**专业探索-物理学**

作者：陈鲲羽，清华大学物理系本科毕业，工程物理系博士在读。

# 关于学科本身

大多数同学对物理学的兴趣都起源于各类科幻作品，这些小说或影视作品中的物理学家往往兼具哲人与发明家两重身份。身为哲人的物理学家能够洞察变化无端的世界背后不为他人所知的真实，身为发明家的物理学家则通过理论与工程知识实现大威力武器或时空穿越那样的奇迹。

这种印象与真实的物理学家相比自然有所夸张，但也并非空穴来风。物理学脱胎于数学作为万物本质的信念，以理想模型这种实际上并不存在的东西作为骨架，对世界做出解释与预言。严格来说，物理学家们所偏好的研究对象都是些并不真实存在的东西：世上没有绝对光滑的平面，完美的质量点，完全均匀的连续流体；但这些实际上并不存在的东西与一代代物理学家们巧妙地搭建出的数学理论结合起来，却可以实现对我们身边的世界的近乎完美的预测。以这些预测为基础，人类搭建了自工业革命起到如今信息时代的科技大厦，覆盖了生活的方方面面。

回溯物理学的历史，理论的进展使得物理学家们得以从知识的边界提取出新的理想模型，而实验技术则为我们从自然之中尽可能将这些理想模型创造出来，把那些原本不可感知的性质变为看得见摸得到的现象。为抽取出纯粹的光，物理学家们在暗室中进行实验，棱镜与光栅将光的波长这种无法直接测量的东西变为容易测量的角度；为获得纯粹的电子或质子束，物理学家们使用磁场滤除其它杂质，而可吸收这些粒子的电容板将比头发丝还细无数倍的基本粒子变为可以在示波器上观测的波形。

事实上，如今的物理学家们依然在做着与上世纪的前辈们区别不大的工作：实验物理学家设计、校正仪器，希望将此前无法捉摸的东西转化为显示屏上可以理解的图表和曲线；理论物理学家调整模型的背景，进行复杂的数学计算，让那些并不存在的理想模型一步步向复杂得多的现实靠拢。在“上帝粒子”、“人造太阳”、“量子计算机”这些看起来新奇炫酷的名词背后，固然有着科幻小说中那样的灵光一现，但更多的是对一行行公式的反复推导，对线路复杂，bug频出的仪器的不断改进。

# 学科的知识结构

## 培养方案

各院校的培养方案中通识类课程与公共课不尽相同，如清华物理系就要求学生选修至少3学分的生物课与至少4学分的化学课，而其它学校的学分要求可能与之略有出入。但专业课程的安排整体上都是类似的，按照知识深度递增大约可分为

* 数理基础课：通常在大一一年学完。这些课程更接近在高中已有的数学与物理知识上的拓展，都是使用既有的数学工具解决简单的物理问题。高中时是使用代数方程做受力分析，此时是使用微积分求解略微复杂一些的运动与场
  + 数学课程：高等数学、线性代数、复变函数
  + 物理课程：普通物理（力学、电磁学、光学、热力学、近代物理），普通物理实验
* 核心专业课：课程分布在大二、大三两年，若学有余力或希望在本科接触科研也可以提前选课或自学。这些课程是最简单的理论物理与其数学基础，后续无论是进行理论研究、实验研究，或是进入交叉学科，都需要以这些课程中的知识为基础。此前那种使用数学工具求解生活中的简单模型的真实感在这一阶段被更理论化的抽象思维所取代，对学生的思维能力与数学水平也有较高的要求。
  + 数学课程：数学物理方法
  + 物理课程：分析力学、电动力学、量子力学、统计力学，近代物理实验
* 按细分方向的选修课：这些选修课的内容或是为接触科研前沿做铺垫，或是本身就已经接近科研前沿，课上通常同时有本科生和研究生。
  + 数学课程：群论、微分几何、拓扑学、随机过程等
  + 物理课程：固体物理、量子统计物理、粒子物理、天体物理、量子场论、等离子体物理、高等量子力学、量子光学等

其中数理基础课和核心专业课程都属于必修内容，而后续的选修课程则与各类细分的专业方向相关。如凝聚态物理方向需学习固体物理、量子统计物理，通常也需要学习拓扑学；高能物理方向需学习粒子物理、量子场论，高等量子力学等。

部分院校会在物理系下设置“应用物理”专业，这一专业的培养方案在部分院校与物理学专业基本完全相同，区别只体现在保研政策上；另一部分院校的应用物理专业则会设置更少的数理基础课程与更多的材料学课程，知识体系整体上更接近材料学，需谨慎选择。

## 细分方向

物理学内部的细分方向相当之多，其中最主干的方向包括

* 凝聚态物理：主要研究各种超导、超流、量子简并态，从数K到μK以下的低温系统表现出的电磁学、光学性质等。科普文章中常见的“拓扑绝缘体”、“量子霍尔效应”、“约瑟夫森结”等属于这一方向的研究对象
* 高能物理：主要使用粒子对撞机研究各种基本粒子在甚高能量下的行为与物理规律，其能量若用温度表现可高达数十万亿亿度。科普文章中常见的“上帝粒子”、“夸克胶子等离子体”、“标准模型”等属于这一方向的研究对象。
* 核物理：主要研究原子核相关的物理与其在核反应中表现出的性质，如原子核内部质子与中子类似化学中价层电子的轨道排布，核稳定性等。其关注方向与核工程、核聚变都有较大区别，更多属于核技术这一门类，科普文章中常见的“重离子束”，“稳定岛”等属于这一方向的研究对象。
* 原子与分子物理：主要研究低温下原子分子与光的相互作用。科普文章中常见的“冷原子技术”，“激光冷却”等属于这一方向的研究对象。
* 等离子体物理：基本上是一门与实现可控核聚变的研究伴生的学科，与激光技术、芯片刻蚀等也有交叉。科普文章中常见的“磁约束聚变”、“惯性约束聚变”、“激光粒子加速”等属于这一方向的研究对象。
* 天体物理：研究对象基本上是地球之外的一切，从行星大气到系外行星探索，从恒星光谱到黑洞吸积盘，再到宇宙的大尺度结构与大爆炸理论都属于天体物理的研究范畴。科普文章中一切与“天体”、“地外”相关的词汇都属于这一方向的研究对象。

这六个方向是物理学之下的细分方向中最主要的几个，在这些方向之外还有声学、光学等较传统的方向，以及生物物理、数学物理等交叉学科方向，因规模相对较小，在此不再赘述。

* 1. **交叉学科**

物理学基本上与所有理工类专业都有交叉，任何一个理工类专业的理论实际上都是为处理一类特定问题而优化过的物理学理论。化学热力学中的理论内容与统计力学基本相同，量子信息与量子计算的研究中所用到的物理学知识与凝聚态物理重合范围很大，金融学模型的思路核心时常与统计物理模型或流体模型相关，与芯片制造相关的研究中也经常需要用到等离子体物理的专业内容。

很难总结出物理学的交叉学科列表，原则上一个优秀的物理系毕业生可以在一段时间的补课后胜任大多数学科的理论研究。

# 学习难度与适合人群

## 有多难学？

在大众认知中，物理学是个学习难度和数学接近的专业，哪怕在高中阶段能学好的人也并不算多。随着知识的逐步深入，学习物理学的难度也自然会不断提升，使得很多人对自己能否学好物理学抱有疑问。

**首先必须要承认，物理学确实是一个具有相当学习难度的学科。**

在上一部分介绍的本科课程体系中，有相当多需要一定的抽象思维能力和时间投入才能学会的硬课在。对这些课程而言，学不会甚至挂科哪怕在清华也不是那么少见。

**复变函数、数理方程**这两门通常安排在大一、大二的数学课程是后续大量物理课程的必要基础，但每年的课上总有四分之一左右的学生来自大三大四，其原因无非是第一次学的时候挂科了需要重修。

这两门课对低年级本科生而言是公认的难，以至于清华物理系的老师们一度发明了一种令人哭笑不得的调分方法：将期末考试得分开根号乘十，作为成绩单上的最终分数，换句话讲36分就能及格。即便最近几年来考试难度客观上降低了一些，卷面平均分也一直在60~70之间徘徊。

而这是清华物理系，全国生源水平最高的院系之一。

实事求是地讲，能够学好物理专业的专业核心课程本来就不是一件理所当然的事情。虽然学好这几门课是接触理论研究之前需要跨越的必要门槛，但适合做理论研究的人从来都是极少数，哪怕在清华，最后满足理论研究要求的人恐怕也不到一半。

**不过这也并不是说只有天才可以学物理，大部分学生总归还是普通人。**

天才自然存在，但如今的宣传总是在或多或少地夸大天才的作用。从二十世纪后半叶起，物理学的框架逐渐完善，科研工作变得宏大而繁琐。牛顿、麦克斯韦、爱因斯坦那样的传奇已经几十年没有出现。

当然，很多核心且重要的想法仍旧需要少数天才的灵光一闪才能发现，但物理学研究远不止于此，大量重要的工作需要依靠强大的恒心才能完成，其对天赋的要求虽然仍然存在，但远没达到并非天才就不能触及的程度。

反映到高考上，这意味着物理研究甚至不会对高考分数有特别高的要求。分数线略低的学校里适合理论研究的比例自然会低一些，但也很难归零。哪怕下沉到双非一级学校的物理系中，也偶尔可以听到某某学长考研进名校，进而去了加州理工、普林斯顿一类学校读博的传说。

## 我适合学习物理学吗？

这其实是一个相当玄学的问题：在跳出高中课程的限制，接触到真正的物理学之前，没有人能判断自己是否适合学习物理学。

高中物理课程的难度放到大学期间基本可以忽略不计，三年间学到的全部内容大约相当于一门3~4学分的基础课程，而这又进一步相当于在大学第一学期学到的数理基础课内容的不到四分之一。如此简单、缺乏区分度的课程能提供的信息少得可怜，唯一能够确定的是，**如果你连高中物理课程都学得非常吃力，那么你一定不适合在大学期间继续学习物理学**。

哪怕对具有一定水平的竞赛生而言，判断自己是否适合继续学习物理也并没有那么简单。

从个人经验出发，学好普通物理和高等数学、线性代数这些基础课程的竞赛生通常可以拿到不错的名次，但这些实际上也是物理专业的基础课程而已。在切实接触过1~2门四大力学等级的课程之前，最好还是不要因为竞赛上的成绩而妄下定论——最后因为学习吃力而转出物理系的竞赛生虽然不占多数，却也实际存在。

## 至少需要学懂四大力学

与数学专业的情况类似，随着学习难度逐渐深入，越来越多的人会发现自己并不适合物理专业与物理研究。

四大力学一类专业核心课会将大量刚刚入门的本科生吓退，然而这些课程也只不过是后续科研工作的基础。无论是做凝聚态、高能还是天体、等离子体，真正的科研前沿都需要依托四大力学中的一部分为基础才能展开。这意味着，**如果你不能将数理方程以及四大力学中的至少1~2门学懂，就基本上告别了物理研究，无论是理论、模拟还是实验**。

所谓学懂，指的并不仅仅是在考试上获得一个满意的分数，而是通过学习，对课程的知识体系有了一个整体的把握，此后遇到问题时可以独立地依据这套知识体系查找资料，解决问题。哪怕已经在考试上得到高分，也需要额外花费不少精力才能学到这种程度。

因此，学习专业核心课的过程整体上就是一个排除自己不适合（学不会）的方向的过程。

在学习量子力学、统计力学是感到吃力的同学基本上告别了凝聚态、高能、冷原子等方向；学习电动力学时感到吃力的同学基本上告别了等离子体、天体、核物理等方向；而学习复变函数、数理方程、基础的分析力学时感到吃力的同学基本上就告别了所有的理论研究。

这么一套筛选流程走下来，最终发现自己不适合理论研究的同学会是绝大多数，而在各种方向的实验研究中可以挑挑拣拣的也是少数。凭借本科几年里打下的数理基础转入其它专业是更为常见的选择。

毕竟除了数学系，其它专业是不会有和四大力学差不多难的课的。

# 就业前景简述

## 本科生毕业去向

物理系本科的培养方案整体上并不支持本科就业。换言之，如果从物理专业本科毕业时既没有申请到合适的研究生项目，也没提前规划好转行路线，就会陷入在没有任何职业技能的情况下被扔进就业市场的尴尬境地——实际上真正与物理系本科毕业生专业对口的工作岗位只有教育行业，也就是去中学或教育机构教物理。

全国一流高校的毕业生中，大多数都会选择继续深造，直接就业的比例一般在 20% 或更低，通常对应的也是提前规划好转行路径后就业的情况。

继续深造的去向是出国+国内（保研/考研），在疫情之前各院校出国读研的比例在 20%~30% 区间，美国是主要的出国目的地。国内读研的选择受推研政策影响，这一档的学校中，毕业成绩在前 50% 的学生基本都可以拿到推研资格，部分院校的推研资格甚至可以给到 70%~80%。只有推研失败或希望选择的专业与本科专业跨度太大时才需要加入考研大军。

在研究生阶段继续选择物理方向的毕业生并不多，大部分都会转成与物理专业相关的其它方向（如偏理论的计算机科学、生物物理、信息物理等交叉学科）。在研究生毕业后也会依照这些方向就业。

对一流水平之下的，大部分 985 及较为强势的 211 院校的本科毕业生而言，选择继续深造的比例仍然相对较高，通常可以过半。但由于出国的难度显著提升，推研资格要求的成绩也更加严苛，部分院校甚至要求成绩前 20%。

在这一背景下，加入考研大军是大部分毕业生的命运，此时提前规划好转行方向并做出准备就显得尤为重要。而若能在研究生阶段进入与上一类学校毕业生类似的院校与方向，后续出路便不会有太大差异。

## 科研与业界

若在硕士、博士时依然选择物理方向，那么在毕业后需要做一次是否坚持科研的选择。因国内外各类科研岗位都高度饱和，选择继续学术理想一般意味着长时间的激烈竞争与在非升即走制度下能否留到最后的问题，因此大多数毕业生都不会走学术路线。较为常见的路径包括

* 转行进入计算机、金融一类行业：由于物理系出身的硕士、博士通常有较好的数理基础，在一段时间的补课（如刷leetcode）与实习后，这类转行通常并不困难
* 选调进入政府部门：具体待遇视各学校政策而定
* 依托专业知识进入业界：这是最常见的出路，在学习期间相当多的精力会被投入各类软硬件的设计、搭建、调试中，因此会产生很多外行人看起来难以想象的专业对口，如高温等离子体实验方向的毕业生可以去做微波器件

# 关于物理科研

## 科研方向的基本结构

简单来说，在上文中提到的几类研究方向之中，每个方向的具体科研工作都可以被大致分为理论、模拟、实验三个部分。比如笔者自己的研究方向就是“等离子体物理理论”，而同实验室其他同学的研究方向中则包含“等离子体物理实验”和“等离子体物理模拟”。

对高中生来说，可以对这三个方向采取如下的简单理解，作为“什么是物理科研”或者“物理学家在做什么”一类问题的回答

**理论：**搭模型、推公式；不想干了可以转算法或量化

**模拟：**敲代码、debug；不想干了可以转码

**实验：**调设备、搭仪器；不想干了可以转去以华为为首的各种和硬件相关的企业

下面会简单展开讲一下每个方向需要的具体基础和工作细节。

## 理论

理论研究是最传统、古典的物理研究，并没有因为时代变迁而发生多大的变化。如今的理论研究也依然是搭模型、推公式、解方程，和上世纪甚至上上世纪并没有多大的区别。

不过这也并不意味着理论研究是什么高大上的事情。因为方程变得越来越难解，理论研究中选取的近似也在变得越来越敷衍，天体物理中常见的近似是“1~2~π”，而等离子体物理研究中存在同样离奇的近似“3>>1”。

这种难看且略有些敷衍的近似其实也充分说明了理论研究的困难程度：如果不取这种看起来相当不靠谱的近似，那么最终很可能连一个用于估算的结果都得不出来。

研究本身的困难程度进一步决定了对有志于从事这一方向的学生的高要求。足够扎实的基础只是入门，学懂本方向上的全部专业核心课和选修课程只能提供一个接触理论课题的机会，相当于在考试中把题目读懂；而实际科研中需要的数学、物理知识是**上不封顶**的，你永远不知道学过的东西有没有帮助，也不知道需要读哪一本参考书才能补上知识体系中欠缺的一块拼图。

笔者个人在理论研究上只能算刚刚入门，从身边老师们给出的建议来看，若想成为一名合格的理论研究者，**扎实的数理基础、优秀的物理直觉、能够沉下心去搜集资料，钻研一个问题的强大恒心**，三者是缺一不可的。

若你在了解了这条路上的各种困难后依然愿意以从事理论研究为目标，那么，欢迎你在这漫长的征途中与笔者一同努力。

## 模拟

模拟研究实际上是与理论研究相对接近的，随着物理学需要研究的系统越来越复杂，单纯通过数学手段求解方程已经难以满足需求，因此大部分理论研究都或多或少要借助数值或者模拟方法才能完成。就算主要在做理论研究的人，也通常需要懂一些模拟方面的知识和技术。

模拟工作可以被理解为通过代码复现一套数学模型及其数值求解方法的过程。拆开来讲大概分四个部分

**前期理论工作：**做模拟实际上就是在特定边界条件下通过特定算法解方程。但是方程和边界条件都得自己推。如果没有做出什么本质的进展，这一块工作一般不难，很多时候甚至是现成的。

**设计、优化算法：**需要相当多的数学知识，很多时候会是面向具体问题而高度特化的，比如怎样把一个发散项尽可能消掉。但这种工作通常相当困难，基本上大部分人的博士课题也就是优化一个模块的算法。

**写代码，维护项目，debug：**这部分工作和物理完全没有关系，反倒和计算机、软件工程一类专业学生的日常工作类似。但这一部分工作往往相当复杂、繁琐，需要占用大量时间，也进一步使得大部分做模拟的物理专业学生有了转码的能力。

**调参数，凑实验结果：**在有了一套完整的模拟代码之后，物理学家也就拥有了进行“数值实验”的能力，通过调节模拟代码里的各项参数（温度、压力、磁场等），并比较不同参数下的模拟结果，就可以进行更加深入的物理研究。

这四个部分中，前两部分与理论方向的工作接近，后两部分则是模拟方向所特有的，其趣味性更接近计算机类学科，通常难以满足对理论工作有偏好的学生的胃口。不过如果你同时对物理和计算机有兴趣的话，那么模拟研究会是一个适合你的方向。

## 实验

相比于前面两个方向，实验研究对数理基础的要求要低上一些，但仍然要求至少把自己研究方向上的专业核心课学懂。

实验研究者并不需要拓宽理论的边界，但仍然需要熟练使用理论工具处理仪器设计、调试时的各种问题：我的仪器测到了一个信号，那这个信号是什么，它应该来自哪种物理过程？为什么参数改变后信号会发生我们观察到的变化？

这些问题通常不像理论研究那么深入，但往往相当复杂。导致奇怪信号出现的原因通常并不是物理现象，而是操作失误或环境噪声。

从环境噪声中筛出微波背景辐射信号的故事经常被大肆吹捧，但更常见的并不是新发现而是乌龙，九十年代中澳洲的一批天文学家就曾经把探测器楼下房间中微波炉发出的信号误认为是某种新天体的蛛丝马迹，各种做微波探测的同学也没少测到过50Hz的周期性信号——来自身边的50Hz交流电。

这些描述展现了实验研究的“生活趣味”：研究对象是物理，但又远远不是物理——理论和模拟研究是无论如何也不会和微波炉扯上关系的。

如果你对理论研究并没有特殊的偏好，只是对物理学抱有一种泛泛的兴趣，那么实验研究可能是一个更适合你的方向。实验操作有时较为单调，但每个异常的信号背后其实都隐藏着一个有趣的故事，等待你去发掘。

# 物理学与数学

## 物理学是数学在现实世界中的应用吗？

**并不是。**

“物理学是数学的应用”是在高中生中相当常见的理解，但这一理解是完全错误的，抱着这种想法的人最好去隔壁数学系，而不是来物理系找茬。

相比于理论模型中的各种数学，物理学所关注的更多是对理论的理解本身。数学中不存在时间、空间与质量，只会给出几个实数和它们的运算规则，而对时间空间等概念的理解仅存在于物理学中——如果重要的仅仅是数学的话，那么为什么我们不能把质量规定成复数呢？

数学家自然有能力给出一套兼容复数质量的理论模型，但解释为什么实数质量就足够描述现实世界则是数学家所不可能完成的任务，这是物理学家所要思考的问题。

物理学家中的柏拉图主义者相当少，而依照费曼的经验，一个不愿妥协的柏拉图主义者多半也不适合学习物理学。

归根结底，在物理学家眼中，数学是一套与现实世界“平行”的工具箱，工具箱里有多种语言。从微积分、线性代数，到群论、拓扑、微分几何，再到动力系统、分形等前沿理论都是这工具箱中的一类语言而已，在被物理学家选中来描述某一类特定系统之前，它们在真实世界中并没有直接的对应。

数学语言在物理学中的地位取决于选择它的物理学家，而选择合适的数学语言并不需要精通这门数学语言。

举一个方便高中生理解的例子，海森伯因创立矩阵形式下的量子力学而获得诺贝尔奖，但最初模糊意识到矩阵形式的海森伯甚至不清楚“矩阵”是什么，只是开始寻找可能有效的数学，随后数学家约当便配合着他的思路教会了这个物理学家矩阵理论，并与他分享了同一个诺贝尔奖。

与当年的海森伯一样，如今的大部分物理学家也会在需要新工具时不断翻找数学这个工具箱，但绝大多数情况下，作为理论研究核心的仍然是物理系统。

## 学好数学就能学好物理学吗？

优秀的数学能力对学习、研究物理学自然有着很大的帮助，物理系的学生中选修数学双学位的也不少。但不管这两门学科联系多么密切，也很难导出“学好数学=能学好物理学”这样的因果关系。

和上一部分中提到的逻辑类似，物理学的关注点与数学不同，需要的能力也与数学有着微妙的区别。

抛开实验这种对数理基础要求一般的方向不谈，物理学理论研究更多需要一种**将现实抽象进一个数学模型中**的能力，然后才需要研究这个具体的数学模型。数学家们自然很擅长后一部分，但前一部分能力是在数学专业的学习中无法接触到的：数学是一套与现实世界“平行”的工具箱，仅研究数学的人很难理解现实世界是什么。

# 一些建议

在真正接触到物理学之前，对物理的兴趣多半来源于科普文章或者科幻小说。在自认想学物理的高中生中，相比于在课程中接触到能量、动量守恒，通过阅读《时间简史》一类科普书籍或《三体》一类科幻小说而接触到“量子”，“虫洞”，“相对论”的时间往往早得多。

可以说，高中生们时常是对物理学充满遐想的。

但真实的物理学学习与研究远没有那么浪漫，在进入大学物理系之后，硬核的专业课程和繁重的科研任务会无情地将那些遐想击碎，让很多人心灰意冷，离开这个专业、这个学科。

这是一个难以避免的筛选过程，而我只能以一个学长的身份，祝愿有志于为物理学进步添砖加瓦的学弟学妹们，在未来面对专业课程与科研挑灯夜战时，还能偶尔想起自己那寄宿在群星里的，对物理学的初心。