

# TEXONO 反应堆中微子能谱的计算\*

陈栋梁<sup>1,2</sup> 李金<sup>1</sup> 毛泽普<sup>1</sup> 王子敬<sup>3</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (解放军防化指挥工程学院 北京 102205)

3 (中研院物理研究所 台北 11529)

**摘要** 在低能反应堆中微子物理实验中,无论是研究中微子振荡、中微子反应还是测量中微子反常磁矩,都必须准确地知道反应堆中微子的通量和能谱. 本文详细讨论了反应堆中微子能谱的计算方法,依据 TEXONO 实验所用的 NP2 反应堆的实际情况及探测器的安排,计算并得到中微子的通量和能谱.

**关键词** 反应堆 中微子 能谱

## 引言

TEXONO(Taiwan Experiment on Reactor Neutrino)是由北京高能物理研究所、台北中研院物理研究所和美国 Maryland 大学等多个单位协作进行的中微子物理实验研究课题. 实验以台湾 II 号核电站的反应堆作为中微子发射源,用 CsI(Tl)晶体量能器做探测器来研究有关中微子物理的各项内容. 实验初期以研究中微子电子散射反应和中微子反常磁矩的测量为主<sup>[1-3]</sup>.

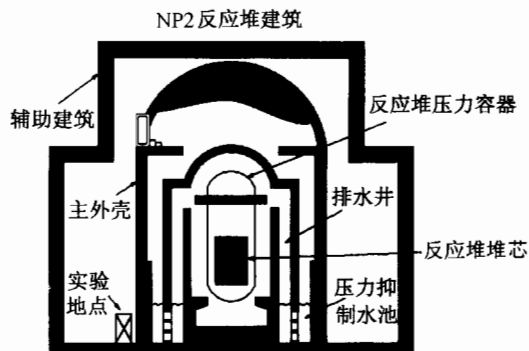


图1 反应堆及探测装置位置侧视简图

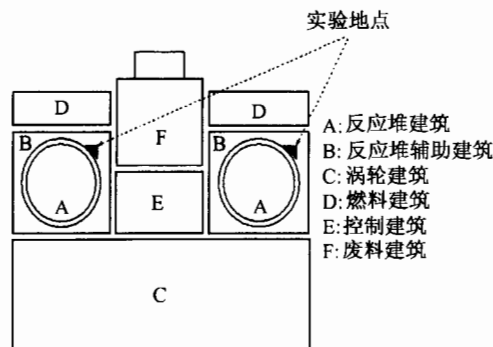


图2 反应堆及探测装置位置俯视图

2001-12-26 收稿

\* 海峡两岸自然科学基金(19975050 和 87-2112-M-001-034, 88-2112-M-001-007)共同资助

台湾 II 号核电站 (简称为 NP2) 由两座沸水堆组成, 每座反应堆的热输出功率为 2900MW. 反应堆中产生裂变效应的核燃料主要有  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  等核素, 反应堆热功率的贡献几乎都来自以上 4 种核素. 中微子的探测装置置于整个反应堆建筑的最底层, 距离反应堆芯分别为 28m 和 102m, 这既是出于对建筑的承重能力方面的考虑, 另一方面, 也是尽可能地增加对宇宙线的屏蔽. 反应堆的运行周期约为 16 个月, 其间反应堆关停时间约为 50 天. 反应堆建筑结构及探测器装置的位置分布如图 1、图 2 所示.

## 1 反应堆中微子能谱计算

关于计算反应堆中微子能谱的方法, 尽管不同文献的描述各有差异, 但是归纳起来, 可以认为它们基本上是从两个方面考虑的, 即反应堆核燃料中各种核素的燃烧情况, 以及反应堆中各种核素裂变后独立的中微子能谱分布. 以文献[4]为例, 所述如下:

$$S(E_\nu) = \sum_i NF_i S_i(E_\nu) \quad (\text{MeV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}). \quad (1)$$

(1)式中,  $S(E_\nu)$  为反应堆中微子的总能谱,  $NF_i$  为核燃料中第  $i$  种核素单位时间内的裂变次数,  $S_i(E_\nu)$  为第  $i$  种核素裂变后独立的中微子能谱. 下面, 分别从上述两个方面进行中微子能谱计算的阐述.

### 1.1 反应堆核燃料平均裂变次数 $NF$ ( $\text{fissions} \cdot \text{s}^{-1}$ )

反应堆核燃料中各种核素单位时间内的平均裂变次数  $NF$  与反应堆单位时间内平均的热输出功率成正比, 是连续的时间函数, 它的定义如下:

$$NF(t) = \frac{W(t)}{\sum_i \eta_i(t) E_i^{\text{eff}}} \quad (\text{fissions} \cdot \text{s}^{-1}). \quad (2)$$

(2)式中,  $W(t)$  表示反应堆单位时间内平均的热输出功率,  $E_i^{\text{eff}}$  表示第  $i$  种核素每次裂变释放的平均能量,  $\eta_i(t)$  表示第  $i$  种核素对平均裂变次数的相对贡献. 假如把反应堆结构人为的分成  $j$  段, 则有

$$NF_i^j(t) = \frac{a_j(t) W(t)}{\sum_m f_m^j(t) E_m^{\text{eff}}} \cdot f_i^j(t) \quad (\text{fissions} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (3)$$

(3)式中,  $m$  与  $i$  意义相同, 都是表示核燃料中核素的种类.  $f_i^j(t)$  表示第  $j$  段燃料中核素  $i$  对于该段核燃料单位时间内平均裂变次数的相对贡献, 即

$$f_i^j(t) = \frac{N_i^j(t)}{\sum_k N_k^j(t)}, \quad (4)$$

$$N_i^j(t) = \frac{m_i^j(t)}{M_i}. \quad (5)$$

(4)式中  $k$  的意义同  $i$ ,  $N_i^j(t)$  表示第  $j$  段核燃料中核素  $i$  的原子核数量, 而(5)式中  $m_i^j(t)$  表示核素  $i$  在第  $j$  段燃料中的净质量,  $M_i$  表示核素  $i$  的原子量.

另外, (3)式中的  $a_j(t)$  表示第  $j$  段核燃料占全部燃料单位时间内的热输出功率的比

重,即

$$a_j(t) = \frac{W_j(t)}{W(t)}. \quad (6)$$

从上述分析可知,由于核燃料中各种核素的原子量和裂变能量是已知的,因此,只要我们知道了反应堆中某一时刻各段核燃料的热输出功率以及对应的各种核素的当前净质量,就可以计算出整个反应堆核燃料中某种核素单位时间内的平均裂变次数.

## 1.2 各种核素裂变后的中微子能谱

计算某种核素裂变后的中微子能谱,基本上可以分为两步:首先,测量出裂变中微子源中某种核素  $i$  裂变后的总  $\beta$  能谱,并将它进行分解,得到核素  $i$  各裂变产物的子  $\beta$  能谱;然后,再利用这些子  $\beta$  能谱换算出相应的中微子能谱,经过积分运算,最后得到核素  $i$  裂变后总的中微子能谱  $S_i(E_\nu)$  ( $\text{fission}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ). 详细描述如下<sup>[5]</sup>:

对某一放射性核素  $(Z, A)$ , 在  $E_\beta - E_\beta + dE_\beta$  能隙间释放出一个  $\beta$  粒子的概率为

$$R_\beta(E_\beta) dE_\beta = \int_0^{Q-E_\beta} P(E_\beta, E_x) dE_\beta dE_x, \quad (7)$$

其中

$$P(E_\beta, E_x) dE_\beta dE_x = b(E_x) \cdot dE_x \cdot F(Z, A, E_\beta) \cdot (Q - E_x - E_\beta)^2 \cdot p_\beta \cdot (1 + E_\beta) \cdot dE_\beta / f(Z, A, Q - E_x) \quad (8)$$

表示放射性核素  $(Z, A)$  衰变产生一个能量为  $E_\beta - E_\beta + dE_\beta$  的  $\beta$  粒子并且子核激发能为  $E_x - E_x + dE_x$  的概率;(8)式中  $b(E_x) \cdot dE_x$  表示该种衰变形式的分支比,  $F(Z, A, E_\beta)$  是标准的费米-库仑函数,  $p_\beta$  是  $\beta$  粒子的动量,  $Q$  是  $\beta$  衰变的总能量,  $f(Z, A, Q - E_x)$  为规范化函数. 相应的,以  $Q - E_\nu - E_x$  替代  $E_\beta$ , 得到

$$R_\nu(E_\nu) dE_\nu = E_\nu^2 \int_0^{Q-E_\nu} b(E_x) \cdot dE_x \cdot F(Z, A, E_\beta) \cdot [(Q - E_\nu - E_x)^2 + 2(Q - E_\nu - E_x)]^{1/2} \cdot (E_\nu + E_x - Q - 1) \cdot dE_\nu / f(Z, A, Q - E_x). \quad (9)$$

将分解得到的各裂变碎片  $(Z, A)$  的产额与  $R_\nu(E_\nu)$  相乘, 再进行迭加求和, 进而得到核燃料中核素  $i$  的裂变后的中微子能谱:

$$S_i(E_\nu) = \sum_n Y_n(Z, A) \cdot R_\nu(E_\nu). \quad (10)$$

(10)式中  $Y_n(Z, A)$  即为核素  $i$  一次裂变后产生的裂变碎片  $(Z, A)$  的产额. 文献[14, 15]等相继给出了<sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu 实验测量的  $\beta$  能谱和计算得到的中微子能谱, 可供参考.

上述的这种计算方法存在一定的不确定性, 因为对于某种核素裂变后产生的各裂变碎片的  $\beta$  能谱和中微子能谱, 只有部分是已知的. 所幸的是, 文献[5, 6]的实验结果表明, 已知的裂变子核的  $\beta$  衰变对全部  $\beta$  衰变的贡献约为 75%—85%. 文献[6]的结果如表 1 所示, 表 1 中  $N_i$  是指每次裂变所放出的中微子的数量, 其能量范围在 0—8MeV.

对于反应堆核燃料中各种核素裂变后产生的中微子能谱, 理论上应该是恒定的, 所以

这一部分的数据是可以参考相关文献的结果. 文献[5,6]的结果基本相符, 差异不大.

表 1 不同诱发条件下铀系核素裂变后的中微子产额

核素	<sup>235</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>239</sup> Pu	<sup>240</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu
$E_{\nu}/\text{MeV}$	0.5	14	0.5	14	0.5	0.5	热中子
$N_{\nu}$ (已知)	4.92	4.34	5.03	4.71	4.34	4.48	4.61
$N_{\nu}$ (未知)	1.22	1.07	2.05	1.88	1.24	1.45	1.81
$N_{\nu}$ (全部)	6.14	5.41	7.08	6.59	5.58	5.93	6.42

## 2 NP2 反应堆中微子能谱的计算

TEXONO 反应堆中产生裂变效应的核燃料主要是<sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu 等 4 种核素, 它们对应的裂变能量如表 2 所示. 依照上文的论述, 我们分别从反应堆核燃料的燃烧情况和各核素独立的中微子能谱两个方面进行反应堆总的中微子能谱的计算.

表 2 几种核素裂变释放出的平均能量

核素	<sup>235</sup> U	<sup>239</sup> Pu	<sup>238</sup> U	<sup>241</sup> Pu
$E^{eff}/\text{MeV}$	201.7	210.0	205.0	212.4

### 2.1 NP2 反应堆核燃料平均裂变次数 $NF$ (fissions $\cdot$ s<sup>-1</sup>)

从上文中关于反应堆中微子能谱计算方法的描述中, 我们得知, 反应堆核燃料当前时刻的燃烧情况可以用反应堆核燃料中各种核素当前时刻的质量、反应堆当前时刻的热输出功率及其位置分布来描述. 根据 NP2 反应堆的实际情况, 我们将该堆划分为 624 个单元. 以 NP2 反应堆 1999 年 10 月 19 日 22 时 54 分 12 秒时的数据为例, 计算结果如表 3 所示.

表 3 NP2 反应堆核燃料的平均裂变次数 (fissions  $\cdot$  s<sup>-1</sup>)

核素	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu
$NF_i$ (10 <sup>18</sup> s <sup>-1</sup> )	1.536	86.36	0.3377	0.0503

### 2.2 NP2 反应堆中微子在探测器位置的通量

反应堆单位时间内释放的中微子数量可以通过下式计算:

$$S(t) = \sum_i NF_i(t) \cdot N_{\nu,i}, \quad (11)$$

式(11)中  $S(t)$  表示反应堆某一时刻的中微子发射量,  $N_{\nu,i}$  表示核素  $i$  中微子产额. TEXONO 的中微子探测器与两座反应堆的距离分别为  $R_1 = 28\text{m}$  和  $R_2 = 102\text{m}$ , 假设从反应堆发射出的中微子在  $4\pi$  角度空间内均匀分布, 则探测器地点的反应堆中微子的注量率可表述如下:

$$\Phi(t) = \frac{S(t)}{4\pi R_1^2} + \frac{S(t)}{4\pi R_2^2}. \quad (12)$$

将表1、表3的数据代入(12)式,即可得到相应时刻探测器处的中微子注量率:

$$\Phi(t) = 6.8 \times 10^{12} \quad (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}).$$

### 2.3 NP2 反应堆中微子的能谱

由于各种核素裂变后的中微子能谱在理论上是恒定的,而且各文献的计算结果基本相符,因此引用文献[4]的数据(如表4所示)投入计算.

表4 各种核素裂变后的中微子能谱

$E_\nu/\text{MeV}$	$N_\nu$			
	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$
0.007813	0.024	0.089	0.14	0.2
0.01563	0.092	0.35	0.56	0.79
0.0312	0.35	1.32	2.13	3.0
0.0625	0.61	0.65	0.64	0.59
0.125	1.98	2.02	1.99	1.85
0.25	2.16	2.18	2.08	2.14
0.50	2.66	2.91	2.63	2.82
0.75	2.66	2.96	2.58	2.90
1.0	2.44	2.77	2.35	2.64
1.5	1.72	1.99	1.50	1.76
2.0	1.28	1.51	1.09	1.33
2.5	8.50(-1)	1.06	7.14(-1)	9.13(-1)
3.0	5.90(-1)	7.60(-1)	4.83(-1)	6.32(-1)
3.5	4.10(-1)	5.50(-1)	3.19(-1)	4.31(-1)
4.0	2.84(-1)	3.86(-1)	2.07(-1)	2.88(-1)
4.5	1.84(-1)	2.58(-1)	1.24(-1)	1.79(-1)
5.0	1.20(-2)	1.71(-1)	7.68(-2)	1.14(-1)
5.5	7.40(-2)	1.06(-1)	4.52(-2)	6.82(-2)
6.0	4.23(-2)	6.05(-2)	2.49(-2)	3.71(-2)
6.5	2.07(-2)	3.15(-2)	1.11(-2)	1.73(-2)
7.0	1.12(-2)	1.74(-2)	5.54(-3)	8.87(-3)
7.5	5.56(-3)	9.28(-3)	2.55(-3)	4.49(-3)
8.0	2.40(-3)	4.69(-3)	9.26(-4)	2.16(-3)

表4中的能量是指该能量道的上限,能谱数据的单位是  $\bar{\nu}_e/\text{MeV} \cdot \text{fission}$ , (-1)表示  $\times 10^{-1}$ ,其他数据依此类推.

将表3、表4的数据代入(1)式,并将其归一化,最终可以得到NP2反应堆的中微子能谱,图3所示的是依据上述公式和数据计算得到的归一化后的NP2反应堆

中微子能谱.纵坐标的单位是  $\bar{\nu}_e/\text{MeV}$ ,横坐标的单位 MeV.本文的计算结果与文献[7]的结果进行了对比,数据基本相符.

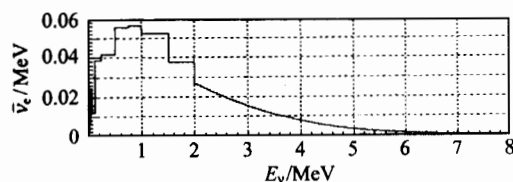


图3 NP2 反应堆中微子能谱

### 3 结束语

本文为描述计算的原理和方法,只给出了某时刻的中微子通量和能谱.实际上,物理实验研究需要在整个实验周期内的中微子通量和能谱,届时还必须对时间进行积分,同时要考虑反应堆热功率随时间的变化.

由于论文篇幅限制,关于 NP2 反应堆 1999 年 10 月 19 日 22 时 54 分 12 秒时的运行数据和本文计算结果与文献[7]的比对详情在此就不一一列出了.

感谢台北中研院物理研究所赖文彬、罗青山等人的大力帮助,特别是他们提供的 NP2 反应堆的运行资料,直接为我们的计算提供了完整的原始数据.

#### 参考文献 (References)

- 1 WONG H T, LI Jin. Nucl. Phys., 1999, **B77**:177
- 2 WONG H T, LI Jin, CHANG C C. Nucl. Phys., 2000, **B87**:517
- 3 WONG H T, LI Jin. Mod. Phys. Lett., 2000, **A15**:2011
- 4 Zacek G, Feilitzsch F V et al. Physical Rev., 1986, **D34**:2621
- 5 Tengblad O, Aleklett K et al. Nucl. Phys., 1989, **A503**:146
- 6 Vogel P, Schenter G K et al. Phys. Rev., 1981, **C24**:1543
- 7 LUO Qing-Shan. The Reactor Neutrino Spectrum. Inner-report of TEXONO Meeting, Jan. 2000

### Calculation of Reactor Antineutrino Spectra in TEXONO\*

CHEN Dong-Liang<sup>1,2</sup> LI Jin<sup>1</sup> MAO Ze-Pu<sup>1</sup> WONG T. H.<sup>3</sup>

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039)

2 (Institute of Chemical Defence, PLA, Beijing 102205)

3 (Physics Institute AS, Taipei 11529)

**Abstract** In the low energy reactor antineutrino physics experiments, either for the researches of antineutrino oscillation and antineutrino reactions, or for the measurement of abnormal magnetic moment of antineutrino, the flux and the spectra of reactor antineutrino must be described accurately. In this paper, the method of calculation of reactor antineutrino spectra was discussed detailedly. Furthermore, Based on the actual circumstances of NP2 reactors and the arrangement of detectors, the flux and the spectra of reactor antineutrino in TEXONO were worked out.

**Key words** reactor, neutrino, energy spectrum

Received 26 December 2001

\* Supported by Science Foundation of Two Sides of Strait(19975050 and 87-2112-M-001-034, 88-2112-M-001-007)