

高等学校试用教材

原子核物理实验方法

下册

复旦大学
清华大学
北京大学
合编

原子能出版社

高等学校试用教材

原子核物理实验方法

下 册

复旦大学
清华大学 合编
北京大学

原子能出版社

1982·北京

内 容 简 介

本书是《原子核物理实验方法》下册，分为八章。内容包括：中子探测技术、低水平放射性测量、核反应截面测量、粒子鉴别技术、核寿命的测量、一些痕量元素的分析方法、常用辐射源、误差和数据处理。书末附有在核物理实验中经常用到的12种图表和数据。

本书可作为高等院校原子核物理等专业的教科书，也可供从事核物理研究、放射性测量、放射性核素应用、辐射防护等方面的工作人员参考。

高等学校试用教材

原子核物理实验方法 下册

复旦大学

清华大学 合编

北京大学

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092^{1/16} ·印张22 ·字数 520千字

1982年 7 月第一版·1982年 7 月第一次印刷

印数001—4300 ·统一书号：15175·415

定价：2.25元

符 号 表

本书(下册)部分通用符号如下

符 号	名 称
B	甄别阈
d	晶面间距
e_m	极限误差
E	中子能量
E_p	反冲质子能量
Γ	能级半宽度
ν	或然误差
K	置信系数
L_c	判断限
L_D	探测下限
L_Q	定量下限
μ	折合质量
ρ_{xy}	相关系数
Q	中子源强度
Q	优质因子
R	放射性产生率
S	比放射性
σ_t	中子全截面
σ_v	中子俘获截面
σ_f	中子裂变截面
σ_s	中子弹性散射截面
σ_n	中子非弹性散射截面
TAC	时幅变换器
τ_c	平均寿命
V_c	质心速度
w	权
ω_s	荧光产额
W_s	极差
Y	核反应产额
θ_s	系统误差
θ_D	晶体的德拜温度

目 录

第十一章 中子探测技术

第一节 中子探测的基本原理	1
一、核反应法	2
二、核反冲法	3
三、核裂变法	4
四、活化法	5
第二节 常用的中子探测器	6
一、气体探测器	6
二、闪烁探测器	10
三、半导体探测器	13
四、其他中子探测器	15
第三节 中子能谱的测量	16
一、氢反冲法	16
二、 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^3\text{He}$ 谱仪	25
三、飞行时间法	26
四、晶体衍射法	34
第四节 中子通量及中子源强度的测量	36
一、概述	36
二、氢反冲法测量快中子通量	39
三、中子活化法测量中子通量	42
四、锰浴法测量中子源强度	46
五、用伴随粒子法测量快中子通量	48

第十二章 低水平放射性测量

第一节 测量系统的优质因子及探测极限	50
一、探测装置的优质因子	51
二、与探测灵敏度有关的几个概念	52
第二节 本底来源及降低本底的措施	56
一、本底的来源	56
二、降低本底的措施	57
第三节 几种低水平放射性测量装置	63
一、低水平 α 计数	63
二、低水平 β 计数	64
三、低水平 γ 放射性的测量	68

第十三章 核反应截面测量

第一节 带电粒子反应截面测量	72
一、物理原理	72
二、微分截面和积分截面测量	75
三、共振反应截面测量	78
第二节 靶室和制靶技术	82
一、靶室	82
二、制靶技术	85
第三节 快中子反应截面测量	90
一、中子全截面测量	90
二、中子散射截面测量	96
三、中子俘获截面测量	101
四、中子裂变截面测量	103

第十四章 粒子鉴别技术

第一节 脉冲形状甄别方法	105
一、闪烁探测器中的脉冲形状甄别	106
二、半导体探测器中的脉冲形状甄别	113
三、正比计数器中的脉冲形状甄别	120
第二节 飞行时间方法	121
一、工作原理	121
二、装置描述	123
三、定时探测器	126
第三节 探测器望远镜方法	128
一、工作原理	128
二、探测器	132
三、鉴别能力	134
四、多重探测器望远镜系统	136
五、探测器望远镜与飞行时间方法的组合	138

第十五章 核寿命的测量

第一节 引言	142
第二节 长核寿命的测量方法	142
一、直接测量法	143
二、比放射性法	145
三、测定子核含量法	146
第三节 短核寿命的测量方法	147
一、直接测量的方法	148

二、延迟符合和微波调制方法	153
三、核反冲法	157
四、确定能级宽度的方法	165
五、非弹性散射方法	173
六、阻塞效应	175

第十六章 核辐射分析技术在痕量元素分析中的应用

第一节 中子活化分析	180
一、中子活化分析原理	180
二、中子活化分析中的干扰反应	182
三、中子活化分析设备和辐照条件选择	183
四、测量和数据分析	183
五、中子活化分析应用实例	184
第二节 带电粒子核反应分析	189
一、带电粒子活化分析法	189
二、瞬发辐射分析法	193
第三节 X 荧光分析	199
一、基本原理	199
二、X 荧光分析的实验装置和方法	204
三、样品分析	207
第四节 离子背散射技术	211
一、基本原理	211
二、实验装置和条件选择	215
三、背散射技术的应用实例	216
第五节 质谱分析技术	218
一、质谱分析的基本原理	219
二、离子源和离子收集器	221
三、分辨本领和灵敏度	222

第十七章 常用辐射源

第一节 概述	224
一、辐射源的选用	224
二、放射源的制备	224
三、放射源的包装和安全检验	225
四、放射源产品等级	226
第二节 α 和重带电粒子源	226
一、同位素 α 放射源	226
二、加速器	228
第三节 β 放射源	230

一、概述	230
二、 β^- 放射源	231
三、 β^+ 放射源	231
四、内转换电子源	232
五、电子加速器	233
第四节 γ 和X射线源	234
一、概述	234
二、低能光子源	235
三、常用 γ 参考源	238
四、高能 γ 射线源	239
五、穆斯堡尔源	240
六、 γ 辐照源	240
第五节 常用中子源	241
一、同位素中子源	241
二、加速器中子源	244
三、反应堆中子源	247

第十八章 测量误差和数据处理

第一节 等精度观测下偶然误差的估算	250
一、观测值和偶然误差的正态分布	250
二、算术平均值及其分布	251
三、方差的估值	252
四、置信度和置信区间	255
五、偶然误差和测量结果的表示方法	257
六、估算均方根差的最大误差法和极差法	259
第二节 不等精度观测误差的处理	262
一、权的概念和加权算术平均值	262
二、加权平均值的均方根差	264
三、单位权方差的估算	265
四、分组数据的处理	268
第三节 系统误差	273
一、系统误差对测量结果的影响	273
二、系统误差的表示和确定	274
三、系统误差的发现和检验	275
四、系统误差的限制和消除	279
第四节 多维数据组和间接测量的误差处理	281
一、二维随机变量	281
二、间接测量中的误差传递	283
三、误差分配和误差分析	286

第五节 用最小二乘法作参数估计	289
一、最小二乘法原理	289
二、线性参数的最小二乘估计	290
三、最小二乘估计的精度计算	294
四、不等精度观测下线性参数的最小二乘估计	297
五、例题	299
六、非线性参数的最小二乘估计	301
第六节 曲线拟合法'	302
一、用最小二乘法按多项式作曲线拟合	302
二、拟合曲线的置信区间	304
三、多项式拟合阶数的选取	305
四、正交多项式族在拟合观测数据时的应用	307
附录 1 几种常用分布的基本性质	312
附录 2 估值的评选标准	314
附录 3 标准偏差 s 的均方根差	314
附录 4 最小二乘残差平方和 R 的统计性质	315

附 录

附录 1 常用物理常数数值表	317
附录 2 正态分布概率积分表	317
附录 3 χ^2 分布 概率积分表	318
附录 4 t 分布 概率积分表	319
附录 5 F 分布 概率积分表	320
附录 6 放射性衰变计算表	322
附录 7 常用核素表	323
附录 8 按 γ 能量排列的常用参考源表	326
附录 9 常用衰变纲图 (简化)	328
附录 10 平面源所张平均立体角的计算	329
附录 11 各元素的 KX 射线能量、相对强度和荧光产额	336
附录 12 几种探测介质和窗材料对低能光子的质量吸收系数	340

第十一章 中子探测技术

引 言

中子的探测在粒子探测技术中占有特殊的地位。这是由于下列原因：

第一，在三十年代末，发现了中子轰击铀原子核能引起核的分裂，并释放出巨大的能量，从而开辟了一条原子能利用的道路。中子在核能的释放过程中起着关键的作用。所以，研究中子的性质和研究中子和物质的相互作用，是过去几十年，也是目前的一个重要研究方向。例如，核反应堆和核武器的设计和试验，都需要精确知道各种能量中子和物质相互作用的截面、角分布等参数。这就大大促进了中子与核相互作用参数的测量工作。在进行这些参数测量时，要用到各种中子探测技术。

第二，近年来中子活化分析、中子测水分、中子测井探矿、中子照相、中子辐射育种和中子治癌等技术有了很大发展。这些工作都要涉及中子的测量。

第三，中子不带电，它与原子核相互作用时不受库仑位垒的阻挡，利用中子引起核反应研究核性质，具有一定的优越性。

因此，关于中子以及与中子有关问题的研究，已经发展成为一门专门的学科——中子物理学^[1-3]。而中子的探测也成为一个专门的应用和研究课题。本章专门讨论中子的探测技术，先介绍中子探测的原理和常用的中子探测器，再分别讨论中子能谱和中子通量的测量技术。

第一节 中子探测的基本原理

我们已经熟悉了带电粒子和 γ 射线的探测原理和技术。其原理，主要是利用这类辐射和物质的某种相互作用。中子和其他辐射一样，也是靠中子和物质的某种相互作用来探测的。

但中子的特点是本身不带电，所以中子通过物质时和物质中的电子是不发生作用的，中子在物质中不能直接引起电离，而要靠中子和原子核相互作用产生能引起电离反应的次级粒子才被记录。

中子和原子核的相互作用有：产生带电粒子的核反应、核反冲、核裂变、活化等。这四种过程也是探测中子的四种原理，下面将分别详细叙述。

探测中子首先必须了解所测中子的能量。不同能量中子的探测原理和探测器的具体结构差别都很大。中子能量的区分有很多种，习惯的区分是：

- (1)慢中子：能量为 $<1\text{keV}$ ；
- (2)中能中子：能量为 $1-100\text{keV}$ ；
- (3)快中子：能量为 $0.1-10\text{MeV}$ 。

能量为 0.0253eV 的中子称为“热中子”，这种中子和室温下周围介质大量的分子处于热

平衡状态，亦即它的能量相当于周围介质分子的热运动能量。分子热运动的最可几能量是 $E=kT$ ，其中 k 是玻耳兹曼常数， $k=1.38 \times 10^{-16}$ erg/K， T 是介质的绝对温度。以 $T=293$ K (即 $+20^\circ\text{C}$) 代入，可得 $E=0.0253$ eV，或中子的速度 $v=2200$ m/s。

比热中子能量更低的中子，叫做冷中子。在慢中子能量区域里，还有共振中子，超热中子，超辐中子等名词，这些都是表示不同能量的慢中子，没有十分明确的能量界限，在以后用到时再作介绍。

本书主要讨论慢中子和快中子的探测方法。

一、核反应法

中子本身不带电，它和物质中原子核之间没有库仑斥力，因此比较容易进入原子核，发生核反应。选择某种能产生带电粒子的核反应，记录带电粒子引起的电离现象就可探测中子。这种方法主要用于探测慢中子的强度，在个别情况下，也可用以测量快中子能谱。

目前应用得最多的是以下三种核反应：



上面三个式子中，2.792，4.786，0.764 MeV 分别是这三个核反应过程中释放的能量，即 Q 值。这三个反应都是放热核反应，所以 $Q > 0$ 。 σ_0 是热中子的反应截面。中子和其他原子核作用的截面一般都是几个靶，上述三个反应截面值都很大，所以采用这三种核反应来探测中子。

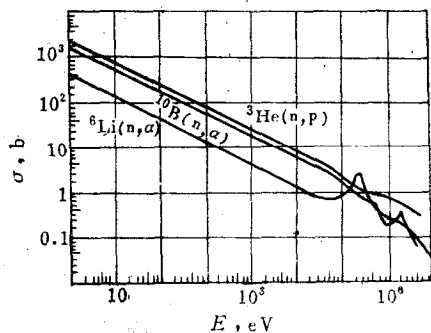


图11.1 ${}^6_3\text{Li}$ 、 ${}^{10}_5\text{B}$ 、 ${}^3_2\text{He}$ 三种核的中子核反应截面

不同的中子能量的核反应截面见图11.1，注意截面和能量坐标都是对数坐标。这三种靶核在应用上各有其优缺点，下面分别予以讨论。

(一) ${}^{10}_5\text{B}(n, \alpha)$ 反应。它是目前应用得最广泛的。主要原因是硼的材料比较容易获得，气态的可以选用 BF_3 气体，固态的可以选择氧化硼或碳化硼。天然硼中 ${}^{10}_5\text{B}$ 的含量约为19.8%。为了提高探测效率，在制造中子探测器时多用浓缩硼 (${}^{10}_5\text{B}$ 的浓度为96%以上)，而浓缩硼的获得并不十分困难。所以，目前利用这种核反应的中子探测器占了很大的

的比重。

中子和 ${}^{10}_5\text{B}$ 作用有二种反应过程，即



第二种方式的反应产物是 ${}^7_3\text{Li}$ 的激发态 ${}^7_3\text{Li}^*$ ，它的平均寿命是 7.3×10^{-14} s，通过释放能量 $E_\gamma = 0.478$ MeV 的 γ 光子立即跃迁到基态，这种方式占93.9%。

对于慢中子，很多元素与它的作用截面随中子能量的变化有一定的规律。图11.2给出了天然硼元素与慢中子作用截面的实验曲线。图上截面和能量都用对数坐标。可以看出：实验

结果基本上是直线，斜率是 $-\frac{1}{2}$ ，所以用关系式 $\log \sigma = -\frac{1}{2} \log E$ 表示，亦即截面与能量的关系是 $\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ 。在慢中子区，中子能量满足上述的关系式， $E = \frac{1}{2}mv^2 \sim v^2$ ，所以 $\sigma \sim \frac{1}{v}$ ，此即“截面变化的 $1/v$ 定律”。在中子能量小于 1keV 的区域内，不仅硼是这样，锂和其他一些元素也有这样的规律。通常利用截面具有 $1/v$ 定律的材料构成的探测器又称为 $1/v$ 探测器。

基于 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反应原理的中子探测器有三氟化硼正比管、含硼电离室和载硼的闪烁计数器等。

(二) $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反应。这个反应的优点是放出的能量最大，所以把中子产生的信号和 γ 本底区分开来比较容易。缺点是 Li 没有合适的气体化合物，使用时只能采用固体材料。另外，天然锂中 ^6Li 的含量只有 7.5% ，以天然锂做成的探测器探测效率低。通常都用高浓缩的氟化锂(^6Li 的含量占 $90-95\%$)，这样价格就贵了。

(三) $^3\text{He}(n, p)$ 反应。这个反应的优点是反应截面最大。缺点是反应放出的能量最小，探测器不容易去除 γ 本底；而且，天然氦气中 ^3He 的含量十分低，大约只占 $1.4 \times 10^{-4}\%$ ，所以 ^3He 的获得比较困难。制备 ^3He 有两条途径，一是靠同位素分离技术把 ^3He 从天然氦气中分离出来；另一种方法是由同位素氚 β 衰变后得到，这时往往气体内混杂有氚，因此要有特殊的消除氚的装置。用这两种方法制备的 ^3He ，价格都是比较贵的，七十年代以来才逐渐用得较多。多数是制成 ^3He 正比计数管或电离室，用以进行几百千电子伏能量的快中子能谱测量。

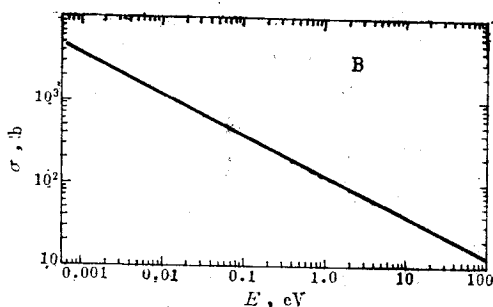


图11.2 天然硼元素的总截面

二、核反冲法

入射能量为 E 的中子和原子核发生弹性散射时，中子的运动方向改变，能量也有所减少。中子减少的能量传递给原子核，使原子核以一定速度运动。这个原子核就称为“反冲核”，反冲核具有一定电荷，可以作为带电粒子来记录。记录了反冲核，就是探测到中子。这种方法就称为“反冲法”。它是探测快中子的主要方法。

由动量、能量守恒定律可以推出，反冲核的质量愈小，获得的能量就愈大。所以，在反冲法中通常都选用氢核做辐射体。这时，反冲核就是质子，有时就称反冲质子法。

发生散射后反冲质子的能量和出射方向由动量守恒和能量守恒定律可以算出为

$$E_p' = E \cos^2 \phi \quad (11.7)$$

式中 ϕ 为反冲质子的出射角。

$\phi = 0^\circ$ 时，相当于入射中子和氢原子核迎面正碰，反冲核获得的能量最大， $E_p' = E$ 。在 $\phi = 10^\circ$ 时， $\cos \phi = 0.9848$ ， $\cos^2 \phi = 0.97$ ，则 $E_p' = 0.97E$ 。即当出射角在 $0^\circ-10^\circ$ 之间变化时，反冲质子的能量只变化了 3% 。在实用中，单测 0° 方向质子计数太少，一般都是测量沿

入射中子束方向，张角为 $\pm 10^\circ$ 的反冲质子。这时，探测器接收到的反冲质子较多。测得的反冲质子能量粗略地就等于入射中子的能量。这样，中子能量的测量就转化为质子能量的测量，这就比较容易做到了。

图11.3给出了氢的中子散射截面，可以看出，在入射中子能量较低时 ($< 0.8\text{MeV}$)，散射截面还是比较大的。

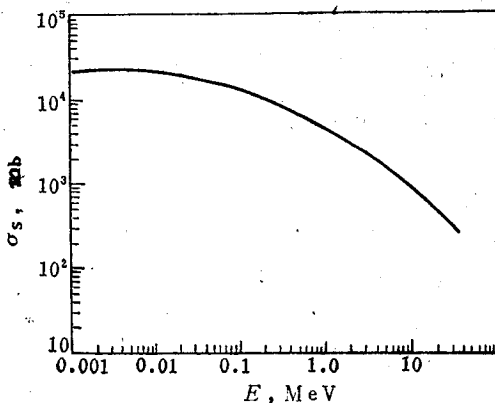


图 11.3 氢的中子散射截面

三、核 裂 变 法

中子与重核作用可以发生裂变，裂变法就是通过记录重核裂变碎片来探测中子的方法。对于热中子、慢中子，总是选用 ^{235}U ， ^{239}Pu ， ^{233}U 做裂变材料。它们的热中子裂变截面值见表 11.1。

图11.4给出这三种裂变材料的裂变截面在慢中子区随能量变化的曲线。

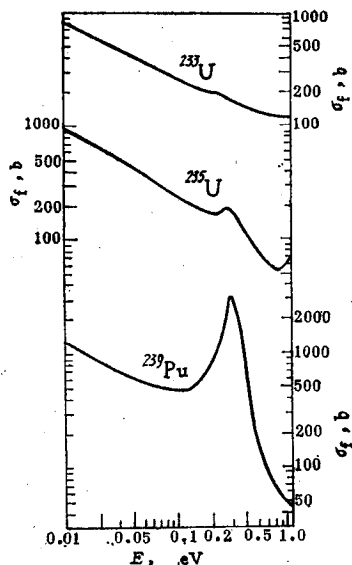


图11.4 ^{235}U ， ^{239}Pu ， ^{233}U 的裂变截面

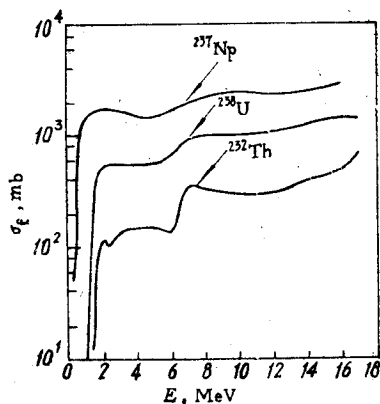


图11.5 常用裂变阈能探测器材料的裂变截面

中子引起裂变时放出的能量很大，大约是 200MeV ，两个裂变碎片共带走 165MeV 。入

射中子的能量一般都远小于这个数值，因此这种方法不能用来直接测定中子能量，主要用来测定中子通量。由于核裂变法的特点是放出的反应能很大，因此 γ 本底对测量没有什么影响，用裂变法可以在强 γ 本底下测量中子。

表 11.1 三种裂变材料的热中子裂变截面

核	σ_f (b)
^{235}U	583.5 ± 1.3
^{239}Pu	744.0 ± 2.5
^{233}U	529.9 ± 1.4

许多重核只有在入射中子能量大于某个值（称为阈值）后才能发生裂变。例如 ^{238}U ，当入射中子能量大于1.5MeV后才能发生裂变。我们可以利用一系列具有不同阈能的裂变元素来判断中子的能量，这种探测器称为“阈探测器”。

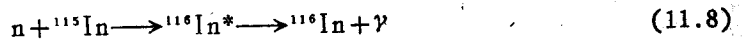
常用的裂变阈探测器材料见表11.2。这些材料的裂变截面随中子能量的关系曲线如图11.5所示。

表 11.2 常用裂变阈探测器材料的特性

裂变材料	热中子裂变截面 (mb)	阈能 (MeV)	3MeV时的截面 (mb)	半衰期 (y)
^{232}Th	<0.2	1.3	0.19	1.41×10^{10}
^{231}Pa	10	0.5	1.1	3.28×10^{10}
^{236}U	<0.6	0.4	1.5	2.45×10^6
^{238}U	—	0.8	0.85	2.34×10^7
^{239}U	<0.5	1.5	0.55	4.47×10^8
^{237}Np	19	0.4	1.5	2.14×10^6

四、活 化 法

中子和原子核相互作用时，辐射俘获是很主要的作用过程。中子不带电，很容易进入原子核形成一个处于激发态的复合核，复合核通过发射一个或几个光子迅速跃回基态。这种俘获中子，放出 γ 辐射的过程称为“辐射俘获”，用 (n, γ) 表示。一个典型例子是用 ^{115}In 作激活材料，它受中子照射时发生如下反应：



新生成的核素一般都是不稳定的，例如上述例子中生成的 ^{116}In 就是 β 放射性的，衰变方式如下：



这种现象称为“活化”或“激活”，所产生的放射性称为“感生放射性”。测量经过中子辐照后材料中的放射性，就可知道中子的强度，这就是活化法。

综合以上所述，中子探测的四种基本原理，就是中子和原子核相互作用的四种基本作用过程。作为本节小结，我们把探测中子的四个基本过程列表如下，作一定性比较。

在不同的中子能区，这些作用过程的截面相差很大。所以对不同能区的中子要采用不同

的探测方法和探测器。由于中子作用截面一般都不大，所以中子探测效率，尤其是快中子探测效率是较低的。和 α 、 β 、 γ 辐射探测器相比，中子探测器的探测效率要低一些，过程也复杂一些，测量精度也低一些。

表 11.3 中子探测的基本方法

方法	中子和核的作用	所用材料 (辐射体)	截面 (b)	用途
核反应法	$(n, \alpha)(n, p)$	$^{10}\text{B}, ^6\text{Li}, ^3\text{He}$	~ 1000	热、慢中子通量
核反冲法	(n, n)	H	~ 1	快中子能量
核裂变法	(n, f)	$^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$ 等 阈能 ^{238}U 等	~ 500 ~ 1	热中子通量
活化法	(n, γ)	In, Au, Dy	热中子 ~ 100 共振中子 ~ 1000 快中子 ~ 1	中子通量

探测中子时，在大多数情况下，中子辐射场总是伴随存在 γ 辐射，而中子探测器往往对 γ 射线也有一定的响应。所以探测中子时，常遇到中子和 γ 的甄别问题。

第二节 常用的中子探测器

根据上述探测中子的基本原理，可以看出中子的探测过程可分为两个步骤。第一，由中子和核的某种相互作用产生带电粒子；第二，用某种探测器记录带电粒子。而带电粒子的探测器品种繁多，所以中子探测器的种类也很多。它们各有不同的性能和特点，适用于不同场合。这里选择一些目前常用的中子探测器作些介绍。

一、气体探测器

(一) 三氟化硼 (BF_3) 正比计数管

测量中子最通用的是三氟化硼正比计数管，通常称 BF_3 计数管。它的结构基本上和测量 γ 射线的G-M管一样，只是管内充的是 BF_3 气体。热中子通过 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应在计数管内产生离子对，再经气体放大输出电信号。这种计数管测量热、慢中子的效率都很好，在计数管外面套上一层石蜡或塑料慢化剂，也可用于记录快中子。现在工业上定型生产的 BF_3 计数管规格是：外径25—35mm，长200—600mm，所充 BF_3 气体压力约760mmHg，其中 ^{10}B 浓缩到95%以上，工作电压2000V左右。我国生产的几种 BF_3 计数管性能见表11.4。

1. 输出脉冲幅度及其分布

中子射入计数管，由 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应产生 α 和 ^7Li 原子核，他们必然以相反方向飞开。反应放出的能量2.792MeV(6.1%)或2.31MeV(93.9%)，应由 α 和 ^7Li 核分配，他们的能量可以根据动量和能量守恒定律计算得出。

若忽略入射中子带来的动量和能量(由于 $E \ll Q$)，并用 m_1 和 m_2 表示 α 和 ^7Li 核的质量，用 v_1 和 v_2 表示它们的速度，则有

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$$

表11.4 BF₃正比计数管性能表

型 号	外 径 (mm)	总 长 (mm)	热中子灵敏度* (cps/nv)	坪 长 (V)	电 容 (pf)	耐γ强度** (μR/s)
SZJ-1	27	236	> 2	400	< 5	2×10 ³
SZJ-2	27	600	> 8	500	7	1×10 ⁴
SZJ-3	27	336	> 2	400	< 5	2×10 ³
SZJ-4	27	426	> 7	500	5	> 2×10 ³
SZJ-5	12	410	> 2	400	< 5	2×10 ³

*热中子灵敏度指在单位中子通量照射下,此计数管给出的计数率;

**耐γ强度指计数管在此照射率情况下仍能正常工作。

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = Q$$

因 $m_1/m_2 = 4/7$, 解联立方程可得 α 粒子的能量为 $(7/11)Q$, 而 ${}^7\text{Li}$ 核得到 $(4/11)Q$ 。所以, 在大多数情况下 (93.9%), α 粒子的能量为 1.47MeV, ${}^7\text{Li}$ 的能量为 0.84MeV。能量为 1.5MeV 的 α 粒子在 BF₃ 计数管中的射程约为 1cm, ${}^7\text{Li}$ 在 BF₃ 中的射程要短一些, 这两种粒子产生的电离作用是相近的。假定 α 和 ${}^7\text{Li}$ 的射程都在计数管有效体积内, 他们产生的离子对总数就等于 $\frac{2.31 \times 10^6 \text{eV}}{w}$, w 是在 BF₃ 气体中平均产生一对离子要消耗的能量, 约为 30eV。

所以, 一个中子和 ${}^{10}\text{B}$ 作用后产生的离子对数为 $\frac{2.31 \times 10^6}{30} = 77000$ (对)。假如 BF₃ 计数管的电

容是 4pf。这些离子数引起的脉冲电压变化大约是 $\frac{77000 \times 1.6 \times 10^{-19}}{4 \times 10^{-12}} = 3$ (mV)。正比计数管的

放大倍数约为 10 倍, 所以计数管最后输出的脉冲幅度约为 30mV, 需要经过放大才能记录。

在测量中子时往往混杂着 γ 射线, γ 射线在计数管壁上打出的电子也能引起电离, 而电子的射程要大得多, 在计数管灵敏体积内损耗能量产生的脉冲信号是比较小的, 靠一定的甄别阈可以把这些 γ 本底脉冲去掉。图 11.6 给出一个 BF₃ 计数管的脉冲幅度分布。图中, A 部分相当于 γ 本底; B 则相当于 93.9% 的过程给出的脉冲信号, 在这个过程中, 放出 0.478 MeV γ 射线, 由于 γ 比 α 的电离比值小得多, 这部分能量几乎没有消耗在计数管内, 所以脉冲幅度谱中的 B 峰对应于总能量 2.31MeV; C 相当于 6.1% 的过程 (反应能为 2.78MeV) 给出的脉冲信号。计数管性能越好, B 峰就越窄, 一般半宽度约为峰高的 10%。测量时, 选择甄别电压 V_d 在 A 与 B 之间计数最小的地方, 这样既能去除 γ 本底, 又能使中子计数峰 B, C 全部记录。当 γ 本底十分强时, 小幅度的 γ 脉冲会叠加, 以致使能谱连续, 在 γ 和中子脉冲之间无明显的界线可区分, 在此情况下, 要在输入级内加入微分电路, 使脉冲宽度变窄, 从而减少 γ 脉冲叠加的几率。

2. 坪特性

选取一定的甄别阈以后, 改变高压, 则得到 BF₃ 正比计数管的坪曲线, 它的形状和 G-M 管的坪曲线相似, 只是 BF₃ 计数管的坪曲线随甄别阈的选取有较大的变化。在屏蔽得很好, 选择合适甄别阈的条件下, 坪斜率会小于 1%, 坪长可达 500V 以上。

3. 效率

正比计数管记录 α 或 ${}^7\text{Li}$ 核的效率可以认为是100%。中子是通过 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应产生 α 和 ${}^7\text{Li}$ ，然后被记录的。所以，BF₃ 正比管探测中子的效率就是：和 ${}^{10}\text{B}$ 发生反应的中子数与入射中子数之比。

BF₃ 计数管的效率可作如下估算。假定在计数管内中子通量 ϕ 是均匀的，计数管的有效体积是 $V = \pi r^2 l$ ， r 和 l 分别是计数管的半径和有效长度。当中子是垂直于计数管轴向射来时，在计数管剖面 S 上入射中子数为 $S\phi = 2rl\phi$ ，在计数管体积 V 内与 ${}^{10}\text{B}$ 发生反应的中子数为 $\phi V n \sigma = \phi \pi r^2 l n \sigma$ ， n 为单位体积中 ${}^{10}\text{B}$ 的原子数， σ 是作用截面。根据定义，效率为

$$\varepsilon = \frac{\phi \pi r^2 l n \sigma}{2rl\phi} = \frac{\pi}{2} r n \sigma$$

$\frac{\pi}{2} r$ 就是入射中子在横向通过计数管时的平均距离。单位体积中的 ${}^{10}\text{B}$ 核数可由阿伏伽德罗常数计算得出，一克分子的气体体积为 22400 cm³，分子数为 6.022×10^{23} 个，所以单位体积中 BF₃ 气体分子数为 2.7×10^{19} /cm³。天然硼中 ${}^{10}\text{B}$ 的含量为 19.8%，如管内所充 BF₃ 的气压为 600 mmHg。对热中子， ${}^{10}\text{B}$ 的截面值 $\sigma_0 = 3840 \text{b}$ 。如计数管的内径 r 为 2 cm，则此计数管的效率为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 2.7 \times 10^{19} \times 0.198 \times \frac{600}{760} \times 3840 \times 10^{-24} \times \frac{\pi \times 2.0}{2} \\ &= 0.05 = 5\% \end{aligned}$$

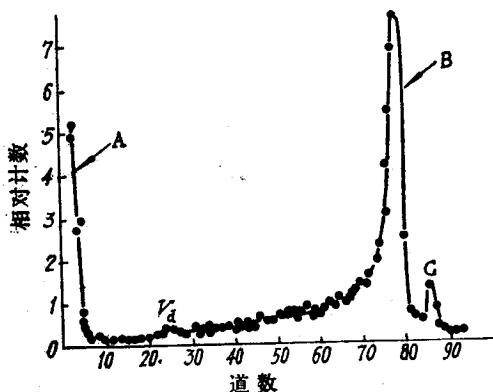


图11.6 BF₃计数管的脉冲幅度分布

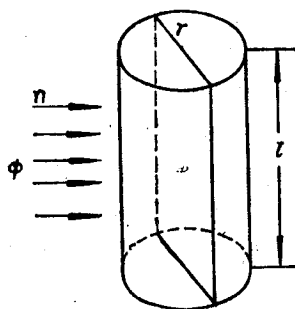


图11.7 BF₃计数管效率估算简图

如果中子是沿着计数管轴向入射，经过的有效距离长，效率也将高一些。当采用 ${}^{10}\text{B}$ 含量为 96% 的 BF₃ 气体时，效率可提高 5 倍左右。

对于慢中子， ${}^{10}\text{B}$ 的截面是按 $1/v \sim E^{-1/2}$ 变化的，所以中子能量愈大，效率愈低。

BF₃ 气体的化学性质非常活泼，和有机物质和大多数金属都能发生作用，因此计数管的外壳总是选择高纯度的稳定金属，例如经过处理的铜或不锈钢。绝缘材料不能用有机物，要选用陶瓷或氟塑料。制造过程中也不能用油扩散泵而要用水银扩散泵。BF₃ 气体和水汽接触立即生成腐蚀性很强的氢氟酸 (HF)。氢氟酸对各种金属，甚至对玻璃都能起腐蚀作用。因此在制备计数管时要尽量防止水汽混入计数管。