

三
星
文
库

科学前沿系列

FRONTIERS OF SCIENCE



费曼处理器

量子计算机简介

[澳] 杰拉德·密尔本 著

郭光灿

周正威

张永生 译

The Feynman Processor:
An introduction to quantum computation

江西教育出版社

被誉为“大西洋两岸最好的科普作家”
保罗·戴维斯 特邀主持

江西省版权局著作权合同登记

图字:14-1998-55

The Feynman Processor

Copyright ©1998 by Gerard J. Milburn

Chinese translation copyright ©1999 by Jiangxi Education Press

Published by arrangement with Allen & Unwin

All rights reserved

图书在版编目(CIP)数据

费曼处理器:量子计算机简介/(澳)密尔本(Milburn, G. J.)著;郭光灿等译. —南昌:江西教育出版社, 1999. 10

(三思文库·科学前沿系列)

书名原文: The Feynman Processor

ISBN 7-5392-3323-0

I. 费… I. ①密… ②郭… III. 第五代计算机, 量子级 N. TP387

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 33215 号

书 名: 费曼处理器: 量子计算机简介

著 者: [澳]杰拉德·密尔本

译 者: 郭光灿 周正威 张永生

责任编辑: 黄明雨 特约编辑: 姚建中

责任印制: 万闰宝 封扉设计: 李颖明

出版发行: 江西教育出版社(南昌市老贡院8号/330003)

印 刷 者: 江西科佳图书印装有限责任公司

(江西省南昌市洪城路 636 号/330009)

开 本: 850mm×1168mm 1/32

印 张: 7.75 字 数: 140千字

版 次: 1999年10月第1版 1999年10月第1次印刷

标准书号: ISBN 7-5392-3323-0/Z·73

定 价: 12.00元

(本书如有印装质量问题, 请向承印厂调换)

序

一个老生常谈的话题是：计算机已经成为我们所处的这个时代的象征。计算机以其所取得的令人瞩目的成就和其骇人的威力向人们昭示：它似乎有着无穷无尽的能力和无可限量的适用范围。大家都知道，计算机每过一年，其速度会变得更快，体积变得更小，价钱也会更便宜。人们很自然地认为这一趋势会永远继续下去。

认真的分析将揭示出一幅更为复杂的景象。无论它们看上去多么神奇无比，计算机并不是理想中的抽象实体：它们是由一星一点物质构成的。既然如此，计算机就应和其它物质一样服从共同的物理规律。其中有一条物理规律就是限制信息不能以超光速传送。这一限制从根本上限定了在空间上相分离的处理器所能达到的运算速度。好在我们可以通过缩小处理器的尺寸来绕过这一问题，但现在，我们又遇到了另外的一条限制。当元件的大小达到原子的尺度时，量子物理就成了一个无法回避的因素。这意味着元件的开关行为将服从海森伯的不确定性原理，乍看起来，这似乎是对信息处理的能力设置了一条致命的限制。毕竟，如果连输出的正确性都无法得到保证的话，即使在很短的时间内完成计算，也

没有多大意义。

天才的理论物理学家理查德·费曼 (Richard Feynmen) 指出, 缺点也可以转化成长处。确实, 量子效应的介入提出了一个严峻的技术挑战, 不过, 业已证明, 量子力学也为人们提供了进行一种神奇计算的机会。其中的原因在于一种颇为神秘的, 被称做“纠缠态”的东西。爱因斯坦在数十年前就曾指出, 如果量子力学是对微观系统的一种真实的描述, 那么它将预示着在有关实在的属性中含有真正离奇的成分。为了看清这一点, 假设有两个量子粒子——例如, 光子——产生于一个单次的原子过程, 并飞往不同的方向。量子物理的规则要求, 虽然这对光子之间可以分开非常远的距离, 但每一个光子都鬼魂缠身般地携带着另一个光子的印记。通过检测一个光子, 我们可以推断远处的另外一个光子的某些性质, 而不需要对它进行直接的观察。量子态包含信息的这种方式与我们在日常生活中所遇到的情形大相径庭, 它完全置我们通常的认识于不顾。特别地, 对于双光子过程, 在对其测量之前而试图定义和盘问单个光子性质的想法, 都将导致与量子原理的冲突。

纠缠态的存在不只是一个理论上的概念: 它已经为实验所证实。纠缠信息的属性同目前编码于数字计算机之中的比特信息有着微妙的差异, 对于数学计算机, 在任意时刻, 它的各个组成部分都处于确定的可区分的状态, 比如“开”或“关”。目前计算技术所面临的境况是, 只存在量的提高而没有产生信息属性的质的飞跃。简言之, 在同样数目的信息载体中, 纠缠的量子态比任何经典状态包含了更多的信息。并且, 量子的优势会随着信息载体数目的增加而不断提高。对

于一个包含了上千个组分的系统，这一差别将非常巨大。由此引申出一个想法：人们可以利用量子过程本身来作为计算手段；换句话说，计算的基本步骤将在原子或亚原子水平上进行。

虽然我们不难看到量子计算的潜力，但具体实现起来却是另外一回事。纠缠态是出了名的“弱不禁风”。虽然，在实验室中可以产生简单的纠缠态，但这需要非常细致和特殊的条件。所有量子系统所面临的困难是，它们要不断地受到周围环境扰动的侵袭。实验表明，在几乎所有的实际情况下，量子纠缠会在很短的时间内被环境噪声搅得混乱不堪。某些研究者认为，这种“消相干”严重地限制了量子计算的规模。的确，如果量子信息过程要想产生非同寻常的功用，使得物理系统免于外界的扰动（或以某种方式补偿这一效应），是我们必须优先考虑的事情。

假如这些棘手的技术障碍都可以得到克服，那么量子计算机究竟有什么用途呢？这里有一种用途。计算机用户都很清楚，某些问题令传统的经典计算机十分头疼，无论计算机功能如何强大，对此都无济于事。这些问题之所以难以处理，是因为计算它们所要花的时间将随着问题的规模呈指数增长。一个著名的例子就是将一个大数分解成质因数的乘积。即使是使用超级计算机，要完成一个 64 位数字的因子分解也要花比宇宙年龄还要长的时间。然而，原则上，量子计算机却可以在相当短的时间内求解这一问题。量子计算机之所以具有这种令人不可思议的威力，其奥秘就在于量子态的奇妙性质。对量子不确定性的一种很形象化的理解（虽然尚存争议）认为，包含于不确定性范围之内之内的所有可能的结果，实

实际上，在彼此平行的多重现实世界中都得到实现。这就是著名的量子力学“多宇宙”解释。如果多宇宙解释成立，例如，一个量子开关以50%的机会处于开或关，那么按照多宇宙的观点，就存在两个世界，一个世界中开关处于“开”；另一个世界中开关处于“关”。这两个世界并存于一种复合的现实中，就好像两部电影投影到同一屏幕上。在更为一般的情况下，这种倍增过程会派生出非常大——甚至是无限——数量的选择对象。按照这种观点，量子物理很自然地具有大规模并行计算的能力，只是，不像现存的计算机，只在相邻的组件间处理平行过程；在量子计算机中，平行过程在相邻的宇宙空间中进行！

如果就此做出结论，认为人类探索量子计算机，其动力仅仅来自于做大数因子分解和类似的数值计算，那就大错特错了。此项研究的目的更多地集中于去理解量子计算机所提出的物理和哲学上的涵义。从牛顿开始，科学家们就倾向于把宇宙看作是一台巨大的时钟机器。然而，渐渐地，这种对物质世界的机械唯物主义的描述为一种新的观念所取代：自然可以被看作是一个可计算的过程。现在，很多科学家都把世界看成是一个巨大的信息游戏，在这个游戏中，硬件部分——这些构成宇宙的实际元件，诸如亚原子粒子——已被放到了次要的位置，人们更关注于硬件所携带的信息以及它们彼此之间的复杂的相互作用。牛津大学的理论物理学家大卫·多奇（David Deutsch）强调：宇宙的富于逻辑和理性的结构不能独立于它所遵从的法则。什么可以计算，什么不可以计算，都将由物理法则的形式所决定。这样，量子宇宙中的计算会完全不同于经典宇宙中的计算。多奇认为，量子宇

宙有着更为深邃的性质，那就是，它的整体可由它的部分来很好地模拟。就是说，一台量子计算机（原则上讲！）有能力产生一个虚拟实在的模拟，并且这种模拟将无法同实在的原形相区别。如果是这样的话，宇宙就带有一种自反射的性质，这暗含了关于实在的基本原则。

上述这些，以及其它的一些令人振奋的专题，构成了杰拉德·密尔本(Gerard Milburn)的这部深富震撼力的作品的主题。作为世界上在量子力学基础领域的一名旗手，密尔本以他早些时候的一部作品《量子技术》而享誉世界。很少有职业的量子物理学家能够将有关量子奇异性的一些令人震惊的结果表达得如此清晰而又得体。他对量子纠缠如何导致出有悖于经典世界的结果做了细致而全面的论述，这是我所见的作品中关于量子纠缠的最为出色的描述。这部作品是一份来自于基础研究前沿的报告，密尔本为我们讲述了当前关于量子操纵这一崭新的领域。在这个领域中，研究者们正在探测单原子的行为；纠缠态被用于克隆亚原子粒子；密码学将被赋予全新的含义。从这篇精彩的叙述中，我们感受到了科学的重大进展即将到来的希望之光。量子计算是将软件概念（如信息、随机性和指令）与硬件概念（如物质和力）联结起来的纽带。我深信，在寻找大自然的统一理论的过程中，客观实在的最深层次的奥秘终将会真相大白，量子计算的研究将标志着一个新时代的开始。

保罗·戴维斯
于阿德莱德大学

前 言

当这一个世纪同时也是一千年即将结束之际，我怀着复杂的心情注意到，在我所在地附近的书店里出现了一批以《……的终结》为题的书籍。我饶有兴味的阅读了《历史的终结》，但当《科学的终结》也出现在书架上时，我不能再保持这种轻松猎奇的心态了。也许我应感觉好笑，因为这个书名一眼看上去就荒谬之极。科学终结了吗？当然还没有。看看我们的周围吧，我们像是解决了所有的、可以合理地求助科学来解决的问题了吗？单是清除早期科学技术工作中所产生的错位，就有一大堆工作要做。全球性的危机就是一例。

然而，那些作者心中所想的是一种“大科学”。对于物理学，他们的说法是：我们目前已经具备了物理实在的一般性的蓝图。当然，还有一些细节问题有待解决，但不再会出现像相对论或量子理论那样重大的科学突破了。这种观点可能是正确的，但是，我们这些具体从事物理工作的人几乎都同意：很少有证据来支持这一说法。我们只需考虑一下，现今的两个最为伟大的理论——量子理论和广义相对论——并不能协调一致，这就很能说明问题了。有一些很有前途的数学方案试图推出一个更具普遍性的理论，但就目前而言，一旦

我们遇到要将重力和量子原理结合起来的问题时，所有的方案都变得一筹莫展。不可否认，一些新理论在探索重力同量子原理相统一的过程中取得了一些成绩，但是事实上，它们仅仅解决了为数不多的问题。当然，任何科学最终都将回答一系列有限数量的问题，这需要时间、经费和技术知识。真正的关键所在是首先要提出问题。问题本身就意味着创造性的科学活动，只有当我们不能再以实验的形式向自然发问时，科学才会走向终结。一个恰当的问题往往会导致一次重大的科学突破。

这本书着力介绍量子原理，这一由本世纪初的一大批物理学家经过艰辛锤炼所得出的、关于物理实在的基本属性方面的最为激动人心的发现。这一原理就是：物理实在带有不可消除的随机性。其核心思想是：宇宙的运作就像是一场大规模的掷骰子的游戏，就像是一场无休无止的硬币抛掷过程。但是，世间万物乃至整个宇宙是如此地秩序井然，它们又怎会源自于这样一条明显地不合法度的原理呢？这就是潜藏在量子原理背后的最基本的奥秘。其答案就在于大自然抛掷硬币的这种难以捉摸的方式。

我们所知道的关于物理世界的一切知识都可以归结为对一系列是/否问题的回答。在量子水平上，这些是/否的结果通常就像抛掷硬币而获得正面/反面一样随机。但其种种古怪之处超出了我们事先的预料。在更深的层次上，每一个是/否问题的答案都被一个量子比特所决定，量子比特是对这种是/否问题的最为基本的量子描述。我们发现单个的量子比特可以表现出无限性。对于一次硬币抛掷，我们仅能提出一个问题；但对于一个量子比特，我却可以对其永无休止地发问，它

将总是能提供我们以是/否的答案。量子世界中充满着无穷无尽的奇异现象，从而警示那些妄自尊大，声称“我们很快就可以揭开所有的自然之谜”的人们。量子比特作为一种方式，它将自然的无限性藏匿于“硬币抛掷”里，量子理论的所有最为扑朔迷离的特征都根植于此。如果客观实在既具有无法消除的随机性，同时又是易于理解的，那么，量子比特可能是投骰子的惟一方式。在客观实在的投骰子游戏背后，并不存在什么精神力量，一个具有明显的可理解性的宇宙是由纠缠量子比特——这个精巧的客观实在的骰子——一点一点地构造出来的。

致 谢

我要感谢丹米恩·波普 (Damien Pope) 细致地审阅了本书的初稿并提出了一些很有价值的建议。在艾克·庄 (Ike Chuang) 的首肯下，我们使用了他的薛定谔猫的维格纳函数作为本书 (英文版) 的封面；德弗·温兰德 (Dave Wineland) 许可我们在图 6.2 中使用他的离子阱的图样；凯茜·霍尔姆斯 (Cathy Holmes) 绘制了图 4.3。在此，我向他们一并表示感谢。我还要向比尔·莫罗 (Bill Munro) 和霍华德·怀斯曼 (Howard Wiseman) 表达我的谢意，他们曾多次同我一起讨论量子纠缠的本质属性，帮我澄清了第三章中的某些问题。虽然如此，量子纠缠对我们所有的人仍然是一个谜。

目 录

序	(1)
前言	(7)
致谢	(11)
第一章 量子法则：甩不掉的 不确定性	(1)
第二章 量子纠缠	(41)
第三章 赌博者的隐形传送	(79)
第四章 模拟现实	(101)
第五章 量子软件	(129)
第六章 设想中的机器	(183)
后记	(205)
词汇表	(208)
注释	(214)
索引	(217)

第一章 量子法则：甩不掉的不确定性

实在是什么和怎样认识它

什么是天地万物最本质的要素？所有的客观实在是否就只是运动的实体呢？或者，根本不是这么回事，而是弥漫于宇宙中的一种复杂振动的谐奏？我们眼中的世界仅仅是浩瀚无际的混沌的一种粗略化的景象，还是它本质上确实存在着一个简单和谐的基本要素？我们所见闻所经历的究竟是不是某个单一的物理规律，在物理实在上不停地重复着所表现的各个层面？还是存在无限类别的规律，每一个都有它各自的适用范围？世界到底是由什么构成的？我们能够认识它吗？这些古老的问题，萦绕于我们的意识之中，挥之不去。值得庆幸的是，在这个世纪濒临结束之际，我们已经懂得了其中的某些答案。量子理论为我们提供了实在的最基本也是最成功的描述。然而量子理论对实在的认识却是那样希奇古怪，大违常规，以致人们在过去的—个世纪中对此争执不休。量子法则看起来应当适用于所有的客观实在，但是人们仍旧无法对此取得共识。令人不解的问题是：我们所看到的世界怎么

会是由这样一条简单同时又使人困惑不已的法则所支配的呢？

这条量子法则就是：物理实在具有无法消除的随机性，而且这种随机性是人们无法预测的，我们称之为不可约随机性。物理实在显现出迄今尚未发现的法则所制约的随机性，以致出现种种奇异现象，使研究这些现象的人都困惑不解，甚至连量子理论的先驱们也深感震撼和吃惊。宇宙为什么会在其最基本层次上赋予我们这样一个无法排除的不确定性的根源呢？

仔细地研读从最初的奠基人到现代量子物理学家们的手稿，不难看出他们所流露出来的困惑和迷惘，他们无法相信世界会是这样构造出来的。爱因斯坦在一封写给马克斯·玻恩（Max Born）的信中是这样抱怨的：

量子力学非常深刻，但我心灵深处的一个声音对我说，真实世界并非如此。这一理论硕果累累，然而却难以使我们进一步去揭开这个古老的秘密。

理查德·费曼因对光的量子理论的贡献而荣获1965年的诺贝尔奖。他是这样来形容量子力学的：

……我们一边大喊着：“秘密，秘密，快把门关上！”一边说，按照量子力学的观点来看待世界，我们总是会遇到许多困难。至少对我来说是如此。现在我已老迈昏花，不足以达到对这一理论实质的透彻理解。对此，我一直感到窘迫难安。¹

然而量子理论是迄今为止最为成功的物理理论。由量子理论所做的预言与实际观测的吻合，达到了史无前例的精确程度。它的大多数违背常规的预言不断地为越来越多的精巧实验所证实。量子理论为我们提供了对物理世界的正确理解。大多数的现代科学技术，从微电子产业所创造的奇迹一直到超市中的激光条码扫描器无不是以此为理论依托。并且，量子理论在更大程度上将成为新的高科技——量子技术的基石。²毫无疑问，自然界是按照量子法则建立起来的。然而，尽管量子力学已获得如此巨大的成功，但对其争论仍然在继续着。有着如此鲜明秩序的世界怎么会建立在无法消除的随机性之上呢？答案还未曾明了，但它的关键在于量子随机性的特殊性质。

量子的硬币投掷

1905年对爱因斯坦来说是成果累累的一年。在这一年中他发表了狭义相对论，同时对布朗运动这一特殊现象作出了解释，并且最终消除了长期以来人们对原子假说残存的某些怀疑。在这一年中他还解释了光电效应，这预示着现代光学的来临，并导致光子概念的诞生。光的性质对物理学家来说是一个古老的话题。牛顿假设光是由一束粒子流构成的。他的这一模型很好地解释了光的反射和折射，但不能解释光的衍射效应——即光线在狭缝附近发生弯曲的现象。到了19世纪，光的波动模型占据了统治地位。这种新的模型既能很好地解释反射和折射，又能解释干涉和衍射。詹姆斯·克勒克·

麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 最终总结出光的波动理论，他证明了光是一种电磁辐射。但是，就在麦克斯韦理论取得了正统地位的时候，一个新的现象使人们对光的电磁波理论是否正确产生了怀疑。这个现象被称为光电效应。光电效应是某些金属的性质，它们在紫外光的照射下会产生出一定的电荷。现在光电效应已成为许许多多的日常仪器设备的基础，从超市中的激光条码扫描器，到用在工业烟囱里的污染探测器。

按照麦克斯韦的波动理论来解释光电效应的种种尝试均告失败。受到马克斯·普朗克 (Max Planck) 早期关于热物体的光辐射描述的启发，爱因斯坦于 1905 年提出了一种新的光模型，它很容易地解释了光电效应的所有特性。这一想法非常简单，乍看起来像是返回到了牛顿的光模型。为了解释光电效应，爱因斯坦认为光是一连串的极其微小的相同能量包。他称这些能量包为光子。

在某些方面一个光子就像是一个粒子。它们携带着能量和动量，并且能同实物粒子（如电子）发生碰撞，就像是小的弹子球。光电效应是这样被解释的：一个有着合适能量的光子从金属的表面敲击出一个自由的电子，从而使金属净余出一个正电荷。但是，光子与弹子球之间有着明显的区别。首先，当光被发射或吸收时，光子便会产生或者湮灭，不会引起发射体或吸收体质量的任何显著改变。第二，光子在真空中根本不会发生相互作用，它们只是简单地彼此穿过。最后，每一个小波包所携带的能量一成不变地由光的颜色来确定，蓝光光子携带的能量比红光光子的大。

近代光学理论解释了如何才能将光子描绘为类似于粒子

的极其微小的客体，同时又能显示出波的所有特性，这种阐述直接把我们带到了量子法则的核心，因为光子本质上是一个量子客体。这一解释虽然令人惊异，但却相当简单。下面我来略加说明，考虑一个非常简单的光学仪器：一面半透半反的镜子。我们称这个仪器为分束器，它能把一束光分解成强度相同的两份，同时又不削弱总的强度，不改变光的颜色。如果我们把一束输入光对准一个分束器，然后测量每一个输出方向上的光强，我们会发现这束光被分解成相同的两份。

为了测量光的强度，我们可以利用光电效应。被打出的电子数目越多，表明每秒中来自于光束的光子数目也就越多。被打出的电子最终形成电流，于是光的强度越大，电流也就越大。如果光的强度非常低，我们能够使光电仪器记录下单个的光子。在实际的仪器中我们将会漏掉一些光子，但是我们将假定利用光电效应原则上可以制造出理想的光子计数器。

光的波动理论在解释光束在分束器上的行为时遇到了困难。光波被分束器分解后，一半强度的光波被透射，另一半强度的光波被反射。两个探测器将测量到相同的强度。只要光足够强，这种解释相当成功。然而，随着光强度的下降，光的粒子特性将会呈现出来。

如果在分束器的两个输出方向上各放置一个光子计数器，并且调低输入光的强度，那么我们会看到什么现象？我们将会发现所测到的光的强度开始起伏。有时 L 探测器上记录到的光子数会比 U 探测器上记录到的多一些，有时则正好相反。虽然，这些起伏可能相较于每个探测器上全部的光子计数要小得多，但当我们继续调低光的强度，这个起伏就会变