

II

498407

CE

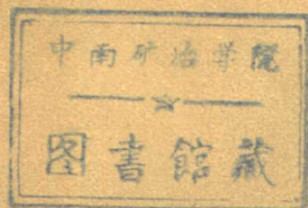
LIANG

剂量测量的标准化

国际原子能机构 编

第二卷

83



原子能出版社

剂量测量的标准化

第 二 卷

国际原子能机构 编

陈丽姝 杨文霞 译
刘远迈 张之彬

张永兴 校

原 子 能 出 版 社

National and International Standardization
of Radiation Dosimetry
Proceedings of an International Symposium
on National and International Standardization
of Radiation Dosimetry
held by the
International Atomic Energy Agency
in Atlanta, Georgia, 5—9 December 1977
Vol. II
International Atomic Energy Agency
Vienna, 1978

剂量测量的标准化

第二卷

陈丽姝 杨文霞 译

刘远迈 张之彬

张永兴 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 787×1092 1/32·印张113/4·字数258千字

1983年 6月第一版·1983年 6月第一次印刷

印数 1—2400·统一书号: 15175·495

定价: 1.45元

内 容 简 介

本书是国际原子能机构剂量测量标准化首次会议录,分两卷出版。本卷介绍了各国家和国际组织在剂量测量方面复现基本单位及其逐级传递的标准化程序中最近取得的重要进展,如基准装置的准确度和精密度以及比对情况;研究了辐射与物质相互作用的基础剂量学的最新数据(如 W 、 dE/dx 、 m 和 μ 值等)、转换因子、各种修正因子以及仪表刻度因子等;从理论上分析了探测器对各种辐射的响应;给出了源的谱特性和方向特性;分析了引起误差的原因。

本书可供电离辐射计量、辐射防护以及剂量测量标准化专业人员参考,亦可作为大学有关专业参考书。

原 版 编 辑 说 明

国际原子能机构编辑部编纂了这本论文集及各篇的讨论记录，以求对广大读者有所裨益。当然，各篇论文所阐述的观点和文笔采用的体裁仍应由署名作者或参加人员负责。此外，这些观点并不一定是该署名国家政府的观点或署名组织的观点。

已编入本论文集的文章均未重新加工，对此我们已通知作者及其政府当局，并对他们的协助表示衷心的感谢。本论文集是通过打字机打印然后用胶印的方法印制而成。在这种方法所能做到的范围内，我们作了各种努力，力求达到编辑上要求的高标准；尤其是，尽量做到单位和符号的统一，并与国际上有权威的一些团体推荐的标准相一致。

本论文集中对一些国家和地区使用了特殊的名称，这并不意味着这些国家或地区的法律地位、他们的主管部门和协会的法律地位、或者他们的边界划分的法律状况等方面已得到本出版者，即国际原子能机构的任何承认。

文中提到了一些个别公司及其产品或商标，这并不表示得到了国际原子能机构的承认或推荐。

从其它出处复制有版权的资料时，作者本人需负责办理必要的批准手续。

前 言

公众对辐射安全所有问题的关注已经产生了一种对电离辐射要进行准确测量的强烈呼声。这种呼声不只是要求把准确的测量用于对人及其环境的保护，而且还要求用于辐射工作起重要作用的所有活动领域——医学、核动力、工业辐照处理和科学研究等。所有这一切都需要有某种类型的管理办法。因而在许多国家中出版了关于应用电离辐射的新规定或修订后的规定，这也就要求剂量测量在国家级和国际级实现标准化。

在辐射测量领域中采用国际单位制（SI）后引起了对有关物理概念及其量与单位的一场严肃评论。这场评论恰值剂量学观点发生明显转变的时期，亦即用于特定辐射质的照射量这个量向吸收剂量（或空气的比释动能）这个量过渡的时期。因此，现在重新来考虑和讨论辐射基准单位的复现及其通过整个校准系统的传递，以便为这个领域中的准确测量提供实用单位，看来是适时的。

为了在地理上和数量上扩大那些标定过的辐射测量装置的利用率，国家基准实验室显然还应当增加一些工作项目。在一些较大的工业化国家中，已经制订出提供校准服务的庞大计划，此计划均以国家标准实验室作为基准的参考中心。许多新近进入核能领域的国家，或者在医学和工业部门采用辐射的国家，建立次级标准剂量实验室（SSDL）似乎是解决辐射单位传递问题的最合适而又最经济的方法。次级标准

剂量实验室的任务是校准三级剂量计和现场用剂量计，还作为基准实验室和使用辐射的用户之间的必要桥梁。这种次级标准剂量实验室——按照国际原子能机构（IAEA）和世界卫生组织（WHO）关于SSDL网的编制——遍布全世界，因此要求它们之间互相协作并与基准实验室相配合，以保证标准完全一致。

因此，在筹备这次辐射剂量测量的国家和国际标准化会议时，我们认为除了要讨论基准和基准实验室的工作之外，还需要对次级标准剂量实验室的具体工作、通过校准传递系统得到的测量结果和不确定度的表述，以及诸如最初由国际、地区或国家实验室发起的那些剂量比对的组织工作和比对结果等问题进行适当讨论。从这个意义上来看，对剂量计性能的国家标准和国际标准，鉴定程序和典型检验程序等问题进行讨论也是很贴切的。

必须强调指出，要继续研究与剂量测量有关的基本物理现象，并要在国际性会议上进行讨论。整个校准系统都会用到那些表征辐射与物质相互作用的基本数据，这就要求国际上对这些数值实行标准化。这又一次说明，标准化实验室的任务不能只局限于按照基准或次级标准分别校准次级标准剂量计或三级标准剂量计，还必须包括辐射单位传递系统的全部事项，这样才能最终通过仪表说明书明确地告诉用户如何根据仪表的读数来确定指定点的吸收剂量。

在医学领域中，许多国家和国际组织出版了关于用光子和电子辐射进行治疗时的剂量测量实用规程，其中有些建议目前正在审议或修订中。目前已提出了一套新体系，它可以取代广泛采用的照射量校准因子和剂量换算因子。这种新方法看来不仅更一致和更准确，而且它还给光子和电子辐射的

校准带来统一的程序。

辐射剂量测量标准化工作的进展是和国际辐射单位与测量委员会(ICRU)的活动密切相关的。自从1925年ICRU涉及这个课题之后,它在辐射测量标准化方面起过的作用比其它任何组织都大。目前ICRU的一项活动是为计算绝对辐射标准用的基本物理特性提供必须的各种因子的资料。

本次会议期间共开了10次专题讨论会,其中有两是关于国家标准化实验室的校准工作,两次是关于次级标准剂量实验室的工作以及有关的国际活动,两次是关于辐射防护的标准化和校准,一次是关于放射源的标准化和校准,一次是关于基本物理问题,还有两次是关于吸收剂量的测定。总共介绍了65篇论文,其中有9篇是特邀代表的发言。出席会议的137位代表,代表着26个国家和8个国际组织。会议文集分两卷出版,包括论文和随后的讨论。

目 录

一、电子和光子剂量测量中的某些理论问题·····	1
二、实际测量气体电离 m 值的准确方法·····	48
三、重离子的 $\overline{W}$ 值与原子序数的关系·····	69
四、高能辐射剂量测定法： C_λ 、 C_E 和固体空腔理论·····	77
五、用 ^{60}Co γ 辐射在水中的吸收剂量来刻度剂量计·····	87
六、 γ 射线剂量测定中的壁效应·····	98
七、 γ 射线剂量测定中的修正因子·····	113
八、由薄壁中减弱产生的康普顿及荧光辐射次级 光子注量的计算·····	137
九、辐射剂量学用标准化放射性衰变数据组·····	153
十、美国国家标准局放射性标准大纲·····	163
十一、全身计数器测量钚的仿真刻度·····	173
十二、关于 ^{252}Cf 和 $^{238}\text{PuBe}$ 源慢化中子场的各种 测量方法的特点·····	187
十三、一种用以补偿光子辐射源校准中由于几何 条件所引起的误差的技术·····	214
十四、X射线剂量学中普适的空腔理论——使用 高压电离室的实验研究·····	221
十五、测量高能光子的新型标准自由空气电离室·····	245
十六、用电离室测定能量在1—50 MeV的电子及 光子束的吸收剂量·····	259
十七、适用于MV X射线和电子束治疗机刻度的	

电离室相关因子.....	292
十八、医用电子加速器能量测定的一种简单方法.....	313
十九、用 Fricke 剂量计测定剂量时 Fe^{3+} 摩尔消光 系数的不一致性.....	324
二十、用热释光剂量计测量 γ 射线剂量的误差.....	347

一、电子和光子剂量测量中的某些 理论问题

S. M. Seltzer J. H. Hu Bbell M. J. Berger

美国国家标准局(NBS)的剂量测量标准化程序中有许多理论方面的课题。它包括编辑成套的标准截面资料,探测器对各种不同辐射响应的理论分析,辐射源的谱特性和方向特性以及确定受照介质内吸收剂量的分布等。本文介绍了这方面的一些最新成果,特别是有关光子和电子剂量测量的成果。讨论了有关光子的衰减系数和电子阻止本领方面的某些最新进展。描述了用于测量医用X射线机输出量的本征锗探测器,以及用它来测量NBS的一个 ^{60}Co 照射装置的特性的碘化钠探测器的响应函数。以高能电子束通过箔片为例,计算了源的特征。探讨了用薄箔片来展宽电子束和用厚箔片作为韧致辐射转换器时的问题。其结果包括有透过电子和放出的韧致光子的能谱分布和角分布。给出了计算 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线照射石墨模体时吸收剂量分布的实例。

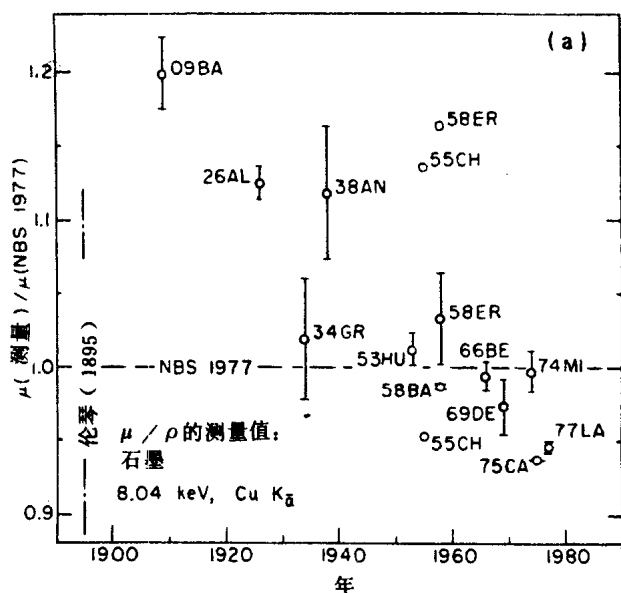
1. 引 言

辐射剂量测量的标准化不仅要在实验上下功夫,而且必须有扎实的理论依据。因此,国家标准局从事剂量学的实验工作者和理论工作者长期进行了协作。理论研究工作通常分成下面几类:(1)评价和选编放射物理学所用的电子和光子截面;(2)辐射探测器的理论;(3)标准辐射源和辐射场的特性;

(4) 预示吸收剂量的分布等。这里将要介绍的是这些课题方面的某些最新成果。

2. 光子的衰减系数和能量吸收系数

国家标准局许多年以来不断地对光子截面进行了评价和选编^[1-7]。这些选编考虑了新积累的实验资料以及理论上的改进，因而随时都是最新的。在前几个图中，我们表明了实验上的输入值和选编值按时间变化的趋势。这些变化都是对辐射探测器最常用材料石墨画出的。图 1 (a) 表示的是 1909 到



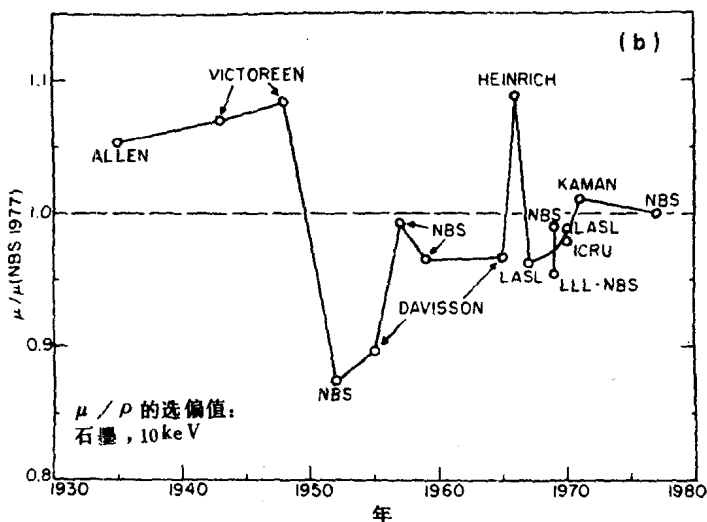


图 1 由国家标准局摘录来的有关石墨对光子的
质量衰减系数^[7]

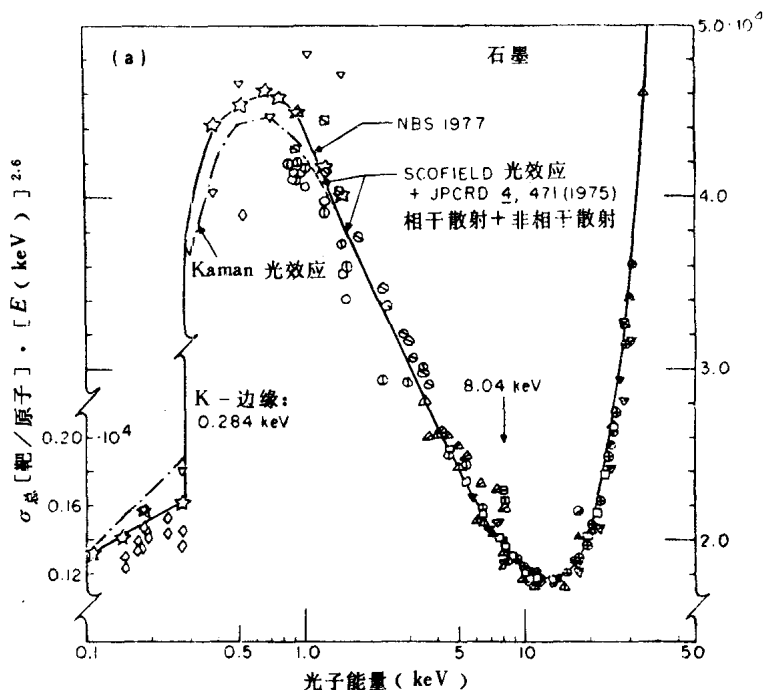
(a) 对 8.04 keV (铜的 K_{α} X 射线) 测得的值。除了 74 MI^[9]、75 CA^[10] 和 77 LA^[11] 以外, 参考文献都是 [8]。
(b) 根据 Allen^[12]、Victoreen^[13,14]、NBS^[2,3,4,6,7]、
Davison^[15,16]、Heinrich^[17]、LASL^[18,19]、LLL-
NBS^[20]、ICRU^[21] 和 Kaman^[22] 等人的表汇编的对
于 10 keV 的值。

1977 年间测得的石墨对 8.04 keV (铜的 K_{α} X 射线) 的总衰减系数的实验值。虽然最近报道的测量值的误差限有缩小的趋势, 但是测量值并不全是按照期望的那样收敛。事实上, 最近的测量值明显地显示出有下降的趋势^①。图 1 (b) 中表明了

① 应当注意, 石墨是最坏的情况, 所选编的值与最新测量结果之间的偏差为 6%。

近40年来在几种选编中给出的石墨对10 keV的总衰减系数。在这种情况下,选编的值按照时间收敛得较好,最新发表的值间只相差1—2%。

只根据理论或只根据实验来系统地制订精确的光子截面表都是不完全恰当的。美国国家标准局的选编综合了这两方面的工作。然而有逐步采用更多的理论数据的倾向。甚至在理论不完全适用的那些区域,理论也可以作为对十分稀少的实验数据进行内插的依据。在有关石墨的最新选编中,再次说明了可以采用理论和实验的这种综合。图2表明了100 keV到20 MeV的总衰减系数。Veigele等^[22]对能量在1 keV



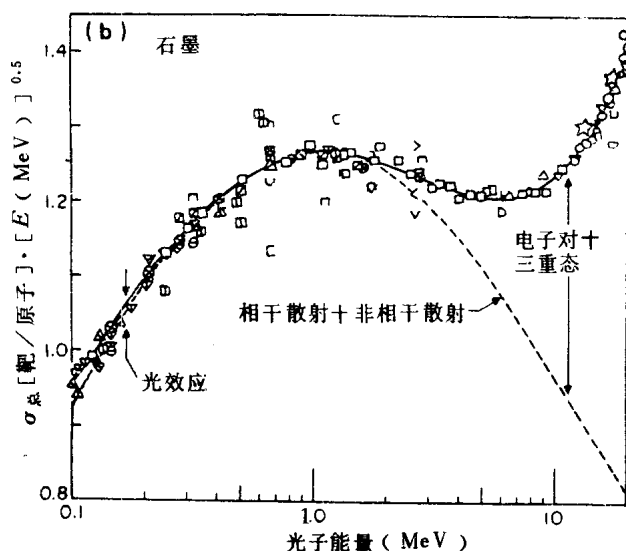


图 2 测得的石墨对光子的总截面与NBS最近采用的计算值^[7]的比较

(a) 能量范围在0.1—30 keV, 截面标尺已乘上 $E^{2.6}$, 以减少结果对光子能量的依赖关系。

(b) 能量范围在0.1—20 MeV, 截面标尺已乘上 $\sqrt{E}$ 。

以下的光子（用非相对论、偶极子近似模式）所作的全面的光效应计算（见图2a）不是足够精确的。在这个区域内，选编的值是根据具有理论结果的测量值，这样便于对未测元素进行内插。在1 keV和5—10 keV之间，Scofield^[23]采用Hartree-Slater波函数对相对论光效应进行计算，提供了制订表中值的适当依据。根据更精确的Hartree-Fock位垒值^[23, 24]的波函数，采用一项简单的校正，就能把这些计算进一步加以改进。这些校正后的结果分布在测量数据的5%左右误差以内。对于10 keV到几MeV（见图2b），由Scofield的光效应截面与最近理论上给出的散射截面值^[29]之和求出的

总衰减系数值，不确定度估计约为2%。事实上，在这个能区最近的选编值几乎完全出自理论结果，很少或者根本没有用实验结果作调整。

在1.022 MeV以上的能区，最重要的新的理论输入值和生成电子对的截面有关。为了得到目前采用的图2b中所示的曲线，采用了 $\varphi_{\text{verb}}\varphi$ ^[26]以及 Tseng 和 Pratt^[27]的低能理论、Davies-Bethe-Maximon^[28]的高能理论，并对屏蔽效应进行了修正。这些理论上的预计值采用了一个按经验修正的、和能量有关的库仑修正因子作了修正^[7]。由于测量的数据中存在着光核巨偶极共振^[29-31] (photonuclear giant dipole resonance)，所以很难对这种修正因子进行估算。这种共振对总截面的贡献可达5—10%。巨偶极共振对于低 Z 元素出现在20—25 MeV附近的能区，对于高 Z 元素则降到12—14 MeV左右。最近Gimm和Hubbell^[32]根据更严密的相对论屏蔽理论和库仑修正因子新的理论结果，以及大量的10—150 MeV之间总衰减系数的测量值^[35]所作的分析指出，可以以好于1%的准确度从理论上预示所有原子序数 Z 的元素对于能量大于10 MeV的 γ 射线生成电子对的截面，而不需要从经验上加以调整。这些新的理论值与以前选编的生成电子对截面（如文献[6]）值的差别，当 γ 能量为10 MeV时，对于 $Z \leq 29$ 的元素来说小于1%，而对于 $Z = 82$ 的元素则达4%。

预计质量能量吸收系数的不确定度大于总衰减系数的不确定度。解释空气电离室的测量值时，人们经常关心的是质量能量吸收系数的比值，例如空气对石墨壁材料的比值^[36]。在这种情况下，大部分不确定度将会相互抵消。对于能量约在0.5—1.5 MeV范围内（包括¹³⁷Cs的0.66 MeV和⁶⁰Co的

1.25 MeV的 γ 射线在内)的光子, μ/ρ 和 μ_{en}/ρ 几乎都可以单独用自由电子的康普顿散射过程来描述(即约束效应和相干散射都很小)。在这个能区, $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{空气}}/(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{石墨}}$ 值的准确度估计在 $\pm 1\%$ 以内, 有可能准确到 $\pm 0.3\%$ 。然而低能区的不确定度将增大, 可能达百分之几。图3中给出了由几个选编中求出的10—30 keV范围内的比值。在1969到1977年之间, 国家标准局对30 keV时的比值下降了6%, 这主要归结为在这个能量处石墨的光电效应截面增加了10%。

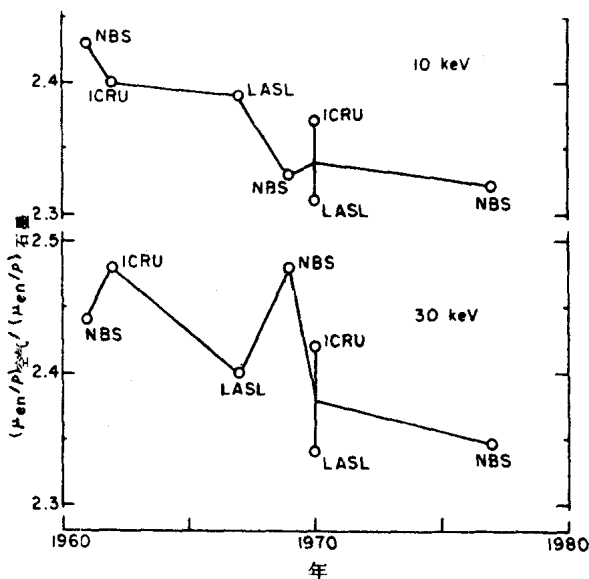


图3 空气/石墨在10和30 keV时的质量能量吸收系数比值
根据NBS^[5-7]、ICRU^[21,37]和LASL^[18,19]的表中值得到的比值。