

70 年前，一位年轻的数学家，在哥德巴赫猜想这座数学高峰上，继华罗庚之后又留下一个属于中国人的足迹——证明了命题“3+4”。他就是王元，时年 25 岁。1955 年 7 月，他将论文《表大偶数为一个不超过三个素数的乘积及一个不超过四个素数乘积的乘积之和》投稿至《数学学报》，次年 9 月发表，轰动世界。

“元老”是中国数学界对中国科学院院士王元的亲切称呼，一则出于其名，二则因为他是中国数学界尤其是数论方向的先驱人物。今年是元老证明“3+4”定理 70 周年。

华罗庚与哥德巴赫猜想讨论班

哥德巴赫猜想以其简洁的语言预测了素数之间的加法关系，被誉为“数学王冠上的明珠”，是数学史上最著名且最具挑战性的问题之一。

1742 年，哥德巴赫在与欧拉的通信中提出了这一猜想：任何一个大于 2 的偶数都可以表示为两个素数之和。这一命题看似简单，却深刻揭示了素数分布的规律性，吸引了无数数学家的关注。希尔伯特曾将哥德巴赫猜想收入其著名的 23 个数学问题之中，此后哈代、利特伍德、维诺格拉多夫、华罗庚等数学大师，都先后对哥德巴赫猜想作出了杰出贡献。

华罗庚曾指出：“哥德巴赫猜想真是美极了，现在还没有一个方法可以证明它。”1938 年，在英国剑桥大学访学期间，华罗庚证明了几乎所有的偶数都可以表示为两个素数之和，即哥德巴赫猜想对几乎所有的偶数都成立。这一成就使华罗庚成为哥德巴赫猜想研究的世界顶级专家。

1953 年，华罗庚在中国科学院数学研究所组织了一个专门研究哥德巴赫猜想的讨论班。他以深厚的数学造诣和高瞻远瞩的学术眼光，为讨论班制定了明确的研究方向，并鼓励年轻人创新。讨论班由年轻人轮流主讲，王元是主要演讲人之一。这个讨论班为新中国培养了一代杰出的数论学家。

华罗庚选择将哥德巴赫猜想作为讨论班的主题，是因为这一猜想与解析数论中所有的重要方法都有联系。通过学习研究哥德巴赫猜想，青年学者能够掌握解析数论中最重要的方法。讨论班的研究计划涵盖了当时国际上研究哥德巴赫猜想的最先进方法与成果，包括塞尔伯格筛法、布朗方法、布赫施塔布方法等。

华罗庚在讨论班上不断提问，确保每个细节都被彻底理解。虽然这种教学方法进展较慢，但参与者受益匪浅。遗憾的是，哥德巴赫猜想讨论班 1956 年被迫中断，未能完成所有计划。

王元与“3+4”

20 世纪初，数学家开始尝试用筛法研究哥



1981 年，王元、陈景润、潘承洞（从左至右）在山东大学。 刘建亚供图

1996 年，王元（右）与刘建亚在香港。 臧文安 / 摄

2019 年，王元在办公室。 刘建亚 / 摄

德巴赫猜想。简单来说，筛法就是容斥原理的深化与细化，其核心思想是通过筛掉合数保留素数。这种过度简化的说法，虽然有助于理解筛法的性质，但是完全不能传递筛法极其复杂、很深的一面。

基于筛法的特点，学习筛法最好的方法是研读论文，而非听讲。笔者曾在不同场合强调：“要想迅速让对方打消学习数论的念头，就给他讲筛法的证明。”这句话，虽有调侃的成分，但确实符合实情。

1920 年，挪威数学家布朗证明了命题“9+9”，这一成果开启了筛法在哥德巴赫猜想研究中的应用。随后，国际上一批数学家不断改进筛法，逐步降低了命题“a+b”中的素因子个数。1938 年，苏联数学家布赫施塔布将结果推进到“5+5”，1940 年，他又证明了“4+4”。这些成果为后续研究奠定了基础。

在讨论班举办期间，华罗庚建议王元用筛法改进哥德巴赫猜想的已有结果，并特别指出塞尔伯格筛法的重要性。通过讨论班的学习，王元已经掌握了布朗的方法，但他没来得及研究布赫施塔布的方法，讨论班就终止了。

由于布赫施塔布 1938 年和 1940 年的两篇重要论文是用俄文发表的，王元一度无法获取这些资料。后来，他听说中国科学院图书馆进口了一批俄文杂志，便立即前往借阅。这批杂志刚到，且尚未编目，便堆放在书库的地上。王元花了一整天时间，将布赫施塔布的两篇论文手抄下来。

王元发现，布赫施塔布的方法实际上是筛函数的一个迭代公式，以恒等式的形式呈现。每迭代一次，筛函数的上下界估计就会得到改进。布赫施塔布首先用布朗方法计算出筛函数的上下界，作为初始值，再通过迭代公式逐步改进，从而改进了布朗方法，并于 1938 年和 1940 年分别证明了命题“5+5”和“4+4”。

王元的思路是，用塞尔伯格筛法得出在各个范围内筛函数的上界，再用布朗方法估计筛函数的下界，并结合布赫施塔布的筛函数下界估计，以此作为筛函数的初始值，反复用布赫施塔布的方法迭代几次，最终证明了定理“3+4”。在论文的引言部分，王元表达了对华罗庚的感激之情：“华罗庚教授指出，用塞尔伯格方法结合布朗－布赫施塔布的方法可以改进上

述结果，本文的目的在于根据这一指示将上述结果改进为‘3+4’。”

这篇论文受到了极大重视，王元因此获得了 480 多元的特等稿费，而当时一名大学毕业生的月薪仅为 50 多元。王元回忆说，这笔稿费足以购买一块欧米茄手表、一件大衣和一套西服。

从“3+4”到现在

在证明“3+4”之后，王元于 1957 年又发表了定理“2+3”的证明。受王元工作的激励，中国数学家继续在哥德巴赫猜想的研究上不断攀登。此后，潘承洞证明了“1+5”，潘承洞与王元各自证明了“1+4”，陈景润则证明了“1+2”。

讲述此类故事的相关文章中最著名的，当数作家徐迟的报告文学《哥德巴赫猜想》，它影响了中国整整一代人。上世纪七八十年代，许多青年学子因为这篇报告文学而选择终身投入数学研究。一篇报告文学能有如此大的影响力，这在中国数学史乃至世界数学史上都是一个奇迹。

与广为人知的“3+4”定理相比，很少有人知道，王元不仅是潘承洞“1+5”论文和陈景润

“1+2”论文的审稿人，还对这两篇论文给予了大力支持。为了弄清潘承洞“1+5”论文的证明细节，王元与潘承洞通信 60 余封。正如中国科学院院士王元后来评价的那样：“这个故事太美丽动人了……潘承洞、王元都是胸怀坦荡。”

陈景润的“1+2”证明摘要 1966 年发表于《科学通报》，但由于当时中国的科技刊物停刊，“1+2”的证明全文直到 1973 年《中国科学》复刊才得以发表。在 1966 年的摘要中，陈景润最关键的“转换原理”并未出现，因此国外数学家普遍认为“1+3”仍然是最好的结果。而王元与闵嗣鹤作为审稿人，是少数了解陈景润“转换原理”的人。

1996 年，元老在香港对我说：“陈景润的转换原理是证明‘1+2’的关键，我只要看一眼转换原理，就能明白其余应该怎么做，用一个星期时间就能自己给出‘1+2’的证明。”以上故事不仅展现了元老高尚的人品和纯粹的学术追求，也是中国数论学派在艰难时期团结奋斗的生动写照。

元老曾经辛勤耕耘的解析数论领域正在蓬勃发展，历久弥新。进入新世纪以来，筛法与解析方法的综合应用催生了一批重要的研究成果。2013 年，华人数学家张益唐在孪生素数猜想研究中取得突破性进展，证明了相邻素数的有限差定理，为这一经典问题作出了决定性贡献。此外，塞尔伯格提出的高维筛法在陶哲轩、梅纳德等数学家的推动下焕发出新的活力，展现出惊人的潜力。如今，一批中外青年数学家正继续在这一领域探索，谱写着解析数论的绚丽华章。

元老的“3+4”定理，是中国学派用筛法研究哥德巴赫猜想的第一座里程碑，它证明了中国数学家有能力在最前沿的数学领域做出世界级的成果。哥德巴赫猜想的研究仍在继续，数学的高峰依然等待着攀登者。王元的“3+4”定理，将永远铭刻在中国数学发展的史册上，激励着一代又一代中国数学家，向着数学高峰不断攀登。

温暖的回忆

1996 年秋冬之际，我正在香港大学从事博士后研究，元老受我的合作导师廖明哲教授邀请访问香港大学。在港期间，元老时间充裕，我与元老除了在办公室座谈，还经常散步交流，既谈国内研究现状，又谈国际研究潮流。元老对中国解析数论始终抱有很深的责任感和危机感。

有一次元老很认真地对我说：“好的定理应该能站得住 100 年，但能站得住 50 年的定理就已经很少了。”元老证明的“3+4”定理，历经七十余载仍光辉灿烂，其光芒必将穿越百年，也将不断激励后辈在通往科学的高峰上努力拼搏。

2021 年 5 月 14 日，王元先生不幸逝世。时隔 4 年，谨以此文表达对元老的无限敬仰与怀念。（作者系山东大学副校长）

在催化实验室里“搭乐高”，她想“干到退休”

■本报记者 孙丹宁

2 月 2 日，闫思杨第一次潜入海底。当她按下潜水背心的排气阀，身体直立着沉入水中的刹那，窒息的压迫感突然变成通透的宁静，面镜后的双眼见证着奇妙转变：阳光在水面折成碎钻，鱼群穿梭在火山沙铺就的“海底星空”。她脑海中的第一反应是——“这就是边界”。

“上岸”一个多月后，在大连理工大学担任科研助理的闫思杨突然收到了《科学》的邮件——她作为共同第一作者的文章即将正式上线。这项研究围绕高效负载型催化剂，证明其设计需要精确构建金属与载体之间的界面结构，并充分利用氢在催化过程中的独特作用。日前，该论文已正式发表。

论文发表后，身边很多人对此十分关注，但闫思杨却略显“淡定”地说：“就像潜水一样，最迷人的永远是突破边界的一瞬。”

从自动化工程师到“分子翻译官”

在当代化学工业的大舞台上，九成“剧目”都需要一位看不见的主角——催化剂。催化剂的应用可以改变化学反应速率，在实际生产过程中催化剂的表面反应是提高化工生产效率的“指挥棒”。

而闫思杨与化工和催化的接触，要追溯到 2011 年。

此时的她刚从浙江理工大学自动化控制专业毕业，成为中国石油天然气集团的一名设计师，负责工厂控制系统的设计以及仪表的选型。

在工厂里，闫思杨看到物料罐、反应器、分离塔和换热器等各司其职，经营管网由仪表系统联通并控制，原料在自动化设备的精密操控下蜕变为形态各异的化学品。高中时代的化学课，与眼前流转的工业图景在她的脑海中悄然重叠。

也是在这时，她萌生了读研“转行”的想法，真正的化学工程领域重新出发，找到自己真正的热爱。没过多久犹豫，她就叩开了大连理工大学化工专业的大门，开启了新的征程。硕士毕业后，2018 年，与大连理工大学教授刘家旭的相遇，则为闫思杨打开了另一扇窗。

“在实验室学习过程中有幸和刘老师聊了很久的催化表征技术，让我第一次系统认知到催化表征技术的大千世界。”闫思杨说。

刘家旭团队一直致力于高效催化技术的研制设计及工业化，在国际上首次开发出双光束原位透射红外表征方法，为近真



潜水中的闫思杨。 受访者供图

实条件下催化反应的机理研究与催化剂设计提供了有力指导。

说到双光束原位透射红外表征方法，闫思杨立刻“两眼放光”。这是一项国际首创技术，就像给催化剂装上两盏“智能探照灯”，即使在高温高压的苛刻条件下，也能实时“直播”材料表面吸附分子或中间体的动态变化。

“因为我是跨专业学习，有一些仪器、控制之类的背景知识，希望能够接触顶尖的设备和科学家。就这样，我成了刘老师团队内的一名科研助理。”闫思杨说道。

搭一个大型“乐高”

有些选择就像催化剂，一旦遇见对的条件，便会迸发出超乎想象的能量。闫思杨加入刘家旭团队后，立刻着手搭建红外实验室。

大多数原位红外表征技术偏重于真空吸附方面，而吸附物种如果过量的话，就会产生游离态，分辨不清哪些是吸附质，哪些是吸附在催化剂表面的中间体，从而影响最终数据的真实性。

此时，双光束红外光谱的优势便凸显出来。它可以实时在空间采集数据，并将气相背景谱“扣除”，避免了过量的吸附质造成的数据干扰。随后，他们又加入了一些气路设计，慢慢开始探索高压、超高温的实验条件，再加入双光束，不断“做加法”。提起这段经历，闫思杨依然很兴奋：“我觉得像搭乐高一样，可以把脑海中的想法一点点在眼前实现，特别有意思。”

“每一步的突破都特别不容易。我印象特别深的是有一次探索炭材料的原位红外表征，吸气很严重，捕捉不到有效信号，整整一个月一个数据都没有，当时是真有点

‘磨人’了。”闫思杨回忆道，“我们逐步调整了各阶段的预处理以及实验条件，最终解决了这个问题。”后来，这项工作发表在《自然－通讯》上，成为了闫思杨作为第一作者发表的第一篇文章。

一项实验技术成熟了，他们就扩展下一个。目前，他们已搭建了 4 台仪器、10 个原位池，最高可以做到 850 摄氏度，实现在工况条件下的原位表征。“实验室的研究最终是为了工业应用服务的，而我们的目标就是打开真实工业反应过程中的‘黑匣子’。”闫思杨笑着说道。

在建设的过程中，团队也迎来了一个老朋友的到访——美国劳伦斯伯克利国家实验室的研究员苏际。他同样毕业于大连理工大学，与刘家旭合作多年。他这次带来的，是关于负载型金属催化剂的难题。

负载型金属催化剂在化学工业和环境清洁方面有着广泛应用，但是由于催化过程的复杂性，催化作用机理与催化剂设计始终蒙着“神秘面纱”，理论研究与实际应用过程存在着明显“鸿沟”。

考虑到这个难题，苏际找到老朋友刘家旭，想到了团队首创的“利器”——双光束原位透射红外光谱。慢慢地，劳伦斯伯克利国家实验室教授 Miquel Salmeron、研究员 David Prendergast 课题组及华中师范大学教授郭彦炳等都加入进来，一个“大家庭”逐步建立起来。

研究所需的原位红外光谱表征就在刘家旭和闫思杨的实验室里。正是通过这台大型“乐高”，让他们在催化反应中发现了新机制，最终通过修饰氧化铈上的铂单位点，设计并确定了新的“铂－铈－氢”三元界面氢化活性中心结构。

合作团队还提出了“氢化活性位点”的新理论，相当于打开了催化剂设计的大门。

该结构的一氧化碳氧化反应速率比铂单位点高出 9 倍。

经过 6 年跨越大洋的合作，这篇文章顺利发表在《科学》上。

“这种新型的氢化反应中心能够显著提高氧化反应的速率和产物的选择性，克服了传统催化剂在效率和选择性方面存在的瓶颈。界面氢化反应中心的概念可以扩展到负载型金属催化剂，将为更多重要的多相催化反应提供可靠的技术路径。”闫思杨说道。

“我愿意在这里干到退休”

这 6 年，闫思杨迅速成长。她在解决科学问题的同时，也很感谢团队搭建了一个“乌托邦”。在刘家旭的团队里，她可以吸收各位老师和同学的想法，全身心投入红外实验工作。

科研助理是目前高校、科研院所等机构常见的职位，主要是协助科研人员开展学术或技术研究工作。在他们的日常词典中，“重复”是关键词。打开精密仪器，关上数据终端，实时监测跳动的图谱，这套系统化流程已经成了闫思杨的肌肉记忆。

当被问及是否枯燥时，她连说了 3 个没有：“我真的很喜欢我的工作。”

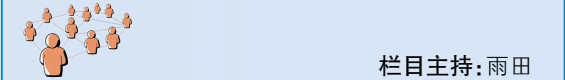
画图定制、DIY 红外池、解决实际问题……这一套流程在闫思杨看来兼顾挑战性和趣味性。“你通过我的实验会觉得流程很固定、很枯燥，但实际上我在电脑上观察到每个实验结果都截然不同。有时候同一个反应用不同的催化剂，它的路径都是不一样的，感觉每天都在接触不同的东西，它们又基于一个共同的基础，万变不离其宗。”

在休息时间，闫思杨最爱做的事情还是“出去走走”。除了潜水，她还热衷于徒步、爬山等活动，“上班看微观世界，下班看大好河山，我觉得生活特别美好”。

在《科学》发表论文后，生活好像也没什么不同，闫思杨依旧每天很早就到实验室。尽管科研助理的工作面临着项目周期短、科研压力大等问题，但是闫思杨依然兴致勃勃：“因为我们搭建的‘乐高’正在逐步走向正轨，后面还有好多事情要做，还有好多想法没有实现。6 年时间于我而言，不过是一个开始。”

“如果可以，我愿意在这里干到退休！”对于许多“90 后”“00 后”来讲，这是对一份工作的最高赞赏。

看“圈”



栏目主持：雨田

高新波 任西安电子科技大学校长

5 月 16 日，西安电子科技大学召开干部教师大会并宣布，高新波任西安电子科技大学校长、党委副书记。

高新波主要从事人工智能、机器学习、图像处理、计算机视觉和模式识别等领域的研究工作。他先后获得西安电子科技大学电子工程专业学士学位和信号与信息处理专业硕士、博士学位。1999 年，高新波在西安电子科技大学留校工作，曾担任电子工程系副主任、党支部书记，电子工程学院副院长，国际合作与交流处处长兼国际教育学院首任院长，校长助理，副校长等。2020 年，出任重庆邮电大学党委副书记、校长。

甘忠如 向母校北大捐资 1 亿元

日前，北京大学生命科学迎来百年华诞。甘李药业创始人、董事长甘忠如捐资 1 亿元支持母校生命科学学院科研教学设施改造与科研发展，并获北京大学颁发的“杰出教育贡献奖”。

甘忠如 1970 年至 1974 年期间在北京大学攻读生物学学士，毕业后留校任教，后赴国外从事药物研发工作。

1995 年，甘忠如回国创业，投身于国内胰岛素的产业化攻坚。1998 年，他带领团队创办甘李药业，并逐步成长为本土生物医药领域的重要力量。甘李药业于 2005 年推出中国首个第三代胰岛素，拓展了我国糖尿病治疗药物的选择空间。

施勇 加盟西湖大学

近日，西湖大学网站更新信息显示，南京大学天文与空间科学学院“80 后”教授施勇已于 5 月加盟西湖大学，任职于西湖大学理学院系宇宙学多波段观测天文实验室。

施勇 2003 年本科毕业于北京大学天文系，2008 年获美国亚利桑那大学天体物理博士，2008 年至 2013 年在美国亚利桑那大学和加州理工学院做博士后工作，2013 年至 2025 年在南京大学任教授。

施勇主要从事观测天文学，包括超大及中等质量黑洞、河外星系形成和演化，以及宇宙学基本参数的测量等。