

原子研究和因果律

[德]W. 海森堡 / 文 王自华 / 译

现代原子物理学的最引人注目的普遍结果，就是在其影响下自然规律在概念上所发生的变革。

近年来经常听说，现代原子物理学取消了原因和结果的规律，或者至少这个规律有时不灵了；因此，人们再也不能按原来的意义谈论事件合乎自然规律的确定性。有时就干脆说，也许因果性原理与现代原子学说是不能协调一致的。要是因果性或者规律的概念弄得不够清楚，那么这些表述终究是不易理解的。因此，下面我想首先简要地谈一下这些概念的历史发展。然后打算探讨在量子论之前早已得出的原子物理学和因果性原理之间的关系。接着准备研究量子论的结果，并谈谈原子物理学近年来的发展。这些发展至今很少深入到公众中去，但看得出来，它似乎也在哲学的领域中期待着它的反作用。

就原因和结果的规则来说，因果性概念的应用在历史上尚较年轻。在早期哲学中，语词“原因(causa)”与现在相比其意义更普遍得多。例如在经院哲学中，按照亚里士多德的说法，“原因(Ursache)”就有四种形式。那里称之为“形式因”(近似于表示现在所指的事物的结构或精神内涵)；“质料因”(做成事物的材料)；“目的因”(创造事物的目的)；以及最后“动力因”。而只有动力因才有点像我们今天所认为的原因(Ursache)这个语词的意思。

从概念“原因(causa)”演变到如今的概念原因(Ursache)是在好多个世纪的进程中实现的，并与由人们所理解的全部现实的演变和在近代开始的自然科学的形成有着内在联系。按照物质过程获得现实性的同一个程度，语词“causa”也与先行于可解释事件的、并以某种方式产生了这一事件的那样一种物质事件有关。因此，在康德[其实他在许多地方事实上干脆是从牛顿以来的自然科学发展中吸取哲学结论]那里，语词“因果性”甚至就已经像我们从19世纪以来所熟悉的那样来表述了：“当我们获悉发生了何时，与此同时，我们也就总是预设了某种它按照一条规则从中产生的东西在先行着。”

于是渐渐地，因果性原理被弄得狭窄了，最后与预期自然界中的事件总是被单义地规定，因而预期对自然界或者其中一个确定片断的准确知识至少原则上足以预先确定将来，是同一个意思了。牛顿物理学正是这样猜测的：能够从系统的一个状态预计系统在一段时间内的未来的运动。拉普拉斯(Laplace)把这个自然界中极为基本的观点说成是虚构一个魔鬼，这也许是最通俗易懂的了。这个魔鬼在某一给定时刻熟悉所有原子的位置和运动，而后它就必定处在能预计整个未来世界的位置。一旦如此狭窄地解释了因果性这个语词，人们也就可以谈论“决定论”了，并且因而认为：存在着从系统的现在状态单义地确定未来状态这样一个永久不变的自然法则。

原子物理学从一开始，就展示出一些本质上不适合这样一个图景的观念。虽然它们与这一图景的矛盾不是根本的，但是原子学说的思想方法一开始就必然与决定论的思想方法有别。早在古希腊德谟克利特(Demokrit)和留基伯(Leukipp)的原子学说中就已经提出：宏观过程是经由许多不规则的微观过程的发生而实现的。这在原则上是可行的，日常生活中就不乏这种例子。比方对农民来说，他们只消看到云层的凝聚和土壤的灌溉就够了，根本就不需要知道水滴是怎样一滴滴下落的。或者再举一个例子，我们准确地知道我们用的花岗岩这个语词指的是何物，即使并未准确了解一个个小晶体的形状和化学结构、它们的混合比和颜色。所以，我们总是一再使用涉及宏观的行为的概念，而不用对微观的单个进程发生兴趣。

这种由许多微小事件从统计上共同起作用的想法，在古希腊罗马的原子学说中已经成为它们解释世界的基础，并且被推广成这个观念：物质所有可感觉的性质间接地由原子的排列和运动所造成。在德谟克利特那里就已经有这种说法：“一物的甜和苦是虚假的，颜色也是虚假的，实际上只存在原子和虚空。”如果人们通过非常多的微小的单个过程的共同作用这种方式来解释感性上可以觉察的过程，那么几乎必然会得出结论：人们也只是把自然界中的规律性看成为统计规律性。尽管统计规律性也能得出一些偶然性程度很高、相当可靠的表述，但在原则上它总是存在有例外。

统计规律性概念经常被认为是充满矛盾。比方人们可能会认为，自然界中的过程要么是被合规律地确定，要么是完全无序地给出；但是在统计规律性之下，人们就很难设想什么东西。与此相反的是，人们必须记住：我们在日常生活中不得不处处与统计规律性打交道，并把它们作为我们实践行动的基础。例如当技术人员建造一座发电厂时，他主要利用每年的平均降雨量来进行计算，虽然他不可能预测何时下雨和下多少雨。

统计规律性在这个规则中意味着：人们只能不完全地了解有关的物理系统。著名的例子就是玩骰子。因为骰子的任何一面都不比其他一面占优势，因此我们用哪一种方法都不能预言它会哪一面朝上地落下来，人们可以认为的是，在掷了非常多的次数后，大约正好有六分之一的次数是五点朝上。

早在近代开始，人们就已试图通过物质原子的统计态从质上也从量上去解释物质的状态。R. 波义耳(Robert Boyle)曾指出：倘若利用单个原子对容器壁的大量碰撞来解释压强的话，便可以弄清楚一定气体的压强和体积之间的关系。用类似方法，人们已经解释了热力学现象，因为他们认为：在热的物体中的原子比在冷的物体中的原子运动得更加激烈。这个陈述的一个数学上的定量形式已经成功地给出，并借此说明了热学规律。

统计规律性的这一应用的最终形式，已经在上世纪后半叶通过所谓统计力学得到了。在这个其基本规律是从牛顿力学简单推导出来的理论中，人们研究了从一个复杂的力学系统的不完全的知识中所得到的结果。所以原则上人们并没有放弃纯粹的决定论，他们设想：单个事件完全是由牛顿力学所规定的。但是人们补充了一种想法：该系统的力学性质并非完全被知悉。正是吉布斯(Gibbs)和玻尔兹曼(Boltzmann)成功地用数学公式适当地领会了不完全知识的性质，尤其是吉布斯能够指出：温度概念正好与知识的不完全性紧密相连。

当我们知道一个系统的温度时，那么这意思就是：这个系统是来自一组权利相等的系统。这组系统可以用数学来精确地描述，而对于所涉及的特殊系统却不行。因此，吉布斯本来已经几乎无意识地跨出了一步，这一步后来引出了一个最重要的结果。吉布斯第一次提出

一种物理概念，只有在我们对自然界中的一个对象的知识不完全时，才能把这种物理概念用到这个对象上。例如假设气体中所有分子的运动和位置已知，那么，谈论气体的温度便再也没有意义。温度概念只能被应用于系统不完全被知悉的情况，并且人们希望从这个不完全的知识中得出统计的结论。

自从吉布斯和玻尔兹曼的发现以来，尽管人们用这个方法把一个系统的不完全知识列入物理定律的表述中，但是，直到M. 普朗克(Max Planck)的著名发现(它是“量子论”的开端)为止，人们基本上还是坚持决定论。普朗克在他关于辐射理论的工作中首先只是发现了在辐射现象中的某种不连续性的要素。他指出，一个在发射中的原子所放出的能量不是连续的，而是分立的，呈脉冲状。这个分立的、呈脉冲状的能量发射像原子论的全部观念一样，又引出一个假设：辐射的发送可能是一种统计现象。但只是在

25年的进程之后人们才提出：事实上，量子论甚至迫使我们把这条规律正好表述为统计规律，并且还决定论发生了原则性的偏离。

在爱因斯坦(Einstein)、玻尔(Bohr)和索末菲(Sommerfeld)的工作之后，普朗克理论已被证明是能用以打开通向原子物理学全域的大门的钥匙。在卢瑟福(Rutherford)一玻尔原子模型的帮助下，人们已经能够解释化学过程。从这个时候起，化学、物理学和天体物理学融合成一个统一体。但是，在量子论规律的数学表达中，人们已经迫不得已地发现自己偏离了纯粹的决定论。因为在此还不能谈论这些数学上的评估，所以我只打算指出几种不同的说法，在其中人们表达了物理学家看到在原子物理学中所体现的那种值得注意的情况。

人们一度能够把与以前物理学的偏离表述为所谓的“不确定性关系②(Unbestimmtheit- srelationen)”。人们确信，一个原子微粒的位置和速度不可能同时以任意精度来确定。如果能够非常准确地测量位置，那么由于观察仪器的干扰，对速度的认识在一定程度上就会变得非常模糊；反之，由于精确的速度测量也会模糊对位置的认识，于是，对于这两个不准确性的乘积由普朗克常数给出一个下限。这种说法至少让人们清楚地看到，借助于牛顿力学的概念就只能裹足不前；因为对一个力学过程进行计算，就非得要在一个确定的时间点同时准确知道位置和速度，但根据量子论这恰好是不行的。

另一种说法由玻尔所创造，他采用了“互补性(Komplementarität)”概念。他认为，我们用以描述原子系统的不同直观图景，尽管对于确定的实验已经完全测定，但不是相互排斥的。例如可以把玻尔原子描述成那样一个小规模的行星系：中间是原子核，外面是电子，电子围绕核旋转。但是在另外的实验中，这样来设想才是适当的：原子核被多层固定的波所包围，在此波的频率决定了由原子所发射的辐射的频率。最后，人们也能把原子看作一个化学的对象，可以计算它与其他原子联合时的反应热，但这样一来就不能同时对电子的运动有所陈述。因此倘若人们在正确的地方应用它们，这两幅不同的图景都是正确的，但是它们彼此矛盾，因此称它们为互补。每一单个的图景都具有不确定性，而这种由不确定性关系来表达的不确定性恰好足以避开不同图景之间的逻辑矛盾。

从这个暗示出发，哪怕不进一步讨论量子论数学也很可以理解到，一个系统的不完全知识必定是那个量子论表述的一个重要组成部分。这个量子论规律必然是统计性质的。为此举例：我们知道镭原子能发射 α 辐射。量子论能指出每单位时间 α 粒子以什么几率离开核；但是量子论不能预言准确时刻，它在原则上不确定。人们也决不能认为，以后还会再发现一个新的规律，它允许我们去确定这个准确时刻；因为倘若情况果真如此，那么就不能理解，

为什么还能也把 α 粒子理解为一个离开原子核的波；这甚至本身也能由实验来证明。

那些既证明了原子物质具有波动性，又证明了原子物质具有粒子性的各种实验，通过它们的悖迫使我们统计规律性进行表述。在宏观过程中这个原子物理学的统计因素一般不起作用，因为从统计规律出发对于宏观过程得出的是一个相当大的几率，使人们可以认为这个过程实际上是决定了的。当然也常有这种情况，其中宏观事件依赖于一个或一些更小的原子行为，那样，人们也能预言这个宏观过程只是统计的。我想用一个众所周知的、但并不能令人愉快的例子，也即原子弹的例子来解释这一点。

对于一个普通的炸弹，能从爆炸物质的重量和它的化学成分预计爆炸强度。对于原子弹，尽管人们也能给出一个爆炸强度的上限和下限，但是，这个强度的一个精确的预计原则上不可能，因为它依赖于一些更小的原子在点火进程中的行为。在生物学中[约尔丹(Jordan)对此特别有所指明]也有相似的几率过程，其中宏观进化受到单个原子中的过程的控制；在遗传过程中基因突变时尤其看到这种情况。这两个例子应该要用量子论统计性质的实际结果来解释；而且这个发展是20多年以来形成的，还不能设想将来在这方面还会有什么根本的改变。

尽管在最近几年，在因果性问题的圈子里还添加了一种新观点，正如在开头我就说过的；它起源于原子物理学的最新发展。但这些问题(现在处于原子物理学兴趣的核心)按照逻辑顺序产生于原子物理学最近200年的进展；因此我必须再次简短地着手探讨近代原子物理学的历史。

在近代早期，原子概念与化学元素概念结合在一起。一种基本物质的特征是它在化学上不允许再分解。因而，每一种元素都有一个所属的确定的原子种类。比如，一块碳元素就由纯净的碳原子所组成，一块铁元素就由纯净的铁原子所组成。因此，有多少化学元素就不得不假设有多少种原子。到那时为止，人们认识了92种不同的化学元素，所以也就必须认为有92种原子。但是，从原子学说的基本预设来看，这样一种观念很不令人满意。最初原子是要由它们的排列和运动来解释元素的质。只有当原子全部都一样或者只在很少种的原子，就是说，只有当原子本身没有质的差别时，那么这种观念才有一个实际的解释价值。但是，当不得不假设92种不同的原子时，面对正好有这么些性质上不同的事物这种说法，人们并没有太多收获。

因此，92种根本不同的最小粒子的假设，长期以来是不能令人满意的，因而人们曾经猜测，想必可以从这92种原子中获得一个数量更少的基本成份。因而人们早就尝试着把化学原子理解为由少数基石复合而成。把一种化学物质转变为另一种化学物质这个最古老的尝试，总还是来源于物质最终是统一的这样一个前提。事实上，过去50年业已证明：化学原于是复合的，并且只是由三种基石所组成，我们称它们为质子、中子和电子。

原子核由质子和中子组成，它被一定数量的电子所围绕。这样，如碳原子的核便由六个质子和六个中子所组成，在它周围一定距离围绕着有六个电子。因而自从核物理学在30年代发展以来，92种不同的原子仅由三种最小的不同粒子所取代了；至此，原子学说准确地选择了它的道路。这条道路对于原子学说来说是可能的它的基本假设所预先制定了的。从此以后，明确了所有化学原子由三种基石所组成，化学物质实现相互转化也就必然成为可能的了。众所周知，随着物理学上的澄清，立即带来了技术上的现实化。自从1938年O. 哈恩(Otto Hahn)发现了铀裂变和与此相关的技术上的发展以来，元素的转化也能够在宏观上被体现出来了。

然而在最近20年里，这幅图景再一次出现了混乱。在所知道的三种基本粒子：质子、中子和电子以外，人们已经在30年代有了更进一步发现，而最近十年这种新粒子的数目惊人地增长着。但总是与这样一些基本粒子有关，它们与三种基石相反都是不稳定的，即只能存在极短的时间。在这些粒子(我们称它们为介子)中有一种寿命约为百万分之一秒，另一种只能存在这个时间的百分之一，第三种不带电的甚至只能存在百兆分之一秒。但除了这个不稳定性外，新基本粒子的状况与三种稳定的物质基石极其相似。

最初给人的印象是，似乎现在人们又在被迫采用大量不同质的基本粒子，鉴于原子物理学的基本假设，这将是很不令人满意的。然而在最近几年的实验中已经表明，基本粒子在相互碰撞时有巨大的能量转移，并能相互转换。当两个基本粒子带着巨大的动能相互击中时，在碰撞以后便会产生新的基本粒子，原先的粒子和它们的能量转换成新的物质。如果认为，说到底所有粒子都由同样的材料组成，它们只能是同一种物质的不同稳定状态，人们便能最简单地描述这个事态。这个基石的数字三，因而再次简化为数字一，只有一种统一的物质，但它可以以各种分离的稳定态而存在。这些状态中有一些是稳定的，它们是质子、中子和电子，另外许多则是不稳定的。

基于过去几年的实验结果，尽管人们几乎不可能更多地怀疑原子物理学将会在这个方向上发展，但是要从数学上把握形成基本粒子的规律性，至今还没有成功。这正是原子物理学家目前工作的难题，不管是实验工作(发现新粒子并研究它们的性质)还是理论工作，尽力有规律地结合基本粒子的各种性质，并且写下它们的数学公式。

在这些努力中，突然出现了我们前面提到的时间概念的困难。当人们研究高能基本粒子相互碰撞时，必须考虑到狭义相对论的空间—时间结构。在原子壳层的量子论中，这种空间—时间结构并没有起很重要的作用，因为原子壳层上电子的运动相对来说比较慢。但是，现在涉及到的是基本粒子，它们的运动接近光速，它们的行为也只有借助于相对论才能被描绘。爱因斯坦在50年前发现，空间和时间的结构根本不像我们最初在日常生活中所想象的那样简单。如果我们把所有那些我们从中至少原则上能够获悉一些什么的事情称为过去；而把所有那些我们原则上也能对之产生点影响的事情称为将来；那么，相信在这两组事情之间只存在着我们能够称之为现在时刻的这样一个无限短的瞬间，这是符合我们天真的想法的。这也曾是牛顿用作他的力学基础观念。

但自从1905年爱因斯坦的发现以来，人们知道，在我刚才称为将来的东西和我称为过去的东西之间，存在一个有限的时间间隔，它在时间上的范围大小依赖于事件与观察者之间的空间距离。因此，现在的范围并非限制在无限短的时间瞬间中。相对论认为，

作用原则上不能传播得比光速更快。于是，相对论的这个特点在与量子论的不确定性关系相联系时即带来了不少麻烦。根据相对论，作用只涉及空间—时间区域，它通过所谓的光锥，也就是通过由一个作用点引出来的光波所达到的空间—时间点而形成轮廓鲜明的边界。因此必须特别强调，这个空间—时间区域是有轮廓鲜明的边界的。而在量子论一方则强调，一个位置的轮廓鲜明的确定，因而甚至一个空间的轮廓鲜明的界定，就带来一个速度上的、因而甚至动量和能量上的无限不确定性。这种事态实际上是以这样的方式产生出来的：在尝试一个基本粒子相互作用的一个数学表述时，能量和动量总是出现无限大的数值，它们阻碍建立一个满意的数学表达式。

在最近几年，对这个困难作了很多研究，但还是不能成功地给出一个完全满意的解决。所以暂时提出这个假设似乎是唯一的补救：在极小的空间—时间区域中，也即在基本粒子的数量级范围内，空间和时间以一个奇特的方式变模糊了，也就是，在那么短的时间中，就连前或后这些概念本身也再不能正确地定义。自然，如果在宏观区域中，空间—时间结构不会有丝毫改变，但那就必须估计到这种可能性：实验将针对在十分小的空间—时间区域中的有关过程指出，某些进程显得在时间上是颠倒进行的，而不是符合它们的因果顺序。

于是在这里，原子物理学的最新发展，再一次与因果律问题联系起来。当然，暂时还不能断定，是否这里会再度出现新的矛盾和对因果律的新的偏离。情况可能是：在尝试基本粒子规律的数学表述时，终究还会产生出一些新的可能性来绕开上述困难。但是人们现在已几乎不怀疑，最新的原子物理学在这方面的发展将再一次跨越到哲学领域里。只有成功地用数学方法确立基本粒子领域中的自然规律；那就是说只有我们知道例如为什么质子的重量正好是电子重量的1836倍，以上提出的问题的最后答案才能得到。

人们由此认识到，原子物理学已经越来越远离决定论的观念。首先，从原子学说一开始，人们就已经把决定大宏观过程的规律理解为统计规律了。尽管当时人们在原则上维护决定论，但是实际上已在用我们不完全的知识计算物理系统。然后，在本世纪上半叶把原子系统不完全的知识看作这个理论的原则上的组成部分。最后，在最近几年还出现了这种情况，在最小的空间和时间中，时间顺序的概念显得成问题了，尽管我们在此还不能说有朝一日将如何解开这个谜。

注 释

① 本文系作者于1952年2月12日在圣加合作的报告。首次发表于《宇宙》年鉴第9卷，1954年第3册，第225—236页。

② 汉语以往通常译为“测不准关系”。——译者

(Werner Heisenberg: “Atomforschung und Kausalgesetz”, 原载: Schritte uber Grenzen, R. Piper & Co. Verlag, Munchen, Zurich, 1971. S. 128—141, 邓晓芒校, 责任编辑: 张敦敏)

[回主页](#)

地址：北京市建国门内大街5号哲学所 邮政编码：100732
电话：(010)8519507 传真：(010)65137826