上册

●郑广垣 编著

●复旦大学出版社

近代物理

近代物理

上册

郑广垣 编著

复旦大学出版社

内 容 提 要

全书分上、下两册。上册内容包括近代物理的两大理论基础——相对论和量子力学，以及原子物理；下册包括量子统计、分子、固体、半导体、原子核、粒子物理等内容。全书注重基本概念和规律的正确阐释；对问题的处理着重从物理上讲深讲透，避免高深繁复的数学运算。

本书可作为综合性大学电类各专业的“近代物理”课程的教材，亦可供理工科院校非物理专业作为“近代物理”课程的教材使用。

责任编辑：丁荣源
封面设计：赵丽丽

近代物理
上 册
郑广垣 编著
复旦大学出版社出版
（上海国权路 579 号）
新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷
开本 850×1168 1/32 印张 11.5 插页 2 字数 331,000
1991 年 2 月第 1 版 1991 年 2 月第 1 次印刷
印数 1—3,000
ISBN 7-309-00617-8/O·89
定价：3.80 元

前　言

自本世纪初以来，物理学建立了一些新的分支学科，如原子和分子物理学、原子核物理学、固体物理学、粒子物理学、天体物理学等。这不仅加深了人类对自然界的认识，而且为一些重大的现代科学技术奠定了理论基础。通常将这些新的物理学分支统称为近代物理，以别于经典物理。随着教学改革的深化，越来越多的理工科专业感到在基础物理教学中有必要使学生对近代物理中的一些基本概念和内容有所了解，以利于他们毕业后参加四化建设工作。复旦大学电子工程系自1982年起即为二年级学生开设近代物理课，作为基础物理教学的一部分。这是一年的课程，每周四学时(包括习题课)。本书即根据作者讲授这一课程的讲稿编写而成的。

相对论和量子力学是近代物理的两大理论基础。没有这两大理论基础就无法深入了解原子、原子核，无法解释固体、半导体的各种特性。因此，本书先介绍相对论和量子力学的一些基本观点和概念，然后运用这些概念来讨论原子、分子、固体、半导体、原子核等。由于固体、半导体中的电子遵从量子统计，故对量子统计法也作了适当介绍。

在基础物理的水平上讲授近代物理，教学重点无疑应放在对有关的概念和规律的物理分析和阐释上。因此本书对各种问题都尽可能从物理上予以深入浅出的分析和阐述，以帮助读者建立正确的物理概念和清晰的物理图像。至于对问题的严格理论处理则留待专门课程中去完成。

近代物理涉及面广，新概念、新方法、新原理多，很难在一门课或一本书中予以全面反映。因此，本书只是对其中最基本的，也是学生在今后工作中有较多机会要接触到的内容，如原子物理、固体物理、半导体物理中的基本概念作较深入的阐述；其他的内容，如粒子物理，则只作简单的介绍。对相对论和量子力学则只介绍为说明本书其余部分内容

所必需的基本概念和原理。由于另有习题课，故在本书中未特别列出例题。

钟万蘅同志在讲授近代物理时曾采用本书的内容，在成书过程中又阅读了全部书稿，提出了宝贵意见并编选了习题，特此致谢。

书中疏漏错误之处如蒙读者指正，作者将不胜感谢。

郑广垣

1990年8月于复旦大学

目　　录

上　册

前　　言 ······································· 1

第一章　狭义相对论Ⅰ ······································· 1

§1.1　伽利略相对性原理 ······································· 1

§1.2　狭义相对论的假设 ······································· 7

§1.3　迈克耳孙-莫雷实验 ······································· 9

§1.4　同时性的相对性 ······································· 13

§1.5　时间膨胀与长度收缩 ······································· 16

§1.6　洛伦兹变换 ······································· 26

§1.7　多普勒效应 ······································· 30

§1.8　四维空时 ······································· 35

习题 ······································· 41

第二章　狭义相对论 Ⅱ ······································· 47

§2.1　相对论性动量 ······································· 47

§2.2　相对论性能量 ······································· 53

§2.3　动量和能量的洛伦兹变换 ······································· 59

§2.4　动量-能量四元矢 ······································· 64

习题 ······································· 67

第三章　电磁辐射的粒子性 ······································· 70

§3.1　黑体辐射 ······································· 70

§3.2　光电效应 ……………………………………………………78
§3.3　康普顿效应 …………………………………………………82
§3.4　电子偶的产生和湮没 …………………………………………86
习题……………………………………………………………………90

第四章　实物粒子的波性………………………………………………94
§4.1　德布罗意假设 ………………………………………………94
§4.2　物质波的实验验证 ……………………………………………96
§4.3　波粒二象性和物质波的统计诠释 ……………………………… 101
§4.4　测不准原理 ………………………………………………… 104
习题…………………………………………………………………… 108

第五章　量子力学初步………………………………………………… 111
§5.1　薛定谔方程 ………………………………………………… 111
§5.2　力学量的平均值和算符表示 ………………………………… 116
§5.3　定态薛定谔方程 …………………………………………… 120
§5.4　阶跃势、势垒和隧道效应 ………………………………… 123
§5.5　一维无限深势阱 …………………………………………… 132
§5.6　线性谐振子(简谐振子) …………………………………… 138
附录…………………………………………………………………… 147
习题…………………………………………………………………… 150

第六章　核型原子……………………………………………………… 154
§6.1　原子的核式结构 …………………………………………… 154
§6.2　原子的光谱 ………………………………………………… 169
§6.3　玻尔的氢原子理论 ………………………………………… 172
§6.4　类氢离子 …………………………………………………… 180
§6.5　夫兰克-赫芝实验………………………………………… 187
习题…………………………………………………………………… 190

第七章 单电子原子…………194
§7.1 单电子原子的薛定谔方程 …………194
§7.2 单电子原子的波函数和能级 …………198
§7.3 几率密度 …………212
§7.4 轨道角动量 …………219
§7.5 跃迁率和选择定则 …………225
习题…………232

第八章 单电子原子的精细结构…………235
§8.1 电子自旋 …………235
§8.2 自旋-轨道相互作用…………239
§8.3 总角动量 …………242
§8.4 氢原子的能级精细结构和光谱精细结构 …………246
§8.5 兰姆移位 …………255
习题…………258

第九章 多电子原子Ⅰ…………260
§9.1 全同粒子 …………260
§9.2 反对称波函数和泡利不相容原理 …………262
§9.3 氦原子 …………267
§9.4 多电子原子的辏力场近似 …………275
§9.5 原子的壳层结构和元素的周期系 …………282
习题…………293

第十章 多电子原子 Ⅱ…………296
§10.1 剩余库仑相互作用和自旋-轨道相互作用 …………296
§10.2 *LS* 耦合…………299
§10.3 *LS* 耦合的谱项…………302
§10.4 *LS* 耦合的精细结构…………308
§10.5 *jj*耦合…………311

§10.6 多电子原子的光谱……………………………… 314
§10.7 X射线谱……………………………………… 319
习题……………………………………………… 327

第十一章 磁场中的原子……………………………… 330
§11.1 原子的磁矩……………………………………… 330
§11.2 拉莫尔旋进和原子磁矩的取向能……………………… 335
§11.3 斯特恩-革拉赫实验 ……………………………… 339
§11.4 塞曼效应及其经典解释……………………………… 343
§11.5 塞曼效应的量子解释……………………………… 348
§11.6 帕邢-巴克效应(强磁场下的塞曼效应) ……………… 355
习题……………………………………………… 358
元素周期表……………………………………………… 361

第 一 章

狭义相对论 I

本章和下章介绍狭义相对论．在本章中，我们先说明狭义相对论的基本假设，然后藉助于假想实验从这些基本假设推论出同时性、空间和时间的相对性，接着在此基础上从物理上导出满足狭义相对论基本假设的洛仑兹变换．狭义相对论的有些推论和预言似乎和我们的直觉与常识相矛盾，但是它们都经受了实验的严格检验，结果发现这些推论和预言都是正确的．

在下一章中我们将着重说明相对论性动量和能量．

§1.1 伽利略相对性原理

我们在研究物体的运动时，首先要选定参照系．在运动学中，参照系可以任意选择．但牛顿运动定律却不是对任何参照系都成立的，它只对惯性参照系成立．考虑两个彼此作相对匀速直线运动的惯性参照系 $S(O\text{-}xyz)$ 和 $S'(O'\text{-}x'y'z')$．$(O\text{-}xyz)$ 和 $(O'\text{-}x'y'z')$ 分别为 S 系和 S' 系中的坐标系，我们令它们相应的坐标轴彼此平行，并且公共的 $x\text{-}x'$ 方向即两参照系的相对运动方向．现有一物体 P，它在某一时刻在 S 系中的位置为 (x,y,z)，在 S' 系中的位置为 (x',y',z')．由图 1.1-1 可以看出 (x,y,z) 和 (x',y',z') 间存在着下列关系：

$$\begin{cases} x = x' + x'_0 \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \tag{1.1-1a}$$

$$\begin{cases} x' = x + x_o' \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \tag{1.1-1b}$$

式中 x_0' 为 S' 系的原点 O' 在 S 系中的位置，$x_{o'}$ 为 S 系的原点 O 在 S' 系中的位置。式(1.1-1a)和(1.1-1b)与我们的"常识"相符。

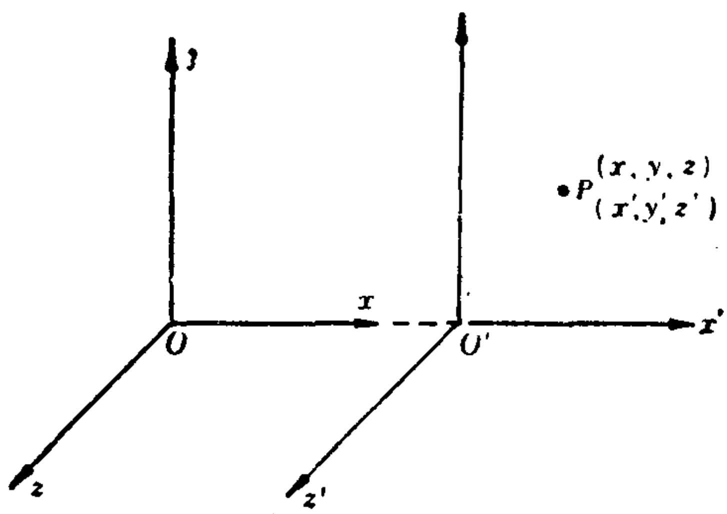

图 1.1-1

由于 S 系和 S' 系有相对运动，要确定 $x_{o'}$ 和 $x_{o'}$，我们不仅需要知道相对运动的速度，而且还需要知道时间。为此我们在原点 O 和 O' 处各放置一只时钟，使 S 系和 S' 系中的观察者都能用自己的钟来测定时间。我们先将这两只时钟在相对静止时校得快慢相同，并且当原点 O 和 O' 重合时将它们的指针都拨到零。至于这两只钟有相对运动时其快慢是否会发生变化，我们对之暂时不作任何假设。在 S 系中的观察者看来，S' 系的原点 O' 以速率 v 沿 x 轴运动，如图 1.1-2 所示。由匀速直线运动的定义可知

$$x_{o'} = vt$$

其中 t 为 s 系中的观察者测出的时间。将此关系式代入式(1.1-1a)，我们得到

$$\begin{cases} x = x' + vt \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

此式可改写成

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \tag{1.1-2a}$$

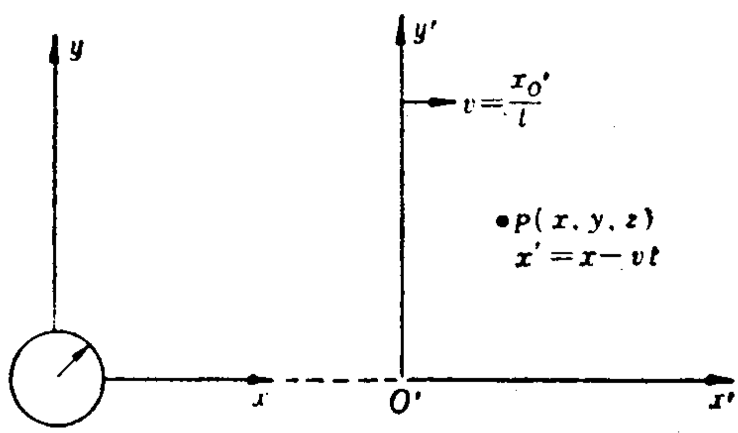

图 1.1-2

但在 S' 系中的观察者看来，S 系的原点 O 以速率 v' 沿 $-x'$ 轴运动，如图 1.1-3 所示。于是有

$$x_{O'} = -v't',$$

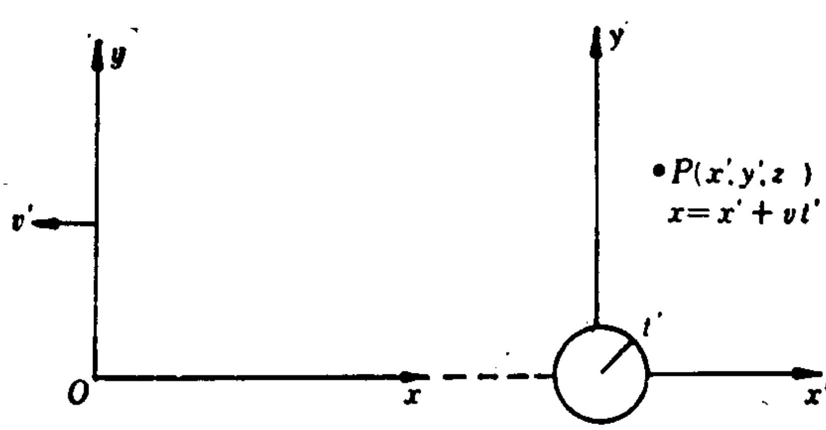

图 1.1-3

t' 为由 s' 系中的观察者测出的时间。将此关系式代入式(1.1-1b)得

$$\begin{cases} x' = x - v't' \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

此式可改写成

$$\begin{cases} x = x' + v't' \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

考虑到 S 系和 S' 系间存在着一定的对称性，如果 S 系中的观察者认为相对运动系由于 S' 在运动，那么 S' 系中的观察者将认为这一相对运动系由于 S 系在运动。因此 v 和 v' 必定大小相同，即

$$v = v'.$$

利用这一关系，上式可写成

$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \tag{1.1-2b}$$

将式(1.1-2a)和(1.1-2b)中的第一式相加，我们得到

$$t = t' \tag{1.1-3}$$

这一结果意味着两只时钟在相对静止时以同样的快慢计时，在彼此作相对匀速直线运动时也以同样的快慢计时。我们没有理由认为 S 系中的时钟快慢与 S' 系的运动有关，因此式(1.1-3)表明 S' 系中的时钟快慢与其相对于 S 系运动与否无关，而且还表明它所测得的时间与其在绝对空间中的位置无关。这就是说时间是绝对的、均匀的，它能独立于参照系来定义。

将上面的结果归纳起来，我们得到两个彼此作匀速直线运动的惯性参照系中的坐标变换式

$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \tag{1.1-4a}$$

$$\begin{cases}x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t\end{cases} \qquad (1.1\text{-}4b)$$

式(1.1-4)称为伽利略变换公式，简称伽利略变换。

由伽利略变换可知

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = t_2 - t_1 = \Delta t$$

即时间间隔在所有的惯性参照系中都是相同的。对于空间间隔则有

$$\begin{aligned}\Delta x' &= x_2' - x_1' = (x_2 - vt_2) - (x_1 - vt_1) \\ &= (x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1) = \Delta x - v(t_2 - t_1)\end{aligned}$$

显然，要空间间隔的这一概念有意义，我们对 x_2 和 x_1 的测量必需同时进行，故有 $t_2 = t_1$

$$\Delta x' = \Delta x$$

即空间间隔在所有的惯性参照系中也都是相同的。因此按照伽利略变换，空间间隔和时间间隔都是绝对的，它们对所有的惯性参照系都相同，与各惯性参照系的相对速度 $\boldsymbol{v}$ 无关。

由式(1.1-4)和速度的定义可得出 S 系和 S' 系中的速度变换关系式

$$\begin{cases}\dot{x} = \dot{x}' + v \\ \dot{y} = \dot{y}' \\ \dot{z} = \dot{z}'\end{cases} \qquad (1.1\text{-}5a)$$

$$\begin{cases}\dot{x}' = \dot{x} - v \\ \dot{y}' = \dot{y} \\ \dot{z}' = \dot{z}\end{cases} \qquad (1.1\text{-}5b)$$

式中 $\dot{x} = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$，$\dot{x}' = \dfrac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'}$，余类推。式(1.1-5)称为伽利略速度变换公式，它告诉我们，对于同一运动物体，S 系中的观察者和 S' 系中的观察者所测得的速度并不相同。

S 系和 S' 系中的加速度变换关系式为

$$
\begin{cases}\ddot{x}'=\ddot{x}\\ \ddot{y}'=\ddot{y}\\ \ddot{z}'=\ddot{z}\end{cases} \tag{1.1-6}
$$

其中 $\ddot{x}=\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$，$\ddot{x}'=\dfrac{\mathrm{d}^2x'}{\mathrm{d}t'^2}$，余类推．式(1.1-6)表明加速度在伽利略变换下是不变量．

现在来考虑一组粒子，设其相互作用只取决于粒子之间的相对位置(例如万有引力相互作用)，于是在 S 系中第 j 个粒子对第 i 个粒子的作用力可写成$(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)$ 的函数 $\boldsymbol{F}_{ji}(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)$，$\boldsymbol{r}_i$ 和 $\boldsymbol{r}_j$ 分别为第 i 个粒子和第 j 个粒子的位矢．在 S' 系中，这一作用力则为 $\boldsymbol{F}_{ji}(\boldsymbol{r}'_i-\boldsymbol{r}'_j)$．在 S 系中，第 i 个粒子的运动方程为

$$
m_i\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}_i}{\mathrm{d}t^2}=\sum_{j\neq i}\boldsymbol{F}_{ji}(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j) \tag{1.1-7}
$$

式中 m_i 为第 i 个粒子的质量．由式(1.1-6)，

$$
\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}_i}{\mathrm{d}t^2}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}'_i}{\mathrm{d}t'^2}
$$

且
$$
\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j=\boldsymbol{r}'_i-\boldsymbol{r}'_j
$$

故有
$$
\boldsymbol{F}_{ji}(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)=\boldsymbol{F}_{ji}(\boldsymbol{r}'_i-\boldsymbol{r}'_j)
$$

将这些关系式代入式(1.1-7)得

$$
m_i\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}'_i}{\mathrm{d}t'^2}=\sum_{j\neq i}\boldsymbol{F}_{ji}(\boldsymbol{r}'_i-\boldsymbol{r}'_j) \tag{1.1-8}
$$

按照经典力学，质量是不变量，同一粒子在不同的惯性参照系中具有相同的质量．因此，式(1.1-8)即第 i 个粒子在 S' 系中的运动方程，它与 S 系中的运动方程式(1.1-7)形式上完全相同．如果两个粒子间的相互作用取决于两者的相对速度，我们也得出同样的结果．从这个例子我们看到牛顿运动定律在伽利略变换下保持不变，它们在不同的惯性参照系中具有相同的形式，这种情形称为协变性．经典力学的其他定律对伽利略变换也保持协变性．例如，我们很容易证明动量守恒定律对伽利略变换是协变的．虽然按照伽利略变换一体系碰撞前（或碰撞后）在 S 系中的总动量与 S' 系中的总动量并不相同，但碰撞前的总

动量与碰撞后的总动量相等这一动量守恒定律的形式在S系和S'系却相同。因此，在伽利略变换下，力学定律在不同的惯性参照系中具有完全相同的形式。这一结论称为伽利略相对性原理。根据这一原理，静止在不同惯性参照系中的观察者对同一力学现象可能得出不同的观察结果，但由此而得到的结论——力学定律——却完全相同。换言之，所有惯性参照系都是等效的，没有一个力学现象能区分出不同的惯性参照系。

§1.2 狭义相对论的假设

在上一节中，我们看到经典力学的定律在伽利略变换下是不变的。它们对每一个惯性参照系都具有相同的形式。我们只要在一个惯性参照系中导出了力学定律就可以不加修正地应用到其他惯性参照系中去，不但定律的形式不变，而且定律中的物理常数在每一个惯性参照系中都具有相同的数值。除了力学定律，物理学中的其他定律是否也这样呢？它们对伽利略变换是否也具有协变性？换言之，它们对每一个惯性参照系是否也具有相同的形式？为了回答这个问题，让我们来看一下电磁学的定律。十九世纪中叶，麦克斯韦将电磁学的规律总结归纳成著名的麦克斯韦方程组，并且从这一方程组导出了电磁场的波动方程。式(1.2-1)就是自由空间的电场和磁场的波动方程：

$$\begin{cases} \nabla^2 \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \dfrac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \boldsymbol{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \dfrac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2} \end{cases} \tag{1.2-1}$$

其中
$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

这组方程不但表明电场和磁场系以电磁波的形式在空间传播，而且从方程的形式可知电磁波在自由空间的传播速度c即由上述方程中对时间的两次微商项前面的系数$\varepsilon_0\mu_0$确定*。

* 典型的波动方程形式是$\dfrac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \dfrac{1}{v^2}\dfrac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$．其解为$\psi = f(x \pm vt)$，它代表以速度$v$沿$x$方向传播的波，故波的传播速度取决于这种形式的波动方程中对时间的两次微商项前的系数。

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=3\times10^8\text{m/s}$$

这一值与实验测得的光速一致,从而肯定了光波即电磁波.式(1.2-1)在伽利略变换下是否保持不变呢?答案是否定的.设式(1.2-1)对 S 系成立,利用伽利略变换将它变换到 S' 系中,我们将发现它不再保持原来的形式. 其实不用计算,我们直接用物理分析也可得到这一结论. 式(1.2-1)对 x、y、z 是对称的,因此在 S 系中,电磁波以波速 $c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ 向各个方向传播,波速 c 是各向同性的. 但是,根据伽利略变换,沿 x 方向传播的波在 S' 系中看来其传播速度将为 $c-v$,S' 系中的波动方程必需反映出电磁波在该系中沿不同方向的传播速度不同这一特点. 它不可能具有式(1.2-1)的形式.

只有力学定律对伽利略变换保持协变,而电磁学定律却并非如此,这在上世纪末和本世纪初给物理学家带来了极大的困惑. 摆在他们面前的问题为:是否相对性原理只适用于力学,而对电磁学并不存在相对性原理?如果是这样,那么在电磁学中就应该有一个从优的参照系,只有在该参照系中,光速才等于 c.是否麦克斯韦的电磁理论并不正确,而正确的电磁理论对伽利略变换是协变的?如果是这样就应去寻找正确的电磁理论. 是否存在着一种既适用于力学又适用于麦克斯韦的电磁学理论的相对性原理?如果是这样,它不可能是伽利略相对性原理,但这样一来,力学定律需要修正. 为了寻求这些问题的解答,物理学家从上世纪起曾进行了一系列的实验,这些实验可分成三类:一类是企图找到与麦克斯韦的电磁理论有偏离的实际情况,从而说明麦克斯韦的理论并不正确;一类是企图找到对电磁学定律从优的参照系,从而说明对电磁学定律不存在相对性原理;还有一类是企图观察到对经典力学定律偏离的实验. 关于这些实验,我们只介绍其中最著名的迈克耳孙-莫雷实验.

但是,爱因斯坦却直接从理论上对上述问题作出了回答. 1905年,他在大部分上述实验尚未进行、对已进行的重要实验(例如迈克耳孙-