

好的，同学你好。今天我们来一同精读一本非常有分量的学术著作——《量子力学的哲学》。我们不是要深入学习量子力学本身，而是要学习如何“阅读”一本学术著作，理解作者和译者想要传达的核心思想。这本由马克斯·雅默撰写的书，是理解现代物理学思想震撼力的必经之路。

我们从这本书的“身份信息”开始，也就是它的封面和版权页。别小看这些内容，它们就像一本书的“出生证明”和“个人档案”，能告诉我们很多背景故事。

【原文】

量子力学的哲学

[以] 马克斯·雅默 著

商务印书馆

始于1897 The Commercial Press

[HTTP://www.cp.com.cn](http://www.cp.com.cn)

ISBN 978-7-100-10012-0

9 787100 100120>

定价: 65.00 元

量子力学的哲学

[以] 马克斯·雅默 著

秦克诚 译

商务印书馆

始于1897 The Commercial Press

2014年·北京

【解读】

同学你好，我们眼前的这部分内容，就像一本书的“身份证”。虽然看起来只是一些零散的信息，但每一条都蕴含着重要的线索。

首先，看书名——《量子力学的哲学》。请注意，它不是《量子力学原理》或《量子力学教程》。这三个字“的哲学”是关键。这告诉我们，这本书探讨的不是如何计算粒子的动量或者解薛定谔方程，而是要深入思考量子力学背后更深层次的问题：这个理论到底告诉了我们一个怎样的世界？现实的本质是什么？我们观察这个世界的行为，又如何影响了世界本身？这正是物理学与哲学交汇的迷人地带，也是爱因斯坦、玻尔、薛定谔等科学巨匠争论不休的核心战场。

接着看作者和译者。作者马克斯·雅默（Max Jammer）是一位重量级人物，我们稍后会在译者前言里看到对他的详细介绍。译者是秦克诚先生。对于一本思想深刻的学术译著来说，译者的水平至关重要，他不仅是语言的转换者，更是思想的传递者。

最后，我们来看出版社——商务印书馆。这个始于1897年的老牌出版社，在中国学术界有着泰山北斗般的地位。它的“汉译世界学术名著丛书”（你可能见过那种标志性的绿色或蓝色封面的小开本书）影响了几代中国知识分子。一本书能由商务印书馆出版，本身就是对其学术价值的一种高度认可。所以，在还没翻开正文之前，单凭这些信息，我们就可以判断：这绝对是一本严肃、权威且具有深远影响的学术经典。

【原文】

图书在版编目 (CIP) 数据

量子力学的哲学/(以)雅默著;秦克诚译. —北京: 商务印书馆,2014
ISBN 978-7-100-10012-0

I .①量... II.①雅...②秦... III.①量子力学—物理学哲学—研究 IV.①O413.1-02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121359 号

所有权利保留。

未经许可,不得以任何方式使用。

量子力学的哲学
[以] 马克斯·雅默 著
秦克诚 译

商务印书馆 出版
(北京王府井大街36号 邮政编码 100710)
商务印书馆 发行
北京冠中印刷厂印刷
ISBN 978-7-100-10012-0

2014年12月第1版	开本 850×1168 1/32	
2014年12月北京第1次印刷	印张 23%	
定价: 65.00元		

Max Jammer

THE PHILOSOPHY OF QUANTUM MECHANICS:

The Interpretations of Quantum Mechanics

in Historical Perspective

Copyright © 1974 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights reserved. This translation published under license.

本书根据约翰·威利出版公司 1974 年版译出

【解读】

好了，同学，我们继续来看这本书的“档案细节”。这部分内容看起来更枯燥，但里面藏着一个非常重要的信息，能帮我们更精确地理解这本书的定位。

首先是“图书在版编目 (CIP) 数据”，这主要是给图书馆管理员看的，是图书分类的国家标准。你看那个“O413.1-02”，就像一个坐标，能在中国国家图书馆浩如烟海的藏书中精确定位到这本书。其中，“O”代表自然科学，“O4”代表物理学，“O413.1”则精准地指向了“量子力学”。这套分类系统本身就是人类知识体系结构化的一种体现。

接着往下看，我们终于看到了这本书的英文原名——《THE PHILOSOPHY OF QUANTUM MECHANICS: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective》。这个副标题至关重要！它比中文书名提供了更丰富的信息：“量子力学的诠释及其历史视角”。这告诉我们，作者的目标并不仅仅是罗列各种哲学观点，而是要将这些关于量子力学的不同“解释”(Interpretations)——比如哥本哈根诠释、多世界诠释、隐变量理论等等——放到历史的长河中去考察。他要追溯这些思想的源头，分析它们是如何产生、发展、相互辩论和演变的。这是一种“思想史”的研究方法，它能让我们明白，科学理论并非凭空出现，而是在一个充满争议和思想碰撞的历史脉络中逐渐形成的。

最后，注意两个年份：英文原版出版于1974年，而我们手中的中文版是2014年翻译出版的。这说明，这本书是经受住了40年时间考验的经典之作。

【原文】

译者前言

本书是一本全面介绍量子力学诠释问题的专著。作者马克斯·雅默[Max Jammer]是德国出生的犹太人，现在在美国和以色列工作。他早年在哈佛大学因实验分子光谱方面的工作获博士学位，后来专攻物理学中的哲学问题和物理学史，在国际上享有很高的声誉。他的主要著作有：《空间的观念》[Concepts of Space]、《爱因斯坦为这本书作序》、《力的观念》[Concepts of Force]、《经典物理学和近代物理学中的质量观念》[Concepts of Mass in Classical and Modern Physics]、《量子力学概念发展史》[The Conceptual Development of Quantum Mechanics]以及本书*。《量子力学概念发展史》和本书是姐妹篇。本书讨论量子力学的形式体系建立之后，其各种诠释的历史发展，而前者则着重讨论量子力学本身如何在实验事实的基础上，经过旧量子论的阶段，一步步建立起来。

* 据本书作者最近来信告知,他的新著《相对论概念发展史》(The Conceptual Development of the Theory of Relativity)即将出版.

【解读】

好了,同学,前面的“开胃菜”结束了,现在我们正式进入这本书的灵魂之一——译者前言。译者秦克诚先生就像一位优秀的导游,在带我们进入复杂的思想迷宫之前,先给了一份详尽的地图和背景介绍。

第一段信息量极大。首先,它开宗明义地指出了本书的核心主题:“量子力学诠释问题”。这是什么意思呢?你可以打个比方:量子力学的数学公式,就像一部性能强大的神秘机器。物理学家们知道如何操作它(输入参数),也能精准预测它会产出什么(实验结果)。比如,我们能用它计算出电子的行为,并得到与实验惊人吻合的答案。但是,这部机器的内部工作原理——也就是现实世界究竟“是”什么样的,才会让这些公式成立——却没人能说清楚。这就产生了“诠释问题”。爱因斯坦认为机器内部有我们没发现的隐藏齿轮(隐变量理论);玻尔则认为,只要机器能正常工作就行,追问内部构造没有意义,我们能谈论的只有我们和机器的互动(哥本哈根诠释)。这本书就是关于这些不同“使用说明书”和“设计哲学”的全面介绍。

其次,这段话介绍了作者马克斯·雅默的“跨界”背景。他既是做过“实验分子光谱”的硬核物理学家,又是专攻物理学史和哲学的思想家。这种双重身份让他既能深刻理解物理公式的内涵,又能跳出公式,从更宏大的历史和哲学视角来审视这些理论。

最后,译者指出了本书和它的“姐妹篇”《量子力学概念发展史》的区别:那一本讲的是量子力学这台“机器”是如何被一步步**建造**出来的;而我们手里的这一本,讲的是机器造好之后,人们围绕着“这台机器**究竟是什么**”展开的世纪大辩论。这个区分非常清晰,帮助我们准确地把握了本书的焦点。

【原文】

本书的特点,首先在于它全面介绍了关于量子力学的各种诠释。国外出版的有关量子力学哲学的专著也不少,但大多是阐发自己的一家之言或者是讨论其中一方面的问题(如隐变量或量子逻辑),像本书这样在一本书内全面介绍从量子力学建立到今日所提出过的各种诠释,并且对于每种主要的诠释,都从哲学史上追溯它的概念的历史根源,然后对其逻辑结构、物理内容和哲学涵义逐一分析;对于不同诠释和各个概念之间的关系,各种诠释和主要科学家对量子力学诠释中一些基本问题的回答的异同,各种诠释在认识论基本问题上的分野,分别进行比较;最后并列举对每种诠释的各种反对意见,让读者自己判断:这样的书是比较少见的。其次,本书包含有极为丰富的资料。作者学识渊博,旁征博引,对文献的收集非常完备,正如原书序言中所说,这可以引导读者进一步自行钻研;并且作者同一些主要的量子物理学家和哲学家有个人接触,书中有许多第一手资料。对于我们了解量子力学诠释问题的基本情况和最近动态,本书是有重要价值的。

【解读】

在这一段,译者就像一位“金牌销售”,为我们清晰地总结了这本书的两大核心优势,或者说,我们为什么要读这本书。

第一个,也是最重要的特点是“全面而客观”。译者强调,市面上很多同类书籍要么是“一家之言”(比如作者只推崇某一种诠释),要么只关注某个“专门问题”(比如只谈隐变量)。而雅默的这本书,更像是一部

“思想的通史”或“武林各派武功的百科全书”。它不仅仅是罗列观点，而是用一种结构化的方式来分析每一种诠释：

1. **寻根**：追溯其哲学思想的源头。
2. **解构**：分析其逻辑、物理和哲学内涵。
3. **比较**：横向对比不同诠释之间的异同和争论焦点。
4. **批判**：列出针对每种诠释的反对意见。

这种“让读者自己判断”的写法，体现了严谨的学术精神。它不是要灌输给你一个“标准答案”，而是为你呈现一幅完整的思想地图，并教会你如何去导航、去辨析。这对培养你的批判性思维能力，是非常宝贵的训练。

第二个特点是“资料极为丰富”。雅默不仅“旁征博引”，查阅了大量文献，更重要的是他拥有“第一手资料”——这得益于他与许多量子力学奠基人的私人交往。这意味着书里的一些内容，可能来自于他与某位物理学巨擘在咖啡馆的一次谈话，或是一封从未公开发表过的信件。这就像在听历史亲历者讲述幕后故事，让这段思想史变得鲜活而真实，极大地提升了本书的权威性和珍贵性。

【原文】

至于本书的美中不足之处,在译者看来,主要是某些章节的表述还不移浅显易懂。作为一本综合介绍各种量子力学诠释的书,应当以比较浅显的语言,扼要介绍每种诠释和重要文献的基本内容,抓住其要点,对每个基本概念、交代清楚它的来龙去脉。作者也是注意到了这个问题,他在序言中表示,要使本书对于那些只是初步懂得量子物理学的一般读者也易于理解。但是就本书的某些章节而言,似乎同作者的上述意向还有一段距离,写成了文献摘要,相当难懂。这种情况也给翻译工作带来很大的困难。有时候,一句孤立的引文,没有上下文,很难判断其准确含义;有时候,一个生僻的概念和某个学派自定的术语突如其来,不附解释,也很难确定它的准确意义和译名。凡是遇到这种情况,译者都尽可能查阅原来的文献,经过和作者核对,改正了一些文献引用不准确之处和印刷错误,在少许地方加了一些译者注,并补充了中文文献,希望对读者能够有些帮助。

【解读】

当然，没有一本书是完美的。在热情推荐之后，译者秦克诚先生非常坦诚地指出了这本书的“美中不足”之处，以及他在翻译过程中遇到的巨大挑战。这对我们读者来说，是一个非常善意的“高能预警”。

这本书的主要缺点在于，部分章节“不移浅显易懂”，甚至写成了“文献摘要，相当难懂”。这是什么意思呢？你可以想象一下，流畅的叙述就像一位老师在给你娓娓道来一个故事，而“文献摘要”则像是在没有前后文的情况下，直接把思想家们的笔记、引言、结论等“干货”堆砌在一起。虽然内容都是精华，但缺少了连贯的逻辑线索，读者读起来就会非常吃力，仿佛在阅读一份加密电报。

译者在这里不仅指出了问题，还无形中向我们展示了“深度阅读”和“学术翻译”的艰辛。当他遇到“一句孤立的引文”或“一个生僻的概念”时，他不能想当然地去猜，而是需要像侦探一样，去“查阅原来的文献”，甚至直接联系作者本人核对。这个过程充满了智力上的挑战。比如，一个术语在不同学派里可能有完全不同的含义，一句引言脱离了上下文就可能产生歧义。

更重要的是，译者告诉我们他做了哪些努力来帮助读者克服这些困难：他“改正了一些文献引用不准确之处”、“加了一些译者注”、“补充了中文文献”。这些都是在原作基础上增加的宝贵价值。当我们阅读时，看到“译者注”这三个字，一定要格外留意，因为这往往是译者花费了大量心血，为我们铺设的一座跨越理解障碍的桥梁。这一段，既让我们对阅读难度有了心理准备，也让我们对译者的辛勤工作肃然起敬。

【原文】

除此之外,翻译中遇到的困难,还在于本书涉及的而面太广:物理学、数学、逻辑、现代哲学、哲学史、心理学和神学;就语种而论,除英文以外,作者还引用了德文、法文、拉丁文、希腊文,远远超出了译者的学力。译者并不是专业的科学哲学和科学史工作者,而只是业余对物理学中的哲学问题感兴趣。译者是在边学边译的情况下译完这本书的。在翻译过程中曾得到王竹溪教授和许良英研究员的关怀和鼓励;一些疑难问题请教过各方面的专家和作者本人,作者并为中文版刷新了参考文献目录,补充了直至1980年为止的文献,增加了中文版的价值。译者在此向他们致以深切的谢意。此外,本书第六章、第十一章两章译文是就吴介子同志的初稿修改而成,一并在声明。译者虽然对本书的翻译工作付出了很多的时间和作了很大的努力,但是限于水平,译文中错误肯定还有不少,敬希读者提出意见。

本书术语的译名均遵照科学出版社出版的《英汉物理学词汇》和《英汉数学词汇》,个别名词作了修改,如德布罗意双重理论中的 guidance formula,《物理学词汇》中作波导公式,有能同微波器件 waveguide 混淆,今译作导引公式。《词汇》中没有的术语,则由译者斟酌而定,如数理逻辑中的 trivial proposition 译作庸俗命题,概率的 propensity interpretation 译为倾向性解释。不妥之处,请各方面专家批评指正。

【解读】

在译者前言的最后部分，秦克诚先生进一步分享了他的不易，并展示了严谨的学术态度。这对我们理解学术工作的本质非常有启发。

首先，他强调本书的“跨学科”特性。你看，要读懂这本书，你需要懂的不仅仅是物理和数学，还包括逻辑学、现代哲学、哲学史，甚至心理学和神学！这告诉我们一个深刻的道理：当科学探索到最前沿、最根本的问题时，学科之间的界限就会变得模糊。关于现实本质的问题，必然会触及人类知识的方方面面。这对于正在分科学习的你来说，是一个很好的提醒——知识是相通的，未来解决重大问题，需要的是广阔的知识视野。

其次，译者非常谦虚地表示自己是“边学边译”，并且得到了很多专家的帮助。这种坦诚的态度，本身就是一种科学精神的体现。学术研究不是闭门造车，而是一个开放、协作、不断学习和修正的过程。特别值得一提的是，原作者雅默本人也参与其中，为中文版“刷新了参考文献目录”，这大大提升了中文版的学术价值。

最后，译者谈到了一个非常具体但至关重要的问题——术语翻译。他举了两个例子：“guidance formula”译为“导引公式”而非“波导公式”，是为了避免物理学内部的混淆；“propensity interpretation”译为“倾向性解释”，这是一个经过深思熟虑的创造性翻译。这背后体现的是翻译工作的“信、达、雅”。一个好的译名，不仅要准确（信），还要清晰易懂（达），并且要符合中文的学术语境（雅）。这向我们揭示了，学术名词的翻译本身就是一项严谨的学术研究工作。

总而言之，这篇译者前言不仅是全书的完美导读，它本身就是一篇关于如何进行学术阅读、研究和翻译的精彩示范。好的，同学们，大家好！

从今天起，我将带领大家一起精读一本非常有深度的著作——《量子力学的哲学》。这本书可能会挑战你们既有的世界观，但它也一定会极大地拓宽你们的思维边界。我们知道，高三的学习生活非常紧张，充满了公式、定理和刷不完的题。但有时候，停下来想一想我们学的这些知识到底意味着什么，科学的本质是什么，这本身就是一种更深层次的学习。

这本书的作者是马克斯·雅默（Max Jammer），一位在科学史和科学哲学领域鼎鼎大名的学者。而我们将要阅读的，是它的中文译本。在进入正文之前，书的开篇部分包含了几位重要人物写的序言和说明。这些“开胃菜”本身就蕴含着丰富的信息，能帮助我们理解这本书的价值和它所处的时代背景。

现在，让我们从译者写的序言开始，正式进入我们的学术探索之旅。

【原文】

科学哲学是一门很重要的学科。它研究科学的概念基础,对 科学的发展作出哲学的概括,同现代科学有密切的联系。它是科

IV

量子力学的哲学

学和哲学之间的边缘学科。要开展科学哲学的严肃的研究工作,一方面,如本书丰富的内容表明的那样,要求从事这一工作的人对 于哲学和有关的自然科学学科有深厚的素养,熟悉科学发展的最 新势态,对其基本概念进行细致的分析,不是贴几个标签或是引几 条语录能解决问题的;另一方面,由于哲学的意识形态敏感性,也 要求有一个宽松的学术环境。现在,我国已经开始开展这方面的 工作。量子力学的诠释是科学哲学中最大的问题之一,是物理 学基础研究中最有争议的问题。国内对这个问题感兴趣的物理学 工作者、哲学工作者和一般读者越来越多,希望本书的出版能够有 助于开展这方面的讨论和研究。此外,本书是雅默教授的专著中 第一本译成中文的,希望以本书为发端,能够把雅默教授更多的著 作介绍给中国读者。

本书译稿于 1980 年初完成,由于种种原因,今年才能出版。 非常关怀本书出版工作的王竹溪教授,已经于 1982 年去世了。我 们永远怀念这位我国物理学界的前辈、治学严谨的学者和仁厚的 长者。

秦克诚

1987年4月,初样校后

重印说明

此次重印前,译者通读了全书,对译文作了少量修改。本书作 者 M. Jammer 已于 2010 年 12 月去世。

秦克诚

2013年3月末

【解读】

同学们，我们首先看到的是本书译者秦克诚先生在1987年写的序言和2013年的重印说明。这短短几段文字，就像一扇窗，让我们窥见了这本书诞生背后的故事，以及它所探讨的学科是多么独特和重要。

首先，秦先生开宗明义，介绍了“科学哲学”这门学科。大家可能觉得“科学”和“哲学”是两个完全不相干的领域，一个研究客观世界，一个探讨抽象思辨。但实际上，它们在山顶相遇。科学哲学就是这样一门“边缘学科”，它不满足于仅仅知道“是什么”(What)和“怎么算”(How)，而是要去追问“为什么”(Why)和“意味着什么”(What does it mean)。打个比方，你们在物理课上学习牛顿三定律，知道如何用 $F=ma$ 解题，这是做科学。而科学哲学则会问：这里的“力”、“质量”、“空间”和“时间”的本质到底是什么？我们凭什么相信这个定律是普适的？它揭示了宇宙的终极真理吗？

秦先生接着指出了从事这项研究的两个“高门槛”。第一，你必须“两手都要硬”，既要懂哲学，更要懂科学。你不能对量子力学一知半解，就空谈它的哲学意义，那就像一个没看过几场球赛的人去当足球评论员，只能说些“贴标签”、“引语录”的空话。你必须深入到科学的细节中，理解它的逻辑和最新的发展动态。第二，需要一个“宽松的学术环境”。这一点带有鲜明的时代烙印。序言写于1987年，当时的中国正处在思想解放的浪潮中。哲学，特别是关于世界本质的讨论，有时会触及“意识形态”的敏感区。因此，一个自由、开放的讨论氛围对于推动这类研究至关重要。

最后，序言点出了本书的核心——“量子力学的诠释”。这可以说是20世纪科学哲学最大的谜题。你们可能听说过薛定谔的猫、波粒二象性，这些听起来很酷但又很烧脑的概念。量子力学本身在数学上是完美的，它的预测能力无与伦比，我们今天的手机、电脑都离不开它。但它所描绘的微观世界图景却完全颠覆了我们的日常直觉。一个粒子可以同时两个地方？观察行为会改变结果？这些到底意味着什么？关于这些问题的不同回答，就是所谓的“诠释”。这个问题至今仍在物理学和哲学界激烈争论。

这两篇简短的说明，跨越了近三十年，我们不仅看到了译者的严谨，也感受到了学术的传承和时间的流逝。王竹溪教授、作者雅默先生都已故去，但他们的思想通过这本书，将继续启发着一代又一代的读者，当然，也包括现在的你们。

【原文】

关于参考文献的说明

本书征引文献相当丰富,对每一条文献,原书分别列出其各种语言版本的书名、出版社、出版地点及年代,条目极为详尽。为了尽量减少篇幅,同时又保持原书提供的信息,从我国读者的实际需要出发,在中译本中,只对所引文献的原文及英译文保留以上条目,其他语言译文一般只列出出版年代,其余各项均删去。对于非拉丁字母的文字(俄文、阿拉伯文)的文献名称,原书都用拉丁字母拼写,为了读者方便,中译本中将俄文文献均还原为俄文。阿拉伯文文献(共三篇)则一仍其旧。所列文献中凡是译者知道有中译文的,都尽可能补上。

原书引用文献时期刊名称是用全名。中译本按通用习惯把常见期刊的用全名改缩写,以省篇幅。由于引用期刊的而相当广,有物理学方面的,也有哲学方面的,读者不一定熟悉,特将常用期刊的名称及缩写对照如下:

American Journal of Physics Am. J. Phys.
Annalen der Physik Ann. Physik
Annales of Physics Ann. Physics
Archive for History of Exact AHES
Sciences

VII

关于参考文献的说明

British Journal for the BJPS
Philosophy of Science
Communications in Com. Math. Phys.
Mathematical Physics
Journal of Mathematical J. Math. Phys.
Physics
Philosophy of Science Phil. Sci.
Physical Review Phys. Rev.
Progress of Theoretical Physics Prog. Theor. Phys.
Reviews of Modern Physics Rev. Mod. Phys.
Zeitschrift für Physik Z. Physik
Вопросы Философии Вop. Фил.
Журнал экспериментальной и ЖЭТФ
Теоретической Физики
Успехи Физических Наук УФН

此外,出版社名称中的 University Press 按通常习惯缩写为 U. P. ,如 Oxford U. P. 即牛津大学出版社。

【解读】

同学们,现在看到的这一部分,是“关于参考文献的说明”。大家可能会觉得奇怪,这不就是个格式说明吗?有什么好解读的?甚至想直接跳过。但请等一下,恰恰是这部分内容,像一个侦探的放大镜,让我们看到了严谨的学术工作背后真正的样子。它所展示的,是学术研究的“基石”——严谨、求实与传承。

首先,这段说明告诉我们,原书“征引文献相当丰富……条目极为详尽”。这意味着什么?这意味着作者雅默教授的每一个观点、每一个论述,都不是凭空想象的,而是建立在对前人大量研究的梳理和分析之上。学术研究不是一场“单口相声”,而是一场跨越时空的“大型研讨会”。爱因斯坦、玻尔、海森堡等科学巨匠的论文,以及无数物理学家和哲学家的著作,都是这场研讨会的发言记录。作者在书中引用它们,就好像在说:“关于这个问题,爱因斯坦在1935年的一篇论文里是这么看的,而玻尔的回应则发表在另一本期刊上……”这种做法,既是对前人智慧的尊重,也为读者提供了一张“寻宝图”,让我们可以顺着线索去追溯思想的源头。

其次,译者秦克诚先生在处理这些文献时所做的说明,体现了翻译工作的高度严谨和“读者意识”。他没有简单地把所有内容都照搬过来,而是思考“我国读者的实际需要”。比如,为了节省篇幅,他保留了原

文和英文译文的详细信息，而删减了其他语言译本的细节。更值得注意的是，他特意将俄文文献从拉丁字母拼写“还原”为俄文原文，并尽可能地补充了中译本信息。这些看似琐碎的工作，背后是译者希望为中国读者搭建一座最便捷、最准确的桥梁，让大家能无障碍地接触到这些宝贵的学术资源。

最后，那个长长的期刊缩写列表，是不是让你们感觉很“高大上”？《Physical Review》、《Annalen der Physik》……这些名字，在物理学史上如雷贯耳。爱因斯坦发表相对论的奇迹之年（1905），他的四篇划时代论文就发表在《Annalen der Physik》（物理学年鉴）上。这个列表不仅是一个工具，更像是一张“英雄榜”，记录着百年来物理学和哲学领域最重要的思想交锋。

所以，同学们，当你们未来写论文或者做研究时，请记住这一页。它告诉我们，学术的殿堂是由一块块严谨引用的砖石搭建起来的。规范地引用文献，不仅是格式要求，更是对知识的尊重，是你参与到这场伟大的人类思想对话中的“入场券”。

【原文】

作者为中文版写的前言

孔子在《论语》中说道：“知之为知之，不知为不知，是知也。”（“为政”第二，第十七款）。这段话虽然是在两千五百多年前说的，但在今天仍然是对科学的最好的照之一。因为这段话既宣示了科学家对于他的知识的真理性的信念，同时又承认他的知识还远不是完备的。

在现代科学的各个部门中，没有哪个部门像量子力学那样，把上述事态表现得这么突出。一方面，量子力学的内部自治性以及它与几乎所有的物理学分支部门中的实验证据的一致，加强了物理学家相信它是终极真理的信念；但另一方面，要理解这个理论的真正涵义，要找出它的正确的诠释，却仍然是互相反对的各个学派激烈争论的一个题目。有这么多互相相对的根本不同的答案被提出来，这一事实提醒我们，孔子上面这段话的第二句现在还是不容忽视的。

本书正是致力于讨论量子力学理论的终极意义这个悬而未决的问题。

【解读】

现在我们读到的是这本书的作者，马克斯·雅默教授，特地为中文版写的序言。一位西方的大学者，在序言的开头，引用了我们最熟悉的孔子的名言，这本身就非常有趣，也体现了他对中国文化的尊重和理解。更妙的是，他用这句古老的东方智慧，精准地概括了现代物理学中最前沿、最核心的困境。

“知之为知之，不知为不知，是知也。”这句话大家在小学就学过，意思是“知道就是知道，不知道就是不知道，这才是真正的智慧”。雅默教授是如何把它和量子力学联系起来的呢？他将其解读为科学精神的两个层面。

第一层面，“知之为知之”。这代表了科学家对自己知识的强大信心。具体到量子力学，它的数学形式优美自治（“内部自治性”），并且它的预测与无数实验结果精确吻合（“与实验证据的一致”）。从芯片到核能，从激光到核磁共振，量子力学创造了我们现代文明的技术基础。它的成功是如此辉煌，以至于物

理学家们有充分的理由相信，他们已经掌握了描绘微观世界的“终极真理”。这就是“知之为知之”，是我们确信自己知道的那一部分。

第二层面，“不知为不知”。这代表了科学家承认自身知识局限的诚实和谦逊。雅默教授指出，尽管量子力学的公式“怎么用”我们很清楚，但这些公式背后到底“意味着什么”，我们却“不知道”。这就是前面提到的“诠释问题”。比如，描述一个电子的“波函数”究竟是什么？它是一种真实的物理存在，还是仅仅是我们用来计算概率的数学工具？当我们进行“测量”时，到底发生了什么神奇的过程，让一个处于多种可能性叠加状态的粒子瞬间“坍缩”到一个确定的状态？对于这些根本性的问题，物理学界分裂成了多个“互相反对的各个学派”，比如哥本哈根学派、多世界诠释、隐变量理论等等，大家争论不休，至今没有共识。这就是“不知为不知”，是我们坦诚自己还不知道的那一部分。

所以，量子力学完美地体现了孔子这句话的张力：它是有史以来最成功的科学理论之一（知），却也带来了最深刻的哲学困惑（不知）。承认这种“不知”，并勇敢地去探索它，正是科学进步的驱动力。雅默教授告诉我们，这本书，就是要带我们潜入这片“不知”的深海，去探索量子力学理论的“终极意义”这个悬而未决的世纪难题。这不仅仅是一次物理知识的学习，更是一场激动人心的哲学冒险。

【原文】

本书原来是用英文写的,我诚挚地欢迎秦克诚先生把它译成 中文出版。科学及其哲学的悠久历史已经表明它们是国际性

IX

作者为中文版写的前言

的。而且,我坚定地相信,随着科学进步的加速,科学及其为 人类造福的功能,其未来完全依赖于我们这个星球上一切国家之间的和谐合作。

孔子在《论语》中用下面这段话表达了这一思想:“学而不思则 罔,思而不学则殆”。(同上,第十五款)

过去,西方曾经从中国学到了很多。炼金术(Alchemy),它是现代化(Chemistry)的鼻祖,看来发源于古代中国。正如李约瑟(Joseph Needham)一再指出的,西方文字中这个字的字源来自汉语“炼金术”。汉语“炼金术”在广东话中的发音是 Lien kim shok,同中国进行贸易的阿拉伯商人把它转成 al kim 或 alkimiya,后来转为 alchemy。不但火药、烟火、造纸、种痘这些众所周知的发明来自中国,而更重要的还有关于磁性现象的现象。如果我们想到,通过 Peter of Maricourt(他与数学家兼天文学家郭守敬是同时代人)传到西方的磁学知识曾经促使并帮助建立了一个个引力理论,他以为引力来源于磁力,而这又有助于牛顿的伟大假设 奠基,那么,中国对西方物理学发展的影响,是怎样估计也不过分。因此,在过去,西方曾经向东方的中国“学”,而西方同时也“思”。

今天,中国的科学家,像那些在国外留学过的一辈科学家或者现在派到西方国家来的年轻一代科学家的例子所表明的那样,也在向他人“学”,但同时自己也在“思”。

我们必须感谢秦克诚先生,他承担了把本书译成中文的繁重 工作,使得他的同事们以及年轻一代的中国未来的物理学家们可 以方便地“学”到别人是怎样提出量子力学理论的种种诠释的,而

X
量子力学的哲学

通过他们自己的“思”,他们可望对这个困难问题的更完满的理解 作出贡献。

Max Jammer
马克斯·雅默 (Max Jammer)

目 录

【解读】

同学们，在序言的后半部分，雅默教授的视野从量子力学的内部困境，扩展到了对整个科学事业的宏大思考，特别是东西方文明在科学发展中的互动。他再次巧妙地引用了《论语》中的名句——“学而不思则罔，思而不学则殆”，并以此为框架，展开了一段精彩的论述。

首先，雅默教授强调了科学的“国际性”。科学知识不属于任何一个国家或民族，它是全人类的共同财富。尤其是在今天，面对全球性的挑战，解决复杂科学问题，“完全依赖于我们这个星球上一切国家之间的和谐合作”。这种开放、合作的精神，正是科学得以繁荣的根本。

接着，他将“学”与“思”这对概念运用到了东西方文明交流的宏大历史叙事中。他认为，“学”代表学习、借鉴、吸收外部的知识和经验；而“思”则代表在学习基础上的独立思考、创新和发展。

他首先回顾“过去”，指出“西方曾经向东方的中国‘学’”。他列举了大家耳熟能详的火药、造纸等发明，但更进一步，他提到了两个非常深刻的例子。一个是化学（Chemistry）的词源可能来自中国的“炼金术”（Lien kim shok），这指出了中国古代方术对世界物质观念的早期影响。另一个例子更为震撼：他认为中国对磁现象的早期研究，通过丝绸之路传到西方后，启发了人们对“超距作用”的思考（比如磁铁不用接触就能吸引铁钉），而这种思考，间接地为牛顿建立万有引力理论（同样是一种超距作用）铺平了道路。在他看来，这是一个典型的“西方‘学’、西方‘思’”的过程，即西方学习了东方的知识，并在此基础上进行了深刻的思考和理论升华。

然后，他将目光转向“今天”。他看到，中国的科学家们正在积极地向西方“学”习先进的科学技术和理论，但同时，他们也在进行自己的“思”考。这是一种充满敬意和期待的看法。他认为，科学的接力棒现在正在全球传递。

最后，他将这种期望具体化到这本书上。他感谢译者秦克诚先生的“繁重工作”，正是这项工作，为中国的学者和年轻学生们（也就是你们！）提供了一个绝佳的“学”的平台——学习西方物理学家和哲学家是如何思考量子力学诠释问题的。而他最终的希望是，你们在“学”了这些不同的观点之后，能够通过自己的“思”，也就是独立的、创造性的思考，为解决这个世纪难题“作出贡献”。

这篇序言不仅是对书本内容的介绍，更是一份深情的寄语。它告诉我们，学习科学知识，不仅仅是掌握公式和定理，更是要理解其背后的思想，参与到人类智慧的传承与创新中去。雅默教授期待着，未来的物理学突破，或许就将来自你们这些“学”贯中西、勤于“思”考的中国年轻人。好的，各位同学，大家好。我是你们的学术导师。今天我们要一起解读一份非常有趣的文档，它看起来像是一本书的目录。别小看这几行字，它其实是一张地图，将带领我们进入20世纪最深刻、最令人困惑也最激动人心的科学领域——量子力学的哲学世界。

在我们正式开始之前，请记住，我们的目标不是去解开量子力学的所有数学谜题，而是要理解那些最顶尖的头脑，比如爱因斯坦、薛定谔、海森伯，他们是如何思考和争论“现实”究竟是什么样子的。这趟旅程，更像是一场侦探游戏，而不是一次枯燥的公式推导。现在，让我们出发吧。

【原文】

作者序 1

第一章 形式体系和诠释 6

1.1 量子力学的形式体系 6

1.2 诠释 17

附录 28

文献选辑 I 28

文献选辑 II 33

第二章 早期的半经典诠释 36

2.1 1926/1927 年间关于量子力学概念的形势 36

2.2 薛定谔的电磁诠释 41

2.3 流体力学诠释 53

2.4 波恩原来的几率诠释 59

2.5 德布罗意的双重解诠释 67

2.6 后来的半经典诠释 73

第三章 测不准关系 80

3.1 测不准关系的早期历史 80

3.2 海森伯的推理 87

3.3 后来对测不准关系的推导 100

【解读】

同学们，我们眼前这份目录，来自一本名为《量子力学的哲学》的书。这本身就是一个非常有意思的组词，“量子力学”是物理学的前沿，而“哲学”则是对世界本源的追问。这本书的结构，就像一部精心编排的戏剧，为我们揭示了这场科学与哲学的伟大对话是如何展开的。

首先看第一章：“形式体系和诠释”。这是一个关键的开篇。大家可以把它想象成学习一门新语言，比如英语。“形式体系”就好比是英语的语法规则和单词表，比如主谓宾结构、时态变化。在量子力学里，这对应的就是薛定谔方程、矩阵力学这些数学工具。它们非常强大，能让你“说”出正确的句子——也就是做出精确的实验预测。但仅仅掌握了语法，你真的“懂”这门语言吗？不一定。这时候就需要“诠释”，它告诉你这些单词和句子在真实世界里究竟“意味着”什么。同样，量子力学的“诠释”就是要回答：那个神秘的“波函数 ψ ”到底是什么？是一个真实存在的波，还仅仅是我们描述知识的数学工具？你看，第一章就直接把核心矛盾摆在了我们面前：我们有一套能完美预测微观世界的数学规则，但我们却对这些规则背后的物理实在感到困惑。

接下来，第二章“早期的半经典诠释”，带我们回到了量子力学诞生的“英雄时代”——1926/1927年。这里的“半经典”这个词非常传神。想象一下，一群习惯了经典物理世界（就像我们日常生活的世界，一切都那么确定和直观）的物理学天才，突然闯入了一个充满幽灵般概率和波粒二象性的量子新大陆。他们的第一反应，自然是尝试用旧世界的地图（经典物理）来理解新世界的景观。于是，我们看到了各种天才的尝试：薛定谔试图把电子想象成一种经典的“电磁波”或“流体”；德布罗意提出了“双重解”，试图保留经典的粒子轨道概念。而波恩则提出了革命性的“几率诠释”，告诉我们波函数描述的不是实体，而是粒子出现在某处的“可能性”。这一章就像是一场思想的“百家争鸣”，展现了先驱们在面对未知时的挣扎、创造和激辩，让我们看到科学并非一蹴而就，而是一个充满人性光辉的探索过程。

最后，第三章聚焦于一个如雷贯耳的概念：“测不准关系”，也就是我们常说的不确定性原理。这一章的结构非常有意思，它从“早期历史”讲起，然后深入“海森伯的推理”，最后探讨“后来的推导”。这告诉我们，一个科学原理的诞生不是某个人灵光一闪的结果。它有其思想的源头，有其最初（可能不那么严谨）的提出过程，更有后人不断用更坚实的数学和逻辑去完善它的过程。海森伯最初可能是通过一个思想实验（比如著名的伽马射线显微镜）来直观地理解这个原理，但后来，物理学家们发现，这种不确定性是量子理论数学结构中一个内禀的、不可避免的性质。它不是我们测量技术不够好，而是微观粒子内生的属性。它深刻地动摇了经典物理学“只要知道初始条件，就能预测一切”的决定论根基。

总而言之，这份目录为我们描绘了一幅壮丽的画卷：从建立数学规则，到争论规则的意义，再到揭示规则背后深刻的哲学内涵。它告诉我们，科学的边界，就是哲学的起点。好的，各位同学，大家好！今天我们化身为思想的探险家，一同来解读一段关于现代物理学灵魂的文本。它看起来只是一份目录，但实际上，这是一张藏宝图，指引我们去探寻20世纪最伟大的科学辩论，一场关于“现实”本质的巅峰对决。让我们一起揭开它的神秘面纱。

【原文】

3.4 哲学涵义	
105	
3.5 后来的发展	

110

第四章 互补性诠释的早期说法 119

4.1 玻尔在科摩的演讲 119

4.2 批判的说明 132

4.3 “平行”互补性和“环形”互补性 141

4.4 历史上的先例 145

第五章 玻尔—爱因斯坦论战 150

5.1 第五届索尔维会议 150

5.2 玻尔同爱因斯坦之间早期的讨论 167

5.3 第六届索尔维会议 183

5.4 后来对光子箱实验和时间—能量关系的讨论 188

5.5 对玻尔—爱因斯坦论战的一些评价 217

第六章 不完备性异议和互补性诠释的后期说法 220

6.1 微观物理属性作为相互作用性的观念 220

6.2 EPR 论证的渊源 229

6.3 EPR 不完备性论证 250

6.4 对 EPR 论证的早期反应 261

6.5 量子态代表关系的观念 272

6.6 数学加工 293

6.7 对 EPR 论证的进一步反应 311

6.8 互补性诠释之被人们接受 341

第七章 隐变量理论 347

7.1 提出隐变量的动机 347

xiii 目录

【解读】

同学们，请看这份目录。它不是普通的章节列表，而是一部科学史诗的剧本大纲。主角是两位物理学

界的泰山北斗：尼尔斯·玻尔和阿尔伯特·爱因斯坦。而他们争论的核心问题，足以颠覆我们对整个世界的认知：我们眼中的“现实”究竟是什么？

故事从第四章的“互补性诠释”拉开序幕。这是玻尔为神秘的量子世界立下的核心法则。想象一下，你们在高中物理学过的波粒二象性——一个电子既可以是粒子，也可以是波。玻尔说，这两个身份就是“互补”的。就像一枚硬币，你看到正面就看不到反面，看到反面就看不到正面。你选择用测量“粒子性”的仪器去观察它，它就呈现出粒子的样子；你用测量“波动性”的仪器，它就呈现出波的样子。但你永远无法同时精确地看到它百分之百的粒子性和百分之百的波动性。这就是“互补原理”，它告诉我们，在微观世界里，观察行为本身会决定现实的呈现方式，这与我们日常经验大相径庭。

然而，这个想法让爱因斯坦无法接受。于是，第五章“玻尔-爱因斯坦论战”——也就是本剧的高潮——上演了。想象一下“索尔维会议”，那简直是物理学界的“华山论剑”。爱因斯坦，这位笃信“上帝不掷骰子”的经典物理捍卫者，一次次设计出精妙的思想实验，如同最锋利的矛，试图戳破量子力学那看似充满不确定性的盾。著名的“光子箱实验”就是他的一次致命攻击。而玻尔，作为哥本哈根学派的掌门人，则通宵达旦，绞尽脑汁，最终总能用量子理论的框架，甚至是爱因斯坦自己的相对论，化解对方的攻势。这场智力对决，是科学史上最璀璨的交锋之一。

进入第六章，爱因斯坦祭出了他最强的“杀手锏”——“EPR论证”，也被称为“EPR佯谬”。他联合两位同事，提出了一个思想实验，旨在证明量子力学是“不完备”的。简单来说，他认为量子力学描述的随机性背后，一定隐藏着某些我们尚未发现的变量，就像魔术师袖子里的机关。这个论证引出了“量子纠缠”这个今天听起来非常时髦的概念，爱因斯坦本人则嘲讽其为“鬼魅般的超距作用”。他认为，一个粒子在地球上的测量结果，不可能瞬间影响到远在宇宙另一端的另一个粒子。这违反了他深信不疑的定域性原理。

最后，第七章“隐变量理论”，正是对爱因斯坦质疑的回应与探索。它探讨的是这样一种可能性：我们看到的量子随机性，是否只是因为我们的无知？是否存在一个更深层次的、决定性的理论（即包含了“隐变量”的理论），可以像牛顿定律预测行星轨道一样，精确预测每一个微观粒子的行为？

所以，同学们，这份目录不仅是知识的索引，更是一段引人入胜的故事。它记录了一场关于确定性与随机性、实在与观测、经典世界与量子世界的伟大对话。这场对话至今仍在以各种形式延续，塑造着我们对宇宙的理解。好的，各位同学，请坐好。今天我们不讲具体的物理题，而是要像侦探一样，从一份书籍的目录中，窥探物理学史上最深刻、最激动人心的一场思想风暴。这份目录来自一本叫《量子力学的哲学》的书，它就像一张藏宝图，指引我们去探索物理学家们为了理解世界的终极奥秘而进行的百年论战。

我们现在就开始。

【原文】

7.2 量子力学之前的隐变量	353
7.3 量子力学中早期的隐变量理论	
361	
7.4 冯·诺伊曼的“不可能性证明”和对它的种种反应	366
7.5 玻姆使隐变量复活	

384

7.6 格里森、姚赫及其他人的工作 410

7.7 贝尔的贡献 419

7.8 近来在隐变量方面的工作 434

7.9 诉诸实验 458

第八章 量子逻辑 473

8.1 量子逻辑的历史根源 473

8.2 非分配逻辑和互补性逻辑 483

8.3 多值逻辑 503

8.4 代数方法 530

8.5 公理方法 536

8.6 量子逻辑和逻辑 558

8.7 种种推广 576

第九章 随机过程诠释 584

9.1 形式上的类似 584

9.2 早期的随机过程诠释 594

9.3 后来的发展 603

第十章 统计系统诠释 613

10.1 历史起源 613

10.2 意识形态方面的原因 618

10.3 从波普尔到明德 624

xiv 量子力学的哲学

【解读】

同学们，看到这份目录，你们可能会觉得它只是一串枯燥的标题和页码。但请相信我，这串列表背

后，隐藏着物理学界一场持续了近一个世纪的“华山论剑”。这不仅仅是关于公式和计算，更是关于“世界究竟是什么样子”的终极追问。

我们来看**第七章**，标题是“隐变量”。这个词听起来很神秘，但它的想法其实非常符合我们的直觉。大家知道，量子力学告诉我们，微观粒子（比如电子）的行为是概率性的，我们无法同时精确知道它的位置和动量（这就是你们学过的不确定性原理）。爱因斯坦对此深感不安，他说出了那句名言：“上帝不掷骰子”。“隐变量”理论，就是爱因斯坦阵营的“武器”。他们认为，量子力学的随机性不是世界本来的样子，只是因为我们还不知道某些“隐藏起来的变量”。就好比抛硬币，结果看起来是随机的，但如果你能精确知道硬币出手时的速度、角度、空气阻力等所有信息（这些就是“隐变量”），你就能完美预测它是正面还是反面。这一章就讲述了这个思想的兴衰史：从早期构想，到天才数学家冯·诺伊曼给出的“不可能性证明”（后来被发现漏洞），再到物理学家玻姆如何奇迹般地“复活”它，最后，关键人物贝尔登场，他设计了一个天才的实验思想，让这个纯粹的哲学思辨变成了可以被实验检验的科学问题。最终的“诉诸实验”部分，更是把这场争论推向了高潮。

接下来是**第八章“量子逻辑”**。这就更颠覆了。我们平时学习的数学和逻辑，都基于一个基本假设：一个命题要么是真的，要么是假的，不存在中间状态。比如，“这支笔在桌子上”这个陈述，它不可能是“既在又不在”。但在量子世界，一个电子可以同时处于“自旋向上”和“自旋向下”的叠加态，直到你测量它的那一刻，它才随机选择一个状态。这就好比那个命题在被观测前，是“既真又假”的。为了描述这个奇怪的世界，一些物理学家和逻辑学家提出，我们可能需要一套全新的逻辑规则——量子逻辑。这就好比我们习惯了用加减乘除来计算，现在突然有人告诉你，在某个领域， $1+1$ 可能不等于2，你需要一套全新的运算法则。这一章探讨的就是这套新法则的可能性和它怪异的特性，比如“非分配逻辑”。

最后，**第九章“随机过程诠释”和第十章“统计系统诠释”**，是另外两种理解量子力学的尝试。前者试图把量子的不确定性，类比成我们熟悉的布朗运动那样，看作是粒子在某种未知环境中随机游走的结果。后者则认为，量子力学的波函数描述的根本不是单个粒子，而是一大群相同粒子的统计平均行为。这就像天气预报说“明天降水概率30%”，它不是说每一滴雨会不会下，而是对整个区域状况的宏观描述。

所以，同学们，这份目录不仅是一本书的结构，它是一部思想斗争的史诗。它告诉我们，科学的边界充满了哲学思辨和激烈的争论。这些章节标题，就是这场伟大探索之路上的一座座里程碑。好的，各位同学，大家好！今天我们要挑战一个非常有意思的任务。我们面前的这份文档，是一本关于量子力学哲学的学术著作的序言。听起来是不是有点“高能”？别担心，我的任务就是当你们的“随身翻译”和“学术向导”，把这些看起来高深莫测的文字，解读成我们都能理解、甚至会为之着迷的知识。量子力学不仅仅是物理题里的公式，它更是一种看待世界的方式，一场颠覆了人类几百年思维定式的革命。现在，就让我们一起，从作者的序言开始，踏入这个奇妙而深刻的世界吧！

【原文】

10.4 其他尝试	650
第十一章 测量理论	656
11.1 经典物理学与量子物理学中的测量	

656

11.2 冯·诺伊曼的测量理论 661

11.3 伦敦和鲍厄的进一步加工 671

11.4 别种测量理论 677

11.5 潜属性理论 702

11.6 多世界理论 706

附录 格论 726

人名译名对照索引 734

作者序

在科学史上，还未曾有一种理论像量子力学那样对人类思想 × 发生过如此深远的影响；也从来没有一种理论，对如此大量的现象(原子物理学、固体物理学、化学等等)的预言赢得了这样惊人的成功。而且，对今天一切已知的事物而言，量子力学是关于基元过程的唯一逻辑一贯的理论。

因此，虽然量子力学要求对传统的物理学和认识论的最根本的基础作重大的修改，但是它的数学工具，或更一般地说它的抽象形式体系[formalism]，看来已经牢固地建立起来了。事实上，一直没有别的哪一种具有根本不同的模式体系得到人们的普遍接受，以作为代替物。然而，这个形式体系的诠释，在提出理论之后几乎半世纪的今天，却仍然是一场空前的争论的主题。事实上，它是当代的物理学基础研究中最有争议的问题，并且把物理学家们和科学哲学家们分成许多对立的学派。

【解读】
同学们，我们先来看这第一部分。开头的目录页是不是已经让你感受到一丝“不明觉厉”的气息了？“测量理论”、“冯·诺伊曼”、“多世界理论”……这些词汇听起来就像是科幻电影里的设定。但这恰恰就是我们今天要进入的、比科幻还精彩的真实科学世界。

接下来，作者在序言的开头，用极其肯定和有力的语言，为量子力学戴上了两顶“王冠”。第一顶，是“思想影响力之王”。作者说，没有任何理论能像量子力学一样，如此深刻地动摇和重塑了人类的思想。这可不是夸张。在量子力学出现之前，我们熟悉的经典物理学，比如牛顿力学，描绘的是一个非常确定的、有规律的世界：你给我一个物体初始的位置和速度，我能精确告诉你它未来任何时刻会在哪里。一切都像钟表一样精准运行。但量子力学告诉我们，在微观世界里，这种确定性消失了，取而代之的是概率和不确定性。一个电子可以同时“分身”在好几个地方，只有当你去“看”(也就是测量)它的时候，它才随机地决定出现在某一个点。这个想法彻底颠覆了我们对“现实”的理解。

第二顶王冠，是“应用成功率之王”。从原子、芯片（固体物理学）到化学反应，量子力学的预言精准得令人难以置信。可以说，没有量子力学，就没有我们今天的电脑、手机、核能和现代材料科学。它是现代科技当之无愧的基石。

然而，最精彩的部分来了——作者话锋一转，揭示了一个巨大的矛盾。量子力学的“数学工具”，也就是那一套复杂的公式和计算方法（作者称之为“抽象形式体系”），已经非常成熟和稳固，大家都在用，而且算出来的结果都对。但这就像我们每个人都会用手机，但很少有人真正明白里面的芯片和操作系统是怎么工作的。物理学家们面临的窘境是：他们虽然会“用”量子力学这套工具，但对于这些公式背后所描述的物理世界究竟是什么样子的，也就是对这个理论的“诠释”，却吵得不可开交。这场争论持续了近一个世纪，把最顶尖的物理学家和哲学家分成了好几个阵营，比如我们目录里看到的“多世界理论”就是其中之一。所以，这段文字的核心思想就是告诉我们量子力学的一个奇特之处：它是一个在应用上无比成功，但在哲学根基上却充满争议的理论。它好用，但它“是什么意思”，没人有最终答案。

【原文】

尽管量子力学的诠释问题对物理学和哲学都很重要，但这个问题却很少(如果不是完全没有的话)从一种一般的历史的观点不偏不倚地[sine ira et studio]研究过。关于这个题目所发表的大量文章或专著，通常都只限于在某些专门的方面为某种特定的观点辩护；迄今尚未见到过对这个问题的全貌和历史所作的全面、

2 量子力学的哲学

渊博的分析。这本历史-批判性著作就是用来填补这个空白的。

本书还有另外两个目的。

由于本书不只是量子力学各种诠释的一部编年纪录，而主要是注意分析它们的概念背景、哲学涵义和相互关系，因此它也可以用来作为学习量子力学的逻辑基础和哲学的一般性的人门书。这个问题虽然对更深刻地理解现代物理学是必不可少的，但是在通常的关于量子力学理论的教科书和讲义中却几乎没有得到足够的考虑。而且历史的讲述方法还有其教学法上的优点，它能减轻那些尚未入门的读者学习这个课题的困难。

最后，由于本书对文献的详细引证，本书也可用作关于这一题目的文献指南。作者费了不少心思，以对所讨论的课题的国际文献提供一个精确的和-迄至最近的参考目录。读者当会发现不难追溯他感兴趣的任何特殊细节。为了使本书自成体系，并且使本书不但对专家而且对只是初步懂得量子物理学的一般读者都易于理解，所有对量子力学诠释问题有重要意义的定理都或译或略地给出其证明。此外，对于许多理解本书正文所必需但量子力学教程通常并不包含的材料，或者详尽地说明，或者至少介绍到这种程度，使得对论证的理解不至于出现困难。特别是，为了读者的方便，在本书的附录中概述了格论的基本内容，这门数学分支是物理学家们极少涉猎但对充分理解量子逻辑及有关论题却是不可少的。这个概述尽管很简略，却已包括了为证明正文中有关定理所必需的全部预备知识。

如果读者只对问题的哲学方面感兴趣，他也可以略去书中一些比较专门的和较为数学性的段落不读，而仍能跟上主要的

3 作者序

【解读】

好了，在了解了量子力学的“成功与争议”之后，作者开始介绍他写这本书的“初心”和“攻略”。

首先，他指出了学术界的“空白区”。关于量子力学诠释的争论，虽然文章和书很多，但大部分都像是在打辩论赛，每一方都只想证明自己是正确的，而很少有人愿意当一个中立的记录者和分析师，客观地梳理这场百年论战的来龙去脉。作者在这里用了一个拉丁文短语“sine ira et studio”，意思是“没有愤怒和偏爱”，也就是不偏不倚、公正客观。他这本书的首要目标，就是要填补这个空白，给大家呈现一幅关于量子力学诠释争论的“全景历史地图”。

接下来，作者说明了本书的另外两个目的，这两个目的对我们这样的学习者来说，简直是“福音”。第一，这本书可以作为一本“量子力学哲学入门指南”。我们高中的物理课本，更多的是教我们“怎么算”，比如用公式去解题。但这本书关注的是“为什么这么算”，这些公式背后的逻辑是什么？它有什么哲学意义？这能帮助我们从一个更深的层次去理解物理学的灵魂。作者还特别提到，他采用“历史的讲述方法”，这就像听故事一样，能让我们更容易地进入这个有点抽象的领域，而不是一上来就被复杂的概念吓跑。

第二，这本书也是一个“学术寻宝图”或“文献指南”。作者不仅自己写，还为我们指明了深入探索的方向。他详细引用了大量文献，如果你对某个观点特别感兴趣，就可以顺着他给的线索自己去挖掘。更贴心的是，作者考虑到了像我们这样可能数学基础没那么深厚的读者。他向我们保证：即使跳过那些看起来头疼的数学部分，也完全能跟上主要的思想脉络。这就好比看一部有深度的好莱坞大片，你即使不懂电影拍摄技巧，也照样能被剧情和思想所震撼。为了帮助我们理解一些必要的、但不常见的数学工具，他还在书后面准备了一个“新手包”——附录里的“格论”简介。“格论”是理解“量子逻辑”的关键，但大多数物理学家都不熟悉，作者特意为我们做了“课外辅导”。

总而言之，这段序言向我们展示了作者的良苦用心。他不仅要写一部严谨的学术著作，更希望它能成为一座桥梁，引导所有对科学和哲学充满好奇心的读者，安全、愉快地进入量子力学这个神秘又迷人的思想宫殿。好的，同学们，今天我们来一起精读一篇关于量子力学哲学的重要著作的序言和开篇。这部分内容虽然不涉及具体的物理公式，但它为我们理解科学是如何被研究、被书写，以及量子力学这门学科的独特性质，提供了一个绝佳的视角。请大家放松心态，我们将像侦探一样，从作者的字里行间，发掘出这部著作背后深层的思考和脉络。

【原文】

论证线索，不致有严重的不连续之感。

本书采用的记号尽可能在全书统一，并且在正文中都有解释。为了使书的篇幅不至过大，避免脚注中文名称重复，书中采用了如下的缩写记法。例如第三章的脚注 2“参见 2-1(1969, p. 105; 1971, p. 73)”，意思就是参见第二章脚注 1 所列的参考文献中的 1969 年出版的该书的第 105 页和 1971 年出版的该书的第 73 页。若是参见同一章的，则略去了章号。对于要参见的数学方程也采用了类似的记号。本书源自 1968 年我在哥伦比亚大学(纽约)关于现代物理学的历史和哲学的一门研究生课程的讲稿。书的头四章是我在访问明尼苏达州科学哲学中心(明尼阿波利斯)、马克思·普朗克研究所(慕尼黑和施达恩堡)和尼尔斯·玻尔研究所(哥本哈根)期间写成的。第五章以 1971 年我在国立罗蒙索夫大学(莫斯科)举行的第十三届国际科学史会议上宣读的一篇论文为基础。随后两章是我于 1972 年和 1973 年在瓦伦那(意大利)的“恩里科·费米”国际物理学讲习班、在佛罗伦斯大学以及在阿姆斯特丹大学的讲演⁷扩充而成。第八章于我访问柏林、哥丁、汉堡及马尔堡等大学期间写成。最后三章是在西蒙·弗拉赛大学(加拿大的不列颠哥伦比亚)、阿尔贝塔大学(加拿大的埃德蒙顿)和里德蒙顿(俄勒冈州波特兰)完成的。我在 1973 年担任该学院安德鲁·梅隆[Andrew Mellon]讲座的高级访问教授。

这些讲座之约使我 Giron 机会查阅许多藏书和档案，而更重要的是，使我得以同当代第一流的量子理论家建立了私人接触。我不顾实用主义者人文学家席勒[F. O. S. Schiller]所称的“奇怪的

4 量子力学的哲学

清楚，即禁忌在一个哲学家在世时提出关于他的意向的问题”，而是不客气地向许多杰出的权威询问了关于他们在量子力学基础方面的工作的详情。他们非常乐意和坦率地回答我的问题，使我得到了大量第一手的信息，这对一个搞现代物理学史的人是莫大的幸运。

因此我得向许多人表示谢意。关于哲学在物理学中的作用方面，对我的观点影响最大的是以下几位教授的著作以及同他们的讨论：费格尔[Herbert Feigl]、费耶拉本德[Paul k. Feyerabend]、马格瑙[Henry Margenau]、纳格尔[Ernst Nagel]和施特格缪勒[Wolfgang Stegmüller]。至于纯物理学方面，我得感谢德布罗意[Louis de Broglie]、狄拉克[Paul A. M. Dirac]、李政道及维格纳[Eugene P. Wigner]等几位教授，他们有的阅读了本书的部分手稿，有的让我有幸同他们讨论本书涉及的许多问题。我也得感谢巴伦泰恩[Leslie E. Ballentine]教授和玻姆[David Bohm]教授，他们阅读了大部分打印稿；还有玻普[Friedrich Bopp]、布[Jeffrey Bub]、弗里德里希·洪德[Friedrich Hund]、约瑟夫·约翰[Josef M. Jauch]、帕索纳尔·乔丹[Pascnal Jordan]、格哈特·吕德斯[Gerhart Lüders]、彼得·米特尔施泰特[Peter Mittelstaedt]、威廉·奥克斯[Wilhelm Ochs]、鲁道夫·佩尔斯[Rudolf Peierls]、康斯坦丁·皮隆[Constantin Piron]、莫里斯·伦宁格[Maurice Renninger]、内森·罗森[Nathan Rosen]、莱昂·罗森费尔德[Léon Rosenfeld]、门德尔·萨克斯[Mendel Sachs]、埃哈德·谢贝[Erhard Scheibe]、阿布纳·西蒙尼[Abner Shimony]、格奥尔格·许斯曼[Georg Süssmann]和弗里德里希·卡尔·冯·魏茨泽克[Friedrich Carl von Weizsäcker]等教授，他们在令人兴奋的谈话中耐心地同我讨论了他们的工作的许

5 作者序

多方面。我还要感谢达泽夫[Assène B. Datzeff]、贝尔[John Stewart Bell]、布洛欣采夫[Димитри И. Блохинцев]、比歇尔[Wolfgang Büchel]、格勒讷沃尔德[Hibrand J. Groenewold]、格雷特·赫尔曼[Grete Henry Hermann]、霍夫曼[Banesh Hoffmann]、肯布尔[Edwin C. Kemble]、兰德[Alfred Landé]、波普尔爵士[Sir Karl R. Popper]和施特劳斯[Martin Strauss]等教授，以及埃弗雷特博士[Dr. Hugh Everett III]、伦敦夫人[Mrs. Edith London]和波多尔斯基夫人[Mrs. Polly Boris Podolsky]，感谢他们的合作，他们用书信提供了资料。最后，我要感谢我的同事卢班[Marshall Luban]教授和格鲁克[Paul Gluck]教授，他们阅读了本书的打印稿并提了批评意见。

不用说，若有任何错误或误解之处，责任完全在我。

viii

马克斯·雅默

1974 年 11 月于

巴里兰大学(以色列拉马拉马拉甘)及纽约市立大学

【解读】

同学们，我们刚刚读完的这段文字，是这本书的作者序。它就像一部电影的“幕后制作”特辑，向我们揭示了这部学术巨著是如何诞生的。请注意，这不仅仅是一篇礼节性的感谢信，它蕴含着关于学术研究本质的重要信息。

首先，作者马克斯·雅默（Max Jammer）开篇就提到了“记号”和“脚注”的规范。这看似枯燥，但却是学术严谨性的基石。大家未来进入大学写论文，就会明白这种规范引用的重要性。它像一张地图，让读者可以追溯作者的每一个论点的来源，确保知识的传承和可验证性。这是一种对知识的尊重，也是科学共同体内部沟通的“通用语言”。

接着，雅默教授讲述了这本书的“旅行地图”。从纽约的哥伦比亚大学，到德国的普朗克研究所，再到丹麦的玻尔研究所，甚至莫斯科、意大利、加拿大……这本书的每一个章节几乎都在一个不同的世界顶级学术中心完成。这告诉我们什么？科学研究，尤其是前沿的理论物理和科学史研究，是一个全球性的、流动的、开放合作的事业。它不是一个人关在书斋里的冥思苦想，而是通过不断的交流、讲学和访问，在与世界各地最顶尖大脑的碰撞中产生的。

而这段序言最核心、最激动人心的部分，在于雅默教授的研究方法。他提到，他“不客气地”向那些创造了量子力学的物理学巨匠们，如德布罗意、狄拉克等人，直接询问他们工作的细节和“意向”。这在学术研究中是非常宝贵的。想象一下，你不是在读莎士比亚的剧本，而是在直接采访莎士比亚，问他：“您写哈姆雷特时，到底在想什么？”雅默做的就是类似的事情。他没有仅仅依赖文献和历史档案，而是去采访那些“活着的传奇”，获取了宝贵的“第一手信息”。这对于理解一门像量子力学这样颠覆我们常识的学科来说至关重要，因为很多关键的思想火花、争论的细节，可能并未记录在正式发表的论文中。

最后，那份长长的感谢名单，绝非简单的“点名”。这份名单本身就是20世纪中叶物理学和科学哲学领域的一幅“群星闪耀图”。我们看到了诺贝尔奖得主（如德布罗意、狄拉克、李政道、维格纳），也看到了重要的哲学家（如波普尔、费耶拉本德）。这说明，理解量子力学不仅仅是物理学家的事，它深刻地触及了哲学的根基，吸引了两个领域的顶尖学者共同探讨。这本书，正是作者站在这些巨人的肩膀上，综合了物理学、历史学和哲学的多重观点，为我们呈现的一场关于量子世界的思想盛宴。总而言之，这篇序言告诉我们：一部伟大的学术著作，诞生于严谨的规范、全球化的合作、勇敢的第一手探寻，以及跨学科的智慧交融。

【原文】

第一章 形式体系和诠释

1.1 量子力学的形式体系

2

本章是一引论，它的第一部分目的是简述有限自由度系统的非相对论量子力学的数学形式体系的概要。正如我们在另一书¹中指出的，这个形式体系是一个复杂的不断摸索的概念演化过程的产物；可以并不夸张地说，这个形式体系超前于它本身的诠释，这种事态在物理学史上几乎是独一无二的。虽然假定读者都熟悉这个形式体系，我们仍将在这里回顾它的主要特征(但不涉及数学细节)，以引入讨论各种诠释所需的实质性内容和术语。

和别的物理理论一样，量子力学可以用几种公理化陈述来表述。历史上最有影响，因而对量子力学诠释的历史最重要的形式体系是冯·诺伊曼于二十年代末提出的，并在他在关于量子学数

① M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1966, 1968, 1973); 日文译本(东京, 1974)。

7 第一章 形式体系和诠释

学基础的名称¹中得到详细说明。

近年来出版了不少讨论和完善冯·诺伊曼的形式体系的优秀著作²，读者要了解进一步的细节可以参考。冯·诺伊曼的M思想是把量子力学表述成希尔伯特空间中的一种算符运算，这无疑是现代物理学中的一大创新³。

按照冯·诺伊曼的抽象定义，一个希尔伯特空间是一个完备的(相对于由内积生成的度规而言)，可分的线性严格正内积空间(一般是在复数域 H 上)。这个空间的元素称为矢量，通常用 $\varphi, \psi, \dots$ 表示，它们的内积或称积记为 (φ, ψ) ；而 φ 的元素则称为矢量，通常用 $a, b, \dots$ 表示。希尔伯特[D. Hilbert]在其关于线性

【解读】

同学们，进入第一章，我们立刻就遇到了挑战。这段文字充满了“形式体系”、“诠释”、“公理化”、“冯·诺伊曼”、“希尔伯特空间”这些听起来就很高深的术语。别担心，这正是我们要攻克的堡垒。让我们一层一层地剥开它的外壳。

首先，作者提出了一个贯穿全书的核心概念：“形式体系”(Formalism)与“诠释”(Interpretation)。这是理解量子力学之谜的钥匙。我们可以用一个绝佳的类比来理解它们的关系：**象棋**。

象棋的“形式体系”是什么？就是它的规则：棋盘是8x8的方格，“马”走日，“象”走田，吃掉对方的“王”就算赢。这套规则是纯粹的、抽象的、数学化的。你不需要知道“马”为什么这么走，你只要遵守规则就可以下棋。同样，量子力学的“形式体系”就是它的数学框架——一套严密的、由公理和方程（比如薛定谔方程）构成的规则。物理学家使用这套规则，可以极其精确地计算出微观粒子的行为，预测实验结果。

那么，象棋的“诠释”又是什么呢？这就复杂了。我们可以说，象棋是古代战争的模拟，每个棋子代表一个兵种。这是一种诠释。我们也可以说，它是一场纯粹的智力游戏，与战争无关。这是另一种诠释。你看，对于同一套规则（形式体系），我们可以有不同的理解和意义解读。

现在，我们来看作者提出的那个惊人的论断：“**这个形式体系超前于它本身的诠释，这种事态在物理学史上几乎是独一无二的。**”这句话是什么意思？意思是，在量子力学的发展过程中，像海森堡、薛定谔、狄拉克这些天才物理学家，先是摸索出了一套能够完美预测实验结果的数学规则（形式体系），但他们自己对于“这套规则到底意味着什么”却争论不休。电子在被观测前到底在哪里？波函数到底是什么？一个粒子真的能同时在两个地方吗？这些问题，就是关于“诠释”的争论。就好像人们发明了象棋规则，并且用它下出了精彩的棋局，但对于“棋子到底代表什么”、“这场游戏究竟在描绘什么”却吵了几十年。这在牛顿力学或电磁学中是不可思议的，在那些理论里，形式和意义是紧密结合的。

接着，作者提到了一个关键人物：**冯·诺伊曼**。如果说早期量子力学的创立者们像是一群各自为战、凭借直觉和灵感构建规则的象棋大师，那么冯·诺伊曼就是那位伟大的逻辑学家。他站出来说：“好了，我们别争了，我来给这盘棋写一本最严谨、最权威的《官方规则手册》。”他用一种叫做“**希尔伯特空间中的算符运算**”的强大数学工具，把量子力学的所有规则都统一起来，建立在一个坚实的公理化基础上。

那么，“希尔伯特空间”又是什么？别被它复杂的定义吓倒。大家可以这样想象：我们描述一个物体在三维空间中的位置，需要用一个包含(x, y, z)三个坐标的矢量。而希尔伯特空间，则是一个更抽象、维度可能无限高的“状态空间”。在这个空间里，每一个“矢量”（比如作者提到的 ψ ）不再代表一个物理位置，而是代表一个量子系统（比如一个电子）的**全部可能状态**。而所谓的“算符”，就像是作用在这个矢量上的“操作”，通过这种操作，我们就能计算出关于这个电子的物理量，比如它的能量或者动量。

简单来说，冯·诺伊曼的贡献，就是为量子力学这个奇怪的游戏，提供了一个无懈可击的数学舞台（希尔伯特空间）和一套精准的表演脚本（算符运算）。他使得物理学家们有了一个共同的、严格的数学语言来讨论问题。然而，舞台和脚本再完美，演员们（物理学家们）对于“这出戏到底演的是什么”的争论，也就是关于“诠释”的争论，却一直持续到了今天。这就是本书将要带我们深入探索的迷人领域。好的，各位同学，大家好。我是你们的学术导师。今天我们要挑战一个非常有深度的话题——量子力学的数学基础。眼前这份文档，看起来可能有些吓人，充满了陌生的名字和符号。但请相信我，这背后是一个波澜壮阔的科学故事。我的任务，就是带你们穿越这些文字的迷雾，看到物理学与数学交汇处最美的风景。我们将像侦探一样，逐段分析这些线索，揭开量子世界的神秘面纱。准备好了吗？让我们开始吧。

【原文】

- ① J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quanten Mechanik* (Springer, Berlin, 1932, 1969; Dover, New York, 1943); 法文译本 (1946); 西班牙文译本 (1949); 英译本 *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton U. P., Princeton, N. J., 1955); 微译本 (1964)。
- ② G. Pano, *Mathematical Methods of Quantum Mechanics* (Mc Graw-Hill, New York, 1971); 意大利文本 (1967)。B. Sz. -Nagy, *Spektraldarstellung lineare Transformationen des Hilbertschen Baumes* (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1967) i. J. M. Jauch, *Foundations of Quantum Mechanics* (Addison-Wesley, Reading, Mass, 1968); B. A. Lengyel, "Functional analysis for quantum theorists", *Advances in Quantum Chemistry* 1968, 1 –82, i. J. L. Soulé, *Linear Operators in Hilbert Space* (Gordon and Breach, New York, 1968); T. F. Jordan, *Linear Operators for Quantum Mechanics* (Wiley, New York, 1969); i. E. Prugovecki, *Quantum Mechanics in Hilbert Space* (Academic Press, New York, London, 1971)。
- ③ 关于这一发现的数学背景的历史，见文献 1 及 M. Bernkopf, "The development of function spaces with particular reference to their origins in integral equation theory", *AHES* 3, 1 –96 (1966); "A history of infinite matrices", 同上, 4, 308 –358 (1968) ; E. E. Kramer, *The Nature and Growth of Modern Mathematics* (Hawthorn, New York, 1970), pp. 550 –576; M. Kline, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times* (Oxford U. P., New York, 1972), pp. 1091—1095。

【解读】

同学们，看到眼前这一大串书名和人名，是不是感觉有点头晕？别担心，这其实不是正文，而是学术

论文或著作开头的“参考文献”或“引注”。我们可以把它看作是一张“藏宝图”的索引，或者是一部电影开头的演职员表。它告诉我们，接下来要讲的故事，是建立在哪些巨人的肩膀之上的。

我们来仔细看看这张“英雄榜”。排在第一位，也是最重磅的，是冯·诺伊曼（J. von Neumann）。请记住这个名字，他是一位堪比爱因斯坦的科学巨匠，在数学、物理学、计算机科学（他被称为“计算机之父”）等多个领域都做出了奠基性的贡献。他1932年出版的德文著作《量子力学的数学基础》，就是我们今天这个话题的“圣经”。你们看，这本书后来被翻译成了法文、西班牙文、英文等多种语言，这足以说明它的重要性——全世界的科学家都必须学习它，才能真正搞懂量子力学。

第二和第三部分列出的，是其他科学家的著作和历史研究。这说明了科学研究的一个重要特点：它不是一个人的独角戏，而是一个庞大的知识共同体共同努力的结果。这些文献就像一张巨大的网络，将冯·诺伊曼的开创性工作，与后来的发展、历史的溯源紧密联系在一起。它们在告诉我们：我们即将探讨的理论，不是凭空想象，而是经过了几十年、无数顶尖大脑的思考、验证和发展的，其根基无比坚实。所以，当你未来写论文时，也要像这样列出参考文献，这既是对前人研究的尊重，也彰显了你自己工作的严谨和可靠。现在，就让我们带着对这些先驱的敬意，正式踏入他们所构建的宏伟殿堂。

【原文】

8 量子力学的哲学

分方程的工 (1904 –1910) 中, 研究过这种空间两种实现 [realization], 即定义在实轴 R 的一个区间 (或 R 本身) 上的全部勒贝格 (Lebesgue) 可测的平方可积复函数 (类) 所构成的勒格空间 L^2 , 和绝对值平方之和收敛的复序列表构成的空间 l^2 。根据里兹-菲歇尔 [Riesz-Fischer] 定理, 可以证明这两个空间是同构的 (而且是等距的); 因此, 尽管这两个空间表面上并无相似之处, 实质上却是同样的空间。冯·诺伊曼对这一点有深刻的印象, 就把所有这种结构的同命名为希尔伯特空间。这种同构保证了海森伯的矩阵力学与薛定谔的波动学之间的等价性, 这一事实使冯·诺伊曼意识到希尔伯特空间对量子力学的数学表述的重要性。

【解读】

好了，正片开始！这一段是全文的核心，它解答了一个困扰物理学界多年的大问题。在20世纪20年代，描述微观粒子运动的量子力学有两个“版本”。一个是海森伯创立的“矩阵力学”，他用一串串无穷的数字列表（也就是矩阵）来描述粒子的状态和运动。另一个是薛定谔创立的“波动力学”，他用一个连续的函数（也就是你们熟悉的波函数）来描述。想象一下，这就像两个人描述同一个东西，一个用的是数字表格，另一个用的是函数图像，两种语言风马牛不相及，但奇怪的是，他们算出来的结果总是一样的！这到底是怎么回事呢？

冯·诺伊曼，这位数学天才，洞悉了问题的本质。他发现，这两种看似不同的描述，其实是同一个数学结构——“希尔伯特空间”——的两种不同“表现形式”（原文称之为“实现”[realization]）。

我们来打个比方。我想描述我在三维空间里的位置。我可以用笛卡尔坐标 (x, y, z) 这三个数字来表示，这就是海森伯的“矩阵力学”的思路，对应文中的 l^2 空间（无穷维的数字列表）。我也可以用一个从原点指向我的位置的向量来表示，这个向量可以看作一个“函数”，它把“方向”映射到“长度”，这就是薛定谔“波动力学”的思路，对应文中的 L^2 空间（由函数构成的空间）。

虽然坐标（数字列表）和向量（函数）看起来不一样，但它们描述的是同一个点，它们背后的“三维空间”这个舞台是同一个。冯·诺伊曼发现的“希尔伯特空间”就是量子世界的那个“舞台”。而“里兹-菲歇尔定理”就像一个完美的翻译器，证明了 l^2 空间和 L^2 空间是“同构的”(isomorphic)，意思是它们的内部结构完全一样，可以毫无障碍地互相转换。这就好比我们证明了无论用坐标还是用向量，我们所研究的几何规律是完全一样的。

这个发现的意义是革命性的！它告诉我们，海森伯和薛定谔不是在各说各话，他们只是从不同角度描述了同一个更深邃的现实。而这个现实的数学载体，就是希尔伯特空间。从此，量子力学有了统一、严谨的数学语言，不再是两种理论的“巧合”，而是一个逻辑自治的完美体系。

【原文】

为了复习这一数学表述，我们来回顾一下它的一些基本观念。

希尔伯特空间 X 的一个 (闭) 子空间 S 是 X 中矢量的——线性流形 (即关于矢量加法和乘以标量的乘法是封闭的)，并且这个线性流形对于度规是闭合的，因此 S 本身也是一个希尔伯特空间。 S 的正交集 $S^\perp$ 是同 X 中所有矢量正交的全部矢量的集合。一个线性流形 φ_A 到 X 的映射 (mapping) $\psi \rightarrow \varphi = A\psi$ ，若对于 D_A 中的一切 φ_1, φ_2 和 X 中的一切 a, b 都有 $A(a\varphi_1 + b\varphi_2) = aA\varphi_1 + bA\varphi_2$ ，则 A 是一个线性算符，其定义域为 D_A 。 D_A 在 A 作用下的是象 A 的值域 R_A 。我们称一个线性算符 A 是连续的，而且且仅若 A 有界 [即 $\|A\varphi\| / \|\varphi\|$ 有界，其中 $\|\varphi\|$ 表示 φ 的范数 $(\varphi, \varphi)^{1/2}$]。算符 A^+ 称为 A 的一个开括，或 $A^+ \equiv A$ 。若 A^+ 在 D_A 上与 A 重合而且 $D_A \equiv D_{A^+}$ 。因为每个有界线性算符有唯一的一个 X 上的连续开括，故总可以取其定义域为 X 。

一个有界线性算符 A 的伴算符 A^+ 是指对 X 中的所有 φ, ψ

9 第一章 形式体系和诠释

【解读】

如果说上一段告诉我们量子世界的“舞台”是希尔伯特空间，那么这一段就是在介绍这个舞台上的“布景”和“游戏规则”。这部分内容非常抽象，充满了数学术语，但我们可以用我们熟悉的三维空间来理解它们。

- 子空间 (Subspace)**：想象整个三维空间就是我们的希尔伯特空间 X 。那么，桌面这个无限延伸的二维平面，就是一个“子空间” S 。为什么呢？因为你在桌面上随便找两个箭头（矢量），把它们相加，或者把它们拉长缩短，得到的新箭头肯定还在这个桌面上，跑不出去。这种“封闭性”就是子空间的核心特征。在量子力学里，一个子空间可以代表系统所有可能状态的一个特定集合。
- 正交集 (Orthogonal Set)**：继续用桌面的比喻。什么是和整个桌面都垂直的东西？当然是垂直于桌面的那根直线，比如桌腿的方向。这根直线上所有的矢量（箭头），都和桌面上的任何一个矢量成90度角（正交）。那么，这根无限长的直线，就是桌面这个子空间的“正交集” $S^\perp$ 。
- 线性算符 (Linear Operator)**：这是最重要的概念！“算符”是量子力学里的“动作”或者“测量”。比如，“测量一个粒子的动量”这个操作，在数学上就对应一个“动量算符” A 。你把你一个代表粒子状态的矢量 ψ （可以想象成一个箭头）“喂”给这个算符，它就会“吐”出一个新的矢量 $A\psi$ 。而“线性”的意思是，这个算符遵守我们熟悉的叠加原理。 $A(a\varphi_1 + b\varphi_2) = aA\varphi_1 + bA\varphi_2$ 这个公式看着复杂，其实意思就是：你把两个状态混合后再测量，得到的结果，等于你先分别测量这两个状态再把结果混合起来。我们高中物理学的电场、磁场叠加，就蕴含着这种“线性”思想。

4. **有界算符 (Bounded Operator) 和 伴算符 (Adjoint Operator)**: 这两个是更专业的概念。“有界”可以通俗地理解为一个“安全”的算符，它不会把一个有限长度的矢量变成一个无限长的矢量，保证了物理结果的合理性。“伴算符 A^+ ”则像是算符 A 的一个“孪生兄弟”，它在数学上有非常重要的性质。在量子力学中，所有代表可观测物理量（如能量、动量、位置）的算符，都必须满足一个特殊条件：它和它的“孪生兄弟”长得一模一样（即 $A = A^+$ ，称为自伴算符或厄米算符）。这个苛刻的条件，保证了我们测量出的物理量必然是实数，而不是虚数，这与我们的物理经验是相符的。

总而言之，这一段为我们描绘了量子力学的数学骨架：状态是希尔伯特空间中的矢量，测量是空间中的线性算符。这套语言的建立，标志着量子力学从一门新兴物理理论，真正成长为一门数学上完美自治的精确科学。好的，同学你好！很高兴能和你一起探讨量子力学这个迷人又深刻的领域。眼前这份文档是量子力学公理化表述的核心，由大数学家冯·诺伊曼奠定。它充满了抽象的数学符号，看起来可能有点吓人，但别担心，这正是它的力量所在——用严谨的数学语言，为我们描绘出微观世界的运行法则。

我的任务就是当你的“翻译”和“向导”，把这些看似天书的数学概念，转化成我们能理解、能感受的物理图像。我们会一步一步来，你会发现，一旦掌握了这些核心思想，你就能站在一个全新的高度去审视我们所处的世界。让我们开始吧！

【原文】

都满足 $(\varphi, A\psi) = (A^+\varphi, \psi)$ 的唯一的算符 A^+ 。若 $A = A^+$ ，则称 A 是自伴算符。若 $AA^+ = A^+A = I$ ，其中 I 为恒等算符，则 A 为么正算符。若是 S 是 X 的一个子空间，则每个矢量 φ 可以唯一地分解为 $\varphi = \varphi_S + \varphi_{S^\perp}$ ，上式中 φ_S 属于 S 而 $\varphi_{S^\perp}$ 属于 $S^\perp$ ，因此映射 $\varphi \rightarrow \varphi_S = P_S\varphi$ 所定义的投影算符 P_S 是一有界自伴算符（即 $P_S = P_S^*$ ）线性算符。反之，若一线性算符 P 有界、自伴而且幂等，则它 P 是一投影算符。投影算符和子空间是一一对应的。两个子空间 S 和 T 对应的投影算符为 P_S 和 P_T ，若而且仅若 $P_S P_T = P_T P_S = 0$ （零算符）时， S 和 T 才是正交的[即对 S 中的一切 φ 和 T 中一切 ψ 都有 $(\varphi, \psi) = 0$]，这时也称 P_S 和 P_T 正交；此外， $\sum P_{S_i}$ 是一投影算符，若而且仅若 $j \neq k$ 时 $P_{S_i} P_{S_k} = 0$ 。若而且仅若 $P_S P_T = P_T P_S = P_S$ 时， $S \subseteq T$ ，即子空间 S 是 T 的一个子空间，这时我们也写作 $P_S \leq P_T$ 。这时 $P_T - P_S$ 是投影到 S 在 T 中的正交余集（即 T 中与 S 的每一矢量正交的一切矢量的集合）上去的一个投影算符。

对于一个无界线性算符 A ，根据赫林格—特普立茨[Hellinger-Toeplitz]定理，若 A 是对称的[即对 D_A 中的一切 φ, ψ 都有 $(\varphi, A\psi) = (A\varphi, \psi)$]，则它的定义域不能为 X ，但可以有一个在 X 中稠密的定义域。这时自伴的定义如下：若对应于矢量 φ 存在有一矢量 φ' ，使得对 D_A 中的一切 φ 都有 $(\varphi, A\psi) = (\varphi', \psi)$ ，则全部矢量 φ 的集合就称为 A 的伴算符的定义域，而 A 的伴算符 A^+ 本身则由映射 $\varphi^+ \rightarrow \varphi' = A^+\varphi$ 来定义。若 $A = A^+$ ，则 A 是自伴的。

【解读】

同学，我们先来攻克第一段，这部分是纯粹的数学“内功心法”。它在为我们后面理解量子世界的物理规则打下坚实的基础。你可以把这里的“算符”(Operator)想象成一个函数或者一台机器，你放进去一个“矢量”(Vector)，它就吐出来另一个“矢量”。在量子力学里，这些矢量就代表着一个量子系统（比如一个电子）的状态。

首先，我们来认识几位重要的“算符”角色：

- 1. 伴算符 (Adjoint Operator) $A^\dagger$:** 原文中 $(\phi, A\psi) = (A^\dagger\phi, \psi)$ 这个公式是它的定义。括号 $(\ , \)$ 代表“内积”，你可以把它粗略地理解成两个矢量之间的一种“关系度量”，类似于高中学的向量点乘。这个公式的意思是，算符 A 作用在 ψ 上再跟 ϕ 求内积，得到的结果，和你先把 A 的“搭档” $A^\dagger$ 作用在 ϕ 上再跟 ψ 求内积是一样的。你可以想象成， $A^\dagger$ 能把 A 的“动作”转移到另一个矢量身上。这在数学推导中非常方便。
- 2. 自伴算符 (Self-adjoint Operator) $A = A^\dagger$:** 当一个算符和它的“搭档”就是它自己时，它就叫“自伴算符”。这是量子力学里最重要的算符！为什么？因为在物理世界里，我们能测量到的量（比如能量、位置、动量）都必须是实数。而自伴算符的“本征值”（我们后面会讲，它就对应着测量结果）恰好保证是实数。所以，**自伴算符 = 物理世界的可观测量**，这个对应关系是量子力学的基石之一。
- 3. 幺正算符 (Unitary Operator):** 它满足 $AA^\dagger = A^\dagger A = I$ ， I 是恒等算符（就是放进去什么，出来的还是什么）。幺正算符的作用，好比是在空间中进行一个“保真”的旋转或变换。它作用在一个矢量上，不会改变这个矢量的“长度”（模长）。在量子力学中，时间的演化就是由一个幺正算符来描述的。这保证了系统状态虽然在变化，但总的概率（与矢量模长的平方有关）始终是1，不会凭空产生或消失。
- 4. 投影算符 (Projection Operator) P :** 这个最好理解。想象一下阳光下你的影子。投影算符 P 就好比是“投射阳光”这个动作，它把你这个三维的“矢量”，变成了地面上二维的影子“矢量”。它有几个特点：它是自伴的，而且“幂等”，即 $P^2 = P$ （对一个影子再投影一次，得到的还是同一个影子）。更重要的是，每一个投影算符都唯一对应着一个“子空间”（比如地平面），反之亦然。如果两个子空间 S 和 T 是“正交”的（可以想象成三维空间里互相垂直的 x - y 平面和 z 轴），那么它们对应的投影算符 P_S 和 P_T 作用的先后顺序无所谓，并且把一个矢量先投到 S 再投到 T ，结果就是零（因为影子再往垂直方向投影，就变成一个点了）。

这段文字的核心，就是给我们介绍了一套数学工具箱。它告诉我们，量子世界的状态是用矢量来描述的，而对这个状态的操作和测量，则是由各种各样的“算符”来完成的。理解了这些算符的脾气和性格，我们才能读懂量子力学的“剧本”。

【原文】

10 量子力学的哲学

根据诺定定理①，对应于每一个自伴线性算符 A 有一个唯一的恒等分解，即一维依赖于实参数 λ 的投影算符 $E^\lambda(A)$ (或简写为 E^λ)，它满足：(1) 当 $\lambda \leq \lambda'$ 时， $E^\lambda \leq E^{\lambda'}$ ，(2) $E^{(-\infty)} = 0$ ，(3) $E^{(\infty)} = I$ ，(4) $E^{(\lambda+0)} = E^\lambda$ ，(5) $I = \int dE^\lambda$ ，(6) $A = \int \lambda dE^\lambda$ [这是 $(\phi, A\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda d(\phi, E^\lambda \phi)$ 一式的缩写，其中 ϕ 的积分分解为勒贝格-斯蒂尔杰斯积分^{2]}，以及 (7) 对于所有的 λ 值， E^λ 同任何与 A 对易的算符对易。 A 的谱是使 E^λ 为常数的 λ 值集合。 E^λ 不连续（“跳变”）的那些 λ 值构成点谱³，点谱与连续谱一起组成了谱。若 D_A 中存在一个非零矢量 ϕ 满足 $A\phi = \lambda\phi$ ，则 λ 就是 A 的一个本征值，而称 ϕ 为属于 λ 的本征矢量。若属于某一本征值的所有 n 本征矢量所张的子空间是唯一的³，则此本征值是非简并的。 A

① 这个定理是冯·诺伊曼证明的，见“*Allgemeine Eigenwerttheorie Hermitescher Funktionaloperatoren*”，*Mathematische Annalen*, 102, 49–131 (1920)，重印在下书中：J. von Neumann, *Collected Works*, A. H. Taub, ed. (Pergamon Press, New York, 1961), Vol. 2, pp. 3–85. M. H. Stone 独立地证明过，所用的方法是 T. Carleman 早先用于具有奇异核的积分方程理论的方法，见 M. H. Stone, *Linear*

Transformations in Hilbert Space (American Mathematical Society Colloquium Publications, Vol. 15, New York, 1932), Chap. 5. 其他证明由 F. Riesz 于 1930, B. O. Koopman 和 J. L. Doob 于 1934, B. Lengyel 于 1939, J. L. Cooper 于 1945 以及 E. R. Lorch 于 1950 给出。

② $\int \lambda d\lambda dg(\lambda)$ 定义为 $\lim \sum f(\lambda_i) (g(\lambda_{i+1}) - g(\lambda_i))$, 其中 $\lambda_i, \lambda_{i+1} \dots$ 是区间 $[a, b]$ 的一种分割. λ_i 在第 i 个区间内. 极限号表示对所有的 j 过渡到 $\lambda_{i+1} - \lambda_i \rightarrow 0$ 。

+ 点谱是数学中常用的名称, 物理学中一般称为分立谱.——译者注

③ 一个希尔伯特空间的维数是其中的一个完备正交矢量组的基数。

【解读】

好, 我们来看第二段。如果说上一段是介绍了工具, 那么这一段就是展示了这些工具中最强大、最核心的一件——**谱定理** (原文中提到的“诺定定理”应为冯·诺伊曼定理, 即谱定理)。这个定理是连接抽象数学和具体物理测量的桥梁, 是量子力学形式体系的灵魂。

让我们先从一个你可能更熟悉的概念开始:**本征值** (Eigenvalue) 和**本征矢量** (Eigenvector)。原文中定义 $A\varphi = \lambda\varphi$ 。这句话的物理图像是什么呢? 我们知道, 算符 A 作用在矢量 φ 上, 通常会把它变成另一个方向、另一个长度的矢量。但对于某些特殊的矢量 φ , 算符 A 对它的作用非常“温柔”, 只是把它拉伸或缩短了 λ 倍, 而没有改变它的“方向”。这些特殊的矢量 φ 就叫作 A 的**本征矢量**, 而这个拉伸的倍数 λ 就叫作对应的**本征值**。

现在关键来了: 在量子力学中, 一个代表可观测量 (比如能量) 的自伴算符 A , 它的**本征值 λ 就是你对这个物理量进行测量时, 可能得到的所有结果!** 而对应的本征矢量 φ , 就代表着系统处于“测量结果确定为 λ ”的那个状态。比如, 氢原子能量算符的本征值, 就是玻尔模型里那些不连续的能级 $E_1, E_2, \dots$; 而对应的本征矢量, 就是电子处于这些定态能级时的波函数。

有了这个概念, 我们再来看谱定理。这个定理告诉我们, 任何一个自伴算符 A , 都可以被“分解”成一堆跟它的本征值 λ 有关的投影算符 E^λ 的组合。公式 $A = \int \lambda dE^\lambda$ 就是这个意思。你可以把它想象成一种“光谱分析”。就像一束白光可以被三棱镜分解成赤橙黄绿青蓝紫的连续光谱一样, 任何一个代表物理量的算符 A , 也可以被谱定理分解成它所有可能的测量结果 (即它的“谱”)。

这个“谱”有两种形态:

1. **点谱 (分立谱)**: 对应的是 E^λ 发生“跳变”的地方。这代表测量结果是**不连续的、离散的**。这正是“量子化”的数学体现! 比如原子能级, 你只能测到 -13.6eV , -3.4eV 这些特定的值, 而测不到它们之间的值。
2. **连续谱**: 对应的是 E^λ 平滑变化的部分。这代表测量结果是**连续的**。比如一个自由电子的位置, 它可以在空间中任何一点被发现, 测量结果是连续变化的。

所以, 谱定理的伟大之处在于, 它用一套统一的数学语言 (投影算符的积分), 把所有物理量的测量, 无论是离散的还是连续的, 都优雅地描述了出来。它告诉我们, 任何一个复杂的物理量算符, 本质上都可以看作是“所有可能的测量结果 (λ)”和“测量到这个结果就投影到对应状态 (dE^λ)”这两个动作的集合。这为我们后面理解测量的概率和测量后的状态变化铺平了道路。

【原文】

11 第一章 形式体系和诠释

的谱点谱中的每个 λ 都是 A 的一个本征值。若算符 A 的谱是非简并的谱 λ_i ($j = 1, 2, \dots$), 则 A 的谱分解 (6) 式化为 $A = \sum \lambda_i P_j$, 其中 P_j 是投射到属于 λ_i 的本征矢量 (“半射线”) φ_j 的投射算符。事实上, 在此情况下只有当 λ_j 是在 $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ 中时才有 $dE^\wedge \lambda = E^\wedge(\lambda + d\lambda) - E^\wedge \lambda \neq 0$, 这时 $dE^\wedge \lambda$ 变成 P_j 。为了用初等方法来证明这一结论的正确, 令 $\varphi = \sum_j (\varphi, \varphi_j) \varphi_j$ 为任意矢量 φ 关于 A 的本征矢量 φ_j 的展开式; 于是对一切 φ 都有 $A\varphi = \sum_j \lambda_j (\varphi, \varphi_j) \varphi_j = \sum \lambda_j P_j \varphi$ 。

有了这些数学预备知识之后, 我们遵照冯·诺伊曼的办法, 来给出量子力学形式体系的一种公理化陈述。未经定义的原始概念是系统、可观察量 (在冯·诺伊曼的术语中为“物理量”) 和态。

公理 I. 每一系统对应有一希尔伯特空间 X , 其矢量 (态矢量、波函数) 完备地描述了系统的状态。

公理 II. 每个可观察量 X 唯一地对应于一个作用于 X 中的自伴算符 A 。

【解读】

好的, 同学, 这一部分是激动人心的转折点! 我们刚刚学习了复杂的谱定理, 现在文本把它简化到了一个我们更容易理解的情境, 然后, 它正式拉开了量子力学公理化体系的大幕。

首先, 我们来看前半部分。前面那个 $A = \int \lambda dE^\wedge \lambda$ 的积分形式可能让你觉得有点抽象。现在, 文本考虑一个最简单的情况: 如果一个物理量 A 的测量结果是离散的 (也就是只有点谱), 比如能量是 $E_1, E_2, E_3, \dots$ 这些不连续的值。那么那个复杂的积分就一下子变成了我们熟悉的求和: $A = \sum \lambda_i P_j$ 。

这是什么意思呢? 它说, 这个算符 A , 可以被拆解成“测量结果1 × 投影到状态1的算符 + 测量结果2 × 投影到状态2的算符 + ...”的形式。这里的 P_j 就是我们之前学的投影算符, 它负责把一个任意的状态“投影”到第 j 个本征态 φ_j 上去。这就像在三维空间里, 任何一个矢量 (x, y, z) 都可以被分解成 $x * (1, 0, 0) + y * (0, 1, 0) + z * (0, 0, 1)$ 。这里的 $(1, 0, 0)$ 等就是“本征矢量”(基矢), 而 x, y, z 就是在这些方向上的“分量”。量子力学做的, 就是把这个思想推广到了更复杂的、甚至是无穷维的抽象空间中。一个任意的量子态 φ 也可以被分解成一系列本征态 φ_j 的叠加, 即 $\varphi = \sum c_j \varphi_j$, 其中 $c_j = (\varphi, \varphi_j)$ 就是这个状态在 φ_j 方向上的“分量”。

现在, 有了这些数学“兵器”之后, 冯·诺伊曼开始搭建量子力学的宏伟大厦。他提出了几条基本“公理”, 就像几何学里的“两点确定一条直线”一样, 这些是量子力学世界不证自明的基本规则。

公理 I: 状态的描述

“每一系统对应有一希尔伯特空间 X , 其矢量 (态矢量、波函数) 完备地描述了系统的状态。”

这条公理告诉我们回答“一个量子系统现在怎么样了?”这个问题的方法。在经典物理中, 我们会用位置、速度这些数组来描述一个物体的状态。但在量子世界, 一个系统 (比如一个电子) 的**全部信息**, 都包含在一个叫做“态矢量”(或波函数) 的数学对象 φ 中。这个矢量生活在一个叫“希尔伯特空间”的抽象数学空间里。你可以把这个空间想象成一个舞台, 态矢量 φ 就是舞台上的一个演员, 它的“姿态”(矢量的方向和大小) 就包含了这个演员的所有信息——它可能在哪里, 可能跑多快, 有多少能量等等, 只不过这些信息是以一种叠加和概率的方式存在的。

公理 II：可观测测量

“每个可观察量 X 唯一地对应于一个作用于 X 中的自伴算符 A 。”

这条公理回答了“我们能测量什么，以及如何表示它们？”。我们关心的所有物理量，比如能量、动量、角动量、自旋，在数学上都有一个“代言人”——一个自伴算符。能量有能量算符（哈密顿算符 H ），动量有动量算符 P ，等等。为什么要用我们第一部分学的“自伴算符”呢？因为它能保证我们测量出来的结果是实数，这非常符合物理直觉。

所以，这前两条公理就建立起了物理世界和数学模型之间的核心对应关系：

- 物理状态 $\leftrightarrow$ 希尔伯特空间中的矢量 φ
- 物理可观测测量 $\leftrightarrow$ 作用于该空间的自伴算符 A

有了这两条，量子力学的故事就可以正式开讲了。

【原文】

公理 III. 对于一个处于态 φ 的系统, 对可观察量 X (由 A 代表) 的一次测量结果处于 λ_1 与 λ_2 之间的几率 $\text{prob}A(\lambda_1, \lambda_2|\varphi)$ 为 $\|(E^{\lambda_2} - E^{\lambda_1})\varphi\|^2$, 其中 E^{λ} 是属于 A 的恒等分解。

公理 IV. 态矢量 φ 的时间演化方程 $H\varphi = i\hbar \partial\varphi/\partial t$ (薛定谔方程) 决定, 其中哈密顿量 H 是演化算符, $\hbar$ 是普朗克常数除

12 量子力学的哲学

以 2π 。

公理 V. 若对可观察量 A (由 A 代表) 的一次测量所得的结果在 λ_1 与 λ_2 之间, 则系统在紧接着测量之后的状态是 $E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1}$ 的一个本征函数。

【解读】

同学，我们现在来到了最后一部分，也是量子力学最核心、最富有哲学思辨，甚至可以说是“奇怪”的部分。这三条公理规定了量子世界的“游戏规则”：我们如何从数学模型中得到测量结果？系统状态如何随时间变化？以及测量这个行为本身会带来什么后果？

公理 III：测量的概率（玻恩法则）

“对于一个处于态 φ 的系统, ... 几率 $\text{prob}...$ 为 $\|(E^{\lambda_2} - E^{\lambda_1})\varphi\|^2$ ”

这条公理是连接理论与实验的纽带。它告诉我们，量子力学本质上是一个**概率性**的理论。对于一个处于态 φ 的系统，我们去测量物理量 A ，我们无法像经典物理那样精确预言结果会是多少。我们能做的，是计算出测量结果落在某个范围 (λ_1, λ_2) 内的概率是多少。这个概率怎么算呢？就是把态矢量 φ 用 $(E^{\lambda_2} - E^{\lambda_1})$ 这个投影算符进行“投影”，然后计算这个投影后得到的“影子”矢量的长度的平方 $\|\dots\|^2$ 。

让我们把它简化一下：如果你想知道测量结果**恰好是**某个本征值 λ_i 的概率是多少，该怎么做？你只需要把态矢量 φ 分解成各个本征态的叠加 $\varphi = c_1\varphi_1 + c_2\varphi_2 + \dots$ ，那么测到 λ_i 的概率就是其对应“分量”的模的平方，即 $|c_i|^2$ ！这个简单而深刻的规则，就是著名的玻恩法则。它告诉我们，量子态的叠加性质，直接导致了测量结果的概率性。

公理 IV：状态的时间演化（薛定谔方程）

“态矢量 φ 的时间演化方程 $H\varphi = i\hbar \partial\varphi/\partial t$ (薛定谔方程) 决定”

这条公理描述了当系统**没有被观察和测量时**，它的状态是如何随时间流逝而变化的。这个演化过程由大名鼎鼎的薛定谔方程主宰。你可以把它看作是量子世界的“牛顿第二定律”。方程左边的 H 是哈密顿算符，也就是总能量算符；右边是态矢量 φ 对时间的变化率。整个方程描述了一个**平滑、连续、确定性**的演化过程。只要你知道系统在某个初始时刻的状态，理论上你就能用这个方程精确地计算出它在未来任何时刻的状态。注意，这里的“确定性”是指态矢量 φ 本身的演化是确定的，但这并不意味着测量结果是确定的，因为根据公理III，测量结果依然是概率性的。

公理 V：测量的后果（波函数坍缩）

“若...一次测量所得的结果在 λ_1 与 λ_2 之间, 则系统在紧接着测量之后的状态是 $E^{\lambda_2} - E^{\lambda_1}$ 的一个本征函数。”

这是量子力学最令人困惑也最迷人的一条公理。它描述了“测量”这个行为本身对系统的剧烈影响。公理IV说，不看它的时候，系统状态是平滑演化的。但公理V说，你**一旦看了**（进行了测量），并且得到了一个确定的结果，比如能量是 λ_i ，那么系统原本那种“多种可能性叠加”的状态 $\varphi = c_1\varphi_1 + c_2\varphi_2 + \dots$ 会瞬间、随机地“坍缩”到只剩下与测量结果相对应的那一种状态 φ_i ！之前的所有其他可能性都在测量的一瞬间消失了。这个过程被称为“波函数坍缩”。

综合来看，量子系统的一生就是在这两种截然不同的演化中交替进行的：

1. **不测量时**：遵从公理IV（薛定谔方程），进行平滑、确定的演化。
2. **一测量时**：遵从公理III和V，发生概率性的、瞬时的“坍缩”。

这五条公理共同构成了量子力学的公理化框架。它用一套严谨的数学语言，精确地描述了微观世界的运行法则，尽管这些法则与我们的宏观经验是如此地格格不入。希望这次解读能帮助你更好地理解这个奇妙的理论世界！好的，导师就位。各位同学，我们今天要解读的这份文档，是关于量子力学形式体系的经典论述。它有点像武林秘籍的总纲，文字不多，但字字珠玑，蕴含着物理学最深刻的奥秘。别担心，我会像剥洋葱一样，一层一层地带大家看懂其中的门道。让我们开始吧！

【原文】

对应公理I和II把原始概念与数学量联系起来。冯·诺伊曼

原来的假说是：可观察量与自伴算符有一一对应的关系，以及希尔

伯特空间的所有非零矢量都是态矢量；鉴于维克(G. C. Wick)、维

格纳(E. P. Wigner)和怀特曼(A. S. Wightman)于1952年发现的

超选择规则的存在，原来的这两个假设必须放弃。

下述这个通常是作为假定的说法。即测量一个由算符 A 代表的可观察量 A 的结果是 A 的谱的一个元素, 可作为逻辑结论从公理III导出。此外, 在公理I至III的基础上, 也容易证明下述定理: 对于一个处于态 φ 中的系统, A 的期望值 $\text{Exp}A$ [由不言自明的表达式 $\lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_{\lambda_j} \text{proba}(\lambda_j, \lambda_j + \Delta \mid \varphi)$ 定义] 为 $(\varphi, A\varphi)$ 。反过来, 应用概率论中所用的特征函数方法可以证明, 从这个定理也可以导出公理III。让我们再加上一句: 在简单的非简并分立情况下, 上述 $\text{Exp}A$ 的定义变成 $\sum_{\lambda_j} \text{proba}(\lambda_j \mid \varphi)$, 其中的几率 $\text{proba}(\lambda_j \mid \varphi)$ 根据公理III由 $(\mid \varphi_j, \varphi \mid)^2$ 给出。我们看到, “量子静力学”——量子力学的不考虑随时间的变

- 见 G.C. Wick, A. S. Wightman and E. P. Wigner, The intrinsic parity of elementary particles, *Phys. Rev.*, 88, 101—105, 1952. —译者注

第一章 形式体系和诠释 13

化的一部分——的基础实质上只有一条公理, 即公理III。而且, 这条公理是在数学与物理数据之间建立某种联系的唯一一条公理, 因此对所有的诠释问题都起着主要作用。在它的通常解释中, 它把玻恩的著名的波函数的几率诠释作为一特别例包括在内; 按照波函数的几率诠释, 对位置可观察量 Q 进行一次测量, 在位置 q 处找到系统的几率密度为 $|\psi(q)|^2$ 。事实上, 若代表可观察量 Q 的算符 Q 由 $Q\psi(q) = q\psi(q)$ 定义, 那么它的谱解就是: 对于 $q \leq \lambda_1$, $E_{\lambda_1}\psi(q) = \psi(q)$; 而对于 $q > \lambda_1$, $E_{\lambda_1}\psi(q) = 0$ 。于是按照公理III, $\lambda_1 \leq q < \lambda_2$ 的几率为 $\| (E_{\lambda_2} - E_{\lambda_1})\psi \|^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |\psi(q)|^2 dq$, 前述论题得证。

【解读】

大家好, 我们来看第一段。这段话的核心, 是在搭建量子世界的“游戏规则”, 特别是规则中最关键的一条。

首先, 想象一下我们要描述一个游戏角色, 比如你们玩的游戏里的英雄。我们需要一些词汇来描述他, 比如“生命值”、“攻击力”、“位置”等等。在物理学里, 这些能被测量出来的东西, 就叫做**可观察量 (Observable)**。而量子力学这本“游戏说明书”是用数学语言写的, 所以它需要一套数学工具来代表这些物理概念。这个工具就是**算符 (Operator)**, 更准确地说是“自伴算符”。所以, 公理I和II做的第一件事, 就是建立一个“词典”, 把物理世界的“可观察量”(比如能量、动量) 翻译成数学世界的“算符”。同时, 它还需要一个东西来完整描述角色当前的状态, 这个东西就是**态矢量 (State Vector)**, 它住在叫**希尔伯特空间 (Hilbert Space)**的数学王国里。你可以把态矢量想象成一个角色的“完整状态档案”, 里面包含了关于他的一切信息。

一开始, 物理学家们以为这个“词典”是一一对应的, 而且希尔伯特空间里所有可能的“状态档案”都是合法的。但后来发现, 存在**“超选择规则”**, 意思是有些状态是不能随便叠加组合的, 就像游戏里你不能同

时拥有“冰霜”和“火焰”两种互斥的魔法属性一样。这说明最初的规则太理想化了，需要修正。

接下来，文章抛出了一个重磅炸弹：**公理III**。如果说公理I和II是建立了语言体系，那公理III就是连接抽象数学和现实世界的唯一桥梁。它回答了一个最根本的问题：当我们去“测量”一个可观察量时，会得到什么？公理III告诉我们两件事：

1. **测量的结果**：你测出来的数值，一定是这个可观察量对应算符的“谱”里的一个值（对于高中同学，可以暂时理解为矩阵的“本征值”）。也就是说，测量结果不是任意的，而是某些特定的、量子化的值。
2. **测量的概率**：你得到某个特定结果的概率是多少？公理III给出了一个精确的计算公式，即 $(|\langle \varphi_j, \varphi \rangle|)^2$ 。这个公式就是大名鼎鼎的**玻恩诠释**的核心。你们在高中物理课本里学到的，电子在某个位置出现的概率密度是波函数模的平方 $|\psi(q)|^2$ ，其实就是公理III在一个具体场景（测量位置）下的一个特例。

所以你看，这篇文章强调，不考虑时间变化的“量子静力学”，其灵魂就是公理III。它像一个神奇的预言家，拿着代表系统状态的态矢量 φ ，就能告诉你，对这个系统进行任何一种测量，可能得到什么结果，以及得到每个结果的概率。这是量子力学区别于经典物理最核心、最神奇、也是最颠覆我们直觉的地方。经典世界是确定的，而量子世界在被观测前，是概率性的。

【原文】

公理IV是“量子动力学”的公理，也可以换成这样：假设有唯一一族参数的幺正算符 $U(t)$ 作用在系统的希尔伯特空间上，使得 $\psi(t) = U(t)\psi(0)$ ，并应用斯通[Stone]定理，根据此定理存在一个唯一的自伴算符 H 使得 $U(t) = \exp(-itH)$ ，这条公理也可以等价地用统计算符来表述。最后，公理V说，在分立情况下，紧接着测量 A 而得到 A 的本征值 λ_j 之后，系统的态是 P_j 的一个本征矢量，而 P_j 是投射属于 λ_j 的本征矢量的投射算符；由于这个原因，公理V被称为“投影假设”。它比其他公理更引起争论，而且它已被一些理论家根据后面要依次讨论到的理由而否定了。虽然要完全推导出全部量子力学定理(包括有关同时测量和全同粒子的那些定理)还需要一些补充的假设，但这五条公理对于表征冯·诺伊曼的量子力学形式体系(这是人们普遍接受的形式体系)的特征这一目的已经足够了。

【解读】

好的，同学们，我们接着来看第二部分。刚才我们讲了“量子静力学”的核心——公理III，它告诉我们如何预测一次测量的结果和概率。但世界是运动的，粒子不会永远静止。那么，一个量子系统是如何随时间演化的呢？这就是“量子动力学”要解决的问题，而它的基石，就是**公理IV**。

大家可以把公理IV理解成量子世界的“牛顿第二定律”。在经典力学中，你知道了一个物体此刻的位置和速度，以及它受到的力，你就能用 $F=ma$ 算出它下一秒的位置和速度。公理IV扮演了同样的角色。它引入了一个叫**幺正算符** $U(t)$ 的数学工具，这个算符就像一台“时间机器”。你把系统在初始时刻的状态 $\psi(0)$ “喂”给它，它就能告诉你系统在任意未来时刻 t 的状态 $\psi(t)$ 是什么。公式 $\psi(t) = U(t)\psi(0)$

就是量子世界的演化定律。而驱动这台“时间机器”的引擎，是一个叫做 H 的特殊算符，它代表系统的总能量，也就是**哈密顿算符**。你们可能听说过的**薛定谔方程**，其实就是公理IV更具体、更常见的表现形式。这条公理保证了量子世界的演化是平滑、连续且确定的——只要你不打扰它。

然而，一旦你进行了“测量”，情况就急转直下，这就是**公理V**登场的时候。这条公理，被称为“**投影假设**”，是量子力学中最具争议、最令人匪夷所思的一条。它描述了测量过程中发生的“突变”。想象一个电子，在被测量之前，它的状态可能是各种可能性的“叠加”，比如它既在这里又在那里。但是，当你用仪器去测量它的位置时，你总会发现它出现在一个具体的地方。公理V说，就在你测量的“一刹那”，电子的状态会瞬间“**坍缩**”或“**投影**”到你测量到的那个结果所对应的状态上。

这个过程非常暴力和不连续，完全打破了公理IV所描述的平滑演化。这就好比你在平稳地开车（公理IV），突然一测量（公理V），车子瞬间移动到了几公里外的另一个地方。为什么测量这个行为如此特殊？它到底是怎么触发这个“坍缩”的？这正是量子力学解释中最深刻的谜题之一，也是无数争论的焦点。

总而言之，这五条公理共同构成了量子力学的标准数学框架，即**冯·诺伊曼体系**。它们就像一部法典，虽然有些条款（特别是公理V）充满了争议，但它确实为我们描绘量子世界提供了一套行之有效的、被广泛接受的数学语言和规则。

【原文】

14 量子力学的哲学

除了系统、可观察量和态的概念诠释，上面的公理中还未加解释地使用了几率和测量的概念。在这方面，虽然冯·诺伊曼是在频率解释的意义下使用几率概念的，但人们不时也对量子力学几率提出了别的解释。事实上，几率哲学的所有主要学派，诸如主观论者、先验客观论者、经验论者或频率解释者、归纳逻辑解释的提出者和倾向性[*propensity*]解释*的提出者们，都对这个概念提出了自己的主张。甚至可以取对量子力学中的几率的不同解释，作为对量子力学的各种诠释进行分类的一种判据。但是采用这种自成体系的判据会使得我们难以按照历史顺序来介绍量子力学诠释的发展，因此本书将不遵循这种办法。

类似的考虑更适用于量子力学中的测量概念。这个概念不管怎样解释，都必定以某种方式把系统、可观察量和态这些原始概念联合在一起，而且通过公理III，也把几率概念包括进来。因此，“测量”这个科学哲学要求自然界作出最后判决的手段，由于它的关键地位，在量子力学中变成了最成问题和最有争议的概念。

1930年，狄拉克[P. A. M. Dirac]发表了他的名著^⑧。他在该书为量子力学提出了一个概念最简洁、记号最优美的形式体系；但

* 关于几率的倾向性解释, 在后面第 10.3 节中有很简略的说明, 读者可以参看本书第 623 页。——译者注

① 对这种分类有兴趣的读者, 可在本章未附录的文献选辑 I 中找到对他方便的参考文献。下述文章包含有对如何实行这种分类的有用建议: M. Strauss, “Logics for quantum mechanics”, *Foundations of Physics* 3, 265—276 (1973)。

② P. A. M. Dirac, *The principles of quantum mechanics* (Clarendon Press Oxford, 1930, 1935, 1947, 1958); 德译本(1930); 法译本(1931); 俄译本(1932, 1937); 中译本, 《量子力学原理》(陈咸亨译, 科学出版社, 1965)。——译者注

第一章 形式体系和诠释 15

【解读】

最后这一段, 作者把我们从纯粹的数学规则拉到了更深层次的哲学思辨。他指出, 尽管我们有了五条公理这套“游戏规则”, 但规则本身并没有解释其中两个最核心的词汇: “**几率 (Probability)**”和“**测量 (Measurement)**”。这就像法律条文里用了“正义”和“合理”这样的词, 但没有定义它们的具体含义, 这就给解读留下了巨大的空间。

首先是“**几率**”。我们平时说硬币正面朝上的概率是50%, 这到底是什么意思? 一种常见的理解 (**频率解释**) 是, 如果你扔一万次硬币, 大概有五千次是正面。这是从大量重复实验的角度来定义的。但量子世界的概率也是这个意思吗? 还是说, 概率反映的是我们知识的不足 (**主观解释**), 就像天气预报说“明天有30%的概率下雨”, 是因为我们无法精确掌握所有大气数据? 又或者, 概率是物质世界的一种内在属性 (**倾向性解释**), 就像电子天生就有一定的“倾向”在某个地方出现? 对“概率”这个词的不同哲学理解, 会直接导致对整个量子理论的不同诠释, 比如多世界诠释、哥本哈根诠释等等, 它们的分歧根源之一就在于此。

而比“几率”更麻烦、更核心的问题, 就是“**测量**”。在经典世界里, 测量是一个被动的行为: 一辆车有它自己的速度, 我们用测速枪去读出这个值, 测量本身不会改变车的速度。但在量子世界, 正如我们之前讨论公理V时看到的, 测量是一个主动的、甚至可以说是“暴力”的干预行为。它迫使一个处于多种可能性叠加态的系统, 瞬间选择一个确定的状态。这就引出了一系列令人头疼的问题:

- 什么是“**测量**”? 是不是必须有人的参与? 一台自动记录的仪器算不算测量?
- “**坍缩**”发生在哪一刻? 是光子撞上底片的时候? 还是人看底片的时候?
- 宏观世界和微观世界的分界线在哪里? 为什么我们日常的宏观物体没有叠加态, 而微观粒子却有?

这个问题, 即著名的“**测量问题**”, 是量子力学诠释中最核心的困难。它把物理学家逼到了哲学的墙角, 迫使他们去思考观察者、现实和意识的本质。

最后, 文章提到了伟大的物理学家**狄拉克**。他的贡献在于, 为这个充满哲学争议的理论, 提供了一套极其优美和简洁的数学语言 (也就是你们未来可能会接触到的“狄拉克符号”或“bra-ket”记号)。他让物理学家们有了一套强大的工具去计算和预测, 即便大家对这些工具背后的哲学意义争论不休。这有点像我们都会用手机, 但很少有人完全理解它内部的工作原理和它对社会的长远影响。狄拉克给了我们一部“好用的手机”, 但关于“手机是什么”的哲学讨论, 至今仍在继续。好的, 同学们, 大家好! 今天我

们要一起深入探讨一篇关于量子力学形式体系和哲学诠释的学术文章。这篇文章的段落可能看起来有些艰深，充满了人名和专业术语，但别担心，我会像一位向导，带领大家穿越这片知识的密林，领略其中引人入胜的风景。我们将一步步剖析原文，把它变成我们都能理解和欣赏的知识。让我们开始吧！

【原文】

是在此之前，冯·诺伊曼已经完成了希尔伯特空间中算符运算理论的主要工作，特别是它的谱论。虽然冯·诺伊曼承认狄拉克的形式体系“就其简洁和优美而言是很雅难过的”，但他还是批评它缺乏数学严格性。特别是因为它广泛使用了(当时)数学上不能接受的 δ 函数。后来，施瓦兹[L. Schwartz]的广义函数论[theory of distributions]使得能够把狄拉克的非正规函数纳入严正数学的领域(这是物理学怎样能刺激数学中新分支成长的一个标准例子)，⁸但狄拉克的形成体系与冯·诺伊曼的形式体系似乎还是不能融合的。狄拉克的形成体系由于其直观性和记号的方便，不仅留存了下来，而且成了许多对理论的阐述爱用的框架。把狄拉克的形式体系与冯·诺伊曼的方法融合起来的可能性，近年来成了一些重要研究工作的题目，例如马尔罗^⑤用希尔伯特空间的直接积分分析来表述谱，罗伯茨^⑥应用“装备的”[rigged]希尔伯特空间，以及赫尔曼^⑦和安托因^⑧的研究。

① 冯·诺伊曼虽然否定这种可能性；“应当强调，正确的做法并不是从数学上完善和阐释狄拉克方法，而是必须有一种从一开始就不同的程序，即依靠希尔伯特的算符理论。”7页注①。序。

② A. R. Marlow, “Unified Dirac-von Neumann formulation of quantum mechanics”, *Jour. Math. Phys.*, 6, 916—927 (1965).

③ J. E. Roberts, “The Dirac bra and ket formalism”, *Jour. Math. Phys.*, 7, 1097—1104 (1966); “Rigged Hilbert spaces in quantum mechanics”, *Com. Math. Phys.*, 3, 98—119 (1966)。译者按：关于装备的希尔伯特空间，可参看 И.М. 盖勒范德、H. Я. 维列金著，广义函数论，第四册(夏道行译，科学出版社，1965)。特别是第一章 § 4。

④ R. Herman, “Analytic continuation of group representations”, *Comm. Math. Phys.*, 5, 157—190 (1967)。

⑤ P. Antoine, “Dirac formalism and symmetry problems in quantum mechanics”, *Jour. Math. Phys.*, 10, 53—69, 2276—2290 (1969)。

【解读】

同学们，这段文字讲述了量子力学发展史上一个非常核心的“门派之争”，主角是两位泰斗级人物：物理学家狄拉克（Paul Dirac）和数学家冯·诺伊曼（John von Neumann）。

想象一下，量子力学在20世纪初诞生时，就像一个天赋异禀但行为不羁的“神童”。它能解决很多经典物理无法解释的问题，但其背后的数学规则却显得有些“随心所欲”。狄拉克就是这位神童的导师之一，他创造了一套非常优美、简洁的数学语言来描述量子世界，也就是我们常说的“狄拉克符号”(bra-ket

notation)。这套方法极其好用，物理学家们爱不释手，因为它非常直观，能迅速抓住物理问题的本质。然而，这套方法里有个“不守规矩”的家伙，叫做** δ 函数**（德尔塔函数）。你可以把它想象成一个理想化的“点”，它在除了一个点之外的所有地方都等于零，但在这个点上却无穷大，并且它下方的总面积恰好是1。这在物理上用来描述一个点电荷或一个瞬间的冲击非常方便，但在当时的数学家看来，这根本就不是一个正经的“函数”，太不严谨了！

这时候，另一位主角冯·诺伊曼登场了。他是一位追求绝对严谨的数学家，他看不惯狄拉克方法里的“数学漏洞”。于是，他动用了当时最前沿的数学工具——**希尔伯特空间和算符理论**，为量子力学构建了一个坚如磐石、逻辑完美的数学基础。你可以把希尔伯特空间想象成一个升级版的、可以是无穷维的坐标系，量子系统的所有可能状态都对应这个空间里的一个向量；而“算符”就是作用在这个空间里的“操作”，比如测量一个粒子的位置或动量。冯·诺伊曼的体系无懈可击，但对于很多物理学家来说，它太抽象、太复杂了，不如狄拉克的方法来得直接。

所以，这里就出现了一个有趣的局面：物理学家们在日常工作中普遍使用狄拉克那套“好用但不完美”的工具，而数学家和理论家们则坚持冯·诺伊曼那套“完美但不好用”的框架来保证理论的正确性。这段文字告诉我们，这个矛盾并非不可调和。后来的数学家，如施瓦兹，发展了“广义函数论”，成功地为狄拉克的 δ 函数找到了一个严格的数学“户口”，证明了它并非无理取闹。这完美地展示了**物理学的需求是如何推动数学向前发展的**。直到今天，科学家们仍在努力融合这两种伟大的思想，比如文末提到的“装备的希尔伯特空间”(Rigged Hilbert Space)，就是试图建立一个既有狄拉克的便捷，又有冯·诺伊曼的严谨的统一框架。这个故事告诉我们，科学的进步往往是在直觉与严谨、应用与基础之间的张力中诞生的。

【原文】

16 量子力学的哲学

量子力学的其他形式体系, 例如冯·诺伊曼、维格纳和约尔丹 [P. Jordan] 于三十年代初创始, 而齐格尔 [I. E. Segal] 于四十年代进一步加工的代数方法(它导致量子力学的 C^* 代数理论), 或伯克霍夫 [G. Birkhoff] 与冯·诺伊曼在 1936 年发端、而马基 [G. Mackey] 于五十年代完善的量子逻辑方法(它导致近代量子逻辑的发展), 都将在下文适当的地方讨论到。另一方面, 我们觉得没有必要提惠勒^①于 1937 年提出、而海森堡^②于 1942 年加以发展以用于基本粒子理论的 S 矩阵方法, 尽管近年来有人主张^③它是量子理论的哥本哈根诠释的一种“实用版本”的最合适的数学框架。

9 我们也没有多少机会谈到费曼^④在普林斯顿研究生时发展起来的有趣的路径积分方法, 当时他把几率幅叠加的概念加以推广以定义时空中任何运动或路径的几率幅, 并证明了通常的量子力学可由假设这些几率幅的位相正比于按经典方法算出的关于该路径的作用量而导出。只要指出这一点就够了: 费曼的方法近来已被用来强调“波动理论之于粒子……正如惠普斯的波动说之于光

- ① J. A. Wheeler, "On the mathematical description of light nuclei by the method of resonating group structure", *Phys. Rev.*, 52, 1107—1122 (1937).
- ② W. Heisenberg, "Beobachtbare Grössen in der Theorie der Elementarteilchen", *Z. Physik*, 120, 513—538 (1942).
- ③ H. P. Stapp, "S-matrix interpretation of quantum mechanics", *Phys. Rev. D*3, 1302—1320 (1971); "The Copenhagen interpretation", *Am. J. Phys.*, 40, 1098—1116 (1972).
- ④ B. P. Feynman, "Space-time interpretation to non-relativistic quantum mechanics", *Rev. Mod. Phys.*, 20, 367—385 (1948).

第一章 形式体系和诠释 17

一样是不可避免的和必要的。”①

【解读】

好的，同学们，如果说上一段我们看到的是两大门派的对决，那么这一段文字就如同打开了一幅画卷，向我们展示了描述量子世界的各种奇妙的“武功秘籍”。它告诉我们，除了狄拉克和冯·诺伊曼的方法，还有很多其他视角来理解和构建量子力学。

我们来快速浏览一下这些“武功”：

- 1. 代数方法 (C* 代数理论)：**这种方法的思路非常酷。它说，我们何必总去想象波函数在某个空间里飘来飘去呢？不如把注意力集中在那些我们能真正“测量”的东西上，比如能量、动量、位置等，物理学中称之为“可观测量”。这些量之间存在着特定的代数关系（比如你们可能听说过的海森堡不确定性原理，就是位置和动量算符不对易的体现）。代数方法就是直接从这些可观测量组成的代数结构出发，来构建整个量子理论。这是一种更加抽象，但也可能更加根本的视角。
- 2. 量子逻辑：**这个就更有颠覆性了。我们日常生活中遵循的逻辑，比如“一个物体要么在这里，要么在那里”，在量子世界里似乎行不通了。一个电子在被测量前，可以“既在这里又在那里”（处于叠加态）。这迫使科学家们思考：是不是我们赖以思考的基本逻辑规则本身就需要修改？于是，冯·诺伊曼和伯克霍夫等人开创了“量子逻辑”这个领域，试图建立一套能描述量子世界奇特行为的新逻辑体系。
- 3. S矩阵方法：**这是一个非常实用的方法，尤其是在高能粒子物理中。它的想法很像一个“黑箱”。想象一下粒子碰撞实验，我们很难知道碰撞发生的瞬间，那电光火石之间到底发生了什么。S矩阵（散射矩阵）理论说：别管中间过程了！我们只需要关心“输入”（碰撞前有哪些粒子，状态如何）和“输出”（碰撞后产生了哪些粒子，状态如何），S矩阵就是一个连接输入和输出的数学机器。只要能精确计算它，我们就能预测实验结果。
- 4. 费曼的路径积分方法：**这是我个人最喜欢的一个，充满了诗意和想象力。物理学家费曼提出一个惊人的想法：一个粒子从A点运动到B点，它走的不是某一条确定的路径。恰恰相反，它同时探索了**所有可能**的路径！是的，你没听错，包括直线、曲线、甚至是先飞到火星再折返回来的疯狂路径。每一条路径都有一个对应的“几率幅”，而粒子最终出现在B点的总概率，就是把所有这些路径的几率幅，按照量子力学的规则叠加起来的结果。这个看似疯狂的想法，却能完美地推导出整个量子力学，并且在后来的量子场论中发挥了巨大作用。

总而言之，这一段向我们展示了量子理论的丰富性和多样性。不同的数学形式体系，就像从不同的山峰去观察同一片壮丽的风景。每一种方法都有其独特的视角和优势，它们共同构成了我们对微观世界深刻而全面的理解。

【原文】

由于本书是遵循历史发展的线索来写的, 而历史发展主要是受冯·诺伊曼的观念的影响, 所以其他的形式体系在我们的讨论中只处于从属地位, 在后面各章中, 尤其是在讨论测量的量子理论时, 更是这样。因此, 我们忽略这些别的形式体系并不意味着贬低它们在学术上的重要性。

1.2 诠释

在回顾了量子理论的形式体系之后, 我们现在来考虑诠释这个形式体系究竟是什么意思这一问题。这绝不是一个简单问题。事实上, 正如物理学家们对什么是量子力学的正确诠释众说纷纭一样, 科学哲学家们对诠释这一理论意味着什么也莫衷一是。如果说, 数学理论的诠释问题——通常应用模型理论model theory的语言解决——就已需要一个概念上十分复杂的工具, 那么经验理论——它与数学理论的区别更多地是在语义学方面而不是在语法方面——的诠释问题就要更困难得多。要全面介绍对这个争论题目的各种观点, 诸如阿欣斯坦[P. Achinstein]、费耶拉本德[P. K. Feyerabend]、舍夫勒[I. Scheffler]、或斯佩克特[M. Spector]等人(我们只提几个这方面的一流专家)的观点, 就要单写一本书和本书篇幅一样大的大部头专著。但是因

① D. B. Beard and C. B. Beard, *Quantum Mechanics with Applications* (Allyn and Bacon, Boston, 1970), p. VII.

18 量子力学的哲学

【解读】

同学们，这最后一部分文字起到了一个承上启下的关键作用。它首先解释了作者的写作策略，然后将我们从“数学形式”这个话题，引向了一个更深邃、更令人困惑也更迷人的领域——“诠释”。

第一段作者先做了一个“声明”。他告诉我们，这本书将主要沿着冯·诺伊曼所开创的、以数学严谨性为核心的道路来展开讨论。这并不是说前面提到的路径积分、量子逻辑等方法不重要，恰恰相反，它们都极其重要。但为了让叙述有一条清晰的主线，作者选择了一条在历史上影响深远，尤其是在探讨量子测量等根本问题时至关重要的路径。这其实也教了我们一个进行学术研究和写作的方法：面对一个庞大而复杂的主题，要学会选择一个切入点和一条主线，这样才能把故事讲清楚。

接下来，就是全文的重中之重，标题“1.2 诠释”。作者提出了一个直击灵魂的问题：我们有了这些强大的数学工具（形式体系），它们能做出精确得惊人的预测，但是，**这些数学符号究竟意味着什么？**

它们告诉了我们一个关于“现实”的怎样的故事？

这里，我给大家打一个比方。量子力学的数学形式体系，就像一部能够完美预测天气的高级计算机程序。你输入当前的气压、温度、湿度，它就能输出三天后是晴是雨，准确率高达99.99%。这是“形式体系”的层面，它负责计算和预测，而且做得非常出色。但“诠释”层面问的是完全不同的问题：程序里的那些变量，比如一个叫做“ Ψ ”的复杂函数（波函数），它在“现实”中到底是什么？它是一团真实的“概率云”吗？还是仅仅代表我们知识的局限？当我们进行一次“测量”（比如抬头看天），天气就从“可能下雨也可能天晴”的叠加状态，瞬间“塌缩”成一个确定的结果，这个“塌缩”是真实发生的物理过程，还是仅仅是我们更新了大脑里的信息？

这些问题，数学公式本身无法回答。这就是“诠释”要解决的问题。它试图为冰冷的数学骨架，赋予血肉和灵魂，告诉我们量子世界到底是一幅怎样的图景。正如文中所说，这个问题极其困难，远比诠释一个纯数学理论要复杂，因为它牵扯到“经验”和“现实”，也就是物理学与哲学的交界地带。物理学家和哲学家们为此吵了一百年，提出了各种各样的诠释方案，比如哥本哈根诠释、多世界诠释、隐变量理论等等，但至今没有一个公认的答案。

作者在这里提到一长串哲学家的名字，是为了告诉我们，这不仅仅是物理学家的“业余爱好”，而是科学哲学领域一个极其严肃和深刻的核心议题。所以，当我们学完量子力学的计算方法后，真正的奇幻之旅才刚刚开始：去思考它背后那令人着迷的哲学意涵。好的，我们开始吧。作为你的学术导师，我将带你一步步深入探索这篇关于科学哲学的精彩文章。我们将一起剖析物理理论的本质，看看科学家们是如何构建起我们对世界的理解的。

【原文】

为这个问题同我们的主题有重大关系, 我们不能完全回避它, 而将限于作一些简短的、非专门性的评述。由于两个原因, 我们的讨论将以所谓分解诠释[partial interpretation thesis]为基础; 一是
10 它提供了表述这个问题的最方便的框架, 二是它在科学哲学家中看来是接受得最广泛的观点。

这种观点已变成逻辑经验论的标准观念, 经布雷思韦特[R. B. Braithwaite]、卡尔纳普[R. Carnap]、亨佩尔[C. G. Hempel]、纳杰尔[E. Nagel]及施特格缪勒[W. Stegmüller]等人进行过精细加工, 它主张一个物理理论是一个被部分地解释的形式系统。为了说明这是什么意思, 我们对一个物理理论T至少对其两种成分加以区分:(1)一个抽象的形式体系F和(2)一组对应规则R。形式体系 F 是理论的逻辑骨架, 它是一套演绎的、通常是公理化的演算系统, 不具有任何经验意义^①; 除了逻辑常词[logical constant]和数学表达式之外, 它也包含一些非逻辑性(指述性)的术语, 如“粒子”和“态函数”, 正如它们的名称所表明的, 这些术语不属于形式逻辑的词汇, 而是讨论对象的具体内容。尽管这些非逻辑性词的名称一般都强烈地暗示了其物理内容, 但这

些术语除了它们在F的结构中所占的地位带来的意义之外, 别无更多的意义; 希尔伯特关于几何学的公理化的工作中的“点”

① 应当指出, 由于有公理III, 如上所述的“冯·诺伊曼形式体系”已不是一个不文意义下的纯粹形式体系。但是这一事实并不影响我们当前的讨论。在第十一章中谈到所谓多重宇宙理论时, 将连带着讨论从纯粹的数学形式体系“推导”出(公理III的)诠释性元素或其等价物的一个建议。

第一章 形式体系和诠释 19

或“叠合”等术语一样, 这些非逻辑性术语也只是被隐含地定义了。于是 F 由一组作为其基本假设的原始公式和按照逻辑规则从原始公式导出的其他公式组成。不应把 F 中无定义的原始术语与原始理论术语定义的非原始术语之间的区别, 同理论术语与观察术语之间的区别混淆起来。关于后者下面即将说明。

【解读】

同学们好! 今天我们要探讨一个非常深刻的问题: 一个物理理论, 比如牛顿力学或者量子力学, 它到底是什么? 这篇文章给了我们一个很酷的分析工具, 叫做“分解诠释”。你可以把它想象成一个解剖刀, 用来剖析一个理论的内部结构。

这个观点认为, 任何一个成熟的物理理论 T, 都可以被拆解成两个核心部分: **F** 和 **R**。

首先, 我们来看 **F**, 也就是“**形式体系 (Formal System)**”。你可以把它理解成一个理论的“**骨架**”或者“**游戏规则**”。想象一下象棋或者你们爱玩的电子游戏。游戏里有各种棋子或角色(比如“车”、“马”、“炮”, 或者游戏里的“坦克”、“法师”), 还有一套严格的规则告诉我们这些棋子/角色能做什么、不能做什么(比如“马走日”、“法师可以放火球术”)。这个由角色和规则组成的封闭系统, 就是“形式体系 F”。

在物理学里, 这个 F 就是一堆纯粹的数学方程和逻辑符号。比如, 牛顿第二定律 $F=ma$, 在它最纯粹的形式体系里, “F”、“m”、“a”就好比是象棋里的“王”、“后”、“兵”。它们只是一些符号, 其“意义”完全由它们在整个数学结构中的关系所决定。文章里提到的“粒子”、“态函数”这些词, 虽然听起来很物理, 但在纯粹的 F 层面, 它们也仅仅是符号, 就像希尔伯特搞几何学时说的“点、线、面”一样。我们暂时不需要知道“点”在现实中是针尖还是星球, 我们只需要知道“两点确定一条直线”这类规则。这个纯数学的、没有和现实世界挂钩的逻辑骨架, 就是 F。它自身是冰冷的、抽象的, 不产生任何关于现实世界的具体预测。

那么, 这个抽象的数学游戏怎么就变成了能描述宇宙的物理理论呢? 这就需要第二个部分登场了。我们下一段再详细分解。总之, 记住第一点: 任何物理理论的核心都有一个纯粹的、抽象的数学与逻辑内核 F, 它本身就像一套游戏规则, 只管内部的逻辑自治, 暂时还“不接地气”。

【原文】

为了把F转换为经验陈述的一个假说的演绎系统从而使它在物理上有意义, 必须把某些非逻辑性术语或出现有非逻辑性术语的某些形式关系与冯·诺伊曼的形成体系似乎还是不能融合

的。它在物理上有意义, 必须把某些非逻辑性术语或出现有非逻辑性术语的某些形式关系与经验观察或经验操作发生关联。这种关联是通过对应规则R表示的; 后者有时又被叫作同格定义[coordinating definition]、操作定义、语义学规则或认识关联[epistemic correlation]等。没有R的F是一场毫无意义的符号游戏, 没有F的R充其量是对事实的一种支离破碎的、不会带来成果的描述。为某些非逻辑性术语指定意义的对应规则, 并不是用这个理论的语言即对象语言[object language]来表示, 而是用一种所谓元语言[metalanguage]来表示*, 其中包含有假定事先已理解的一些术语。观察术语, 即通过R获得经验意义的非逻辑性术语, 并不一定正好在F的公设[postulate]中出现; F通常是“从底到顶”而不是“从顶到底”来解释的。我们用符号FR来表示通过对应规则R而被这样部分地解释了的形式体系F。显然, 一组不同的对应

* 对象语言是谈论世界诸对象的一种语言。元语言是在语义学和哲学中用于分析对象语言的语言。可以说, 一种元语言是关于另一种语言的语言。——译者注

** 即, 首先是把F的一些逻辑结论与经验知识联系起来, 而不是赋予F的基本假定以经验意义。——译者注

20 量子力学的哲学

规则R', 将导致不同的 F_R 。

【解读】

好, 接上文。我们已经有了理论的骨架 F, 那个纯粹的数学游戏。现在, 我们需要让它“活”起来, 让它能描述我们生活的这个真实世界。这就需要第二个关键部分: **R**, 也就是“**对应规则 (Correspondence Rules)**”。

你可以把 R 想象成一份“**游戏说明书**”或者一座“**桥梁**”。这份说明书的作用, 就是把形式体系 F 中那些抽象的符号, 和我们能在实验室里看到、摸到、测量到的东西联系起来。没有这份说明书, F 就只是一堆数学符号, 一场“毫无意义的符号游戏”。

我们再用 $F=ma$ 举例。在 F 层面, “F”、“m”、“a”只是符号。现在, 对应规则 R 登场了, 它会告诉我们:

- 符号“m”对应于我们用天平测量出的物体的“质量”(一个操作定义)。
- 符号“a”对应于我们用刻度尺和秒表测量出的物体位置随时间的变化率, 也就是“加速度”。
- 符号“F”对应于我们用弹簧秤拉动物体时, 秤上显示的“力”的读数。

看到了吗? R 就是这样一座桥, 它把抽象的数学世界 (F) 和具体的经验世界 (实验室操作) 连接了起来。正是通过 R, 理论才获得了“物理意义”。一个没有骨架 F 的理论 R, 就只是一堆零散的实验数据记录, 杂乱无章; 而一个没有桥梁 R 的骨架 F, 只是空中楼阁, 与现实无关。两者结合, 才构成了强大的物理理论。

我们将这两者结合后的产物记为 F_R 。这个下标 R 提醒我们，这个理论 F 是被一组特定的规则 R “解释”过的。这里的“解释”是指赋予了经验意义。一个非常有趣的点是，我们通常不是从理论最顶层的公理开始连接现实（从顶到底），而是常常把理论推导出来的一些结论和实验结果相连接（从底到顶）。比如，我们不会直接去“观察”牛顿第一定律，而是通过它推导出不受外力的物体会保持匀速直线运动，然后去验证这个推论。

最后，作者提到了一个很酷的概念：“对象语言”和“元语言”。别被吓到。F 里的语言就是“对象语言”（谈论“粒子”、“力”这些理论对象的语言）。而 R 这份说明书，是用我们日常和实验的语言（比如“用天平称量”、“读取仪表盘”）写成的，这种“用来谈论另一种语言的语言”，就叫“元语言”。就像我们用中文（元语言）去解释英语单词（对象语言）的意思一样。

【原文】

某些有实证主义倾向的科学哲学家宣称，一个物理理论就是一个 F_R 。在他们看来，一个物理理论并不是一种解释，而是如杜亨[P. Duhem]有一次所说的那样，是“一个数学命题的体系，其目的是尽可能简单、尽可能完备而且尽可能准确地表示一整组实验定律”，这些要求是单靠F和R就可以满足的。

另一些学派却争辩说，一个描述系统，不论它是多么全面和精确，也不构成一个物理理论。亚里士多德曾经说过：“人们在未掌握一事物‘所以然’之前并不认为自己认识了”；像亚里士多德一样，这些学派也坚持认为，一个成熟的理论还必须有一种解释的功能。有些学派还主张，一个科学理论的价值并不是由它表示给定的一类已知经验规律的真程度来评定，而是由它预言发现迄今尚未知的事实的力来评价。在他们看来，对 F_R 还必须补充以某种起连结作用的原理，这种原理在理论的各项描述性特征之间建立了一种内在的关联，从而赋予理论以解释和预言的能力。提出这样一个原理通常也叫作一种“诠释”，但当然应该同引入R的意义下的“诠释”明确地区别开来。前者是 F_R 的一个诠释，而后者是 F 的一个诠释。正是对 F_R 的诠释引起了物理学中争论很多的——一些哲学问题，诸如关于“物理实在”的本体论问题或关于“决定论还是非决定论”的形式哲学问题。

若为理论T建造一幅“图象”或一个模型M，那么探寻解释性原理的工作将容易得多，这一过程也常常叫作理论的一种“诠释”。实际上，常常把M定义为一个已被完全解释了的体系，例如命题体系，它的逻辑结构与 F_R 相似或同构，但其认识结构则与

第一章 形式体系和诠释 21

F_R 有重大差别，这种差别在于：在 F_R 中是逻辑上居后（“在底下”）的命题决定出现在它上面的层次中的术语（或命题）的意义，而在模型M中则是逻辑上居先（“在顶上”）的命题决定出现在它

下面的层次中的术语(或命题)的意义。正是这一特性使模型具有统一性和解释作用。M除了作为一个思维经济的工具帮助人们在“一瞥”中记起理论的一切主要方面之外,还可以有极大的启发作用;指出新的探索的道路。没有M这些道路也许就不会显示出来,因此M有助于加强T的预言能力。但是也应当看到存在着这样的危险性,即可能把M的一些非本质的东西错误地当成真的东西,从而当成是T本身不可缺少的部分,或把M与T本身等同起来,这种错误在量子力学诠释的历史上是屡见不鲜的。在这方面值得指出的是,哥本哈根诠释由于根本否定了为T建立一个M的可能性,倒是不可能犯这种错误的。

【解读】

现在,我们已经有了 F_R , 一个能和实验数据完美对上的数学体系。那么问题来了:这就足够了吗? 一个物理理论就仅仅是 F_R 吗? 这里,哲学上的两大阵营出现了分歧,一场精彩的辩论就此展开。

阵营一: 工具主义/实证主义者。 他们认为,“是的,足够了!” 在他们看来,科学理论就是一个高效的工具。只要这个 F_R 能够“简单、完备、准确”地描述和预测所有的实验现象,它的任务就完成了。这就像一个超级精准的天气预报App,它能完美预测明天的天气,但它不需要告诉你它内部复杂的算法“到底意味着什么”。你只要会用,并且它很准,它就是个好App。对于这个阵营的科学家来说,物理理论就是这样一个高级的“计算器”,我们输入初始条件,它输出正确结果,至于过程中的那些数学符号背后“真实的世界是怎样的”,他们认为这不是科学应该回答的问题。

阵营二: 实在论/解释主义者。 他们则大声反对:“不,这远远不够!” 他们引用亚里士多德的话——“知其然,更要知其所以然”。一个真正的理论,不仅要能描述现象,更要能**解释**现象为什么会发生。光有一个能预测行星轨道的 F_R 是不够的,我们还想知道,是什么样的“物理实在”导致了这样的轨道? 是像牛顿所设想的“万有引力”在背后牵引,还是像爱因斯坦所描述的“时空弯曲”? 这种对“所以然”的追求,要求我们在 F_R 之上,再增加一个东西。

这个东西,就是**模型 M (Model)**。模型 M 是我们为了理解抽象的 F_R 而在脑海中构建的一幅生动的“**图像**”或一个“**故事**”。

- 对于经典力学,我们的模型 M 就是“**台球宇宙**”:宇宙由无数个像台球一样坚硬、实在的小球(原子)组成,它们在绝对的时空中按照牛顿定律精确地碰撞、运动。
- 对于电磁学,我们的模型 M 是法拉第的“**力线**”:空间中充满了看不见的、有弹性的力线,电荷和磁铁通过这些力线的拉伸和振动来相互作用。

这个模型 M 有巨大的好处:它把抽象的数学变得直观,帮助我们理解、记忆和统一整个理论(“思维经济”)。更重要的是,一个好的模型具有强大的**启发性**,能指引我们去探索新的未知领域,从而增强理论的**预言能力**。比如,麦克斯韦正是基于力线模型,才预言了电磁波的存在。

然而,模型 M 也是一把双刃剑,它有巨大的**危险性**。我们太容易爱上自己构建的生动图像,以至于把它错当成是物理实在本身(“把 M 与 T 等同起来”)。比如,我们后来发现,原子根本不是坚硬的小台

球，而是遵循量子力学的、模糊的概率云。如果死守着“台球模型”，就无法理解量子世界。

文章最后画龙点睛地提到了量子力学的“哥本哈根诠释”。这个诠释的特点之一，就是它非常警惕模型的危险。它近乎于说：量子世界太诡异了，我们人类基于宏观经验构建的任何直观模型（比如把电子想象成一个旋转的小球）都注定是错的、会误导人的。因此，我们最好放弃构建模型 M 的企图，老老实实地用我们那套能够精确预测实验结果的数学工具 F_R 就行了。这是一种非常彻底的、为了避免犯错而选择放弃“看图说话”的深刻思想。好的，导师就位。各位同学，今天我们要一起深入探讨一篇关于科学哲学的文章。这篇文章讨论的是物理学家和哲学家如何理解和“诠释”一个科学理论，尤其以量子力学为背景。这听起来可能有点抽象，但别担心，我会像剥洋葱一样，一层一层地带大家看透其中的奥秘。我们会发现，这些看似深奥的思辨，其实和我们如何构建知识、如何理解世界息息相关。现在，让我们开始第一部分的学习。

【原文】

迄今为止我们已遇到“诠释”的三种不同的意义：用 R 来解释 F ，用补充的原理解释 F_R ，以及建立 M 。下面我们来看这个词的第四种意义，它同建立 M 有密切的关系。很可能发生这样的情况：由于了这样那样的原因，所提议的模型 M 极其显著地显示出 F 或 F_R 的结构的一些主要关系，但却不是它的全部。这时，不是去修改 M ，而是修改 F 以得到两种结构之间的同构，可能被证明是一种可取的做法。严格说来，这样一个做法是把原来的理论 T 换为另外一个理论 T' 。但是，因为这样引起的修改通常是少量的，新理论 T' 连同其模型 M 也将——与物理学文献中的通常说法——被称是原理论 T 的一种“诠释”。特别是若所提出的修改并不意味着可观察的（或在当时观察到的）实验效应时，更是

22 量子力学的哲学

如此。一个例子就是玻姆[D. Bohm]、维日尔[J.-P. Vigiér]、捷尔列夫[И. П. Терлецкий]等人在不同场合提出的一个非线性方程来代替薛定谔方程。如果有必要做出区别，我们将使用不同的术语。例如，在讨论隐变量时，我们用“隐变量诠释”指未修改的形式体系，而用“隐变量理论”指修改了的形式体系，以资区别。

若 T 能被包摄于一个更普遍的理论 T' ，作为其一部分，而 T' 是已被完全或部分解释了的，则得到一个模型来解释 T 的一种特殊情况。只要有这样一个理论 T' 存在，使得 T 的形式体系 F 与 T' 的形式体系 F' 完全等同或前者为后者的一部分，这就总是可能的。将在第二章讨论的量子力学的经典诠释的绝大部分，特别是量子理论的流体力学诠释，就是适当的例证。

M 又可以用来检验一个物理理论的逻辑无矛盾性，这一点是

13 狄拉克注意到的，他写道：虽然“物理科学的重要的目的并不是提供图像”，并且“是否存在一种图像模式是一件次要的事”，人们还是可以“推广‘图像’一词的意义，让它包括任何看待基本规律的方式，它使基本定律的自治性明显起来”。

【解读】

大家好。我们眼前的这段文字，其实是在探讨一个非常核心的科学哲学问题：当我们说“诠释”一个科学理论时，我们到底在做什么？这个词远比我们日常理解的“解释一下”要复杂得多。作者在这里梳理了“诠释”的几种不同层次的含义。

首先，想象一个科学理论T就像一部构造精密的机器。它的核心部分是它的数学骨架，也就是形式体系F（比如牛顿力学的 $F=ma$ ，量子力学的薛定谔方程等等）。

第一种诠释，是用R来解释F。这里的R（对应规则）就像是机器的“操作手册”，它告诉我们，机器上的某个符号（比如F）对应现实世界中的“力”，另一个符号（m）对应“质量”。这种诠释把抽象的数学公式和我们能测量的物理世界联系起来。

第二种诠释，是用补充的原理来解释 F_R 。这好比我们的机器和操作手册结合起来用（ F_R ）的时候，发现有些地方说不通，或者有些现象无法覆盖。于是我们给手册打了个“补丁”，增加一条新规则，比如“这条定律只在宏观低速下成立”。

第三种诠释，是建立一个模型M。这是最有趣的一种。好比为了理解 $F=ma$ 这台“机器”，我们搭建了一个小球和弹簧的物理模型。这个模型非常直观，它的运动方式完美地模拟了抽象的数学方程。这个模型M，就是理论T的一个“诠释”。

而这段文字的重点，是第四种意义。这种情况更激进：假设我们建立的模型M（比如那个小球弹簧系统）本身非常优美、强大，它能模拟出原理论F的绝大部分行为，但就是有那么一两个地方对不上。这时，我们可能会做出一个惊人的决定：我们不改模型M，我们反过去修改理论F！我们觉得模型M揭示了更深刻的真相，是原来的理论F不够完美。这样一来，原来的理论T就变成了新理论T'。虽然严格上这是个新理论了，但因为改动很小，大家习惯上还是称之为对原理论T的一种“诠释”。文中提到的用一个新方程代替薛定谔方程，就是想对量子力学这台“机器”的核心代码做一点小小的修改，让它能适配一个大家认为更好的“模型”。

此外，文章还提到了两种特殊情况：一种是把一个理论T看作是一个更宏大理论T'的特例，比如我们可以把牛顿力学看作是爱因斯坦相对论在低速情况下的一个“模型”或“诠释”。另一种是狄拉克提到的，模型M可以作为“逻辑扫描仪”，用来检查理论本身有没有自相矛盾的地方。如果你连一个能自圆其说的“图像”或“故事”（也就是模型）都讲不出来，那你的理论很可能在逻辑上就有漏洞。

总而言之，这段话告诉我们，“诠释”在科学中是一个主动的、创造性的过程。它不仅是“翻译”和“解释”，更是一种构建、修正、检验甚至颠覆理论的强大工具。

【原文】

在一切物理上重要的理论中，并不是F中的所有非逻辑性术语都通过对应规则R得到经验的意义。和观察术语相反，那些不是直接通过R解释的非逻辑性术语被称为“理论术语”。如前所述，它们只是由它们在F的逻辑结构中所起的作用而被隐含地、前后台地定义。正是由于这个原因，我们说T只是一个受到“部分”解释的理论。

这种事态自然会引出这样的问题：有没有可能系统地消除所有的理论术语，从而把一个受到部分解释的理论变成一个得到完全解释的理论，但却不改变其经验内容。逻辑结构论学派对这个问题给了一个肯定的回答，他们如皮尔逊[K. Pearson]和罗素[Bertrand Russell]等人坚持认为，“只要有可能，便应当用逻辑结构来代替所推断的实体”。在他们看来，一切理论术语都是逻辑结构，它们能够被还原为其构成要素，即观察到的客体、事件或属性。因此，T中每一个含有一理论术语的命题，都可换成一组只含观察术语的命题，而不增减其经验意义。

【解读】

同学们，这段文字触及了科学理论的核心构造，也就是一个理论的“词汇表”是如何组成的。作者把理论中的词汇分成了两类，这个区分非常关键，理解了它，你就能理解二十世纪科学哲学中一场非常重要的争论。

第一类词汇叫“观察术语”。顾名思义，它们指向的是我们能直接用感官或仪器观察、测量的东西。比如，“温度计读数是25摄氏度”、“指针指向刻度5”、“天平向左倾斜”。这些都是构成科学实验基础的、非常接地气的描述。它们是理论与现实世界直接“握手”的地方。

第二类词汇，也是更核心、更有趣的一类，叫做“理论术语”。这些词汇我们无法直接观察到。比如“电子”、“夸克”、“引力场”、“波函数”。你见过一个“电子”吗？没有。你看到的是它在云室中留下的径迹，是电流表上摆动的指针。你见过“引力场”吗？没有。你看到的是苹果掉落，行星围绕太阳旋转。这些“理论术语”就像是悬在空中的节点，它们本身不直接接触地面（经验世界），但它们却把许多根线（逻辑关系）连接起来，让那些孤立的“观察术语”形成一张有序的网络。它们通过在整个理论框架（形式体系F）中所扮演的角色来获得自己的意义。就像在一部小说里，“勇气”这个词不是一个实体，但它通过主角的一系列行为（观察术语）而被定义和理解。

正是因为存在这些无法直接观察的“理论术语”，所以作者说，任何一个物理理论都只是被“部分”解释的。这就引出了一个哲学上的大问题：这些“理论术语”是必不可少的吗？它们是指向某种真实存在的、我们暂时看不到的实体（比如电子真的就是一个个小球），还仅仅是我们为了方便思考而发明的“脚手架”或者“占位符”？

文中提到的“逻辑结构论学派”（通常我们称之为逻辑实证主义），就持有一种非常激进的“极简主义”观点。他们认为，科学的目标应该是建立一个纯粹由“观察术语”构成的、没有任何含糊之处的知识体系。在他们看来，“电子”这种词汇就是一种思想上的“懒人包”。他们相信，任何一个包含“电子”的句子，原则上都可以被翻译成一个（可能极其复杂的）只包含“仪器读数”、“实验现象”等观察术语的句子集合，并且意义完全不变。他们的口号是：“用逻辑结构代替所推断的实体”。也就是说，他们希望把科学理论里所有推断出来的、看不见摸不着的东西，全都用看得见摸得着的观察结果之间的逻辑关系来替换掉。这就像是要把“这个苹果很好吃”这句话，替换成一长串关于“甜度计读数”、“果香分子浓度”、“果肉硬度测试”等等的纯粹客观描述。这是一个雄心勃勃的计划，旨在将科学语言彻底净化。接下来，作者将用一个具体的例子来展示这种想法是如何运作的。

【原文】

为了说明引入理论术语如何能导致经验发现以及理论术语如何通过一个纯粹的逻辑程序换成观察术语，让我们考虑下面的简单例子。

我们假定一个理论T含有三个观察术语a, b, c, 比方说, 它们可以表示若干集的逻辑词, 还有三个理论术语x, y, z, 对它们即将做更仔细的说明。我们还假定, T的形式体系F的(原始)“逻辑常词”有相等 $=$ (设为自反的、对称的及可逆的)和(集的)相交[intersection] $\cap$ (设为结合的、对称的及幂等的), 后者是用来在F中定义包含[inclusion] $\subseteq$ 的概念的, 规定当而且仅当 $m \cap n = m$ 时有 $m \subseteq n$ (m, n, p 用来表示T中的任何术语, 不论是观察术语还是理论术语)。更进一步假定, 相等的术语可以相互替换, 比如, 若 $m = n$ 且 $n \subseteq p$, 则 $m \subseteq p$ 。于是容易证明, 不须再加任何假定, 在形式体系F中下述定理成立:

定理 1. 若 $m \subseteq n$ 且 $n \subseteq m$, 则 $m = n$ 。

定理 2. $m \cap n \subseteq m$ 。

我们最后再假定, 关于观察术语,(暂时)只知道下面两条经验 14

定律:

24 量子力学的哲学

$$(E_1)a \cap b \subseteq c; (E_2)a \cap c \subseteq b. (E)$$

我们即将看到, 由于有三个理论术语, 理论就不只限于说明两条经验定律(E_1)和(E_2), 而且还获得了前述意义下的预言能力。三个理论术语由下面三条理论定律交错地和观察术语联系起来:

$$(U_1)a = y \cap z; (U_2)b = x \cap z; (U_3)c = x \cap y. (U)$$

首先应当明确, x, y, z 是未经解释的理论术语, 因为它们虽然通过前照应而应有意义, 但是它们之中一个也不能单依靠观察术语表示出来, 因为方程(U)对 x, y, z 是不可解的。其次, 我们的理论现在说明了两条经验定律(E_1)和(E_2)。这两条定律现在可以作为逻辑结论从理论定律推导出来。例如为了推导(E_1), 我们看到, 由于基本假定和定理2, 有

$$a \cap b = (y \cap z) \cap (x \cap z) = x \cap y \cap z \subseteq x \cap y = c.$$

第三, 我们的理论提示了新的经验定律

$$b \cap c \subseteq a, (E_3)$$

它同(E_1)和(E_2)一样可以从理论定律(U)导出。于是我们看到, 由于理论术语, 这一理论获得了新的发现的手段。

下面我们来看, 通过对形式体系 F 的完善化, 即通过对 F 的纯逻辑-数学推广而不增加任何经验定律或理论定律, 怎样能够把理论术语变换为观察术语。为了这个目的, 我们引入具有结合性、对称性和幂等性的(集的)相并[union] $\cup$, 假定它满足分配律 $(m \cap n) \cup p = (m \cup p) \cap (n \cup p)$ 及包含律 $m \subseteq m \cup n$ 。在推广的形式体系中现在还可以再建立两条定理:

定理 3. $m \cup (m \cap n) = m$ 。

定理 4. 若 $n \subseteq m$, 则 $m \cup n = m$ 。

第一章 形式体系和诠释 25

借助了新的引入的 $\cup$, 理论术语可定义如下:

【解读】

好, 同学们, 现在我们进入了最精彩的部分。作者给我们呈现了一个极其精妙的逻辑模型, 用来模拟一个科学理论是如何工作的。这个例子看起来全是数学符号, 有点吓人, 但别怕, 我们把它翻译成一个生动的故事, 你就会豁然开朗。

想象我们是研究某种古代合金的炼金术士。我们发现了三种可以直接观察到的特性（**观察术语**）：

- a：合金具有“**强韧**”的特性。
- b：合金具有“**耐腐蚀**”的特性。
- c：合金具有“**导魔**”的特性（一种虚构的能量传导性）。

通过大量实验，我们总结出两条可靠的经验定律（**Empirical Laws**）：

- (E1) $a \cap b \subseteq c$ ：既强韧又耐腐蚀的合金，总是导魔的。
- (E2) $a \cap c \subseteq b$ ：既强韧又导魔的合金，总是耐腐蚀的。

到此为止，我们只是在描述现象。现在，我们想更进一步，提出一个深刻的理论来“解释”为什么会这样。我们大胆地假设，这些宏观特性是由三种我们看不见的、神秘的微观元素（**理论术语**）决定的：

- x：神秘元素“龙之血”
- y：神秘元素“精灵之泪”
- z：神秘元素“地精之铁”

我们的理论（**Underlying Laws**）是这样联系宏观与微观的：

- (U1) $a = y \cap z$ ：强韧，是因为合金里同时含有“精灵之泪”和“地精之铁”。
- (U2) $b = x \cap z$ ：耐腐蚀，是因为合金里同时含有“龙之血”和“地精之铁”。
- (U3) $c = x \cap y$ ：导魔，是因为合金里同时含有“龙之血”和“精灵之泪”。

现在，我们来看看这个引入了“看不见的元素”的理论有什么用。

首先，它能解释已知的经验定律。 比如，为什么(E1)成立？根据我们的理论，一个合金“既强韧又耐腐蚀”($a \cap b$)，就意味着它同时含有 ($y \cap z$) 和 ($x \cap z$)，也就是三种神秘元素 x, y, z 都有。而只要含有 x 和 y，它就是“导魔”的 ($c = x \cap y$)。所以，理论完美地解释了实验结果。

其次，也是最关键的一点，它能做出新的预测！ 这是理论最强大的力量所在。通过我们的理论公式，我们可以推导出一条全新的定律(E3)： $b \cap c \subseteq a$ 。翻译过来就是：“**既耐腐蚀又导魔的合金，也一定是强韧的**”。这条定律是我们以前从未在实验中注意到的！现在，我们可以回到实验室，专门去测试那些耐腐蚀又导魔的合金，看看它们是不是真的都很强韧。如果实验证实了这一点，就说明我们的理论非常成功，这些看不见的“理论术语”(龙之血、精灵之泪) 虽然是虚构的，却成了我们发现新知识的有力工具！

最后，作者展示了逻辑学家的终极梦想：消除理论术语。 我们发现，虽然我们无法直接从 a, b, c 中解出 x, y, z，但如果我们引入一个新的数学工具——集合的“并集”($\cup$)，情况就可能改变。这好比我们发明了一种新的“逻辑炼金术”。通过这个新工具，我们或许能找到一个公式，直接用我们能观察到的“强韧”、“耐腐蚀”、“导魔”来定义“龙之血”是什么。比如（这里只是一个猜想），我们可能最终证明 $x = b \cup c$ 。如果能做到这一点，我们就成功地把那个神秘的、推断出来的实体 x，用一个完全由观察术语构成的逻辑结构给替换掉了。那个“理论术语”的神秘面纱就被揭开了，它不再是基本元素，而只是宏观特性的一种特定组合方式。

这个例子完美地展示了理论术语在科学发现中的“脚手架”作用：我们借助它攀登到了新的知识高度（做出新预测），而一旦登顶，我们又希望能拆掉这个脚手架（消除理论术语），让整个知识大厦只由坚实的、可观察的地基构成。好的，各位同学，大家好！今天我们要一起深入探讨一段关于科学哲学和量子力学的文本。这段内容初看起来可能有些抽象，充满了逻辑符号和专业术语，但别担心，这正是我在这的目的。我将扮演你们的学术导师，把这些复杂的思想掰开揉碎，用我们熟悉的方式来理解它们。科学的魅力不仅在于公式和实验，更在于其背后的深刻思想。让我们一起开始这段探索之旅，看看科学家和哲学家是如何思考理论、观察以及我们所生活的这个奇妙世界的。

【原文】

$$(D_1)x = b \cup c; (D_2)y = a \cup c; (D_3)z = a \cup b. (D)$$

由于有了这些定义(D), 定律(U)现在可从经验定律(E_1)、(E_2)和(E_3)导出, 于是这些原来的理论定律, 现在变成了“定理”。我们以(U_1)为例来说明这一点:

$$\begin{aligned} y \cap z &= (a \cup c) \cap (a \cup b) = (a \cap a) \cup (a \cap b) \cup (c \cap a) \cup (c \cap b) \\ &= (a \cap a) \cup (a \cap b) \cup (c \cap a) \cup (c \cap b) = a \cup (b \cap c) \\ &= a \end{aligned}$$

这里利用了对所包含的运算所假定的性质, 利用了定理3、定理4和(E_3)。我们看到, 在以这样推广的形式体系为基础的理论中, 所有的理论术语和所有的理论定律都已分别还原为观察术语和观察定律。当然, 我们的例子完全不表明这样一种程序是否总是可以实现。但是看来它暗示出, 实行这样一步将会窒息理论的创造力, 使之不适于发现新的事实。

【解读】

同学们，我们先来看这第一部分。它看起来像是一道数学题，但实际上，它是在用一个高度简化的模型来探讨一个非常深刻的哲学问题：科学理论中的“抽象概念”究竟是不是必需品？

首先，我们来破解这些符号。你可以把 a , b , c 想象成我们能直接“观察”到的东西，比如“红色”、“圆形”、“坚硬”这些基本属性。我们称之为**观察术语 (observational terms)**。而 x , y , z 则是我们为了方便描述世界而构建出来的**理论术语 (theoretical terms)**，比如“苹果”这个概念。一个苹果（比如 y ）可以被定义为“红色的 (a) 或者 坚硬的 (c) 的东西”，这就是定义 (D_2) $y = a \cup c$ 的意思。这里的 $\cup$ 符号，大家在数学课上学过，是“并集”，可以理解为“或者”。

接下来，作者做了一个推导。他想看看，只用我们能观察到的东西，能不能得到和用理论术语一样的结论。这个推导 $y \cap z = a$ ，这里的 $\cap$ 是“交集”，可以理解为“并且”。整个推导过程，运用了集合运算的分配律，最终得出了一个只包含观察术语 a , b , c 的关系式。这个过程在哲学上叫做**还原 (reduction)**。它想表达的是：你看，我根本不需要“苹果”(y)和“棒球”(z)这些复杂的理论概念，我只需要谈论“红色”(a)、“圆形”(b)、“坚硬”(c) 这些基本属性，就能描述这个世界。从表面上看，这似乎让科学变得更“纯粹”、更“经验化”了，因为我们把所有看不见摸不着的抽象概念都消除了。

然而，作者立刻指出了这种做法的巨大隐患：“实行这样一步将会窒息理论的创造力”。这是什么意思呢？想象一下，如果没有“引力”这个理论术语，牛顿每次都只能说：“这个苹果往下掉的现象，和月亮绕着地球转的现象，以及地球绕着太阳转的现象，它们都遵循一个非常复杂的、只涉及物体质量、距离和运动状态的数学关系式……”是不是非常繁琐？“引力”这个词，虽然我们看不见它，但它像一个强大的工具，把无数孤立的观察现象联系在了一起，形成了一个简洁、优美、并能启发我们去探索新现象的理论框架。如果我们强行把所有理论术语都消除掉，科学理论就会变成一堆盘根错节、臃肿不堪的观察陈述，失去了指引我们发现新知识的“导航”能力。这就像你拿到了一本只有具体街道门牌号、却没有城市地图的旅行指南，你也许能找到几个地址，但永远无法理解整个城市的布局，更不用说去探索未知的区域了。

【原文】

我们的例子虽然是以极其简化的方式，但却典型地表示出普遍情况，即，在实际上已知的科学理论均能满足很宽的条件下，理论术语都可以被系统地消除而无损于其经验内容。兰西^①在约五十年前就证明了这一点，三十年之后，克赖格^②又以不同的

① F. P. Ramsey, *The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays* (Routledge and Kegan Paul, London; Harcourt Race, New York, 1931; Littlefield Patterson, N. J., 1960), Ch. IX.

② W. Craig, “On axiomatizability within a system”, *Journal of Symbolic Logic*, 18, 30—32 (1953); “Replacement of auxiliary expressions”, *Philosophical Review*, 65, 38—55 (1956).

26 量子力学的哲学

方法证明了这一点。大致说来，克赖格的可消除性定理是，对于每一个含有观察术语和理论术语的理论 T ，存在一个理论 T' ，它给出 T 的每一个观察的(经验的)定理，但在它的逻辑[extra-logical]词中只含有观察术语。克赖格的结果尽管对理论逻辑是重要的，但却不对诠释问题提供一个实际的解答，因为人们发现 T' 的结构臃肿不堪，难以处理。兰西的消除程序在技术上没有那么复杂，它也导致一个替代的理论 T'' ， T'' 不含 T 的一切理论术语，但保留了 T 的全部观察结果。但是正如兰西的遗著的编者布雷思韦特所指出的，它容易遭到反对，说它牺牲了启发式的富有成果性、创造性以及人们通常称的理论的“开放性质”[open texture]。

【解读】

好的，接下来这段文字是对上一个观点的深化和印证。作者告诉我们，前面那个小例子所揭示的问题，并不是一个特例，而是科学哲学中一个普遍且重要的话题。

首先，作者提到了两位哲学家——兰西（Ramsey）和克赖格（Craig）。他们通过严谨的逻辑证明，得出了一个惊人的结论：原则上，任何一个包含理论术语的科学理论（比如物理学中的“能量”、“场”、“夸

克”)，我们都可以创造出一个新的、不包含任何理论术语的理论版本，并且这个新版本能预测出和旧理论完全相同的、所有可被观察到的现象。换句话说，从纯粹的“实用”角度来看，理论术语似乎是“可以被消除的”，并不会损失理论的经验内容，也就是它的预测能力。

这听起来是不是很颠覆认知？这就像有人证明，我们可以写出一部和《三体》情节完全一样的小说，但里面完全不使用“三体人”、“智子”、“黑暗森林”这些核心设定，只用对人物行为和对话的纯粹描述来替代。技术上也许可行，但你能想象那会是怎样一部作品吗？

这正是作者接下来要讨论的重点。克赖格的消除方法虽然在逻辑上无懈可击，但构造出的新理论 T' “臃肿不堪，难以处理”。这就像我们之前说的，用一堆复杂的观察陈述去替代“引力”这个词，结果就是理论变得极其复杂，人类的大脑根本无法有效使用它。而兰西的方法虽然简单一些，但同样面临一个致命的批评，这个批评来自布雷思韦特 (Braithwaite)，他指出了这种做法牺牲了三样宝贵的东西：

1. **启发式的富有成果性 (heuristic fruitfulness)**：“启发式”这个词大家可以理解为“有助于发现和解决问题”。一个好的理论术语，就像一个好向导，能启发科学家去思考“如果……会怎么样？”，从而引导他们做出新的发现。比如“基因”这个概念，就启发了一代代科学家去寻找它的物质载体 (DNA)、研究它的复制和变异机制。
2. **创造性 (creativity)**：科学不仅仅是记录观察，更是人类想象力和创造力的结晶。理论术语是这种创造力的核心载体。
3. **开放性质 (open texture)**：这是个非常关键的概念，我们下一段会详细讲。简单来说，一个好的理论术语，它的内涵不是一成不变、完全被锁死的，而是“开放”的，可以随着我们知识的增长而不断被丰富和修正。

所以，这段的核心思想是：理论术语在逻辑上“可消除”，但在实践中“不可或缺”。它们是科学理论的灵魂，是简洁性、创造力和未来发展的源泉。强行消除它们，就像是把一首优美的诗歌翻译成了一份干巴巴的技术说明书，虽然信息量没丢，但灵魂和美感荡然无存。

【原文】

16 布雷思韦特的争议，即“只有以理论不能适用于新情况为条件，才能通过可观察属性来定义理论术语”，前面在我们的例子的末尾其实已经间接到。他的意见可以照亨佩尔^①的说法用下面的简单例子来说明：“假设在科学研究的某一阶段，‘温度’这个词只是用一个水银温度计的读数来解释。如果只把这个观察判据当作一个部分解释(即当作一个充分条件而不是必要条件)，那么就还为补充一部分解释的可能性留有余地，即参照别种测温物质，它们在高于水银沸点和低于水银凝固点时仍可使用。”显然，这个步骤使得有可能大为扩展有“温度”这个术语的物理定

^① C. G. Hempel, “The theoretician's dilemma”, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 2, 37—98 (1958); 重印于下书中: C. G. Hempel, *Aspects of Scientific Explanation* (Free Press, New York; Collier Macmillan, London, 1965), pp. 173—226.

第一章 形式体系和诠释

律的应用范围。“但是,如果给予原来的判据以完全定义者的地位,那么理论就不能作这样的推广;这时,必须放弃原来的定义以迎合另一个定义,后者与前者是不相容的”。

【解读】

这一段通过一个绝佳的例子,生动地解释了上一段结尾提到的理论术语的“开放性质”(open texture)。这个例子就是我们非常熟悉的物理概念——“温度”。

我们来跟着作者的思路走一遍。想象一下,在科学发展的早期,我们只有水银温度计。这时候,我们可能会天真地给“温度”下一个定义:**所谓温度,就是水银温度计的读数**。这听起来很科学、很精确,对吧?我们把一个抽象的理论术语(温度)和一个具体的观察术语(水银柱的高度)完全等同了起来。这种做法,就叫做把观察判据赋予“完全定义者的地位”。

但问题很快就来了。水银在 -39°C 左右会凝固,在 357°C 左右会沸腾。那么,低于 -39°C 的南极严冬,或者高于 357°C 的炼钢炉,难道就没有“温度”这个概念了吗?显然不是。如果我们死守“温度=水银温度计读数”这个定义,那么“温度”这个概念的适用范围就被水银的物理性质给“锁死”了。我们就无法讨论更广阔范围内的热现象,理论的推广也就无从谈起。这就是布雷思韦特所说的:“只有以理论不能适用于新情况为条件,才能通过可观察属性来定义理论术语”。换言之,你一旦用当前的可观察手段把一个概念完全“定义”死,这个概念就失去了成长的能力。

那么,正确的做法是什么呢?作者提出了一个更好的选择:把观察判据当作一个**部分解释 (partial interpretation)**。我们不说“温度就是水银温度计的读数”,而是说**“如果水银温度计的读数是20,那么温度就是20摄氏度”**。这在逻辑上是一个“充分条件”,而不是“充要条件”(即“当且仅当”)。这样做,就给“温度”这个概念留下了巨大的发展空间。当我们需要测量更高或更低的温度时,我们可以引入新的测量手段,比如酒精温度计、热电偶、红外辐射计等等,然后补充新的解释:“如果酒精温度计读数是-50,那么温度就是-50摄氏度”、“如果热电偶……”,等等。

通过这种方式,我们不断地丰富和扩展着“温度”这个概念的内涵,让它能够适用于从绝对零度附近到恒星核心的巨大范围,而不需要每次都“放弃原来的定义以迎合另一个定义”。这个概念本身是“开放”的,像一个可以不断添加新补丁和扩展包的软件,而不是一个写死了、无法修改的程序。这正是优秀理论术语所具备的强大生命力。

【原文】

我们在研究量子力学各种诠释的过程中,将会遇到许多类似的例子。实际上,态函数 ψ (它无疑是量子力学中最重要的理论术语)的概念就提供了这样一个例子。因为玻恩的诠释(前已指出,它已纳入冯·诺伊曼的量子力学公理化方案之中)正是这样一个部分解释。玻恩诠释的最普遍的说法,是把态函数描述为关于自伴算符的各个本征值的几率分布的生成函数

generator

,几率由态函数的展开式中的展开系数的绝对值平方给出,展开式的基础所讨论的算符的归一化本征函数构成。它既不排除补充的局部解释,甚至不排除赋予“生成函数”本身以一种客观意义的可能性,只要玻恩

诠释的观察结论能保持不变的话。我们以后将会看到,在某些正是旨在达到这一目标的量子力学诠释中,这样带来的僵硬性如何导致同已确立的事实不相容。

【解读】

好了同学们,在理解了“理论术语”和“部分解释”这些哲学思想后,作者终于把我们带到了本书的核心主题——量子力学。他告诉我们,前面用“温度”举的例子,在量子力学中有一个绝佳的对应,那就是量子力学中最核心、最神秘的理论术语——**态函数 ψ (psi)**。

大家可能在物理课上听说过“波函数”,态函数 ψ 和它密切相关。你可以把它想象成一个描述微观粒子(比如一个电子)所有可能性状态的数学函数。这个 ψ 本身非常抽象,它不是我们能直接测量到的物理量,你没法用尺子量它,也没法用天平称它。它就是一个纯粹的数学存在,一个至关重要的理论术语。

那么,我们是如何将这个抽象的 ψ 和我们能观察到的实验结果联系起来的呢?这里就要提到物理学家马克斯·玻恩(Max Born)提出的**玻恩诠释 (Born's interpretation)**。玻恩诠释的内容听起来很复杂,我们把它简化一下:态函数 ψ 的绝对值的平方 ($|\psi|^2$) 代表了在某个位置“找到”这个粒子的**几率**(或者说概率)。

请注意,这正是“温度”例子的重演!玻恩诠释并没有说“ ψ 就是粒子位置的几率”,而是说,我们可以**通过 ψ 计算出**粒子位置的几率。这是一种典型的**部分解释**。它就像连接理论世界(ψ)和观察世界(探测器在某处“咔”地响了一声)的一座桥梁,但它并没有定义理论世界的全部。

这种“部分解释”的方式,同样给 ψ 这个概念留下了巨大的“开放性”。它允许科学家和哲学家们继续追问:这个 ψ 本身到底是什么?它仅仅是一个计算概率的数学工具吗?还是说,它对应着某种真实存在的、我们看不见的“客观实在”? (比如,一个真实弥散在空间中的“波”?)

作者在这里埋下了一个伏笔。他说,有些量子力学的诠释(也就是对量子理论的不同理解方式),试图给 ψ 一个更具体、更“实在”的意义,想把它从一个“部分解释”变成一个“完全定义”。然而,这种尝试往往会带来一种“僵硬性”,就像把温度完全定义为水银读数一样。这种僵硬性,最终可能导致理论的推论和已经被实验反复验证的事实产生矛盾。这再次警示我们,试图用我们日常的、可观察的经验去完全“锁死”一个深刻的理论术语,可能是一件非常危险的事情。

【原文】

但是应当记住,即使全部理论术语都已还原为观察术语,其结果也只不过是一个在 F_R 意义上的在观察上得到完全解释的形式体系。虽然这很可能对更普遍意义上的 F_R 的诠释加以概念上的限制,即对根据可接受的本体论假定或形而上学假定而提供的解释性原理进行挑选施加概念上的限制,但它不会无歧义地决定究竟。正是由于这一剩余自由度,使得哲学考量同量子力学的诠释

量子力学的哲学

释有着重大关系①。

【解读】

这最后一段是全文思想的一个总结，也是为全书的研究方向定下了基调。作者引导我们进行一次思想实验：好吧，就算我们真的成功了，把量子力学里所有的理论术语（比如态函数 ψ ）都用一大堆复杂的、只涉及观察的语言给替换掉了。我们得到了一个在观察层面被“完全解释”的理论。那么，所有问题都解决了吗？

作者的回答是：没有。即使做到了这一点，我们依然面临一个核心问题，他称之为**“剩余自由度 (remaining degree of freedom)”**。

“自由度”这个词，大家在物理和数学中可能接触过，它指的是系统可以独立变化的参数个数。在这里，它是一个比喻。想象一下，我们有一堆实验数据点，画在坐标系上。现在，我们要用一条曲线去拟合这些点。你可能会发现，不止一条曲线能够完美地穿过所有这些数据点。一条简单的二次曲线可以，一条复杂的高次多项式曲线也可以，甚至一条分段函数曲线也可以。这些数据本身，并不能“无歧义地决定”哪一条曲线才是“真正”的、描述背后规律的那一条。选择哪条曲线，除了要看数据，可能还要依赖于我们的一些额外偏好，比如我们更喜欢“简洁”的曲线，或者我们相信背后的物理规律应该是“平滑”的。

科学理论和观察数据的关系也是如此。一个能够完美解释所有已知观察结果的理论体系，并不意味着它所描绘的“实在图像”是唯一的。在同样的实验数据背后，可能存在多种不同的“故事”或“世界图景”。这些不同的故事，就是作者所说的**“本体论假定或形而上学假定”**。“本体论”是哲学的一个分支，研究的是“存在”的本质，即“世界到底是由什么构成的”。

因此，量子力学的诠释问题，不仅仅是一个物理学问题。物理学本身（公式和实验）给了我们数据点，但如何把这些点连成一幅前后一致、令人信服的关于“实在”的画卷，这里就有了“剩余自由度”。这正是哲学考量变得至关重要的地方。不同的哲学立场（比如你是否相信存在一个独立于观察的客观世界），会引导你选择不同的“曲线”，也就是不同的量子力学诠释。这就是为什么理解量子力学，我们既需要物理学家的严谨，也需要哲学家的深思。

【原文】

附录

文献选辑 I

一般著作

M. Black, "Probability", 载于 *The Encyclopedia of Philosophy*, P. Edwards, ed. (Crowell Collier and Macmillan, New York, 1967), Vol. 6, pp. 464—477.

W. Kneale, *Probability and Induction* (Oxford U. P., London, 1949).

J. R. Lucas, *The Concept of Probability* (Oxford U. P., London, 1970)。

主观解释

【解读】

同学们，我们最后看到的这部分是书的附录和文献选辑。虽然这里没有深奥的理论，但它对于我们的学术学习同样重要。这部分相当于作者提供的一份“延伸阅读书单”。

大家可以看到，做学术研究，从来都不是闭门造车。每一位学者都站在前人的肩膀上。作者在正文中提出的观点和讨论，都建立在这些文献所代表的学术传统之上。列出这些文献，一方面是尊重前人的劳动成果，另一方面也是为有兴趣深入研究的读者提供路径图。

我们来看看这份书单的内容。它被分为了“一般著作”和“主观解释”等类别。标题中频繁出现一个关键词：“Probability”（概率）。这暗示了什么呢？还记得我们之前讨论的玻恩诠释吗？它的核心就是将态函数 ψ 和“几率”（概率）联系起来。因此，“概率”这个概念本身到底是什么，就成了理解量子力学的关键。

概率仅仅是我们因为信息不足而做出的一种主观猜测吗（这叫“主观解释”）？还是说，概率是物理世界的一种客观属性，就像质量和电荷一样？对这个基本概念的不同理解，会直接影响我们如何诠释量子力学。

所以，这份书单不仅是知识的延伸，更是思想的索引。它告诉我们，要真正理解量子力学的哲学问题，我们需要回到一些更基础的概念，比如“概率”、“归纳”等等。虽然作为高中生，我们暂时不需要去啃读这些专业的哲学著作，但了解它们的存在，能让我们对知识的全貌有一个更宏观的认识。这就像看一张地图，即使我们只打算去一个城市，了解这个城市在整个国家乃至世界的位置，也会让我们的旅程更有方向感。好的，各位同学，请坐好。今天我们要一起研读一份看起来有点“劝退”的文档。它充满了各种外文书名和专业术语，但请相信我，这背后隐藏着一个非常迷人且深刻的科学哲学问题。作

为你们的学术导师，我的任务就是带你们穿越这些复杂的文字，去探索那个问题的核心。我们将像侦探一样，从这份书单中，挖掘出几百年来最聪明的大脑们是如何思考“概率”这个我们既熟悉又陌生的概念。

我们开始吧。

【原文】

E. Borel, *Valeur Pratique et Philosophie des Probabilités* (Gauthier-Villars, Paris 1939); "Apropos of a treatise on probability", 载于 *Studies in Subjective Probability*, H. E. Ky-

① 关于本节的各项考虑(尤其是关于 F 同 F_R 之间的区别)对量子力学以外的物理学理论的应用,我们推荐读者参见 H. Margenau 和 R. A. Mould 为一方面同 H. Dingle 为另一方面之间关于狭义相对论的诠释问题的论争。见 H. Margenau and R. A. Mould, "Relativity: An epistemological appraisal", *Phil. Sci.* 24, 297—307 (1957), H. Dingle, "Relativity and electromagnetism: An epistemological appraisal", 同上, 27, 233—253 (1960)。本节的参考文献见本章末尾的附录中的文献选辑 II。

第一章 形式体系和诠释

29

burg and H. E. Smokler, eds. (Wiley, New York, 1964), pp. 45—60.

B. de Finetti, "La prévision; ses lois logiques, ses sources subjectives", *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, 7, 1—68 (1937); "Foresight; Its logical laws, its subjective sources", 载于 *Studies in Subjective Probability*, 见上, pp. 93—158. 又见 D. A. Gillies, "The subjective theory of probability", *BJPS*, 23, 138—157 (1972)。

I. J. Good, *Probability and the Weighing of Evidence* (C. Griffin, London, 1950)。

H. E. Kyburg, *Probability and the Logic of Rational Belief* (Wesleyan U. P., Middletown, Conn., 1961)。

古典解释

J. Bernoulli, *Ars Conjectandi* (拉丁文) (Basel, 1713); 法译本 *L'Art de Conjecturer* (Caen, 1801); 德译本 *Wahrscheinlichkeitsrechnung* (Ostwalds Klassiker No. 107, 108. Engelmann, Leipzig, 1899)。

R. Carnap, "The two concepts of probability", *Philosophy and Phenomenological Research* 5, 513—532 (1945), 重印在下书中; H. Feigl and M. Brodbeck, eds., *Readings in the Philosophy of Science* (Appleton-Century-Crofts. New York, 1953); *Logical Foundations of Probability* (University of Chicago Press, Chicago, 1950)。

【解读】

大家好。我们眼前这部分内容，表面上看是一堆书目和一条脚注，但它其实是一张藏宝图，指引我们去探索一个根本性问题：“概率”到底是什么？你们在数学课上学过计算概率，比如抛硬币、掷骰子。但你们有没有想过，当我们说“明天降雨的概率是80%”时，这个“概率”和“掷骰子得到6点的概率是1/6”里的“概率”，是同一个意思吗？

首先，看那个脚注①和章节标题“形式体系和诠释”。这是一个关键的线索。一个“形式体系”就像是数学公式或物理定律，比如爱因斯坦的质能方程 $E = mc^2$ 。它本身是冰冷、精确的。但这个公式在现实世界中到底意味着什么？这就需要“诠释”。脚注里提到了关于狭义相对论的论争，这告诉我们，即使是像相对论这样成熟的理论，最顶尖的物理学家们也会对它的深层含义有不同看法。这就像读一首古诗，文字（形式体系）是固定的，但不同的人可以有不同的解读（诠释）。我们今天要讨论的概率论，同样面临着诠释的难题。

接下来，书单为我们展示了两种主要的早期诠释。第一组未加标题的文献（Borel, de Finetti等），主要指向“主观解释”。这种观点认为，概率不是世界固有的客观属性，而是我们个人对某个事件发生与否的“相信程度”或“信心指数”。比如，你预测你支持的球队下一场比赛的获胜概率是70%，这个数字反映的是你基于已有信息（球队状态、对手实力等）的主观判断。对你来说，它是70%，但对你的对手球迷来说，可能只有30%。主观概率论研究的，就是我们这种“信心的度量”应该遵循怎样的逻辑规则，才能做到理性、自洽。

而紧随其后的“古典解释”（代表人物：伯努利、拉普拉斯），则是你们在课本上学到的。它的核心思想是“等可能性”。当你掷一个均匀的骰子，它有6个面，每个面朝上的可能性都完全相等，所以任何一面朝上的概率都是1/6。这种解释非常直观，在处理赌博、抽签这类理想化问题时非常有效。但它的局限性也很明显：你怎么知道骰子是“均匀”的？对于一个不均匀的骰子？或者对于“明天是否下雨”这种根本不存在“等可能结果”的问题，古典解释就显得无能为力了。

所以，我们看到了概率世界的第一场伟大辩论：概率是客观存在的事实，还是我们头脑中的主观信念？这张书单，就是这场辩论的见证。

【原文】

量子力学的哲学

30

18 J. S. de Laplace, *Essai Philosophique sur les Probabilités* (Paris, 1812, 1840; Gauthier-Villars, Paris, 1921); 英译本 *A Philosophical Essay on Probabilities* (Dover, New York, 1952)。

频率解释

R. von Mises, *Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit* (Springer, Wien, 1928, 1951, 1971); 英译本 *Probability, Statistics and Truth* (W. Hodge, London, 1939; Macmillan, New York, 1957)。

E. Nagel, "Principles of the Theory of Probability", 载于 *Encyclopedia of Unified Science* (University of Chicago Press, 1939), Vol. 1.

H. Reichenbach, *Wahrscheinlichkeitslehre* (A. W. Sijthoff, Leiden, 1935); 英译本 *The Theory of Probability* (University of California Press, Berkeley, 1949)。

或然推理[Probable Inference]解释

R. T. Cox, *The Algebra of Probable Inference* (John Hopkins Press, Baltimore, Md., 1961)。

H. Jeffreys, *Scientific Inference* (Cambridge U. P. London, 1931, 1957); *Theory of Probability* (Oxford U. P., London, 1939, 1961)。

J. M. Keynes, *A Treatise on Probability* (Macmillan, London, 1921; Harper and Row, New York, 1962)。

第一章 形式体系和诠释

31

倾向性解释

D. H. Mellor, *The Matter of Chance* (Cambridge U. P., London, 1971)。

C. S. Peirce, "Notes on the Doctrine of Chances", *Popular Science Monthly* 44, (1910); 重印于 *Collected Papers of Charles Sanders Peirce* (Harvard U. P. Cambridge, 1932), Vol. 2, pp. 404—414.

【解读】

同学们，我们接着来看这张“藏宝图”的后半部分。这里为我们揭示了更多关于概率本质的深刻思考。在古典解释和主观解释之后，思想家们发展出了更精妙、也更具争议的理论。

首先是“频率解释”，代表人物是冯·米塞斯（von Mises）和赖欣巴哈（Reichenbach）。这个观点试图给概率一个坚实的、客观的、可测量的基础。它认为，概率就是一个事件在大量重复试验中发生的“相对频率的极限”。这是什么呢？想象一下，你抛一枚硬币，可能第一次是正面，第二次是反面……结

果看似随机。但如果你抛一万次、一百万次，你会发现出现正面的次数除以总次数，会越来越稳定地趋近于0.5。频率学派就说：这个0.5，就是“正面朝上”这件事的客观概率。它不再依赖于“等可能性”的假设，也不管你内心相信什么，它是一个可以通过实验逼近的物理事实。我们天气预报说“降雨概率80%”，很大程度上就是基于频率的观点：分析历史上无数个与今天气象条件类似的日子，发现其中80%都下雨了。

接下来是“或然推理”(Probable Inference)解释，有时也叫“逻辑解释”。它的代表人物是著名的经济学家凯恩斯(Keynes)和物理学家考克斯(Cox)。这种观点非常独特，它认为概率既不完全是客观世界的频率，也不完全是个人主观的信念。它描述的是“证据”和“结论”之间的一种逻辑关系。大家在学数学证明时，结论是从前提出发100%推导出来的，这叫演绎逻辑。而或然推理则是一种“不完全的”演绎逻辑。比如，一个侦探在案发现场发现了一些线索(证据)，他会推断出某个嫌疑人作案的可能性很大(结论)。这个“可能性很大”，就是一种逻辑概率。它衡量的是，在给定这些证据的条件下，一个理性的思考者应该对这个结论抱有多大程度的信任。它试图为主观信念建立一个客观的逻辑基础。

最后，我们看到了一个非常现代且与物理学，尤其是量子力学紧密相关的“倾向性解释”。它的思想是，概率是一个物理系统自身所固有的一种“倾向”或“趋势”。这听起来有点玄，我们来打个比方。一个不均匀的骰子，它可能有一种内在的、物理上的“倾向”，使得它更容易掷出“6”。这种倾向性就像物体的质量或电荷一样，是它固有的一种属性，即使只掷一次，这种倾向性也客观存在。这个观点在量子世界里特别有用。比如，一个放射性原子核在下一秒会衰变，它的概率是确定的，这被看作是这个原子核自身的一种内在“倾向”，而不是我们知识的缺乏，也不是大量原子统计的结果，而是单个原子就具有的物理性质。

所以，同学们，从这张书单我们看到，一个简单的“概率”，背后却有如此多样的诠释：它是理想化的对称性(古典)、是个人信念的度量(主观)、是长期重复的频率(频率)、是证据与结论间的逻辑关联(或然推理)，还是物理系统内在的倾向(倾向性)？这场争论至今没有最终的赢家，因为它触及了我们如何认识随机性、知识和现实世界本质的哲学核心。希望这次解读，能让你们在未来遇到“概率”这个词时，能多一分深刻的思考。好的，同学你好！很高兴能和你一起探讨这个看起来有点“吓人”的文档。别担心，这些列表虽然充满了陌生的名字和标题，但它们背后是一个非常精彩的思想世界。我们就像侦探一样，从这些线索里，去发掘量子力学背后那些最深刻、最激动人心的秘密。

我们现在就开始，把这份“藏宝图”一点点解开。

【原文】

K. R. Popper, "The propensity interpretation of the calculus of probability and the quantum theory", 载于 *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics*, S. Körner, ed. (Butterworths, London, 1957; Dover, New York, 1962), pp. 65—70; "The propensity interpretation of probability", *BJPS* 10, 25—42 (1959/60).

L. Sklar, "Is probability a dispositional property?", *Journal of Philosophy* 67, 355—366 (1970).

A. R. White, "The propensity theory of probability", *BJPS* 23, 35—43 (1972).

量子力学中的几率

M. Born, *Natural Philosophy of Cause and Chance* (Oxford U. P, London, 1949, Dover, New York, 1964). 中译本:《关于因果和机遇的自然哲学》,M. 玻恩著,侯德彭译 (商务印书馆, 1964)。

C. T. K. Chari, "Towards generalized probabilities in quantum

量子力学的哲学

32

mechanics", *Synthese* 22, 438—447 (1971).

N. C. Cooper, "The concept of probability", *BJPS* 16, 216—238 (1965).

【解读】

同学你好，我们眼前的这份列表，其实是一份学术文献的节选，有点像一部武功秘籍的目录。它罗列了许多顶尖物理学家和哲学家写的论文和书籍，他们都在试图解答一个核心问题：“量子力学中的‘几率’（或者说‘概率’）到底是什么意思？”

你看，我们高中学物理，比如计算小球的运动轨迹，一切都是确定的，有因有果。但在量子世界里，规则变了。我们无法准确预测一个电子下一秒会出现在哪里，只能说它有百分之多少的几率出现在A点，百分之多少的几率出现在B点。这个“几率”彻底颠覆了物理学的根基，所以才引来了这么多大师的思考。

我们来看几位“武林高手”的“秘籍”。第一位是卡尔·波普尔（K. R. Popper），一位大名鼎鼎的哲学家。他提出了一个叫“倾向性诠释”（propensity interpretation）的观点。这是什么意思呢？我们通常认为，掷硬币正反面概率各50%，是因为我们掷了很多次，统计出来的结果。但波普尔认为，这个50%的概率是硬币本身的一种内在“倾向”或“潜质”，就像糖有“甜”的属性一样。这个“倾向”是由硬币的物理状态（重量、形状）和投掷装置共同决定的。这个想法很酷，因为它把概率看作是物理系统的一种真实属性，而不是我们知识不足的体现。

紧接着，我们看到了马克斯·玻恩（M. Born）的名字，他可是量子力学的奠基人之一，还因此获得了诺贝尔奖。他的贡献正是将量子力学中的数学方程（也就是薛定谔方程的解——波函数）和现实中的“概率”联系起来。他的书名《关于因果和机遇的自然哲学》就点明了主题：经典世界是“因果”的，而量子世界充满了“机遇”。这标志着物理学从一个决定论的、像时钟一样精确运行的世界观，转向了一个充满内在随机性的、概率性的世界观。这在当时是革命性的，连爱因斯坦都无法接受，说出了那句名言：“上帝不掷骰子。”

你看，这份列表里的每一行，背后都是一场关于世界本质的深刻辩论。它告诉我们，科学不仅仅是计算和实验，更是对我们如何理解现实的不断追问和反思。

【原文】

C. G. Darwin, "Logic and probability in physics", *Nature* 142, 381—384 (1938).

E. B. Davies and J. T. Lewis, "An operational approach to quantum probability", *Com. Math. Phys.* 17, 239—260 (1970).

B. P. Feynman, "The concept of probability in quantum mechanics", 载于 *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1951), pp. 533—541.

19 A. Fine, "Probability in quantum mechanics and in other statistical theories", 载于 *Problems in the Foundations of Physics*, M. Bunge, ed. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971), Vol. 4, pp. 79—92.

N. Grossman, "Quantum mechanics and interpretation of probability theory", *Phil. Sci.* 39, 451—460 (1972).

H. Jeffreys, "Probability and quantum theory", *Philosophical Magazine* 33, 815—831 (1942).

E. C. Kemble, "The probability concept", *Phil. Sci.* 8, 204—232 (1941).

R. Kurth "Über den Begriff der Wahrscheinlichkeit", *Philosophia Naturalis* 5, 413—429 (1958).

A. Landé, "Probability in classical and quantum theory", 载于

第一章 形式体系和诠释

33

Scientific papers presented to Max Born (Oliver and Boyd, Edinburgh, 1953), pp. 59—64.

H. Margenau and L. Cohen, "Probabilities in quantum mechanics", 载于 *Quantum Theory and Reality*, M. Bunge, ed. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967), pp. 71—89.

F. S. C. Northrop, "The Philosophical significance of the concept of probability in quantum mechanics", *Phil. Sci.* 3, 215—232 (1936).

J. Sneed, "Quantum mechanics and classical probability theory", *Synthese* 21, 34—64 (1970).

P. Suppes, "Probability concepts in quantum mechanics", *Phil. Sci.* 28, 378—389 (1961); "The role of probability in quantum mechanics", 载于 *Philosophy of Science-Delaware Seminar*, B. Baumrin, ed. (Wiley, New York, 1963), Vol. 2, pp. 319—337; 这两篇论文重印在下书中; P. Suppes, *Studies in Methodology and Foundations of Science* (Reidel Dordrecht, 1969), pp. 212—226, 227—242.

C. F. von Weizsäcker, "Probability and quantum mechanics", *BJPS* 24, 321—337 (1973).

文献选辑 II

【解读】

我们继续来看这份“高手名录”。你会发现一个有趣现象：这里面不仅有我们熟悉的物理学期刊（比如 *Nature*），还有很多哲学和数学的期刊。这说明，量子概率问题已经超出了纯粹物理学的范畴，变成了一个需要逻辑学家、数学家和哲学家共同参与的跨学科大挑战。

我们来挑几个亮点看。首先，理查德·费曼（B. P. Feynman），这位你肯定不陌生，他以风趣幽默和物理学上的天才洞察力而闻名。连他都专门写文章探讨“量子力学中的概率概念”，可见这个问题有多么核心和棘手。费曼的独特之处在于，他用“路径积分”的方法重新诠释了量子力学。简单来说，一个粒子从A点到B点，它不是走某一条确定的路，而是同时“探索”了所有可能的路径！我们最终测得的概率，是所有这些路径贡献的总和。这个想法既疯狂又优美，再次说明量子概率和我们日常生活中扔骰子的概率完全不是一回事。

再看这些标题，你会发现几个反复出现的“关键词”，它们代表了不同的研究思路。比如，戴维斯和刘易斯的“操作性方法”(operational approach)。持这种观点的学者比较务实，他们会说：“我们先别争论概率的‘真实’含义是什么，我们来定义一下，在实验室里，我们如何‘操作’和‘测量’它。”这是一种“先别管，用起来再说”的哲学，在科学发展中非常重要。

另一个关键词是“经典”与“量子”的对比，比如兰德（Landé）和斯尼德（Sneed）的文章。这触及了一个关键问题：我们熟悉的经典概率论，比如你在数学课上学的那些，能直接用到量子世界吗？答案是：不能。经典概率论处理的是“已知”集合中的未知事件，比如从装有红球和白球的罐子里摸球。而量子概率处理的是一种根本性的、内禀的“不确定性”。在测量之前，一个电子的自旋状态不是“向上”或“向下”我们不知道，而是它就处在一个“既向上又向下”的叠加态中。这种底层逻辑的差异，是很多科学家和哲学家着迷的地方。

最后，诺斯洛普（Northrop）的文章标题直接点明了这一切的“哲学意义”。量子力学迫使我们重新思考：什么是“实在”？什么是“知识”？什么是“因果”？它告诉我们，宇宙的底层逻辑可能远比我们想象的要奇怪和反直觉。这份长长的文献列表，就是过去几十年里，人类最聪明的一群大脑试图理解这个奇怪而美妙的世界时，留下的思想足迹。它不是终点，而是一张邀请函，邀请每一个像你一样充满好奇心的年轻人，加入这场伟大的智力探险。好的，同学们，大家好！今天我们要一起研读一篇关于量子力学哲学的经典文献。这听起来可能有点深奥，但别担心，我会像一位向导，带你们一步步走进这个奇妙又深刻的世界。量子力学不仅仅是物理公式，它更是一种全新的世界观，彻底改变了我们对现实、对测量、对“存在”本身的理解。这篇文献将带我们回到那个英雄辈出的年代，看看物理学大厦是如何被颠覆和重建的。现在，让我们从第一部分开始，看看作者为我们准备了怎样的思想地图。

【原文】

P. Achinstein, *Concepts of Science* (Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., 1968).

量子力学的哲学

34

R. B. Braithwaite, *Scientific Explanation* (Cambridge U. P., Cambridge, 1953; Harper and Brothers, New York, 1960).

M. Bunge, "Physical axiomatics", *Rev. Mod. Phys.* 39, 463—474 (1967); *Foundations of Physics* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1967).

N. R. Campell, *Physics; The Elements* (Cambridge U. P., Cambridge, 1920); 重印本名为 *Foundations of Science* (Dover, New York, 无出版日期)。

R. Carnap, "Testability and meaning", *Phil. Sci.* 3, 420—468 (1936); 4, 1—40 (1937); 重印为一专册 (Whitlock, New Haven, Conn., 1950); 其摘抄重印在下书中: H. Feigl and M. Brodbeck, eds., *Readings in the Philosophy of Science* (Appleton-Century-Crofts, New York, 1953); *Philosophical Foundations of Physics* (Basic Books, New York, 1966)。

C. G. Hempel, *Fundamentals of Concept Foundation in Empirical Science* (University of Chicago Press, Chicago, 1952).

H. Margenau, *The Nature of Physical Reality* (McGraw-Hill, New York, 1950).

E. Nagel, *The Structure of Science* (Routledge and Kegan Paul, London; Harcourt, Brace and World, New York, 1961, 1968).

M. Przelecki, *The Logic of Empirical Theories* (Routledge and Kegan Paul, London; Humanities Press, New York, 1969).

J. D. Sneed, *The Logical Structure of Mathematical Physics* (Reidel, Dordrecht-Holland, 1971).

【解读】

同学们，我们看到的这第一部分，标题是“量子力学的哲学”，紧接着是一长串看起来有点枯燥的列表。这是什么呢？这其实是学术著作中非常重要的“参考文献”部分。大家可以把它想象成一张藏宝图的索引，或者是一场伟大科学对话的“嘉宾名单”。作者在这里告诉我们：“我接下来要讲的内容，并不是我一个人拍脑袋想出来的，而是站在了这些巨人的肩膀上。”

大家请看，这里的每一条都记录了一本书或一篇论文，格式很规范：作者、书名（用斜体标出）、出版社、出版年份等等。这在学术上是必须的，它体现了严谨和对前人研究的尊重。未来你们进入大学写论文时，也会学习如何规范地引用文献。

更重要的是，这份书单揭示了本文的主题。我们不仅看到了像《物理学基础》(Foundations of Physics) 这样的标题，还看到了大量关于“科学哲学”的著作，比如《科学的结构》(The Structure of Science)、《科学解释》(Scientific Explanation)。这说明什么呢？说明我们即将探讨的量子力学，不

仅仅是一套计算工具，它更深刻地触及了哲学的核心问题：什么是真实？我们如何认识世界？科学理论的本质是什么？比如名单里的卡尔纳普（Carnap）和亨普尔（Hempel），他们是“逻辑实证主义”学派的代表人物，这个学派就非常关心科学语言的逻辑和理论的可检验性。所以，这份书单就像一个预告片，它告诉我们，接下来的旅程将是一场物理学与哲学的跨界探索，我们将要思考的，是量子力学背后的逻辑、概念和世界观。

【原文】

第一章 形式体系和诠释

35

W. Stegmüller, *Theorie und Erfahrung* (Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg, New York, 1970).

进一步的参考文献见下书中的文献评介: *Readings in the Philosophy of Science*, B. A. Brody, ed. (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1970), pp. 634—637.

第二章 早期的半经典诠释

2.1 1926/1927 年间 关于量子力学概念的形势

现代量子力学的发展始于 1925 年初夏,当时海森伯在患过一场枯草热重病之后,正在黑利戈兰

Heligoland

岛上疗养,他想出了一组同时间有关的复数来代表一个物理量的想法^①。玻恩

Max Born

立即认识到,海森伯用来解决非简谐振子问题的“数组”,正是数学中被称为矩阵的那种量,它的代数性质早自凯莱*发表关于矩阵理论的论文(1858)以来就已被数学家研究。在短短

① 历史详情参考文献 1—1 (pp. 199—209) 及 W. Heisenberg, "Erinnerungen an die Zeit der Entwicklung der Quantenmechanik", 载于 *Theoretical Physics in th Twentieth Century; A Memorial Volume to Wolfgang Pauli* (Interscience, New York, 1960), pp. 40—47; *Der Teil und das Ganze* (Piper, Munich, 1969), pp. 87—90; *Physics and Beyond* (Harper and Row, New York, 1971), pp. 60—62。

* 凯莱(A. Cayley, 1821—1895),英国数学家,主要工作为矩阵理论、有限群论 等。——译者注