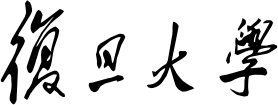
学校代码：10246

学 号：12300000000



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：2023 年 5 月 27 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](#bookmark2) **iii**

[摘要](#bookmark4) **v**

[Abstract](#bookmark6) **vii**

[符号表](#bookmark8) **ix**

[第 1 章 介绍](#bookmark10) **1**

[1.1 量子力学历史概要](#bookmark12) 1

[1.2 研究对象](#bookmark14) 1

[1.3 研究方法](#bookmark16) 1

[第 2 章 数学基础](#bookmark18) **3**

[2.1 基础公设](#bookmark20) 3

[2.2 量子态与量子算符](#bookmark22) 4

[2.3 动力学演化](#bookmark24) 4

[第 3 章 总结与展望](#bookmark26) **5**

[附录 A 公式推导](#bookmark28) **7**

[参考文献](#bookmark30) **9**

[致谢](#bookmark32) **11**

插图目录

[2-1 施特恩—格拉赫实验](#bookmark33) . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 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 |
| Ψ(x) | 波函数 |
| ⟨x| | 左矢（bra） |
| |x⟩ | 右矢（ket） |
| ⟨α|β⟩ | 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](#bookmark34)–[2](#bookmark35)] 。

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](#bookmark36)–[5](#bookmark37)] 。

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 ℋ 中的态矢量 |Ψ⟩ 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 |Ψ1⟩、 |Ψ2⟩ 属于希尔伯 特空间 ℋ ,则 c1 |Ψ1⟩ + c2 |Ψ2⟩ 也属于希尔伯特空间 ℋ。

2. 时间演化公设：态矢量为 |Ψ(t)⟩ 的量子系统，其动力学演化可以用薛定谔

方程表示：

⟩ = ⟩ . (2.1)

其中，哈密顿算符  对应于量子系统的总能量，ℏ 是约化普朗克常数。根 据薛定谔方程，假设时间从 t0 变化到 t，则态矢量从 |Ψ(t0 )⟩ 演化到 |Ψ(t)⟩ , 该过程以方程表示为

̂

|Ψ(t)⟩ = U(t, t0 ) |Ψ(t0 )⟩ . (2.2)

̂

其中 (t, t0 ) = e−iH(t−t0)/ℏ 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，而算符  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  作用于量子系统的态矢量 |Ψ⟩, 测量值只能为厄米算符  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 ai 的本征态 |ei⟩。

5. 波恩公设：对于这测量，获得本征值 ai 的概率为量子态 lΨ〉处于本征态 lei〉的概率幅的绝对值平方。[①](#bookmark38)

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 lΨ〉；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 l↑〉和 l↓〉。

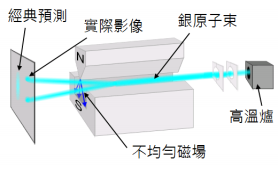


图 2-1 设定施特恩—格拉赫实验仪器的磁场方向为 z-轴，入射的银原子束可以被分裂成两 道银原子束，每一道银原子束代表一种量子态，上旋 l↑〉或下旋 l↓〉[[6](#bookmark39)] 。

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](#bookmark33)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 l↑〉；另一道为下旋，量子态为 l↓〉，这样，可以制 备成量子态为 l↑〉的银原子束，或量子态为 l↓〉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

lΨ〉= α l↑〉+ β l↓〉. (2.3)

其中，α、β 是复值系数，lαl2 、lβl2 分别为入射银原子束处于上旋、下旋的概率， 且有

lαl2 + lβl2 = 1. (2.4)

2.3 动力学演化

① 使用可观察量 A 的基底 {e1 , e2, … , en }，量子态 lΨ〉可以表示为 lΨ〉= Σj cj lej〉，其中 cj 是量子态 lΨ〉 处于本征态 lej〉的概率幅。根据波恩定则，对于此次测量，获得本征值 ai 的概率为 l〈ei lΨ〉l 2 = lci l 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: vol- ume 1[M]. Basic books, 2011.

[3] ZUREK W H. Quantum darwinism, classical reality, and the randomness of quan- tum jumps[A]. 2014.

[4] COHEN-TANNOUDJI C, DIU B, LALOË F. Claude cohen-tannoudji; bernard diu; franck laloë: Quantenmechanik: volume 1[M]. Walter de Gruyter, 2013.

[5] ZETTILI N. Quantum mechanics: concepts and applications[M]. 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.ph](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Stern-Gerlach_experiment_zh.png&oldid=221590546) [p?title=File:Stern-Gerlach\_experiment\_zh.png&oldid=221590546](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：