

物理 演示实验

Physics

黄晓虹 主编

Demonstrations



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

物理演示实验

黄晓虹 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容简介

本书是在“大学物理演示实验”课程讲义的基础上整理而成,罗列了近 70 项的物理演示实验,涵盖了力学、热学、电磁学、光学及自制教具等内容。每个演示实验内容包括了仪器介绍、操作和现象、原理解析等,大部分实验还设置了知识拓展或应用举例,便于读者了解进一步探索实验所涉及的相关知识。此外,还对演示实验中涉及的物理学家作了简单的介绍,便于读者了解一些相关的背景知识。书中“自制教具”这部分内容适合于中学教师用于课堂演示实验,提高学生学习物理的兴趣,从而消除对物理的畏惧之心。

本书可以作为“大学物理演示实验”课程的教材,对从事基础物理教学的教师以及对物理现象感兴趣的读者都有非常好的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

物理演示实验 / 黄晓虹主编. —杭州:浙江大学出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-308-10656-6

I. ①物… II. ①黄… III. ①物理学—实验
IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 226718 号

物理演示实验

黄晓虹 主编

责任编辑	徐素君
封面设计	林智广告
出版发行	浙江大学出版社 (杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007) (网址: http://www.zjupress.com)
排版	杭州中大图文设计有限公司
印刷	浙江云广印业有限公司
开本	710mm×1000mm 1/16
印张	11
字数	200 千
版印次	2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
书号	ISBN 978-7-308-10656-6
定价	25.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

我校大学物理演示实验展示厅始建于2003年夏,开创了浙南地区由高校创办、面向社会的物理科学普及活动的先河。经过近几年的建设,物理演示实验展示厅由最初的30套演示实验项目增至目前的近100套,资产达到80多万元。由于物理演示实验能把原理深奥、构思巧妙、技术先进、效果突出的实验呈现到学生面前,使学生开阔眼界、启迪思维、培养兴趣、开发智力,对提高学生学习物理的兴趣和理解物理现象起着极其重要的作用。因此,自创办以来,物理演示实验展示厅面向学校和社会团体开放百余次,参观人次超过万人,其中包括在校大学生,温州地区各级中学的师生,以及很多社会单位。由此可知,物理演示实验展示厅在充分发挥物理实验教学示范中心的辐射示范作用中起到了举足轻重的作用。但是,由于物理演示展示厅缺乏与之配套的教材,给展示厅的教育功能的拓展,持续提升学生和公众的科学素养,带来了一定的阻力。

目前,我校已经开设了大学物理演示实验课程,它对学生观察物理现象、增加感性知识、提高学习兴趣方面,对培养学生分析问题、解决问题的能力方面,无疑是重要的。尤其是大学物理演示实验让学生自己动手观察实验、思考问题,使学生对大学物理课程中的基本概念、基本理论、基本方法能够比较准确地理解,这对培养学生综合应用能力和开拓创新精神等方面显示出其独特的魅力。但是由于缺乏相配套的教材,给教师更好地开展教学工作,提高教学效果带来了一定的困难。

所以,在这种情况下,当务之急是出版一本与展示厅演示器材相配套的教材。在众人的帮助下,这本教材终于编写成功。这本教材编写的指导思想依然是以学生为本,帮助学生加深理解课堂教学内容,促进学生思考,培养学生根据物理原理解决实际问题的能力,引导学生对现有的演示实验器材的原理进行探究分析,形成研究论文,以开拓学生的眼界,提升他们的科学素养等,因此本书不仅对每一个实验内容的原理作了简要的分析,而且还引入科学史的内容,并在每一项实验后面加入一定的知识拓展、应用举例等内容。

关于物理演示实验方面的教学改革还是刚刚起步,希望本教材的出版能有一个良好的开端。由于刚刚处于摸索起步阶段,编入书中的演示实验

只有近 70 项,而且难免会有许多不足之处。书中的缺点和错误,敬请读者批评指正。

参加这次编写的老师有黄晓虹(第一章力学演示实验部分)、黄运米(第二章热学演示实验部分)、蔡建秋(第三章电磁学演示实验部分,其中实验三十一由罗海军编写)、王振国(第四章光学演示实验部分,其中实验四十八、实验六十由金清理编写),罗海军(第五章自制教具部分),最后由黄晓虹统稿。编著本书的过程中,特别要感谢王振国老师,他不仅画了部分插图,而且还为演示仪器拍了照片,为编者提供了尽可能的帮助。感谢所有提出宝贵意见的老师們。

主 编

2012 年 9 月

目 录

第一章 力学演示实验	1
第一节 基础类	1
实验一 弹性碰撞	1
实验二 茹科夫斯基凳	4
实验三 车轮式进动演示仪	6
实验四 傅科摆	8
实验五 混沌摆	11
实验六 科里奥利力演示仪	13
实验七 直升飞机演示角动量守恒	16
实验八 能量穿梭机	19
实验九 锥体上滚	21
第二节 空气动力学	23
实验十 伯努利悬浮器	23
实验十一 飞机举力	25
实验十二 龙卷风模拟仪	27
第三节 振动与波	30
实验十三 昆特管	30
实验十四 声聚焦	33
实验十五 声波可见	35
实验十六 鱼洗	37
第二章 热学演示实验	39
实验十七 伽耳顿板	39
实验十八 麦克斯韦速率分布	41
实验十九 家用冰箱空调工作原理演示仪——热力学第二定律演示	44
实验二十 热电转换——温差电效应	47
实验二十一 沸腾球	51



实验二十二	饮水鸟	53
实验二十三	孔明灯	55
第三章 电磁学演示实验		57
实验二十四	法拉第笼	57
实验二十五	怒发冲冠	59
实验二十六	静电摆球	61
实验二十七	静电植绒	63
实验二十八	静电吹烛焰及富兰克林轮	65
实验二十九	静电风转筒	67
实验三十	静电除尘	68
实验三十一	维姆胡斯感应起电机	70
实验三十二	手触蓄电池	74
实验三十三	弹性跳环——跳环式楞次定律演示仪	76
实验三十四	涡电流演示	78
实验三十五	互感现象的演示	81
实验三十六	雅格布天梯	84
实验三十七	脚踏发电机	85
实验三十八	洛仑兹力演示仪	86
实验三十九	磁聚焦实验	89
实验四十	电磁炮	92
实验四十一	超导磁悬浮列车	94
实验四十二	太阳能应用——神舟号飞船仿真模型	97
实验四十三	大型扩散云雾室——宇宙射线观察	100
实验四十四	等离子球——魔灯	103
实验四十五	三相旋转磁场	106
第四章 光学演示实验		108
实验四十六	光纤通信	108
实验四十七	光学幻影——“看得见,摸不着”	112
实验四十八	偏振光实验	113
实验四十九	旋光色散	115
实验五十	激光倍频	120
实验五十一	留影板	121





实验五十二	红绿立体图	123
实验五十三	光栅立体图	125
实验五十四	光栅视镜	127
实验五十五	3D 影像系统	131
实验五十六	激光钢琴	135
实验五十七	人造火焰	137
实验五十八	魔术钱盒	139
实验五十九	海市蜃楼	141
实验六十	反射式白光再现全息图	145
第五章 自制教具		148
实验六十一	奇异的串联	149
实验六十二	光通信模拟演示	151
实验六十三	大气压强演示实验	154
实验六十四	非纯电阻电路中能量转化演示实验	155
实验六十五	神奇的魔箱	157
实验六十六	多功能碰撞小车	159
实验六十七	奇异碰撞小车	160
实验六十八	虹吸喷泉	162
实验六十九	简易光控电路演示仪	164
实验七十	奇特的杠杆	166
参考文献		168



第一章

力学演示实验

第一节 基础类

实验一 弹性碰撞(Elastic Collision)

仪器介绍

如图 1-1 所示,弹性碰撞演示仪由底座、钢球、支架、拉线、拉线调节螺丝等组成。每个钢球的大小和质量均相同。

操作与现象

若干个具有相同质量和半径的小球悬挂在同一高度上。当静止时,调节每个小球的悬线长度,确保所有小球在一条直线上。

将第一个小球拉起,然后释放,让其碰撞其他静止的小球,结果原先被拉起的小球会突然静止,而原先静止的最后一个小球会接过第一个球的速度,运动到第一个小球被拉起的高度,然后落下,如此来回往复。

同理,可以拉起 2 个、3 个……小球进行类似的实验。

注意:在实验过程中使小球的质心始终处于同一平面,否则会发生非对心碰撞从而影响演示实验的效果;小球拉起的幅度不宜太大(建议摆角小于 30°),以免发生激烈碰撞而使拉线断裂。

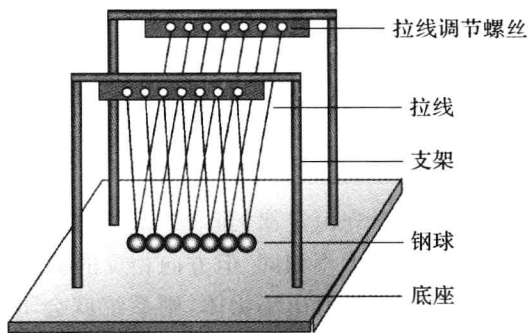


图 1-1 弹性碰撞演示仪

原理解析

设两个小球的质量分别为 m_1 和 m_2 , 它们在碰撞前的速度为 v_{10} 和 v_{20} , 对心碰撞后的速度为 v_1 和 v_2 , 根据动量守恒定律有:

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (1-1)$$

当两球发生完全弹性碰撞, 则机械能守恒定律有:

$$\frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (1-2)$$

若其中一个球 m_2 静止, 即 $v_{20} = 0$ 时, 可得碰撞后的速度为

$$\begin{cases} v_1 = \frac{(m_1 - m_2) v_{10}}{m_1 + m_2} \\ v_2 = \frac{2 m_1 v_{10}}{m_1 + m_2} \end{cases} \quad (1-3)$$

如果两个小球的质量相等, 即 $m_1 = m_2$, 则由式(1-3)可得

$$v_2 = v_{10} \quad v_1 = v_{20} = 0$$

由此可知, 质量相等的两个小球相碰后, 第一个小球静止, 第二个球获得第一个球的速度之后继续去碰撞第三个小球, 以此类推, 实现小球间的动量和能量的传递。事实上, 由于小球间的碰撞并非理想的弹性碰撞, 会有一定的能量损失, 所以最后小球还是会停下来。

知识拓展

根据动量守恒定律, 当一个系统向后高速射出一个物体时, 该系统会获得与小物体大小相同、但方向相反的动量, 即系统会获得向前的速度。如果系统不断向后射出小物体, 则系统就会不断向前加速。火箭就是利用了动量守恒原理不断推进的。在火箭内装置了大量的燃料, 燃料燃烧后会产生高温高压的气体, 通过火箭的尾部不断向后高速喷出, 从而使火箭不断向前加速。通常, 单级火箭不可能把物体送入太空轨道, 必须采用多级火箭, 以接力的方式将航天器送入太空轨道。

火箭是中国最先发明的, 已是世界公认。自三国时起, 史书上就有关于“火箭”的记载。此时的火箭只能是一种在箭头上附着像油脂、松香、硫黄之类易燃物质, 点燃后用弓或弩射出去, 用来延烧敌方人员、军械和营房, 充其量只是“带火的箭”。真正由火药喷射推进的火箭可能是南宋时期发明, 在周密《武林旧事》有记载, 称之起火, 即依靠所附带的火药燃料着火后, 产生大量的带火星的气体向后喷射, 从而产生一种反冲力推动其向前飞行的一



种烟火玩物,定向性能不好。到了明代,火箭就能较好地解决定向问题,而且有了较大的运载能力,因而在军事上得到了广泛的应用。值得注意的是:《武备志》^①中记载着“火龙出水”(如图 1-2 所示)的火箭。这是一种用于水战中的二级火箭。先用四支大火箭筒燃烧喷射,由此产生的反作用力把龙形筒射出去,当这四支火箭里的火药燃料烧完之后,再引燃龙腹中的神机火箭,把它们射向敌方,能射中二、三里远的敌方船只。



图 1-2 火龙出水

^① 中国明代大型军事类书,是中国古代字数最多的一部综合性兵书。明茅元仪(浙江吴兴人)编辑,240 卷,文 200 余万字,图 738 幅。清乾隆年间被列为禁书。



实验二 茹科夫斯基凳(Zhukovski Chair)

仪器介绍

如图 2-1 所示,转盘上安置了一张可绕竖直轴自由转动的茹科夫斯基^①凳。

操作与现象

操作者坐在凳上,手持哑铃,两臂平伸,由旁人助其旋转或自己设法转动起来,然后慢慢收起双臂,可以看到转速不断增大。若把两手再平伸,则转速就由大变小。

原理解析

系统绕某一定轴转动时,若所受的合外力矩为零,则系统的角动量守恒,即 $J = I\omega = \text{恒量}$,式中 I 为系统的转动惯量。茹可夫斯基凳实验中,因为人的双臂并不产生对转轴的外力矩,忽略转轴的摩擦,系统的角动量应保持守恒。根据转动惯量的平行轴定律,手臂伸开时系统的转动惯量 I_2 明显大于双臂收起时的转动惯量 I_1 ,由角动量守恒定律可知,当 $I_2 > I_1$ 时,则 $\omega_2 < \omega_1$,所以收起双臂时系统转速会增大。反之,系统转速则会减小。

应用实例

冰上舞蹈演员在做旋转动作时,当他们逐渐收拢双臂时,旋转速度就越来越大,似乎能旋转起一阵风来,真是惊艳四座。



图 2-1 茹科夫斯基凳



^① 茹科夫斯基(Zhukovski, Nikolai Egorievich 1847—1921):俄国著名空气动力学家、现代航空科学的开拓者,为苏联发展航空科技奠定了基础,被称为“俄罗斯航空之父”。第一次世界大战前,茹科夫斯基曾到军官飞行员训练班任教。茹科夫斯基凳可用于训练飞行员对抗高速的旋转。



跳水运动员在空中做翻滚动作的时候,总会收拢下肢,双手抱膝,把身体尽量地卷曲起来,目的是为了减小运动员绕自身质心的水平轴的转动惯量,根据角动量守恒定律,就可以加大转速,快速的旋转总是会引来掌声一片;运动员到了接近水面时,便会舒展四肢,把转动惯量变得最大,角动量变得最小,这样就能比较方便控制自己的身体姿势,以最佳的姿势入水,获得好成绩。



实验三 车轮式进动演示仪 (Wheel-typed Precession Demonstrator)

仪器介绍

如图 3-1 所示,由转轮(自行车轮子)、平衡重物、横杆、支架、支点等组成。

操作与现象

1. 观察刚体的定向转动

调平衡重物,使系统的重心通过支点,即调成水平平衡状态。左手握横杆使其保持水平状态,右手快速地转动转轮,松开双手后,不管如何旋转支架,都可观察到转轮的转轴方向始终保持不变。

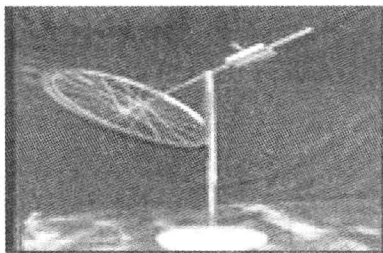


图 3-1 车轮式进动演示仪

2. 观察进动和章动

调节平衡重物的位置,使系统重心不通过支点,即整个系统对支点轴有重力矩作用,如此一来,仪器就会朝一侧略微倾斜。左手握横杆使其保持水平状态,右手快速地转动转轮,松开双手后,可观察到转轮自转的同时,其自转轴(横杆)还会绕竖直轴转动,称为进动。横杆在进动过程中,还会出现微小的上下周期性摆动,可用手指轻压一下转轮感受一下,即所谓产生了章动。

原理解析

1. 刚体的定向转动

此时系统处于水平平衡状态(重心通过支点),根据角动量守恒定律:对于某一定点(支点),系统所受的合外力矩为零,则系统对于该定点的角动量矢量保持不变。所以,在转轮转动过程中,其转轴的方向始终保持不变。

由此可知,绕对称轴高速转动的陀螺仪的稳定性,正是因为角动量守恒的原因。即便受到实际当中不可避免的外力矩(摩擦)的作用,如果外力矩较小,由此带来的角动量的改变相对于陀

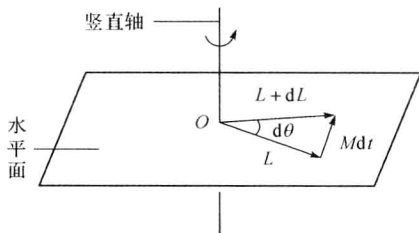


图 3-2 进动效应的解释



螺仪本身很大的角动量来说是很小的,可忽略不计,角动量依旧保持不变。因此,无论我们怎么去扰动它,都不会使陀螺仪的转轴方向发生改变。

2. 进动和章动

当系统重心不通过支点时,整个系统对支点轴受重力矩作用,角动量不守恒。

假设转轮的角动量 $\mathbf{L}$ 如图 3-2 所示,由角动量定律可知,在 dt 时间内转轮对支点 O 的自转角动量 $\mathbf{L}$ 的增量为 $d\mathbf{L} = \mathbf{M}dt$,其中 $\mathbf{M}$ 是转轮所受的对支点 O 的重力矩,方向水平向内,如图 3-2 所示。显然,下一时刻的角动量为:

$$\mathbf{L} + d\mathbf{L} = \mathbf{L} + \mathbf{M}dt$$

由于 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{L} + d\mathbf{L}$ 的方向均在水平面内,所以转轮的自转轴的方向不会向下倾斜,而只是在水平面内偏转,就会形成自转轴的转动,即进动。由于外力矩 $\mathbf{M}$ 方向始终与角动量方向垂直,因此外力矩只改变角动量的方向,而不会改变角动量的大小,即转轮的轴向会发生改变而转速并不会变化。

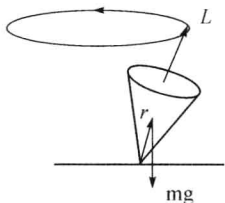


图 3-3 陀螺仪的进动性

陀螺仪的进动性也正是由于其在自转的同时因重力会向一边倾斜而受到一个垂直于纸面向里的重力矩($\mathbf{r} \times m\mathbf{g}$)的作用,如图 3-3 所示,从而发生进动。

章动的效果是为了使进动仪的重心保持在低于起始点的水平上,由此释放出来的势能提供了进动和章动所需的动能。

知识拓展

陀螺仪是一种既古老又很有生命力的仪器,从第一台真正实用的陀螺仪问世以来已有大半个世纪,但直到现在,仍旧吸引着人们对其进行研究。陀螺仪最主要的基本特性是它的稳定性和进动性。

陀螺仪最早是用于航海导航,但随着科学技术的发展,它在航空和航天事业中也得到广泛的应用。现代陀螺仪是一种能够精确地确定运动物体方位的惯性导航仪器,因而不仅可以作为指示仪表,而且更重要的是它可以作为自动控制系统中的一个敏感元件,即作为信号传感器。根据需要,陀螺仪能提供准确的方位、水平、位置、速度和加速度等信号,以供驾驶员来控制飞机、舰船或航天飞机等按一定的航线飞行,而在导弹、卫星运载器或空间探测火箭等航行器的制导中,则直接利用这些信号完成航行器的姿态控制和轨道控制。作为稳定器,陀螺仪能使列车在单轨上行驶,能减小船舶在风浪中的摇摆,能使安装在飞机或卫星上的照相机相对地面稳定等等。作为精密测试仪器,陀螺仪能够为地面设施、矿山隧道、地下铁路、石油钻探以及导弹发射等提供准确的方位基准。



实验四 傅科摆(Foucault Pendulum)

仪器介绍

实验仪器如图 4-1 所示。

操作与现象

(1) 将单摆拉开一定角度(不超过底盘限定的范围),使其在竖直面内摆动。

(2) 调节底盘上的定标尺,使其方向与单摆的摆动方向一致。

(3) 经过一段时间(大约 1~2h),观察单摆的摆动面与定标尺方向的夹角(大约 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$)。

原理解析

傅科摆是法国物理学家傅科^① 1851 年在巴黎国葬院的圆拱屋顶上悬挂的一个长约 67 米、摆锤重 28 千克的大单摆。随着每一次摆动,地上巨大的沙盘便留下摆锤运动的痕迹,令观摩者相顾惊诧的事情发生了,这只大摆自始至终都没有按一条直线来回往复,在经过一段时间后,摆动方向偏转了很大角度。傅科宣布:“我们看到了地球的转动。”

地球自西向东旋转,其角速度 ω 的方向沿地轴指向北极。处于北半球某点的运动物体速度 v 方向(如图 4-2 所示),那么该物体所受的科里奥利力的表达式为:

$$f_c = 2m\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$$

科里奥利力 f_c 的方向垂直于一个平面,这个平面是由 v 和 ω 的方向所组成的平面,所以 f_c 垂直于 v ,使 v 发生偏转。图 4-3 所示的是北半球傅科摆摆



图 4-1 傅科摆

^① 莱恩·傅科(Léon Foucault, 1819-1868):法国物理学家。早年学习外科和显微医学,后转向照相术和物理学方面的实验研究。他的研究工作偏重于仪器的制备、新实验方法的设计,以及对物理量的精确测量。他最出色的工作是光速的测定(为此获得物理学博士学位)、“傅科摆”实验以及提出涡电流理论。



动平面的旋转示意图。

在地球的两极,傅科摆的摆动平面 24 小时转一圈,而在赤道上,傅科摆没有方向旋转的现象;在两极与赤道之间的区域,傅科摆方向的旋转速度介于两者之间。傅科摆在地球的不同地点旋转的速度不同,说明了地球表面不同地点的线速度不同,因此,傅科摆还可以用于确定摆所处的纬度。

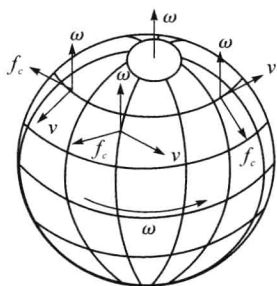


图 4-2 科里奥利力示意图

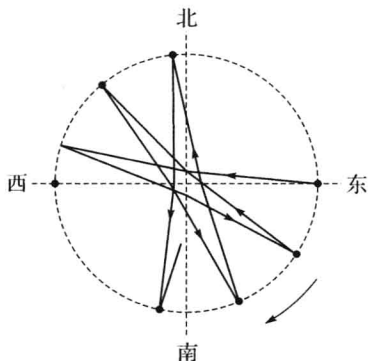


图 4-3 北半球傅科摆摆动平面的旋转轨迹

知识拓展

傅科从小喜欢动手做试验,最初傅科学习的是医学,后来才转行学习物理学。1862 年,傅科使用旋转镜法成功地测定了光速为 289000km/s 。傅科还在实验物理方面做出了一些贡献。比如,改进了照相术,拍摄到了钠的吸收光谱。在提出傅科摆实验的第二年,即 1852 年,他制造出了回转仪(陀螺仪)——现代航空、军事领域使用的惯性制导装置的前身。此外,他还发现了在磁场中的运动圆盘因电磁感应而产生涡电流,这被命名为“傅科电流”。

当然,最闪光的还是傅科摆实验,它非常简单地演示了地球自转的现象。傅科选择了一个 28 千克的铁球作为摆锤,当然傅科使用如此巨大的摆是有道理的。由于地球转动得较缓慢(相对摆的周期而言),需要一个比较长的摆线才能显出轨迹的差异。又因为空气阻力的影响,这个系统必须拥有足够的机械能(一旦摆开始运动,就不能给它增加能量)。

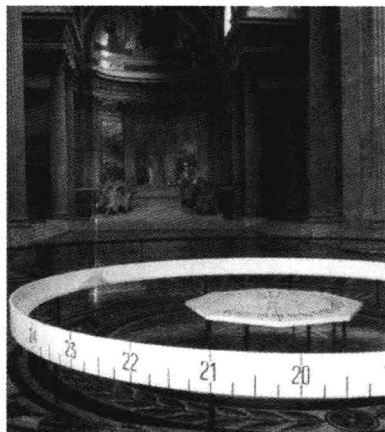


图 4-4 法国巴黎国葬院大厅内的傅科摆

