

辐射量和单位

科学出版社

辐 射 量 和 单 位

中国科学院生物物理研究所
辐射剂量学翻译小组译

科 学 出 版 社

1 9 7 4

内 容 简 介

本书是国际辐射单位和计量委员会的一份报告(ICRU 报告 19), 发表于 1971 年, 代替了 1968 年发表的报告 11。内容主要有两部分: 基础的量和单位; 辐射防护适用的量和单位。在微剂量学和辐射防护方面增添了新量纲, 并提出了各种辐射量的严格定义。可供放射生物学、原子能科学工作者及放射医疗卫生工作者参考。

辐 射 量 和 单 位

中国科学院生物物理研究所
辐射剂量学翻译小组译

·

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

·

1974 年 3 月第 一 版	开本: 787×1092 1/32
1974 年 3 月第一次印刷	印张: 1
印数: 0001—6,450	字数: 20,000

统一书号: 13031·227

本社书号: 377·13—6

定 价: 0.13 元

目 录

引 言	1
第一部分 基础的量和单位	3
一、有关物理辐射量的详细考虑	3
1. 随机量和非随机量	3
2. 谱和平均值	5
二、定义	6
第二部分 辐射防护适用的量和单位	20
一、概论	20
二、剂量当量	20
三、环境辐射水平的详细说明	22
参考文献	27

引 言

这个报告取代了 ICRU 报告 11. 主要的更改是: (1) 特别是在微剂量学和辐射防护方面, 引进了新加的量; (2) 量的更准确定义, 使它们在形式上有某些不同, 而没有改变其意义或适用范围. 已作出定义的量列于表 1 和表 2.

应当承认, 这里给出定义的某些术语, 在科学的其它领域中也是重要的, 并且在别处已经有各种不同的定义. 如果与其它有关领域科学家的代表经过讨论, 能对共同的定义或符号取得一致意见, 那么任何一种量的定义之准确措辞, 甚至名称和符号, 在将来都有可能需要变更, 虽然这些定义代表某种程度的折衷意见. 但在辐射测量的领域中, 它们被认为符合要求.

委员会认为量的定义和概念是基本的东西, 而单位的选择则是次要的, 如果被考虑的量已经清楚的阐明, 那就能最好的避免含混. 这里介绍的单位制是国际单位制 (SI), 然而像许多其它领域一样, 专用单位在这里也存在. 例如, 按照惯例, 赫 (hertz) 限于测量时间频率, 居里 (curie) 限于测量一定量某核素的活性. 虽然这些量具有相同的量纲, 但人们不用赫来测量活性, 也不用居里来测量时间频率.

委员会考虑到在辐射剂量学领域内建立另加的专用单位是不可取的, 但继续承认已有的专用单位, 并建议这些专用单位的使用应限于如下:

rad——用于比能、吸收剂量、吸收剂量指数和科玛 (kerma);
伦琴 (roentgen)——用于辐照量;

居里——用于活性；

rem——用于剂量当量和剂量当量指数。

委员会意识到需要有适合于辐射防护的量和单位的公式，也留意到在这方面普遍存在着分歧意见的事实。然而，分歧在本质上只包含概念和解释方面的问题，而在如何测定和应用这些有争议的量方面，一般的意见是一致的。由于只有这些运用方面的要求非常紧迫，因此决定提供有实用意义的定义。这样，虽然剂量当量这个量的性质仍然大部分没有确定，但其定义对有效的利用是足够清楚的。由于这种方法与这里作出定义的大多数量所采用的方法很不相同，有关辐射防护的介绍被放在本报告一个单独的部分，两个新量和解释材料一起也放在这一部分。

第一部分 基础的量和单位

一、有关物理辐射量的详细考虑

1. 随机量和非随机量

因为辐射及其与物质的相互作用都属于不连续的性质,某些辐射量只能用统计学术语予以描述。这里较详细的分析了这种描述方式,为以后介绍的定义系统提供依据。然而,这些考虑的研究,不是实际应用第二节中所给出定义的必要条件。

物理学中常常遇到统计学的起伏,在辐射的情况中,它们可以很极端。由于在任何给定情况下,辐射的作用决定于这些量的实际值而不是平均(期望)值,对前者给予特别的重视是可取的。因此必须考虑那些非随机量以外的**随机量**,这两类量之间的区别和相互关系最好用一个实例来说明。

给与能(energy imparted) σ (见定义 5), 容易有无规起伏, 若观察体积小或带电粒子通量低时这种起伏就变大。**随机量比能**(specific energy) z (见定义 7), 是在一定体积中给与能 σ 除以质量 m 所得的商, 可以从**非随机量吸收剂量**(absorbed dose) D (见定义 8) 偏离相当多。 z 的重复测定可以建立一个实验分布, 这是 z 的概率分布的估计; 同样, z 的平均实验值是期望值 $\bar{z}$ 的估计, 当质量趋近于零时 $\bar{z}$ 的极限是 D 。

因此比能 z , 作为一个随机量具有下列特征:

- a. 它只对有限的范围作出定义。其值在空间和时间上不连续变化,无从谈及其变化速率。
- b. 其值不能预测,然而出现任何一个特殊值的概率由概率分布决定。
- c. 原则上,其值可以测量至任意小的误差。

像其他非随机量一样,吸收剂量 D , 具有下述特征:

- a. 通常它是空间和时间的一个连续而可微分的函数,可以谈及其梯度和速率。
- b. 一定条件下,在原则上其值能被计算。
- c. 它能作为与随机量有连系的观测平均值的估计。在一个空间上不均匀的辐射场中,人们必须从一个无限小的质量推导出这个平均值的极限值。实验误差往往大于这里所考虑的统计学变异,但是后者经常存在。

上述考虑代替了 ICRU 报告 11 中标题是“极限程序”(Limiting procedures)的章节。随机量概念的引入,导致吸收剂量的一个更严格的定义。本篇报告只对三个随机量 σ 、 z 、 y (y 见定义 23) 作出了定义。所有其他作出定义的量都是非随机量。与 ICRU 报告 11 中所选择采用差商的方法相反,非随机量是点函数,它们的定义在这里以微分形式表达。按照物理学的习惯用法,可以理解微商的自变数 (arguments of differential quotients) 总是非随机量。例如,若微商 dN/da 被称为“ dN 除以 da 所得之商,其中 dN 是进入横截面为 da 的球体的粒子数”,那末 dN 就可理解为 N 的微分,即粒子数的期望值。这种期望值特性的详细分析必须根据相应的随机量和它们的概率分布去考虑。在许多应用中可以不管这些考虑,并且所有非随机量的定义都可以充分被理解,而不去考虑无规的起伏。

2. 谱和平均值

在实践中,下面给出定义的许多量,使对于辐射场及其与物质相互作用的特性描述成为可能,都用于具有一定能量范围的辐射。在这样的情况下,一种量对于另一种量的分布¹⁾可以作出定义。例如:通量(fluence) Φ (见定义 10)是进入极小体积的球中,带有各种能量的粒子数除以该球的截面积。总数分布 $\Phi(E)$,是所具能量介于 0 和 E 之间的粒子产生的那部分通量。通量对于粒子能量 E 的微分分布 Φ_E 是 $\Phi(E)$ 关于 E 的导数:

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE}.$$

这个微分分布对于所有粒子能量从零至无穷大(0 至 ∞)的积分就是通量 Φ , 即

$$\Phi = \Phi(\infty) = \int_0^{\infty} \Phi_E dE.$$

独立量不一定总是能量,例如,可以指定吸收剂量对于线性能量传递的谱分布。

在这个报告中, $\Phi(E)$ 类型的谱分布称为积分或总数分布,那些 Φ_E 类型的谱分布则称为微分分布。由于一种量对另一种量的微分分布的因次和两量商的因次相等,所以 $\Phi(E)$ 的因次不同于 Φ_E 。

相互作用系数如阻止本领(stopping power) S (见定义 21)或衰减系数(attenuation coefficient) μ (见定义 18),都是粒子

1) 本报告中,分布一词有两种用法:(a)如在本节中表示谱分布。(b)表示概率分布,在这整个报告中,和谱分布相反。概率分布均被假定已经规格化了,同时,采用了不同符号以区别这两种类型的分布,为明确地表明涉及概率分布的情况,相应的采用正式的数学术语概率密度(probability density)和分布函数以代替通常使用的术语(微分)分布和总数(或积分)分布,后面两个术语保留着专门用来鉴别不同类型的谱分布。

能量的函数。对一个具有复杂能谱的辐射场,按照有关量的谱分布加权的平均值如 $\bar{\mu}$ 和 $\bar{S}$ 可能是有用的。例如:

$$\bar{\mu} = \int_0^{\infty} \mu \Phi_E dE / \int_0^{\infty} \Phi_E dE = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} \mu \Phi_E dE$$

是 μ 按照通量加权的平均值。

二、定 义

本节所采用的普遍形式是对每种量给以一个简短的定义,在定义后面的解释性附注中指出所用任何特殊的措辞或术语的精确意义。这里只包括那些对辐射量和单位的考虑是关键的定义,没有企图作出一个所有可能有关的定义的综合目录。

本章中没有像 ICRU 报告 11 那样把量的符号用下标表示,这样就消除了与微分分布(见一.2 节)混淆的可能。

(1) **直接电离粒子**是带电粒子(电子、质子、 α 粒子等)具有足够的动能,可以因碰撞产生电离。

(2) **间接电离粒子**是不带电粒子(中子、光子等)它们能释放直接电离粒子,或能引起核转化。

(3) **电离辐射**是任何一种辐射,由直接或间接电离粒子或者两者的混合物组成。

(4) **能量贮存事件**指由有关的电离粒子在被作用物质中能量的贮存。

注:(a)“有关的”(correlated)一词表示统计的依赖。

(b) **能量贮存**的例子包括由于一个 α 粒子和/或其 δ 射线,由于形成电子对时产生的一个或两个电子和由于核衰变时的一种或更多产物引起的能量贮存。

(c) 在一个能量贮存事件中,递送的能量与通量率

或吸收剂量率无关。

(5) **给与能** (energy imparted) ϵ , 它是一定体积内由电离辐射给与物质的能量。 ϵ 是随机量:

$$\epsilon = \sum \epsilon_{in} - \sum \epsilon_{ex} + \sum Q,$$

其中, $\sum \epsilon_{in}$ = 进入这一体积的所有直接和间接电离粒子能量(不包括静止能量)的总和;

$\sum \epsilon_{ex}$ = 离开这一体积的所有直接和间接电离粒子能量(不包括静止能量)的总和;

$\sum Q$ = 这一体积中所发生的核和基本粒子的任何转换中所释放的全部能量总和减去所消耗的全部能量总和。

(6) **平均给与能** (mean energy imparted) $\bar{\epsilon}$, 是给与能的期望值。

注: $\bar{\epsilon}$ 有时被称为这一体积内的“积分剂量”。

(7) **随机量比能或比给与能 z** ²⁾, 是 ϵ 除以 m 所得的商, 其中 ϵ 是电离辐射给与一个体积单元内物质的能量, m 是该体积单元中物质的质量:

$$z = \frac{\epsilon}{m}.$$

比能的专用单位是 $\text{rad}^{3)}$,

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J kg}^{-1}.$$

注: (a) 因为 z 是一个随机量, 需要使用概率分布。分布函数的值 $F(z)$, 用等于或小于 z 的比能 z' 的概率表示:

$$F(z) = P(z' \leq z).$$

概率密度 $f(z)$, 是 $F(z)$ 关于 z 的导数:

2) 在这个量可能与热力学量比能含混的情况中, 比给与能一词可能更好些。

3) 当 rad 可能与弧度符号混同时, 允许以 rd 作为 rad 的符号。

$$f(z) = \frac{dF(z)}{dz}.$$

在 $z = 0$ 时, 对无能量贮存的概率, $f(z)$ 总是包括一个离散的组分 (一个 Dirac delta 函数).

(b) 平均比能 $\bar{z}$, 是一个非随机量:

$$\bar{z} = \int_0^{\infty} z f(z) dz.$$

(c) 比能可以是由于一次或多次能量贮存事件, 在一个单一事件中贮存的比能的分布函数 $F_1(z)$, 由一次事件后贮存的一个小于或等于 z 的比能 z' 的条件概率表示:

$$F_1(z) = P(z' \leq z | \nu = 1),$$

其中 ν 指明能量贮存事件次数.

概率密度 $f_1(z)$ 是 $F_1(z)$ 关于 z 的导数:

$$f_1(z) = \frac{dF_1(z)}{dz}.$$

(8) **吸收剂量** (absorbed dose) D , 是 $d\bar{e}$ 除以 dm 所得的商, 其中 $d\bar{e}$ 是电离辐射给与一个体积单元中物质的平均能量, dm 是该体积单元中物质的质量:

$$D = \frac{d\bar{e}}{dm}.$$

吸收剂量的专用单位是 $\text{rad}^{3)}$,

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J kg}^{-1}.$$

注: 吸收剂量是被考虑的范围内质量趋近于零时平均比能的极限, 即:

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \bar{z}.$$

这种关系指出了 D 和 z 之间的联系, 可以作为 D 的又一种定义.

(9) **吸收剂量率** (absorbed dose rate) $\dot{D}$, 是 dD 除以 dt 所得的商, 其中 dD 是在时间间隔 dt 内吸收剂量的增量:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}.$$

吸收剂量率的专用单位是 rad 或其倍量或约量, 除以一个合适的时间单位所得的任何一种商 (rad s^{-1} , mrad h^{-1} 等).

(10) **通量 Φ** , 粒子的通量 Φ 是 dN 除以 da 所得的商, 其中 dN 是进入截面积为 da 的一个球体内的粒子数:

$$\Phi = \frac{dN}{da}.$$

(11) **通量密度 (flux density) 或通量率 (fluence rate) φ** , 粒子的通量密度或通量率 φ 是 $d\Phi$ 除以 dt 所得的商, 其中 $d\Phi$ 是在时间间隔 dt 内粒子通量的增量:

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt}.$$

(12) **能通量 Ψ** , 粒子的能通量 Ψ 是 dE_{fl} 除以 da 所得的商, 其中 dE_{fl} 是进入截面积为 da 的球体内所有粒子能量的总和, 但不包括静止能量:

$$\Psi = \frac{dE_{\text{fl}}}{da}.$$

(13) **能通量密度 (energy flux density) 或能通量率 (energy fluence rate) ϕ** , 是 $d\Psi$ 除以 dt 所得的商, 其中 $d\Psi$ 是在时间间隔 dt 内能通量的增量:

$$\phi = \frac{d\Psi}{dt}.$$

(14) **科玛 (kerma) K** , 是 dE_{tr} 除以 dm 所得的商, 其中 dE_{tr} 是在指定物质的一个体积单元内, 由间接电离粒子释放

4) 这个量和通常在中子物理学使用的量 nvt 相同.

的所有带电粒子起始动能的总和,而 dm 则是该体积单元内物质的质量:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}.$$

科玛的专用单位是 $\text{rad}^{(3)}$, $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J kg}^{-1}$.

注: (a) 因为 dE_{tr} 是由间接电离粒子释放的带电粒子起始动能的总和,那末,它也包括那些带电粒子在韧致辐射中辐射的能量. 若在此体积单元内发生次级过程,则由此产生的任何带电粒子的能量也包括在内. 因此,俄歇电子的能量也是 dE_{tr} 的一部分.

(b) 往往可以方便的涉及一指定物质,在自由空间,或在一种不同物质内部某点的科玛值或科玛率值. 在这样的情况中,此值就是指若把少量指定物质放在被测点上所得的值. 因此允许作这样的说明:“在一个水模型内部某点 P 上的空气科玛值是……”.

(c) 在实际测量中,这一质量单元应该如此之小,以致它的引入并不明显扰乱间接电离粒子场,这点很重要,如果被用来测定科玛值的介质不同于周围介质;并引起场的明显干扰,那就必须加以适当的修正.

(d) 辐射场的基本物理特性可以用在所有有关点的能通量密度(能通量率)来描述. 然而,为剂量学的目的,可以方便的用对某种适当物质的科玛率来描述间接电离粒子场的特性. 这种物质对中等能量的电磁辐射来说,可以是空气,对于医学或生物学的所有间接电离辐射来说,可以是组织;对辐射效应的研究来说,可以是任何有关物质.

(e) 当带电粒子平衡存在于被测点的物质中,并且可以忽略韧致辐射的损失时,科玛也可以是剂量学中一

个有用的量。那时，它将等于那一点上的吸收剂量。在 X 或 γ 射线，或中等高能中子束中，会出现带电粒子的近似平衡，那么科玛通常就略小于吸收剂量。

(15) 科玛率 (kerma rate) $\dot{K}$ ，是 dK 除以 dt 所得的商，其中 dK 是时间间隔 dt 内科玛的增量：

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}.$$

科玛率的专用单位是 rad 或其倍数或约数除以适当的时间单位所得的任何一种商 (rad s^{-1} , rad min^{-1} , rad h^{-1})。

(16) 辐照量 (exposure) X ，是 dQ 除以 dm 所得之商，其中 dQ 是当在质量为 dm 的一个体积单元的空气中，由光子释放的所有电子（负电子和正子）在空气中全部被阻时，产生的一种符号的离子的总电荷的绝对值：

$$X = \frac{dQ}{dm}.$$

辐照量的专用单位是伦琴 (R)：

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} \text{ (精确值)}.$$

注：(a) 在所测体积内由所释放出的次级电子产生的韧致辐射被吸收后所产生的电离不能包括在 dQ 以内。但这只在高能时才是有意义的，除了这个差别，上面定义的辐照量是空气中科玛值的电离当量。

(b) 当所包含光子的能量在数百万电子伏以上或几千电子伏以下，用现有的技术去测量辐照量是困难的。

(c) 如同科玛 (定义 14, 注 b) 的情况，经常可以方便的提到在自由空间或在一种不同于空气的物质内部某点的辐照量或辐照率值。这样的情况下，这一数值就是把少量空气放在所关心的点上所测定的值。因此允许这样说：“在水模型内部某点 P 的辐照量是……”。

(17) **辐照率** (exposure rate) $\dot{X}$, 是 dX 除以 dt 所得的商, 其中 dX 是时间间隔 dt 内辐照量的增量:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}.$$

辐照率的专用单位是伦琴或其倍数或约数除以适当的时间单位所得的任何一种商 ($R s^{-1}$, $R min^{-1}$, $mR h^{-1}$ 等等).

(18) **质量衰减系数** (mass attenuation coefficient) μ/ρ , 一种物质对指定能量的间接电离粒子的 μ/ρ 是 dN/N 除以 ρdl 所得的商. 其中 dN/N 是在密度为 ρ 的介质中, 穿行距离 dl 时, 经受相互作用的粒子的份额:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl}.$$

注: (a) 相互作用一词, 应用于间接电离粒子的能量或方向由此被改变的过程.

(b) 对于 X 或 γ 线光子⁵⁾:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho},$$

其中 τ/ρ 是光电质量衰减系数, σ_c/ρ 是总康普顿质量衰减系数, σ_{coh}/ρ 是对于相干散射的质量衰减系数, κ/ρ 是形成电子对质量衰减系数.

(c) 另一种在原理上相同而广泛用于中子计算的近似方法是根据横截面 σ 的定义. 这个横截面⁶⁾大小为 L^{-2} , 是在一个质量单元中, 相互作用的概率, 除以核子数与通量的乘积. 质量衰减系数与横截面的关系是:

$$\mu/\rho = N_A \sigma / M,$$

其中 N_A 是阿佛加德罗常数. M 是靶单元的克分子质量.

-
- 5) 这个公式适用于核相互作用不重要的情况, 对于能量超过数百万电子伏的 X 或 γ 射线; 这样的相互作用可能需要增加一个额外项.
6) 在中子物理中, σ 和 Σ 通常分别叫做微观和宏观的横截面.

一种物质的 μ 量有时用 Σ 表示, 是在一质量单元中相互作用的概率除以其体积和通量的乘积。

(d) 按上面的注 (b) 类推, 截面积 σ 可以表示为与此有关的各种中子反应中部分横截面的总和。例如:

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_s,$$

其中 σ_a 是中子吸收横截面, σ_s 是中子散射横截面; 或

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_{n,n'} + \sigma_{n,\gamma} + \sigma_{n,\alpha} + \sigma_{n,p},$$

其中 e 代表弹性散射,

n, n' 代表非弹性散射,

n, γ, n, α 和 n, p 相应的代表中子俘获以后随之发生的 γ 射线辐射、 α 粒子辐射或质子辐射。

由于可能产生的相互作用数目很大, 并且依赖于中子能量和靶核性质, 这里不准备例举广泛的例子。

(19) **质能传递系数** (mass energy transfer coefficient) μ_{tr}/ρ , 一种物质对于指定能量的间接电离粒子的质能传递系数 μ_{tr}/ρ , 是 dE_{tr}/E 除以 ρdl 所得的商, 其中 dE_{tr}/E 是入射粒子能量 (不包括静止能量) 在密度为 ρ 的介质中穿行距离 dl 时, 由于相互作用转换成带电粒子动能的份额:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho E} \frac{dE_{tr}}{dl}.$$

注: (a) 对于给定的单能辐射, 能通量和科玛之间的关系可写作:

$$K = \varphi \frac{\mu_{tr}}{\rho}.$$

(b) 对于能量为 $h\nu$ 的 X 或 γ 射线光子⁷⁾:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau_a}{\rho} + \frac{\sigma_{ca}}{\rho} + \frac{k_a}{\rho},$$

7) 这一公式适用于核的相互作用不重要的情况。对于能量超过数百万电子伏的 X 或 γ 射线, 这样的相互作用可能需要增加一个额外项。