

理论物理第四册

相 对 论

吴大猷

科学出版社

理论物理第四册
相 对 论

吴大猷 著

科 学 出 版 社

1 9 8 3

中科院图书馆

内 容 简 介

本书为著名物理学家吴大猷先生的著述《理论物理》(共七册)的第四册。《理论物理》是作者根据长期所从事的教学实践编写的一部比较系统全面的大学物理学教材。本册内容共分五章,第一章叙述物理定律的变换及不变性;第二章介绍 Michelson 及其他实验;第三章为狭义相对论;第四章讲述电动力学的相对论形式;第五章讲述相对论动力学。

本书根据台湾联经出版事业公司出版的原书翻印出版。作者对原书作了部分更正,李政道教授为本书的出版写了序言,我们对原书中一些印刷错误也作了订正。

本书可供高等院校物理系师生教学参考,也可供研究生阅读。

理论物理第四册

相 对 论

吴大猷 著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年6月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1983年6月第一次印刷 印张: 8 1/8 插页: 精 2 平 4

统一书号: 13031·2226

本社书号: 3040·13-3

定 价: 布面精装 2.80 元
压膜平装 2.15 元

序言

吳大猷先生是國際著名的學者，在中國物理界，是和嚴濟慈、周培源、趙忠堯諸教授同時的老前輩。他的這一部《理論物理》，包括了“古典”至“近代”物理的全豹。1977年初，在台灣陸續印出。這幾年來對該省和東南亞的物理教學界起了很大的影響。現在中國科學院，特別是由於盧嘉錫院長和錢三強、嚴東生副院長的支持，決定翻印出版，使全國對物理有興趣者，都可以閱讀參考。

看到了這部巨著，聯想起在1945年春天，我初次在昆明遇見吳老師，很幸運地得到他在課內和課外的指導，從“古典力學”學習起至“量子力學”，其經過就相當於唸吳老師的這套叢書，由第一冊開始，直至第七冊。在昆明的這一段時期是我一生學物理過程中的大關鍵，因為有了紮實的根基，使我在1946年秋入芝加哥大學，可立刻參加研究院的工作。

1933年吳老師得密歇根大學的博士學位後，先留校繼續研究一年。翌年秋回國在北大任教，當時他的學生中有馬仕俊、郭永懷、馬大猷、虞福春等，後均致力物理研究有成。抗戰期間，吳老師隨北大加入西南聯大。這一段時期的生活是相當艱苦的，但是中國的學術界，還是培養和訓練了很多優秀青年。下面的幾

段是錄自吳老師的《回憶》一書：

“組成西南聯大的三個學校，各有不同的歷史。……北京大學規模雖大，資望也高，但在抗戰時期中，除了有很小數目的款，維持一個‘北京大學辦事處’外，沒有任何經費作任何研究工作的。在抗戰開始時，我的看法是以爲應該爲全面抗戰，節省一切的開支，研究工作也可以等戰後再作。但抗戰久了，我的看法便改變了，我漸覺得爲了維持從事研究者的精神，不能讓他們長期的感到無法工作的苦悶。爲了培植及訓練戰後恢復研究工作所需的人材，應該在可能情形下，有些研究設備。西南聯大沒有此項經費，北大也無另款。……我知道祇好儘自己個人的力量做一點點工作了。……請北大在崗頭村租了一所泥牆泥地的房子做實驗室，找一位助教，幫着我把三稜柱放在木製架上拼成一個最原始形的分光儀，試着做些‘拉曼效應’的工作。

“我想在二十世紀，在任何實驗室，不會找到一個拿三稜柱放在木架上做成的分光儀的了。我們用了許多腦筋，得了一些結果。……

“1941年秋，有一位燕京大學畢業的黃昆，要來北大當研究生隨我工作，他是一位優秀的青年。我接受了他，讓他半時作研究生，半時作助教，可以得些收入。那年上學期我授‘古典力學’，下學期授‘量子力學’。班裏優秀學生如楊振寧、黃昆、黃授書、張守廉等可以說是一

個從不易見的羣英會。……

“1945年日本投降前，是生活最困難的時期。每月發薪，紙幣滿箱。因為物價飛躍，所以除了留些做買菜所需外，大家都立刻拿去買了不易壞的東西，如米、炭等。……我可能是教授中最先擺地攤的，……抗戰初年，託人由香港、上海帶來的較好的東西，陸續的都賣去了。等到1946年春復員離昆明時，我和冠世的東西兩個手提箱便足夠裝了。”

就在1946年春，離昆明前吳老師還特爲了我們一些學生，在課外另加工講授“近代物理”和“量子力學”。當時聽講的除我以外，有朱光亞、唐敖慶、王瑞駢和孫本旺。

在昆明時，吳老師爲了北京大學的四十週年紀念，寫了《多原分子的結構及其振動光譜》一書，於1940年出版。這本名著四十多年來至今還是全世界各研究院在這領域中的標準手冊。今年正好是中國物理學會成立的五十週年，科學出版社翻印出版吳大猷教授的《理論物理》全書，實在是整個物理界的一大喜事。

李政道

1982年8月

寫於瑞士日內瓦

總序

若干年來，由於與各方面的接觸，筆者對臺灣的物理學教學和學習，獲有一個印象：（一）大學普通物理學課程之外，基層的課程，大多強納入第二第三兩學年，且教科書多偏高，量與質都超過學生的消化能力。（二）學生之天資較高者，多眩於高深與時尚，不知或不屑於深厚基礎的奠立。（三）專門性的選修課目，琳瑯滿目，而基層知識訓練，則甚薄弱。

一九七四夏，筆者擬想以中文編寫一套筆者認為從事物理學的必須有的基礎的書。翌年夏，得褚德三、郭義雄、韓建珊（交通大學教授）三位之助，將前此教學的講稿譯為中文，有（1）古典力學，包括 Lagrangian 和 Hamiltonian 力學，（2）量子論及原子結構，（3）電磁學，（4）狹義與廣義相對論等四冊。一九七六年春，筆者更成（5）熱力學，氣體運動論與統計力學一冊。此外將有（6）量子力學一冊，稿在整理中。

這些冊的深淺不一。筆者對大學及研究所的物理課程，擬有下述的構想：

第一學年：普通物理（力學，電磁學為主）；微積分。

第二學年：普通物理（物性，光學，熱學，近代物理）；高等微積分；中等力學（一學期）。

第三學年：電磁學（一學年）及實驗；量子論（一學年）。

第四學年：熱力學（一學期）；狹義相對論（一學期）；量子力學（引論）（一學年）。

研究院第一年：古典力學（一學期）；分子運動論與統計力學（一學年）；量子力學（一學年）；核子物理（一學期）。

研究院第二年：電動力學（一學年）；專門性的課目，如固體物理；核子物理；基本粒子；統計力學；廣義相對論等，可供選修。

上列各課目，都有許多的書，各有長短。亦有大物理學家，集其講學精華，編著整套的書，如 Planck, Sommerfeld, Landau 者。Landau-Lifshitz 大著既深且博，非具有很好基礎不易受益的。Sommerfeld 書雖似較易，然仍是極嚴謹有深度的書，不宜輕視的。筆者本書之作，是想在若干物理部門，提出一個綱要，在題材及著重點方面可作為 Sommerfeld 書的補充，為 Landau 書的初階。

筆者深信，如一個教師的講授或一本書的講解，留給聽者或讀者許多需要思索、補充、擴展、涉獵、旁通的地方，則聽者讀者可獲得較多的益處。故本書風格，偏於簡練，課題範圍亦不廣。偶以習題的方式，引使讀者搜索，擴大正文的範圍。

筆者以為用中文音譯西人姓名，是極不需要且毫無好處之舉。故除了牛頓，愛因斯坦之外，所有人名，概用西文。*

* 商務印書館出版之中山自然科學大辭典中，將 Barkla, Blackett, Lamb, Bloch, Brattain, Townes 譯為巴克納，布拉克，拉目，布勞克，布勞頓，湯里士，錯誤及不準確可見。

本書得褚德三，郭義雄，韓建珊三位交通大學教授之助，單越（清華大學）教授的校閱，本冊譯稿由褚德三先生執筆，筆者特此誌謝。

吳大猷

1977 年元旦

目 錄

甲部 狹義相對論

第一章 物理定律：變換及不變性	1
1. 物理定律的變換與不變性	1
2. 張量代數	4
3. 實數時間之表示：逆變及協變張量	8
第二章 Michelson 及其他實驗	11
1. Michelson-Morley 實驗	12
2. Trouton-Noble 實驗	13
3. Fizeau 實驗	15
4. 恒星光的偏差	16
第三章 狹義相對論	19
1. 時間・空間：度量的觀念	19
2. Einstein 相對論	21
3. Minkowski 的幾何表象	24
(1) 時間性區域與類時向量	26
(2) 空間性區域與類空向量	27
(3) 因果關係	27
4. Lorentz 變換的結果	32
(1) 時間的伸展	32
(2) “同時性”觀念的相對性	34

(3) FitzGerald-Lorentz 收縮	34
(4) Doppler 效應	35
(5) 星光的偏差	35
(6) 速度之和	37
第四章 電動力學的相對論形式	39
1. 張量形式的場方程式	39
2. 運動電荷所產生的場	48
(1) Lienard-Wiechert 場勢	48
(2) 任意運動之電荷	49
3. Lorentz 力與電動力學	52
(1) 能—動量張量	52
(2) 能量守恒定律	54
(3) 動量守恒定律	55
(4) 能—動量向量	56
(5) 平面波的能量與動量	58
(6) 帶電質點的能量輻射	61
4. 運動介質的電動力學	63
(1) 運動的電荷密度	64
(2) 運動的電流	65
(3) 運動的電流線圈	66
(4) 物質介體的能—動量張量	67
5. 有單磁極之電動力學	68
附錄 Dirac 單磁極理論	75

1. 規範變換及相位	75
2. 電磁場奇異性的量子化與單磁極	78
第五章 相對論動力學	85
1. 運動方程式	85
2. 質量與能的關係	90
3. 質點的能量, 動量及質量	92

乙部 廣義相對論

第一章 張量微積分.....	97
1. 逆變與協變張量.....	97
2. 基本（或度規）張量.....	101
3. Christoffel 三指數符號	105
4. 協變導數.....	107
5. 協變散度.....	111
6. 張量密度.....	113
(1) 純量密度	113
(2) 向量，張量密度及散度	115
第二章 仿射幾何.....	181
1. 仿射聯絡與仿射幾何.....	121
2. 協變微分與 Stokes 定理	125
3. 曲度張量 $R'_{\mu\nu}$; Riemann 張量 $R_{\mu\nu}$	128
4. 平行位移與可積分性.....	130
5. 極端線 (Geodesics)	137
第三章 Riemannian 幾何	139
1. 曲度張量.....	139
(1) 曲度張量 $R'_{\mu\nu}$	140
(2) Riemann 張量 $R_{\mu\nu}$	142

(3) Gaussian 曲度 R	142
(4) 四維空間之曲度	148
2. 曲度空間與平度空間	151
3. 極端線	154
(1) 由變分方程式而得	154
(2) 由 Hamilton 方程式而得	156
4. 自然的, 或極端線的, 座標系	159
(1) 極端線座標系	159
(2) 正則座標系	160
5. Einstein 張量 G_{μ}^{ν}	163
第四章 廣義相對論	167
1. 幾何與物理	167
(1) 長度	168
(2) 時間	169
2. 廣義相對論	171
3. 平度時空的加速運動	172
第五章 Einstein 引力理論	177
1. 等效原理	178
2. Riemannian 空間的時, 空度量	181
3. 時鐘 (或雙生子) 的問題	183
4. 引力理論	190
5. Einstein “引力方程式”的近似解	195
(1) 時—空度量—紅移	199

(2) 光在“引力場”之彎曲	202
6. Einstein “引力方程式”之正確解	205
(1) 水星近日點之推前	211
(2) 光之偏折	216
(3) 光譜線之引力紅移	218
7. Einstein $G_{\mu} = -\kappa T_{\mu}$ 方程式之解的問題	218
8. 星體內光的極端線	222
第六章 最近的發展	223
1. 統一場論的嘗試	223
2. Einstein-Infeld-Hoffman 的成果	224
3. 黑洞	225
索 引	231

第一章

物理定律：變換及不變性

1 物理定律的變換與不變性

相對論的基本觀念，是當我們從某一“慣性座標”變換到另一“慣性座標”時，所有的物理定律，不因這種變換而改變其形式。爲瞭解此點，我們可從下面的考慮開始。

((1)) 按本書第一冊乙部第Ⅲ章，在古典動力學中，任何動力系統的運動方程式均可寫成如下之正則形式：

$$\dot{q}_k = \frac{\partial H}{\partial p_k}, \quad \dot{p}_k = -\frac{\partial H}{\partial q_k} \quad (\text{I-1})$$

且座標與動量 q_k, p_k 至 Q_k, P_k 的變換 (所謂正則變換)

$$\begin{aligned} q_k &= q_k(Q_1, \dots, Q_n, P_1, \dots, P_n) \\ p_k &= p_k(Q_1, \dots, Q_n, P_1, \dots, P_n) \end{aligned} \quad (\text{I-2})$$

有數學中的“群”的性質。這種正則變換會使上列方程式 (I-1) 不變其形式，即

$$\dot{Q}_k = \frac{\partial \bar{H}}{\partial P_k}, \quad \dot{P}_k = -\frac{\partial \bar{H}}{\partial Q_k}$$

((2)) 在電磁理論中，Maxwell 的場方程式及帶電質點的運動方程式，已證明在下列變換下，不變其形式：

空間反投（或宇稱）運作

時間變數 t 逆反運作

電磁場勢規範變換

（詳見本書第三冊電磁學，第四章，第 4 及 7 節）。

((3)) 在古典力學中，一個系統的運動方程式（或運動定律）

$$mr_i = F(r_i), \quad i = 1, 2, \dots \quad (\text{I-3})$$

在所謂 Galileo 變換下

$$\begin{aligned} r_i &= r'_i + vt, \\ t &= t', \end{aligned} \quad v = \text{常數}, \quad (\text{I-4})$$

不變其形式。(I-4) 式所代表的變換，係表示從一座標系統 S （在此系統中，座標為 r_i ）變換到一以等速度 v 相對於 S 運動的座標系統 S' 。如 Newton 運動定律對某一參考座標 S （稱為慣性座標）成立時，則對於所有以均勻速度相對於 S 運動的座標亦應成立。此意即謂，在自己的座標中，不可能藉任何動力學性質的觀測，來發覺自己的座標是“靜止”抑或“等速運動”的。這是說絕對性的“等速運動”，是無意義的。這個結論，是所謂 Galileo 的相對論原理。

在變換 (4) 中，我們應注意，時間變數 t 並無變換。此即牛頓所採用的絕對的或數學的時間。這種時間的定義，依照牛頓的 Principia 第一冊中的 Scholium，是“均勻地流動，而且與其一切外界無關的”。在下章中，我們將可看到 Einstein 的理論係