

多即不同

BY P. W. ANDERSON

译：孙全超 12110811

2024年2月26日

还原论的假设至今仍是哲学家们争论的问题，不过我觉得对于大多数活跃的科学学家而言，还原论是毋庸置疑的。我们头脑和身体的运转，以及我们所详细了解的活物和静物被认为遵守着同一套基本法则。除非在很极端的条件下，我们通常认为我们对这些法则深入了解。

如果不加判断，人们单看一眼就觉得以下内容是还原主义的明显推论：如果一切事物都遵守相同的基本规律，那么唯一真正从最本质的视角上研究万物的科学学家应该只在那些基本规律上钻研。实际上，这样的科学学家等效于一些天体物理学家，一些基本粒子物理学家，一些逻辑学家和其他数学家，而很少有其他（学科）的科学学家。这种观点在Weisskopf (1)的一段相当著名的文章中表达过，而在本文的目的就是要反驳这样的观点：

“遍观二十世纪的科学发展，可以看到有两个发展分支，由于缺少更好的术语表述，我暂时分别将它们称为“本质性研究”和“外延性研究”。简而言之，本质性研究侧重于基础定律，外延性研究侧重于用已知的基础定律解释现象。和往常一样，这种区分有时并不有效，但对于大多数情况可以做到清晰分类。固体物理学，等离子物理学，或许还包括生物学都是外延性的。高能物理，相当大的一部分核物理都是本质性的。一旦发现新的基本规律，一场浩大并不断增强的学术热潮开始将新发现应用到那些迄今位置不能解释的现象中。因此基础研究有两个层面。科学的前沿内容沿着最新最现代化的本质性研究一直延伸，外延性研究产生于过去的本质性研究，并基于过去几十年的本质性研究广泛和成体系的发展外延性研究。”

最近，我听到材料科学领域的一位大佬在一次会议中引用了这个观点，旨在敦促与会者致力于研究“凝聚态物理中的基本问题”，并声称没有这些（基本）问题，就只剩下了他认为是设备集成的外延性研究了。

这种观点的主要谬误在于，还原论假设并不意味着“建构主义”假设：把所有事物还原为简单的基本定律的能力并不等同于能从这些定律出发重新构建宇宙的能力。事实上，基本粒子物理学家告诉我们的基本定律的性质越多，它们与其他科学领域的现实问题的联系似乎就越小，更不用说与社会科学的联系了。

建构主义假设再面对尺度和复杂程度的双重困难时就会失效。事实证明，基本粒子大而复杂的聚集体行为不能通过对少数粒子特性的简单外推来理解。相反，在每一级复杂（尺度？）层次上都会有全新的性质涌现，而理解这些新的行为，就需要进行研究，我认为这种研究在本质上和其他研究一样具有根本性。也就是说，在我看来，我们可以按照这样的思路，将各门科学按照层次线性排列：学科X遵循学科Y的规律。

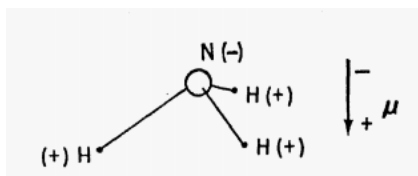
X	Y
固体或多体物理	基本粒子物理学
化学	多体物理
分子生物学	化学
细胞生物学	分子生物学
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
心理学	生理学
社会科学	心理学

但是这个层次结构并不意味着学科X“只是应用Y”。在每一个阶段都需要全新的规律，概念，总结，所需要的灵感和创造力和前一个阶段一样多。心理学不是应用生物学，生物学也不是应用化学。

在我所从事的多体物理领域中，我们也许会比其他学科更接近基本的、本质性的底层结构，而其他学科种会出现非常重要的复杂性，因此，我们想要就如何实现量变到质变的转变提出一个一般性的理论。这个理论称为“对称性破缺”理论，它或许会有助于更普遍的说明还原论的建构主义反面的失效。我将对这些观点做一个基本的、不完整的解释，然后在对其他层面的类比和类似现象做一些更统统的推测性评论。

在开始之前，我想要澄清两个可能存在的误解。第一，当我谈到尺度变化一起本质变化时，我指的并不是那种浅显的观点，即在新尺度上的现象可能遵守实际上完全不同的基本定律，例如，在宇宙学尺度上需要广义相对论，而在原子尺度上需要量子力学。我想大家都会同意，所有不同物质都遵循简单的电动力学和量子理论，这确实涵盖了我要讨论的大部分内容。（正如我所说，我们都必须从还原论出发，这一点我完全接受）。第二个容易混淆的原因是，基本粒子物理学家借用了对称性破缺的概念，但严格来说，他们对于这一术语的使用只是一种类比，这种类比是深刻的还是华而不实的还有待考量。

让我以一个最简单的例子开始讨论，这个例子对我来说很自然，因为我在读研究生的时候就接触过：氨分子。当时每个人都知道氨，并以此来校准自己的理论或仪器，我也不例外。化学家会告诉你，氨“是”一个三角锥构型



氮带负电，氢带正电，因此它有一个电偶极矩（ μ ），方向与锥体顶朝向相反。这对当时的我来说很奇怪，因为我被教的内容是任何东西都没有电偶极矩。教授其实教的是没有原子核具有偶极矩，因为他教的是核物理，但他的论点是基于时间和空间的对称性，一般来说是正确的。

我很快了解到，实际上它们是正确的（或许说并非不合理更为准确）因为他一直小心翼翼地说，系统的任何静止状态（即不随时间变化的状态）都不具有电偶极矩。如果氨从上述的非对称状态开始演化，它将不能稳定存在很长时间。氮原子可以通过量子隧穿效应穿过氢原子组成的三角形到达另一侧，事实上，整个过程非常快。这就是所谓的“反转”，其反转发生的频率约为每秒 3×10^{10} 次。真正的平稳状态只能是不对称棱锥和它的逆构体等量叠加。这种混合物没有偶极矩。（我再次警告读者，我的说法过于简略，详情参考教科书）。

我就不对这个例子进行完整证明了，但结果是，系统的状态如果保持稳定，就必须要有与支配它的运动规律具有相同的对称性。原因很简单：在量子力学中，除非对称性不允许，否则总可以有一种方法可以从一种状态进入另一种状态。因此，如果从任何一种非对称性态开始演化，系统将会过渡到其他状态，所以只有以对称的方式将所有可能的非对称态叠加，才能得到稳定状态。氨的情况所涉及的对称性是奇偶性，即看待事物的左手和右手的等价性。（基本粒子物理学家发现某些违反奇偶性的现象与本问题无关；这些效应对一般的物质影响微弱。）

在了解氨分子如何满足我们关于不存在偶极矩的定理之后，我们可以研究其他情况，特别是研究逐渐增大的系统，检验状态和对称性是否总是相关。还有一些其他由较重的原子构成的棱锥形分子，三氯化磷， PCl_3 ，的重量是氨分子的两倍，它的反转频率却只有氨分子的十分之一。三氟化磷， PF_3 ，用更重的氟代替了氢，虽然理论上可以认为其会从制备时的方向在合理的时间内发生反转，但没有观察到其以可以观测到的速度进行反转。

然后我们可以继续研究更为复杂的分子，例如大约由40个原子组成的糖，对于这些分子来说，指望它们反转已经没有意义了。生物体制造的每一个糖分子都是相同的螺旋形分子，无论通过量子隧穿效应还是在常温下热搅拌，它们都不会发生反转。在这一点上，我们必须忘记反转的可能，忽略奇偶对称性：对称定理不是被推翻了，而是破缺了。

另一方面，如果我们大概在热平衡的条件下通过化学反应合成糖分子，我们会发现，通常情况下左手手性并不比右手手性的糖更多，反之亦然。在没有比自由分子集合体更复杂的东西的情况下，通常来说，对称性定律不会破缺。我们需要生物在种群中产生真正的不对称性。

在非常大但无生命的原子集合体中会出现各种类型的对称性破缺，进而导致产生净偶极矩或净光旋转功率，或者二者兼有之。许多晶体在每个原胞内都会产生一个净偶极矩（热电性质），某些晶体中的偶极矩会在电场作用下发生逆转（铁电性质）。这种不对称性是晶体寻求其达到能量最低状态的自发效应。当然，与之相反的状态也是存在的，而且根据对称性，相反状态的能量与前者相同，但这个系统是如此之大，以至于任何热力学或量子力学力都不能在类似宇宙年龄的无穷时间内，使其从一种状态转变为另一种状态。

由此至少可以得到三个推论。一是对称性在物理学中十分重要。我们所说的对称性是指存在从不同的视角，但从不同的视角看来，系统都是一样的。稍微夸张的说，物理学是一门研究对称性的学问。第一次说明这一思想的深刻的人可能是牛顿，他可能问过自己这样一个问题：如果我手中的物质和天上的物质遵循着相同的规律会怎么样？也就是说，如果空间和物质都是均匀且各向同性的话会怎么样？

第二个推论是，即使物质的总状态是对称的，其内部结构也未必是对称的。即使没有任何“状态”具有这样的三棱锥构型，我觉得你可以挑战一下从量子力学的基本规律出发而不借助非对称的三棱锥构型，预测氮分子的反转以及它的一些可观测到的性质。有趣的是，直到几十年前（2），核物理学家才放弃了把原子核当成无特征的对称小球的观念，并意识到虽然原子核没有磁偶极矩，但它可以是足球状或板状的。这可以通过核物理研究的反应和激光光谱观测验证，尽管它比氮的反转更难直接证明。在我看来，无论这是否称得上本质性研究，它在本质上和那些被称为本质性研究一样基础。但它并不需要关于基本定律的新知识，也很难从那些定律中综合推导出来；不可否认的是，这只是一种灵感，基于日常直觉，突然将一切融合起来。

很难推导出来的基本原因对我们进一步思考很重要。如果原子核足够小，就没有办法能真正严格定义它的形状：三个、四个或十个相互旋转的粒子并不能定义出一个旋转的“平板”或“足球”。只有将原子核当作一个多体系统——也就是通常所说的 $N \rightarrow \infty$ 极限时——这种行为才是可以严格定义的。我们告诉自己：具有这种形状的宏观物体会这样或那样的旋转和震荡的激发光谱，其完全不同于无特征系统的激发光谱。当我们看到这样一个即使不那么分立、完美的光谱时，我们也会认识到毕竟原子核不是宏观的；它只是接近宏观行为。要组合出这样的行为，我们必须做两件不可能完成的事情——仅利用基本定律和计算机，解决无限多体问题，然后将结果应用到有限系统。

第三个推论是，一个非常大的系统的状态并不具有其遵守的定理所具有的对称性。实际上，大尺度系统往往对称程度更低。一个很明显的例子就是晶体：在原子和空间的基底上，按照完美符合空间各项同性的规律生长，得到的晶体却突然表现出一种全新而美丽的对称性。然而，即使是晶体，通常也是大系统的对称性低于底层结构：即尽管晶体是对称的，但其对称性低于各项同性。

也许就晶体举例会引起误解。晶体的规则性质在19世纪中期就可以半经验的推导出来，而不需要任何复杂的推理。但有时，正如超导现象中，新的对称性——由于原来的对称性不再明显，而被称为对称性破缺——可能是一种完全出乎意料类型，并且极难想象。物理学家从掌握解释超导现象的所有基本规律到真正实现超导就用了三十年。

超导现象是最著名的普通宏观物体发生对称性破缺的例子，但它当然不是唯一一个。反铁磁体、铁电材料、液晶以及许多其他物态遵循某种相当普遍的规则和原理，一些多体理论学家将这些规则和原理统称为“对称性破缺”。我接下来不会进一步讨论这些历史，而是在本文末尾提供一份参考书目（3）。

理解物体经过数学上尖锐、奇异的“相变”的基本思想在大系统所谓 $N \rightarrow \infty$ 的极限（像我们自己一样的宏观尺度），对于说明其中某种意义上违反的微观对称性甚至微观运动方程的现象，是方便且必要的。对称性只留下了某些特征行为，例如，长波震动，我们熟悉的例子就是声波；或者是超导体的宏观传导现象；或者是一个深刻的类比，晶体留下了大多数固体物质都有的刚性。当然，实际上系统并不存真正违背时间和空间的对称性，与违背相反，因为能量原因系统更倾向于固定其中的某些部分，对称性只允许系统作为整体对外力做出反应。

这样就产生了“刚性”，这也是对超导和超流的恰当解释，尽管它们有显然的流体行为。[对于前者，London很早就注意到了这一点（4）。]实际上，对于木星或者银河系中心某个氢云中的一个假想的气态而聪明的居民来说，普通晶体的性质可能比超流氢的性质更令人困惑和费解。

我并不是想让大家觉得一切问题都解决了。例如，我认为玻璃和其他非晶相的机理问题依然有趣，这可能揭示出更为复杂的行为类型。不过我们目前至少能从原理上理解对称性破缺在宏观惰性材料中的作用了。在这个例子中，我们可以看出来整体是如何大于部分之和并产生与部分之和的不同特性。

按逻辑推进的下一个问题是，是否能够彻底破坏时间和空间上的基本对称性，以及破坏后是否有和类似与凝聚成对称性低的“简单”相变有本质区别的新现象产生。

我们不讨论液体、气体和玻璃等显然不对称的情况。（从任何意义上，它们都更对称。）我觉得下一步应该考虑的是有规律但包含信息的系统。也就是说，它在空间上有某种意义的规律，使它能被“读取”，但它包含的元素在不同“单元”之间是可以变化的。一个显著的例子就是DNA；在日常生活中，一行字或一部电影都具有相同的结构。这种“承载信息的结晶”似乎对生命至关重要。生命的发展是否需要进一步的对称性破缺，目前尚不清楚。

进一步对生物出现的对称性破缺进行分类，我发现至少有一种内在现象是可以识别的，并且普遍或常见，那就是时间有序性（规律性或周期性）。许多关于生命过程的理论揭示了时间的规律性脉动的重要作用：发育理论，生长和生长极限理论以及记忆理论。时间规律性在生命体中非常常见。它至少有两种作用。首先，大多数从环境中获取能量以建立持续、准稳定的方法都涉及涉及时间周期性机制，生命过程也是如振荡器和发生器相同的方式工作。其次，与空间规律性能承载信息一样，时间规律性能用来处理信息的手段。人们的口头语言就是一个例子，值得注意的是，所有计算机都使用时间脉冲。上述理论还暗示了第三个可能的作用：利用时间脉冲的相位关系来处理信息，控制细胞和生物体的生长和发育（5）。

从某种意义上，结构——目的论意义上的功能结构，而不仅仅是晶体形状——也必须被看作是对称性破缺中的一个处在晶体和信息弦之间的中间层次。

在这个猜想上进一步猜想，我想说，下一阶段可能是分级或功能分化或者二者兼有。有时我们不得不停止称其为对称性降低，而是称其为复杂性增加。因此，我们沿着科学得层析向上分析时，每个阶段的复杂性也在不断增加。我们希望能在每个阶段都遇到令人着迷的，我愿称之为是非常基础的问题，即如何将不太复杂的部分组成更为复杂的系统，并理解可能会出现的新基本行为种类。

可能说把多体理论最简单的情形中的复杂性，化学中的复杂性，真正复杂的文化和生物中的复杂性之间简单的类比并不会有什么用，或者只能说，一般情况下，从思想上，系统与其部分的关系是单向的。部分综合成为系统是不可能的；另一方面，分析不仅可能，而且会在各个方面取得丰硕成果：例如，如果不理解超导现象中的broken对称性，Josephson可能就不会有自己的发现的效应[Josephson效应的另一个名称是“宏观量子干涉现象”：在超导体中的电子宏观波函数或超流氦中氦原子的宏观波函数可以观测到干涉效应。这些效应已经极大提升了电磁测量的精确度，并有望在未来计算机和其他可能的领域中发挥巨大的作用，因此从长远来看，它们可能会十年内发挥巨大作用（6）。]再比如，生物学已经从原来的遗传学到生物化学，生物物理学，已经展现出了全新的面貌，这也将长生难以言喻的影响。因此，并不是像最近的一篇文章（7）所说的那样，我们应该只“开垦自己的山谷，而不要试图在各个学科之间...的山脉上开辟道路”。相反，我们应该认识到这些道路尽管是我们自己学科领域中的捷径，但在另一门学科的视角里是看不到的。

我们现在已经摆脱了粒子物理学家的傲慢以及他们的本质性研究（正电子的发现者曾说“剩下的都是化学了”），但是我们还没有摆脱分子生物学家的傲慢，他们似乎想要把一切人类有机体，包括从普通感冒和所有心理疾病到宗教信仰，全都还原到“只剩”化学的程度。人类伦理学与DNA之间的递进层次肯定要比DNA与量子电动力学之间的层次要多，而每一个层次都需要一个全新的概念框架。

最后，我想讲两个经济学的例子说明我想要说的。马克思说过量变会引起质变，不过一个发生在十九世纪二十年代的一段对话可能更清楚一些，大致内容是：

Fitzgerald: 富人和我们是不同的。

Hemingway: 是的，他们有更多钱。

参考文献

1. V. F. Weisskopf, in *Brookhaven Nat. Lab. Publ.* 888T360 (1965). Also see *Nuovo Cimento Suppl. Ser 1* **4**, 465 (1966); *Phys. Today* **20** (NO. 5), 23 (1967).
2. A. Bohr and B. R. Mottelson, *Kgl. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.* **27**, 16 (1953).
3. Broken symmetry and phase transitions: L. D. Landau, *Phys. Z. Sowjetunion* **11**, 26, 542 (1937). Broken symmetry and collective motion general: J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg, *Phys. Rev.* **127**, 965 (1962); P. W. Anderson, *Concepts in Solids* (Benjamin, New York, 1963), PP. 175-182; B. D. Josephson, thesis, Trinity College, Cambridge University (1962). Special cases: antiferromagnetism, P. W. Anderson, *Phys. Rev.* **86**, 694 (1952); superconductivity, —, *ibid.* **110**, 827 (1958); *ibid.* **112**, 1900 (1958); Y. Nambu, *ibid.* **117**, 648 (1960).
4. F. London, *Superfluids* (Wiley, New York, 1950), vol. **1**.
5. M. H. Cohen, *J. Theor. Biol.* **31**, 101 (1971).
6. J. Clarke, *Amer. J. Phys.* **38**, 1075 (1969); P. W. Anderson, *Phys. Today* **23** (No. 11), 23 (1970).
7. A. B. Pippard, *Reconciling Physics with Reality* (Cambridge Univ. Press, London, 1972).