

# 飞行时间法测量脉冲堆热柱孔道热中子能谱

刘书焕<sup>1,2</sup>, 江新标<sup>1</sup>, 于青玉<sup>1</sup>, 仲云红<sup>1</sup>, 张文首<sup>1</sup>, 王凯<sup>1</sup>,  
杨军<sup>1</sup>, 王应林<sup>1</sup>, 张继红<sup>1</sup>, 方绍辉<sup>1</sup>, 周辉<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710613;

2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

**摘要:** 文章介绍飞行时间法测量中子能谱的基本原理, 给出脉冲堆热柱孔道飞行时间谱测量实验的系统设计及时间谱测量结果, 利用自行研制的解谱程序求解飞行时间法测量的热柱孔道热中子能谱分布。结果表明, 测量能谱较 Thermal Maxwellian 理论谱偏软, 谱峰对应的中子能量为  $(24.8 \pm 7.2)$  meV。

**关键词:** 飞行时间法; 热中子能谱; 脉冲堆

中图分类号: TL329

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)S0-0009-06

## Thermal Neutron Spectrum in Thermal Column of Pulse Reactor Measured Techniques With Time of Flight Method

LIU Shu-huan<sup>1,2</sup>, JIANG Xin-biao<sup>1</sup>, YU Qing-yu<sup>1</sup>, ZHONG Yun-hong<sup>1</sup>,  
ZHANG Wen-shou<sup>1</sup>, WANG Kai, YANG Jun<sup>1</sup>, WANG Ying-lin<sup>1</sup>, ZHANG Ji-hong<sup>1</sup>,  
FANG Shao-hui<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The basic principle of neutron spectrum measured with time of flight method was introduced. The design of experimental device for the time of flight spectrum in the thermal column of the pulse reactor measurement was given, and the time spectrum measured result was shown at the same time. In the end, the measured thermal neutron spectrum of the thermal column resolved by the selfmade programs was offered. The experiment results prove that the measured spectrum is a little softer than Thermal Maxwellian theory spectrum, the neutron energy value corresponding with the measured spectrum peak point is about  $(24.8 \pm 7.2)$  meV.

**Key words:** time of flight method; thermal neutron spectrum; pulse reactor

在反应堆的设计、安全运行及各种应用实验研究(如核仪器标定、核反应截面测量和核医

学剂量学等)中,都需要精确了解反应堆辐射场中子能谱分布。因此,自上世纪四十年代以来,

人们探索发展了各种中子能谱探测方法,如核反应法、核反冲法、飞行时间法、活化法和慢化球方法等。在热中子能谱测量中,飞行时间法是一种最直接、最经典的测量方法,在上世纪四、五十年代曾有很广泛的应用。从五十年代开始,飞行时间法已应用到快中子能谱测量方面。其测量的精确性和应用范围远远超过了其它中子能谱测量方法<sup>[1]</sup>。

根据脉冲堆热柱孔道几何特点,设计了飞行时间法能谱测量系统,较为全面地考虑了实验系统和环境因素对测量能谱准确性的影响,为脉冲堆安全运行及其应用研究提供了较为精确的热中子能谱参数。

## 1 基本原理

### 1.1 解谱基本原理

飞行时间法能谱测量是根据不同能量的中子飞行一定的距离所需飞行时间不同来分析中子能量,因此,中子按能量的分布就变成了按时间的分布,即只要测出中子飞行时间就可算出中子能量。对于非相对论中子,中子飞行时间  $t$  与中子能量区及飞行距离  $l$  之间的关系<sup>[1]</sup>可近似表示为:

$$t \approx 72.3l/\sqrt{E} \quad (1)$$

式中: $l$ 、 $E$  和  $t$  的单位分别取 m、eV 和  $\mu s$ 。

能谱与飞行时间谱的关系由下式决定:

$$\frac{dN(E)}{dE} \cdot dE = \frac{dN(t)}{dt} \cdot dt \quad (2)$$

即:

$$F(E)dE = [\phi(t) - \phi_b(t)]/t_m dt \quad (3)$$

式中: $t_m$  为飞行时间多道谱仪测量时间, s;  $\phi(t)$ 、 $\phi_b(t)$  分别为多道谱仪在  $t_m$  内测量的飞行时间谱及本底谱,  $cm^{-2}$ ;  $F(E)$  为与谱仪测量的飞行时间谱对应的中子能谱,  $cm^{-2} \cdot eV^{-1}$ ;  $dE$  和  $dt$  是两种分布上对应的微分间隔。这样,在飞行时间法中把测量中子能谱的任务就转化为测量飞行时间谱。

由式(2)、(3)得:

$$F(E) = \frac{\phi(t) - \phi_b(t)}{t_m} \cdot 72.3lE^{-\frac{3}{2}} \quad (4)$$

式中: $F(E)$  并非为实验孔道测量的能谱分布,因探测器具有一定的探测效率  $\epsilon(E)$ 。此外,当飞行中子所处实验环境为非真空时,还需考虑

环境空气衰减(主要是空气中的氮气和氧气组分)  $F_{air}$  和环境湿度衰减(水蒸气)  $F_H$  校正,考虑上述各项因素修正后,实验孔道测量能谱为:

$$\Phi(E) = \frac{F(E)}{\epsilon(E)F_{air}F_H} \quad (5)$$

### 1.2 中子飞行时间的确定

中子飞行时间是由时间分析器来测量的。为测量中子飞行时间,须记录中子起飞及到达终点的时刻,后者通常由放在终点的中子探测器给出。而起飞的参考时刻则可由多种方式给出,有:

1) 在周期性脉冲源条件下,可由与中子脉冲同步的电脉冲作为中子飞出的参考时刻;

2) 在非脉冲化中子源条件下,可由记录与中子同时产生的带电粒子或  $\gamma$  射线作为起飞的参考时刻;

3) 对于既无同步脉冲,又无适当伴随粒子射线用作参考时刻的情形,可通过记录中子在一个有机闪烁体内中子的散射作用获得起飞的参考时刻。

对于热中子,通常采用第 1 种方法<sup>[1]</sup>。对于快中子,3 种方法都行。本实验采用第 1 种方法,由与机械选择器形成的中子脉冲同步的光电脉冲给出中子起飞信号。

## 2 实验设计

### 2.1 实验装置

实验装置图示于图 1。从反应堆辐射出的各种能量的中子经热柱石墨体充分慢化后形成热中子束。

本实验根据脉冲堆孔道和辐射场特点,设计的飞行时间谱仪的电子学线路图示于图 2。

测定热中子谱的飞行时间谱仪一般采用机械选择器来获得脉冲中子源。机械选择器是一圆盘,它由 2 层不锈钢及其中间夹着的 1 层镉片组成。在圆盘上刻有 2 条互为  $180^\circ$  角的狭缝。选择器由直流马达驱动,圆盘转动时,当其中 1 条狭缝对准反应堆孔道时,中子束通过并起飞,而另 1 条狭缝也正好通过由发光二极管和光敏三极管相对组成的凹形槽,二极管发出的光恰好不受圆盘阻挡而穿过狭缝,被三极管接收形成电脉冲,成为中子束的起飞信号。中子探测器距选择器在一定距离处与中子束相垂

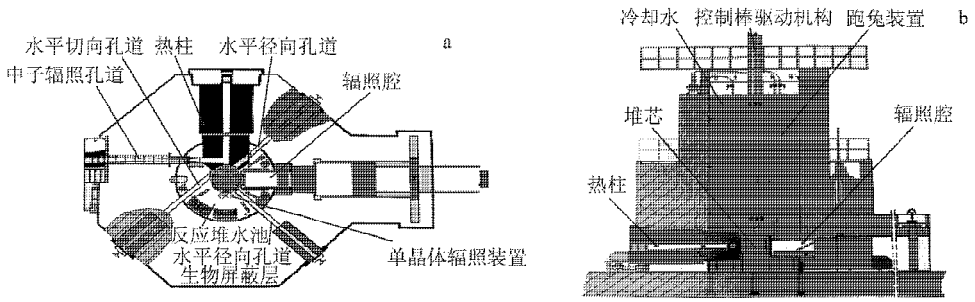


图 1 脉冲反应堆结构剖面示意图

Fig. 1 Cross section view of pulse reactor  
a——横剖图;b——纵剖图

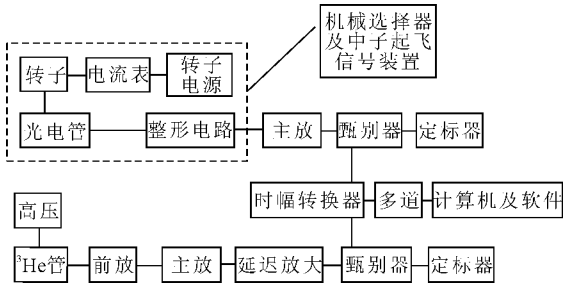


图 2 飞行时间谱仪电子学测量系统框图

Fig. 2 Block diagram of electronic measuring system for time of flight spectrum

直放置,中子打到中子探测器上形成的脉冲送到时间分析器的一个输入端,在分析器的另一端送入和中子起飞同步的信号,2个信号的时间间隔即为中子飞行时间;中子探测器和选择器之间的距离即为中子飞行距离。设计的热中子飞行时间谱测量装置示意图示于图 3。

### 2.2 实验测量

经整形后的光敏三极管的脉冲和<sup>3</sup>He 正比

计数管的脉冲分别做为中子的起飞信号和终止信号送入时幅转换器 TAC, TAC 的输出又被送入多道幅度分析器 MCA, 由 MCA 给出测量的飞行时间谱。

#### 1) MCA 道宽和 TAC 线性的刻度

对多道分析器的道宽进行刻度以便把测量谱  $\Phi(N)$  转换成中子飞行时间谱  $\Phi(t)$ 。由于测量是在热中子区,按中子飞行 1 m 的距离估算,中子飞行时间将达 ms 量级,因此,只用常规的延迟线(最大量程为  $10^2 \mu s$ )对系统进行刻度是不够的。

为在更宽的范围内对多道进行刻度,实验中选用<sup>3</sup>He 正比计数管探测到的 Be-Am 中子源辐射的中子形成的脉冲作为 TAC 的起始信号,采用脉冲发生器的脉冲作为终止信号送至系统。由于这两组脉冲之间没有时间上的关联,所以,它们之间的时间间隔是随机的,最小为零,最大为脉冲发生器的周期。改变脉冲发生器的频率就可以在不同时间量程下对系统的

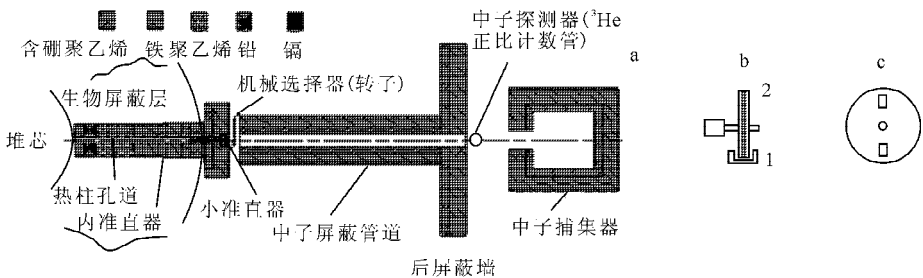


图 3 飞行时间谱测量实验装置设计示意图

Fig. 3 Design sketch for time of flight spectrum measured device

a: 整体装置; b: 1——发光二极管和光敏三极管组成的凹形槽, 2——机械选择器; c: 机械选择器中的转盘

道宽进行刻度。

实验刻度结果表明,飞行时间谱仪电子学测量系统具有较好的时间线性(图4)。

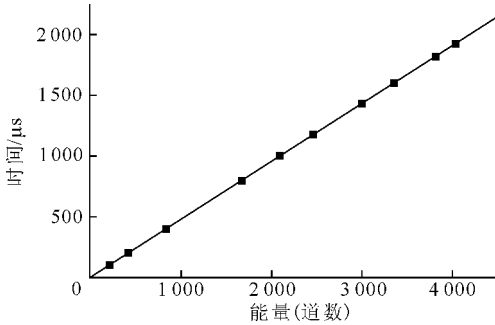


图4 MCA的 $200 \times 10$  K档时间刻度拟合曲线

Fig. 4 Fitting line of time calibration for  $200 \times 10$  K scale of MCA

本实验中,飞行时间谱仪测量档位选择为 $200 \times 10$  K档,对应的多道谱仪刻度曲线方程为:

$$T = 0.7159 + 0.4762N \quad (6)$$

式中: $N$ 为多道谱仪道址序数; $T$ 为多道谱仪第 $N$ 道对应的测量飞行时间, $\mu\text{s}$ 。

## 2) 飞行时间谱和本底谱测量

在脉冲堆满功率运行时,机械选择器转子转速为 $(3500 \pm 150)$  r/min,时幅转换器选择 $200 \times 10$  K档位,环境温度、相对湿度和大气压强分别为 $(25.7 \pm 0.4)$   $^{\circ}\text{C}$ 、 $(68 \pm 0.2)\%$ 和 $(96.1 \pm 0.1)$  kPa条件下,实验测量的飞行距离为1.5 m处的归一化飞行时间谱示于图5(未扣本底)。

由于转子不是绝对黑体,透过的超热中子、 $\gamma$ 射线将引起本底,另外还有环境中也存在中

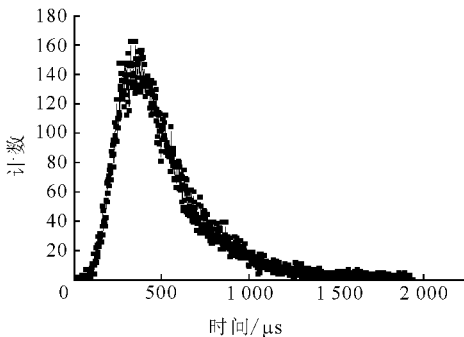


图5 飞行时间测量谱

Fig. 5 Time of flight measurement spectrum

子、 $\gamma$ 射线本底等。因此,对测量飞行时间谱需进行本底扣除。实验采用本底谱测量的方法,在堆满功率运行时,将机械选择器转子遮掩住热柱孔道口,阻止中子束的通过,同时用脉冲信号发生器周期性脉冲代替转子狭缝触发的光敏三极管的脉冲作为起始信号,在谱仪测量活时间为9.6 h的条件下,实验测量的本底计数结果如图6所示。从图6可以看出,在统计涨落范围内本底谱为均匀分布。

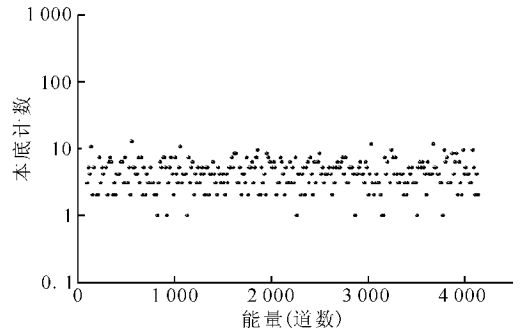


图6 本底测量计数

Fig. 6 Measurement background counts

## 3 数据解谱处理

考虑到测试电子学系统延迟、环境大气对飞行中子和测量飞行时间的不确定性以及 $^3\text{He}$ 探测效率等因素的影响,将上述飞行时间谱测量结果转换成孔道对应的飞行时间谱和中子能谱分布时,需根据实验测量条件和解谱原理,确定以下各参量。

### 3.1 系统时间零点的确定

由于起始信号和终止信号经过了不同的电子线路,主要是给出起飞信号的光敏三极管对光响应有较长的驰豫时间,使得起飞信号有相当的延迟。为确定时间零点 $t_0$ ,实验上可在不同飞行距离下去测量同一能量的中子,用所测到的不同飞行时间来进行推算,具体方法如下。

设能量为 $E$ 的中子在飞行距离 $l_1$ 和 $l_2$ 时的飞行时间分别为 $t_1$ 和 $t_2$ ,由于信号延迟了 $t_0$ ,所以,实际测到的飞行时间分别为 $T_1$ 和 $T_2$ ,则有:

$$T_i = t_i - t_0 \quad (7)$$

由式(1)可得:

$$t_i = \frac{72.3l_i}{\sqrt{E}} \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

因而可推算得出:

$$t_0 = \frac{l_2 T_1 - l_1 T_2}{l_1 - l_2} \quad (9)$$

实验通过测量不同飞行距离的飞行时间谱峰值对应的多道谱仪测量时间(为减小统计涨落,求解过程中对飞行时间测量谱进行了光滑处理),根据式(9)确定出系统的时间零点为  $(163.27 \pm 4.54) \mu\text{s}$ 。

### 3.2 时间分辨修正<sup>[2]</sup>

根据实验条件,由于转子狭缝具有一定的宽度,因此,形成的中子起飞信号具有一定的脉宽。同时考虑到中子探测器、多道谱仪和时幅转换器具有一定的分辨时间,因此,需对多道谱仪测量的飞行时间谱进行分辨时间修正。设修正前后的飞行时间谱分别为  $\phi(t')$  和  $F(t)$ , 根据定义,有:

$$\phi(t') = \int_0^\infty F(t)R(t, t')dt \quad (10)$$

其中,  $R(t, t')$  为时间分辨函数,可用高斯分布表示:

$$R(t, t') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-t')^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

$$\sigma = \Delta t/2.36 \quad (12)$$

其中,  $\Delta t$  为时间分辨半宽度。

### 3.3 <sup>3</sup>He 正比计数管探测效率

根据实验所用<sup>3</sup>He管(型号18NH10)技术指标(有效长度为100 mm,气体压力为  $6 \times 10^5$  Pa,热中子探测效率为75%)和探测效率定义,导出<sup>3</sup>He管探测效率。<sup>3</sup>He管探测几何示意图如图7所示。设中子束沿垂直于纸面的方向入射,将<sup>3</sup>He管几何沿垂直于纸面的方向平行切分。根据<sup>3</sup>He管划分几何,得<sup>3</sup>He管探测效率  $\epsilon$  如下式所示:

$$\epsilon = e^{-\sum_i N_j \sigma_j(E) t_d} \cdot \left(1 - \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot e^{-2rN_{3\text{He}} \sigma_{3\text{He}}(E) \sin \theta} d\theta\right) \quad (13)$$

式中:  $t_d$  为<sup>3</sup>He管壁厚, cm;  $N_j$  为<sup>3</sup>He不锈钢管壁中第  $j$  种组分的原子数密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $\sigma_j(E)$

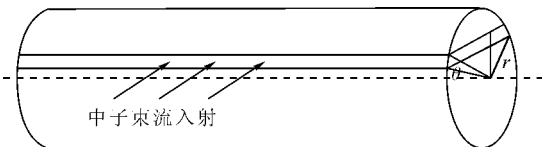


图7 <sup>3</sup>He管探测几何示意图

Fig. 7 Detecting geometric diagram of <sup>3</sup>He tube

为<sup>3</sup>He管壁中第  $j$  种组分中子核反应总截面, bar;  $N_{3\text{He}}$  为<sup>3</sup>He管内单位体积<sup>3</sup>He原子数密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $\sigma_{3\text{He}}(E)$  为<sup>3</sup>He中子核反应总截面, bar。

根据18NH10所示的技术指标,利用式(13)计算的<sup>3</sup>He管的探测效率曲线及其拟合曲线示于图8。

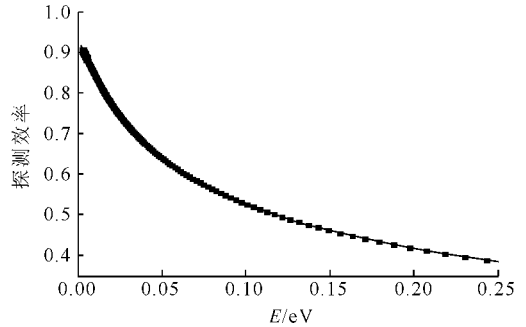


图8 18NH10型<sup>3</sup>He管热中子探测效率曲线分布及其拟合曲线

Fig. 8 Distributions of thermal neutron detecting efficiency and fitting line for type of 18NH10 <sup>3</sup>He tube

根据效率曲线,得到<sup>3</sup>He管热中子探测效率曲线拟合方程为:

$$\lg \epsilon(E) = -0.02934 - 4.81475E + 39.7459E^2 - 226.79964E^3 + 685.85779E^4 - 820.90515E^5 \quad (E < 0.3 \text{ eV}) \quad (14)$$

根据效率曲线拟合方程计算的<sup>3</sup>He管在能量为0.025 eV处的探测效率为74.45%,与生产厂商提供的探测效率技术指标(75%)吻合较好。

### 3.4 环境大气对中子的衰减

#### 1) 环境空气对飞行中子的衰减

空气衰减校正主要考虑了环境大气中氧气和氮气对中子的衰减影响,  $F_{\text{air}}$  可表示为:

$$F_{\text{air}} = \exp\left(-\sum_i 2N_i \sigma_i(E) l\right) \quad (15)$$

式中:  $N_i$  为单位体积空气中所含氮气或氧气的分子数密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $\sigma_i(E)$  为氮或氧原子的中子核反应总截面, bar;  $l$  为中子飞行距离, cm。

根据气体状态方程及绝对湿度和相对湿度的关系<sup>[3]</sup>,环境大气中氮气和氧气的分子数密

度  $N_i$  可表示为:

$$N_i = w_i N_0 p (1 - \phi) M_{\text{air}} / (RT) \quad (16)$$

式中:  $w_i$  为空气中氧气或氮气的质量百分比;  $N_0$  为阿佛加德罗常数;  $M_{\text{air}}$  为干空气摩尔质量, g/mol;  $p$  为环境大气压, Pa;  $\phi$  为环境相对湿度;  $R$  为气体状态方程常数;  $T$  为环境温度, K.

## 2) 环境湿度对中子的衰减

环境湿度对中子衰减主要考虑空气中水蒸气对中子的衰减影响。同理,  $F_H$  可表示为:

$$F_H = \exp(-N_{\text{H}_2\text{O}} \sigma_{\text{H}_2\text{O}}(E) l) = \exp(-N_{\text{H}_2\text{O}} (2\sigma_{\text{H}}(E) + \sigma_{\text{O}}(E)) l) \quad (17)$$

式中,  $\sigma_{\text{H}}(E)$ 、 $\sigma_{\text{O}}(E)$  分别为氢、氧原子的中子总截面, bar;  $N_{\text{H}_2\text{O}}$  表示空气中水的分子数密度,  $\text{cm}^{-3}$ , 由空气湿度、温度、气压等参数确定。

根据相对和绝对湿度的定义<sup>[4]</sup>及气体状态方程, 空气中水的分子数密度  $N_{\text{H}_2\text{O}}$  可表示为:

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\psi p}{RT} N_0 \quad (18)$$

## 4 结果与讨论

根据上述各参量计算分析和解谱原理, 本文利用自行研制的解谱程序求解的热柱孔道实验测量能谱(归一化)与 SNAD-II 谱数据库<sup>[4]</sup>提供的 Thermal Maxwellian(20 °C)理论谱(归一化处理)曲线的对比如图 9 所示。

求解的实验测量中子能谱峰对应的中子最可几能量值为  $(0.0248 \pm 0.0072)$  eV; 与理论谱峰对应的最可几能量值 0.025 eV 相吻合, 测量谱平均中子能量为  $(0.042 \pm 0.010)$  eV, Thermal Maxwellian 理论谱平均中子能量为

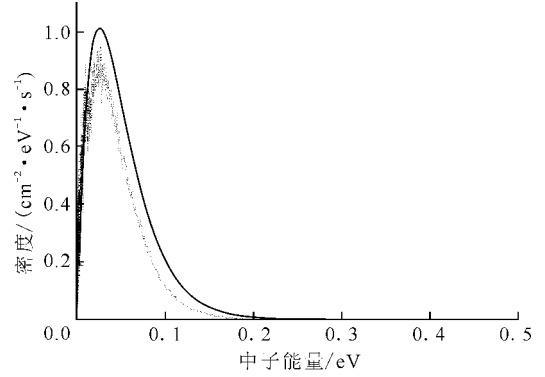


图 9 热柱孔道实验测量热中子谱与

20 °C 时 Thermal Maxwellian 理论谱对比

Fig. 9 Comparison of experimental thermal neutron spectrum in thermal column

with Thermal Maxwellian theory spectrum at 20 °C

实线——理论谱; 虚线——实验测量谱

0.045 eV。在 0.045 eV 以上高能段热柱孔道测量谱较理论谱偏软。

## 参考文献:

- [1] 复旦大学, 清华大学, 北京大学合编. 核物理实验方法(下册)[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 26-31.
- [2] 岳骞. 用  $^{235}\text{U}$  裂变电离室绝对测量热柱中子注量率[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 1998.
- [3] 陈敏衡, 丛德滋, 方图南. 化工原理(下册)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 213.
- [4] BERG S, MCE W N, GROU. A computer-automated iterative method for neutron flux spectra determination by foil activation; AFWL-TR-67-41 [R]. [S. l.]: [s. n.], 1967.