

聊聊朗道和超流

朗道是上个世纪以物理直觉而著称的科学大家，在物理系的众多教科书上如果以冠名的物理术语包括模型方法理论等来计数，朗道处于第一并可能是永久性的第一。正如朗道是众多物理领域所绕不开的名字一样，这篇拙作的初意是聊聊超流，在稍做酝酿时却发现更自然和确切的题目是聊聊朗道和超流。

在朗道五十大寿的时候，苏联物理学界的人士在两块大理石板上刻了“朗道十诫”作为祝寿的礼物和纪念。朗道十诫列举了被挑选出来的他的十个学术成就，配有公式和图示，可谓图文并茂，其内容则不仅蔚为大观，而且沉甸无比。而这明显仿效圣经上摩西十诫的做法，则似乎更可以透露出同事和学生们在学术上对朗道的一种无上敬意和近乎崇拜的心理。在“物理王国”中纵横捭阖任意驰骋的朗道不免有时给人一点贡高我慢的印象，他在一个涉及对自己成就评价的地方却表现出一种伟大的谦逊品德。朗道自己编了一个理论物理学家按成就的对数尺度来排列的表，处于 0 格的是牛顿，0.5 格的是爱因斯坦，处于 1.0 格的包括一些量子力学的创始人，波尔、狄拉克、薛定谔、海森堡、玻色等【1】，如果是别人把朗道放在这个表里，都将会毫不思索地放在 1.0 格，他却最初把他自己放在 2.5 格，在完成超导方面的朗道-金兹堡方程后才把自己移到 2.0 格。这表中牛顿和爱因斯坦略有差别，恐怕是牛顿不仅建立了经典力学而且创立了所需的微积分，有物理和数学双重的深远的影响，如果历史是让爱因斯坦建立了广义相对论以及创立了所需的黎曼几何，那么朗道恐怕就会把他和牛顿同放在 0 格了。朗道在大学读的系叫物理和数学系 (Department of Physics and Mathematics)，对数学也是科班的出身和感受，他还上了化学系的课程。随着学科的分化和发展，朗道表格里面爱因斯坦栏在将来也许有可能会添上别的名字，而牛顿恐怕在 0 格永远地寂寞下去了。而朗道他自己在某种参数的表格上也处于牛顿类似的处境，这便是对现代物理百科全书式的贡献，于此处他在历史的长河里也恐怕将永远地寂寞着。

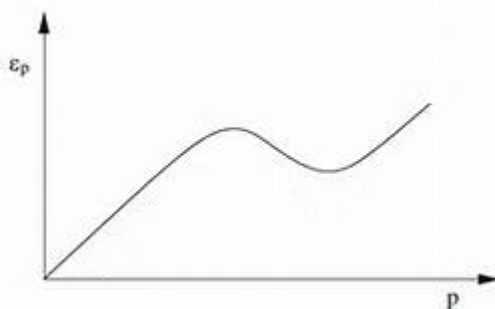
朗道的一个主要工作领域是凝聚态物理。这个领域的大家安德森曾经说，凝聚态物理有四个重要的概念，朗道贡献了三个；在 1957 年解释超导的 BCS 理论出来时，人们普遍觉得这该是朗道做出来才对；这些均反映出在人们心目中，朗道在凝聚态领域里面那种开山鼻祖和执牛耳式的地位。

让我们先说说凝聚态体系研究的困难的地方。任一凝聚体系，在基础的数理层面上说是归类于量子多体体系；原则上讲，如果我们能搞清某个凝聚体系的所有多体量子（谱）态以及态与态之间的跃迁，那么这个凝聚体系里面的物理就会象氢原子的物理那样变得清楚了，真切且无遗漏。打个比方，一个凝聚体系的物理就象是一个量子小世界，这个量子小世界的居民就是一个个多体量子态化成的小精灵，这些小精灵之间的来往就是这量子小世界里面的（全部）故事。求解一个凝聚体系的多体量子态的问题却是到目前为止还是不见一丝曙光的科学难题：量子多体问题。牛顿是第一个面临和体会到多体难题的人，他大体说过聚人类智力之和也攻克不了这个难题的话，他指的是经典多体问题，量子多体问题同样如此，聚人类智力之和于一体，也难以撼动这个难题一丝。这个难题成了凝聚态理论的背景，在这种背景下，所谓的物理直觉就显得弥足珍贵，因为它可以帮助人们抓住重要的部分，摸索出大致的方向。而朗道就是凭借他的物理直觉，打开了一个个量子小世界。

我们接下来要说的是超流体系这个量子小世界里面的故事，以及它与热力学第二定律之间的不解之源。

液态氦四的超流现象最先是被 Kapitza, 以及 Allen 和 Misener 的两人小组相续发现并在 1938 年初发表。在温度低于 2.17K 的时候，他们发现液态氦在毛细管中的流动是完全地畅通无阻，呈现出一种粘滞和摩擦完全消失的状态，作为一种强烈的对比，在温度高于 2.17K 的时候，液态氦在毛细管中的粘滞摩擦是如此之强烈，以至在加压的情况下也难以通过毛细管而流出。这种在 2.17K 温度以下液态氦和周围环境之间的摩擦的消失，意味着液态氦一旦流动起来，它就可以永远维持着流动状态，譬如在一个环形管内的流动的液态氦将会一直在管内流动下去 (Reppy 等在后来观察到这样的现象)。但是这种摩擦的完全消失从另一个普通的物理角度来说是一件不可能和不应该存在的事情。这就是热力学第二定律，它告诉人们任何有序的运动中所携带的能量会逐渐转换成无序运动也就是热运动的能量，这样有序程度在减少，而无序程度在增加，也就是熵在增加，最终达到无序程度即熵的最大化。物质体系的机械运动包括液态氦的流动是一种系统中所有粒子往一个方向的高度有序的运动，这个运动的能量即动能也会不可避免地要转换成无序的热运动的能量，这个动能以及相应的动量不断减少的过程就是摩擦耗散的过程。现在，液态氦在 2.17K 温度之下的超流状态，停止了这种有序的流动的动能向无序的热运动的能量的转化，停止了熵应有的增加，让被视为金科玉律的热力学第二定律使不上力，这太不可思议，这太神奇而让人无法相信。

超流现象发表的 1938 年对朗道来说却是艰难的一年，在 4 月他被投入监狱。在他被逮捕的当天，实验物理大家 Kapitza 就行动起来，他写信，他为朗道担保，他告诉人们朗道是何等的非凡和不可替代，他说只有朗道才能解释清楚他刚发现的超流现象。大约一年后，朗道总算被 Kapitza 从监狱里面捞出来，可以投身超流的理论工作，去解开这个神奇之谜。

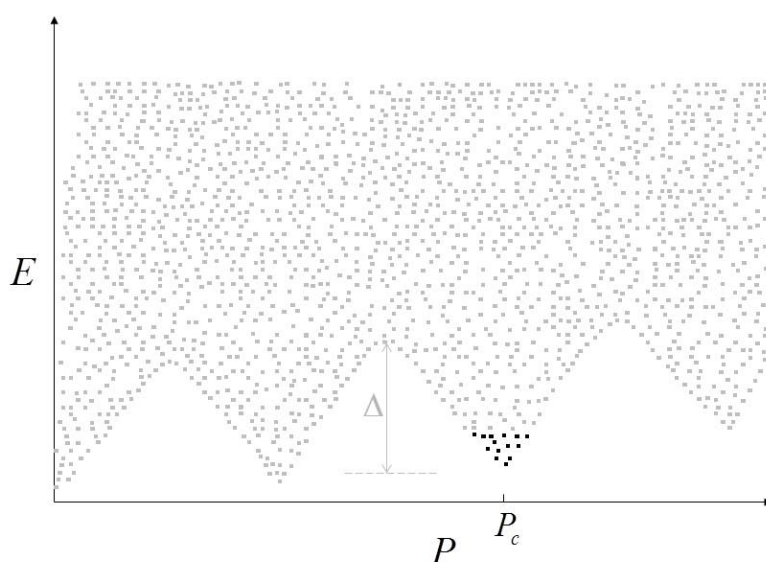


图一 朗道的准粒子谱态

朗道估计在某个阶段也尝试过量子多体难题而没有成功，当他在思考超流的问题的时候，他还是想从量子谱态这样第一性的东西出发去给予一种踏实和真切的物理图像和解释。他绕开了量子多体问题这个难题，他用他的物理直觉去猜和力逼出一些量子态来。在解释超流的文章中，他的直觉化为雄有力的物理论述，见山劈山，见水劈水，扫重如无，量子多体难题似在一旁化为轻烟，这样他得到如图一中所画的一组谱态，称之为准粒子谱态。有个这组谱态，朗道就用了一个中学生也能明白的浅显的动力学论述，干净利索地说明了超流氦的流 (superflow) 是怎么不可能被衰减的。朗道的理论令人无法忘记。热力学第二定律如同是只有阴雨连绵天气的某个世界里面的那个灰蒙蒙的天空一样，人们虽然无奈却早已习惯，朗

道的理论让超流变成了天际边上露出一块瓦蓝的天空,当那个世界的人们头一次看到这块瓦蓝的晴朗的天空时,那种初见是那种何等的神奇却带着清新自然的感受。这种一端是神奇,一端是自然,中间却畅通无比,整体又清新如一的感受,令人留恋徘徊,不肯离去。

朗道找到的准粒子态只是众多的量子态的一小部分,他不大可能猜出大部分的态来,要是能猜出,那便是比直接攻克量子多体难题而言更是奇迹般的事情。这小部分的量子态无法去直接解释一些深入的超流物性,朗道就用准粒子概念发展了已有的二流体表象模型来说明这些深入的实验观察。这种二流体表象模型就完全远离了量子谱态这种量子力学中第一性的真实的要素,虽然它在表面上看上去能‘说明’一些现象,但是我在这篇拙文稍后的位置却要不得不去说它的不是。在今天回头看来,上个世纪已有部分的实验在隐约地暗示着超流在与热力学第二定律的‘对抗’的路上可以走得更远,但是那个失去量子态意味的二流体模型对这些实验的‘理解’未能示现出这个暗示。



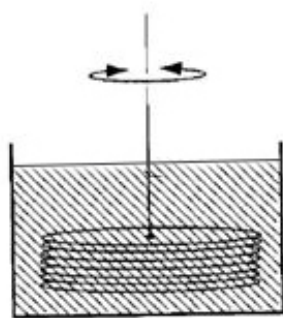
图二 某个超流体系的多体能谱的示意图

大约十年前,我在受到前面许多工作的启发的基础上(其中一个重要的启发来自于中山大学鲍诚光教授的一个工作),意识到量子多体难题在超流体系周边构建的堡垒并非浑然一体如铸,而是有几道细小的裂隙,通过这些裂隙,能看到里面超流体大部分的量子态大致是什么样子,这意味着我们能像理解氢原子的物理那样去清楚明白地理解超流的诸多物性。先让我们看看这些量子态是怎么简单地说明超流体的流(superflow)是不会衰减掉的。在图一中,我们给出了一个超流体系的多体量子态的一个示意图,图表中的每个点(包括灰点和黑点)代表着该体系自身多体哈密顿算符的本征量子态,点的纵坐标值就是这个态的能量本征值 E ,而点的横坐标代表这个态在沿着某个方向(注:超流的流方向)的总动量算符的期待值 P ,横坐标 P 值也大致说明系统处于这个量子态时流量的大小或速度的快慢。我们看到一些能量很低的态在谱图的下面形成一个个的谷状‘结构’。当温度低的时候,那些处于谷底部附近的量子态才起作用,它上面的那些态因为能量太高而够不着。图二中的黑色点标记着系统处于某个超流状态下所(部分)占据的量子态,这个系统和周围环境之间的相互作用会引起系统

本身的量子态的跃迁，但是出于这个被占据的谷底与左边临近的（动量小的）谷底之间的能量障碍（图上用 Δ 表示）的缘故，系统无法从这些黑点代表的态跃迁到这个左边临近谷底的态；换句话说，系统只能在这个谷底那些黑点代表的态之间来回跃迁，而这些态的动量都在 P_C 左右，这就意味着系统一致维持着 P_C 左右的动量，也就是没法不断减少下去，从而形成了超流。对这些多体谱态的分析也说明了超流是一个量子效应（玻色交换效应），经典力学体系形成不了图二所示的谱态图。

我们在上面已看到了有了这些多体量子态，就可简单和清楚地说明超流现象。我们接下去要用这些态来说二流体表象模型的不是，更重要的，来说明超流氦在与热力学第二定律对抗的路上能够走得更远。是的，能够走得更远。

二流体模型说，在 2.17K 温度以下液态氦四系统可以看成两种液体成份之和，一种成份是熵为零的没有粘滞性的超流液体，而另一部分是由朗道准声子和旋子组成的熵不为零的有粘滞性的平常液体，当液态氦在毛细管中流动的时候，只有那种超流液体成份流过去，而剩下的那部分平常液体因为粘滞摩擦的缘故完全被毛细管管壁阻止而停下来（流速为零）。



图三 Andronikashvili 实验示意图

在说二流体模型的不是前，对实验熟悉的人会说，你不用去说二流体模型的不是了，Andronikashvili 实验已经证实了二流体模型并且定量也相符合。Andronikashvili 实验是在一根可扭转的纤维丝的下部分等距离地悬挂一组非常薄的金属碟片，碟片之间的间距也很小（见图三）。把这组碟片放于液氦之中，扭转纤维丝来测量它的来回振荡周期，从测量的周期可以计算出转动惯量，进而计算出有多少物质质量在参与这种来回的旋转运动。从实验推出，当温度趋近零时，碟片间的液氦没有参加来回旋转运动，都是二流体模型中的超流液体成份。当温度增加时候，碟片间的液氦就有一部分参加旋转运动了，这部分是被碟片带动起来一起旋转的，自然是二流体中的有粘滞性的平常液体成份，这种平常液体成份所占的比例随温度增加而增加，到 2.17K 时达到百分之百的比例。如果二流体模型不正确，这个实验怎么解释？答案是能用类似图二中的那些量子态来解释这个实验，是一个看上去有些微妙的解释。当碟片组在做简谐式的来回旋转运动时候，碟片组之间的液氦感受到它的环境（指碟片组）的变化，好比是置身于一个角速度不但变化的旋转坐标系之中，在这个新的旋转坐标系之中，类似图二的能级会被倾斜（tilted）从而彼此能量值相对大小会变化，这样会引起能级占据率的调整 and 变化。碟片组代表的旋转坐标系的角速度是不断变化的（简谐式），从而液氦能级占据率的调整 and 变化也是简谐周期式的，这样（在实验室坐标系里）液氦的内能发

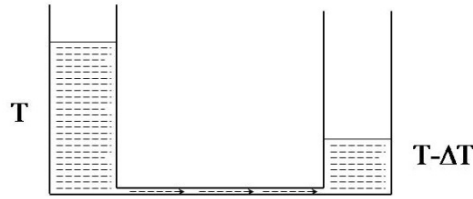
生周期性的变化，这种能量的变化反馈到碟片组和纤维丝（注：总能量守恒），从而修改了纤维丝的扭转周期，这样从能量角度去看液氦的内能变化像是模拟出一部分物质在那儿也参与了来回旋转运动的‘表象’。或者说，液态氦对碟片组的来回转动的反应是一种能量方面的反应，是能级占据率的翩翩起舞，并且温度愈高，这个能量起舞的‘幅度’越大，模拟出更多的物质参与了来回旋转运动的‘表象’，而实际上液氦的角动量几乎是没有什么变化的。如果实验有方法能测量碟片组间的液氦的角动量从而知道它的角动量对碟片组来回旋转的反应，就会知道这个角动量基本为零，这样就确定性地知道并没有什么正常液体成份在那儿和碟片以同样的角速度旋转。

让我们从量子态的角度来解析二流体模型。考虑某个超流体，它（部分）占据的量子态就是图一上面那些黑点代表的那组谷底附件的态，这也对应着系统处于一个动量大致为 P_C 的一个 superflow 态。在这组被占据的态之中，相对于那个在谷底的能量最低的态来说，别的态的能量都要高一些，都有一些激发能。每个激化态所含的激发能可以比拟成一些准粒子等，但是这样的比拟并不能为二流体模型提供理论依据，让我们想象某人（姑称为某甲）和图二黑点代表的态化成的小精灵之间的一段对话，

某甲：我知道你们这些小精灵身上都有一个口袋，口袋里面多多少少装有一些准粒子，现在和你们商量一下，能不能都把你们口袋里面的准粒子交给我，这样我可以用这些准粒子组成一个正常液体，他们可以和环境之间发生粘滞效应。

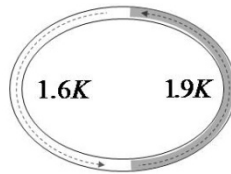
某小精灵：我们没有这样的口袋。我们与谷底的那个小精灵相比都会多些激发能，但这激发能也是我们自身的不可分部分。我们每个小精灵可以随时传给环境一份能量，这时候这个小精灵就变身成为了另外一个小精灵。那给出的能量直接成了环境的能量的一部分，让环境的内能增加，所以那传递出的能量并没有独立形成一个正常液体。每个小精灵不但可以释放一份能量给环境从而变身为能量低的小精灵，他还可以在环境中捕获一份能量而变身成为能量高的小精灵。我们这些在表演的小精灵（注：图二中那些黑点代表的态）就是在和环境之间玩着这样馈赠和捕获能量的游戏，我们不断地变身着，一瞬间可以变身千千万万次的，这个过程中我们还和环境之间达成了能量传递的平衡，就是那个热平衡，在这个热平衡中，我们每个小精灵出现的几率就是那个波尔兹曼几率；但是我们每个小精灵都带有 P_C 左右的动量，可以说是一种维持动量或者维持流的热平衡状态，这也是超流（superflow）的流状态的完整说明。

从上面的对话中我们可以认识到超流（superflow）是一个含有内能的‘热’流，而不是二流体模型中所说的熵为零的绝对冷的冷流。那么我们怎么解释实验上所观察到的当液氦超流从毛细管或微孔媒介中流出来时，温度降低的现象呢（见图四，这类现象在教科书上归纳为超流氦的机热效应）。我们先说一下这种温度降低的现象其实就在暗示着超流在与热力学第二定律的抗争上可以走得更远（在某些情形下这个现象本身也示现了一种短暂性的熵减过程）。我们可以注意到，当超流从毛细管或微孔媒介流出的时候，流速发生了很大变化，这些实验中超流在毛细管或微孔媒介的流速很大，基本是或接近于临界速度，而从毛细管或媒介流出来以后，流的截面变大，流速变小，基本可以忽略不计了。而超流氦四的又一个有些微妙但能弄清楚的地方就是超流（superflow）的内能依赖于流速，在同样温度下流速大则内能小，流速小则内能大。在毛细管或微孔媒介中超流的内能因流速的缘故比较小，这样为了维持能量守恒，出来以后温度就必须降低了。当然，这个超流的内能也会对孔径大小之类的环境几何参数也有一定的依赖性，这些均可以导致温度的调整。



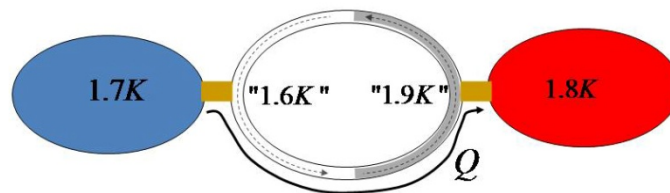
图四 超流氦的流 (superflow) 从毛细管中出来时候温度会降低

这样我们可以设计一个有意思的系统，在一个环形管道里面，让它的一半填充致密的孔径小的微孔媒介，另一半则填充比较疏的孔径大的微孔媒介，然后在管道里面注入液氦并形成超流 (superflow)，超流在两个媒介里面的流速会有个大的差别，等时间足够长，这个流就会在系统中造成有差别的温度分布，在致密媒介部分，温度高一些 (譬如说温度为 1.9K)，而在稀疏媒介部分，温度就低一些 (譬如说 1.6K)。管道里面的流会一直旋转下去 (超流的缘故)，这个温度分布就一直维持下去 (见图五)。



图五 管道里的超流 (super flow) 诱导出有差别的温度分布

现在我们设想将 1.6K 部分的管道和一个温度为 1.7K 的无限大的热库做良好的热接触，将 1.9K 部分的管道与一个温度为 1.8K 的无限大的热库做良好的热接触。这时候管道里面的流在 1.6K 部分会接受从 1.7K 的热库传来的热量，它的温度和内能将都升高一些，这些升高的内能随着超流一起流到稀疏的媒介里，在那里温度要重新调整来容纳增加的内能，温度因此升到 1.9K 以上，这样这部分更可以向与之相连的 1.8K 热库传送出热量了。这样，我们就看到了热量从 1.7K 的热库传到 superflow 再传到 1.8K 的热库的过程。这是个热量从温度低的热库 (1.7K) 到温度高的热库 (1.8K) 传递的过程(见图六)，并且永远传递下去，这就完全突破了热力学第二定律，我们看到超流氦可以用来实现熵减少的物理过程，而且熵可以永远减少下去。



图六 此系统实现了热量从温度低的热库向温度高的热库的传递，从而熵不断减少

未了，以一段某甲和超流世界的某小精灵的对话作为结束，

某甲：你们好像在某些时候可以完全不用去遵循热力学第二定律，这是怎么回事？

某小精灵：我们是个量子的世界，我们遵循量子力学，量子力学把我们都安排得好好地，把我们的日程安排得满满地，我们不需要再遵循别的什么了。

某甲：难道真是如人们所说的那样，在量子力学中一切皆有可能？

某小精灵：… (注：… 代表无语)

某甲：那个家伙说你们有可能为能源问题的解决带来新的方法，那个家伙可靠不？

某小精灵：你是说那个偷看我们好多年的讨厌的家伙吧，他完全有可能看花了眼还自己不知道。… 这样吧，我正式邀请你来看我们的表演，如何你看到什么并且觉得没有眼花的话，你看到的就有可能是真的哟。

某甲：…

谨以此文向伟大的量子物理先驱朗道先生致敬！

(武汉物数所 余永乐)

参考文献：

【1】 M. Asoke, *Physics Today* **59**, vol. 11, page 10-14 (2006).