

量子-地球科学研究的初步展望 ——以量子-生物科学的研究为鉴

王振^{1 2} 张旗^{3*} 石玉若¹ 原杰⁴

1. 中国地质科学院 地质研究所 北京离子探针中心 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国科学院 地质与地球物理研究所 北京 100029; 4. 邢台学院 资源与环境学院 河北 邢台 054001

摘 要: 地球科学和生物科学一样都是研究复杂系统的学科。量子-生物科学的产生,对生物科学的发展起到了很大的推动作用,至今方兴未艾。本文以量子-生物科学中鸟类迁移和光合作用研究为例,简述了量子力学在生物科学中的作用。并以此为例,引出量子-地球科学在岩浆岩演化、地球磁场成因以及矿物生长等方面涉及量子力学的研究。最后,针对量子-地球科学的研究需求,对未来研究方法和技术准备进行了初步的探讨。

关 键 词: 量子-地球科学; 量子-生物科学; 量子效应; 展望

中图分类号: P571 文章编号: 1007-2802(2022)04-0875-06 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.049

Preliminary Perspectives on Quantum-Earth Science Research ——The Study of Quantum-Biology as a Lesson

WANG Zhen^{1 2} ZHANG Qi^{3*} SHI Yu-ruo¹ YUAN Jie⁴

1. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4. School of Resources and Environment, Xingtai University, Xingtai Hebei 054001, China

Abstract: Earth science and biology are both disciplines for investigating complex systems. The emergence of quantum-biology has significantly promoted the development of biology, which is still in the thriving stage. We have briefly discussed the role of quantum mechanics in biology in this paper, using the study of bird migration and photosynthesis in quantum-biology as an example. Based on this, it is introduced that the quantum-earth science involves the research of quantum-mechanics in the magma evolution, the formation of the Earth's magnetic field, and the mineral growth. Finally, future research methods and technical preparations for the quantum earth science are also discussed preliminarily.

Key words: quantum-Earth Science; quantum-biology; quantum effects; perspectives

0 引言

量子力学是研究和描述微观世界的理论,从20世纪初提出到现在一直在发展和完善。随着量子理论的发展以及现代仪器和技术的进步,基于量子力学原理的各项理论和技术在不同的学科逐渐得到应用。六大基础学科(数学、物理、化学、天文、生物、地球科学)中,数学和物理催生并不断发展着量

子力学理论,并进一步加深对化学领域的理解,发展出量子化学;天文学中,量子力学被用来解释一些天体的演化,如恒星内部极端温压下光量子的“量子隧穿”效应(Lamers and Levesque, 2017)。对于同样以复杂系统为研究对象的生物学和地球科学,生物学是研究生物规律的学科,地球科学是研究地球演化和运行规律的学科。两门学科在很长一段时间内,均是以描述为主的学科,生物描述动

收稿编号: 2022-007 2022-4-13 收到 2022-5-13 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41872209)

第一作者简介: 王振(1991-),男,博士研究生,研究方向: 岩石地球化学。E-mail: geosciences_wzh@163.com.

* 通信作者简介: 张旗(1937-),男,研究员,研究方向: 岩石地球化学。E-mail: zq1937@126.com.

植物、微生物等的生命形态,总结行为方式以及和外界环境的相互作用。地球科学描述各个圈层中的物质分布、特征并总结其规律。20世纪随着基因理论的兴起,生物科学迎来辉煌时刻,以基因为主导的生物学科不断发展壮大,至今方兴未艾。近年来,生物科学研究中随着量子力学的介入,已取得一些实质性的成果,使得量子力学在生物科学中的研究俨然成为一个有前景且值得深入的研究方向,并在未来大有可为(Lambert et al., 2012; Marais et al., 2018; Cao et al., 2020; Kim et al., 2021)。

反观地球科学领域,20世纪板块构造理论的提出掀起了一场地球科学领域的革命(Frisch et al., 2011)。板块构造作为目前已知类地行星中仅地球具有的特征,能够较好的解释地球演化历史上洋-陆格局的演化,至今依旧在不断应用和完善当中(Frisch et al., 2011)。和生物学一样作为复杂系统,地球科学的研究涉及到从微观原子到宏观地球,但是和量子力学的结合依旧没有进展(张旗等, 2019)。因此,尝试将量子力学引入地球科学领域,建立量子地球科学,并将其作为一个崭新的研究方向,也已被提上了日程(张旗等, 2019)。

地球科学需要量子力学吗?或者说量子力学能够在地球科学中扮演基本角色并具有实质的影响吗?地球科学领域是否存在目前不能被经典物理学所解释的现象?量子地球科学中的量子效应是什么?本文以量子地球科学小组成立为契机,参考生物学与量子力学的结合,来探讨地球科学与量子力学结合的可能,以及今后需要突破的方向。

1 量子-生物科学进展

量子生物学是近年来兴起的一个新的研究方向,其源于对生物现象的量子力学解释。如光合作用、酶的催化作用、鸟类迁徙以及嗅觉等方面不仅涉及了大量的经典物理学理论也涉及了一些量子力学的知识,如态相干性、量子隧穿和量子纠缠等(秦明, 2017; Cao et al., 2020; Kim et al., 2021)。本文以对光合作用和鸟类迁徙中涉及的量子力学的研究为例,对量子生物学中的研究方法作一初步的了解。本文不去描述其中的量子力学原理,只对其发现生物学中的量子效应的方法进行讨论,以求启发地球科学领域相关的探索。

1.1 鸟类迁徙中的量子效应

鸟类迁徙是一种适应环境周期变化形成的本能行为。人类很早就对鸟类这种奇特的行为进行了研究,以求了解其中的机制。多种实验表明,鸟

类利用不同的感觉能力来进行导航和标记地点,比如记忆迁徙过程中的各种路标(山川、河流等),也有通过星辰和太阳光的感应来导航(Wiltschko and Wiltschko, 1972; Wiltschko et al., 2010; 秦明, 2017; Kim et al., 2021)。除此之外, Wiltschko 和 Wiltschko (1972)推测鸟类是通过感应磁场来判断方位的。然而地球磁场的变化是很微弱的,很容易受到各种因素的干扰。而鸟类却能利用磁场进行长距离的导航,这就需要鸟类对地磁场有十分精确的感应。针对这一问题,研究人员总结了多种可能的方式,如电磁感应、基于磁性离子的磁感受和基于自由基对的磁感受,后两种需要鸟类体内有磁受体来对磁场的变化进行识别和反应(Mouritsen, 2018)。

这里,我们对基于自由基对的磁感受进行简述。维基百科中对自由基的定义是“自由基,又称游离基,是指化合物的分子在光热等外界条件下,共价键发生均裂而形成的具有不成对电子的原子或基团。在书写时,一般在原子符号或者原子团符号旁边加上一个“·”表示没有成对的电子。如氢自由基($\text{H}\cdot$ 即氢原子)、氯自由基($\text{Cl}\cdot$ 即氯原子)、氢氧自由基($\text{OH}\cdot$)、甲基自由基($\text{CH}_3\cdot$)等。”

有研究发现自由基对的化学反应会受到弱磁场的影响,因此联想到同样可能利用弱磁场进行导航的鸟类,提出了“自由基对理论”模型(Schulten et al., 1978)。这一模型认为鸟类的磁感应可能与一种受体蛋白——隐花色素分子的量子化学反应有关。该蛋白存在于鸟类眼睛中,接受光照射后,分子由基态变为不稳定的激发态,产生自由电子。产生的电子会与外部的地磁场耦合,电子的行为会同时受到分子和外部磁场的双重影响,在这种影响下发生化学反应,形成相应的化学产物。而不同的产物产生相应的神经信号,鸟类正是根据这种神经信号来判断磁场方位(Mouritsen, 2018)。这一模型很好地将生物行为和量子效应结合到一起,随着实验和理论工作的不断进行,该模型还在不断的完善。这一模型的关键,是激发态下从隐花色素分子中释放的电子对磁场的感应(秦明, 2017; Cao et al., 2020; Kim et al., 2021)。最新的一项研究中,直接观测到了这个模型中所涉及的隐花色素对磁场的反应,而且还是在人类的细胞中(Ikeya and Woodward, 2021)。实验人员发现海拉细胞中的内源性自发光对于 25 mT 及以下的外部弱磁场很敏感。将细胞放在 25 mT 及以下的外部弱磁场环境下,细胞会发出荧光,这是由于隐花色素吸收光量子之后被激发,发生电子转移形成自由基对。自由基对的磁感受

与量子力学具有密切联系(Ikeya and Woodward, 2021)。

1.2 光合作用中的量子效应

光合作用是地球上最重要的化学反应之一,是生物使用发色团网吸收光能(光子),并将太阳能有效地输送到发生电荷分离的反应中心,光子在反应中心激发电子转移,实现光能向化学能转换(许大全,2013)。光合作用分为光反应和碳反应,光反应是反应中心色素所吸收的光能与原初电子受体和次级电子受体之间进行的氧化还原反应,从而实现光能转化为电能,并转变为化学能的过程;碳反应是生物将无机碳(二氧化碳)转换为有机化合物的过程(许大全,2013)。量子力学被认为在光合作用的光反应中起着重要作用,虽然仍有争议,但得到了理论和实验研究的支持(秦明,2017)。

光合作用的整个过程对于光能的使用率是较低的,最高不超过10%(Björkman and Demmig-Adams,1995)。但是,其中捕获光子以及将光子运送到反应中心的过程是非常稳定和精确的(Brookes,2017)。光合作用中生物利用色素-蛋白质复合物收集光子,将光子转化为激发能量并传递到反应中心。这一传递过程效率非常高,通常能超过95%,并且是在极短的100ps内完成的(秦明,2017)。其涉及到超快激发态动力学,而量子叠加态和量子相干在超快激发态动力学中起到了重要作用,因此研究者们利用量子力学理论对这一高效精准过程进行描述,并在实验中进行了进一步的验证(Fleming and Scholes,2004; Levi et al.,2015)。

1.3 量子-生物科学对量子地球科学的启示

除上述两项之外,量子力学还被用于解释嗅觉、酶促反应、DNA复制与突变、神经系统传递机制等问题,生物科学在很多方面都发展出了和量子相结合的理论和实验依据,如DNA复制过程中存在的量子隧穿是基因突变的诱因(Kim et al.,2021)。应该可以进一步理解,量子隧穿可能影响了生物的多样性。这一理论,可以将微观量子 and 生物系统的宏观特征很好的结合了起来,尽管该理论还有待进一步的研究,但其思路值得地球科学借鉴。

地球科学与生物科学研究的是复杂系统,研究过程中都要考虑诸多因素。不同点可以概括为两点,即时间和空间。在时间上,上述生物科学例子中,都是瞬时发生或是很短时间内的事情。而地球科学上的事情,以岩石学为例,岩浆的演化大多是以百年至万年为时长基数的活动(Marsh,1989; Hochstein et al.,1998),时间跨度上,很难像生物那

样去通过实验一遍一遍的验证。在空间上,生物个体体积小、更直观和易观察。而地球科学,除了地表露头,我们要根据各种技术手段以及发现各种线索,才能尝试窥探全貌和推测地球深部的状况(朱日祥等,2021)。相对于生物科学,想在更为庞杂的时空系统内寻找量子效应,目前来说是很难的。更何况,将量子效应与该庞大体系的各类现象联系起来,难度可能更大(Allevi et al.,2019)。

2 量子-地球科学可能发现量子效应的方向

在宏观世界中寻找量子效应,一直是科学家们努力的方向。最近,科学家们首次在宏观领域观测到了量子纠缠这一量子世界特殊的量子效应(Peng et al.,2005; Schleich et al.,2016; Ockeloen-Korppi et al.,2018; Kotler et al.,2021; de Lépinay et al.,2021)。为我们试图在地球科学研究中发现量子效应带来了信心。

量子力学是研究微观粒子的科学,从量子-生物科学的研究内容也可以看出,都从微观入手,鸟类迁徙和光合作用中,量子效应发挥作用的方式都体现在电子的行为上(Kim et al.,2021)。因此,量子-地球科学是否也可以从这个方面入手去探索量子效应。下面我们针对几个可能存在量子效应的方面进行初步的探讨。

2.1 岩浆演化过程

纵观整个地球科学体系内岩浆的形成和演化过程,可能是更容易发现量子效应的过程。因为岩浆作用过程涉及到巨量的物质能量转换,而从物理和化学角度来说,就涉及到原子(或分子)丢失电子的过程,如果存在电子的转移以及能量的释放,就应该会存在明显的量子力学效应(Urbietta et al.,2018)。地球深部(岩石圈深部、地幔、地核)的高温高压环境(Dehant et al.,2022)应该会使组成深部岩石的原子外层的电子挣脱原子核的束缚(曾谨言,2003)。而这一过程可导致电子的能级跃迁,这一过程是否能够较为容易的观测到量子效应呢?这是值得我们关注的。如果在岩浆演化中发现量子效应,应该为我们更好的理解岩浆作用过程中能量的传递和物质转变,提供更为精准的解释,比如岩浆演化中元素的迁移。

2.2 地球磁场

地球磁场的存在,对于地球生物、人类生存等具有重大意义,诸如抵御太阳风(Tenerani et al.,2020)、鸟类导航(Mouritsen,2018)等。虽然地球物

理的发展日新月异,但是对于地球磁场的成因,依然需要进一步的观测与实验(宋贯一,2009)。地球磁场是地球深部的物理体现。关于其成因,目前主流科学界所认可的就是“发电机”假说(Elsasser, 1946; Bullard and Gellman, 1954),即地核的液态金属外核对流形成“电流”,“电流”围绕固态金属内核产生磁场,即所谓的“电生磁”。但是,对于这一假说中“电流”产生的机制、地核的物质状态等问题,仍然还未解决。想要明白地球磁场的成因,就需要研究地球深部的物质状态。地核在超高温高压(4000~6000 °C, 150~370 GPa)的极端环境下,一定涉及到量子力学的相关知识(陈志耕,2002; 杜国强等,2007; 刘植凤等,2007; 刘植凤和李艳,2008)。对超高压高温条件下物质状态的研究,在恒星和行星动力学研究中已有所涉及(Becker et al., 2018; He et al., 2022)。尝试利用量子力学效应来解释地球磁场成因,应是一个值得关注的方向。

2.3 矿物生长

由于实验条件以及仪器等限制,我们在研究矿物的生长过程时遇到了很大的困难。年轮之所以能够用来估算树木的年龄,是因为一年当中气候、降水、光照以及大气环境等因素规律性或周期性的节律变化在树木生长过程中不断地影响所导致的。因此,每一圈年轮,都能看作是一个环境变化周期的记录(Le Moulllec et al., 2019)。与年轮类似,矿物中生长有环带,环带的外在表现是不同环带光性的不同,其实质是矿物颗粒内各组成分子比例改变引起的,而引起这种比例变化的因素,则是矿物形成时的温压变化(Li et al., 2022)。与树木年轮相比,矿物环带生长的过程更为缓慢,如果我们能够根据环带去反演其形成过程中的温度压力变化,那么我们就能够将岩浆岩形成的过程进行进一步的细化,为相关研究提供更为精准的科学线索。Li等(2022)就是基于对石英环带中氧同位素的逐环分析,用来反演石英生长过程中的信息,通过这些信息来反推石英形成过程中的环境。该研究是在纳米离子探针技术下完成的,可见仪器精度的提高对地球科学研究有很重要的意义。量子技术在高精度仪器研发与应用方面有很大的潜力(孙昌璞,2000,2010),因此量子应用的发展将来对于地球科学发展也有很大的助力。

3 研究方法与技术准备

量子-生物科学的产生过程,是在知“果”寻

“因”的过程中发现量子力学的效应,而与之相比,量子-地球科学目前来说应该是直接寻因的过程,因为我们目前还没有某个方面真正的与量子力学挂钩,也就是说可能是在不知道量子效应在地球科学中意义的情况下,先去寻找量子效应,然后再对应量子效应在地球科学中的意义(张旗等,2019)。

量子力学的效应是在小尺度下,比如电子的运动层面反映出来(Omnès, 1992)。以岩浆岩为例,既然岩浆岩的形成是一个过程,可以考虑先拿一个阶段来尝试。物理的研究可以先研究纯粹点的体系,比如,拿某种岩石,研究它在升温过程中的物理演化过程。前人的研究,集中在矿物的变化,也就是分子尺度的变化。这类研究,强调的是变化前后的物质成分,也就是岩相。而想要发现量子效应,可能就要专注于深入理解这个变化的过程。假设,我们在岩浆演化的过程中发现了量子效应,肯定能帮助我们更精细地理解岩浆作用过程。

上述2.1节提到了岩浆岩中观测量子效应的可能性,是否可以从观测岩浆作用过程中辐射光谱的变化开始,因为光谱的变化代表的是能级的跃迁(申晨等,2020)。能级量子化是不连续的,所以能级差是一些不连续的数值,电子在这些能级之间跃迁,吸收和辐射的能量就是这些能级差,也就是不连续的(曾谨言,2003)。如果利用光谱仪能在岩浆岩形成过程中看到一些线状光谱或者吸收谱,也就是不连续的能量释放和吸收,就很有可能是明显的量子过程。但是直接观测深部岩浆是无法实现的,只能在实验室进行模拟,因此就需要相应的实验设备。目前,没有专业的设备和实验室,就需要我们和理论物理以及实验物理方面进行学科交叉。同样,上述2.3节中关于对矿物中震荡环带研究的设想,对于测量仪器的精度有很高的要求,单个环带的宽度大多只有零点几到几微米之间,要想精准的定位并测定环带内的成分,其仪器精度至少要在微米以下。以离子探针为例,仪器若想打在单条环带的范围内,其束斑至少要低于0.1~0.5 μm,目前纳米离子探针已经能达到这样的精度(Li et al., 2022)。

原子探针(APT)能够对样品中元素的三维分布进行分析,已广泛应用在冶金及材料科学中。近几年,原子探针在地球科学领域的研究已取得了一些初步的成果,未来对于分析矿物中元素的分布、矿物中同位素定年等研究(王碧雯和李秋立,2020),能够更为准确的分析矿物形成过程中的元素的迁移过程,纳米地质年代学以及纳米矿物学可能会有

一定的发展前景(王碧雯和李秋立,2020)。

目前而言,量子-地球科学依旧是空白。研究方法只能依托于物理学和地球科学相结合进行开创。地球科学理论和理论物理相结合,地球科学实验和实验物理相结合,共同驱动,才能使得量子-地球科学发展起来。

4 结语

地球科学随着近些年对月球、火星、小行星带以及各类小行星带之外的岩质行星研究的深入,已经从地球系统科学迈向行星科学。其研究范围介于传统天体物理学与地质学之间,已经开始了天文学和地球科学的交叉融合(Nesvorný,2018)。这也从侧面反映了地球科学的复杂性。随着研究对象更为庞大和宏观,涉及到的物质、能量转换方式就更为复杂多样。而宇宙中,除了黑洞、中子星等特殊致密星体以外,物质的性质均是由构成它们的原子的外层电子所决定的(曾谨言,2003)。而研究电子行为,就一定会涉及到量子力学。所以,量子-地球科学的提出,并不是凭空想象和毫无意义的,而是很有前瞻性和突破性的;同时,也是难度极大的。

本文仅从几个例子,对量子-生物科学进行了论述。结合地球科学和生物科学的差别,对地球科学中发现量子效应的可能性进行了初步的设想和讨论。鸟类长距离迁徙、光合作用中光量子的精准传递,这些动植物具有的本能的特质中都有量子效应的影响,而且还是起到了最为关键的作用(Kim et al.,2021)。这让我们不得不考虑,地球科学中量子力学所扮演的角色。岩浆演化中,高温高压环境下是否存在量子能级跃迁?地球深部到底是怎样一个物质状态和动力机制,产生了亿万年来持续存在的地磁场?是否会有更为精细的量子力学原理的仪器,测量矿物的每一个环带,从而反演矿物形成过程中环境的变化?

本文并没有结论,因为量子-地球科学处于刚刚提出的阶段,与量子-生物科学的方兴未艾不同,量子-地球科学还处于跃跃欲试阶段。量子-地球科学要真的发展起来,还有很长的路要走。

5 后记

笔者专业是岩石学和地球化学,在此之前对于生物学以及理论物理学的认识非常有限。文中涉及生物学、量子力学以及量子生物学的讨论部分,一定会有一些理解不到位以及纰漏之处。本文是

在听取南京大学张伟华教授在第二次量子-地球科学北京会议上的报告后,受到启发所写。审稿人提出了很好的修改意见,笔者受益匪浅,深表感谢。

参考文献 (References):

- Allevi A, Chesi G, Nardo L, Bondani M. 2019. Detecting quantum features in the real world. In: Quantum Information and Measurement. Rome, Italy: Optical Society of America, T5A.23
- Becker A, Bethkenhagen M, Kellermann C, Wicht J, Redmer R. 2018. Material properties for the interiors of massive giant planets and brown dwarfs. *The Astronomical Journal*, 156(4): 149
- Björkman O, Demmig-Adams B. 1995. Regulation of photosynthetic light energy capture, conversion, and dissipation in leaves of higher plants. In: Schulze E D, Caldwell M M, eds. *Ecophysiology of Photosynthesis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 17-47
- Brookes J C. 2017. Quantum effects in biology: Golden rule in enzymes, olfaction, photosynthesis and magnetodetection. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2201): 20160822
- Bullard E C, Gellman H. 1954. Homogeneous dynamos and terrestrial magnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 247(928): 213-278
- Cao J, Cogdell R J, Coker D F, Duan H G, Hauer J, Kleinekathofer U, Jansen T L C, Mancal T, Miller R J D, Ogilvie J P, Prokhorenko V I, Renger T, Tan H S, Tempelaar R, Thorwart M, Thyraug E, Westenhoff S, Zigmantas D. 2020. Quantum biology revisited. *Science Advances*, 6(14): eaaz4888
- de Lépinay L M, Ockeloen-Korppi C F, Woolley M J, Sillanpää M A. 2021. Quantum mechanics-free subsystem with mechanical oscillators. *Science*, 372(6542): 625-629
- Dehant V, Campuzano S A, De Santis A, Van Westrenen W. 2022. Structure, materials and processes in the Earth's core and mantle. *Surveys in Geophysics*, 43(1): 263-302
- Elsasser W M. 1946. Induction effects in terrestrial magnetism part I. Theory. *Physical Review*, 69(3-4): 106-116
- Fleming G R, Scholes G D. 2004. Quantum mechanics for plants. *Nature*, 431(7006): 256-257
- Frisch W, Meschede M, Blakey R C. 2011. Plate tectonics: Continental drift and mountain building. Berlin, Heidelberg: Springer
- He Y, Sun S C, Kim D Y, Jang B G, Li H P, Mao H K. 2022. Superionic iron alloys and their seismic velocities in Earth's inner core. *Nature*, 602(7896): 258-262
- Hochstein M P, Watson M I, Malengreau B, Nobes D C, Owens I. 1998. Rapid melting of the terminal section of the Hooker Glacier (Mt Cook National Park, New Zealand). *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 41(3): 203-218
- Ikeya N, Woodward J R. 2021. Cellular autofluorescence is magnetic field sensitive. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(3): e2018043118
- Kim Y, Bertagna F, D'Souza E M, Heyes D J, Johannissen L O, Nery E T, Pantelias A, Jimenez A S P, Slocombe L, Spencer M G, Al-

- Khalili J, Engel G S, Hay S, Hingley-Wilson S M, Jeevaratnam K, Jones A R, Kattnig D R, Lewis R, Sacchi M, Scrutton N S, Silva S R P, McFadden J. 2021. Quantum biology: An update and perspective. *Quantum Reports*, 3(1): 80–126
- Kotler S, Peterson G A, Shojaei E, Lecocq F, Cicak K, Kwiatkowski A, Geller S, Glancy S, Knill E, Simmonds R W, Aumentado J, Teufel J D. 2021. Direct observation of deterministic macroscopic entanglement. *Science*, 372(6542): 622–625
- Lambert N, Chen Y N, Cheng Y C, Li C M, Chen G Y, Nori F. 2012. Quantum biology. *Nature Physics* 9(1): 10–18
- Lamers H J G L M, Levesque E M. 2017. Understanding stellar evolution. Bristol: IOP Publishing
- Le Moullec M, Buchwal A, van der Wal R, Sandal L, Hansen B B. 2019. Annual ring growth of a widespread high arctic shrub reflects past fluctuations in community-level plant biomass. *Journal of Ecology*, 107(1): 436–451
- Levi F, Mostarda S, Rao F, Mintert F. 2015. Quantum mechanics of excitation transport in photosynthetic complexes: A key issues review. *Reports on Progress in Physics*, 78(8): 082001
- Li Y, Allen M B, Li X H. 2022. Millennial pulses of ore formation and an extra-high Tibetan Plateau. *Geology* (in press)
- Marais A, Adams B, Ringsmuth A K, Ferretti M, Gruber J M, Hendrikx R, Schuld M, Smith S L, Sinayskiy I, Kruger T P J, Petruccione F, van Grondelle R. 2018. The future of quantum biology. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(148): 20180640
- Marsh B D. 1989. Magma chambers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 17(1): 439–472
- Mouritsen H. 2018. Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature*, 558(7708): 50–59
- Nesvorný D. 2018. Dynamical evolution of the early Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56: 137–174
- Ockeloen-Korppi C F, Damskægg E, Pirkkalainen J M, Asjad M, Clerk A A, Massel F, Woolley M J, Sillanpää M A. 2018. Stabilized entanglement of massive mechanical oscillators. *Nature*, 556(7702): 478–482
- Omnès R. 1992. Consistent interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 64(2): 339–382
- Peng C Z, Yang T, Bao X H, Zhang J, Jin X M, Feng F Y, Yang B, Yang J, Yin J, Zhang Q, Li N, Tian B L, Pan J W. 2005. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: Towards satellite-based global quantum communication. *Physical Review Letters*, 94(15): 150501
- Schleich W P, Ranade K S, Anton C, Arndt M, Aspelmeyer M, Bayer M, Berg G, Calarco T, Fuchs H, Giacobino E, Grassl M, Hänggi P, Heckl W M, Hertel I V, Huelga S, Jelezko F, Keimer B, Kothaus J P, Leuchs G, Lütkenhaus N, Maurer U, Pfau T, Plenio M B, Raseel E M, Renn O, Silberhorn C, Schiedmayer J, Schmitt-Landsiedel D, Schönhammer K, Ustinov A, Walther P, Weinfurter H, Welzl E, Wiesendanger R, Wolf S, Zeilinger A, Zoller P. 2016. Quantum technology: From research to application. *Applied Physics B*, 122(5): 130
- Schulten K, Swenberg C E, Weller A. 1978. A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 111(1): 1–5
- Tenerani A, Velli M, Matteini L, Réville V, Shi C, Bale S D, Kasper J C, Bonnell J W, Case A W, De Wit T D, Goetz K, Harvey P R, Klein K G, Korreck K, Larson D, Livi R, Macdowall R J, Malaspina D M, Pulupa M, Stevens M, Whittlesey P. 2020. Magnetic field kinks and folds in the solar wind. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 246(2): 32
- Urbietta M, Barbry M, Zhang Y, Koval P, Sánchez-Portal D, Zabala N, Aizpurua J. 2018. Atomic-scale lightning rod effect in plasmonic picocavities: A classical view to a quantum effect. *ACS Nano*, 12(1): 585–595
- Wilschko R, Stapput K, Thalau P, Wilschko W. 2010. Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(Suppl. 2): S163–S177
- Wilschko W, Wilschko R. 1972. Magnetic compass of European robins. *Science*, 176(4030): 62–64
- 陈志耕. 2002. 地核物态及其量子地球动力探讨. 物探与化探, 26(4): 273–278
- 杜国强, 刘植凤, 李艳, 陈志耕, 张艳红. 2007. 地磁场的量子模型. 石家庄学院学报, 9(6): 47–51
- 刘植凤, 杜国强, 张艳红, 李艳, 陈志庚. 2007. 对内地核物质的力学状态及其量子效应的研究. 石家庄学院学报, 9(3): 50–54
- 刘植凤, 李艳. 2008. 内地核物质的状态参数及其量子效应的研究. 地球物理学进展, 23(2): 438–442
- 秦明. 2017. 光合作用中的能量传输. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学
- 申晨, 李乾, 周朋, 杨海燕. 2020. 基于光致发光谱的窄禁带半导体材料能级研究. 红外, 41(7): 1–4, 37
- 宋贵一. 2009. 地球基本磁场的成因. 地球物理学进展, 24(1): 89–94
- 孙昌璞. 2000. 量子测量问题的研究及应用. 物理, 29(8): 457–467
- 孙昌璞. 2010. 量子开系统理论及其应用. 物理, 39(1): 1–8
- 王碧雯, 李秋立. 2020. 原子探针工作原理及其在地球科学中的应用. 矿物岩石地球化学通报, 39(6): 1108–1118, 1065
- 许大全. 2013. 光合作用学. 北京: 科学出版社
- 曾谨言. 2003. 量子力学教程. 北京: 科学出版社
- 张旗, 焦守涛, 李明超, 朱月琴, 韩帅, 刘学龙, 金维浚, 陈万峰, 刘欣雨. 2019. 量子纠缠技术在地质学上应用的可能性. 地学前缘, 26(4): 159–169
- 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 万博. 2021. 宜居地球的过去、现在与未来——地球科学发展战略概要. 科学通报, 66(35): 4485–4490

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)