

4 π 列阵 γ 射线探测器的发展

赵 之 正

1. 前 言

在束 γ 实验可以测量核反应生成的 γ 发射体发射的 γ 射线。显然这种 γ 射线带有核结构和产生发射核的反应机制两者的信息。这类实验最初由单个NaI探测器测量,后来用高分辨 γ 探测器。今天已经有三个多探测器列阵开始工作。它能测量 γ 发射体的全部性质。本文将叙述这些列阵探测器的发展方向和在核物理实验中的新贡献。

2. 列阵探测器的发展方向

2.1 自旋谱仪, 晶体球和TESSA性能比较

在橡树岭的自旋谱仪和在海德堡的晶体球本刊已有介绍^①。这二者同属用NaI作的为对称的严密几何结构类型。现在在英国达

累斯伯里又开始工作了另外一种类型的列阵,即用六角柱型BGO探测器构成的并带有反康抑制屏蔽的Ge探测器的列阵探测器^②。称作总能量抑制屏蔽列阵(Total Energy Suppression Shield Array),简称TESSA。TESSA对 γ 射线的总探测效率低于前二者。如晶体球对500KeV γ 射线效率为98%,对2MeV是95%,而TESSA 500KeV是86%,2MeV是60%。这是因为TESSA的BGO厚度(3~5厘米)不足以全部吸收高能 γ 射线。但因为BGO的光电吸收份数很大,散射出去的份数少(TESSA为0.15而自旋谱仪仅为0.28,晶体球为0.33)所以重数分辨率TESSA仍有与前二者相当的能力^③。前二者可用飞行时间法区分中子的干扰,而TESSA由于BGO离靶太近是不可能这样作的。但TESSA的体积很小,仅为晶体球和自旋谱仪的1/70和1/40。这同中子在NaI和

是: 1. 研究放射性靶核或弹核的核反应。这些反应将有可能激发用现有的射弹尚未观测到(或未充分研究过)的核态。例如布鲁克海文正在应用的108MeV的强¹⁴C束。

2. 在束流光学和宽束出射粒子的高效率、高分辨率探测方面继续取得技术进展。这将允许我们分辨间隔更密的态并研究生成截面十分小的态。

3. 高能探针将得到更广泛的应用。它将允许我们以更高的精度和新的方式研究核

的自由度和核结构。

4. 当我们确切知道核反应中涉及的态的特性时,将能更好地了解反应机制。

5. 核模型将会起到预期的作用。

6. 将进行愈来愈多的多元实验,以试图测量所有有关参数;而且实验将会愈来愈复杂、费钱和费时。因而高能(基本粒子)和低能(核)物理之间的传统区别将会消失。

[朱维和编译自Phys. today, 1983, 36, 11, 26-32]

BGO作用截面一起可计算出,TESSA的中子干扰影响是前二者的1/6.5,影响不大^②。

NaI列阵因其体积大不可能在球外加反康屏蔽的Ge γ 探测器。只能取掉一个单元探测器代之以Ge γ 探测器。而TESSA在列阵外加六个带NaI反康屏蔽的Ge γ 探测器,组成了十分理想的探测器列阵。反康屏蔽采用横向式。NaI尺寸为:直径25厘米,长20厘米。 γ 向前散射方向有较厚的NaI材料。在 γ 入射孔加了NaI的反散射探测器,这使整个 γ 谱范围内都有好的抑制特性,并使 γ - γ 符合谱的本底直到200 KeV以下都是很平滑的。反康屏蔽以峰总比作为性能指标更为恰当。如表一所示,n型本征锗探测器总能够获得最好的峰总比。这是因为,在它的表面和芯部死层很小。按照两个探测器峰总比之积得到的 γ - γ 符合份数看,抑制屏蔽将有许多倍的改善。如0.66 MeV记录的份数可从0.09提高到0.50。这个改善对高自旋态弱峰和弱边带以及 E_T - E_T 关联实验有极大意义。目前TESSA上用的反康屏蔽的峰总比为0.6,经过改进可以到0.7。^③

TESSA从靶到Ge探测器中心距离为27厘米,而它们的准直孔立体角只有0.16%。这对减少多普勒加宽和减小高多重事件下的 γ 射线重叠有重要作用^④。

TESSA和六反康探测器在典型实验中Ge探测器计数率为5K/秒无抑制屏蔽时 γ - γ 符合计数率为1K/秒。有抑制屏蔽时 γ - γ 符合率为150次/秒。而整个BGO阵列的计数率为300K/秒。此时累积20~30百万事件约用3天时间。

2.2 发展方向

首先是按照TESSA的成功经验,给列阵加反康抑制屏蔽。如自旋谱仪将加上BGO和NaI结合的反康屏蔽。新的列阵设计都带有BGO反康屏蔽。为了增加 γ - γ 符合效率,新的列阵都大大增加了屏蔽Ge探测器的数目。如TESSA计划用16个BGO屏蔽Ge探测器取代六个反康探测器。在反康屏蔽的形式上,

据不同目的采用横向(图1a)或轴向(图1b)。有人建议在屏蔽的前部用NaI代替BGO(见图1.b)可使低能光产额增大一个数量级,有利于低能反散射 γ 线的抑制^⑤。还有的设计用1厘米厚NaI封住了 γ 入射孔,以增大反散射 γ 的探测立体角。还有可能减小Ge晶体后面的冷指联接部封装外壳的直径到2厘米,空间以BGO代之。这将有利于朝前散射的 γ 射线的吸收^⑥。

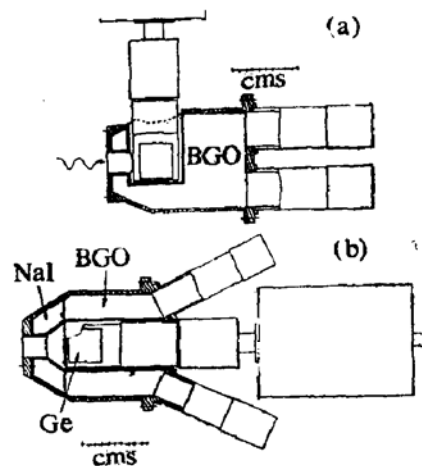


图1 抑制屏蔽的类型
a) 横向 b) 轴向

再一个改进是在列阵球内增加带电粒子探测器,以求对全部反应产物都记录。如海德堡晶体球内部将用14个平行板雪崩探测器组成的“灯笼”探测器(Lantern)^⑦。这个探测器的总立体角达到82%。对中子,也可加上大立体角中子探测器,并同 γ 列阵符合应用。如达累斯伯里将用25个液闪探测器组成中子墙^⑧,并同TESSA联合工作。

用不同的闪烁体作 4π γ 列阵也是一个发展。在法国用氟化钡(BaF_2)构成列阵称作“晶体城”(crystal castle)。 BaF_2 的密度介于NaI和BGO之间,能量分辨率也在二者之间。但衰落时间比二者都快,这有利于用飞行时间法区分中子与 γ 射线。

2.3 新列阵建议

新的列阵计划都是BGO球。有的已申请到资金,有的仍是计划。下一个将开始工作的是伯克利列阵。它最初是15个带BGO屏蔽

的Ge探测器。现在是21个。并有44个BGO单元的内球。法国的晶体球有74个BaF₂单元和16个BGO屏蔽Ge探测器。加拿大是仿照橡树岭的自旋谱仪,以72个五棱柱和六棱柱的BGO球带有20个BGO屏蔽。在西德尤利希等几个单位联合建立12个屏蔽Ge探测器和38个单元的BGO球。在阿贡用56个单元BGO内球和10个抑制屏蔽Ge探测器,类似于FESSA。在密执安州立大学(MSU)是15个抑制屏蔽Ge探测器和14个单元BGO内球。因此,在今后几年内的在束 γ 谱学将是十分激动人心的时期。

3. 对在束 γ 谱学的贡献

3.1 反应机制的研究

由于 4π 列阵可以测出总激发能和多重性,而且这是唯一可靠的测出多重性的方法,因此自旋谱仪首先用于复合核入口态研究。现已测出熔合反应中由 γ 射线带走的角动量最大值仅是 $55\hbar$,这同理论预言有较大差别。目前正在测量转移反应中角动量的变化。可以预言灯笼探测器将会得出十分丰富的结果。

3.2 谱学

由于列阵探测器可以选择反应道和入口态区域,因此在分立谱的研究中可以获得更高的角动量态和更多的弱边带。在TESSA测量的⁸⁴Zr和^{129,130,131,132}Ce都达到了 $30^+\hbar$,¹⁵²Dy, ^{157,158,159,160}Er, ^{166,167,168}Yb和^{162,163,168,174}Hf都达到了 $40\hbar$ 。其中¹⁵⁸Er yrast带在 38^+ 时看出核形状的变化,这明显的不同于不用晶体球的结果,同样在边带在 $41^-\hbar$ 时也给出类似于yrast带形状变化的结果^⑥。

在连续谱区,现在用TESSA作 E_T-E_T 关联实验已经看出¹⁵²Dy在低自旋区是小形变粒子跃迁,而在高自旋态下变成了强集体性和长椭球核。并且看到了宽度只有7.5KeV的脊。这是 $\beta \approx 0.6$ 的超形变的特征。此外从总能量对多重性图上也看到了某些核在高自旋

态下核形状发生了突然的变化。如¹⁴⁶Nd (²⁰He, 6n)¹⁶⁰Yb。在 $40\hbar$ 附近曲线突然偏折成斜率小一些的曲线。这可以说明它从长椭球突然变成扁椭球。在¹⁵⁸Yb中除了在 $40\hbar$ 附近有一个偏折外,在 $49\hbar$ 附近又有偏折成斜率大的曲线的折点。这可能对应着三轴形变。但要严格把它们确定下来,并深入研究它们,目前大都寄希望于作 γ - γ - γ 三重关联实验。因为它的符合效率比二重符合又低了三个数量级,所以必须加更多的探测器作符合实验。这就是为什么要把反康屏蔽Ge探测加多到15个以上的原因。

3.3 稀有衰变方式

由于列阵探测器可以降低不需要的事件,而突出所需要的事件,因此可用它研究低几率事件。许多人正在作高激发能低自旋区的结构研究,这用列阵探测器最理想。建立在高自旋态上的巨共振跃迁已被发现,它的强度约为yrast跃迁的0.1%左右。目前海德堡晶体球正在对巨共振作系统性研究。从某些轻核的发射粒子谱中可以分析出形成了核分子态。如果能测出准分子转动 γ 跃迁,那将是十分有意义的。但这样的跃迁强度是一次核事件的 10^6 分之一,因此这类实验也要由晶体球作^⑦。在⁹⁰Zr的第一个激发态是 $1.76\text{MeV } J^\pi = 0^+$,它到基态的跃迁主要是EO成份占71%,其余29%为发射电子对 e^+e^- 。现在用晶体球还测到了另一种双 γ 发射的衰变方式^⑧。此外,晶体球还用来找称作axion的假想粒子^⑨,它可能存在于正电子湮灭过程中。已知正电子湮灭可以发射两个511KeV γ 射线和发射三个能量小于511KeV的 γ 射线。理论预言还有可能是 $e^+e^-(1^3S_1) \rightarrow a + \gamma$ 的湮灭方式,a即axion。经计算如果存在,它的强度在三 γ 衰变方式中仅占 5×10^{-6} 到 10^{-11} 之间。寻找axion的实验已经在晶体球上作了,但上限在 5×10^{-7} 范围内仍未发现它。

从上述可以看出, $4\pi\gamma$ 列阵探测器已在多方面的实验中作出重要贡献。今后若干年内它们的结果将十分引人注目。

表1 TESSA 中25%的Ge探测器的峰总比

探测器类型	¹³⁷ Cs源		⁶⁰ Co源	
	无抑制	抑制	无抑制	抑制
GeLi	0.30	0.66	0.18	0.53
Ge n型	0.32	0.75	0.20	0.60
平均	0.31	0.71	0.19	0.57
γ-γ 份数	0.09	0.50	0.04	0.32

表2 不同闪烁体的某些性质

材料	NaI	BaF ₂	BGO
密度	3.7	4.9	7.1
能量分辨(¹³⁷ Cs)	8%	~11%	~17%
时间分辨(⁶⁰ Co)	~3ns	0.8ns	~4ns

参 考 文 献

- 1 L. L. Riediger, 核物理动态 1983年 第三期
增刊 1.
- 2 P. J. Twin, 在佛罗伦萨的国际核物理会议
上的报告1983.9.
- 3 B. Herskind, 私人通信
- 4 D. G. Sarantites, 核物理动态1983年第三期
增刊23.
- 5 J. D. Garrett, 在近物所的报告 1983.9
- 6 D. Habs等, Nordic Meeting on Nuclear
Physics 1982. 8. 59.
- 7 W. Wahl, GSI 科学报告 1983.3. 45.