

# $\gamma$ 射线探测器的能量标定

石宗仁

中国原子能科学研究院

2018, 3 7, 在 高能所的 报告

# 1. 引言

- 1.1  $\gamma$ 射线探测器
- **有机闪烁体**，H, C, O的化合物。  $\gamma$ 射线与它们主要是Compton散射。时间响应快，效率低，没有全能峰，但易制成大面积，造价低。  $E_{\gamma}=661\text{keV}$ 的能量分辨率8-25%。
- **无机闪烁体**。  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ,  $\text{NaI}(\text{TI})$ ,  $\text{CsI}(\text{TI})$ 。效率高，有全能峰，造价高。  $E_{\gamma}=661\text{keV}$ 的能量分辨率3-15%。
- **半导体**。纯半导体Ge和Si, 化合物半导体CdTe等。效率中等，有全能峰，造价高。 Ge和Si 需低温运行。
- 由于Si的原子序数低14，用于几百keV以下的x-射线探测。
- 根据效率，能量、时间和位置分辨率，粒子鉴别本领和固有的放射性杂质等要求选取探测器。

# 探测器的响应函数

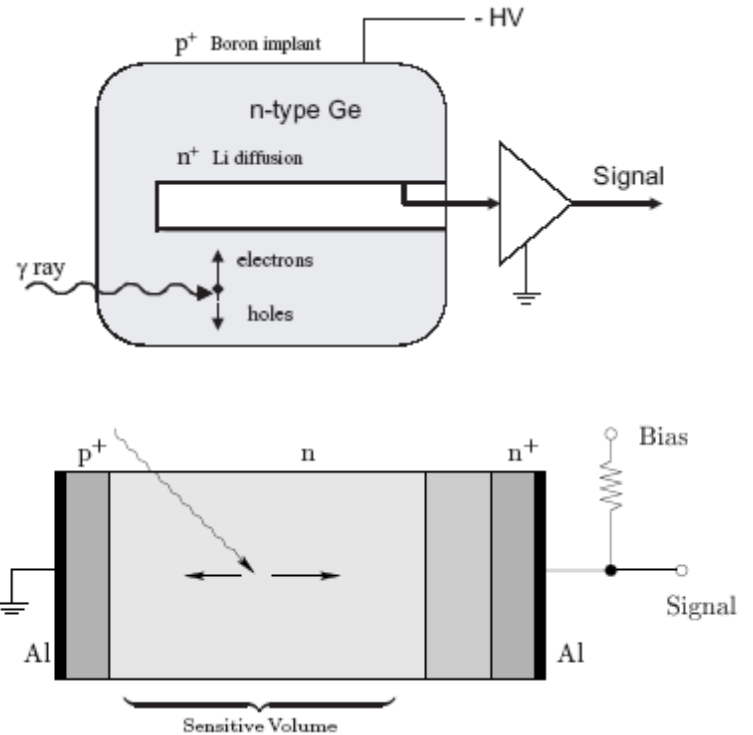
- 一个单能 $\gamma$ 射线在探测器内的能量沉积谱用总计数归一称**响应函数**，即归一的信号输出的脉冲幅度谱。
- 在探测器中， $\gamma$ 射线与探测介质的相互作用、次级电子和电子-空穴对等的行为决定了响应函数，它是连续的。
- 采用MC程序Geant4模拟响应函数。
- 响应函数中的单色部分称**峰形函数**。
- 建立响应函数和峰形函数与 $\gamma$ 射线能量的关系，分别用于解连续的和分立的 $\gamma$ 射线能谱。
- 响应函数的单色化技术：反康、对谱仪和两者的复合。

# 解谱

- 从测量的脉冲幅度谱求出 $\gamma$ 射线能谱称为解谱。关键是解重峰。
- 目的是确定峰位和峰面积。然后利用标定的能量和效率曲线，导出 $\gamma$ 射线的能量及其强度。
- 实验上测量的脉冲谱 $P(E)$ 可写成如下的积分式
- $$P(E) = \int f(E_\gamma) R(E-E_\gamma) dE_\gamma + B, \quad B = \sum_i a_i E_i$$
- 其中： $E$ 表示脉冲幅度或道数； $R(E-E_\gamma)$ 是实验测定或MC计算的响应函数； $f(E_\gamma)$ 是入射到探测器的 $\gamma$ 射线能谱； $B$ 是本底。
- 当 $\gamma$ 射线能谱是分立的，解谱相对简单。
- 经数据光滑，寻峰，高斯峰形拟合等步骤。
- 一般，能量的不确定度 $\sim$ keV，强度为百分之几—几十。

# 1.2 HPGe探测器

- **n-型Ge**几keV以上，抗辐照及损伤可恢复。
- **p-型Ge**几十keV以上，有较好的能量分辨率。
- 在几何上，常用**单开端同轴和平面**两种HPGe。
- 单开端同轴可认为由**平面和真同轴**两部分组成。
- 还有井型、外电极分割和点接触等类型的HPGe探测器。

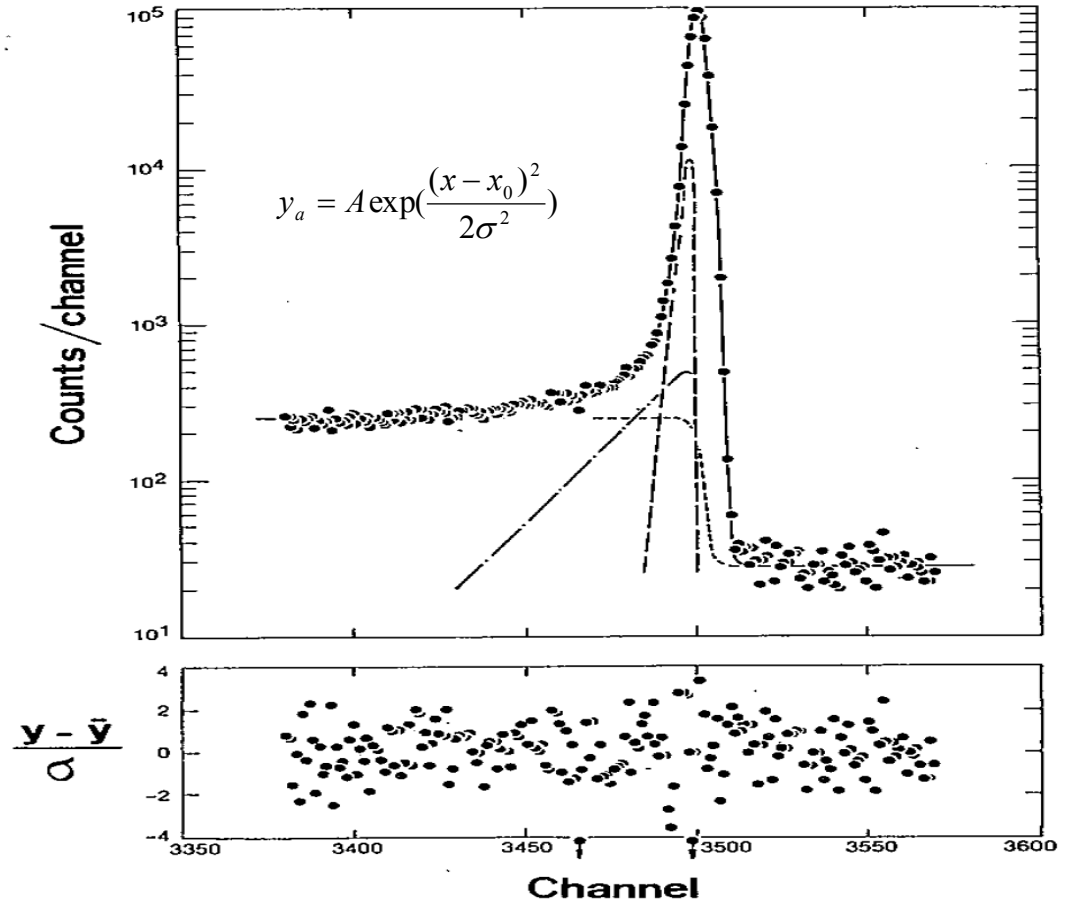


# HPGe探测器的性能指标

- **能量分辨率**~2keV。噪声~1.4keV, 电子-空穴对的统计~1.5keV。
- **时间分辨率**~5ns。与能量范围有关。
- **位置分辨率**。普通的HPGe没有位置分辨本领。
- **峰/康比**~60。
- **相对效率**是 $^{60}\text{Co}$ 源离探测器表面25cm时相对3" ×3" NaI(Tl)的效率。最大相对效率达200%。
- **效率**~正比于体积。
- HPGe是电离室, 它的信号脉冲上升时间, ~200ns, 与e-h产生位置有关。中等速度的探测器。
- HPGe探测器的性能指标是用 $^{60}\text{Co}$ 放射源的 $E_{\gamma}=1.33\text{MeV}$ 测量的。
- 有机和无机闪烁体的性能指标是用 $^{137}\text{Cs}$ 放射源的 $E_{\gamma}=0.661\text{MeV}$ 测量的。

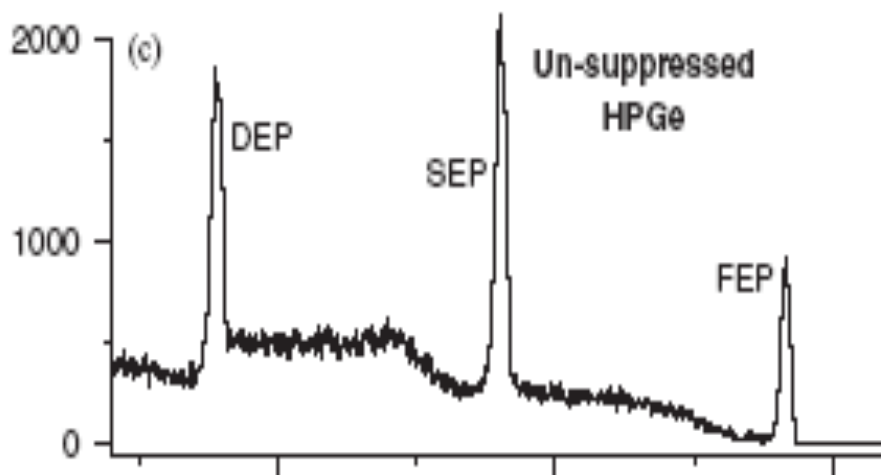
# HPGe的峰形函数

- **峰形函数**由高斯分布G、低能指数尾T和平台erfc等三部分组成。
- 图是Helmer等人的拟合函数。G+2T+erfc。
- T和erfc来自电荷收集不完全，如陷阱、表面道效应、电子的边界逃逸，及光电和对效应产生电子的韧致辐射光的逃逸、多次Compton散射及弹道亏损等。
- 为获得准确的重峰的峰位和面积采用三部分函数，但计算时间长。
- **一般，采用G确定它们。**



# HPGe对高能 $\gamma$ 射线的响应

- 一般，放射性源的 $\gamma$ 射线能量 $<3\text{MeV}$ ，称**低能源**。
- $>3\text{MeV}$ 称**高能 $\gamma$ 射线**，它们主要来自核反应。
- 高能 $\gamma$ 射线与探测介质产生 $e^+e^-$ 对效应显著。响应函数中有全能、单逃逸和双逃逸三个单色峰，都可用于测定 $\gamma$ 射线能量。
- 由于逃逸现象，在 $10\text{--}20\text{MeV}$ 响应函数可能更复杂。





## 2. 能量标定

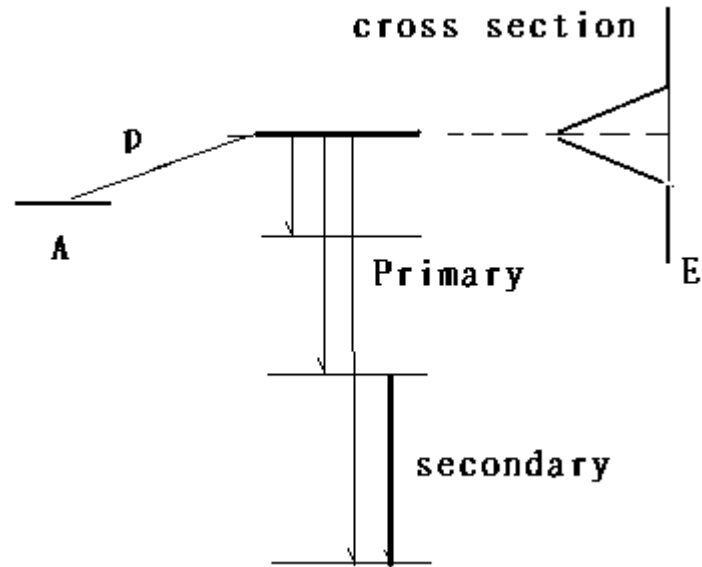
- 如下步骤：
- 选取标准 $\gamma$ 射线源，
- 实验测量，
- 解谱得到标准 $\gamma$ 射线的峰位，即测量的能量，
- 对测量的 $\gamma$ 射线能量做修正，
- 建立 $\gamma$ 射线能量与测量能量的关系曲线，
- 评估 $\gamma$ 射线能量的不确定度。

## 2.1 选择标准 $\gamma$ 射线源

- 由多个实验测量，经评价和推荐的数据称标准。分初级和次级标准。
- 放射性同位素标准源. 能量范围 $E_{\gamma} < 3\text{MeV}$ ，能量不确定度 $\sigma \leq 10\text{eV}$ 。
- $E_{\gamma} < 3\text{MeV}$ 的标准 $\gamma$ 射线源容易得到。
- $E_{\gamma} > 3\text{MeV}$ 的有两个。 $^{56}\text{Co}$  (486.5–3611.7keV,  $T_{1/2}=77.3\text{d}$ ,  $^{56}\text{Fe}(p, n)^{56}\text{Co}$ ) 和 $^{66}\text{Ga}$  (833.6–4807.0keV;  $T_{1/2}=9.5\text{h}$ ,  $^{63}\text{Cu}(\alpha, n)^{66}\text{Ga}$ ) 能发射 $>3\text{MeV}$ 高能 $\gamma$ 射线，但制做困难和寿命短。
- 热中子辐射俘获反应高能 $\gamma$ 射线标准源。 $E_{\gamma} < 11\text{MeV}$ ， $\sigma \leq 100\text{eV}$ 。
- $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{N}(n, \gamma)$  分别产生最高能为8.6和11MeV的多线源。
- 轻核质子辐射俘获反应 $(p, \gamma)$  $\gamma$ 射线标准源， $E_{\gamma} > 10\text{MeV}$ ， $\sigma \leq 1\text{keV}$ 。
- $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p, \gamma)$  等是标准。特别 $^{11}\text{B}(p, \gamma)$  能产生10MeV以上的 $\gamma$ 射线。它适合10–20MeV  $\gamma$ 射线的标定。
- 标记韧致辐射高能 $\gamma$ 射线源。
- Compton背散射光源。

## 2.1.1 $A(p, \gamma)$ 共振反应

- 轻核质子共振辐射俘获反应
- 共振能级和宽度
- 共振能级退激发射出初级 $\gamma$ 射线，随后的称次级 $\gamma$ 射线。
- 初级 $\gamma$ 射线的能量与共振宽度有关。次级与宽度无关。
- 宽度与其寿命有heisenberg关系，
- $\Gamma \cdot \tau = h/4\pi$ .

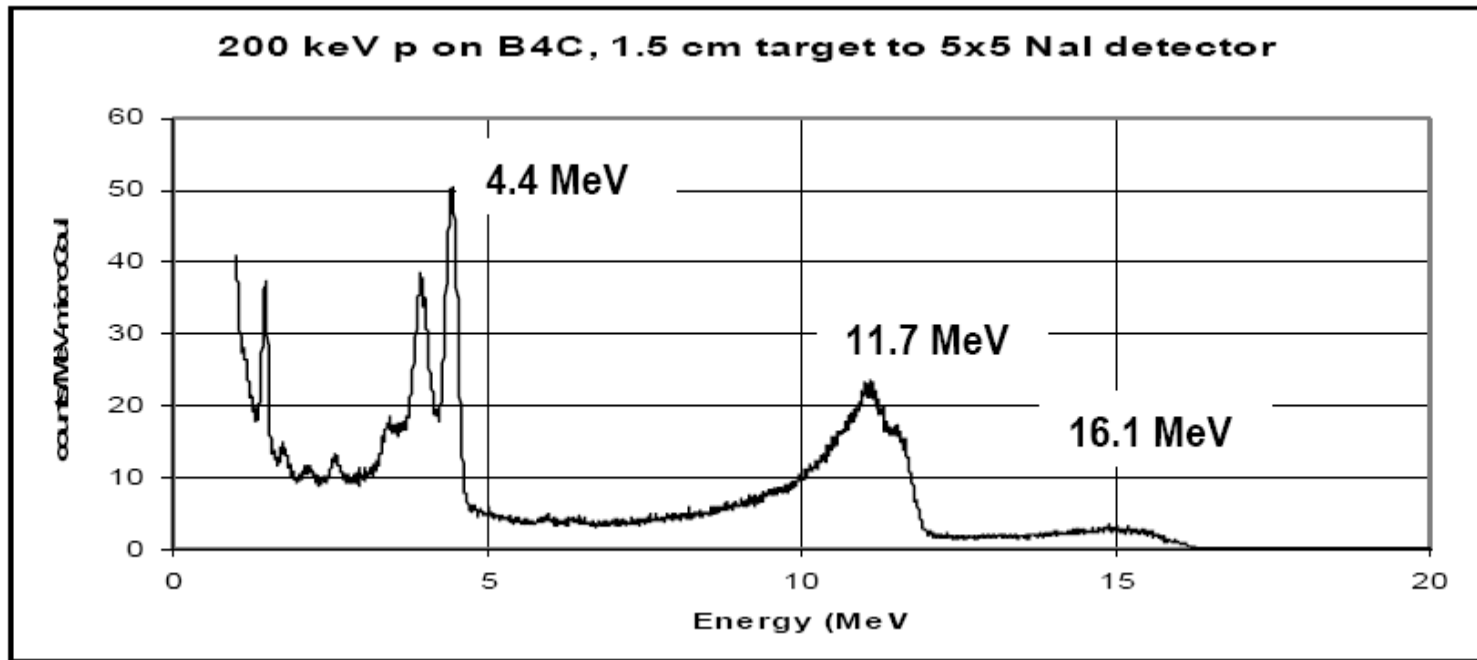


# 质子共振辐射俘获反应

- 低能质子、较高产额的 (p,  $\gamma$ ) 共振辐射俘获反应。
- 8个 $E_\gamma=4-18\text{MeV}$ 。

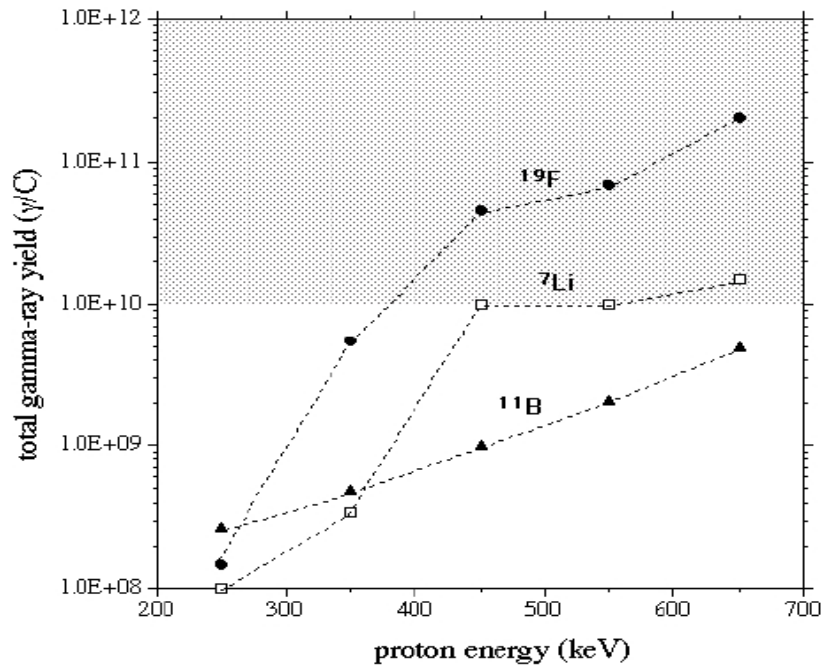
Reaction	$E_\gamma$ (MeV)	$E_p$ (keV)	$\sigma$ (mb)	$\Gamma$ (keV)	Target
$^{11}\text{B}(p,\gamma)^{12}\text{C}$	4.4, <b>11.7</b> , 16.1	163	0.16	7	Easy
$^{11}\text{B}(p,\gamma)^{12}\text{C}$	4.4, <b>12.2</b>	675	0.05	322	Easy
$^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$	4.11, <b>8.06</b>	550	1.44	33	Moderate
$^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$	<b>6.1</b> , 6.9, 7.1	340	160	3	Difficult
		484	32	1	
		597	7	30	
		672	57	6	
$^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$	1.6, <b>11.9</b>	672	0.5	6	Difficult
$^7\text{Li}(p,\gamma)^8\text{Be}$	<b>14.8</b> , <b>17.7</b>	441	6	12	Moderate

# $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ 的 $\gamma$ 射线



# $\gamma$ 射线产额

- 厚靶的每库伦入射质子的 $\gamma$ 射线产额。10 $\mu$ A质子束流累积达到1C需~30h。测量时间长。



## 2.1.2 非共振 $^{11}\text{B}(p, \gamma)$ 反应

- 利用 $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ 反应获得10MeV以上的单色 $\gamma$ 射线。
- 反应 $Q=15957.17 \pm 0.33\text{keV}$ 。
- 截面小,  $\sim \mu\text{b}$ 。
- 从连续态跃迁到 $^{12}\text{C}$ 基态和第一激发态的初级 $\gamma$ 射线能量用下式计算。

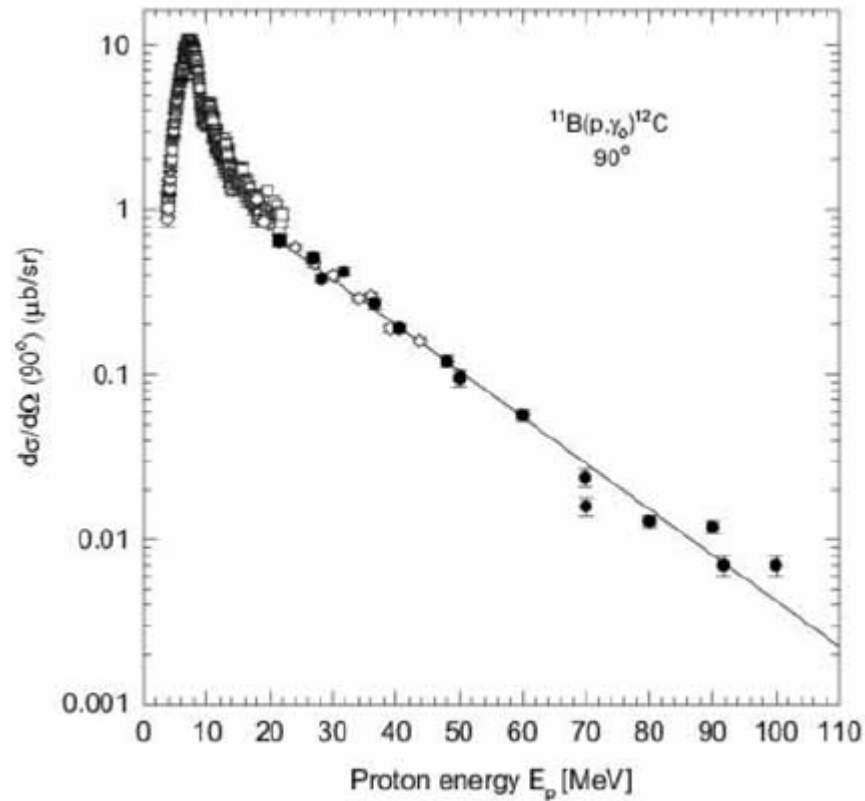
$$E_{\gamma 0} = (0.92)E_p + 15.957 \text{ MeV},$$

$$E_{\gamma 1} = (0.92)E_p + 11.518 \text{ MeV}$$

$$0.92 = \text{mass}_{\text{boron}} / (\text{mass}_{\text{boron}} + \text{mass}_{\text{proton}})$$

# 非共振的 $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ 反应

- 在 $90^\circ$ 的 $\gamma_0$ 的微分截面。  $E_p=4-18\text{MeV}$ ,  $\sigma(90^\circ) > 1\mu\text{b}/\text{sr}$ .





# 如何选择(p, $\gamma$ )源?

- 应考虑下面的因素:
- 共振反应的截面, 决定计数率;
- 共振宽度和寿命, 决定初级 $\gamma$ 射线的FWHM和Doppler效应;
- 非共振(p,  $\gamma$ )反应可得到更高能量的 $\gamma$ 射线, 反应截面小;
- $\gamma$ 射线的角分布;
- 是否有中子产生, 本底;
- 靶是否容易制做;
- 加速器的能量、束流强度的稳定性;
- 能量的不确定度等。
- 选取尽可能多的 $\gamma$ 射线能量, 得到宽能区的能量曲线。

## 2.1.3 中子和 $\gamma$ 射线混合源

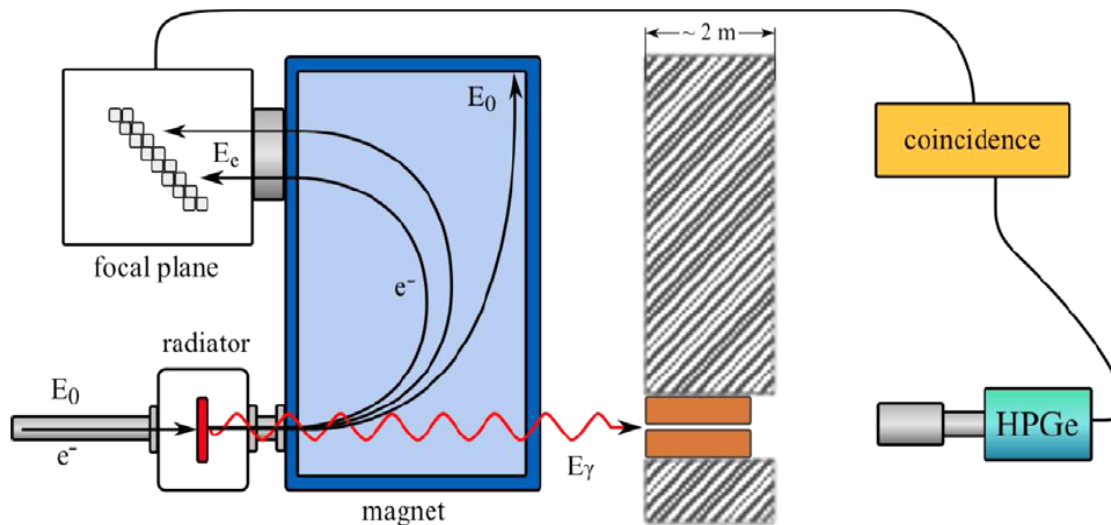
- 同时产生中子和 $\gamma$ 射线的非共振反应。
- $^{11}\text{B}(\text{d}, \text{n}\gamma)^{12}\text{C}$ ,  $E_{\gamma}: 4.43, 15.1\text{MeV}$ .
- $^{11}\text{B}(\text{d}, \text{p}\gamma)^{12}\text{B}$ ,  $E_{\gamma}: 0.95, 1.67\text{MeV}$ .
- $^{241}\text{Am} - ^9\text{Be}$ 的中子和4.43MeV $\gamma$ 射线源.
- $^{238}\text{Pu} - ^{13}\text{C}$ 的中子和6.13MeV $\gamma$ 射线源.
- 标定有机闪烁体。
- 中子和 $\gamma$ 射线同时用于检测—反恐。

# $(p, \gamma)$ 和 $(n, \gamma)$ 反应

- 评价和推荐的多线源
- $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ , 共振 $E_p=992\text{keV}$ ,  $\Gamma=70\text{eV}$ ,  $E_{\gamma\text{max}}: 10762.9$ 。
- $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ , 共振 $E_p=1058\text{keV}$ ,  $\Gamma=3900\text{eV}$ ,  $E_{\gamma\text{max}}: 8281.5(5)$ 。
- $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$ , 共振 $E_p=1417\text{keV}$ ,  $\Gamma=90\text{eV}$ ,  $E_{\gamma\text{max}}: 8925.55$ 。
- $^{14}\text{N}(n_{\text{th}}, \gamma)^{15}\text{N}$ ,  $E_{\gamma}: 10829.110(59), 9148.95(9), 8310.156(39)$ 。
- $^{35}\text{Cl}(n_{\text{th}}, \gamma)^{36}\text{Cl}$ ,  $E_{\gamma}: 8578.53(9), 7790.28(8)$ 。
- 在 $<11\text{MeV}$ 的能区, 利用 $^{14}\text{N}(n_{\text{th}}, \gamma)$ 和 $^{27}\text{Al}(p, \gamma)$ 标准源校准能量曲线。  
一般能量不确定度 $\sim 0.1\text{keV}$ 。

## 2.1.4 高能标记的韧致辐射源

- FWHM~30–50keV. L. Schnorrenberger et al. NIMA735 (2014) 19

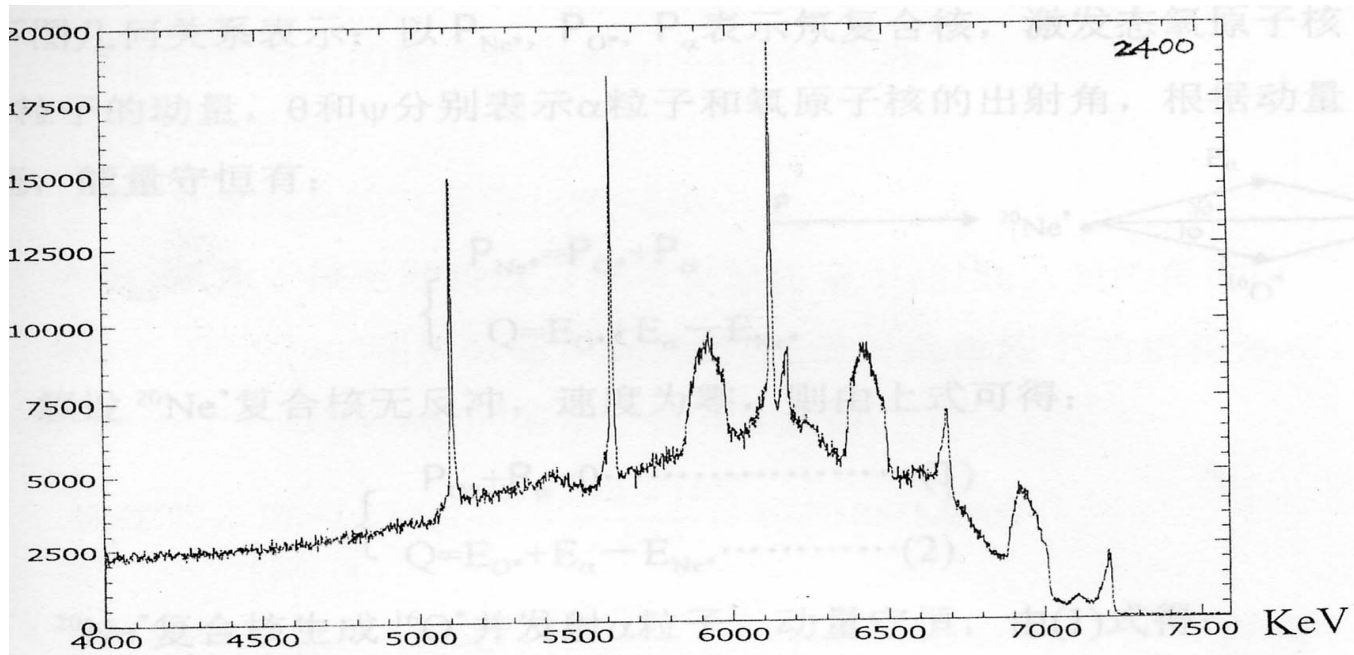


## 2.2 多普勒效应和核反冲

- **多普勒 (Doppler) 效应**引起 $\gamma$ 射线能量的移位和展宽
- 根据能动量守恒, 在质子辐射俘获反应中, 复合核是沿束流方向运动的。
- 共振能级的寿命 $\tau$ 和复合核在靶中的慢化时间 $t_m$ 是两个重要的参数。
- **三种情况:**  $\tau \ll t_m$ , 在飞行的起点衰变发射 $\gamma$ 射线;  $\tau \gg t_m$ , 停止后衰变;  $\tau \sim t_m$ , 前两者之间。
- **多普勒的线形是非对称的。**
- $E_\gamma = E_0 (1 + v \cos\theta/c) - E_0^2/2M$ .
- **不同的探测角度, 产生能量移位**
- $(E_\gamma - E_0) / E_0 = v \cos\theta/c$ ,
- 为了克服多普勒移位, 探测器放置在 $\theta=90^\circ$ 。
- **探测器的有限张角, 产生峰展宽**
- $\Delta E_\gamma / E_0 = v/c (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$ 。

# 多普勒效应

- 关注多普勒 (Doppler) 效应，如何从脉冲幅度谱测定能量。

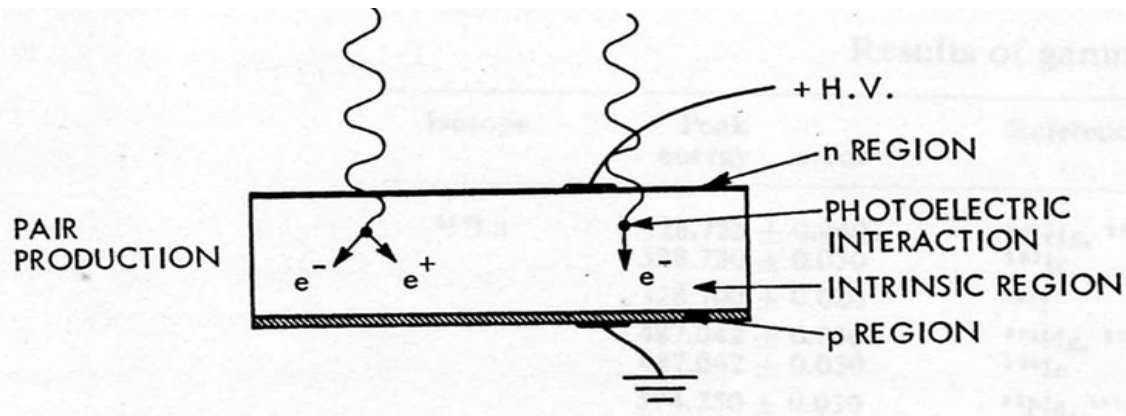


## 2.3 实验测量

- 严格控制实验条件：
- 源-探测器几何保持一致；
- 主放大器应调节到最佳状态，特别是放大器的时间常数；
- ADC道数的选择，在保真和计数统计间折衷；
- 控制计数率，防止计数率效应引起峰位漂移；
- 测量中用放射性 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线源监测探测器和电子线路的稳定性，或采用内标；
- 加速器束流在空间和能量应稳定；
- 靶的老化和沾污等。
- 标定和测量的实验条件和解谱方法一致。

# 源-探测器几何

- **场增量效应**，电子加速与 $\gamma$ 射线入射和电场方向的夹角有关。
- **晶格取向效应**，电子-空穴对的产生与 $\gamma$ 射线入射和晶轴间的角度有关，影响峰位和FWHM.
- 由于入射方向的差异，本底中子经 $H(n, \gamma) {}^2H$ 反应产生的2223keV和高能 $\gamma$ 射线产生的511keV都不适合作为能量标准。可能有几百eV的系统不确定性。可做稳定性监测。
- 保持校准源与待测源的位置尽可能一致。





# ADC的道宽

- 为了保证谱的信息不畸变，ADC的道宽应满足Shannon定理：最大道宽是测量有意义的能量范围中最小FWHM的一半。
- $N = (E_1 - E_2) / (\text{FWHM}_{\min} / 2)$
- 有意义的能量范围10-20MeV. 10MeV对应的 $\text{FWHM}_{\min} \sim 5\text{keV}$ ,  $N \sim 8000$ .
- 道数N越多，信息的保真度越高，但每道的计数越少，测量时间越长。
- 为获得每道有较好的计数统计，有时道宽的选取需要在谱的畸变和计数统计间折衷。
- 用 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 标定ADC的道宽和零点。

## 2.4 数据处理—解谱

- 分立的单能 $\gamma$ 射线。
- 目的是标定能量。
- 利用全能、单逃逸和双逃逸峰，确定峰极大值的位置。
- 采用高斯分布函数+二次多项式本底拟合峰形，确定峰的位置。
- 测量与标定采用同样的解谱方法。

# 能量修正

- 反冲核能量修正，可计算。
- 探测系统不稳定的修正，用 $\gamma$ 射线监测源。

# 能量曲线

- 函数拟合法
- $E_{\gamma}(x) = ae^{-bx} + \sum_{n=1}^4 C_n x^{n-1}$
- 非线性来源于探测器、ADC和电子学线路。
- 由于非线性的物理过程至今不十分清楚，因此没有函数能真正的描写非线性关系。

# 残差法

- 峰位和 $\gamma$ 射线能量做线性最小二乘法拟合，得到线性参数 $c$ 和 $d$ 。
- $E_0(x) = c + dx$ 。
- 测量的峰位与直线数据做差得剩余，
- $\Delta E_\gamma(x) = E_\gamma(x) - E_0(x)$ 。
- $\Delta E_\gamma(x)$ 的数量为几个keV。
- 用目测绘制 $\Delta E_\gamma(x)$ 与 $E_\gamma(x)$ 的关系曲线。

# 测量能量的不确定度

- **来源：**
  - 标准 $\gamma$ 射线的能量不确定度；
  - 峰计数统计引起峰位的不确定度；
  - 在非共振(p,  $\gamma$ )反应中，质子能量的不确定度对初级的影响；
  - 在非共振(p,  $\gamma$ )反应中，质子在靶中能量损失的不确定度；
  - 靶厚不均匀引起质子在靶中能量损失的不确定度等。
- 
- 由于利用单色峰的极大值，即峰位确定 $\gamma$ 射线的能量。在足够的计数下，峰位准确性很高，能达到ADC道宽的3%，~1keV。
  - 多个单能测量值的线性拟合将进一步减少能量不确定度。

# 总结

- 采用轻核共振和非共振的  $(p, \gamma)$  反应作10–20MeV的 $\gamma$ 射线源是可行的。特别是 $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ 反应。
- 需要进一步调研有关  $(p, \gamma)$  反应的参数。
- 估算能量的不确定度。
- 确定实验方案。
  
- 感谢原子能科学院的陈永静同志的帮助。
  
- **谢谢!**