

物理量和单位讲座

第四讲 电离辐射和核物理的量和单位

吕维纯

电离辐射和核物理的量和单位在我国的国家标准中分列为两类,即 GB 3102.9 原子物理学和核物理学的量和单位及 GB 3102.10 核反应和电离辐射的量和单位。两类标准中共列出 110 项物理量和相应的单位。这些量和单位的建立时间至今也不过 80 年,如 1908 年法国维拉提出了“e”单位,用测量空气中电离的方法来测定 X 射线的量。这些量的演变和发展过程比较复杂,这一方面说明问题本身的复杂性,另一方面也说明,随着科学技术的进步,要求描述对象的特征更多或需要更严格区分其细节。

十九世纪末二十世纪初,在物理学中出现了大跃进的局面,其中最值得注意的事件是发现了电子、X 射线、放射性现象和创立了量子理论,从而使物理学研究由宏观世界深入到微观世界,出现了原子物理学和核物理学。在发现 X 射线和放射性元素镭和钋以后不久,科学家和工程师就在医学和工业方面找到了它们的实际应用,如 X 射线透视,镭和钋的射线治疗,发光材料的生产等。为了精确掌握放射性物质的用量,使电离辐射的诊断和治疗获得良好的效果,并保证使用电离辐射或放射性物质人员的健康,必须建立统一的测量电离辐射量的方法,电离辐射计量学就是在这—基础上创建的。随着核物理学的发展,特别是二十世纪四十年代实现了核裂变链锁反应,核能工业飞速发展壮大。核能在军事和民生两方面都有重大效用。从事与核事业有关的人员剧增,他们从工作内容、自身健康、对家庭和社会的影响等多方面考虑,必然会重视和关心电离辐射量的测量和安全标准问题。为此必须了解和熟悉这些量和它们的单位。电离辐射是能量较高的足以使物质电离的电磁辐射(如 X 射线、 γ 射线、同步辐射)或粒子辐射(如 α 射线、 β 射线、中子束)。按引起电离过程的特征也可分为直接电离辐射(如 α 射线、

β 射线)和间接电离辐射(如中子束、X 射线)。辐射与物质的相互作用是很复杂的过程,总的说来是辐射逐步失去能量,最终被物质吸收。物质吸收辐射能量和粒子以后发生了各种物理和化学变化(如温度升高、结构改变、分子断裂或重组等),研究这些变化过程或效果对于了解辐射的性质是必须的;同时,这些研究也是辐射测量、辐射加工工艺学、辐射化学和辐射生物学的基础。在为数众多的辐射和核物理的量和单位中,有些涉及的面比较窄,有些简单明确,长期使用没有发生变动,因此对这些量和单位本文不予讨论。对放射性活度、照射量、吸收剂量、剂量当量和粒子注量等则从基本概念和历史沿革方面进行一些介绍。

1. 放射性活度 (activity, 符号 A)

这是对象或样品中某种核素(如 ^{24}Na)或处于特定能态的某种核素 ($^{234}\text{Pa}^*$) 在单位时间内发生自发核跃迁数的期望值,

$$A = \frac{dN}{dt},$$

dN 是时间间隔 dt 内发生自发核跃迁数的期望值。在不会引起误解的情况下,放射性活度可简称为活度,过去习惯上称为放射性强度或强度 (radioactivity),它是在 1910 年提出的。放射性活度最早使用的单位是居里 (Ci),当时 1Ci 表示与 1 g 镭相平衡的钋的量,在压力为 1atm、温度为 0°C 时,钋占有 0.66mm^3 体积。根据当时的测量数据,折算到现在 SI 单位贝可 (Bq) 的数值为 $3.4-3.7 \times 10^{10}$ 。1930 年,国际标准委员会建议 1g 镭的衰变率取 $3.7 \times 10^{10}/\text{s}$,并建议将单位 Ci 推广应用到铀放射系的其他衰变产物。1950 年,规定 1Ci 等于 $3.7 \times 10^{10}/\text{s}$,适用于任何放射性物质。1962 年,建议用活度作为物理量的名称以取代放射性。1975 年,第十五届国际计量大会通过决议,采用具有

专门名称的 SI 单位贝可 (becquerel, Bq), $1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$, 这一名称取自放射性现象的发现者、法国科学家 A. H. Becquerel (1852—1908)。

比活度 a 是与活度直接相关的量, 过去称为比放射性, 它是单位质量样品中的活度, 单位为 Bq/kg。

2. 照射量 (exposure, 符号 X)

这是 X 或 γ 射线在单位质量空气中产生的正离子或负离子的电荷绝对值。更严格的定义是 X 或 γ 射线在质量为 dm 的空气中释放出来的全部电子被空气阻止时, 在空气中产生的正离子或负离子的电荷绝对值如为 dQ , 则

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

其中不包括在该质量空气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荷。

1923 年, 彭肯 (H. Behnken) 提出新单位伦琴 (röntgen, R), 1928 年, 第二届国际放射学大会通过了伦琴单位的定义: 伦琴是 X 射线的量, 当次级电子被全部利用而消除了室壁效应的影响时, 1R 在 0°C 和 76cm 汞柱压力下的 1cm^3 空气中产生的导电性, 在饱和电流的条件下所测得的电荷为 1 静电单位。1933 年, 伦琴单位推广应用到 γ 射线的照射情况。1956 年, 国际放射学单位与测量委员会 (ICRU) 鉴于以 R 作为单位的物理量本身没有名称, 因此授名为照射剂量, 后来又因它与吸收剂量容易混淆而改为照射量。由于 R 不属于 SI 单位, 因此被 C/kg 所取代, 照射量的 SI 单位与活度和吸收剂量的 SI 单位授名方式上有所不同, 没有授以专门名称。照射量是以空气作为介质来测量 X 或 γ 射线的电离效果的, 它测量比较方便, 容易达到较高的准确度。但实际研究的对象 (如人体的某一部分) 在密度或组成的物质上与空气有很大差异, 这样的物体放在同一辐射场中, 即使照射量相同, 吸收的能量却与空气吸收的并不相同, 不同物体吸收的能量也不同。因此, 照射量本质上只是一种对辐射场进行描述的量。根据照射量测算各种物质中吸收的能量不是很简易的事情。

3. 吸收剂量 (absorbed dose, 符号 D)

这是任何电离辐射给予物质单位质量的能量。更严格的定义是电离辐射给予质量为 dm 的物质的平均授予能量 dE 被 dm 除所得的商。

$$D = \frac{dE}{dm}.$$

1948 年, 美国帕科 (H. M. Parker) 鉴于照射量的局限性, 提出了物理伦琴当量和人体 (或哺乳动物) 伦琴当量。1953 年, ICRU 正式建议采用吸收剂量和它的单位拉德 (rad), 1rad 等于 100erg/g 。1975 年, 第十五届国际计量大会通过决议, 采用具有专门名称的 SI 单位戈瑞 (gray, Gy), $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$, 这一名称取自空腔电离理论的开创者之一, 英国放射生物学家 L. H. Gray (1905—1965)。剂量本来是医疗中常用的词, 指一次服用的药剂量, 当辐射用于治疗方面时, 医生很自然地采用了这个词。吸收剂量的测量方法有空腔电离室法、量热法和化学剂量计法。它们是分别根据辐射作用于物质后引起的电离、温度升高和化学变化效应来进行测量的。研究表明, 辐射类型不同时即使同一物质吸收相同的剂量, 引起的后果也不一定相同, 特别是对生物损伤程度方面。例如, 生物体对快中子和 γ 射线吸收相同的剂量, 而快中子引起的损伤程度为 γ 射线的十倍。

4. 剂量当量 (dose equivalent, 符号 H)

它是辐射的吸收剂量与该辐射的品质因子的乘积。它的更严格的定义是在研究的组织中某处的吸收剂量、辐射品质因子 Q 和其他一切修正因子 N 的乘积。

$$H = DQN.$$

在 1948 年帕科建议的基础上, 1955 年国际放射防护委员会 (ICRP) 提出, 如果人体吸收剂量是由几种辐射产生, 则将其分别换算成以雷姆 (rem) 为单位的剂量相加求和, 即

剂量 (rem) = 吸收剂量 (rad) \times RBE, RBE 是相对生物效应系数。1962 年, ICRU 提出不宜采用 RBE, 认为它与辐射的电离密度、剂量率、剂量的给予方式和个体的生理条件等因素都有关。经与 ICRP 共同商定, 采用剂

量当量这一名称,规定其单位为 rem, 1rem = 100erg/g. 用品质因子和其他必要的修正因子乘积取代 RBE. 电子, X射线和 γ 射线的Q为1,热中子为2.3,快中子和质子为10, α 粒子为20. 1979年,第十六届国际计量大会通过决议,采用具有专门名称的SI单位希沃特(sievert, 缩写为Sv), 1Sv = 1J/kg, 这一名称取自瑞典放射物理学家 R. M. Sievert (1896—1966).

5. 注量 (fluence, 符号 Φ)

它是观测时间内通过单位面积的粒子数. 它的严格的定义是在空间给定部位射入一小球体的粒子数 dN 被球体截面积 da 除所得的商. 它的SI单位是 m^{-2} . 以前这一物理量常被称为积分通量,含义不确切,是对面积变量积分还是对时间变量积分? 为此ICRU于1962年提议采用注量这一名词.

与此直接相关的物理量注量率 (fluence

rate) 或通量密度 (flux density) 在反应堆物理和工程、辐射测量方面也经常使用. 它的定义是单位时间内通过单位面积的粒子数. 它的SI单位是 $m^{-2} \cdot s^{-1}$.

在电离辐射和核科学领域实行法定计量单位是比较复杂的任务,除了原有工作人员的习慣行为所产生的阻力以外,仪表的更新需要经历较长的时间;国际上对某些量和单位的定义、名称也有一些争议. 尽管如此,国家领导和主管部门是十分重视实行法定计量单位制的. 这几年来主要是从基本方面抓紧进行了各项标准的改订,在教材和其他书刊中推行SI单位,在仪表生产方面采用SI单位,严格控制非SI单位的仪表设备的进口等. 不论是在国外,还是在国内,广大有识之士普遍赞同推行国际单位制,因此大方向是确定的. 通过各方面人员的共同努力,在我国电离辐射和核科学领域推行法定计量单位的工作一定会取得明显的进步.

(上接第154页)

不再一一详述.

这里关键的区别在于,(12)式的定义用量子化的场振幅表示,而(9)式的经典定义中直接出现强度量. 我们再次看到,在量子理论中,几率幅的概念是具有头等重要意义的. Paul在文献[3]中说,干涉一词应当不限于传统光学中所指的干涉条纹或拍频信号,而可以推广到任何由于不同几率幅叠加而产生的效应. 这样, Brown-Twiss 实验就是最早检测到的,由不同原子发出的独立光子之间的‘干涉’的实验之一(在这前后,也已经观察到独立光束之间的光学拍频现象). 于是,本文介绍的一些新实验,都可以看成是对由几率幅叠加而产生的各种干涉现象的深入研究,并且必定使我们对光的本性有进一步的理解.

[1] R. P. Feynman, *The Theory of Fundamental Processes*, Benjamin, (1962), 1; R. P. Feynman, A. R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals*, McGraw-Hill, (1965), 1.

[2] P. A. M. Dirac, *现代物理学参考资料第三集*, 科学出版社, (1978), 37—44.
 [3] H. Paul, *Rev. Mod. Phys.*, **58** (1986), 209.
 [4] L. Mandel, in *Progress in Optics* E. Wolf ed., North-Holland, Vol. 13, (1976), 29—68.
 [5] P. W. Milonni, *Phys. Reports*, **25** (1976), 1.
 [6] P. W. Milonni, in *The Wave-Particle Dualism*, S. Diner et al. ed., Reidel Pub. Co., (1984), 27—67.
 [7] H. Paul, *Rev. Mod. Phys.*, **54**(1982), 1061.
 [8] 范岱年等编译爱因斯坦文集, 第二卷, 商务印书馆, (1977), 37—53页.
 [9] 同[8], 335—350页.
 [10] A. Einstein, *Phys. Z.*, **10** (1909), 185.
 [11] M. Born, W. Biem, *Phys. Today*, **21-8** (1968), 51.
 [12] G. I. Taylor, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **15** (1909), 114.
 [13] P. A. M. Dirac 著, 陈咸亨译量子力学原理, 商务印书馆, (1979), 8—9.
 [14] G. Magyar, L. Mandel, *Nature*, **198** (1963), 255.
 [15] R. L. Pfliegler, L. Mandel, *Phys. Lett.*, **24A** (1967), 766; *Phys. Rev.*, **159** (1967), 1084.
 [16] W. Radloff, *Ann. Physik*, **26**(1971), 178.
 [17] R. Hanbury-Brown, R. Q. Twiss, *Nature*, **177** (1956), 27.
 [18] E. M. Purcell, *Nature*, **178** (1956), 1449.
 [19] R. Loudon, *Rep. Prog. Phys.*, **43**(1980), 913.
 [20] H. J. Kimble, M. Dagenais, L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977), 691; M. Dagenais, L. Mandel, *Phys. Rev.*, **A18** (1978), 2217.
 [21] J. F. Clauser, *Phys. Rev.*, **D9** (1974), 853.