

国际单位制基本单位“米”的定义

姜友陆

国际单位制的长度单位“米”，自开始创立米制时就是最基本的单位。米制就由它的名称而得名。1790年法国科学院建议，以通过巴黎的子午线四分弧长的一千万分之一为长度的基本单位。1791年，法国国民议会通过法律确定了该单位的定义，并称之为metre(米)。显然，这个米的定义是由自然基准体现的。但是，经过艰苦地测量和计算子午线之后制造出的米基准器，后来证明，它的长度并不严格等于地球子午线的四千万分之一，而是比原来的定义短一些。因此，1872年国际米制委员会决定变更原来的米定义，改用已制成的实物基准来定义米。由于当时这个米基准器保存在法国档案局，故称之为档案局米。在1875年，世界各国签署了米制公约之后，决定重新复制一批铂铱合金米基准器，这批米基准器共31支，于1889年制成。选出其中与档案局米最接近的第六号米基准定为国际米原器，由同年召开的第一届国际计量大会批准。其余的米基准器作为副原器分发给当时各米制公约成员国作为各国的米基准器。关于米的这种实物基准的定义，在1927年的第七届计量大会上又重新加以明确：将米定义为国际计量局所保存的米原器在0℃时其上两条刻线的轴线之间的距离。这个定义曾使国际之间的长度单位得到了良好的统一。但是，由于原器上两条刻线间的距离随时间发生变化，不能满足科学技术发展中高精度测量的要求，因此人们仍然希望建立长度的自然基准。事实上，早在1892年迈克尔逊就同国际计量局合作，根据米定义测定了光波波长。根据他们的研究成果，1895年的第二届国际计量大会通过决议，将“米和光波波长之比作为米原器的自然作证参数”。同时指出，有可能通过光波波长来表示米，从而建立光波米的自然长度基准。到1927年的第七届国际计量大会就决定推荐采用镉红线的波长作为光波波长的基准。这条谱线在标准大气压下的干燥空气中的波长为 643.84696×10^{-9} 米。结果得到一米等于1553164.13个这种波长。后来，为了得到更准确更稳定的波长基准，各国从谱线轮廓和超精细结构等方面对很多谱线进行了深入研究，以寻求具有更细的单色谱线的单一同位素，来作为基准辐射源。

西德和美国等国分别研究氪的同位素 ^{86}Kr 和 ^{84}Kr 的辐射，汞的同位素 ^{199}Hg 以及镉同位素 ^{114}Cd 的辐射。1948年第九届国际计量大会决定，“继续研究这些谱线，以便将来根据选定的特定条件下的辐射确定米的新定义”。为了研究米的新定义，国际计量委员会于

1952年成立了专门的米定义咨询委员会，并于1953和1957年召开了第一次和第二次会议。经过多年的研究和讨论得出结论： ^{86}Kr 的橙色辐射无论从谱线的宽度、谱线的对称性以及抗干扰能力等方面，都比 ^{199}Hg 的绿色辐射和 ^{114}Cd 的红色辐射的谱线优越。因此，1960年第十一届国际计量大会正式通过决议确定了现在的米定义，即“米等于 ^{86}Kr 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的1650763.73个波长的长度。”同时废除了于1889年生效的以铂铱国际原器为依据的米定义。在该届大会所批准的国际单位制中，这个新定义的米被列为第一个基本单位。从此，长度单位米就有了一种可靠的永远不毁灭的自然基准。这种基准不仅能进行十分满意的光波波长之间的相互比较，而且又有利于通过光波干涉仪将波长直接传递到长度的实物基准。

现在这个米定义的理论依据是，当原子从较高能量的 E_1 能级跃迁到另一较低能量的 E_2 能级时，将发射一定频率的辐射，这个频率是

$$\nu = (E_1 - E_2)/h,$$

式中 h 是普朗克常数，当原子在两个固定的能级之间发生跃迁时，辐射的频率是一个常数。当这一辐射在真空中传播时，则可以得到与频率 ν 相对应的波长：

$$\lambda = c/\nu,$$

式中 c 是真空中光速。这个原子辐射波长是一个自然常数。将以上两式合并可得

$$1/\lambda = (E_1 - E_2)/hc$$

其中 $1/\lambda$ 称为波数，而量 E_1/hc 和 E_2/hc 各称为一个光谱项。对于米定义中 Kr 的跃迁，光谱项 E_1/hc 的值是107676.95厘米 $^{-1}$ ，它对应于 $5d_5$ 能级。而光谱项 E_2/hc 的值是91169.31厘米 $^{-1}$ ，它对应于 $2p_{10}$ 能级。这两个光谱项的差是16507.64厘米 $^{-1}$ ，即为1650764米 $^{-1}$ 。这是从光谱分析计算出来的值。各国对 ^{86}Kr 的 $2p_{10}-5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的波长进行测量的结果是

0.605 780 21 微米	国际计量局
0.605 780 23 微米	西德
0.605 780 21 微米	英国
0.605 780 21 微米	日本
0.605 780 20 微米	加拿大

将这些值加以平均，除一米就计算出米定义中的波数1650763.73米 $^{-1}$ 。由于在这个定义之前曾用镉红线的波长为基准，所以米的连续性同镉波长与米原器相

比较的不准确程度有关。后来用 ^{86}Kr 的波长对米原器进行测量，表明新的米定义比原来的米短了大约 0.25 微米，这说明 ^{86}Kr 的米定义与原来的米原器的定义吻合并不好。

我们知道，原子内部电子所处的状态，可以用四个量子数即主量子数、角量子数、磁量子数和自旋磁量子数来描述。但是，通常只用主量子数 n 和角量子数 l 来表示电子状态，即用一个指示 n 值的数目字在前，一个指示 l 值的小写拉丁正体字母在后来表示。这些拉丁字母是 s, p, d, f, \dots 等，分别表示 l 等于 $0, 1, 2, 3, \dots$ 。在一个原子中，各电子按其能量大小分布在离核不同距离的一些壳层中。主量子数 n 相同的电子构成一个电子壳层。在同一个电子壳层中， l 相同的电子构成一个次壳层。在正常态的原子中，各电子总是处于尽可能低的能级中。但是，每个电子壳层及其次壳层中最多所能容纳的电子数是一定的，可根据泡利不相容原理计算出来。量子数 $n = 1$ 的电子有两个，这两个电子的状态被称为 $1s$ 态，组成距核最近的一个壳层，通常叫做 K 壳层。量子数 $n = 2$ 的电子有 8 个，其中有两个 $2s$ 态和 6 个 $2p$ 态，构成 L 壳层。其次是两个 $3s$ 态，6 个 $3p$ 态和 10 个 $3d$ 态构成 M 壳层，两个 $4s$ 态，6 个 $4p$ 态，10 个 $4d$ 态和 14 个 $4f$ 态构成 N 壳层等等。一个原子中各个电子所处的电子态，合称为电子组态。

氩原子的原子序数为 36，它有 36 个电子，氩原子在基态时的电子组态是 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6$ ，其中 $3s^2$ 等是 $3s3s$ 的简写，所以，右上角的数目表示该态的个数。当氩原子从外界获得能量，使其一个 $4p$ 态电子处于较高能态时，则这时的电子组态就由前述的基态时的电子组态变为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^5 5s$ 或 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^5 6s$ 等等。实际上，只是最外层的电子次壳层即 $4p^6$ 变为 $4p^5 5s$ 、 $4p^5 6s$ 等， $4p^5 5p$ 、 $4p^5 6p$ 等， $4p^5 4d$ 、 $4p^5 5d$ 等无穷多不同的状态。通过这些表示电子状态的符号可以看出每个电子接近原子核的程度。但是由于电子和原子核之间，以及电子和电子之间的相互作用等，与每种电子组态对应，氩原子会形成很多不同的能级。

表示原子的能级的方法最常见的是罗素-桑德斯 (Russell-Saunders) 法。这种方法是使用大写的拉丁字母表示角量子数 l 的数值，所用的字母和前述表示电子态时所用的字母相同，只是改为相应的大写字母。在该大写拉丁字母的右下角标注内量子数的数值，而在其左上角标注代表 $(2S + 1)$ 的数目字，在整个符号之前写上主量子数的数目字。例如 $1^3S_{1/2}$ ，表明主量子数 $n = 1$ ，角量子数 $l = 0$ ，内量子数 $l = 1/2$ ，自旋量子数 s 可根据 $2S + 1 = 2$ 求出，即 $s = 1/2$ 。但是，只有当原子核外的各个电子的轨道角动量的矢量能合成一个确定的总矢量，同时各核外电子的自旋角动

量也能合成为一个确定的总矢量，而且它的数值和方向对能量影响不大时，这种能级表示方法才适用。对于氩这类核外电子较多的原子的能级，电子的磁作用比电子之间的静电作用大得多，以致上述两个合成的总矢量都不存在确定的值，因此不能用这种能级表示方法。

表示这类原子的能级是用所谓帕邢 (Paschen) 表示法。这种方法是帕邢在 1919 年研究氩原子的光谱时首先使用的。由于氩原子的光谱同氖原子的光谱很相似，因此在研究氩原子的光谱时沿用了这种表示方法。

对于氩原子的能级可以这样想象，当核外的一个 $4p$ 电子被电离而脱离氩原子后，被电离的氩原子将可能有两个相邻的能级。如果再退还给电离的氩原子一个电子，则这个电子可以在很多不同轨道上进行选择。如果所加的是 s 电子，即其角量子数 $l = 0$ ，由于电子对于氩离子可以有两种不同的方向自旋，因此可以构成四种可能的能级。帕邢就将这四个能级按照光谱项值的顺序用 s_2, s_3, s_4, s_5 表示。如果所加的是 p 电子，即 $l = 1$ ，则可以构成十个可能的能级。帕邢将这 10 个能级表示为 p_1, p_2, \dots, p_{10} ，当所加的是 d 电子时，将组成下列 12 个能级： $d_6, d_5, d'_4, d_4, d_3, d_2, d'_1, d_1, s'_1, s'_1, s'_1, s'_1$ 。这组能级的后四项是帕邢当时用错了的符号，一直沿用下来。若所加的是 f 电子，即 $l = 3$ ，则所组成的能级被命名为 T, U, \dots, X, Y, Z 等。至于每个

表 1

能级	电子状态	$4p^6$	$4p^5 ns$	$4p^5 np$	$4p^5 nd$	$4p^5 nf$
0		p_0				
5						$n-$
4						nU
4					$(n-1)d'_4$	$n-$
3					$(n-1)d_4$	nW
3				$(n-3)p_3$	$(n-1)d'_1$	nT
2				$(n-3)p_8$	$(n-1)d'_1$	nY
2			$(n-4)s_5$	$(n-3)p_6$	$(n-1)d_3$	nZ
1			$(n-4)s_4$	$(n-3)p_7$	$(n-1)d_2$	nX
1				$(n-3)p_{10}$	$(n-1)d_5$	
0				$(n-3)p_3$	$(n-1)d_6$	
4						$n-$
3						$n-$
3					$(n-1)s'_1$	$n-$
2					$(n-1)s'_1$	$n-$
2				$(n-3)p_2$	$(n-1)s'_1$	
1				$(n-3)p_4$	$(n-1)s'_1$	
1			$(n-4)s_2$	$(n-3)p_3$		
0			$(n-4)s_3$	$(n-3)p_1$		

能级相应的主量子数则置于上述每个符号之前,根据帕邢的规定,由 s 电子所构成的各能级从 1 开始顺序编号,例如 $1s, 3s,$ 等。而由 p 电子构成的各组能级,则从 2 开始顺序编号,例如 $2p_1, 2p_0,$ 等。由 d 电子构成的各组能级则从 3 开始顺序编号。这样,可将核外电子状态所对应的能级列如表 1。

由这个表可以看出 ^{86}Kr 原子的每种电子组态中与不同内量子数对应的能级。当氪原子处于基态,即外层电子分布为 $4s^2 4p^6$ 时,帕邢将这个基态称为 p_0 。当所加的电子是 p 电子时,如果 $n = 5$,即电子组态的为 $4p^5 5p$,则所对应的 10 个能级是 $2p_1, 2p_2 \dots 2p_{10}$ 。当所加的电子是 d 电子时,如果 $n = 6$,即电子组态为 $4p^5 6d$,则所对应的 12 个能级为 $5d'_1, 5d_1 \dots 5d_5 \dots$ 。由表中的这些能级符号可见,帕邢关于氪原子能级的表示方法,绝大部分是任意命名的,这几乎是单独给各个能级编号,特别是帕邢能级符号中右下角的数目字只是一种记号。

近年来一直在研究更好的米定义。1967 年开始研究用激光的辐射作为波长基准。激光辐射的方向性好,强度高而且单色性强,特别引起人们的兴趣。尤其,当利用饱和吸收使激光波长锁定在一种气体的吸收线上的方法成功之后,解决了稳定激光波长的问题,从而得到了谱线极窄的稳定的激光辐射。这种稳定激光的稳定性和复现性都可高达 10^{-11} 数量级,甚至更高。这就为通过激光辐射确定波长基准和长度基准开辟了广阔的前景。结果,国际计量委员会于 1973 年推荐由甲烷或碘的饱和吸收线伺服的氦氖激光所产生的单色辐射作为波长基准。

甲烷稳定的氦氖激光辐射在真空中的波长为 $3392231.40 \times 10^{-12} \text{m}$ 碘稳定的氦氖激光辐射在真空中的波长为 $632991.399 \times 10^{-12} \text{m}$

此外,测量光频的技术也取得了很大进展,由于可以独立地实现激光波长与频率的高精度测量,从而也可以得到高精度的光速的量值。将前述甲烷谱线的频率通过秒定义中的 ^{133}Cs 的跃迁频率相比较而测出后,

同它的波长相乘,就得到第十五届国际计量大会决议 2 所推荐的电磁波在真空中传播的速度值 $c = 299792458$ 米/秒,从此,就有可能利用激光辐射或光速通过不同的途径重新定义长度单位米。例如,可以根据某种激光跃迁对应的辐射波长定义米,也可以利用光在指定时间内在真空中通过的距离定义米。

除上述重新定义米的可能方案外,单位咨询委员会还曾提出了另一个米的新定义:“米等于 ^{133}Cs 原子的基态两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 $9192631770/299792458$ 个波长的长度”。此外,还提出了其它一些类型的米的新定义。1975 年第十五届国际计量大会和 1979 年 10 月召开的第十六届国际计量大会都慎重地讨论了重新定义米的问题。

应指出,现在考虑变更米的定义,主要并不是出于长度计量学的需要,因为按现行的米定义,用 ^{86}Kr 实现米对长度计量学的需要来说是足够精确的;而改变米定义主要还是为了保持国际单位制的完善。另一方面,现在除了用 ^{86}Kr 实现米之外,还有甲烷稳定的激光波长和碘稳定的激光波长和光速三个参考值,而且它们都具有相同的准确度。但激光波长的复现性比 ^{86}Kr 基准的复现性高 100 多倍。这样,由于使用不同的波长基准,对光谱学中一些波长的测量和其它一些特殊长度测量造成了某些不一致,甚至混乱。这也只能通过改变米定义来解决。

考虑到今后计量学的发展趋势是将物理量的“基准”建立在基本物理常数的基础上,同时,以固定的光速值为依据所确定的米的新定义在将来的相当一段时间内不会改变——这对天文学和物理学等都是有利的。因此,米定义咨询委员会通过了一项建议,要求国际计量委员会考虑一个新的米定义,于 1983 年提交第十七届国际计量大会讨论。这个定义是“米是平面电磁波在 $1/299792458$ 秒的持续时间内在真空中传播的行程的长度”。米定义咨询委员会号召国际所有有关组织和科学家从现在起熟悉这个米的新定义。