

超越巴斯德象限的基础研究动态演化模型及其实践内涵

张慧琴¹, 王鑫^{1,2}, 王旭¹, 孙昌璞¹

(1. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100193; 2. 中国工程科技创新战略研究院, 北京 100088)

摘要: 国家需求牵引的基础研究关系着我国源头创新能力和国际科技竞争力的提升, 是颠覆性科技产生的重要驱动力, 对我国创新型国家建设的重要性十分突出。为此, 需要深入理解其内涵及基本发展规律, 以更好引导基础研究的发展。本文回顾了布什科学研究线性模型的内涵、应用及其如何推广至巴斯德象限模型, 在此基础上, 考虑时间维度, 引入基础度和应用度概念, 提出由 3 个维度刻画的基础研究动态演化模型。为展示基础研究动态演化模型的适用性和优越性, 以激光和强激光的发展为案例进行说明, 阐述了国家需求牵引下基础研究、应用研究和技术开发之间的相互促进、螺旋上升的互动关系。基于本文模型描述的基础研究发展规律, 针对需求牵引的基础研究, 今后应更加强调学术诚信及可证伪性; 要发挥基础研究对关键技术发展的方向性判定作用, 并避免需求牵引引起的主观性诱导和误导。

关键词: 基础研究; 需求牵引; 布什科学研究线性模型; 巴斯德象限模型; 基础研究动态演化模型; 可证伪性

中图分类号: C93-03 **文献标识码:** A

Beyond Pasteur's Quadrant Model: A New Dynamic Model of Basic Research and its Implementation

Zhang Huiqin¹, Wang Xin^{1,2}, Wang Xu¹, Sun Changpu¹

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100193, China; 2. Chinese Academy of Engineering Innovation Strategy, Beijing 100088, China)

Abstract: Basic research inspired by national interest is critical for the promotion of China's innovation capacity and global competitiveness in science and technology; it is also a major driving force for disruptive technologies. Therefore, the concept and development law of basic research inspired by national interest should be well studied to guide the development of basic research. In this study, we review the connotation and application of the linear model of innovation proposed by Vannevar Bush and the Pasteur's quadrant model proposed by Donald Stokes. Based on these models, we introduce basicness and useness dimensions along with a time dimension and develop a new three-dimensional dynamic model of basic research. The development of intense lasers fits this new model well and clearly demonstrates the spiral upward interactions among basic research, applied research, and technology development inspired by national interest. On the basis of this new model of basic research development, we emphasize the importance of falsifiability and research integrity, and the decisive role of basic research on the key technologies. Besides, the subjective misguidance of researches inspired by national interest should be avoided.

Keywords: basic research; research inspired by demand; Bush's linear model of innovation; Pasteur's quadrant model; dynamic model of basic research; falsifiability

收稿日期: 2021-05-17; **修回日期:** 2021-06-08

通讯作者: 孙昌璞, 中国工程物理研究院研究生院教授, 中国科学院院士, 研究方向为量子物理; E-mail: suncp@gascaep.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究(二期)”(2019-ZD-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

在当前中美全面竞争的严峻国际形势下，国家需求牵引的基础研究对我国创新型国家建设的重要性显而易见。因此，我们必须在当代科学发展理论的框架下，全面深入理解需求牵引基础研究的内涵和本质，掌握其基本发展规律。要充分认识到，需求牵引的基础研究与兴趣驱动的基础研究一样，不仅会带来人类思想的革命，而且在颠覆性科技创新方面更具推动力。

万尼瓦尔·布什在《科学：无尽的前沿》报告中提出了基础研究自动引发应用技术创新这一科学发展理论 [1]。这份报告指导了之后 70 多年美国的科技政策，促进了第二次世界大战后美国科学技术突飞猛进的发展，也深刻影响了世界科学技术的发展。需要指出的是，布什的理论是在不断改进中向前发展的。唐纳德·斯托克斯研究发现，巴斯德针对甜菜酿酒的应用技术研究直接导致了微生物学的建立，但这一事实在布什“从基础到应用”的科学发展线性模型（见图 1）中找不到相应位置。为此，斯托克斯发展了布什的理论，建立了科学发展的二维巴斯德象限模型（见图 2）。该模型包括纯基础研究（玻尔象限）、技术引发的基础研究（属于应用基础研究，巴斯德象限）、纯应用研究（属于技术创新研究，爱迪生象限），以及认识目的和应用动机都不明显的探索性研究（属于过自由探索研究，皮特森象限）4 个区域 [2]。这一科学发展理论强调，应用技术牵引的基础研究不仅与兴趣驱动的基础研究同样重要，而且有可能直接引发颠覆性观念的创新。

然而，斯托克斯提出的科学发展的巴斯德象限模型也存在一定局限性，因为不同类型的基础研究内涵边界是不清晰的。为了克服这一问题，本文在

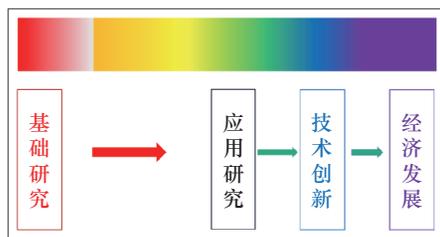


图 1 布什科学发展线性模型预言的科学研究谱线

斯托克斯的巴斯德象限模型基础上，引入基础度(b)和应用度(u)的序数标度，用二维图示描述基础研究的演化发展过程（见图 3）；由此进一步考虑时间维度，构建了基础研究演化发展三维模型：从时间演化的观点看，一种类型的科学研究由一条运动轨迹所描述，而不是用静态的 4 个象限来表示。基础研究演化发展模型可以明确区分应用基础研究和纯技术的应用研究，避免了巴斯德象限模型中意义不明显的皮特森象限带来的边界模糊问题。我们的模型不仅在理论上逻辑完备，而且可以准确反映各类基础研究的特征，为分类支持基础研究提供理论依据。

本文还以激光和强激光科技发展为例，说明该模型的正确性和优越性；基于基础研究动态演

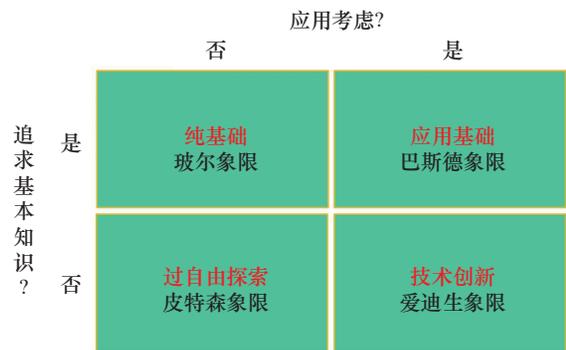


图 2 巴斯德象限模型 [2]

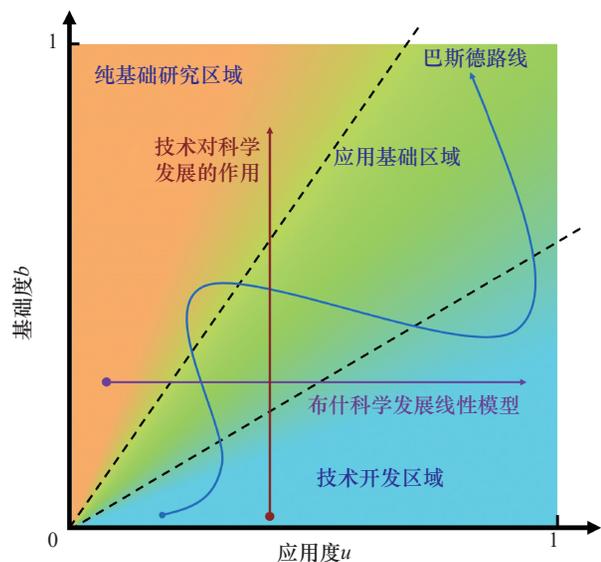


图 3 基础研究演化发展模型

注：布什线性模型由几乎平行横轴的紫色横线表示，平行于纵轴的竖线代表纯技术进步引发基础研究创新。

化模型描述的基础研究发展规律,指出对于不同类型研究中可能出现的问题,可以基于规律对症下药,如在巴斯德象限中的需求牵引的基础研究,应注意的关键问题是主观性诱导和误导。

二、从布什科学发展线性模型到巴斯德象限模型

(一) 布什科学发展线性模型的重要性及其现实意义

1945 年,布什在《科学:无尽的前沿》的报告中指出,基础研究会产生产新概念和新原理,进一步产生新产品和新工艺,最终催生新产业并创造更多的就业 [1]。这一论断被总结为科学发展的线性模型,对之后美国科技发展产生了重要影响,也指导了世界其他国家科技政策的制定。时至今日,布什的这一理论仍在影响着美国,多数学者认为相关报告依然具有重要的现实意义。2012 年,美国总统科学顾问委员会的一份报告指出,布什科学发展线性模型将基础研究与国家兴盛有机地联系起来 [3]; 2020 年 5 月,美国参议院和众议院两院议员分别向两院提交的“无尽前沿法案”可视为对此的一种致敬 [4,5]; 2020 年,美国科学院的一份报告中提到,布什认识到前沿基础科学对产业、教育和经济发展的必要性,从而建立了政府与科学研究的新关系,推动政府对基础科学研究制度性的资助,这一远见卓识为美国后续几十年的创新发展提供了强大动力,成就了美国今天的繁荣 [6]。另外,布什科学发展线性模型在国家政策上是有针对性的,旨在呼吁政府加强基础研究 [7]。核武器与核能应用、半导体、激光、基因工程以及生物医学技术等的发展都是线性模型的经典案例,这说明布什科学发展线性模型是极具实用性的 [8]。经济合作与发展组织出版的《弗拉斯卡蒂手册》继承了布什科学发展线性模型,并对该模型进行了优化,提出基础研究与应用研究之间存在着互相反馈影响的密切关系 [9]。

(二) 布什科学发展线性模型的内涵

基础研究活动的目的是认识世界,不必考虑实际应用,而应用研究的目的则是改造世界。布什科学发展线性模型事先将基础研究和应用研究简化为互相独立的两种科学活动,然后阐述二者关系。在

这种情况下,这两种研究活动之间存在着内在的张力,它源于资源总量的约束:

$$B+A=T \quad (1)$$

式(1)中, B 为基础研究方面的资源投入量, A 为应用研究方面的资源投入量, T 为资源投入总量。在总量 T 固定的约束条件下, A 和 B 有此消彼长的关系。

接下来,我们探讨在总量 T 固定的约束下科技投入的效用问题。首先,设定投入基础研究的效用函数为 $F_b(B)$ 和投入应用研究的效用函数为 $F_a(A)$ 。其次,根据基础研究和应用研究的内涵属性,假设效用函数的不同变化方式。基础研究的效用一开始为0,当达到一定的阈值之后,基础研究的效用随着投入增加而增加,但是边际效用(效用变化率) $F'_b(B)$ 逐渐降低;应用研究的效用也是随着投入增加而增加,但是边际效用 $F'_a(A)$ 呈现出先增后降的趋势(见图4)。这是因为在通常情况下,基础研究一旦突破,开始时会长增长较快,之后逐渐变慢;而应用研究需要先期积累,随后才会迅速增长,之后增长减缓,二者变化规律相似但并不同步。如果基础研究和应用研究相互独立的话,在总量 T 一定的条件下,基础研究投入过多会挤占应用研究的投入,将导致总投入的边际效用降低。因此,总的效用函数为:

$$F(A)=F_a(A)+F_b(T-A) \quad (2)$$

总的边际效用函数为(见图4中的蓝色虚线):

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A}=F'_a(A)-F'_b(B)|_{B=T-A} \quad (3)$$

根据公式(3)和图4中蓝色虚线的趋势,特定的投入 A 值后,总的边际效用会变成负的,也就是说,对基础研究过多投入挤占了应用研究的资源导致科技投入总的社会效益下降。然而,就科学发展的实际情况而言,这一结论显然是不正确的,原因在于假设了 $F_a(A)$ 和 $F_b(B)$ 是独立的,仅依赖各自的独立投入,而基础研究可以是促进应用研究发展的内生变量。因此, F_b 不仅是应用研究投入 B 的单调增函数,而且还是 F_a 的增函数:

$$F_t(A) = F_a(A) + F_b(F_a(A), T-A) \quad (4)$$

这时，对于基础研究投入而言，总的边际效用有可能不再为负，而是随着 A 的增加而增加（见图 4 中的黑色曲线）。这就是布什科学发展线性模型能够在一定场景下正确描述科技进步的社会经济学机制。

（三）对布什科学发展线性模型的质疑

布什科学发展线性模型自诞生之日便引发了诸多学者的质疑，尤其是针对该模型中暗含的“基础研究和应用研究之间存在明确的界限”这一论述引起了广泛而长期的争论。有学者认为，基础研究和应用研究之间没有明确的界限，并试图以自由性研究和计划性研究来取代基础研究和应用研究；有学者认为，基础研究可以分为任务定向的基础研究和自由的基础研究，其中任务定向的基础研究是期望有直接的、可预见的使用价值的基础研究；也有学者进一步将任务定向的基础研究称为定向基础研究，并且认为“基础”和“应用”不是反义词，直接面向应用的研究工作在性质上也可以是广义的基础研究 [2]。

斯托克斯通过分析巴斯德甜菜酿酒的研究，将布什科学发展线性模型拓展为二维的象限模型（见图 2），即巴斯德象限模型 [2]。巴斯德象限模型在

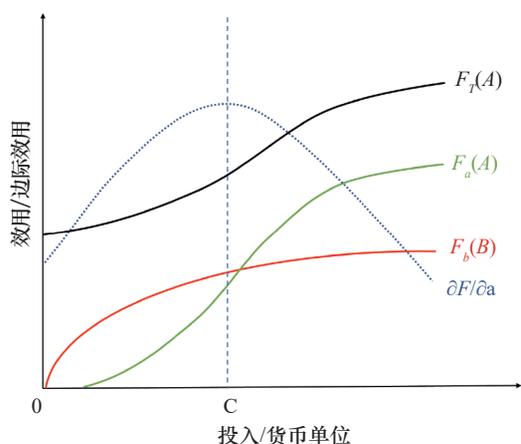


图 4 基础研究效用、应用研究效用与科技投入变化的示意图
注：红线表示基础研究的效用函数；绿线表示应用研究的效用函数；黑线表示线性模型下的总效用函数；蓝色虚线表示总边际效用；C 为总边际效用的拐点。

已有的基础研究和应用研究定义基础上，增加了“基础性”这一判断依据，简单地将一维模型拓展成二维模型，并在一维模型的基础研究和技术开发之间增加了应用基础研究。然而，巴斯德象限模型却难以较好地解释额外增加的、既不考虑应用又不追求基本认识的象限（即皮特森象限），同时也忽视了研究活动属性随时间因素的变化。鉴于上述模型的问题与不足，需要进一步完善和拓展科学发展的模型，以更好指引科学发展规律的探索。

三、超越巴斯德象限的基础研究动态演化模型

从科学发展动态演化的角度来考察科学研究可以发现，基础研究和应用研究的自身属性在各自变化的同时，还会相互影响和相互渗透。为此，本文明确引入时间维度。我们首先认识到，布什科学发展线性模型以外的任何研究划分都未能有效解决“界限模糊”问题，例如，“任务定向研究”和“自由基础研究”的划分并不能排除“自我定向”的目标驱动，自由只能是相对的。因此，本文从发展的眼光出发，不再执着于科学研究不同类型划分的“边界问题”，而是从不同研究类型之间相互影响和相互转换的角度入手，吸收巴斯德象限模型的合理之处，拓展布什科学发展线性模型，建立基础研究动态演化模型。

首先，引入基础度和应用度两个维度来表示一项科学研究的形态，其中，基础度为 b ，表示一项研究工作的基础性程度， $b \in (0,1)$ ；应用度为 u ，表示这项研究工作的有用性， $u \in (0,1)$ 。在接下来的讨论中，将 u 和 b 归一化，以它们构成二维坐标系中的点来表示一项基础研究形态。例如，关于玻尔模型和狭义相对论的研究是在不考虑应用目的的基础上开展的，因此， $b=1, u=0$ ；而电话和电报的发明是基于应用目的开展的研究，因此， $u=1, b=0$ 。当然， b 和 u 的取值只有有序数的意义，这与微观经济学中效用函数的内涵一致。例如，假设玻尔模型和激光理论的基础度分别为 $b=1, b=0.8$ ，这仅能表明前者比后者更基础，但基础程度具体差多少是没有实用意义的。然而，如何对 u 和 b 赋值，必须有“拓扑”不变性，如假设激光理论的基础度为 $b_1=0.8$ ，可以将强激光

放大方法的基础度赋值为 $b_2=0.7$ 或 $b_2=0.68$ ，但绝不能改变次序，变为 $b_2=0.82$ 。如图3所示，靠近纵轴“1”附近的区域表示基础性程度高，靠近横轴“1”附近的区域代表应用性程度高，而它们之间的扇面区域代表既有较强基础性又有一定应用前景的研究工作，当然这类工作仍然属于基础研究的范畴。

在图3中，对于一项具体研究工作，在特定时刻其只能处在一个点上，在某种外部要素的驱动下，这些点是会沿着驱动力的方向演化的。如果只有自由探索的兴趣驱动，研究工作必定沿着平行于纵轴（ b ）的方向发展，从创新技术出发，作为新的研究工具应用到纯科学研究中，最后逐渐逼近基础程度为“1”的点，产生纯基础性的研究工作，如玻尔原子理论。如果以应用为主要目的，研究工作将沿着平行于横轴（ u ）的方向演进，而这个水平方向的轨迹移动可与布什科学发展线性模型一致。需要指出的是，上述论述是就整个科学研究群体而言的，科学研究的总体投入是一个驱动力，它契合了科学应用的目标，自然导致理想科学谱线的形成。

驱动科学研究的目标不是单一的，既有技术应用，又有纯粹的兴趣驱动，从而导致研究工作沿着一条不平行于坐标轴的理想曲线（见图3中的蓝色曲线）而进化。驱动科学研究的目标也会随着时间的变化而变化，科学家的研究过程可以从基础研究发展到应用研究，也可以是从应用研究中得到启发进而回到基础研究。基础研究发展的状态演化曲线是基础研究动态演化模型的具体体现，表示的是不同类型基础研究的发展动态（见图5中的红色曲线）。当前，很难明确定义一项科学研究是基础研究还是应用研究。图5（a）和图5（b）分别代表的是纯基础研究和单一的技术应用研究工作，仅代表在一项科学研究过程中某个特定时间范围内的发展状态。在长期的科学发展中，基础研究始终居于基础研究状态，应用研究始终限于技术发展的状态是不多见的，大部分的科学研究如图5（c）所示，在研究开始时可能源于基础研究，然后通过初级的应用研究进入技术开发阶段，接着技术开发反过来促进应用研究，最后进一步推动基础研究。另外，有一部分基础研究也可能是由技术创新驱动的（见图3中的蓝色曲线）。

四、案例分析：激光与强激光的发展

为进一步阐述基础研究动态演化模型的实际意义，本文以激光和强激光的诞生与发展为例，展示基础研究、应用研究和技术进步之间的关系。由图6可以看出，激光研究是在基础研究、应用研究以及技术开发之间穿梭的，是一种相互促进、螺旋上升的科学研究过程。

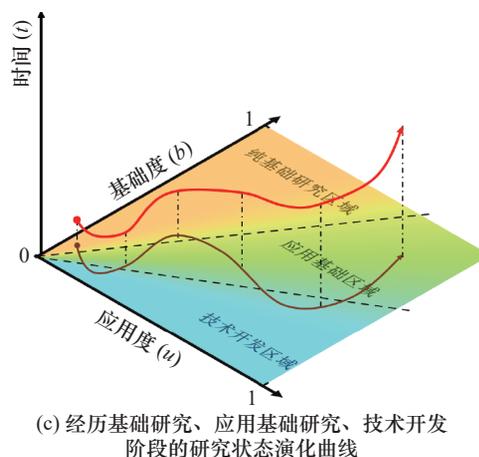
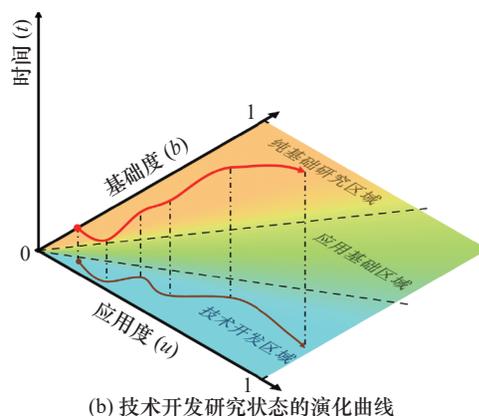
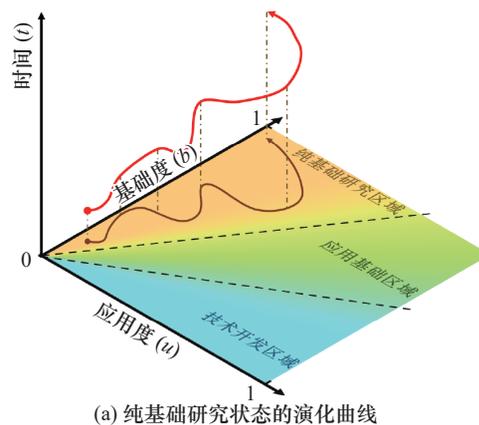


图5 科学研究发展的状态演化曲线
注：红色曲线是科学研究发展在三维模型空间中的动态演化曲线；棕色曲线是红色曲线在基础度和应用度构成的二维平面投影。

激光的出现并非来自于对自然界自由探索的研究需求,而是源于对雷达及其军事应用需求。雷达是第二次世界大战中最重要、最关键的军事需求之一。为提高军事雷达的工作频率以改善观测精度,查尔斯·汤斯利用受激辐射原理和微波谐振腔建造出了第一台微波激光器,以氨分子作为增益介质[10]。由于微波极易被大气中的水蒸气吸收,微波激光器在军事雷达应用上并无价值,但却为研究微波与分子的相互作用提供了一种前所未有的高频率和高分辨率探测工具。之后,微波激射机制被应用到可见光频率范围,并于1960年制造了第一台激光器,以红宝石为增益介质[11]。此后,基于不同增益介质、具有不同特性的激光器相继出现。激光在多个领域得到广泛应用,同时激光作为一种具有特殊优良性质的光源,应用于相关的基础研究后催生了一系列新的研究领域,如非线性光学、量子光学、超冷原子分子物理等,拓展了人类对微观物质的理解与操控能力以及对光(电磁场)本身的理解。

激光出现后,如何不断提高激光的强度成为研究的重点。通过不断泵浦增益介质并增加脉冲在谐振腔内的往返放大次数可以产生更强的激光脉冲,但是能够达到的峰值场强上限约为 10^9 W/cm^2 ,继续提高场强则会破坏增益介质,而最终克服产生更强激光瓶颈的技术仍然来自于雷达[12,13]。杰哈·莫罗和唐娜·斯特里克兰在20世纪80年代中期将雷达的啁啾脉冲放大技术引入到光学领域,突破了产生强激光的技术瓶颈[14],目前大型强激光系统的峰值场强可以达到 $10^{21} \sim 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 。

超强激光的发展催生了一系列新的基础研究领域,如强场原子分子物理、激光等离子体物理、高能密度物理、实验室天体物理等。目前,基于强激光的惯性约束核聚变则是两种主要的实现可控核聚变的途径之一。惯性约束核聚变产生的高温、高压、高能密度的极端条件与核武器的动作过程有很多相似之处,已逐渐成为一个集成多个前沿基础研究方向的研究领域。

通过分析激光研究发展历程可以看出,从雷达技术的应用,到微波激射原理的发现,再到激光技术的发明,最后到产生激光物理等,本文提出的模型能很好地阐释这一系列基础研究和应用研究的互动过程,也与全球研究理事会提出的基础研究与创新

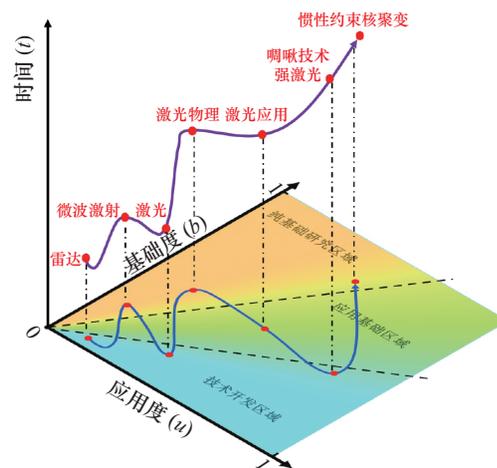


图6 激光与强激光发展的科学研究状态演化曲线——应用目标牵引的路线图

注:紫色曲线是激光与强激光发展在三维模型空间中的动态演化过程;蓝色曲线是紫色曲线在基础度和应用度构成的二维平面投影。

新之间动态互动的观点不谋而合[15]。

五、需求牵引下科学研究的证伪与学术诚信

通过分析基础研究动态演化模型以及具体的案例可以看出,需求为基础研究提供了广阔的牵引动力,进而催生出重要的新兴领域和颠覆性技术。然而需要注意的是,过度的需求导向可能会引发学术不端的风险;需求目标过于清晰,可能会导致科学研究迎合需求细节而产生人为造假。近年来,国内外学术造假、学术失信问题频发,在一定程度上阻碍了科学研究的正常发展,造成了学术资源的浪费。例如,德国科学家舍恩的学术造假事件,被视为科学界的最大丑闻之一,其利用晶体管微型化在柔性芯片制造和计算机下一步发展中的关键需求,系统性地伪造了大量实验结果,是一个典型的迎合需求编造数据的案例[16,17]。因此,对于需求牵引的基础研究,要关注其可证伪性,避免科学研究的主观性以及学术失信情况的发生。

在国防科研领域等国家战略需求牵引的科学研究,限于保密性、不可公开验证等客观因素,“证伪”更难,若发生学术造假,产生的后果更为严重。事实上,相比玻尔象限的纯基础研究,需求牵引的基础研究应用场景更为清晰,甚至有明确的国家任务使命,研究成果必须经得起时间和实践的检验。因此,对需求牵引的基础研究的支持,也应与其发展

规律相适应,要立足长期目标驱动的原始创新,以分级解决问题为导向 [18]。对于颠覆性创新,尤其是涉及到解决国防和国家安全问题的,特别要注重“证伪”,发挥好基础研究对关键技术方向性判定作用,防止迎合需求而产生的“伪颠覆”或“伪创新”的“科学技术”。

国防科研等领域的研究更为聚焦,实际需求的结果导向明确,研究意义重大。这类研究的应用目标清晰,但问题较为复杂,其可能的解决途径并不唯一,更容易出现来自竞争国家的战略误导。例如,若干年前欧洲和美国倡导了量子密钥分发的研究,并且该研究在我国掀起了量子通信研究的高潮并获得大量科技资源投入;然而,近年来英国、美国、法国却都发布了禁止量子密钥分发使用的禁令报告 [19-22],不知是事属蹊跷还是战略误导,非常值得深入探究。另一个例子是“量子霸权”(quantum supremacy,或译为“量子优越性”),这是美国科学家提出的概念,然而,当我国已在该领域取得重大突破后,美国科学家又指出该概念存在逻辑问题(teapot 检验) [23,24],此时我国业已有了太多的投入。为此,在当前国际科技竞争更为激烈的趋势下,需要防备他国可能主动实施的战略误导行为。

六、结语

本文回顾了布什提出的科学发展线性模型以及对该模型发展和完善的进展,从投入效用角度分析了其内在机制,并提出了阐释基础研究发展规律的动态演化模型。布什科学发展线性模型是用一维来表示的,认为从基础研究到应用研究是一个自发过程,然而该模型在当前科技发展的新趋势下,割裂了基础研究和应用研究之间的复杂关系;斯托克斯将布什科学发展线性模型拓展为二维表示的巴斯德象限模型,但仍无法精确呈现基础研究与应用研究之间的关系,且模型中存在难以明确界定的“皮特森象限”。鉴于这些问题,本文引入时间维度,建立了包含基础度、应用度、时间 3 个维度的基础研究动态演化模型,可以更好反映基础研究、应用研究和技术开发之间的螺旋形互动上升的逻辑关系,同时很好地呈现出布什科学发展线性模型与巴斯德象限模型的合理部分。

不可否认的是,科学研究中的纯基础研究代表了人类宝贵的自由探索精神,可以不断开拓前沿知识领域,催生新的重大科学思想和科学理论,无疑是科技进步不可或缺的动力,因此,通过纯基础研究的探索来孕育重大科学突破应是世界大国长期支持与加大投入的方向 [25]。在国际科学合作与竞争格局下,以应用为导向的基础研究逐渐受到更多重视,同时也应清晰认识基础研究与应用研究、试验发展的关系及这一关系的重要性 [5,26]。本文提出的新模型特别强调了需求牵引的基础研究的重要性,并以激光与强激光发展这一目标牵引的研究为例,通过分析其基础研究演化路径,从新的视角和清晰的图示阐述了自由探索和需求牵引双轮驱动的科学发 展全景图。

值得注意的是,虽然需求牵引的基础研究重要性不言而喻,然而历史案例却提醒我们,以需求牵引为导向的基础研究尤其要注重学术诚信问题,应更加严格地遵循科学研究“可证伪性”的要求,以经得起时间和实践的检验。同时,在当前国际科技竞争不断加强的态势下,要科学地甄别他国可能存在的战略误导行为。

致谢

感谢中国工程物理研究院研究生院董辉研究员对本文在撰写和材料方面提供的帮助。

参考文献

- [1] 范内瓦·布什,拉什·霍尔特. 科学: 无尽的前沿 [M]. 崔传刚译. 北京: 中信出版社, 2021:13-19.
Vannevar B, Rush D H. Science: The endless frontier [M]. Translated by Cui C G. Beijing: China Citic Press, 2021.
- [2] Stokes D E. Pasteur's quadrant: Basic science and technological innovation [M]. Washington D.C.: Brookings Institution Press, 1997.
- [3] President's Council of Advisors on Science and Technology. Transformation and opportunity: The future of the U.S. research enterprise [R/OL]. Washington D.C.: President's Council of Advisors on Science and Technology, 2012. (2012-11-30) [2021-04-12]. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast_future_research_enterprise_20121130.pdf.
- [4] 116th Congress. Endless frontier act [EB/OL]. (2020-05-21) [2021-04-12]. <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/3832>.
- [5] 116th Congress. Endless frontier act [EB/OL]. (2020-05-21) [2021-04-12]. <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/6978>.
- [6] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The

- endless frontier: The next 75 years in science [R]. Washington D.C.: The National Academies Press, 2020.
- [7] 樊春良. 没有止境边疆的科学——《科学: 没有止境的边疆》75年的历程和影响 [J]. 科技中国, 2020 (7): 56–64.
Fan C L. Science of endless frontier: 75 years of history and influence of “Science: Endless frontier” [J]. China Scitechnology Think Thank, 2020 (7): 56–64.
- [8] Brooks H. The evolution of U.S. science policy. in Bruce L. R. Smith and Claude E. Barfield, eds., Technology, R&D, and the economy [M]. Washington D.C.: Brookings Institution and American Enterprise Institute, 1995: 15–48.
- [9] Organization for Economic Co-operation and Development. Frascati manual 2015: Guidelines for collecting and reporting data on research and experimental development, the measurement of scientific, technological and innovation activities [M]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development Publishing, 2015: 50–51.
- [10] Townes C H. 1964 Nobel lecture: Production of coherent radiation by atoms and molecules [EB/OL]. (1964-11-11) [2021-04-12]. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/townes-lecture.pdf>.
- [11] Maiman T. Stimulated optical radiation in Ruby [J]. Nature, 1960, 187: 493–494.
- [12] Dicke R H. Object detection systems [P]. Patent U.S. 2, 624, 876, 1953.
- [13] Darlington S. Pulse transmission [P]. Patent U.S. 2, 678, 997, 1954.
- [14] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219–221.
- [15] Global Research Council. Statement of principles for the dynamic interplay between fundamental research and innovation [EB/OL]. (2017-10-30) [2021-04-30]. https://www.globalresearchcouncil.org/fileadmin//documents/GRC_Publications/Statement_of_Principles_for_The_Dynamic_Interplay_Between_Fundamental_Research_and_Innovation.pdf.
- [16] 阎康年. 科学界的诚信——舍恩事件始末综述 [J]. 国外科技动态, 2002 (11): 14–17.
Yan K N. Integrity in the scientific community: A review of the Schoen case [J]. Scientific & Technological Trend Abroad, 2002 (11): 14–17.
- [17] 尤吉尼·塞缪尔·瑞驰. 科学之妖 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Reich E S. Plastic fantastic: How the biggest fraud in physics shook the scientific world [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 张慧琴, 平婧, 孙昌璞. 分类支持基础研究 促进全链条颠覆性技术创新 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(6): 24–26.
Zhang H Q, Ping J, Sun C P. Supporting basic research by classification to promote whole-chain disruptive technology innovation [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(6): 24–26.
- [19] The National Cyber Security Centre. Quantum security technologies [EB/OL]. (2020-03-24) [2021-04-12]. <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-security-technologies>.
- [20] The National Cyber Security Centre. Preparing for quantum-safe cryptography [EB/OL]. (2020-05-04) [2021-04-12]. <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/preparing-for-quantum-safe-cryptography>.
- [21] The French National Agency for the Security of Information Systems (ANSSI). Should quantum key distribution be used for secure communications? [EB/OL]. (2020-11-11) [2021-04-12]. https://www.ssi.gouv.fr/uploads/2020/05/anssi-technical_position_papers-qkd.pdf.
- [22] National Security Agency Central Security Service (NSA/CSS). NSA cybersecurity perspectives on quantum key distribution and quantum cryptography [EB/OL]. (2020-10-26) [2021-04-12]. <https://www.nsa.gov/News-Features/Feature-Stories/Article-View/Article/2394053/nsa-cybersecurity-perspectives-on-quantum-key-distribution-and-quantum-cryptogr/>.
- [23] Lieven L B. Teapot supremacy [EB/OL]. (2021-03-13) [2021-04-12]. <http://www.neverendingbooks.org/teapot-supremacy>.
- [24] Scott A. Doubts about teapot supremacy: My reply to Richard Borchers [EB/OL]. (2021-03-13) [2021-04-30]. <https://www.scottaaronson.com/blog/?p=5460>.
- [26] Global Research Council. Statement of principles for funding scientific breakthroughs [EB/OL]. (2015-05-28) [2021-04-30]. https://www.globalresearchcouncil.org/fileadmin//documents/GRC_Publications/Statement_of_Principles_for_Funding_Scientific_Breakthrough.pdf.