



中国科学技术
经·典·文·库

理论物理 (第四册)

相 对 论

吴大猷 著

中国科学技术经典文库·物理卷

理论物理(第四册)

相 对 论

吴大猷 著

科 学 出 版 社

北 京

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5章:第1章叙述物理定律的变换及不变性;第2章介绍 Michelson 及其他实验;第3章为狭义相对论;第4章讲述电动力学的相对论形式;第5章讲述相对论动力学.

本书根据中国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.

图书在版编目(CIP)数据

理论物理(第四册): 相对论/吴大猷著. —北京: 科学出版社, 2010
(中国科学技术经典文库·物理卷)

ISBN 978-7-03-028724-3

I. 理… II. 吴… III. ①理论物理学 ②相对论 IV. O41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 162235 号

责任编辑: 张 静 唐保军 / 责任校对: 陈玉凤
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1983年8月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年9月第二次印刷 印张: 11 3/4

字数: 221 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

吴大猷先生是国际著名的学者,在中国物理界,是和严济慈、周培源、赵忠尧诸教授同时的老前辈。他的这一部《理论物理》,包括了“古典”至“近代”物理的全貌。1977年初,在中国台湾陆续印出。这几年来对该省和东南亚的物理教学界起了很大的影响。现在中国科学院,特别是由于卢嘉锡院长和钱三强、严东生副院长的支持,决定翻印出版,使全国对物理有兴趣者,都可以阅读参考。

看到了这部巨著,联想起在1945年春天,我初次在昆明遇见吴老师,很幸运地得到他在课内和课外的指导,从“古典力学”学习起至“量子力学”,其经过就相当于念吴老师的这套丛书,由第一册开始,直至第七册。在昆明的这一段时期是我一生学物理过程中的大关键,因为有了扎实的根基,使我在1946年秋入芝加哥大学,可立刻参加研究院的工作。

1933年吴老师得密歇根大学的博士学位后,先留校继续研究一年。翌年秋回国在北大任教,当时他的学生中有马仕俊、郭永怀、马大猷、虞福春等,后均致力物理研究有成。抗战期间,吴老师随北大加入西南联大。这一段时期的生活是相当艰苦的,但是中国的学术界,还是培养和训练了很多优秀青年。下面的几段是录自吴老师的《早期中国物理发展之回忆》一书:

“组成西南联大的三个学校,各有不同的历史。……北京大学规模虽大,资望也高,但在抗战时期中,除了有很小数目的款,维持一个‘北京大学办事处’外,没有任何经费作任何研究工作的。在抗战开始时,我的看法是以为应该为全面抗战,节省一切的开支,研究工作也可以等战后再作。但抗战久了,我的看法便改变了,我渐觉得为了维持从事研究者的精神,不能让他们长期地感到无法工作的苦闷。为了培植及训练战后恢复研究工作所需的人才,应该在可能情形下,有些研究设备。西南联大没有此项经费,北大也无另款。……我知道只好尽自己个人的力量做一点点工作了。……请北大在岗头村租了一所泥墙泥地的房子做实验室,找一位助教,帮着我三棱柱放在木制架上拼成一个最原始形的分光仪,试着做些‘拉曼效应’的工作”。

“我想在二十世纪,在任何实验室,不会找到一个拿三棱柱放在木架上做成的分光仪的了。我们用了许多脑筋,得了一些结果。……”

“1941年秋,有一位燕京大学毕业的黄昆,要来北大当研究生随我工作,他是一位优秀的青年。我接受了他,让他半时作研究生,半时作助教,可以得些收入。那年上学期我授‘古典力学’,下学期授‘量子力学’。班里优秀学生如杨振宁、黄昆、黄

授书、张守廉等可以说是一个从不易见的群英会。……”

“1945 年日本投降前，是生活最困难的时期。每月发薪，纸币满箱。因为物价飞跃，所以除了留些做买菜所需外，大家都立刻拿去买了不易坏的东西，如米、炭等。……我可能是教授中最先摆地摊的，……抗战初年，托人由香港、上海带来的较好的东西，陆续地都卖去了。等到 1946 年春复员离昆明时，我和冠世的东西两个手提箱便足够装了。”

就在 1946 年春，离昆明前吴老师还特为了我们一些学生，在课外另加工讲授“近代物理”和“量子力学”。当时听讲的除我以外，有朱光亚、唐敖庆、王瑞骅和孙本旺。

在昆明时，吴老师为了北京大学的四十周年纪念，写了《多原分子的结构及其振动光谱》一书，于 1940 年出版。这本名著四十多年来至今还是全世界各研究院在这领域中的标准手册。今年正好是中国物理学会成立的五十周年，科学出版社翻印出版吴大猷教授的《理论物理》全书，实在是整个物理界的一大喜事。

李政道

1982 年 8 月

写于瑞士日内瓦

总 序

若干年来, 由于与各方面的接触, 笔者对中国台湾的物理学教学和学习, 获有一个印象: (一) 大学普通物理学课程之外, 基层的课程, 大多强纳入第二第三两学年, 且教科书多偏高, 量与质都超过学生的消化能力. (二) 学生之天资较高者, 多眩于高深与时尚, 不知或不屑于深厚基础的奠立. (三) 专门性的选修课目, 琳琅满目, 而基层知识训练, 则甚薄弱.

一九七四年夏, 笔者拟想以中文编写一套笔者认为从事物理学的必须有的基础的书. 翌年夏, 得褚德三、郭义雄、韩建珊 (中国台湾交通大学教授) 三位之助, 将前此教学的讲稿译为中文, 有 (1) 古典力学, 包括 Lagrangian 和 Hamiltonian 力学, (2) 量子论及原子结构, (3) 电磁学, (4) 狭义与广义相对论等四册. 一九七六年春, 笔者更成 (5) 热力学, 气体运动论与统计力学一册. 此外将有 (6) 量子力学一册, 稿在整理中.

这些册的深浅不一. 笔者对大学及研究所的物理课程, 拟有下述的构想:

第一学年: 普通物理 (力学, 电磁学为主); 微积分.

第二学年: 普通物理 (物性, 光学, 热学, 近代物理); 高等微积分; 中等力学 (一学期).

第三学年: 电磁学 (一学年) 及实验; 量子论 (一学年).

第四学年: 热力学 (一学期); 狭义相对论 (一学期); 量子力学 (引论) (一学年).

研究院第一年: 古典力学 (一学期); 分子运动论与统计力学 (一学年); 量子力学 (一学年); 核子物理 (一学期).

研究院第二年: 电动力学 (一学年); 专门性的课目, 如固体物理; 核子物理, 基本粒子; 统计力学; 广义相对论等, 可供选修.

上列各课目, 都有许多的书, 各有长短. 亦有大物理学家, 集其讲学精华, 编著整套的书, 如 Planck, Sommerfeld, Landau 者. Landau-Lifshitz 大著既深且博, 非具有很好基础不易受益的. Sommerfeld 书虽似较易, 然仍是极严谨有深度的书, 不宜轻视的. 笔者本书之作, 是想在若干物理部门, 提出一个纲要, 在题材及着重点方面可作为 Sommerfeld 书的补充, 为 Landau 书的初阶.

笔者深信, 如一个教师的讲授或一本书的讲解, 留给听者或读者许多需要思索、补充、扩展、涉猎、旁通的地方, 则听者读者可获得较多的益处. 故本书风格, 偏于简练, 课题范围亦不广. 偶以习题的方式, 引使读者搜索, 扩大正文的范围.

笔者以为用中文音译西人姓名, 是极不需要且毫无好处之举. 故除了牛顿, 爱

因斯坦之外, 所有人名, 概用西文.*

本书得褚德三、郭义雄、韩建珊三位中国台湾交通大学教授之助, 单越 (中国台湾清华大学) 教授的校阅, 笔者特此致谢.

吴大猷
1977 年元旦

* 商务印书馆出版之中山自然科学大辞典中, 将 Barkla, Blackett, Lamb, Bloch, Brattain, Townes 译为巴克纳, 布拉克, 拉目, 布劳克, 布劳顿, 汤里士, 错误及不准确可见.

目 录

序言
总序
导言

甲部 狭义相对论

第 1 章	物理定律：变换及不变性	5
1.1	物理定律的变换与不变性	5
1.2	张量代数	7
1.3	实数时间之表示：逆变及协变张量	10
第 2 章	Michelson 及其他实验	13
2.1	Michelson-Morley 实验	13
2.2	Trouton-Noble 实验	14
2.3	Fizeau 实验	15
2.4	恒星光的偏差	16
第 3 章	狭义相对论	18
3.1	时间·空间：度量的观念	18
3.2	爱因斯坦的相对论	19
3.2.1	相对性原理	19
3.2.2	光速守恒性原则	19
3.3	Minkowski 的几何表象	21
3.3.1	时间性区域与类时向量	23
3.3.2	空间性区域与类空向量	23
3.3.3	因果关系	23
3.4	Lorentz 变换的结果	27
3.4.1	时间的伸展 (time dilatation)	27
3.4.2	“同时性”观念的相对性	28
3.4.3	FitzGerald-Lorentz 收缩 (contraction)	28
3.4.4	Doppler 效应	29
3.4.5	星光的偏差	29
3.4.6	速度之和	31

第 4 章 电动力学的相对论形式	32
4.1 张量形式的场方程式	32
4.2 运动电荷所产生的场	38
4.2.1 Lienard-Wiechert 场势	38
4.2.2 任意运动之电荷	39
4.3 Lorentz 力与电动力学	41
4.3.1 能-动量张量	41
4.3.2 能量守恒定律	43
4.3.3 动量守恒定律	44
4.3.4 能-动量向量	44
4.3.5 平面波的能量与动量	46
4.3.6 带电质点的能量辐射	48
4.4 运动介质的电动力学	50
4.4.1 运动的电荷密度	51
4.4.2 运动的电流	51
4.4.3 运动的电流线圈	52
4.4.4 物质介体的能-动量张量	52
4.5 有单磁极 (magnetic monopole) 之电动力学	53
附录 Dirac 单磁极理论	57
1. 规范变换及相位	57
2. 电磁场奇异性的量子化与单磁极	60
第 5 章 相对论动力学	63
5.1 运动方程式	63
5.2 质量与能的关系	66
5.3 质点的能量、动量及质量	68

乙部 广义相对论

第 1 章 张量微积分	75
1.1 逆变与协变张量	75
1.2 基本 (或度规) 张量 (metric tensor)	78
1.3 Christoffel 三指数符号	81
1.4 协变导数	82
1.5 协变散度 (covariant divergence)	85
1.6 张量密度	87

1.6.1	纯量密度	87
1.6.2	向量密度, 张量密度与散度	89
第 2 章	仿射几何	93
2.1	仿射联络与仿射几何	93
2.2	协变微分与 Stokes 定理	96
2.3	曲度张量 $R_{\mu\nu\sigma}^{\rho}$; Riemann 张量 $R_{\mu\nu}$	99
2.4	平行位移与可积分性 (parallel displacement and integrability)	100
2.5	极端线 (geodesics)	105
第 3 章	Riemann 几何	107
3.1	曲度张量	107
3.1.1	曲度张量 $R_{\mu\nu\sigma}^{\rho}$	108
3.1.2	Riemann 张量 $R_{\mu\nu}$	109
3.1.3	Gaussian 曲度 R	109
3.1.4	四维空间之曲度	114
3.2	曲度空间与平度空间	116
3.3	极端线	117
3.3.1	由变分方程式而得	118
3.3.2	由 Hamilton 方程式而得	119
3.4	自然的或极端线的坐标系	121
3.4.1	极端线坐标系或自然坐标系	121
3.4.2	正规坐标系	122
3.5	爱因斯坦张量 G_{μ}^{ν}	124
第 4 章	广义相对论	127
4.1	几何与物理	127
4.1.1	长度	127
4.1.2	时间	128
4.2	广义相对论	129
4.3	平度时空的加速运动	130
第 5 章	爱因斯坦引力理论	134
5.1	等效原理	134
5.2	Riemann 空间的时, 空度量	136
5.3	时钟 (或双生子) 的问题	138
5.4	引力理论	142
5.5	爱因斯坦“引力方程式”的近似解	146
5.5.1	时-空度量-红移	150

5.5.2 光在“引力场”之弯曲	152
5.6 爱因斯坦“引力方程式”之正确解: Schwarzschild 解法	154
5.6.1 水星近日点之推前	159
5.6.2 光之偏折	162
5.6.3 光谱线之引力红移	163
5.7 爱因斯坦 $G_{\mu}^{\nu} = -kT_{\mu}^{\nu}$ 方程式之解的问题	164
5.8 星体内光的极端线	166
第 6 章 最近的发展	168
6.1 统一场论的尝试	168
6.2 Einstein-Infeld-Hoffman 的成果	169
6.3 黑洞 (black holes)	169
索引	173

导 言

狭义相对论的基本假定是：在所有的惯性系中，对物理现象的描述均为等效，或以数学的术语，即在所有惯性系的时空坐标变换 (Lorentz 变换) 下，所有的物理定律，均不变其形式。广义相对论 (general theory of relativity) 则系讨论到较一般化的系统，亦即讨论到在任何不加以等速相对运动的限制的坐标系中，物理定律的不变性是否仍然成立的问题。广义相对论中自然包括了加速运动以及我们熟识的牛顿 (Newton) 重力理论的探讨。早在 1905 年，爱因斯坦 (Einstein) 便讨论到时钟在加速度坐标系以及在 Newton 重力场的性质的问题，但他的广义相对论，却经过许多的研讨，到 1915 年才完成。这理论不仅可说是划时代的，也可说是美丽的及深奥的。在狭义相对论中，爱因斯坦已澄清了时空度量的观念，由之导出了包含所有重要物理内涵的 Lorentz 变换方程式。在他的广义相对论中，爱因斯坦更进一步地讨论物理学中四维时空簇的几何性质。直到爱因斯坦为止，物理学及哲学都基于日常的经验，将三维空间用欧氏 (Euclidean) 几何来表示，看成为一自然的、天经地义的事情。甚至在狭义相对论中的四维时间，仍是欧氏几何 (正确说法应为假 (pseudo) 欧氏几何)。牛顿自然而然地沿用欧氏几何的空间观念；为了解释太阳系中行星的运动，乃创立了他的“万有引力理论”。爱因斯坦则引进了一个革命性的观点，认为描述物理现象的“物理空间”，不必是欧氏空间；它的几何性质，是应由空间的物质 (或能量) 分布来决定的。爱因斯坦这种想法的数学表示，是一般的非欧几何 (黎曼 (Riemann) 几何)。至于广义的相对性原则的数学表示，则系谓所有物理定律，在任意时空坐标变换下皆有协变性。这种变换性质的研究工具，即为张量微积分。在下文数章中，我们将简略地讨论：张量微积分、Riemann 及仿射几何，以及爱因斯坦的广义相对论及其“引力理论”。

甲部 狭义相对论

第 1 章 物理定律：变换及不变性

1.1 物理定律的变换与不变性

相对论的基本观念，是当我们从某一“惯性坐标”变换到另一“惯性坐标”时，所有的物理定律，不因这种变换而改变其形式。为了解此点，我们可从下面的考虑开始。

(1) 按本书第一册乙部第 3 章，在古典动力学中，任何动力系统的运动方程式均可写成如下之正则形式：

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

且坐标与动量 q_k, p_k 至 Q_k, P_k 的变换 (所谓正则变换)

$$\begin{aligned} q_k &= q_k(Q_1, \dots, Q_n, P_1, \dots, P_n) \\ p_k &= p_k(Q_1, \dots, Q_n, P_1, \dots, P_n) \end{aligned} \quad (1-2)$$

有数学中的“群”的性质。这种正则变换会使上列方程式 (1)* 不变其形式，即

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

(2) 在电磁理论中，Maxwell 的场方程式及带电质点的运动方程式，已证明在下列变换下，不变其形式：

空间反投 (或宇称) 运作

时间变数 t 逆反运作

电磁场势规范变换

(详见《理论物理第三册电磁学》，第 4 章，第 4.4 及 4.7 节)。

(3) 在古典力学中，一个系统的运动方程式 (或运动定律)

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

在所谓 Galileo 变换下

$$\begin{aligned} r_i &= r'_i + vt, \\ t &= t', \end{aligned} \quad v = \text{常数} \quad (1-4)$$

* (1) 式即公式 (1-1)，公式序号均去掉了章号，只用顺序号表示，其他章节类同。—— 编辑注

不变其形式. (4) 式所代表的变换, 系表示从一坐标系统 S (在此系统中, 坐标为 r_i) 变换到一以等速度 v 相对于 S 运动的坐标系统 S' . 如 Newton 运动定律对某一参考坐标 S (称为惯性坐标) 成立时, 则对于所有以均匀速度相对 S 运动的坐标亦应成立. 此意即谓, 在自己的坐标中, 不可能借任何动力学性质的观测, 来发觉自己的坐标是“静止”抑或“等速运动”的. 这是说绝对性的“等速运动”是无意义的. 这个结论, 是所谓 Galileo 的相对论原理.

在变换 (4) 中, 我们应注意, 时间变数 t 并无变换. 此即牛顿所采用的绝对的或数学的时间. 这种时间的定义, 依照牛顿的 Principia 第一册中的 Scholium, 是“均匀地流动, 而且与其一切外界无关的”. 在下章中, 我们将可看到爱因斯坦的理论系由时间观念的重新检讨而开始的.

(4) 如将 Galileo 变换 (4) 应用到电磁理论的方程式, 我们立刻可以发现到这些方程式在 Galileo 变换下, 形式是要改变的. 在这种结论下, 因在互以等速作相对运动的不同坐标系中, 电磁方程式各有不同的形式, 则我们似乎只要在自己的坐标系中从事一些电磁实验, 即可找出我们自己坐标系的运动情形. 在下节中, 我们将描述一些企图决定我们坐标系运动情形的实验.

H. A. Lorentz 在 1895 及 1899 年间, 为了研究运动物体的电学及光学现象, 获得了电磁定律在“静止”坐标 S 及运动坐标 S' 间的一些变换关系. 这些变换关系, 系包括 $\frac{v}{c}$ 次项, 1903 年, Lorentz 终于导出了一组直到现在仍冠以他的大名的变换, 即

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{\beta}{c}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (1-5)$$

v 系代表 S' 及 S 坐标系沿其 x' 及 x 轴的相对速度. 在下章中我们将发现, 在这个时空变换 (5) 下, 只要考虑及同时使场量 E, B 等也经过一与 (5) 式相似之变换, 则电磁场及带电质点的所有方程式, 均不改其形式. 变换 (5), 事实上即为 1905 年爱因斯坦所发表的相对论的数学表示式, 但 Lorentz 对于 t' 及变换 (5) 的物理意义并不很清楚, 他把 t' 当做“本地时间”, 引入到物理学来.

(5) 在第 (3) 中, 我们提到古典动力学的定律在 Galileo 变换式 (4) 下不改其形式; 在第 (4) 中, 我们提到电磁定律在 Lorentz 变换下保持不变. 因此, 我们可以得到下面结论

变 换	Galileo (4)	Lorentz (5)
动力学定律	形式不变	形式变
电磁定律	形式变	形式不变

(1-6)

我们已知, 当考虑光速 c 为无穷大值的极限情况, Lorentz 变换即缩变为 Galileo