

中子探测技术

上海仁机仪器仪表有限公司

- ❖ 重点：
 1. 中子性质及其与物质的作用形式
 2. 中子的探测方法
 3. 中子探测器
- ❖ 难点：
 1. 中子能谱测量
 2. 中子通量测量
- ❖ 要求：
 1. 掌握两种中子探测方法——核反应和核反冲法
 2. 了解常用中子探测器的工作原理
 - a. BF_3 正比计数管
 - b. 闪烁探测器——ZnS快中子屏，Li玻璃闪烁体
 - c. 半导体中子探测器

内容：

第一节 基础知识

第二节 探测的基本原理

第三节 常用的中子探测器

第一节 基础知识

中子的基本性质

- ❖ 1.不带电 静止质量 $m_n=1.67495 \times 10^{-24}g$
- ❖ 2.中子分类（按能量高低—即运动速度划分）
 - （1）慢中子： 能量为 $<1keV$ ；
 - （2）中能中子： 能量为 $1—100keV$ ；
 - （3）快中子： 能量为 $0.1—20MeV$ 。
- ❖ 慢中子又分： 超热中子： $E_n > 0.0253eV—1Kev$
 - 热中子： $E_n = 0.0253eV$
 - 冷中子： $E_n < 0.0253eV$
- ❖ 分子热运动的最可几能量 $=0.0253eV$

中子的应用

1. 上世纪三十年代 $n + {}^{235}\text{U}$ —核裂变—核爆
2. 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、中子治癌
3. 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。

中子与物质作用形式

- 1.产生带电粒子的核反应 (n,a)
- 2.核反冲（散射） (n,n')
- 3.活化 (n,r)
- 4.核裂变 (n,f)

第二节 探测的基本原理

1.核反应法

1.1原理：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。

1.2 目前应用得最多的以下三种核反应:



(1) $Q>0$ 放热反应

(2) σ_0 为热中子的反应截面

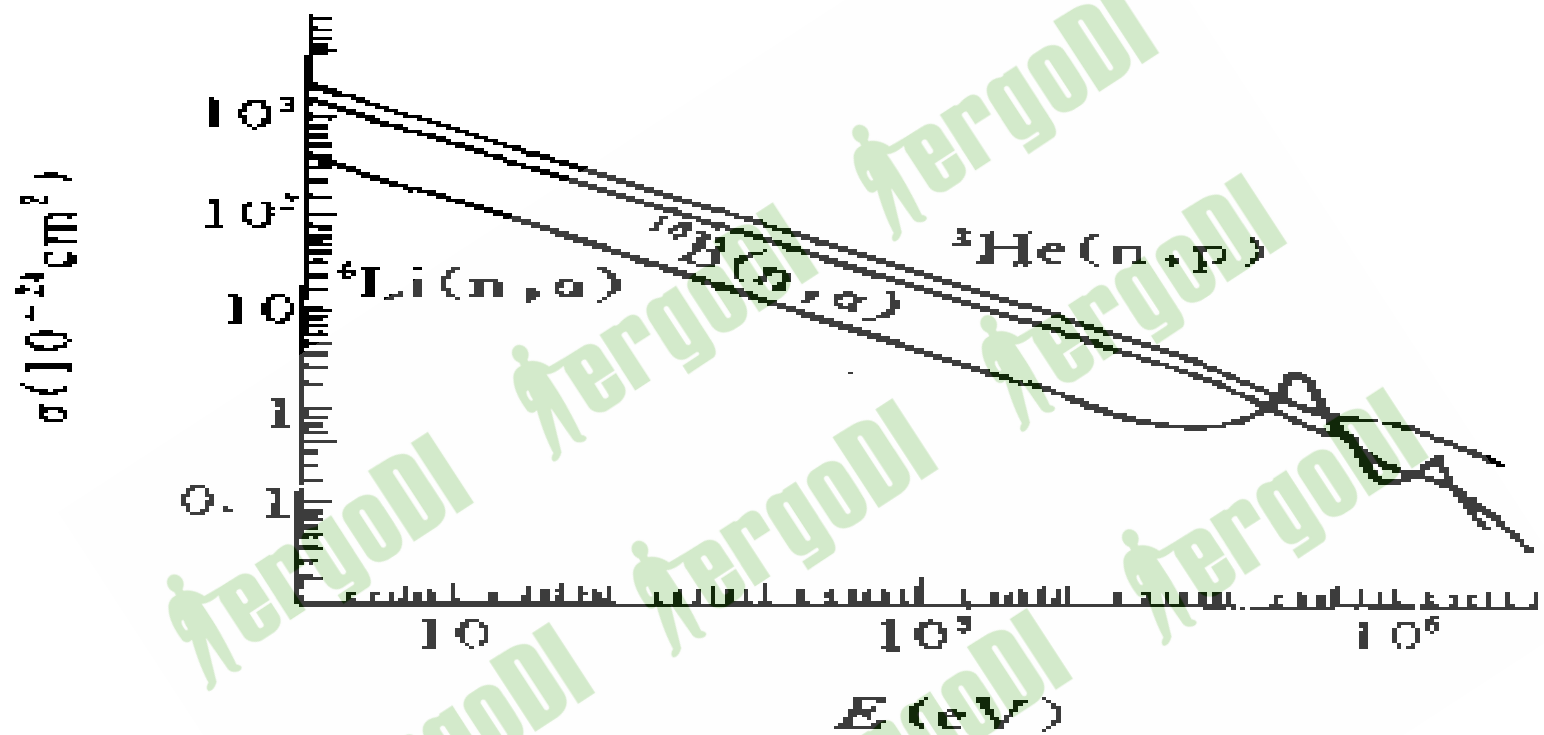
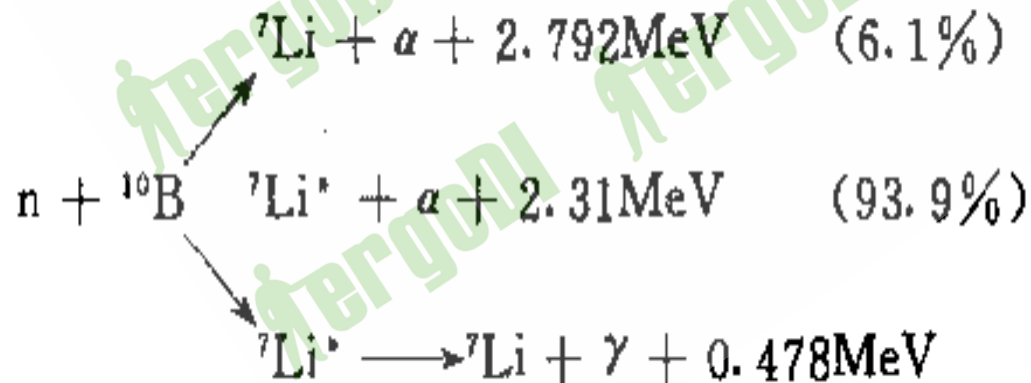


图 11.1 ${}^{10}\text{B}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{He}$ 三种核的中子核反应截面

1.3 $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ 反应

B易获得， ^{10}B 的丰度为19.8%，可方便浓缩至96%以上

此反应目前应用最广 BF_3 （固体 B_2O_3 、 B_4C ）中子与 ^{10}B 作用有两种反应过程，即



1.4 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反应

- ❖ 优点：Q大，n和 α 易甄别
- ❖ 缺点：Li没有合适的气体，且 ${}^6\text{Li}$ 丰度低，只有7.5%，浓缩后价贵。

1.5 $^3\text{He}(n,p)$ 反应

优点: σ_0 最大

缺点: Q低, n与r不易分开; 天然氦气中 ^3He 含量低, 只有1.4ppm, 所以 ^3He 价贵

2.核反冲法

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。

❖ 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：

$$E_p = E \cos^2 \phi$$

Φ —反冲质子的出射角

(1) $\Phi=0^\circ$ 时，正面对撞， E_p 最大= E_0

(2) $\Phi=10^\circ$ 时， $\cos \Phi=0.9848$ ，
 $\cos^2 \Phi=0.97$ ，则 $E_p=0.97E$

所以测 E_p 得到 E_n ，即当 Φ 从 $0-10^\circ$ 变化时， E_p 只改变3%

● 一般探测 $\pm 10^\circ$ 范围内的反冲质子，从而测定中子的 E 和 I

3.核裂变法

- 1)中子与重核作用可以产生核裂变
- 2)裂变法就是通过记录重核裂变碎片来探测中子的方法
- 3)对于热中子、慢中子，一般选 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U 做裂变材料。
- 4)裂变时放出的能量很大（大约200Mev）， E_n 远小于这个数值
所以本法不能用来测定中子能量，只能测定中子通量
- 5)由于Q值很大，所以 γ 本底的影响很小，故可以在强 γ 本底下测量中子
- 6) E_n 大于某个值（阈值）时，才能产生裂变
核素不同，则阈值也不同
因此，可以用一系列阈值来判定中子的能量范围

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 (10^{-27}cm^2)	阈能 (MeV)	3MeV 时的截面 (10^{-27}cm^2)	半衰期 (a)
^{232}Th	<0.2	1.3	0.19	1.41×10^{10}
^{231}Pa	10	0.5	1.1	3.28×10^{10}
^{234}U	<0.6	0.4	1.5	2.45×10^5
^{236}U	—	0.8	0.85	2.34×10^7
^{238}U	<0.5	1.5	0.55	4.47×10^9
^{237}Np	19	0.4	1.5	2.14×10^6

4.活化法

- 1.中子速度很快时（快中子），散射是主要方式
- 2.当En很小时，辐射俘获是主要的作用过程

即中子进入原子核，形成复合核（新核），新核通过辐射 γ 射线（一种或几种）而迅速回到基态。用 (n, r) 表示

例如

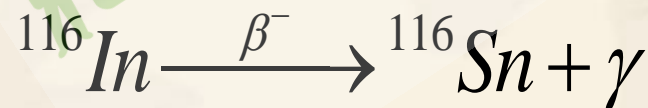
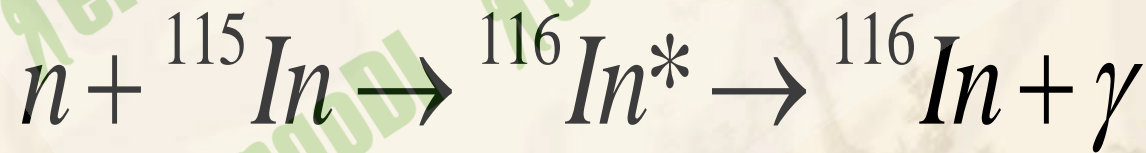


表 11.3 中子探测的基本方法

方法	中子和核的作用	所用材料 (辐射体)	截面(10^{-24}cm^2)	用途
核反应法	$(n,\alpha)(n,p)$	$^{10}\text{B}, ^6\text{Li}, ^3\text{He}$	~ 1000	热、慢中子通量密度
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	~ 500	热中子通量密度
		阈能 ^{238}U 等	~ 1	
活化法	(n,γ)	In, Au, Dy	热中子 ~ 100	中子通量密度
			共振中子 ~ 1000	
			快中子 ~ 1	

第三节 常用的中子探测器

中子探测过程：

- (1) 由中子和核的某种相互作用产生带电粒子
- (2) 用某种探测器记录带电粒子

分类

一、气体探测器：

- (1) 三氟化硼正比计数管
- (2) 硼电离室和裂变室

二、闪烁探测器

- (1) 硫化锌快中子屏
- (2) 硫化锌慢中子屏
- (3) 锂玻璃闪烁体
- (4) 有机闪烁体

三、半导体探测器

四、其它中子探测器

- (1) “自给能”探测器
- (2) 固体径迹探测器

三氟化硼正比计数管

- ❖ (1)结构:与G-M管一样,只是其内充有 BF_3 气体
- ❖ (2)工作原理: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,再经气体放大作用输出电信号
- ❖ (3)特点:
 - ❖ a.对热中子、慢中子的探测效率都很高
 - ❖ b.在计数管外面套上一层石蜡或塑料慢化剂,也可测快中子
 - ❖ c.体积大,灵敏度较高

(4)性能指标

热中子灵敏度：1—10（最大到40-50） S^{-1}/nv

坪长：200—500v

寿命： $\geq 10^{10}$ （计数）

高压：2000v

耐 γ 辐射强度：2000—10000 $\times 10^{10}c/kg \cdot s$

分辨率： $<20\%$

- 热中子灵敏度—指在单位中子通量照射下，计数管给出的计数率
- 耐 γ 辐射强度—指计数管在此照射率情况下仍能正常工作

硫化锌快中子屏

- (1) 工艺：将ZnS(Ag)粉与有机玻璃粉均匀混合，热压成型而得
- (2) 原理：快中子在有机玻璃中产生的反冲质子（散射作用），使ZnS(Ag)发光而被记录
- (3) 特点：效率高，对快中子达到1—2%

铯玻璃闪烁体

- ❖ (1) 工艺结构：在有机玻璃中掺入铯(Ce)激活的氧化铯制成铯玻璃
- ❖ (2) 原理： ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 产生 α 和T使闪烁体发光
- ❖ (3) 特点：
 - a. 适用En较宽，热中子
 - b. 对热中子的探测效率高
 - c. 耐酸，耐化学腐蚀，耐潮湿，耐高低温，适合在恶劣条件下使用
 - d. γ 干扰较大

半导体探测器 (${}^6\text{LiF}$)

- (1) 特点：体积小、响应快、对 γ 不灵敏、可测中子能量和通量
- (2) 结构：夹心式中子谱仪将两个金硅面垒型半导体探测器面对面地靠在一起，中心夹一层含 ${}^6\text{Li}$ 的薄膜

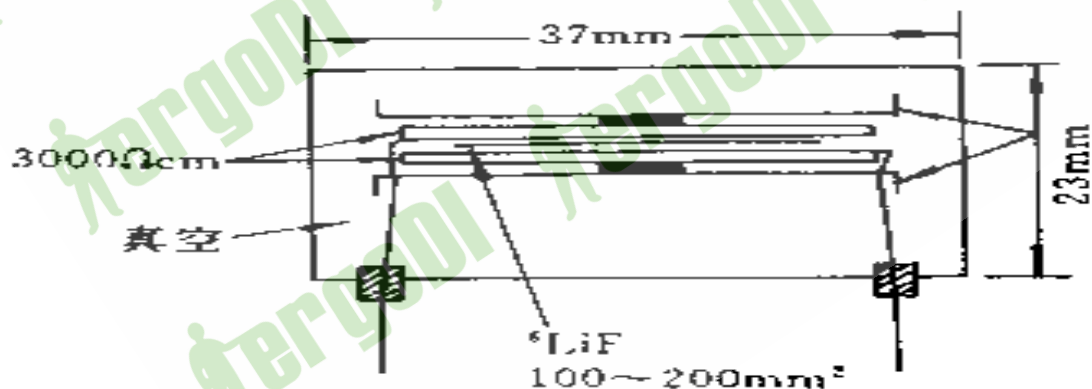


图 11.15 ${}^6\text{LiF}$ 半导体中子谱仪

(3) 原理：利用 ${}^6\text{Li} (n, \alpha) \text{T}$ 产生 α 和T，分别被两个探测器记录，输出脉冲并接到相加电路。故脉冲幅度相当于入射 $E_n +$ 反应能Q

因为 $Q = 4.786 \text{ Mev}$ $E_n = \text{几 Mev}$

总能量 $E = E_n + Q$ 约为 10 Mev

(4) 能量分辨率：

对 E_n 为 0.5 Mev ，半宽度大约是 70 Kev

(5) 用途：测量反应堆的快中子能谱

$E_n = 10 \text{ Kev} \text{—} 6 \text{ Mev}$

小结

1. 四种基本形式——四种探测中子的方法
2. E_n 不同时，这些作用的截面相差很大
对于不同能量的中子，采用不同的探测方法和中子探测器
3. 由于中子作用的截面一般都不大，所以中子探测效率较低。
特别是探测快中子的效率是很低的，过程也较复杂。
中子的探测精度一般较 α 、 β 、 γ 、 x 等要低
4. 大多数情况下， n 和 r 总是伴随产生
而中子探测器往往也对 γ 射线有一定的响应（探测效率）
5. 中子探测的基本方法比较