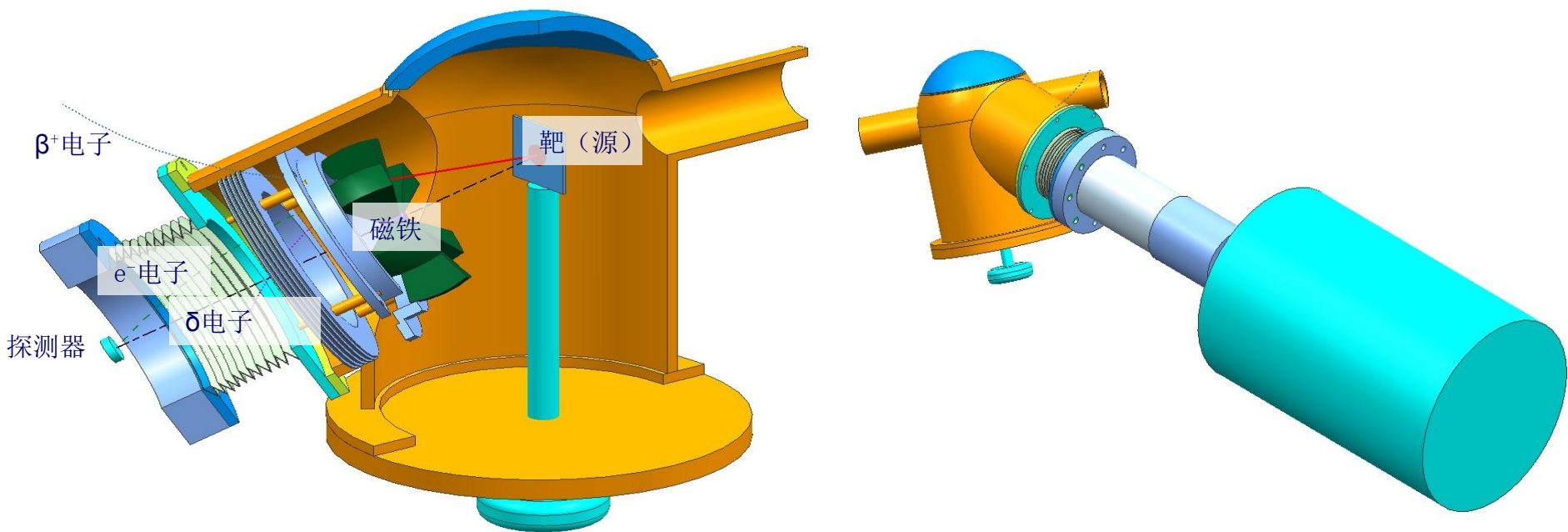
左图是内转换电子和伽玛射线符合测量得到的裂变核 ^{238}Pu , ^{232}U 核的伽玛能谱。从图中可以看到经过和内转换电子符合测量后得到的裂变核 ^{238}Pu , ^{232}U 的伽玛能谱很干净，去除了其它核伽玛射线的干扰。利用此方法，相信会得到更好的有关Pu同位素核的实验数据。

内转换电子的在束测量装置

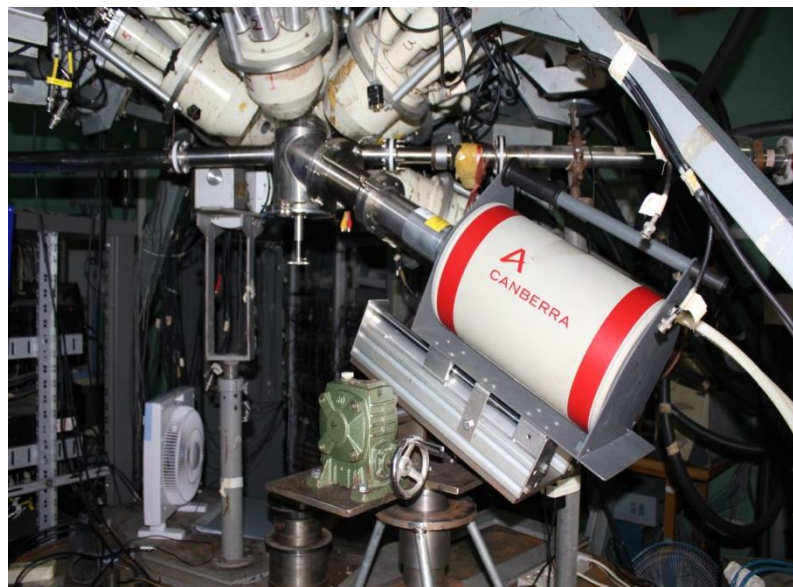


内转换电子的在束测量装置图

G = Ge探测器, T = 靶, M = 微桔谱仪,
D = Si (Li) 探测器, F = 冷却棒, B = 波纹管



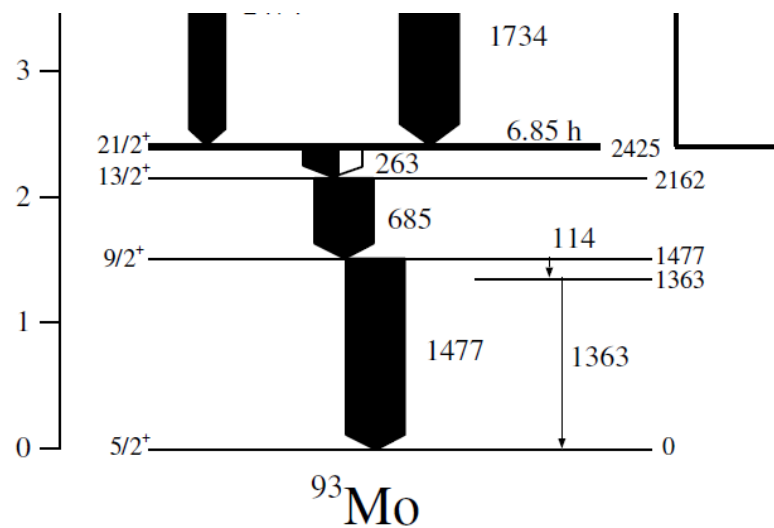
3-3、 ^{93}Mo 内转换电子在束实验



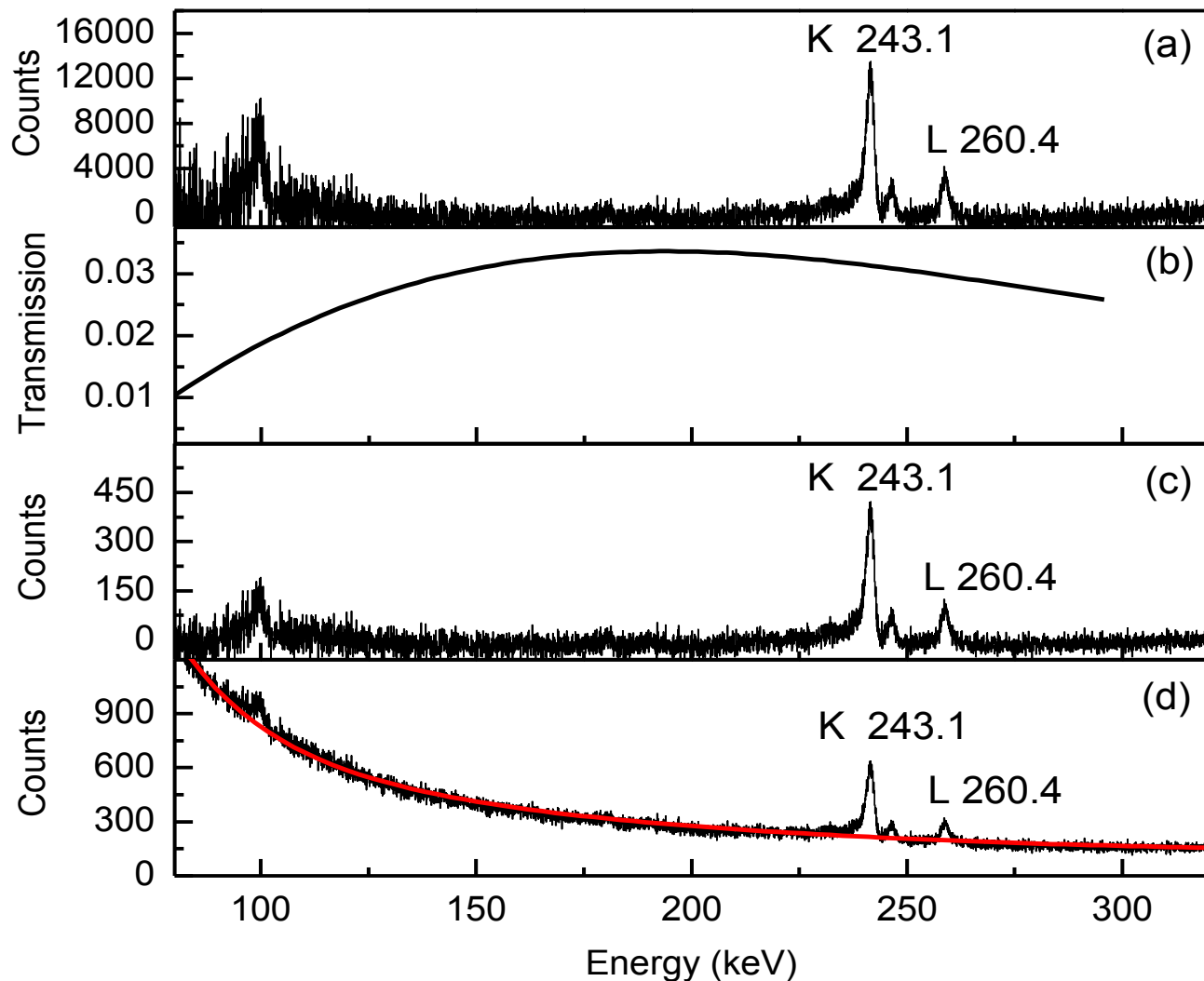
►探测阵列由9套HPGe反康谱仪+2个小平面Ge探测器+1台微桔谱仪组成

► $^{90}\text{Zr}(\alpha, n)^{93}\text{Mo}$

►采用带Pb衬Zr靶， ^{90}Zr 厚度：0.43 mg/cm²，Au衬厚度：9.5 mg/cm²



3-3、 ^{93}Mo 内转换电子在束谱



K层和L层内转换系数比为:

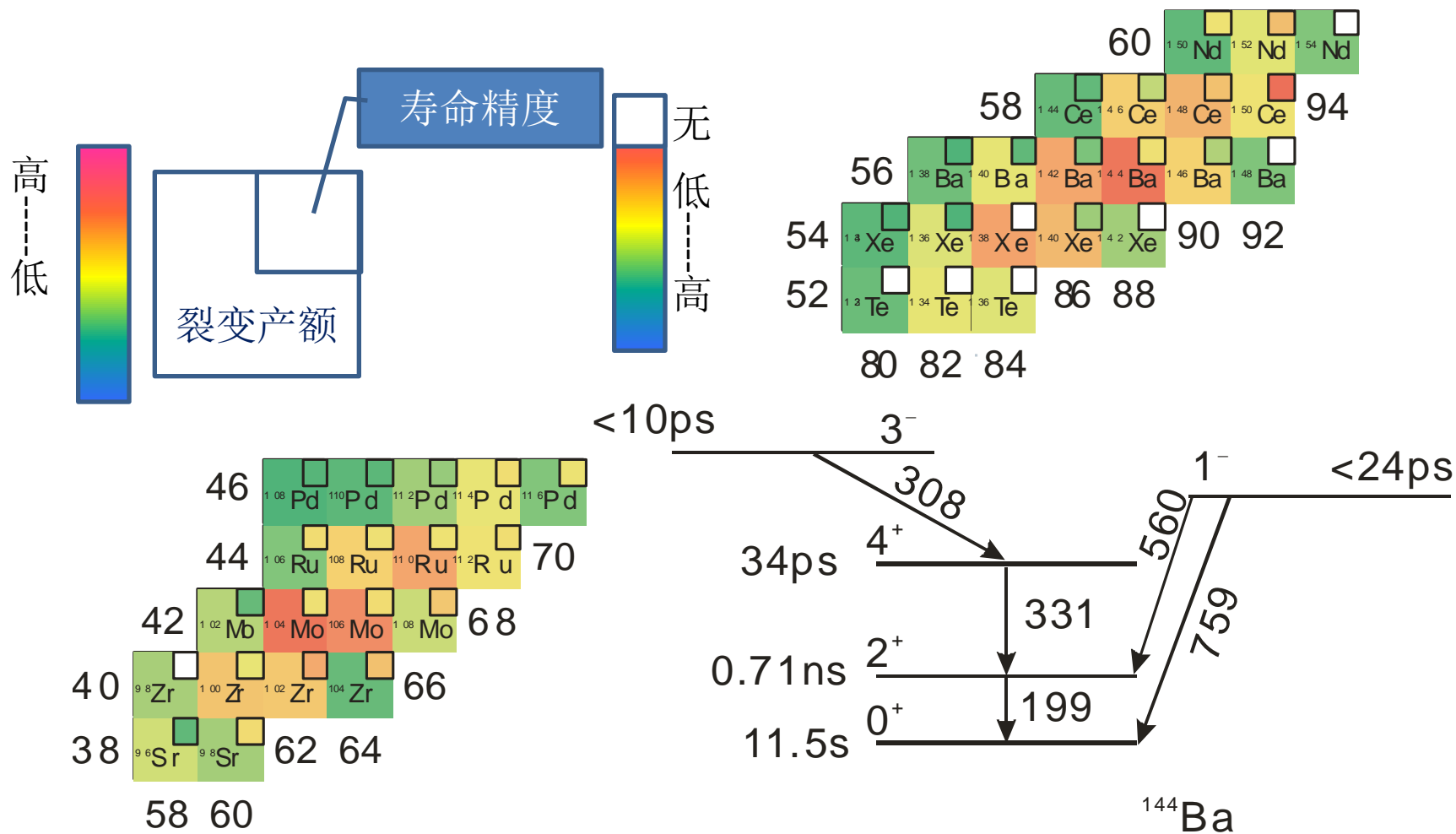
$$\alpha_K / \alpha_L = 3.48 \pm 0.61$$

E4理论值: 3.47

M4理论值: 5.16

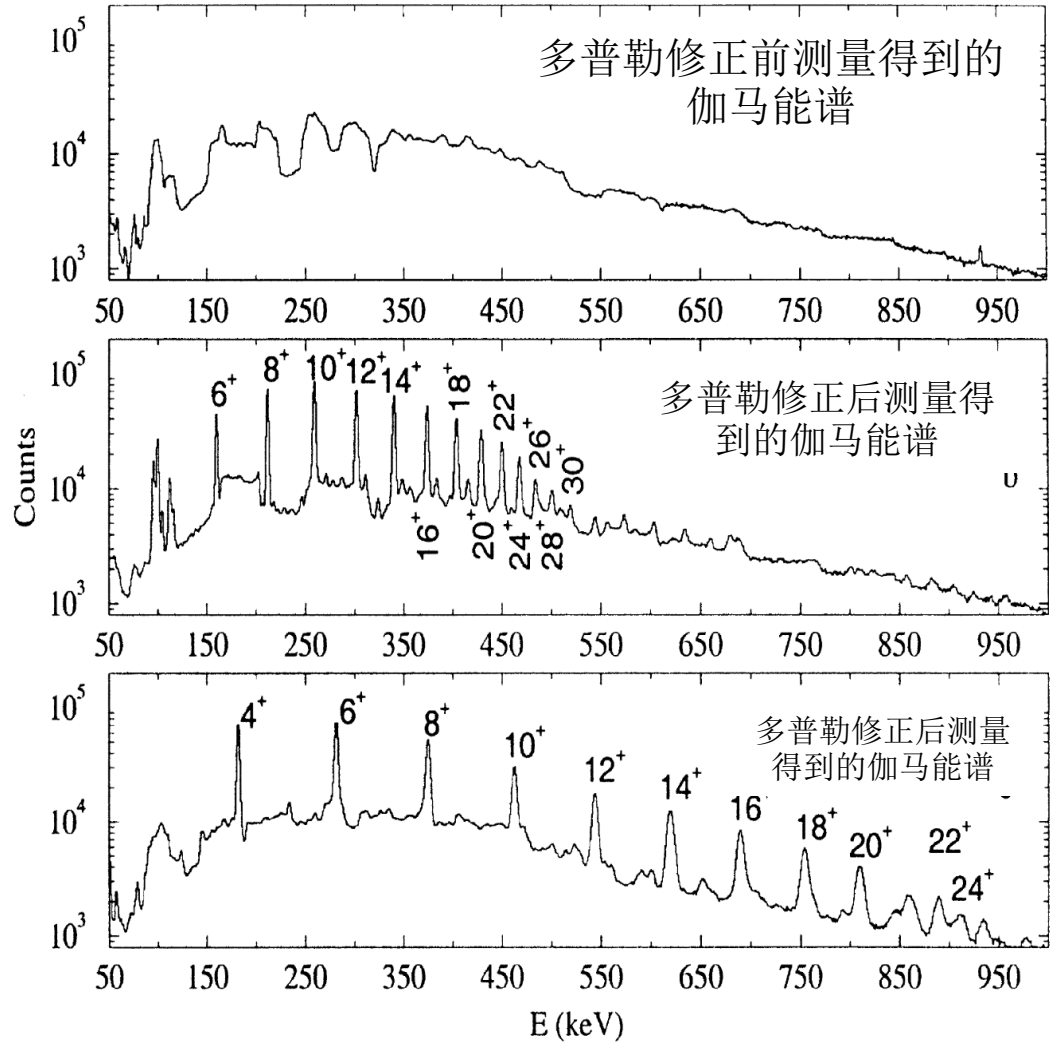
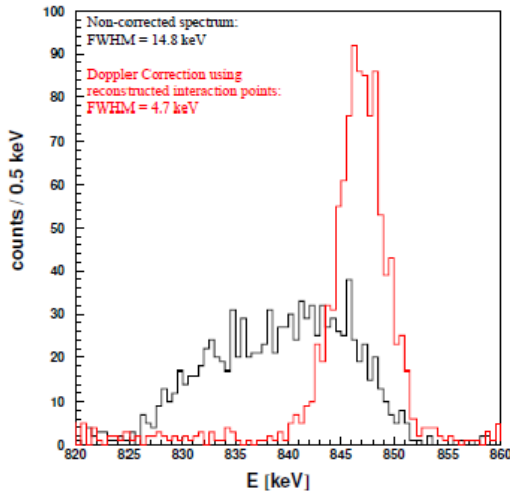
$21/2^+ \rightarrow 13/2^+$ 退激发射的263keV γ 跃迁具有与文献所述一致的跃迁特性E4

裂变产物中偶偶核 2^+ 态寿命

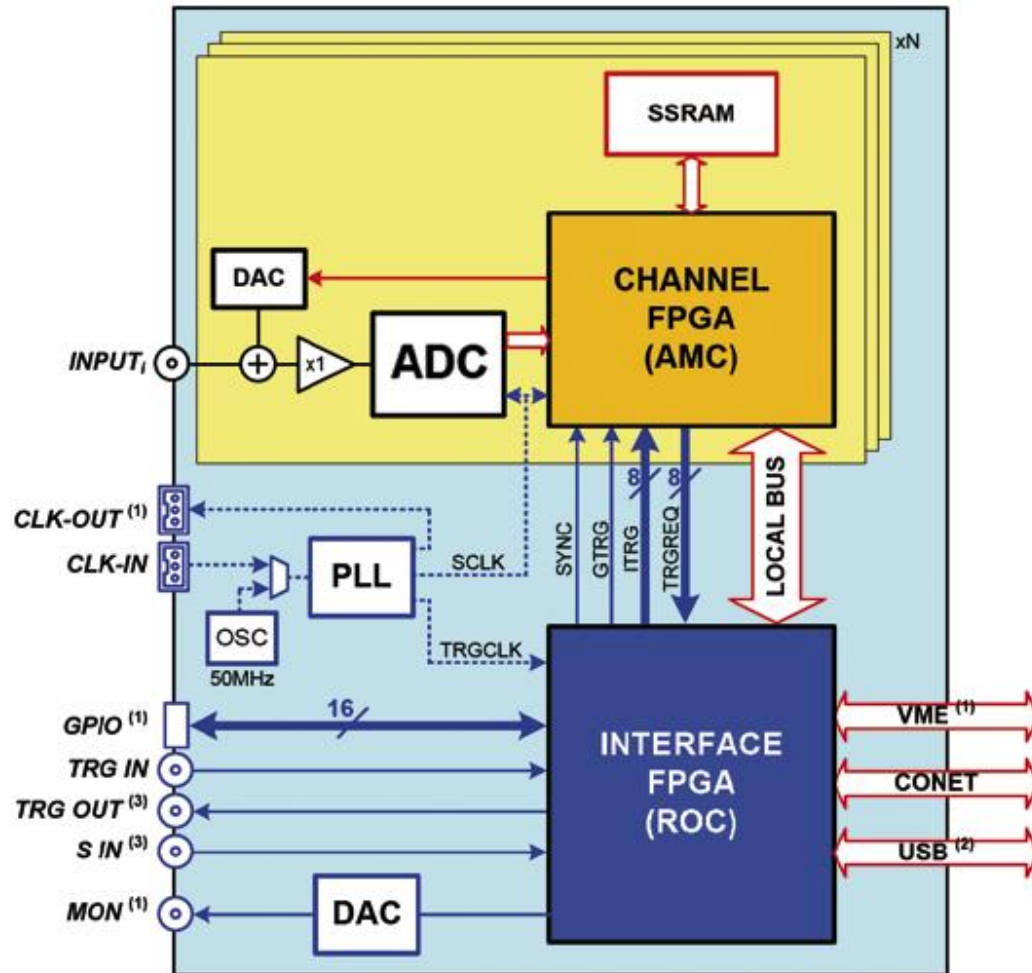


多普勒修正

因为在束测量时，由于多普勒效应，不同角度的探测器探测到的 γ 射线会随角度的不同使其测得的峰位有漂移，如不解决，那么测得的 γ 峰将会有很大的多普勒展宽，使其分辨变得很差。所以需要使用由100个探测单元覆盖 4π 空间角度的探测阵列来进行测量，并在数据分析中进行多普勒修正，以使100个不同角度测得的 γ 谱相加后总的 γ 谱有很好的分辨。



数字化谱仪

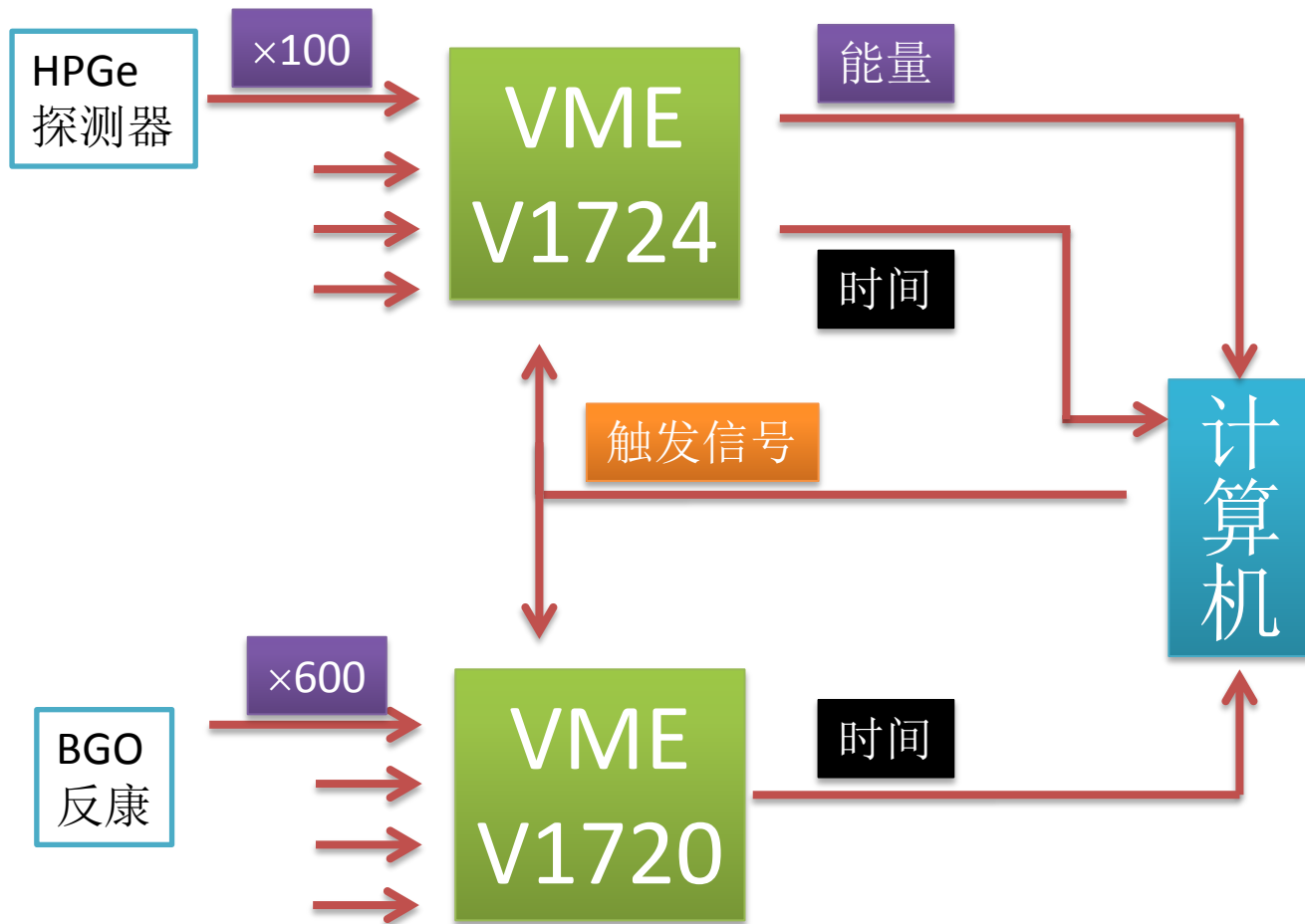


- (1) VME boards only
- (2) Desktop/NIM boards only
- (3) for Desktop/NIM boards, TRG-OUT = GPO, S-IN = GPI

CAEN公司724系列是14位ADC,采样频率为100 MS/s的数字化插件,可以较好的用于HPGe探测器信号的获取,满足高计数率的要求

数字化线路设计方案

-----软件触发

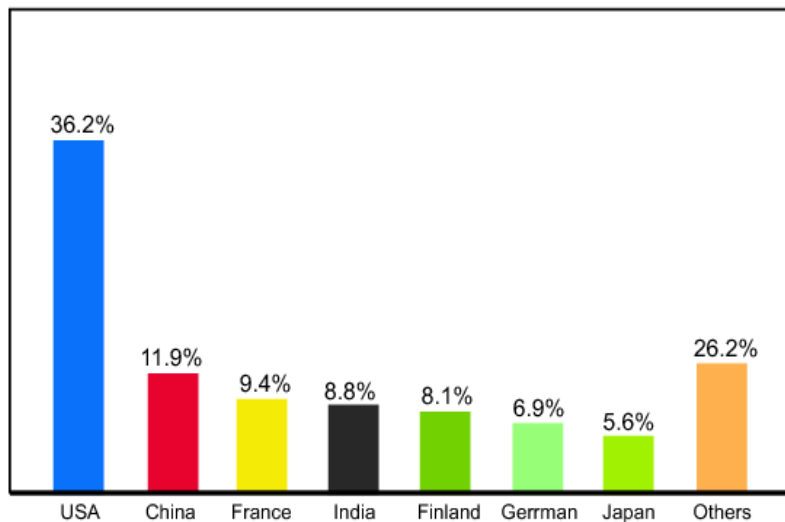


CIAE在束 γ 谱学装置与国外实验室同类装置成果比较

对于在束 γ 谱学研究来说，原子能院的探测装置与美国和欧洲等国外同类装置比落后了很多，甚至与日本，印度和南非等国相比也有不小的差距（见下表）。但这几年来经过我院在束伽玛谱学组研究人员的不断努力，特别是最近两年来通过对实验装置与获取系统的重新设计和改进，我们与合作单位共同努力取得了很高水平的研究成果。据统计，最近两年（2010年-2011年）国际上发表的关于在束 γ 谱学研究的SCI文章，出自我院在束 γ 谱学终端的文章数排在第二位（见下图），可以说我们串列加速器实验室的在束 γ 谱学终端与国外同类装置相比是投入产出比最高的实验终端。

各国实验室成果产出统计（2010-2011）

成果统计出自：PRL, PRB, PRC, NPA, JPG, EPJA

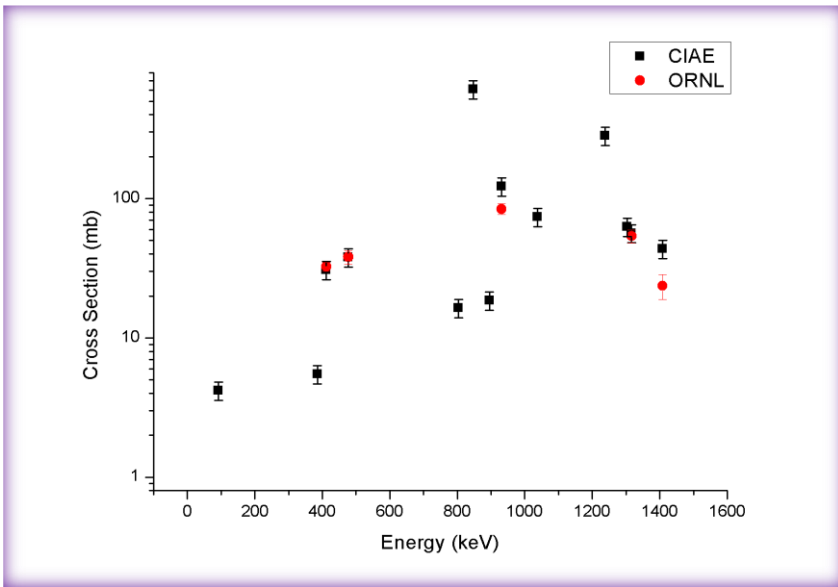
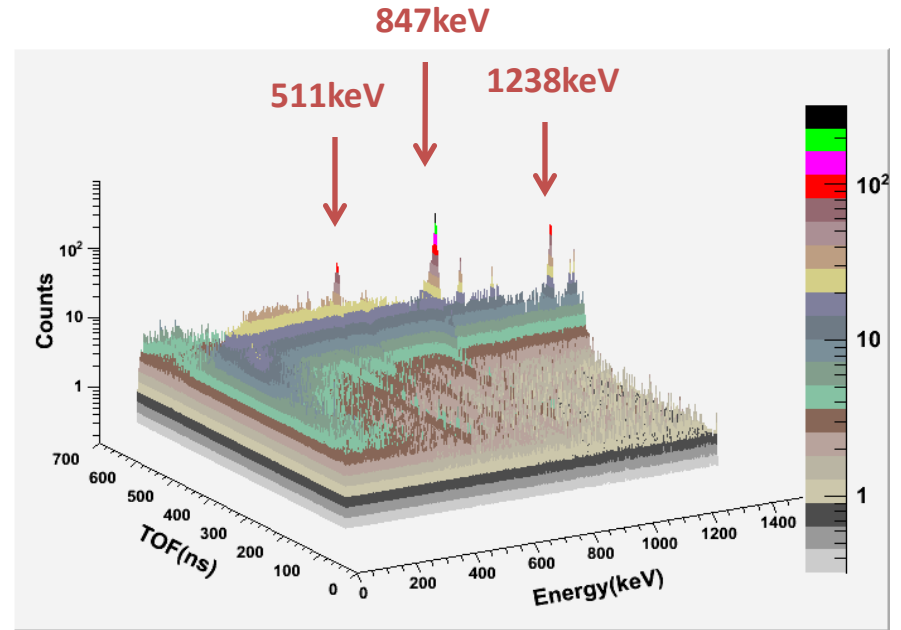
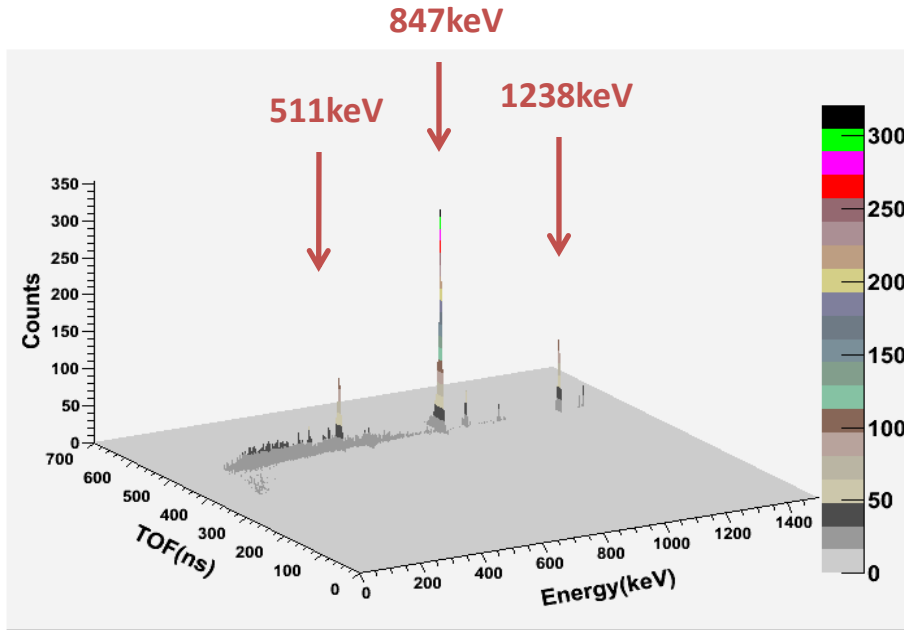


摘自清华大学朱胜江教授在2012核结构大会上的报告

国家	探测器个数
美国	100HPGe
法国	100HPGe+26Clover
德国	105HPGe
芬兰	60HPGe
印度	24Clover（96个探测单元）
南非	8Clover+8HPGe（40个）
中国	14HPGe

(n,2n γ)截面测量

铁样品测量结果:



847keV γ 射线产生截面: $623 \text{ mb} \pm 87 \text{ mb}$

R.O.Nelson, GEANIE: $669 \pm 46 \text{ mb}$

$^{56}\text{Fe}(n,2n\gamma)$ 测量截面与ORNL结果的比较

主要修正项:

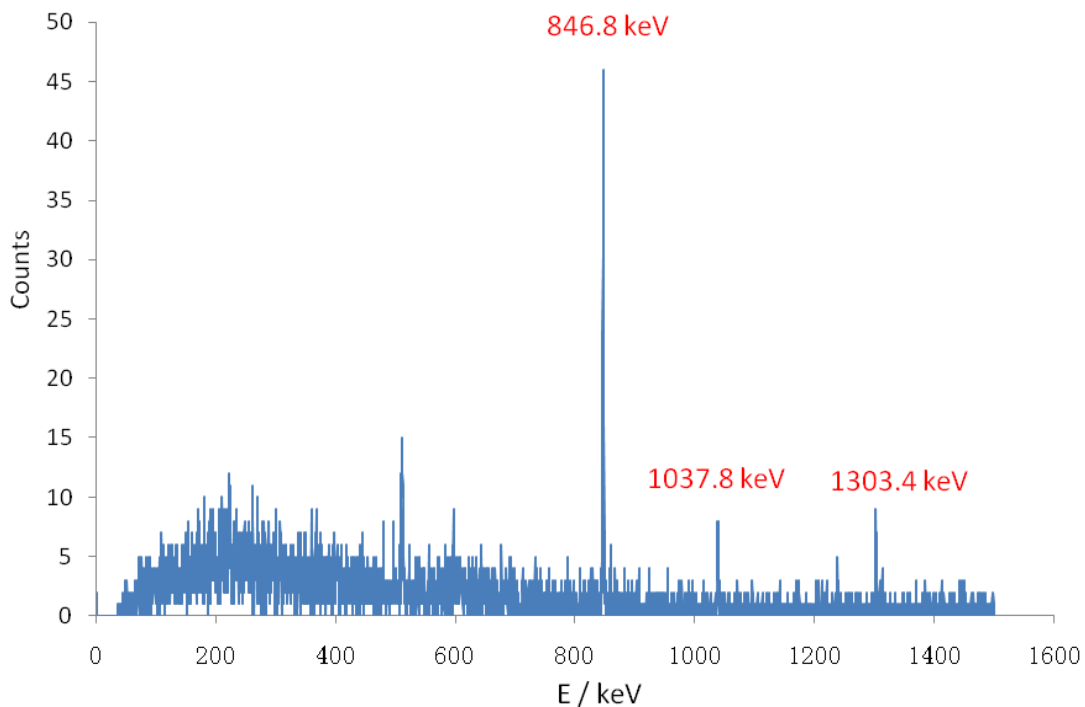
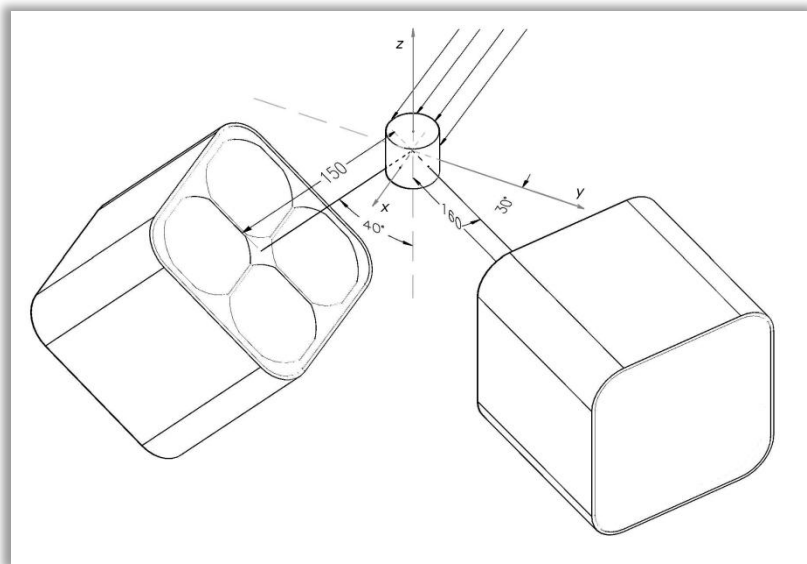
1. 中子通量衰减及多次散射
2. γ 射线自吸收
3. 死时间修正

符合测量方法

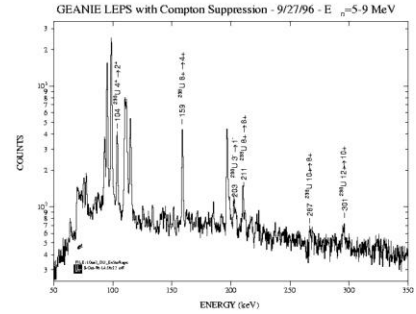
- 846.8keV与1238.3keV γ 射线符合测量:

以其他晶体1238.3keV γ 射线开门, 记录各晶体846.8keV γ 射线符合计数。

- 通过汇总后的符合计数及探测器效率, 反推出1238.3keV γ 射线修正后截面为274.9mb, 与用直接测量方法得到的283.85mb的结果一致。

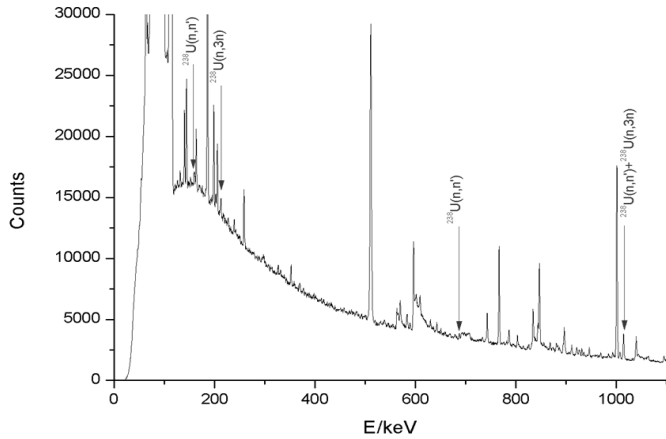


^{238}U 样品测量结果



^{238}U 样品:7.3g

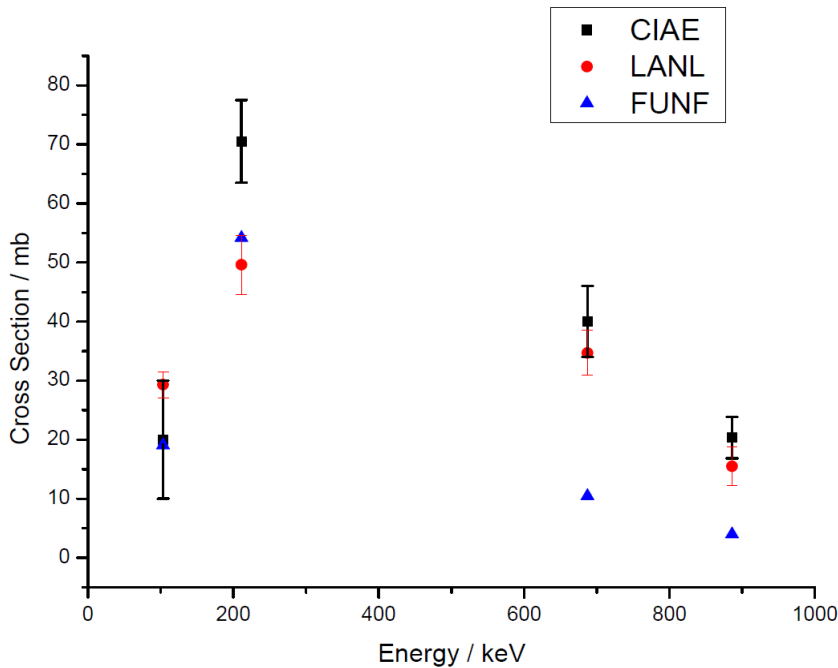
放射性样品、 γ 射线能量较低，难度明显加大

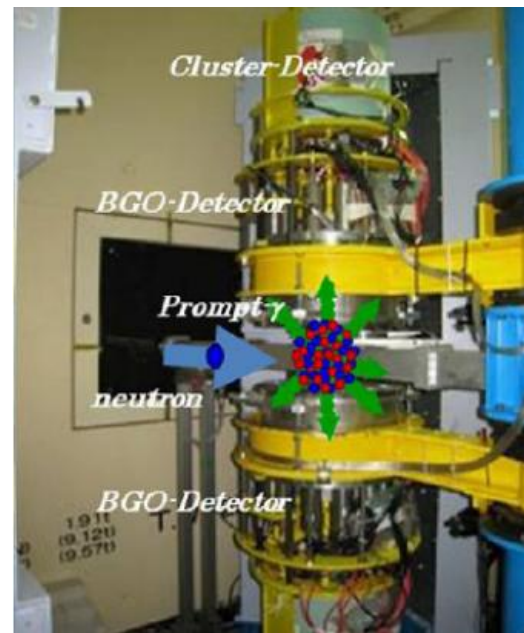
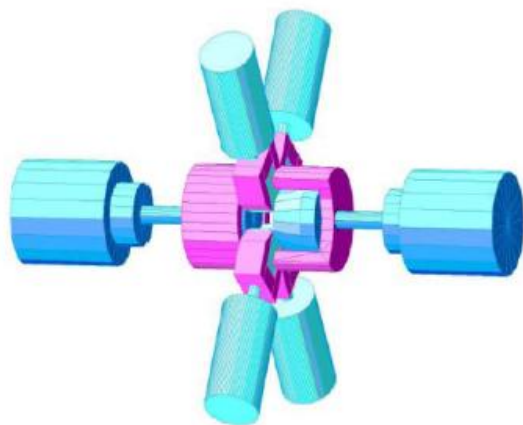


相关核理论计算是关键一环。国外相应的程序有GNASH、TAYLS等。

UNF、FUNF---自主研发程序：中子核数据计算核心程序，理论基础是球形光学模型、统一的Hauser-Feshbach和激子模型

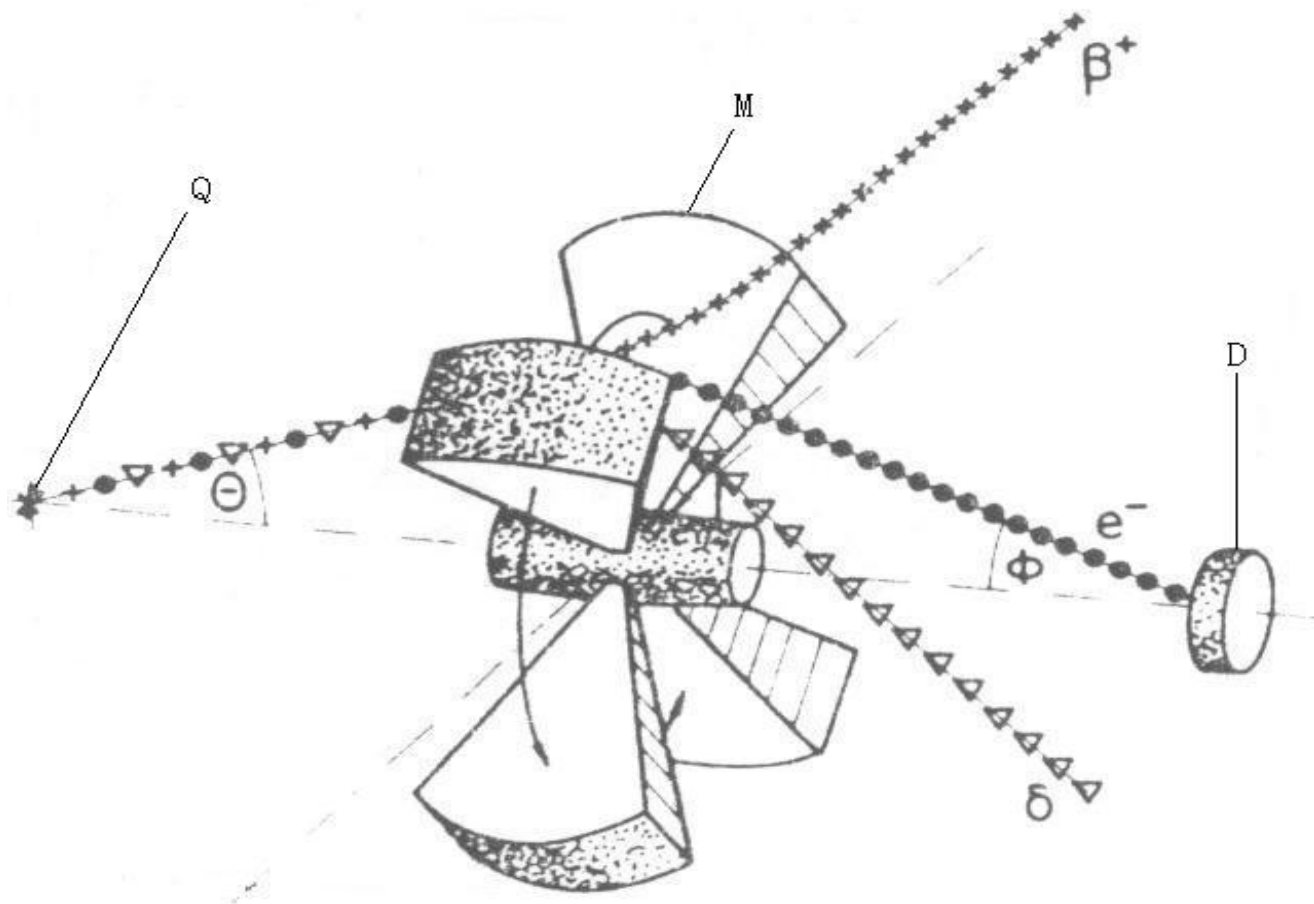
$^{238}\text{U}(n,xny)$ 理论计算及与实验测量结果的比对





4 π Ge谱仪位于J-PARC的ANNRI中子束流线上，包含22-30个HPGe晶体，带BGO反康，用于中子俘获截面测量。

微桔谱仪 — 在束测量内转换电子的实验装置



微桔谱仪的基本结构和工作原理。 Q=放射源， M=磁铁瓣， D=探测器。