

天下文化
知識的世界

The Feynman Lectures on Physics
The Definitive Edition
Volume 2

電磁與物質 4

——電磁場能量動量、折射與反射

《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4冊著重於電磁場能量動量、折射與反射等相關主題，例如：

場能量與場動量、電磁質量、晶體、緻密材料的折射、表面反射。

The Feynman

費曼物理學講義 [II]

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

李精益、吳玉書 譯 高涌泉 審訂

費曼物理學講義 II 電磁與物質 / 費曼 (Richard P. Feynman)、雷頓 (Robert B. Leighton)、山德士 (Matthew Sands) 原著 ; 鄭以禎等譯. -- 第一版. -- 臺北市 : 天下遠見, 2008.11-2010.01

冊 : 公分. -- (知識的世界 ; 1207-1211)

第1冊 : 靜電與高斯定律 ; 第2冊 : 介電質、磁與感應定律 ; 第3冊 : 馬克士威方程 ; 第4冊 : 電磁場能量動量、折射與反射 ; 第5冊 : 磁性、彈性與流體

譯自 : The Feynman Lectures on Physics, The Definitive Edition Volume 2

ISBN 978-986-216-230-9 (第1冊 : 精裝)

ISBN 978-986-216-231-6 (第2冊 : 精裝)

ISBN 978-986-216-466-2 (第3冊 : 精裝)

ISBN 978-986-216-476-1 (第4冊 : 精裝)

ISBN 978-986-216-477-8 (第5冊 : 精裝)

1. 物理學

330

97019966

典藏天下文化叢書的 5 種方法

1. 網路訂購

歡迎全球讀者上網訂購，最快速、方便、安全的選擇

天下文化書坊 www.bookzone.com.tw

2. 請至鄰近各大書局選購

3. 團體訂購，另享優惠

請洽讀者服務專線 (02) 2662-0012 或 (02) 2517-3688 分機 904

單次訂購超過新台幣一萬元，台北市享有專人送書服務。

4. 加入天下遠見讀書俱樂部

■ 到專屬網站 rs.bookzone.com.tw 登錄「會員邀請書」

■ 到郵局劃撥 帳號：19581543 戶名：天下遠見出版股份有限公司
(請在劃撥單通訊處註明會員身分證字號、姓名、電話和地址)

5. 親至遠見·天下文化事業群專屬書店「93巷·人文空間」選購

地址：台北市松江路93巷2號1樓 電話：(02) 2509-5085

費曼物理學講義 II

電磁與物質

4 電磁場能量動量、折射與反射

The Feynman Lectures on Physics
The Definitive Edition
Volume 2

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



吳玉書 譯
高涌泉 審訂

Feynman

費曼物理學講義 II

電磁與物質

4 電磁場能量動量、折射與反射

目錄

第27章	場能量與場動量	11
	27-1 局域守恆	12
	27-2 能量守恆與電磁學	14
	27-3 電磁場中的能量密度與能流	17
	27-4 場能量的不確定性	22
	27-5 能流實例	23
	27-6 場動量	30
第28章	電磁質量	37
	28-1 點電荷的場能量	38
	28-2 運動電荷的場動量	40
	28-3 電磁質量	42
	28-4 電子作用於自身的力	45
	28-5 修正馬克士威理論的嘗試	49
	28-6 核力場	62

第29章

電荷在電場與磁場中的運動 67

29-1	均勻電場或磁場中的運動	68
29-2	動量分析	70
29-3	靜電透鏡	73
29-4	磁透鏡	75
29-5	電子顯微鏡	76
29-6	加速器導向場	78
29-7	交變梯度聚焦	84
29-8	在交叉的電場與磁場中的運動	89

第30章

晶體內部的幾何結構

91

30-1	晶體內部的幾何結構	92
30-2	晶體內的化學鍵	96
30-3	晶體的成長	98
30-4	晶格	99
30-5	二維系統的對稱性	102
30-6	三維系統的對稱性	108
30-7	金屬的強度	111
30-8	錯位與晶體成長	115
30-9	布拉格—奈伊晶體模型	117

第31章

張量

145

31-1	極化張量	146
31-2	張量分量的轉換	150
31-3	能量橢球	151
31-4	其他張量；慣性張量	158
31-5	外積	161
31-6	應力張量	163
31-7	更高階的張量	170
31-8	電磁動量的四維張量	172

第32章

緻密材料的折射率 177

- 32-1 物質的極化 178
- 32-2 介電材料裡的馬克士威方程 182
- 32-3 介電材料裡的波動 186
- 32-4 複數折射率 191
- 32-5 混合物質的折射率 193
- 32-6 金屬物質裡的波動 196
- 32-7 低頻與高頻近似；趨膚深度與電漿頻率 199

第33章

表面反射 205

- 33-1 光的反射與折射 206
- 33-2 緻密物質裡的波 208
- 33-3 邊界條件 214
- 33-4 反射波與透射波 221
- 33-5 金屬表面的反射 230
- 33-6 全內反射 232

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27章

場能量與場動量

- 27-1 局域守恆
- 27-2 能量守恆與電磁學
- 27-3 電磁場中的能量密度與能流
- 27-4 場能量的不確定性
- 27-5 能流實例
- 27-6 場動量

27-1 局域守恆

顯然，物質的能量並不守恆。當一物體輻射出光時，它就損失了能量。然而，這部分損失的能量可以用其他方式來描述，比如說用光的方式。因此，要是沒有考慮與光、或普遍而言與電磁場相關的能量，那麼能量守恆的理論便不是完整的。我們現在要來討論場的能量守恆以及動量守恆。我們肯定不能只談其中之一，而不涉及他者，因為在相對論中，它們是同一個四維向量的不同面向。

在第 I 卷很前面的部分，我們就討論過能量守恆；當時我們只是說，世界上的總能量恆定不變。我們現在要將能量守恆律此概念在一重要方面——說明能量是**如何**守恆的某些**細節**方面，加以推廣。此新定律將描述：假如能量離開一個區域，那是由於它通過了該區域的**邊界**，而**流**出去的。比起不加此一限制的**能量守恆律**，這是稍微更強的定律。

為看清這一說法的含義，讓我們來考察電荷守恆律是如何作用的。我們過去對電荷守恆的描述如下：有一電流密度 \mathbf{j} 和一電荷密度 ρ ，當某處的電荷減少時，必定有電荷從該處流出。我們將此稱為電荷守恆。此一守恆律的數學形式為

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (27.1)$$

上述定律有這麼一個後果，即世界上的總電荷總是保持恆定不變——永遠不會有電荷的淨增益或淨損失。然而，世界上的總電荷是可以按另一種方式而恆定不變的。假設在點 (1) 附近有某電荷 Q_1 ，在隔一段距離的點 (2) 附近則不存在電荷（圖 27-1）。現在假定：隨著時間的推移，電荷 Q_1 會逐漸消失，而與此**同時**卻有某些電荷 Q_2

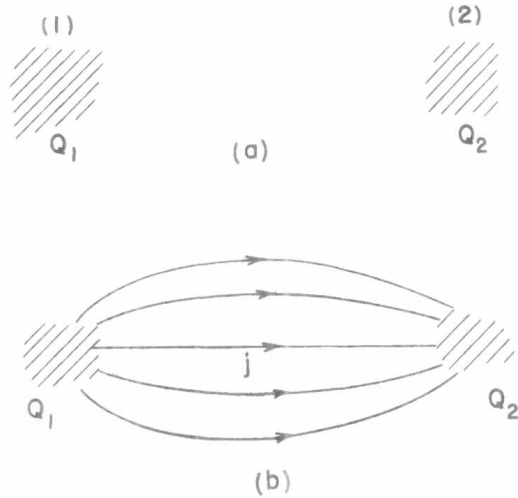


圖 27-1 兩種使電荷守恆的方式：(a) $Q_1 + Q_2$ 為常數；(b) $dQ_1/dt = \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} da = -dQ_2/dt$ 。

在點 (2) 附近出現，並且以這樣一種方式進行，使得在每一時刻， Q_1 與 Q_2 之和總是一常數。換句話說，在任一中間狀態， Q_1 所喪失的電荷量，應加在 Q_2 之上。那麼世界上的總電荷才會守恆。這是一種「世界規模的」守恆，而不是我們將稱為「局域」守恆的情況，因為要使電荷從點 (1) 轉移至點 (2)，並不要求電荷在兩點之間的任一處出現。就局部而言，該電荷是真正「喪失」了。

這一種「世界規模的」守恆律，在相對論中有其困難。在空間中兩處，「同時刻」這一概念對於不同參考系來說是不相同的。在某一參考系中是同時的兩事件，對於從旁運動而過的另一參考系來說則不是同時的。在上述那種「世界規模的」守恆律中，要求從 Q_1 喪失的電荷應該**同時**出現在 Q_2 上。否則，某個時刻就會出現電荷並不守恆。如不打造出一個「局域」守恆律，似乎無法使電荷守恆

律具有相對論性不變。事實上，勞侖茲相對論不變性這一要求，似乎以驚人方式限制了可能有的自然定律。比方說，在現代的量子場論中，人們往往希望經由我們所謂的一種「非局部」交互作用來改變理論，非局部交互作用是指，這裡的某件東西會直接影響到那裡的某件東西，但我們卻在相對論原理陷入了困境。

「局域」守恆還涉及另一個概念。這個概念表明，電荷之所以能夠從一處移至另一處，在它們之間的空間內必須有某個事件發生。要描述該定律，我們不僅需要電荷密度 ρ ，而且也需要另一類的量，即 \mathbf{j} ，它給出通過一個面的電荷流率的向量。於是，這個流量與電荷密度變化率的關係，可以經由 (27.1) 式聯繫起來。這是守恆律中更為極端的一種。它表明電荷按某一種特殊的形式守恆，也就是「局域」守恆的形式。

事實證明：能量守恆是一種局域過程。在某個給定的空間區域內，不但存在能量密度，而且也存在代表穿越表面的能流速率的向量。例如，當一光源向外輻射時，我們能求出從該源流出來的光能。若我們設想某個包圍著該光源的數學曲面，那麼從這個曲面內部所損失的能量，就等於穿越該曲面流出去的能量。

27-2 能量守恆與電磁學

現在我們要定量寫出電磁學的能量守恆。為此，我們必須描述空間任一體積元素內的能量及能流速率各為若干。假設我們首先只考慮電磁場的能量。我們將令 u 代表場的**能量密度**（也就是空間內單位體積的能量），並令向量 \mathbf{S} 代表場的**能通量**（即單位時間通過垂直於流動方向的單位面積的能流）。於是，同電荷守恆，即 (27.1) 式完全相似，我們可以把場能量的「局域」守恆律寫成

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{S} \quad (27.2)$$

當然，這一定律並非普遍正確：說場能量守恆是不對的。假設你在一個黑暗房間裡，打開電燈開關。忽然之間，整個房間裡都充滿了光，所以就有了場方面的能量，儘管在此之前，一點光也沒有。(27.2)式並非一個完整的守恆律，因為場能量單獨來說，是不會守恆的，只有世界上的總能量——也包括物質的能量，才會守恆。假如物質對場作了一些功，或場對物質作了一些功，則場的能量將會改變。

然而，若是在我們感興趣的體積內存在物質，則我們知道它具有多少能量：每一個粒子具有能量 $m_0 c^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。物質的總能量正好是所有粒子能量之和，而通過一個面的能流，就正好是通過這個面的每一個粒子所攜帶的能量之和。現在我們只想談論電磁場的能量。因此我們必須寫出這樣一個方程式，它會說出在某個給定體積內的總場能量的減少，或者是由於場能量從該體積流出，或者是由於場把能量給了物質而有所損失（或從物質獲得能量，那不過是能量的負損失）。在體積 V 內的場能量為

$$\int_V u dV$$

而其減少率則是此一積分對時間導數的負值。離開體積 V 的場能流等於 \mathbf{S} 的法向分量對包圍著 V 的整個曲面 Σ 的積分，即

$$\int_{\Sigma} \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} da$$

因此，

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_V u dV = \int_{\Sigma} \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} da + (\text{對 } V \text{ 內部物質所作的功}) \quad (27.3)$$