

物理量和单位讲座

第三讲 光学和原子物理的量和单位

徐 大 刚

(中国计量科学研究院)

一、国家标准 GB3102 文件规定的有关量

随着现代科学技术和经济的发展,光学和原子物理的量和单位的名称及符号的统一成为必然趋势.国际电工委员会,国际照明委员会等编纂的国际电工辞典,早已对有关量和单位给出了规范化的术语、符号和定义^[1].国际标准化组织制定了相应标准^[2,3].我国本着“向国际标准靠拢”的原则,颁布了国家标准^[4,5].

GB 3102.6《光及有关电磁辐射的量和单位》规定了如下光学量^[4].

1. 基本量: 频率和圆频率,波长和波数,辐射能,辐射功率,发光强度,光通量.
2. 常数量: 电磁波在真空中的速度, 斯忒藩-玻耳兹曼常数,第一辐射常数,第二辐射常数.
3. 光和辐射的联系量: 光视效能,最大光谱光视效能,光视效率,光谱光视效率.
4. 辐射度的空间特性量: 辐射能密度,辐射能流率,辐射强度,辐射亮度,辐射出射度,辐射照度.
5. 光度的空间特性量: 光照度,光出射度,光亮度.
6. 光辐射的时间特性量: 曝光量,光量.
7. 光谱特性量: 辐射能密度的光谱密集度,各种光谱辐射量.
8. 颜色特性量: CIE 光谱三刺激值,色度坐标.
9. 材料特性量: 吸收比,反射比,透射比,发射率,辐亮度系数,线性衰减系数,线性吸收系数,摩尔吸收系数,折射率.

在 GB 3106.9《原子物理学和核物理学的物理

量和单位》中,有下列一些涉及原子物理的量^[5].

1. 粒子数: 质子数,中子数,核子数(质量数).
2. 量子数: 轨道角动量量子数,自旋角动量量子数,总角动量量子数,主量子数,磁量子数.
3. 质量: 原子质量,电子静止质量,质子静止质量,中子静止质量,质量过剩,质量亏损.
4. 电磁特性量: 元电荷,玻尔磁子,磁旋比, g 因子(朗德 g 因子).
5. 常数量: 普朗克常数,里德伯常数,精细结构常数.
6. 长度特性量: 玻尔半径,经典电子半径,康普顿波长.
7. 能量量: 哈特里能量,能级宽度.
8. 周期量: 原子进动频率,回转角频率.

毫无疑问,上述光学量和原子物理量都应当采用我国法定计量单位^[6],它们的较为详尽的说明可参阅《量和单位丛书》^[7,8].在国家标准中,一个物理量只有一个概念和定义.与此同时,对于大多数物理量,力求做到一个物理量只有一个名称,一个符号.但是考虑到国际标准的原本,以及我国目前的实际情况和人们的习惯,在列出国家标准的同时也并列了一些量的其他名称和符号.例如,光学中的波数和波率,辐射能密度的光谱密集度和光谱辐射能密度,辐射功率和通量,光谱光视效率(视见函数),线性衰减系数和消光系数,光谱吸收比(吸收系数)等;原子物理中的质子数和原子序数,核子数和质量数以及两个学科都使用的圆频率和角频率.在量的符号中,并列了频率的 f 和

ν , 辐射的 Q 和 W , 辐射功率的 P 和 ϕ , 轨道角动量子数的 l_i 和 L , 磁量子数的 m_i 和 M 等。需要指出的是, 迄今有些量的名称使用仍不规范, 例如把光谱透射比和反射比称为光谱透射率和反射率, 其实二者的涵义和概念是大有区别的^[4,7], 值得人们注意。

二、光的基本量和单位

发光强度的单位——坎德拉是光的基本单位。它也是国际单位制和我国法定计量单位的七个基本单位之一。发光强度单位的定义, 可溯源于上个世纪^[9]。英国在 1864 年曾把它定义为“直径为 2.2cm, 质量为 75.7g 的鲸鱼油蜡烛, 在标准气压下每小时燃烧 7.78g, 火焰高度 4.5cm, 垂直于火焰中心水平方向的发光强度”。一百多年来, 随着科学技术的进步, 发光强度单位的定义作过多次更动和改进。1967 年曾定义为: “在 101325N/m^2 压力下处于铂凝固温度的黑体的 $1/600000$ 平方米表面在垂直方向的发光强度”。国际最新公认的定义(国际计量大会于 1979 年 10 月通过)为: “坎德拉(cd)是一光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} 赫兹的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ 瓦特每球面度”。这一新定义的特点是它没有规定复现计量单位的具体手段, 是属于开放性的定义, 有利于计量基准的改进和复现精度的提高。然而在光度学历史上, 发光强度单位的定义都明确规定了体现该单位的计量标准的形式, 如蜡烛、特殊设计的火焰基准、白炽基准、黑体基准等以及它们的尺寸和工作条件等, 这就限制了计量基准的改进和发展。新定义的又一特点, 是把光度单位与辐射度单位联系起来, 并且以单色频率和最新精确测定的最大光谱光视效能值进行定义。各国已按新定义建立复现坎德拉这一基本单位的基量基准。我国采用电校准的补偿型空腔辐射计建立国家光度基准, 总的不确定度为 $\pm 0.28\%$ ^[10]。

发光强度单位在我国曾有过多种名称, 如烛光、新烛光、国际烛光、支、支光等。法定计量

单位“坎德拉”这一中文名称译自 *candela* (音译)一词, 现在包括苏联在内的世界各国采用的这一单位的名称都是 *candela* 词的音译^[11]。我国现行的七个基本单位的名称, 除“秒”以外, 大都是由原名音译过来的。这顺乎现代科学技术的发展和国际交流的潮流。应该注意的是, 坎德拉和烛光并不完全相等, 1 国际烛光 ≈ 1.02 坎德拉^[12]。所以, 应当准确地使用“坎德拉”这一法定单位名称, 避免用其他名称。发光强度通常不宜简称为光强或光强度, 因为后者常用于衍射、干涉等物理现象的定性描述中, 而且二者的量纲也不相同。

应当说明的是, 虽然现行单位制选用发光强度及其单位作为基本量和单位, 并按光度量之间的关系, 由各基本单位和辅助单位相乘除, 导出和构成其它单位。但是, 不论从理论角度或从实践角度来看, 光通量是比发光强度更为基本的量, 它的单位——流明适宜作基本单位。发光强度概念仅仅用于光源, 光通量概念则应用广泛, 同时其它光度量都可由光通量以非常方便的形式推导或表述, 而发光强度却没有这一优点。发光强度的测量往往要受到空间量的测量精度的影响, 所以一些学者曾建议用光通量的单位流明代替发光强度的单位坎德拉作为基本单位^[13], 但国际计量委员会为保持国际单位制稳定而未采纳。

三、光度和辐射度的关系^[14]

许多光学现象既可从纯物理效应的观点进行评价, 也可按纯视觉效应的观点给与评价, 因而有辐射度和光度两类量和单位。它们相互之间——对应, 其对应量可共用同一的符号, 仅以脚标 ν 和 e 加以区别。例如, I_ν 代表辐射强度, I_e 代表发光强度。光度和辐射度之间是由一系列特征量联系的, 如光视效能、光谱光视效能、最大光谱光视效能、光视效率、光谱光视效率等。

光谱光视效能 $K(\lambda)$ 是光谱波长的函数, 其定义用单色光通量 $\phi_{\nu, \lambda}$ 与单色辐通量 $\phi_{e, \lambda}$ 之比表示:

$$K(\lambda) = \frac{\phi_v \lambda}{\phi_{e\lambda}} \quad (1)$$

对于复色光来说,总的光视效能 K 为

$$K = \frac{\phi_v}{\phi_{e\lambda}} = \frac{\int \phi_{v\lambda} d\lambda}{\int \phi_{e\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

利用(1)式,可得

$$K = \frac{\int K(\lambda) \phi_{e\lambda} d\lambda}{\int \phi_{e\lambda} d\lambda} \quad (3)$$

人的眼睛在绿色光谱区较为灵敏,在明视觉条件下,其最灵敏的波长为 555nm,相应的频率为 540×10^{12} Hz. 这一单色辐射的光谱光视效能即为最大光谱光视效能 K_m . 现代各国采用不同方法测定了 K_m 值. 国际计量委员会在 1977 年正式承认各国测量结果的平均值为最大光谱光视效能^[4]:

$$K_m = 683 l_m/W \quad (4)$$

为了使用方便,人们将光谱光视效能在最大处归一化,并称其为光谱光视效率 $V(\lambda)$

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (5)$$

这个量就是过去人们熟知的视见函数. 但是目前各国都把它统一称为光谱光效率. 国家标准在这一术语和其它有关术语中都用“光视”代替“光”,以强调光辐射引起的视觉效应(即光视效应). 请注意以上术语中的效能和效率的差别: 光谱光视效能的单位是 l_m/W , 量纲是 $L^{-2}M^{-1}TJ$, 而光谱光视效率则是无量纲量. 物理意义上的区别是明显的.

国家标准 GB 3102.6 文件编录了国际计量委员会于 1972 年批准的 $V(\lambda)$ 值. 这一新 $V(\lambda)$ 值采用精确的内插和外推法,大大扩展了原有的 $V(\lambda)$ 表. 波长范围从 380 到 780nm, 现已扩展为 360 至 830nm; 波长间隔从 5nm 细分到 1nm; 最多有效数字由五位增到八位.

总的光视效率为

$$V = \frac{K}{K_m} \quad (6)$$

利用(3)式和(4)式,则

$$V = \frac{\int V(\lambda) \phi_{e\lambda} d\lambda}{\int \phi_{e\lambda} d\lambda} \quad (7)$$

由(1)式,(5)式和(6)式可得光通量的下述表示式:

$$\phi_v = K_m \int \phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

上式可推广至任一光度量 X_v ,

$$X_v = K_m \int X_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

从(9)式看出,由于已知光度——辐射度的联系量或常数值,所以任意一个光度量都可通过测量其光谱辐射量,再根据上式计算出来.

四、原子的质量、长度和能量单位

原子物理涉及许多关于质量、长度和能量的物理量. 由于微观世界的特殊性,需要进行超微性质的度量,这一领域存在几种不同的单位. 例如质量,既有克或千克单位,又有统一原子质量单位 u . 原子质量在最初是用原子量给出的,并且开始时以氢原子质量为 1 进行标度,随后则以氧原子质量为 16 作为标度. 后者的优点是使多数的原子量具有整数值^[5]. 然而,自然界的氧是由多种同位素组成的,这种情况导致产生了两种原子量标度^[16-19]. 化学家使用的一种标度是基于氧同位素¹⁶O, ¹⁷O 和¹⁸O 的自然混合物,称为原子重量单位,专门名称为道尔顿 (dalton),符号为 awu

$$1 awu = 1.6601 \times 10^{-27} kg,$$

而物理学家所用的标度是基于氧同位素¹⁶O. 后者把该同位素的十六分之一的质量定为一个原子质量单位,符号为 amu

$$1 amu = 1.6597 \times 10^{-27} kg.$$

可见,当时物理学的原子质量单位比化学的原子重量单位小 0.275‰. 为了消除两种原子质量标度之间的差异,1960 年国际理论和应用物理协会接受国际理论和应用化学协会提出的建议,即所有原子量都应以¹²C 标度为根据. 这样

一来,以前的化学标度和物理标度给出的值,就要分别按 1.000043 和 0.999685 的因子而增大和减小。根据国内外标准的单位定义,一个统一的原子质量单位等于处于基态的 ^{12}C 中性原子的静止质量的 $1/12^{[1]}$, 或定义为“等于一个碳-12 核素原子质量的 $1/12^{[20]}$ 。千克(kg) 是国际单位制的基本单位,(统一的)原子质量单位(u)是我国选定的非国际单位制单位,二者目前都是法定计量单位^[6]。其换算关系为

$$1 \text{ u} = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg},$$

这也就是统一的原子质量常数:

$$m_{\text{u}} = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u}.$$

氢 ^1H 的原子质量为

$$\begin{aligned} m(^1\text{H}) &= 1.6735594 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 1.007825036 \text{ u}. \end{aligned}$$

注意,法定计量单位中的原子质量单位是指统一的原子质量单位 [atomic mass unit (unified)], 而非曾用在原子物理中的等于电子静止质量的质量原子单位(atomic unit of mass)^[21]。电子静止质量为

$$\begin{aligned} m_{\text{e}} &= 0.9109534 \times 10^{-30} \text{ kg} \\ &= 5.4858026 \times 10^{-4} \text{ u}. \end{aligned}$$

质子和中子的静止质量分别为

$$\begin{aligned} m_{\text{p}} &= 1.6726485 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 1.007276470 \text{ u}, \\ m_{\text{n}} &= 1.6749543 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 1.008665012 \text{ u}. \end{aligned}$$

至于原子长度单位,在法定计量单位中,只采用国际单位制的基本单位——米,符号是 m。原子物理曾用氢原子的玻尔理论的第一轨道半径 a_0 作为原子长度单位^[21], 其它常用单位有埃, 符号为 \AA 。这两种单位与法定计量单位的换算关系为

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.52917706 \times 10^{-10} \text{ m}, \\ 1 \text{ \AA} &= 10^{-10} \text{ m} \quad (\text{准确值}). \end{aligned}$$

我国法定的能量单位有两种。一种是国际单位制的单位,其名称为焦[耳], 符号为 J; 另一种是非国际单位制的单位,它是“一个电子在真空中通过 1 伏特电位差所获得的动能”^[20], 称为电子伏,符号是 eV。

$$1 \text{ eV} \cong 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ J},$$

$$1 \text{ MeV} \cong 1.6021892 \times 10^{-13} \text{ J},$$

$$1 \text{ GeV} \cong 1.6021892 \times 10^{-10} \text{ J}.$$

在原子物理学中,过去还有两种能量单位^[21]: 其一为哈特里 (hartree), 是以氢原子玻尔理论的第一轨道电子的势能为原子能量单位,与焦耳单位有如下关系

$$E_{\text{h}} = 4.35981 \times 10^{-18} \text{ J};$$

其二为里德伯 (rydberg), 它是氢原子的电离电位,其半值曾被定为原子能量单位。

爱因斯坦关于质量和能量关系的定律 $E = mc^2$, 把质量和能量单位联系起来,因此存在下列一类的关系式^[22]:

$$1 \text{ kg(能)} = 8.98755179 \times 10^{16} \text{ J}$$

$$= 5.609545 \times 10^{15} \text{ eV},$$

$$1 \text{ J} = 1.11265006 \times 10^{-17} \text{ kg(能)}$$

$$= 6.700429 \times 10^9 \text{ u(能)}.$$

五、分贝——级差单位的应用

一般光学和原子物理很少使用级差单位。然而,在现代高质量光纤和长距离光通信技术中大量启用了级差单位,以便描述、计算和比较大动态范围的光纤和光通信特性。在法定计量单位中,级差单位是分贝,符号 dB, 定义为“两个同类功率量或可与功率类比的量之比值的常用对数乘以 10 等于 1 时的级差”^[20]。

光纤和光通信技术的级差单位,一般用在特定波长辐射的光纤功率损耗测算上,常用表示式为^[23]

$$L(\text{dB}) = 10 \log [P_0/P_x],$$

式中 P_0 为输入的光功率, P_x 为 x 处测出的光功率。近年来,人们不仅以分贝级差单位表示损耗,还用它来直接表示光功率的大小。此时,将被测功率或信号功率参比于某一指定单位的功率进行计算:

$$P(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{P_{\text{测量}}}{P_{\text{参比}}} \right].$$

光纤和光通信技术常以 1 mW 或 1 μW 功率为参比功率^[24], 于是

$$P(\text{dB}_m) = 10 \log \left[\frac{P_{\text{信号}}(\text{mW})}{1 \text{ mW}} \right]$$

$$= 10 \log [P_{\text{信号}}(\text{mW})]$$

$$P(\text{dB}_\mu) = 10 \log \left[\frac{P_{\text{信号}}(\mu\text{W})}{1 \mu\text{W}} \right]$$

$$= 10 \log [P_{\text{信号}}(\mu\text{W})].$$

表 1 列出 $P(\text{W})$ 和 $P(\text{dB})$ 的换算。

表 1

$P(\text{W})$	$P(\text{dB}_m)$	$P(\text{dB}_\mu)$
10mW	10dB _m	40dB _μ
5mW	7.0dB _m	37dB _μ
1mW	0dB _m	30dB _μ
0.5mW	-3.0dB _m	27dB _μ
0.1mW	-10dB _m	20dB _μ
0.05mW	-13dB _m	17dB _μ
10μW	-20dB _m	10dB _μ
5μW	-23dB _m	7.0dB _μ
1μW	-30dB _m	0dB _μ
0.1μW	-40dB _m	-10dB _μ
10nW	-50dB _m	-20dB _μ
1nW	-60dB _m	-30dB _μ
0.1nW	-70dB _m	-40dB _μ
10pW	-80dB _m	-50dB _μ
1pW	-90dB _m	-60dB _μ

由上式和上表,不难得到

$$P(\text{dB}_\mu) = \{P(\text{dB}_m + 30)\text{dB}_\mu,$$

就是以 dB_m 为单位的功率值加上 30, 即为以 dB_μ 为单位的功率。上表中的负号有特殊的涵义, 它表示信号功率低于参比功率, 即低于 1 mW 或 $1 \mu\text{W}$ 的光功率。

六、常见计量单位正误

光学和原子物理使用大量的计量单位, 现将其中常见单位名称和符号的正误对照列于表 2 中。表 2 中的计量单位名称和符号的错误, 有的是使用了非法定计量单位, 如能量、功率、照度用卡作单位, 频率用周和兆周作为单位; 有的使用废弃了的符号, 如质量单位符号 gm ; 有

物理

的用了不应当有的重叠词头, 如波长的毫微米和时间的微微秒; 有的只写出了词头而未与单位符号连用, 如波长的 μ ; 有的单位符号, 大写字母写成了小写字母或相反, 如能量单位的 j 和功率单位的 w , 把词头 k 写作 K 等。

表 2

量		单位名称	单位符号
波长等	正	米, 微米, 纳米	$\text{m}, \mu\text{m}, \text{nm}$
	误	微, 毫微米	$\mu, \text{m}\mu\text{m}$
质量	正	千克, 原子质量单位	kg, u
	误		gm, Kg
频率	正	赫[兹], 兆赫	Hz, MHz
	误	周, 兆周	$\text{HZ}, \text{hz}, \text{c}$
时间	正	秒, 纳秒, 皮秒	$\text{s}, \text{ns}, \text{ps}$
	误	毫微秒, 微微秒	$\text{m}\mu\text{s}, \mu\mu\text{s}, \text{S}$
能量	正	焦耳, 毫焦, 电子伏	$\text{J}, \text{mJ}, \text{eV}$
	误	卡	cal, j
功率或	正	瓦[特]·毫瓦	W, mW
能量	误	卡/秒	$w, \text{cal/s}$
照度	正	瓦/米 ² , 毫瓦/厘米 ²	$\text{W}/\text{m}^2, \text{mW}/\text{cm}^2$
	误	卡/秒·厘米 ²	$\text{cal/s} \cdot \text{cm}^2$
级差	正	分贝	dB
	误		db

希望读者熟悉和掌握法定计量单位。在光学和原子物理学中统一和正确地运用计量单位的名称和符号, 必将大大有利于这一领域的科研生产和学术交流。

- [1] 徐大刚, 李在清译, 国际电工辞典, 科学出版社, (1983), 1-82.
- [2] ISO International Standard 31/6, Quantities and Units of Light and Related Electromagnetic Radiation, (1980).
- [3] ISO International Standard 31/9, Quantities and Units of Atomic Physics and Nuclear Physics, (1980).
- [4] 国家标准 GB3102.6-82 和 GB3102.6-86, 光及有关电磁辐射的量 and 单位, 中国标准出版社, (1983).
- [5] 国家标准 GB3102.9-82 和 GB3102.9-86, 原子物理学和核物理学的量 and 单位, 技术标准出版社, (1983).
- [6] 国务院发布统一实行法定计量单位命令, 人民日报,

- 1984年3月4日,第一、二版;
杜荷聪,陈维新,法定计量单位宣贯手册,国防工业出版社,(1986),5.
- [7] 徐大刚,光及有关电磁辐射的量和单位,计量出版社,(1983).
- [8] 吕维纯,刘远迈,原子物理学和核物理学的量和单位,计量出版社,(1983).
- [9] J. W. T. Walsh, *Photometry*, (1958), 1—11.
- [10] 高执中等,计量学报, No. 2 (1983), 81.
- [11] 同1,30.
- [12] 同7, 18;
J. Terrien et F. Desvignes, *La Photométrie*, (1972), 33
- [13] W. R. Blewin and B. Steiner, *Metrology*, V. 11, No. 3 (1975), 97.
- [14] 同7,23.
- [15] H. G. 杰拉德, D. B. 麦克奈尔著,赵民初、何明高译,科学单位词典,科学出版社,(1983),213.
- [16] 李慎安,常用计量单位辞典,计量出版社,(1984),619.
- [17] J. Thewlis, *Encyclopaedic Dictionary of Physics*, Vol. 1, (1961), 321.
- [18] *McGraw-Hill Encyclopaedia of Science & Technology*, Vol., (1977), 709.
- [19] *Физический Энциклопедический Словарь*, том 1(1960), 117.
- [20] 中华人民共和国法定计量单位定义,(1986),3.
- [21] H. J. Gray and A. Isaacs, *A New Dictionary of Physics*, (1975), 34.
- [22] M. H. 格林著,徐幼先译,米制换算手册,计量出版社,(1982),36.
- [23] B. L. Danielson, *Natl. Bur. Stand. U. S. Tech. Note*, 1018, (1980), 2.
- [24] R. Mack, *Laser Focus/Electro-Optics*, No. 7(1985), 94.

单个原子中的量子跳跃

Randall G. Hulet

量子力学试图描述一个激发态原子在退激发过程中发射光子的自发辐射的动态过程。通常,由于在测量发光时收集到的是许多原子的发光,这些引人注目的量子效应往往变得模糊了。但是,在测量单个原子的荧光时,可以观察到这种量子效应。在原子发生“量子跳跃”时,荧光的突然“开”和“关”就是最近观察到的这种效应的一个例子。

1985年, Cook 和 Kimble^[1] 发现,对于具有“V”型结构的三能级系统(即两个激发态可以退激发到同一个基态的情况),如果其中有一个激发态自发辐射寿命很短,而另一个激发态自发辐射寿命很长,则这样的系统非常适合用来研究原子的光子发射和吸收过程。最初, Dehmelt^[2] 研究了这样的系统,并将它用作检测非常弱的光学跃迁的光子放大手段。如果用激光来耦合基态和衰减很快的“强”上能级,在平均时间足够长的情况下,从强能级发出的荧光具有稳定的光强。通常,当收集的荧光是由许多原子发出的,则第二束用来耦合基态到衰减缓慢的“弱”上能级的激光所起的效果是减少上述荧光的平均光强。这是因为,平均而言,第二束激光的存在使得强能级的粒子数减少。对于单个原子来说,平均光强如何减少这一问题可以有两种可能的答案:一个是它可以减少到一个比较弱的稳定值,就象在收集许多原子发射荧光的情况那样;另一个答案是如果在基态和弱耦合态之间原子发生“量子跳跃”,则发光过程可能从“开”突然转换到“关”。

去年,有许多人从理论上研究了一般三能级系统,并计算了所发射辐射的统计性质^[3]。他们的结论是:量子跳跃的物理图象是正确的。最近的一个实验已毫不含糊地证明,在具有“V”型结构的三能级系统中,如果测量的时间分辨率比弱耦合能级的寿命短,则由

“V”型三能级系统的强跃迁发射的荧光强度确实是双值的,而不是连续的^[4]。在这个实验中,利用一个电磁陷阱把一个带单个正电荷的汞离子囚禁到小于 $1\mu\text{m}$ 的区域,并用两束激光同时照射汞离子。另外还有两个研究小组采用囚禁单个铯离子的办法做了类似的实验^[5,6]。第四个小组观察了由非常稀薄的原子束中单个铷原子发射的荧光,测量了被检测到的两个光子之间的时间相关性,这些测量推断量子跳跃的图象是正确的^[7]。上述这些实验使我们能够了解原子发光和吸收过程的统计特性。

- [1] R. J. Cook and H. J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985), 1023.
- [2] H. Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.*, **20** (1975), 60.
- [3] T. Erber and S. Putterman, *Nature*, **318** (1985), 41; J. Javanainen, *Phys. Rev. A*, **33** (1986), 2127; C. Cohen-Tannoudji and J. Dalibard, *Europhys. Lett.*, **1** (1986), 441; D. T. Pegg, R. Loudon and P. L. Knight, *Phys. Rev. A*, **33** (1986) 4095; A. Schenzle and R. G. Brewer, *Phys. Rev. A*, **34**, (1986), 3127; H. J. Kimble, R. J. Cook and A. L. Wells, *Phys. Rev. A*, **34** (1986), 3190; P. Zoller, M. Marte and D. F. Walls (to be published in *Phys. Rev. A*).
- [4] J. C. Bergquist, R. G. Hulet, W. M. Itano and D. J. Wineland, *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986), 1699.
- [5] W. Nagourney, J. Sandberg and H. Dehmelt, *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1986), 2797.
- [6] T. Sauter, W. Neuhauser, R. Blatt and P. E. Toschek (to be published).
- [7] M. A. Finn, G. W. Greenlees, and D. A. Lewis (to be published in *Opt. Commun.*).

(张景园译自 *Physics Today* 1987 年第 11 期第 s-23 页)