

量和单位丛书

11

吕维纯 刘迈远 编

原子物理学和核物理学的量和单位

计量出版社

量和单位丛书(11)

原子物理学和核物理学 的量 and 单位

吕维纯 刘远迈 编

计 量 出 版 社

1983·北京

量和单位丛书 (11)

原子物理学和核物理学的量和单位

吕维纯 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 7/8

字数 18 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 15210·279

定价 0.15 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、经济管理以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、GB3102.9—82 的制定原则.....	(1)
三、GB3102.9—82同ISO及国际上一些国家的标准的 比较.....	(2)
四、GB3102.9—82 中几个量的说明.....	(4)
五、关于几个单位的换算关系.....	(16)
附录.....	(17)
附录1 GB3102.9—82《原子物理学和核物理学的量和单位》 简明表.....	(17)
附录2 GB3102.9—82 中常用的物理常数表.....	(23)

一、引 言

国家标准(GB3102.9—82)《原子物理学和核物理学的量和单位》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。这是对原子物理学和核物理学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。今后在制定其它有关的各项标准和实际应用时都要贯彻使用此标准。

二、GB 3102.9—82的制定原则

1. 积极采用国际单位制

根据国际标准化组织(ISO)关于所有国际标准必须采用国际单位制的规定,以及1977年5月27日国务院颁布的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》关于“我们的基本计量制度是米制,逐步采用国际单位制”的决定,GB3102.9—82所制定的量的单位均采用国际单位制。可与国际单位制并用或允许暂时并用的非国际单位制单位列在对应的国际单位制的下面,并用虚线将两者分开。

2. 与现有的国家标准保持一致

遵照国家标准 GB1.1—81《标准化工作导则编写标准的一般规定》关于“编写标准应贯彻国家有关法令和法规。编写国家标准、专业标准(部标准)、企业标准应与现行上级、同级有关标准协调一致”的规定,GB3102.9—82在制定过程中参考了其它有关的国家标准,并与其保持一致。本标准所制定的量和单位的名称及符号与1981年7月14日经国务院

批准的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案(试行)》完全一致。

3. 尽可能与 ISO 的国际标准一致

在考虑到我国实际情况的同时,尽可能与国际标准化组织(ISO)制定的有关国际标准保持一致,但对其中个别不妥之处或不适合于我国情况的地方,做了一些适当的修改和调整。

为了与 ISO 的总分类相一致,本标准不包括中子物理、粒子物理和核反应的内容,与 ISO 相对应,把核反应的内容列在 GB3102.10—82《核反应和电离辐射的量和单位》中。

在标准的制定过程中,还考虑了人们的使用习惯。本标准的9—12.1项,ISO国际标准对应项的原文名称为“gyromagnetic ratio (γ)”,以前直译的译名为“回旋磁比率”或“回转磁比率”。考虑到按分子、分母顺序称呼的汉语习惯,本标准将它改成“磁旋比”。

三、GB3102.9—82同ISO及国际上 一些国家的标准的比较

在国家 标准 GB3102.9—82 的制定过程中,除主要参考国际标准化组织(ISO)制定的 ISO31/9—1980(E) 国际标准以外,同时还参考了法国和日本制订的有关标准。下面是我国的标准与其它国家或组织的标准比较表(见第3页)。

我国的国标 GB3102.9—82 与国际 标准 ISO31/9—1980 (E) 的主要不同之处有以下 3 点:

1. 项目的增减

GB3102.9—82 与 ISO31/9—1980 (E) 相比,共增加了5

国家或组织	标准项数	标准条数	说 明
中国(GB)	43	51	我国与 ISO 相比, 增加了5项, 减少了2项。
国际(ISO)	40	50	法国与 ISO 相比, 增加了1项(β 衰变能), 减少了1项(β 最大能量)。 日本与 ISO 相比, 增加了1项(结合能)。
法国(NFX)	40	50	
日本(Z)	41	51	

项, 它们是9—22.1核的字称 π ; 9—30.1核的结合能 E_B ; 9—31.1 比结合能 ε ; 9—32.1 中子分离能 S_n ; 质子分离能 S_p 。这5项都属于核物理学的内容, 增加的原因是因为它们在核物理学中都是基本的或常用的量。

GB3102.9—82与 ISO31/9—1980(E)相比, 减少了2项, 共四条。其内容是“相对质量过剩”、“相对质量亏损”、“敛集率”和“结合率”。去掉的理由是这些量在实际中使用很少。

另外, GB3102.9—82 还删去了 ISO31/9—1980(E)中的附录 B、附录 D 和附录 E。

2. 量的名称的修改

本标准中对 ISO31/9—1980(E) 中的两个量的名称进行了修改。其中一个是将“拉莫尔角频率”改为“原子进动角频率”, 因为前者是一个应包括后者的更为广泛的概念; 另一个是将“电子半径”改为“〔经典〕* 电子半径”, 其原因是因为用后一名称更加确切。

3. 定义的修改

①内转换系数(α) 在 ISO31/9—1980(E) 中定义为“原子在给定跃迁中放出的内转换电子数与 γ 光子数之比”,

* 按国家标准规定, 方括号内的字在不致引起混淆的情况下, 可以省略。下同。

此定义不妥。我国的标准中改为“核在给定跃迁中发射内转换电子的几率与发射 γ 光子的几率之比”。

② β 衰变能(Q_β) 在 ISO31/9—1980 (E) 中定义为“在质心系中 β 最大能量与反冲原子的能量之和”，此定义不妥。我国标准中改为“ β 衰变过程所放出的能量，即质心系中 β 粒子、中微子与子核的动能之和”。

四、GB3102.9—82中几个量的说明

在国家标准 GB3102.9—82《原子物理学和核物理学的量和单位》中，一共定了43项51条，即共包括51个量。其中有几个量需做一点简要说明。

1. 核素 X 的原子质量 m_a 和统一的原子质量常数 m_u

9—4.1核素 X 的原子质量 m_a (或 $m(X)$, $m(Z, A)$) 定义为中性原子处于基态的静止质量。

强调中性状态是因为不能无视核素原子中电子得失所引起的质量增损。基态强调原子内部能量处于最低状态，静止则强调原子不具有额外的动能。因为按照爱因斯坦的质能关系式

$$E = mc^2$$

当原子具有额外的内能和动能时，等于增大了它的质量。

核素 X 的原子质量，是一种核素的原子质量，如 ^1H 。

$$m(^1\text{H}) = (1.673\ 559\ 4 \pm 0.000\ 008\ 6) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

它与元素的原子量是不同的，其主要差别表现在两方面：

①元素的原子量，是考虑了在天然存在条件下元素中各个同位素的丰度和它们的核素原子质量以后所求得的统计平均质量。②元素的原子量是该元素统计平均质量与统一的原子质量常数的比值，因此是不具有单位的数值。同样，也可以得

到相对的核素原子质量，它也是不具有单位的数值，它与原子量的差别是不必顾及元素中各同位素之间的相关性。由上述关系可以知道，不论是核素原子质量还是相对的核素原子质量都是不会随样品的来源而改变的，而原子量则与样品的来源有关。历史上由于数据精度的限制，在化学中使用传统的原子量并未引起矛盾。但是，随着实验测量精度的提高，一定会越来越感到需要使用核素原子质量和相对的核素原子质量概念，而逐渐地放弃使用原子量这一概念。

9—4.2 统一的原子质量常数 m_u ，定义为一个 ^{12}C 中性原子处于基态的静止质量的 $1/12$ 。

$$m_u = (1.660\ 565\ 5 \pm 0.000\ 008\ 6) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

m_u 具有质量的量纲。在原子物理或核物理中常常用作质量的单位而赋予一个可与 SI 并用的单位，称作统一的原子质量单位，符号为 u 。一个统一的原子质量单位等于 1 个处于基态的 ^{12}C 中性原子的静止质量的 $1/12$ ，即

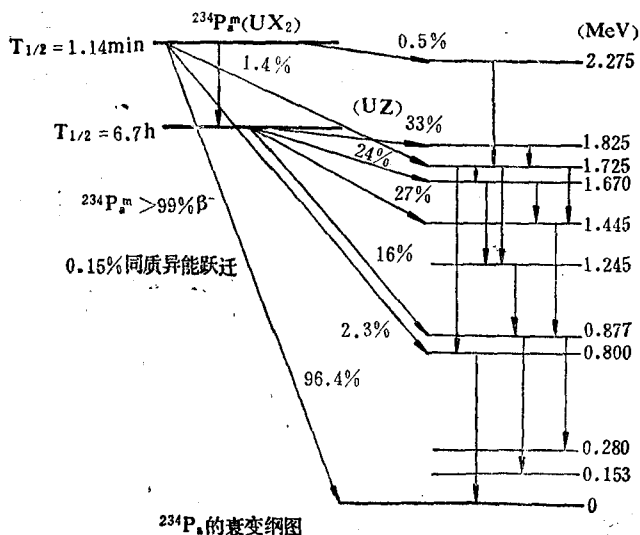
$$1\ u = 1.660\ 565\ 5 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

2. 放射性活度 A

在核物理和电离辐射领域中，用放射性活度来替换过去惯用的放射性或放射性强度的决定出现在国际上已经有 20 年之久，但是在我们国内传播则还不到 10 年。而且时至今日，在国内还没有完全被接受。这其中既有习惯性的原因，也由于人们还存在着唯恐同物理化学中的活度、生物学中的活性相重复而造成混乱这样的顾虑所致。但是国际范围内的实践已经表明，上述顾虑是多余的。1976 年，国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 的主席 Wyckoff 致函国际计量局局长 Terrien 时曾谈及这一问题。函件中写到：“ICRU 感到，活度这个词看来已经被广泛接受，不必用放射性或放射性强度来代替。”

此外, 1976年对活度的定义还做了两点补充: 一是对放射性核素加入了特定能态的定语, 即单是指出放射性核素仍不够严格, 还必须指出特定能态。二是将转变 (transformation) 改为跃迁 (transition), 通常转变是指 α , β^+ , β^- , K 俘获等衰变过程, 即核素发生了变化。而跃迁则含义更广泛, 既包括上述衰变过程, 也包括了 γ 光子发射的过程。因此, 活度的定义是: 在给定时刻, 处于特定能态的一定量放射性核素在 dt 时间内发生自发核跃迁数的期望值除以 dt 。

这种更改的必要性可以从下面的例子中看出。 $^{234}\text{P}_m$ (UX_2) 和 $^{234}\text{P}_a$ (UZ) 都有相同的 Z 和 N , 因此是同一核素, 但能态不同, 这两种状态互称为同核异能态 (isomer)。Soddy 在提出同位素概念时就已经预言过这种“高级同位素”存在的可能性。isomer 这个词是从化学中借用的, 在化



核素 ^{234}P 的衰变纲图

学中指的是同分异构物。在核素的表征中，既然不存在分子的形式，因此不能沿用化学中同分异构物的中文译名。长期以来我国将它译成同质异能素，但是同质两字很容易使人联想到质量数相同，因此就会和同量异位素 (isobar) 相混。从字面上来看，将同量异位素说成同质异能素也是可以的，所以将 isomer 译为同核异能态或同核异能素更合理些。如果只指定核素而不指定能态，则这两种状态的跃迁应该加和在一起。而且如果同核异能态的数目不止两种（它们都具有可以测量的寿命）时，均需要一一加和考虑，这既麻烦又同活度定义的原意相悖（原意是考虑单一特征核品种的跃迁）。当然也可以定义具有特征能量的核品种为一种核素，这样，上例将分别称为两种核素。有些出版物中曾出现过这种定义，而且核素表中也往往将它们分列为不同核素。但是这样将和目前采用的核素的正式定义相违背，而且不论采取哪一种定义，事实上都有这样的前提，不同能态存在的寿命在可以测量的时限内才被承认是一种状态（或核素），否则只能认为是瞬时发射几种能量的辐射而跃迁。

3. 比活度 a

9—37.1 比活度 a 定义为样品的放射性活度除以该样品的总质量。这种定义是简明的，对于不少使用的实例也是方便的，但对有些情况不是十分满意的。如果是一种放射性溶液，按照定义，加水稀释将导致比活度的降低；加入其它无关的物质也导致比活度的降低；加入与该放射性核素相同的元素同样导致比活度的降低。当需要再恢复到原来的比活度时，难易的程度差别很大。加水稀释的情况，只需要加热蒸发或干燥去水就可以实现；加入其它无关物质的情况，则需要通过一些化学处理或简单的物理方法处理来实现；加入了同位素的情况则必须通过十分困难的同位素分离才能提高样

晶的比活度。正因为如此，对于一些放射化学和核化学的研究来说，常常把比活度定义为样品中放射性原子数 N^* （或活度 A ）与给定元素的总原子数 N 之比（即 N^*/N 或 A/N ）。当然 N 也可以用给定元素的物质的量（单位为摩尔）或质量（单位为千克或克）来代替。这样定义的比活度，显然将不受加水稀释或加入无关物质的影响。

4. 放射性核素的寿命

1897年 J.J. Thomson 发现任何物质中都包含电子，1903年 E. Rutherford 和 F. Soddy 阐明放射性是元素的本性发生变化的过程，这两项重大发现动摇了 Dalton 的原子学说，说明原子不是不可分割的。但是同一种原子中电子数的改变仅仅引起该种元素化学状态的变化，而没有造成元素本性的变化。化学变化已为人们所熟知，所以电子的发现对原子学说的冲击力是不大的。而放射性过程则不然，它总是伴随着元素本性的改变。一种元素的原子在放射性变化的同时就结束了它的一生，同时又诞生了一种新元素的原子。由此得到启示，我们可以认为自然界各种核素的原子都是具有寿命的，所谓稳定的核素，不过是它的寿命比我们所了解的时间范围远为久长，而我们无法认识到它们发生的变化罢了，这正如生命短促的蜉蝣难于发觉松柏的死亡一样。而对所有已发现的放射性核素来说，我们总能通过实验的方法测量出它们的寿命，即它们的寿命不是万寿无疆的。现代实验技术能够测量的时间间隔（在特定的条件下）为 10^{-17}s ，但是通常核反应所需要的时间约为 10^{-14}s ，所以一般约定放射性核素的寿命最短的极限为 10^{-14}s 。

不同的放射性核素各自具有特征的寿命，如同乌龟的寿命与蚕蛾的寿命那样长短很不一样。即使是同一种放射性核素，每个原子的寿命也不是完全一样，而是有较大差别

的。这就好比人的平均寿命为70岁，而每个人不一定都活70岁一样。平均寿命是一大群人寿命的数学平均值，每个人寿命的长短服从一定的统计规律。

在放射性核素的衰变方面同样具有统计的特征性质。1905年E. von Schweidler首先根据放射性的统计特征推导了放射性核素原子存活时间的关系式。他的基本假定是放射性原子在时间间隔 Δt 中蜕变的几率 p 同原子过去的历史和现在的环境无关。 p 正比于 Δt ，因此

$$p = \lambda \Delta t$$

比例常数 λ 则是该种放射性核素的特征值。因为蜕变与不蜕变是两种互斥的事件，两者的几率和为1，所以该种原子活过 Δt 时间的几率为 $1 - \lambda \Delta t$ 。若把时间 t 分为许多很短的时间间隔 Δt ，则 $t = n \Delta t$ ，则该种原子活过 $2 \Delta t$ 的几率显然为 $(1 - \lambda \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)^2$ 。依此类推，活过 t 时间的几率为 $(1 - \lambda \Delta t)^n$ 或 $\left(1 - \lambda \frac{t}{n}\right)^n$ 。如令 Δt 越来越短 ($\Delta t \rightarrow 0$)，则 $n \rightarrow \infty$ ，数学上证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = e^x$$

所以，一个放射性原子活过 t 时间的几率为 $e^{-\lambda t}$ ，如果起始有 N_0 个放射性原子，则经过 t 时间后剩下的原子数

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

这就是放射性衰变的指数关系式。它与1903年 Rutherford 和 Soddy 提出放射性蜕变理论时实验测量结果所表示成的数学关系完全相同。

放射性原子的寿命由于遵守同样的统计规律，它们的寿命只能按照多数原子的存活时间来判定，按个别原子的存活时间是不能较准确地判定该种放射性核素的寿命的。

按照衰变的指数关系式规定半衰期 $T_{1/2}$ (9—39.1) 这种物理量是最为简单和明确的, 它是指 $N = \frac{1}{2} N_0$ 时所经历的时间。这时

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}$$

有时也采用平均寿命 τ (9—34.1) 这一物理量。按照定义, 它应该是该种放射性核素所有原子存活时间的总和除以原子总数。

故

$$\tau = \frac{-1}{N_0} \int_{t=0}^{t=\infty} t \cdot dN = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

由此可见, 对于同一种放射性核素来说, 平均寿命总是半衰期的 $1/\ln 2$ 倍 (近似为 1.443 倍)。

此处的 λ 称衰变常数 (9—38.1, 10—64.1), 其定义为特定能态的放射性核素在 dt 时间内发生自发核跃迁的几率除以 dt 。

5. 核自旋量子数 I

1924年奥地利物理学家首先提出原子核具有角动量这一概念, 其目的是为了了解释单一同位素或核素的原子光谱中的超精细结构。在具有多种同位素的一些元素中, 造成光谱中的超精细结构可以用同位素的谱线位移来解释, 即由于几种同位素的核质量不同而使光谱线分裂。现在知道这两种因素都会造成光谱中的超精细结构。一种核的角动量通常表示为 $I \frac{h}{2\pi}$, 也称为核自旋, 所以 I 称为核自旋量子数 (9—21.1),

它是整数或半整数。质子和中子的固有自旋量子数为 $\frac{1}{2}$ 。原子核中的核子（这是质子和中子的总称，核子这一名称是1939年由荷兰科学家 Belinfant 提出的）就象原子中的电子一样，既具有轨道角动量（它们是 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍），还具有固有自旋角动量 $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ 。因为每个核子只能使其固有自旋与轨道角动量保持平行与反平行，即两者相加或相减，所以任何偶数 A 核的自旋必定是零或整数倍 $\frac{h}{2\pi}$ ，而奇数 A 核的自旋必定是半整数倍 $\frac{h}{2\pi}$ 。所有核自旋的测定结果与这一结论都是符合的，而且所有偶数 A 同时又是偶数 Z 的核处于基态情况时， I 总是为零。

6. 核磁矩 μ

当原子核的角动量不为零时，它们的磁矩就不为零。

Dirac 曾经从理论上预言：一个电子的磁矩是 $\frac{eh}{4\pi m}$ 。经过实验测定的值与这一理论预言相一致。为了纪念 N. Bohr，把

$\frac{eh}{4\pi m}$ 称为 1 个 Bohr 磁子 (μ_B) (9—11.2)，式中 m 为电

子的质量。按此，预期质子具有的磁矩应该是 $\frac{m}{m_p} \mu_B$ ， m_p 是

质子的质量，并把 $\frac{m}{m_p} \mu_B$ 称为 1 个核磁子 μ_N (9—11.3)。

但实际测出的值并非如此， $\mu_p = 2.79 \mu_N$ 。这说明不能把质子看作是不具有结构的一个几何点。对 neutron 进行测定的结果也

同样令人惊异， $\mu_n = -1.91\mu_N$ ，负号说明自旋与磁矩的方向相反，同时说明中子表现是电中性的。实际上内部电荷分布有更为复杂的结构。从 μ_n 的值可以设想，其外层分布的负电荷较多，而在心部则正电荷的分布比较集中。

通常核或核子的磁矩是以原子核或核子的 g 因子来表示的，所以它们的磁矩为 $g \cdot I$ ，记为 μ_N 。 g 可以是正号，也可以是负号，这取决于自旋与磁矩的方向是平行还是反平行。

7. 核四极矩 Q

原子核除了具有自旋及磁矩（磁偶极矩）之外，还具有电四极矩。这是由于在原子光谱中出现反常的超精细结构而提出的一种解释。这种性质可以想象为是原子核中电荷的椭球状分布所引起的。核四极矩 Q (9—16.1) 为

$$Q = \frac{1}{e} \int (3z^2 - r^2) p(x, y, z) dx dy dz$$

其中 $p(x, y, z)$ 为核自旋的子分量取最大值时核的电荷密度； e 是元电荷。上式也可以表示为

$$Q = \frac{2}{5} Z(a^2 - b^2)$$

式中 Z 为核的原子序数； a 是椭球旋转的半轴； b 是垂直于 a 的半轴。 Q 具有面积的量纲。对氘核来说， $Q = +2.74 \times 10^{-27} \text{cm}^2$ ，正号表示拉长的电荷分布。如果 Q 为负值，则

电荷成扁平形的椭球分布。只有当核的 $I > \frac{1}{2}$ 时才具有 Q

值（可以为正值或负值）。如果核的 $I = 0$ 或 $I = \frac{1}{2}$ ，则 $Q = 0$ 。一般原子核中电荷分布偏离球形对称的情况不超过核半径的10%。

核四极矩的测量方法有：①光谱法；②微波谱法；③核