

CN9200577

CNIC-00506
SINPC-0001

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

14MeV 中子在大体积贫化铀球装置
中平均裂变数的实验测量

DETERMINATION OF AVERAGE FISSION FRACTION
PRODUCED BY 14 MeV NEUTRONS IN ASSEMBLIES
WITH LARGE VOLUME OF DEPLETED URANIUM

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00506

(SINPC-0001)

14MeV 中子在大体积贫化铀球装置 中平均裂变数的实验测量

王大伦 黎本慈 王秀春
励义俊 张少华 何永武

(西南核物理与化学研究所, 四川)

摘 要

在大体积贫化铀装置中, 测量了一个 14MeV 中子与 ^{238}U 作用产生的平均裂变数—— $p_f^{238\text{U}}(R_{30}^*)_{14} = 0.897 \pm 0.036$ 。测量了 14MeV 中子通量分布和贫化铀球中 ^{235}U 同位素的平均裂变数。在系列球中完成了 $p_f^{235\text{U}}(R^*)$ 值的测量。对于 $\phi 600$ 球, $p_f^{235\text{U}}(R_{30}^*) = 0.823 \pm 0.041$ 。贫化铀装置的密度 $\rho = 18.8\text{g/cm}^3$, 总重 2.8t。

DETERMINATION OF AVERAGE FISSION FRACTION PRODUCED BY 14 MeV NEUTRONS IN ASSEMBLIES WITH LARGE VOLUME OF DEPLETED URANIUM

(In Chinese)

Wang Dalun Li Benci Wang Xiuchun
Li Yijun Zhang Shaohua He Yongwu
(SOUTHWEST INSTITUTE OF NUCLEAR
PHYSICS AND CHEMISTRY, SICHUAN)

ABSTRACT

The average fission fraction of ^{238}U caused by 14 MeV neutrons in assemblies with large volume depleted uranium has been determined. The measured value of $p_i^{238\text{U}}$ ($R_{\text{coo}}^{\text{depleted}}$)₁₄ was 0.897 ± 0.036 . Measurements were also completed for neutron flux distribution and average fission fraction of ^{235}U isotope in depleted uranium sphere. Values of $p_i^{238\text{U}}$ (R^{depleted}) have been obtained by using a series of uranium spheres. For a sphere with ϕ 600 the $p_i^{238\text{U}}$ ($R_{300}^{\text{depleted}}$) is 0.823 ± 0.041 , the density of depleted uranium assembly is 18.8g/cm^3 and total weight of assembly is about 2.8t.

引 言

一个 14MeV 中子,在贫化铀材料与 ^{235}U 作用产生的平均裂变数 $\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$,是一个对材料内次级中子能谱很敏感的积分量。在校验和调整裂变能区内快中子参数,改善理论计算精度方面,在裂变-裂变混合堆的研制中, $\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$ 值愈加重要。为此,本实验室设计了大体积贫化铀装置。完成了此值的实验测量^[1]。实验证明:就 $\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$ 的实验测量而言,本装置已是一个无限大贫化铀球。

早在 60 年代初,英国核武器研究院 Weale 等人,在大体积天然铀装置中(装置由天然铀棒组成,平均密度为 16.3g/cm³,总重 19.2t)做过此项实验。其结果为^[2]: $\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14} = 1.18 \pm 0.06$ 。

70 年代后,为了校验快中子参数和裂变-裂变混合堆的概念设计,围绕 Weale 实验,国内外曾相继做过不少计算。计算值起伏很大^[3~6]。从中看到测准这个参数的重要性。

所谓 $\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$ 值是:在无限大贫化铀球中心,发射一个 14MeV 源中子,中子在铀球内经扩散,吸收,增殖作用后,由 ^{235}U 产生的裂变反应总数。

设: $N^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$ 为 A 个/s 14MeV 中子和无限大铀球作用后,由 ^{235}U 产生的总裂变反应数。则有:

$$\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14} = N^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}/A \quad (1)$$

$N^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$ 不能直接测量。可通过测量铀球内 ^{235}U 的裂变率分布 $f(R)$ 得到:

$$N^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14} = 2\pi\rho \int_0^{\infty} R^2 f(R) \sin\theta \, d\theta \, dR \quad (2)$$

当中子源是各向同性时,由式(1)和式(2)得:

$$\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14} = \frac{4\pi\rho}{A} \int_0^{\infty} R^2 f(R) \, dR \quad (3)$$

R :中心点源到测量点距离。

$f(R)$:当源强为 A 时,无限大铀球内 $R + \Delta R$ 处, ΔR 球壳上,单位质量 ^{235}U 在单位时间内产生的裂变反应数。

为了测量 $\bar{p}^{235\text{U}}(R_{\infty})_{14}$ 值,需要对以下 3 个量做绝对测量:

- (1) 贫化铀球中绝对裂变率分布;
- (2) 14MeV 中子源绝对强度;
- (3) 探测器所含铀材料的绝对质量。

1 大体积贫化铀装置

大体积贫化铀装置由球体和柱体两部分组成。

1.1 $\phi 600$ 贫化铀球

$\phi 600$ 球由 7 层球壳组合成。球心处有一 $\phi 80$ 源腔。靶室置于源腔内。与入射 D 束成 0° , 45° , 90° , 135° 方向上开有实验孔道。并有相应的铀塞块与源配合。在 0° 孔道的对称方向上有靶室的 D 束管道。在 45° 孔道的对称方向上有靶室的 α 管道。

7层球壳可组成7个尺寸的系列球:

$\phi 262, \phi 362, \phi 388, \phi 467, \phi 508, \phi 570, \phi 600$ 。

1.2 $\phi 400$ 贫化铀柱体

由5个 $\phi 300 \times 50$ 的铀圆饼和一个 $\phi 400 \times \phi 300 \times 200$ 的铀筒组成一个 $\phi 400$ 的铀柱体。

这种柱体和 $\phi 600$ 的球组合,就构成了本实验的大体积贫化铀装置(见图1)。

就 $\rho^{235}(R_{eff})_{\infty}$ 的测量而言,此种大体积贫化铀装置等效于无限大贫化铀球(见附录A)。

这样, $\phi 600$ 球和5个圆饼相组合,就构成了5个等效尺寸的系列球:

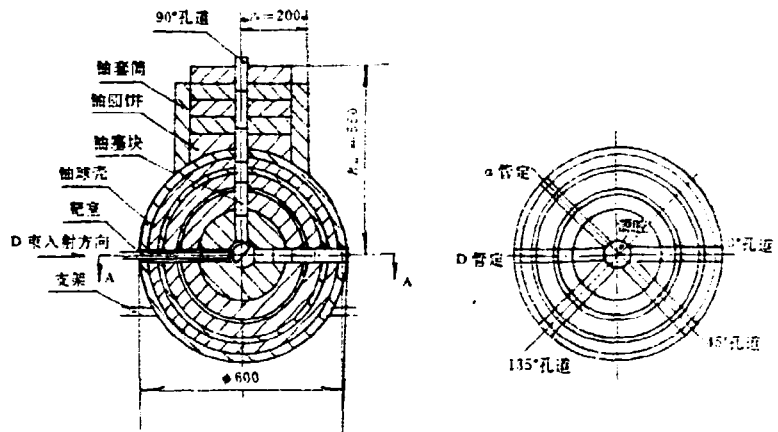


图1 无限大贫化铀球装置

$\phi 700, \phi 800, \phi 900, \phi 1000, \phi 1100$

因此,可将图1所示的大体积贫化铀装置分解成12个系列球。

装置中存在着两种空腔:一是 $\phi 80$ 源腔。由于装置是无限大球,所以 $\phi 80$ 源腔仅改变裂变率分布形式,不影响 $\rho^{235}(R_{eff})_{\infty}$ 值的大小。二是靶室的D管道和 α 管道空腔。实验证明:此种空腔对裂变率分布的测量没有影响。

贫化铀装置的密度: $\rho = 18.8 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 。装置中心(球心)和靶心在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 内重合。实验中,用调解轴塞块厚度的方法确定各测量点的位置。

2 实验测量

2.1 14MeV 中子源绝对强度

以T-400加速器提供的DT中子作为14MeV中子源。

考虑到DT中子强度和能量的角分布以 90° 对称。DT中子能量的变化引起 ^{235}U 裂变截面的变化并不明显,并可认为是线性的。因此,以 90° 方向单位立体角的中子强度乘以 4π 等效于各向同性单能中子源强度。

T-400 高压使用 180keV, 考虑 D 核能量在 T 靶死层中的损失, 实际引起 DT 反应的 D 核能量为 $E_0 = 150\text{keV}$ 。因此, 90° 方向的中子能量为 $E_n = 14.07\text{MeV}$ 。

在裂变率分布的测量中, 已消除了 DD 本底中子、靶室散射中子、出靶室次级增殖中子、大厅散射本底中子的影响, 并采取了靶点归心措施(在靶点归心中, 已使面源等效于点源)。所以, 实际使用的 DT 中子源已等效于成分单一和各向同性的单能中子点源。

用伴随粒子法测量中子源绝对强度^[7-9]。伴随粒子法仅给出靶上产生的中子强度。对入射到铀球内的源中子强度, 要考虑源中子出靶室的衰减。实验上测量了 14MeV 中子出靶室衰减因子: $K = 1 - (0.032 \pm 0.002)$ 。

入射到铀球内的源中子绝对强度由下式给出:

$$A = 4\pi \frac{N_a}{\Omega_s} A_s(90^\circ) K \quad (4)$$

式中 N_a —— 半导体探测器测到的 α 计数;

Ω_s —— 探测器对 T-Ti 靶(芯靶)所张的立体角;

$A_s(90^\circ)$ —— 各向异性因子。

2.2 铀镀片镀层的绝对重量

用 α 定量法给出铀镀片镀层的绝对质量, 定量误差为: $\pm 1\%$ 。贫化铀的定量系数 A^R 值, 由测量的同位素丰度计算出, 并在热中子场下测量了此值。结果为:

实验值: $A^R = 18.10 \pm 0.14$

计算值: $A^R = 18.11 \pm 0.11$

铀镀片用电镀法获得, 实验表明, 铀镀层的不均匀性和镀层内杂质成分对裂变探测器的计数效率没有构成影响。

2.3 铀球内裂变率分布

使用小型平板裂变室^[10-12], 固体径迹探测器显微镜读数方法^[13,14], 固体径迹火花自动计数器^[15-17]完成了铀球内裂变率分布的测量。

所用探测器的有关参数列于表 1。

表 1 探测器使用参数

探测器	型号和材料	镀层直径 (cm)	镀层质量 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	裂片计数效率 (%)
裂变室	$U_{235} 1^\#$	$\phi 24$	337.9	94.82 ± 0.7
	$U_{235} 3^\#$		269.0	95.46 ± 0.6
	$U_{235} 5^\#$		423.8	93.07 ± 0.8
	$U_{238} 1^\#$		281.4	96.06 ± 0.6
	$U_{238} 1^\#$		194.5	96.63 ± 0.6
固体径迹探测器显微镜 读数($100\mu\text{m}$ 聚酯)	贫化铀镀片 浓缩铀镀片	$\phi 24$	100~500	93.35 ± 1.0
火花自动计数器 ($100\mu\text{m}$ 聚酯膜)	贫化铀镀片 浓缩铀镀片	$\phi 24$	100~500	57.6 ± 3.0

探测器中的铀镀层代表着铀球内 AR 球壳中相应那一部分球面上的铀材料。为将探测器

中的平面铀镀层转化为 $R + \Delta R$ 处的部分球面,使用平均距离 \bar{R} 取代 R 。这里:

$$\bar{R} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{2}r^2} \quad (5)$$

式中 R 为探测器平面铀镀层至球心距离;

r 为平面铀镀层的半径。

为消除裂变室结构材料和空腔对裂变率分布测量的影响,使用俘获法^[10]测量了其影响因子。

在大体积贫化铀装置内,用贫化铀和浓缩铀探测器测量了裂变率分布,用迭代法做同位素修正后,得²³⁵U 的裂变率分布。

将裂变室置于铀球内各位置处,做裂变计数测量。小型平板裂变室测出的裂变碎片谱如图 2 所示。

对测出的裂变计数经通量归一、质量归一、靶点归心,效率修正、出靶室次级中子影响修正、裂变室结构材料和空腔影响修正后,由测量时间和铀镀层质量转化为裂变率。

将 10 μ m 厚的聚脂膜(下称信号膜)和铀镀片以 2π 几何条件相组合后,置于装置内各位置处照射,照射后的信号膜经蚀刻、清洁、干燥处理后,进行预放电,然后进行正式火花计数。对这种火花计数经通量归一、质量归一、信号膜厚度归一、蚀刻厚度归一、死面积修正、效率修正、靶点归心、出靶室次级中子修正后,转化为裂变率。

以 100 μ m 厚的聚脂膜作为固体径迹探测器(显微镜读数)。以和信号膜同样的方式照射。照射后,经蚀刻处理后,在显微镜下读数。将读出的 416 个视场中的裂变径迹数转化成与铀镀层面积相对应的裂变径迹数。然后经通量归一、质量归一、裂片底散射修正、效率修正、靶点归心、出靶室次级中子影响修正后,按与裂变室测量相同的时间转化成裂变率。

裂变率分布测量的结果如图 3~5。

由于中子的增殖,使²³⁵U 裂变率分布和 R^2 之积约在 $R = 17$ cm 处达到峰值(图 3)。由于²³⁵U 裂变阈能较高,14MeV 中子裂变大于次级中子裂变,因此,使²³⁵U 裂变率分布和 R^2 之积的峰值前移到接近于源腔处(图 4)。约在 $R = 5$ cm 处达到峰值。贫化铀的裂变率分布和 R^2 之积约在 $R = 5.5$ cm 处达到峰值(图 5)。这是由于²³⁵U 同位素的影响所致。

2.4 14MeV 中子通量分布

使用⁶³Cu(n $2n$)⁶³Cu 反应测量⁶³Cu 活性。预先在已知强度的 14MeV 中子源下,刻度出 Q 值(在特定的计数和照射条件下,每个 γ 计数相应的中子通量)。由此得到 14MeV 中子通量分布。实验值用最小二乘法拟合,给出无限大贫化铀球装置内 14MeV 中子通量分布形式:

$$R^2\phi_{14}(R) = 14.272 \times e^{-A/14228} \times 10^6 \quad (6)$$

此式是在中子源强度为: $A = 4\pi \times 7.673 \times 10^8$ 的条件下得到的。

由 $\phi_{14}(R)$ 和预先刻度出的因子 $B_1 = 3.103 \times 10^6$, 给出装置内 14MeV 中子产生的裂变率分布:

$$f_{14}(R) = B_1\phi_{14}(R) \quad (7)$$

实验结果如图 6。次级中子的裂变率分布,是从总的裂变率分布中扣除 14MeV 中子的裂变率分布后得到。

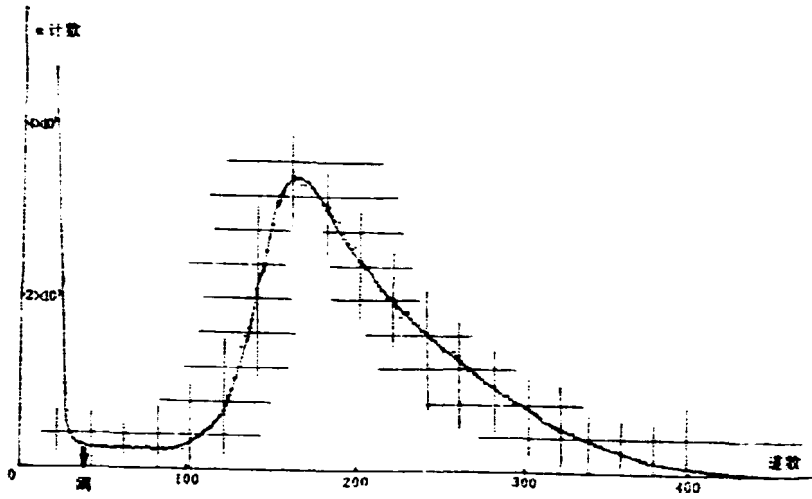


图 2 小型平板裂变室测出的裂变碎片谱

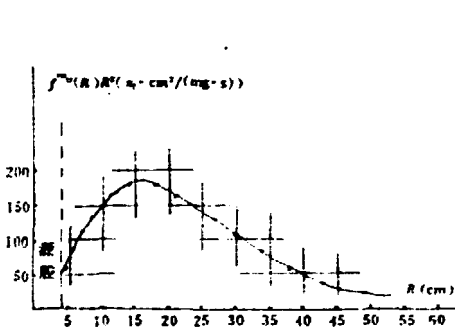


图 3 无限大贫化铀球中²³⁵U 同位素的裂变率分布

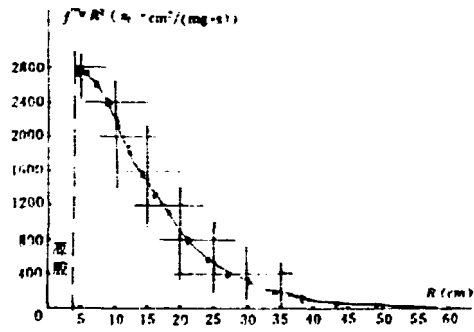


图 4 无限大贫化铀球中²³⁸U 裂变率分布

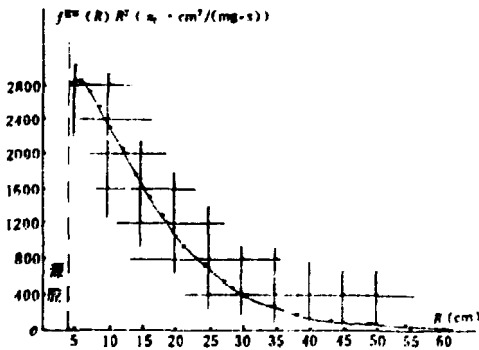


图 5 无限大球中贫化铀的裂变率分布

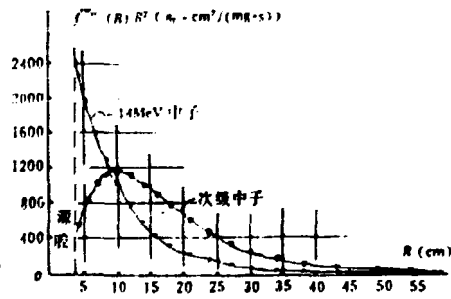


图 6 14MeV 中子和次级中子产生的²³⁸U 裂变率分布

2.5 系列球的 $p_i^{235U}(R^R)_{10}$ 值

如上述,将大体积贫化铀球装置分解成 12 个系列球。用小型平板裂变室测量系列球的 $p_i^{235U}(R^R)_{10}$ 值。在 $\phi 600$ 球中测出的 ^{235}U 裂变率分布如图 7:

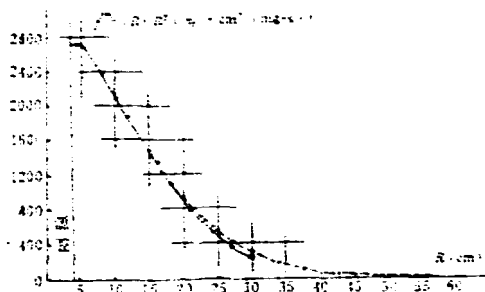


图 7 $\phi 600$ 贫铀球和大体积贫铀装置中 ^{235}U 裂变率分布

图 7 表明:在 $\phi 600$ 铀球内,当半径 R 小于 180mm 时, $\phi 600$ 球和无限大球中的裂变率分布在测量误差内一致。在 $\phi 600$ 铀球内其半径 R 大于 180mm, $\phi 600$ 球内的裂变率分布(和无限大球内的裂变率分布相比较)下降。如果把厚 120mm 的球壳看成是 $R 180$ 球的反射层,那么,120mm 厚和无限厚的反射层对 $R 180$ 球内 ^{235}U 裂变率分布的影响等效。

这说明:对 90° 方向裂变率分布测量而言, $\phi 600$ 球加柱体($\phi 400$ 柱体)等效于整球是合理的。

系列球的实验结果列于表 2。

表 2 系列贫化铀球的 $p_i^{235U}(R^R)_{10}$ 实验值

R (cm.)	13.09	18.08	19.39	23.34	25.39	28.19	30.00
$S(\lambda)^*$	2.59	4.01	4.38	5.51	6.09	6.97	7.40
$p_i^{235U}(R^R)_{10}$	0.45%	0.608	0.660	0.731	0.758	0.796	0.823
	± 0.018	± 0.024	± 0.026	± 0.029	± 0.031	± 0.032	± 0.041
R (cm)	35.00	40.00	45.00	50.00	55.00	∞	
$S(\lambda)$	8.82	10.25	11.67	13.09	14.52	∞	
$p_i^{235U}(R^R)_{10}$	0.852	0.878	0.885	0.886	0.890	0.897	
	± 0.043	± 0.044	± 0.044	± 0.044	0.036	± 0.036	

* $S(\lambda) = \frac{R-4}{3.51}$ 与铀球壳厚度相应的 14MeV 中子平均自由程数。

3 实验结果

根据图 3、图 4、图 5、图 6 和式(4)给出的 $A = 4\pi \times 8.1439 \times 10^4$ (个/s),由式(3)得到 $p_i(R^R)_{10}$ 值。实验值的误差来源见附录二。

实验结果列于表 3。

表 3 $\rho_i(R_{\infty})_{11}$ 值的实验结果

$\rho_i(R_{\infty})_{11}$	本实验值	Weale 实验值	赵玉钧等人计算值	
			B1621	B1631
$\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11}$	0.915 ± 0.044	1.18 ± 0.06		
$\rho_i^I(R_{\infty}^I)_{11}$	1.012 ± 0.038			
$\rho_i^{235U}(R_{\infty}^{II})_{11}$	0.897 ± 0.036	1.13 ± 0.06	0.8431	0.9360
$\rho_i^{235U}(R_{\infty}^{III})_{11}$	0.864 ± 0.035			
$\rho_i^I(R_{\infty})_{11}$	0.407 ± 0.036	0.39		
$\rho_i^{235U}(R_{\infty})_{11}$	0.115 ± 0.006		0.123	0.122

• • • 根据实验数据的估算值。

表中： $\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11}$ 为一个 14MeV 中子在无限大天然铀装置中，由 ^{235}U 产生的平均裂变数。

$\rho_i^I(R_{\infty}^I)_{11}$ ， $\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11}$ ， $\rho_i^{238U}(R_{\infty}^I)_{11}$ 分别为一个 14MeV 中子在无限大贫化铀球中，由贫化铀、 ^{235}U 和 ^{238}U 同位素产生的平均裂变数。

$\rho_i^{235U}(R_{\infty}^{235U})_{11}$ ：为一个 14MeV 中子在无限大 ^{235}U 球中，由 ^{235}U 产生的平均裂变数。

$\rho_i^I(R_{\infty})_{11}$ ：在无限大铀球中，当源发射一个 14MeV 中子时，由铀球内的 14MeV 中子和 ^{235}U 作用产生的平均裂变数。

4 讨 论

(1) 将 Weale 实验值 $\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11} = 1.18 \pm 0.06$ 转化为 $\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11} = 1.13$ 后，和本实验值 $\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11} = 0.897 \pm 0.036$ 相比较，两个实验结果不符。

(2) 装置内由 14MeV 中子产生的平均裂变数 $\rho_i^I(R_{\infty})_{11}$ 值为：

$$\text{本实验值：}\rho_i^I(R_{\infty})_{11} = 0.407 \pm 0.036$$

$$\text{Weale 实验值：}\rho_i^I(R_{\infty})_{11} = 0.39$$

$$\text{计算值：}\rho_i^I(R_{\infty})_{11} = \frac{\sigma_f}{\sigma_f - \sigma_a} = 0.392$$

三者均在误差内相符。

(3) 实验中存在的各种影响因素，是造成 $\rho_i^{235U}(R_{\infty}^I)_{11}$ 实验值有系统误差的原因。本实验中所考虑的影响因素总结于附录 C 中。实验值中已消除了这些因素的影响。

(4) 为了揭露矛盾，发现实验中的系统误差，对三个基本量开展了比对测量，比对内容和结果总结于附录 D 中。在实验误差内，比对测量结果相符。

5 致 谢

本工作开展以来，受到邓稼先和胡仁宇院长的重视和关心，得到付依备所长的支持和鼓励。在此致以感谢。

工作进行中得到江文勉主任和王世绩主任的支持和帮助。胡润章同志对本工作的开展给予了具体的帮助和关心。谨致感谢。

在完成工作中,盛菊芳同志帮助审核实验结果,从理论上进行多方面的估计,并提出了不少宝贵意见。在此致以感谢。对 T-400 加速器组魏绍宾、赵玉霞、吴启凤、冯华宁等人的协助和辛勤劳动及刘国良同志的热心帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 王大伦,关于 $p_{\alpha}(R_{\infty})_{\alpha}$ 值的实验总结报告:[内部资料]-四川,中国工程物理研究院
- [2] *Reactor Science and technology*. 114(1961),91~99
- [3] *Nucl. Sci. eng.* 61(1976),53~59
- [4] *Int. conf. on neutron physics and nuclear data for reactor on other applied purposes*. 1978/9125-9,1478,1028~1032
- [5] 贾树权等,以积分实验的理论计算评价裂变中子谱:[内部资料]-北京,应用物理与计算数学研究所
- [6] 陈福源,张毓泉等,140keV 中子在金属铀装置中的裂变率及其分布的计算结果与分析:[内部资料]-北京,应用物理与计算数学研究所
- [7] *Nucl. instr. meth.* 61(1968),61
- [8] *Nucl. instr. meth.* 126(1975),309
- [9] 1982 年我国首次召开的 14.6MeV 中子通量比对会议资料:四川,中国工程物理研究院
- [10] 王大伦,陆义俊,绝对裂变率测量用的小型平板裂变室:[内部资料]-四川,中国工程物理研究院
- [11] AEEW-R-526
- [12] *Nucl. Technology*. 25(1975),237
- [13] 王大伦,陆义俊,固体径迹探测器(显微径迹数):[内部资料]-四川,中国工程物理研究院
- [14] *Nuclear instruments & methods*. 98(1972),229
- [15] 王大伦,陆义俊,固体径迹大花自动计数器:[内部资料]-四川,中国工程物理研究院
- [16] *Nuclear instruments & methods*. 151(1978),583
- [17] *Nuclear instruments & methods*. 141(1977),489~497

附录 A

无限大贫化铀球的设计原理和实验验证

为完成 $k_{eff}^{238U}(R_{\infty})_{\infty}$ 值的实验测量, 需要一个无限大贫化铀球。为此, 首先引入无限大贫化铀球等效半径 R_{∞} 这个参量。定义为: 就 $k_{eff}^{238U}(R_{\infty})_{\infty}$ 值的测量而言, 在实验误差内, 使 $k_{eff}^{238U}(R_{\infty})_{\infty}$ 值趋于不变时, 相应的铀球半径。因此, 一个以 R_{∞} 为半径的球就等于无限大球。如图 A1:

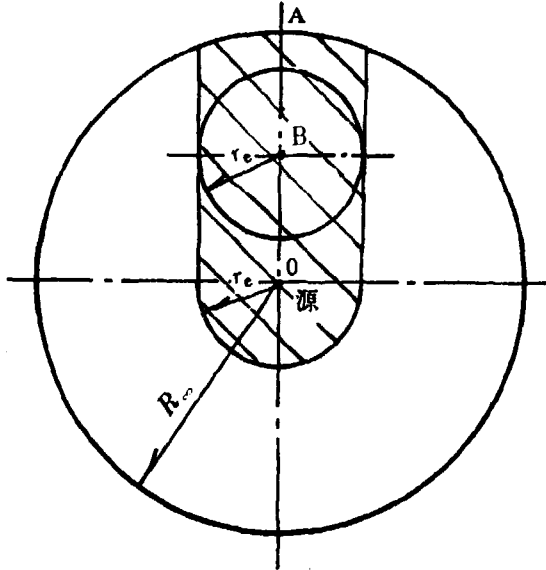


图 A1 无限大贫化铀球

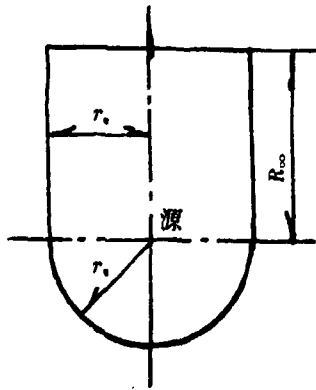


图 A2 无限大贫化铀球的结构形式

如图 A1, 中子源位于球心。实验上, 通过测量铀球内 OA 方向上的裂变率分布, 积分后得到总裂变系数和 $k_{eff}^{238U}(R_{\infty})_{\infty}$ 值。但当测量 OA 方向的裂变率分布时, 不是铀球中所有材料内

的中子都对这个方向上的裂变率分布有贡献。如果以 OA 为轴心, 将其周围铀材料的作用看成是铀反射层时, 那么, 仅是一定厚度的铀材料对 OA 方向的裂变率分布有贡献。因此, 再引入铀反射层有效作用厚度 r , 这个参量。其定义为: 就贫化铀球内 ^{235}U 裂变率分布测量而言, 对裂变率分布起作用的那部分铀材料的厚度。

按着 r 的含义, 当在图 A1 所示的无限大球中测量 OA 方向上 B 点的裂变率时, 仅是以 B 为心, 以 r 为半径的球内的铀材料对 B 点的裂变率有贡献。因此, 测量 OA 方向上的裂变率分布时, 仅是图 8 所示的阴影部分的铀材料才有贡献。将对 OA 方向上的裂变率分布无作用的铀材料去除。就构成了图 A2 所示的无限大铀球结构形式。

本实验装置就是按着这种原理构成的。

以下实验数据, 证明了本实验装置满足“无限大”的物理要求:

(1) R_{∞}, r 的测量

实验测量了系列球的 $k^{235}\text{U}(R^{\text{球}})_{14}$ 值。结果如图 A3。由此可得到 R_{∞} 值。

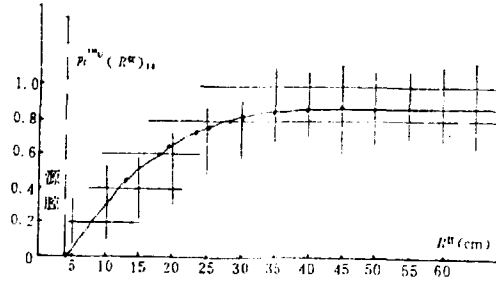


图 A3 系列球的 $k^{235}\text{U}(R^{\text{球}})_{14}$ 值

从系列球裂变率分布变化的比较中(参见正文图 7), 可得出 r 值。通过改变 $\phi 600$ 球上的柱体直径大小, 从其裂变率分布的变化中也可得到 r 值。

R_{∞} 和 r 值的测量结果如表 A1:

表 A1 R_{∞} 和 r 的实验值

名称	实验值	设计使用值
R_{∞}	< 45cm	55cm
r	< 15cm	20cm

由于本装置所用的 R_{∞} 和 r 值都大于实验值。这就保证了本装置满足“无限大”的物理要求。

(2) 无限大球结构原理论证实验

为了验证无限大球的设计原理, 做了如下实验:

在 $R_{\infty} = 44.1\text{cm}, r = 20\text{cm}$ 和 $R_{\infty} = 43.1\text{cm}, r = 15\text{cm}$ 两种铀柱体中(如图 A2, 两种铀柱体总重分别为 1.57t 和 0.88t), 测量了 $k^{235}\text{U}(R^{\text{柱}})_{14}$ 值。实验结果如表 A2:

表 A2 3种装置中 $\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 的测量值

装置	本装置(2.8t)	1.57t 柱体	0.88t 柱体
$\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$	0.897 ± 0.036	0.896 ± 0.036	0.893 ± 0.036

实验结果论证了图 A2 所示的无限大铀球结构形式的正确性。也证明了本实验装置已满足了“无限大”的物理要求。

(3) $\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11} / \bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 之比

实验测量和理论计算的 $Q = \bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11} / \bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 值列于表 A3:

表 A3 $\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11} / \bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 值

R (cm)	13.09	18.08	19.39	23.34	25.39	28.49	30.00
Q (实验)	0.506	0.678	0.736	0.815	0.845	0.887	0.918
Q (计算)	0.587	0.770	0.892		0.907		0.947
R (cm)	35.00	40.00	45.00	50.00	55.00	∞	
Q (实验)	0.950	0.979	0.987	0.988	0.992	1.00	
Q (理论)	0.972	0.985	0.992	0.996	0.998	1.00	

比较实验测量和理论计算的 Q 值。对 $\phi 600$ 球, 实验值为 0.92, 计算值为 0.95。无限大球和 $\phi 600$ 球 $\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 的差异, 实验值大于计算值。这也说明了本装置是等效于无限大球的。由于 $\phi 600$ 球和无限大球的 $\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 值只差 5%~8%。这表明: 可以使用 $\phi 600$ 球测出的裂变率分布, 外推到零, 给出无限大球的 $\bar{p}^{238\text{U}}(R_{\text{球}})_{11}$ 值。这种值和无限大球中测到的值就相差无几了。二者显然会在误差内相符的。因此, 本实验装置已满足了“无限大”球的要求, 这种结论是可信赖的。

附录 B

$^{235}\text{U}(R_{\text{总}})_{14}$ 值的实验测量误差来源

$^{235}\text{U}(R_{\text{总}})_{14}$ 值的实验误差主要来源于:绝对裂变率分布和 14MeV 中子源绝对强度的测量误差。现将这两个量的测量误差来源列于下表:

表 B1 轴球内位置 1 处绝对裂变率测量的误差来源

误差来源	误差(%)
测量的随机误差	±1.9
球心和靶心的不重合度	±2.1
各修正项造成的误差:	
(1) 裂变室结构材料和空腔效应	±1.0
(2) 通量归一	±0.1
(3) 质量归一	±1.0
(4) 效率修正	±0.7
(5) Ω_{α} 归一	±0.7
(6) 出靶室衰减因子修正	±0.2
(7) 靶点归心	±1.0
(8) DD 本底	±0.15
(9) 裂片动量和角分布随入射中子能量的变化	±0.2
综合误差	±3.5%

表 B2 14MeV 中子源绝对强度测量误差来源

类别	误差来源	误差(%)
α 计数和谱	α 计数的统计性	±0.04
	管道的 α 粒子散射	±0.23
	靶材的 α 粒子库伦散射	±0.5
	硅本底	±0.2
	DD 本底	±0.1
	$^3\text{He}(\text{DP})\alpha$ 本底	±0.1
	计数系统阈值的漂移	±0.1
	"不归零"的 α 计数外推	±0.1
	α 计数效率和死时间修正	±0.4
	α 计数死角的影响	±0.2
$A_{\alpha}(\theta\phi)$	入射 D 核平均能量的变化	±0.8
	D 核散射引起入射角的变化	±1.0
	靶点偏心引起入射角的变化	±0.1
	D 和 α 管道间夹角的不准	±0.35
	$A_{\alpha}(\theta\phi)$ 的计算	±0.2
几何条件	靶到探测器的距离	±0.5
	半导体准直孔测量的不准	±0.2
	靶点偏心	±0.1
衰减因子	源中出靶室的衰减因子	±0.2
综合误差		±1.7%

附录 C

$^{235}\text{U}(R\bar{E})_{10}$ 值测量中的有关影响因素

项目	影响因素	说明
装置	(1) 实验装置是否无限大	实验证明, 对 $^{235}\text{U}(R\bar{E})_{10}$ 测量而言, 附录 B 图 B2 所示的实验装置是一个等效的无限大贫化铀球装置
	(2) 装置中的空腔 (a) $\phi 80$ 源腔 (b) D 和 α 管道空腔	不影响 $^{235}\text{U}(R\bar{E})_{10}$ 值的测量
	(3) 靶心和球心的重合度	在 $\pm 0.5\text{mm}$ 内重合
中子源	(1) DT 中子能量和强度的角分布变化	以 90° 方向的 14.07MeV 中子等效于单能各向同性的源中子
	(2) DT 中子源为面源	用靶点归心方法转化为点源
	(3) 源中子出靶室的衰减	$K = 1 - (0.032 \pm 0.002)$
	(4) 出靶室次级中子对裂变率的影响因子	$Q = 0.995$
	(5) DD 中子	对 $^{235}\text{U}(R\bar{E})_{10}$ 的影响小于 0.15%
	(6) 减能源中子	按 14MeV 中子计
	(7) 环境散射的本底中子	对 ^{235}U 裂变率分布无影响
裂变率分布	(1) 裂变室结构材料和空腔	修正因子, 1.024
	(2) 靶点漂移和位置变化	用 Cu 活化片监视, 将 $f(R)$ 归一到靶心
	(3) 靶室和冷却水的散射和屏蔽	实验证明, 对 $f(R)$ 没有影响
	(4) 裂变碎片底散射	裂变室和火花计数器不存在此种影响。对固体探测器显微慢读数引入修正因子, 0.979
	(5) 裂变探测器的效率	见正文表 1
	(6) ^{235}U 同位素	用迭代法修正
	(7) 裂变碎片动量和角分布随入射中子能量的变化	铀球内次级中子产生的 $f(m)$ 不受此因素的影响。 14MeV 直穿中子产生的 $f(m)$ 存在有此因素的影响。但对 $^{235}\text{U}(R\bar{E})_{10}$ 的影响小于 0.4%
	(8) 探测器的平面铀被层	使用平均距离 $\bar{R} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{2}r^2}$ 将平面转化为相应的球面

项目	影响因素	说明
铀镀片	(1)铀镀片长期存放和使用后的自然脱落	裂变室的铀片不存在此影响。固体探测器所用的铀片,在照射前后分别测其质量
	(2)长期使用的贫铀镀片,所生成的 ²³⁰ Pu其 α 放射性对定量的影响	²³⁰ Pu的 α 计数影响小于0.5%(连续使用3年的贫铀镀片)
	(3)铀镀层中的杂质成分	实验证明,在测量误差内,杂质成分对 $f_{(a)}$ 没有构成影响
	(4)铀镀层的非均匀性	实验证明在测量误差内,无影响。

附录 D 比对实验内容和结果

项目	比对测量内容	结果
裂变率分布	改变靶点和位置变化的监视条件	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.905 \pm 0.054$
	改变测量系统和参数	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.896 \pm 0.053$
	改变贫铀裂变室型号	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.903 \pm 0.053$
	用天然铀裂变室测量	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.925 \pm 0.053$
	使用厚结构材料的靶室($K = 0.863$)	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.909 \pm 0.048$
	使用薄壳靶室($K = 0.968$)	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.897 \pm 0.036$
	用固体探测器火花自动计数方法测量	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.886 \pm 0.055$
	用固体探测器显微镜读数方法测量	实验结果见图 5
	在总重 1.57t 柱体装置中测量	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.896 \pm 0.036$
	在总重 0.88t 贫铀柱体装置中测量	$\mu^{230}(R_{\text{测}})_{1\sigma} = 0.893 \pm 0.036$
14MeV 中子源绝对强度	参加国内比对(比对中所用实验条件和本实验条件一致)	在误差内相符
	用作随粒子法, ²³⁰ U 裂变室, ⁵⁹ Fe 活化片 3 种方法测量	在误差内,3 种方法测量结果相符
铀镀层的定量	在热堆上对 α 定量过的铀镀片用背对背裂变室做校验	在误差内相符
	两个研究室间对同一铀镀片进行定量比对	在误差内相符

14MeV 中子在大体积贫化铀球中裂变率的实验测量

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社微光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 1 · 字数 23 千字

1991 年 7 月北京第一版 · 1991 年 7 月北京第一次印刷

ISBN 7-5022-0501-2

TL · 271

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

ISBN 7-5022-0501-2
TL • 271

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre