

CNIC-00602
IAPCM-0019

铍球中子增殖率积分实验分析

刘连焰

(北京应用物理与计算数学研究所)

摘 要

利用中子输运计算程序和最新的评价核数据对铍球中子增殖率积分实验进行了模拟,论证了实验方法的可行性;给出了实验结果的理论修正项;估计并校正了探测器扰动而引起的偏差;最后比较了实验值和理论计算值,显示 ENDF/B-VI 和 Los Alamos 评价数据过高(8%)地给出了铍的中子增殖能力。

ANALYSES FOR NEUTRON MULTIPLICATION INTEGRAL EXPERIMENT OF BERYLLIUM SPHERES

(In Chinese)

Liu Lianyan

(INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS AND
COMPUTATIONAL MATHEMATICS, BEIJING)

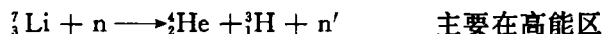
ABSTRACT

The beryllium sphere neutron multiplication integral experiment is simulated by using neutron transport codes and latest evaluated data. The feasibility of the experimental method is verified, and the computing corrections for the experimental results are derived. Errors resulted from the perturbation of the detection system are estimated and corrected. Finally, the comparison of the experimental data with the calculating data is completed. It shows that the capability of evaluated data of beryllium sphere neutron multiplication adopted by ENDF/B-VI and Los Alamos are 8% higher than experiment results.

引言

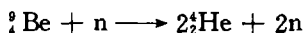
无论纯聚变堆还是聚变-裂变混合堆,都需在包层中用 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 生产核燃料 ${}^3\text{H}$ 。

聚变堆(混合堆)中造氦反应:



但如果用堆芯 DT 反应产生的 14 MeV 中子直接造氦,往往不能实现核燃料的自持。现在被广泛接受的设计概念是在造氦过程之前用中子增殖材料将 DT 中子增殖。 ${}^9\text{Be}$ 被认为是最好的中子增殖材料之一,已在 ITER(International Thermonuclear Engineering Reactor)工程堆设计中采用。

铍中子增殖反应:



为了满足核反应堆设计的需要,精确的 ${}^9\text{Be}$ 数据是必不可少的。令人遗憾的是迄今 ${}^9\text{Be}$ 的评价核数据还不令人满意,几个重要的评价数据库的 ${}^9\text{Be}$ 核数据之间存在明显的差异,见表 1。

表 1 ${}^9\text{Be}(n, 2n)$ 14 MeV 截面

Evaluation	Cross section (b)
ENDF/B-IV	0.536
ENDF/B-VI	0.485
JENDL-3T	0.542

有鉴于此,人们希望通过积分实验来检验 ${}^9\text{Be}$ 核数据的有效性。表 2 列出了现有的几个积分实验情况。Jnlich 铍积分实验给出的铍中子增殖率比 B-IV 计算值低 25%(厚度 20 cm),但 Kurchatov 实验值与 B-IV 计算完全符合。为了克服这些已有的铍积分实验的不足,有必要进行新的铍中子积分实验以检验铍数据。SWINPC* 进行了 ${}^9\text{Be}$ 球中子倍增率实验,采用球几何,铍厚度为 4.55, 10.45, 14.85 cm, IAPCM** 承担了理论分析工作。

表 2 已有的铍中子增殖率积分实验

Institution	Thickness (cm)	Geometry	Error	Remark
Jnlich (FRG)	8, 12, 20	Rectangular	3.8%, 3.2%, 1.2%	2-Dimensional
Kurchatov (USSR)	1.5, 5, 8	Spheric	3.2%, 2.9%, 2.8%	no large thickness
Texas (USA)	4.6, 13.8, 19.9	Spheric	9%, 9%, 9%	too large error

1 实验介绍

在 SWINPC 实验中,所关心的积分量是铍球中子泄漏增殖率 M_L 。 $M_L = L_{Be}/S$ 即单位 14

* SWINPC 为西南核物理与化学研究所; ** IAPCM 为北京应用物理与计算数学研究所。

MeV 源中子经铍增殖后的泄漏中子数。14 MeV 中子源位于球心,由 D^+ 束轰击 TiT 靶产生,源中子经铍球时发生 ${}^9\text{Be}(n,2n)$ 反应从而中子发生增殖。为了测量铍球中子泄漏率,采用全吸收法,即用一个大体积慢化介质(聚乙烯 CH_2)将铍球包围起来,从铍球泄漏出的中子被慢化且绝大部分中子被吸收。

根据中子数守恒有:

$$\text{有铍球时: } L_{\text{Be}} = A_{\text{H}}^{\text{M}} + A_{\text{C}}^{\text{M}} + L_{\text{CH}_2}^{\text{M}} \quad (1)$$

$$\text{无铍球时: } S = A_{\text{H}}^0 + A_{\text{C}}^0 + L_{\text{CH}_2}^0 \quad (2)$$

这样可得中子泄漏增殖率 M_L :

$$M_L = L_{\text{Be}}/S = A_{\text{H}}^{\text{M}}/A_{\text{H}}^0 \cdot \frac{1 + A_{\text{C}}^{\text{M}}/A_{\text{H}}^{\text{M}} + L_{\text{CH}_2}^{\text{M}}/A_{\text{H}}^{\text{M}}}{1 + A_{\text{C}}^0/A_{\text{H}}^0 + L_{\text{CH}_2}^0/A_{\text{H}}^0} = M_{\text{app}} \cdot F_c \quad (3)$$

$M_{\text{app}} = A_{\text{H}}^{\text{M}}/A_{\text{H}}^0$ 为表现增殖率,实验中用 ${}^{235}\text{U}$ 裂变室探测器分别测量有铍球系统和无铍球系统的 $\text{H}(n,\gamma)$ 吸收率得到; F_c 是由于聚乙烯球中 ${}^{12}\text{C}$ 对 neutron 吸收及中子从聚乙烯球泄漏而引入的修正量,由理论计算提供。实验测量了 3 个铍厚度: 12.8/17.35, 6.9/17.35, 2.5/17.35 (内径/外径)。

2 计算与分析

这部分讨论了测量方法的有效性;给出了理论计算修正项,得到了实验结果;对探测器系统对测量值的扰动进行了估计和校正;并将最后的实验值与理论值进行了比较。

2.1 测量方法的有效性

实验中聚乙烯大球中的 ${}^1\text{H}(n,\gamma)$ 反应率是由 ${}^{235}\text{U}$ 裂变室探测器测量的。一个令人关心的问题是探测器的响应 ${}^{235}\text{U}(n,f)$ 反应率能否精确地代表 ${}^1\text{H}(n,\gamma)$ 反应。

为了证实这个问题,我们用一维 ANISN 程序 25 群 ENDF/B-VI 中子群参数对实验系统进行了计算。计算中在聚乙烯中加入假想密度为 1×10^{-15} 的 ${}^{235}\text{U}$ 介质(不会影响系统的中子场),以考查 ${}^{235}\text{U}(n,f)$ 与 $\text{H}(n,\gamma)$ 的关系。表 3 给出了计算结果,可以看出,如果我们只关心反应率的相对值 $A_{\text{H}}^{\text{M}}/A_{\text{H}}^0$, ${}^{235}\text{U}$ 探测器可以给出非常精确的结果。

表 3 聚乙烯壳中 ${}^1\text{H}(n,\gamma)$ 和 ${}^{235}\text{U}(n,f)$ 反应率

Be sample	${}^1\text{H}(n,\gamma)$	Rela. Value	${}^{235}\text{U}(n,f)$	Rela. Value
0.0	0.8329	1.000	1.580E-12	1.000
12.8/17.35	1.1932	1.433	2.261E-12	1.431
6.9/12.8	1.5787	1.895	2.988E-12	1.891
2.5/17.35	1.7810	2.138	3.370E-12	2.133

这一理想的结果归因于在这个反应能区, ${}^1\text{H}(n,\gamma)$ 和 ${}^{235}\text{U}(n,f)$ 均有 $1/v$ 的截面特点。

2.2 修正因子 F_c 与实验结果

根据方程(3),在实验测得了表现增殖率 M_{app} 后,为了获得中子增殖率 M_L ,还需通过计算给出修正因子 F_c 。为此我们用 Monte Carlo 中子输运程序 MCNP 和 ${}^9\text{Be}$ 的 Los Alamos 评

价数据进行了模拟,表 4 给出了计算结果。

表 4 修正因子 F_c 的计算

Be sample	M_L	A_H	A_C	L_{CH_2}	F_c
0.0	1.0	0.854	0.069	0.077	—
12.8/17.35	1.332	1.224	0.055	0.053	0.929
6.9/12.8	1.667	1.598	0.040	0.029	0.891
2.5/17.35	1.840	1.779	0.033	0.028	0.883

根据测量的表观增殖率 M_{app} 和上面的修正因子,得到了所需要的实验结果 Be 球中子增殖率 M_L 。

表 5 实验的 Be 球中子增殖率 M_L

Be sample	M_{app}^*	F_c	M_L
12.8/17.35	1.371	0.929	1.274
6.9/12.8	1.711	0.891	1.525
2.5/17.35	1.832	0.883	1.618

* M_{app} 为 SWINPC 的测量值。

很明显,这个实验结果依赖于修正因子(F_c),假定各计算项的误差均为 10%,根据误差传递公式求得 M_L 的误差分别为 1.2%, 1.1%, 1.1%(不同铍厚度)。所以计算误差不会损害实验结果的精度。

2.3 探测器扰动校正

在 SWINPC 的实验测量中, ^{235}U 裂变室探测器被置于聚乙烯球之中。由于探测器的存在,周围的中子通量将会发生扰动,从而导致测量值 M_{app} 发生偏离。SWINPC 实验探测器系统如图 1 所示。

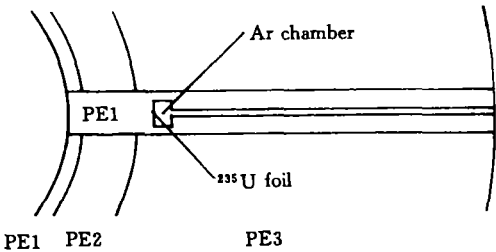


图 1 SWINPC 实验探测器系统

为考查这一扰动效应,我们进行了耦合的 ANISN-MORSE 计算,即未扰动的整个大系统(假定探测器不存在)用一维 ANISN 进行计算,扰动区域内用三维 Monte Carlo 程序 MORSE 进行模拟。耦合通过扰动区域的边界条件实现,扰动区域为包含探测器系统的足够大范围,从而可以认为在边界上通量的扰动可以忽略,即采用 ANISN 计算结果为 MORSE 的边界条件,MORSE 边界源为:

$$dI = q_k(r, \mu) |\Omega \cdot n| dA d\Omega$$

扰动结果在图 2,3 给出。这个结果显示探测器扰动会较大地影响测量结果(11%,18%),因

此有必要加以校正。

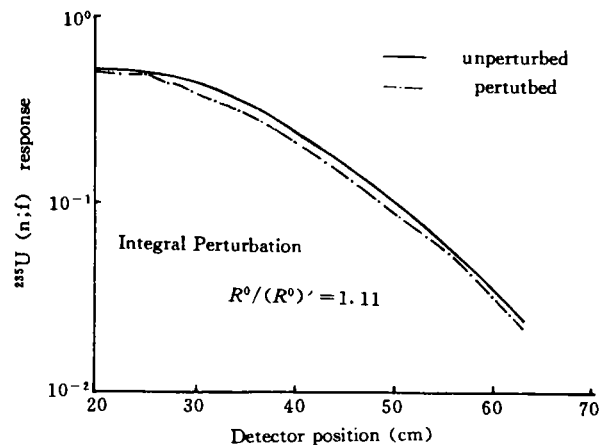


图 2 不含铍样品系统聚乙烯壳中²³⁵U(n,f)探测器响应扰动

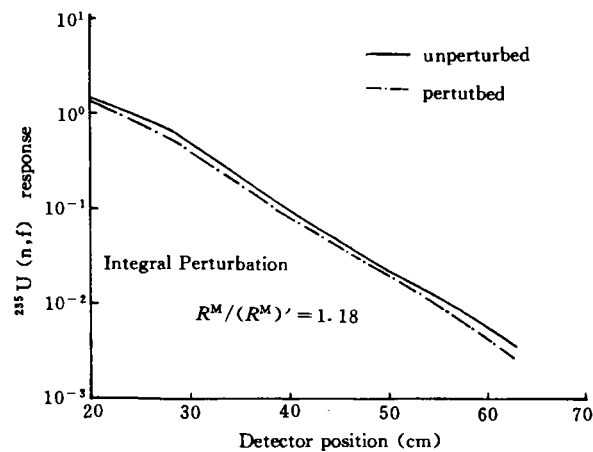


图 3 含铍(2.5/17.35)系统聚乙烯壳中²³⁵U(n,f)探测器响应扰动

我们采用如下公式对测量到的响应 R'_{exp} 进行修正：

$$R_{exp} = R'_{exp} \cdot \frac{R_{cal}}{R'_{cal}}$$

R_{cal} 和 R'_{cal} 分别为计算出的未扰动响应和扰动后的响应。

表 6 对扰动校正后的实验结果 M_L

Be sample	Before correction	After correction
12.8/17.35	1.274	1.325
6.9/17.35	1.525	1.582
2.5/17.35	1.618	1.713

2.4 实验值与理论计算的比较

作为积分实验的目的——检验评价核数据,比较了最后的实验值和理论计算值(见表7)。

表7 实验和计算的铍中子增殖率比较

Be sample	Calculated		Experimental SWINPC
	ANISN+ENDF/B-6	MCNP+LASL data	
12.8/17.35	1.320	1.332	1.325
6.9/17.35	1.667	1.667	1.582
2.5/17.35	1.850	1.840	1.713

上表显示,尽管在铍壳较薄时(4.55 cm),计算值与实验值吻合得也很好,但对于大厚度(10.45,14.85 cm),计算值比实验值高出5%和8%,超出实验误差。所以SWINPC实验指出ENDF/B-VI和LASL数据均过高地给出了铍中子增殖能力,需进一步评价,以满足核反应设计的需求。

3 总 结

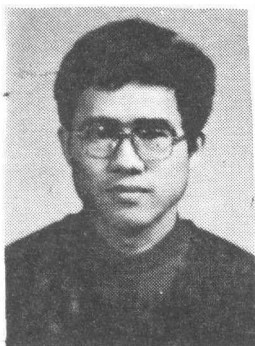
从以上的分析可以得到以下结论:

- (1) ^{235}U 裂变室探测器可以(相对地)精确测量 $^1\text{H}(n,\gamma)$ 反应率;
- (2) 计算修正不会给实验结果引入较大的误差;
- (3) 探测器系统会对测量结果产生较大的扰动,实验结果应加以修正;
- (4) SWINPC中子增殖率实验认为ENDF/B-VI和LASL评价核数据给出了偏高的中子增殖能力。

这项工作得到了国际原子能组织IAEA的支持。(合同号, No 5740/RB和5740/R1/RB)

参 考 文 献

- [1] Cheng E T. Review of the nuclear data status and requirements for fusion reactor. Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. & Tech., (Mito, Japan, 30 May-3 June, 1988)
- [2] Basu T K. et al., NSE, 70, 309 (1979)
- [3] Zagryadskij V A. et al., INDC (CCP)-272/G, IAEA, Vienna, Austria (1987)
- [4] Hartley R S. Neutron multiplication in beryllium, PhD Dissertation, University of Texas, Austin, Texas (1987)
- [5] Engle W W. Jr. A user's manual for ANISN, A one-dimensional discrete ordinate transport code with anisotropic scattering. K-1693, ORNL (1957)
- [6] MCNP-A general monte carlo code for neutron and photo transport. LA-7396-M (1981.4)
- [7] Benveniste J. et al., Information on the neutrons produced in the $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ Reaction. UCLA-4266 (1954)
- [8] MacFarlane R. et al., The NJOY data processing system. Vol. I LA-9303-M, Los alamos national laboratory (1982)



刘连焰：北京应用物理与计算数学研究所助理研究员，1984年毕业于上海复旦大学原子核物理专业，1987年获北京应用物理与计算数学研究所硕士学位。

Liu Lianyan; Researcher of Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing. Graduated from Fudan University in 1984, majoring in atomic nucleus physics and got master degree at Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing in 1987.