

初等物理学

第三卷 第三分册

兰茨别尔格主編

上海教育出版社

初 等 物 理 学

第 三 卷

(第 三 分 册)

兰 茨 别 尔 格 主 编

周 恒 涛 原 译 周 梦 麀 修 订

上 海 教 育 出 版 社

一 九 六 二 年 · 上 海

目 录

第七篇 原子物理学 1

第二十章 原子结构 1

§191. 原子 (1) §192. 阿佛加德罗数、原子的大小和质量 (2)
§193. 基本电荷 (5) §194. 在原子物理学中电荷、质量及能量的
单位 (9) §195. 带电粒子质量的量度、质谱仪 (10) §196.
电子的质量、质量对速度的依从关系 (14) §197. 爱因斯坦定律
(17) §198. 原子的质量、同位素 (20) §199. 同位素的分开、重
水 (22) §200. 原子的核式结构 (25) §201. 原子的能级 (29)
§202. 氢原子、在原子内的电子运动规律的特殊性 (35) §203. 多
电子的原子、原子的光谱和伦琴射线谱的起源 (38) §204. 门捷
列夫的元素周期表 (40) §205. 量子 (波动) 力学初步知识 (43)

第二十一章 放射性 49

§206. 放射性的发现、放射性元素 (49) §207. α 、 β 和 γ 射线、威
尔孙云室 (52) §208. 带电粒子的计数方法 (57) §209. 放射性
射线的本质 (61) §210. 放射性蜕变和放射性嬗变 (65) §211.
放射性的应用 (70) §212. 加速器 (71)

第二十二章 原子核和核能 76

§213. 核反应 (76) §214. 核反应和元素的嬗变 (78) §215. 中
子的性质 (80) §216. 在中子作用下的核反应 (83) §217. 人
为放射现象 (85) §218. 正电子 (87) §219. 爱因斯坦定律在
电子-正电子偶的湮灭和形成的过程上的应用 (90) §220. 原子

核的构造(92) §221.核能、星球的能源(95) §222.鈾的裂變、
无阻尼的鏈式反应(100) §223.无阻尼的鏈式反应的应用、原
子彈和氫彈(105) §224.鈾反应堆和它們的应用(108) §225.
宇宙綫(115) §226.基本粒子(119) §227.基本粒子(續)(121)
§228.結束語(124)

第七篇 原子物理学

第二十章 原子结构

§191. 原子 根据化学以及前面讲过的物理的几个部門，我們知道，一切物体都是由一些分开的、很小的粒子——原子和分子組成的。原子指的是化学元素的最小粒子；分子指的是由几个原子組成的一种更复杂的粒子。元素的物理和化学性质，由这些元素的原子的性质决定。

原子这个名詞出自希腊字 $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ ，意思便是不可分割的。直到十九世紀末大家都相信：原子是最简单的、不能分割的物质粒子。但是后来的科学发展否定了这一观点。我們断定，原子并不是最简单的粒子，它有一种相当复杂的結構。光学，特别是光的电磁說說明了这一点。我們已經証明，电荷作加速运动的时候，会发出电磁波，包括光在內。我們现在提到的物质的原子也能够发射光——可见的电磁波^①，产生每种原子所特有的輻射——光譜(第十八章)。从这里我們可以断定，原子本身含有能够移动的电荷。金属(第二卷§86)和气体(第二卷§91, 92)导电性的研究說明，在原子的成分里含有带負电的粒子——电子，它的质量比原子的质量小得多。因为原子整个是中性的，所以除了电子，原子也含有带正电的粒子。

① 光本身也是不可见的，“可见光”不过是一个惯用的名称。——譯注

由此可见，原子是由其他更简单的粒子构成的复杂粒子。原子的组成部分是电子，以及在第二十二章中我们将要說到的带正电的粒子(质子)和不带电的粒子(中子)。

原子是非常坚固的系统，比由原子组成的分子要稳固得不知多少。实际上，把分子分解成原子比较容易，例如把物质加热，就能够达到这一目的。如将气态的氮或氢加热到 2000° 左右，就能使大部分分子(N_2 或 H_2)分解成相应的原子；在这里必须指明，分子 N_2 和 H_2 还算是最稳定的哩。而象氯化氨(NH_4Cl)的分子，在室温或微热时，就已经会分解成氨(NH_3)和氯化氢(HCl)了。再如把一块金属钠投到水里，就会引起一种化学作用，结果，水的分子 H_2O 就被分解，放出了气态的氢 H_2 ，并生成苛性钠 $NaOH$ ，也就是，发生了分子的根本改变。而对原子来说，这样方式的变换则长久未能成功。最强的作用(加热、改变压力、强大的放电等等)只能使原子发生极小的变化：可以使它们电离，也就是，可以把一个或几个电子从原子中分出来。

离子虽然有一些和原子不同的特性，不过，原子的一些基本性质还保持在离子里；当先前失掉的电子再和离子结合起来时，离子很容易重新变成中性原子。炼丹家想利用加在原子上的各种化学和物理作用，把一种原子变成另一种(特别是，从“不值钱”的元素中来获取金子)的长期努力都没有成功。

只有在最近几十年内，才发现了原子发生根本变化而变成另一种元素的原子的现象。我们把这一类现象留在第二十一章和第二十二章中再来讨论。

§192. 阿佛加德罗数、原子的大小和质量 原子物理的最重要常数之一是阿佛加德罗数(参阅第一卷, §242), 即 1 克原子的任何物质内的原子数(或 1 克分子内的分子数)。知道了阿佛加德罗

数,就可以找到表示单独原子的特性的量:原子的大小和质量、离子的电荷等等。

测定阿佛加德罗数的方法有好几种。这些方法利用了各种不同的物理现象,其中有悬浮在液体或气体里的微小粒子的布朗运动(第一卷,§219)、放射性(本卷第二十一章)、光在气体内的散射等等。而根据伦琴射线的衍射测定这个数目的方法,是最准确的方法。

从光学(第十五章)中,我们知道,伦琴射线是电磁波,它和可见光线不同的地方是波长很短。伦琴射线的波动性质最初是在一些关于它们在晶体内衍射的实验中明确的。这些实验同时证实了一个概念,即晶体是一些有规则地分布成空间点阵的一种原子的组合这一点(第一卷,§266)。

投射到晶体上的伦琴射线束多半在一定的方向中散射(参阅§150)。散射角依伦琴射线的波长和晶体内相邻原子间的距离而定。知道了以上两个量中的一个,在量出散射角以后,可以求出其中的另一个量。

根据伦琴射线在普通刻线光栅上的衍射,可以很准确地测定这些射线的波长;光栅和光学(参阅§135)中应用的类似。知道了伦琴射线的波长,我们就可以决定晶体内原子间的距离。在食盐(NaCl)型的晶体内,各原子分布在一个立方体的各顶角上,这个立方体的边长等于原子间的最短距离 a 。一个原子相当的晶体体积等于 a^3 ,而跟一个分子相当的晶体体积等于 $2a^3$ 。令 V 等于一克分子重的晶体的体积,那末阿佛加德罗数就可以按公式

$$N = \frac{V}{2a^3}$$

求出。

所有各种测定阿佛加德罗数的方法都推出同一数值。根据最近的测定,它的值是,在一克原子内

$$N = 6.02 \times 10^{23} \text{ 个原子。}$$

各种测定阿佛加德罗数的方法的一致性 (也就是各种测定原子质量、大小和速度的方法的一致性),令人相信物质原子论的正确无误。

我们再注意一下气体跟液体和固体在压缩性质上的显著的差别。

依照玻意耳—马略特定律 (第一卷, § 226), 要气体体积减小 1%, 只要增加压强 1% 就够了。但对固体和液体说, 体积减小 1%, 就需要增加几十倍和几百倍的压强。这一差别是由于气体分子间的距离要超过分子大小好多倍。热运动会妨碍它们的接近。而相互距离很远的一些气体分子间的相互作用力很弱, 因此可以略去不计。相反, 液体和固体中的各个原子(或分子)可以当做几乎“紧靠”在一起的看待。当各个原子(分子)接近时, 会产生很大的斥力, 这也会使物体体积的减小发生困难。

由此可见, 固体和液体的相邻原子中心间的平均距离, 可以近似地把它认为是原子的尺度。知道了阿佛加德罗数, 就可以容易地算出这个距离。

1 克原子的物质含有 N 个原子, 占据体积 A/ρ , 这里的 ρ 是物质的密度, A 是它的原子量。设 1 克原子物质的形状是立方体。在立方体的每一边上总分布着 $\sqrt[3]{N}$ 个原子; 而每边长度是等于立方体体积的立方根, 就是 $\sqrt[3]{A/\rho}$ 。每边长度除以每边上的原子数, 就得到相邻原子中心间的平均距离, 我们可以把它看做是原子的近似大小。这一距离等于:

$$a = \frac{\sqrt[3]{A/\rho}}{\sqrt[3]{N}} = \sqrt[3]{\frac{A}{\rho N}}$$

现在拿液态的氢(在 $T = 24^\circ K$ 的温度下)做例子来说, 把 $A = 1$ 和 $\rho = 0.086$ 克/(厘米)³ 代入上式, 即得:

$$a = \sqrt[3]{\frac{1}{0.086 \times 6.02 \times 10^{23}}} = 2.7 \times 10^{-8} \text{ 厘米。}$$

对其他元素的计算, 也得到接近的数值。我们可以推断, 所有原子的线度都接近 1 埃, 就是接近一厘米的万万分之一。

已经知道了阿佛加德罗数, 也就可以确定单独一个原子的质量: $m = A/N$ 。

这一公式给我们的, 只是原子质量的平均值。至于一种给定的元素的所有原子是不是都具有同样质量, 这个问题必须由实验来决定(参阅§ 195)。

原子中最轻的是氢原子, 它的原子量和 1 相差很小。把 $A = 1$ 代入上式, 即得:

$$m_H = \frac{1}{6.02 \times 10^{23}} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ 克。}$$

§ 193. 基本电荷 法拉第发现的电解定律证实了有一个最小的、不可再分的电量存在。在电解时, 1 克原子的任何 n 价物质都带有电荷 $Fn = 96400n$ 库仑 (F 是法拉第常数)。因此一个原子(更正确地說, 离子)上的电荷是:

$$e_0 = \frac{Fn}{N} = \frac{96400}{6.02 \times 10^{23}} n = 1.60 \times 10^{-19} n \text{ 库仑。}$$

一个一价离子($n = 1$)上的电荷是 $e_0 = 1.60 \times 10^{-19}$ 库仑, 二价离子($n = 2$)上的电荷是 $2e_0$, 三价离子($n = 3$)上的电荷是 $3e_0$, 等等。

如果认定电荷 $e_0 = 1.60 \times 10^{-19}$ 库仑是最微小的一份电荷, 即**基本电荷**, 那就容易了解这一规律性。

可是电解定律也可以这样来了解，就是 e_0 是一价离子所带的一份电荷的平均电量；于是 n 价离子带有 n 倍多的电荷的性质就不必应用原子的电的结构，而只要用离子的性质来解释。因此，要弄清楚基本电荷的存在问题，就需要做一些测定最小电量的直接实验。这种实验在 1909 年由密立根^① 做出来了。

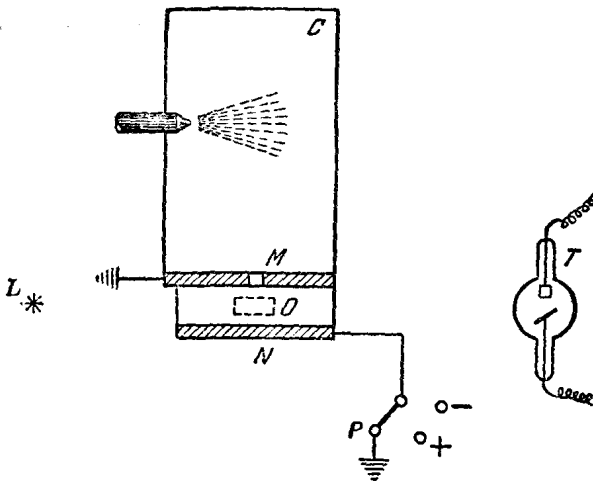


图 342 测定基本电荷的实验的装置图。

C 是容器，其中有喷雾器喷射出来的小油滴； M, N 是电容器的极板，可用转换开关 P 给以任意极性的电压； O 是用来以显微镜观察油滴的窗口； L 是照明灯； T 是伦琴射线管。管子 T 是用来改变油滴的电荷的；伦琴射线的辐射在极板 M, N 间的空间中产生离子，离子附着到油滴上，就使它的电荷改变。

密立根的实验装置，如图 342 所示。它的主要部分是扁平的电容器 MN ，利用转换开关 P 可把正或负的电位差加到电容器的极板上。在容器 C 中，利用喷雾器喷出微小的油滴或其他液体的液滴。有些油滴穿过上面一块极板的小孔，进入电容器两板中间被灯 L 照亮的区域。利用显微镜从窗口 O 观察这些油滴；它们在黑

① 密立根(1868—1953)是美国物理学家。

的背景上看起来象是一些明亮的星点。

当电容器极板間沒有电场时，油滴以**恒定速度**下降。在加上电场时，沒有带电荷的油滴繼續以不变的速度下降。可是在噴雾时，許多油滴获得了电荷(摩擦起电)。因此，除重力外，还有电场力作用在带电的油滴上。根据电荷是正的或者負的，可以这样选择电场的方向，使电场力的方向和重力的方向相反。在这样情形下，带电的油滴在电场加上后就要比沒有电场时下降得慢些。我們也可以选择电场 E 的数值，使电场力超过重力，而油滴便向上运动了。

在密立根的装置中，我們可以在几小时内观察同一个油滴的运动；要做到这一点，只要在油滴刚要开始接近电容器上面一块极板时把电场除去，而当油滴要下降，走向下面一块极板时，重行把电场加上。

油滴运动的匀速性指明，作用在油滴上的力为空气阻力所平衡，这一空气阻力的大小和油滴的速度成正比。因此，对这样的油滴来說，可写出等式

$$mg = av, \quad (1)$$

这里的 mg 是作用在质量是 m 的油滴上的重力， v 是油滴速度， av 是空气阻力(摩擦力)， a 是一个依空气的粘滯度和油滴的大小而定的系数。

利用显微鏡测定了油滴的直径，因而，在知道了它的质量，并确定了它自由降落的均匀速度 v 之后，我們便可从式(1)求出系数 a 的值； a 的值对給定的油滴来說是保持不变的。当带有电荷 q 的油滴在电场 E 中以速度 v_E 上升时，它作匀速运动的条件是

$$qE - mg = av_E. \quad (2)$$

从(2)得：

$$q = \frac{\alpha v_E + mg}{E}.$$

由此可见,如对**同一油滴**,在电场不存在和存在时进行必要的测定,我們就可以求得油滴的**原始电荷** q 。这一个原始电荷是可以改变的。为这一目的我們可用伦琴射綫管 T (图 1),使电容器内的空气电离。产生出来的离子如被吸着在油滴上,油滴的电荷便会改变而等于 q' 。这时,油滴的匀速运动的速度也就改变,而变为等于 v'_E ,于是得

$$q'E - mg = \alpha v'_E. \quad (3)$$

从(2)与(3)式,求出电荷的变化量是

$$q - q' = \frac{\alpha}{E} (v_E - v'_E),$$

因为已經知道这种油滴的 α ,所以这个变化量,也就可以求得。

应用各种物质(水、油、甘油、水銀)的液滴,带正电的或带負电的,来做的这一种性质的許多测定都显示,無論是电荷 q ,还是所有观察到的电荷的变量 $q - q'$ 永远是同一个最小电荷

$$e_0 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 庫仑}$$

的整数倍。

我們可以看出来,这一个最小电荷正等于在电解现象中出现的元电荷。需要指出的是,油滴的原始电荷是“摩擦电”,而这一种电荷的改变是由于油滴粘附了一些由伦琴射綫造成的气体离子而发生的。由此可见,摩擦电荷,气体离子和电解离子的电荷都由同样的基本电荷相加而成。其他实验的資料也都使我們能得到这一普遍結論: **所有在自然界中遇到的正、負电荷都由整数倍的基本电荷**

$$e_0 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 庫仑}$$

組成。

特別要說一下，**电子的电荷正等于一个基本电荷。**

§ 194. 在原子物理学中**电荷、质量及能量的单位** 这样，任何粒子的电荷总归含有整数个基本电荷。就原子般大小的粒子說，这一个整数并不大。根据这一点，在原子物理学中，取一个基本电荷做**电荷的单位**，比較方便：

$$1 \text{ 基本电荷} = e_0 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 庫仑。}$$

在原子物理学中，常取氧原子质量的 $\frac{1}{16}$ 做**质量的单位**。我們所以选氧做质量的标准，是因为氧几乎能和所有的元素，形成化合物，因而在化学上，原子量就是依氧来决定的。取氧的原子量等于16。1克原子，就是16克的氧包含 $N = 6.02 \times 10^{23}$ 个原子(N ——阿佛加德罗数)。因此，1个原子质量单位等于

$$1 \text{ 原子质量单位} = \frac{16}{N} \cdot 16 = 1.66 \times 10^{-24} \text{ 克。}$$

原子质量单位也可以确定为一种原子量为1的元素的原子的质量。因此，用原子质量单位表示出来的原子质量（更正确地說，它的平均值），就等于元素的原子量。

注意，在自然界中并不存在原子量是1的元素。氢的原子量接近于1，可是稍微大一点，它等于1.008。因此，原子中最輕的一种——氢原子——的质量就等于1.008 **原子质量单位**。

原子物理学中一般采用的**能量单位**就是一个单位的基本电荷（例如电子）通过1伏特电位差时所得到的能量。这个单位叫做**电子伏特**。电荷在电场中运动时所得到的能量，等于电荷跟路径的起点和終点間电位差的乘积，因此

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏特} &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ 庫仑} \times 1 \text{ 伏特} = \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦耳} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格。} \end{aligned}$$

根据电子伏特的定义可知,被电位差 V 伏特加速了后的电子,就有了 V 电子伏特的能量。而带有2个基本电荷的离子在通过同样电位差时就获得 $2V$ 电子伏特的能量,其余类推。

不仅是带电的粒子,而且中性粒子的能量,也可用电子伏特来量度。我们可用电子伏特表示一个以1000米/秒($v=10^5$ 厘米/秒)的速度运动着的氧原子($m=16$ 原子质量单位)的能量:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \frac{mv^2}{2} = \frac{16 \times 1.66 \times 10^{-24} (10^5)^2}{2} = 1.33 \times 10^{-13} \text{ 尔格} = \\ &= \frac{1.33 \times 10^{-13}}{1.6 \times 10^{-12}} = 0.083 \text{ 电子伏特。} \end{aligned}$$

测定快速粒子的能量要利用较大的单位——千电子伏特和百万电子伏特。1千电子伏特等于一千电子伏特;1百万电子伏特也叫兆电子伏特。

习题 1. 粒子通过1000伏特电位差,得到8千电子伏特的能量。问粒子的电荷是多少?

习题 2. 氮原子的动能是2百万电子伏特,求它的速度。

习题 3. 设 CO_2 的生成热是94.5千卡/克分子,求由炭形成一个 CO_2 分子时所放出的能量(以电子伏特表示)。

§ 195. 带电粒子质量的量度、质谱仪 从电学里我们知道,带电粒子在磁场内运动时要受到一种力;那种力叫做洛伦兹力(参阅第二卷,§ 137)。洛伦兹力跟磁场和粒子的速度垂直,它的方向可由左手定则来决定(图 343)。这一个

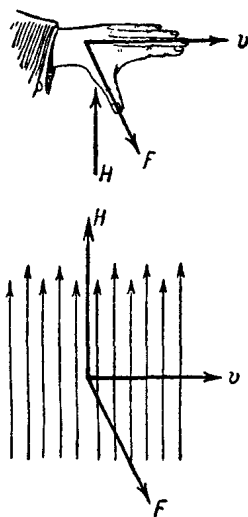


图 343 电荷在磁场 H 内以速度 v 运动时所受到的洛伦兹力 F 的方向。

图上表示正电荷的情形。对负电荷说,力的方向和图示方向相反。

力的大小跟粒子的电荷 e 、它的速度 v 和磁场强度 H 成正比。如 v 和 H 垂直，那末，洛伦兹力可用下面的关系式表示：

$$F = 0.1evH \text{ 达因,}$$

这里 e 的单位是库仑， H 的是奥斯特，而 v 的是厘米/秒。洛伦兹力 F 和一般的力相同，所产生的加速度 a 和力的大小成正比，而和粒子的质量 m 成反比，也就是说，在 $v \perp H$ 时，我们有

$$a = \frac{F}{m} = 0.1 \frac{e}{m} vH。$$

现在来讨论粒子在一个和粒子初速度垂直的匀强磁场内的运动。因洛伦兹力，从而加速度，都和速度垂直，粒子便沿着圆周运动起来；根据力学，我们知道加速度和速度的互相垂直是匀速圆周运动的特征，因此，这时速度 v 的数值是保持不变的。在作匀速圆周运动时，粒子的加速度（向心加速度）等于 $\frac{v^2}{r}$ ，这里的 r 是圆的半径。由此可见，粒子的加速度

$$a = 0.1 \frac{e}{m} vH = \frac{v^2}{r},$$

或

$$r = 10 \frac{mv}{eH}。 \quad (4)$$

当 v 和 H 已给定时， $\frac{m}{e}$ 越大，粒子轨道的半径也越大（图344）。

知道了 v 和 H ，并量出圆形轨道的半径 r ，我们就可以确定 $\frac{e}{m}$ ——粒子的电荷对它的质量的比。粒子的电荷等于一个或几个基本电荷。如电荷已经知道，那就可以算出粒子的质量。有一种重要的物理仪器，叫做质谱仪，它的作用就是根据以上所说的原理。质谱仪可以用来量度最小的带电粒子（离子和电子）的质量。

附有匀强磁场的质谱仪的示意图如图 345 所示。这仪器本身

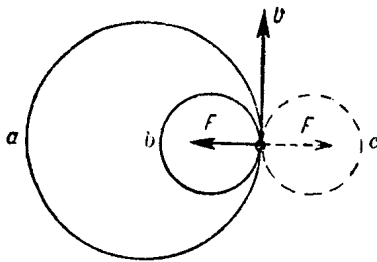


图 344 匀强磁场中几个具有同样初速度的带电粒子的軌道。

軌道 a 表示的 $\frac{m}{e}$ 的值較大，軌道 b 表示的 $\frac{m}{e}$ 的值較小， a 和 b 是帶負電的粒子； c 是帶正電的粒子。磁力綫和圖面垂直，並且方向朝上。

是一个抽到高度真空的容器，放在一个磁力綫跟圖面垂直的磁场中。带电粒子从源 T 放射出来。最简单的带电粒子源是气体放电。放电和强烈的气体电离同时发生。当膜片 D 与源 T 的狭縫間有正电位差时，一些电子和負离子就要从放电中“被拉出去”，而在有負电位差时，是正离子“被拉出去”。用各种气体或蒸汽来充实源 T ，便可得到各种元素的离子。

通过狭縫 A 的粒子，以吸引它們出来的那电位差所給它們的速度投到磁场中。帶有給定的电荷和质量的一切粒子，都可以得到同样的速度，并在磁场中描出同一半径的圓周。在偏轉 180° 后，粒子束就落到一块照相底片上；在粒子束落下的地方(图 345 中的 B 点)，在底片显影后，就出现黑帶①。距离 AB (图 345) 等于粒子运动时所走的那圓周的半径 r 的 2 倍。

r 的大小依粒子的速度而定。粒子是带着动能 $T = \frac{mv^2}{2}$ 飞入

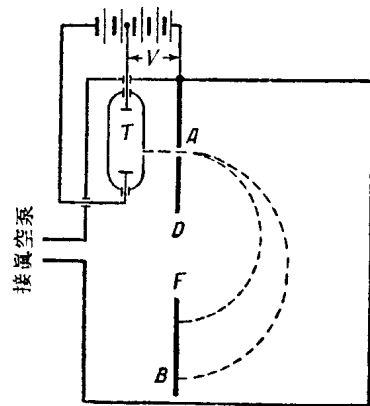


图 345 質譜儀示意图。

T 是离子源(气体放电管)； D 是帶有狭縫 A 的膜片； F 是照相底片； V 是使离子加速的电压。

① 實驗說明，快速带电粒子对照相底片上感光乳胶的作用跟光綫的作用相似。

磁场中的，而动能 T 是依靠拉粒子出来的那电位差 V 做功而得到的。根据这一点，我们可以求得粒子的速度。如 e 的单位是库仑，而 V 的单位是伏特，那末电场所做的功就等于 eV 焦耳，或 $eV \times 10^7$ 尔格。因此，

$$T = \frac{1}{2} m v^2 = eV \times 10^7 \text{ 尔格。} \quad (5)$$

从(4)和(5)，得

$$m = \frac{eH^2 r^2}{2 \times 10^9 V}。$$

把已知的 e 、 H 、 V 的数值和量得的半径 r 的数值代入这一公式，我们就可以算出投射到照相底片上 B 点处的粒子的质量。

如果在源 T 所射出的粒子束中，包含有质量对电荷之比不同的粒子，在照相底片上就会有几个平行黑带出现。最靠近狭缝的黑带是由一些在半径最小的圆周上运动的粒子造成的。这些粒子拥有最小的质量对电荷之比〔参阅公式(4)〕。如在一束内的所有粒子的电荷都相同，那末最接近于狭缝的黑带跟质量最小的粒子相对应。

跟光学类似，在照相底片上得到的图形叫做**质谱**。光谱仪可产生光束的波长谱，就是光谱线按波长的分布。质谱仪可造成粒子束的质量谱，就是粒子按质量(更确切些，按 m/e 比)的分布。

习题 4. 一个离子在磁场中所走的路径是成一半径是 5 厘米的圆。在同样的磁场中，一个重到四倍的离子具有同样的电荷及 (a) 同样的速度；(b) 同样的能量。问它所走的轨道的半径各是多少？

习题 5. He^+ 离子 $\left(\frac{m}{e} = \frac{4 \text{ 原子质量单位}}{1 \text{ 基本电荷}} \right)$ 的轨道半径等于 10 厘米。求

被同样电位差加速的、质量对电荷的比小一半的粒子，在同样磁场内所走的轨道的半径。考虑以下两种情形：