

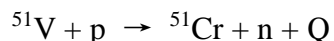
第三章 中子探测器的效率刻度

中子探测阵列通过 Geant4 蒙特卡洛模拟确定含硼聚乙烯和聚乙烯慢化体的厚度、 ^3He 正比计数管的参数和位置以及排布方式之后，进行加工，完成组装。但是，加工过程存在误差（例如， ^3He 管中 ^3He 和 Ar 的含量和比例、 ^3He 管外壁的厚度和材料成分以及 ^3He 的摆放位置等等），都会对中子探测阵列的效率造成影响。最重要的是，Geant4 模拟中子在聚乙烯中的慢化过程与实际情况存在差异，这将会使中子探测阵列的模拟效率与实际效率存在严重的分歧。因此需要实验刻度中子探测阵列的效率与模拟结果进行比较，然后对模拟效率进行缩放、外推来得到感兴趣范围内的探测效率。

中子探测器效率刻度是一个非常困难的工作，因为这需要一个单能且各向同性的中子源。我们常见的放射性中子源，例如：Am-Be、Pu-C、 ^{252}Cf 等，虽然是各向同性的，但是能量是连续的；加速器中子源，例如： $\text{D}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$ 、 $\text{T}(\text{p}, \text{n})^3\text{He}$ 虽然是单能的，但是角分布确实各向异性的。而 $^{51}\text{V}(\text{p}, \text{n})^{51}\text{Cr}$ 反应是为数不多的单能且各向同性的中子源反应，因此被广泛用于中子探测器的效率刻度。本章对使用 $^{51}\text{V}(\text{p}, \text{n})^{51}\text{Cr}$ 反应进行探测器效率刻度进行详细介绍。

3.1 $^{51}\text{V}(\text{p}, \text{n})^{51}\text{Cr}$ 反应介绍

这个核反应的表达式为



其中 $\text{Q} = -1535 \text{ keV}$ ，这个反应是吸能的，对应于实验系下的反应阈值为 1565 keV 。以质子能量为 2 MeV 为例，通过 LISE++ 计算能量随角度的变化关系如图 3.1 所示。能量随角度的变化非常小，因此可以认为这个反应发射中子的能量是各向同性的。但是随着质子能量的升高，可以布居到 ^{51}Cr 的激发态。 ^{51}Cr 的能级纲图如图 3.2 所示。 ^{51}Cr 在 749 keV 处有一个激发态，对应于入射质子的能量为 2.33 MeV 。当入射质子的能量超过 2.33 MeV 时，发射的中子有两种来源，一种是布居到 ^{51}Cr 基态发射的中子，另一种是布居到 ^{51}Cr 激发态发射的中子，这时中子的能量不再是

单能的。因此这个反应只适用于质子能量小于 2.3 MeV，对应于中子能量小于 750 keV 中子探测器的效率刻度。

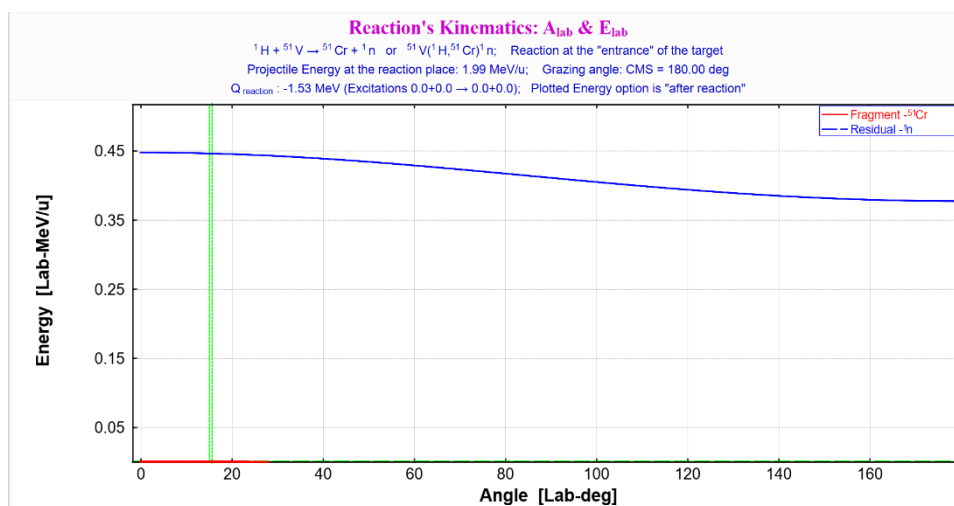


图 3.3 能量随角度的变化关系
 Fig.3.3 Page setting graph of paper

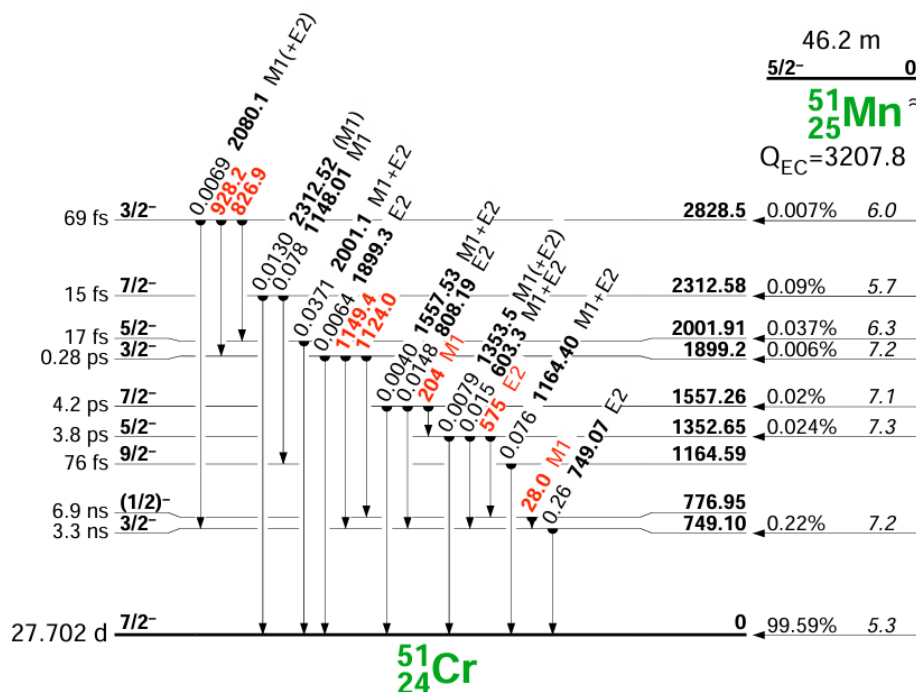


图 3.2 ^{51}Cr 的能级纲图
 Fig.3.2 Page setting graph of paper

图 3.3 给出了当质子能量为 2.5 MeV 时， $^{51}\text{V}(p, n)^{51}\text{Cr}$ 反应两种中子能量随角度的变化关系。

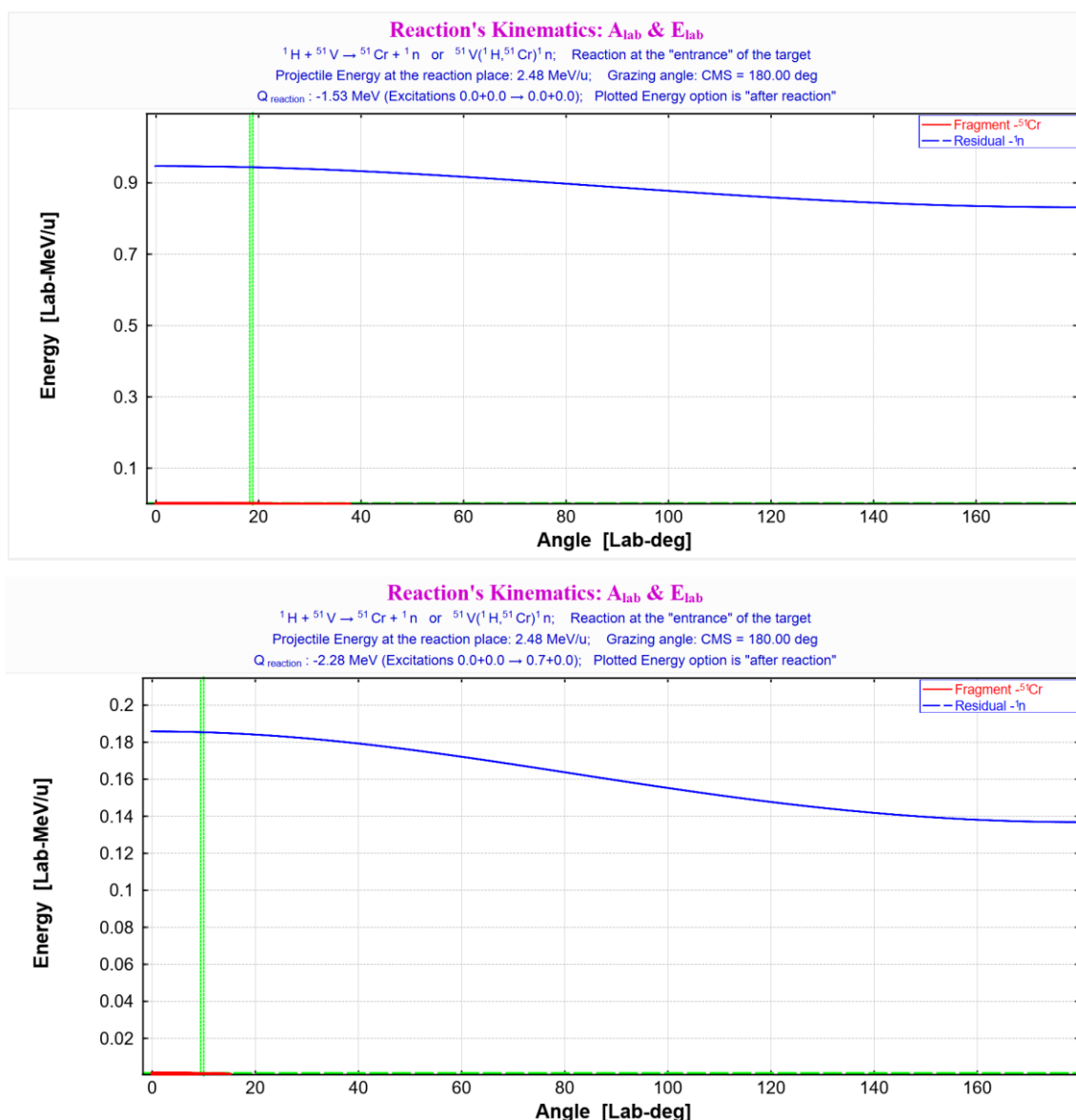
图 3.3 质子能量为 2.5 MeV 时, $^{51}\text{V}(\text{p},\text{n})^{51}\text{Cr}$ 反应两种能量随角度的变化关系

Fig.3.3 Page setting graph of paper

3.2 刻度能量点的选择

由于 $^{51}\text{V}(\text{p},\text{n})^{51}\text{Cr}$ 反应在 $E_p=2330 \text{ keV}$ 以下发射的中子能量是单能的, 所以中子探测阵列效率刻度选择的质子能量范围在反应阈值 1565 keV 到 2330 keV 之间。由于这个反应中子的角分布几乎是各向同性的, 根据 Q 方程 (θ 取 90°)

$$E_n = \frac{A_B - A_a}{A_B + A_b} E_a + \frac{A_B}{A_B + A_b} Q$$

其中, A_a 、 A_b 、 A_B 分别是质子、中子和 ^{51}Cr 的质量数, E_a 是质子的入射能量, Q 是 $^{51}\text{V}(p,n)^{51}\text{Cr}$ 反应的 Q 值。计算得到质子能量在 1600 keV 到 2300 keV 之间, 步长为 100 keV 对应的中子能量见表 3.1。

表 3.2 中子探测器效率刻度选择的能量点
Table 3.2 The parameters of

质子能量(keV)	中子能量(keV)
2300	706
2200	610
2100	514
2000	418
1900	322
1800	225
1700	129

将表 3.1 中的 7 个能量点作为刻度的能量点进行中子探测阵列的效率刻度, 这 7 个质子能量对应的中子能量随着角度的变化会有微小的波动, 但是由于我们中子探测阵列的设计是中子能量在 0-2 MeV 以内, 探测效率对能量的依赖非常小(小于 0.5%), 因此中子能量角分布的变化对中子探测阵列效率的影响可以忽略不计。所以, 我们可以近似认为表 3.1 中相应能量的入射质子产生相应能量的单能中子。

3.3 ^{51}V 靶的制备

钒(V)的同位素半衰期比较长的有两个, 一个是处于稳定状态的 ^{51}V , 一个是半衰期为 2.65×10^{17} 年的 ^{50}V , 但是 ^{51}V 的天然丰度(99.75%)远高于 ^{50}V 的天然丰度(0.25%)。**(这里需要询问王老师高老师和制靶老师 ^{50}V 和质子反应或者其贝塔衰变之后生成的 ^{50}Ti 与质子反应是否会对本实验产生干扰)**因此, ^{51}V 靶的制备可以采用真空蒸发法将天然的钒蒸镀到钽(Ta)衬底上。 ^{51}V 靶蒸镀的厚度一般为几十微克每平方厘米**(具体厚度需要与制靶老师商量)**, 这样的厚度对应于质子能量在 1700 keV 到 2300 keV 的厚度为几个 keV, 对应与中子能量的变化也在几个 keV 左右。因为我们中子探测阵列的设计在 0-2 MeV 的中子能量范围, 中子的探测效率对能量的依赖非常小, 可以忽略不计。因此这样厚度的靶, 我们不需要考虑质子在靶的不同位置发生核反应, 对产生中子能量微小变化的影响, 可以认为是质子在靶

表面发生的核反应。

刻度的能量点一共有 7 个，每个能量点需要一块靶，为了防止靶在运输和实验安装过程中损坏，因此需要最少准备 10 块靶(此处没有考虑效率随位置变化所需要的靶)以及一块干净的钽衬底来评估实验过程中束流带来的中子本底。

3.4 中子数量的确定

中子探测器探测效率的确定是用探测器探测到的中子数量除以核反应过程发射的中子数量。

探测器探测到的中子数量为整个实验过程中探测器实际探测的数量，这里需要特别注意的是，内圈的 ^3He 正比计数管的计数率很高，因此需要脉冲发生器来监控内圈 ^3He 正比计数管的死时间，使其死时间控制在 0.1% 以内。如果实验过程中死时间过大，需要及时减小流强。

核反应过程发射的中子数量一般通过束流强度、靶厚以及截面的关系进行计算，如公式 3.1 所示

$$N' = \sigma I N_s$$

其中 N' 是核反应过程中发射的中子数量， σ 是核反应截面或称为有效核反应截面， I 是入射束流的强度， N_s 是单位面积上靶原子的数量。用这个公式计算的核反应过程中发射的中子数量受核反应截面的不确定度、束流强度的稳定性以及靶厚精确度的影响，一般偏差较大。使用 $^{51}\text{V}(p,n)^{51}\text{Cr}$ 反应进行中子探测器效率刻度的另一个主要优势是它不需要使用上面的公式计算核反应过程发射的中子数量。这是因为质子与 ^{51}V 反应产生的 ^{51}Cr 会通过 β 衰变回 ^{51}V ，并释放一条分支比为 9.88%、能量为 320 keV 的 γ 射线，这个衰变机制如图 3.4 所示。因此，可以通过用已知探测效率的高纯锗探测器对反应靶进行离线测量，进而得到核反应过程中发射的中子数量。这种方法由于不受束流强度、靶厚以及核反应截面不确定度的影响，具有非常高的精确度。

3.5 小结

综上所述， $^{51}\text{V}(p,n)^{51}\text{Cr}$ 反应发射的中子是单能且各向同性的，因此非常适合

用于中子探测器探测效率的刻度。另外， ^{51}V 是稳定元素，天然丰度远远高于具有长半衰期的同位素 ^{50}V ，这使得 ^{51}V 能够从天然的 V 中提取并制备成靶。而且 ^{51}V 与质子反应产生的 ^{51}Cr 会发生 β 衰变，又衰变回 ^{51}V 并同时释放一条 320 keV 的 γ 射线，这是由于这条 320 keV 的 γ 射线可以使我们通过测量它来计算核反应过程中发射的中子数量，从而避免了由于束流强度、靶厚以及核反应截面的不确定度所带来的误差。基于这些优点，从而使 $^{51}\text{V}(\text{p},\text{n})^{51}\text{Cr}$ 反应广泛用于中子探测器的探测效率刻度，例如。。。。。。。。值得注意的是，这个反应只适合用刻度中子能量在 0.7 MeV 以下探测器的探测效率，因为入射质子的能量超过 2.3 MeV 时，可以布居到 ^{51}Cr 的 749 keV 的激发态上，从而使发射的中子能量不再是单能的。

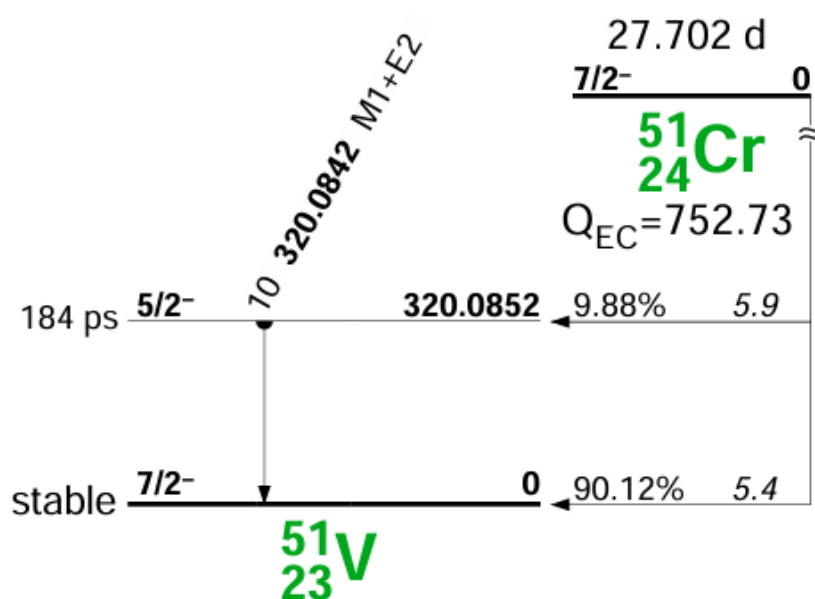
图 3.4 ^{51}Cr β 衰变纲图

Fig.3.4 Page setting graph of paper