

量子电动力学导论

——光子学导引

陈亚孚 著

兵器工业出版社

307368

561

量子电动力学导论

——光子学导引

陈亚孚 著



兵器工业出版社

(京) 新登字 049 号

内 容 简 介

这是一本用场论方法研究光子学和光电子相互作用现象的入门书。前三章做量子力学和场论的概念和数学知识准备；第四章量子场，主要对光子场和电子场二次量子化；第五章阐述电磁相互作用的量子场方程；第六章列举光子和电子相互作用的典型问题，并作出基本解释。本书可作为从事光通信、光集成、光信息处理、激光、红外等光电子器件和应用研究的广大科技工作者、研究生、大学高年级学生及教师研究光子学的参考书和分析光技术的指导书。

量子电动力学导论

——光子学导引

陈亚孚 著

*

兵器工业出版社出版发行

(北京市海淀区车道沟 10 号)

各地新华书店经销

兵器工业出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：9.56 字数：257 千字

1992 年 6 月第 1 版 1992 年 6 月第 1 次印刷

印数：1~2000 册 定价：7.50 元

ISBN 7-80038-522-1/TN·22

前 言

这本量子电动力学导论是用量子场论方法研究光子和光电子相互作用现象的入门书，也是光子学研究的入门书。全书在量子电动力学体系的基础上，力求精简复杂的数学演证，侧重阐述光子和光电子相互作用的基本物理概念，并结合现代光学技术的问题，如激光、红外、光通信、光集成等的基本原理作出理论解释，形成一个新的理论体系。

我们知道，自从激光器问世以后，近二三十年来光技术得到飞速发展。光通信技术、集成光学技术和推向光波段的信息处理技术（光盘储存、光缆电视、光雷达和即将出现的光计算机等）相继出现，一场以光技术为主体的新兴技术革命的帷幕已经拉开。社会学家已经预言：21世纪将是光技术世纪。现在看来，这些新兴的光学技术有两大特点：一是高速度、大容量的信息传输和储存，比电子技术提高了 10^{4-6} 个数量级，这将是未来信息社会的重要标志；二是小型化和集成化的光学元件和光学仪器仪表的发明，变革了三百多年（从伽俐略时代算起）的光学技术历史，以人类技术史上空前高的速度发展，已经对社会生活产生了重大影响，如光纤通信和激光声像装置就是实例。

光学技术革命的科学实质，就是光子技术革命，光子学所产生的技术成果登上人类科学技术的舞台，是1905年A. 爱因斯坦（Albert. Einstein）所提出的光量子学说，经过半个多世纪科学家的实验、发明进入技术领域的结果。因此它才会有如此高的发展速度，产生如此巨大的影响。

随着新兴光子技术的发展，有越来越多的人开始关注光子学的研究，各门专业技术应用理论应运而生，如激光物理、光纤理论、光波导理论、光信息处理、光传感等。它们对指导和推动

各门技术发展起到了重要作用，也都从不同角度对现代光学理论作了深入的研究。但是，这些理论研究大多数是波动光学理论基础，而对光的量子性研究很不够，因此有必要重新探索光的波粒二象性问题。从光学发展历史看，自从1801年托马斯·杨(Tomas Yong)确立光的波动性学说以后，到1865年马克斯韦尔(MaxWell)揭露光的电磁波本性，光的波动理论达到了顶峰。为追究物质发光的原因，普郎克(Plank)在1900年提出了量子论，1905年A.爱因斯坦光量子学说产生，开辟了光子学的历史。从现代光学技术发展现状看，研究的内容都是光同物质粒子相互作用的现象，具体地说是光子和电子相互作用为主导的现象，因此光子学的研究是一个迫在眉睫的研究任务。

光子学应该是研究光子和光子同其他物质粒子相互作用的运动规律的学问。它应该建立在对光的波动性和量子性双重属性认识的原理基础上，从光的产生、传输、转化或湮灭的物理过程中建立理论体系，并揭示光学技术的深层本质。因此，建立光子学的理论是一件很困难的事，特别是至今仍认为光子的静止质量为零，在理论处理上又是一件很麻烦的事。我们出版这本导论只是作为光子学研究的一种理论方法，以作抛砖引玉之用。鉴于目前尚无光子学的书出版，这本导论作为引子，使读者先睹为快。

这本导论的第一、二章介绍和概括了单体量子力学；第三章介绍经典场方法，把光和电子都纳入场的概念描述；第四章进行场量子化，得出量子场概念；第五章重点阐述电磁相互作用的量子场方程；第六章用量子场观点解释一些典型例题。全书都注意结合激光理论、光波导理论、光线量子力学理论等当前光技术中的基本理论阐述。

最后感谢沈柯教授、任大翠副教授对本书撰写的支持和鼓励，感谢王少君对本书出版所做的许多有益工作。由于作者水平有限，诚恳读者批评指正。

1991.12 于长春

目 录

前言

第一章 量子力学准备	(1)
§ 1.1 评述初等量子力学	(1)
§ 1.2 算 符	(8)
§ 1.3 本征值问题.....	(15)
§ 1.4 密度矩阵.....	(21)
§ 1.5 线性谐振子的微扰理论.....	(23)
§ 1.6 光辐射的初步理论.....	(31)
第二章 相对论量子力学	(36)
§ 2.1 量子力学表示的三种绘景.....	(36)
§ 2.2 经典力学量子化.....	(41)
§ 2.3 薛定谔相对论方程.....	(43)
§ 2.4 狄拉克相对论方程.....	(47)
§ 2.5 狄拉克方程的自旋描述.....	(53)
§ 2.6 氢原子能级的精细结构.....	(63)
附录 γ 矩阵	(68)
第三章 经典场	(75)
§ 3.1 经典场的分类与描述方法.....	(75)
§ 3.2 场变换的对称性与守恒定律.....	(82)
§ 3.3 经典标量场.....	(87)
§ 3.4 经典马克斯韦尔场.....	(89)
§ 3.5 经典辐射场.....	(95)
§ 3.6 辐射规范下的电磁场.....	(99)
§ 3.7 经典电磁场理论综述	(100)
§ 3.8 光波导的经典场理论	(107)

第四章 量子场	(116)
§ 4.1 引言	(116)
§ 4.2 场的正则表示	(119)
§ 4.3 动量和角动量的正则表示	(128)
§ 4.4 狄拉克场的量子化	(133)
§ 4.5 不定度规的量子化方法	(141)
§ 4.6 电磁场量子化	(145)
§ 4.7 量子电磁场的自旋	(152)
§ 4.8 光辐射的量子理论	(156)
§ 4.9 光线量子力学理论	(164)
第五章 量子电动力学方程	(171)
§ 5.1 引言	(171)
§ 5.2 量子电动力学基本方程	(174)
§ 5.3 相互作用绘景的量子电动力学方程	(181)
§ 5.4 协变性奇异函数	(188)
§ 5.5 量子电动力学的微扰论	(193)
§ 5.6 正规积、编时积与收缩	(198)
§ 5.7 相互作用绘景下的对易关系与附加条件	(204)
§ 5.8 散射矩阵元	(211)
§ 5.9 二级散射与费曼图	(219)
§ 5.10 费曼图技术与散射截面.....	(227)
附录 奇异函数	(235)
第六章 量子电动力学的应用选题	(242)
§ 6.1 光子和电子散射	(242)
§ 6.2 电子-正电子湮灭.....	(254)
§ 6.3 电子-电子散射.....	(258)
§ 6.4 光子和电子被外场散射	(263)
§ 6.5 韧致辐射	(268)
§ 6.6 规则化与重整化	(272)

§ 6.7	电子和光子的自能	(280)
§ 6.8	电子散射的辐射修正	(286)
§ 6.9	红外发散困难的消除	(295)
参考文献	(298)

第一章 量子力学准备

初等量子力学理论是这本导论的重要基础。为熟练掌握初等量子力学的原理、概念和理论方法，本章从对初等量子力学的评述开始，扼要阐述量子力学的主要原理、概念体系，进而对算符问题、本征值问题、密度矩阵问题、线性谐振子问题、光的发射和吸收等几个问题加以阐述，用以完成本书的初等量子力学准备知识。

§ 1.1 评述初等量子力学

初等量子力学是指非相对论量子力学。大学本科的理科和部分工科专业几乎都开设这门基础课，而且各种版本的书籍很多，可供读者选阅。

由于量子力学是本世纪初物理学两大创举之一（另一个是相对论），初学者不易掌握其原理、概念和理论方法。然而，当今量子力学已成为物理、数学、化学、生物、医学、天体、地学的基础理论，熟练掌握量子力学原理，已成为科学工作者必备的知识。本节假定读者已学过量子力学，在这个基础上对量子力学的概念原理作个总结概括和提高，以此建立一个概念框架。大家都知道，量子力学的主要问题是物理概念问题，通过掌握概念，完成对物质运动认识上的观念转变。

一、初等量子力学的研究范围

初等量子力学是研究原子尺寸（ 0.1nm 量级）的运动粒子波动性和粒子性运动规律的学问。粒子运动的速度必须满足心 $v \ll c$ （光速）的条件，因此是非相对论粒子体系。单粒子的运动总能量

$E < h$ (普朗克常数), 才会有波动现象和量子现象同时发生。研究的体系是封闭的, 满足粒子数守恒、质量守恒、电荷守恒、空间宇称守恒和能量守恒五个守恒定律。其中粒子数守恒是指体系不考虑粒子产生、湮灭和转化, 质量守恒是指体系在非相对论条件下不考虑静止质量的盈亏。由此看来, 非相对论量子力学的研究对象跟经典力学的研究对象没有什么大的差别, 只是宏观尺寸和能量在数量级上变小了, 相对经典物理而言是“微观”的。正是那么一点差别, 导致了静止质量不为零 ($m \neq 0$) 的微观粒子波动本性的发现, 导致描述粒子运动力学量量子化取值规律的发现。这二大发现就是非相对论量子力学对物理学的卓越贡献。

二、初等量子力学研究的主要内容

初等量子力学研究的主要内容就是微观粒子的波粒二象性运动规律, 特别是波动特性和力学量取值量子化规律。因此, 它是用一些新原理、新概念和新的数学方法建造起来的理论体系。我们认为量子力学的主要问题是物理概念体系, 而不是数学逻辑体系。它的理论的重要方面是为人们提供了打破经典物理对物质世界认识的传统观念, 开阔了科学眼界。学习量子力学比较困难的是改变认识物质运动的传统观念, 这就是开始学习量子力学所遇到的障碍, 会感到陌生和难懂。这点恰恰是量子力学成为物理学史上一个创举的原因。翻开几百年的物理学历史, 没有人想象到一个可观测体积大小、边界清楚和有静止质量的粒子会有波动特性! 一个描述粒子运动的力学量怎么会有量子化的可能取值? 或者说对力学量的测量值为什么不能用连续数值表示? 在一个连续测量的仪表上力学量测量值竟然会出现跳跃的读数! 这些现象, 在量子力学创立的初期, 广大学者都是不可思议的, 对今天刚开始接触量子力学的人也仍然是不可思议的。然而大量的实验证明这是事实! 因此量子力学同所有经典物理的最大差别就是改变人们对物质世界认识的传统物理观念。

量子力学理论的另一个美妙之处还在于, 这些新的观念用物

理原理、概念和数学推理、定律来阐述，而不是用哲学语言阐述。物理和数学的美好谐和建立了一个全新的物理理论。而狄拉克 (P. A. M. Dirac) 竟创造了一套新颖的数学符号 (称狄拉克符号) 及运算规则，严格地阐述了量子力学的全部原理，不愧称为物理学理论的一绝。

如上所述，量子力学的主要研究内容概括为二点：一是接受、掌握和运用新观念观察和认识物质运动，建立微观物质运动的新图像；二是学习、掌握和运用阐述新原理、新概念的数学方法，探索物理概念、原理和数学公式、方程的美妙谐和。

作为支撑量子力学的原理概念框架，主要有下述几条原理：

第一物质波原理 这是法国物理学家德布罗意 (DeBroglie) 1923 年提出的关于静止质量 $m \neq 0$ 的实物粒子具有波动性的假定，后在 1929 年由革末 (Germer) 和戴威逊 (Davisson) 的电子衍射实验证实。

这个假定刚提出就受到爱因斯坦的肯定，认为是“揭开了巨大面罩的一角”。当时在物理学界引起了很大的反响，也是量子力学建立以后，持续半个多世纪争论的焦点问题之一。这个原理是说：具有动量为 p ，能量为 E 的自由运动的实物粒子跟一个波长为 k ，频率为 ω 的单色平面波相联系，即

$$\psi(\mathbf{r}, t) = A e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)} \quad (1.1-1)$$

式中 $\mathbf{P} = \hbar \mathbf{k} = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{n}_0$ (\mathbf{n}_0 为单位矢量)

$$E = \hbar \omega \quad (1.1-2)$$

(1.1-2) 式称德布罗意关系式。

这种自由运动的粒子波粒二象性运动状态用波函数 (1.1-1) 表示，说明物质粒子存在波动性，称为物质波原理，也称波函数原理。这是量子力学第一个原理。

第二力学量量子化取值原理 这是 1925 年 24 岁的德国物理学家海森堡 (W. Heisenberg) 提出的关于量子体系的力学量矩阵

计算方法所揭示的力学量取值量子化规律。后经约当 (P. Jordan) 和玻恩 (M. Born) 完成为“矩阵力学”，当时也被称做量子力学。又由美国青年数学家维纳 (N. Wiener) 把矩阵运算方法推广为数学算子，就是现在量子力学中的力学量算符表示。这个原理不仅揭示原子体系力学量的量子化取值规律和算符化原则，而且发现了力学量之间的第一个不可交换关系 (对易关系)，即坐标 q 和动量 p 的算符之间有

$$pq - qp = -i\hbar I \quad (I \text{ 为单位算符}) \quad (1.1-3)$$

揭示了原子体系的坐标和动量的相关性并不是像经典物理中的相互独立。接着又发现能量和时间也具有相关性，即

$$Ht - tH = -i\hbar I \quad (1.1-4)$$

这个原理用数学理论阐述了量子力学理论中的两个根本问题，一是力学量算符化表示，二是共轭力学量之间不可交换性质，即存在对易关系，从而奠定了量子力学体系的力学量概念基础。

第三薛定谔方程 薛定谔波动方程是现代量子力学的重要标志。以薛定谔波动方程为核心建立起来的量子力学，开始被称为波动力学。这个方程是 1926 年由德国物理学家薛定谔 (E. Schrödinger) 在波函数原理的基础建立的。他把波函数原理推广到束缚态粒子也具有波粒二象性的运动状态。这个状态满足下述方程

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = H\psi(\mathbf{r}, t) \quad (1.1-5)$$

式中 \hbar 为普朗克常数 $h/2\pi$ ， H 为哈密顿算符，并有

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \quad (1.1-6)$$

式中 $V(\mathbf{r})$ 为原子体系的位能势场。

我们看到 (1.1-5) 的方程是一个具有虚数 i 系数的偏导方程，既不是实验定律的抽象总结，也不是数学逻辑的推演。满足方程的波函数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 描述原子体系粒子的波粒二象性运动状态，不

能由实验测量确定。因此薛定谔方程是一个原理概念性的方程，是科学家思维创造的结果。正因为波函数不能由实验测定，它一出现就引起一场长达半个多世纪的争论。争论的实质是经典物理观念和量子物理观念的交锋。因为几百年来经典物理运动方程都是力学量的运动方程，求解方程得到的力学量都能从实验上确定。而薛定谔方程是体系运动状态的方程，求解方程的状态波函数不能由实验测定，这就对它的物理真实性引起争论。我们认为波函数是描述体系运动的总体图像，是一个全方位的信息函数，不能靠测量有限几个力学量测定它。这是物理学向深层发展的结果，是科学思维的创造。在经典物理中从来没有过能用一个解析函数表示物理体系运动状态的先例，更谈不上有状态运动方程。何偿由薛定谔方程演化出的一系列结果，如几率、波动性、本征值等都在实验上得到了证明。时至今日，以薛定谔方程为核心建立起来的量子力学已成为各门自然科学的基础理论。

薛定谔波动方程的空间振幅方程是体系能量的本征方程。薛定谔在1926年1月的第一篇论文中最先用这个方程计算了氢原子的线状光谱，预言了原子能级的量子代取值，结果跟实验非常符合。薛定谔在1926年的2月、5月、6月又接连发表了三篇论文，同时也论证了跟矩阵力学的等同性，从而奠定了波动力学的理论体系，就是现在的量子力学理论。

上述足见，薛定谔方程是量子力学最基本的原理，既有物理概念上的开拓性，又具有数学形式上的新颖性。

第四波函数统计解释原理 薛定谔方程能够预言束缚态中某些力学量的各种可能取值，而对系统的单次测量只能得到一个取值，多次测量的取值有不确定性，不能重复测量，这也曾经引起人们的争论。1929年玻恩对此提出了波函数的统计解释原理。他认为一个力学量在状态中的各种可能取值按几率分布，对单次测量的一个取值几率太小，不易重复，因此会有不确定性。这正是物质波的波动性产生的结果。这种几率分布就是波动性的反映。由

于玻恩这个几率解释原理，后来人们把物质波也称做几率波。玻恩的波函数几率解释原理具体地说就是：对于状态 $\psi_F(r, t)$ 中出现的力学量 F 取值几率密度 w 跟波函数模量的平方 $|\psi_F|^2$ 成正比，即

$$w = c |\psi_F|^2 \quad (1.1-7)$$

c 为比例常数，也是 ψ 的归一化常数。对于 F 一系列取值 F_1, F_2, F_3, \dots ，满足归一化条件

$$\sum_{F_i} w_{F_i} = 1 \quad (1.1-8)$$

这是一个揭示原子体系运动状态跟力学量取值关系的原理，同时也揭示了微观粒子波动的特性。

第五测不准原理 在波动力学建立的初期，实验发现量子体系的一个状态中不同的力学量不能同时准确地测量。有些力学量之间具有相关性，不像经典物理那样，不同的力学量之间永远是互相独立无关的。海森堡在矩阵计算中首先发现了这个问题。他发现表示不同力学量的矩阵之间，不能随意交换次序，即有不可对易性。他进一步深入探索这种力学量之间不可对易性，是否存在某种定量关系？结果发现不对易力学量之间在实验测量精度上存在一个定量的界限。这就是 1927 年提出的测不准原理。这个原理是说，一对不可对易的力学量之间（称共轭力学量），它们测量精确度的乘积等于一个常数 $h/2$ 。其中一个测量精确度高，另一个就不高；一个精度提高，另一个精度就降低。例如坐标 x 和动量 p 的测量精度就满足下列不等式

$$\Delta x \cdot \Delta p \leq h/2 \quad (1.1-9)$$

式中 Δx 和 Δp 分别为坐标和动量的测量偏差。后来发现时间和能量也存在测不准关系，即

$$\Delta t \cdot \Delta E \leq h/2 \quad (1.1-10)$$

由 (1.1-9) 可见，当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时， $\Delta p \rightarrow \infty$ ，反之也对。

测不准原理所揭示的共轭力学量之间的相关性存在定量关

系，正是经典物理和量子物理之间的定量界限，也就是经典物理和量子物理的适用条件。

第六电子自旋运动原理 自由电子运动存在自旋运动，早在1921年康普顿就曾提出过。但是，束缚在原子体系的电子存在自旋运动，并具纳入量子物理的一种运动形式在理论上加以描述，是1925年由荷兰物理学家乌伦贝克 (G. Uhlenbeck) 和古德斯密特 (S. Goudsmit) 首先发表了他们的研究成果。同时对电子自旋运动作了大量有贡献的研究工作的还有美国20岁的物理学家克龙尼格 (R. Kronig)。在非相对论量子力学中，电子自旋运动是作为原理引进的，在薛定谔方程中增加一个独立的自变量和独立波函数因子。电子自旋量子数 $1/2$ 也是以假设形式引进的，由原来描述电子运动的三个量子数 n, l, m 增加为 n, l, m, s 四个量子数。这是一个揭示原子体系存在自旋运动的原理，因此也作为支撑量子力学的一个原理列入。

综上所述，我们评述了支撑量子力学理论的六个原理。就是这些原理构成了量子力学的物理概念框架。有些文献还介绍了全同性原理和泡利 (W. Pauli) 不相容原理，这都涉及多体问题，这里没有列入。

量子力学跟其他物理体系一样，都是集中研究体系的运动状态和力学量二个主要内容。需要强调指出的是，量子力学的状态用一个解析的数学函数表示，并且给出一个状态运动方程，这是跟全部经典物理理论的不同之处。量子力学的力学量，用算符表示，并且通过求解算符的本征方程，预言力学量的取值规律和实验测量上可能测到的全部取值，特别是预言力学量的量子化取值的存在，是一个重大的发现。

量子力学的理论体系，除了上述的原理框架而外，还有大量的数学演绎内容，其中包括算符、本征值问题、矩阵表示和近似方法等问题。在本章的后面几节，我们选择出对本书宗旨有用的内容加以讨论。在这些数学演绎中，狄拉克的工作⁽¹⁾达到了前所未

有的精湛程度。他创造了“狄拉克符号”，把原理概念和严格的数学演绎融为一体，这是本节最后应该提到的。

§ 1.2 算 符

在量子力学中，力学量用算符表示；在经典物理中，力学量用文字符号表示。二者的内涵有很大差别。经典物理的力学量文字符号，直接对应实验测量值的集合；量子力学的力学量算符表示力学量测量的实验操作。

算符是由力学量的矩阵计算推广来的，在数学上是算子，如 \int 积分符号表示对后面函数实施积分运算。量子力学的算符兼顾算符运算规则和物理量概念二者，不是所有数学算子都能用作表示力学量的算符，例如只有厄米算符才能表示真实的力学量。

一、空间和狄拉克符号

1. 空间

量子力学所使用的空间是无穷多维的正交希耳伯特 (Hilbert) 空间。空间坐标系的基矢量由力学量算符的本征函数 (或矢集) 表示。在这个空间中，任何一个量子力学状态都是一个矢量，称态矢。例如，对于力学量 F 的本征函数系 φ_n ($n=1, 2, 3, \dots, n, \dots$) 由下述方程得到

$$F\varphi_n = \lambda_n\varphi_n \quad (1.2-1)$$

以 φ_n 为基矢的空间写为 $\{\varphi_n\}$ 。根据状态的叠加原理，任意一个波函数 ψ 在这个空间写为

$$\psi = \sum_n c_n \varphi_n \quad (1.2-2)$$

展开式系数 c_n ，写为

$$c_n = \int \varphi_n^* \psi d\tau \quad (1.2-3)$$

式中 $\int \varphi_n^* \varphi_m d\tau = \delta_{nm}$ 为正交归一条件。通常所使用的直角坐标

空间，实际是 x 算符的本征矢集 $\delta(x-x_0)$ 构成。

2. 狄拉克符号

狄拉克创造的符号是右矢 $|\rangle$ 表示状态，对状态 ψ 写为 $|\psi\rangle$ ，对于 λ_n 的本征函数写为 $|\varphi_n\rangle$ 或 $|n\rangle$ ；左矢 $\langle|$ 表示波函数的复数共轭，如 ψ^* 写为 $\langle\psi|$ ， φ_n^* 写为 $\langle\varphi_n|$ 或 $\langle n|$ 。内积写为 $\langle\psi|\psi\rangle =$ 数， ψ 的模方 $|\psi|^2 = \langle\psi|\psi\rangle$ ，归一化写为 $\langle m|n\rangle = \delta_{mn}$ 。 δ_{mn} 为克龙尼克符号

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 1 & m = n & \text{归一化} \\ 0 & m \neq n & \text{正交} \end{cases} \quad (1.2-4)$$

可见狄拉克符号对于运算具有简洁性。运算规则同矩阵运算和矢量运算基本相同，差别只有三点：

- (1) 同种矢量（左矢或右矢）没有内积运算；
- (2) 左矢和右矢完全系分别各自构成二个空间，这二个空间互相对偶，不能由左矢和右矢混合作空间基矢；
- (3) 不同矢量之间没有求和计算，如 $|A\rangle + \langle B| \neq |A\rangle + |B\rangle$ ，只有 $|A\rangle + |B\rangle$ 和 $\langle A| + \langle B|$ 成立。

二、算符的定义

一种操作符号 A 作用在态矢 $|\psi\rangle$ 上，使得态矢 $|\psi\rangle$ 改变为整矢 $|\phi\rangle$ ，或者说，改变态矢的运算操作称为算符。

定义式为：

$$A|\psi\rangle = |\phi\rangle \quad (1.2-5)$$

对态矢没有作用的操作，就不是算符。例如，常数 c ， $c|\psi\rangle = c|\psi\rangle$ ， c 不是算符。

三、算符的种类

根据算符的定义，可把量子力学算符分为两大类：一类是代表真实力学量的算符，如动量 p 、能量哈密顿 H 、角动量 L 等；另一类是变换算符，如么正算符、相似算符、反演算符等。从数学形式上分，有单量算符和算符函数，如 $F(p)$ ， p 为动量算符，构成函数 $F(p)$ 。