

# 从朗道学派看物理学教育

廖玮

华东理工大学物理学院

“物理学家与物理学史”春季研讨会

中国高等科学技术中心

2024年5月20日

探究物理学历史的人可能有多种不同的想法！

至少对很大一部分物理学家而言，一个非常重要的目的是：

物理大师如何思考问题？

物理大师如何教导学生？

我们可以学到什么？

朗道以及朗道学派的成功是物理学研究和探索的成功典范！

朗道学派有3位理论物理学家获得过诺贝尔物理学奖。

理论物理的最高奖狄拉克奖章，自1985年第一次颁奖开始至2022年，共颁奖38次，其中俄国人获奖11次，共有15人获奖。在获得狄拉克奖章的这15人之中，可以算入朗道学派以及朗道学派的徒子徒孙的人占了绝大多数（11人）。

苏联在实验物理上有不少成就，但是远谈不上是世界实验物理的中心。

然而，苏联的理论物理却能在远离实验科学中心、相对封闭的环境里取得与美国比肩的成就。这是物理学历史上一个非常异常的突出例子！

Sidney Coleman说俄国人像飞机（人类历史上的奇迹）！也许不算夸张！

为什么谈论朗道、朗道学派？

一方面，朗道和朗道学派非常有趣！

另一方面，不仅仅有趣！

个人的成功可能有很大的偶然因素，可能因为天赋极其出众。

一大批人的集体成功必定不是偶然的，必定有其成功的（教育）方法！

朗道以及朗道学派极其成功的物理学教育可以极好地展示物理学的思想方法的特色，有很多生动的故事，不仅对于物理学研究，而且对于所有不同程度的物理学教育，都可以给人以很多启发！

当然这也可以启发人们怎样去学习物理！

不仅仅是针对学习理论物理！

内容：

一、 导言

二、 朗道的工作方式与朗道学派的物理学教育

三、 物理学思维的特色

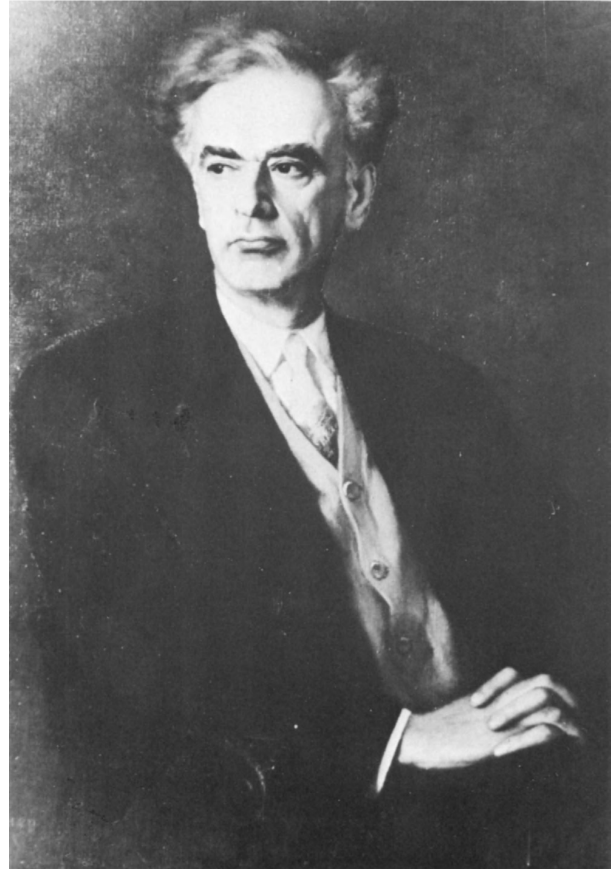
四、 物理学教育和物理学习

五、 结语

## Lev D. Landau

一位伟大的物理学家，  
一位伟大的教师，  
一位特立独行的奇人

有很多故事可以说明  
朗道的特立独行



朗道把理论物理学家分成5个等级(5 classes)

牛顿和爱因斯坦是 0.5等

麦克斯韦、玻尔、海森堡、狄拉克、薛定谔、泡利、玻尔兹曼等人是第1等

费米是1.5等

他先把自己列为2.5等，  
后来在50年代把自己列入第2等

人们常说朗道非常狂妄、非常挑剔，  
但是另一方面也可以说朗道也谦逊，他对自己也很挑剔！

他认为自己与第1等的理论家相比，还差得很远。

他认为自己以数学方法解决问题的能力是无与伦比的，但是自己的直觉不够，  
认为自己没有爱因斯坦、玻尔、海森堡、狄拉克具有的直觉。

他很可能低估了自己的能力。

Isaak Pomeranchuk 曾经劝Landau去研究量子电动力学，说这里面的基本问题（例如紫外发散）是只有你这种人才能解决，朗道却说解决这类问题超出了他的能力，他不探讨这种问题。

相反，他却把精力基本都集中在一些很具体的问题上，如超流、超导、金属的性质、天体物理等。



朗道在1930年代初曾经研究过量子电动力学

他在访问苏黎世泡利研究组期间，与Rudolf Peierls(当时泡利的研究助手)合作做了一个关于量子电动力学中测量问题的的工作，之后去找玻尔讨论，临行前泡利说你们将会与玻尔发生一场大战 (more than a war)

Rudolf Peierls战斗了4天，受不了先走了，朗道与玻尔激战了21天，激战过程中，有时去电影院看 stupid movie 放松一下。

Gamow画了一副漫画描绘这场激战，朗道蜷缩在椅子上，经受玻尔的猛烈抨击。

朗道视玻尔为导师，也许朗道从这种激烈争论中学到很多！

这些故事当然很有意思，是很好的谈资

同时这些故事也可以说明了朗道的一些重要特色：

- 1) 极好争辩
- 2) 极其挑剔，不仅对别人，也对自己
- 3) 极其重视直觉

还有一个特色：

- 4) 极其唯象

## I. L FABELINSKI I 回忆与朗道讨论自己的一个实验及其物理:

“他坐在角落里的沙发上，请我坐下，准备听。考虑到这次谈话，我决定从我们的公式开始，然后描述我们无法理解的结果。但事情却变得截然不同。我刚说到公式，朗道就阻止了我：“不需要公式。你的实验表明了什么？让我们理解它，然后再找到一个公式。”……朗道聚精会神地听着，看了看论文，说：“这种测定是可能的，现在我们知道怎么做了，我们可以把公式写下来了。”然后他让我大吃一惊。他伸手拿起桌子上的一张小纸条，拿起一支铅笔，在纸上写下了我一开始想要告诉他的公式。”

朗道有一种由实验结果直接“看出”理论公式的能力。

I. E. DZYALOSHINSKII 对于朗道研讨会的记述与此类似：

“这的确是一种痛苦。在那个遥远的年代，《物理评论》还没有分成不同系列，每一期的大小大约是现在B系列或D系列的，站在黑板前的人代表这期杂志的每一位作者发言，理想情况下，他有义务对所陈述的每一个结果提出证明或反证。一半，涵盖了物理学的整个主题：固体物理学、核物理学、基本粒子物理。幸运的是，朗道的天才和独特的科学风格拯救了演讲人。他总是能记住作者的结论（演讲者必须以结论开始），在大多数情况下，他能立即判断黑板上的公式是否正确。同时，如果他愿意的话，他还可以说明如何推导出这个正确的公式。最后他失去了兴趣，讨论也就结束了。人们又可以呼吸了。”

在朗道的研讨会上，综述报告的报告人被要求先介绍结果，然后再介绍其他。在介绍和讨论过程中，朗道可能直接重复出论文的理论公式。与I. L FABELINSKII的故事一致。

魔术般的思维方式！

很难知道这种本事是如何练出来的。  
但是直觉在其中必定起到了极端重要的作用。

而且，朗道的直觉不仅仅是物理图像的直觉。

朗道可以从一些实验结果出发，直接猜想得到理论公式。  
这是一种比常说的直觉更进一步的能力。

理论物理学家有多种类型，  
有些很有直觉，很有原创性，但是不太擅长发展数学表述；  
有些擅长数学表述，但是不太有原创性，需要借助别人创造的概念来思考问题；  
还有兼善这两个方面的大物理学家。

朗道有这个能力独立完成：建立直觉、然后根据直觉建立数学表述

而且朗道很自觉地先通过直觉先达到答案，再去论证，这是朗道的一个重要特色。

朗道的学生 Boris Ioffe 曾经说起这种思维特色：

“这种从一开始就预测结果的努力是典型的朗道的思维方式，他自己对其表达如下：“你怎么能在事先不知道答案的情况下解决问题呢？””

当然直觉只是一个步骤，下一步还需要达到坚实的数学表述

M. I. Kanagov说起朗道的这种思维方法：

“即使在最复杂的问题上，他也能出色地猜测出结果，但他要求每个人的结果都具有最严格的可证明性，当然也包括他自己的结果。“猜测”，或直觉论证，只适合作为一个粗略的指导和达到问题的严格表述的必要步骤”。

朗道的严格性 (rigor) 与常说的数学严格性 (mathematical rigor) 也是不同的

他说的还是物理学家的 rigor, 实际上要远弱于 mathematical rigor

Rudolf Peierls 说起朗道的这种倾向:

“直觉对他来说是一个重要的工具, 尽管他在数学上解决问题的能力很强。他认为为直觉上显而易见的陈述寻找严格的证明是迂腐和不必要的。如果有人抱怨他所依赖的东西不明显, 他会说, 或者至少暗示说: “好吧, 如果这对你来说不明显, 你就不应该成为物理学家。”这种态度甚至在其优秀的《理论物理课程》中也有影响, 有时会使羞怯的读者感到气馁, 尽管它有助于避免那些可能使人只见树叶不见树木的形式上的细节。”

很难知道朗道怎么练出这种本事。

当然和天赋有关，但是这也必定和后天的训练方法有关。

一个很可能相关的锻炼方法：朗道基本上不读文献，他只是读论文的大意（主要思路和结论），然后以自己的方法重复论文的内容，在朗道的研讨会上，朗道实际上就是以这种方式思考问题。

Rudolf Peierls 对朗道的这种思想方法有一些记述：

“他很少细读理论物理方面的论文，但他会花足够的时间来观察这个问题是否有趣，如果有趣，作者的方法是什么。然后他开始自己做计算，如果答案与作者的一致，他就同意了这篇论文。”

这个所谓不读文献 应该是在朗道完成了他自己的物理学教育之后的事情



朗道这种直接面对实验，直接解释实验的倾向，很难不发展出强烈的唯象倾向。

Yakov. B. Zeldovich回忆说：

“N. N. Bogolyubov关于超流动性理论的杰出工作涉及到一种原子是纯排斥性的气体，因此不能立即应用于液氦。这导致朗道发展了一种液氦性质的现象学(而不是微观)理论。我还记得大概是在20世纪50年代，在物理问题研究所的一次研讨会上，朗道特别坚持认为神只创造了一种超流体。我不保证引用的准确性；也许是大自然，而不是神。我清楚地记得一般的意思，这种情况使得有必要研究这种液体的性质，而不是问超流动性本身的起源是什么。但我还记得当场从已故的Obreimov院士来的一句评论：氦有两种稳定的同位素，氦3和氦4。所以有一个问题是两者是否都是超流体，比较应该揭示玻色凝聚的作用。”

这段话展现了朗道非常强的唯象学倾向（与还原论的思维倾向不同）：

需要去研究液氦的性质，而不去问超流的原因是什么！

这种思想方法特别明显地反映在  
描述超导现象Ginzburg-Landau理论（宏观理论）上

Tinkham, Introduction to Superconductivity

When first proposed, the theory appeared rather phenomenological, and its importance was not generally appreciated, especially in the western literature. However, in 1959, Gor'kov<sup>22</sup> was able to show that the GL theory was, in fact, a limiting form of the microscopic theory of BCS (suitably generalized to deal with spatially varying situations), valid near  $T_c$ , in which  $\psi$  is directly proportional to the gap parameter  $\Delta$ . More physically,  $\psi$  can be thought of as the wavefunction of the center-of-mass motion of the Cooper pairs. The GL theory is now universally accepted as a masterstroke of physical intuition which embodies in a simple way the macroscopic quantum-mechanical nature of the superconducting state that is crucial for understanding its unique electrodynamic properties.

金兹伯格-朗道理论现在被普遍认为是物理直觉的神作，它以一种简单的方式体现了超导态的宏观量子力学性质，这对于理解其独特的电动力学性质至关重要。

超导是金属中的电子导致的效应，电子是费米子

但是朗道关于超导现象的宏观理论是一个关于玻色场的理论。

这个理论很生动地反映出：

朗道的研究是创造概念描述现象，而不是把自己局限在基本概念之上。

后来，在BCS理论发明之后，人们发现可以使用费米子凝聚的概念推导出Ginzburg-Landau理论，但是这是后来的事情。

在成功的微观理论被发明出来之前，朗道创造出了可以很好地描述现象的宏观理论。

这些故事并不是要说直觉总是对的，相反直觉常常会犯错，包括朗道。但是，没有直觉寸步难行，连犯错的机会都很难有(not even wrong)

在其20多岁，成名不久之后，朗道就立志要全面改造苏联的物理学教育

他曾计划撰写

大学普通物理教程、  
训练理论物理学家的理论物理教程、  
给物理系学生用的数学教材，  
甚至中小学教材

最终完成的只有十卷本理论物理教程

朗道制定了一个“**理论物理最低标准**”大纲 以及 实验物理的大纲  
大纲中包括一系列的阅读材料（综述文章和书，需要掌握的知识点）

有很多人写信给朗道，询问该如何学习物理、学什么，朗道会把大纲寄过去

例如一个技术学院的学生写给朗道，抱怨学了很多但是还有更多，很失落：……  
朗道的回答是

亲爱的B同志

你显然很认真地对物理感兴趣，我急切地想要帮助你。你很好地懂得，在科学领域工作，你需要学习很多东西。

至于你应该学什么，这在很大程度上取决于你未来的计划。关键是现代物理学家分为两类——理论家和实验家。理论家们用笔在纸上写下公式，实验家们在实验室里用仪器工作。很自然，这两个专业所需要的教育是不同的。很明显，理论家需要一个更彻底和深刻的理论基础，尽管实验家当然也必须知道很多。

因此，考虑一下这个问题，写信告诉我你的意愿。我很乐意寄给你合适的大纲，在你学习完这些材料之后，我想你就会做好准备开始工作了。

致以最美好的祝愿

朗道

一所教育学院的一名学生写信给朗道，收到了如下答复：

“你热切地想从事物理学是很好的，因为对科学的热爱是通向成功的第一个通行牌。幸运的是，理论物理是一门完全不需要强制学生上大学的科学。我在这封信里附上了一个大纲。遵照这个大纲，你将获得足够的理论知识，使你能够进一步独立工作。记住，精通数学是特别重要的。数学的主要分支在大纲的导言部分提到。

如果您能够并且愿意的话，请到莫斯科来，我的同事或我可以从大纲的各个部分(共有九个部分，包括数学)对你进行考察。如果你成功了，我希望能帮助你找到一个从事理论物理工作的机会，即使你不是从莫斯科大学毕业，而是从图拉教育学院毕业。

确切地说，这就是全部。我衷心祝愿你成功。记住，在科学中最重要的是工作，其余的自然会来到。”

理论物理最低标准大纲包括9个部分，两门数学，七门物理（力学、场论、量子力学、统计物理、连续介质力学、宏观电动力学和相对论量子理论）

按照大纲学习的学生可以给朗道打电话约其考试

首先是入门数学考试

“列夫·达维多维奇首先对每位考生进行数学“实用”和计算方面的测试。测试要求具备以下能力：计算任意不定积分（可以用初等函数表示）和解任意标准型常微分方程的能力，以及矢量分析和张量代数的知识。第二次数学考试包括复变函数理论的原理（余数理论、拉普拉斯方法）。其中的设想是，像张量分析、群论等的训练，将与它们所应用的理论物理分支一起学习。”

通过入门考试后 再继续各门考试

朗道以这种方式广泛散发

其对于物理学家该接受哪些训练以及该接受怎么样的训练的看法

考虑到其考核范围如此之广，考题又有相当的难度，这样的考试当然是很难的！

但是，实际上根据Aleksei Abrikosov 等人的回忆，朗道的理论物理考题是有限的，考生通过之前的考试结果基本上知道都有哪些考题，**也就是说这个考试到后来实际上是接近于开卷的。**

Abrikosov回忆自己主持考试的时候试图更改试题，避免考题泄漏的结果，但是遭到朗道的斥责，要他改回固定的试题范围，他回忆说：

“碰巧我是朗道最后一个博士学生，而且似乎也是最后一个由他亲自主持理论物理最低标准考试的学生。后来，情况发生了变化，从那时起，研究生被分配给他的同事：Lifshitz, Khalatnikov和我，尽管他自己也给他们出主意。我们也开始管理考试。当时，莫斯科物理技术学院的学生成群结队而来。**我们很快就意识到学生们只是互相抄袭考试中的几道题，然后我设计了一个复杂的复积分，使这样的作弊失败，对此我感到非常自豪。当我把这件事告诉朗道时，他责备我，要求我们回到他的标准试题。**“但是，Dau”我反对说，“这些什么都不是，他们不会知道别的。”他回答说：“他们不需要知道别的。”



朗道的一个早期学生Ya. A. Smorodinskii曾经说起他参加的理论物理考试，他说：

“1939年秋天，我成为了一名博士生。我必须通过理论物理最低标准考试，这是一个很难的测试，在两三个月内要通过八门考试(我通过了一门入学考试)。起初我以为考试本身并不难，但每次都发现朗道的物理和大学里的完全不一样。朗道似乎都是用一种完全不同的语言说话、思考和提问……每次考试都带来了意想不到的发现。在场论的考试中，我必须推导出两个电子相互作用的Moller公式。我几乎熟记Heitler那本广为流传的关于辐射量子理论的书，很快就写下了好几页公式。然而，我听到的不是预期中的肯定，而是一句困惑的话“你在干什么？”我为Heitler的辩护失败了，还接受了一个关于明智的人如何解决这类问题的简短演讲。然后我意识到朗道指的是Sommerfeld的半经典方法。Klein-Nishina公式最初就是用这种方法推导出来的。事实上，使用麦克斯韦方程计算由跃迁电流(场中的电子)引起的辐射场，可以更快地得到答案。朗道不喜欢任何不必要的数学复杂性。但是，如果没有新的数学工具问题就无法解决，他随时都可以使用新的数学工具。Klein-Nishina公式由I. E. Tamm(Lanczos独立地)使用量子电动力学的方法推导出来，但直到多年后物理学家们将注意力转向辐射修正时，才需要这种严格的方法。”

只是把题做对了、做出了正确结果，不一定会通过考试，需要做得漂亮才行

朗道的考试主要是考察是不是能够用合适的方法把问题做对。

量子电动力学的方法是基本的，索末菲的方法是半经典的，不够基本

但是如果可以使用不够基本的半经典方法迅速得到相关的物理量，没有必要使用量子电动力学的方法用一大堆理论工具去做繁琐的计算得到结果，只有在老的理论工具无法处理相关问题或者处理相关问题过于繁琐的时候，才使用新的概念和新的理论工具。

简单地说，得到正确答案的方法可能有很多种，物理学家应该学会采取明智的方法迅速得到答案，朗道的考试实际上考察的是这个方面。

朗道似乎是用一种完全不同的语言说话、思考和提问

但是，这只是和一般的教科书讲述的方式不同的方式，实际上却是物理学家研究物理思考物理的实际思维方式。

成功建立起来的物理学大厦有一些基本原理、基本概念和基本的方法，学会从基本概念基本原理出发考虑问题当然是非常重要的一般的教科书基本上以这种演绎方式讲授物理。

但是，如费曼有句话所说：**总是从公理出发的方法在获得定理时的效率不太高。**

如果一个人只是学会了以基本概念基本原理来考虑问题，**那可以相当明确地说 这个人学的是相当笨重的物理！**

如果在学会基本原理的同时还学会了以很多捷径（shortcut）来讲述物理和解决实际问题，那么以这种方式学会的物理才是丰富的物理！  
这也是极其有趣的物理！**物理直觉常常从这种思考中建立！**

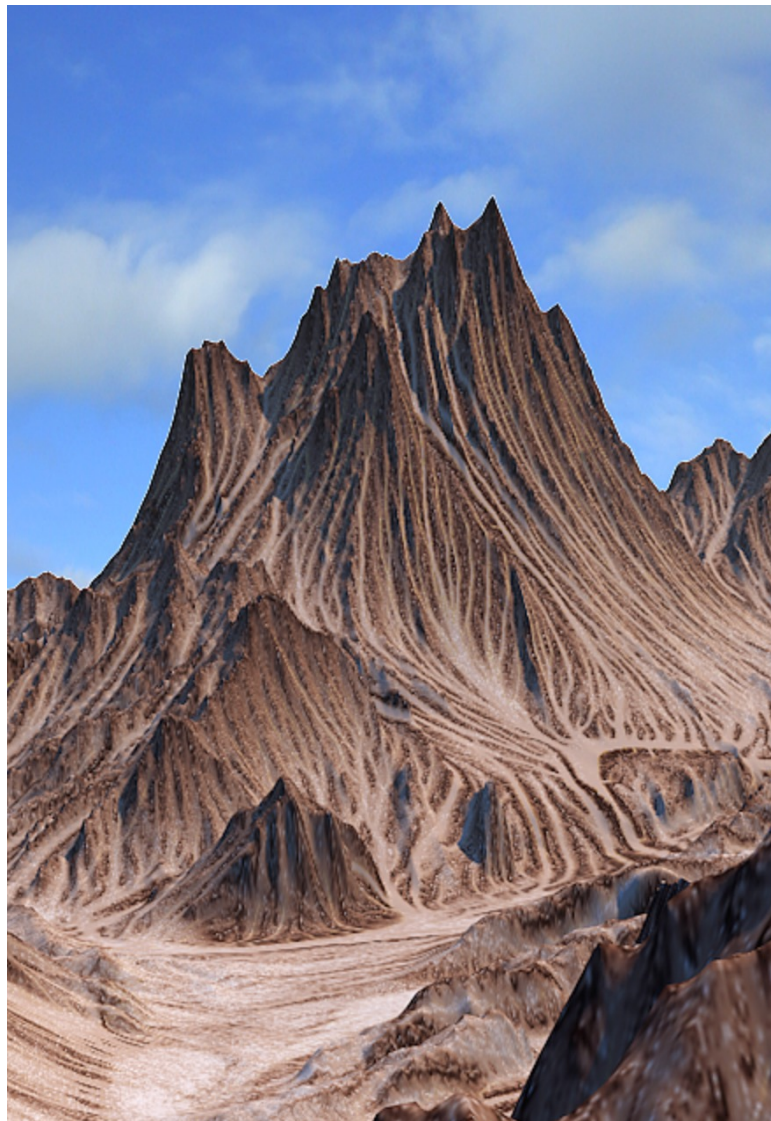
总是从最基本原理出发的想法相当于，要到达山峰的任何一个地方，都先到达山顶，再从山顶出发

但是更加快速的方法是绕着山腰走，这就相当于并不总是从基本原理出发

很明显上一种走法是普遍有效的，但是是相当笨的方法，实际上也是苦力活

下一种方法没有普遍有效的走法，而且需要很多思考

但是如果一个人对物理问题总是能够找到快速通向答案的方法，我们会说这是一个聪明人，学会了聪明的丰富的物理



朗道还以其研讨会给他的学生极强的唯象学训练。

朗道的研讨会也是极具综合性的！

Boris L. Ioffe回忆说：

“成为朗道的弟子并不意味着特权，只意味着义务。这是因为任何人都可以和朗道进行科学讨论，并得到他的建议。此外，在那些通过了朗道最低要求考试的学生中，只有少数人成为了他的研究生(我没有)。朗道的学生享有参加朗道研讨会的全部权利。但是，同样，任何人都可以参加他的研讨会、提问和发言。具有“完全的权利”的与会者的义务是按字母顺序定期准备讨论会的综述报告。每次研讨会结束后，朗道都会拿起最近一期的《物理评论》(当时还没有分册)，向未来的演讲者指出他应该在研讨会上报告哪些论文。通常，他会从物理学的各个分支中挑选十几篇这样的论文。大多数情况下，它们都是实验性的，或者是半理论半实验的。有时，也可以是简短的理论论文，如致编辑的信等。演讲者不仅要回顾这篇论文，即陈述它的基本思想和最终结果，而且应该很好地理解结果是如何得到的，向听众展示和解释所有必要的公式，包括实验技术，并对结果是否可靠有自己的看法。简而言之，演讲者对所报告的论文(以及其中的错误!)几乎要负同样多的责任，就好像他是作者一样。如我已经提到过，这些论文的主题非常广泛——从粒子物理和核物理到金属和液体的性质。”

朗道的学生的义务是在朗道研讨会上轮流做综述报告，

报告主题可以从粒子物理核物理跨越到固体物理凝聚态物理

此外报告的论文主要是关于实验，偶尔才涉及理论论文，这是非常强的唯象训练！

朗道设计的理论物理最低标准大纲和考试是极其全面综合的。

朗道为什么要求其学生学习全面的理论物理知识？

朗道认为理论物理是一个整体，应该有**统一的语言、统一的方法**，

E. M. Lifshitz说：

“成功的申请人可以接着开展理论物理最低标准考试的七个连续部分的学习，其中包括理论物理所有领域的基本知识，然后进行适当的考试。在朗道看来，任何理论家都应该掌握这些基本知识，而不管他将来的专业是什么。当然，他并不指望任何人能像他自己一样通晓科学。**但是，他以这种方式表明了他对理论物理学作为一门具有统一方法的单一科学的完整性的信念。**”

Vitalii L. Ginzburg也表达了这种看法：

“值得一提的是，与光学物理学家、声学物理学家、无线电物理学家、核物理学家等大多数其他类型的物理学家相比，“理论物理学家”涵盖的范围尤其广泛。这是合理的，因为理论物理渗透在整个物理学中。一个结果是，理论物理学家(或者更确切地说，那些被描述和被认为是理论物理学家的人)经常不能很好地理解彼此，因为有时他们在工作方式、使用的数学方法等方面有很大的不同。**然而，如果他们才是真正的物理学家，他们分享理论物理学作为他们的共同语言。**”

朗道对其学生的物理学教育：

全面的理论基础训练

深入的唯象学训练：研究实验、对实验做综述报告

在其研讨会上展示 直觉思维和以数学表述解决问题的强大能力和魅力

所有这些谈到的故事、训练大纲都是与物理学研究的相关的东西，  
好像与物理教学和物理学习没什么关系

实际上当然是有关的，这些提及的内容涉及到对于物理学的认知

## 物理学思维的特色

### 《两大世界体系的对话》第一天对话

“辛普利邱：亚里士多德是先用演绎法建立他的论据根据，通过自然的、明显的、明确的原则说明天必然是不变的。他后来又用归纳法从我们的感觉经验和古人的传统来证明同一论断。

萨尔维阿蒂：你指的是他著书立说时所使用的**方法**，但我不相信这是他考察问题的方法。**我比较敢于肯定，他首先是通过感觉、实验和观察所得的结果，尽可能地弄清自己的那些结论无误，以后他才设法加以证明。在实验科学里，大部分都是这样做的。**所以如此，是因为当结论是真实时，人们就可以通过分析方法探索出一些已经证实的命题，或者找到某种自明的公理；但如果结论是错误时，人们就可以永远探索下去而找不到任何已知真理……”

伽利略在这段话中说出了他自己以及实验科学如何思考问题的方式：

**先归纳再演绎**

或者说 **先直觉再推理**，或者说**先猜到结果再去证明**



## 一个例子

《对谈》花了大量篇幅讨论不同物体在空气、水、水银等不同媒质中的受力和运动。

伽利略注意到具有不同比重的物体在不同媒质中表现出不同的运动，他借萨尔维亚蒂之口总结相关的实验和观察并做出了猜想：

“萨尔维亚蒂：……我们已经看到，不同比重的物体之间的速率差，在那些阻滞性最强的媒质中最为显著；例如，在水银这种媒质中，金不仅比铅更快地沉到底下，而且还是能够下沉的唯一物质，所有别的金属，以及石头，都将上升而浮在表面。另一方面，在空气中，金球、铅球、铜球、石球以及其他重材料所做之球的速率之差都是那样的小，以致在一次100腕尺的下落中，一个金球不会超前于一个铜球到4指的距离。既已观察到这一点，我就得到结论说，在一种完全没有阻力的媒质中，各物质将以相同速率下落。

辛普利邱：这是一个惊人的叙述，萨尔维亚蒂。但是我永远不会相信，在真空中，假如运动在那样的地方是可能的，一团羊毛和一块铅将以相同的速度下落。”

伽利略的思想飞跃：

伽利略比较不同物质在不同媒质中的运动：

在水银中，只有金球可以下落；

在水中，金球、铅球、铜球、石球可以下落，木球不能下落；

在空气中，金球、铅球、铜球、石球、木球都可以下落，而且其运动基本一样

所以

1) 媒质在这里起的是阻力作用，

2) 在越来越稀薄的媒质中，物体的下落运动应该是越来越趋于一样的，

在真空中所有物质都应以相同的速率下落。

羽毛在空气中很慢地下落，但是这相当于木球在水中的。

羽毛在真空中的运动应该与木球在空气中的运动作类比。

如果仅仅考虑在空气中物体的运动，人们实际上无法或很难建立起对运动问题的正确直觉。

而通过实验观察和比较不同物体在不同媒质中的运动之后，人们就有机会重建对运动问题的直觉，发现运动的规律。

这是非常典型的以实验和观测建立直觉、矫正直觉来思考问题的例子！

这种归纳法不是简单的枚举分类比较等，而是有很多的猜测、有思想的飞跃，这是典型的物理学的归纳法。

伽利略的书中有非常多的这类漂亮例子。  
在物理学历史上的探索过程中，有很多这类例子。

非常糟糕的是，在我们的中学和大学教育中基本上没人提到这些精妙的论证。

很多人把物理学当作是从一些基本概念和基本原理导出很多结果的理论，这是教科书式的物理学，是发展完善了总结好了的物理学形式。

实际上，在科学探索中的物理学家常常并不以这种思维方式思考问题。

相反，在未知领域探索的科研人员面对的可能是一片迷雾，他们并不知道已有的概念、思想方法是不是有效的或合适的，他们需要对所有已有的东西保持警惕。

在未知领域探索的这种思想方法的特色是：

尽量依靠直觉达到结果，再加以论证；

使用尽量少的概念和尽量少的假设达到尽量多的结果；

使用尽量少的数学达到尽量多的结果。

这是从伽利略时代起物理学家就会的思想方法。

伽利略的《关于两门新科学的对谈》建立了静力学和运动学理论，其中有很多的数学推理

但是仔细考察可以发现，这些数学推理都放在直觉论证之后，

例如

第一天对话基本上没什么数学，基本上是在探讨各种概念是否合理

第二天对话，先讨论杠杆原理是否正确，其后再使用杠杆原理推理其他结论。

第三天对话，同样如此：先探讨运动学的一些概念是否合理，例如瞬时速度、加速运动、力的分解规则等，然后再使用这些概念推论得到其他结论。

《关于两大世界体系的对话》更是如此，  
伽利略在其中根据实验现象和天文观测探讨了非常广泛的问题：  
月球是否是类似于地球的天体（第一天对话）、  
运动的相对性和运动的矢量合成法则（第二天对话）、  
太阳黑子的现象与太阳自转（第三天对话）、  
金星的盈亏现象与太阳系模型等等（第三天对话）

之所以需要如此：

我们现在视作理所当然的概念，运动的矢量合成与分解、力的合成与分解、力产生加速度、加速运动、瞬时速度等等概念，

对伽利略而言全都是未知的，需要发现才能建立起来

伽利略必须在提及这些概念的时候，做出合适的论证，说明其合理性

而这种论证，很大程度上只能是直觉的，

因为这些基本原理 无法从其他原理通过逻辑推理得到

这是从伽利略时代起物理学家就会的思想方法。

正是因为善于以这种方式思考问题，

物理学家才能够在缺乏相关概念和数学知识的情况下在未知领域开展探索，而基本概念和基本理论通常都是在这类先期探索的基础上逐渐发展出来的。

朗道的一个特色是

先建立直觉，然后发展出数学表述和理论形式

伽利略实际上就是如此，或者说朗道的思想方法正是来自正宗的物理学传承

有很多其他例子说明，许多大物理学家都是这样思考问题

海森堡回忆1922年与玻尔的讨论：

“那次讨论，我们在海因堡的密林中来回走动，这是我记忆中关于现代原子理论的基本物理和哲学问题的第一次深入讨论，它无疑对我以后的职业生涯产生了决定性的影响。我第一次了解到，玻尔比当时的许多其他物理学家更加怀疑他的理论观点，例如索末菲。那时，他对理论结构的洞察力不是对基本假设进行数学分析的结果，而是对实际现象深入研究的结果，这样他就有可能直觉地感受到这些关系，而不是从形式上推导出来。”

直觉地去感受世界，猜测现象与现象的关系，然后发展出现象之间的数学关系

伽利略是这样

玻尔、海森堡、朗道也都是这样

物理学史上最神奇的这类成就也许是

海森堡运用玻尔的对对应原理猜出量子力学的正则对易关系！



这是典型的归纳法

根据现象和对现象的洞察，建立和发展合适的概念，在此基础之上建立数学模型

在这个建立概念基础的过程中，当然会有一些推理，但是这些推理的目的是为了检验其原理是否合理。 如惠更斯所说

“（在本书中）看到的论证，不像几何学中的论证那样反映出很强的确然性，二者的差异甚大，因为几何学家是用确定的、无可争辩的原理来证明他们的命题，而这里的原理是由它们引出的结论来检验的。这些东西的性质不允许以其他方式论证。”

这些才是物理学中最生动、最有趣味的部分！

这种思想方法在很多时候会使用不严格的论证，会让一些人感觉不适应。

但是，正如朗道所说，物理学中实际上充满了不严格的论证：

“在物理学家中有一种普遍的误解：统计物理学是理论物理中基础最不牢靠的一个分支。这种误解，通常是因为他们看到某些统计物理学的结论缺乏严格的数学证明，而他们并没有看到，理论物理的所有其他分支也有同样的不严格论证，却并没有当成那些学科基础不足的证据。”（朗道《统计物理学》第一版序言）

“必须指出，和原始文献相比，许多量子力学教程讲得过于复杂。这种复杂化的一般理由虽然是为了普遍化和严格化，但是仔细研究后不难看出，这种做法实际上是一种空想，这些“严格”理论往往不少是错误的。既然复杂化的阐述我们认为根本不恰当，我们就力求简洁并且更多地回到原始文献。”（朗道《量子力学》第一版序言）

这种思想方法是做出发现的方法，

是更加简明、更具穿透力、更具启发性的思想方法，也更易让人建立物理直觉。

## 物理教学与物理学习

这种思想方法是符合人的认识规律的思想方法

人的认识总是从具体的事物开始，然后才能达到抽象

例如小学生，除了少数天才，基本上没法进行太过抽象的思考

中学生的抽象思维能力一般要强很多，但也远远达不到可以做纯粹抽象思维

所有物理的教学也应该从具体到抽象，帮助人逐步在头脑中建立起概念

但是，实际上基本没做到

此外，物理学的概念还需要能够解决问题

按照前述朗道学生的回忆，朗道的考试实际上是以解决问题的效率为标准

朗道把物理学中一些漂亮的、但是不解决新物理问题的理论称为病态理论。他认为，这类理论只是为了展现所谓理论的优美，实际上只是一些表演。

在物理学史中，有许多概念和理论是为了方便解决问题而诞生的

物理教学和物理学习中也应该反映这种思路，对每个概念都做类似考察。

例如当我们引入能量、动量的时候，有没有一些问题是使用这些概念容易解决的，而使用受力分析的方法很复杂或很难解决（例如碰撞问题、复摆）

朗道的考题是一些接近于公开的大题  
这也是一种值得学习的教学考核方式

朗道的学生被要求在其研讨会上轮流做综述报告，特别是讲实验。  
这也是特别值得学习的教育方式

这种方式可以强化学生对其学习的内容作深入思考，  
特别是让学生自己来讲述物理概念的基础，是学会归纳法的一个好办法

现在有一些学校在开展翻转课堂的尝试，可以总结经验在此方面做更多努力

总之，物理学不是一套发展完好的死的逻辑理论，不是死的知识

归纳法是物理学的一个思考问题的重要方式，  
是物理学（以至所有近代科学）建立概念基础的核心思考方式

学会直观地感受世界、发展出相关概念、以归纳法的方式思考问题是一种极其重要的物理学教育

很遗憾的是，这种教育在中国恰恰非常缺乏

因为归纳法教育的缺失，中国学生过早过多地陷入繁琐的数学形式和计算之中，  
没有系统地学会物理学的思考方法，**在物理学上的训练、视野和眼界受到很大程度的限制。**

物理学是一种活生生的探索活动，  
常常依靠直觉思考问题、建立起合适的概念，  
在探索中发明出合适的概念和理论、优化概念和理论，最后形成理论体系

简单说：

物理学是在人类的技术、语言和思维的极限之处的极限运动

应该在物理学习中学习到对自然现象的洞察，感受到那种探索的快乐、那种极限运动的快乐！

如果没有物理图像、没有直觉、没有洞察

学习会找不到头绪，迷失在数学形式和数学推理之中，  
不知道自己在学什么，觉得太难，感到厌烦

如果有物理图像、有直觉，能够自觉地建立物理直觉，会发现

物理实际上很简单  
很深邃  
很美

物理学充满乐趣



总结：

个人的成功可能是偶然的，很可能是因为特殊的天赋，  
一个群体的成功很难是偶然的，必定有获得成功的方法！

朗道以他特殊的方式对其学生做全面综合的训练

朗道的理论物理最低标准考试和以研讨实验为主的研讨会是一体两面

它们既使学生获得全面深入的理论训练，  
又使学生获得全面深入的唯象学训练，

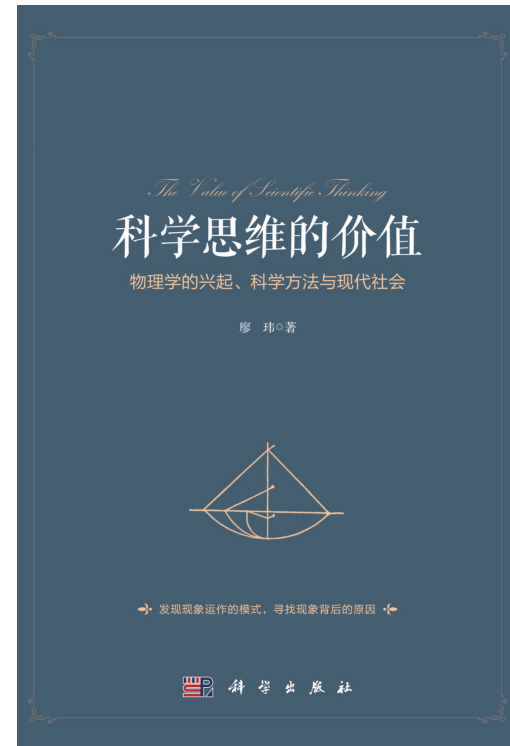
朗道还以研讨会的形式营造出非常活跃的学术氛围，  
从而最终能够使大量受到过良好训练的学生脱颖而出成为杰出的科学家

参考资料：

科学思维的价值，廖玮，科学出版社，2021

费曼，《数学与物理学的关系》

胡宁，《模型在物理学发展中的作用》



《从量子电动力学的创立历史看物理学思维的特色和价值》，《物理》杂志  
2023年第3期

《二十世纪苏联理论物理获得辉煌成就的关键是什么》，《物理》杂志  
2024年第2期