

采用异色视亮度匹配法 测量明视觉光效率函数

吴辛甲 朴大植 刘允翥 刘少珏 李 琪 赫葆源 许宗惠

(中国计量科学研究院)

(中国科学院心理研究所)

摘要 本文介绍采用异色视亮度匹配法,用A光源照明,在 2° 和 10° 视场条件下测量明视觉光效率函数 $V(\lambda)$ 的实验装置、方法及结果。观察者中有汉族、朝鲜族和哈萨克族,测量结果无明显差异。在 2° 视场条件下对16名观察者测得的 $V(\lambda)$ 值与国外9个实验室对37名观察者的平均值相符。

测量光效率函数 $V(\lambda)$ 的方法很多,有异色视亮度匹配法、闪烁法、逐步视亮度比较法、最小界线辨认法、阈限法等^[1]。1924年 CIE 公布的 $V(\lambda)$ 值是用闪烁法和逐步比较法测量的平均值^[2]。近年来,人们发现使用的测量方法不同,得到的 $V(\lambda)$ 曲线也不同。因此,当用眼睛直接比较两个不同光源的亮暗时,若二者的光亮度相等,而往往感觉并不一样亮。在单色光源或类似类色光源的亮度与视亮度之间,这种矛盾更为突出。为此,CIE 的 Kinney^[3] 和池田光男^[4] 提出了征求视亮度匹配数据和颜色数学模型的建议。本文报导我们用异色视亮度匹配法,以A光源为参考光源,在 2° 视场条件下测量了16名观察者、在 10° 视场条件下测量了9名观察者的明视觉光效率函数的情况。

一、实 验 装 置

实验装置如图1所示。从光源S发出的光经透镜 L_1 变成平行光后,又经反射镜 M_1 和透镜 L_2 成象在双光栅单色仪 GDM-1000 的入射狭缝 S_1 上(狭缝宽度为3mm时,出射光波半宽度为1nm)。从单色仪出射狭缝射出来的单色光经消色差透镜 L_3 将出射狭缝的象成象在光楔 WG_1 上, WG_1 的密度为0~4,由伺服电机带动光楔左右移动以改变单色光的强度。透过光楔的单色光入射到消色差透镜 L_4 形成平行光束,再通过半透半反玻璃片 PS。此玻璃片沿中心线分为左右相等的两部分,一部分镀铝反射白光;另一部

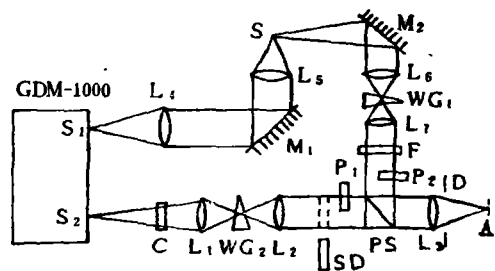


图1 实验装置

本文于1983年12月19日收到。

分不镀透过单色光束, 并被消色差透镜 L_1 聚焦于直径约 5mm 的人工瞳孔 A 上。

另外, 从光源发出的另一部分光被反射镜 M_2 反射后由透镜 L_2 聚焦在光楔 WG_2 上, 又经透镜 L_3 变成平行光, 透过中性减光玻璃片 F 照射到 PS 玻片的镀铝面并被反射到 L_1 上, 也聚焦在 A 上。利用 WG_2 和 F 可调节该参考白光的强度, 以使视场满足所要求的亮度水平。

在 PS 前面的两个光路中分别装有挡板 P_1 和 P_2 , 调整它们的位置使视场成为两个相等的半圆形, 如图 2 所示, 一半是白光(W), 另一半是单色光(λ), 中间有一条黑的细线, 其宽度约为 $10'$ 。采用不同焦距的 L_1 和不同孔径的限制光阑 D 可以控制视场的大小。对 2° 视场, L_1 的焦距为 250mm, D 的直径为 8mm; 对 10° 视场, 则分别为 176mm 和 32mm。

从单色仪出射的光是一级光谱和二级光谱重叠的。在测一级光谱时, 在光路 C 处加入一片 JB_1 玻璃滤光片; 测二级光谱时加入 GRB 和 QB_{21} 玻璃滤光片。在测量波长为 400~420nm 的光效率函数时, 加入 QB_5 玻璃滤光片。这些滤光片的光谱透过率曲线如图 3 所示。

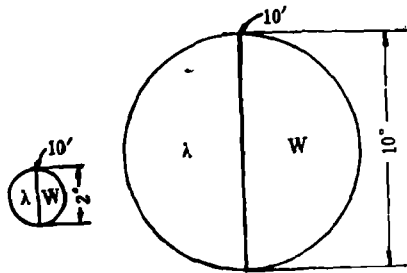


图 2

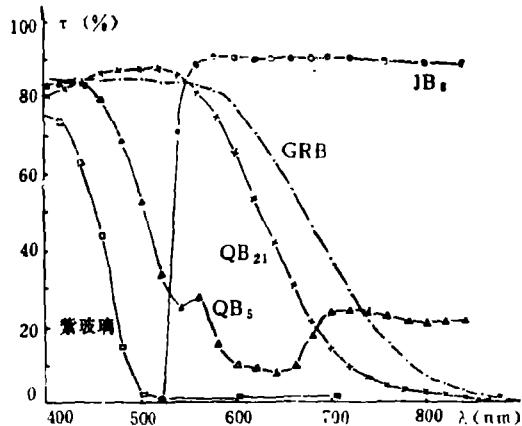


图 3 各种截止滤光片的光谱透过率曲线

用上述装置测量波长为 400nm 的光效率函数时, 亮度水平较低, 为克服这个缺点, 我们又设计了一套测量装置, 它包含一台双光栅单色仪、一个作为光源的 2kW 溴钨灯、一个 BDQ₃ 光强度标准灯 (作为参考灯)。在测量 400~410nm 波长的光效率函数时, 为防止杂散光的影响, 在光路中加入一个紫色玻璃滤光片来消除 500nm 波长以外的杂散光, 紫色玻璃的透过率也示于图 3。在测量辐射功率和人眼观察时, 在光路中加进一个分束器, 将单色光分成两部分, 并用一个参考接收器监视光源。在人眼观察后, 把一个已知光谱灵敏度的标准接收器置于人眼位置测量相对辐射功率。其他光路与第一套装置相同。两台装置视场周围的背景均为黑色。

二、光效率函数的测量

1. 观察者的概况

参加实验的观察者共 16 人, 年龄是 20~51 岁。以性别分, 男性 11 人, 女性 5 人。以民族分, 汉族 12 人, 朝鲜族 2 人, 哈萨克族 2 人。均经检查无色盲、视力在 1.0 以上。实验前

在光度测量装置上进行三天的异色测光训练。

2. 观察实验

在观察前, 观察者先在暗室内适应15分钟。观察者的下颌放在为固定眼睛位置的托架上, 眼睛对准视场的黑线, 并能清晰、均匀地看到视场的两个部分。然后, 观察者操纵按钮驱动伺服电机使光楔左右移动, 观察单色光的亮暗变化, 逐渐使单色色与白光达到视亮度匹配。与此同时, 主试人记下此时光楔的相对位置。在观察过程中, 主试人可以有意识地改变光楔位置, 以避免可能出现的假匹配。

在测量光效率函数时, 在 400~730nm 波长范围内, 每隔 10nm 测一点, 每个波长点测三次作为一轮。每位观察者在三天内要测 5 轮, 每轮需要 1~2 小时。

在亮度匹配过程中, 参考白光的亮度水平保持恒定。在 2° 视场条件下, 在 420~730nm 波长范围内, 网膜照度为 250Trol; 在 400~410nm 波长范围内为 20 Trol。对于 10° 视场, 在 420~720nm 波长范围内为 250Trol。网膜照度的测量方法与文献[5]所用的相同。

3. 单色光相对辐射功率的测量

我们使用两只由真空热电偶标定过的硅光电二极管测量单色光的相对辐射功率。接收器放置在图 1 的 SD 位置, 让单色光充满其直径为 10mm 的接收面上。输出信号经电流电压转换器后由数字电压表测出。将两个接收器的测量结果用公式

$$P(\lambda) = K[I(\lambda) - I_0(\lambda)]/S(\lambda)$$

分别算出它们测得的相对辐射功率, 二者的平均值即为所测的单色光相对辐射功率。式中, K 为比例系数, $I(\lambda)$ 、 $I_0(\lambda)$ 分别为波长 λ 处的光照及暗电流示值, $S(\lambda)$ 为接收器的相对光谱灵敏度。在 400~730nm 波长范围内每隔 10nm 测量一个值。

由于接收器是放置在 PS 玻璃及 L_3 透镜的前面进行测量的, 所以它们的光谱选择性会影响测量结果, 应进行修正。图 4 为测得的 PS、 L_3 和光楔 WG_1 的光谱透过率曲线, 图中点划线是 PS 的值, 带 \times 的线是 2° 视场用的 L_3 之值, 带 \circ 的线是 10° 视场用的 L_3 之值, 带 \triangle 的线为 WG_1 之值。由图可以看出, 只有 10° 视场的 L_3 之值才出现明显的光谱选择性, 需对相对辐射功率作相应的修正。光楔 WG_1 是用石墨和明胶压在玻璃板上制成的, 其非中性程度在测量误差范围以内。

4. 光楔密度的测量

固定硅光电二极管的位置, 移动光楔每隔 10nm 波长测一个点, 测出不同位置处的透射比 $\tau_\lambda(x)$, 然后算出各位置的密度 $D_\lambda(x)$ 。图 5 为 $D_\lambda(x)$ 与光楔位置 x 之间的关系。

5. 接收器的非线性

在测量单色光的相对辐射功率和光楔密度时, 接收器的非线性会直接影响测量结果。采用

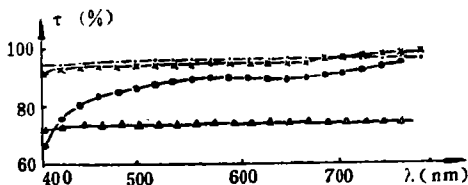


图 4

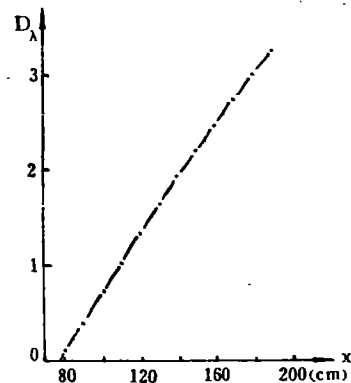


图 5

双孔径法线性检查仪对硅光电二极管进行了测量,发现示值读数变化了 512 倍,而接收器的非线性仅为 6×10^{-4} 。因此,在测量中可以忽略接收器的非线性误差。

6. 光效率函数的计算

设未经过光楔和经过光楔后测得的单色光相对辐射功率分别为 $P(\lambda)$ 和 $P'(\lambda)$, 则有

$$P'(\lambda) = P(\lambda) \tau_{\lambda}(x)$$

用光楔密度表示可写为

$$P'(\lambda) = P(\lambda) / 10^{D_{\lambda}(x)}$$

取波长为 570nm 处与其他波长处的辐射功率的比值,即得光效率函数 $V(\lambda)$:

$$V(\lambda) = \frac{P'(570)}{P'(\lambda)} = \frac{P(570) / 10^{D_{570}(x)}}{P(\lambda) / 10^{D_{\lambda}(x)}}$$

一个观察者 m 次测量的光效率函数平均值为

$$\bar{V}_m(\lambda) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_i(\lambda)$$

其变异系数为

$$C_m(\lambda) = \frac{\left\{ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m [V_i(\lambda) - \bar{V}_m(\lambda)]^2 \right\}^{1/2}}{\bar{V}_m(\lambda)} \times 100\%$$

n 个观察者测量的平均值为

$$\bar{V}_n(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j(\lambda)$$

其变异系数为

$$C_n(\lambda) = \frac{\left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [V_j(\lambda) - \bar{V}_n(\lambda)]^2 \right\}^{1/2}}{\bar{V}_n(\lambda)} \times 100\%$$

三、测量结果及误差

图 6 是用异色视亮度匹配法在 2° 视场条件下,由 16 名观察者测得的光效率函数平均

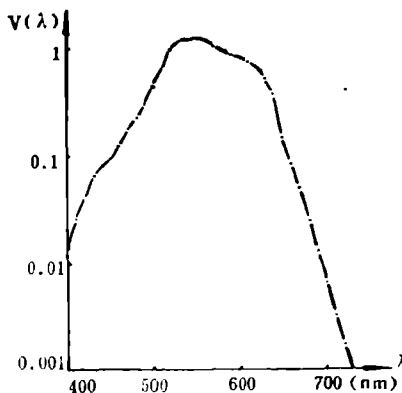


图 6

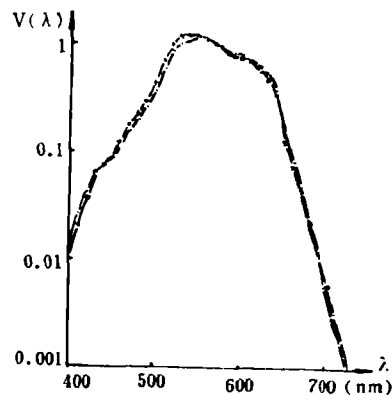


图 7

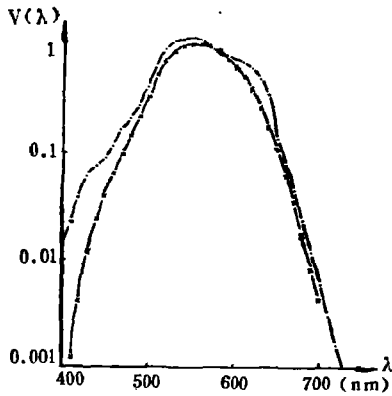


图 8

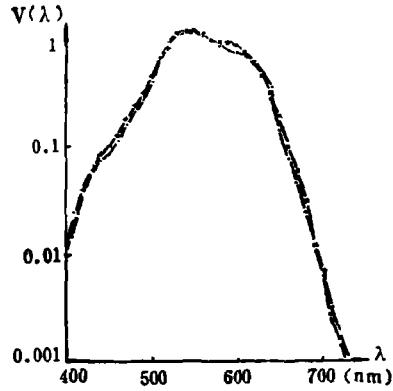


图 9

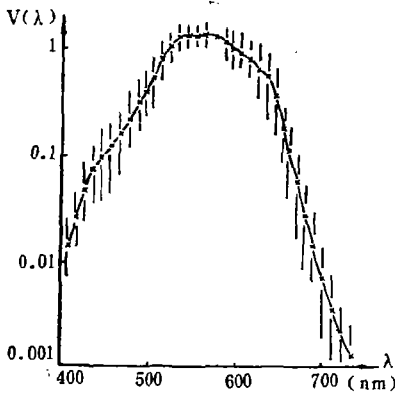


图 10

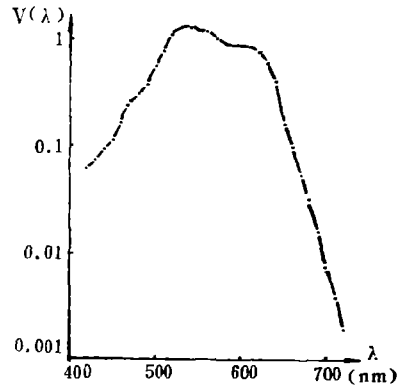


图 11

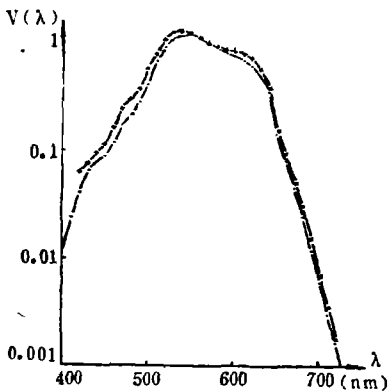


图 12

值曲线。图 7 是 16 名观察者按年龄分为两组分别得出的测量平均值，30 岁以上的组有 9 人，30 岁以下的组有 7 人，图中分别用 × 号和点划线表示。从图上的曲线看，两组相差不大，只是 30 岁以上组测得的曲线在短波部分偏低，这可能是由于晶体变黄的缘故。

图 8 是图 6 的曲线与 CIE 给出的 $V(\lambda)$ 曲线^[1]的比较，二者分别用点划线和 × 号表示。从曲线形状看，CIE 的曲线较窄，在短波区偏低，我们的曲线在 540nm 和 640nm 波长附近有峰值。

图 9 是图 6 的曲线与国外 9 个实验室对 37 人测得的 $V(\lambda)$ 曲线的比较，二者分别用点划线和 × 号表示。从图上可以看出，两条曲线符合得很好。

图 10 为 16 名观察者测量的发散性，图中竖直线表示发散范围，带 × 号的线为平均值。图 11 为 10° 视场 9 名观察者测得的光效率函数的平均值。图 12 为 2° 视场和 10° 视场光效率函数曲线的比较，前者用点划线表示，后者用带 × 号的线表示，由图可以看出，前者在 420~

540nm 的短波部分比后者低, 这可能是由于在大视场条件下黄斑色素的减少和其他原因造成的。

表 1 列出 2° 视场 (16 名观察者) 和 10° 视场 (9 名观察者) 条件下测得的光效率函数的平均值, 和由之算得的变异系数值。

测量光效率函数的误差有如下几方面:

表 1

| $\lambda(\text{nm})$ | 2° 视 场 | | 10° 视 场 | |
|----------------------|------------------------|------|------------------------|------|
| | V(λ) | C(%) | V(λ) | C(%) |
| 400 | 1.113×10^{-2} | 52 | | |
| 410 | 2.345×10^{-2} | 39 | | |
| 420 | 4.416×10^{-2} | 34 | 6.096×10^{-2} | 20 |
| 430 | 6.478×10^{-2} | 40 | 7.323×10^{-2} | 31 |
| 440 | 7.729×10^{-2} | 36 | 9.138×10^{-2} | 24 |
| 450 | 8.959×10^{-2} | 40 | 1.126×10^{-1} | 23 |
| 460 | 1.185×10^{-1} | 42 | 1.635×10^{-1} | 31 |
| 470 | 1.719×10^{-1} | 38 | 2.456×10^{-1} | 31 |
| 480 | 2.184×10^{-1} | 37 | 3.012×10^{-1} | 28 |
| 490 | 2.861×10^{-1} | 33 | 3.640×10^{-1} | 22 |
| 500 | 4.128×10^{-1} | 29 | 5.562×10^{-1} | 25 |
| 510 | 6.588×10^{-1} | 23 | 7.771×10^{-1} | 17 |
| 520 | 9.193×10^{-1} | 19 | 1.077 | 14 |
| 530 | 1.103 | 17 | 1.242 | 14 |
| 540 | 1.134 | 14 | 1.240 | 11 |
| 550 | 1.164 | 16 | 1.180 | 12 |
| 560 | 1.129 | 14 | 1.121 | 9 |
| 570 | 1.000 | 0 | 1.000 | 0 |
| 580 | 9.165×10^{-1} | 12 | 8.962×10^{-1} | 7 |
| 590 | 8.192×10^{-1} | 17 | 8.472×10^{-1} | 14 |
| 600 | 7.745×10^{-1} | 22 | 8.301×10^{-1} | 19 |
| 610 | 7.053×10^{-1} | 28 | 8.200×10^{-1} | 27 |
| 620 | 6.348×10^{-1} | 30 | 7.328×10^{-1} | 34 |
| 630 | 4.730×10^{-1} | 33 | 5.827×10^{-1} | 45 |
| 640 | 3.291×10^{-1} | 35 | 3.911×10^{-1} | 54 |
| 650 | 1.317×10^{-1} | 38 | 1.547×10^{-1} | 39 |
| 660 | 7.597×10^{-2} | 38 | 9.551×10^{-2} | 41 |
| 670 | 4.356×10^{-2} | 42 | 5.258×10^{-2} | 47 |
| 680 | 2.288×10^{-2} | 45 | 3.109×10^{-2} | 65 |
| 690 | 1.198×10^{-2} | 52 | 1.558×10^{-2} | 55 |
| 700 | 6.257×10^{-3} | 57 | 7.142×10^{-3} | 45 |
| 710 | 3.182×10^{-3} | 60 | 3.683×10^{-3} | 48 |
| 720 | 1.686×10^{-3} | 56 | 1.834×10^{-3} | 44 |
| 730 | 9.219×10^{-4} | 59 | | |

(1) 测量硅光电二极管相对光谱灵敏度的误差。在不同波长范围的不确定度为

| | | | |
|-----------|-------|-----------|-------|
| 400~430nm | ±7.0% | 600~650nm | ±1.2% |
| 440~500nm | ±3.0% | 660~700nm | ±3.0% |
| 510~590nm | ±0.8% | 710~730nm | ±6.0% |

(2) 用硅光电二极管测量单色光相对辐射功率的误差估计为±2%。

(3) 光楔密度的测量误差估计为±1%。

(4) 波长在 400~410nm 的光效率函数是用第二套装置测量的, 测量的不确定度估计为±8%。

(5) 在 10° 视场测量中使用的透镜 L₁ 的光谱选择性测量误差估计为 1%~2%。

(6) 杂散光的影响。我们采用波长为 632.8nm 的氦氖激光入射到单色仪的入射狭缝上, 用光电倍增管来测量, 从结果估计杂散光的影响小于 1×10^{-6} 。在实际测量时是用白光作光源, 我们仍以 1×10^{-6} 来估计各个波长范围的杂散光的影响, 则由此产生的测量光效率函数的误差在波长为 400nm 处是 0.20%, 在 410nm 处是 0.05%, 在 420nm 处是 1.3%, 在 430nm 处是 0.15%, 在 440~730nm 范围则可忽略。

(7) 光谱带宽的影响。我们所用单色光的带宽虽然很窄, 但对光效率函数仍有一定影响, 通过计算得出的修正量如下: 在波长 400nm 处为 -0.13%, 在 410nm 处为 -0.10%, 在 420nm 处为 -0.04%。已用这些修正量对 2° 视场的测量平均值进行了修正。

表 2 列出测量 2° 视场和 10° 视场光效率函数的总不确定度。

表 2

| 波 长 范 围 (nm) | 2° 视场总不确定度 (%) | 10° 视场总不确定度 (%) |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| 400~410 | ±8.0 | |
| 420~430 | ±7.4 | ±7.6 |
| 440~500 | ±3.4 | ±4.2 |
| 510~590 | ±2.4 | ±3.1 |
| 600~650 | ±2.5 | ±3.2 |
| 660~700 | ±3.7 | ±4.2 |
| 710~730 | ±6.4 | ±6.7 |

我们还计算了在 2° 视场和 10° 视场条件下各两名观察者的观察精度, 即多次观察的相对标准偏差。在 400~730nm 波长范围分别为 12.7% 和 17.0%, 二人平均为 14.8% (2° 视场)。在 420~720nm 波长范围分别为 16% 和 17.6%, 二人平均为 16.8% (10° 视场)。

从我们的实验可以看出, 测得的光效率函数与国外研究者测得的结果相似^[6], 而与 CIE 的 $V(\lambda)$ 值相差较大。这是因为用异色匹配法测得的结果受无色通道、红-绿和黄-蓝对抗色通道所影响的缘故。因此, 国际上有必要早日建立起标准化的光效率函数。

参 考 文 献

- [1] Publication CIE, № 41(TC-1.4), 1978.
- [2] Yves Le Grand, "Light, Colour and Vision", Chapman and Hall, London, 1957, Chap. 4.
- [3] J. A. S. Kinney, J. Opt. Soc. Am., **68**(1978), 1155.
- [4] M. Ikeda, J. Illum. Engng. Inst. Japan, **10**(1978), 10.
- [5] 香取宽二、不破正宏, 电试汇, **45**, 3 and 4 (1981), 27—53.
- [6] M. Ikeda et al., J. Opt. Soc. Am., **72**, 12(1982), 1660.

The Photopic Spectral Luminous Efficiency Functions

Measured by the Heterochromatic Brightness Matching Method

Wu Xin-jia, Piao Da-zhi, Liu Yun-zhu, Liu Shao-jue,
Li Qi, He Bao-yuan and Xu Zhong-hui

Abstract——The measurement of photopic relative spectral luminous efficiency functions has been carried out for 2° visual field of 16 observers and for 10° visual field of 9 observers by using the heterochromatic brightness matching method. The average maximum spectral sensitivities of them were found to be at 550 nm and at 530 nm respectively. Among these observers Han, Korean and Kazakh nationalities were included. There is likely no significant difference among the results obtained from different nationalities. $V(\lambda)$ for 2° visual field of our experiment is in close agreement with that of 37 observers from 9 laboratories in other countries. The overall uncertainty of the relative radiation power is estimated to be less than 8.0%.