

823/164

43933

量和单位丛书

12

陈丽妹 刘远迈 编



核反应和电离辐射的量和单位

量 出 版 社

823/164

量和单位丛书(12)

核反应和电离辐射的量和单位

陈丽株 刘远迈 编

计 量 出 版 社

1983·北京

量和单位丛书 (12)

核反应和电离辐射的量和单位

陈丽姝 刘远迈 编

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 787×1092 1/32

印张 1 1/4

字数 24 千字

印数 1—31 000

1983年5月第一版

1983年5月第一次印刷

统一书号 15210·280

定价 0.20 元

说 明

为了贯彻1981年7月14日经国务院批准的、由中国国际单位制推行委员会颁布的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案(试行)》,“全国量和单位标准化技术委员会”提出了有关量和单位的15项国家标准(即GB3100, GB3101及GB3102.1—13),并已于1982年5月至7月先后经国家标准局批准发布(1983年7月1日起实施)。我们现在组织上述国家标准的起草人员编写了这套《量和单位丛书》,供各有关科学研究、文化教育、新闻出版、国防建设、国内外贸易、工农业生产、经济管理及政府机关人员使用参考。

对本丛书的意见,请寄北京市邮政2112信箱SI办公室。

中国国际单位制推行委员会办公室

1982年12月

目 录

一、引言.....	(1)
二、GB3102.10—82的制定原则.....	(2)
三、GB3102.10—82 与 ISO 国际标准及 ICRU 第33号 报告的比较.....	(2)
四、描述辐射场的量.....	(5)
五、描述辐射与物质相互作用的量.....	(7)
六、剂量学中几个常用的量.....	(9)
七、有关放射性的量.....	(14)
八、辐射防护中使用的量.....	(16)
九、单位的换算关系.....	(23)
附 录.....	(25)
GB3102.10—82《核反应和电离辐射的量和单位》 简明表.....	(25)

一、引言

国家标准(GB 3102.10—82)《核反应和电离辐射的量和单位》已于1982年7月26日正式发布,并决定从1983年7月1日起实施。这是对核反应和电离辐射领域中常用的基本量和单位(包括区别性的定义)所制定的国家标准,是科学技术中的基础性标准之一,在今后制定其它有关标准和实际应用时,都要贯彻使用。

“核反应和电离辐射”领域中的量和单位相对于其它学科来说要新得多。就其基本量的数量而言,也是随着科学及应用技术的发展而逐渐增多的。自从1928年国际上第一次提出本学科特有的物理量伦琴单位的定义起,到现在50多年来,国际标准化组织(ISO)正式定义的量就有70个;就其已有的量的名称和定义来看,也经历了一个不断进行修改、日趋完善的过程;再加之同一名称的量在不同时期有着不同的概念和定义,就使得这个领域中的量用得很混乱。此外,有些量的名称在由外文翻译成中文时,量的名称及其定义中所涉及到的一些有关术语尚未定出大家公认的通行译名,这些,在制定本标准时都做了认真的考虑。

随着量的演变,对应的单位和换算系数的变化也是很频繁的。虽然在“原子物理学和核物理学”中过去用得最多的还是CGS制单位,但是在电离辐射和核反应领域中,从第一个量伦琴的出现开始,就建立了一些专用单位,而这些专用单位与国际单位制并不一致。因此,虽然从整体看本领域中大多数量的单位向国际单位制单位过渡没有什么困难,但是个别单位在过渡时困难却较大。于是国际上对某些量存在的必要性有争论,到目前为止,这种争论还在延续。²在制定本标准时,也充分考虑了这一情况。

二、GB3102.10—82的制定原则

GB3102.10—82中所列各量，均属本学科使用的一些最基本的量，可以由这些基本量派生出来的其余各量在本国标中均未列出。国标中对各量的定义尽量与国际上的最新标准保持一致，力求做到准确、简明。

制定本标准时，尽力保持与国务院批准的、由中国国际单位制推行委员会颁布的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案（试行）》相一致。并参考了国际标准ISO 1000，ISO31/10 1973年版和1980年版以及法国国家标准和日本国家标准的有关部分。此外，还参考了第15届、第16届国际计量大会的正式决议，国际辐射单位与测量委员会（ICRU）第33号报告（1980年4月15日出版），核能术语汇编 ISO-921，国际电工委员会（IEC）的有关术语（IEV-881）和我国有关部门通用的和正在制订的有关标准。

在本标准中，量的名称和定义以及备注栏中所用的术语的中译名，主要参照了中国科学院名词室编的《物理学名词》和原子能出版社出版的《英汉原子能词典》以及中国工业出版社出版的《英汉原子核词典》等。对于新近出现的某些术语，参考了国际上有关组织的正式出版物中的中译名。此外，对于那些与其它学科领域有关量的名称，也分别进行了考虑。

三、GB3102.10—82与ISO国际标准 及ICRU第33号报告的比较

GB3102.10—82比ISO标准增加了10个量。这10个量是：
10—2.1辐射能 E_R 、10—53.1 剂量当量率 $\dot{H}$ 、10—59.1 吸收剂

量指数 D_1 、10—60.1 剂量当量指数 H_1 、10—61.1 粒子辐射度 P 、10—62.1 能量辐射度 γ 、10—63.1 辐射化学产额 $G(x)$ 、10—64.1 衰变常数 λ 、10—65.1 线能量 γ 、10—67.1 质能吸收系数 (μ_{en}/ρ) 。增加的原因是在于这 10 个量都是些最基本的量，其它一些常用的量，都是在它们的基础上进行定义的。其中“辐射能”这个量，虽然是光和电磁辐射学科中的一个基本量，但也是本学科中的一个重要物理量，其名称、符号、单位和定义在这两个学科中都是一致的。

本国标中未采纳 ISO31/10 中的量有：①(10—30.1)* 中子速率 (neutron speed)。②将原 (10—50.2) 的平均授予能 (mean energy imparted) 从单独项号中去掉，并入到现 10—49.1 授予能的备注栏内。③去掉了原 (10—31.1) 中子注量率 (neutron fluence rate)，因为在 10—10.1 中有粒子注量率这个量，在“本标准说明”中已经说明本国标中“粒子”一词，既包括那些静止质量不为零的粒子（质子、电子、中子……），也包括静止质量为零的粒子（如光子），因而粒子注量率也包括了中子注量率。鉴于中子注量率这个量在过去较长一段时间内，人们习惯地称它为“中子通量”，而按照最新标准，过去称之为“中子通量”的，现在应称为“中子通量密度”，最好是称作“中子注量率”，因为目前国际上有把原“中子通量”趋于淘汰之意。为了便于新旧对照，在国标备注栏内业已指出中子注量率过去曾称中子通量。④将原 (10—29.1) 中子数密度、(10—30.1) 中子数密度的扩散系数和 (10—31.1) 中子注量率的扩散系数分别改为现在的 10—30.1 粒子数密度、10—31.1 粒子数密度的扩散系数和 10—32.1 粒子注量率的扩散系数。

在 ISO31/10—1980 标准中，把过去中子物理学中常用的

* 括弧内为 ISO31/10 的项号，下同。

量勒(lethargy, GB3102.10—82 的 10—36.1 项)定名为能量减少的对数, GB3102.10—82 定名为“对数能降”, 这同我国对物理量的名称采用意译的原则相一致。但是为了使人们有个习惯的过程, 而在备注栏内说明“此量过去称为勒”。另外, 10—26.1“形成每对离子平均损失的能量”, 在 ISO 标准中用符号 W_i 表示, 为与国际上通用符号保持一致, 在本国家标准中改为 W , 并在备注栏内说明 ISO 1980 年版用 W_i 作为 W 的符号。

1925 年, 在国际放射学会内成立了“国际辐射单位与测量委员会 (ICRU)”, 它是国际上最早探讨电离辐射量和单位的组织, 直到现在仍然是这方面的学术界的权威性机构。目前它已成为独立的国际性学术组织。50 年代以后, 这个组织的工作很活跃, 出版了很多报告。国际上一些组织, 如国际计量局 (BIPM)、国际标准化组织 (ISO)、国际电工委员会 (IEC) 等有关机构, 凡涉及到电离辐射量和单位时, 都以 ICRU 建议的量的名称、定义和单位为基础。ISO 31/10 中“电离辐射量”这部分大体上与 ICRU 1980 年 4 月出版的第 33 号报告一致。但由于它们不属于同一系统, 因而编写的着眼点和体裁有所不同。总的看来, ISO 编写这方面标准的人员权威性不如 ICRU, 因此有些量的定义在叙述上不如 ICRU 严谨。但是 ISO 标准中除了列出电离辐射量以外, 还包括了核反应部分用到的一些量, 这是 ICRU 所没有的。

ISO 31/10 (1980 年版) 与 ICRU 第 33 号报告中量的名称、定义和单位完全相同的有 17 个量。这 17 个量是: 粒子注量、能注量、粒子注量率、能注量率、截面、总质量阻止本领、传能线密度、形成一对离子平均损失的能量、授予能、比授予能、吸收剂量、吸收剂量率、比释动能、比释动能率、照射量、照射量率和剂量当量。这 17 个量 GB3102.10—82 全部引

用了,但对其中的个别措词做了小的改动,以便使叙述更为严谨。

另外还有质量衰减系数、质能转移系数和放射性活度3个量,ISO31/10(1980)和ICRU第33号报告中都有,但定义不尽相同。国标对前两个量选用了ISO的定义,对后一个量基本上采纳了ICRU的定义。

ICRU第33号报告中下列18个量是ISO31/10(1980年版)中所没有的:辐射能(radiant energy)、剂量当量率(dose equivalent rate)、吸收剂量指数(absorbed dose index)、剂量当量指数(dose equivalent index)、粒子辐射度(particle radiance)、能量辐射度(energy radiance)、辐射化学产额(radiation chemical yield)、衰变常数(decay constant)、线能量(linear energy)、粒子数(particle number)、粒子通量(particle flux)、能通量(energy flux)、空气比释动能率常数(air kerma rate constant)、吸收剂量指数率(absorbed dose index rate)、剂量当量指数率(dose equivalent index rate)、表浅剂量当量指数(shallow dose equivalent index)、深度剂量当量指数(deep dose equivalent index)和质能吸收系数(mass energy absorption coefficient)。其中前9个量和最后一个量已增订在本国家标准中。

四、描述辐射场的量

本标准中所列描述研究点处辐射场的量有:10—9.1粒子注量、10—10.1粒子注量率、10—11.1能注量、10—12.1能注量率、10—13.1粒子流密度、10—2.1辐射能、10—28.1离子数密度和10—30.1粒子数密度等,下面重点介绍一下粒子注量。

注量是一个描述辐射场的基本量。是1962年首先由国际

辐射单位与测量委员会 (ICRU) 提出的一个新术语。

注量 Φ 定义为在空间一给定点处，射入以该点为中心的小球体的粒子数 dN 除以该球体的截面积 da ，即

$$\Phi = dN/da$$

注量 Φ 的 SI 单位为每平方米，符号 m^{-2} 。

假如球体的截面积为 da ，由各个方向射入该球体的总粒子数为 $dN = n_1 + n_2 + \dots + n_i$ ，其中 $n_1, n_2, \dots, n_i$ 分别代表由不同方向射入该球体内的粒子数。 dN 实质上是所有穿过与粒子运动方向垂直的截面的粒子数之和。

注量 Φ 也可以理解为进入单位截面积球体内的粒子数。但是，它与通过单位面积的粒子数是不同的。因为对于单位面积来讲，面积的方向是一定的，致使有些方向的粒子不能通过这个面积，例如虽然靠近该单位面积但运动方向与面积平行的一些粒子以及其它运动方向与面积不能相交的所有粒子。而单位截面积球体的截面积具有各个方向，使得只要与该球相交的粒子都可以通过该球体的单位截面积。因此除了单向平行垂直入射束以外，通过单位面积的粒子数总是小于上述定义的注量 Φ 。

采用射入的说法是强调只穿过一次，同时也便于与作用截面的概念联系起来，并防止与源的概念联在一起。注量在中子物理中就是常用的 nvt ，其中 n 为中子数密度 (m^{-3})， v 为中子速度 ($m \cdot s^{-1}$)， t 为时间 (s)。

与注量相关的量还有 10—11.1 能注量 Ψ ，10—10.1 粒子注量率 ϕ 和 10—12.1 能注量率 ψ 。

能注量 Ψ 的定义为在空间一给定点处，射入以该点为中心的小球体的所有粒子的能量 dE_R (不包括静止能量) 总和除以该球体的截面积 da ，即

$$\Psi = dE_R/da$$

粒子注量率 φ 为时间间隔 dt 内粒子注量 Φ 的增量, 即

$$\varphi = d\Phi/dt$$

能注量率 ψ 为时间间隔内能注量 Ψ 的增量, 即

$$\psi = d\Psi/dt$$

理解了粒子注量以后, 对于粒子注量率、能注量和能注量率就比较容易理解了。

在没有引入注量之前, 常借用物理学中已建立起来的“通量 (flux)”或“通量密度 (flux density)”来描述粒子的辐射场。在一般物理学名词中, 通量没有单位面积的要求, 通量密度才有单位面积的含义。例如磁通量密度单位为韦伯每平方米, 电通量密度单位为库仑每平方米等。另外, 带有“通量”一词的物理量有的有时间含义, 如辐射通量单位为焦耳每秒, 而有的则没有时间的含义, 如磁通量单位为韦伯 ($=V \cdot s$)。为了与一般物理学中的术语相一致, “注量率”应该对应于“通量密度”(中子物理学中常用的通量密度就是注量率)。绝不应该把注量称之为“通量”。粒子注量中“粒子”一词可用所指粒子的名称来代替, 如质子注量、中子注量, 等等。顺便提一下关于 fluence 的翻译问题。此词来源于拉丁文, 是“流”的意思, 可译成“流量”, 但这类词在物理学名词中使用过多, 易于混淆。另外, 按定义 fluence 是射(流)入单位截面球体内的粒子数, 中文“注”是射(流)入的意思, 因此, 为了避免使用过多的“流”字, 经有关专家建议, 把 fluence 译为“注量”。目前这个译名在电离辐射领域已被大家所接受。

五、描述辐射与物质相互作用的量

本标准中定了许多表征辐射与物质相互作用的量, 在此

着重介绍10—15.1质量衰减系数、10—66.1质能转移系数、10—67.1质能吸收系数、10—21.1总质量阻止本领、10—56.1传能线密度和10—65.1线能量这6个量。

1. 质量衰减系数 μ/ρ 、质能转移系数 μ_{tr}/ρ 和质能吸收系数 μ_{en}/ρ

这3个系数都是针对不带电电离粒子穿过介质发生的现象而定义的。不带电电离粒子在介质中穿行一距离，平均有多少粒子发生了相互作用，用质量衰减系数 μ/ρ 量度（除去散射光子部分就是质量吸收系数 μ_a/ρ ）；总能量中平均有多少转移为次级带电粒子的动能，用质能转移系数 μ_{tr}/ρ 量度；转移为次级带电粒子动能中除去以韧致辐射形式放出的以外，真正消耗在介质中的即平均有多少能量被介质吸收，用质能吸收系数 μ_{en}/ρ 量度。

概括地讲，这3个系数分别量度：平均有多少粒子发生相互作用；平均有多少能量转移为带电粒子的动能；平均有多少能量被介质所吸收，它们的SI单位都是平方米每千克（ m^2/kg ）。

2. 总质量阻止本领 S/ρ 、传能线密度 L_Δ 和线能量 y

总质量阻止本领和传能线密度这两个量都与带电粒子在物质中损失能量的过程有关，但它们各自描述的是这一过程的不同方面。用能量损失与穿过的路程之比来定量描述带电粒子损失能量的过程，就是阻止本领的概念。显然，它是就某种物质对某特定能量的带电粒子（ α ， β 等）而言的。阻止本领定义中所指的能量损失，包括各种类型的全部能量损失。当粒子的行程以线长度表示时，即为总线阻止本领 S ， $S = -dE/dx$ ；粒子的行程以单位面积内质量 ρdx 表示时，就是总质量阻止本领 S/ρ ， $S/\rho = dE/\rho dx$ 。在核反应可忽略的能量范围内，总质量阻止本领可以分成碰撞电离损失和韧致辐射损失

两部分, 即

$$S/\rho = \frac{1}{\rho} (dE/dx)_{\text{碰撞}} + \frac{1}{\rho} (dE/dx)_{\text{辐射}}$$

其中 $(dE/dx)_{\text{碰撞}} = S_{\text{碰撞}}$ 和 $(dE/dx)_{\text{辐射}} = S_{\text{辐射}}$ 分别为线碰撞阻止本领和线辐射阻止本领。总质量阻止本领的 SI 单位为 $J \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$, 也可以用 $eV \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ 作为单位。

传能线密度 L_d 是在总线阻止本领中, 限制在选定能量截止限 Δ 以下的那部分能量转移, 即为特定能量的带电粒子在某种物质中, 由于碰撞(只计能量转移小于 Δ 的)而引起的能量损失线密度, 也就是常说的在单位距离上损失的能量。因此有时把传能线密度称为有限线碰撞阻止本领。传能线密度的 SI 单位为 $J \cdot m^{-1}$, 也可用 $eV \cdot m^{-1}$ 表示。

线能量 y 的定义为 $y = \epsilon/\bar{l}$ 。其中 ϵ 是在一次能量沉积事件中授予某一要研究体积内物质的能量, $\bar{l}$ 是该体积的平均弦长。线能量是从微观尺度来定量描述电离辐射在物质内损失能量的过程的, 是一个随机量, 与吸收剂量和吸收剂量率无关。其 SI 单位为 $J \cdot m^{-1}$, 也可用 $eV \cdot m^{-1}$ 表示。

传能线密度 L_d 和随机量线能量 y 的量纲相同, 但它们是有区别的: ①传能线密度 (L_d) 是受能量截止限 Δ 约束的非随机量; 而线能量 y 是受几何截止限约束的随机量。②传能线密度定义于带电粒子的微观径迹元上, 因此必须在比粒子射程小的路程上来确定它; 而线能量定义中的平均弦长 $\bar{l}$ 没有涉及到径迹结构, 所以当平均弦长 $\bar{l}$ 大于粒子射程时也可采用这个量。

六、剂量学中几个常用的量

剂量学中的量是描述辐射对物质的现实效应和潜在效应

的量。它们既依赖于辐射场的强弱，又依赖于辐射与物质的相互作用，因此它们可以用这两者的乘积来计算，但它们又都可以通过测量而直接得到。本标准中所包括的剂量学的量有：10—49.1授予能 ϵ 、10—50.1比授予能 Z 、10—50.2吸收剂量 D 、10—51.1吸收剂量率 $\dot{D}$ 、10—54.1比释动能 K 、10—55.1比释动能率 $\dot{K}$ 、10—57.1照射量 X 、10—58.1照射量率 $\dot{X}$ 和10—65.1线能量 γ （已在第五节中介绍了）等。现将几个最常用的量介绍如下。

1. 照射量(exposure) X

照射量是一种用来表示 X 或 γ 辐射在空气中产生电离能力大小的物理量。它只适用于 X 或 γ 辐射，不能用于其它类型的辐射（如中子、电子束等），也不能用于其它物质。在其它物质内某一点上确定的照射量，是指假定在所研究的那一点上存在着少量空气而且又满足电子平衡条件时得到的。

照射量 X 的定义为 X 或 γ 辐射在质量为 dm 的空气中释放出来的全部电子（正电子和负电子）完全被空气阻止时，在空气中产生一种符号的离子的总电荷的绝对值 dQ 除以 dm ，即

$$X = dQ/dm$$

定义中的 dQ 不包括光子在该质量中释放出来的次级电子发射的韧致辐射被吸收后产生的电离。不过这仅在光子能量很高时才有意义。除此差别外，照射量就是 X 或 γ 辐射在空气中比释动能 $K_{\text{空气}}$ 的电离当量，即有 $X = K_{\text{空气}} \cdot \frac{e}{W}$ 。

只有在满足“电子平衡”的条件下，才能严格按照定义精确测量照射量。因此，鉴于现有技术条件和对精确度的要求，利用电子平衡原理精确测量照射量的光子能量限制在几 keV 到几 MeV 的能量范围以内。

照射量的SI单位是库仑每千克，符号为 $C \cdot kg^{-1}$ 。暂时允

许与SI单位并用的专用单位是伦琴,符号为R, $1\text{ R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{ C/kg}$ (准确值)。

照射量是个历史悠久变化较大的量,也是目前争论较多的一个量。国际辐射单位与测量委员会(ICRU)未要求国际计量大会(CGPM)对照射量的SI单位(C/kg)给予专门名称的原意就是要逐步取消这个量。但它又是一个使用最久的量,使用中不必引入W值等常数,而且也是能够按照定义精确测量的一个量。照射量除了可以用来描述X或 γ 辐射在空气中的辐射场以外,目前更广泛的用途是通过测量的照射量来计算所需要的吸收剂量。鉴于照射量存在上述优点,国际上一种意见认为应继续保留这个量,并对其SI单位(C/kg)赋予专门名称。另一种相反的意见则认为,实际应用中真正需要的是吸收剂量,而照射量只能表征光子与物质相互作用的第一阶段,还仅限于光子与空气的相互作用,具有局限性,因此建议逐步废除这个量。在带电粒子暂时平衡的条件下,以伦琴为单位的照射量数值上近似等于以拉德为单位的空气、水或软组织的吸收剂量。然而,在使用SI单位时,这种数值上近似相等的关系就不存在了。对于涉及光子的许多应用来说,认为使用与吸收剂量有相同SI单位(戈瑞)的空气比释动能可能更方便些(两者在数值上近似相等)。但是,比释动能目前还不能按定义实现测量,因此是否用比释动能来取代照射量,现在还是一个尚未解决的问题。在1980年出版的国际辐射单位与测量委员会的第33号报告中,将原照射量率常数 Γ 改成为空气比释动能率常数,(此常数是光子辐射的一个重要特征)。由此可以看出,国际辐射单位与测量委员会有意通过空气比释动能向吸收剂量转换,以逐步废除由照射量向吸收剂量转换的方法。当然,最终能否实现,还有待于事物的进一步发展。

2. 比释动能(kerma) K

比释动能 K 是用来量度不带电电离粒子与物质相互作用时, 释放出来的带电粒子初始动能总和的一个宏观物理量。因此, 只有大量相互作用时才能很好地确定它。

比释动能 K 的定义为不带电电离粒子在质量为 dm 的某种物质中释放出来的全部带电粒子的初始动能总和 dE_{tr} 除以 dm 即

$$K = dE_{tr}/dm$$

定义中的 dE_{tr} 代表由不带电电离粒子所释放出来的带电粒子的初始动能的总和, 它既包括这些带电粒子在韧致辐射过程中辐射出来的能量, 也包括在该体积元内发生的次级过程所产生的任何带电粒子的能量。因此, 在质量元 dm 中产生俄歇电子时, 它们的能量也是 dE_{tr} 的一部分。

比释动能的 SI 单位为焦耳每千克, 符号为 J/kg。SI 单位的专门名称为 gray (戈瑞), 符号是 Gy, $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$ 。暂时允许与 SI 单位并用的专用单位为 rad (拉德), $1\text{rad} = 10^{-2}\text{Gy}$ 。

应当注意, 比释动能虽然与吸收剂量有相同的单位, 但两者在概念上是完全不同的两个物理量。不带电电离粒子与物质相互作用可以分成两个步骤: 第一步是不带电电离粒子在物质中产生带电电离粒子和其它次级不带电电离粒子而损失其能量; 第二步是带电电离粒子将能量授予物质。比释动能表示第一步的结果, 而吸收剂量则表示第二步的结果。因此, 只有在完全满足电子平衡条件, 而且韧致辐射可忽略不计时, 比释动能才等于吸收剂量。

比释动能是由英文 kinetic energy released in material (在物质中释放出的动能) 缩写而成 kerma, 曾有人采用音译, 即称“珂玛”, 但按照我国习惯, 物理量单位的名称一