

近代物理讲座

第一讲 几个著名的物理实验 (II)

张之翔

(北京大学物理系)

四、密立根实验与分数电荷

密立根实验是直接测定电子电荷的实验,现在一般电磁学书上很少讲它,作为参考资料,我们在这里对它作一简单介绍,并附带提一下有关分数电荷的问题。

1. 历史背景

(1) 1891年,爱尔兰物理学家斯通内(G. J. Stoney, 1826—1911)根据法拉第电解定律中的法拉第常数 F 与阿伏伽德罗数 N_A 之比 F/N_A 应当是电荷的自然单元,把它取名为electron¹⁾。但当时并不知道 N_A 的确切值。

(2) 1897年,英国物理学家汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940)利用阴极射线在电磁场中的偏转,测出电子的荷质比 e/m ,以后就被公认为这是电子的发现。

(3) 1897年,爱尔兰物理学家汤森德(J. S. E. Townsend, 1868—1957)直接测定(也是历史上第一次直接测定)电子电荷,他的方法及其所依据的原理大致如下:电解出来的气体分子有少数带电,使它们通过水冒泡出来后,形成云雾状的带电小水滴。测出一立方厘米内这些小水滴的总质量和它们所带的总电荷,并观测小水滴下降的速度,用斯托克斯公式求出它的半径,从而得出一立方厘米内的小水滴数。假定每个小水滴都是带一个单位电荷 e ,就可以由上述观测数据算出 e 来。他得出的结果为 $e = 3 \times 10^{-10}$ 静电单位。

(4) 1898年,汤姆孙改进汤森德方法(主

要改进是用X射线使小水滴带电),测出 e 的值为 6.5×10^{-10} 静电单位。

(5) 1906—1908年,英国物理学家威耳孙(H. A. Wilson)改进汤姆孙的方法(主要是加上两块铜板,以便加上电场,控制带电小水滴的运动)。他得出的结果为 $e = 3.1 \times 10^{-10}$ 静电单位。

(6) 1908—1909年,美国物理学家密立根(R. A. Millikan, 1868—1953)重复威耳孙实验,得出 $e = 4.65 \times 10^{-10}$ 静电单位。

2. 密立根油滴实验

(1) 密立根的改进

1909年秋,密立根改用小油滴作实验。这是一个很重要的改进。因为小水滴蒸发太快,寿命很少超过一分钟,在视场中只能观察几秒钟;而油滴的蒸发就慢得多,对一个油滴的观察可以长达几小时。

(2) 实验装置

密立根实验装置如图4.1所示。在一个密闭的容器C内,装有两块平行的黄铜圆板M和N,板的直径为22cm,相距为16mm;上板中间开有小孔,以便油滴进入。M和N接到电压

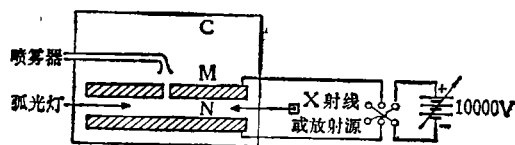


图4.1 密立根实验装置示意图

1) electron 一词,在我国汉语中译为“电子”,可能是从日本人的翻译“电子”转来的。

可变的电源上。由喷雾器喷入油滴，用X射线或放射线使它们带电或改变它们所带的电量。用弧光灯照明M和N间的油滴，再用一个短焦距望远镜（图中未画出）观测它们运动的速度，从而测定它们所带的电荷。

(3) 实验原理

设油滴的半径为 a ，密度为 ρ ，重力加速度为 g ，则它所受的重力便为 $mg = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho g$ ，所受的空气浮力便为 $\frac{4\pi}{3} a^3 \rho_0 g$ ， ρ_0 是空气的密度。当它以速度 v 下降时，它所受的摩擦阻力按斯托克斯公式为

$$f_{\mu} = 6\pi\eta av, \quad (4.1)$$

式中 η 是空气的粘滞系数。当重力与浮力和摩擦阻力平衡时，油滴便以匀速（收尾速度） v_0 下降，这时便有

$$\frac{4\pi}{3} a^3 (\rho - \rho_0) g = 6\pi\eta av_0; \quad (4.2)$$

加上电场 E 后，设油滴上的电荷为 q ，电场作用在 q 上的力向下，则当达到平衡，油滴以另一收尾速度 v_1 下降时，便有

$$\frac{4\pi}{3} a^3 (\rho - \rho_0) g + qE = 6\pi\eta av_1. \quad (4.3)$$

把(4.2)式代入(4.3)式，得

$$qE = 6\pi\eta a(v_1 - v_0). \quad (4.4)$$

再由(4.2)式解出 a ，代入(4.4)式便得

$$q = 9\sqrt{2} \pi\eta^{3/2} \frac{v_1 - v_0}{E} \sqrt{\frac{v_0}{(\rho - \rho_0)g}}. \quad (4.5)$$

式中 η ， E ， ρ ， ρ_0 和 g 等都是已知量，因此只要测出 v_1 和 v_0 ，就可以算出油滴上的电荷了。

(4) 实验结果

密立根经过多年的精心研究，从实验中总结出了有关电荷的一些结论，其中最主要的有两点：

(i) 电荷是量子化的。他从实验里发现，在实验误差范围内， q 总是某一最小值 e 的整数倍，即

$$q = ne, \quad (4.6)$$

式中 n 是整数。

(ii) 测出电子电荷的值。根据多年的测

定，考虑各种因素，最后得出 $e = (4.807 \pm 0.005) \times 10^{-10}$ 静电单位^[12]。

密立根因为这一功绩和在光电效应方面所作的贡献，获得1923年的诺贝尔物理学奖。

3. 关于分数电荷

分数电荷 (fractional charge) 是指比电子电荷小的电荷，这种电荷是否存在，目前还没有定论。这里介绍一些有关的情况。

(1) 1910年，密立根在他的文章中提到，“我曾把对一个显然是带单电荷的液滴的、不确定的和不能重复的观察舍去，这次观察给出该液滴上电荷的值比 e 的最终值约小百分之三十”^[13]。他认为该液滴太小，蒸发太快，因而他得出的数据不好。

从此以后，就不断有人对小于电子电荷的存在提出证据^[12]，但都经不起考验而得不到承认。

(2) 1964年，美国物理学家盖耳曼 (M. Gell-Mann, 1929—) 提出强子由夸克 (quark) 组成的理论^[14]，预言夸克有多种，它们的电荷分别有 $\pm \frac{1}{3}e$ ， $\pm \frac{2}{3}e$ 等四种。但迄今 (1982年) 为止，没有在实验上观察到自由夸克。

(3) 1977年，美国斯坦福大学的费尔班克 (W. M. Fairbank, 1917—) 教授等报告^[15]，把铌球悬浮在超导磁场中，加上变化的电场以观测铌球的运动，从而测出它所带来的电荷。他们得出结论说，观察到了存在 $\pm \frac{1}{3}e$ 的证据。后来他们继续研究，并一再报道肯定上述结果^[16,17]。另一方面，别人用其他方法，如用新的反馈悬浮静电计 (feedback levitation electrometer) 观测室温下小铁圆柱的实验^[18]和用改进密立根的方法所作的汞滴的实验^[19]，都没有观察到分数电荷存在的证据。

(4) 1982年，费尔班克等重新分析了密立根的1913年的实验数据，得出结论说，没有使人信服的证据说明油滴上有分数电荷存在^[20]。

五、卢瑟福实验^[21-24]

1911年，卢瑟福 (E. Rutherford, 1871—

1937) 根据 α 粒子散射实验, 提出原子的有核模型。这是物理学上的一个重大进展, 也是人类认识自然的一个重大进展。

1. 历史背景

(1) 1895年11月8日晚, 德国维尔茨堡大学教授伦琴 (W. R. Röntgen, 1845—1923) 研究阴极射线时, 用黑纸把放电管包起来做实验, 发现放在一段距离外涂有荧光材料[铂氰酸钡 $\text{BaPt}(\text{CN})_6$] 的纸屏发出了浅绿色的荧光。经过认真研究, 他知道了荧光是由来自放电管的一种看不见的射线激发的。他把这种射线叫做 X 射线, 并于 1895 年 12 月底发表了报告。

(2) 1896年1月, 庞加莱 (J. H. Poincaré, 1854—1912) 在法国科学院的一次会议上报告了伦琴的发现, 并给与会者看了实验的照片。贝克勒耳 (A. H. Becquerel, 1852—1908) 也在座。庞加莱提出, 是否所有的荧光物质在太阳光照射下都能发出类似于 X 射线的射线?

贝克勒耳当时是巴黎高等技术学校的教授, 从事磷光和荧光的研究多年, 听了庞加莱的报告后, 回去就作实验, 果然成功。1896年2月24日他在法国科学院报告了“磷光中发生的辐射”。一周后(3月2日), 他又报告说, 铀盐不经太阳晒也能发出辐射。不久他又发现, 铀盐和铀本身都能发出永久性的辐射。

(3) 1895年, 卢瑟福从新西兰到英国剑桥大学, 在汤姆孙领导下的卡文迪什实验室当研究生, 研究铀的射线, 不久就发现了由他自己命名的 α 射线和 β 射线。

(4) 1903年, 汤姆孙根据实验, 提出了“果子面包”式的原子模型, 认为原子中的正电荷连续分布在原子中, 而带负电的电子则处在正电荷中, 像嵌在面包里的果子那样。

(5) 1903年, 英国物理学家克鲁克斯 (W. Crookes, 1832—1919) 等发现, 当很微弱的 α 、 β 射线射到硫化锌的屏上时, 硫化锌就能闪烁发光。

(6) 1902—1907年间, 卢瑟福研究 α 射线, 用实验证明它就是氦离子流。

(7) 1908年, 卢瑟福的主要助手之一盖革 (H. F. Geiger, 1882—1945) 研究 α 粒子穿过物质后的小角度散射。

(8) 1909年, 卢瑟福指导研究生马斯登 (E. Marsden, 1889—) 研究大角度散射。后来在卢瑟福指导下, 盖革和马斯登作了大量的 α 粒子散射实验。

2. 实验装置

卢瑟福实验装置如图 5.1 所示。在抽空的

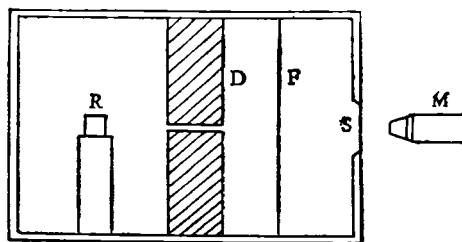


图 5.1 卢瑟福实验装置示意图

器内放有放射源 R, 它放射出 α 粒子。D 是中央有小孔的铅板, 以便从放射源得出一束很细的 α 粒子流。F 是厚度约为 0.0004 厘米的金属箔片, 可以移动, 以便 α 粒子可以穿过它, 也可以不穿过它。穿过 F 的 α 粒子射到硫化锌的荧光屏 S 上, 产生闪烁。在外面用放大镜 M 观察屏上的闪烁, 并记录一定时间内屏上各处的闪烁数。

3. 原子核的发现

(1) 实验中的发现

卢瑟福原来相信汤姆孙的原子模型是基本正确的。他设计这个实验的目的也是为了证实 α 粒子穿过金箔后的散射角度一定会很小。预计 α 粒子的散射角平均应小于万分之一弧度。由统计理论得出, 在薄箔的情况下, 散射角大于 3° 的 α 粒子远小于 1%, 而散射角大于 90° (反向散射) 的几率约为 10^{3500} 分之一。

实验结果证实了散射角小的占优势, 但 α 粒子发生大角度散射的百分比却比汤姆孙理论预言的要大得多, 实际上, 反向散射的 α 粒子数约占总数的万分之一, 而不是 10^{3500} 分之一。这使得相信汤姆孙模型的物理学家大为惊奇, 用卢瑟福的话说, “这是我一生中从未有过的最

以置信的事件。它的难以置信好比你对一张纸射击一发炮弹，结果却被顶了回来而打在自己身上。经过思考，我认为反向散射必定是单次碰撞的结果，而当我作出计算时看到，除非采取一个大部分质量都集中在微小核内的原子系统，否则无法得到符合上述数量级的结果。这就是我后来提出的原子具有一个体积很小而质量却很大的核心的想法。”所以卢瑟福根据实验结果断定汤姆孙模型是不对的，从而提出了他自己的原子模型：原子由带正电的原子核和带负电的电子构成，原子核的体积比原子小得多，原子的绝大部分质量都集中在原子核里，电子则在核外绕核运动。

(2) 卢瑟福的理论

设有一 α 粒子以速度 v_0 从无穷远 (A) 射向原子核 (Ze)，瞄准距离为 b ；以 Ze 为原点，取坐标如图 5.2 所示。由于受到原子核的库仑力的作用， α 粒子前进时便逐渐发生偏转，最后射向无穷远处 (C)，偏转角 (散射角) 为 θ 。下面先求 θ 与 b 的关系。

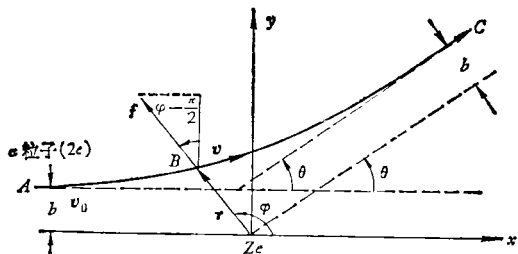


图 5.2 α 粒子被原子核 (Ze) 散射

设 α 粒子在 B 点，这时它受力的牛顿方程在 y 方向上的分量为

$$m \frac{dv_y}{dt} = \frac{2e(Ze)}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin\varphi, \quad (5.1)$$

式中 m 为 α 粒子的质量。

α 粒子的角动量为

$$\mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v},$$

其大小为 $mr^2 \frac{d\phi}{dt}$ ，其方向垂直于纸面向里，当 α 粒子处于无穷远处时，角动量为 $bm v_0$ ，故由

物理

角动量守恒定律得

$$mr^2 \frac{d\phi}{dt} = mbv_0. \quad (5.2)$$

由(5.1)和(5.2)两式得

$$dv_y = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mbv_0} \sin\varphi d\varphi.$$

两边积分得

$$\int_A^C dv_y = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mbv_0} \int_{\pi}^{\theta} \sin\varphi d\varphi.$$

因为在 A 点 (无穷远处) $v_y = 0$ ，而在 C 点 (无穷远处) $v_y = v_0 \sin\theta$ ，所以

$$\begin{aligned} v_0 \sin\theta &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mbv_0} [-\cos\varphi]_{\pi}^{\theta} \\ &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mbv_0} (1 + \cos\theta), \\ \cot\frac{\theta}{2} &= \frac{2\pi\epsilon_0 mv_0^2}{Ze^2} b. \end{aligned} \quad (5.3)$$

这就是 α 粒子的偏转角 θ 与瞄准距离 b 之间的关系。凡瞄准距离为 b ，偏转角便为 θ 。

再求散射到荧光屏上 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 范围内单位面积上的粒子数。如图 5.3 所示，瞄准距离在 b 与 $b - db$ 之间的 α 粒子，其散射角便在 θ 与 $\theta + d\theta$ 之间。因此，以 Ze 为中心，在垂直于 x 轴的平面内，分别以 b 和 $b - db$ 为半径画圆，两圆间环带的面积为 $dS = 2\pi b db$ ，凡射中这面积的 α 粒子，便都被散射到 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 的范围内。

面积为 A' 的一块金属箔片，厚度为 t (t 很小)。设单位体积内的原子数为 n ，则共有 $nA't$ 个原子，每个原子的原子核都有上述的一块环带面积。这些环带的总面积 (参看图 5.4) 为 $nA't \cdot 2\pi b db = 2\pi nA't b db$ 。凡射中这些环带面积的 α 粒子，散射角便都在 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 范围内。

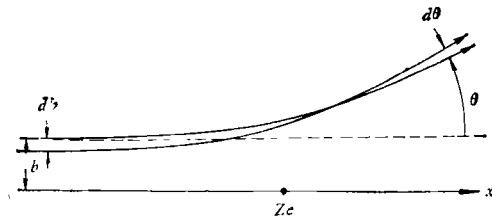


图 5.3

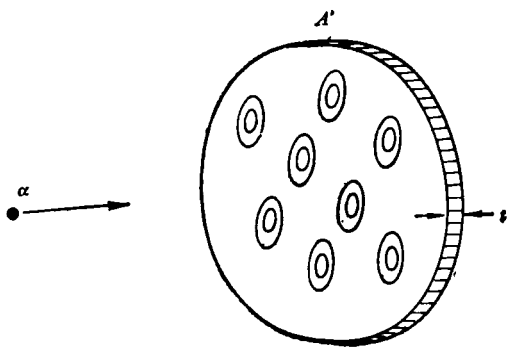


图 5.4

一个 α 粒子，射中这些环带面积的几率为

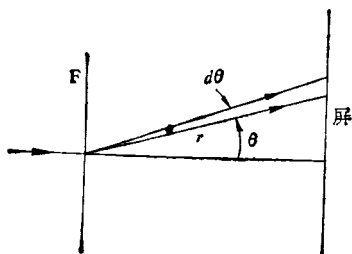
$$dP = \frac{\text{环带的总面积}}{\text{箔片面积}} = \frac{2\pi n A' t b db}{A'} = 2\pi n t b db. \quad (5.4)$$

当 N 个 α 粒子射中这块金属箔片时，散射到 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 范围内的 α 粒子数便为

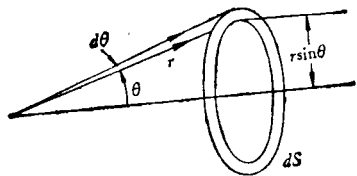
$$dN = NdP = 2\pi n N t b db.$$

在荧光屏上， $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 范围内的面积(参看图 5.5)为

$$dS = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta,$$



(a)



(b)

图 5.5

故散射到荧光屏上 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 范围内单位面积上的 α 粒子数便为

$$\frac{dN}{dS} = \frac{n N t b}{r^2 \sin \theta} \frac{db}{d\theta}. \quad (5.5)$$

由(5.3)式得

$$\frac{db}{d\theta} = - \frac{Z e^2}{4\pi \epsilon_0 m v_0^2} \csc^2 \frac{\theta}{2},$$

式中负号表示 b 增大时， θ 减小。把上式代入(5.5)式，取绝对值，便得

$$\left| \frac{dN}{dS} \right| = \frac{n N t b}{r^2 \sin \theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| = \frac{n N t (Z e^2)^2}{(4\pi \epsilon_0 m v_0^2)^2} \frac{1}{r^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}}. \quad (5.6)$$

由(5.6)式得出：散射到荧光屏上 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 范围内单位面积上的 α 粒子数与金属箔的厚度 t 成正比，与金属箔的原子序数 Z 的平方成正比，与 α 粒子的动能 $\frac{1}{2} m v_0^2$ 的平方成反比，与 $\sin^4 \frac{\theta}{2}$ 成反比。

(3) 实验验证

盖革和马斯登对(5.6)式作了大量的实验验证，用金、银、铜等的不同厚度的箔片作实验，都证实了(5.4)式是正确的。从此，卢瑟福的原子模型就为科学界接受。人类终于发现了原子核！

最后提一下，卢瑟福的计算是根据经典力学作的，我们今天知道，原子内部的规律是量子力学，因此虽然(5.4)式与实验符合，是否就表示原子核存在？还是个问题。后来由量子力学算出的结果，与(5.6)式相同，这个问题就解决了。

(本节由冯庆荣整理)

参 考 文 献

- [1] M. Faraday, Faraday's Diary, Vol. I—VII, Ed. G. Bell and Sons, Ltd., London, (1932—1936).
- [2] E. Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity, Vol. I, (1951), Chap. IV.
- [3] F. K. Richtmyer, E. H. Kennard, T. Lauritsen, Introduction to Modern Physics (1955), 36—43.
- [4] H. Hertz, Ann. Physik, 31(1887), 931; 34(1888), 301.
- [5] E. Whittaker, A History of the Theories of

- Aether and Electricity, Vol. I, (1951), 319—325.
- [6] Encyclopaedia Britannica Encyclopaedia Britannica, Inc., (1947), Vol. 8, 300.
- [7] A. A. Michelson and E. W. Morley, *Am. J. Sci.*, **34**(1887), 333; *Phil. Mag.*, **24**(1887), 449.
- [8] R. S. Shankland, *Am. J. Phys.*, **32**(1964), 16.
- [9] 郭奕玲,沙振舜,大学物理, **11**(1982), 21.
- [10] 张元仲,狭义相对论实验基础,科学出版社,(1979),第二章,§2.1.
- [11] 郭硕鸿,电动力学,人民教育出版社(1979),第五章,§1.
- [12] 密立根著,钟闻译,电子及其它质点,商务印书馆,(1958),第三、四、五章.
- [13] R. A. Millikan, *Phil. Mag.*, **110**, (1910), 209.
- [14] M. Gell-Mann, *Phys. Letters*, **8**, (1964), 214.
- [15] G. S. LaRue, W. M. Fairbank, A. F. Herbard, *Phys. Rev. Lett.*, **38**, (1977), 1011.
- [16] G. S. LaRue, W. M. Fairbank, J. D. Phillips, *Phys. Rev. Lett.*, **42**, (1979), 142.
- [17] G. S. LaRue, J. D. Phillips, W. M. Fairbank, *Phys. Rev. Lett.*, **46** (1981), 967.
- [18] G. Gallinaro, M. Marinelli, and G. Morpurgo, *Phys. Rev. Lett.*, **38** (1977), 1255.
- [19] C. L. Hodges et al., *Phys. Rev. Lett.*, **47** (1981), 1651.
- [20] W. M. Fairbank, A. Franklin, *Am. J. Phys.*, **50-5** (1982), 394.
- [21] E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **XXI**-May (1911), 669.
- [22] E. Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity, Vol. II(1953), Chap. I.
- [23] R. 瑞斯尼克著,上海师范大学物理系译,相对论和早期量子论中的基本概念,上海科学技术出版社,(1978), 236 页.
- [24] 褚圣麟,原子物理学,人民教育出版社,(1981),8—19 页.

新实验技术在材料研究中的应用讲座

第九讲 电子能量损失谱原理及应用

朱 静

(冶金工业部钢铁研究总院)

一、物理本质

把与样品交互作用后的透射电子按能量大小进行计数,这就是电子能量损失谱(EELS)。EELS 是一次过程,其中的电离损失峰是内壳层电子直接被激发或电离的过程。X射线能谱是电离后的弛豫过程,是二次过程,取决于X射线的产额。故从理论上说,EELS 的测量效率应较之X射线能谱为高。但因为在实际测量中,EELS 受谱仪接受角大小的限制,只能接受一部分非弹性散射的电子,所以实际测量效率相近。

二、谱仪结构及能量分辨率

1. 谱仪结构

一个完整的谱仪由三部分组成:(1)电子源;(2)一个含有磁棱镜的谱仪主体^[1];(3)数

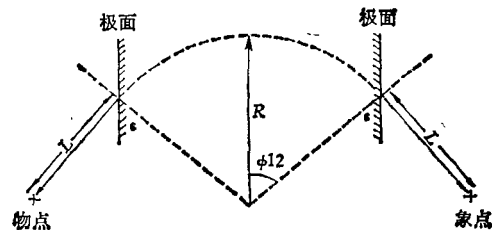


图1 一个对称的磁棱镜及其设计参数

据显示和处理系统。

图1是一个对称的磁棱镜谱仪的设计。在此种结构中,电子的点源经过两次聚焦,通过分析器后形成点像。若设

$$\tan \varepsilon = \frac{1}{2} \tan(\phi/2), \quad (1)$$

其中 ε 是极面的折射角, ϕ 是磁场的折射角。两次聚焦发生在距离 L 处,

$$L = R / [\tan(\phi/2) - \tan \varepsilon]. \quad (2)$$

物距 $L =$ 象距 L 。合并(1)和(2)式得