

量子信息基础

第一章：量子史话

金潮渊

浙江大学信息与电子工程学院



C1-2 从波粒二象性到现代量子力学



课程回顾

经典物理	量子力学
绝对时空观：时间和空间是宇宙运行的背景。	相对性原理
因果论假设：如果一个物体呈现运动的状态，我们可以推测出运动的原因。	“几率波”，量子纠缠，相对性原理
决定论假设：如果知道宇宙在某一时刻的状态，我们可以确定以前和今后的宇宙状态。	不确定性原理，熵增原理
光：光是波动，麦克斯韦的电磁波理论。	波粒二象性
能量：一种是运动物体的能量，另一种是波的能量。	能量量子化，质能关系
测量：可以实现任意精度的测量	不确定性原理



旧量子论

- 旧量子论是一些比现代量子力学还要早期，出现于1900年至1925年之间的量子理论。
 - a. 黑体辐射实验 普朗克的能量量子化学说
 - b. 光电效应 爱因斯坦的光量子学说
 - c. 原子光谱 波尔的原子模型和轨道量子化学说
- 旧量子论的一些局限：
 - a. 量子化的假设是人为引入的 微观粒子的波粒二象性
 - b. 缺乏一个统一理论描述 波动力学/矩阵力学
 - c. 难以解释半量子数的存在 电子自旋和零点能

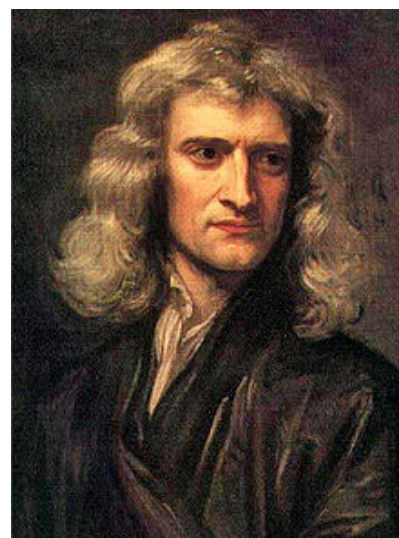


波粒二象性

- 问题：物质最根源的本质是由波动还是粒子来解释？或者同时需要二者？
- 光是波还是粒子？



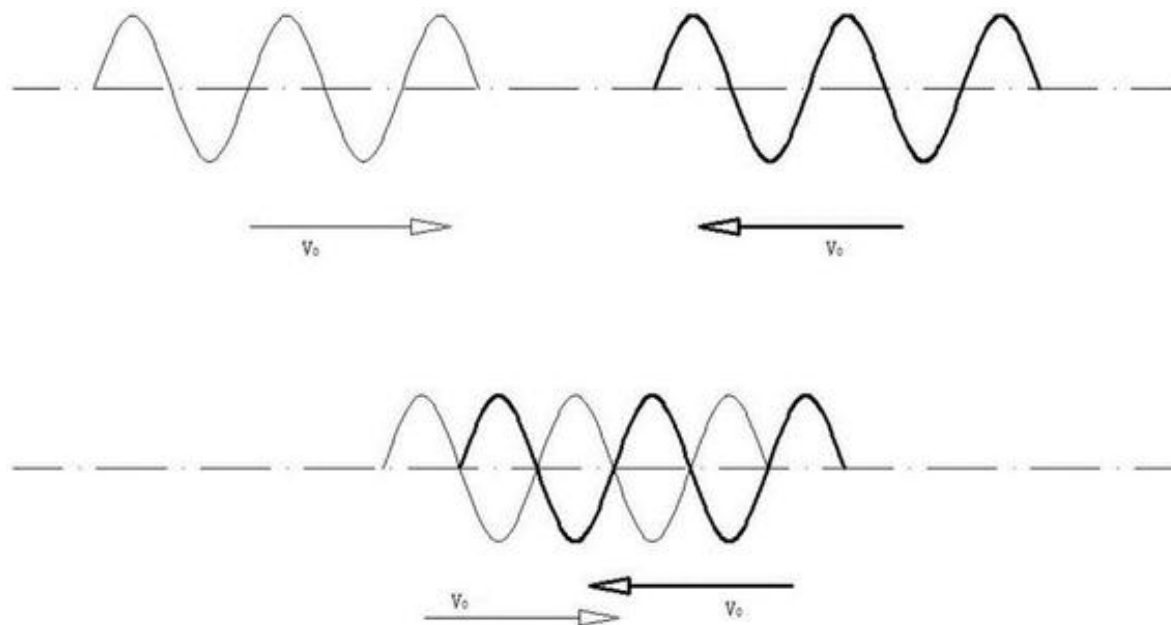
惠更斯(Christiaan Huygens, 1629-1695)
光的波动说



牛顿(Isaac Newton, 1643-1727)
光的粒子说

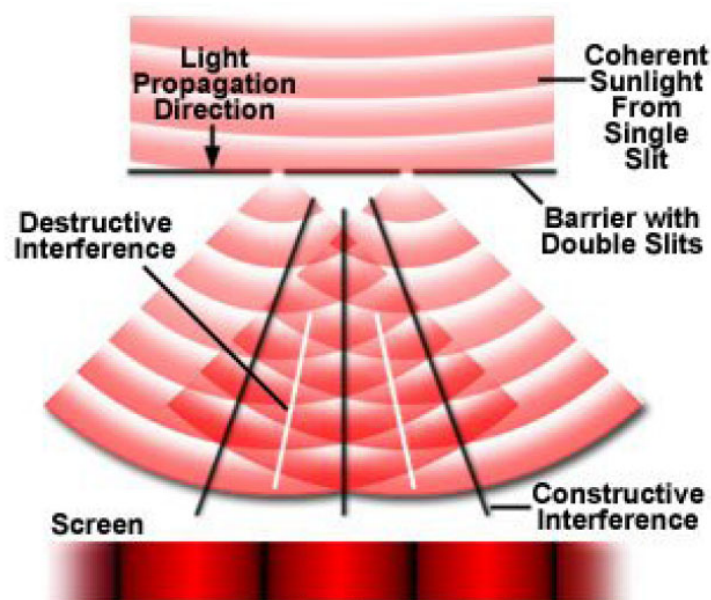
波的特性：叠加

- 当两个波（比如水波）在某一时刻通过某一点，总的波动（位移）就是各个波动（位移）的矢量叠加。



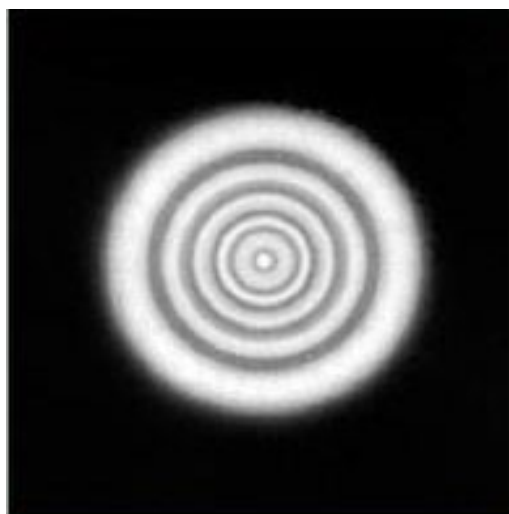
波的特性：干涉

- 波的速度 v 、波长 λ 和频率 f 由公式 $v = \lambda f$ 相联系；
- 杨氏双缝干涉实验，由Thomas Young (1773-1829)在1801年完成。证实了光是一种波。

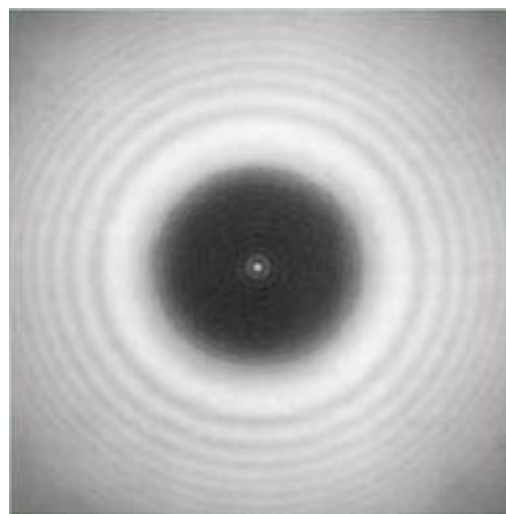


波的特性：衍射

- 当光通过极细的小圆孔（跟大小跟光波长相当）时，会呈现衍射图案。在19世纪，几乎所有的物理学家都认为光是一种波动。



小孔衍射



泊松斑

爱因斯坦的光量子

- 爱因斯坦在1905年：光看成微粒—光子，只是一种“启发式的观点”。
- 爱因斯坦在1909年：“依我看，理论物理学的下一步发展将会将光看成是波和微粒的融合”。（波粒二象性的雏形）
- 但那时的物理学家并没有认真看待此事。



德布罗意(Louis de Broglie, 1892-1987)



- 1923年在巴黎读研究生时，提出了令人震惊的思想，即物质也会呈现波动特性。
- 德布罗意方程：

$$E = mc^2 = (mc)(c) = (p)(c) = (p)(f\lambda)$$

$$(h)(f) = (p)(f\lambda)$$

$$\underline{h/p = \lambda}$$

德布罗意的博士论文

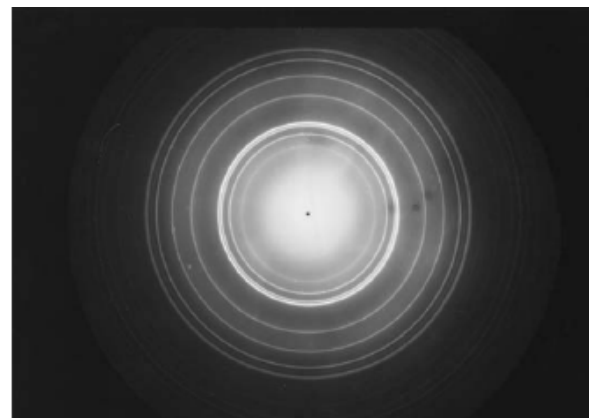
- 1924年提交的博士论文中，微观粒子具有波粒二象性的思想；
- 既然传统上认为是波动的光也具有粒子性，那么像电子、质子这样的粒子为什么不能具有波动性呢？
- 他的博士生导师朗之万非常的困惑，将一份论文寄给爱因斯坦。
- 爱因斯坦读了论文，并告知洛伦兹，“我相信德布罗意的假说是照耀在现今物理学谜题上的第一缕光芒”。
- 然后他的博士答辩委员会，“……德布罗意掀开了面纱……”。当然，论文通过了。



物质波的证实



- 数年之后，德布罗意的所有预言都被证实了。
- 汤姆逊(George P Thomson, 1892-1975)，老汤姆逊的儿子，1937年获得诺贝尔奖，因为“通过晶体发现电子的衍射”。



原子中的电子波

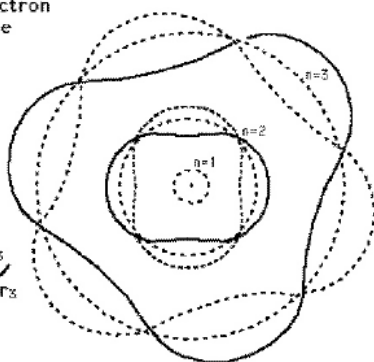
Visualization of electron waves for first three Bohr orbits

Electron wave resonance

$n=1$
 $\lambda_1 = 2\pi r_1$

$n=2$
 $2\lambda_2 = 2\pi r_2$

$n=3$
 $3\lambda_3 = 2\pi r_3$



- 对原子中的电子，其波动性的表现是驻波。
- 只有某些离散的频率会产生， $2\pi r = n\lambda$ 。
- 利用驻波方程和德布罗意关系，我们可以得到：
$$n\lambda = 2\pi r$$
$$n(h/mv) = 2\pi r$$
$$n(h/2\pi) = mvr$$
- 这其实就是玻尔的量子化假设。

新量子论的诞生

- 从1925年6月到1926年6月间的12个月，三份独立的工作发表，各自得到了较为完善的量子力学体系：
 - a. 海森堡的矩阵力学
 - b. 薛定谔的波动力学
 - c. 狄拉克的量子代数
- 之后，这三项工作被证明在数学上等价。



海森堡(Werner Heisenberg,1901-1976)



- 在慕尼黑跟索末菲学习物理。
- 1920年与泡利相遇。1922年他和泡利遇见玻尔。
- 在一次玻尔的讲座上，海森堡问了一个刁钻的问题。玻尔问他是否可以在下午一起散步，散步回来后玻尔告诉友人：“海森堡了解一切，答案就在他手中，他一定会找到方法解决量子力学的难题。”

海森堡的原子图像

- 海森堡22岁时，玻恩引荐他成为了哥廷根大学的无薪讲师。
- 起始点：不是将原子想象成小太阳系，而是能够产生各种频率的简谐振子，就如普朗克在1900年所做的。使用半经典方法，他找到了将原子中的量子数和能量状态跟实验所得光谱频率和强度联系起来的方法。
- 他有了令人震惊的发现。在经典力学中，因子 p 和 q 是可以对易的（ $pq = qp$ ，例如 q 为位置， p 为动量）。但在量子力学中不一定对易。
- 乘法交换律不再适用！



黑戈兰岛之夜

- 为了得到的正确的谱线频率和强度，海森堡不得不采纳量子假定，该假定具有非常深刻的意义：

$$pq - qp = h/2\pi i$$

- 有了该假定，他发现能量状态是量子化的，而且跟时间无关，说明在玻尔的原子模型中量子态是稳定的。
- 在黑戈兰岛的凌晨三点，海森堡完成了他的理论推导，此时他才刚刚从严重的花粉热中恢复。但他非常兴奋，无法入睡，他走到山顶散步，等待日出。美妙的黑戈兰岛之夜！



玻恩(Max Born, 1882-1970)



- 曾经在哥廷根、剑桥和爱丁堡教书。程开甲、黄昆、彭恒武、杨立铭的导师。1954年诺贝尔奖。晶格动力学的开创者。
- 当海森堡把论文交给他的时候，他开始思考海森堡理论中的非对易性。跟他的天才学生约当(Pascual Jordan, 1902-1980)一起，玻恩将海森堡的理论用矩阵语言来描述。
- 矩阵力学的诞生！

泡利以及物理直觉

- 泡利很快证明，用矩阵力学可以非常精确地推导出氢原子的光谱，以及在有外加电场和磁场时的分裂谱线。
- 问题：在矩阵力学中，没有电子轨道这种概念，只有非常抽象、非常形式化的数学过程，但是结果是对的。其中的物理意义如何解释？
- 在矩阵力学中，原子到底是由波还是粒子构成并没有关系，并没有一个看得见的物理模型。



薛定谔(Erwin Schrödinger, 1887-1961)



- 曾在波兰、苏黎世、柏林、牛津、都柏林等地教书。1933年诺贝尔奖。
- 1925年，他开始基于德布罗意的物质波概念开始发展另外一个版本的量子力学。他认为他的方法：
 - a. 更容易被物理学界接受。
 - b. 标志着回归到经典物理的连续、可视化世界。
- 事实证明只有第一点是对的。

薛定谔方程

- 薛定谔构造出一个方程用于描述一维空间中处于势场 $V(x)$ 、质量为 m 的粒子：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(t, x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(t, x) + V(t, x) \Psi(t, x)$$

- 其中函数 $\Psi(t, x)$ 表示波动，其描述了粒子的量子特征（从某种程度上还需进一步阐释）。对于更一般的物理系统，薛定谔方程为：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(t, x) = \hat{H} \Psi(t, x)$$

- 其中 \hat{H} 是哈密顿算符。



薛定谔的波动力学

- 薛定谔将求解原子中能量状态的问题简化为所谓的本征值问题。
- 用波动力学，他能够完全解释氢原子的各种谱线，以及巴耳末公式。
- 他认为他的波动力学意味着回归到经典物理；他提出了物质波的经典描述以跟经典力学兼容，就如麦克斯韦的电磁波理论跟经典光学相兼容一样。
- 他甚至怀疑粒子的真实存在，他认为粒子实际上就是一组尺寸很小、朝各个方向的波群（即波包）。
- 洛伦兹(Henrik Lorentz, 1853-1928)批评了他的波包假说，自由粒子的波包会很快随时间弥散开来。
- 从1926年夏开始，薛定谔关于物质作为波包的概念受到质疑。
- 那么粒子的波函数跟粒子本身到底是什么关系？



薛定谔与海森堡

- 薛定谔厌恶海森堡的矩阵力学，认为它缺乏物理直观性，但薛定谔（其实还有泡利）证明了矩阵力学跟波动力学在数学上实际完全等价。
- 1926年7月，薛定谔和海森堡在慕尼黑首次会面，此时海森堡向薛定谔提出挑战，问他如何用连续的波动学说来解释光电效应和黑体辐射的量子化过程？
- 薛定谔无法回答，并意识到他的学说无法解释这些效应。



波函数的概率诠释

- 1926年夏，玻恩发展了他的量子力学概率理论：
 - 薛定谔方程中的 Ψ 是 “概率幅度”
 - $|\Psi|^2$ 描述粒子的 “实际概率”
- 这里的概率并非出于无知，而实际上描述了我们所能够知道的基本的、原则性的限制。
- 协调了波动性和粒子性：波函数 Ψ 确定了一个粒子在某个位置出现的可能性（其本身并无物理实在性，不同于电磁场的波）。



海森堡的不确定性原理

- 回顾位置和动量的非对易性关系。将 p 和 q 解释成算符，是否意味着位置和动量的测量次序并非无关紧要？
- 要确定一个物体的位置，测量光波长必须小于物体的尺寸（对于电子来说，其尺寸远小于可见光的波长）。
- 位置测量的不精确度： $\Delta x \geq \lambda$
- 动量测量的不精确度： $\Delta p \geq h/\lambda$ 至少大于单个光子传递给电子的动量。

不确定性原理

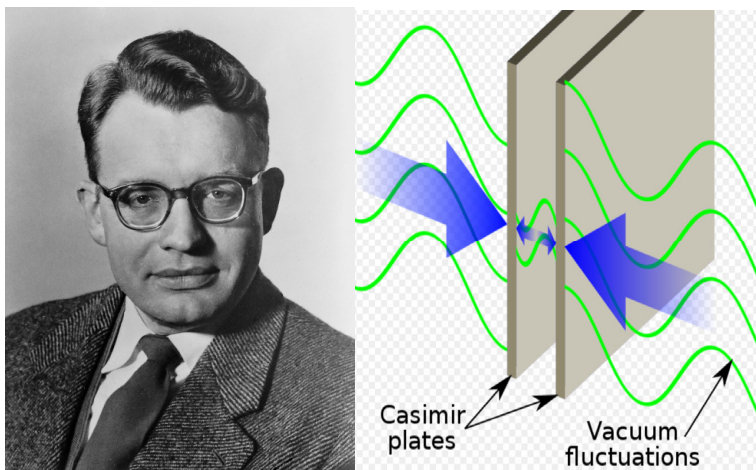
- 同时测量动量和位置的不精确程度永大于某个固定值，该值可由普朗克常数估计：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

- 同时精确测量位置和动量是不可能的。



真空场和零点能量



- 一维谐振子 + 海森堡不确定原理，得到振子的零点能量。
- 真空中充满了任意频率电磁波的真空电磁场。

$$E = \frac{\hbar\omega}{2}$$

- 亨德里克·卡西米尔（Hendrik Casimir, 1909-2000）于1948年提出的一种现象，此效应随后被侦测到，并以卡西米尔力为名以纪念他。

新量子论

- 至此，现代量子力学的大厦已经初步建立。
- 其基础包括德布罗意的波粒二象性、海森堡的矩阵力学、薛定谔的波动力学、玻恩对波函数的概率性诠释、泡利不相容原理、海森堡不确定性原理、玻尔的互补原理等。
- 量子力学在1930-1940年代迅速发展、完善，其标志性的成果有结合量子力学与狭义相对论的狄拉克方程、量子电动力学、量子色动力学等。
- 尝试结合广义相对论与量子力学是热门研究方向，为当前的物理学尚未解决的问题。当前主流尝试理论有：超弦理论、圈量子引力论等等。
- 量子力学可以算作是被验证的最严密的物理理论之一了。至今为止，所有的实验数据均无法推翻量子力学。大多数物理学家认为，它“几乎”在所有情况下，正确地描写能量和物质的物理性质。



哥本哈根学派



- 1921年，玻尔倡议并建立了哥本哈根大学理论物理学研究所，并领导这一世界性的科学中心40年，形成著名的哥本哈根学派，在量子力学的发展中起着独特的作用。

- 玻恩、海森堡、约当、泡利、罗森菲耳德、福克、朗道、狄拉克、德布罗意、德拜、考斯特。在很短的时间内，哥本哈根推动了量子力学快速发展。海森堡给出了描述微观粒子运动的矩阵力学方程；泡利发现了矩阵力学和波动力学的等价性；狄拉克发展了更为普遍的理论—变换理论；海森堡提出了测不准原理。海森堡、泡利、狄拉克都先后获得了诺贝尔物理学奖。

海森堡与玻尔

- 1941年9月，海森堡前往哥本哈根，找到他的老师玻尔并与之进行了一次谈话，但是谈话不欢而散。
- 那场对话后，情同父子的俩人彻底决裂，玻尔被迫逃离丹麦，后来在美国与奥本海默一同研制出了原子弹。海森堡则回到德国。
- 海森堡曾经是纳粹德国开发核武器的领导人，不过纳粹德国自始至终都没有能力将核武器从理论变为现实。一种似乎是海森堡本人提供的说法称海森堡其实并不信任希特勒政权，他在尽力拖延纳粹德国的研究计划。不过一些科学家则对这种说法嗤之以鼻，他们认为恰恰是因为海森堡的“无能”才导致了纳粹德国核武器计划的失败。

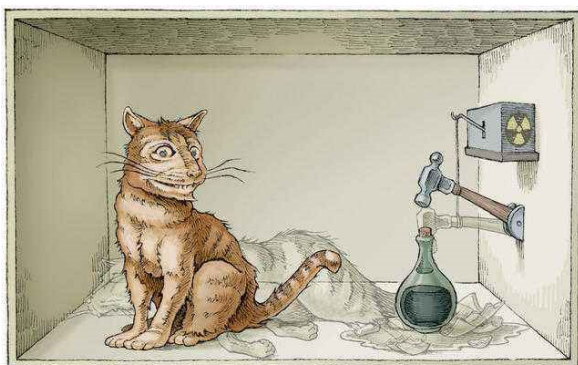


爱因斯坦和波尔的论战



- “上帝不会掷骰子” vs “不要告诉上帝怎么做”。
- 爱因斯坦提出了一系列思想实验的挑战，包括“双缝实验”，“光盒实验”，EPR佯谬等，都几乎的到了势均力敌的回应。波尔则产生了诸如互补原理和非定域性等哲学思想。
- 众多问题的根源在于玻恩的“概率”诠释和海森堡的“不确定性关系”。薛定谔提出了纠缠的思想，和那只著名的猫。

薛定谔的猫



- 薛定谔提出的一个著名思想实验。一只猫关在装有少量镭和氰化物的密闭容器里。镭的衰变存在几率，如果镭发生衰变，会触发机关打碎装有氰化物的瓶子，猫就会死；如果镭不发生衰变，猫就存活。
- 根据量子力学理论，我们可以写出镭处于衰变态 $|1\rangle$ 与未衰变态时 $|2\rangle$ 体系的状态，即一种纠缠态：

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{live}, 2\rangle + |\text{dead}, 1\rangle)$$

- 由于退相干现象的存在，薛定谔猫的思想实验没有宏观上的实验版本，但却可以在微观世界中被验证。

贝尔(John Stewart Bell, 1928-1990)



- EPR佯谬是由爱因斯坦(A. Einstein), 波多尔斯基(B. Podolsky)和罗森(N. Rosen)三人合作提出。
- 在研究EPR佯谬的基础上, 贝尔提出了贝尔不等式

$$|P(a, b) - P(a, c)| \leq 1 + P(b, c)$$

- 量子纠缠的非定域性! 量子密钥分发, 量子隐形传态, 量子计算的基础。

第一章小结

- 旧量子论的三大学说
 - 黑体辐射和普朗克的能量量子化假说
 - 光电效应和爱因斯坦的光量子学说
 - 原子光谱和波尔的原子模型

分界：德布罗意的物质波假说—波粒二象性

- 新量子力学的三大理论
 - 薛定谔的波动力学
 - 海森堡的矩阵力学
 - 狄拉克的量子代数



参考文献

- 量子力学的历史有兴趣的同学可以翻阅下面两本书：
 - Louisa Gilder , 纠缠—量子力学趣史, 人民邮电出版社。
 - Laurie M. Brown, Abraham Pais, Brian Pippard, 20世纪物理学（第1卷）, 科学出版社。

