

# 超大型 $\gamma$ 谱仪 EUROGAM 简介

提要暨引言:由法英两国科学家联合提议建造的 EUROGAM,是为解决核物理新近发展中的许多重要问题而建立的新一代  $\gamma$  射线探测系统。它由 70 个 BGO 康普顿抑制 Ge 探测器组成,能提供相当高的分辨能力与探测总效率,可观测很弱的转动级联跃迁(相对布局强度  $10^{-4}$ ),可用三重和三重以上符合方式来分析复杂能谱。运行计划将从 1991 年夏末开始,花 12 个月的时间,先在英国 Daresbury 实验室,用 50 个 BGO 抑制 Ge 探测器与反冲质量谱仪做符合测量;后移往法国,把全部的 70 个 Ge 探测器与其它新建的探测系统如  $4\pi$  粒子探测器、内层 BGO 晶体球、BaF<sub>2</sub> 晶体墙等联合使用,进行广泛深入的核物理实验研究。下面,就在 EUROGAM 上准备研究的物理课题和该装置的设计,作以简要介绍。

## 一、EUROGAM 准备开展的物理课题

### 1. 超形变带的馈送和退激

实验发现在很高自旋时,核可处于长短轴比约为 2:1 的超形变态。这证实了原子核有超形变和高速转动性质的理论推断。超形变态谱学研究,提供了对核平均场概念的一种灵敏检验,可研究不同粒子数和转动频率下的侵入轨道性质,并验证核有很大拉长时的壳结构。但由于退激超形变带的  $\gamma$  跃迁强度很弱,用现有装置观察不到这个退激过程,所以无法确定超形变态的能量和自旋。EUROGAM 可测到分支比低于超形变强度 1% 的跃迁,用它可确定退激路径,能获得与超形变态底部能级相混杂的正常态的重要信息。

实验还观察到 60h 超形变带的强度比正常带大 10 倍,而 60h 已接近核裂变极限,

是什么机制增强了向超形变的晕带馈送?要验证这种馈送机制,就需要对馈送跃迁能量和不同入射能的激发截面等作精确测量;这些,都需要利用大大改善了探测灵敏度的 EUROGAM 才能实现。

### 2. 高角动量核研究中的内部对称性

#### (1) 膺 SU<sub>3</sub> 对称性

实验发现,在核中存在着能量分散很小的(一组能级)多重谱线(膺 SU<sub>3</sub> 多重谱线),且不随核拉伸的增大而变化,这证明了理论计算的单粒子能量随核拉长程度变化的近似简并性。只要核轴对称性存在它就存在,并且在核拉伸得比超级形变( $\beta_2 \sim 0.6$ )大时还存在;这是一种系统效应,使得至少应存在超级形变(Superdeformation)和极端形变(hyperdeformation)( $\beta_2 \sim 0.1$ )两个核“链”。

按照 Strutinsky 理论,膺 SU<sub>3</sub> 对称性的存在是很明显的。因为单粒子谱中能隙的存在意味着在总能量图中有极小值存在,而位于多重谱线间的区域是对应于超形变和极度形变的存在。这种形变下的单粒子态性质,在实验上是未知的。故这些能级的实验测知,对其核结构的理论研究,如有效相互作用性质、平均核自旋——轨道场等,是很重要的。虽然膺 SU<sub>3</sub> 的一些预言已被超形变实验证实,但这种对称性的完全证实还有待于下一步的实验,如测量位于能隙处 Z、N 核的超形变和四极矩。SU<sub>3</sub> 对称性预言了极端形变核的存在,但在拉伸很长的核中,发射质子的库仑位垒下降,所以把高效的 EUROGAM 和轻带电粒子探测器联合使用,便有可能发现这种极端形变核并确定其稳定极限。

原子核到底能承受多大的形变?无论是考虑核子—核子力的 Hartree—Fock 方法或

Strutinsky 的宏观—微观方法,都难以验证这种极度形变,因为目前实验提供的与这种形变有关的信息只限于裂变(特别是裂变寿命)。但高自旋时的裂变寿命信息实际上还没有。所以,在实验上测量核高自旋态下的裂变寿命和超形变态的四极矩是有意义的,特别是测量低温时相对增大的裂变寿命则意味着可能存在由特别稳定的量子(壳)效应造成的极端形变结构,这对揭示这种极端的核组态是非常重要的,而这些实验都只能用这个新设备来做。

### (2) 膺 L—S 对称

在上述多重谱线中有双重谱线,其特点是除了自旋投影有  $\pm \frac{1}{2}$  区分外,其余量子数全相同。这些量子数与 Nilsson 渐近量子数  $[N, n_z, \Lambda]_0$  类似,称为膺自旋量子数  $[\widetilde{N}, \widetilde{n}_z, \widetilde{\Lambda}]_0$ , 定义为  $\widetilde{N} = N - 1$ ,  $\widetilde{n}_z = n_z$ ,  $\widetilde{\Lambda} = \Lambda - 1$ ,  $\widetilde{Q} = Q$ 。  $[\widetilde{N}, \widetilde{n}_z, \widetilde{Q}]$  相同、 $Q = \Lambda \pm \frac{1}{2}$  的两线,能量很接近,这种对称性造成的物理结果还尚未被研究。

最近在一些原子核中,发现它们的超形变转动带跃迁能量非常接近的特点。如  $N = 86$  的同中子素  $^{150}\text{Gd}$ 、 $^{151}\text{Tb}$  和  $z + 1, N = 86$  的  $^{151}\text{Tb}$   $^{151}\text{Dy}$  的晕态超形变带,它们的能量在 1/1000 精度内相等。理论上的解释是,可能在大形变和高自旋的极端情况下存在膺 L—S 对称性。所以使用 EUROGAM 进行精确测量,对研究膺 L—S 对称性意义甚大。

### 3、“正常”形变原子核的行为

EUROGAM 的目的之一,是扩展对强度为 1% 到 0.01% 正常形变核的晕态和晕态附近态的研究。要进行探索的几个感兴趣的问题是:

(1) 从长椭球到扁椭球的形状跃迁:用 EUROGAM 提供的很高统计性的三重符合数据,可确定蜕变路径、去除馈送问题,因而可获取高精度的寿命值,来研究在很高自旋

时其跃迁集体性质逐渐消失的问题。

(2) 形状共存:理论预言一些原子核在高自旋时存在着弱的三轴形变带,而在低自旋时这些核却为弱形变扁椭球形状。

(3) 带终止效应:对一长椭球转动核,当全部有效价核子顺排得到最大自旋时,变成扁椭球结构,转动带被“终止”。这个终止的带通过很强的 EZ 跃迁到长椭球态。用 EUROGAM 的高效性可对  $N = 90$  附近的带终止进行系统研究。

(4) 高 K 同质异能态的衰变方式:用高效 EUROGAM 详细测量 g 因子和四极矩,可进一步探讨高 K 同质异能态违反 K 选择规则向晕线的衰变,及其单粒子的结构和形状。

(5) 内禀宇称和时间反演对称性破坏的探讨:用 EUROGAM 可提供  $B(E1)/B(E2)$  的新数据,验证内禀宇称破坏并探索在高自旋时时间反演的破坏。

(6) 无对作用系统:对于长椭球形变核转动频率大于  $0.5\text{MeV} (\approx 40\hbar)$  时,静态中子对作用被认为可忽略,相应理论预言了在这种情况下带交叉。用 EUROGAM 可测量  $I > 40\hbar$  无对作用时的谱学,与 DSAM 配合测量  $I > 40\hbar$  能级的寿命,以观察正常形变带集体性质随转动频率的减少,无疑将大大提高对这些核的了解。

(7) 系统谱学的研究:通过用 EUROGAM 进行系统谱学测量,可扩大核混沌运动的证据来研究正常态与混沌态间的过渡;确立奇—奇核所特有的复杂能级结构,以验证壳模型计算和最后一对中子—质子间的有效相互作用。

### 4、高自旋原子核的能级密度

用统计模型分析重离子熔合反应蒸发粒子谱,可得到高激发和高自旋核的能级密度。但由于所测粒子是从不同的激发能级联蒸发的混合,因此统计模型计算必须有多个

外加参数才能描述这种级联过程,不能直接得到能级密度。利用 EUROGAM 的高探测效率和 Ge 探测器三重、四重符合的高选择性,很容易选取出仅蒸发一个中子或带电粒子而形成低激发能高角动量的复合核,因而可直接得到高自旋和低激发能核的能级密度。

### 5. 原子核的转动阻尼(Damping)

原子核转动带混合或阻尼,是指当核温度较高时( $1\text{MeV} < E < 10\text{MeV}$ )角动量为  $I$  的转动带态并不唯一地衰变到  $I-2$  的态,而是可衰变到能量间隔在  $\Gamma_m$  内的多个末态上, $\Gamma_m$  为转动阻尼或散布的宽度。它在实验上是通过连续谱  $r-r$  符合关联中的脊结构来研究的。但通常这种二维关联谱对角线的谷很浅,脊结构很弱。利用 EUROGAM 的多重符合本领,如三重符合,可作沿  $X+Y-2Z=0$  平面的二维投影关联谱。这样沿对角线谷的宽度增加了二倍,增强了脊结构和对大转动阻尼宽度的灵敏度,就能更好地理解几个 MeV 激发能的阻尼问题。还可使用有足够统计的更多重符合,这种很高的选择性便于严格验证模型和与模拟阻尼计算结果进行比较。

### 6. 远离 $\beta$ 稳定线的原子核

研究远离稳定线核的各种性质,是对现有理论模型的严格挑战。

把 EUROGAM 和反冲核谱仪联合使用,由于它的高灵敏度,对产生截面很低,象  $N, Z$  低于  $S_n$  ( $Z=50$ ) 的核(其中子和质子占据相同的轨道),可做  $\gamma-\gamma$  反冲核三重符合,进行详细谱学研究,以得到中子-质子对效应和剩余核子-核子作用的信息。在  $A \sim 120-140$  很缺中子核中,中子和质子都填充  $h_{11/2}$  壳,但填的是该壳的不同部位,这可能产生很重要的中子-质子相互作用。由于这些核的生成截面很小,至今数据很少,很适合用高效的 EUROGAM 进行研究。而

对由裂变和深度非弹散射机制产生的质量分布很宽的丰中子核,使用高灵敏度 EUROGAM 的三重  $\gamma$  符合或与其它高效谱仪联合使用,可对其高、低自旋态展开极好的研究。

另外,根据“弹核碎裂”机制,可产生奇异核的次级束流,它们被库仑激发或被非弹性散射而激发产生非常奇异的核。这些核可用分离器分离出来。但由于产生截面很小,测量时间要很长。而 EUROGAM 有很高的探测效率和分辨率,测量立体角很大,把它和粒子探测器联合使用,就可对由次级束流产生的奇异核的  $\beta$  延迟辐射性质进行研究,对丰中子核和  $\beta$  衰变到不了的态及远离  $\beta$  稳定线的炮弹碎裂退激态结构等进行研究。

### 7. 巨共振

用 EUROGAM 的高能量分辨率和探测效率,可精确确定冷核巨共振  $\gamma$  级联衰变道,通过衰变路径鉴别能级以得到能级结构的信息。还可研究至今仍了解甚少的声子多重激发,以便能与理论预言进行比较。另外,对热核巨共振的基本现象虽已了解,但它还应包含更多的物理内容,这也是用 EUROGAM 想要做的工作之一。

## 二、EUROGAM 的设计制造

### 1. 阵列的分辨能力

为了满足上述物理测量的需要,新设计的 EUROGAM Ge 探测器阵列必须具有很高的  $\gamma$  射线分辨能力。为便于定量讨论和比较一个测量系统的分辨能力,定义  $n$  重  $\gamma$  符合事件( $\gamma^n$ )的分辨能力为:

$$R_{\gamma^n} = \left[ \frac{SE_{\gamma} PT}{\Delta E_{\gamma}} \right]^n$$

$SE_{\gamma}$  是转动带中相邻两  $\gamma$  跃迁间的平均能量差(超形变带约为  $50\text{keV}$ ),  $\Delta E_{\gamma}$  是 Ge 探测器对  $\gamma$  射线的能量分辨,  $PT$  是峰总比。要

能观测到强度很弱的  $\gamma$  跃迁,只有高的分辨能力还不够,必须要保证峰的计数有一定的统计,如 100,这就要求阵列应有高的对峰的探测总效率。因此,新阵列设计应设法满足三个条件,即大的全能峰效率、好的能量分辨  $\Delta E_\gamma$  和大的峰总比 PT。

能量分辨  $\Delta E_\gamma$  和依赖 Ge 探测器的本征分辨率和多普勒移动  $V\cos\theta$ 。对 1—1.5MeV 的  $\gamma$  射线,本征分辨率小于 2.5keV。反应余核反冲速度  $V$  可由于在靶中能损不同和反冲角度不同而有歧离  $\Delta V$ 。 $\cos\theta$  值则主要由 Ge 探测器所张立体角大小而改变。例如,对  $V/C=3\%$ ,Ge 探测器立体角  $2.3 \times 10^{-3}$  和 1MeV  $\gamma$  射线,  $\Delta E_\gamma=6.4\text{keV}$  ( $0^\circ$  方向) 和  $6.9\text{keV}$  ( $90^\circ$  方向),大大超过了本征分辨率。只有同时减小所张立体角,  $\Delta v/V$ ,  $V/C$  才能使  $\Delta E_\gamma$  有实质性的改善。

没有康普顿抑制的 Ge 探测器峰总比在 0.15(Ge 晶体为  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ ) 和 0.25( $7\text{cm}$

$\times 7\text{cm}$ ) 之间,使用 BGO 抑制后就增加到了 0.5—0.6,提高约三倍。但在实验中,由于伴随  $\gamma$  而辐射的中子在 Ge 晶体中发生相互作用和有两个以上  $\gamma$  射线同时进入同一 Ge 探测器,可使这个本征峰总比 PT(本征)降低。经对这两种效应修正后的峰总比可写为:

$$PT = (i_n) \cdot (i_s) \cdot PT(\text{本征})$$

这里  $i_n$  是不受中子作用影响的事件比例(对  $4n$  反应,约为 0.85),  $i_s$  是单独一个  $\gamma$  射线被测到的几率,它的定义是:

$$i_s = (1 - \epsilon')^{M_\gamma - 1}$$

其中  $\epsilon'$  是单个 Ge 探测器经抑制修正后的效率,  $M_\gamma$  是  $\gamma$  射线的多重性。表 1 为几个系统 PT 值比较。

表 1 对  $E=1.33\text{MeV}$   $\gamma$  峰总比值比较

探测系统名称	$\Omega \times 10^{-3}$	PT(本征)	$i_n(M_\gamma=30)$	$i_s$	PT
TESSA3	2.3	0.55	0.96	0.88	0.46
CHATEAUII	1.8	0.50	0.97	0.90	0.44
HERA	6.0	0.53	0.90	0.85	0.41
NORDBALL	6.6	0.55	0.90	0.85	0.42
8pi	2.5	0.55	0.96	0.88	0.46
GAMMASPHERE	4.2	0.60	0.93	0.88	0.49
EUROGAM	5.1	0.60	0.94	0.88	0.49

#### \* 对 $4n$ 反应道

要使 Ge 探测器阵列对  $\gamma$  射线的峰有大的探测总效率,则要求单个 Ge 探测器有大的全能峰效率,阵列全部 Ge 探测器所张的总立体角要大。实验和模拟计算都已证明,Ge 晶体直径  $d=75-80\text{mm}$  的探测器,其单位立体角的全能峰效率  $\epsilon_p$  要比  $d=52\text{mm}$  的大一倍(图 1)。EUROGAM 就选用 70 个这种高相对效率(约 70%),相应  $\epsilon_p=0.2$  的 Ge

探测器,因此可达到总共约 8-9% 的峰探测效率(对 1.33MeV 的  $\gamma$  射线)。这个高的总峰效率对多重符合测量是至关重要的,图 2 给出了在一次多重性  $M_\gamma=30$  的事件中,可测到的  $n$  重符合数与总峰效率的关系。例如,若总峰效率为 0.1,则四重  $\gamma$  符合数就可达 3。这样一个系统,可达到的观测极限为  $10^{-4}$ 。

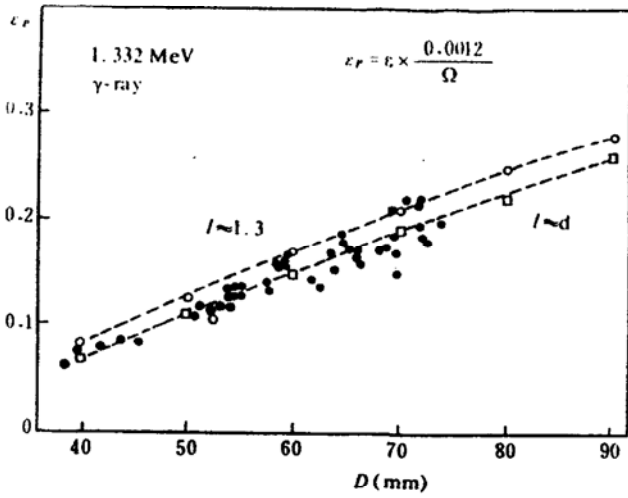


图1 单位立体角峰效率  $\epsilon_p$  与 Ge 晶体尺寸的关系。d 为直径, L 为长度, 黑点是实验测量值, 曲线是用 GEANT 程序计算的结果

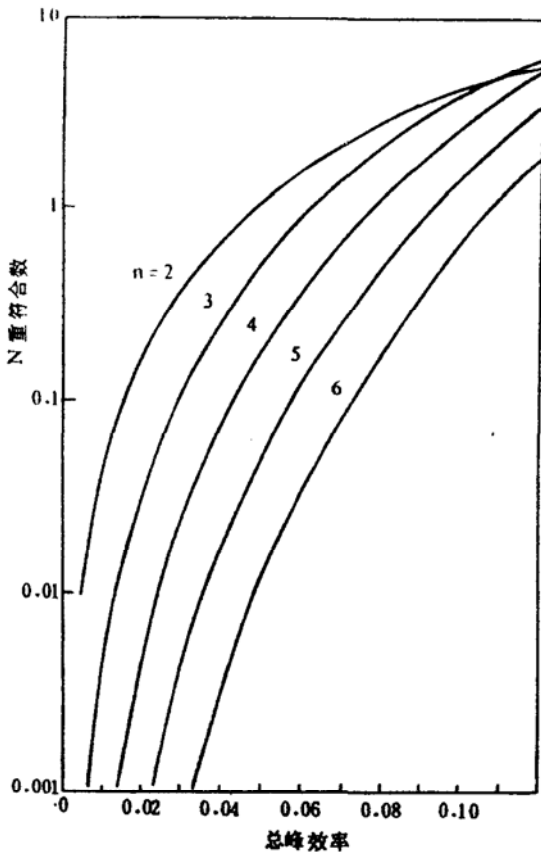


图2 对多重性  $M_r=30$  的一个事件, 测到的 n 重合数随总峰效率的变化。

## 2. EUROGAM 的设计制造

提出了两种不同结构的 Ge 探测器供

EUROGAM 选择。一种是由直径和长度都大于 70mm 的单块 N 型 Ge 晶体构成(图 3A) 相对效率大于 70%。从距晶体前表面 30mm 处开始, 把晶体略微削尖, 使之完全适合它所张的立体角。探测器的外壳也制成相应的圆锥形, 以保证 Ge 晶体在加工或修理后能顺利地放入外壳中的最佳位置。Ge 晶体距外壳前表面最近可达 3.5mm, 前放用流线性设计, 由于输出脉冲上升时间差异大而引起的能量分辨降低, 用冲击亏损电路来补偿。使用自动加注液氮装置和可沿任意方向放置的液氮杜瓦并。每 24 小时自动加注液氮一次。

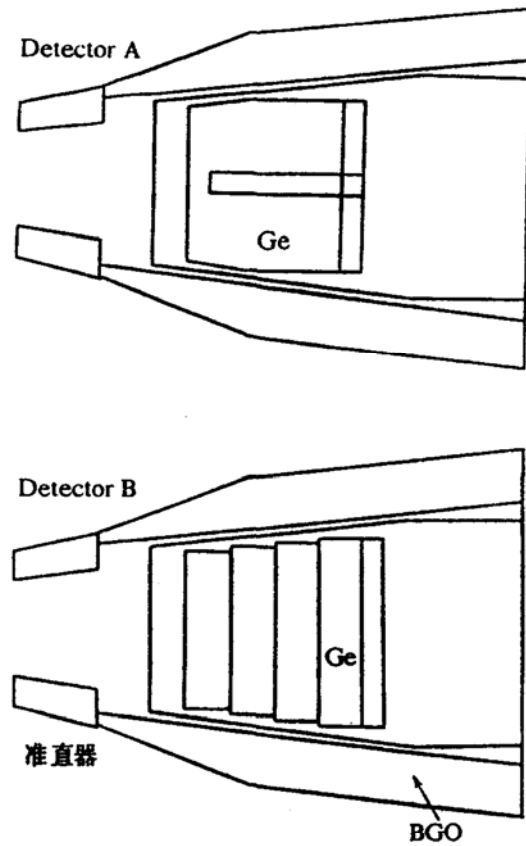


图3 Ge 探测器结构示意图

A: 单块 Ge 晶体型,  $\Phi=70\text{mm}$ ,  $L=70\text{mm}$

B: 平面 Ge 迭加型, 第一对  $\Phi=64+68\text{mm}$ ,  $L=20\text{mm}$ , 第二对  $\Phi=72+76\text{mm}$ ,  $L=20\text{mm}$

另一种是把成对的平面 Ge 探测器背靠背迭起来,放在同一恒温外壳内构成的(图 3B)。使用这种结构,有可能研制出直径很大的 Ge 探测器,而且通过增加平面探测器的对数,来提高对高能  $\gamma$  的探测效率。这种探测器的另一个优点是时间性能好,这在高重数符合测量中是很重要的。在法国 Strasbourg 实验室,已成功地制成了由一对平面 Ge 构成的这种探测器,两平面 Ge 直径  $\Phi=68.5$  mm,厚度  $L=15$ mm 和 17mm 能量分辨  $R \approx 2.0$ keV;时间性能为  $\delta_{1/2} \approx 4$ ns,  $\sigma_{1/10} \approx 13$ ns。一个由 4 块平面 Ge 构成的探测器正在进行测试。这种探测器的每一对平面 Ge 需要一个前放输出,这个缺点可以被选用高集成度的电子学线路来加以克服。EUROGAM 到底采用那种结构的 Ge 探测器,有待对这两种器样的研究结果而定。

为了使 EUROGAM 的 Ge 探测器能排列紧密,有更大的探测立体角,阵列设计为由 12 个正五边形构成的十二面体。每个五边形容纳六个 Ge 探测器(图 4),五边形每个角上一个,另一个在五边形面中心,距面 4cm 处。这样整个阵列可包含 72 个 Ge 探测器,但束流的出入占去两个位置,因而共可容纳 70 个。在每个 Ge 探测器的周围,有抑制康普顿散射的 BGO 晶体。位于每个正五边形五个角上的 Ge 探测器的 BGO 屏蔽,是由光隔绝的 10 块 BGO 构成的十面锥形, BGO 长度 190mm,其前端最薄处仅 3.5mm,后端最厚处为 18mm。每块 BGO 有自己独立的光电倍增管,对  $^{137}\text{Cs}662\text{keV}\gamma$  的分辨为 20%,对  $^{241}\text{Am}60\text{keV}\gamma$  的峰谷比大于 2。为了减少 BGO 所占空间和 BGO 的用量,EUROGAM 设计把这些 BGO 共用,即每个 BGO 要用来抑制相邻的两个或三个 Ge 探测器产生的康普顿事件。但这种共用方式会因相当于增加了多个  $\gamma$  被同一探测器探到的几率,因而降低了峰总比。所以这种 BGO 屏蔽也

可以只用于单个 Ge 探测器,这时虽然由于 BGO 厚度薄,抑制效果较差,但与共用方式相比,哪种更好,有待实验研究。还设计出一种通过改变 BGO 屏蔽内表面为园柱形状而加厚 BGO 的结构。EUROGAM 将根据对它们的实验结果再决定选用那种。位于每个五边形面中心 Ge 探测器的 BGO 屏蔽,是由五块 BGO 构成的,这个屏蔽不共用。其 BGO 厚度与以上共用方式时 BGO 厚度保持一致。

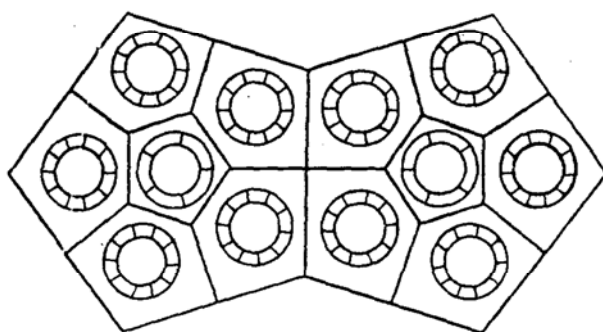


图 4 两个相邻正五边形及相应探测器的截面示意图

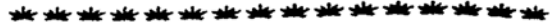
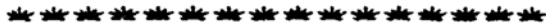
在每个 BGO 屏蔽的前端,有一块厚度至少为 35mm,比重为 18 的钨镍铁合金准直器。它一方面用来屏蔽从靶子产生的  $\gamma$  直接照射 BGO,另一方面,它被设计为内外两层,内层准直孔径是可调变的,这样便能适应不同大小的 Ge 单晶。一个长 3.65cm,园锥张角  $6.8^\circ$ ,最大孔径 48mm 的准直器,可使 EUROGAM 每个 Ge 探测器的立体张角为  $5.1 \times 10^3$ 。

整个 EUROGAM 的支撑结构分为两部分,第一部分为支撑固定 BGO 屏蔽探测器的“球形支架”,第二部分为把这个球形支架固定于靶位的外部支撑。EUROGAM 运行的第一年将是在英国 Daresbury 实验室,那时

它将被支撑固定在反冲质量分离器靶子的位置上,这个位置距分离器只有 300mm,因此,能有 50 个 Ge 探测器可以投入使用。如果一切顺利,在 1991 年秋季,将可进行首批

迄今为止最为精彩的实验。

(余坚芳 王积成摘译自 EUROGAM  
孙相富审校)



(上接 17 页)

Препринт/МИФИ, 058-87, 1987

[5] А. М. Галблер, 林进福等, 地震学报, (待发)

[6] М. Б. Гохберг и др., Электромагнитные

Предвестники Землетрясений, М, Наука, 1982

[7] М. Б. Гохберг и др., Оперативные Электромагнитные предвестники землетрясений, М, Наука, 1985

