



# 氦滴能揭示宇宙的秘密吗

许梅

(中国科学院国家天文台 北京 100080)

在芬兰赫尔辛基理工大学和莫斯科朗道理论物理研究所工作的伏龙维克(Grigori Volovik)研究液氦已30多年。在其研究成果的基础上,他提出:研究接近绝对零度的一滴液氦的特性有助于揭示宇宙的许多秘密。

当氦(He)被冷却到接近绝对零度时,它仍然是液态,但开始遵循量子力学的规律而不再服从经典力学的法则。诸氦原子失去独立性,开始互相影响各自的运动:例如氦3能无摩擦地沿容器壁流动并蔑视重力沿烧杯壁向上爬行。科学家们若干年前就已发现超流态的氦与宇宙从数学的观点看存在着奥妙的联系。与任何其他液体一样,声波在超流态氦里的运动方式就数学方程而言与光线在引力场里的运动方式相似,但对于氦,这种类似的层次要深刻得多。

## 宇宙弦学说

首先,审视一下液氦与所谓宇宙弦(Cosmic String)的相似性。池水在冬季结冰时,起初,水面是均匀的液体,随着气温的下降,小块小块的冰开始分散地长出来,但不同池水区的冰晶不一定都有相同的取向,因此,当冰块长大互相挤压时就会出现裂缝和断层等“缺陷”。同理,当宇宙从原始热大爆炸状态冷却下来,电弱力与强核力的对称性破坏时,在时-空结构上也会产生类似的裂隙。这种由某些基本粒子物理学的大统一场论所预言的时-空缺陷有零维(点)、一维(线)和二维(面)3种:零维的是磁单极子,一维的便是20世纪70年代英国皇家学院的基布尔(Tom Kibble)提出的宇宙弦。这种假想的、高度绷紧的细弦成为从早期宇宙的气云中生长出星系的“种子”。这一学说似乎能够说明我们今天所观测到的星系分布的纤维状结构:宇宙中几乎到处都分布着没有星系的空洞,而星系只是丛生在空洞与空洞的交界线上。

1985年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的祖雷克(Wojciech Zurek)注意到支持宇宙弦学说的数学描述与当液氦冷却到超流态时发生的相似缺陷的数学描述是一样的。这些缺陷与上述水面结冰发生的情况类似:当液氦的不同部分选择向不同的方向流动时,沿着各液区相遇的边界便出现涡旋状的细线。若基布尔的宇宙弦概念是正确的,就应在能扩张并能被探测到的超流态氦的最小涡旋与其低温恒温容器的转速之间有明显的关系。伏龙维克和他的同事们于1995年进行了这项实验,实验数据表明基布尔的宇宙弦学说是正确的。虽然,过去几年中,对大爆炸遗留下来的宇宙背景辐射的测量表明宇宙弦对星系分布形式的形成并不能起到过去所认为的那么重要的角色,但用氦验证此一维缺陷能够形成却是氦宇宙学的一大胜利,证明了它的预见能力。因此,伏龙维克决定将类似的探讨投入到更多的宇宙学问题上。

## 量子引力难题

伏龙维克要来捧物理学的“圣杯”:在极高能和非常小的尺度上所发生的现象,宇宙诞生时的状态。目前,尚未出现能圆满地说明这种状态的理论,而高能粒子加速器仍难达到所需的最高能量。值此真实的宇宙隐藏着其秘密之际,伏龙维克的氦宇宙学却能窥其全豹。

视温度与压力的情况,超流态氦(氦3)可存在于 $^3\text{HeA}$ 态或 $^3\text{HeB}$ 态。伏龙维克认为A态能准确地模拟四维时-空所有的特性。被称为空旷空间的真空,远非一无所有,而是虚粒子的泡沫状海洋,这种粒子从真空窃取能量,忽而现身、忽而湮灭,进进出出。 $^3\text{HeA}$ 就有如此复杂的性质,即使能将其冷却到(不能达到的)绝对零度时,它也不会固态化,在几乎接近到绝对零度时,类似于自由粒子的“准粒子”<sup>①</sup>,声能包开始出现。在绝对零度以上的任何温

① 准粒子(quasiparticle):在描述有相互作用的多粒子体系时使用的某些客体。准粒子具有粒子的性质(例如质量、能量、动量等),但不能以自由粒子的形式存在,准粒子的例子有固体中的声子和其他元激发、朗道液氦-3理论的“包衣”氦-3原子等。

度,轻击原子便能产生不大的声波,与各种波动一样,这些声波是由不同大小的能包组成的。

这些准粒子能被探测到,而且,它们的行为所遵循的数学法则与在真空中的基本粒子,如电子、中微子和夸克等的行为所服从的某些数学定律相同。例如,伏龙维克说,某些准粒子之间的相互作用与假想的携带引力的引力子与物质粒子如电子之间的作用方式相同。他说,事实上, ${}^3\text{He A}$ 和时-空一样,能揭示出引力场和电磁场所有的物理学。对 ${}^3\text{He A}$ 的分析研究导致他提出使科学家们震惊的结论:首要的是,引力不是宇宙的基本性质;换言之,宇宙创生时是没有引力的。当液氦从高能混沌态冷却到低能超流态时,有序状态开始现形。首先量子化状态露头,这时准粒子才开始表现出特殊的性质——如与引力和电磁现象类似的性质。伏龙维克认为,这表明新生宇宙是在无规则的混沌状态中诞生的。在现实的宇宙里,起初一切事物是过热的和充满能量的。然后,按伏龙维克的说法,当大爆炸火球冷却于约 $10^{-43}$ 秒后,瞬间统治宇宙的单一力出现了。在此后的某个时刻,人们今天知道的引力、强力等等冒头了。他说,“脱离了混沌,爱因斯坦学说面世了,而如强和弱作用等力也露头了。”

越来越多的物理学家都参予讨论这一问题。斯坦福大学的诺贝尔物理学奖得主劳克林(Robert Laughlin)争论道:我们认为是基本的和现实世界基础的定律实际上是从真空的随机混沌孕育出来的性质吗?这是一个挑战性的陈述,但在伏龙维克看来,关于这个问题真地没有任何根本的东西。设想一个实际上充斥着几十亿个空气分子的“空”瓶子,这些分子不停地运动并随机地互相碰撞,显然这是混沌的,但从混乱状态我们称之为温度和压力的性质出现了。时-空定律不能以同样的方式出现吗?

若伏龙维克的观点是正确的,则试图发现一个量子引力学说将是徒劳无功的。现在,不少物理学家夜以继日地设法将爱因斯坦的引力学说、广义相对论和量子力学联姻,他们希望这样的学说有助于描述在宇宙诞生的极早期,当时-空、诸力和物质被约束在小尺度并具有极大能量时所发生的一切。他们认为,没有这样的理论就不能说明宇宙的诞生或在黑洞的中心所存在的不可思议的状态。伏龙维克说,“经过70年的探索,不论已获得多大的成就,但量子引力学说仍远未达到既定的目标。”他认为简单地“量子化”广义相对论是肯定做不到的。在最

高能条件下,由于其他粒子和场的混沌状态使得不可能分离出任何看似引力的东西,因而导致量子引力场陷入如此的困境。

维多利亚大学的维瑟(Matt Visser)说,“虽然是猜测,但我想伏龙维克的观点是正确的可能性极大,因为引力可能只不过是短距离和高能量条件下根本不同的某些事物的一个低能近似。果真如是,则“量子引力便完全没有意义了。”在此前题下,维瑟认为,科学家们必须改弦更张,探讨在低能量时广义相对论能从其出现的某些量子学说,不论这种学说如何地怪异。他说,“这与设法量子化广义相对论是两码事。”

### 模拟黑洞

伏龙维克说,氦还能演示很多其他问题。例如关于黑洞的一个关键预见。理论暗示,任何物质、即使是光线都不能逃逸出黑洞的视界,但在20世纪70年代,英国科学家霍金(Stephen Hawking)证明:由于成对的粒子在视界突然出现的结果,小量的能量能从黑洞泄漏出去:一对粒子中的一个落入黑洞,另一个则窃取了黑洞的一些能量——实际上的质量——逃逸出黑洞,其结果,黑洞将通过此“霍金辐射”而蒸发。问题在于这种辐射极其微弱,微弱到空间中一个典型的黑洞将需要比现在宇宙的年龄长得多的时间才能完全蒸发掉。实际上,天文学家们从未考虑过能探测到空间中黑洞候选者的霍金辐射。

但一些研究人员相信,仔细调整超流体的流动能够模仿黑洞的物理学。例如,一个处处都快于准粒子极大速度的超流态氦的流动,对准粒子而言就是一个“视界”,因为正像光子不能逃出黑洞,准粒子也不能逸出超液氦流。伏龙维克和他的同事们计划用两个互相滑动的超流体去制造一个氦“黑洞”,2002年早些时候他们展示了能在两个超流态氦流动之间的边界对于准粒子形成一个视界的制品,代替粒子从黑洞窃取能量作为霍金辐射发射的是少量的准粒子从液氦流动中偷窃动能而泄漏出液流。虽然这一霍金辐射的准粒子模拟结果可能太小难以测量,但却能首次提供科学家们看到进行中的某些细节的黑洞物理学的机会。伏龙维克认为在不久的将来一定能在实验室里进行模拟黑洞行为的实验。

### 关于宇宙学常数

伏龙维克考虑的下一个问题是有关宇宙加速膨胀。1998年,几个天文观测小组宣布对几十亿光年远的一些Ia型超新星的观测得出了宇宙在加速膨

胀的结论, 这使许多天文学家和宇宙学家认为宇宙内存在着以宇宙学常数  $\Lambda$ <sup>①</sup> 为标志的暗能量。暗能量来源于何处? 尚无人真地知道, 一个较好的猜测是起源于沸腾真空的能量。但若用量子力学的方程式将来自虚粒子和场的随机起伏的贡献加在一起去合计宇宙内有多少真空能量时却得到了一个非常大的数值, 此斥力的强度竟然是  $10^{120}$  倍于天文学家们所观测到的推动宇宙加速膨胀所需的斥力。许多科学家将此矛盾归咎于最高能量的起伏, 因为这是一个隐藏着的因素, 理论工作者从未设法去计算它们, 其贡献的某些部分可能是负值, 在消除掉大部分其他真空能量的贡献后, 剩下很小的一个宇宙学常数。伏龙维克认为这一猜测是正确的, 因为氦可提供佐证, 甚至并不需要做什么实验, 就能证明这件事。

他说, 设想居住在超流态<sup>3</sup>HeA 里的人: “此人是由基本的准粒子构成的, 就像我们一样是由基本粒子构成的。”在超流态氦中, 准粒子不施加任何种类的力于液体中的原子。因为在准粒子人与氦原子之间无任何作用, 该人将认为他是生活在空的空间内。若准粒子人将其周围“空的空间”中起伏的能量加在一起试图计算他们真空的能量时, 将得到一个巨大的答数。与真实情况比较, 也会发现估算值是一个数量级极大的数。因此, 伏龙维克说, 对于准粒子人而言, 和我们一样, 宇宙学常数也是一个谜。但从氦宇宙的外面, 我们能看到原子结构的一切组成部分, 与在我们的宇宙里不一样, 没有任何隐藏着的東西, 因此, 能够计算它的各种影响。伏龙维克说, 模仿宇宙内最高能量物理学影响的氦原子的影响是去计数真空能量。当你将一切加在一起的时候, 总和是一个小的数值, 但重要的是, 它不是零, 与观测到的不太大的宇宙加速膨胀匹配得很好。

### 反物质问题

另一个氦能帮助解决之谜是为什么宇宙被物质而不是反物质所主宰? 理论认为宇宙创生大爆炸应产生等量的物质和反物质, 但今天(除极少量人造的反氢原子外)在自然界没有发现反物质。一种设想是反物质在与物质相遇时, 于产生辐射的“噗噗”声中消失了, 但就任何遗留下来构成恒星和星系的物质而言, 各处的物质应比反物质要稍多一些。

一个领先的学说认为, 在宇宙演化过程中, 真空

自身产生的夸克要比反夸克稍多一些。这是 20 世纪 60 年代提出来的并被冠以名称: Bell Jackiw-Adler 反常。若此偏置现象确实存在, 则在超流态的氦中应有所显示, 将会发现有一个额外的不大的力作用在旋转的氦涡流上。而伏龙维克小组的实验已肯定了此力的存在。

伏龙维克说, 氦还能说明很多问题, 例如, 空间为何显得完全是平直的而不是爱因斯坦方程所认为的是容易弯曲的, 为什么星系是被交缠的磁场贯穿起来的, 而宇宙中的“基本”常数, 如光速等等, 哪些是真正基本和恒定的等等。

对伏龙维克的工作有不同的评价。圣安德鲁斯大学的伦哈特(Ulf Leonhardt)也在设法制作人造黑洞, 他认为伏龙维克的工作是信得过、严密的且具挑战性; 而一些对凝聚态物质和广义相对论都熟悉的科学家则有些保留; 而维瑟则半信半疑, 例如, 他不能相信超流态氦能真地说明宇宙学常数问题。

欧洲科学基金会已拟订了一个叫做 COSLAB (在实验室中的宇宙学) 的计划, 去探讨凝聚态物质、粒子物理学和宇宙学之间的关联。来自欧盟 10 个国家的科学家们正在用凝聚态物质, 如超流态氦做实验去观察——如果有什么区别——这种物质能告诉我们多少关于黑洞、驱动宇宙膨胀的暗能量和时-空中的缺陷。

当然, 氦能否揭示宇宙最深层次的秘密是没有保证的。但伏龙维克认为, “至少, 我们应当设法检查某些自然界顽固地阻止我们去达到的境界。氦启示可能会成为物理学最好的概念之一, 值得经常注意的是有多少真正深奥的和基本的物理学能从隐藏在未预料到的地方被发现。”伏龙维克的著作《Universe in a Helium Droplet》将问世。



① 爱因斯坦的引力学说, 除对牛顿引力理论做了众所周知的改进外, 还在其 1919 年提出的引力方程式中首次引进了宇宙学常数  $\Lambda$ 。这样, 便意味着宇宙中存在负的引力质量, 产生斥力。