

牛顿与引力物理

方励之

(中国科学院北京天文台)

牛顿是引力物理的奠基人。他的《自然哲学和宇宙体系的数学原理》以下简称《原理》一书是引力物理学的第一部经典著作。当然，今天的引力物理学已经超越了牛顿的《原理》。然而，也许正是在它被超越之后，我们才更容易看清楚它的巨大价值。

的确，比之一般性的进展，一项划时代的贡献的意义，往往要等更长的时日才能得到正确的理解和评价。譬如，整整一百年前，也就是《原理》已经发表了二百年的时候，仍然有哲学家认为：能够给与牛顿万有引力理论的“最好评价就是，它没有说明，而是描画出行星运动的现状”，并且认为：所谓“万有”引力是“夸张”的命名。这种评价显然在当时就是错误的。不过，回顾一下这类评价，还是有益的。它使我们更直接地看到，一些今天习以为常的观念，其实是由于牛顿的首创并由于后继的引力物理学的发展，才赢得公认的。

第一个这种“习以为常”的观念，就是曾被视为“夸张”的“万有性”或“普适性”。

牛顿《原理》所阐述的，远不只是“行星运动”，而是自然界的一种极为普遍的性质：任何物体都参与引力相互作用。

牛顿意识到引力的万有性，是在1684年底。该年11月，在《原理》的前身《论运动》的初稿中，牛顿还只考虑太阳对行星的引力，并没有考虑任何其他物体的引力。即认为，只有太阳有引力，其他物体是没有的。依照这种理论，行星绕太阳的轨道应当是严格的椭圆。随后，牛顿很快注意到，行星实际上并不严格作椭圆运动，而是“任何一颗行星的轨道依赖于其他所有行星的合成运动”。对这个结果，如果仅认为太

阳才有引力，是无法解释的。所以，在1684年12月《论运动》的修改稿中，牛顿开始提到，只有计及“行星彼此之间的作用”，才能说明行星运动。这意味着，引力不再仅是太阳的属性，同样也是行星的属行。到1685年，牛顿更进一步地写到：“依此定律，一切物体必定互相吸引”。这就是万有引力了。

牛顿在《原理》第三编中总结了他在研究自然界时所遵循的几条法则，其中第1, 2条就是有关“万有性”或“普适性”的：

法则1：除那些真实而已足够说明其现象者外，不必去寻求自然界事物的其他原因。

法则2：所以，对于自然界中同一类结果，必须尽可能归之于同一种原因。

以上两条法则，实质上可以概括为：普适即本质。所谓追求自然界事物的本质或原因，就是追求普适性。找到越普适的相互作用规律，就是找到了越深入的物理世界的本质。

虽然牛顿力学已经有三百年的历史了，但今天的物理学仍然同《原理》一样，把普适性作为最基本的物理追求之一。普适性成了一种有效的判据：凡与普适性要求不相适应的地方，都是物理研究的焦点。今天的引力物理研究正是围绕着这些焦点。

二十世纪引力物理研究的焦点，主要是由引力论、相对论、量子论三者的普适性决定的。这三者的普适性如下：

1. 引力论，任何物体都参与引力相互作用，标志它的普适常数是万有引力常数 G ；
2. 相对论，任何运动规律都是相对论性不变的，标志它的普适常数是光速 c ；

3. 量子论, 任何运动形态都遵从量子化要求, 标志它的普适常数是普朗克常数 \hbar .

这三个普适论断的地位和意义, 首先可以从单位系的选取来看. 在物理学中, 有三个最基本的概念, 即长度、时间、质量. 度量时间、长度、质量三者的单位, 是各种单位系的基础, 例如秒-米-公斤单位系, 秒-厘米-克单位系等等. 从物理角度看, 这些单位选取并无物理理由, 而是习惯的或人为的. 一种具有物理根据的单位系是:

$$\begin{aligned} \text{时间单位} \quad \left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2} &= 5.3908 \\ &\times 10^{-44}, \text{秒 (s);} \\ \text{长度单位} \quad \left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2} &= 1.6161 \\ &\times 10^{-33}, \text{厘米 (cm);} \\ \text{质量单位} \quad \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{1/2} &= 2.1766 \\ &\times 10^{-5}, \text{克 (g).} \end{aligned}$$

这个单位系, 称为自然单位, 它用三个物理常数 G , c 和 \hbar 作为标准, 代替人为选择的度量标准. 由于 G , \hbar 二常数的测量精度还不够高, 目前还不能在实用上选择自然单位系. 1983 年决定用常数 c 代替原用的长度标准, 作为单位系的一个基本量. 可见, 的确是在向使用自然单位系方向发展. 我们要强调的是, 自然单位, 这种具有极好的普适性的单位系之所以存在, 其根据就是引力论、相对论、量子论.

如果分别用 G , S , Q 分别表示引力论、相对论和量子论, 那么今天的引力物理可以用图

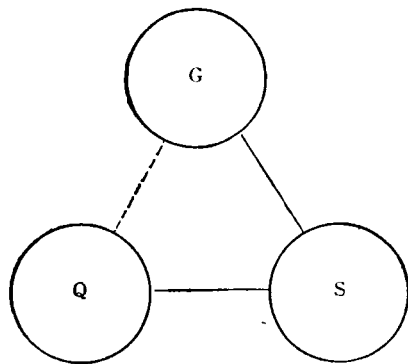


图 1 引力论、相对论、量子论之间的相容

1 来概括. 图 1 的含义是, 三个普适论断要真正具有普适性, 还必须三者之间能相容.

引力论与相对论之间的相容, 在 1916 年由爱因斯坦完成了, 即广义相对论的建立. 因此, 图 1 中 G 与 S 之间已用实线相连.

完成相对论与量子论之间的相容, 则晚得多. 早在量子力学发展初期人们就注意到, 量子论普适性要求相对论性场(如电磁场)也应当是量子化的. 然而, 场的量子化导致一系列发散, 成为长期困扰物理学的发散困难. 直到四十年代末, 重整化理论的发展才解决了量子化电磁场中的发散困难. 六十年代, 弱电统一理论的建立, 使弱相互作用中的发散困难也得到解决. 目前, 虽然强相互作用理论还不十分成熟, 但一般似乎有信心地认为, 在类似于弱电相互作用的框架中, 可以解决强相互作用领域中的相对论与量子论的相容. 因此, 在图 1 中 Q 与 S 之间也可以勉强地连上实线.

最困难的问题是 G 与 Q , 即量子引力理论问题. 迄今为止, 为了建立量子引力论, 已作了不少努力, 但我们还不能有把握地说, 解决量子引力论, 是指日可待了. 当然, 使人感到似有希望的进展还是有的, 近几年来超对称、超引力、超弦等等的发展, 都是希望之所在. 因此, 在图 1 中 G 与 Q 之间只能连以虚线^[1,2].

在引力论与量子论之间的相容问题上, 困难有多大, 我们可以从以下的论证中看到一点. 首先, 引力论中有一条普遍的结论: 引力场中不同位置、不同速度的钟, 将测出不同的时间, 因此精确的时间测量必须精确地知道钟在引力场中的位置及速度. 另一方面, 量子论则断言: 原则上不可能同时精确地知道任何物体的位置及速度. 这样, 把引力论与量子论二者的普适性加在一起, 结论就是: 原则上不可能进行精确的时间测量. 定量而言, 时间测量精度不可能超过 $\left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2}$, 即不可能测量比 $\left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2}$ 小的时间间隔. 类似地, 长度测量精度也不可能超过 $\left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2}$, 即不可能测量比 $\left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2}$ 小的距离.

由物理学的方法论，一个原则上不可能直接或间接测定的物理量，在物理中是没有意义的。这就是说，在小于 $\left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2}$ 和 $\left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{1/2}$ 的范围，时间和长度概念将失去意义。由时间和长度派生出来的其他概念，也随之失效。总之，引力论与量子论二者的普适将导致时空概念本身的不普适，这就是量子引力论面对的难题之一。

牛顿引力论中的另一个重要观念，是不稳定性。有一种说法：牛顿的自然观是僵化的、不变的，牛顿引力论只能描写行星运动“现状”，而不能给出它的发展和生成过程。这种批评是不公正的。第一，牛顿曾具体描绘过星体的生成过程，第二，牛顿引力论提供了生成和发展的一个关键理论根据——引力不稳定性。

1692年，牛顿在写给本特利的几封著名信件中，第一封里就有如下的话：

“如果构成我们的太阳和行星的物质以及宇宙的全部物质都均匀分布于整个天空，每个质点对于其他一切质点来说都有其内在的引力，而且物质所分布的整个天区又是有限的，那么处于这天区外沿的物质，将由于引力作用而趋向所有处于内部的物质，结果物质都将落到整个空间范围的中央，并且在那里形成一个巨大的球状物体。但是，如果物质是均匀分布于无限的空间中的，那末它就决不会只是聚集成一个物体，而是其中有些物质会聚集成一个物体，而另一些物质则会聚集成另一个物体，以致造成无数个巨大物体，它们彼此距离很远，散布在整个无限的空间中。如果这种物质还具有发光的性质，很可能太阳和恒星就是这样形成的”。

按照现代的天体物理，太阳和恒星的确就是这样形成的。

在宇宙早期，物质分布很均匀，并无任何星体。随着宇宙膨胀，宇宙物质的温度下降，以致

均匀分布的物质成为引力不稳定的。在这种引力不稳定性机制的作用下，物质聚集成天体。引力不稳定的道理十分简单。如图 2(a)，它表示一个初始分布均匀的物质。只要在均匀分布的某局部区域由于小起伏密度变得稍高，则这个区域的引力就变得更强烈些，也就会吸引更多的物质，形成更高的密度，从而破坏均匀。相反，若某个区域里，由于起伏，密度变得稍低，则其引力变弱，就会有更多的物质逃离这个区域，形成更低的密度，也破坏了均匀。总之，引力可导致如下的演化：

均匀无结构 → 非均匀有结构

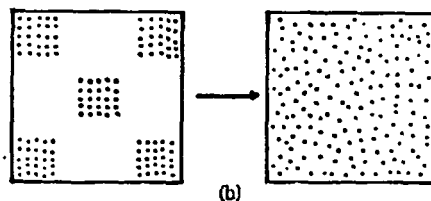
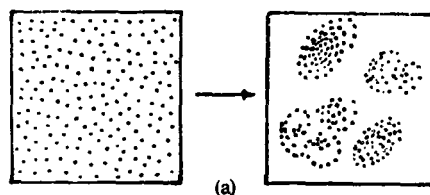


图 2 (a) 有引力时从均匀演化到非均匀；
(b) 无引力时从非均匀到均匀

上述的演化方向有些非同寻常。由分子运动论，通常的演化方向是：

非均匀有结构 → 均匀无结构

如图 2(b)，还是考虑同一范围中的物质。如果没有引力作用，那么演化方向是从非均匀到均匀，物质的扩散使密度高的地方变低，低的地方变高，达到均匀化。可见，体系的演化方向取决于引力是不是重要。

还可以从热力学角度再来考查引力的这个作用。热力学第二定律告诉我们：一个孤立的体系，若其中各部分的温度不同，则经过一段时间，温度会自动地变成相同。相反，如果温度已经处处一样，则绝不会自动地变成不一样。一个热力学体系会自动地从非热平衡演化到热平

衡,但相反的演化是不可能的。把这个结论用到整个宇宙上,结论就是宇宙各处的温度趋于相同,走向热死。这就是热死论。

热死论预言的演化方向与宇宙学的结论是相反的。热大爆炸宇宙学告诉我们,从整体上说,宇宙是从简单到复杂的。今天宇宙里存在的万事万物,原来都是没有的,都是在宇宙演化过程中形成的,都是从原初的简单均匀状态生成的。宇宙中的物质是从热平衡状态演化成非热平衡的。所以,不仅热死说,甚至整个热力学第二定律预言的演化方向似乎都与宇宙学不相容!

宇宙学的演化方向之所以不同于热死,原因也是引力。具体而言,是由于引力决定的宇宙膨胀^[3,4]。一般的热力学结论都是在静态背景空间下证明的。若空间是膨胀的,则可以证明,演化方向可以同静态空间情况完全相反。

考虑一种简单情况。在一定的空间里有两类物质,一种是相对论性的如辐射;一种是非相对论性的如静质量较大的粒子。如果两类物质的温度不一样,辐射温度不等于粒子温度 T_m ,即

$$T_r \neq T_m. \quad (1)$$

显然,按照热力学,经过一段时间之后,两种温度必定变得一样,即

$$T_r = T_m. \quad (2)$$

如果上述空间是膨胀的,结论就完全不同了。膨胀将使各类物质的温度降低,一般说,不同类型物质,其温度随膨胀而降低的方式不一样。辐射温度随膨胀降低得较慢,而非相对论性粒子较快。也就是说,随着宇宙的膨胀,辐射和粒子的温度变化方式不一样,不可能时时相同。这样,哪怕最初是热平衡的 $T_r = T_m$,由于宇宙膨胀也会有

$$T_r > T_m. \quad (3)$$

这个结果与静态背景空间的热力学正好相反,是从热平衡变成非热平衡。

有人会反驳:膨胀所产生的两类物质的温度差,并不能保持,它们将由于辐射与粒子之间的碰撞而消失,最后仍达到热平衡。的确,辐

射与粒子之间的作用会使温差消失,但是这个过程需要一定的时间。如果达到均匀所需的时间比宇宙膨胀的时标还长,则辐射和粒子之间就永远达不到热平衡。

宇宙膨胀是引力理论的一个结果。因此,归根结底,我们可以说,考虑引力相互作用之后,宇宙就可能免于热死。在这个意义上,引力是宇宙万物的生成和发展的根本原因。

引力带来的不稳定,非平衡,是极根本的。我们再来研究所谓自引力体系,即由物质自身引力而维系的体系。例如,太阳就是一个自引力体系,太阳之所以成为一个整体,不会离散,是由于太阳中物质之间的引力。宇宙间的天体多是自引力体系。自引力体系在稳定状态时,也具有确定的温度,按照热力学,温度是由体系中的粒子的平均速度决定的,速度越大,相应温度越高。自引力体系有个非常特别的性质:给自引力体系能量,则其中粒子的平均速度变小;由自引力体系取能,则粒子平均速度反而变大。

所谓“给自引力体系能量”,相当于向体系加热;而“由自引力体系取能”,相当于自引力体系取热。另外,“粒子平均速度变小”,相当于体系温度变低;“粒子平均速度变大”,相当于体系温度变高。所以,上述自引力体系的性质,简单地说就是:加热则变冷,放热则升温。即这种体系的热容量是负的。

现在考虑一个体系,其中包含有正热容物体甲,以及负热容物体乙。若整个体系处于热平衡,则甲和乙温度相同。热平衡是动态的,即甲乙之间有能量交换,但交换的数量相等,相互抵消,维持平衡。甲乙之间的能量交换,总不免有小的起伏。甲给乙的辐射,有时略大于乙给甲的辐射,总效果是乙多吸收了一点能量。如果乙是正热容物体,则多吸收的能量会导致温度提高,从而乙的辐射也增强,结果抵消了多吸收的能量,又回到平衡。这就是说,当甲乙都是正热容物质时,小起伏不会破坏热平衡。

如果乙是负热容的,情况就不同了。这时,它多吸收的能量反而使它温度下降,辐射变小,结果更加不能抵消甲多给乙的能量。如此恶性

循环下去,乙的温度将越来越低,破坏了原来的平衡。

总之,含有自引力物体的体系,其热平衡是不稳定的,稍有起伏就会演变成大的温差。可见,在引力主导的体系中,不存在通常热力学意义上的平衡。因此,有必要建立包含引力场的热力学。例如,什么是引力场本身的熵?有引力场时熵不减原理如何推广?这些都是当前引力物理中的课题。

牛顿《原理》是第一本物理的动力学。三百年来,物理学中增添了一个又一个动力学。动力学方法已成为物理学中一个最标准的框架。这种框架,是《原理》对物理的又一个有普遍意义的贡献。牛顿在《原理》中说:

“我奉献这一作品,作为哲学的数学原理,因为,哲学的全部责任似乎在于——从运动的现象去研究力,然后从这些力去说明其他现象。”

这表明,牛顿动力学的目的不仅是“描写”已知的现象,而且要预言未来,预言新的现象。动力学的正确与否,正是根据这些可证伪的预言来检验的。

对引力论的一些经典检验,如海王星的发现,是熟知的了。目前正在进行或正在计划进行的一些引力物理实验,如引力波的探测、轨道陀螺、高阶后牛顿效应、高精度等效原理等等,已不属于牛顿引力论,而是爱因斯坦引力论。

一类仍属牛顿引力论的现代实验课题,是微引力问题。微引力的目的是研究在没有引力或引力极小的情况下的物性^[3]。物性一般决定于电磁作用。由于引力比电磁力小得多,故物性与引力无关。但是,在特定条件下,引力对物性也是不可忽略的。

考虑在地球实验室中的某物体,它处在热力学平衡状态。用 z 表示垂直于地面的坐标,由于物体密度 ρ 是 z 的函数,所以单位质量的化学势 μ 也是 z 的函数,即 $\mu[\rho(z), T]$ 。热力学平衡条件是

$$\Delta\mu \equiv \mu[\rho(z), T] - \mu[\rho(z_0), T]$$

物理

$$\begin{aligned} &= -g(z - z_0) \\ &\equiv -g\Delta z, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 g 为引力加速度。上式又可写成

$$\Delta\rho = -\Delta z \left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\mu} \right)_T g = -\Delta z \chi_T g, \quad (5)$$

其中 $\chi_T = \left(\frac{\partial\rho}{\partial\mu} \right)_T$, 是压缩率。

引力作用可以忽略的条件是

$$\Delta\rho \ll \rho_c \equiv \rho(z_0). \quad (6)$$

由(5)式,上式可以写成

$$h\chi_T \ll \frac{\rho_c}{g}, \quad (7)$$

其中 $h = \Delta z$ 是样品的高度。一般情况下,不等式(7)式是成立的。但是,在临界点附近, χ_T 是发散的,(7)式不再成立,引力不能忽略。只有在微引力($g \sim 0$)的条件下,(7)式才能再保持。

图3给出氙在临界温度时,其密度偏离 $\Delta\rho \equiv \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c}$ 随高度 z 的变化,其中 ρ_c 为临界密度。由图3可见,在地球实验室($g = g_0 = 9.81\text{m/s}^2$)中,1mm高的样品中密度变化可达7%,太大了。只有在微引力,如 $g \sim 10^{-6}g_0$ 的环境中,密度变化才小于1%。所以,只有在微引力环境中,才有条件作精密的实验研究。

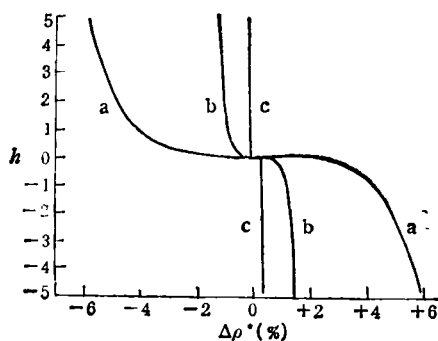


图3 氙在临界温度时的密度偏离 $\Delta\rho$ 随高度 h 的变化
 $g^* = g/g_0, g_0 = 9.81\text{m/s}^2$

引力不仅通过环境条件起作用,如果考虑引力场会直接叠加在物质的微观场上,就应当计及引力的更直接的作用。特别是,由于引

力具有长程性、非局域性,因此某些问题上弱的引力是有决定性的。比如,一均匀的体系,在临界点上,压缩率和相干长度都是发散的,然而当有引力时,这二者都不发散。

在引力场中,物性参数随高度不同而不同,故相干长度 ξ 是高度的函数。这时,可以局地地定义热力学量(如温度、压力等)的条件是

$$\frac{\Delta\xi}{\xi} = \frac{1}{\xi} \left| \xi \left(z + \frac{\xi}{2} \right) - \xi \left(z - \frac{\xi}{2} \right) \right| \ll 1. \quad (8)$$

当这个条件不成立时,这种由引力带来的非定域性会根本改变临界点的理论结果。

图4中围绕着氦的临界点画出一个压力温度范围,在该范围中,均匀的临界点理论失效。从图4可见,只有当微引力时,才有可能研究理想情况的临界现象。

液氦的临界现象,就是微引力研究的良好对象。液氦在 λ 点附近的比热;临界涨落的衰减;双流的粘滞性; ^3He 的切变粘滞系数;第二声声速等等,都是有价值的微引力研究课题。

除了临界现象,微引力涉及问题还很多,如流体力学,输运现象,晶体生长,界面现象,燃烧等等。

从牛顿到爱因斯坦,引力物理中有一系列创造,影响着整个物理学的发展。但是,由于引力是自然界最弱的相互作用,所以就具体课题来说,引力物理长期以来是相当孤立的,它与其他物理分支的联系极少。近二十年来,完全改观了。一方面,在宇宙学和高能天体物理中,引

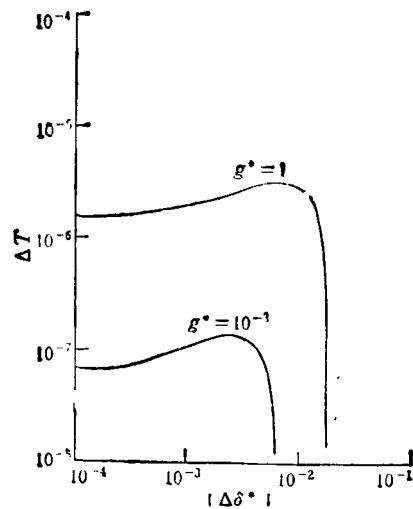


图4 围绕着氦的临界点的温度密度范围,在其中流体性质由于引力非局域性而有本质改变

$$\left(\Delta T^* \equiv \frac{T - T_c}{T_c}, T_c \text{ 为临界温度} \right)$$

力物理与高能物理不可分了;另一方面,在微引力物理中,引力也进入了凝聚态物理和材料科学。

- [1] P. West, Introduction to Supersymmetry and Supergravity, World Scientific, Singapore, (1986).
- [2] L. Z. Fang and R. Ruffini, Quantum Cosmology, World Scientific, Singapore, (1987).
- [3] 方励之,李淑娟,宇宙的创生,科学出版社,(1987)。
- [4] G. Marx and H. Sato, Inter. J. Mod. Phys. A, 2(1987), 133.
- [5] M. R. Moldover, J. V. Sengers, R. W. Gammon and R. J. Hocken, Rev. Mod. Phys., 51(1979), 79.

(上接第315页)

题中的混沌和湍流现象等动力学问题。另外一个重要的领域牵涉到流体由一种粘滞度变化成另一种粘滞度时“指纹”式图案的形成。这也是泰勒开拓的一个课题,他曾经设想把较重的、粘度较小的水注到岩石底床,把油抬高,以便从多

孔岩石中回收石油。这样的问题仍然需要泰勒的后继人继续发挥想象力和创造力,并在最后加以解决。

(郭跃进译自 Nature, Vol. 322, No. 6079, 1986, p. 500)