

物理学这棵老树绽放的一朵新花： 实验室真人统计物理学

黄吉平

(复旦大学物理系 200433)

一、物理：从“物质之理”到“事物之理”的蜕变

简单言之，“物理”二字的意思就是“物质之理”。不言自明，这里的“物质”是指自然界中无智能的“物”，例如原子、电子等。这里所说的“无智能”主要指，这些物质没有学习能力、对外界环境没有适应性，举个例子：若有两个原子，沿着同一轨道相向而行，它们必然相撞；今天撞了，如果明天再遇到同样的情况，这两个原子仍旧会相撞。为什么？因为这些原子没有学习能力，它们“不长记性”、“记不住”已经发生的事情，所以，下次再相遇时，该发生什么还发生什么，换言之，因为它们没有学习能力，所以，它们对外界环境也就没有适应性。事实上，也正因为“物理”关心的是无智能的物质系统，所以，它们可以用简单的物理原理来描述、理解、预测，例如牛顿第二定律、万有引力定律等。在这些原理中，人们不必额外引入描述学习能力和适应性的物理量，可能也正因此，物质世界在物理学家的眼中是简单的，物理学家总喜欢用一些简单的物理原理解释和预言我们所在的这个物质世界。例如，理论物理学家们正在刻苦攻关的大统一理论正是这样的一个理想的、“简单”的理论，期望它能解释宇宙中各种自然力之间的关系。

可喜的是，物质世界的范围，小到原子、电子甚至更小，大到星球、银河系乃至宇宙，都是“物理学”的研究范畴。然而，介于最小与最大之间的万物之灵——人，似乎一直游离在物理学家的视线之外。为什么呢？其中一个很重要的原因就是，“人”有学习能力和适应性，这点使得研究“人”与研究传统物质世界的方法或手段迥然不同。为此，诞生了很多社会科学，例如经济学、金融学、社会学、政治学等。这些学科的设立主要就是用于研究“人”。针对这种状况，若从“善意”的角度看，可以说这些社会科学与“物理学”形成了一个很好的互补的关系，因为社

会科学主要关注“人”，而“物理学”主要关注“非人”（此处特指“人”之外的无智能的物质世界）。但是，若从“恶意”的角度看，是不是也可以说已有物理学的研究方法和手段对“人”不适用呢？然而，无数物理学的成果已经显著改善了人类今天的生活，例如：电的普遍使用，不得不归功于法拉第的电磁感应定律；计算机（含平板电脑、智能手机等）的使用，不得不归功于量子力学的功效；等等。鉴此，有什么充足的理由可以下结论说“已有物理学的研究方法和手段对‘人’不适用”呢？没有，肯定没有！既然没有，物理学家是不是可以对“人”做一些研究呢？一来可以填补空白，二来可以使得传统物理对“人”更有用。

果真如此，“物理”理当从“物质之理”蜕变为“事物之理”。这里，“事物”，“事”加“物”也：“事”指“人事”，与“人”相关；“物”指“物质”，即前面提及的“物质世界”。

无疑，这个蜕变有点让人激动。但是，为了不读者觉得我是在这里“忽悠”大家，我很有必要给出具体的方法和例子。好的，继续下去，究竟物理学家是如何让“物理”从“物质之理”蜕变为“事物之理”的呢？事实上，已被广泛用于理解物质世界的“统计物理学”就可以助物理学家们一臂之力。

二、统计物理学：处理无智能物质系统中 多体问题的一把利剑

当牛顿力学在处理单体（或少体）问题如鱼得水、成效显著时，物理学家（例如玻耳兹曼等）已经意识到，牛顿力学在处理多体问题时，有点力不从心。例如：一杯水，含有大量的原子、分子，基于牛顿力学并不能给出每个分子、原子的运动方程，以把水分子的微观运动与宏观的热学性质（如温度）关联起来。是的，牛顿力学不能，当然不能！但，统计力学，能！统计力学与牛顿力学同属于物理学里面俗称的“四大

统计物理与复杂系统研究前沿进展专题

力学”，它们的分工不同：统计力学处理的是多体问题，而牛顿力学处理的是单体或少体问题。这里提及的“统计力学”更文雅一点就叫法就是“统计物理学”，它的鼻祖是玻耳兹曼。

大体而言，统计物理学是采用概率论的方法，把微观机制与宏观现象联系起来的一门学科。这里可以看出，概率论的方法取代了牛顿力学中的“确定论”，这就使得人们可以从统计层面很好地给出众多宏观现象的微观机制，例如：有两杯水，第一杯水的温度是30摄氏度，第二杯水是40摄氏度，它们的微观世界有什么不同呢？统计物理学告诉我们，第一杯水里面水分子的平均动能比第二杯水的小。那这个解释有什么用呢？太有用了。从这个解释可以知道，物体的宏观温度是由微观分子的平均动能决定的，那么，反过来说，只要让分子动起来也就可以给物体升温了，于是微波炉诞生了：微波炉发射的微波能够驱使牛奶内水分子运动的速率增大，从而增加水分子的平均动能，其结果是，牛奶变热了，可以喝了——这是我们大家现在都知道的生活常识。从这里看，你说统计物理学有没有用？太有用了！从这里也可以看出，这时探讨单个水分子的动能，并不是太有实际意义的事情——而这却是牛顿力学的强项。由此也可以看出，处理单体问题，例如火箭上天，基于牛顿力学，恰如其分；统计大量水分子的热运动，基于统计物理学，也是恰到好处。牛顿力学与统计物理学，它们不能、也没必要取代对方，它们之间是很好的互补关系。

说到这里，可能有读者急了：“你说的这些我们都知道，快快告诉我如何用统计物理学去研究‘人’吧。”好的，继续下去。

三、实验室真人统计物理学：把“统计物理学”

从无智能物质系统推广到有智能人类系统

从上文的介绍可以知道，在统计物理学中，人们并不关心个体（例如单个水分子）的运动，换言之，个体究竟如何运动，对系统整体的宏观统计物理性质并无影响。当然，这个“并无影响”是有前提的，这个前提就是针对所有个体的概率描述必须可靠。这也是统计物理学中为什么要用到麦克斯韦-玻耳兹曼分布的原因，它是描述微观个体概率分布的一个表达式，太重要了。

上文已经说过，“人”有物质粒子不具有的两个特性，一是学习能力，二是（对环境的）适应性。若有两个人，在同一条路上，相向而行，如果他们对这个世界一无所知，它们必然相撞，但是，相撞后，两人都感觉不爽，不爽就对了，他们也就记住了（看，学习能力体现出来了！），下次两人再次走到同一条路上，再次相向而行时，他们就会避开对方，也就不会再次相撞了。也就是说，尽管外在环境一样，但是，不会再相撞了。为什么呢？是因为他们已经通过学习（学习能力），适应了环境（适应性）。

既然统计物理学对微观个体的运动行为并不“关心”，那么，依此类推，这个做法在研究“人”时，应该同样有价值！也就是说，我们可以只从概率角度描述“人”的行为，而不涉及单个人的特定行为，从而得到“人”这个系统整体的宏观统计物理性质或现象。这个路子与统计物理学不是如出一辙吗？统计物理学历史已经证明这个路子行之有效，现在若把这个路子推广一下，用来处理“人”，应该也有用。这就是一些物理学家的思考逻辑，不严密，但务实。

事实上，从20世纪90年代中期以来，统计物理学家们已经系统开展了相关研究。

但是，统计物理学家们已经系统开展的相关研究多是对与人类行为有关的金融数据的统计物理分析，例如分析股票市场大盘指数演变过程中出现的标度律，等等。这样的研究有点类似物理学家研究的热学现象，研究的是宏观现象本身，并不涉及微观机制——而揭示微观机制才是统计物理学的用武之地。

其实，物理学在发展之初，人们也是先从身边的数据，开始观察、研究的。例如：亚里士多德看到海平面不平，听到从希腊最南面回来的人描述的太阳高度与从最北面回来的人描述的太阳高度不一样，等等，他得出大地是球形的结论。

这说明，通过对身边已有数据的观察，归纳总结出有用的结论，这个方法（即实证分析）是每个新学科开始时必须经历的阶段。因为人们只能从熟悉的对象开始研究，然后，才及其余。物理学家对金融数据已有的统计分析正处于实证分析阶段。

然而，熟悉物理学的人都知道，物理学在实证分析阶段产生过很多辉煌的成果，例如开普勒的行星运

动定律就是实证分析的结果。但是实证分析的一个缺陷是，它通常不能揭示参数之间的因果关系，而只能揭示相关关系。例如，上面说到亚里士多德看到海平面不平，而得到大地是球形的结论，这里“不平的海平面”与“大地是球形”之间并没有明确的因果关系，只有相关关系，即我们不能说因为“海平面不平”所以“大地是球形的”，也不能说因为“大地是球形的”所以“海平面不平”。这两者之间有相关性，没有因果性，或者确切地说，因果性不显著。

另一方面，实证分析因为观察对象的不可控性，很容易得到错误的结论，例如亚里士多德站在家门口朝天看，发现太阳和星星都是围绕地球转的（基于自然现象的实证分析），得出结论“地球是宇宙的中心”——我们今天都知道，这个结论是错误的，宇宙没有明确的中心。那么，为什么他的这个结论是错误的呢？是他不够聪明吗？绝对不是。主要是因为实证分析的研究对象具有不可控性，或者说，做实证分析的研究者通常只能被动地去分析研究对象。亦即，“实

证分析”犹如用肉眼观察水中的一枝笔，观察的结论是“笔是弯的”（图1（a）），然而，实际上，笔是直的（图1（b））。从这里可以看出，实证分析因为不可控，而导致其结论具有不可靠性。

但是，这里我就不从实证分析的不可靠性继续阐述出去了，姑且仍旧从实证分析结论中蕴涵的相关性出发。我们都知道，与相关性相比，因果性是人们对事物的更深层次的认识。物理学在经历实证分析阶段之后，伽利略开始做可控实验，即控制变量的实验，于是，因果关系也开始能被揭示出来了。换言之，在物理学家眼中，可控实验是揭示因果关系的一个行之有效的途径。但是，由于可控实验本身的局限，例如限制于具体地点（实验室）、由特定的人操作（例如伽利略），这就面临另一个问题，可控实验揭示出来的因果关系具有特殊性，它对特定人在特定地点的实验适用。换个人、换个地点重做实验还适用吗？不知道——因为实验没做，结论就不能随便下。但是，人类的精力和资源有限，伽利略不可能在意大利做完了自由落体实验后，打飞的，跑遍全世界重复做自由落体实验。于是一个关键的问题也就浮现出来了：基于可控实验获得的因果关系常常具有特殊性。如何打破这样的特殊性，使之具有普适性呢？超级大牛牛顿应运而生，他提出用理论分析来解决这个问题。他的理论分析是基于微积分来完成的。他的步骤是这样的：先基于实证分析和可控实验，构建理论模型，然后，调节模型参数，以比较模型结果和可控实验结果。这样做了后，可控实验揭示出来的因果关系在理论模型中也就能够出现了。由于理论模型本身是普适的（或，确切地说，比可控实验适用范围更广），那么，经过论证的这个因果关系也自然是普适的了。至此，可能有人会立即反驳，从逻辑上看，理论模型给出与可控实验一致的结论，并不能严格证明理论模型给出的结果就是真正普适的。事实也是如此。那么如何解决这个逻辑矛盾呢？很简单。在把理论模型结果用于描述、解释已有的实验数据后，人们可以通过调节模型参数，让它预测未来或未知。而这些预测的结果如果被后来的实验证实了，不正从结果上反过来论证了起初理论模型的可靠性吗？这是物理学家在研究物质世界的过



图1 (a) 在水中的一枝笔；(b) 同样的一枝笔，但没有水。
(a) 图：笔看起来是弯的；(b) 图：笔看起来是直的。可见，单
单通过观察（实证分析）获得的结论，具有被动性和不可靠性。

统计物理与复杂系统研究前沿进展专题

程中总结出来的一个行之有效的办法。

至此，可以总结物理学家研究物质世界的方法论了：

首先，针对身边的“数据”，开展实证分析，揭示相关性（实证分析的“相关性”），然后，开展可控实验，揭示因果性（可控实验的“因果性”），再后，发展理论模型，进行理论分析，以便解释已有的实证分析结果和可控实验结果，并对未来或未知进行预言（理论分析的“普适性”）。

这个方法论很有用。例如：开普勒总结了行星运动定律（实证分析），然后，伽利略做可控实验得到自由落体定律（可控实验），再后，牛顿的理论分析给出了牛顿第二定律和万有引力定律（理论分析），其结果是火箭带着卫星上天了，于是，我们今天在家里可以观看卫星转播的江苏卫视的节目“非诚勿扰”，我们手机上装的卫星导航系统使得我们在野外转悠时再也不会迷路了……厉害吧，物理学的这个方法论太厉害了。

其实，这个方法论也正是“实验室真人统计物理学”的方法论。即先针对实际生活中人类产生的各种数据，例如股票市场数据、网络交友数据，开展实证分析，得到初步结果，这些结果具有相关性，然后，在实验室中，开展可控真人实验（图2），揭示变量与系统性质之间的因果关系，并继而开展理论分析（代理人建模、模拟），验证实验结果，并预言新结果。例如，200多年前，经济学家斯密根据市场数据，归纳总结出“市场中存在看不见的手”的结论（实证分析），2009年有研究人员（*PNAS* 106, 8423 (2009)）设计了资源分配市场，开展可控真人实验，验证了这个结论，并同时开展了理论分析，揭示了其中的机制，使得这个结论具有普适性——这里“普适性”的意义是指，只要涉及资源分配的系统（而非限于金融市场本身），这只“看不见的手”就起作用，例如学生选课、司机选择行车路线，等等。在这些研究的过程中，一些新的相变现象也被陆续揭示出来。

“实验室真人统计物理学”这个新方向有时也叫做“实验经济物理学”或“实验金融物理学”，这是因为人的行为通常与经济或金融活动有关，“实验经



图2 计算机辅助的真人可控实验现场。所有电脑通过局域网相联，实验组织者通过电脑提示被试如何操作，并通过电脑在线收集、实时计算每轮实验数据。（照片摄于2013年9月27日）

济物理学”或“实验金融物理学”的叫法方便与经济学家或金融学家的沟通。从这里也可以看出，现在把这个新方向命名为“实验室真人统计物理学”的用意在于方便与物理学家的沟通，并特别凸显“可控真人实验”在其中起的关键作用，这在一个研究方向的诞生之初，这样的命名可能是比较合适的，因为这样可以使得同行更多地关注其中的关键部分——“可控真人实验”。

至此，值得一提的是，近期德国斯普林格（Springer）出版了“实验室真人统计物理学”这个领域的第一本英文专著，即 *Experimental Econophysics: Properties and Mechanisms of Laboratory Markets*，该专著系统总结了该领域的相关进展和研究范式；同时，物理学期刊 *Physics Reports* 亦已于2015年刊登此领域的第一篇综述论文。

四、结束语：不是“结束”，这是“开始”

与一个新方向一起成长是年轻人在科学殿堂取得成功的一个捷径，实验室真人统计物理学正是这样的一个新方向，它正在成长，他需要更多的年轻人加盟，它是传统物理学这棵老树新开的一朵花：它把传统物理学的研究对象从“无智能的物质系统”推广到“有智能的人类系统”。

这里需要指出的是，若以任何未知的应用价值来抬高或贬低这个方向，都是不明智的。这正如一个婴儿，未来是做工人、警察还是科学家，皆是未知数，当前唯有踏踏实实地做好抚育工作，才是务实之道、明智之举。