

CNIC-01289

SINPC-0012

反射中子效应测量中的本底和可信性分析

王大伦 陈素和 励义俊 亢 武 黄卫东

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都, 610003)

摘 要

介绍了在反射中子效应实验中的中子本底测量方法和测量结果。从系统误差的角度, 分析了反射中子效应实验结果的可信性。在实验误差范围内, 实验值和理论值相符, 在近 50 个实验数据中有 50% 的实验值在 3%~5% 的误差范围内和理论值相符。

The Background and Reliability Analysis in the Measurement of Reflecting Neutrons Effect

(In Chinese)

WANG Dalun CHEN Suhe LI Yijun KANG Wu HUANG Weidong

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of
Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The measuring method and measured results of neutrons background in the experiment of reflecting neutrons effect are introduced. From point of view on system errors, the experimental results reliability of reflecting neutrons effect were analysed. The experimental results accord with the theoretical calculations in the range of experimental errors. The approximate values accord with the theoretical calculations values in the range of 3% to 5% errors.

引言

为了检验理论计算方法和所用的中子群参数,完成了系列的工程模拟实验。这里的反射中子效应实验是其中的实验内容之一。实验装置见图1。

测量的内容之一是在铁球壳表面 90° , 55° , 45° , 30° 处测量反射中子效应系数(中子能量大于 1.2 MeV 的情况下) $K(\theta)$ 值,这里, $K(\theta)$ 值的定义由下式给出:

$$K(\theta) = F_{\theta}^{\text{有}}(^{238}\text{U}) / F_{\theta}^{\text{无}}(^{238}\text{U}) \quad (1)$$

式中: $F_{\theta}^{\text{有}}(^{238}\text{U})$ 为在图1装置中,有反射体时,铁球表面 θ 角度处由 ^{238}U 产生的裂变率;

$F_{\theta}^{\text{无}}(^{238}\text{U})$ 为在图1装置中,无反射体时,铁球表面 θ 角度处由 ^{238}U 产生的裂变率。

14 MeV 中子穿过 127 mm 厚的重材料(如铁),再经 200 mm 厚的慢化吸收混合材料的慢化和吸收,到达铁球表面的中子已寥寥无几。在这种弱中子场下,测量铁球表面的裂变率分布时,大厅散射本底中子对裂变率分布测量的影响就突出了。尤其是用 ^{235}U 无阈探测器测量全能中子谱中子(热中子除外)的反射中子效应时,散射本底中子的影响直接关系到裂变率测量的精度和数据的可靠程度。因此,正确的测出散射本底中子对铁球表面上裂变率分布测量的影响,是本实验要解决的重点问题。实验的失败与成功取决于此。

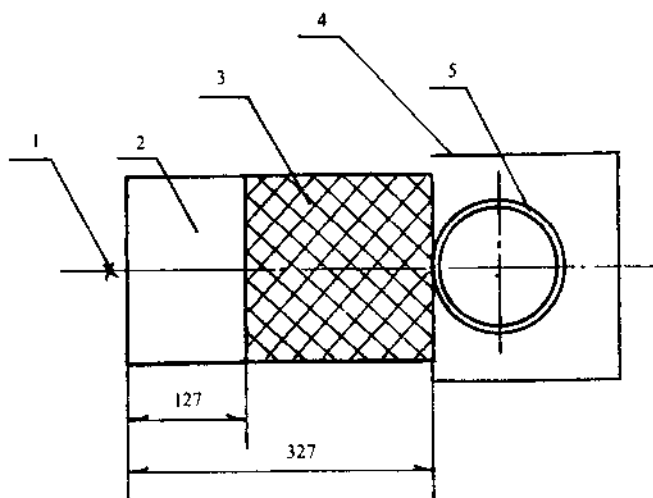


图1 反射中子效应系数实验测量装置

1——14 MeV 中子源; 2——铁; 3——慢化吸收组合材料; 4——反射体; 5——铁球壳。

1 反射中子效应实验中的本底测量

1.1 测量方法的确定

如图1所示,在装置中铁球表面上的裂变率主要由两种中子产生:一是信号中子,二是本底中子。信号中子就是14 MeV 源中子经过127 mm 铁和200 mm 慢化吸收混合材料的作用后,直接进入铁球表面的中子。反射中子效应就是指由这种信号中子在反射体的作用下对铁球表面裂变率分布产生的效应。这里的本底中子就是指大厅散射的本底中子,它通过两个途径进入铁球表面:一是大厅散射本底中子直接进入表面,二是大厅散射本底中子

通过 200 mm 的慢化吸收混合材料和反射体作用后再进入铁球表面。所以,测量大厅散射本底中子对裂变率分布的影响时,必须保证有图 1 这种 200 mm 慢化吸收混合材料及反射体。这就使本底中子对裂变率分布影响的测量方法的选择受到了限制。为满足上述要求,我们选择了屏蔽法测量大厅散射本底中子的影响。

使用屏蔽体屏蔽掉信号中子,仅使同样的大厅散射本底中子进入铁球表面。由此测量本底中子的影响。怎样保证屏蔽体能完全屏蔽掉信号中子,并在这种屏蔽体存在下使同样的大厅散射本底中子进入铁球表面,这是屏蔽体设计中要考虑的问题。

1.2 屏蔽体的结构

为了测量大厅散射本底中子,对 $F_0^{\text{中}}$ (^{238}U) 和 $F_0^{\text{热}}$ (^{238}U) 的影响,设计了两种形式的屏蔽体,见图 2 和图 3。

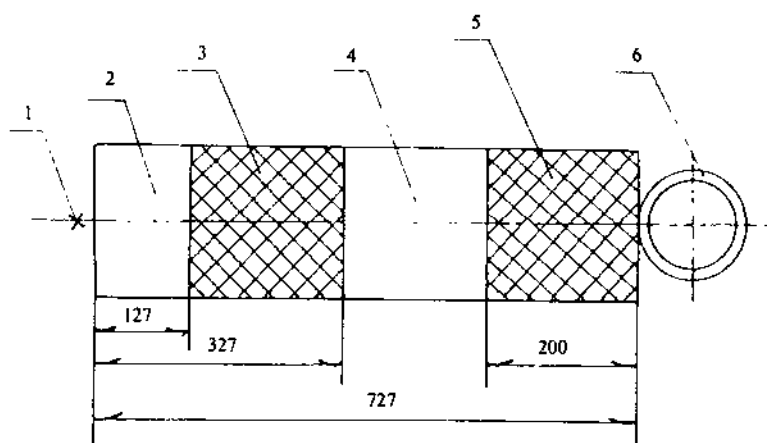


图 2 无反射体时的本底测量装置

- 1 14 MeV 中子源; 2——铁; 3——慢化吸收组合材料; 4——聚乙烯;
5——慢化吸收组合材料; 6——铁球壳。

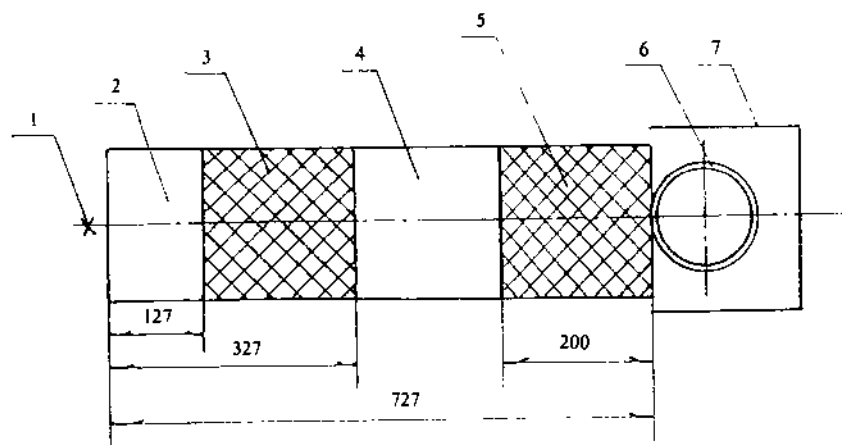


图 3 有反射体时的本底测量装置

- 1 14 MeV 中子源; 2——铁; 3——慢化吸收组合材料; 4——聚乙烯;
5——慢化吸收组合材料; 6——铁球壳; 7——反射体。

源中子和屏蔽体的作用过程如下: 14 MeV 源中子首先穿过铁锥, 主要通过非弹性散射过程使其慢化, 变为铁的蒸发谱中子。这种能量的中子是轻材料慢化起作用的能段。然后通过慢化吸收混合材料经弹性散射过程使其继续慢化, 并在慢化过程中不断吸收。使中子穿过这种混合材料后大大减弱, 相对讲这种中子能谱由于吸收作用变得较硬。接着进入聚乙烯屏蔽体中继续慢化, 这种能量较软的中子经慢化吸收混合材料进一步慢化和吸收, 直至信号中子全消除为止。图 2 和图 3 装置的结构形式满足了屏蔽体设计中的三点要求。

(1) 由于屏蔽体前材料结构和图 1 装置一致, 这样就保证了在图 1 和图 2、图 3 装置中跑入大厅参与大厅散射的初始中子是一致的。因此, 进一步保证了在用屏蔽体测到的大厅散射本底中子和图 1 装置中的本底中子是一致的。

(2) 由于屏蔽体中和铁球结合的屏蔽材料和图 1 装置中的材料一致, 这样就使大厅散射本底中子以同样的条件进入铁球表面, 因此用屏蔽法测出的大厅散射本底中子对铁球表面裂变率分布的影响和装置中本底中子的影响是一致的。

(3) 在图 2 和图 3 装置中, 考虑了通过改变聚乙烯厚度的方法来评估信号中子的衰减情况。

2 大厅散射中子本底的实验研究

2.1 研究的主要内容

用屏蔽法测量大厅散射本底中子对铁球表面裂变率分布影响时, 有两个问题需弄清:

- (1) 多厚的屏蔽体能将信号中子全屏蔽掉? 使其仅有大厅散射本底中子进入铁球表面?
- (2) 用屏蔽法测到的本底中子影响和图 1 装置中本底中子的影响, 由于两者的位置不同, 二者差异有多大? 测到的本底中子影响是否能代表图 1 装置中本底中子的影响?

为解决上述两个问题, 我们开展了铁球表面的裂变率随屏蔽体厚度变化规律的实验研究。

实验中用“小型平板裂变室”和“俘获探测器”测量铁球表面的绝对裂变率。 ^{235}U (浓缩铀) 和 ^{238}U (贫化铀) 裂变室和俘获探测器所用铀镀片的重量用 α 定量方法给出。所用浓缩铀和贫化铀材料的同位素成分由质谱仪分析给出。测出的裂变率经同位素修正后给出 ^{235}U 和 ^{238}U 的裂变率。14 MeV 中子源绝对强度用伴随粒子法测量。对于测到的裂变率都归一到一 α 粒子计数之下。

通过改变聚乙烯和混合材料的厚度的方法, 作铁球表面裂变率随屏蔽体厚度变化规律的研究。

2.2 实验结果

在几种不同情况下, 研究了裂变率随屏蔽体厚度变化规律及本底中子的变化情况。实验结果介绍于下:

- (1) ^{235}U 和 ^{238}U 裂变率随屏蔽体厚度的变化

在相同的实验条件下, 测量了 ^{235}U , ^{238}U 裂变率随屏蔽体厚度的变化及本底中子的影响。

- ① ^{235}U 裂变率随屏蔽体厚度变化的实验结果见图 4。

- ② ^{238}U 裂变率随屏蔽体厚度变化的实验结果见图 5。

图 4、图 5 结果说明:

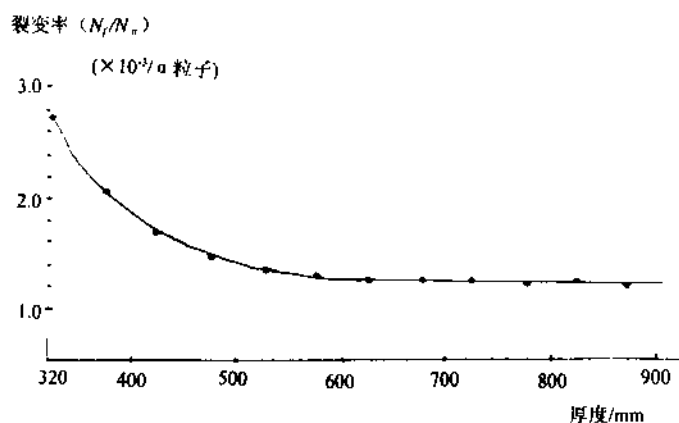


图 4 ^{235}U 裂变率随屏蔽体厚度的变化

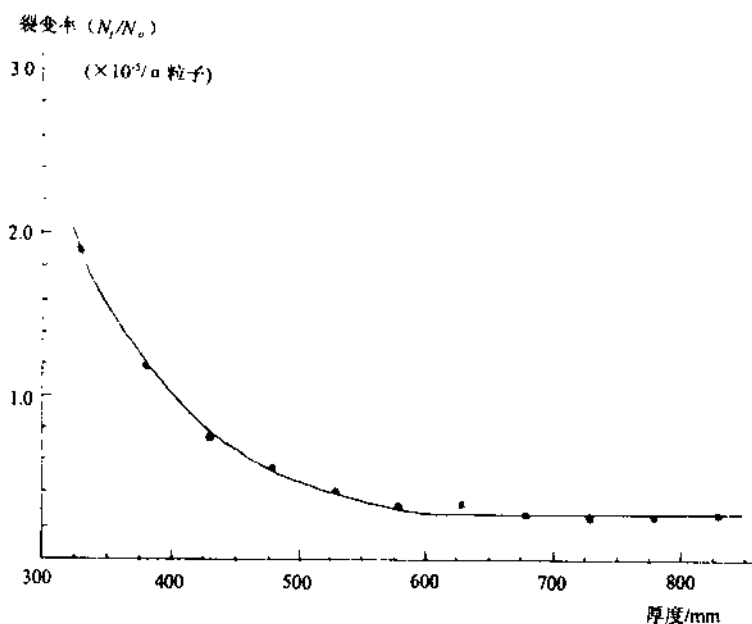


图 5 ^{238}U 裂变率随屏蔽体厚度的变化

(a) 当屏蔽体的厚度大于 600 mm 时, 裂变率的变化是一常数, 这说明屏蔽体的厚度小于 600 mm 时, 裂变率是由信号中子和本底中子产生的。屏蔽体厚度大于 600 mm 时, 裂变率仅由本底中子产生。因此 600 mm 厚的屏蔽体可以将信号中子屏蔽掉。

(b) 600 mm 厚的裂变率是一常数, 表明大厅散射本底中子在实验测量的距离内和距离 (距中子源心之距) 无关, 这样用屏蔽法在图 2、图 3 装置中测到的本底中子影响, 等同于图 1 装置铁球表面本底中子对裂变率的影响。

(c) 图 4 和图 5 表明: ^{235}U 和 ^{238}U 裂变率随屏蔽体厚度变化规律相同。在屏蔽体厚度大于 600 mm 时, 裂变率不随距离变化, 进一步表明大厅散射本底中子和距离无关, 在实验测

量的距离内大厅散射本底中子是一常数。

(2) 铁球表面不同角度下的裂变率随屏蔽体厚度的变化

用 ^{235}U 探测器测量了在铁球表面 55° 和 90° 角度处的裂变率及本底中子的影响。实验结果见图6。图6表明：铁球表面 90° 和 55° 方向上 ^{235}U 裂变率随屏蔽体变化的曲线走向不同，但规律相同，屏蔽体厚度大于600 mm时， ^{235}U 裂变率随厚度变化是一常数，这一事实又进一步表明大厅散射本底中子在实验测量的距离内是一常数。

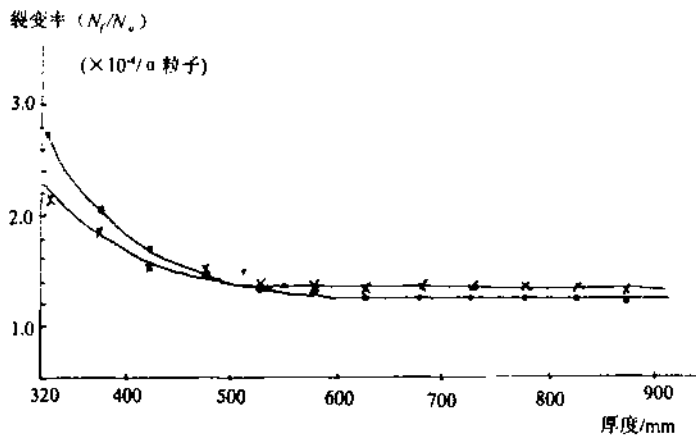


图6 90° 和 55° 方向上 ^{235}U 裂变率随屏蔽体厚度的变化

(3) 在不同结构的屏蔽体下裂变率随屏蔽体厚度的变化

为了研究不同结构的屏蔽体对裂变率和中子本底的影响设计了如图7结构形式的屏蔽体。

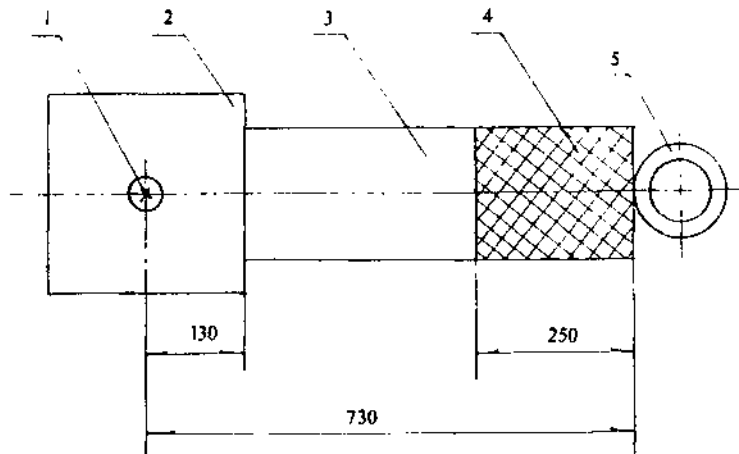


图7 另一种屏蔽体的结构形式

1 — 14 MeV中子源；2 — 混合材料；3 — 聚乙烯；4 — 慢化吸收组合材料；5 — 组合材料球。

在图7屏蔽体下,实验测量组合球内腔表面90°方向裂变率随屏蔽体厚度的变化实验结果见图8。

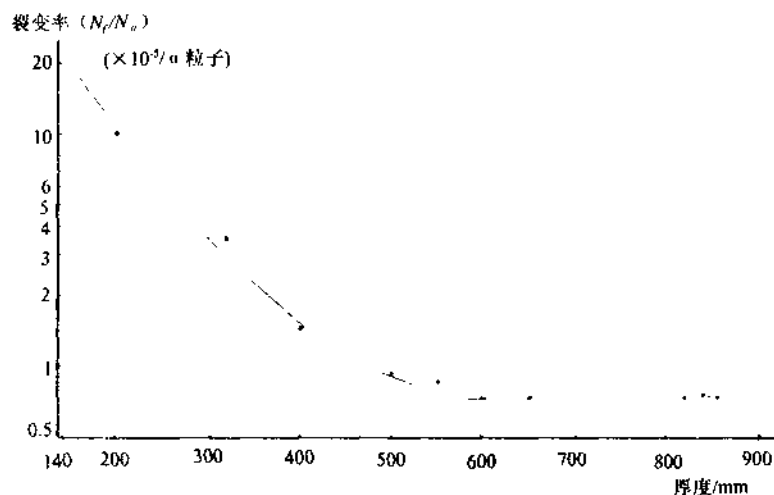


图8 组合球内腔90°方向²³⁵U裂变率随屏蔽体厚度的变化

将图8和图4曲线比较,两者变化规律相同,屏蔽体厚度大于600 mm,裂变率随屏蔽体厚度的变化都是常数。表明屏蔽体的结构形式不影响裂变率随屏蔽体厚度变化的规律。在实验测量的距离内,大厅散射本底中子是一常数,这一实验事实又一次被证实。

(4) 在不同加速器大厅中裂变率随屏蔽体厚度的变化

在三个加速器大厅中用屏蔽法研究了大厅散射本底中子对裂变率分布测量的影响。测量了裂变率随屏蔽体厚度变化规律。三个大厅的主要情况是:①K-400 大厅为水泥浇筑地面,地面至天花板的距离大于5 m,14 MeV 中子源距地面2.7 m,源和周围墙壁之距大于5 m。②T-400 大厅为钢板空心地面,厅高约4 m,源至天花板之距为2.5 m,至周围墙壁之距大于5 m。③839 加速器大厅为钢筋水泥地面(厚为1 m,下为地下室),厅高3.45 m,源至地面之距1.7 m,至周围墙壁之距大于4 m。

图4、图5、图8曲线是分别为839加速器大厅、K-400大厅、T-400大厅的实验结果。三个大厅中源中子散射条件不同。图4、图5、图8都表明屏蔽体大于600 mm时,裂变率随屏蔽体厚度变化是一常数,且都表明了600 mm厚的屏蔽体可以屏蔽掉信号中子,在实验测量的距离内本底中子是一常数,和距离无关。

(5) 屏蔽体结构和厚度的确定及中子本底测量结果

在完成了上述的中子本底实验研究后,根据实验中的结论,确定了如图2、图3所示的屏蔽体结构。屏蔽体的厚度取727 mm,这就更保证了信号中子全被屏蔽掉的要求。使用这种屏蔽体测量了大厅散射本底中子在铁球表面产生的裂变率分布及图1装置中铁球表面的裂变率分布。实验结果列于表1和表2。

表 1 本底中子和信号中子的²³⁵U 裂变率分布 (N_i 计数)

角度/ (°)	本底中子 (60 s)		信号中子 (60 s)		本底信号比	
	无反射体	有反射体	无反射体	有反射体	无反射体	有反射体
90	195±12	210±10	1289±36	2072±43	0.131±0.026	0.092±0.019
55	205±17	210±10	2073±29	2768±37	0.090±0.015	0.071±0.013
45	200±22	206±5	2365±29	3025±69	0.078±0.014	0.064±0.029
30	189±18	202±7	2750±38	3270±55	0.064±0.014	0.058±0.016

注: 本底信号比为本底中子计数除以信号中子计数加本底中子计数

表 2 本底中子和信号中子的²³⁵U 裂变率分布 (N_i 计数)

角度/ (°)	本底中子 ($\times 10^{-4}/\alpha$ 粒子)		信号中子 ($\times 10^{-4}/\alpha$ 粒子)		本底信号比	
	无反射体	有反射体	无反射体	有反射体	无反射体	有反射体
90	1.39±0.04	1.72±0.12	2.38±0.09	5.11±0.22	0.369±0.026	0.252±0.037
55	1.18±0.08	1.39±0.08	3.09±0.20	5.10±0.25	0.276±0.050	0.214±0.040
45	1.09±0.08	1.28±0.10	3.33±0.14	5.06±0.20	0.267±0.037	0.202±0.035

(6) 讨论

通过上述几个方面的实验研究, 对大厅本底中子有以下认识:

① 用屏蔽法测量 14 MeV 源中子产生的大厅散射本底中子时, 在 14 MeV 源中子首先经过钢的慢化及其后用轻材料慢化和吸收的条件下, 屏蔽体的厚度大于 600 mm 可将信号中子全部吸收掉。

② 在高大于 3.5 m 大厅内, 14 MeV 中子源处于距地面和天花板中心, 距周围墙壁之距大于 4 m 条件下, 和 14 MeV 中子源处于同一水平面上的大厅散射本底中子是一常数。至少在以源为中心的 1.5 m 水平面范围内大厅散射本底中子和距离无关, 本底中子强弱不变。这一实验首先使本底中子的测量变得简单并证明用屏蔽法测量本底中子是可行的。屏蔽法测到的本底中子就是参数测量处的本底中子。其次由于本底中子是一常数, 它产生的裂变率随屏蔽体厚度的变化也是一常数。这样我们才有了按裂变率随屏蔽体厚度变化曲线找出需多厚的屏蔽体能将信号中子屏蔽掉的依据。否则屏蔽掉信号中子的屏蔽体厚度是无法明确找到的。

③ 本底中子的测量对完成反射中子效应实验测量是一个关键, 解决了本底中子测量问题就为完成反射中子效应实验奠定了基础。否则这种实验是无法完成的。

3 反射中子效应实验结果的可信性分析

合理地完成了反射中子效应实验中的本底测量, 这就增加了反射中子效应实验结果的可信性。反射中子效应系数的实验误差约为 6%。这种实验结果是否可信? 给的误差是否合理? 这首先取决于实验结果中是否潜伏着系统误差。

实验误差通常分两类: 一是系统误差, 系统误差决定了实验结果的准确度 (可信性)。二是随机误差, 随机误差决定了实验结果的精确度。反射中子效应系数 6% 的标准误差就是这种随机误差。只有在实验测量中已消除了各种系统误差的基础上, 这种误差才有意义。否则这种误差就没有意义, 实验结果就不可信。

在完成反射中子效应实验中, 为了消除和发现系统误差或将系统误差减到最小的限度,

我们做了两方面工作：一是分析实验条件，找出影响实验的诸因素，引入修正值，以消除实验中的系统误差。二是改变实验条件，增加实验测量手段，开展比对测量，以揭露和发现实验中的系统误差。

3.1 分析实验条件，找出影响实验的诸因素，引入修正值，消除实验中的系统误差

在反射中子效应实验中的系统误差主要来源于中子源、探测器和实验装置。

(1) 中子源

待测量是 14 MeV 源中子穿过屏蔽材料后的反射中子效应系数。但在实验测量中还有 D-D 自生靶中子、D-D 管道中子、出靶室增值中子和大厅散射本底中子干扰着反射中子效应系数的测量。其中大厅散射本底中子的影响前文已述。D-D 管道中子用屏蔽的方法（用慢化吸收材料围管道）和加速器人员一起用良好聚焦的 D 束和散焦的 D 束等方法，评估其影响。我们认为在现有的加速器运行条件下，D-D 管道中子对反射中子效应系数测量的影响可略。D-D 自生靶中子的产额和靶的新旧、靶在运行中的变化、水冷却效果的好坏等因素有关。但在用伴随粒子法监测中表明它的产额和 14 MeV 中子产额相比小于 0.5%。因此对铁球表面²³⁸U 裂变率的影响小于 0.003%。在本实验中靶上产生的 14 MeV 中子穿过 2 mm 厚不锈钢靶室壁后，产生了 3.2% 的出靶室增值中子，其能量为铁的蒸发谱中子，能量较裂变谱中子软。按裂变谱中子估计，它对铁球表面裂变率的影响小于 0.02%。

加速器运行中的靶点漂移对进入铁锥的 14 MeV 中子有影响。实验中使用 $\phi 10$ mm 的芯靶，靶点直径小于 $\phi 3$ mm。靶点偏心的最大距离小于 5 mm。按此参数设计了铁锥，保证在 $\phi 10$ mm 靶上产生的所有 14 MeV 中子都能通过铁锥进入慢化吸收混合材料中，避免了在反射中子效应系数测量中由此因素带来的系统误差。

14 MeV 中子产额用伴随粒子法测量。测出的产额是靶上产生的。这种产额经出靶室因子修正后给出实际对铁球表面裂变率起作用的 14 MeV 源中子产额。

(2) 探测器

反射中子效应系数的测量主要用“俘获探测器”完成。对“俘获探测器”的作用主要考虑了：

① 俘获材料的选择和作用要满足两点要求：(a) 材料的自屏蔽影响可忽略。(b) 中子在材料中产生的本底不影响对裂变率的测量，对 50 μ m 厚 $\phi 30$ 的聚脂模中子产生的本底对裂变率的影响小于 1%。

② 俘获片和²³⁸U 片要保证良好的配合：(a) 配合中要消除边界效应的影响。(b) 每次组合时的重复性要保证。

③ 保证照射条件和测量条件的一致性。

④ 所用²³⁸U 镀片的定量和归一。

⑤ 同位素影响的修正。

⑥ 照射中，铀片和俘获片几何条件的修正。

(3) 实验装置

实验中对实验装置主要考虑了三点：

① 靶心、屏蔽体（铁锥和慢化吸收混合材料的总称）中心、反射体中心要在同一轴线上。并评估了装置结构中不同轴度对实验的影响。

② 装置的支架等结构材料的影响。

③ 屏蔽体、反射体、铁球材料的成分及密度的均匀性。

主要从以上三方面考虑了系统误差的来源，并在反射中子效应系数的测量中消除了上述三方面因素带来的系统误差。

3.2 改变实验条件，增加实验测量手段，开展比对测量，以揭露和发现实验中的系统误差

反射中子效应系数测量本身没有开展过比对实验测量。但对于实验中的几个重要的量已做过了比对测量。

(1) 裂变率

① 使用裂变室和“俘获探测器”在图1装置中测量了裂变率，两种探测器的测量结果在实验误差内相符。

② 使用裂变室、“俘获探测器”、固体径迹探测器、固体径迹火花自动计数器在铀球装置中测量了裂变率，在实验测量误差内四种探测器的测量结果满意地相符合。

从以上两方面的比对测量中说明用“俘获探测器”测量裂变率是可行的。没有发现这种探测器在测量裂变率中存在着系统误差。

(2) 14 MeV 中子产额

① 用伴随粒子法测量了 14 MeV 中子产额。并参加了国内组织的比对，通过参加国际比对后得知，我们的比对结果和国际比对的结果相符。

② 我们自己用伴随粒子法、活化法、 ^{238}U 裂变室分别测量了 14 MeV 中子产额。在实验测量误差内三种方法的测量结果相符。

通过上述两方面的比对测量表明：伴随粒子法是测量 14 MeV 中子产额的一种好方法，其误差约为 1.5%。测量结果的可信程度较高。

(3) 所用铀材料的绝对定量

① 用 α 定量方法定量 ^{235}U 和 ^{238}U 镀片铀镀层的重量。同一铀镀片的定量分别由两个单位完成。我们自己用平板裂变室定量，外协单位用栅网裂变室定量。两家的定量结果在测量误差内相符。

② α 定量所用的 ^{235}U 和 ^{238}U 的定量系数用热中子进行校验，实验测量的系数和计算所用的系数相一致。

由于上述工作的完成，我们认为实验中所用裂变探测器中的铀材料的绝对重量是可信的，消除了系统误差。

(4) 14 MeV 中子出靶室衰减因子

① 实验中所用的出靶室衰减因子，已用靶室模拟方法、靶材料的衰减外推法，并分别用铜及氟活化探测器和 ^{238}U 裂变室（对次级中子影响做修正）进行了比对测量。两种方法、三种探测器测量的结果在实验误差内相符。

② 在两个课题组间对不同材料和不同结构形式的靶室用不同的方法做了比对测量，测量结果一致。

(5) 大厅散射本底中子

本文已有叙述，从略。

因此，实验中所用的 14 MeV 中子出靶室衰减因子及出靶室增值因子是可靠的，不会有系统误差残留之中。

在完成了上述工作后，对反射中子效应系数的可信性有以下三点认识：

① 反射中子效应系数实验本身没有做过比对测量。但对系数测量中的重要物理量：裂变率、14 MeV 中子源绝对强度、铀镀片的重量、14 MeV 中子出靶室衰减因子、大厅散射本底中子等，已做过了比对测量。

② 在我们目前所认识的范围内，实验结果中已消除了系统误差，实验测量精度为 $\pm 6\%$ 。

③ 在近 50 个实验数据中，实验值和理论计算值相符，其中 50% 的实验数据在 3%~5% 的误差范围内与理论计算值相符。

参 考 文 献

- 1 陈素和，王大伦，亢武等. 14 MeV 中子穿过组合材料后反射中子效应的实验测量，待发表
- 2 Null. Instru. Meth., 1968 (61): 61