

周永亮 著

揭开**EPR** 关联之谜

天津科学技术出版社

揭开 EPR 关联之谜

谭天荣 著

天津科学技术出版社

津新登字(90)003号

责任编辑:杨岳霖

揭开 EPR 关联之谜

谭天荣 著

*

天津科学技术出版社出版

天津市张自忠路189号 邮编 300020

天津新华印刷二厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 850×1168毫米 1/32 印张 5.75 字数 142 000

1995年2月第1版

1995年2月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5308-1572-5

O·74 定价:8.00元

内 容 提 要

本书是关于量子力学诠释的专著,它试图证明如下论点:

第一,单个物理系统处于各种状态的几率分布,乃是相应的系综(它由大量相同的物理系统组成)的状态分布的观念映象。例如,量子力学中的命题。

“如果一个电子的动量取某值的几率为 1,则它出现于全空间任意一点的几率一样。”

只不过是观念映象,其现实原型是:

“如果一个电子束的动量一致,则它们的位置均匀地分布在全空间。”

量子力学把“几率分布”误解为一种描写单个物理系统状态的现实的分布。这种误解和由此引起的概念混淆,我们称之为“哥本哈根迷误”。

第二,一切几率都是条件几率,几率表达式 $P(A|S)$ 是指事件 A 相对于条件 S 的几率,或者说,是指事件 A 相对于一个恰好知道了条件 S 的特定观察者的几率。不指定观察者,孤立地说事件 A 的几率是没有意义的。

当观察者或已知条件 S 改变时, A 事件的几率将突然改变,这是概率论中的“观察效应”。在量子力学中,由于哥本哈根迷误,这种效应被理解为“波包缩编”。

第三,动量一致的电子束形成均匀的位置分布,是由于电子束的固有电磁场对诸电子的调整作用。

在 EPRB 理想实验中,一对电子(或其他 $\frac{1}{2}$ 自旋粒子)之间的“几率关联”,观念地反映了向相反方向射出的两个电子束之间的关联。由于每一对电子发射之前形成单态,这两个电子束的固有电磁场是对称的,这种对称性不会因为它们相互远离而消失。一对处于单态的电子在相同的外磁场中偏转方向相反,不是由于它们借助于超光速信号知道了对方在测量仪器中的行为,而是由于它们在各自所处的电磁场中受到了相互关联的作用。这种作用是接触作用,两个接触作用之间的相互关联起源于两个电磁场之间的对称性。

第四,按照量子力学的“算符统计法”,两个互不对易的力学量,例如,位置与动量,不可能有联合分布函数。

贝尔不等式

$$\begin{aligned} & |\langle \sigma_a \cdot \sigma_a' \rangle - \langle \sigma_a \cdot \sigma_c' \rangle| \\ & \leq 1 + \langle \sigma_b \cdot \sigma_c' \rangle \end{aligned}$$

可追溯到如下两个前提:

A. σ_a 和 σ_b 存在联合分布函数。 B. $\sigma_a' = -\sigma_a$.

EPRB 实验否定贝尔不等式实质上否定了这里的前提 A,与实在论和定域性都完全无关。

序 言

M·Jammer 在《量子力学的哲学》一书中,曾这样评述 EPR 关联与隐变量理论之间的关系:

“在远离的位置上得到的两个测量结果的相关性暗示我们,这些结果实际上是当这两个系统还有相互作用时被一些力学变量预先确定的,这些力学变量在两个系统分开后也使它们的态发生联系。虽然这些变量是我们发现不着、控制不了的,但如果这些变量使系统的态这样联系起来,那就能够理解,从一次测量的结果便可以预言另一次测量的结果,而不必假定第一次测量的实行会对第二次测量的结果产生因果的影响。”

在本书中,我们正是按照这一思路揭开了 EPR 关联之谜的。我们的基本观点是:电子(和其他微观粒子)有一个固有电磁场。一束电子的固有电磁场迭加成一个统一的场。这个统一的场对诸电子有一种强而有力却又隐而不现的制约作用。在 EPRB 理想实验中,向相反方向发射的两束电子在它们相互作用时形成了一种对称性,它们的场也有了相应的对称性。这两个相互对称的场各自对自身的电子束的制约作用,使得这两个电子束在测量过程中呈现出 EPR 关联。

为了阐明这种观点,本书重新考察了量子力学中的几率、系综、波函数、波包编缩、态矢及算符等基本概念,并对正统诠释、系综诠释、隐变量诠释作了批判的阐述。

目 录

第一章 原子世界有特殊规律吗？	(1)
§1 电子到底该怎么运动？	(1)
§2 辐射的量子性违背经典物理学吗？	(3)
§3 光电效应表明光具有粒子性吗？	(4)
§4 电子的运动是轨道运动吗？	(7)
第二章 几率与系综	(12)
§1 几率分布是一种观念上的分布	(12)
§2 吉布斯正则系综	(14)
§3 热力学函数	(16)
§4 压强的涨落	(19)
§5 无机系综与有机系综	(24)
§6 量子力学的第一问题	(26)
§7 量子力学的第二问题	(28)
§8 几率表现观察者的认识	(32)
§9 气体分子的两种自由程	(35)
第三章 哥本哈根迷误	(41)
§1 热力学第一定律的诠释	(41)
§2 失败的尝试	(47)
§3 狄拉克论双缝衍射	(49)
§4 哥本哈根迷误	(52)
§5 薛定谔猫	(54)
§6 波粒二象性	(57)
§7 波包编缩	(59)
§8 系综诠释	(63)

第四章 电子自旋	(69)
§ 1 电子束的极化	(69)
§ 2 几率的振幅	(75)
§ 3 变换矩阵	(78)
§ 4 关于几率幅的两个基本假设	(85)
§ 5 态矢与自旋空间	(88)
§ 6 电子自旋	(92)
§ 7 自旋与极化	(95)
第五章 态矢与算符	(98)
§ 1 么正变换	(98)
§ 2 么正算符	(102)
§ 3 本征态矢与本征值	(107)
§ 4 自旋算符	(112)
§ 5 哈密顿算符	(117)
§ 6 位置分布与动量分布	(121)
§ 7 动量算符与位置算符	(127)
§ 8 薛定谔方程	(132)
第六章 EPR 关联	(138)
§ 1 EPR 论证	(138)
§ 2 对 EPR 论证的反应	(140)
§ 3 隐变量理论	(143)
§ 4 修正的贝尔定理	(146)
§ 5 联合几率统计法与算符统计法	(151)
§ 6 令人困惑的量子关联	(156)
§ 7 自旋相关函数	(160)
§ 8 贝尔定理	(164)
§ 9 薛定谔的质疑	(168)
§ 10 结论	(170)
参考文献	(174)

第一章 原子世界有特殊规律吗？

在物理学王国里怀疑原子世界有特殊规律，无异于在基督教王国里怀疑上帝。尽管如此，我们还是甘冒天下之大不韪，提出如下质疑。

§ 1 电子到底该怎么运动？

玻尔断言：“原子世界有特殊规律”，原因是电子的行为一再违反经典物理学的预言。让我们提一个问题：

“如果原子世界没有特殊规律，电子应该怎样运动？”

按照经典力学，质量为 m ，电量为 e 的点电荷在外电磁场 $(\vec{E}, \vec{B})$ 中的运动方程是

$$\frac{d}{dt}(m \vec{v}) = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1-1)$$

汤姆逊当年发现电子，即发现阴极射线是电子流时，他默认了一个前提：

(1-α) “电子在外电磁场中的行为和点电荷一样，即满足方程(1-1)。”

后来，人们还根据这一前提发现了质量和速度的关系：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1-2)$$

可见自从发现电子以来，人们一致认为：

(1-β) “如果原子世界没有特殊规律，则电子在外电磁场中的行为将和点电荷一样。”

由此立刻得出结论：

(1- γ) “如果原子世界没有特殊规律，则对于卢瑟福的原子有核模型来说，电子将绕核作椭圆轨道运动。”

量子力学建立以后，人们发现，在普朗克常量 $h \rightarrow 0$ 的极限情形下，薛定谔方程蜕化为经典力学的哈密顿 - 雅可比方程。将这一方程应用于原子的有核模型，将得出(1- γ)。可见，甚至在量子力学建立以后，(1- γ) 也是人们默认的前提。

可是，在玻尔提出他的原子理论并断言原子世界有特殊规律时，他的前提却是：

(1- δ) “如果原子世界没有特殊规律，则按照经典电动力学，在原子的有核模型中，电子将会因辐射而落于核。”

因此，

(1- ϵ) “如果原子世界没有特殊规律，则在原子有核模型中，电子不会绕核作椭圆轨道运动。”

即使电子是一个百依百顺的女孩子，任我们梳妆打扮，她也会无所适从。她会问：

“你们到底要我怎么运动？”

但是，胡适的原理在这里似乎不适用。电子非常不听话，一再让人们得出结论：“原子世界有特殊规律”。但这也难怪电子，无论电子怎么运动，它都会不断地证实着“原子世界有特殊规律”这一论断。因为：

在原子的有核模型中，如果电子不绕核作椭圆轨道运动，它就违背了经典力学，按照(1- γ)，这表明原子世界有特殊规律。如果电子绕核作椭圆轨道运动，它就违背了经典电动力学，按照(1- ϵ)，这也表明原子世界有特殊规律。

在玻尔理论中，电子在量子轨道上运动时，绕核作椭圆轨道运动，按照(1- ϵ)，这表明原子世界有特殊规律。当电子从一个量子轨道跃迁至另一量子轨道时，它不是绕核作椭圆轨道运动，按照(1- γ)，这也表明原子世界有特殊规律。于是玻尔理论双重地证明

原子世界有特殊规律。

尽管如此,当玻尔理论被实验否定时,“原子世界有特殊规律”这一论断又再一次地被证实了。

§ 2 辐射的量子性违背经典物理学吗?

今天,物理学家都承认有两类现象,一类是经典现象,一类是量子现象。这种独特的划分可追溯到1900年,这一年12月14日,普朗克发表了辐射量子论:物质发射电磁波不是一个连续的过程,而是跳跃地、一份一份地发射。辐射的最小单位称为一个“能量子”,其能量 ϵ 与电磁波的频率 ν 成正比:

$$\epsilon = h\nu \quad (2-1)$$

其中普朗克常量 h 是一个普适常量。这一理论成功地说明了他自己提出的黑体辐射公式。

但是,连普朗克本人也觉得这一理论与经典物理学格格不入。那么,按照经典物理学,物质应该怎样发射电磁波呢?和当时的其他物理学家一样,普朗克想到的是赫兹的“振子模型”:物质中的带电粒子,如电子,在恢复力和强迫力作用下作强迫振动。在这一过程中,振子按照麦克斯韦方程的推迟解发射电磁波,这是一个连续的过程。

但是,连续的发射过程要求源源不断地供给能量。对于宏观过程,这不成其为问题,实验装置提供了适当的外部能源。例如,一个接通了电源的振荡器。然而,我们却不能这样去设想微观过程。别忘了,物质是由原子组成的,基本的物质辐射过程是原子的辐射过程。难道我们能设想每一个原子的身边恰好有一个类似于振荡器的外部能源,它源源不断地向原子提供能量,以保证它连续地发射电磁波吗?

不!原子没有一个伴随着自己的外部能源,它的辐射只能以它自身的能量减少为代价,而原子自身的能量是有限的。因此,原子

辐射过程只能是一个有始有终的有限过程。在这一有限过程中,辐射出去的能量只能是一份有限的能量。 N 个原子经历同一过程就会辐射 N 份能量。从来没有半个原子,所以物质不会辐射半份能量。这就使得物质的辐射具有量子性。

由此可见,辐射的量子性乃是物质的原子性的必然补充。既然物质的原子性是经典物理学的基本假设,辐射的量子性就是经典物理学的必然结论了。

我们可以打个比方来阐明这一点:

春节了,孩子们放鞭炮,设想有一位大人国的观察者,他看不见孩子们,更看不见鞭炮。但他根据一系列的测量、推理与计算,发现在放鞭炮的过程中,声波的能量跳跃地、一份一份地增加。如果这位大人国的观察者不存偏见,那么他得出的结论将是:

“声波的量子性(其能量一份一份地增加)是由于声源的原子性(声源由一个一个鞭炮组成)。

而不是:

“声音具有波粒二重性。”

§ 3 光电效应表明光具有粒子性吗?

人们这样介绍光电效应:

“光电效应是金属表面受到光照射时发射电子的现象。实验证明:被光击出的电子——光电子的数目决定于光的强度;光电子的动能与光的频率成线性关系;此外,光电效应没有明显的惯性,光刚照到金属就有光电子逸出。

爱因斯坦根据普朗克的辐射量子论提出了‘光子说’:频率为 ν 的光波同时又是一束称为“光子”的微粒;每个光子的能量为 $h\nu$, 动量为 $\frac{h\nu}{c}\vec{n}$, 其中 $\vec{n}$ 是光传播方向的单位矢量。

根据这一理论,光电效应可说明如下:当在金属中静止的自由

电子吸收了一个频率为 ν 的光子时,它立刻获得了这个光子的全部能量 $h\nu$ 。如果这一能量大于电子为摆脱金属表面的约束所需的“脱出功” W ,电子就会从金属逸出。于是光电子的动能是

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W \quad (3-1)$$

只有光的频率大于光电效应的‘阈频’:

$$\nu_0 = \frac{W}{h} \quad (3-2)$$

时,才会有光电子逸出。这些结论都定量地与实验符合。因此,光电效应不容置疑地证明了光具有粒子性。”

果真如此吗?

按照爱因斯坦的机制,当在金属中静止的自由电子吸收了一个频率为 ν 的光子并获得了光子的能量 $h\nu$ 时,它同时也获得了光子的动量 $\frac{h\nu}{c}$,因此,它应该沿光传播方向运动。但事实并非如此。

图 1 是光电效应的示意图,如果我们从图示的 x 轴方向来看这一过程,那么,光是从左向右入射,而光电子则从右向左逸出。这是一个矛盾。

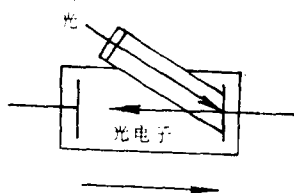


图 1

还有,电子作脱出功时,要穿过一个表面层,按照爱因斯坦的机制,当电子吸收光子时,它在不在表面层中呢?

如果它在表面层中,那么它逸出金属表面时所作的功将小于 W 。这样一来,光电效应就不会有阈频了。

如果它不在表面层中,那它就是自由电子。而根据相对论,自由电子是不可能吸收光子的。

于是电子吸收光子时,它不可能在表面层中,又不可能不在表

面层中。这又是一个矛盾。

诸如此类的矛盾表明，爱因斯坦的光子说其实说明不了光电效应。

人们在断言光子说简单而圆满地说明了光电效应的同时，还断言光的波动说不能说明光电效应。他们把被实验事实所否定的机制描述成：

“当光波照射金属时，会引起金属中电子的强迫振动，当其振幅增大到一定程度时，便会有足够的能量脱离金属。”

提出这一机制之后，人们就不厌其烦地证明它怎样违背实验事实。但是，把这一机制与实验事实作比较是完全多余的，它与经典物理学本身相矛盾。

第一，实验证明，光只有照射金属才发射光电子，而金属的特点是有大量自由电子的，可见光电效应是光与自由电子的相互作用。然而自由电子不能作“强迫振动”，因为它没有强迫振动所需要的恢复力。

第二，即使金属中有某些电子在光作用下作强迫振动，其共振频率将是光的频率。因此，其振幅小于光的波长（否则电子的速度将超过光速）。如此频率极大而振幅极小的振动怎能使电子从金属内部逸出呢？

玻姆在《量子理论》一书中对这一问题作了更详细的探讨。他着重考察了光电效应没有明显的时间延迟这一实验事实与光的波动说之间的矛盾。他不是诉诸某种特殊的经典机制，而是诉诸经典物理学的普遍原理。在考察了各种可能性之后，玻姆得出结论：

“用能量从辐射场向物质逐渐转移过程来解释光电效应的所有努力都失败了。”

我们不在这里一一反驳玻姆的各种论据，只想反问一个问题：

根据落体定律，当1千克的物体在重力场中下落1米时，将获得约10牛顿·米的动能。如果用“能量从重力场向落体逐渐转移”来说明这一事实，我们能不失败吗？

§ 4 电子的运动是轨道运动吗？

据说，有一次玻尔在美国讲学，有位年轻人问他：“难道真有相信电子作轨道运动的傻瓜吗？”在这里，我们提的正是这个“傻瓜的问题”。

我们从电子的单缝衍射过程开始，按照我们的理解，过程可描写如下：

如图 2 所示：

一块障板开有一条

宽度为 a 的狭缝。

动量为 p 的电子束

沿障板的法线方向

射入，通过狭缝达

到一个感光底片

上。如果感光时间

很短，底片显影后

只有一些离散的斑

点。当感光时间足够长时，底片显影后将呈现出衍射图形，与波长为

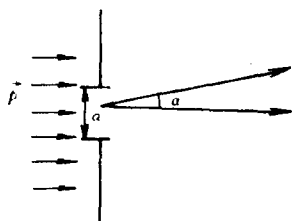


图 2

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4-1)$$

的光束经过同样的装置时的衍射图形一样。这一现象表明电子束与一种未知的波有联系。这种未知的波叫“德布洛依波”。

根据光学理论，单缝衍射的强度与出射角 α 的关系是

$$\frac{I(\alpha)}{I(0)} = \frac{\sin^2 \xi}{\xi^2} \quad (4-2)$$

其中

$$\xi = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha \quad (4-3)$$

衍射图形中满足条件

$$|\xi| \leq \pi \quad (4-4)$$

的区域叫“主峰”，它对应的出射角 α_0 满足

$$\sin \alpha_0 \approx \frac{\lambda}{a} \quad (4-5)$$

对于电子束来说，衍射图形的明暗程度与电子的数密度成正比。衍射图形表明诸电子经过狭缝以后发生了偏转，它们的动量方向按照出射角 α 形成表现为衍射图形的分布，其中大多数电子落在主峰内。

取主峰近似，通过狭缝的电子束的动量的横向分布范围为

$$\Delta p \approx p \sin \alpha_0 = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha_0 \quad (4-6)$$

另一方面，还是取主峰近似，在与狭缝相距 y 的地方，电子束的横向位置分布范围

$$\Delta x \approx a + 2y \sin \alpha_0 \quad (4-7)$$

当刚刚通过狭缝时， $x = a$ 。在那以后， $x > a$ 。在任何时刻，有

$$\Delta x \geq a \quad (4-8)$$

(4-6) 和 (4-8) 给出

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq a \cdot \frac{h}{\lambda} \sin \alpha_0 \quad (4-9)$$

将 (4-5) 代入 (4-9)，有

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h \quad (4-10)$$

这是海森堡的测不准关系的一个例子。

在这个例子中，我们得出测不准关系 (4-10) 时，假定电子从狭缝到底片作等速直线运动。但海森堡却根据这个例子和其他例子断言，测不准关系表明：

(4-α) “电子的运动不是轨道运动。”

那么电子是怎样从狭缝到达底片的呢？海森堡的回答高深莫测，我们不在这里考察。

但是，再深奥的理论也得从事实出发，让我们回到事实本身。

把狭缝与底片之间的距离记作 L ，则主峰的宽度

$$D = 2L \sin \alpha_0 \quad (4-11)$$

(4-5) 和 (4-1) 给出

$$\sin \alpha_0 \approx \frac{h}{ap} \quad (4-12)$$

将 (4-12) 代入 (4-11), 有

$$D \approx \frac{2Lh}{ap} \quad (4-13)$$

测量了 a 、 L 和 p , 就得到 D 。

如果观察者 T 恰好知道某一电子 e 通过了狭缝, 但他不知道该电子将会落在底片上的什么地方。在这种意义下, 人们说:

(4-β) “电子 e 在底片上的落点是不确定的。”

然而, 由于大多数电子落在主峰之内, 他可以八九不离十地预言 e 落在主峰内。在这种意义下, 可以用 D 来度量 (4-β) 意义下的不确定性。换句话说, 对于观察者 T 来说, D 是单个电子在底片上的落点的“不确定度”。

设另一观察者 S 对电子 e 在底片上的位置作了测量。由于电子在底片上留下的光斑比电子本身大得多。这样测量之后, e 在底片上的位置仍然不能完全确定。我们可以用光斑的直径 d 来度量这种不确定性。换句话说, 对于观察者 S 来说, d 是单个电子在底片上的落点的“不确定度”。

观察者 T 的不确定度 D 由测不准关系给出, 而观察者 S 的不确定度 d 则与测不准关系完全无关。海森堡承认有这种不受测不准关系限制的测量, 他称之为“回溯性测量”, 而前一种测量 (即对 a , L 和 p 的测量) 则称为“预告性测量”。海森堡认为, 回溯性测量在理论上是没有意义的。

但波普尔却认为回溯性测量有重要意义, 它是检验理论的预言必不可少的。对于这种回溯性测量来说, 光斑的直径 d 表现的不确定度是“单次测量的结果的误差”; 而衍射图形的主峰的宽度 D 表现的不确定度, 则是“多次测量的结果的散布范围”。只有当单次测量的结果的误差远小于多次测量的结果的散布范围时, 才能通

过测量来检验理论对统计分布的预言。

我们不在这里介入波普尔和海森堡的争论。不论回溯性测量对理论有意义也好，无意义也好，有一点是可以肯定的：

(4-γ) “对于回溯性测量来说，测不准关系中的不确定度是指多次测量的结果的散布范围；而单次测量的结果的误差，则与测不准关系完全无关。”

这一命题完全是用“测量的结果”的语言来表达的，它不依赖于电子从狭缝到达底片的方式，从而不依赖于电子是否作轨道运动。此外，这一命题对其他量子现象也是适用的。

说起测不准关系，人们总是兴高采烈地谈起海森堡发现它的经过：

1926年，海森堡已经建立了矩阵力学，成功地说明了许多实验事实。但对于电子在威尔逊云室中留下径迹这一简单现象却无法理解，因为矩阵力学里根本没有“轨道”的概念。经过几个月的冥思苦想，海森堡突然想起爱因斯坦对他说过：“理论决定我们观察到的东西。”于是他把爱因斯坦的“理论”和自己的矩阵力学等同起来，茅塞顿开：既然矩阵力学中没有轨道的概念，就不应该设法去描写它，而应该放弃它。怎样放弃呢？他想起电子在云室中的径迹不外是一串凝聚起来的水珠。这些水珠比电子大得多，不可能精确地表示经典意义下的轨道，而只能对电子的坐标和动量给出一种近似的、不确定的描写。为了定量地表现这种不确定性，海森堡发现了测不准关系。

人们在讲述这个动人的故事时，已经默认：

(4-δ) “在云室中，因水珠比电子更大而造成的电子径迹的不确定度，正是测不准关系给出的不确定度。”

海森堡和他的追随者认为这是不言而喻的。果真如此吗？

让我们设想电子通过一个小孔进入云室，穿过云室之后落在一个屏上。这样，电子一方面在云室中留下一条“径迹”，另一方面又在屏上留下一个“落点”，而落点恰好是径迹的终点。我们知道：