学校代码：10246

学　　号：12300000000

復旦大學

博 士 学 位 论 文

（学术学位）

论文标题

Thesis Title

院　　系：　　物理系

专　　业：　　物理学

姓　　名：　　王二

指 导 教 师：　某某某　教授

完 成 日 期：2026 年 11 月 16 日

指导小组成员

张　三　教　授

李　四　教　授

王五六　研究员

目　录

插图目录 iii

摘要 v

Abstract vii

符号表 ix

第 1 章 介绍 1

1.1 量子力学历史概要 1

1.2 研究对象 1

1.3 研究方法 1

第 2 章 数学基础 3

2.1 基础公设 3

2.2 量子态与量子算符 4

2.3 动力学演化 4

第 3 章 总结与展望 5

附录 A 公式推导 7

参考文献 9

致谢 11

插图目录

2-1 施特恩—格拉赫实验 4

摘　要

中文摘要

关键词：不确定关系；量子力学；理论物理
中图分类号：O413.1

Abstract

English abstract

Keywords: Uncertainty principle; quantum mechanics; theoretical physics
CLC code: O413.1

符号表

x	坐标
p	动量
$\psi(x)$	波函数
$\langle x\|$	左矢（bra）
$\|x\rangle$	右矢（ket）
$\langle \alpha \| \beta \rangle$	内积

第 1 章　介绍

量子力学是物理学的分支学科。它主要描写微观的事物，与相对论一起被认为是现代物理学的两大基本支柱，许多物理学理论和科学，如原子物理学、固体物理学、核物理学和粒子物理学以及其它相关的学科，都是以其为基础[1-2]。

1.1　量子力学历史概要

1.2　研究对象

1.3　研究方法

第 2 章　数学基础

2.1　基础公设

整个量子力学的数学理论可以建立于五个基础公设。这些公设不能被严格推导出来的，而是从实验结果仔细分析归纳总结而得到的。从这五个公设，可以推导出整个量子力学。假若量子力学的理论结果不符合实验结果，则必须将这些基础公设加以修改，直到没有任何不符合之处。至今为止，量子力学已被实验核对至极高准确度，还没有找到任何与理论不符合的实验结果，虽然有些理论很难直觉地用经典物理的概念来理解，例如，波粒二象性、量子纠缠等等[3-5]。

1. 量子态公设：量子系统在任意时刻的状态（量子态）可以由希尔伯特空间 $\mathscr{H}$ 中的态矢量 $|\psi\rangle$ 来设定，这态矢量完备地给出了这量子系统的所有信息。这公设意味着量子系统遵守态叠加原理，假若 $|\psi_1\rangle$、$|\psi_2\rangle$ 属于希尔伯特空间 $\mathscr{H}$，则 $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ 也属于希尔伯特空间 $\mathscr{H}$。

2. 时间演化公设：态矢量为 $|\psi(t)\rangle$ 的量子系统，其动力学演化可以用薛定谔方程表示：

$$\mathrm{i}\hbar\frac{\partial}{\partial t}|\psi(t)\rangle = \hat{H}|\psi(t)\rangle . \tag{2.1}$$

其中，哈密顿算符 $\hat{H}$ 对应于量子系统的总能量，$\hbar$ 是约化普朗克常数。根据薛定谔方程，假设时间从 t_0 变化到 t，则态矢量从 $|\psi(t_0)\rangle$ 演化到 $|\psi(t)\rangle$，该过程以方程表示为

$$|\psi(t)\rangle = \hat{U}(t, t_0)|\psi(t_0)\rangle . \tag{2.2}$$

其中 $\hat{U}(t, t_0) = \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\hat{H}(t-t_0)/\hbar}$ 是时间演化算符。

3. 可观察量公设：每个可观察量 A 都有其对应的厄米算符 $\hat{A}$，而算符 $\hat{A}$ 的所有本征矢量共同组成一个完备基底。

4. 坍缩公设：对于量子系统测量某个可观察量 A 的过程，可以数学表示为将对应的厄米算符 $\hat{A}$ 作用于量子系统的态矢量 $|\psi\rangle$，测量值只能为厄米算符 $\hat{A}$ 的本征值。在测量后，假设测量值为 a_i，则量子系统的量子态立刻会坍缩为对应于本征值 a_i 的本征态 $|e_i\rangle$。

5. 波恩公设：对于这测量，获得本征值 a_i 的概率为量子态 $|\psi\rangle$ 处于本征态 $|e_i\rangle$ 的概率幅的绝对值平方。[①]

2.2　量子态与量子算符

量子态指的是量子系统的状态，态矢量可以用来抽象地表现量子态。采用狄拉克标记，态矢量表示为右矢 $|\psi\rangle$；其中，在符号内部的希腊字母 ψ 可以是任何符号、字母、数字，或单字。例如，沿着磁场方向测量电子的自旋，得到的结果可以是上旋或是下旋，分别标记为 $|\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\rangle$。

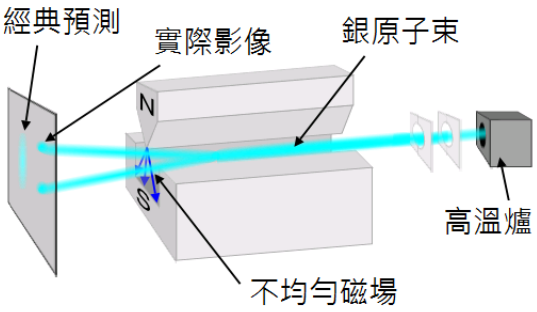


图 2-1　设定施特恩—格拉赫实验仪器的磁场方向为 z-轴，入射的银原子束可以被分裂成两道银原子束，每一道银原子束代表一种量子态，上旋 $|\uparrow\rangle$ 或下旋 $|\downarrow\rangle$[6]。

对量子态做操作定义，量子态可以从一系列制备程序来辨认，即这程序所制成的量子系统拥有这量子态。例如，使用施特恩—格拉赫实验仪器，设定磁场朝着 z-轴方向，如图 2-1 所示，可以将入射的银原子束，依照自旋的 z-分量分裂成两道，一道为上旋，量子态为 $|\uparrow\rangle$；另一道为下旋，量子态为 $|\downarrow\rangle$，这样，可以制备成量子态为 $|\uparrow\rangle$ 的银原子束，或量子态为 $|\downarrow\rangle$ 的银原子束。原本银原子束的态矢量可以按照态叠加原理表示为

$$|\psi\rangle = \alpha\,|\uparrow\rangle + \beta\,|\downarrow\rangle\,. \tag{2.3}$$

其中，α、β 是复值系数，$|\alpha|^2$、$|\beta|^2$ 分别为入射银原子束处于上旋、下旋的概率，且有

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \tag{2.4}$$

2.3　动力学演化

① 使用可观察量 A 的基底 $\{e_1, e_2, \ldots, e_n\}$，量子态 $|\psi\rangle$ 可以表示为 $|\psi\rangle = \sum_j c_j\,|e_j\rangle$，其中 c_j 是量子态 $|\psi\rangle$ 处于本征态 $|e_j\rangle$ 的概率幅。根据波恩定则，对于此次测量，获得本征值 a_i 的概率为 $|\langle e_i|\psi\rangle|^2 = |c_i|^2$。

第 3 章　总结与展望

附录 A　公式推导

参考文献

[1] 曾谨言. 量子力学：卷 I.[M]. 北京：科学出版社，2013.

[2] Feynman R P，Leighton R B，Sands M. The feynman lectures on physics，vol. i：the new millennium edition：mainly mechanics，radiation，and heat：v.1[M]. Basic books，2011.

[3] Zurek W H. Quantum darwinism，classical reality，and the randomness of quantum jumps[PP/OL]. arXiv（2014）. https://arxiv.org/abs/1412.5206.

[4] Cohen-Tannoudji C，Diu B，Laloë F. Claude cohen-Tannoudji；bernard Diu；franck Laloë：quantenmechanik：v.1[M]. Walter de Gruyter，2013.

[5] Zettili N. Quantum mechanics：concepts and applications[Z]. AAPT，2003.

[6] Commons W. File:stern-gerlach experiment zh.png — wikimedia Commons, the free media repository[EB/OL]. （2016）. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Stern-Gerlach_experiment_zh.png&oldid=221590546.

致　谢

致谢

复旦大学
学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。论文中除特别标注的内容外，不包含任何其他个人或机构已经发表或撰写过的研究成果。对本研究做出重要贡献的个人和集体，均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：_____ 日期：_____

复旦大学
学位论文使用授权声明

本人完全了解复旦大学有关收藏和利用博士、硕士学位论文的规定，即：学校有权收藏、使用并向国家有关部门或机构送交论文的印刷本和电子版本；允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。涉密学位论文在解密后遵守此规定。

作者签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____