

J 近代物理

JINDAIWULI

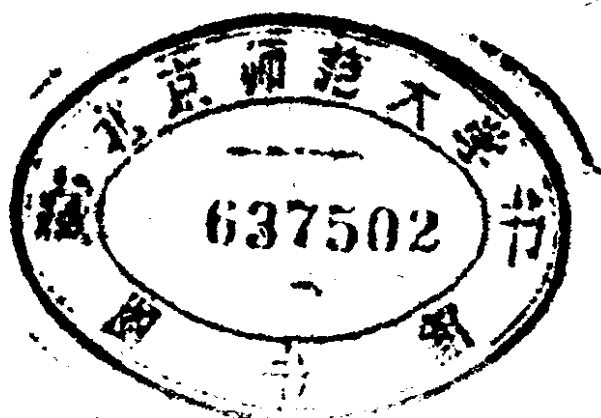
倪光炯 李洪芳

上海科学技术出版社

近代物理

倪光炯 李洪芳

JY1147/15



上海科学技术出版社

近代物理

倪光炯 李洪芳

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

本书由上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 13.875 字数 303,000

1979年8月第1版 1979年8月第1次印刷

印数 1—100,000

书号: 13119·772 定价: 1.30 元

序

编写这本书的最早动机是想为青年读者提供一些关于近代物理的知识,但后来征求了各地各方面同志的意见,我们在几经改写的过程中,逐渐明确了如下的指导思想:既要比较深入地介绍近代物理概念的发展,又能向读者提供一些切实有用的基础知识;在取材上应该在照顾必要的系统性的前提下突出重点,这样才能在叙述中有选择地保证一定的深度。我们希望这本书可以作为大学物理系的教学参考书,也能够使范围更广的读者从书中获得一些启示。

基于上述考虑,我们确定了对微观世界认识的历史发展这样一条叙述线索。全书内容基本上可分为四部分:相对论(包括广义相对论)、量子论和量子力学、原子核物理、高能(粒子)物理。叙述以理论概念为主,实验材料为辅。除个别章节外,只用到初等数学工具。但是,限于本书的性质和篇幅,也由于我们编写时主观上的考虑,书中叙述有简有繁,深度也有起伏,还杂以一些议论。所以,远不是每句话,每个式子在科学上是足够严谨的和在叙述上前后紧密联系的。我们相信,这样做对大多数读者来说,并不会引起选择和判断上的困难,也许还可能进一步提高学习的兴趣。

我们感谢许多同志热诚地提出宝贵意见,特别是江苏师院、南京大学、清华大学、上海师大、高能所、中国科大、北京大学等兄弟院校和研究所同志在审阅初稿后提出的意见,对我们在修改中帮助很大。但是,由于本书涉及范围广而我们水

平有限，一定存在不少错误之处，深望读者在发现后指出，以便有机会时予以改正。

目 录

引言——打开微观世界的窗户.....	1
一、历史背景	1
二、电子的发现	2
三、X射线的发现	5
四、放射性的发现	6
五、原子核的发现	9
第一讲 山雨欲来风满楼	
——相对论产生的历史背景.....	13
一、绝对时空观 伽里略变换和力学相对性原理	13
二、电磁场和光的传播	18
三、以太风,你在哪里?	20
四、迈克尔逊-莫雷实验	26
五、洛仑兹等人的尝试	31
第二讲 陌生的高速世界.....	34
一、爱因斯坦的选择	34
二、同时性的相对性	35
三、洛仑兹变换	38
四、速度相加定理——是否可以超过光速?	43
五、运动物体长度的收缩	46
六、运动时钟的变慢	50
七、相对论力学 质量随速度的增长	56
八、质能关系	59
九、小结	63
第三讲 广义相对论简介.....	65

一、问题的提出	65
二、惯性质量和引力质量相等的实验 等效原理	68
三、引力场中空-时性质的非欧性	72
四、空-时度规和四维不变弧元	74
五、广义协变原理	81
六、引力场方程 引力场中质点的运动	83
七、引力频移	87
八、光或无线电波在太阳旁的偏折	95
九、水星轨道近日点的进动	97
十、雷达波传播中的时间延迟	98
第四讲 关于相对论一些问题的讨论	101
一、狭义相对论在科学性上有什么问题?	101
二、光速不变合理吗?	104
三、引力波的问题	106
四、相对论是完全相对的吗?	107
五、相对论的适用范围	112
第五讲 波粒二象性 量子论的诞生	114
一、热辐射	114
二、普朗克公式及其解释	118
三、光子的概念	123
四、原子的稳定性 光谱线系	125
五、氢原子的玻尔模型	128
六、电子的波性 电子衍射	135
七、定态驻波和能量量子化	140
八、小结	145
[附录] 德布罗意关系的导出	146
第六讲 量子力学引论	149
一、引言	149
二、波函数的线性迭加原理和统计解释	150
三、薛定谔方程	155
四、定态 本征值和本征函数	160

五、角动量	168
六、氢原子中的电子	174
七、电子的自旋 泡里不相容原理和原子的壳层结构	180
八、原子的发光	187
九、算符 对易关系和不确定关系	196
十、氢分子离子(H_2^+)和氢分子(H_2) 化学键	205
十一、小结	218
第七讲 原子核放射性和辐射的性质	222
一、原子核的结合能	222
二、 α 、 β 、 γ 放射性概述	229
三、射线与物质相互作用的特征	242
四、放射性衰变规律	254
五、 ^{14}C 在考古中的应用(^{14}C 鉴年法)	261
[附录] 探测器简介	263
一、电离室	263
二、G-M 计数管	265
三、闪烁计数器	267
四、半导体探测器	270
第八讲 原子能	273
一、从太阳谈起	273
二、聚变和裂变的可能性	275
三、裂变的发现	277
四、裂变链式反应和反应堆	279
五、原子弹和氢弹	284
六、受控热核聚变的研究	289
第九讲 原子核物理的发展	294
一、稳定(和亚稳)核的分布	294
二、原子核的液滴模型 核结合能的半经验公式	297
三、核反应的截面	300
四、共振与复合核	304
五、原子核的壳层模型和综合模型	309

六、超铀元素的发现	313
七、超重元素的探索	315
【附录】 加速器简介	317
一、引言	317
二、静电加速器	319
三、直线加速器	320
四、回旋加速器	322
五、同步回旋加速器	324
六、同步加速器	325
七、强聚焦和超高能质子同步加速器	327
八、对撞机	327
九、重离子加速器	329
第十讲 基本粒子和宇宙线	331
一、正电子的发现	331
二、其它反粒子的发现	336
三、 μ 和 π 的发现	339
四、同位旋	343
五、 K 介子和超子的发现 奇异数	344
六、“稳定”粒子表	350
七、宇宙线	350
【附录】 径迹探测器	359
一、云室	359
二、气泡室	361
三、火花室	362
四、核乳胶	363
五、固体径迹探测器	363
第十一讲 高能物理研究些什么	364
一、共振态的发现	364
二、相互作用的分类	368
三、守恒定律和对称性	377
四、强子的 SU_3 对称性	379

五、宇称不守恒的发现	383
六、时间反演不守恒的发现	393
七、强子有结构吗?	396
八、夸克(层子)模型	401
九、 J/ψ 等新粒子的发现 c 夸克(粲层子)	411
[附录] 带电粒子在原子核势场中的运动	422
一、质心系和质心系能量	422
二、轨道角动量 平面波按角动量的分解	424
三、原子核的库仑势垒 卢瑟福散射和核散射	426
四、中子被核的散射	427
五、势垒的穿透和 α 衰变	427
六、截面的高能极限	428
结束语	430

打开微观世界的窗户

一、历史背景

十九世纪末叶，欧洲各主要资本主义国家的工业生产有了很大的发展，对新技术、新工艺和新产品的需求日益迫切。例如，当时白炽灯已经发明，人们为了寻找新的光源，大力进行真空和放电的研究，下面我们马上就要看到，这一点对物理学的发展有着相当直接的影响。

然而，自然科学的发展还有它本身的规律。当时的物理学正处于一场大革命的前夜，它一方面好象很完善了，另一方面却又暴露出尖锐的矛盾。前一方面指的是所谓经典物理学（大致可分为力学、声学、热学、光学和电磁学等分支）所达到的认识，可概括如下：

(1) 世间万物都由八十几种元素的原子所组成。

(2) 原子是不可再分的最小微粒，它的运动服从牛顿力学定律。

(3) 热就是大量分子作混乱机械运动的表现。我们利用力学规律性加上统计规律性及其处理方法，就可能解释气体、固体和液体等凝聚态物质体系的性质。

(4) 存在正、负两种电荷，它们可能是某种流体样的东西；电荷产生电场，电荷的运动又产生磁场；电磁场可以脱离电荷而运动，这就是电磁波；热辐射（红外线）、可见光和紫外线等都不过是不同波长的电磁波。

(5) 无论力、热、声、光、电等现象如何复杂，一切过程都

遵从能量守恒定律和动量守恒定律。

面对这些成就,在绝大部分物理学家的眼光里,物质世界的运动已经构成了一幅清晰的画面,基本问题都研究清楚了,留给下一代人所做的工作,将不过是把已有的实验做得更精密一些,使测量数据的小数点后面增加几位有效数字而已。

那末,矛盾又在那里呢? 1900年,著名的英国物理学家开尔文(威廉·汤姆逊)在一篇瞻望二十世纪物理学的文章中先说:“在已经基本建成的科学大厦中,后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了”;接着他又说:“但是,在物理学晴朗天空的远处,还有两朵小小的令人不安的乌云”。这两朵乌云,指的是当时物理学无法解释的两个实验,一个是热辐射实验,另一个是迈克尔逊-莫雷实验。开尔文真算是有眼力的了。但他可能也完全没有想到,正是这两朵小小的乌云,不久就发展成为物理学中一场革命的风暴。而且实际上,在高潮到来之前,已经有三个重大的事件,揭开了近代物理的序幕,这就是电子、X射线和放射性的发现。

二、电子的发现

前面已提到,由于电磁、真空等科学技术的进步,也由于寻找新光源的需要,在十九世纪最后三十年里,研究真空放电的人很多。

在一个真空管(用转动泵抽气)内密封一个阴极 C 和一个阳极 A ,在 CA 之间加上几千伏的高电压,在管内的稀薄气体中便会产生美丽的放电现象,随着水银扩散真空泵的应用,管内气压进一步降低(真空度提高),气体发光现象看不见了,但在对着阴极的玻璃管壁上却会产生蓝绿色的荧光。这表明从阴极发出一种肉眼看不见的射线,它沿直线行进,在磁场中

偏转,由此可证明这种射线是带负电的,它能穿过很薄的金箔箔,因此不可能是负离子。1897年,英国物理学家 J. J. 汤姆逊在前人大量工作的基础上,决心进一步弄清楚这种“阴极射线”。为此他重新设计了实验仪器(图1)。

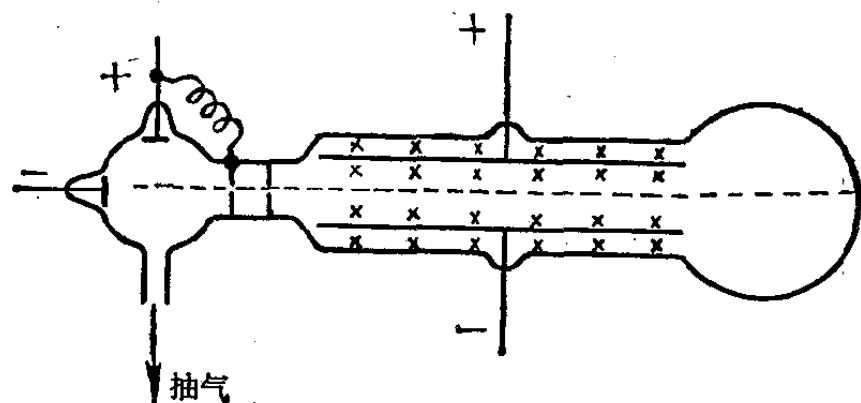


图1 阴极射线管(图中×表示磁场的方向由纸外向纸里)

阴极射线穿出小孔以后,进入一个静电场区域,它是由两块平行板电极加上电压 V (板间距离为 d)而产生的,人们就看到射线向上偏转一段距离;如果同时加上一个垂直于纸面向里的适当强度的磁场 B ,便可以抵销这种偏转,而使射线仍然射到对称的中心点。通过调节电压 V 和磁场 B ,测量射线不偏转时的磁场强度,汤姆逊就能够算出射线粒子的速度 v (米/秒):设粒子质量为 m (单位千克),电荷绝对值为 e (单位库仑),则它在电场 E (伏/米)中受力为

$$F_{\text{电}} = eE = e \frac{V}{d}, \quad (1)$$

而在磁场 B (韦伯/米²)中受力为

$$F_{\text{磁}} = evB, \quad (2)$$

平衡时两者相等,给出

$$eE = evB, \quad v = \frac{E}{B}. \quad (3)$$

接着,汤姆逊撤去磁场,测出射线在平板电极右端出口处的横

向偏离值 s^* 。这个 s 应等于 $\frac{1}{2}at^2$ ，而其中加速度 a 由 $F_{\text{电}} = eE = ma$ 决定为 $a = \frac{eE}{m}$ ，因 s 比平板的长度 L 小很多，粒子的飞越时间 t 可由速度 v 及板长 L 简单地算出： $t = \frac{L}{v}$ ，所以

$$s = \frac{1}{2} \left(\frac{eE}{m} \right) \left(\frac{L}{v} \right)^2. \quad (4)$$

再以(3)式代入，即得

$$s = \frac{1}{2} \left(\frac{e}{m} \right) \frac{L^2 B^2}{E}.$$

由此可见，阴极射线粒子的“荷质比”

$$\frac{e}{m} = \frac{2Es}{L^2 B^2} = \frac{2Vs}{dL^2 B^2}, \quad (5)$$

可以由实验测量到的 V 、 d 、 B 、 L 、 s 等数值算出。当时实验精度不高，结果用二位有效数字表示为：

$$\frac{e}{m} = 1.7 \times 10^{11} \text{ 库仑/千克}. \quad (6)$$

汤姆逊发现，这个荷质比数值既与管内所充气体（空气、 H_2 或 CO_2 等）的性质无关，也与阴极材料（Al、Fe 或 Pt 等）的性质无关。这意味着阴极射线是由一种荷质比完全确定的粒子流所形成。进一步的实验，直到 1909 年有名的密立根油滴实验，证明一切荷电物质都只能带有 e 的整数倍的电量，而一个阴极射线粒子所带的电量（ $-e$ ）是负电荷的最小单位。 $\left(\frac{e}{m}\right)$ 不变， e 也不变，表示粒子质量 m 也是确定的。这种粒子，以后便称为电子。阴极射线就是高速电子流。根据近年的测量，电子电荷（绝对值）及质量：

* 实际上，射线穿出电场区域后，还可以直线飞行一段距离，这时 s 只能间接算出，不过我们下面只作定性说明，不讲细节了。

$$e=1.6021892 \times 10^{-19} \text{ 库仑};$$

$$\text{质量 } m=9.109534 \times 10^{-31} \text{ 千克}。$$

到目前为止,还没有发现荷电比 e 更小的粒子。另一方面,电子质量虽然很小,只有氢原子质量的 1836 分之一,但却不能说它是自然界中最轻的粒子*。我们以后将任意地用符号 e 表示一个电子,或者表示电量的最小单位,有些书上用 e 表示电子电荷时已包括了负号,所有这些,希望读者自己留意。

三、X 射线的发现

比电子的确认还要早一些,即 1895 年 11 月 8 日,在放电管实验中就发现了另一种新现象。一位德国的大学教授伦琴,一次在暗室中做放电实验,他用黑色硬纸把放电管密包起来,无意中发现放在一段距离外的涂有一种荧光材料(铂氰酸钡 $\text{BaPt}(\text{CN})_6$) 的纸屏竟发出微弱的荧光,他马上仔细观察,肯定激发这种荧光的東西来自放电管,但同时可肯定这种东西不可能是阴极射线,因为后者透不出玻璃管。伦琴就称这种看不见的东西为 X 射线。经过连续 7 个星期的紧张研究,伦琴在年底写出了一篇论文,详细地分析了 X 射线的性质、产生的原因和在各种物质中的透射率。他指出:阴极射线打在固体上面便会产生 X 射线,固体元素越重,产生的 X 射线越强;X 射线既不受磁场偏转,也不能用玻璃透镜聚焦。伦琴发现,几乎所有物质对 X 射线都是透明的,15 厘米厚的 Pb 才能显著地减弱它,而把手放在放电管和荧光屏之间时,由于肌

* 在以后讲相对论时将说明,当一个电子的速度增大时,它的质量也要随之增大,这里列出的 m 值是电子的“静止质量”;但是另一方面,电子电荷值 e 却不随速度而改变,最近的实验以很高的精确度证明了这一点。

肉对X射线的吸收比骨质弱得多，屏上便可看到手指的骨骼。

伦琴这一发现的巨大潜在价值是显而易见的，大家奔走相告，许多实验室纷纷重复这一实验，并向听众宣讲示范，三个月后，维也纳的医院外科治疗中便首次应用X射线拍片。

在后来制造的“X射线管”中，通过灯丝的加热，发射出许多电子，它们在高电压(几万伏)的加速下，轰击到重金属(如钨或钼等)制成的靶上，靶的表面便会发出很强的X射线。现已弄清楚，这是由于高速电子在靶物质内的运动受到阻碍而急剧减速，在这减速过程中，电子便会发出一种波长极短(约 $1\text{\AA}$ 左右， $1\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米，而可见光的波长在 $4000\sim 8000\text{\AA}$ 之间)的电磁波，这就是X射线。X射线的发现使人们认识的“电磁波谱”朝着短波方向拓广了一大段(图2)*。下面我们还要介绍从原子核内放出来的电磁波，叫做 γ 射线，它的波长还要短，穿透本领比X射线更强。

四、放射性的发现

法国的贝克勒尔原来对荧光现象很有研究，1896年2月，他听说伦琴的发现之后，就想看一看不能透过黑纸的日光能否激发出X光、再透过黑纸激发出荧光来(现在我们知道这是不可能的)。一天恰好天阴，没有日光，他就把制备好的一种样品——硫酸铀酰钾复盐($\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 一种已知的磷光物质)用黑纸包起来，放在抽屉里的照相底片上面。几天后，他怕底片有些漏光，便决定将其中一张冲洗看一下，不料洗后一看，晶体的象竟赫然在目。他于是赶紧仔细做实验，证

* 图上为应用方便起见，还列出了与一定频率对应的“光子”能量值，用电子伏(eV)表示，其意义将在第五讲详细讨论。

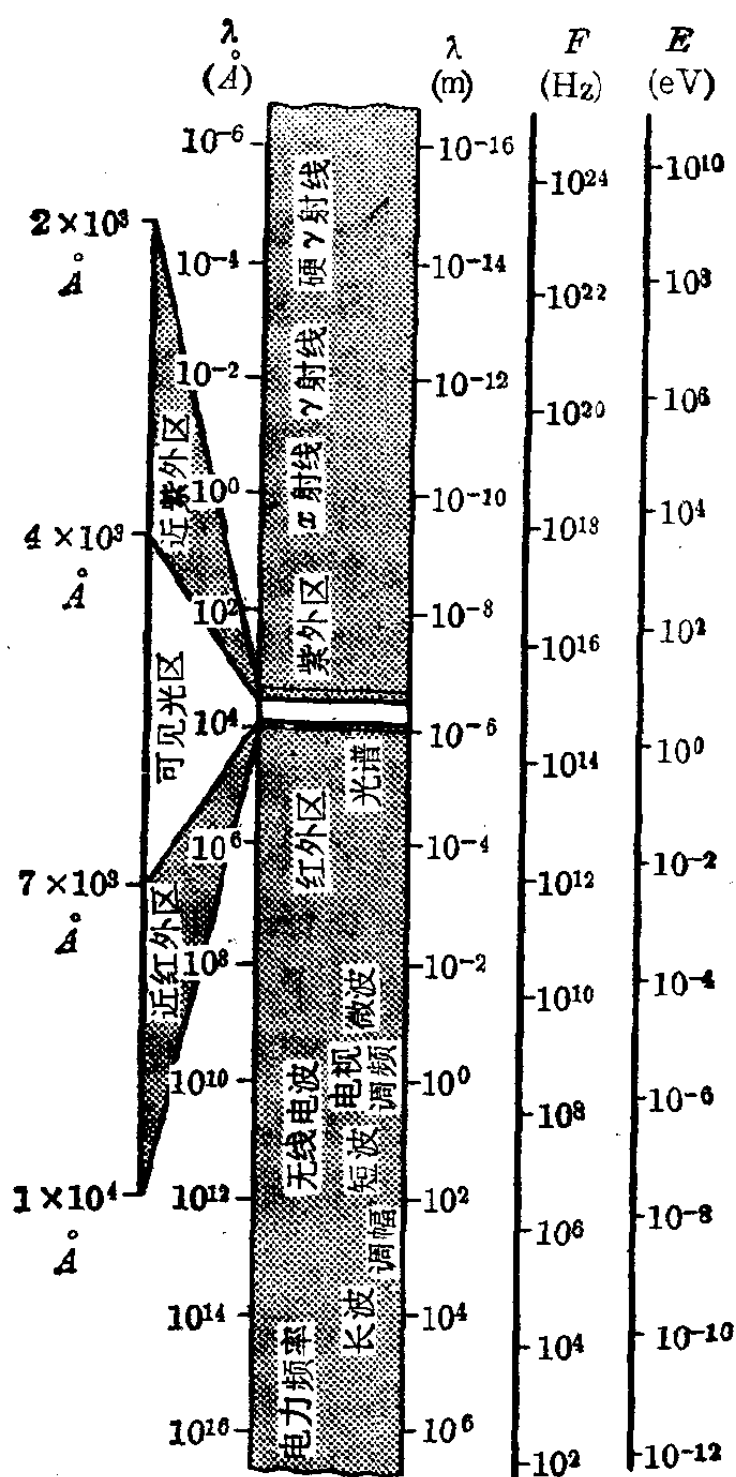


图2 电磁波谱

明感光这是由于样品含铀所致，铀确实发出了一种肉眼看不见的射线，这就是天然放射性的发现。

后来许多科学家，尤其是最有名的一位原籍波兰的女科学家居里夫人，通过十分艰巨的化学分离和检定工作，从上吨