

## 朗道小传

E. M. Lifshitz 著 姬扬<sup>†</sup>译

2022-10-25收到

† email: jiyang@red.semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230607

## 译者的话

这篇文章是栗弗席兹(E. M. Lifshitz)为俄文版《朗道文集》撰写,首次以俄文发表于*Uspekhi fizicheskikh Nauk*, 1969, 97: 169。英文版由E. Bergman翻译,首发在*Soviet Physics Uspekhi*, 1969, 12: 135,后略有修改,并经美国物理学会许可重印,收录于英文版*Course of Theoretical Physics*。2020年,朗道和栗弗席兹合著的《理论物理学教程(十卷)》中译本终于全部出版了,由于是从俄文版直译,因此这篇“朗道小传”并没有收录其中。故译者根据英文版本翻译出来,文中引用的朗道文章的标号是按照《朗道文集》里的顺序。译者感谢李涛、胡文兵和刘全慧指出初稿中翻译不妥之处。

自1968年4月1日列夫·达维多维奇·朗道去世至今,还没有多长时间,但命运的旨意是,即使现在我们也是遥望着他,就像以前一样。在远处我们更清楚地看到,他不仅是一位伟大的科学家,随着时间的流逝,他工作的意义变得越来越明显,他还是一位品德高尚的伟人,非常公正和友好。毫无疑问,这是他作为科学家和教师深受欢迎的根源,是他的直接和间接学生热爱他和尊敬他的根源,在可怕事故发生以后,为了抢救他的生命而奋斗的日子里,这种爱戴以异常强烈的方式得到了证明。

悲惨的命运让他死亡了两次。

第一次发生在6年前,1962年1月7日,从莫斯科到杜布纳的路上,他的小汽车在结冰的公路上打滑,并与一辆对面驶来的卡车相撞。随后为抢救他的生命而进行了史诗般的斗争,主要是无数医生和护士们的无私劳动和精湛技能的故事,但也是非凡的团结壮举的故事。这场灾难性的事故激起了整个物理学家群体的自发而迅速的反映。朗道昏迷不醒的医院成了所有这些人的中心,他的学生和同事们努力做出任何力所能及的贡献,帮助医生为了抢救朗道的生命而进行不顾一切的斗争。

“伟大的同志情谊从第一天开始就喷薄而出。然而,那些对医学一无所知的杰出科学家们、科学院的院士和通讯院士们、博士和博士生们,与54岁的朗道同一辈的人,还有他的学生们,以及他们更年轻的学生们,全都自愿充当信使、司机、中间人、代理人、秘书、护工甚至搬运工和劳工。他们自发成立的总部

设在第50号医院的主任医师办公室,那里成了全天候的组织中心,无条件地立即执行主治医师的任何指示。

87名理论家和实验家参加了这支自愿的救援队。对于可能在任何时候需要联系的个人和机构,按字母顺序编写了他们的电话号码和地址,总共有223个电话号码!包括其他医院、汽车运输基地、机场、海关、药房、部委和最有可能接触到咨询医生的场所。

在最悲惨的日子里,当‘朗道快要死了’的时候,有8到10辆小汽车随时等候在医院的七层大楼前——这样的日子至少有四天。

1月12日,当一切都指望人工呼吸机的時候,一位理论家建议在物理问题研究所的车间里制作人工呼吸机。这是天真的、不必要的,但多么惊人的自发性啊!物理学家们从脊髓灰质炎研究所得到了这台机器,并亲自将它送到病房,朗道正在那里十分困难地呼吸。他们挽救了自己的同事、老师和朋友。

这个故事可以无限制地继续下去。这是真正的物理学家兄弟



列夫·达维多维奇·朗道  
(1908—1968)



叶甫盖尼·米哈伊洛维奇·栗弗席兹(1915—1985)

情……”<sup>1)</sup>

就这样，朗道得救了。但三个月后，当他重新恢复了知觉的时候，他不再是我们认识的那个人了。他没能从事故的所有后果中恢复过来，再也没有完全恢复他的能力。接下来的六年，只是长期的痛苦和折磨。

## 朗道的人生经历

1908年1月22日，列夫·达维多维奇·朗道出生于巴库，他的父亲是石油工程师，在巴库油田工作。他的母亲是医生，曾从事生理学的科研工作。

朗道在13岁就完成了中学课程。即使在那时，他已经被精确科学所吸引，他的数学能力很早就显现出来。他自学了数学分析，后来他常说，他几乎不记得自己不知道分析和积分的时候了。

朗道的父母认为他年龄太小，不能上大学，就让他去巴库经济学院待了一年。1922年，他进入巴库大学，同时在两个系学习：物理数学系和化学系。后来，他没有继续他的化学教育，但终生都对化学保持兴趣。

1924年，朗道转入列宁格勒大学物理系。列宁格勒是当时苏联物理学的主要中心，在那里他初次认识了真正的理论物理学，那时候正是理论物理学的动荡时期。他以年轻人的热情和精力投入到学习中，工作得如此卖力，以至于常常筋疲力尽，晚上睡不着觉，在心里捣腾公式。

后来，他经常描述当时他是如

何惊讶于广义相对论的不可思议之美(有时候他甚至宣称，初次认识这个理论时的这种狂喜，应该是任何天生的理论物理学家的特征)。他还描述了阅读海森伯和薛定谔的文章给他带来的狂喜，它们标志着量子力学的诞生。他说，从他们那里他不仅认识到科学的真正魅力，而且还敏锐地意识到人类天才的力量，最大的胜利是人类能够理解超越他苍白想象的事物。当然，时空的曲率和不确定性原理正是这样。

1927年，朗道大学毕业，在列宁格勒物理技术学院攻读研究生课程。在更早的1926年，他就是一名兼职做研究的学生了。这几年产生了他最早的科学文章。1926年，他发表了双原子分子光谱强度的理论<sup>[1]</sup>(然而，当时他不知道，Honl和London在一年前已经发表了这些结果)。1927年，他发表了一篇关于量子力学中阻尼问题的研究，首次引入密度矩阵来描述系统的状态。

然而，他对物理学的迷恋和作为科学家的初期成就，当时却因为在与他人交往时的胆怯和不自信而失色。这个特点给他带来了许多痛苦，有时使他陷入绝望——正如他在晚年所承认的那样。随着岁月的流逝，他身上发生了变化，变成了一个活泼而又合群的人，在很大程度上是由于他特有的自律和对自己的责任感。这些品质，加上清醒的自我批评的头脑，使他能够训练自己并进而拥有了罕见的力量——快乐的能力。同样清醒的头脑使他总是能够区分什么是真正的人生价值，什么是不重要的小事，

即使在生活中遇到困难时也能保持心理平衡。

1929年，根据人民教育委员会的指派，朗道出国旅行，在丹麦、英国和瑞士工作了一年半。对他来说，此次旅行最重要的部分是在哥本哈根，在那里，来自全欧洲的理论物理学家聚集在伟大的尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)周围，在玻尔领导的著名的研讨会上，讨论当时理论物理学的所有基本问题。玻尔本人的人格魅力强化了这种科学氛围，在朗道形成自己的物理科学观时，这些都决定性地影响了他，后来他一直认为自己是玻尔的弟子。在1933年和1934年，他又两次访问哥本哈根。朗道在国外访问期间，开展了关于电子气体的抗磁性理论工作<sup>[4]</sup>，研究了在相对论性的量子区域里，相对论对物理量可测量性的限制(与Peierls合作)<sup>[6]</sup>。

1931年，他回到列宁格勒，在列宁格勒物理技术研究所工作。1932年，他搬到哈尔科夫，成为新组建的乌克兰物理技术研究所(列宁格勒研究所的分支)理论部门的负责人。同时，他还担任哈尔科夫力学和机械制造学院的物理学和力学部的理论物理系主任。1935年，他成为哈尔科夫大学的普通物理学教授。

在哈尔科夫时期，朗道的研究工作既深入又广泛<sup>2)</sup>。正是在那里，他开始了自己的教学生涯，并建立了自己的理论物理学派。

20世纪有许多杰出的理论物理学的先驱者和创造者，朗道就是其中之一。但他对科学进步的影响还远远不只是他对科学的个人贡献。

1) 楷体内容引自D. Danin的文章“Comradeship (同志情深)”，发表在1962年7月21日的*Literaturnaya Gazeta* (文学报)。

2) 从朗道在1936年完成的一系列研究中，可以了解他当时的科学活动范围：二级相变理论<sup>[29]</sup>，超导体的中间态理论<sup>[30]</sup>，库仑相互作用的输运方程<sup>[24]</sup>，单分子反应理论<sup>[23]</sup>，金属在极低温度下的性质<sup>[25]</sup>，声音的色散和吸收的理论<sup>[22, 28]</sup>，半导体光电效应理论<sup>[21]</sup>。

他不仅是杰出的物理学家，还是真正杰出的教育家，天生的教育家。在这方面，只能把朗道和他的老师玻尔相比。

当他还很年轻的时候，理论物理学乃至物理学作为一个整体的教学问题就引起了他的兴趣。正是在哈尔科夫，他第一次开始制定“理论最低限度”方案——实验物理学家和希望献身于理论物理学专业研究工作的人所需要的理论物理学基础知识。除了起草这些方案以外，他还为乌克兰物理技术研究所的科研人员以及物理和力学部的学生讲授理论物理学。因为有意对整个物理学教学进行重新安排，他接受了哈尔科夫国立大学普通物理学教授的职位(在战后，他继续在莫斯科国立大学物理技术学院讲授普通物理学)。

也是在哈尔科夫，朗道萌生了这个想法，并开始编写完整的理论物理学课程和普通物理学课程。终其一生，朗道梦想着在每个层次上写关于物理的书——从学校的教科书到专家的理论物理课程。事实上，在他遭遇重大事故的时候，《理论物理学教程》(*Course of Theoretical Physics*)的所有各卷和《大众物理学教程》(*Course of General Physics and Physics for Everyone*)的第一卷都已经完成。他还起草了物理学家使用的数学教科书的编撰计划，这是一份“行动指南”，指导数学在物理学中的实际应用，并且应当摆脱对这门课没有必要的严格性和复杂性。但最终他没有时间把这个方案变为现实。

朗道一直强调，理论物理学家

要精通数学技术。这种精通的程度应该尽可能地使数学方法的复杂性不会分散人们对问题的物理困难的注意力——至少在涉及标准的数学技术的时候。只有经过充分的培训，才能做到这一点。然而，经验表明，目前物理学家的大学数学教学模式和课程往往不能保证这种训练。经验还表明，在物理学家开始独立的研究活动后，就会发现数学的研究太“无聊”了。

因此，对于任何想要成为他学生的人，朗道的第一次测试是数学在实际计算方面的测验<sup>3)</sup>。成功的申请人可以继续学习“理论最低限度”方案的连续七个部分，包括所有理论物理领域的基本知识，然后采取适当的考察。朗道认为，任何理论家都应该掌握这种基本知识，无论他未来的专业是什么。当然，他并不期望所有人像自己一样全能。但这表现了他对理论物理学完整性的信念：这是一门单独的学科，具有统一的方法。

起初，朗道本人主持“理论最低限度”的考察。后来，在申请人的数量过多以后，这一职责由他最亲密的同事们分担。但是朗道总是亲自主持第一次考试，与每个新的年轻申请人进行第一次会面。任何人都可以见到他——只要给他打电话，请他安排面谈就行了。

当然，并非每个开始学习“理论最低限度”的人都有足够的能力和毅力完成它。从1934年到1961年，共有43人通过了这个考试。这种选择的效果仅从以下标志性的事实就可以看出：在这些人中，有7人已经成为科学院院士，另有16人

是科学博士。

1937年春天，朗道来到莫斯科，成为物理问题研究所理论部门的负责人，该研究所前不久刚在卡皮查(P. I. Kapitza)的指导下成立。他一直待在那里，直到生命的尽头。这个研究所就是他的家，在这里他的各种活动终于开花结果。就是在这里，朗道与实验研究发生了惊人的相互作用，创造了他科学活动的杰出成就——量子流体理论。

也是在这里，他得到了无数的外界对他贡献的认可。1946年，朗道当选为苏联科学院院士。他被授予许多勋章(包括两个列宁勋章)和社会主义劳动英雄的荣誉称号——表彰他的科学成就和他对重要的实用的国家任务作出的贡献。他三次获得国家奖，1962年获得列宁奖。还有许多来自其他国家的荣誉。早在1951年，他就当选为丹麦皇家科学院院士，1956年任荷兰皇家科学院院士。1959年，他成为英国物理学会的荣誉会员，1960年成为英国皇家学会的外籍院士。同年，他当选为美国国家科学院和美国艺术与科学院的院士。1960年，他获得了F·伦敦奖(美国)和马克斯·普朗克奖章(西德)。最后，在1962年，他被授予诺贝尔物理学奖，“表彰他关于凝聚态物质，特别是液氦的开创性理论”。

当然，朗道的科学影响远远不限于他自己的学生们。在作为一名科学家的生活中(以及在作为一个人的生活中)，他非常民主：他从来不虚荣自大，也不会尊崇权威。任何人，无论他的科学功绩和头衔如何，都可以寻求朗道的建议和批评

3) 要求是：能够计算任何可以用初等函数表示的不定积分，并能求解任何标准型的常微分方程，具备向量分析和张量代数的知识以及复变量函数理论的原理(留数理论，拉普拉斯方法)。他认为，像张量分析和群论这样的领域将与它们应用的理论物理领域在一起研究。

(这些都是精确而明确的), 只有一个条件: 这个问题必须是实事求是的问题, 而不是他在科学中最讨厌的东西: 空洞的哲学或虚假的、浮夸的、充满伪科学诡辩的问题。他有一种敏锐的批判性思维, 这种品质, 以及他从深刻物理学的角度出发的方法, 使他的讨论变得很有吸引力也非常有用。

在讨论中, 他总是热情而尖锐, 但不粗鲁, 机智而讽刺, 但不刻薄。在乌克兰物理技术研究所办公室的门上, 他挂的名牌上是这样写的:

朗道  
小心, 他很凶!

多年来, 他的性格和态度有所缓和, 但是对科学的热情和毫不妥协的态度保持不变。当然, 他锋芒毕露的外表掩盖了科学公正的态度、崇高的心灵和伟大的善良。无论他的评论说得多么刺耳, 多么令人不快, 他也同样强烈地渴望用自己的建议为别人的成功作出贡献, 当他给别人以认可的时候, 也是同样的热情。

朗道作为一名科学家的个性和他的天赋的这些特点, 实际上把他提升到了最高科学法官的地位, 对于他的学生和同事, 实际情况就是如此<sup>4)</sup>。毫无疑问, 朗道在这方面的活动, 他的科学和道德权威, 对轻浮的研究产生了抑制作用, 也显著提高了我们理论物理学的水平。

对于朗道来说, 与众多的学生和同事进行不断的科学交流, 也是

他的一个知识来源。他的工作作风的一个特点是, 从很久以前, 从哈尔科夫时期开始, 他自己几乎从来没有读过任何科学文章或书籍, 尽管如此, 他总是完全熟

悉物理学的最新消息。他的这些知识来自于在他指导下举行的研讨会上的诸多讨论和提交的文章。

这个研讨会每周举行一次, 持续了近30年, 在过去几年里, 这个会议成为莫斯科所有理论物理学家的聚会。在研讨会上展示论文, 成为所有学生和同事的神圣职责, 朗道本人对于讲述材料的选择是非常严肃和彻底的。他对物理学的各个方面都感兴趣而且技巧娴熟, 研讨会的参与者都发现不容易跟上他的思路, 例如, 讨论的内容立即从“奇怪”粒子的性质转变为硅电子的能谱。对朗道来说, 他自己听文章从来都不是空洞的形式: 直到一项研究的实质完全阐明, 消除了其中所有的“语言学(philology)”痕迹——在“为什么不能”的原则上做出的未经证实的陈述或主张, 他才休息。作为这种讨论和批评的结果, 许多研究被斥为病态的, 朗道对它们完全失去了兴趣。另一方面, 真正包含了新思想或新发现的文章被列入“黄金储备”, 并永远驻留在朗道的记忆中。

事实上, 通常他只要知道一项研究的指导思想, 就足以再现其所



A. A. Yuzefovich的著名漫画“道曰……”

有的结果。一般来说, 他发现自己获得这些结果比仔细跟随作者的推理更容易。这样, 他就为自己再现了、并深刻地思考了理论物理学所有领域中获得的大部分基本结果<sup>5)</sup>。这可能也是他非凡能力的原因, 实际上他能回答被问到的任何关于物理的问题。

朗道的科学风格没有把简单的事情复杂化的倾向(通常是基于概括性和严谨性, 然而, 通常是虚幻的)——不幸的是, 这种倾向传播得相当广泛。他自己总是朝着相反的方向努力, 把复杂的事物简化, 以最清晰的方式揭示自然现象背后规律的真正简单性。他的这种能力, 他自己常说的那种“让事情简单化”的技巧, 对他来说特别值得骄傲。

追求简单和秩序是朗道思想结构的固有部分。这不仅表现在严肃的事情上, 而且表现在半严肃的事情上, 也表现在他特有的幽默感上<sup>6)</sup>。因此, 他喜欢对每个人进行分类, 从女性的美丽程度到理论物理学家对科学的贡献。最后这种分类基于了五个对数尺度: 因此, 二等物理学家的成就是三等物理学家

4) A. A. Yuzefovich 有一幅著名的友好漫画“道曰……”(Dau said……), 把朗道的这个地位形象化了。

5) 这碰巧解释了朗道的论文中缺乏某些必要的参考资料, 这通常不是故意的。然而, 在某些情况下, 如果认为这个问题太琐碎了, 他可能故意诉诸于参考资料。在这种事情上, 他自己确实有相当高的标准。

6) 然而, 这个特点在朗道的日常生活中并不是一种习惯, 也就是说, 在他的日常生活中, 他根本不讲究式地准确, “无序区”会在他的周围迅速出现。

的10倍(“病态型的”列为第五等)。在这个尺度上,爱因斯坦占据了1/2的位置,而玻尔、海森伯、薛定谔、狄拉克和其他一些人则名列第一等级。朗道谦虚地把自己排在2又1/2等,待了很长的时间,在生命的后期,他才把自己提升到第二等。

他总是很努力地工作(从来不在桌子边,通常躺在家里的沙发上)。对任何科学家来说,自己的工作成果获得承认,或多或少都是重要的;对朗道当然也是必不可少的。但可以说,他对优先权问题的重视程度远不如通常情况。不管怎么说,毫无疑问,他的工作动力在本质上不是出于对名誉的渴望,而是对探索自然规律(无论其表现的大小)的无尽的好奇心和热情。他从不放过任何一个机会来重复这条基本真理:一个人永远不应该为无关的目的而工作,不应该仅仅是为了伟大的发现而工作,因为那样就无论如何,什么都完成不了。

朗道在物理学以外的兴趣范围也非常广泛。除了精确科学,他热爱并精通历史。他对各种类型的精致艺术也非常感兴趣而且印象深刻,但音乐(和芭蕾)除外。

那些有幸成为他多年的学生和朋友们的人知道,我们的“道”,就像他的朋友和同志们对他的昵称<sup>7)</sup>一样,不会变老。在他的陪伴下,无聊消失了。他的个性光芒从来没有变得暗淡,他的科学力量仍然强大。最无情而可怕的是那次意外,使他的辉煌行动结束在巅峰的时刻。

## 朗道的科学贡献

朗道的文章通常展示了他独特

科学风格的所有特征:清晰而明确地表述物理问题,最简短又最优雅地给出解决方案,没有多余的闲言碎语。即使是现在,经过多年以后,他的大部分文章也不需要任何修改。

下面的简要回顾仅是对朗道著作的丰富性和多样性提供一个初步认识,并在一定程度上澄清其在物理学史上所占的地位。对当代的读者来说,这个地位可能并不总是显而易见的。

朗道科学创造力的一个特点是以几乎前所未有的广度,涵盖了从流体力学到量子场理论的整个理论物理学。20世纪是专业化越来越严重的世纪,他学生的科学道路也逐渐不同,但朗道自己却把它们统一起来,始终保持着对一切事情都有惊人的兴趣。也许在他身上,物理学失去了最后一位伟大的全才。

即使对朗道作品目录的粗略检查也表明,他的一生里没有任何漫长的时期只工作在某个物理学领域。因此,对他作品的讲述不是按时间顺序进行的,而是尽可能按主题来划分。我们从致力于量子力学一般问题的的工作开始。

这些首先包括他早期工作的几篇文章。在研究辐射阻尼问题的过程中,他率先引入了不完全量子力学的概念,借助后来被称为密度矩阵的量来描述<sup>2)</sup>。在这篇文章中,密度矩阵以其能量表示形式被引用。

两篇文章<sup>17, 9)</sup>专门讨论准经典过程的概率的计算。这个问题的困难源于这样的事实:由于指数的性质(有一个大的虚指数),准经典波函数矩阵元中的被积函数是一个快速

起伏的量,使得积分的估计变得非常复杂。事实上,在朗道的工作以前,所有关于这类问题的研究都是错误的。朗道首次为准经典矩阵元的计算提供了一般方法,还把它应用到一些特定的过程。

1930年,朗道(与R. Peierls合作)发表了一篇关于相对论要求对量子力学描述施加限制的详细研究<sup>6)</sup>,这篇文章在当时引起了热烈的讨论。其基本结果在于,确定在有限时间内测量粒子动量的可能性的极限。这意味着在相对论性的量子领域,测量表征粒子相互作用的任何动力学变量都是不可行的,唯一可测量的量是自由粒子的动量(和极化)。这也是在该领域应用传统量子力学方法所产生困难的物理根源,这些方法使用的概念在相对论性的领域里变得毫无意义。朗道在最后发表的文章<sup>100)</sup>里回到了这个问题,他在文章中表示,他相信, $\psi$ 算符作为不可观测信息的载体,以及整个哈密顿方法,应该在未来的理论中消失。

这个信念的原因之一是朗道在1954—1955年期间(与A. A. Abrikosov, I. M. Khalatnikov和I. Ya. Pomeranchuk合作)进行的量子电动力学基础的研究结果<sup>[78—81, 86]</sup>。这些研究基于点相互作用的概念,即“模糊”相互作用(“smeared” interaction)在“模糊”半径趋于零时的极限。这样就有可能直接处理有限的表示。他们还证明了,对整个微扰理论的主项进行求和是可能的,(在这种情况下)就可以推导量子电动力学基本量的渐进表达式——格林函数和顶点部分。这些

7) 朗道本人喜欢说,这个名字源于他名字的法语拼写: Landau = Lane Dau (the ass Dau)(笨驴道,蠢道)。

8) 关于为这个说法寻找更严格的证据,他在文章[100]中宣言(典型的朗道风格):“生命短暂,我们不能把时间浪费在不会导致新结果的问题上”。有关这个问题的综述见文章[84, 89]。

关系本身被用来导出电子的真实电荷和质量与它们的“裸”值的关系。虽然这些计算是在“裸”电荷很小的前提下进行的，但有人争辩说，不论裸电荷的大小，真正电荷和裸电荷的关系式都仍然有效。然后对该公式的分析表明，在点相互作用的极限下，真电荷变为零——理论“失效了”(nullified)<sup>8)</sup>。

只有未来才会判断朗道计划的方案<sup>[100]</sup>在构建相对论性的量子场论方面的有效性。在事故发生前的最后几年里，他自己也在这个方向积极地工作。特别是，作为这个方案的一部分，他制定了一种一般方法来确定在量子场论的图解技术里出现的奇异性<sup>[98]</sup>。

针对1956年弱相互作用中宇称不守恒的发现，朗道立即提出了具有固定手性的中微子理论(“二分量中微子”)<sup>9)</sup><sup>[92]</sup>。并提出了“组合宇称”守恒原理，他称之为空间反演和电荷共轭的联合应用。朗道认为，空间的对称性以这种方式“保持守恒”——不对称被转移到粒子本身。事实证明，这个原则比宇称守恒定律适用得更广泛。然而，众所周知，近年来也发现了组合宇称不守恒的过程；这种不守恒行为的含义目前尚不清楚。

朗道1937年的一项研究<sup>[31]</sup>涉及核物理。这项研究定量地体现了玻尔不久前提出的观点：用统计物理学的方法检验原子核作为一滴“量子液体”。值得注意的是，与其他研究人员以前的做法相反，这项研究没有利用任何深远的模型概念。特别是，首次建立了复合核的能级之间的平均距离与能级宽度的关系。

模型概念的缺失也是朗道(与Ya. A. Smorodinskii合作)提出的质子—质子散射理论的特征<sup>[55]</sup>。在他们的研究里，散射截面以参数表示，其含义不受关于粒子相互作用势的任何具体假设的限制。

研究(与Yu. B. Rumer合作)<sup>[36]</sup>宇宙射线中电子簇射的级联理论是他技术娴熟的例证；这个理论的物理基础早先由一些研究者制定，但本质上缺乏定量理论。这项研究提供了数学工具，成为该领域以后所有工作的基础。朗道本人参与了簇射理论的进一步完善，他又贡献了两篇文章，一篇关于粒子角分布<sup>[43]</sup>，另一篇关于二次簇射<sup>[44]</sup>。

朗道致力于阐述费米关于碰撞中产生多个粒子的统计性质的思想，同样是技艺精湛<sup>[74]</sup>。这项研究也代表了一种光辉的范例，一个理论物理学方法论统一的例子，其中一个问题使用的解决方法来自于看似完全不同的另一个领域。朗道证明，多个粒子的产生过程包括一个“云”的扩展阶段，它的尺寸远大于粒子的平均自由程；相应地，这个阶段应该用相对论流体力学方程来描述。这些方程的求解需要许多天才的技术和彻底的分析。朗道曾经说过，他在这项研究里付出的努力比他解决的任何其他问题都多。

朗道总是乐于回应实验者的要求和需要，例如，通过发表文章<sup>[56]</sup>，确定了快速粒子在通过物质的过程中，电离损失的能量分布(以前只存在平均能量损失理论)。

现在谈谈朗道关于宏观物理学的工作，我们从代表他对磁性物理学贡献的几篇文章开始。

根据经典力学和统计，自由电子在磁场中运动模式的变化不能导致系统出现新的磁性质。在量子情况下，朗道首次阐明了这种运动在磁场中的特性，表明量子化完全改变了经典的情况，使得自由电子气出现了抗磁性(这种效应现在被称为“朗道抗磁性”)<sup>[4]</sup>。当磁场强度很高时，同一项研究定性地预测了磁化率对磁场强度周期性的依赖关系。在当时(1930年)，这种现象还没有被任何人观察到，后来才被实验发现了(De Haas—van Alphen效应)；在后来的一篇文章<sup>[38]</sup>里，朗道提出了这种效应的定量理论。

1933年发表的一篇通讯<sup>[12]</sup>的意义远远超过了其标题所述的问题——对某一类物质在低温下磁化率的磁场依赖性的一种可能的解释。这篇文章最早介绍了反铁磁性的概念(虽然没有使用这个术语)，作为磁性物体的特殊相，在对称性上与顺磁相不同；因此，从一个状态到另一个状态的转变，必然发生在一个严格确定的点上<sup>10)</sup>。这篇文章考察了特定模型，研究了一种具有强铁磁耦合的层状反铁磁体，并对它进行了定量研究，建立了相变点附近磁性能的特征。朗道在这里采用的方法是基于他随后在二级相变的一般理论中阐述的想法。

另一篇论文涉及铁磁性理论。铁磁体结构的概念是由不同方向自发磁化的基本区域(磁畴，正如现代术语所说的那样)组成的，早在1907年就由外斯(P. Weiss)表达过。然而，对于这种结构的定量理论问题还没有合适的解决方法，直到朗道(与E. M. Lifshitz合作)在1935年表明，

9) 萨拉姆以及李政道和杨振宁同时独立地提出了这个理论。

10) 大约一年以前，奈尔(Néel)预测了一种物质存在的可能性(朗道不知道他的工作)，从磁学的角度来看，这种物质由具有相反磁矩的两个子晶格组成。然而，奈尔并没有假设这里涉及一种特殊的物质状态，他只是简单地认为，在低温下具有正交换积分的顺磁体逐渐变成由几个磁性子晶格组成的结构。

这个理论应该在热力学的基础上考虑,并确定了典型情况下畴的形式和尺寸。同样的研究得出了磁畴磁化矢量的宏观运动方程,并由此发展了铁磁体磁导率在交变磁场中的色散理论;特别是,预测了现在称为铁磁共振的效应。

1933年发表的一份简报<sup>[10]</sup>表达了一种想法,电子在晶格中的“自局域化”可能来自于电子本身的极化效应产生的势阱。这个想法为离子晶体电导率的极化子理论提供了基础。在后来的一项研究中,朗道自己又回到这些问题(与S. I. Pekar合作)<sup>[67]</sup>,讨论了极化子在外场中运动方程的推导。

另一份简报<sup>[14]</sup>报道了朗道(与G. Placzek合作)关于液体或气体中瑞利散射谱线结构的结果。早在1920年代初期,布里渊(Brillouin)和曼德尔什坦(Mandel'shtam)表明,由于声音振动的散射,这条线必须分裂为双重线,朗道和Placzek提请注意存在熵涨落散射的必要性,而不是伴随着频率的任何变化;因此,应该观测到三重态,而不是双重态<sup>[11]</sup>。

朗道的两项工作与等离子体物理有关。其中之一<sup>[24]</sup>是首次推导出考虑粒子间库仑相互作用的输运方程;这些力减小得很慢,传统的方法不适合构造这种情况下的输运方程。另一项工作<sup>[61]</sup>处理等离子体振荡,表明即使在等离子体中粒子之间的碰撞可以忽略的条件下,高频振荡仍然会减弱(“朗道阻尼”)<sup>[12]</sup>。

他编写多卷本的《理论物理学教程》其中一卷的工作,激励他彻

底地研究流体力学。很有朗道的特色,他独立思考并推导出了这个科学分支的所有基本概念和结果。特别的,他新鲜而原创性的看法,开创了一种处理湍流开启问题的新方法,他阐明了这个过程的基本方面,随着雷诺数的增加,非定常流动逐渐发展,层流运动失去稳定性,并在这种情况下预测了在定性上不同的替代方案<sup>[52]</sup>。通过对超声速绕体流动性质的研究,他得出一个出乎意料的发现:在超声速流动中,远离物体处必然存在两个冲击波,一个跟着另一个<sup>[60]</sup>,而不是像传统的假设那样只有一个。即使在射流理论这样的“经典”领域,他也成功地为粘性可压缩流体的轴向对称“淹没”射流找到一个新的、先前没有注意到的精确解<sup>[51]</sup>。

在朗道的科学成就里,无论从直接意义的角度还是从随后物理应用的角度来看,二级相变理论都占据了突出的位置<sup>[29]</sup>;这个理论基础思想的第一个大纲已经包含在早期的通讯里<sup>[13]</sup><sup>[17]</sup>。不同级相变的概念最早由埃伦菲斯特(Ehrenfest)以一种纯粹形式的方法引入,热力学量的第几阶导数在相变点可能出现不连续。究竟哪些相变可以在现实中存在,其物理性质是什么,这个问题仍然悬而未决,以前的解释相当模糊,也没有根据。朗道最先指出,在物体状态变化的意义上,连续相变和跳跃式(不连续的)相变存在的可能性,与物体的某些对称性在相变点的变化有深刻的联系。他还指出,在这个相变点,远远不只是发生任何对称性的变化,并提供了一

种方法,使确定对称性变化的允许类型成为可能。朗道发展的定量理论是建立在相变点附近热力学量展开的规律性假设的基础上的。现在很明显,这样一种理论由于没有考虑到这些量在相变点可能存在奇点,因此不能反映相变的所有性质。朗道对这些奇点的性质问题非常感兴趣,在工作的最后几年里,他在这个难题上做了许多工作,但没有成功地得到任何明确的结论。

朗道(与金兹堡(V. L. Ginzburg)合作)于1950年发展的超导唯象理论<sup>[73]</sup>也是在相变理论的精神下构建的;特别是,后来它成为超导合金理论的基础。这个理论涉及到许多变量和参数,其含义在当时还不完全清楚,只有在1957年出现了微观超导理论以后,才被严格地发展和理解,这使得金兹堡—朗道方程的严格证明和其适用范围的确定成为可能。在这方面,朗道和金兹堡的原始论文包含了一个错误的陈述,这个故事(金兹堡的回忆)很有教育意义。该理论的基本方程定义了超导电子的有效波函数 $\Psi$ ,其中包含磁场的矢量势 $A$ ,

$$\frac{1}{2m} (-i\hbar\nabla - \frac{e^* A}{c})\Psi,$$

完全类比于薛定谔方程中的相应项。你可能认为,在唯象理论中,参数 $e^*$ 应该代表某个有效电荷,与自由电荷 $e$ 没有直接关系。但是,朗道反对这个假设,指出有效电荷不是普适的,而是会依赖于各种因素(压力、试样的组分等);在不均匀的试样中,电荷 $e^*$ 是坐标的函数,这将破坏理论的规范不变性。

11) 从未以文章的形式详细阐述过这个研究的结论和结果。在朗道和栗弗席兹的著作《连续介质电动力学》的第96节有部分介绍。

12) 有趣的是,朗道做这项工作的原因是,他对此前关于这个主题的研究中提出的“语言学”作出了反应(例如,不合理的替换发散积分的主值)。为了证明自己是正确的,朗道开始认真思考这个问题。

13) 朗道本人把这个理论应用于晶体对X射线的散射<sup>[32]</sup>,并与I. M. Khalatnikov合作,应用到相变点附近的声音吸收<sup>[82]</sup>。

因此, 这篇文章指出, “……没有理由认为 $e^*$ 的电荷与电子电荷不同”。我们现在知道,  $e^*$ 实际上与库珀电子对的电荷相同, 即 $e^*=2e$ 而不是 $e$ 。当然, 这个 $e^*$ 的值只能根据电子配对的想法来预测, 而这是超导电性的微观理论的基础。但是数值 $2e$ 和 $e$ 一样普适, 因此朗道的论点本身是有效的。

朗道对超导物理学的另一个贡献是阐明“中间态”的性质。这种状态的概念首先由Peierls和F. London(1936年)引入, 用来解释观察到事实, 即在磁场中向超导状态的转变是渐进的。然而, 他们的理论纯粹是唯象的, 仍然没有回答中间态性质的问题。朗道证明了这种态不是一个新的态, 实际上, 这种态的超导体由正常相薄层和超导相薄层交替组成。1937年, 朗道<sup>[30]</sup>考虑了一个模型, 这些层出现在样品表面, 他用一种优雅而巧妙的方法, 成功地在这个模型中完全确定了薄层的形状和尺度<sup>[14]</sup>。1938年, 他提出了该理论的一个新变体, 根据这种理论, 薄层不停地分叉、向表面延伸, 对于尺寸足够大的样本, 这样的结构应该在热力学上更有利<sup>[15]</sup>。

但是, 朗道对物理学最重要的贡献是他的量子液体理论。这门新学科的重要性目前正在稳步增长; 毫无疑问, 它在近几十年的发展也对物理的其他领域产生了革命性的影响——对固体物理学, 甚至对核物理学。

超流理论是朗道在1940—1941

年创立的, 在卡皮查于1937年底发现了氦II的基本性质之后不久。在此之前, 理解在液氦中观察到相变的物理性质的前提条件基本上是缺乏的, 因此, 现在看来, 以前对这个现象的解释甚至是幼稚的<sup>[16]</sup>。值得注意的是, 朗道从一开始就建立起氦II理论的完整性: 他关于这个主题的第一篇经典论文<sup>[46]</sup>实际上已经包含了氦II的微观理论和在其基础上构建的宏观理论——这种流体的热力学和流体力学——的几乎所有主要思想。

朗道理论的基础是构成氦II能谱的准粒子(基本激发)的概念。事实上, 朗道是第一个以一种非常普遍的形式提出宏观物体的能谱问题的人, 也是他发现了液氦( $\text{He}^4$ 同位素)所属的一种量子流体(现在称为玻色型)的能谱性质。在他1941年的工作里, 朗道认为基本激发谱由两个分支组成: 声子, 其能量 $\varepsilon$ 线性依赖于动量 $p$ ; “旋子”, 具有二次依赖关系, 通过能隙与基态分离。随后他发现, 从理论的角度(因为它不稳定)和对到那时为止的更完整、更准确的实验数据的仔细分析来看, 这种能谱形式无法令人满意, 因此他在1946年建立了现在著名的能谱, 只有一个分支, 而“旋子”对应于 $\varepsilon(p)$ 曲线上的最小值。超流体理论的宏观概念是众所周知的。基本上, 它们简化为在流体中同时发生的两种运动——“正常”运动和“超流”运动, 这可以视为两种“流体组分”的运动<sup>[17]</sup>。正常

运动伴随着内摩擦, 就像在常规流体里一样。粘度系数的确定是一个动力学问题, 需要分析“准粒子气体”中出现平衡的过程; 1949年朗道(与I. M. Khalatnikov合作)发展了氦II粘度理论的原理<sup>[69, 70]</sup>。最后, 还有一项研究(与I. Ya. Pomeranchuk合作)<sup>[64]</sup>讨论了氦中外来原子的行为问题, 特别是, 无论杂质物质本身是否具有超流性, 任何这类原子都将成为流体“正常成分”的一部分——与以前在文献中持有的不正确的观点相反。

液态同位素 $\text{He}^3$ 是另一种类型的量子液体(现在称为费米型)。虽然它的性质不像液体 $\text{He}^4$ 的性质那么引人注目, 但是从基础理论的角度看, 它们的有趣程度并不亚于液态 $\text{He}^4$ 。朗道提出了一种液体理论, 并在1956—1958年发表了3篇论文。前2篇<sup>[90, 91]</sup>建立了费米液体能谱的性质, 考虑了它们的热力学性质, 并为这些液体中发生的弛豫过程建立了动力学方程。根据他对动力学方程的研究, 朗道预测了液体 $\text{He}^3$ 在绝对零度附近的一种特殊类型的振动过程, 并称之为“零声”。第3篇文章<sup>[95]</sup>对输运方程进行了严格的微观证实, 而早期的推导包含了许多直观的假设。

总结完这个简短而不完全的评述, 还需要再说一遍: 对物理学家来说, 不需要强调朗道对理论物理学贡献的重要性。他的成就具有持久的意义, 并将永远成为科学的一部分。

14) 朗道本人在关于这件事的文章中写道: “令人惊讶的是, 能够精确地确定薄层的形状。”<sup>[30]</sup>

15) 这项工作的详细描述发表于1943年<sup>[49]</sup>。

16) 因此, 朗道在他关于相变理论的工作<sup>[29]</sup>中考虑了氦II是否是液晶, 尽管他强调了这个假设的可疑性。

17) L. Tisza独立于朗道, 提出了液氦的“两组分”宏观描述的一些思想(但没有提供清楚的物理解释)。1940年他在法国发表了一篇详细文章, 由于战时的条件, 直到1943年才在苏联收到, 不幸的是, 1938年在巴黎科学院的《法国科学院通报》中的简短说明也没有被注意到。朗道在文章<sup>[66]</sup>中在定量方面对Tisza理论提出了批评。