

# 丘成桐：攻克物理难题的数学大师

王丽娜, 史永超

科技导报社, 北京 100081

2018年7月2日,在意大利首都罗马举办的第十五届马塞尔·格罗斯曼会议中,著名华人数学家丘成桐(图1)被授予马塞尔·格罗斯曼奖(图2),该奖表彰他在广义相对论中总质量的正定性、完善“准局域质量”概念、证明“卡拉比猜想”以及在黑洞物理研究等工作中做出的巨大贡献。马塞尔·格罗斯曼奖是物理学界最重要的奖项之一,很多著名物理学家都获得过这一奖项,包括李政道、霍金、钱德拉塞卡等,而获得过此奖的数学家只有普林斯顿大学的Sinai和哈佛大学的丘成桐。

丘成桐领奖归来不久,就在清华大学丘成桐数学科学中心接受了本刊专访。本文呈现了丘成桐访谈的主要观点和内容。

## 1 用数学方法解决了物理难题

1) 广义相对论中总质量的正定性

广义相对论是物理学中引力场的主要内容。物理学有4个基本力,引力是最特殊的,虽然目前引力与量子力学还无法融合,但是,

这20年来引力理论在物理中变得越来越重要。从中子星到发现引力波,科学家们在天文上观察到很多关于引力的现象。

整个宇宙从大爆炸到现在,有过很多重要的引力现象产生,但是这些强引力的现象都需要以广义相对论为基础的天体物理学来计算,因为牛顿力学在这时候不适用。爱因斯坦认为整个宇宙并不是静止的,而是不停地在发生变化,而且,爱因斯坦建立的方程是非线性的,这在数学的描述上产生了很多困难。另外,爱因斯坦很重要的一个贡献是他认为引力的产生是由于时空的几何现象形成的,这个观点产生了很多有意义的几何问题。

原本在牛顿力学中可以理解的事情,一旦放到广义相对论中就变得很复杂。例如,在牛顿力学中有很好的对称性,当物体在平移或旋转时,一切物理现象是不会改变的,因此很多基本观念,例如质量,就可以通过这些对称来定义。但是,在广义相对论中,就没有平移、旋转这种很简单的对称性质,这使



图1 丘成桐

得质量在广义相对论中无法用古典的物理方法来定义。早在100年前,爱因斯坦就定义了总质量的概念,但是他质疑定义的总质量是否为正?这是一个很基本的问题。在广义相对论中,时空是否稳定和这个问题息息相关,如果总质量是负的,则引力系统就不能稳定存在,就会塌垮掉。这就表示爱因斯坦的理论是错误的。因此,当时,研究引力的物理学家们都很忧虑,每年召开国际专题会议,试图搞清

收稿日期:2018-07-19;修回日期:2018-07-23

作者简介:王丽娜,编辑,研究方向为科技传播,电子信箱:wanglina@cast.org.cn;史永超(通信作者),编审,研究方向为科技传播,电子信息:shiyongchao@cast.org.cn

引用格式:王丽娜,史永超.丘成桐:攻克物理难题的数学大师[J].科技导报,2018,36(15):93-95;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.15.011

楚这个问题。

丘成桐也花了很多时间试图解决这个问题。他从1973年就开始对爱因斯坦的广义相对论产生了很大兴趣,但直到1978年,才与他的学生Richard Schoen一同用几何方法破解了这个难题。对此,当时很多物理学家都非常惊讶,他们不相信数学家有能力来解决这个问题,不过霍金认为证明的过程是正确的。从那时起,丘成桐便开始与霍金等物理学家有了更多学术上的交流。

丘成桐很喜欢与物理学家合作,他认为这种合作不仅会有跳跃性的研究进展,也能不断地反思,在这过程中扩展了很多数学前沿的研究内容。

## 2) 证明“卡拉比猜想”

“卡拉比猜想”是丘成桐在1976年完成的重要工作。

实际上,当丘成桐关注广义相对论的时候,就对“卡拉比猜想”产生了兴趣。当时,发现爱因斯坦场方程的解都有奇异点,因此,他开始思考是否存在一个没有奇异点的时空,同时是真空而没有物质的空间。他发现“卡拉比猜想”给出了一系列方法来构造这些时空,这些时空满足爱因斯坦方程的要求。这些空间现在叫做卡拉比-丘成桐(Calabi-Yau)空间,它们对古典的爱因斯坦的引力场论来说都是真空的。但是通过量子力学,空间的几何可以产生物质,而这些物质结构可以通过这些空间的几何性质来计算。

当时,年轻的数学家们都不相信“卡拉比猜想”这个美妙的命题是正确的,包括丘成桐自己。他的导师陈省身甚至认为这个研究方

向意义不大,但是,丘成桐却看到了“卡拉比猜想”在几何结构描述上的重要意义。于是,他用了3年的时间试图找反例证明“卡拉比猜想”是错的,但每次都在微

妙的地方出现问题。他后来逆转了思路,试图证明“卡拉比猜想”的正确性。这个阶段,他每天起床睁开眼睛就开始想“卡拉比猜想”,每天工作超过12 h,达到痴迷的程度。功夫不负有心人,终于在1976年成功证明了这一世界级的难题。也由于这个证明,丘成桐在几何学界一举开辟了几何分析的新方向。

实际上,在完成“卡拉比猜想”的证明之前,他还研究了其他几个比较重要的问题,都与“卡拉比猜想”有关。后来,又用“卡拉比猜想”证明了很多有待解决的数学问题,这些重要的数学问题变成了“卡拉比猜想”的推论,也验证了他之前对“卡拉比猜想”的看法。

## 3) 完善“准局域质量”概念

“卡拉比猜想”的重要之处是它提供了一个真空且有引力的空间,没有奇异点,同时这个空间是紧致的。丘成桐用“卡拉比猜想”构造出来这样的空间,提供了数学上极为重要的观念和工具,并且在物理上具有重要意义。1979—1980年,在普林斯顿召开的会议上讨论了“局域质量”的问题。当时,丘成桐邀请了罗杰·彭罗斯(Roger Penrose)参会作报告,他是做广义



图2 马塞尔·格罗斯曼奖雕塑  
(图片来源: <http://www.icra.it/mg/awards>)

相对论研究的著名学者,与霍金齐名。彭罗斯提出的第1个问题就是准局域质量的定义问题,他提出只有给准局域质量一个很好的定义,才能使得质量在广义相对论中可以进行有意义的讨论。

这个问题已经困扰了物理学家30多年,此后,丘成桐也开始考虑这个问题,最后与他的学生王慕道解决了它。这项工作使得质量在广义相对论中得到定义,物理领域中很多重要的观点也就可以讨论了。

## 2 数学是非常重要的学科

数学是科学的基础。进入21世纪,几乎所有科学都与数学相关。数学对很多学科来说必不可少,比如,人工智能中的声音与图像的处理、物理领域中的高能物理和电磁场等诸多科学问题的解决需要数学;很多经济学问题的解决也依赖于数学方法;甚至连音乐、手机、信用卡等,也用到了数学。

数学是非常严谨的学科,与其他学科有着明显的不同。例如,物理学家在地球上很多地方做实验都很成功,但是,在某个特殊地方可能就会出现异常;生物学家也一

样,很多实验在小鼠身上成功了,但是在人体上就未必成功。实验虽然很重要,但是由于实验受到了环境的影响,实验得出的结论不一定永远正确,但是一旦经过数学逻辑性的推理证明,那就一定是正确的了。所以,正确的科学理论必须要经过数学的验证。丘成桐曾这样评价数学的重要性:“数学的发展推进了科学的进步,使得数学成为现代文明的支柱。”

谈及目前火热的人工智能,丘成桐却有独特的看法。他认为,就目前来说,人工智能的很多项目基本是实验性质的,即存在一定的成功概率。就如 AlphaGo 与人类下围棋,即使失败几局也没太大关系。然而,如果人工智能用在与人类性命攸关的地方,就必须慎重对待,需要用严谨的数学来控制风险。例如,人工智能用在飞机的驾驶时,就必须达到非常可靠的程度。人工智能领域与几何分析有着密切联系,他也正在用几何学来做与人工智能有关的一些研究。

### 3 科研中的灵感是学问累积形成的

科学家经常会用“灵感”来表达头脑中突然“迸出”的关键思想。丘成桐认为,做学问不可能突然之间就产生灵感,所谓的灵感其实是累积的学问最后形成的一个想法。当做了几年的研究之后,累积下来的经验就会在脑中“发酵”,通过不同的经验去启发时,可能惊奇的想法就会突然出现。丘成桐用水塘形象地描述了灵感产生的过程:如果水塘是干的,采用很多办法水都不会喷涌出来;只有水慢慢积到一定程度时,才能喷涌而出。

### 4 诗词对科研与人生有着重要影响

对丘成桐稍有了解的人,都知道他酷爱诗词。他认为,世界上的诗词都是很高雅的文字,饱含几千年累积下来的诗人的情感,这对他做人的态度与想法都有很大的启发。另外,很多诗词是描述大自然的景观,与数学非常契合,只是二者描述大自然的方法不同,所以,他认为诗词可以促使人类对大自然有更多的认识,激发我们不断产生新的思想。丘成桐经常作诗来表达自己的情感,在完成“卡拉比猜想”时,就用了两句诗来描述当时的心境——“落花人独立,微雨燕双飞”。

丘成桐在数学领域取得非凡成就,受中国诗词的影响很大。他认为,感情的培养是做大学问最重要的一部分,“立志要做大学问,只不过是一刹那间事,往往感情澎湃,不能自己,就能够将学者带进新的境界”。2008年,丘成桐出版了《丘成桐诗文集》,从中能感受到他对诗词发自内心的热爱,也可以看到他讲数学与诗词的自然融合。他提及,在读《红楼梦》时,“想象作者的胸怀和澎湃的感情,也常常想象在数学中如果能够创作同样的杰作,也是非常伟大的事情”。

### 5 努力、好奇、学习,是成功学者必备的素质

丘成桐破解了许多世界级的难题,几乎拿遍了数学界的所有奖项,包括最高数学奖菲尔兹奖和沃尔夫奖。国际著名数学大师辛格对丘成桐的数学成就有着高度评价:“即使在哈佛,丘成桐一个人就是一个数学系!”

丘成桐非凡数学成就的获得,在旁人看来或许是轻而易举,这其中的艰辛,只有丘成桐自己心里最清楚。他曾这样描述科研中的艰辛,“我和众多朋友开拓的几何分析,也差不多花了10年才成功奠基,虽不敢说是‘以血成书’,但每一次的研究都花费工夫,甚至废寝忘食,失败再尝试,尝试再失败,经过不断的失败,最后才成就一幅美丽的图画”。

丘成桐告诫年轻的科研人员,若想在科学上取得重大突破,最重要的就是努力。人类的科学知识是经过几千年积累下来的,若想发现一个更深层次的问题,就需要充分了解前人的工作,在此基础上向前探索。其次,需要对科学有浓厚的兴趣。在研究中,需要聚精会神地去思考科学问题,如果不是对科研本身产生兴趣,就不能长年累月地静下心来思考。丘成桐在做客央视的《朗读者》时,提及华尔街的公司曾用10倍于哈佛大学的薪水来请他,但他都不为所动,因为他对“做数学学问”的理想坚定不移。最后,还需要多与其他人交流,保持不断学习的态度。一个人的能力有限,要向很多朋友或者科学家们学习,他人总有自己没有的长处。丘成桐强调,努力、好奇、学习,是一个成功学者必备的素质,没有其它捷径可寻。

在接受本刊专访时,丘成桐正与数学家们热切地讨论数学问题;专访一结束,丘成桐立刻又加入讨论中,没有半分钟的停留与休息。这位数学大师,一直在身体力行地践行着“努力、好奇、学习”!