实验工作中的理性思维

黄 祖 洽*

引 言

实验是物理科学的基础. 实验工作对于物理学的发展是至关重要的. 但从实验课题的提出，方案的制订到具体实验的设计，以及对实验结果的分析，都离不开理性思维，也就是离不开从理论角度进行考虑. 正如爱因斯坦所强调："是理论决定着观察什么". 因此，一个好的实验工作者固然应当熟练掌握有关的实验技术，但尤其要具有清晰的物理概念并能够进行透澈的理性思维.

随着现代实验设备的大型化和自动化，计算机的应用和计算技术的发展在实验工作中也起着越来越重要的作用. 实验条件的精确规定，实验数据的快速获取和自动处理，都依赖于计算机和相应计算程序的帮助. 许多情况下，计算机上的模拟计算可以部分代替昂贵的真实实验，或在实际不可能进行实验时给出可能的结果.

实际上，实验、理论、计算这三者已成为物理学的三大支柱，它们彼此间存在着相互依存和相互促进的关系，如下图所示意：

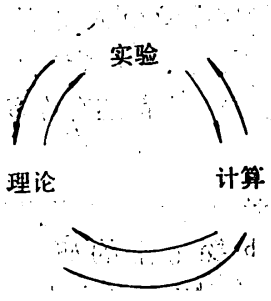


图 1

由于实验的目的在于发现新的自然现象和揭示现象发生的规律性，所以下面我们将讨论自然现象间的因果关系、等价关系和对称性等基本问题.

因 果 关 系

日常生活中有许多因果关系，如：音乐会后听众鼓掌，发出一片掌声. 可以把鼓掌看成原因，掌声看成结果. 迷信的因果关系宣称今生遭遇的"果"都来自前世的"因". 还有一种绝对化的因果关系把所有的事件都看成与所考虑的事件相关. 例如，认为远的银河系的织女星或更远的超新星大爆炸对我们实验室中所进行的离子注入实验也有影响.

在科学的因果关系中，首先要明确规定可以单独加以考虑的系统 S. 设 A 及 B 为其中的二子系：

$$[S]=\{A,B,\cdots\cdots\}.$$

整个系统 S 的任意一状态均确定子系 A 及 B 的相应状态，如下表：

整个系统状态 S	决定子系状态	
	A	B
a	h	p
b	i	p
c	h	q
d	j	r
e	j	s
⋮	⋮	⋮

A、B 间的因果关系建立在它们状态（由 S 的状态所决定）空间之间的相关上.

如果 A 的同样状态总伴着 B 的同样状态（但 A 的不同状态也可能伴有 B 的同样状态），如：

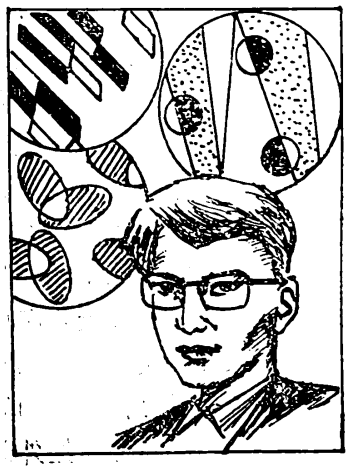
S	A	B
a	h	p
b	i	q
c	j	r
d	i	q
e	l	r
f	m	q
⋮	⋮	⋮

那么，我们就说 A 为因，B 为果. 而如果 B 的同样状态也总伴有 A 的同样状态，如：

S	A	B
a	h	p
b	i	q
c	j	r
d	k	s
e	h	p
f	l	s
⋮	⋮	⋮

则 A、B 互为因果.

如了解此相关所隐含的机理则可用"导至"、"产生"来表述这一关系，但即使不明机理，A、B 状态间的相关经验事实仍说明因果关系的存在.



当发现具有因果关系的二系统时，为了了解这一关系，就要找一以这二系统为子系统的系统 S，它可以看成是孤立的，也就是说，我们可以把 S 从整个世界中抽出来加以研究. 例如，研究物体运动时，我们的系统 S 包含该物体及其所受到的各种作用力和它的运动. 以一杯水为例，它的加速度是 0，作用在它上面可能

* 北京师范大学低能核物理所教授，学部委员.

有各种力，如：重力、桌子反作用力、外加力、磨擦力等等．只要这些力的总和是0，加速度就为0．在力的子系和加速度子系之间有一个因果关系．由于相同的加速度不能说是一定由同样一些力作用所引起，(不同的一些力可以产生同样的加速度)．所以这例子中，力的子系为因，加速度的子系为果．在上面音乐厅的例子中系统 S 包括有音乐厅、听众、演员、听众的行动(鼓掌或否)、厅内的声音(有掌声或否)等，听众的行动与厅内的声音这二子系之间可认为有互为因果的关系．

又例如，在离子注入实验中，"因"和"果"子系可分别如下规定：

因：离子注入系统、靶室、样品、将是靶特定离子束(种类、能量、剂量、剂量率)

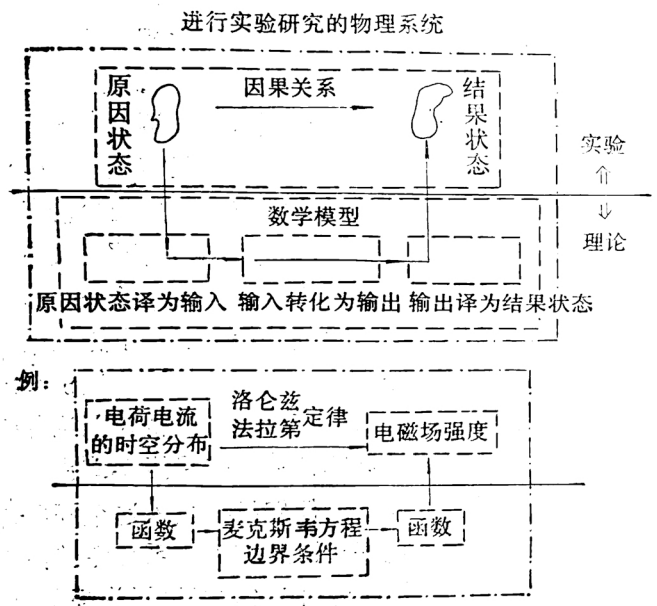


图 2

果：靶中的杂质及缺陷分布

实验发现了因果关系后必需经过下图所示的"加工"，才能了解有关的机制：

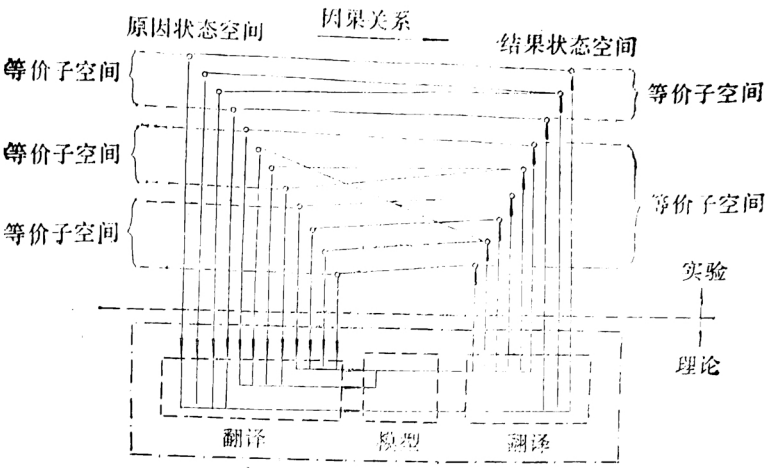


图 3

等价关系和等价原理

在一个物理系统的理论描述中，在对由原因状态到输入和由输出到结果状态的翻译中，一定有状态的某些方面被忽略掉．因此译成同样输入的不只一个状态，而输出的信息也不足以唯一确定结果状态．这就在原因和结果子系的状态空间中引进了一种等价关系：当二状态译成同样输入(或由同样输出译成)时，它们被称为等价因(果)态．

例如：在特殊相对论中，所有只差一空间或时间位移或只差一 Lorentz 变换的状态都是等价的．

从图中看到原因有三个子空间而结果有二个等价子空间．

如果因果状态中没有等价性就谈不上科学的客观性．等价原理(科学存在的必要条件)：等价"因"态一定导至等价"果"态．这个原理很重要．在实验中光得到偶然的结果不够，要把等价的原因和等价的结果都找出来，才能作出科学的结论．

等价原理带来两个可以称为科学基石的特性：可重复性和可预见性．

1）可重复性：在同样(等价)条件下（但人、地、时不同）重复一实验并得出同样(等价)结果的可能性→客观性．(使科学成为人类共同的不朽的事业)

2）可预见性：这是科学的另一基石．预见尚未进行的实验会给出什么结果的可能性．(理论的作用)

人类的智力足以了解自然和认识自然规律（理论)，使预见未观察到的现象成为可能．光有可重复性没有可预见性不成其为科学．它只使实验观测结果的记录、编目、分类成为共有的资料，而没有超过资料积累的好处．只有在所收集的事实中发现规律，并据此预见新实验的结果，科学才开始成为可能．

可重复性和可预见性来源于我们对自然界存在因果关系的认识，某一科学理论则为因果关系的表达：

实验→理论→新实验→验证或改进理论→…

对称性和对称原理

由等价关系定义的对称群包含所有维持等价关系不变的对称变换．

∵ "因"等价→"果"等价

∴ "因"对称群的元素必然也是"果"对称群的元素，即："因"对称群⊂"果"对称群．这就是对称原理．结果至少和原因同样对称，当然可能有结果的对称变换不是原因的对称变换．

对称原理的应用：给定结果对称性的下界．如果已知原因，就可求出其对称性，于是结果至少具有此对称性．例：给出：球对称的电荷分布＋试验电荷(因)求：试验电荷的加速方向(果)

原因对称群包含所有绕通过球心及试验电荷的轴线的转动．结果(加速度)至少也具有这个对称性→加速度必沿轴线方向．

对称原理往往能帮助我们通过简单的对称性考虑作出合理的实验安排和判断实验结果中是否包含了意外的因素或实验过程中是否出现了某种错误．