

# 西南联大的人才培养和杨振宁先生的学术起步(下)\*

朱邦芬<sup>†</sup>

(清华大学物理系 高等研究院 北京 100084)

2022-09-26 收到

<sup>†</sup> email: bfz@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230511

## 2 杨振宁的三篇学位论文

大学本科生在校的主要任务是学习,学有余力的学生可以尝试做点研究,而大学学士学位论文是本科生在结束一个学习阶段时的综合性学习和研究训练,旨在使学生学会运用所学知识进行一些探究,为进一步的学习和研究打基础。研究生在学阶段则不仅要进一步掌握学科前沿知识,还要开始把重点转移到创造知识上。学习知识和创造知识两个环节,既有联系,又有实质性的差别。本科毕业论文一般是导师给一个研究题目,然后学生在导师指导下一步一步地学做研究;而博士研究生一般在导师所指定的研究领域中学做有创意的研究,特别是优秀研究生要学会自己寻找研究题目,最后实现具有独立研究能力的目标。博士毕业论文反映了博士生的研究能力,特别是研究工作的创造性和独立性。对于有潜质的优秀博士,其论文选题往往具有相当的自主性。硕士学位论文介于两者之间:优秀的硕士学位论文完全可与博士学位论文媲美,而平庸的硕士学位论文甚至还不如优秀的学士学位论文。

通常,就培育学生研究能力、品味和风格而言,导师起很重要的作用。导师的研究领域、学术品味、思维风格和洞察力,往往给学

生带来深远的影响,甚至影响学生未来的贡献。杨振宁很幸运也很特殊:在学术起步阶段遇到吴大猷和王竹溪两位良师,分别指引他进入到他一生发生浓厚兴趣的物理学两个前沿领域,而这两个领域都是刚开始不久的新兴领域。吴先生指引他进入对称原理研究领域,王先生把他带入统计力学领域,而杨振宁一生最重要的研究就是围绕对称原理和统计物理展开的。可以说,西南联大为杨振宁未来的学术腾飞奠定了极好的学术基础。

### 2.1 学士学位论文

1929—1937年,清华大学物理系要求四年级学生撰写毕业论文一篇(相当于3—4学分),否则不能获得学士学位。“七七事变”后,不同于战前清华对学士论文要求,限于研究条件,联大物理系规定本科毕业论文非必修,而由学生自选<sup>[6]</sup>。杨振宁选择了做学士毕业论文,论文题目是“Group Theory and the Vibration of Polyatomic Molecules”,指导教师是吴大猷教授。杨先生提供的这篇学士论文是用打字机打在一种质地很差、很薄、很容易破碎的纸上,有些字现在已看不太清楚了,公式和希腊字母都是杨振宁手写的。杨振宁的学士论文,除了学校保存一份、本人保留一份外,吴先生也保留了杨振宁的论文30余

年,后来听杨振宁告诉他,自己的一份已丢失,于是吴先生就把自己保存的那份给了杨先生。

#### 2.1.1 论文题目选择

对于学位论文而言,论文题目的选择十分关键。学士学位论文的题目一般由导师布置。由于论文通常安排在大学四年级最后一个学期,需要在比较短的规定时间内完成,而此时学生往往还要上课;另外,选题还要有一定的新意,即使还不能发表在学术期刊上,但至少要在某几点或某一方面是以以前没人做过的。因此,论文导师需要在了解学生能力的基础上,在自己所熟悉的研究领域给学生出合适的题目。当然,学生也可以自己选择毕业论文的题目。如果学生自己选题,要想得到导师的指导,题目应与导师的研究领域有较密切的联系。因而,不管学生自己选还是老师给题目,学生选择论文导师往往意味着自觉地或不自觉地选择了自己论文的研究领域,而其影响往往可能比想象的更为长远。

作为西南联大一名最优秀的大四学生,杨振宁的学士学位论文的题目是这样确定的。根据吴大猷先生回忆,1941年,在他所教的古典力学、量子力学班中,“有杨振宁、黄昆、张守廉、黄授书、李荫远和其他十余人,遇见这样的‘群英会’,是使教师最快乐的事,但教这样的一班人,是很不容易的事。除

\* 本文原载于:朱邦芬,阮东(编).杨振宁的三篇学位论文.北京:清华大学出版社,2020. pp. 154—173. 转载时文字略有修改。

了我比他们多知先知一点外，他们的能力是比我高的。”“在古典力学课将结束时，我出了十余个课题，任各人选一题做一篇。杨振宁选的是用群论方法于多原子分子的振动的问题。杨自力地读群论，读我给他的参考文章，写了一篇论文”。（注：在西南联大的相关教学资料中，1941—1942学年里，吴大猷只教过“量子力学及原子光谱”，没有吴先生回忆的“古典力学”，杨振宁成绩单上也没有这门课的记录。）西南联大期间，吴先生在极端艰苦的环境下撰写了一本书名为 *Vibrational Spectra and Structure of Polyatomic Molecules* 的英文学术专著。这本书出版后很快成为国际上多原子分子结构和振动光谱领域的权威著作。杨振宁的学士论文涉及吴先生最擅长的研究领域。另一方面，群论是杨振宁父亲杨武之所擅长的，30年代他曾在清华数学系讲授过群论这门课程，陈省身、华罗庚都曾听过。而杨振宁自己还在念高中时，“就从父亲那里接触到了群论的初阶，也常常被父亲书架上一本斯派赛(A. Speiser)的关于有限群的书中的美丽的插图所迷住”。

杨振宁先生回忆道：“(吴大猷)给了我一本 *Reviews of Modern Physics* (《现代物理评论》)，叫我去研究其中一篇文章，看看有什么心得。这篇文章讨论的是分子光谱学和群论的关系。我把这篇文章带回家给父亲看，他虽不是念物理的，却很了解群论。他给了我狄克逊(Dickson)所写的一本小书，叫做 *Modern Algebraic Theories* (《近代代数理论》)。狄克逊是我父亲在芝加哥大学的老师，这本书写得非常合我的口味。因为它很精简，没有废话，在二十页之间就把群论中

‘表示理论’非常美妙地完全讲清楚了。”

### 2.1.2 用群论于多原子分子振动谱

多原子分子的振动，是指分子中每个原子围绕其平衡位置所做的微小振动。原子在平衡位置受力互相抵消，而偏离平衡位置时受到其他原子施加的作用力之和是微振动的驱动力。一阶近似下，作用力正比于原子偏离平衡位置的相对位移，以及弹性力常数(即势函数对位移的二阶导数)。每个原子的位移有三个分量，即三个运动自由度，由  $N$  个原子组成的分子，一共有  $3N$  个运动自由度。对于每个原子位移分量，可以写出一个由  $3N$  个位移分量组成的线性齐次方程，这样的方程一共有  $3N$  个。 $3N$  个线性齐次方程组存在非平庸解的条件是其系数矩阵行列式为零，由此可得到分子的本征振动频率和本征振动模式。在电脑和数值计算程序包广泛使用的今天，只要矩阵维度不太大，求解这样的久期方程不是一件困难的事。然而，八、九十年以前，计算条件的限制使得求解多原子分子振动频率和简正模式不是一件容易的事。另一方面，多原子分子的平衡位置一般都具有某种对称性(如空间旋转特定角度，镜面反射，中心反演，等等)，利用点群对称性和群论的表示理论，可以大大降低久期方程的维度，由此比较容易求得多原子分子振动频率；还可以直截了当地观察到简正模式的对称性。吴先生给杨振宁的参考文献 *Group Theory and the Vibrations of Polyatomic Molecules* (注：杨振宁学士论文题目与之差别只在用 vibration 而不是复数。)，刊登在一本 1936 年出版的《现代物理评论》杂志上 (*Rev. Mod. Phys.*, 1936, 8(4): 317—

346)，作者是美国哥伦比亚大学化学系的 Jenny E. Rosenthal 和 G. M. Murphy。这篇参考文献共 30 页，其中约 2/3 篇幅是从群的定义开始介绍群论的最基本知识，可见当年物理学界对群论是相当不熟悉的；甚至还有不少人公开表示讨厌群论，例如大物理学家泡利(W. E. Pauli)甚至称之为“群祸”。在吴先生指导下，杨振宁选择用群论方法研究多原子分子的振动谱。杨武之提供的《近代代数理论》这本书和吴大猷提供的《现代物理评论》这篇评述论文构成了杨振宁学士论文的学术背景。

如果只考虑分子内部原子间的相对运动，则应该去掉代表分子整体平移的 3 个自由度和整体空间转动的 3 个自由度，因此  $N$  原子分子的振动剩下  $3N-6$  个内部振动的自由度，这需要用  $3N-6$  个“独立约化坐标”(或称“内部对称坐标”或“几何对称坐标”)来描述。通常，用初等方法，去掉整体平动和转动的自由度，得到与位能对称性相合的内部对称坐标，是相当不容易的。

杨振宁的学士学位论文显示出，他具有令人惊讶的成熟的数学技巧、极佳的数学推演和证明能力，即使现在一些相当优秀的本科毕业生，如果没有上过群论课，也不易完全掌握杨先生的学士论文。事实上，杨先生告诉笔者，在做论文中他并没有与吴先生讨论过。除了杨振宁的天赋和父亲偶尔的指点外，通过旁听许宝騄先生的课程而掌握矩阵理论，通过自学而完全掌握群论的“表示理论”，这些自主学习是这篇论文中所体现出来的“令人惊讶的成熟的数学技巧”的原因。这篇论文也显示出杨振宁重视数学、善于将数学和物理结合的理论物理学家的特色。

### 2.1.3 杨振宁学士论文的后续影响

通过准备学士论文,杨振宁学通了群论,体会到群论对称性的美妙,自此他对物理中“很妙”的各种不变性产生了极大的兴趣,导致他进入了对称与不变性(invariance),或叫做“对称原理”的研究领域。这对他以后的研究有决定性的影响。对称原理,即“对称决定相互作用”,是杨振宁一生最主要的研究领域,占他所有研究工作的2/3,包括他与米尔斯(R. L. Mills)提出的非阿贝尔规范场理论,以及与李政道合作发现的弱相互作用中宇称不守恒定律。杨振宁学士论文对他产生的长远影响不仅影响了他选择的未来的研究领域,还影响到他的学术品味和学术风格的形成。

## 2.2 硕士学位论文

### 2.2.1 清华研究院培育研究生概况

1942年秋天,杨振宁考进清华大学研究院理科研究所物理学部攻读硕士研究生,导师是清华大学物理系的王竹溪教授。那时,考入联大的本科生都算作联大学籍,而研究生学籍则依导师所在学校分属于清华大学、北京大学、南开大学三个大学的研究院,虽然所有课程学习和考试仍然在一起进行。研究生入学考试一般都是基础课程,如1939年清华大学研究院理科研究所物理学部考试科目共5门:国文、英文(作文及翻译)、微积分及微分方程、力学及电磁学、热力学及光学。那年报名三人,录取了一个人。

清华研究院成立初始,就对研究生严格要求。按当时规定,研究生学制是两年,要获得硕士学位,必须满足以下要求:(1)修满24学分的课程,而取得学分的最低成绩是70分,否则必须重修而没有补考之

说;(2)通过毕业初试;(3)通过论文考试。毕业成绩的计算方法为:课程平均学积分积占25%,毕业初试成绩占25%,论文考试成绩占50%,满分为100分。只有历年学分平均成绩、毕业论文及毕业初试三者皆及格者,才给予研究院研究期满考试及格之证书,并授予硕士学位。由于对研究生要求严格,抗战环境艰苦,再加上一些研究生在学期间肄业出国留学,整个西南联大期间物理学研究生只有7人毕业,其中黄昆属于北大研究院,谢毓章、黄授书、杨振宁、张守廉、应崇福和杨约翰6人都属于清华研究院<sup>[6]</sup>。

除了本科阶段修过的4门研究生课外,杨振宁在研究生院第一年修了5门研究生课(共24学分),分别是王竹溪讲授的“量子力学”(一学年6学分),吴有训讲授的“X射线及电子”(一学年6学分),饶毓泰讲授的“光之电磁论”(一学期3学分),周培源讲授的“相对论原理”(一学期3学分),以及张文裕讲授的“原子核物理及放射性”(一学年6学分)。根据规定,研究生学年平均成绩如果不满65分,则要被退学。

西南联大期间,本科生必修课程所指定的教材大多是美国大学通用的,比较浅显;而教杨振宁研究生课的王竹溪、马仕俊等都是从英国留学回来不久,所用教材均为当时世界上程度最深的,给他打下了很好的基础。杨振宁研一平均学分为89.125。此外,研究生第二外语考试必须通过,杨先生二外选的是德文。

毕业初试有点像研究生“资格考试”,但限定范围且仅口试。毕业初试须在完成毕业论文以前举行,成绩以百分制计算:70分以上为及格;60分以上、不到70分,可以申

请补考。考试范围由各学部分别对每一位研究生作具体规定,杨振宁毕业初试科目为量子力学、统计力学及电动力学三门,而他的同学张守廉(导师周培源)则考量子力学、相对论及流体力学。毕业初试由多名教授组成的考试委员会主持。张守廉、杨振宁两人的毕业初试同时进行,由同一个考试委员会主持。赵忠尧先生为邀请毕业初试的考试委员专门向清华大学教务长潘光旦先生写了如下报告。

敬启者:

物理系研究生张守廉、杨振宁二君业已经过德文考试,成绩及格。兹定于五月十二日(星期五)下午二至五时在西仓坡四号举行第一次考试,考试委员拟聘请严慕光先生(玉龙堆十六号)、郑华焯先生、杨武之先生、叶企孙先生、吴正之先生、王竹溪先生及忠尧担任。张守廉君考试科目为量子力学、相对论及流体力学,杨振宁君为量子力学、统计力学及电动力学。特此奉请贵处函邀各考试委员,并转办事处预备地点并届时略备茶点,为盼。专此即请  
潘教务长大鉴

赵忠尧敬启

杨振宁毕业初试得89分。

毕业论文须先经研究导师认可,再由论文考试委员会主持答辩,决定是否通过答辩,并给出论文成绩。按规定,多名教授组成的考试委员会还必须有经教育部核准的校外人员参加。杨振宁论文考试委员包括吴有训(吴正之)、叶企孙、王竹溪、马仕俊、赵忠尧以及北平研究院物理研究所钱临照、黄子卿诸先生。图1是以梅贻琦校长名义发出的杨振宁毕业论文考试委员会邀请函,相当正式。杨振宁的硕士

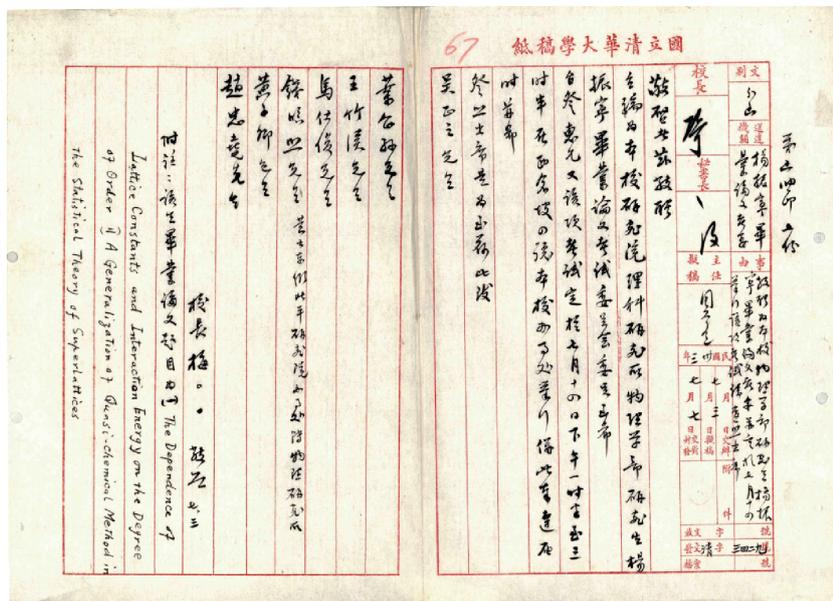


图5 杨振宁硕士学位论文考试委员会邀请函(清华大学档案馆馆藏)

论文题目为：(一) The Dependence of Lattice Constants and Interaction Energy on the Degree of Order; (二) A Generalization of Quasi-Chemical Method in the Statistical Theory of Superlattice.

杨振宁论文考试得88分。他的研究生三项成绩按权重平均后的总分是88.28分，这是一个非常高的分数。根据清华研究院规定，研究生年度成绩在75分以上的就可以获得奖学金；如果毕业生的学分成绩、毕业初试成绩及论文成绩，均在80分以上，并获得所在学部推荐，可以由评议会特组审查委员会按照总成绩择优派遣留学，每年至多不得超过10名，每学部每年至多不得超过2名。杨振宁的成绩完全够择优留学。当然，由于他又考取了清华庚款留美公费生，不需要通过评议会派遣留学。

### 2.2.2 超晶格统计理论探究

杨振宁的硕士导师是王竹溪教

授，硕士论文题目是《超晶格统计理论探究》。王竹溪先生于1933年清华物理系毕业后跟随周培源先生读研究生，1935年在庚子赔款留英奖学金资助下去英国剑桥师从富勒(R. H. Fowler)教授，1938年获得博士学位回到昆明任清华大学教授，专长是统计力学和热力学。杨振宁之所以选择王竹溪先生当他的研究生导师，一是因为王竹溪留英刚回来曾在联大就“相变”问题做过系列讲座，杨振宁积极去听了，虽然似懂非懂，但印象深刻，感觉“很妙”；二是王竹溪先生数学功底很深，很重视数学论证和物理规律的结合，这点很合杨振宁的taste。在西南联大，王先生曾讲授过“普通物理”“动力学”“电动力学”“量子力学”“统计力学”“微子论”“热学”等多门课程，其中杨振宁选修过王先生教授的研究生课程“量子力学”和“统计力学”。王先生教学十分认真，学生中流传的一条重要经验是“谁要想学习理论物理学，

一个最有效的办法是借阅王竹溪教授的笔记本看”。

金属合金由两种以上金属原子构成，按照原子排列是否有序，可把合金分为有序合金和无序合金。对于金属合金来说，最常见的无序是组分无序，即一种金属原子占据另一种金属原子的晶格位置。有序合金可以形成超结构，或称超晶格。一般而言，温度较高时，合金中不同金属原子的排列倾向于无序，而低温时比较有序，例如铜金合金的晶格结构在有序时是四面体结构，而在无序时为面心立方结构，这样随温度升高，金属合金将经历由有序到无序的相变，相变时比热发生突变。20世纪30—40年代，金属合金的有序无序及其相变是统计物理学家和固体物理学家感兴趣的一个问题。富勒教授是该领域一位主要研究者，他的两位中国学生——王竹溪和张宗燧都开展过这方面的研究，而杨振宁关注这个问题的研究则是由王竹溪先生所引导。

杨振宁关于超晶格统计理论研究的硕士论文是由两篇研究论文组成：第一篇论文发表在《中国物理学报》(*Chinese Journal of Physics*)<sup>1)</sup>，标题为“Variation of Interaction Energy with Change of Lattice Constants and Change of Degree of Order”(*Chinese J. Phys.*, 1944, 5(2): 138—149)；第二篇论文发表在美国《化学物理杂志》(*The Journal of Chemical Physics*)上，题为“A Generalization of the Quasi-Chemical Method in the Statistical Theory of Superlattices”(*J. Chem. Phys.*, 1945, 13(2): 66—76)，该文是杨振宁发表在国外的第一篇物理学研究论文，文章的收稿日期是1944年11月17日，杨振宁

1) 《中国物理学报》(*Chinese Journal of Physics*)创刊于1933年，发表论文以英文为主，附中文摘要。1952年该刊改名为《物理学报》(*Acta Physica Sinica*)，刊载中文论文。

寄出时间应该不会晚于1944年10月。在昆明期间杨振宁一共发表了5篇学术论文，其中发表在国外的论文2篇，另一篇为数学论文“On the Uniqueness of Young's Differentials” (*Bull. Amer. Math. Soc.*, 1944, 50(6): 373—375)，这是杨振宁的第一篇国际论文。

铜原子和金原子组成的二元合金在热平衡时的位型由自由能极小决定，而自由能主要由原子的相互作用能和位型熵决定，其中相互作用能与有序度、晶格常数和原子排列有关。序一般可分为长程序和短程序；无序发生时，长程序首先被破缺，而某种程度的短程序仍然可保留。当时研究合金相互作用能和位型熵常用的方法有布拉格—威廉斯(Bragg—Williams)理论和贝特(Bethe)理论：前者不考虑短程序，而后者弥补了前者的缺点。杨振宁硕士期间第一项研究是用Bethe理论研究铜金合金的有序—无序问题，虽然以前已有人用Bethe理论研究了铜金合金的相互作用能，但在研究熵的时候却没有考虑短程序，杨振宁认识并解决了两者之间的不自洽性，从而计算得到的相变温度时的突变比热与实验符合得很好。

杨振宁第二项研究是将富勒和古根海姆(E. A. Guggenheim)提出的准化学方法做了进一步推广和发展。富勒和古根海姆将二元合金AB中各种可能配对的最近邻原子(包括错位)连同其相互作用能看成若干种“分子”，将合金看成分子的集合，从而由所谓的准化学方法，求解合金的一些物性。和Bragg—Williams方法、Bethe等方法一样，准化学方法也属于平均场近似，其自由能求解都涉及复杂的积分和计

算。杨振宁在硕士论文中不仅把准化学方法推广到更大的原子团簇，可以一阶一阶地做高阶近似，并明显比其他不同版本的平均场理论要好；更重要的是，杨振宁发现一个勒让德(Legendre)变换，可以直接计算自由能而避免了数学复杂性。这是一个很大的实质性的改进。杨振宁还运用这个方法研究了更复杂的 $\text{Cu}_3\text{Au}$ 面心立方结构。

1944年杨振宁考取清华庚款留美奖学金。按当年规定，留学生出国前有“留待时间”，需要在国内至少工作一年，杨振宁于1945年8月赴美之前在联大附中教数学，期间除了学习，还就二元合金的有序—无序转变问题完成了两篇论文：C. N. Yang. The Critical Temperature and Discontinuity of Specific Heat of A Superlattice (*Chinese J. Phys.*, 1945, 6(1): 59—66); C. N. Yang and Y. Y. Li (李荫远). General Theory of the Quasi-Chemical Method in the Statistical Theory of Superlattice (*Chinese J. Phys.*, 1947, 7(2): 59—71)。

### 2.2.3 杨振宁硕士论文的后续影响

在王竹溪先生的引导下，通过硕士论文，杨振宁进入了统计力学研究领域。统计力学是杨振宁一生中另一个最主要的研究领域，大约占他所有研究工作的1/3。他的13项最重要的物理学贡献中，4项属于统计力学，包括相变理论、玻色子多体理论、杨—巴克斯特(Yang—Baxter)方程、一维 $\delta$ 函数排斥势中的玻色子在有限温度下的严格解<sup>[7]</sup>。2003年杨振宁全时回到清华任教，随着冷原子实验物理的兴起，耄耋之年的杨先生又集中在统计物理领域两个物理结构直接简单的模型(稀薄玻色硬球系统和一维具

有 $\delta$ 函数排斥作用的多粒子系统)开展了卓有成效的研究，取得了多项重要成果。

杨振宁硕士论文的第二项研究成果，被他收入在1982年出版的*Selected Papers With Commentary* (1945—1980)，并列为文选的第一篇论文。在该篇文章的评注《忆我在中国的大学生活》中，杨振宁回忆他在西南联大艰苦生活的同时，特别提及“我在物理学里的taste主要是在该大学度过的6年时间里(1938—1944)培养起来的”<sup>[1]</sup>。西南联大时期的学习对杨振宁产生了深远的影响，影响他所选择的未来研究领域，特别是影响他的研究品味和未来学术风格的形成，例如他对数学之美的欣赏和对物理之美的追求。

## 2.3 博士学位论文

### 2.3.1 博士论文题目的选择

在清华留美公费资助下，1946年初杨振宁注册成为芝加哥大学物理系的博士生。芝加哥大学物理系是当时美国最好的物理系，杨振宁于1948年6月就获得博士学位，并随后被留下当教员(instructor)。然而他的博士阶段并非一帆风顺。

杨振宁“去芝加哥的主要原因是想跟恩里科·费米(Enrico Fermi, 1901—1954)写一篇实验方面的博士论文”。一方面，当时杨振宁觉得实验能力对于中国的发展更加需要；另一方面，他最欣赏三位物理学家(爱因斯坦、狄拉克、费米)的研究风格<sup>[8]</sup>，而只有费米兼做理论和实验，也只有费米有可能接受他当学生。可是，芝加哥大学核物理研究所1946年还没有破土动工，费米只能去阿尔贡(Argonne)实验室的反应堆做实验，而由于保密原因，杨振

宁不能进阿尔贡。因而费米推荐他先跟特勒(E. Teller)做理论工作。特勒是美国的“氢弹之父”，他的新想法非常多，对于核物理学、凝聚态物理学、宇宙射线等问题都非常有兴趣。特勒建议他用托马斯—费米—狄拉克(Thomas—Fermi—Dirac)模型与维格纳—塞茨(Wigner—Seitz)近似方法计算Be与BeO的K-电子湮没几率问题，杨振宁很快算出结果，并做报告获得好评。但是他自己所用近似方法得到结果的可靠性没有把握，始终没有写成文章发表<sup>[9]</sup>。杨振宁渐渐发现，他所喜欢的研究方法跟特勒的不一样，于是开始自己找理论研究题目。

1946年秋天，费米又介绍杨振宁去做核实验物理学家艾里孙(S. K. Allison)教授的研究生，参与建造一台40万电子伏的考克饶夫特—瓦尔顿(Cockroft—Walton)加速器。可是杨振宁的动手能力较差，同学们很佩服他的理论知识，却一致笑他在实验室里的笨手笨脚，流传“Where there is Bang, there is Yang!”

正如杨振宁在他的一篇介绍自己学习和研究经历的文章中所写，“博士生为找题目感到沮丧是极普遍的现象”<sup>[10]</sup>。1947年，尽管杨振宁在《物理评论》(Physical Review)已发表来美后的第一篇论文，“关于量子化的时空”(On Quantized Space-Time)，但是他在给好友黄昆的一封信中曾用“disillusioned”(幻灭)来描述自己的心情<sup>[11]</sup>。杨振宁学习一直极其优秀，自视甚高，又很努力，但是发现自己不擅长做实验，而做理论自己找的4个研究题目都一时没有取得成果。他当时产生兴趣的理论题目包括：(1) 1944年昂萨格(L. Onsager)关于伊辛(Ising)模

型的文章；(2) 1931年贝特(H. Bethe)关于自旋波的文章；(3) 1941年泡利关于场论的综合报告；(4) 1943年后关于核物理中各种反应的角分布的研究。受王竹溪先生的影响，前两个题目属于统计力学领域；受吴大猷先生的影响，后两个题目与对称性分析有关。当时，前三个题目芝加哥大学没人有兴趣，他独自一人在图书馆中研读，弄清来龙去脉，每一项都花了几个星期的努力，都以无果而告终。“只有第4项是特勒极感兴趣的研究。当时这方面的理论论文很多，可是都不够严谨，我花了几个星期用群论分析‘物理规律旋转不变’(invariance of physical laws under space rotation)的意义，得出了几个漂亮的定理，写成一篇短文。特勒很喜欢这篇文稿。”<sup>[9]</sup>

1948年春天，特勒主动来找杨振宁说：“你不必坚持一定写出一篇实验论文。你已写了理论论文，那么就用一篇理论论文来做毕业论文吧。我可以做你的导师。”杨振宁“想了两天，决定接受他的建议。作了这个决定以后，我如释重负”。以此为基础，构成杨振宁的博士论文。

### 2.3.2 核反应和符合测量中的角分布

以往在计算核反应产物的角分布与涉及 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线过程中角关联时，经过繁杂计算后经常遇到许多项互相抵消的情况。有人猜想这里面有与具体作用机理无关、普适的原理在起作用。杨振宁在博士论文中证明了这点，基于物理过程在空间旋转和中心反演不变，他推导了一般的定理，并详细分析了若干具体物理过程，包括 $\beta$ 衰变中电子和中微子的角关联，核放射 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线的角关联，以及相继两束 $\gamma$ 射线的角关联<sup>[10]</sup>。

杨振宁一开始的论文只有区区几页，特勒觉得作为博士论文，它太短了。杨振宁补充了半整数角动量(即考虑粒子的自旋)和考虑高速粒子的相对论效应，文章增加了几页，然而特勒还是嫌论文不够详尽，有些不高兴。最终杨振宁的博士论文扩充到十余页。文章简洁，不含一点渣滓，这正是杨振宁的风格之一，反映了作者思路明晰、逻辑性强，一气呵成的特点。

杨振宁在1948年6月获得博士学位，而《物理评论》收到这篇研究论文投稿是在1948年6月9日，于同年10月1日正式发表。文章发表后，其中给出的定理受到核物理界的广泛注意。

### 2.3.3 杨振宁博士期间研究工作的后续影响

杨振宁在两年半时间内获得了博士学位。鉴于他的数学和物理基础在去芝加哥大学以前就明显高于一般博士的水准，他在这两年半期间主要是全力以赴从事研究，他的收获也极其丰硕。

对称原理代表20世纪下半叶物理学发展的主流，也是20世纪理论物理三大主旋律之一。杨振宁的博士论文是他进入对称与不变性领域的第一篇文章，紧接着发表的关于 $\pi^0$ 的自旋的工作是他在此领域中第二篇文章，文章中仔细分析了场论中不变性的群论表示。“这两篇文章使我一跃成为用群论与场论分析对称的专家，那时此领域才刚刚开始。”<sup>[9]</sup>能在一个领域刚开始时进入该领域，对于一个年轻科学工作者而言是极幸运的。

## 3 几点感想

杨振宁从1938年秋考入西南联大，到1948年夏获得芝加哥大学博

士学位，历时10年。这10年学校生活为他以后的学术腾飞奠定了扎实的基础，也给了我们许多启示，感受颇深。

(1) 学术大师主要地不是老师在课堂上教出来的，关键是要为有潜质的天才学生营造一个好“环境”，以利于他们脱颖而出。

抗战时期的西南联大，物质条件异常艰苦，然而杰出人才辈出，这里最重要的是它是一个好的广义的学校“环境”。总结叶企孙先生创建的老清华物理系和西南联大物理系的成功实践和理念，一个好的学校环境可以包括六点要素：优秀学生荟萃以及他们之间的相互作用；良好的学风；优秀的教师以及教师对学生尽心培育；学生有自主学习和研究的空间；国际视野；较好的软件和硬件条件。除最后一点，西南联大符合各个要素，对优秀学子而言确实是个好的学校环境。此外，抗战期间，亡国的危机时刻更加激发学生的使命感和责任感；而西南联大远在昆明，远离政治中心，学生相对而言更有自由。这些也为杨振宁成为大师提供了“沃土”。

(2) 一流大师在培育一流杰出人才方面起特别重要的作用，除“传授知识，培养能力，塑造价值观”外，一流大师对学生学术品味和学术风格的形成，特别是指引学生选择未来有发展前景的研究领域，有不可替代的作用。

对杨振宁一生最有学术影响的导师有吴大猷、王竹溪、费米、特勒等4位教授。吴大猷引导杨振宁进入对称性原理领域，王竹溪引导杨振宁进入统计力学领域，特别是在这两个领域刚开始发展的时候引入，成为杨振宁一生主要研究和取得重要成果的领域。杨振宁从特勒

那里不仅学到很多丰富的原创性想法，而且杨振宁的博士论文题目来自特勒物理直觉的启发：角分布和对称性及群论有关。更重要的是，特勒把杨振宁从执着于做一个实验物理学家，转变为做一位理论物理学家。

杨先生曾写到：“在每一个有创造性活动的领域里，一个人的 taste，加上他的能力、脾气和机遇，决定了它的风格，而这种风格反过来又决定他的贡献。”杨振宁曾把自己的研究风格归结为(D+E+F)/3，其中D代表Dirac，E代表Einstein，F代表Fermi。在西南联大7年，他没有机会见到这三位大物理学家，而是从阅读他们的文章中欣赏他们的研究风格，即具有把一个物理概念，一种理论结构，或一个物理现象的本质提炼出来的能力，并且都能够准确地把握住其精髓。虽然杨振宁从阅读文章中猜想并欣赏这三位大物理学家的风格，而后真正与大师接触，他觉得自己的感觉大致是正确的。我曾在一篇文章中概括杨先生的学术风格为：对数学之美的欣赏和对物理之美的追求并存；独立；简洁<sup>[12]</sup>。这的确与他这十年的研究经历有关，特别是费米对他的影响。

(3) 研究生阶段没有取得成果的研究也是宝贵的财富。

博士期间杨振宁有很长一段时间是自己在探索研究方向，遇到一些挫折，其实这是博士阶段最有价值的经历。判断博士论文能否通过和博士学位是否授予，最重要的一个判据是具备独立研究的能力。所谓独立研究能力，关键是自己找到有学术价值并可行的研究课题。这通常是不断探索、不断碰壁的过程，而这正是博士阶段最有价值的锻炼。

杨振宁在艾里孙实验室一年多时间，并不算成功。但是这段经历并不是白费时间，对他也是一笔宝贵的财富，使他“从中了解到实验工作者的价值观与理论工作者不同，这一点影响了我以后的许多工作，最显著的是1956年宇称可能不守恒的文章与1964年CP不守恒的唯象分析(phenomenological analysis)”<sup>[9]</sup>。

博士期间，杨振宁自己独立选择了4个题目，都是极有学术价值的课题，虽然短时间内没有获得满意结果，遇到了一些挫折，但后来都先后开花结果了。

例如，对于Ising模型，1949年11月，他在普林斯顿偶遇路丁格(J. M. Luttinger)，听说考夫曼(B. Kaufman)已经简化了昂萨格的方法。由于杨振宁在芝加哥大学曾花了数星期研究昂萨格1944年的文章，做了必要的准备工作，“很容易就掌握了昂萨格一考夫曼方法的要点”，最后吸收了新方法，就开花结

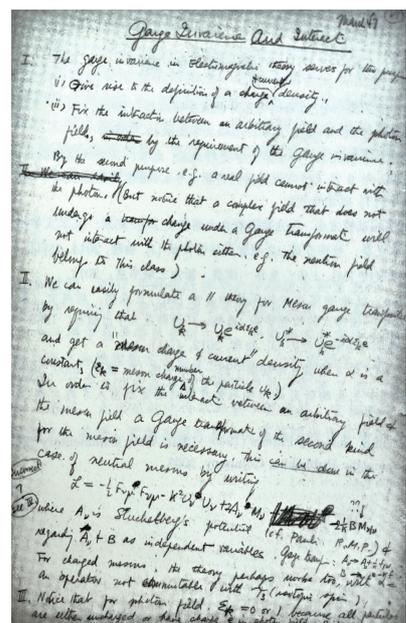


图6 杨振宁1947年 Gauge Invariance and Interaction 手稿首页

果了。这个“兴趣！准备工作！突破口”的过程，杨振宁认为是“多半研究工作必经的三部曲”。<sup>[10]</sup>

又如，杨振宁在芝加哥读博时期对把外尔(H. Weyl)电磁学之规范不变性进一步推广到其他相互作用(泡利有名的综述报告中提及)十分有兴趣，1947年他写了3页题为 *Gauge Invariance and Interaction* 的手稿(图6)。类比用矢量势描述、保持电荷守恒的电磁场方程，杨振宁试图导出用  $B_\mu$  描述的、保持同位旋守恒的规范场方程，但后来总是导出一个越来越复杂的公式，迫使他不得不暂时搁置下来。他几次三番觉得这个想法很妙，但总是得不到满意的结果。正如杨先生在《杨振

宁的三篇学位论文》一书前言中提到，一直到1953—1954年他在访问布鲁克海文国家实验室期间，与同一办公室的米尔斯一起进行讨论，突然想到尝试在场强  $F_{\mu\nu}$  上加一个二项式，变成

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial B_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial B_\mu}{\partial x_\nu} + i\epsilon [B_\mu, B_\nu],$$

从而一举奠定了杨—米尔斯(Yang—Mills)场的基础，成为标准模型的基石。

随着困难一一获得解决，对于选择研究课题，杨振宁的自信心越来越强。他总结出“要找与现象有直接简单关系的题目，或与物理基本结构有直接简单关系的题目”，他还认为“把问题扩大往往会引导出

好的新发展方向”，他多次以自身的经历告诫学生“最好在领域开始时进入一个新领域”。这既是他的经验也是他的研究风格之一。

### 参考文献

- [6] 西南联合大学北京校友会·国立西南联合大学校史·北京：北京大学出版社，2006
- [7] 施郁·物理，2014，43(1):57
- [8] Max Dresden. 试论物理学中的风格和品味. 见：丘成桐，刘兆玄编. 甘幼译. 杨振宁——20世纪一位伟大的物理学家. 桂林：广西师范大学出版社，1993
- [9] 杨振宁·物理，2012，41(1):1
- [10] 杨建邺·杨振宁传·上海：生活·读书·新知三联书店，2011
- [11] 朱邦芬·物理，2009，38(8):575
- [12] 朱邦芬·物理，2022，51(1):47



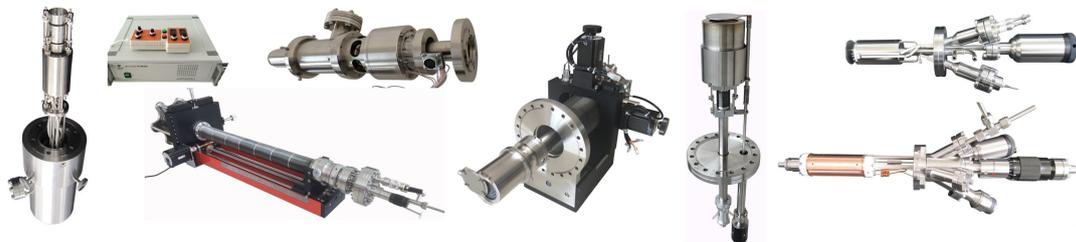
## 大连齐维科技发展有限公司

地址：大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话：0411-8628-6788 传真：0411-8628-5677

E-mail: [info@chi-vac.com](mailto:info@chi-vac.com) HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理 and 薄膜生长产品：氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备：PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

