

淡泊谦和的科学巨星

——纪念“中国氢弹之父”于敏

朱亚宗

(国防科技大学 文理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 中国“氢弹之父”于敏, 2014年国家最高科学技术奖得主, 也是2019年“共和国勋章”获得者, 时为该奖唯一不在世的获奖人。文章详细阐述了民族脊梁于敏院士卓越的科技独创、迷人的研究艺术与纯正的精神品格。于敏院士的功绩、才华与品格使他成为科技史、国防史乃至大历史上的丰碑, 也为当代卓越人才的培养提供了启发与借鉴。

关键词: 氢弹之父; 共和国勋章; 于敏; 科研艺术; 品格

中图分类号: G640 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8874(2020)03-0046-10

A Detached and Modest Science Superstar: In Memory of Yu Min, the Father of Hydrogen Bomb in China

ZHU Ya-zong

(College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Yu Min, the father of hydrogen bomb in China, was the winner of the State Preeminent Science and Technology Award in 2014, and the winner of the “Medal of the Republic” in 2019. He was the only winner of the award who was not alive. This paper expounds in detail the outstanding scientific and technological originality, charming research art and pure spiritual character of academician Yu Min, backbone of the Chinese nation. His achievements, talents and character make him a monument in the history of science and technology, the history of national defense and even the great history, which also provides inspiration and reference for the cultivation of contemporary outstanding talents.

Key words: father of hydrogen bomb; Medal of the Republic; Yu Min; the art of doing research; character

中国优秀传统文化对人才的评价, 一贯秉持德才兼备的原则。苏轼就曾指出, “古之立大事者, 不惟有超世之才, 亦必有坚忍不拔之志。”^[1] 爱因斯坦有感于居里夫人杰出的科学贡献与超凡的人格魅力, 在居里夫人悼念会上, 发表了发人深省的见解: “第一流人物对于时代和历史进程的意义, 在其道德品质方面, 也许比单纯的才智成就方面还要大。即使是后者, 它们取决于品格的

程度, 也远超过通常所认为的那样。”^{[2]³³⁹} 人类科技史上, 才智超卓且有重大贡献者的队伍里, 过分追求虚荣而陷于发明权争议者有之, 违反科学道德的学术不端者有之, 不识人类文明进步方向为法西斯效力者有之。爱因斯坦指出, “居里夫人的品德力量和热忱, 哪怕只要有一小部分存在于欧洲的知识分子中间, 欧洲就会面临一个比较光明的未来。”^{[2]³⁴⁰}

在处于科学技术发挥空前伟力的时代，科技工作者的作用与影响前所未有的。于敏院士集卓越的科技独创、迷人的研究艺术与纯正的精神品格于一身，乃是民族的脊梁。本文若能有助读者欣赏与深识于敏的品格与才智，笔者将不胜欣慰。

一、神思独运的氢弹突破

1999年，于敏被授予“两弹一星”功勋奖章，还曾获得2014年度国家最高科学技术奖，2019年，又成为“共和国勋章”获得者，而且是唯一不在世的获奖人。一个长期隐姓埋名的科技工作者，终于实至名归成为中国璀璨科学家群星中的巨星。人们无不惊赞于敏不可磨灭的科技贡献：填补我国原子核理论的空白，突破氢弹原理，发明世界氢弹两大构型之一——“于敏构型”，中子弹及其他核武器的研发，受控核聚变与X光激光的探索，我国核武器发展的战略建议，等等。于敏的才华也引起大家的热议，学界与媒体广为流行一种说法：“他永远是那个临门一脚的人。”^[3]何祚庥院士的说法更为具体生动：“到了关键时刻，临门一脚，应声入网的却总是于敏院士。”^[4]

“临门一脚”的比喻十分形象生动，无疑可以加深人们对于敏突破氢弹贡献的理解。但是，这一比喻过分强调最后关头的能力与贡献，似乎不足以客观反映于敏突破氢弹的全程贡献：从零起步，筚路蓝缕，独辟蹊径，一举扛鼎创造科学奇迹。如果要以足球赛场作比，于敏的作用更像从后半场带球起步，以惊人的过人技巧，突破多重封阻，带球直逼对方球门，最后临门一脚，定鼎赛局。就技能而言，似如世界足球比赛精彩进球集锦中的第一妙球：足球巨星马拉多纳从后场带球连过5人后的一记进球。

一切重大的科技创新都是杰出人才在时代提供的伟大舞台上独辟蹊径的伟大创造。具体的突破方式大致有两种：一是前期科技积累较为充分，科技信息传播较为广泛，相关领域的多个科技中心与杰出人才形成交流、合作与竞争，最终摘取突破性成果的杰出人才不只一家，而是双峰对峙甚至多峰并立；二是科技积累不够充分，科技信息只是初露端倪，科学共同体内只有个别杰出人才敏锐地领会到科技重大突破的信息、途径与方法，这是一条几乎从零开始、独辟蹊径的艰险的探索之路。这样敏锐的杰出人才有时甚至尚未被

科学共同体接纳，而游离于科学中心之外。

第一种情形，如17世纪的微积分创立，由英国的牛顿与德国的莱布尼兹，各自以自创的数学形式独立地完成，以致牛顿误以为莱布尼兹剽窃了自己的创新。19世纪的生物进化理论，也由达尔文与华莱士两人几乎同时独立地创立，只是达尔文的资料积累与系统论证更胜一筹。20世纪量子力学的创立，也由德国的海森伯与奥地利的薛定谔几乎同时完成，只是二者数学形式有别，海森伯采用了矩阵数学工具，薛定谔采用了微分方程。开启分子生物学与生物工程的重大发现——DNA双螺旋结构，也在剑桥大学的华生、克里克与伦敦国王学院的威尔金斯、富兰克林两个团队的交流、合作与竞争中完成。另一种鹤立鸡群、独领风骚式的重大突破，在科技史上也屡见不鲜。17世纪的天才牛顿在物理学领域里，一人独创牛顿力学三大定律、万有引力定律、反射望远镜、光的颜色理论等，完成了人类科学史上第一次伟大革命；19世纪的麦克斯韦独立揭示出电、磁的内在统一性，提出了综合前人电、磁学研究成果而有惊人预言力的麦克斯韦电磁场方程；20世纪的爱因斯坦，大学毕业后身处远离学术中心，且无名师指导的伯尔尼专利局，在26岁时一举独创狭义相对论，十年以后，再接再厉，又独创了物理学界尚无人探索的广义相对论。

于敏即是眼光独到、基础雄厚、才华卓越的能够独辟蹊径的科技引领者。

于敏加入氢弹研发工程时，核大国研发氢弹的技术途径与具体方法绝对保密，不可能借鉴。当时唯一知道的是氢弹理论上的物理过程是氢同位素的聚变反应，是一种自持的热核燃烧过程。还有就是美国的通俗小册子说到要用一个原子弹引爆氢弹，为氢弹创造自持聚变的条件。于敏与同事们可以说是从零开始，4年多的探索，“着重研究了突破氢弹的两条可能的技术途径，否定了非平衡燃烧这条技术途径；对加强型（指原子弹加聚变材料的加强型——引者）的内在规律也已基本摸清。弄清楚了这种模型的威力与重量的关系，要想威力上去，重量就得上去；在总威力中，聚变威力所占的份额不能随着威力的增加而增加；这种核弹中所加的热核材料，固然能起到加强原子弹威力的作用，但由于热核材料燃烧不充分，这种加强作用又是有限的；对于好材料的作用也进行了探索。”^{[5]61-62}这种“加强型”，实际上是改

良型的原子弹,未能充分发挥热核材料聚变的能量效应,也与中央要求的实战性轻量化目标相差甚远。可以说,直到1965年9月,中国的氢弹原理探索工作仍未有实质性的突破。1965年9月27日,于敏率领理论部一些年轻人到达上海,计划利用上海华东计算机所的J501机(5万次/秒),对改进后的加强型核弹设计再作一次系统的数值模拟计算,但是,“计算结果老是不理想,威力总是上不去,不管如何优化设计,重量已经很重了,不用好材料时威力只有几十万吨。”^[5]⁶⁴在这压力巨大的关键时刻,于敏没有放弃,一方面组织学术讲座,亲自为年轻一代系统讲授核武器理论与设计,同时通过“教学相长”的机制,进一步深入探索氢弹原理及技术途径与设计。功夫不负有心人,机遇垂青有准备的头脑。于敏认准聚变材料高密度的目标,设想控制与驾驭原子弹裂变能量,高度压缩聚变材料氘化锂-6,使其点火与自持燃烧,从而形成了氢弹初级能量传输到氢弹次级的技术途径与精巧结构,也即两级氢弹原理的理论设计。这一完整清晰的氢弹反应过程的物理图像,得到计算机数值计算结果的支持。中国氢弹研制的关键一步——氢弹原理,终于成功突破。于敏当之无愧地成为中国氢弹原理突破的主要贡献者,中国氢弹的第一发明人。中国成为世界上第四个拥有氢弹的国家,各核大国从突破原子弹到突破氢弹,美国用时7年3个月,苏联6年3个月,英国4年7个月,法国8年6个月,而中国仅用2年8个月。

1985年,于敏作为第一完成人的项目“氢弹突破和武器化”荣获国家科学技术进步特等奖;1987年,作为第二完成人的项目“气态引爆弹装置的突破”荣获国家科学技术奖特等奖;1988年,作为第一完成人的项目“中子弹装置的突破”荣获国家科学技术奖特等奖;1982年,作为第四完成人,项目“原子弹氢弹设计原理中的物理力学数学理论问题”荣获国家自然科学基金一等奖。

除了在氢弹、中子弹、核武器小型化、惯性约束核聚变、X光激光等硬科学领域有关键性、开拓性贡献外,于敏在战略咨询等软科学领域也发挥了不可替代的重大作用:通过对世界核武器发展趋势的深刻分析,于敏预感到世界核大国核裁军谈判对我国核武器发展的影响,于1986年与邓稼先提出了“加快核试验过程”的战略建议,建议书提前规划了我国核试验的部署,使中央果断

决策,为我国争取了宝贵的十年核试验时间,为提升我国核武器水平、推动核武器装备部队并形成战斗力发挥了极为重要的前瞻性作用。在国际禁核试条件下,于敏又提出了以精密实验室实验等方式支撑核武器持续研究的设想,成为我国核武器事业发展的重要指导思想。

于敏以不朽的功业,赢得了“两弹一星”功勋奖章、国家最高科学技术奖、共和国勋章等最高荣誉,成为中国科技界头等光辉的巨星,也在神州大地树起世代景仰的丰碑。

二、精湛迷人的研究艺术

在中国与世界的物理学家中,于敏的研究方式宽广而精湛,从跟踪大师到独辟蹊径,从哲学思维到科学分析,从近似粗估到数值计算,是物理学界少有的同时精通理论物理、实验物理与计算物理的大家。其从心所欲运用各种方式的才华,令人惊赞,臻于化境,科学研究在于敏那里,犹如出神入化的艺术创造,光彩夺目却难以模仿。

人类有两种基本的思维方式:逻辑思维与形象思维,它们与科学活动及艺术活动的关系,至今仍是有待深入探索的问题。年轻的爱因斯坦曾经给出一个简单的答案:“如果用逻辑的语言来描绘所见所闻的身心感受,那么我们所从事的就是科学,如果传达给我们的印象所假借的方式不能为理智所接受,而只能为直觉所领悟,那么我们所从事的便是艺术。”^[6]六十一年以后,已进入花甲之年的杨振宁1982年对这一问题提出了一种见解:“两件事情要齐头并进:就是(理性)证明是有用的;直觉也要发展。当两件事情结合得很好的时候,对于这个学科就可以掌握得多一些。”^[7]¹³⁴又说:“物理理论的发展,有两条并进的路,一条……是要与实际结合,一是要以结构的美为中心要务;在不同的时候,一条路比另外一条路来得更宽广,不过最后这两条路都是必要的。”^[7]¹⁷³正如书法艺术的训练要经历先描正楷、再写草书两个阶段,科学研究的训练也必经先模仿、后创新两个阶段。高水平的创新性研究工作必须依靠科学家个体性的自由发挥,必定有只可意会难以言传的思维活动与技巧奥秘。可以说越是研究难度大、创新程度高的科学研究,所含的个体艺术性因素也越多。

当然,艺术活动也并非意味完全的个性化与

彻底的神秘化，评论家、美学家与哲学家已经发现并将继续探索艺术的现象与规律。高水平科学创新活动中个体艺术性因素的理性诠释，也是创造心理学家、科学史家与科学哲学家一直致力的事，但这一个进展非常缓慢而充满挑战风险的探索性领域。令中国人骄傲的是，我国杰出的数学大师兼数学史家吴文俊先生，用严密的数学算法破解了天才牛顿发现万有引力定律之谜。1687年，牛顿在其划时代的著作《自然哲学的数学原理》中提出了万有引力定律，但是并没有给出从开普勒定律出发推导万有引力定律的证明过程，三百年来，后人一直无法解开其中奥秘，20世纪天才的诺贝尔物理学奖得主费曼也欲解无门。事实上，牛顿发现万有引力定律，既基于严密的数理逻辑，也借助艺术性的直觉想象，二者结合的复杂思维活动，牛顿自己也说不清楚。1986年，吴文俊应邀访问美国阿尔贡实验室，“美国自动推理学界的领袖人物沃斯（L·WOS）向吴文俊提出了如何利用计算机，从开普勒定律自动推导出牛顿平方反比定律的问题……美国自动推理界的专家们，应用他们熟悉的数学工具研究这个问题，苦无良策，长期未能解决。吴文俊回国后，利用微分情形的‘吴方法’，很顺畅地解决了这个问题”^[8]。所谓“吴方法”，是吴文俊于70年代创造的定理证明机械化方法。

牛顿含有诸多个体性艺术性因素的重大科学创新，历经整整三百年，竟可从逻辑上完全理性地推导出来。令人惊叹的，既是科学理性的非凡力量，也是模糊的直觉的艺术方式对科学创新神秘而伟大的贡献。一切令人惊赞的杰出科学家的重大创新，无不包含超越科学理性的艺术性因素，全面深入地研究杰出科学家的研究艺术，应是发扬和学习他们的精神与方法的重要基础。

于敏不仅是国内顶尖的物理学家，而且是享有盛誉的国际一流物理学大师，凡与于敏有较深接触的学者，都对其无比高效锐利而充满神秘魅力的研究才华钦佩不已。于敏的研究方式，即使是高水平的同行专家也难以学习效仿，青年后学与一般科研人员更觉无章可循、神秘莫测，而只能望峰兴叹。可以说，于敏所创造和实践的独特研究方式，已非通常的较易解读的“科学风格”，而是类似于只可意会、难以言传的艺术风格，也即进入科学研究的“艺术”境界，可与人类科技史上牛顿、麦克斯韦、爱因斯坦、海森伯、狄拉

克、华罗庚等传奇式的科学研究的艺术大师相通。解读科技史上这些大师科学研究的“艺术”，已取得许多可喜成果，如关于爱因斯坦想象力与形象思维的研究，关于麦克斯韦、狄拉克、华罗庚“以美求真”思维方法的研究，等等。这些解读对丰富人类科学方法论宝库、深化人类思维方式及训练培养青年杰出科技人才都有重大的意义。本文以下尝试对于敏非凡的科学研究艺术作一初步的解读。

（一）敏于大师手笔，倾心学习拓展

于敏的学术起点很高，就读北京大学时的研究生导师为著名物理学家张宗燧，曾是国际物理学大师N·玻尔最欣赏的年轻物理学家之一。进入中国科学院近代物理研究所工作后，前辈钱三强、王淦昌、彭桓武等皆是有重要创新的国际著名物理学家。具体指导于敏的彭桓武，指明了其从事既适应中国重大需求而又是国际前沿的原子核物理学领域，从此，于敏一头扎进文献堆里。但是于敏的过人之处不仅在于勤奋和刻苦，还能敏锐地捕捉到最重要的研究成果，而且能透过成果本身，深入领会物理大师的知识结构及研究方法等重要信息：“于敏在广泛地阅读核物理文献的基础上，还特别精读了梅尔（Mayer）和江森（Jensen）合写的关于壳模型的论文。梅尔是位女物理学家，后来因创立了壳模型理论而获得了诺贝尔奖（1963年获奖——引者）。于敏在反反复复地研读梅尔的论文时发现，她之所以能创立壳模型理论，除了她有坚实的物理基础和数学功底外，很重要的一点是她非常重视物理实验。她的壳模型理论正是在分析大量物理实验基础上建立起来的。由此，于敏感悟到从事物理理论研究，一定要仔细地了解相关物理实验的内容，关注物理现象，去伪存真，总结分析物理规律。只有这样，才能做到有所发现，有所前进。这一感悟一直成为他理论研究的信条。与于敏一起从事理论研究的人，发现他对相关物理实验了如指掌，无不惊讶和佩服。著名实验核物理学家王淦昌说，我所接触的我国理论物理学家中最重视物理实验的人是于敏……于敏觉得还有必要把相关基础理论打得更扎实，于是又仔细地钻研了大物理学家费米的《原子核物理》……他发现对称性在壳模型中非常重要，又开始了进一步深入地学习群表示理论……彭桓武对于敏……表现出的才华倍加赞赏，说‘真正钻进去了的只有于敏’。”^{[9][11]}

对于国际学术大师的前沿性重大创新,于敏的感悟是敏锐的,梅尔核壳层模型的提出,促使“核结构的理论和实验研究迅速发展,并取得重大突破”^[10]。于敏由此领悟到物理学研究的门径:理论与实验的统一性,物理对数学的依赖性。于敏从一个大师的研究方式中深刻领悟到的真谛,成为其一生研究工作的信条和遵循。

大约十年以后,于敏跟踪大师的方式跃上台阶,从学习模仿进到深化拓展和独创。二十世纪六十年代初,哥本哈根物理学派领袖A·玻尔(1975年获诺贝尔物理学奖),提出原子核内有能隙现象的新观点后,于敏通过学习与思考,进一步指出能隙现象源于原子核内核子在短程力作用下的两两配对——“超导对”,并提出了原子核的相干结构理论及模型。相关的论文《一个具有等间隔能谱的费米系统》(《物理学报》,1963年第8期)、《原子核在短程力下的相干效应》(《科学通报》,1965年,1月号),被誉为“位于国际前列”的高水平成果^{[5]24}。正是关于原子核理论方面的突出成果,年轻的于敏受到国际国内物理学界高度关注和好评,A·玻尔称于敏是一个出类拔萃的人,钱三强指出,于敏填补了我国原子核理论的空白。事实上,在中国核武器研发中,于敏娴熟地创造性应用于解决关键问题的物理学基本原理与定律,如相对论量子力学方程、狄拉克方程、布赖特-维格纳公式、康普顿散射定律、玻尔兹曼分布、泡利原理等等,都是于敏长期潜心钻研后得心应手的世界物理学大师的创新成果。于敏所以在业内成为才华卓越的全能型理论物理学家,首先因为全方位学习、继承与拓展了世界物理学大师的重要成果与研究方法。

(二) 富于哲学智慧,善抓问题关键

精通自然科学史与哲学思维的恩格斯,有许多精辟的见解:“不管自然科学家采取什么样的态度,他们还是得受哲学的支配。问题只在于:他们是愿意受某种坏的时髦哲学的支配,还是愿意受一种建立在通晓思维的历史和成就的基础上的理论思维的支配。”^[11]“辩证法对今天的自然科学来说是最重要的思维形式……熟知人的思维的历史发展过程,熟知各个不同的时代所出现的关于外在世界的普遍联系的见解,这对理论自然科学来说是必要的,因为这为理论自然科学本身所建立起来的理论提供了一个准则。”^{[12]28}“在涉及概念的地方,辩证的思维至少可以和数学计算一样

地得到有效的结果。”^{[12]70}

但是,物理学与哲学的关系,在物理学界并未取得共识。爱因斯坦赞同恩格斯的观点,并提出了许多新的见解:“认识论同科学的相互关系是值得注意的。它们互为依存。认识论要是不同科学接触,就会成为一个空架子。科学要是没有认识论——只要这真是可以设想的——就是原始的混乱的东西。”^{[2]480}“如果把哲学理解为在最普遍和最广泛的形式中对知识的追求,那么,显然,哲学就可以被认为是全部科学研究之母。”^{[2]519}“感性知觉是一切研究的出发点。只有考虑到理论思维同感觉经验材料的全部总和的关系,才能达到理论思维的真理性。”^{[2]523}

杨振宁在这一问题上发表了与恩格斯、爱因斯坦不同的看法。有人曾向杨振宁提问:“一个念物理的人应当怎样看待哲学?”杨振宁答道:“一种是哲学家的哲学,还有一种是对物理问题长、中距离(甚至短距离)的看法。”提问者又问:“第二种哲学是否指思想方法?”杨振宁明确予以否定:“不是……第二种哲学无非表示你的看法怎样,你注意什么问题。它对物理学有关键性长期性影响……至于第一种哲学,我认为它和物理学的关系是单向的。物理学影响哲学,但哲学从来没有影响过物理学。”^[13]杨振宁所谓的“第二种哲学”,是指物理学思想及方法,并明确否定了哲学对物理学的影响。

除恩格斯、爱因斯坦与杨振宁的见解外,中国上世纪六十年代还曾盛行过“哲学替代论”。即从哲学观念出发直接推断和评判具体的自然科学研究工作,并对相对论、量子力学、共振论、控制论、基因论等许多重大自然科学理论采取轻率的批判否定态度。

面对如此纷繁复杂的哲学思想观念,作为理论物理学家的于敏,保持了清醒的哲学头脑,既不唯书,也不趋时,摒弃了左右两种错误倾向,坚持辩证哲学思维可以指引物理学研究工作的正确方向。于敏与氢弹理论组,具体选择和钻研了明白易懂而有深刻内涵的毛泽东哲学著作《实践论》与《矛盾论》,于敏后来回忆说,在4年左右时间里始终以其指引突破氢弹原理的研究工作:

“当时,提倡学习毛主席的《矛盾论》《实践论》。我们以‘外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用’作为指导思想,研究了高温高密度等离子体状态下的许多基本物

理现象和规律，诸如各种形式能量的相互转换、耗损、输运和弛豫过程，各类波的产生、发展和相互作用，热核材料点火和燃烧的规律等等，得到了许多有关热核燃烧的内因和外因的重要现象和规律。”^{[14]144}

在此期间，于敏曾用《矛盾论》关于主要矛盾和主要矛盾方面的哲学思维，在氢弹热核反应纷繁复杂的头绪中，抓住最本质、最关键的环节，而略去次要、复杂而难以处理的物理过程，使主要的问题突现出来，使解决问题的途径明朗起来。于敏抓主要矛盾解决复杂物理问题的哲学智慧，给同事胡仁宇院士留下了深刻的印象：“他经常讲到，面对一个有待研究的复杂物理问题，首先要进行分解，看看到底有哪些因素影响它的运动变化……哪些是主要的，哪些是次要的。”^{[9]58}

据于敏的亲密合作者何祚庥院士回忆，“研究氢弹机制的时候存在一个链式反应，如果把它编成计算机程序计算，工作量极大，而且当时的计算机条件并不能解决这个问题。于敏想了个办法，他建议完全略去介质的运动，而首先构造一个静态无限大的中子增殖模型，专门计算中子的增殖速度，同时也就给出了升温速度……通过于敏的办法，氢弹机理研究略去了求解辐射流体力学方程带来的巨大麻烦，大大节省了计算工作量。”^[15]长于哲学分析，善抓主要矛盾，是于敏高超的化繁为简技巧的哲学基础。于敏的以小机器算大问题的过人计算物理才华，是物理学、计算机与哲学交融的胜利。抓住热核材料链式反应过程的本质和关键后，氢弹理论设计就剩下最后一道难关——氢弹构型问题。也即裂变原子弹如何与聚变热核材料结合及热核材料如何充分燃烧的问题。解决这一问题，同样得益于哲学思维指引。关于突破氢弹的最后百日奋战，于敏回忆说，“当时虽然掌握了突破氢弹的关键所在，但是要创造热核材料充分燃烧的条件，还是相当困难的事情。因为原子弹有巨大的多方面的破坏作用，是很难驾驭和控制的。这时，得益于过去对热核燃烧的内因和外因有关现象的基础研究，利用掌握的规律，通过大量的探索分析，多方面计算，反复的讨论，终于控制住原子弹的破坏因素，采取精巧的结构，创造出了热核材料燃烧的条件。”^{[14]146-147}

中国氢弹研发虽起步较迟，但研发速度超越其他核大国，理论设计水平也令世人称奇。“美国和苏联做了上千次热核试验，法国也做了200多次

热核试验，我国总共只做了46次，在核武器设计方面就达到了国际先进水平”^{[14]150}。笔者曾撰文指出，擅长哲学思维是创造后来居上奇迹的重要因素：“人类科技史表明，资金投入、硬件设施与科技创新之间常呈现统计正相关，但是总有很多后进国家、群体和个人，在资金、设备落后的情况下取得重要成就……造成这些以弱胜强、以少胜多、后进胜先进的科学超越现象的原因固然是复杂的，但其中也可以发现明显的规律，这就是人才的关键作用。而分析这些人才的内在素质，又有一个共同点，即擅长哲学思维，善于运用正确的哲学思想来指导科学研究工作。”^[16]于敏是杰出科学家高度自觉运用哲学思维的典范，为中国科技界提供了哲学智慧与专业素养深度融合的成功范例，也为当今中国拔尖人才的选拔与培养树立了一根重要标杆。

（三）基于物理原理，擅长粗估精算

于敏天性适于抽象理性，而不喜直接动手。在天津名牌中学耀华中学读书时，“除日语外，数理文史门类功课的成绩名列榜首……老师们一致认为他是耀华中学多年来未见过的优秀学生。”^{[5]11}1944年，进入北京大学工学院电机系学习后，于敏很快发现，自己在中小学时养成的刨根究底、思维严密的习惯，在工学院难以得到满足，“学工科的人，动手能力要强，而他却是心灵手不巧，不太喜欢动手。”^{[5]13}1946年，于敏为实现自己的学术理想，毅然辞谢了启新洋灰公司的资助，转到北京大学理学院物理系，虽然每天过着窝头就咸菜的清寒苦读生活，却树立了远大的学术理想：“他早早地就把自己的专业方向定为理论物理……于敏的性格和超常的智商非常适合学理论物理……除了认真学习必修课外，他还选修和旁听了一些课，其中选修最多的是数学方面的课……于敏思维敏捷、学得好，对老师之所授能融会贯通。有一次近世代数考试时……数学系学习最好的一个学生也只得了60分，惟独于敏得了100分。在学习讨论中，他常常见地独到，语惊四座。北大的教师说，多少年没有见到这样的学生了。”^{[5]15-16}1949年，于敏大学毕业，顺利考取研究生，师从长于数理的张宗燧先生。

1951年，钟情量子场论的于敏调入中国科学院近代物理研究所，1953年起，于敏的研究方向转为更切近国家需要的原子核物理。立足一流的中国科学院近代物理研究所平台，又有王淦昌、

彭桓武、钱三强等名师的熏陶,加上扎实的基础与超常的勤奋,于敏很快站到国际原子核物理学学术前沿。1961年1月,于敏再次服从国家重大需求,投身于氢弹原理的预先研究工作。尤其在独创氢弹的“于敏构型”中,显示了卓越驾驭物理原理的能力。这时的于敏已是娴熟掌握基本物理学原理,并能灵活自如地用当其所的高手。

于敏进入氢弹理论组时,大家正被一个重要问题困扰:氢弹聚变材料是氢的同位素氘、氚,必须确定氘、氚的核反应效率,也即反应截面。据梅镇岳先生的《原子核物理》教科书,氘氘反应截面的理论值是15巴,是氘氚反应截面的3倍,数据来源是国际物理学权威杂志——美国《现代物理评论》。这个数据对理论计算与实验设计非常重要。“于敏自被请来参加工作后,立即用布赖特-维格纳公式严格证明了,所有轻核反应的截面均绝对不可能超过5巴。所谓氘氘反应截面高达15巴的问题,一定是假的!这真是石破天惊第一声……由于于敏用的是从第一原理出发的理论……在听完于敏的证明以后,我们两人(指何祚庥与黄祖洽——引者)一致认为,这一结论十分可信而巧妙,因而否决了……部署、测量氘氘反应截面的实验建议。这就避免了一次大浪费。”^[17]

对于有些人期望用原子弹点燃氘化锂而引发热核反应的问题,于敏熟练运用逆康普顿散射机制、玻尔兹曼分布、韧致辐射等基本理论,通过严格证明,给出了否定的答案^[18]。

于敏驾驭物理学原理最精彩的篇章,是“于敏构型”的创造。世界上有两种氢弹构型,一是美国发明的“T-u”构型:“T”指氘,“u”指铀235。这种构型是以大量的液态氘和氘包裹原子弹,原子弹爆炸后点燃氘和氘混合体的热核反应,由于液态氘、氘需超低温冷冻机,氢弹十分笨重,达62吨,价格昂贵而无法用于实战;另一种“于敏构型”,是于敏的独创:为提升热核反应的效率,必须提高轻核材料的密度和温度,“于先生抓住了关键,利用原子弹把轻核物质压缩起来……利用原子弹的辐射能量达到目的,并提出了一种结构模型……怎么引导原子弹辐射能的传输?编制计算程序……用蒙特卡罗法试验可行性。”^[19]最终完成了氢弹理设计的突破。中国第一颗氢弹设计轻巧、高效,胜过核大国的早期研发。在突破氢弹原理的研究中,于敏担当大任,一枝独秀,无可替代。有人评论说,“理论部有不少同志思想

活跃,对突破氢弹的途径提出过各种想法,也有人提出过用原子弹能量的这样或那样的朴素猜测。但有的是不合理的,有的因缺乏清楚的物理思想和必要的理论估算,并没有形成一个可操作的合理的物理模型。”^{[5]67}这不禁使人想起300多年前,万有引力定律的探索过程中,胡克的定性猜测与牛顿的严密证明之间的巨大差距。

作为世界一流的理论物理学家,于敏在氢弹理论研究中让核大国刮目相看的精彩之笔还不止氢弹构型。如关于辐射不透明度的研究,美国在原子弹爆炸成功后,研究辐射不透明度数据时,有关专家采用的物理原理是精确度较低的非相对论量子力学方程,这对于高温重物质而言,会产生较大的误差。而“中国人一开始就从相对论方程出发,起步比美国人高,可以说是后来居上”^{[9]190}。而这样的高起点研究得益于于敏的高水平指导:“为向总体设计提供高精度高温重物质的辐射不透明度数据,在于敏先生指导下,该组(指辐射不透明度研究小组——引者)决定求解全相对论量子力学方程,以算准原子(离子)结构……到1964年中,全部程序试算成功。”^{[9]190}

突破氢弹原理的理论研究,不仅要深谙物理学基本原理,而且还要有多方面的高超技能,是一个包含基础物理原理运用、近似方程粗估与计算机数值模拟计算三个紧密联动的极其复杂的探索过程。其中,近似方程粗估是连结物理原理与数值计算不可或缺的中间环节。由于包含原子核裂变与热核材料聚变两级的氢弹爆炸异常复杂,因素众多,相互影响,过程多变,在掌握基本物理原理以后,必须找出反映主要物理过程的近似方程,将复杂的物理过程化繁为简,对数据作出粗估,从而对数值计算结果或实测数据心中有数。笔者大学时代的物理老师严济慈先生擅长物理粗估,讲课时反复强调对学习和研究中遇到的物理量要心中有数,能粗估其数量级,并常在课堂上提问学生。何祚庥院士更称粗估是物理学研究的灵魂。国际上,物理学大师费米是出名的粗估高手,另一位诺贝尔物理学奖得主W·Ketterle也善于用非常简单的物理公式描述和估算极其复杂的物理问题。与上述擅长粗估的大师相比,于敏的粗估能力毫不逊色。这源于于敏掌握的迅速把握物理本质的能力,即爱因斯坦所论述的一种非凡能力:“掌握理论观念的本质,剥掉理论的数学外衣,直到清楚地显露出简单的基本观念。”^{[2]325}

何祚庥院士曾讲述过一个精彩的案例：“有一次，一位法国的核物理学家到原子能所作有关康普顿散射的报告。报告过程中，报告人还没有讲实验结果，于敏就小声地对坐在旁边的何祚庥说，这个分支比是 10^{-4} 至 10^{-6} 数量级。后来报告人给出的实验结果，果然如于敏所估计的。当时何祚庥觉得他实在是太神了。”^{[5]24}

在突破氢弹原理的上海百日奋战中，在计算机精确计算前的理论研究过程中，于敏神妙的粗估发挥了重要作用：“于敏苦苦思索，估算了几天几夜……从辐射流体力学、中子扩散和热核反应的基本方程出发，结合以前的理论探索和最新的计算结果，时而进行严密的推导，时而进行量纲分析和粗估，旁证侧引，列举了实现热核材料自持燃烧的各种可能途径，比较了它们的优劣利弊，详尽地论证了实现热核材料自持燃烧的内因和必要条件，提出了两级氢弹的原理和构型设想。”^{[5]66-67}这一氢弹原理与构型，得到了计算机数值模拟的确证，中国终于在1966年12月28日成功实现首次两级热核试验，并于1967年6月17日成功爆炸了第一颗氢弹。

对于核武器研发中物理问题的计算机模拟计算，于敏掌握不少编程窍门，又因深刻理解数据的物理含义，因而对计算数据有惊人的敏感性与判断力。杜祥琬院士曾回忆说，有一次，“于敏和几位搞物理的同事，盯着纸带上打印出来的随时间变化的物理量。突然，于敏指着一个物理量说：‘不对，这个物理量错了！’于是，大家开始查找错误的根源，最后发现执行这个物理量计算的晶体管坏了。于敏由物理量的概念，能找出计算机一个硬件的错误，着实令人佩服！”^[20]

关于如何优化算法，来提升计算效率的问题，于敏也有独到的思路。据于敏的学生蓝可回忆说，“于老师的要求是非常严格的。记得在用逃逸概率方法处理柱对称等离子体中共振线的输运时，计算公式含四重复杂的积分，而共振线有成百上千条，计算量非常大。于老师认为可以用一个近似表达式来处理。当我通过好些天的工作仍找不到方向时，于敏老师还是坚定地说：‘必须要有近似表达式，你一定要给出一个来。’一点也不给我退路。最后，经过仔仔细细的分析，我终于找到了一个计算简单、相对误差很小的近似表达式。这多亏于老师的严格要求啊！”^{[9]193}

三、纯正高尚的精神品格

与非凡的科技成就及迷人的研究艺术交相辉映的是于敏感人至深的人格魅力。于敏的精神品格，是中国优秀传统文化、世界近现代科学文化与中国国防科技文化交汇融合的结晶，必将积淀为中国乃至世界精神宝库中熠熠生辉的瑰宝，也必将成为永远激励后人追求真善美的动力。

（一）家国情怀

1926年，于敏出生在天津一个小职员家庭，对贫困动乱的旧中国有深刻的印象，对爱国强军有强烈的愿望：“我的青少年时代是在抗日战争时期沦陷区度过的，亡国奴的屈辱生活给我留下深刻惨痛的印象，而我周围很多同事都是在外国留学，出于爱国热情，放弃国外优厚待遇回到祖国从事这项工作，这都对我影响很大，核武器是一种保障国家安全的手段。作为年轻的新中国，不能没有自己的核力量。这促使我下决心从基础研究转向研制氢弹工作。”^[21]

于敏有极高的自然科学理论兴趣与天赋，大学时代曾不惜代价从机械专业转向物理学，并选择了理论物理中最抽象繁难而仍是物理学前沿的量子场论作为自己的研究方向，这是一个有理论天赋的青年学子最易登堂入室，甚至攀登高峰的领域。在理论物理前沿探索创新而荣获诺贝尔物理学奖的青年才俊不乏其人：1932年的海森伯、1933年的狄拉克、1957年的李政道，都在31岁时因理论物理创新而登上诺贝尔奖领奖台。于敏的学术研究工作开局良好，考上北京大学研究生后，导师张宗燧这位中国统计物理与量子场论的开拓者，也不禁赞叹说，没见过物理像于敏这么好的。但是，当中国核武器与原子能和平利用需要于敏从量子场论转向原子核物理时，于敏虽心有不舍，仍然从国家需要的大局出发，改变了自己的研究方向。当于敏在新的原子核理论方向渐入佳景，进入国际前沿，受到同行高度赞扬时，钱三强又从氢弹理论预先研究的重大需求出发，要求于敏再次改行，转向国防科技研发领域。于敏“经过一番短暂的思想斗争以后，就欣然接受了时代赋予他的光荣使命，决定再次改行，下定决心，全力以赴地参加氢弹理论的预先研究工作。”^{[5]41}

从此，才华横溢的理论物理学家于敏基本上隐姓埋名，潜心一志地献身于中国国防科技事业。

其间,曾经三次与死神擦肩而过,并度过了无数个压力巨大、殚精竭虑的不眠之夜。有一段令人心酸眼湿的文字写道:“于敏长年风餐露宿,艰辛地度过了整整10年的单身汉生活,并落下了胃炎,双腿也冻出了关节炎。病情发作时,时常疼得他死去活来,整夜无法入睡。然而,他以坚强的毅力,长年坚持一次次核试验,不断对中国核武做着改良工作,以求精益求精,万无一失。有一次,当于敏好不容易挤出几天假期回北京探亲,妻子孙玉芹看着门外那个皮肤黝黑、满脸皱裂的长头发‘流浪汉’,不禁发问:‘您找谁?’当孙玉芹终于认出眼前这个落魄的汉子正是她和孩子们日思夜想的亲人时,禁不住抱住于敏放声大哭。这时,于敏反而安慰起妻子:‘没什么,不就是去野外搞科考嘛。’”^[22]

拥有强烈的家国情怀,而同时又有宽广的国际视野与深沉的历史意识,是于敏高尚品格的一个重要特征,也是于敏高人一筹的地方。杜祥琬院士在一次采访中说,“他十分重视研究国际上的信息资料。1992年,他在同我们的一次谈话中,又一次分析了核禁试的前景,他说:‘1963年的条约,是因为他们(美苏等国)大气层的试验做够了,但地下试验还在做,以通过近区物理测试了解小型化的途径。1974年的条约(美苏签订的《限制地方核试验当量条件》),是因为大当量的做够了,可以限制15万吨了。现在,在核试问题上,它们的每步棋也各有底牌。’经过一番分析,他认为‘全面禁核试或分步骤达到禁试都是可能的。’因此,要抢在这之前加强实验室工作。在经过有限的核试验之后,通过实验室工作,可以解决安全、可靠的问题。以后几年的实际情况基本上就是他分析的那样。”^[23]

于敏深谙历史唯物论,既不忘过去的状态,也深知未来的面貌。于敏坚信,只要全球形成多极化格局,霸权主义就没有实战的余地,和平与发展就会成为真正的现实。“我想,核武器最终会被销毁。”“我当然不愿意打仗,我打心眼里赞成核武器最好都彻底销毁、完全禁止。可是,在50年代,核大国几次威胁要使用核武器来打我们,你要想不受人家欺侮的话,就不能没有核武器。”正是非凡的核武器研发才能与经验,再加上深刻的历史唯物主义思想,使于敏成为中国顶尖的国防科技战略家。

(二) 质朴正直

年少的于敏朴素真诚,非常励志。“面对穷家弱国,小小的于敏想,自己该怎么办?他想自己的出路只有努力奋斗,认真读书,学好本领,才能救弱国于累卵之危,助穷家免饥羸之困,同时自己个人也才有前途。学什么本领?他觉得自己性格内向,不喜欢交际,喜静不喜动,喜欢动脑子不喜欢动手,这样的性格特点只有努力学好科学知识,将来去搞科学研究……科学救国是于敏少年时代就立下的志向。从此以后,他矢志不改,从不动摇,一直为实现自己的理想抱负奋斗不懈。”^{[5]6-7}少年立志的于敏,又经历了北京大学现代科学文化的熏陶与科学方法的训练,并经过建国初革命思想的教育与建设高潮的鼓舞,焕发出了巨大的学习与工作热情,业务水平迅速提升,成为中国物理学界一颗耀眼的新星。

人类科技史表明,这样一类大智若愚的人才,往往是难得一见的拔尖人才苗子,他们常常是未来重大突破的主角。术业有专攻,回报有迟早。人们应以宽容平和的心态等待他们未来可能作出的令人惊赞的创新。若对科技人才实施“给高才以空间、给中才立规矩、给低才以出路”的分类管理,庶几可以更好地各得其所,用当其才,使中华民族伟大复兴中最宝贵的人才,更多地站立在世界科技高峰。

一向平和低调的于敏,当遇到违反实事求是与不遵从科学规律的事情时,也会显示出刚直不阿、坚持真理的勇气。胡思得院士、朱建士院士回忆说,于敏不说假话。有次大家对某次试验产生不同看法,于敏不计个人得失,以科学家的良知实事求是地分析处理问题,“老于后来对我们说:‘如果说假话,我现在可以轻松过关,但我经受不了历史和真理的考验。我宁愿现在挨整,绝不说对不起历史的话,不说违背真理的话’。于敏同志这种大义凛然的态度,在当时的政治环境下,确实是难能可贵,对我们是极大的教育和鼓舞,也免使科技工作误入歧途。”^{[9]66-67}

(三) 轻己淡我

于敏朴实无华的家中,有一副醒目的条幅:“淡泊以明志,宁静以致远”。于敏十分敬佩诸葛亮,以他的名言作为座右铭,与此同时,不乏文学才华的于敏也说出了一句名言:“我只是萤火之光,不可与皓月争辉”^[24]。

功夫艺高的于敏令人高山仰止,然而于敏身

边的人看到的是：“中央电视台有几个著名栏目都想请于先生做嘉宾，于先生总是婉言谢绝，谦逊地说：成绩是大家的，我个人的确没什么好说的。许多栏目的编导、记者不解，问我们说：像他们这样的知名栏目所请嘉宾都是十分乐意合作的，为什么于先生一直未曾首肯呢？”^{[9]198}原因在于，于敏轻己淡我，真正的心灵超凡，彻底的淡泊名利。而这又源于深沉的历史意识与强烈的全局观念：“核武器的研制是集科学、技术、工程于一体的大科学系统，需要多种学科、多方面的力量才能取得现在的成就，我只是起到了一定的作用，氢弹又不能有好几个‘父亲’。”^[25]于敏坚决不同意给自己戴上“中国氢弹之父”的桂冠，并说：“一个人的名字，早晚是要没有的。能把自己微薄的力量融进祖国的强盛之中，便足以自慰了。”^[26]

与淡泊一样令人敬仰的是谦和。于敏的学生蓝可的切身感受是：“我在于老师指导下学习了这么多年，从来没有看到待人对事籍以激烈的言辞，从来没有听到于老师高声调表述其学术观点。对于他所不同意的学术问题，无论对方年纪大小、地位高低，于老师阐述完他的观点后，最后总会用征询的语气说：是不是这样更好一些？是不是那样更合理一些？语气永远是那么的温和，态度永远是那么的真诚。而且，他特别鼓励和支持年轻人有自己的见解。我们在一起讨论工作时，只要他发现我有一点想法，他都会想方设法让我充分表达出来。”^{[9]195}

于敏是大物理学家，还承担不少职务。研究工作和管理工作都很繁忙，但就是这样一位忙人，同事们都说向于敏请教问题有“三不”：一是提问的时间不受限制。不论是上班、下班，在办公室，还是在家里，随时都可以问他；二是提问的范围不受限制。不论是物理的、力学的、状态方程，还是计算方法，都可以向他提；三是即使提出一个看来有些幼稚可笑的问题，他也照样耐心而热情地给你讲解，直到你懂了为止^[27]。

于敏与人交往时，还有一个非常难能可贵的特点，就是不给人造成一点压力。“他为人谦和、平易近人、深入实际、深入群众。大家都亲切地称呼他‘老于’。虽然，他在科学上是十分严格的，可是大家对他却没有一点惧怕的感觉……许多科研人员都说：跟老于讨论问题我们很舒心，可以没顾虑地提出不同的意见。”^[28]

于敏有出神入化的研究能力，即使是在西方

获得博士学位的著名学者，也对他礼让三分，一般同事或合作者的专业水平与于敏相比，更有巨大的差距。但是占据绝对优势地位的大学者，竟对一般人不产生任何压力。这不禁使人想起爱因斯坦对物理学大师洛仑兹的赞美：“从来没有使别人感到压抑。谁都觉得他很卓越，但是谁也不觉得他盛气凌人。”^{[2]577}这是一种智慧，更是一种境界，此外还得益于与助人为乐的精神完全协调的温和性格。天生的个性，丰美的心灵，同无与伦比的科技才华完美地融于一身。

于敏的功绩、才华与品格，将使他成为一座丰碑，永远为科技史、国防史乃至大历史所铭记。

参考文献：

- [1] 苏轼. 晁错论[M]//古文观之. 长沙: 岳麓书社, 1982:615.
- [2] 许良英, 李宝恒, 赵中立, 等. 爱因斯坦文集: 第一卷[M]. 北京: 商务印书馆, 1977.
- [3] 高雅丽. 他永远是那个临门一脚的人[N]. 中国科学报, 2019-01-22(3).
- [4] 何祚庥. 当之无愧的氢弹构型最主要发明者[J]. 中国经济周刊, 2019(2):53.
- [5] 郑绍唐, 曾先才. 于敏[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2005.
- [6] [美]海·杜卡斯, 巴·霍夫曼. 爱因斯坦读人生[M]. 高志凯, 译. 北京: 世界知识出版社, 1984:39-40.
- [7] 潘国驹, 潘星华, 韩川元, 等. 人间重晚晴——杨振宁、翁帆访谈录[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 胡作玄, 石赫. 吴文俊之路[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002:132-133.
- [9] 卫广刚, 郝晋. 于敏院士八十华诞文集. 北京: 原子能出版社, 2006.
- [10] 杨建邺, 朱新民. 诺贝尔奖获奖者辞典[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1994:89.
- [11] 国家科委政策法规司. 马克思、恩格斯、列宁、毛泽东、周恩来、邓小平论科学技术[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1990:35-36.
- [12] 恩格斯. 自然辩证法[M]. 北京: 人民出版社, 1971.
- [13] 宁平治, 唐贤民, 张庆华. 杨振宁演讲集[M]. 天津: 南开大学出版社, 1989:151.
- [14] 于敏. 艰辛的岁月, 时代的使命[M]//罗荣兴. 请历史记住他们——中国科学家与“两弹一星”. 广州: 暨南大学出版社, 1999.
- [15] 高雅丽. 他永远是那个临门一脚的人[N]. 中国科学报, 2019-01-22(3).
- [16] 朱亚宗. 哲学思维: 无形而巨大的科技创新资源[J]. 哲学研究, 2010(9):119.

科技大学校级优质课程, 研究型教学改革成果获国防科技大学教学成果二等奖。以“材料物理”课程为基础的“简明固体物理”慕课课程在中国大学慕课平台上线, 获得了广泛好评。

五、结语

“材料物理”课程是材料科学与工程专业的核心基础课。在多年的课程教学实践过程中, 课程教学团队针对原有课程内容未突出基础理论的拓展与应用、以教师为主的授课形式难以满足学生综合能力培养目标要求、单一考核形式难以准确把握教学动态和效果等问题, 坚持“以能力产出为导向”, 围绕“突出学生主体地位、培养学生创新思维能力”这一主题, 持续开展研究型教学改革, 在教学内容优化、教学方法改革、考核形式改革、教材建设、应用专题模块和教学资源库建设等方面取得了明显的成效, 教学效果得到显著的提升。相关教学改革措施已逐步辐射到本专业其他核心骨干课程, 一定程度上带动了本专业

教学理念向“以学生学习效果为中心”的转变。

参考文献:

- [1] 万红, 白书欣. 材料物理课程建设思考[J]. 高等教育研究学报, 2009(C1): 21-23.
- [2] 唐宇, 张怡, 叶益聪, 等. “正奇结合”: 材料专业《固体物理》课程教学探索[J]. 科教文汇, 2019(8): 78-79.
- [3] 万红, 白书欣. 材料物理课程建设思考[J]. 高等教育研究学报, 2009(C1): 21-23.
- [4] 黄昆, 韩汝琦. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 25-30.
- [5] 叶益聪, 万红, 白书欣. 非物理专业研究生《固体物理》课程的研究型教学探索[J]. 首都教育学报, 2014(5): 79-82.
- [6] Drumel A. Empty lattice approximation[EB/OL]. (2019-12-12)[2020-04-26]. <http://lampx.tugraz.at/~hadley/ss1/empty/empty.php>.
- [7] Drumel A. Empty lattice approximation[EB/OL]. (2019-12-12)[2020-04-26]. <http://lampx.tugraz.at/~hadley/ss1/empty/empty.php>.

(责任编辑: 邢云燕)

(上接第55页)

- [17] 何祚庥. 于敏: 当之无愧的氢弹构型最主要发明者[J]. 中国经济周刊, 2019(2): 50-51.
- [18] 何祚庥. 于敏: 当之无愧的氢弹构型最主要发明者[J]. 中国经济周刊, 2019(2): 51.
- [19] 杨琳. 众物理学者读于敏[J]. 百年潮, 2015(12): 32.
- [20] 高雅丽. 他永远是那个临门一脚的人[N]. 中国科学报, 2019-01-22(3).
- [21] 杨琳. 众物理学者读于敏[J]. 百年潮, 2015(12): 28.
- [22] 王玉琴. 于敏: 隐身28年的“共和国铸剑师”[J]. 炎黄春秋, 2019(6): 12.
- [23] 杨琳. 众物理学者读于敏[J]. 百年潮, 2015(12): 33.

- [24] 马晓岚. 忆采访于敏院士二三事[N]. 中国科学报, 2019-01-22(3).
- [25] 刘骄. 国防科技事业改革发展的重要推动者[J]. 新湘评论, 2019(5): 26.
- [26] 刘骄. 国防科技事业改革发展的重要推动者[J]. 新湘评论, 2019(5): 26.
- [27] 宋炳寰. “共和国勋章”获得者于敏同志的一些往事[J]. 百年潮, 2019(11): 24.
- [28] 宋炳寰. “共和国勋章”获得者于敏同志的一些往事[J]. 百年潮, 2019(11): 24.

(责任编辑: 王新峰)