

天下文化

知識的世界

The Feynman Lectures on Physics  
The Definitive Edition  
Volume 2

# 電磁與物質 5

—— 磁性、彈性與流體

《費曼物理學講義》共有三大卷，  
展現了最偉大的物理教師——費曼博士的獨到見解，  
以及縱覽物理學的非凡功力。  
第II卷的主題為電磁與物質，共有五冊，  
第5冊闡釋磁性、彈性與流體等主題，涵蓋：順磁性與反磁性、  
鐵磁性、彈性學與彈性材料、乾水與濕水之流動、彎曲時空。

# The Feynman

## 費曼物理學講義 [II]

By Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands  
吳玉書、師明睿 譯 高涌泉 審訂

## 費曼物理學講義 II —— 電磁與物質

### (5) 磁性、彈性與流體

原 著 / 費曼、雷頓、山德士  
譯 者 / 吳玉書、師明睿  
審 訂 者 / 高涌泉  
顧 問 群 / 林和、牟中原、李國偉、周成功  
科學館總監 / 林榮崧  
責任編輯 / 徐仕美、林文珠  
美術編輯暨封面設計 / 江儀玲

出 版 者 / 天下遠見出版股份有限公司  
創 辦 人 / 高希均、王力行  
遠見·天下文化·事業群 董事長 / 高希均  
事業群發行人 / CEO / 王力行  
出版事業部總編輯 / 許耀雲  
法律顧問 / 理律法律事務所陳長文律師 著作權顧問 / 魏啓翔律師  
社 址 / 台北市 104 松江路 93 巷 1 號 2 樓  
讀者服務專線 / (02) 2662-0012 傳真 / (02) 2662-0007 ; 2662-0009  
電子信箱 / cwpc@cwgv.com.tw  
直接郵撥帳號 / 1326703-6 號 天下遠見出版股份有限公司

電腦排版 / 極翔企業有限公司  
製 版 廠 / 東豪印刷事業有限公司  
印 刷 廠 / 崇寶彩藝印刷股份有限公司  
裝 訂 廠 / 源太裝訂實業有限公司  
登 記 證 / 局版台業字第 2517 號  
總 經 銷 / 大和書報圖書股份有限公司 電話 / (02) 8990-2588  
出版日期 / 2010 年 1 月 29 日第一版第 1 次印行

定 價 / 380 元

原著書名 / **The Feynman Lectures on Physics, The Definitive Edition Volume 2**  
**by Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands**

Authorized translation from the English language edition, entitled THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS, THE DEFINITIVE EDITION VOLUME 2, 2nd Edition, ISBN: 0805390472 by FEYNMAN, RICHARD P.; LEIGHTON, ROBERT B.; SANDS, MATTHEW, published by Pearson Education, Inc, publishing as Benjamin Cummings.

Copyright © 2006 by California Institute of Technology

Complex Chinese Edition Copyright © 2010 by Commonwealth Publishing Co., Ltd., a member of Commonwealth Publishing Group

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

本書由 Pearson Education, Inc. 授權出版。未經本公司及原權利人書面同意授權，不得以任何形式或方法（含數位形式）複印、重製、存取本書全部或部分內容。

ISBN: 978-986-216-477-8 (英文版 ISBN: 0-8053-9047-2)

書號: BW1211



天下文化書坊 <http://www.bookzone.com.tw>

# 費曼物理學講義 II

## 電磁與物質

### 5 磁性、彈性與流體

The Feynman Lectures on Physics  
The Definitive Edition  
Volume 2

By Richard P. Feynman,  
Robert B. Leighton, Matthew Sands

吳玉書、師明睿 譯  
高涌泉 審訂

Feynman

# 費曼物理學講義 II

## 電磁與物質

### 5 磁性、彈性與流體 目錄

第34章	物質的磁性	13
	34-1 反磁性與順磁性	14
	34-2 磁矩與角動量	17
	34-3 原子磁體的進動	20
	34-4 反磁性	23
	34-5 拉莫定理	26
	34-6 古典物理中不存在反磁性及順磁性	28
	34-7 量子力學的角動量	30
	34-8 原子的磁能	35
第35章	順磁性與磁共振	39
	35-1 量子化的磁性能態	40
	35-2 斯特恩-革拉赫實驗	44
	35-3 拉比分子束法	46

35-4	塊材之順磁性	52
35-5	絕熱去磁冷卻	58
35-6	核磁共振	60

## 第36章

### 鐵磁性

65

36-1	磁化電流	66
36-2	$H$ 場	77
36-3	磁化曲線	80
36-4	鐵心電感	84
36-5	電磁鐵	88
36-6	自發磁化	93

## 第37章

### 磁性材料

105

- |      |        |     |
|------|--------|-----|
| 37-1 | 瞭解鐵磁性  | 106 |
| 37-2 | 熱力學性質  | 113 |
| 37-3 | 遲滯曲線   | 116 |
| 37-4 | 鐵磁材料   | 128 |
| 37-5 | 非常磁性材料 | 132 |

## 第38章

### 彈性學

139

- |      |        |     |
|------|--------|-----|
| 38-1 | 虎克定律   | 140 |
| 38-2 | 均勻應變   | 143 |
| 38-3 | 扭棒；切變波 | 153 |
| 38-4 | 曲樑     | 159 |
| 38-5 | 皺屈     | 165 |

## 第39章

### 彈性材料

171

- |      |         |     |
|------|---------|-----|
| 39-1 | 應變張量    | 172 |
| 39-2 | 彈性張量    | 178 |
| 39-3 | 彈性體內的運動 | 182 |
| 39-4 | 非彈性行為   | 189 |
| 39-5 | 計算彈性常數  | 193 |

## 第40章

### 乾水之流動

201

- |      |            |     |
|------|------------|-----|
| 40-1 | 流體靜力學      | 202 |
| 40-2 | 運動方程式      | 206 |
| 40-3 | 穩定流動—白努利定理 | 213 |
| 40-4 | 環流         | 222 |
| 40-5 | 渦旋線        | 226 |

## 第41章

### 濕水之流動

231

41-1	黏滯性	232
41-2	黏滯流動	238
41-3	雷諾數	241
41-4	流經圓柱體的流動	245
41-5	趨近零黏度	250
41-6	庫埃特流	251



## 第42章

### 彎曲時空

257

42-1	二維的彎曲空間	258
42-2	三維空間的曲率	272
42-3	我們的空間是彎曲的	275
42-4	時空幾何	278
42-5	重力與等效原理	280
42-6	重力場中的時鐘走速	281
42-7	時空的曲率	289
42-8	彎曲時空中的運動	291
42-9	愛因斯坦的重力論	295
	中英、英中對照索引	300

*The Feynman*

# 費曼物理學講義 II

目錄

## 電磁與物質

### 1 靜電與高斯定律

關於理查·費曼

修訂版序 費曼最寶貴的遺產

紀念版專序 最偉大的教師

費曼序

前言

第 1 章 電磁學

第 2 章 向量場的微分

第 3 章 向量積分學

第 4 章 靜電學

第 5 章 高斯定律的應用

第 6 章 各種情況下的電場

第 7 章 各種情況下的電場（續）

第 8 章 靜電能量

第 9 章 大氣中的靜電

## 2

# 介電質、磁與感應定律

中文版前言

- 第10章 介電質
- 第11章 介電質內部
- 第12章 靜電類比
- 第13章 靜磁學
- 第14章 各種情況下的磁場
- 第15章 向量位勢
- 第16章 感應電流
- 第17章 感應定律

### 3

## 馬克士威方程

- 第18章 馬克士威方程組
- 第19章 最小作用量原理
- 第20章 馬克士威方程組在自由空間中的解
- 第21章 馬克士威方程組在有電流與電荷時的解
- 第22章 交流電路
- 第23章 空腔共振器
- 第24章 波導
- 第25章 按相對論性記法的電動力學
- 第26章 場的勞侖茲變換

### 4

## 電磁場能量動量、折射與反射

- 第27章 場能量與場動量
- 第28章 電磁質量
- 第29章 電荷在電場與磁場中的運動
- 第30章 晶體內部的幾何結構
- 第31章 張量
- 第32章 緻密材料的折射率
- 第33章 表面反射



## 5

# 磁性、彈性與流體

第34章 物質的磁性

第35章 順磁性與磁共振

第36章 鐵磁性

第37章 磁性材料

第38章 彈性學

第39章 彈性材料

第40章 乾水之流動

第41章 濕水之流動

第42章 彎曲時空

中英、英中對照索引

*The Feynman*



## 第34章

# 物質的磁性

- 34-1 反磁性與順磁性
- 34-2 磁矩與角動量
- 34-3 原子磁體的進動
- 34-4 反磁性
- 34-5 拉莫定理
- 34-6 古典物理中不存在反磁性及順磁性
- 34-7 量子力學的角動量
- 34-8 原子的磁能

## 34-1 反磁性與順磁性

本章將討論材料的磁學性質。擁有最明顯磁性的材質是鐵，其他元素，如鎳、鈷，及低溫（ $16^{\circ}\text{C}$  之下）的釷，以及某些合金，也都有類似磁性。這種磁性，稱為**鐵磁性**，因為有顯著且複雜的特性，我們將另闢專章討論。然而，所有非鐵磁材料，都具有些許磁性，只是比起鐵磁材料，它們的磁性要小上千倍至百萬倍。這便是本章將要討論的普通磁性，也就是非鐵磁材料的磁學性質。

這種微弱的磁學效應可分為兩類。有一類材料會受磁場**吸引**；另一類則被**排斥**開來。與材料的電學效應相比較，不同之處在於介電質永遠會被電場所吸引。磁學效應有正負兩種符號，這兩種符號可藉由強力電磁鐵的實驗觀測到。如圖 34-1 所示，磁鐵的一極具有尖銳的端點，另一極則呈平坦結構，尖端處的磁場遠大於平坦的一端。如果將一小塊材料用長線繫住，懸掛於兩極之間，這個材料將感受到微弱的磁力。當磁鐵通電時，這個懸掛的材料會因為微弱磁力而產生些微位移。只有少數鐵磁材料會受尖端磁極強烈吸引；其餘材料則只會感受微弱之力，且其中有些受尖端磁極微弱吸引；有些則被微弱排斥開來。

使用鈹材料做成的小圓柱體，可以輕鬆觀察到上述效應，小圓柱體將因**排斥**而移離高場區域。這類受斥物質稱為**反磁材料**。即使像鈹這種反磁性頂強的物質，其反磁效應仍屬微弱。所以一般而言，反磁性屬於微弱效應。反之，如果將小圓柱體替換為小塊的

**請複習**：15-1 節〈作用在電流迴路上的力；偶極的能量〉。



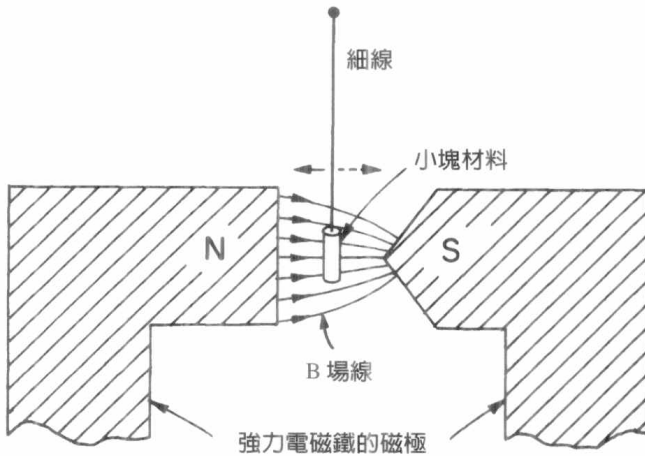


圖 34-1 鈹的小圓柱體會受尖端磁極微弱排斥；鋁則被吸引。

鋁，懸掛於兩極之間，則物體將受到微弱引力而**移往**尖端磁極。因此，像鋁這一類的物質稱為**順磁材料**（在這類實驗裡，通電及斷電時，因為磁場強度變化，物體上將產生渦電流；而在磁場—渦電流作用下，物體將感受到強烈衝力。我們應該要耐心等待物體靜止後，才去測量它的淨位移）。

接下來，我們將簡短描述造成這兩種效應的機制。首先，在許多材料裡，其組成原子並不帶有永久磁矩，或者說，原子內的所有磁體會相互抵消，使得該原子的**淨磁矩**為零。由於原子中電子自旋及軌道運動所貢獻的磁矩恰好完全抵消，所以原子不帶有平均磁矩。對於這樣的材料，當外加磁場出現時，原子內會引發感應電流。根據冷次定律，此感應電流產生的磁場與原磁場反向。也就是說，原子會因感應而產生與原磁場方向**相反**的磁矩。這就是「反磁性」的物理機制。

另外，有些材料裡，其組成原子帶有永久磁矩，也就是說，原