

高等学校教学用书



物理学概论

第三册

阿·伊·基泰戈罗兹基 著

人民教育出版社

蘇聯中學教學用書



物理学概論

第二版

編：伊·基謝列夫、亞·基
爾

人民教育出版社

高等学校教学用书



第四版

物理学讲义

力学部分

第三版

第二版 (第二十

页)

物理学概論

第三冊

物質的构造和性質

阿·伊·基泰戈罗兹基 著

上海交通大学等十五院校集体翻譯

人民教育出版社

本书系根据苏联国立物理数学书籍出版社 (Физматгиз) 出版的阿·伊·基泰戈罗兹基 (А. И. Кытайгородский) 著“物理学概论” (Введение в физику) 一书 1959 年版译出。原书曾经苏联高等教育部审定作为高等工业学校的教学参考书。其他高等学校理工科学生也可参考。

原书分为三篇, 第一篇讲解机械运动与热运动 (第一至第十三章), 第二篇讲解电磁场 (第十四至第二十五章), 第三篇讲解物质的结构与性质 (第二十六至第三十七章), 另有附录。中译本由上海交通大学等十五院校的物理教研组集体翻译, 分为三册出版, 册次与原书的篇次同。

第三册译者是合肥工业大学 (第二十六、二十七章)、大连工学院 (第二十八、二十九章)、哈尔滨工业大学 (第三十至三十二章)、清华大学 (第三十三至三十七章)。其中第二十六至三十二章曾由北京石油学院戈草校订。

簡裝本說明

目前 805×1168 毫米規格紙張較少, 本書暫以 787×1092 毫米規格紙張印刷, 定價相應減少 20%。希鑒諒。

物 理 学 概 論

第三册

阿·伊·基泰戈罗兹基 著

上海交通大学等十五院校集体翻译

人民教育出版社出版

高等学校教学用书编辑组
北京宣武门内大街25号

(北京市书刊出版业营业许可出字第2号)

京华印书局印刷 新华书店发行

统一书号 13010·800 开本 787×1092¹/₃₂ 印张 2¹/₁₆

字数 223,000 印数 20001—45000 定价 (6) 0.70

1960年7月第1版 1961年2月北京第2次印刷

目 录

第二十六章 带电粒子流	459
§ 167. 带电粒子在电场和磁场中的运动	459
§ 168. 电离气体	462
§ 169. 气体中的放电现象	464
§ 170. 带电粒子束的获得	468
§ 171. 电子透镜	470
§ 172. 电子显微镜	473
§ 173. 电子投影器和离子示像器	478
§ 174. 电子射线管	480
§ 175. 质谱仪	483
§ 176. 带电粒子的加速器	485
§ 177. 自动稳相	487
§ 178. 同步稳相加速器、同步加速器	488
第二十七章 微观粒子的波动性	491
§ 179. 电子衍射	491
§ 180. 量子力学的基本概念	493
§ 181. 测不准原理	496
§ 182. 位阱	500
§ 183. 薛定谔方程的解提供些什么?	505
§ 184. 隧道跃迁	506
第二十八章 原子结构	508
§ 185. 氢原子的能级	508
§ 186. 量子数	511
§ 187. s 态的电子云和 p 态的电子云	513
§ 188. 泡利原理	515
§ 189. 原子束在磁场中的偏转	517
§ 190. 电子的自旋	519
§ 191. 原子的磁矩	522
§ 192. 门捷列夫周期律	523
§ 193. 电离电位	525
§ 194. 光学范围内的原子光谱	526

§ 195. 原子的倫琴射綫譜	529
第二十九章 分子	532
§ 196. 化学鍵	532
§ 197. 分子的几何学	535
§ 198. 分子的电子云	539
§ 199. 分子的能級	541
§ 200. 分子的轉动光譜	544
§ 201. 紅外振轉光譜	547
§ 202. 光的并合散射	552
§ 203. 电子光譜	555
第三十章 原子核	557
§ 204. 原子核物理学的实验方法	557
§ 205. 作为原子核的組成的粒子	565
§ 206. 原子核的质量和能量	566
§ 207. 放射性	569
§ 208. 核的自旋和磁矩	574
§ 209. 磁共振	576
§ 210. 四极共振	578
§ 211. 核子的相互作用力	581
§ 212. 核中的核子	583
§ 213. 快速电子的相互作用	584
§ 214. 核子相互作用的解子理論	586
§ 215. 介子	587
§ 216. 电子的相对論理論	588
§ 217. 粒子偶的产生与湮沒	590
§ 218. 粒子和反粒子	592
§ 219. 基本粒子的不对称性	595
第三十一章 核轉变	597
§ 220. 化学变化和核轉变的普遍規律性	597
§ 221. 核反应	599
§ 222. 重核的裂变反应	602
§ 223. 鏈式反应	604
§ 224. 核反应堆的作用原理	606
§ 225. 人为放射性产物	609
§ 226. 热核反应	613
第三十二章 物体的原子結構	615

§ 227. 多晶物质和单晶体	615
§ 228. 空位点阵	616
§ 229. 晶胞的选择·晶体的对称性	621
§ 230. 晶体中粒子的堆积	625
§ 231. 分子晶体	628
§ 232. 球的紧密堆积	631
§ 233. 结晶结构的例子	634
§ 234. 晶体中的热振动	637
§ 235. 热波	639
§ 236. 热膨胀	642
§ 237. 晶体的缺陷	644
§ 238. 近程有序性·液体	649
§ 239. 非晶体	651
§ 240. 合金中原子排列的远程有序性和近程有序性	653
§ 241. 液态晶体	655
§ 242. 聚合物	657

第三十三章 相变

§ 243. 状态图	659
§ 244. 相变	661
§ 245. 相的稳定状态的条件	663
§ 246. 亚稳状态	665
§ 247. 气体 $\rightleftharpoons$ 液体转变	668
§ 248. 气体的液化	670
§ 249. 气体 $\rightleftharpoons$ 晶体转变	671
§ 250. 液体 $\rightleftharpoons$ 晶体转变	672
§ 251. 晶体 $\rightleftharpoons$ 晶体转变	675
§ 252. 在固体中的扩散	677

第三十四章 物体的形变

§ 253. 弹性	680
§ 254. 塑性	681
§ 255. 极限强度	684
§ 256. 多晶体物质的力学性质	685
§ 257. 表面活跃的物质对于形变的影响	686
§ 258. 在粒子流作用下物质的破坏	688

第三十五章 电介质

§ 259. 介电常数和分子极化率之间的关系	691
------------------------------	-----

§ 260. 有极分子和无极分子的极化	694
§ 261. 克分子折射度的可加性	698
§ 262. 热电晶体和压电晶体	700
第三十六章 磁质	704
§ 263. 磁质的三种类型	704
§ 264. 抗磁性	704
§ 265. 顺磁性	707
§ 266. 铁磁性	709
第三十七章 物体的电子结构和性质	716
§ 267. 自由电子	716
§ 268. 固体中的能级	717
§ 269. 电子气	721
§ 270. 电导性	724
§ 271. 超导电性	727
§ 272. 半导体	730
§ 273. 电子发射	735
§ 274. 光电效应	738
§ 275. 阻挡层	741
§ 276. 接触电位差	743
§ 277. 在受热不均匀的物体中的电荷分布	745
§ 278. 温差电动势	746
§ 279. 在电路中热量的放出	748
§ 280. 温差电效应的应用	750
附录	752

第二十六章 带电粒子流

带电的基本粒子——电子和离子——的总和，是物质的最简单形式。我們所遇到的带电粒子系，或者是所有粒子具有共同速度并且沿同一个方向而运动的粒子束的形式；或者是作着无规运动的粒子气的形式。当然，介乎二者之間的状态也是可能的。本章将研究和粒子束及带电粒子气有关的基本物理现象及技术装置。至于直接和固体物理学有关的电子发射问题，則将在第三十七章加以叙述。

§ 167. 带电粒子在电场和磁场中的运动

任意的电磁场将对带电粒子施一个力 $f = eE + \frac{e}{c} [vB]$ (269 頁)。如果作为坐标和时间的函数的电场强度 E 和磁感强度 B 是已知的，并且給定了粒子的初速度和初位置，那么，速度 $v \ll c$ 的粒子的轨迹 $r(t)$ ，就可以根据下列的力学基本定律求出：

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = f.$$

这个问题的求解通常会遇到很大的数学困难。为了認識一般性的规律性，研究粒子在均匀场中的运动就足够了。

电场中的粒子 粒子和电场方向成 $90^\circ + \alpha$ 角而进入电场(图 190)。在如图所示的坐标选择下，运动方程具有下列形式：

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{e}{m} E, \quad \frac{dv_x}{dt} = 0.$$

由此即得，

$$v_y = -\frac{e}{m} E t + v_{0y}, \quad v_x = v_{0x}.$$

再积分一次并假定 $t=0$ 时 $x=0$, 我们就得到

$$y = -\frac{1}{2} \frac{e}{m} E t^2 + v_{0y} t, \quad x = v_{0x} t.$$

消去时间, 我们就得到抛物线方程, 这就是电荷所要描绘的曲线 (图 190 中的虚线)。

如果粒子和电场方向成直角而进入电场 ($v_{0y}=0$), 那么轨迹方程就具有下列形式:

$$y = -\frac{1}{2} \frac{e}{m} E \frac{x^2}{v_0^2}.$$

如果粒子沿着电力线进入电场, 那么它就将以加速度 $\frac{e}{m} E$ 沿着力线继续运动。

用 V 来表示带电粒子运动的起点及终点的电位差, 利用动能方程就可以得到:

$$eV = \frac{m}{2} (v^2 - v_0^2).$$

如果末速度 $v \gg v_0$, 那么就有

$$eV = \frac{mv^2}{2} \quad \text{及} \quad v = \sqrt{2 \frac{e}{m} V}.$$

这一方程可以明显地使电子伏特这个能量单位的用途推广了。

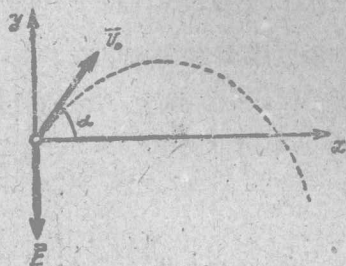


图 190

$$1 [\text{电子} \cdot \text{伏特}] = 1.63 \cdot 10^{-12} [\text{尔格}].$$

这就是用 1 伏特的电压加速一个电子时所必需作的功。当能量是针对一个基本粒子来计算时, “电子伏特”这个单位是适用的。电离功, 电子从金属中逸出时的逸出功——所有这些量都具有一或几十电子伏特的数量级。

磁场中的粒子 作用在磁场中带电粒子上的力, 其特点我们已经知道 (269 页)。

設粒子以初速 v_0 进入磁场。我們把这个矢量分解为平行于磁场和垂直于磁场的分量 $v_{\parallel}$ 和 $v_{\perp}$ 。于是，对于和磁场相垂直的平面内的运动来说，我們就有：

$$ma = \frac{e}{c} v_{\perp} B.$$

平行于磁场的运动将以恒定速度 $v_{\parallel}$ 而匀速地进行。

在垂直于磁场的平面内，运动是圆周运动， $a = \frac{v_{\perp}^2}{R}$ 是向心加速度。于是，

$$\frac{e}{c} v_{\perp} B = \frac{mv_{\perp}^2}{R},$$

由此即得：圆的半径 $R = \frac{mv_{\perp} c}{eB}$ 和粒子的速度成正比而和磁感强度成反比。必須記住，在給定的磁场中，同种类粒子繞力綫旋轉的角速度 $\omega = \frac{eB}{mc}$ 是相同的。不管速度的大小和方向如何，所有的粒子都将在同一時間內繞力綫旋轉一周。



图 191

如果粒子和磁场的方向成某一角度而进入磁场，那么它就将以频率 ω 沿着半径为 R 的螺旋綫而运动(图 191)。沿力綫方向的速度射影 $v_{\parallel}$ ，使我們能够得出螺距：

$$z = v_{\parallel} T = v_{\parallel} \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi mc}{eB} v_{\parallel}.$$

重要的是，甚至在 $5-10^\circ$ 的初速弥散角下， $v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha$ 这个量也在很高程度上是一个恒量，式中 α 是初速和场之間的夹角(在这种情况下， $v_{\parallel}$ 的变动差誤不超过 1%)。由此得出結論：每經過 z 厘

米,发散的带电粒子束将(在上述精确范围内)集中在一点,也就是聚焦在圆柱面的母线上(在这圆柱上缠绕着螺旋状的轨迹),而这母线通过粒子进入磁场时的那一点。

例 設电子被 $V=300$ 伏特的电压所加速,而以 $\alpha=30^\circ$ 的角度进入磁感强度 $B=500$ 高斯的磁场中。电子的速度:

$$v_e = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 4.8 \times 10^{-10} \times 1}{9 \times 10^{-28}}} = 10^9 \text{ [厘米]/[秒]}.$$

有必要指出 $\frac{v_0}{c} = \frac{1}{30}$, 因此在现在的计算中引入相对论的改正是没有意义的。

$$v_{||} = v_0 \cos \alpha = 0.87 \times 10^9 \text{ 厘米/秒}, \quad v_{\perp} = 0.5 \times 10^9 \text{ 厘米/秒}$$

电子轨道缠绕于其上的柱面,其半径是

$$R = \frac{mv_{\perp}^2}{eB} = \frac{9 \times 10^{-28} \times 0.5 \times 10^9 \times 3 \times 10^{10}}{4.8 \times 10^{-10} \times 500} = 0.056 \text{ 厘米},$$

也就是說它的直径略大于1毫米。角速度

$$\omega = \frac{eB}{mc} = \frac{4.8 \times 10^{-10} \times 500}{9 \times 10^{-28} \times 3 \times 10^{10}} = 0.89 \times 10^{16} \text{ 弧度/秒}.$$

轨迹的螺距

$$z = v_{||}T = 0.87 \times 10^9 \frac{2 \times 3.14}{0.89 \times 10^{16}} = 0.6 \text{ 厘米}.$$

§ 168. 电离气体

原子到正离子的转变,也就是原子中电子的逸出,可以用非常不同的很多方法来进行。电子、其他原子或分子的轰击,光子的吸收,只要所传递的能量足以克服电子和原子之间的结合力,那么所有这些能量的传递方法就都能够造成原子的电离。对于不同的原子和分子来说,这一能量介于4—25电子伏特之间(参阅525页)。这就意味着,利用在4—25伏特的电压下加速的电子,就可以完成原子的电离。不言而喻,高能粒子可以将若干个原子或分子转变为离子,就看它的能量储备多大而定。由强大的加速器中放出的

一个电子,能够造成几百万个离子对。

原子的电离就是从原子中取出电子;分子的电离也可能导致电子的逸出;但在另外的情况下,分子在电离时将分成两个大个儿的离子。就这样,电离不但能够形成电子和正离子,而且也可以形成负离子。但是,负离子的获得也可以有另外的方法;那就是使自由电子与中性原子相结合。人们发现(参看 § 196),这样的过程在能量上是有利的。

固体内的电离过程将在 § 258 中详细研究。在这里,电离问题只是作为能够产生离子流的一种方法而使我們发生兴趣的。从这个观点出发,有兴趣的就仅仅是气体的电离。如果我们想要由在标准状况下以固体或液体形式存在的物质得到离子流,那么就需采用汽化的方法。

我們来研究用任何一种粒子流来引起的气体电离。如果将电离源拿开,那么正负带电粒子就将重新结合(复合)为中性原子或分子。既然在复合过程中将有一对粒子相遇,那么,复合的速度很自然地就和单位体积内离子数 n 的平方成正比。如果 Δn 是在单位时间内单位体积中变为中性粒子的离子数,那么就有 $\Delta n = \gamma n^2$; 式中 γ 是一个系数;对于标准条件下的大多数气体来说,该系数的数量级是 10^{-6} 厘米³/秒。在电离剂的恒定作用下,电离过程和复合过程之间应该建立平衡。设在单位时间内电离剂在单位体积中造成 N 对离子。在起初,气体中的离子数将增加;但是,既然复合过程发生得越来越频繁(和存在着的离子对数的平方成正比),那么,当 $N = \Delta n$ 亦即 $N = \gamma n^2$ 时,离子的增加就将停止。如果电离的气体充满某一体积,而且粒子的无规运动是占优势的,那么这种由中性粒子和带电粒子所组成的导电气体就称为等离子体。

用增高温度的方法就能使气体处于电离的状态和等离子体状态。在数量级为 6000° 的温度下,气体的热电离即将开始。这时,

分子的平均动能 $\frac{3}{2}kT$ 就足以保证在那样一些分子之间发生足够频繁的碰撞, 该种分子带有电子逸出即电离所必需的能量。

电离度和气体的温度及压强有关。压强增高时电离度将减小。在以万度计的温度下, 当压强为 10^{-3} 毫米汞高时, 电离度已接近于 100%。这样的热电离气体就是和环境处于热力学平衡的等离子体。等离子体中一切带电粒子和中性粒子的平均动能是相同的, 并且是决定于等离子体的温度的。在温度很高的星体上, 就存在着这样的等离子体。

电离层就是强电离气体的重要例子。在单位体积电离层中的带电粒子数, 经受着以一昼夜为周期和以一年为周期的强烈变化。大家知道, 这种变化对无线电接收是有影响的。在 1 厘米³ 的电离层内, 约有 10^6 个电子和离子。而这一体积中的全部粒子则大约有 10^8 个。因此电离层的电离度约为 1%。在各种离子仪器中形成的强烈的等离子体内, 电离度也具有这样的数量级。

§ 169. 气体中的放电现象

研究了电流通过气体(气体中的放电)的问题, 物理学家获得了有关基本带电粒子的最初认识。充有气体的玻璃管联结于电路中。借助于焊在玻璃上的电极来接通电路。为了获得这种现象的详细景象, 应该对不同气压和不同电场强度下的各种气体来研究这种现象。

不同气体的行为, 一般是相同的。电离电位的不同(参阅 526 页)造成这样的结果: 某些临界点存在于另外的电压和气压下。关于这些临界点, 我们将在下面讲述。

我们来研究当增加电压时在充有任何一种气体的气体放电管内所发生的现象。我们所要描述的气体行为, 在很大的压强范围内是存在的。我们暂不讨论极低压强下的情形; 在这样低的压强下,

分子的自由程可以和气体放电管的綫度相比。我們也不研究极高压强下的情形；在这样的压强下，气体密度和液体密度相近；在液体中，分子自由程是不存在的。粒子的自由程为什么这样重要，讀者立刻就会明白。

因此，我們在气体放电管上加上不很大的电压。如果没有电离剂，那么电流就不会通过放电管。当电离剂存在时，气体中就会出现带电粒子——离子和电子。在施加电场时，粒子将被电场引向电极。这种现象称为气体的被激导电。带电粒子向着电极移动的快慢决定于很多条件，其中首先是电场强度和气体的压强。

在由于恒定电场力的作用而引起的离子定向运动之上，迭加得有无规则热运动。由电场加速的粒子，能够飞行一个不大的距离。很短的路程不可避免地会由于碰撞而告終。在不很大的运动速度下，这些碰撞将按照弹性碰撞的定律来进行。

平均自由程的长度，首先决定于气体的压强。压强越高，自由程就越短，粒子定向运动的平均速度也越小。加在气体放电管上的电压，当然要引起相反影响而增加粒子定向运动的平均速度。

如上节所述，在处于电离剂作用下的气体中，存在一定的离子浓度；在平衡状态下，每秒新形成的离子数等于在同一时间内复合的离子数。施加的电压将打破平衡：一部分电子来不及复合就到达了电极。随着电压的增加，在单位时间内产生的离子中，将有越来越多的离子到达电极：通过气体的电流将增大。就这样，一直繼續到完全没有复合时间，从而电离剂所造成的所有离子都将全部到达电极为止。显然，进一步增加电压并不能再使电流增大（飽

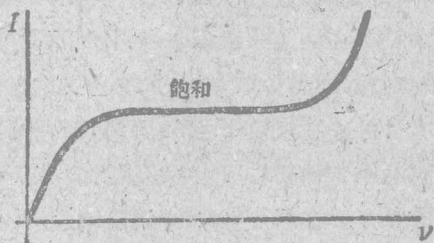


图 192.

和电流,图 192 上的直线部分)。

气体的密度越小,到达饱和电流所需的电压也就越小。

饱和电流的强度等于电离剂在气体放电管中每秒造成的离子的电荷。

进一步增加电压将引起新的现象。在某一时刻,电子的速度将增大得足以使中性的原子和分子失去电子。在这种情况下,加在管上的电压应该达到很大的值,在这样大的电压下,电子在自由程上将来得及积累足以使分子发生电离的能量。

碰撞电离的发生对于电流和电压之间的关系曲线是有影响的: 电流开始增大。因为电压的增加意味着电子运动速度的增加,而速度的增大又引起电子的电离本领的增大,从而引起大量离子对的产生及电流强度的增大。

在这个电压范围内,当电流通过气体时就有光学现象伴随着发生——气体发光。事实上,如果粒子的轰击能够引起原子和分子的电离,那么它们就更加能够引起粒子的激发,也就是引起到达较高能级的跃迁。当然,当回到正常的状态时,分子或原子就将辐射光量子。这方面的問題我們將不在这里进行討論,因为原子和分子辐射以后在很多的方面将进一步地加以研究(参看第二十八和第二十九两章)。

如果电子的能量比一个分子电离所必需的能量大了若干倍,那么电流通过气体时就具有特别明显的雪崩特点。某些电子将把原子打坏而造成离子和电子;而所产生的电子又将具有引起电离的本领,而且原来的电子还保有足以使其他原子发生电离的能量。这个过程将发展下去,而电荷的雪崩过程就将从原始电离的地方向电极方面扩展开去: 在靠后的每一层中,离子对的数目都比前一层要多。在或高或低的电压增长下,这种雪崩发生得异常迅速。

在气体中,次级电离剂是电子而不是离子。离子只有在具有

十分巨大的运动速度时才能使气体分子电离；这样大的速度我們通常是不会遇到的。如果离子不引起电离，那么外加电离剂的移去就将使气体中的放电停止，即使碰撞所造成的离子对的数目千百倍地超过初始电离的数目也是如此。每次雪崩都必须从一个原始电子开始；但是由于电子飞向阳极，从而在沒有外加电离剂的情况下，当全部电子达到了阳极以后放电就将停止。

这种十分强烈的被激放电具有下列特性：在給定的电压下，通过气体的电流强度和单位時間内外加电离剂所造成的原始离子数成正比。所謂电流放大是指电流强度和最初电离所产生飽和电流强度之比，可以达到几百或几千。放电現象的这一性質可用来制造测量电离的仪器——正比放大器（參閱 § 204）。

只有在离子成为带电粒子的附加供給者的情况下，放电才能成为自激的，也就是說，它才能在沒有外加电离剂时繼續下去。在很高的电压下，当离子能够如上所述地使被碰分子发生电离时，这种情况是永远会发生的。在这种情况下，离子可以造成一批一批的新生电子——雪崩过程的导火綫。

但是，如果我們把放电管的阴极制成板状，那么在低得多的电压下也能发生自激放电現象。問題在于离子能从冷阴极上打出电子来。如果离子的速度足够完成这个过程，那么自激放电的条件就可以这样表述：阴极上出現的新电子，最低限度應該能够代替原有电离剂的工作。

我們还一点也沒有談到关于压强的作用。在高压下放电柱將收縮而热电离將开始，不同的压强將改变电流密度的分布綫景，从而也改变气体放电的发光特点。在标准压强和較高的压强下，我們將碰到放电的不同形态：无声放电、弧光放电和火花放电。在稀疏气体中将出現所謂輝光放电。这些放电現象的发生条件和外貌是怎样的呢？