1845年创刊 · 以科技见证世界改变

环球科学 SCIENTIFIC AMERICAN

《科学美国人》杂志独家授权

邮局订阅代号：80-498
2020年1月号 总第181期 每月1日出版
定价：¥30

BEST SELLING
中国邮政发行畅销报刊

2019
《环球科学》
十大科学新闻

时间晶体：神奇新物态

时间晶体是一种令人惊喜的新物态，它在时间上展现了普通晶体在空间上具有的对称性。基于时间晶体，我们可以制造更精确、更简洁的时钟，从而能以极高的精度测量距离和时间。

PLUS

黑洞违反量子力学

仅仅是黑洞存在这件事本身，就和当前描述宇宙中其他一切现象的量子力学定律相矛盾。

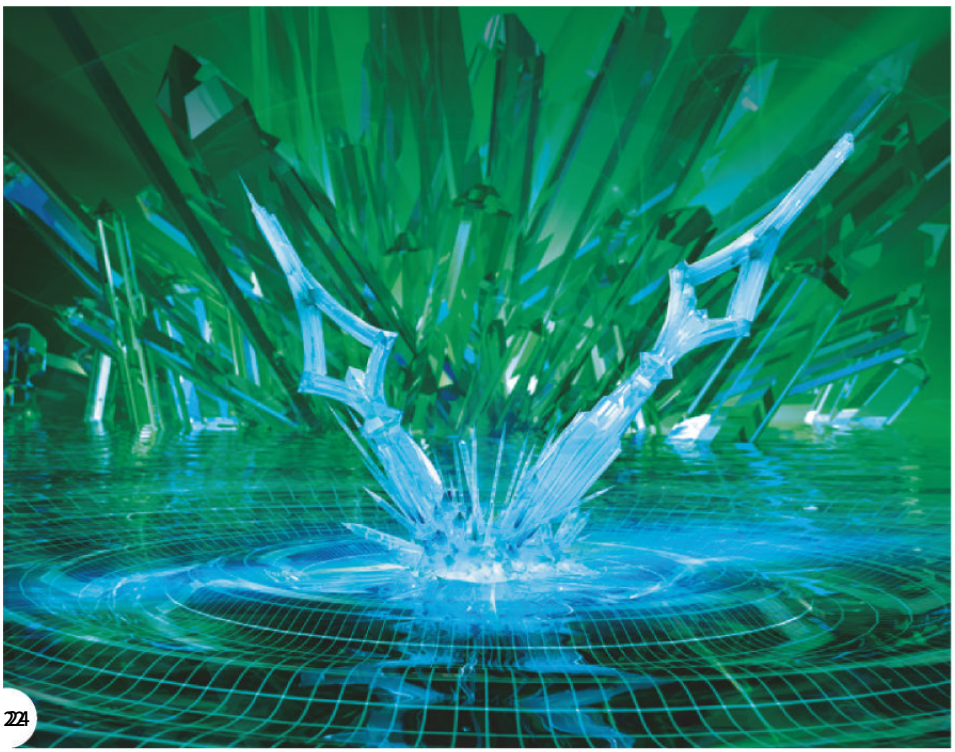
燃烧的龙卷风

处于燃烧状态的龙卷风拥有上千摄氏度的高温和极高的转速，可以摧毁它所路过的大片区域。

ISSN 1673-5153
9 771673 515207 01>
绿色印刷产品

CONTENTS | 目录

2020年1月号



22

封面故事
COVER STORY

时间晶体：神奇新物态

时间晶体是一种令人惊喜的新物态，它在时间上展现了普通晶体在空间上具有的对称性。基于时间晶体，我们可能制造出更精确、更简洁的时钟，从而能以极高的精度测量距离和时间。

时间晶体可以做什么

本刊记者 吴非

物理学 PHYSICS

34 黑洞违反量子力学

撰文 史蒂文·B·吉丁斯（Steven B. Giddings）

2019 年 4 月 10 日，人类第一次“看见”了黑洞。但仅仅是黑洞存在这件事本身，就和迄今为止描述宇宙中其他一切现象的量子力学定律相矛盾：在量子力学中，信息是守恒的，但根据当前的理论，黑洞却能摧毁信息，这引发了黑洞信息悖论。要解决这个矛盾，可能需要一次像量子力学取代经典物理一样意义深远的概念革命。

天文学 ASTRONOMY

42 钱德拉望远镜的20年

撰文 贝琳达·J·威尔克斯（Belinda J. Wilkes）

2019 年是钱德拉 X 射线天文望远镜发射 20 周年。这台望远镜自 1999 年发射以来，一直在绕地球飞行，能捕获到达其探测器的每一个 X 射线光子的位置、能量和到达时间。过去 20 年里，钱德拉望远镜改变了我们对暗物质、恒星诞生、太阳系中行星的性质等重大天文学问题的理解。

信息技术 INFORMATION TECHNOLOGY

48 脆弱的GPS系统

撰文 保罗·塔利斯（Paul Tullis）

除了导航之外，GPS 在日常生活中还有很多应用，比如手机移动网络、股票交易、电网系统、应急服务等都依赖于 GPS 定时系统。但是，来自卫星的 GPS 信号其实很容易受到黑客攻击，从而被“篡改”：只要一个稍强的无线电信号就能取代 GPS 信号，使接收者错以为自己是在另一个地方或另一个时刻，而这只需要用一台笔记本电脑就能做到。

物理学 PHYSICS

56 聚变核电站：2060年接入电网？

撰文 朱莉娅·帕基奥尼（Giulia Pacchioni）

目前，世界上最大的热核聚变实验性发电设施——国际热核聚变实验反应堆（ITER），已完成了 60% 的建造工作。按计划，ITER 将于 2035 年实现核聚变功能，届时将证明热核聚变在工业水平上的发电能力，并为原型核聚变电站的建造提供基础，而后者或能在 2060 年发电并接入电网，实现真正清洁的电能供应。

人工智能 ARTIFICIAL INTELLIGENCE

60 机器意识终会诞生？

撰文 克里斯托夫·科赫（Christof Koch）

对于机器能否产生意识，目前学界已有了两种主流的研究方向，一是全局神经元工作空间理论（GNW），它强调意识来源于大脑的特殊构造，对大脑结构和功能的精细模拟能带来意识；二是信息集成论（IIT），它认为机器只有具有内秉因果力，才会产生意识。但是，如果机器产生意识，我们将面临一个问题：只要机器能通过自己的感官体验生活，它们就不再是一种完全由人类掌控命运的物体，它们将能决定自己的命运。

医学 MEDECINE

64 精神疾病能够预测吗

撰文 鲍里斯·肖梅特（Boris Chaumette）

科学家发现，大脑中 β- 淀粉样蛋白的异常积累可能是引发阿尔茨海默病的元凶，而载脂蛋白 E 相关基因的突变，也与许多精神类疾病的出现有关。这类基因的信息和生理学特征，正在不断提高我们预测精神类疾病的可能。但是，没有任何一个人可以确定地说，一旦出现这些症状就肯定会患上某种疾病。

2019年度专刊 · 重磅上市

诺奖得主经典文集

他们如何开创科学的黄金时代?

爱因斯坦、玻尔、玻恩、鲍林、薛定谔、哈恩、克里克、科恩伯格……



18位 诺奖得主 + **16篇** 传世经典

每一位作者，都是科学史上高山仰止的存在；
每一篇文章，都凝聚了人类的巅峰智慧。

现已全国上市
客服热线：010-57458982

~~原价 68元~~
优惠价 **56** 元

包快递

CONTENTS 目录

2020年1月号



42

神经科学 NEUROSCIENCE

68 我们为什么会做梦

撰文 弗兰切斯卡·西克拉里（Francesca Siclari）

梦从哪里来？为何我们的大脑能够每夜毫不费力地生成故事和图片？利用现有的技术，我们能够实实在在地记录下这些转瞬即逝的梦境吗？这些问题目前还很难回答，不过最近的一项研究取得了重要进展：在一项长达五年的实验中，科学家探究了睡眠期间的大脑活动，从而确定了负责产生梦境的大脑区域。

气象学 METEOROLOGY

74 燃烧的龙卷风

撰文 杰森·M·佛瑟夫（Jason M. Forthofer）

对于经历过龙卷风的人而言，这种狂暴而极具破坏性的自然现象无法不让人胆怯。但是，自然界中还有一种比它更恐怖的现象：处于燃烧状态的龙卷风。它拥有上千摄氏度的高温和极高的转速，可以摧毁它所路过的区域。这种现象十分罕见，又被称为火龙卷。它的破坏力惊人，在日本、德国和美国引发过恐慌性事件，某次案例曾造成过 4 万多人丧生。

医学 MEDICINE

82 动物毒素：从杀人到救人

撰文 克丽丝蒂·威尔科克斯（Christie Wilcox）

毒蛇、毒蝎、毒蜂……它们的体型不大，却拥有致命的毒液。很多年来，人类一直畏惧它们，但是，未来的医学奇迹或许就藏在一些最致命的毒素中。要治愈人类面临的棘手疾病，我们也许可以从那些危害过人体的毒素中寻找希望。

对话 DIALOG

86 让瘫痪患者再次行走

本刊记者 杨心舟

在科幻电影中，身着奇异装甲的人类能够获得极其强大的功能。而实际上，最近几十年科学家也一直在努力将科幻转变成现实——一种以脑机接口为基础的外骨骼装置正让许多瘫痪患者受益。病人不仅能很快学会使用外骨骼装置，还能通过训练恢复部分被切断的神经功能，获得再次行走的能力。

前沿 ADVANCES

14

废弃建筑孳生蚊媒疾病

夜蛾翅膀会“发光”

观测超新星残骸

失控行为的脑回路

全球科技热点

用大肠杆菌量产裸盖菇素

全新的量子比特

睡觉帮你解决问题

野生虎在老挝功能性灭绝

模拟鲨鱼皮肤的抗菌材料

长腿蜘蛛勾勒冰河时代边界

专栏 COLUMN

08 《科学美国人》国际版本速览

时间晶体 TIME CRYSTAL

09 如何看待“量子霸权”

撰文 弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek）

10 全球学术期刊概览

12 2019年《环球科学》十大科学新闻

科学评论 COMMENT

90 重绘人类谱系树?

撰文 凯特·王（Kate Wong）

科技投资 VENTURES

91 塑料能缓解气候变暖?

撰文 韦德·劳什（Wade Roush）

健康科学 THE SCIENCE OF HEALTH

92 对付阿尔茨海默病的新靶点

撰文 克劳迪娅·沃利斯（Claudia Wallis）

反重力思考 ANTI GRAVITY

93 月球上的垃圾

撰文 史蒂夫·米尔斯基（Steve Mirsky）

十字路口 INTERSECTION

94 富豪们为什么向往太空

撰文 柴内普·图菲克奇（Zeynep Tufekci）

数据 DATA

95 44次引力波事件

撰文/制图 凯蒂·皮克（Katie Peek）

96 经典回眸 50,100&150 YEARS AGO

来自NASA教育的STEM课程

扫描二维码
填写报名表



巴克比 先生
太空科技营教育顾问
美国 NASA 高级顾问
美国太空营创始人

2020寒假太空科技营

北京站

招募启动!

- 引入美国太空与火箭中心和 NASA 教育共同研发的太空课程
- 不出国门体验美国宇航员青少年培训体系
- 深受孩子们喜爱的动手体验项目
- 美国太空营创始人巴克比先生 & 中国联络处联合签发证书
- 获得 NASA 纪念徽章 & 定制 T 恤

特色课程

- 国际空间站与月球基地
- 净水器实验
- 飞车制作
- VR 火星体验
- 降落伞制作
- 太空服原理
- 队徽设计

地点：北京，中国宋庆龄青少年科技文化交流中心　**日期：**2020年2月1日-5日
建议年龄：7-12岁小学生　**报名热线：**18610619968　010-57101895
主办方：美国太空营中国联络处https://spacecamp.com/

本活动由主办方美国太空营中国联络处负责组织，最终日程安排以冬令营协议为准。

环球科学 SCIENTIFIC AMERICAN

COPYRIGHT 版权

2020年1月1日出版 总第181期

主管单位 Authorities in Charge
中华人民共和国教育部 Ministry of Education of the People's Republic of China

主办单位 Sponsor
中国大学出版社协会 China University Presses Association

出版单位 Published By
《环球科学》杂志社有限公司
GLOBAL SCIENCE MAGAZINES Co. Ltd
社址 Address：北京市朝阳区秀水街1号建外外交公寓4-1-21 Office 4-1-21, Jianguomen Diplomatic Residence Compound, No. 1, Xiu Shui Street, Chaoyang District, Beijing, China. **邮编：**100600

社长 / 总编辑 Editor-in-chief
陈宗周 Chen Zongzhou

出版人 Publisher
刘芳 Liu Fang

编辑中心 EDITORIAL DEPARTMENT
执行主编 Executive Editor
褚波 Wave Chu
资深编辑 Senior Editor
吴兰 Wu Lan / 罗凯 F. Leocas
吴非 Wu Fei / 魏潇 Wei Xiao
编辑 Editor
龚聪 Gong Cong / 杨心舟 Yang Xinzhou
助理编辑 Assistant Editor
石云雷 Shi Yunlei
记者 Chief Reporter
方行苇 Fang Xingwei
特约记者 Contributing Reporter
陈耕石 Chen Gengshi / 吴好好 Wu Haohao
颜磊 Yan Lei / 杜立配 Du Lipei

网站 Website
袁雪 Yuan Xue

设计部 Art & Design
视觉总监 Visual Director
封雪英 Feng Xueying

编辑部热线：010 - 85325871
新媒体合作：010 - 85321181

运营中心 OPERATING DEPARTMENT
发行部 Circulation Department
发行热线 010 - 57439192

市场部 Marketing Department
市场热线 010 - 57101895

广告部 Advertising Department
广告热线：010 - 85325810

读者服务部 Reader Service
晶晶 Jingjing 010 - 57458982

国际标准刊号：ISSN 1673-5153
国内统一刊号：CN11-5480/N
总期号：总第181期
发行单位：北京报刊发行局
全国各地邮局均可订阅 邮发代号：80-498
广告经营许可证号：京朝工商广字第8144号
印刷单位：北京利丰雅高长城印刷有限公司

版权声明：本刊刊登的所有内容，杂志保留全部版权。未经许可，不得以任何形式转载 、复制 、翻印 、传播或使用 。如无特殊声明 ，杂志保留以任何形式（包括但不限于纸版、数字版、移动终端版、数据库、光盘等）编辑、修改、出版、使用或授权 使用该作品的权利。作译者在本刊发表文章，享有文章署名权和获取一次性报酬 的权利，不享有其他任何权利。本刊保留一切法律追究的权利。

北京市绿色印刷工程
——优秀青少年读物绿色印刷示范项目

顾问委员会

中国顾问委员会

周光召 杨振宁（以下按姓氏笔画）
艾国祥 李国杰 吴新智 张玉台 张厚粲 赵忠贤 钟南山 姚期智 欧阳自远 郭光灿 焦洪波 滕吉文

全球顾问委员会

莱斯利·C·艾洛 (Leslie C. Aiello)
温纳-格伦人类学研究基金会主席

罗杰·宾汉姆 (Roger Bingham)
科学网络（The Science Network）联合创始人、负责人

G·史蒂文·博乐 (G. Steven Burrill)
美国博乐集团CEO

亚瑟·卡普兰 (Arthur Caplan)
纽约大学Langone医学中心医学伦理学人口健康系主任

乔治·M·丘奇 (George M. Church)
哈佛医学院计算遗传学中心主任

丽塔·科尔韦尔 (Rita Colwell)
马里兰大学帕克分校教授、约翰斯·霍普金斯大学公共卫生学院教授

德鲁·恩迪 (Drew Endy)
斯坦福大学生物工程学教授

埃德·费尔顿 (Ed Felten)
普林斯顿大学信息技术政策中心主任

凯格厄姆·J·加布里埃尔 (Kaigham J. Gabriel)
摩托罗拉移动公司副总裁

哈罗德·加纳 (Harold Garner)
弗吉尼亚理工学院生物信息学研究所教授、医疗信息系统部门负责人

迈克尔·S·加扎尼加 (Michael S. Gazzaniga)
加利福尼亚大学圣巴巴拉分校Sage心智研究中心主任

戴维·J·格罗斯 (David J. Gross)
2004年诺贝尔物理学奖得主、加利福尼亚大学圣巴巴拉分校卡夫利理论物理研究所教授、常任理事

莱内·维斯特高·哈乌 (Lene Vestergaard Hau)
哈佛大学物理与应用物理系教授

丹尼·希利斯 (Danny Hillis)
Applied Minds公司主席

维诺德·科斯拉 (Vinod Khosla)
科斯拉风险投资公司合伙人

克里斯托夫·科赫 (Christof Koch)
艾伦脑科学研究所CSO

丹尼尔·M·卡门 (Daniel M. Kammen)
加利福尼亚大学伯克利分校可再生能源及新能源实验室主任、能源与资源研究组特聘教授

劳伦斯·M·克劳斯 (Lawrence M. Krauss)
亚利桑那州立大学宇宙学家、起源项目负责人

莫顿·L·克林格尔巴赫 (Morten L. Kringelbach)
牛津大学精神病学系资深研究员、丹麦奥胡斯大学神经科学教授

史蒂文·凯尔 (Steven Kyle)
康奈尔大学应用经济与管理系教授

罗伯特·S·兰格 (Robert S. Langer)
麻省理工学院化学工程系戴维·H·科赫研究所教授

劳伦斯·莱斯格 (Lawrence Lessig)
哈佛大学法学院教授

约翰·P·穆尔 (John P. Moore)
康奈尔大学威尔医学院微生物学和免疫学教授

M·格兰杰·摩根 (M. Granger Morgan)
卡内基·梅隆大学工程与公共政策教授兼系主任

米格尔·尼科莱利斯 (Miguel Nicolelis)
杜克大学神经工程中心负责人

马丁·A·诺瓦克 (Martin A. Nowak)
哈佛大学生物学和数学教授、进化动力学项目负责人

罗伯特·E·帕拉佐 (Robert E. Palazzo)
阿拉巴马大学伯明翰分校文理学院院长

卡罗琳·波尔科 (Carolyn Porco)
卡西尼探测器成像科学团队、太空科学研究所卡西尼成像中心运营实验室负责人

马丁·里斯 (Martin Rees)
英国皇家天文学家、剑桥大学天文学研究所宇宙学和天体物理学教授

维兰努亚·S·拉玛钱德朗 (Vilayanur S. Ramachandran)
美国加利福尼亚大学圣迭戈分校大脑与认知中心主任

丽莎·兰道尔 (Lisa Randall)
美国哈佛大学物理学教授

约翰·里根沃德 (John Reganold)
美国华盛顿州立大学土壤科学和农业生态学终身教授

杰弗里·D·萨克斯 (Jeffrey D. Sachs)
美国哥伦比亚大学地球研究所主任

尤金妮亚·斯科特 (Eugenie Scott)
美国国家科学教育中心执行主任

特里·诺斯基 (Terry Sejnowski)
美国索尔克生物学研究所计算神经生物学实验室教授、负责人

迈克尔·舍默 (Michael Shermer)
《怀疑论》杂志出版人

迈克尔·施耐德 (Michael Snyder)
斯坦福大学医学院遗传学教授

迈克尔·E·韦伯 (Michael E. Webber)
清洁能源孵化器负责人、美国得克萨斯大学奥斯汀分校机械工程系副教授

史蒂文·温伯格 (Steven Weinberg)
1979年诺贝尔物理学奖得主、美国得克萨斯大学奥斯汀分校物理系理论研究组主任

乔治·怀特塞兹 (George M. Whitesides)
美国哈佛大学化学与化学生物学教授

内森·沃尔夫 (Nathan Wolfe)
全球病毒预警计划（Global Viral Forecasting Initiative）负责人

R·詹姆斯·沃尔赛 (R. James Woolsey)
勒克斯资本管理合伙人

安东·蔡林格 (Anton Zeilinger)
奥地利维也纳大学量子光学、量子纳米物理学、量子信息学教授

乔纳森·齐特林 (Jonathan Zittrain)
哈佛大学法律和计算机科学教授



2020. Scientific American, a division of Nature America, Inc. Subject to national and international intellectual property laws and treaties. All rights reserved. Used under license. No part of this issue may be produced by any mechanical, photographic or electronic process, or in the form of an audio recording, nor may it be stored in a retrieval system, transmitted or otherwise copied for public or private use without written permission of the publisher.

《环球科学》经典珍藏版

《环球科学》× 机械工业出版社 联合出品









时间专刊·宇宙专刊·黑洞专刊·天文专刊

全新的装帧设计，全新的阅读体验

扫码了解更多



意大利版

卵子冷冻服务

在美国，卵子冷冻服务正在蓬勃兴起，很多年轻女性选择购买这一服务，把自己的卵子冷冻起来，以便在未来有生孩子的意愿时使用。在意大利，卵子冷冻服务尚不如美国普遍，但是增长的势头已经开始显现。除了普通女性，生殖医学领域的一些意大利医生和研究人员也颇为关注这一服务，他们希望弄清楚一些关键问题：女性在什么年龄来提取卵子是最合适的？每位适龄女性每次需要提取多少颗卵子用于冷冻，才能最大程度保证最终的成功率？冷冻与解冻过程对卵子的健康是否有影响？据说，如果严格按照冷冻流程，冷冻卵子解冻后，存活率可达80%。不过，由于意大利并未强制性地要求相关机构披露信息，因此卵子冷冻的数据还有待进一步研究和核实。

日本版

如何防止 AI“被骗”

2011 年以来，深度学习开始急速发展，在短时间内就成为了可以在现实世界中应用的技术。现在，大部分与AI相关的技术，都会用到深度学习。但是，这种技术也会犯一些人类绝不会出现的错误。比如，遮挡“停止”标识牌的某个部分，AI算法就可能把标牌识别为“限速45km”。更麻烦的是，我们并不清楚AI为什么会如此轻易地被骗，防御这种攻击的方法也未被找到。AI的这种特性，展现出了它与人类大脑活动完全不同的一面。目前AI已经进入了自动驾驶、医疗诊断、投资建议等各种常见的社会活动，一旦被“骗”将会造成严重后果。于是，科学家们开始对AI“思考”和“判断”的过程进行探索（译/魏潇）。

法国版

果蝇喜欢什么颜色

美国迈阿密大学的研究团队最近发现了一个有趣的现象。他们把果蝇装在不同的试管中，然后用不同光线照射试管，结果发现果蝇在清晨和傍晚更偏爱绿光，在中午却喜欢红光。这样的变化主要受到生物钟的调控。果蝇具备二色视觉，能分辨不同色调的绿色和蓝色，红光对它们来说相当于很浅的绿色，在中午时分选择红光有助于让它们找到凉爽的区域。携带特定基因突变而导致生物钟失灵的果蝇会始终待在有绿光的区域，而生物钟错乱的果蝇会徘徊在绿光和红光之间，表现出异常的行为模式。不过在任何时候，果蝇都会回避蓝色的光线，因为蓝光接近紫外线区域，具有较高的能量（译/戚译引）。

西班牙版

音乐可以改变大脑

演奏不同的乐器是否会刺激或改变大脑中的结构呢？我们知道，人类大脑由两个半球组成：左半球和右半球。而胼胝体，就是连结左半球和右半球的主要通道。此前，科学家认为胼胝体可能参与了人类认知相关的工作，特别是在解决复杂问题方面。最近，德国伯格曼希尔大学医院的拉拉 · 施拉夫克（Lara Schlaffke）领导的团队在一项研究中试图揭示音乐演奏与大脑功能的关系，特别是演奏打击乐器对大脑的内部结构的影响。通过磁共振成像技术，他们对比了专业打击乐手以及音乐经验不足的人的大脑，结果发现在专业打击乐演奏者大脑中，胼胝体中的纤维比一般人少，但更粗壮（译/孔娟）。

时间晶体



弗兰克·维尔切克是麻省理工学院物理学教授、量子色动力学的奠基人之一。因在夸克粒子理论（强作用）方面所取得的成就，他在 2004 年获得了诺贝尔物理学奖。

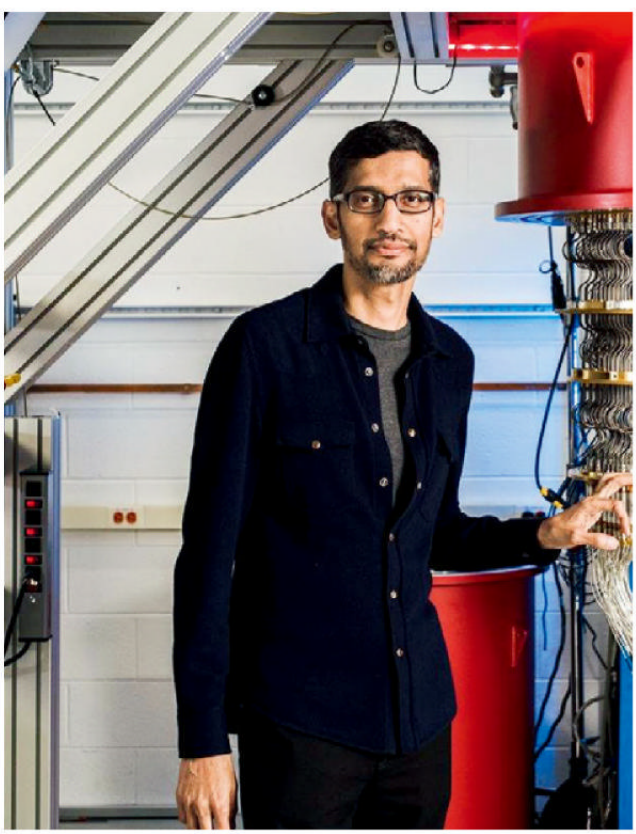
如何看待“量子霸权”

在通向实用的下一代处理器的漫长征程上，谷歌的最新突破迈出了积极的一步。

撰文 弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek） 翻译 胡风 梁丁当

目前，绝大多数计算机都是处理由0、1组成的巨大数组。这两个二进制数字经常被称为比特。随着时代进步，物理学家和工程师们能够使用越来越小的器件来构建功能性比特。真空管和电磁继电器逐渐被现代化的集成电路所代替。一个可以轻易置入手机或者手表的小型芯片上聚集着数十亿个晶体管。而且晶体管的尺寸仍然在继续变小。

然而，当微型化接近原子大小的时候——其实现在的晶体管不比原子大很多——我们便置身于一个崭新的世界：量子力学奇境。 比特的量子版，即量子比特，可以是0和1的任意组合（用专业术语讲，即“叠加”）。相较于由比特构成的经典计算机，由量子比特构成的量子计算机的功能可能更加强大，但也更加复杂和脆弱。



谷歌 CEO 桑达尔·皮查伊（Sundar Pichai）站在谷歌公司的量子计算机旁边。

量子计算机已成为当今科学技术的前沿。量子比特的制造融合了低温科学、超导和新型光电电路，是一项开创性的杰出技术成就。但它们其实比基于现代晶体管的经典比特更大，而非更小。我们目前能够制造的量子计算机还没有实际用途。事实上，针对它们的研究主要还是着眼于未来。

在这条发展道路上，“量子霸权”标志着一个里程碑：量子计算机能够完成一项复杂的计算，而这样的计算，通常的经典计算机无法在较短的时间内完成。谷歌的研究人员们最近在《自然》杂志上发表了一篇让人印象深刻的论文，宣称用一台名为Sycamore的处理器实现了量子霸权。让人惊讶的是，他们的这台量子计算机只由几十个低质量（或“噪声”较大）的量子比特构成，可它的性能却能够比肩由数百上千亿高质量比特所构成的最先进的经典计算机。

尽管如此，我们最好谨慎、全面地看待它。首先，Sycamore实现的只是非常特殊的计算。即使对一名物理学家来说，该计算听起来都很复杂，并没有明显的实用价值。而且，IBM的研究人员很快注意到，利用更好的算法的经典计算机也能在不太长的时间内完成。

而更加让人深思的则是量子霸权的意义。其实解决重要的定量问题时，我们不用量子比特也可以比任何经典计算机都快。 随便一个碳原子，仅通过自己的行为，便能“计算”出一个非常重要的实际问题的答案——即碳会如何运动和变化？比如，通过检测气体碳在受热或激光辐射后的发射光谱，我们就可以“计算”出碳原子是如何辐射光子以及与光进行相互作用的。相比于任何超级计算机求解相关方程的速度，碳原子给出答案的速度显然快得多。而且这个方案很容易扩展：只要多用几个碳原子，你就可以解决化学中的一些重要问题。

毫无疑问，从长远来看，利用物质量子特性的计算机将大大地增强我们解决有用问题的能力。但我们距离这个目标还很遥远，甚至都不能确保一定成功。在可预见的将来，我们顶多只能在精心选择的应用中拥有“量子优势”，而并非在广泛的领域拥有“量子霸权”。

全球学术期刊概览

领研网 www.linkresearcher.com



arXiv: 1909.04251

arXiv

用人工智能应对网络暴力

人工智能算法早已用于删除网络仇恨言论，如今，研究人员研发出了一种新型人工智能工具，不仅能够删掉仇恨言论，还能做出回复，比如：“您所使用的语言极具冒犯性，所有种族和社会团体都值得被宽容对待。”来自英特尔的数据科学家在两个社交媒体网站上分别收集了5 000条和12 000条对话，针对其中的仇恨言论，请真人写下回复模板，然后让自然语言处理算法学习真人的回复，并撰写出自己的评论，回复的内容在大部分情况下都很合适。研究人员表示，这个方法是为了触发更多的良性对话，进而引导社区群体内的讨论，包括引导可能发表仇恨性言论的人以及他们可能要伤害的人。

扫码收听英语
原声论文解读



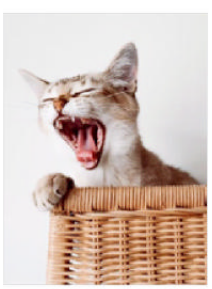
DOI: 10.1098/rsbl.2019.0407

《生物学快报》

滨蟹也能学会跑迷宫

大鼠和小鼠会跑迷宫，蜜蜂和某些人类也会。现在，会跑迷宫的生物名单上又多了滨蟹（*Carcinus maenas*）。英国的海洋生物学家在实验室搭建了迷宫，在出口放上碎贻贝作为引诱，然后在迷宫的入口放开滨蟹。他们发现，接下来一个月里滨蟹在迷宫中跑得越来越快，转错弯的次数也越来越少；第三周开始，就有滨蟹能毫不出错地跑出迷宫了，这说明它们一直在学习这一技能。而在彻底清洗迷宫、拿走贻贝后，经验丰富的滨蟹会比从没跑过迷宫的同伴更快跑到出口。如今的海洋污染越来越严重、酸性越来越强，关于螃蟹的这一发现让科学家能够对蟹类的认知技能进行测试，来检查螃蟹和其他海洋无脊椎动物如何应对不断变化的海洋环境。

扫码收听英语
原声论文解读



DOI: 10.1098/rsbl.2016.0545

《生物学快报》

打哈欠并不是因为困

我们普遍认为打哈欠是困倦或无聊的表现，但最近的证据表明，打哈欠可能起到了促进大脑降温的作用，原理就是：当你深吸一口气时，吸入的空气会使大脑稍稍降温；同时，伸展下巴增加了流向大脑的血液，这是另一个降温因素。那为什么我们会在晚上打哈欠呢？因为晚上即将睡觉时，我们大脑和身体的温度是一天中最高的。美国的进化心理学家考察了网上大量动物打哈欠的视频，包括猫咪、狗、狐狸、大象、大猩猩、刺猬、松鼠、老鼠和海象，对不同动物的哈欠计时，然后与每个物种的大脑平均重量和大脑皮层神经元数量进行比较。结果发现，打哈欠的时长能很好地预测动物的大脑重量和大脑皮层神经元数量，这表明打哈欠很可能起到了非常基本的神经生理功能，换句话说，打哈欠有助于让大脑冷静下来。

扫码收听英语
原声论文解读



DOI: 10.1016/
j.amepre.2015.06.025

《美国预防医学杂志》

“抖腿”能减轻久坐的危害

“坐着的时候不要动来动去”这样的引导可能不那么健康，因为久坐会对身体产生负面影响，而手脚上的小动作实际上有助于抵消这种负面影响。英国的研究人员对近1.3万名女性进行了12年的跟踪调查，询问了她们的饮食、吸烟和饮酒习惯，以及锻炼和坐着的时间。除此之外，还提出了一个不太寻常的要求，让她们用1至10表示自己无法静坐的时间，因为研究人员觉得有关锻炼的提问可能没有涵盖所有的运动能量消耗。结果发现，不管研究对象在其它时间有多活跃，每天坐7个小时以上都与死亡风险增加30%相关；但这种关联在手脚容易多动的人身上消失了。研究人员表示，坐立不安似乎并不会降低体重身高指数，但可能会改善新陈代谢。所以，如果你坐了很长时间，不论什么活动都是有益的，哪怕是“抖腿”。

扫码收听英语
原声论文解读



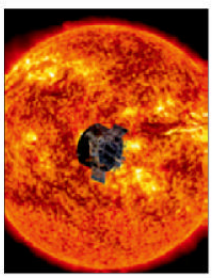
《大脑》

空气污染可能导致大脑萎缩和记忆衰退

DOI: 10.1093/brain/awz348

在世界卫生组织公布的“2019年十大健康威胁”中，空气污染排在了第一位。已有的研究显示，$PM_{2.5}$暴露与呼吸系统疾病和心血管疾病都具有相关性，而近期美国的一项研究表明，较严重的空气污染与女性记忆力明显衰退、大脑萎缩症状相关。研究数据来自美国国立卫生研究院的妇女健康倡议研究，涉及998名73~87岁的女性，研究人员对她们进行了长达12年的记忆测试和脑部影像学检查，同时监测她们12年间所处的环境、空气数据，以评估她们的$PM_{2.5}$暴露程度。综合所有信息，结果发现较高水平的$PM_{2.5}$暴露与大脑变化和记忆下降有着明显的关联。

扫码查看最新《大脑》论文导读



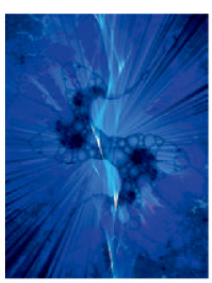
《自然》

四篇《自然》论文共同揭开太阳谜题

DOI: 10.1038/s41586-019-1813-z

帕克太阳探测器已经三次近距离飞掠太阳，收集到的数据共同发布于4篇《自然》论文中。关于太阳的许多现象，科学家一直没能找到合适的解释，例如日冕加热问题和太阳风加速能量起源之谜。利用独特的成像与探测仪器，帕克揭示了“慢”太阳风的来源和加速机制，同时也提出了更多新的问题，包括磁场方向的大幅翻转、强度惊人的电磁场波动、比此前理解中更复杂的磁场结构等。第一批结果包含的信息量如此之大，可能需要好几年的时间逐步分析，而帕克的太阳之旅仍在继续。

扫码查看最新《自然》论文导读



《美国科学院院刊》

强电场让氨分子发生量子隧穿

DOI: 10.1073/pnas.1914432116

隧穿效应是一种量子力学现象，指的是微观粒子能够穿越比自身能量更高的位势垒。来自韩国和美国的化学家团队将一个最高可达2亿伏每米的超强电场施加到了夹在两个电极之间的氨分子样本上，产生的力几乎与两个相邻分子间的相互作用一样强，让伞状结构的氨分子产生了隧穿。除氨分子之外，研究人员正致力于利用外加电场来研究一些其他分子。这种新的研究方法对未来研究分子结构和动力学具有重大意义，相关应用也为理解隧道现象的本质提供了更基本的见解。

扫码查看最新《美国科学院院刊》论文导读

领研网

《环球科学》旗下科技学术分享与人才招聘平台，致力于传播与分享全球优秀研究成果，为华人科研人员铺就职场道路，为高校、研究机构与科技企业搭建人才桥梁。

合作邮箱：contact@linkresearcher.com　　电话：010-85321181

领研网 · 论文频道

1 000+ 种
各学科优质期刊

20 000+ 篇
中文论文导读

50+ 家
出版方、国内外研究机构合作精选

30 000 000+ 次
学术界传播及曝光

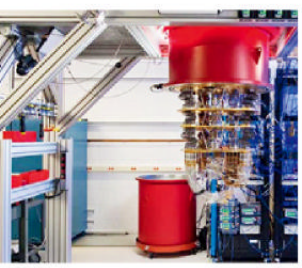
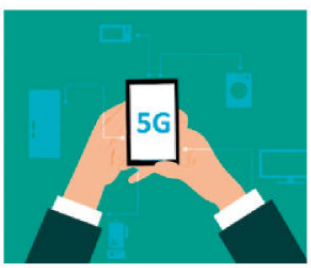
扫描二维码
订阅科学 60 秒
与最新论文

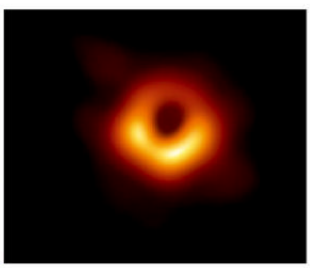
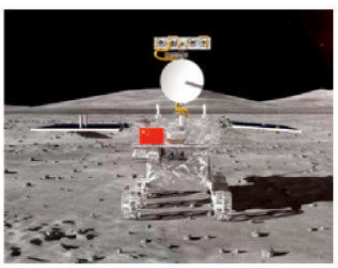
2019年
《环球科学》十大科学新闻

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

2019年，我们经历了多次第一：第一次拍摄到黑洞、第一次在月球背面发现月幔物质、第一次看见量子纠缠……每个“第一次”，都意味着人类的认知范围又扩大了一点。正是这些“第一次”，筑成了人类文明一路前行的阶梯。现在，让我们一起来回顾，科学家在2019年为我们搭建的“文明阶梯”。

在评选本年度“十大科学新闻”时，我们得到了14家优秀学术自媒体的支持，他们是（按拼音顺序排列）：BioArt、高分子科学前沿、慧天地、机器之心、集智俱乐部、京师物理、纳米人、PaperWeekly、全国地研联、X-MOL资讯、学术经纬、研之成理、中科院地质地球所、中科院物理所，在此向他们表示感谢。


1 人类首次直接拍摄到黑洞

2019年4月10日，事件视界望远镜（EHT）项目团队在全球六地同步召开新闻发布会，发布了人类历史上的首张黑洞照片。这个黑洞位于巨椭圆星系M87中心，距离地球5500万光年，质量为太阳的65亿倍。这是人类首次目睹黑洞真容，这项成果不仅可以让科学家在引力极强的极端环境中验证广义相对论，也有助于揭开宇宙学领域的更多未解谜团。接下来，科学家将进一步增加观测望远镜的数量，希望拍出细节更丰富、角度更多样的黑洞照片。

2 5G正式商用，5G元年到来

2019年6月6日，中国工信部正式发布5G商用牌照，电信运营商获得牌照后，标志着5G业务的正式商用和5G元年的到来。同时，中国也成为韩国、美国、瑞士、英国后，第五个正式实现5G商用的国家。中国发放5G牌照后，相关部署进展迅速——截至2019年11月，中国5G套餐签约用户数达87万，开通5G基站11.3万个。同时，包括华为在内的中国企业在5G技术上也处于全球领先地位。这些事实意味着，中国在经历了1G空白、2G落后、3G追赶、4G同步的阶段之后，在5G技术领域终于跻身全球第一梯队。5G的广泛应用也必然会像互联网和4G网络一样，深度重塑人类社会。改变正在到来。

3 谷歌宣布实现“量子霸权”

2019年10月23日，《自然》杂志发表了谷歌研究人员在量子计算领域的重要进展：谷歌研制的量子计算机首次实现“量子霸权”，这台量子计算机用200秒就能解决的问题，当今最先进的经典计算机需要花费1万年才能解决。在这篇论文中，谷歌量子计算机负责人约翰·马丁尼斯（John Martinis）带领的团队构建了一个名为Sycamore的量子芯片，这个芯片由54个量子比特构成，在执行复杂任务时表现出了令人震惊的效率。但在论文发表后，IBM公司的研究人员对马丁尼斯团队的数据提出了质疑，认为采用先进算法的经典计算机在两天内就能完成任务。尽管如此，谷歌的最新研究仍是量子计算领域的重大进展，显示了量子计算机的巨大潜力。除了谷歌、IBM等国外企业，阿里、腾讯等中国科技公司也已布局量子计算，目标只有一个，那就是真正通用的量子计算机。

4 “嫦娥”4号首次在月球背面发现月幔物质

2019年5月16日，《自然》杂志发表了一篇来自中国探月团队的重要论文：“嫦娥”4号在月球背面首次发现

月幔物质。2019年1月3日，“嫦娥”4号在月球背面的冯·卡门陨石坑着陆。然后，“玉兔”2号月球车便与“嫦娥”4号分离，先后前往着陆点南侧与西北侧的两个探测点，获取了这里的光谱数据。探月团队分析数据后发现，在上述两处探测点，橄榄石的占比分别为48%和55%，这是人类首次在月球找到高橄榄石含量的岩石样本，这种矿物组成也意味着，它们很可能来自上月幔。这项发现让人类得以透过月球表面窥视月球深处的物质组成，为完善月球形成与演化模型提供了有力支撑。

5 死猪大脑恢复部分细胞功能

2019年4月18日，美国耶鲁大学科学家内纳德·塞斯坦（Nenad Sestan）发表论文称，利用全新的体外灌注系统——BrainEx，他和同事成功让死猪的大脑恢复了部分细胞功能。在这项研究中，塞斯坦团队利用特殊的管道，将猪的颈动脉和BrainEx相连，向猪脑灌注模拟血液。在持续灌注6小时后，研究人员发现，大脑皮层的细胞可以维持正常形态，并恢复了部分细胞功能。尽管在研究中没有检测到意识、感知等高阶大脑活动，但这项研究仍然令人震撼，这也说明在适当的情况下，大型哺乳动物的大脑组织可以在死后维持更长时间并恢复部分功能，这也为严重的大脑创伤的治疗提供了新思路。

6 亚马孙森林大火

2019年8月，亚马孙雨林再次发生严重火灾，并持续了3周以上的时间，烧毁森林超过80万公顷。亚马孙雨林被誉为“地球之肺”，有着极其丰富的生物多样性，在全球生态系统中起着无可替代的作用。但在南美，为了开垦耕地，当地人经常砍伐森林，然后点燃倒下的树木，把草木灰当作下一季耕作的肥料。由于这种耕作方式，亚马孙雨林常年火灾不断，这座原始森林被一步步推向危险的边缘：如果毁坏面积达到20%~25%，亚马孙雨林可能就会进入衰退期，引发生态灾难。而目前，已经有15%~17%的雨林被毁，危机已经不远了——亚马孙需求全球的帮助。

7 世界第二例艾滋病治愈病例或已出现

2019年3月5日，《自然》杂志的一篇报道引起了全球的关注：一名感染HIV的“伦敦病人”经过干细胞移植后，病情得到了缓解。停止服用抗HIV药物18个月后，这位病人体内仍然检测不到HIV，他也有望成为世界上第二个被治愈的艾滋病患者。在他之前，“柏林病人”经历了大剂量的放化疗，完成了两次移植后，最终摆脱了艾滋病。但至今，“柏林病人”的成功一直未被复制，这让研究人员不禁怀疑“柏林病人”是否具有某种特殊性。而“伦敦病人”让科学家们看到了希望，尽管目前还不能确定他是否被治愈，但他的出现让科学家确信，艾滋病被治愈的理论依据是存在的，未来或许可以利用基因技术或抗体技术治愈艾滋病。

8 人类第一次看见量子纠缠

2019年7月12日，在一篇发表于《科学·进展》的论文中，英国物理学家保罗-安托万·莫罗（Paul-Antoine Moreau）展示了他和同事拍摄到的史上第一张量子纠缠照片，人类终于亲眼看见这种“幽灵般的超距作用”。如今的科学界已经普遍接受量子纠缠是存在的，不过始终没人真正看到量子纠缠。在这项最新研究中，莫罗设计了一个巧妙的系统，当两个相互纠缠的光子通过分束器分开后，会沿着两条光路传播，其中一个光子被探测器检测到之后，也会触发另一条光路上的相机进行拍照，进而可以捕捉到纠缠量子的图像。这项研究以直接的证据证明了量子纠缠是存在的，并且可能推动量子计算等新兴领域的发展，催生新型成像技术和设备。

9 基因研究首次论证现代人类确切起源地

2019年10月28日，澳大利亚科学家瓦妮莎·海斯（Vanessa Hayes）发表论文称，通过对1217人进行血液采样，分析一种名为“L0”的线粒体DNA，首次把现代人类的起源地指向20万年前的马卡迪卡迪湿地。这是首个论证现代人类起源的确切地点的研究，但也有不少科学家指出，这项研究的结论有待商榷，因为仅从线粒体DNA这一个层面来确定现代人的起源地并不可靠，而且此前通过研究Y染色体，科学家还得出过相反的结论——人类起源于非洲西部，而不是南部。但不管怎样，海斯团队至少为“我们来自何处”这一古老谜题提供了重要线索和探索方向，也许未来的科学家会基于他们的研究找到可靠的答案。

10 马德里气候大会未能取得重要成果

2019年12月15日，联合国气候变化马德里大会在延时两天之后落下帷幕。这届气候大会被称为“史上最长”，直到15日，缔约各方才通过了《智利-马德里行动时刻》。而在本次气候大会备受关注的《巴黎协定》第六条碳市场机制的探讨上，各方未能取得共识，只能留待来年审议。从目前来看，要在2050年达到碳中和目标，时间已经相当紧迫，而美国在2019年11月正式启动退出《巴黎协定》的程序，更是给这一目标的达成蒙上一层阴影。好在，马德里气候大会的与会各方在碳市场机制问题上持积极态度，中国也在持续推动相关各方早日达成共识——2020年的气候大会上，我们也许能听到好消息。要把全球平均气温上升幅度控制在2°C内，只能依靠全球的共同努力。



巴尔的摩地区空置建筑较多，生长在那里的虎蚊体型更大，危险性也更高。



图片来源：戈登·扎米特 (Gordon Zammit)

生态学

废弃建筑孳生蚊媒疾病

撰文　梅琳达·温纳·莫耶（Melinda Wenner Moyer）
翻译　赵欢

在过去50年中，美国部分地区的蚊子数量猛增了10倍。这种情况非常令人担忧，可能会加剧西尼罗河病毒、登革热和基孔肯雅病的传播。分析显示，有些地区受到的影响明显比另一些地区更严重。2019年10月，《医学昆虫学杂志》（*Journal of Medical Entomology*）发表了一项研究，文中提到，美国巴尔的摩低收入地区的问题最严重，因为这些地方的蚊子数量更多，个头更大，并且寿命也更长。问题的根源主要在于，巴尔的摩有近1.7万座废弃建筑，这些建筑集中在经济落后的地区，非常有利于蚊虫繁殖和生长。为了有效防治蚊子及其携带的疾病，巴尔的摩需要寻找解决方案，考虑如何管理城市的建筑设施。

白纹伊蚊是从1987年进入美国的，俗称亚洲虎蚊，目前已经成为美国许多城市中最常见的蚊种。美国纽约卡里生态系统研究所（Cary Institute of Ecosystem Studies）和马里兰大学的研究人员在巴尔的摩展开了相关工作，他们连续3年在5个居民社区捕获成年的白纹伊蚊。在测量蚊子的翅膀长度（可用于代表蚊子

的体型大小）后，研究人员发现，收入较低的街区蚊子的体型更大。这可不是只让蚊子更显眼那么简单，蚊子体型越大，寿命越长，可叮咬的次数也就越多。这样，蚊子因叮咬感染致病微生物的几率会增加，因叮咬传给不同人群的几率也会变大。因此，体型更大的蚊子疾病风险也更高。同时，在同一属种中，体型更大的蚊子产卵也多，能促进蚊虫繁衍。香农·拉多（Shannon LaDeau）是卡里生态系统研究所的疾病生态学家，她和同事在2013年发表的一项研究显示，巴尔的摩低收入区的白纹伊蚊比高收入区多72%左右，而且蚊子密度也更高。

研究人员表示，相比于富裕区，低收入区废弃建筑更多，也会散落更多废弃不用的容器。这些容器往往会积水，于是，蚊子很容易借此孳生。此外，废弃建筑还为很多水池提供了荫庇，这也很利于蚊子生长。出于好意，一些城市会在低收入地区种植树木绿化环境，但这或许会使蚊虫问题变得更严重：蚊子在积水池里生长繁衍，栽种的树木和灌木不仅有利于积水池的形成，飘到水面上的落叶还会成为蚊子幼虫的食物，有助于幼虫长得更大。

布莱恩·艾伦（Brian Allan，并未参与这项研究）是美国伊利诺伊大学香槟分校的生物学家，他提到：“在以下三者之间，似乎存在一种复杂的关联：低收入区、供幼蚊生长的栖息地类型以及将疾病传播给人类的成蚊体型。”

幸运的是，蚊媒疾病在美国还不是一个很大的问题。从2019年1月到10月，美国疾病控制与预防中心只报告了777例西尼罗河病毒感染，614例登革热感染（其中大部分患者不是在美国感染患病）。但气候变化可能会扩大蚊子的栖息地，延长夏季时间，这样蚊子的繁殖时间和寿命也会延长，从而使美国蚊媒疾病的状况恶化。

拉多表示：“当（某种疾病）在每一季的入侵和传播时间越长，流行的可能性就越大。”而最新研究表明，如果蚊媒疾病开始在美国各大城市大肆传播，低收入社区就有可能受到更严重的影响。

研究还发现，这些负面影响将遍及全美国。美国林肯土地政策研究所（Lincoln Institute of Land Policy，总部设在马萨诸塞州的一家非营利机构）在2018年的一份报告中称，2005年至2010年间，美国的闲置房屋数量从950万套增加到了1200万套，这可能是由2008年的房地产危机造成的持续影响。此后，这一数字虽略有下降，但仍然远高于2005年。大面积的闲置空地也值得关注。仅在费城就有约40 000块这样的土地，多集中在贫困地区。此外，受飓风等自然

生物学

夜蛾翅膀会“发光”

撰文 哈里尼·巴拉特（Harini Barath）
翻译 罗广桢

有一种夜蛾，不仅在后翅上带有显眼的圆点，还可以通过前翅上微结构的变化，悄悄在黑夜中吸引异性。在一项发表于2019年9月《当代生物学》（*Current Biology*）杂志的研究中，科学家展示了他们的发现：从一些特定角度观察雄性夜蛾前翅上的斑点，会有三种不同暗度和大小的变化，而雌性夜蛾的前翅却没有表现出这种变化。

有很多蝶类和蛾类是在日间活动的，它们非常善于利用动态视觉效果相互传递信息。学界一直认为，那



雄蛾的前翅具有某种可以随观察角度变化的视觉特征。

些昼伏夜出的蝶类和蛾类并不善于此道，因为在缺乏光线的环境下，它们基本只能通过化学信号交流。但是，当科学家首次在夜蛾身上发现这种变化时，情况就发生了转变，原来夜蛾也能发出视觉信号。另外，由于只在雄性身上发现了这种现象，研究人员认为这可能与性别选择机制有关。

詹妮弗·凯莉（Jennifer Kelly）是西澳大学的生态学家，在观察为其他项目准备的飞蛾标本时，她和同事第一次注意到了这种不同寻常的视觉现象。“当发现这种现象与角度有关时，我们就意识到，要理解背后的原理就必须理解其中蕴含的光学知识，”凯莉说。随后，他们与其他科学家联系，希望获得支持。

其中包括默多克大学研究材料几何的科学家格尔德·施罗德-特克（Gerd Schröder-Turk），以及瑞士阿道夫·梅克尔研究所的纳米光子学家博多·维尔茨（Bodo Wilts）。

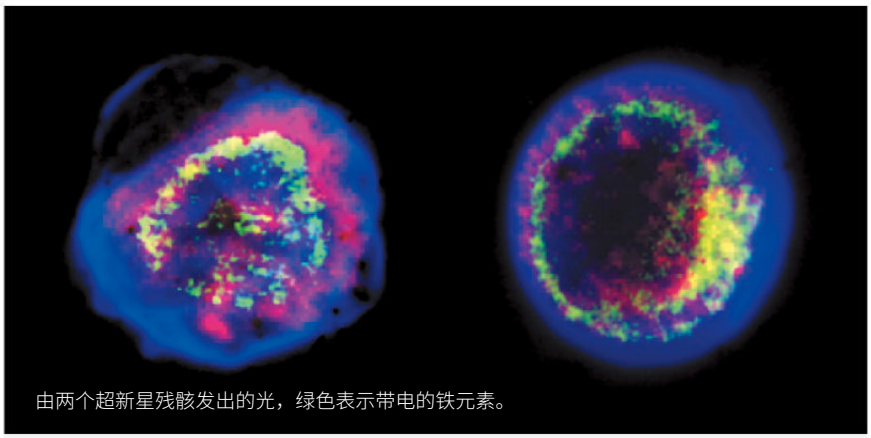
科学家合作研究了这种光学现象，为此还深入分析了夜蛾翅膀上纳

灾害影响的低收入地区，也可能成为蚊虫孳生的环境。研究表明，灾害对低收入居民区房屋造成的损害更大，即便有可能重建，速度往往也会很慢。

因此，在开展灭蚊工作时，可能更需要注意以上提及的地区。美国市政卫生部门通常会向公众普及一些基本的常识，以及这些行为的重要性。比如，及时清空宠物饭碗等放置在室外的容器，及时清理垃圾桶和回收箱中的水。但是，没有人会前往废弃的房屋，倒掉那里的废水。到目前为止，美国大多数市政机构都不愿意接受这项工作。罗格斯大学分子生态学家迪娜·丰塞卡（Dina Fonseca，并未参与这项研究）表示："要解决这个问题很难，因为进入私宅清理的费用很高。"但是，如果这些废弃房屋成为蚊虫的孳生地，或者孕育出其他危险的病媒，当地政府就不得不转变态度，采取措施。

米尺度的鳞片。他们发现，从正上方观察蛾翅时，这些鳞片会像镜子一样直接将光线原路反射回去；从另外的角度观察时，部分光线会穿过翅翼表面让内部颜色更暗的鳞片显露出来，以此显示出雄蛾翅膀上斑块一般的形状。当昆虫用力扑扇它们的翅膀时（这是雄虫在求偶时普遍存在的一种行为），这些斑块就会一闪一闪的，甚至在光线非常弱的环境中也能创造出醒目的信号。

"这些飞蛾为解决窃听问题提供了一种不错的思路，"密歇根大学行为生态学家伊丽莎白·蒂贝茨（Elizabeth Tibbetts，并未参与这项研究）表示，"它们的信号只能从特定的角度接收，这让雄虫可以在不引起天敌注意的情况下，向异性展示它们的魅力。"



由两个超新星残骸发出的光，绿色表示带电的铁元素。

天文学

观测超新星残骸

撰文　雷切尔·伯科维茨（Rachel Berkowitz）　翻译　董子晨曦

当一颗白矮星从附近轨道上的伴星中吸取到足够多的物质时，就会发生Ia型超新星核聚变。这个过程会喷射出新合成的元素，并与星际气体混合，最终形成恒星和星系。但是，天体物理学家始终不清楚引发这一过程的具体条件。

伊沃·赛腾扎尔（Ivo Seitenzahl）是澳大利亚堪培拉大学的天体物理学家，他和同事利用升级后的智利甚大望远镜（Very Large Telescope），为这些超新星碎片建立了史无前例的三维化学动态图。

在超新星爆发事件中，重元素会以超音速从白矮星的内核射出。这个过程会形成一阵冲击波，向外席卷周围的星际气体和尘埃；另一阵冲击波则向后反弹，回到爆炸的碎片中，最终将喷出物质加热到能够释放X射线的温度。通过这些X射线信号，科学家就能了解超新星残骸的组成——但是目前的X射线分析仪还无法检测超新星的喷出物。

赛腾扎尔的团队利用甚大望远镜的可见光数据，以一种全新的方法分析了超新星残骸。相关描述发表在2019年7月份的《物理评论快报》（*Physical Review Letters*）杂志上。一些基本理论认为，Ia型超新星产生了宇宙中大部分的铁元素。越处于超新星冲击波后段产生的铁，带的电荷就越多，因此就会发出独特波长的可见光。然而，这种类型的可见光太弱，在甚大望远镜最近这次升级以前，是探测不到的。

通过升级后的甚大望远镜，研究人员在大麦哲伦星云（我们银河系临近的一个卫星星系）的超新星残骸内，观测到了同心圆状的带电铁环带。通过分析带电铁环带发出的光，科学家首次确定了Ia型超新星残留物中内向冲击波的速度。普渡大学的天文学家丹·米利萨维利维奇（Dan Milisavljevic，并未参与这项研究）表示："这项成果十分令人振奋，是新技术促成了这一点。要感谢新技术被精准地应用到了需要它的研究中。"

生物学

失控行为的脑回路

撰文 西蒙·梅金（Simon Makin）
翻译 赵欢



图片来源：KTSDESIGN

对于许多与成瘾症斗争的人来说，看到吸毒用具或者前往曾经吸毒的地点，都会重燃他们对毒品的渴望，拉高复吸的可能性。将环境线索与愉快的经历关联起来，原本是学习的一种基本形式。但是，有研究发现这种关联会“劫持”人们的行为，导致类似成瘾或饮食失调的问题。

谢利·弗拉热尔（Shelly Flagel）是美国密歇根大学的神经科学家，他领导的团队发现了与“劫持现象”相关的大脑回路。在实验中，行为失控的小鼠和行为正常的小鼠的大脑活动明显不同，改变这个回路则会改变老鼠的行为。这些发现可能有助于研究人员了解为什么有些人更易患冲动控制障碍。剑桥大学的杰夫·达利（Jeff Dalley，并未参与这项研究）表示：“从技术上来说，这是一项很出色的研究。”

在2019年9月发表于*eLife*杂志上的一篇论文中，研究人员做了一项有趣的实验。在每次通过喂食槽给小鼠喂食前，都会给它们展示一个不可活动的杠杆，并按照它们的反应进行分组。首先，所有的小鼠都在杠杆和喂食之间建立了关联，但一些被称为“目标追踪者”（goal trackers）的小鼠会在看到杠杆后直接靠近喂食槽，而“信号追踪者”（sign trackers）则会不断跑向杠杆。

研究组猜测，这套过程涉及2个大脑区域：驱动行为的丘脑脑室旁核（PVT）以及参与奖励机制的前缘皮层。研究人员使用化学遗传学技术（chemogenetics）改变了回路内的神经元连接，从而使它们能够激活或抑制前缘皮层信号。他们发现，如果激活回路，会降低信号追踪者靠近杠杆的倾向，但不会影响目标追踪者。抑制回路会将目标追踪者导向杠杆（显示出信息追踪行为），但不会影响信号追踪者。研究人员还发现，在抑制回路后，目标追踪者大脑中的多巴胺（参与奖励过程的化学递质）含量有所上升。

一旦在人体中明确了信号追踪和目标追踪的神经机制，我们就能测试这些机制是否与某些精神疾病相关。我们希望，借助这套系统，能够鉴别哪些人更容易患上特定精神疾病。

前缘皮层似乎能够从上到下全程控制，而PVT则负责处理由提示触发的信号。“在自上而下的皮层控制过程和自下而上的亚皮层情感过程之间，不同个体似乎以不同的方式平衡这两套系统的功能，”弗拉热尔说，“对环境提示更敏感的个体，可能存在一定的缺陷，影响了自上而下的控制系统。”她认为，认知训练疗法或许可以克服人类的这种缺陷。

达利指出，这条回路本身也许可能成为新疗法的靶标。但在解剖学层面我们还有很多不明确的地方。另外，成瘾反应远远不止一种机制在起作用。

接下来，研究人员会逐步开展人体试验。弗拉热尔说：“一旦在人体中明确了信号追踪和目标追踪的神经机制，我们就能测试这些机制是否与某些精神疾病相关。我们希望，借助这套系统，能够鉴别哪些人更容易患上特定精神疾病。”

简讯

全球科技热点

撰文 萨拉·卢因·弗雷泽（Sarah Lewin Frasier）
翻译 郝豪

摩洛哥

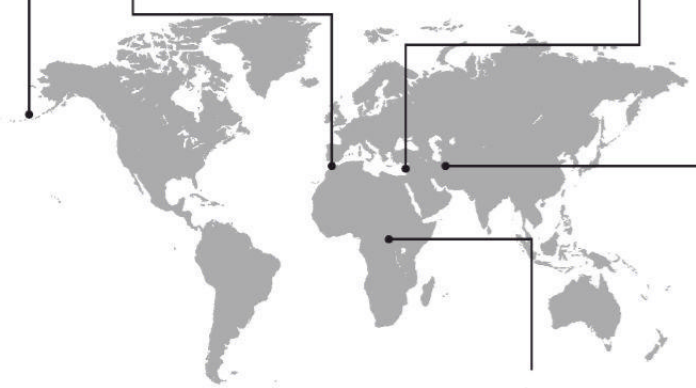
科学家们发现了4.8亿年前埋在泥沙中的三叶虫化石。三叶虫呈并排前行状，头部都朝着一个方向。这一行为类似于处于迁徙状态的现生棘刺龙虾。

以色列

早在20万年前，以色列中部凯塞姆洞穴的居民就已经学会了保存鹿腿，以便在日后食用骨髓。科学家发现，保存的时间可长达9周。这可能是已知最早史前人类储存食物的案例。

美国

在阿拉斯加，有大量北海狗聚集在博戈斯洛夫岛（Bogoslof Island）上。博戈斯洛夫岛位于一座活火山的顶端，曾于2017年爆发过一次。到2019年，已经有超过36 000只海狗幼崽在这座布满间歇泉的岛上出生。



伊朗

由于在没有手机信号的地区逗留了数月，一只装有电子追踪设备的老鹰飞过伊朗上空时，突然发送了累积数月的坐标信息。为此，俄罗斯科学家需要支付大量的电话费用。

南极洲

南极洲的埃默里冰架（Amery Ice Shelf）分离出了一座比夏威夷瓦胡岛还要大的冰山。科学家表示，这种现象每60到70年就会发生一次，相关卫星刚好记录下了这次分裂过程的实时图像。

刚果

研究人员发现，刚果巨型蟾蜍的形状和颜色模仿了加蓬蝰蛇的头部，这是已知的第一种模仿毒蛇的蟾蜍。加蓬蝰蛇拥有已知蛇类中最长的尖牙和最多的毒液。

生物学

用大肠杆菌量产裸盖菇素

撰文 塔尼娅·刘易斯（Tanya Lewis）
翻译 施怿

几十年来，对迷幻剂的研究一直是一种禁忌。近期，科学家在临床试验中有了新的进展，发现裸盖菇素（“神奇蘑菇”的活性成分）或许可以用于治疗抑郁症或尼古丁成瘾等病症。种植裸盖菇需要几个月的时间，并不适用于制药生产；用化学方法合成裸盖菇素，会变得既昂贵又繁杂。现在，科学家成功地改造了大肠杆菌，可以用微生物生产这种令人意乱神迷的药物。

经过改造后，每升培养基中的微生物可产出高达1.16克的裸盖菇素，这是迄今为止表现最好的基因工程菌，比以往的产量提高了10倍以上。扩大规模后，新方法有望批量产出这种可以用于医疗使用的裸盖菇素。

“这种方法的首要优势就是便宜，”亚历山德拉·亚当斯（Alexandra Adams）说，至少在成本上比其他方法更具竞争力。亚当斯是美国迈阿密大学化学工程专业的本科生，也是这篇论文的主要作者。她还说，“控制大肠杆菌比控制其他微生物更容易。”

亚当斯和合作者设计了包含3段裸盖菇基因的大肠杆菌，借助廉价又容易获得的前体分子4-羟基吲哚，就能通过大肠杆菌合成裸盖菇素。随后，研究人员还优化了合成过程，以便更大规模地生产药物。这项进展发表在2019年12月的《代谢工程》（*Metabolic Engineering*）杂志上。

德国弗里德里希·席勒大学的药物微生物学家德克·霍夫迈斯特（Dirk Hoffmeister），并未参与这项研究，但也曾带领团队用基因工程菌生产裸盖菇素。霍夫迈斯特对此的评价是“概念验证性实验”，也是“有趣的替代方法”，显示了“合成生物学的潜力和可能性”。他还说，基因工程菌也可能产生有毒或致敏的微生物代谢产物，需要通过纯化手段去除。根据亚当斯的说法，制药企业可以使用已有的工业技术避免这种风险。因为在通过细菌生产抗生素或胰岛素等药物时，就已经使用过相关技术了。

安德鲁·琼斯（Andrew Jones）表示，他们的终极目标是用葡萄糖合成裸盖菇素。琼斯是这项研究的通讯作者，也是迈阿密大学的化学和生物工程方面的工程师。

材料学

全新的量子比特

撰文 吉姆·戴利 (Jim Daley)　翻译 罗广桢

我们知道，超导体材料可以在没有损耗的情况下将电子从一处直接传输到另外一处。这种材料一般只有一条“车道”，但是，最近发现的一种材料却拥有一种奇特的性质，可以同时双向传导电流。

这种材料被命名为“β-Bi_2Pd”，是一种由结晶铋和钯构成的薄膜。当把它的形状调整成环形后，就能展现出非比寻常的导电能力：让电流同时在顺时针方向和逆时针方向循环。该材料的研发人员表示，或许可以在下一代量子计算机中运用这种材料，因为它恰好符合要求。

李玉帆（Yufan Li）是约翰·霍普金斯大学的物理学家，也是这项研究的主要负责人，他说，“双向电流叠加”的性质类似于量子计算机的基本单元——量子比特，可以将两个不同的状态叠加在一起。传统计算机中的比特只有2种存在形式：0或1，但量子比特能够以两种状态叠加的形式存在（就像著名的“薛定谔的猫”那样）。因此，量子比特可以比传统比特保存更多的信息，这也赋予了它们成为超级计算力的潜力。

此前，超导量子比特需要依靠极其精确的磁场才能工作，但是李玉帆和团队设计的这种材料不需要外加磁场就能实现双向电流通路，因此，这种圆环也被称为“超导磁通量子比特”（superconducting flux qubit）。



插图：托马斯·富克斯（Thomas Fuchs）

研究人员表示，这种材料的特性可以为量子比特技术带来“肉眼可见的进步”。“对我们而言，量子比特可以摆脱磁场独立工作，”李玉帆说，“这意味着大大降低了电路设计和校准的难度。”

β-Bi_2Pd材料的诸多特性也意味着它可能会引发被称为“准粒子”的类粒子现象。具体来说，这是一种存

心理学

睡觉帮你解决问题

撰文 马修·赫特森（Matthew Hutson）
翻译 马晓彤

当你被某个问题困住时，最好的办法有时是不再纠结这个问题。曾经有研究表明，休息或小憩可以帮助大脑找出解决问题的方法。最近，科学家找到了一种方法，可以拓展这种所谓的“孵化”（incubation）现象。他们可以利用声音提示，使睡眠中的大脑集中思考一个具体的问题。

睡眠时，人类大脑的某些区域会对部分记忆进行回顾、增强和修改。大约在10年前，研究人员开发了一种叫做目标记忆激活（TMR）的技术，可以进一步强化选定好的记忆：当一段声音与记忆相关联后，在睡眠



时播放这段声音，就会激活相关的记忆。2019年11月，《心理学科学》（*Psychological Science*）杂志发表了一项研究，研究人员想知道，在睡眠时激活正在解决某个难题的记忆，是否会提高解决这个问题的能力。

约有60名受试者参与了这项试验。他们都是在临睡前来到实验室的。在傍晚的会议中，受试者需要解决一些难题（包括空间、文字和概念问题），在尝试解决不同的难题时，都会出现一段一一对应的音乐作为背景音。当他们剩下6个问题没法解决时，第一天的试验就告一段落了。当晚他们需要佩戴电极入睡，电极会探测他们的慢波睡眠阶段（睡眠最深的阶段，可能对记忆整合十分重要），并在这个阶段播放3种背景音乐（分别对应6个难题中的其中3个）。第二天受试者需要回到实验室，再次尝试解决那6个未解的难题。

总体来说，对于没有在睡眠中激活的难题，解决的比例是21%；对于在睡眠中播放了提示性音乐的难题，解决比例达到了32%，整整提高了50%。

卡迪夫大学的心理学家彭妮·刘易斯（Penny Lewis，并未参与这项研究）表示，“他们获得了卓越而有

在于理论上的，被称为“马约拉纳费米子”的准粒子，它同时也是自己的反粒子（反粒子与其相对应的粒子质量相同，电性相反）。如果超导材料具备这种性质，它就有可能以一种高度理想化的量子比特状态工作，而这种机制可以通过加大元件间的距离，抵御环境噪音的干扰。

然而，用β-Bi_2Pd构建任何一种功能性量子比特的工作还有很长的一段路要走。纽约大学物理学家贾瓦德·沙巴尼（Javad Shabani，并未参与这项研究）认为，除开其他因素，这些元件的可控性必须变得更符合量子比特的要求。“为此，我们需要使用更多的控制手段，”沙巴尼说，“如果我们都无法驾驭这些材料，又何谈真正使用它们呢？”

趣的成果。现在，科学家需要迈出下一步，重复这类试验，试图理解其中的机制，然后确认到底是哪些过程受到了影响。”

除了为人类在睡眠时会重构记忆这一观点提供了新证据以外，这项研究可能还有更实际的意义。克里斯廷·桑德斯（Kristin Sanders，该研究的第一作者，从事研究期间还是美国西北大学的研究生）认为，“在解决难题时，TMR或许可以在未来给我们提供一定的帮助”。睡眠监测技术正在变得普及，即使没有试验中用到的工具，人们也可以在睡前让大脑集中思考某个有待解决的难题。

不过，睡眠并没有特殊魔力，人们需要做好功课，把涉及到的内容提前加载到大脑中。桑德斯说：“比如我就无法用这个过程解决癌症，因为我对癌症研究一无所知。”



野生老虎已从老挝南艾普洛国家公园绝迹。

生态学

野生虎在老挝功能性灭绝

撰文 蕾切尔·努维尔（Rachel Nuwer） 翻译 董子晨曦

10年前，肉食动物专家在老挝北部规划了一片地处偏远的野生动物保护区。该地区被称为南艾普洛（Nam Et-Phou Louey）国家公园，可能是老挝野生虎类最后的避难所。为了研究保护区内的野生动物，2013年时研究人员在区域内设置了隐蔽的相机。这项工作迅速确认了区域内至少存在两头野生虎。但是，在随后一项持续4年的研究中，科学家再也没有观察到这两头野生虎，或者任何其他的野生虎了。

2019年10月，《全球生态与自然保护》（*Global Ecology and Conservation*）报道了这项研究的成果，确认野生虎已在老挝功能性灭绝。研究人员还发现，原本认为依然活跃的猎豹也从该国的国家公园中消失了。“在东南亚剩余的老虎保护区中，国家公园地位很重要，”牛津大学野生动物保护学家戴维·麦克唐纳（David Macdonald）说，“这里的野生动物也在灭绝，简直像是带来了毁灭性的打击。”

阿克莎·拉斯福（Akchousanh Rasphone）是这项研究的主要作者，同时也是首位在牛津大学获得博士学位的老挝女性。她和同事在南艾普洛将近6000平方千米的山脊和密林中安装了超过1500个隐蔽的相机。4年来，他们观察到共计43种哺乳动物及鸟类，然而其中并没有猎豹，2013年后也没有再观察到老虎。有很多国际性机构都对老挝的反偷猎工作提供过支持，但与其他很多国家一样，偷猎者总能找到猎杀野生动物的方法。

“这些发现也是意料之中，”印度班加罗尔野生动物研究中心（Center for Wildlife Studies in Bengaluru）的肉食动物生物学家乌拉斯·卡兰斯（Ullas Karanth，并未参与这项研究）说，“因为缺乏针对当地人规模性盗猎的保护性措施，野生动物最终都会消失。”

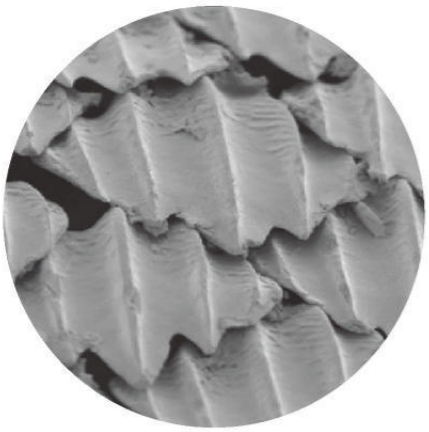
老虎其实是可以在人类占据主导地位的环境中繁衍生息的。印度的人口位居世界第二，但也颁布了针对虎类的优先保护区。目前，印度保有全球三分之二的野生虎类。麦克唐纳表示，老挝和印度的案例为泰国（现存约200头野生老虎）之类的国家提供了经验和教训。保护栖息地十分关键，但痛击偷猎、减少对虎制品的需求，也同样重要。麦克唐纳说，“无论如何，人类都需要做出改变。”

图片来源：OZBALCI

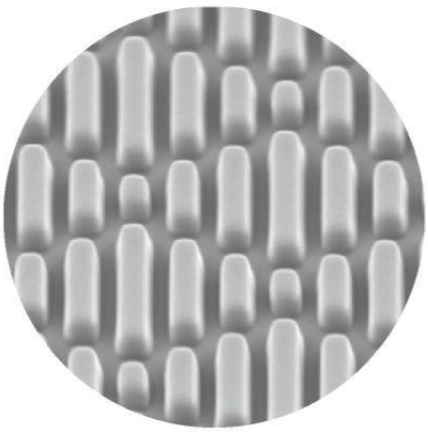
材料学

模拟鲨鱼皮肤的抗菌材料

撰文 戚译引



加拉帕戈斯鲨鱼肤齿的显微镜照片。（放大倍数约 100 倍）



Sharklet 微结构的显微照片。（放大倍数约 1200 倍）

我们通常用抗生素、消毒剂对付微生物，但是，通过物理手段也能实现抑菌功能，这就是美国佛罗里达大学教授、材料科学家安东尼·布伦南（Anthony Brennan）在做的事情。

作为一名材料学家，布伦南专注研究生物黏附（bioadhesion），即有机体如何附着在物体表面上。1978年，他大学毕业后的第一份工作，就是为牙科医生研发将正畸托槽粘在牙齿上的材料。

他发现，这些材料表面容易滋生细菌，形成斑块。“从那时起，我就开始研究微生物在你能想到的每一种材料表面上的黏附情况，这件事我做了一辈子，”布伦南说。

有一次，美国海军资助布伦南开展一个研究项目，探索如何保持船体的清洁。在研究过程中，他注意到许多海洋动物体表也长着海藻或藤壶，而鲨鱼却是干干净净的。这个现象引起了他的注意，因此他深入研究了鲨鱼的皮肤。布伦南发现，鲨鱼表面排布着密密麻麻的肤齿，就像细小的鱼鳞一样。

经过进一步研究，布伦南认为，鲨鱼皮肤的表面结构对浮游生物和微生物的生长有着重要的影响。这些肉眼看不见的、高低起伏的结构降低了材料的表面能（surface energy）。“表面自由能是恒温恒压时材料表面相对于材料内部所多出的能量（因为材料内部的分子和表面的分子受到的力不同）。固体表面自由能越高，越容易被润湿。”他说。表面能的变化又将改变材料表面水分和营养物质的分布，进而对微生物的生长造成影响。也就是说，如果能够模拟鲨鱼皮肤的结构，那么其他物体或许也能像鲨鱼一样，抑制微生物在自身表面的增殖。

于是，布伦南与微生物学家密切合作，他们改变纹理的尺寸和排列方式，探索不同的表面微结构如何影响微生物的生长。他们筛选出一种带菱形图案的横纹，宽度约2微米，大约只有真实的鲨鱼肤齿的二十分之一。在实验室培养中，这种纹理体现出较好的抗菌效果。

细菌往往借助被污染的液体传播，而这样的表面纹路能让脏水更不容易附着。并且由于材料表面微米级的纹路与细菌的尺寸相近，留下来的细菌也不容易大量生长繁殖。布伦南说：“通过抑制细菌的附着、生长和传播，我们抑制了生物膜的形成。”

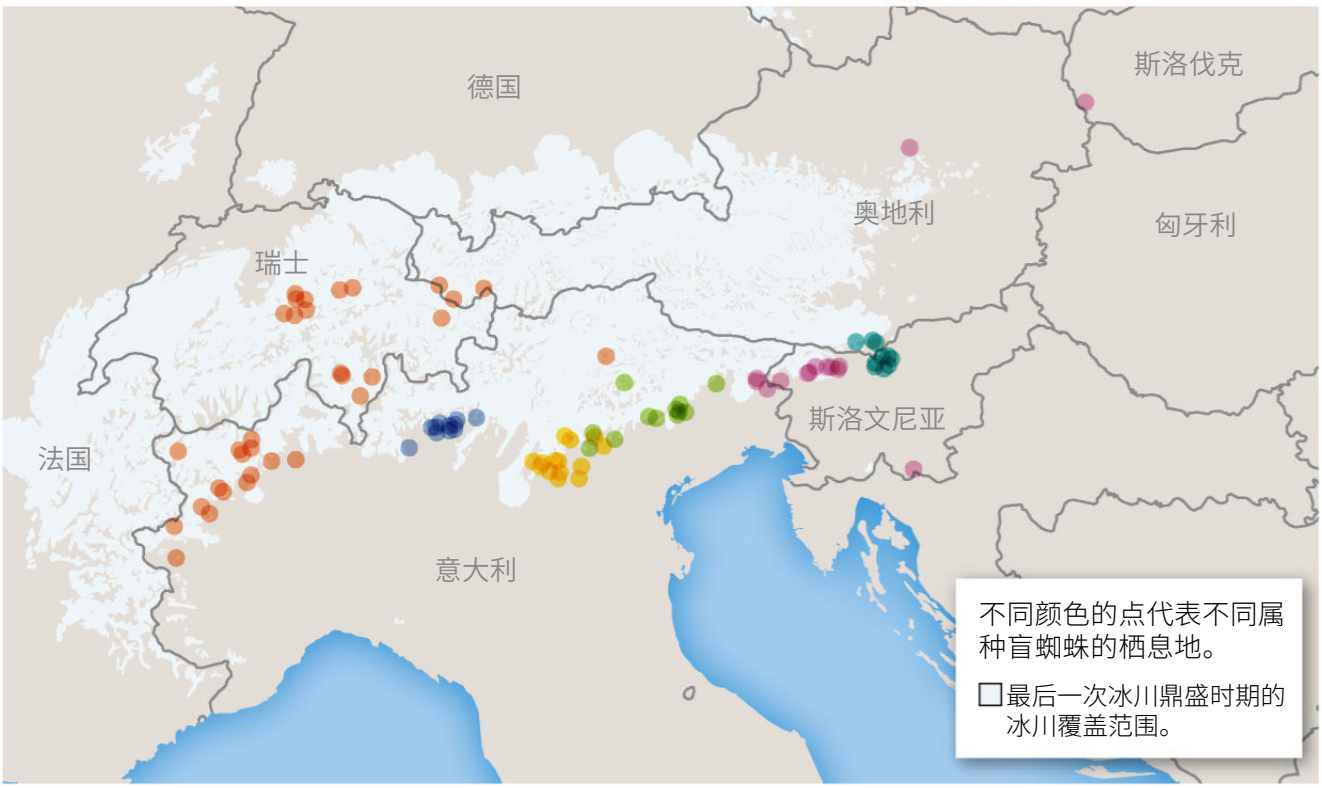
布伦南认为这样的纯物理抑菌方法具有重要的意义。他将这种纹理命名为“Sharklet”，并创立了鲨纹科技公司（Sharklet Technologies），开始探索如何将这种结构进一步应用到医疗器械上。

布伦南说：“我们的技术不使用化学药品，也不会直接杀死细菌，而是制造一个物理环境，让它们无法附着在材料表面。这样的话，细菌很难发展出一种替代机制来克服这个问题。”相比之下，抗生素虽然能够有效杀死大部分细菌，但同时也会优胜劣汰地选择更“强壮”（耐药）的细菌，使得抗生素不再有效。

如今十多年过去，随着生产工艺的改进，在合成皮革、塑料和硅胶表面加工出这样的细微纹路变得更加容易。在这样的背景下，鲨纹公司最近决定进军中国，希望让这一技术应用到生活的更多方面，例如母婴用品、健身用品等。布伦南说：“中国拥有规模庞大而具有竞争力的工业，我们相信这里能够用非常高效的方式生产出优质的鲨纹产品。”

这样的微结构未来或许还能开发出更多用途。布伦南介绍，可以通过调节材料的表面能来调控生物的生长和附着。他们正在使用一种尺寸较大的微结构开发伤口敷料，通过引导细胞移动和生长来促进伤口的愈合。

跨学科研究总是能带来意想不到的发现。布伦南说：“在发明技术的时候记得看看自己领域之外的东西，这点非常重要。”他指出，要借助不同的方式对事物进行全面观察，才能发明更好的技术，用环境友好的方式改善人们的生活。



古地理学

长腿蜘蛛勾勒冰河时代边界

撰文 约书亚·拉普·莱昂（Joshua Rapp Learn）　翻译 赵欢

在距今约22 000年前，最后一次重要的冰河时代发展到了顶峰时期。此后，全球的冰川就一直在退缩。最新研究表明，通过穴居蛛形纲动物盲蜘蛛（harvestmen）的现代居住地，或许可以寻找到欧洲地区冰川在南部的边界，虽然这条界限早已消失。

“现在，我们可通过研究盲蜘蛛的分布情况，模拟和重建最后一次冰川鼎盛时期的面貌，这很有趣”斯特凡诺·玛莫拉（Stefano Mammola）表示，他是意大利国家研究委员会（National research council of Italy）水研究所的生态学家，同时也是这项研究的主要负责人。相关研究发表于2019年8月的《动物系统学与进化研究》（*Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*）杂志。

盲蜘蛛，有时又被称为长腿蜘蛛（daddy longlegs），经常被人们误认为是蜘蛛。有一些盲蜘蛛拥有很大的钳子，生活在比利牛斯山（Pyrenees）、阿尔卑斯山和巴尔干半岛的寒冷潮湿的洞穴中。而这些洞穴刚好形成了一条横跨欧洲的狭窄地带。

玛莫拉与合作者仔细整理了这个条带的数据，并与最后一个冰河时代冰川覆盖的模型进行了对比（这个模型由地质学家提出）。他们发现，除了一些细微变化，这个条带几乎与冰川最南部的边界完全匹配。

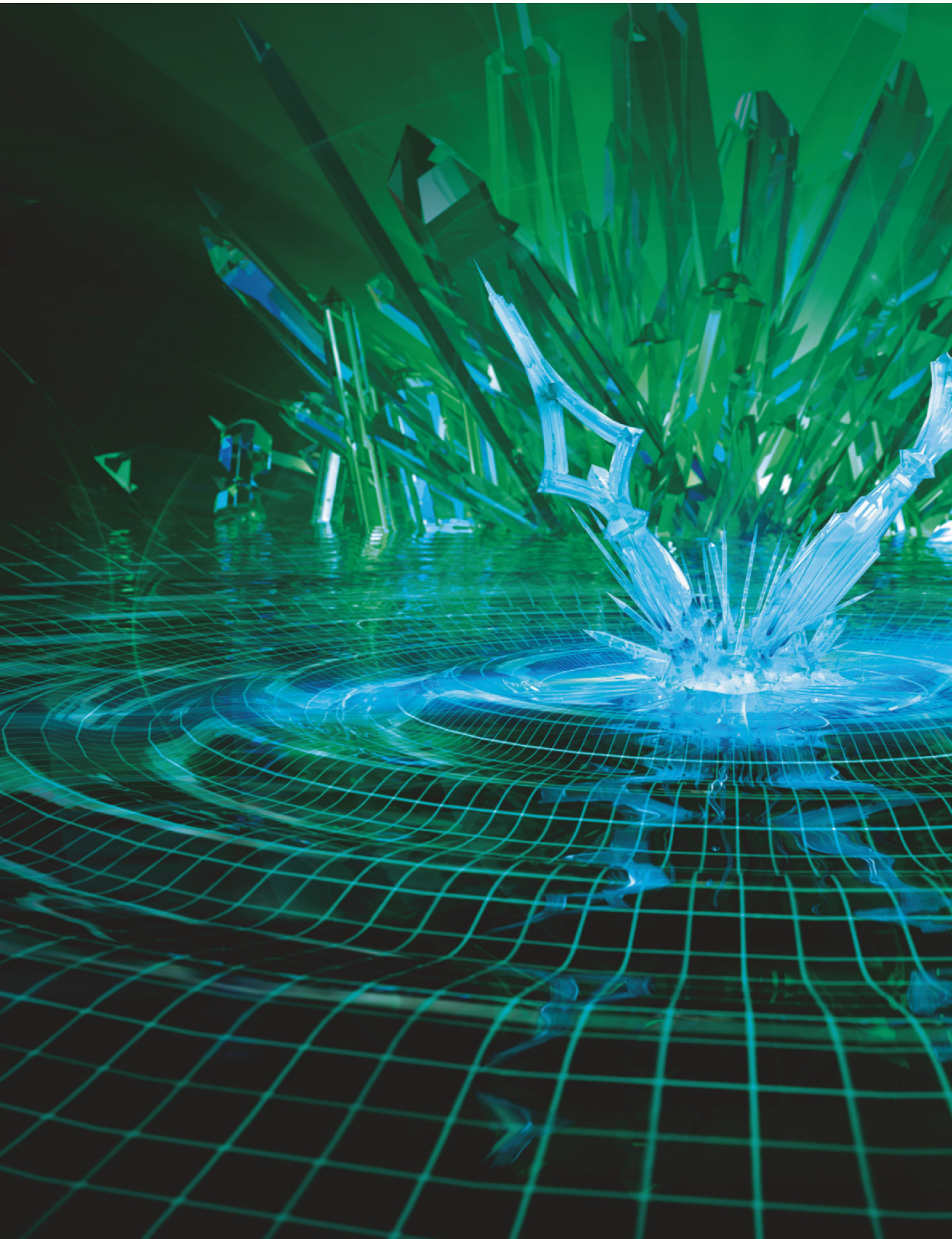
玛莫拉说，盲蜘蛛的洞穴如果被冰层覆盖，它们就无法继续存活，但盲蜘蛛也可能无法适应冰川边缘以外变暖的环境。那时，盲蜘蛛的洞穴温度已经在变暖，但玛莫拉说，变暖的过程很缓慢，足以让盲蜘蛛能够适应新环境。他还指出，“凉爽的环境与没有完全被冰层覆盖的洞穴之间，存在着某种平衡。而现在，大家只能看到一个范围较大的古盲蜘蛛分布的缩影图。”

马里兰大学巴尔的摩分校的生物学家梅赛德斯·伯恩斯（Mercedes Burns，致力于研究盲蜘蛛，但并未参与这项研究）认为，盲蜘蛛的活动范围与古时的冰川范围轮廓相符，有一定的道理。

伯恩斯还提到：“利用盲蜘蛛追踪地理变化的思路很不错。因为盲蜘蛛终其一生或者某一代，都不会出现远距离迁徙的现象，完全可以作为该地区地理变化的标志。”研究人员已表明，某些植物也展示了类似的古地理特征。

玛莫拉表示，绘制盲蜘蛛等穴居节肢动物物种分布图，可以作为研究人员调查古气候的额外证据。

信息来源：“TRACKING THE ICE: SUBTERRANEAN HARVESTMEN DISTRIBUTION MATCHES ANCIENT GLACIER MARGINS,” BY STEFANO MAMMOLA ET AL., IN JOURNAL OF ZOOLOGICAL SYSTEMATICS AND EVOLUTIONARY RESEARCH, VOL. 57; JANUARY 17, 2019





Crystals in Time

时间晶体：神奇新物态

时间晶体是一种令人惊喜的新物态，
它在时间上展现了普通晶体在空间上具有的对称性。

撰文 弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek） 翻译 吴飙

弗兰克·维尔切克是麻省理工学院物理学教授、量子色动力学的奠基人之一。因在夸克粒子理论方向取得的成就，他获得了 2004 年的诺贝尔物理学奖。他的研究方向包括粒子物理学、暗物质理论与时间晶体等。



晶体是自然界最有序的物质。在它们的内部，原子和分子按照重复的结构规则排列，如此形成的固体不但稳定、有刚性，而且看起来非常漂亮。

在现代科学到来之前，人们已经发现晶体非常炫目和迷人，因此经常把它们当作珠宝珍藏。十九世纪的科学家对晶体形式进行了分类，并理解了它们对光的作用，这些努力促进了数学和物理的发展。后来在二十世纪，科学家对电子在晶体中基本量子行为的研究，直接催生了现代半导体电子学，最后给我们带来了智能手机和互联网。

我们对晶体的理解正在更上一层楼，这要归功于爱因斯坦的相对论：空间和时间是紧密相连的，它们在本质上属于同一个框架。所以，一个很自然的问题就是物体在时间上可不可以具有普通晶体在空间拥有的性质。为了回答这个问题，我们发现了“时间晶体”。这个新概念和日益增多的相关新材料，不但导致了令人激动的物理认识，而且带来了新的应用希望，比如实现比现在所有时钟更精确的计时技术。

对称

在完整介绍这个新想法之前，我必须先阐明晶体到底是什么。这个问题的答案充满了科学的内涵，涉及两个深刻的概念：对称和对称性自发破缺。

在日常生活中，“对称”的意义非常宽泛，有平衡、和谐，甚至公正的意思。在物理和数学里，它的意义更加准确。如果对一个物体做一些变换（比如旋转），它的状态却没有发生改变，那么我们说这个物体是对称的或具有某种对称性。

这个定义乍听起来可能有些玄妙和抽象，让我们专心看一个简单的例子：一个圆。当我们绕着圆心旋转这个圆，无论转多大的角度，尽管圆上的每个点可能都移动了，但这个圆看上去却没有任何变化——它有完美的对称性。一个正方形也有对称性，但不如圆，因为你必须旋转 90°的整数倍，正方形才能恢复原貌。这些例子说明，对称的数学定义抓住了对称的实质，并且让它的意义更精确。

这样定义对称还有一个好处，它可以被推广。我们可以改进这个想法让它不只适用于形状，而是广泛地适用于物理规律。对于一条物理定律，如果我们改变它的应用环境而定律不变，我们就说这条物理定律具有对称性。比如，狭义相对论的基本原则是：当我们在不同的相对匀速运动的参考系里看世界时，物理定律是一样的。所以，相对论要求物理定律具有某种对称性——即，在改变参照系的情况下，物理定律不会发生改变。

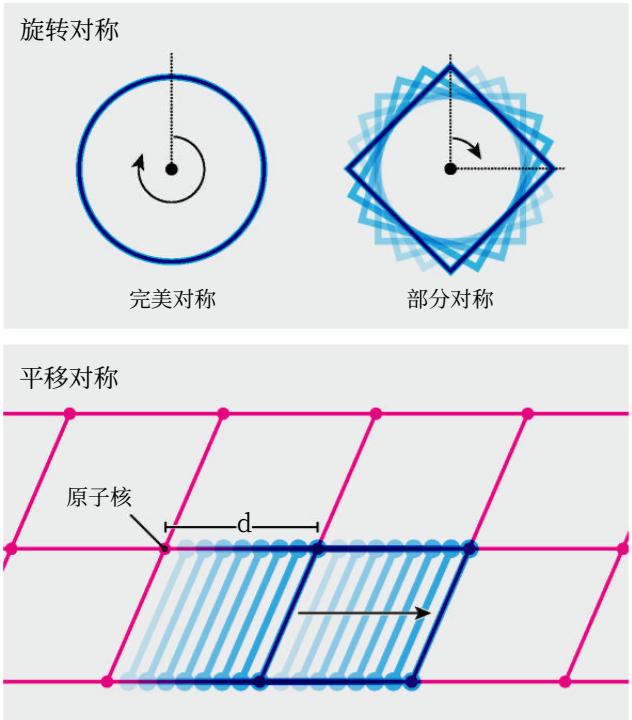
对于晶体（包括时间晶体）来说，重要的是另一类变换，这些变换很简单，但有很重要的意义——这就是“平移”（translation）。相对论提出，对于移动速度不同的参考系，

精彩速览

晶体是有序的物质态，由原子按照不断重复的结构排列而成。在物理学家看来，这些晶体具有“空间对称性的自发破缺”。

时间晶体是一个更加新颖的概念，这种物态的结构会每隔一定的时间不断重复，其时间对称性发生了自发破缺。

时间晶体的概念是 2012 年首次提出的，物理学家在 2017 年首次发现了这类新材料。这些材料可能会把时钟精度提高到前所未有的水平。



物理定律是相同的；类似地，在空间平移对称中，对于不同地点的观察者，物理定律是相同的。如果你将实验室从一个地点移到另一个地点，即“平移”，你会发现在新的地方物理定律是一样的。换句话说，空间平移对称是指，我们在任何地点发现的物理定律适用于所有地点。

时间平移对称表达的是一个类似的想法，不过它是针对时间而不是空间：现在运行的物理定律同样适用于过去或将来的观测者。也就是说，我们在任何时间发现的物理定律适用于所有时间。由于它基础性和重要性，时间平移对称应该有一个更简单的名字。在这里我把它叫做 tau，用希腊字母 τ 表示。

如果没有空间和时间平移对称，不同地方不同时间做的实验将无法重复。科学家在日常工作中把这些对称看作是理所当然的。确实，如果没有这些对称性，那么我们所知道的科学是不可能存在的。但重要的是，我们可以在实验中测试空间和时间的平移对称。我们以遥远的天体来具体说明。这些天体显然处于不同的地方，同时由于光速有限，我们现在观测到的其实是天体在过去的运动。通过非常详细、准确的观测，天文学家已经确认，遥远天体所遵循的物理定律和此时此地在地球上的物理规律完全相同。

对称性破缺

晶体因对称而美，但对于物理学家来说，晶体最显著的特征却是它们缺失了对称。

考虑一个特别简单的晶体。它是一维的，它的原子核规则地排列在一条直线上，相邻间距是 d（因此，每个原子核的坐标是 nd，其中 n 是整数）。如果我们将这个晶体往右平移一丁点儿，那么它和移动前是不一样的。只有平移了特定的距离 d，我们才会得到相同的晶体。所以，我们的理想化晶体只具有部分平移对称性，这与前面介绍的正方形只具有部分旋转对称性是一样的道理。

物理学家认为，在晶体中，物理基本定律的平移对称性“破缺”了，只剩下部分平移对称性。这些遗留的对称性却描述了晶体的本质特征。事实上，一旦我们知道晶体的对称是平移距离 d 的整数倍，我们就知道晶体中原子的相对位置。

二维和三维的晶体会更复杂，它们的种类非常多，可以同时具有部分旋转和平移对称性。十四世纪的艺术家在装饰西班牙格拉纳达的阿尔罕布拉宫时，利用想象和经验发现了很多可能的二维晶体。而十九世纪的数学家则对三维晶体进行了分类。

2011 年的夏天，我开了一门课，主要讲授物理中的对称。我在准备晶体分类那章时觉得相关的数学非常优雅。在备课过程中，我总是尝试从一个新的角度来审视我的课程，尽可能增加一些新的内容。我突然意识到，三维空间晶体的分类可以推广到四维时空晶体。

我把相关的数学研究告诉了阿尔弗雷德·萨皮尔（Alfred Shapere），他曾是我的学生，现在是我亲密的合作者。他目前在肯塔基大学工作。他希望我先回答两个基本的物理问题：

时空晶体能描述什么实际的物理体系？

这些晶体会引导我们发现不同的物质状态吗？

这两个问题带我走上一个充满惊喜的科学历程。

第一个问题的答案相当直接。既然普通晶体是物体在空间的有序排列，那么时空晶体应该是事件在时空中的有序排列。

我们效仿上面对普通晶体的讨论，先考虑一维时空晶体来找找感觉。这个特殊情况下，时空晶体就成了纯粹的时间晶体。我们这时需要寻找的系统应该这样：它的状态每隔一段时间就会重复。令人尴尬的是，这样的系统早已为人熟知。比如，地球在空间中的姿态每隔一天就重复一遍，地球与太阳的相对位置每隔一年也重复一次。

发明家和科学家在过去几十年里发展了很多时钟系统，这些时钟每重复一次的时间间隔的精度越来越高。单

摆和弹簧钟已经被基于（传统）晶体振动的晶钟超越，后者又被基于原子振动的原子钟超越了。原子钟已经取得了令人惊叹的精度，但我们有很多理由去继续提高精度——我们后面将会看到，在这个问题上，时间晶体极有可能会帮上忙。

一些大家熟知的真实体系则是高维时空晶体。比如右页图中的平面声波，其曲面的高度表示随空间和时间变化的密度。更复杂的时空晶体可能很难在自然界找到，但它们可能成为艺术家和工程师追求的目标——想象一下，一个会动的增强版阿尔罕布拉宫也是一个时空晶体。

对于这类时空晶体，我们只是新瓶装旧酒，换了一个不同的标签。而回答萨皮尔的第二个问题则会将我们带入一个真正创新的物理领域。为此，我们现在必须介绍一个概念：对称性自发破缺。

对称性自发破缺

当液体或气体冷却成晶体时，一件非常基本且神奇的事发生了：晶体——这个物理定律的解——具有的对称性少于物理定律本身的对称性。由于这个对称性的减少只是通过降温而获得的，在这个过程中并没有其他外界因素的干预，于是我们认为在晶体形成过程中，物质“自发”破坏了空间平移对称性。

晶体形成的一个重要特征是物质系统的行为有一个急剧的变化，或者按专业说法，一个急剧的相变。在临界温度上（这个温度的高低取决于系统的化学成分和环境压强），系统是液体；临界温度下，系统则变成了晶体——晶体的各种性质都和液体非常不同。这个相变可以预测，并伴有能量的释放（一般是以热的形式）。环境条件的微小变化会让物质重组，成为非常不同的材料，比如水变冰。人们虽然很熟悉这个现象但依然会觉得神奇。

晶体的刚性是另一个不同于液体和气体的性质。从微观上看，晶体之所以有刚性是因为晶体中的原子在很大范围内的有序排列，任何试图破坏这种有序性的行为都会遭到晶体的抵抗。

我们刚刚讨论了晶体形成的三个特征——减少的对称性、急剧的相变和刚性——它们是紧密相关的。这三个特征都源于一个基本原则，原子“希望”按照一个能量尽可能小的方式排列。在不同的外部条件（比如不同的压强和温度）下，原子会按不同的方式排列——这些就是不同的“相”。当外界条件改变时，我们经常会看到急剧的相变。有序排列的形成要求原子们集体行动，整个材料中的原子都会被要求按照同样的方式排列。这种排列即使受到小的扰动，也会自动恢复。

由于对称性自发破缺能将不同的想法连接起来解释很多物理现象，我感到探索 τ 被自发破缺的可能性是非常重要的。当我把这个想法具体写下来时，我向我的妻子贝茜 · 迪瓦恩（Betsy Devine）解释了这个想法：

“它看起来是一个晶体，但它是关于时间的晶体。”受到我激情的感染，她好奇地问道：“你准备叫它什么？”我回答道：“时间平移对称性的自发破缺。”她立即反对说：“不会吧。应该叫它时间晶体。”我选择了她的叫法。2012 年，我发表了两篇论文，介绍了这个想法，其中一篇是与萨皮尔合作的。时间晶体是这样的系统，它的 τ 自发破缺了。

有人可能会问，既然 τ 和自发破缺都早已为人熟知，为什么在更早的时候科学家没有想到把二者结合起来？这是因为 τ 和其他对称有一个重大的区别，使得它的自发破缺变得更加微妙。这个区别来自数学家埃米·诺特（Emmy Noether）在 1915 年证明的一个深刻的物理定理。诺特的定理建立了对称和守恒量之间的联系——每一种对称对应一种守恒量。

应用到这里我们可以发现，诺特定理表明 τ 其实等价于能量守恒。反过来说，当一个系统的 τ 破缺时，能量就不再守恒，能量这个概念不再能有效地刻画这个系统。（更精确地讲，没有 τ，你不再能够将系统不同部分的贡献加起来得到一个类似能量的物理量，更不能保证这个物理量不随时间变化。）

物理学家通常这样解释，对称自发破缺之所以能发生，是因为它能降低能量。如果能量最低的状态打破了空间对称而系统的能量又同时保持守恒，那么一旦进入对称破缺的状态，系统就会持续保持这个状态。这就是普通晶体能够存在的物理原因。

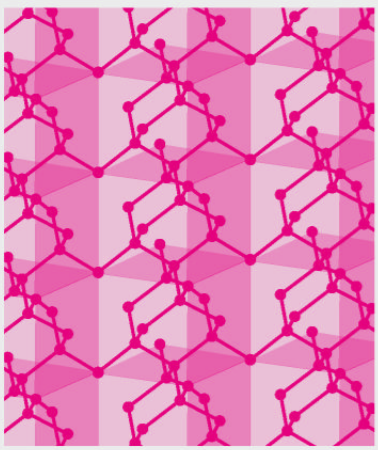
但是，这种基于能量的解释不适用于 τ 的破缺，因为 τ 一旦破缺，能量就不再守恒，能量不再能度量这个系统。由于这个困难，大多数物理学家从来没有考虑过 τ 自发破缺的可能性，当然也就没考虑过时间晶体这种奇怪的东西。

但是，对称性自发破缺还有一种更广泛的理解方式，适用于 τ 的破缺。除了自发重组成一个能量更低的状态，材料可以重组进入一个更稳定的状态。比如，许多粒子可以在一个大的空间或时间范围形成一个有序排列，如果破坏有序的力是小尺度和局域的，那么这个有序排列就很难被打破。这样，如果相比以前的状态，材料新的有序排列发生在一个更大的尺度上，那么它就有可能获得更高的稳

复杂晶型实例

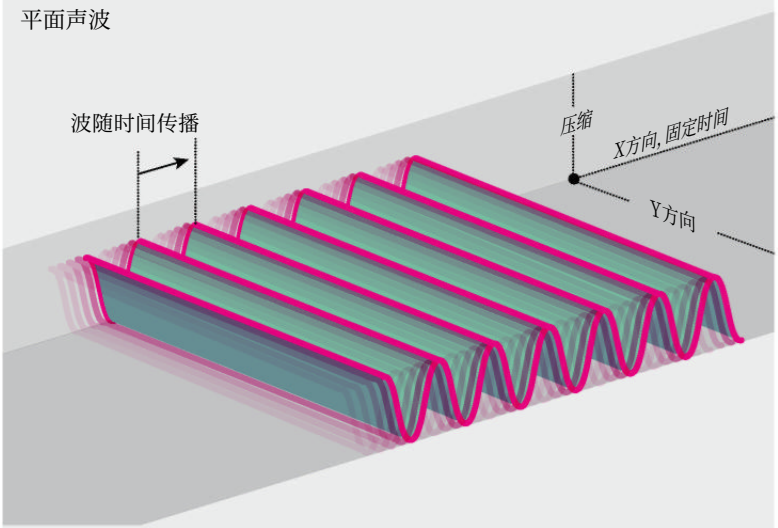


二维（来自《阿尔汉布拉宫》）

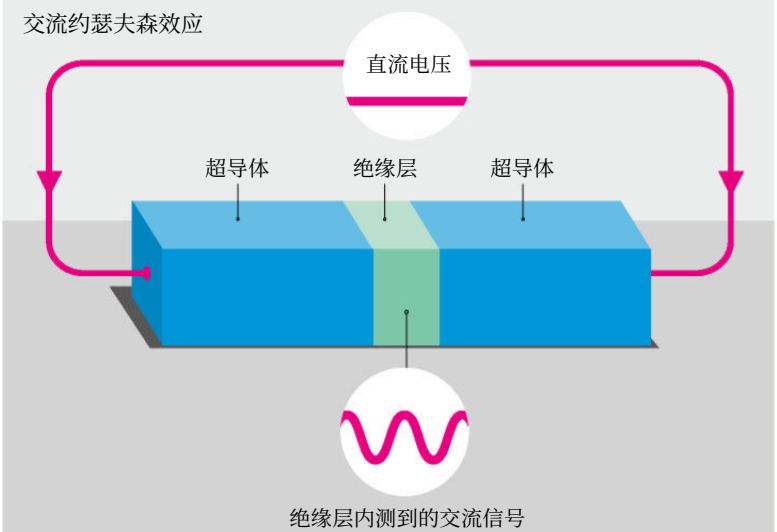


三维（金刚石晶体结构）

平面声波



交流约瑟夫森效应



定性。

当然，最终没有哪种物质的状态可以面对所有的扰动都保持稳定。比如，钻石就是这样。“钻石恒久远”这句传奇的广告词已经妇孺皆知。但如果温度足够高，钻石在合适的空气中会烧成灰尘，不再光彩夺目。钻石在普通温度和气压下不是碳最稳定的状态，它们是在非常高的压强下产生的。钻石一旦形成，它们可以在普通压强下存在很长时间。按照物理学家的计算，如果等待足够长的时间，你的钻石也会变成石墨。甚至还有一个非常小但不是零的可能性，那就是量子涨落会让钻石变成黑洞。钻石还可能由于质子的衰变而转化为别的物质。在实践中，当我们说一个物质状态（比如钻石）时，我们说的是它形成了一种组织，对于很多外界扰动，这个组织具有稳定性。

新旧时间晶体

交流约瑟夫森效应是物理中的一块宝石，它为一大类时间晶体提供了原型。以1973年诺贝尔物理学奖得主、英国物理学家布赖恩·戴维·约瑟夫森（Brian David Josephson）命名的“约瑟夫森结”是夹在两个超导体中间的绝缘层。当在结的两端加上一个常电压后，我们就能观察到约瑟夫森效应——这时会观测到一个频率为 $2eV/\hbar$ 的交变电流流过，在这里 e 是电子电荷，$\hbar$ 是约化普朗克常数。尽管整个物理设置不随时间改变（也就是说，它遵守 τ），但系统最后的行为却随时间变化。完整的时间平移对称变成周期为 $\hbar/2eV$ 的整数倍的对称。所以，交变约瑟夫森效应体现了时间晶体的最基本特征。但是，从某些角度来说，它不是完全符合期望。为了维持电流，我们必须让电路闭合并连上一节电池。交变电流会释放热，而电池会衰竭。另外，变化的电流还会辐射电磁波。由于这些原因，约瑟夫森结的稳定性还不够理想。

通过各种改进（比如改用完全超导的线路，用高品质电容代替通常的电池，用闭合

的笼罩防止辐射外泄），我们可以大幅降低这些效应。另外，通过用超流体或磁铁取代超导体，我们可以观察到类似的效应，同时将各种耗散降到最低。

对 τ 破缺的大胆思考让这些问题受到了很多关注，物理学家因此发现了新的物理系统并做了许多富有成果的实验。但是，由于核心思想已经隐含在了约瑟夫森 1962 年的工作里，我们不妨称这些物理系统为“旧”时间晶体。

2017 年 3 月 9 日，《自然》杂志宣布了“新”时间晶体的到来。这期杂志的封面是漂亮的、象征性的时间晶体，上面还有一句宣言：“时间晶体：神奇新物态的首次观测。”杂志里面是两篇独立的开拓性论文。这两篇论文显示，在一个实验里，美国马里兰大学的克里斯托弗 · 门罗（Christopher Monroe）领导的小组用精心设计的镱离子链形成了时间晶体。在另一个实验里，哈佛大学米哈伊尔 · 卢金（Mikhail Lukin）的小组利用钻石里的几千个氮空位缺陷实现了时间晶体。

在这两个实验中，原子（镱离子或钻石缺陷）的自旋方向会规则变化，每隔一定周期，原子们会回到初始的形态。在门罗的实验里，研究人员用激光翻转离子的自旋，并将这些自旋关联起来形成“纠缠”态。最后，离子的自旋开始以两倍于激光脉冲速率的频率振荡。在卢金的实验里，科学家用微波脉冲翻转钻石缺陷的自旋，发现在微波脉冲之间系统会重复变化好几次。在这两个实验中，系统都需要外界的激发——激光或微波脉冲——但系统最终的振荡周期却和激发频率不同。换句话说，它们都自发地破坏了时间对称。

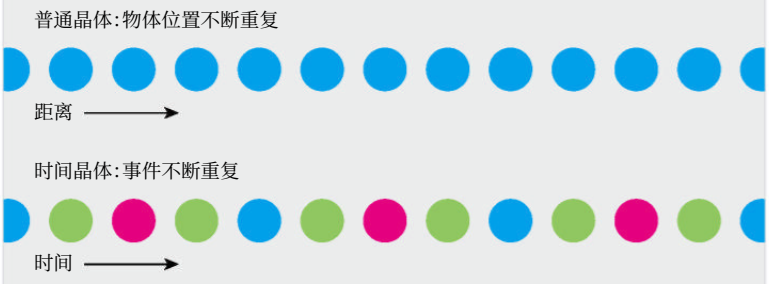
这两个实验在材料物理领域开拓了一个新方向。基于相同的一般原则，人们发现了更多类似的材料体系。它们现在被称为弗洛克（Floquet）时间晶体。

弗洛克时间晶体和一些早期发现的现象有些类似，但有本质的不同。1831 年，迈克尔 · 法拉第（Michael Faraday）发现，当他以周期 T 垂直晃动一水槽的汞时，汞的流动周期通常是 2T。但是，在对称破缺的法拉第系统——以及很多 2017 年以前研究过的其他体系中，材料和驱动力（这里指晃动）没有清晰的分离，它们没有展示对称性自发破缺的核心特征。驱动一直在不停地向系统注入能量（或更准确地说是熵），它们最后以热辐射的形式散去。

实际效果是，由材料加驱动组成的整个系统的对称性要少于驱动或材料各自的对称性。2017 年的两个实验所用的物理系统显著不同：这两个系统在经过短暂的迟滞后会进入一个稳态，材料不再和驱动力交换能量或熵。这个区别很微妙，但在物理上非常关键。这些新的弗洛克时间晶体代表了一种新的物质状态，展示了对称性自发破缺的

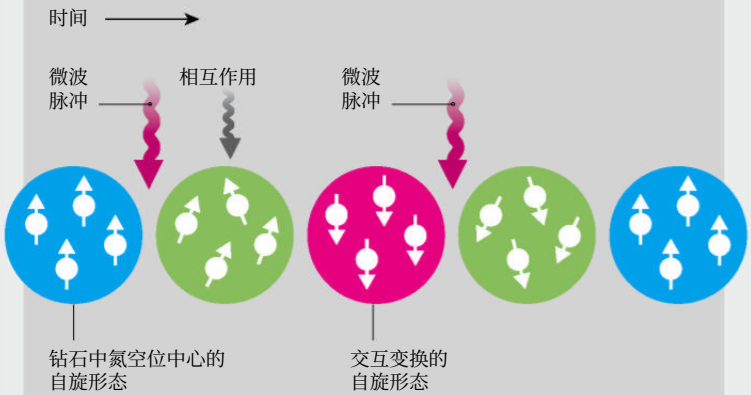
时间晶体的制备

普通晶体里的原子会每隔一定距离就重复它们的排列；类似地，时间晶体是一种物质状态，它每隔一个特定的周期就重复一次。这类新材料最早是在 2017 年由两个研究小组发现的：一个研究组由哈佛大学的米哈伊尔 · 卢金领导，另一个研究组由马里兰大学的克里斯托弗 · 门罗领导。



卢金实验

钻石晶体中存在一种被称为氮空位中心的缺陷。通过操控这些缺陷的原子自旋，卢金的小组制备了时间晶体。研究人员用微波脉冲周期性地照射钻石。在两次微波脉冲照射之间，自旋继续相互作用。 整个系统每隔一段时间就重复一遍自己的状态——但这个重复周期并不是微波脉冲的周期，而是系统自己的时间周期，这个系统以微波脉冲周期的整数倍不断循环。



核心特征。

在这个意义上，地球的自转和绕太阳的公转也不是时间晶体。它们令人深刻的稳定性是由能量和角动量的大致守恒来保证的。它们的能量和角动量都不是最小的，因此前面关于稳定性的能量分析在这里不适用。因为这两个量都特别大，所以要显著改变它们，你需要特别大的扰动或者长时间积累的小扰动。潮汐、其他行星的引力，甚至太阳自己的转动都会影响这些天文体系。因此，与此相关的时间，比如“日”和“年”的测量，都非常麻烦，需要不断修正。

与之形成鲜明对比的是这些新的时间晶体，它们的重复行为有很强的刚性和稳定性。这个特征给出了一种精确分割时间的方式，这是制造先进时钟的关键。现代原子钟有令人惊叹的精度，但是它们没有时间晶体拥有的长时间稳定性。基于这些时间晶体，我们可能制造更精确、更简洁的时钟，从而能以极高精度测量距离和时间，而这样的时钟可以用来改进 GPS，也可以根据地下洞穴和矿产对重力或引力波的影响来探测这些洞穴和矿产。由于这些可能的应用，美国国防高级研究计划局（DARPA）正在资助时间晶体的研究。

宇宙学和黑洞中的τ

围绕时间晶体和自发 τ 破缺的想法和实验还处于“婴儿期”。在这方面还有很多没有回答的问题。一个正在努力的方向是通过设计和发现新的时间晶体材料，从而扩展时间晶体家族，让它们包括更大更方便的系统，展示更多变的时空排列。物理学家对研究这些状态的相变也非常感兴趣。

另一个方向是细致研究时间晶体的物理性质。前面提到过的半导体晶体提供了令人鼓舞的榜样。我们可以研究电子和光在时间晶体中会受到怎样的影响，以及什么新发现会从中涌现。

我们已经在思考和时间相关的物质状态的各种可能性。我们不但可以考虑时间晶体，还可以考虑时间准晶体（规则但是没有重复排列的材料）、时间液体（时间轴上的事件密度是常数但不是周期的）和时间玻璃（具有刚性的结构但是和规则排列有偏离）。研究人员正在探索这些材料以及其他可能的相关材料。事实上，某些形式的时间准晶体和时间液体已经找到了。

迄今，我们已经考虑了各种基于 τ 的物质相。我最后简短评论一下宇宙学和黑洞中的 τ。

稳恒态宇宙模型试图从原则上在宇宙学中维持 τ。在这个二十世纪中期非常流行的模型中，天文学家假设宇宙的状态或形貌在大尺度上是不依赖于时间的——也就是说，它是时间对称的。宇宙一直在扩张，稳恒态宇宙模型则假设物质不断产生，从而保持宇宙的平均密度不变。但是稳恒态宇宙模型没能经受住时间的考验。天文学家已经掌握的证据表明，137 亿年以前宇宙大爆炸时刻的宇宙和现在的宇宙非常不同，尽管物理规律是一样的。在这个意义上，τ 对称在宇宙中自发破缺了。有些宇宙学家还认为，我们的宇宙是循环的或者宇宙曾经历过一段快速振荡期。这些猜想很接近时间晶体的相关思想。

最后谈一下广义相对论。它是至今关于时空结构的最好理论。广义相对论建立了这样的概念：我们能够确定空间内任意邻近两点间的距离。可惜，这个简单的想法至少在两种极端条件下不成立：当我们将宇宙大爆炸外推到它的初始时刻或者在黑洞中心的时候。在其他物理领域，如果一个方程不再能描述某个物体的行为时，它通常意味着系统将经历一个相变。难道是时空在高压、高温或极速变化下自己放弃了 τ 对称？

最终，时间晶体这个概念可能会同时在理论和实践上，从另一个角度推动物理学家对宇宙学和黑洞的理解。在可见的将来，我们非常可能会发现新型时间晶体，它们会让我们造出更完美的时钟，展示更多有用的性质。简而言之，时间晶体非常有趣，为我们打开了更多的窗户，扩展了我们对物质组织结构的理解。

本文译者　吴飙是北京大学物理学院量子材料科学中心教授，他的研究方向是凝聚态理论物理。

扩展阅读

Classical Time Crystals. Alfred Shapere and Frank Wilczek in Physical Review Letters, Vol. 109, No. 16, Article No. 160402; October 2012.
Quantum Time Crystals. Frank Wilczek in Physical Review Letters, Vol. 109, No. 16, Article No. 160401; October 2012.
Observation of a Discrete Time Crystal. Jiehang Zhang et al. in Nature, Vol. 543, pages 217–220; March 9, 2017.
Observation of Discrete Time-Crystalline Order in a Disordered Dipolar Many-Body System. Soonwon Choi et al. in Nature, Vol. 543, pages 221–225; March 9, 2017.
Time Crystals: A Review. Krzysztof Sacha and Jakub Zakrzewski in Reports on Progress in Physics, Vol. 81, No. 1, Article No. 016401; January 2018.
Time Crystals in Periodically Driven Systems. Norman Y. Yao and Chetan Nayak in Physics Today, Vol. 71, No. 9, pages 40–47; September 2018.
Anyons. Frank Wilczek; May 1991.

时间晶体可以做什么

维尔切克认为，超越标准模型的新理论不会带来新的技术革命，但是，通过全新或是更加深入的方式理解现有的理论，依然能带来新的技术，这同样是令人激动的探索。

本刊记者 吴非

尽管年近七旬，但弗兰克·维尔切克依然对世界或者说宇宙充满好奇——在采访这位物理大家的过程中，我们能明显感受到这一点。

正是因为好奇心的驱使，维尔切克在近半个世纪一直身处物理学的最前沿，探索着宇宙的本质：1973 年，维尔切克发现了渐进自由理论，这个描述夸克间强相互作用的理论成为量子色动力学的基石，维尔切克也因此获得 2004 年的诺贝尔物理学奖；后来维尔切克又相继提出了轴子和任意子的概念；2012 年，维尔切克又提出并命名了时间晶体——一种全新的奇特物质状态，这一概念已经得到了多个实验的证实。

在维尔切克看来，这些年来，他探索的方向没有转变，而是在不断延伸。从渐进自由理论，到暗物质候选粒子——轴子，再到对量子多体物理的深刻洞见，维尔切克在物理的世界里不断拓展和创新。时间晶体之后，维尔切克还会给现实世界带来什么？让我们一起听听他的答案。

《环球科学》：你在本期的封面故事中提到，时间晶体可以用于制造更精准的时钟。为什么基于时间晶体的时钟，可以比目前的原子钟更精准？

维尔切克：我并不是要完全重新造一个更精确的时钟。原子钟的精度已经非常高了，通过长时间的实践，人们已经对它进行过很多改进和提高。因此，我们不需要重新制造一种时钟，而是在原子钟的基础上进行改进。简单地说，原子钟是基于对单个原子运动的精细观察和调控。我们想做的，是将几个或者更多的原子制备成一个时间晶体。这样原子振动的稳定性就增强了。

另一种候选方案是，利用约瑟夫森效应来打造非常精确的时钟。目前，这个类型的时钟的稳定性还不足以与原子钟媲美，但我们可以想象将多个约瑟夫森结耦合起来形成一个时间晶体。类似地，相比于单个约瑟夫森结，其稳定性会得到大幅提升。人们正在开展这方面的研究。

《环球科学》：可以谈谈时间晶体时钟的应用场景吗？

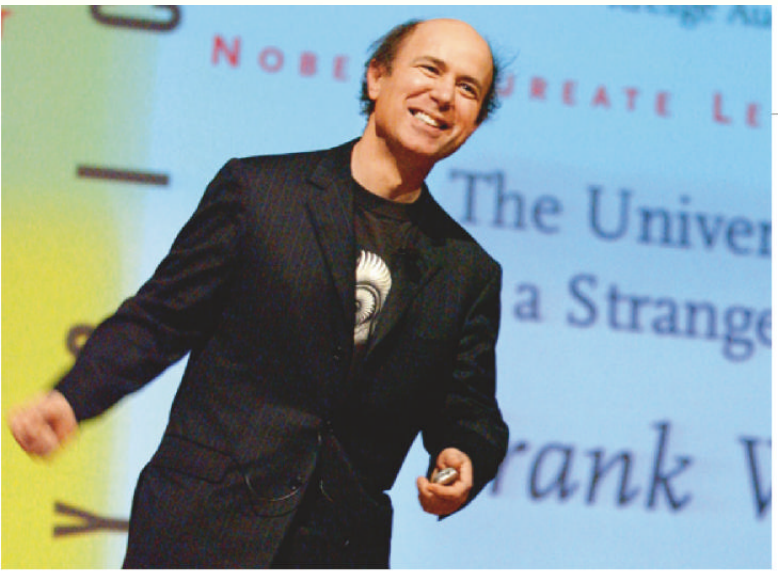
维尔切克：量子计算机需要精确的量子时钟。计算机（包括量子计算机）一般都是按照时序完成一系列操作，其中的许多单元需要在同一时间完成多个步骤。所以在设计计算机时，至关重要的一点是它需要确保不同单元能同步工作。因为量子计算机很脆弱，同步会带来新的问题。由于某种原因，为量子计算机设计合适的高精度时钟被忽视了。时间晶体或许能在这里帮上忙。

当然，基于时间晶体的时钟，还是一个刚刚起步的研究领域。目前，科学家还没有真正造出时间晶体时钟。我们正在从时间晶体角度重新审视基于约瑟夫森结的时钟，希望实现进一步的提升。美国国防部高级研究计划局（DARPA）正在资助时间晶体的研究，希望得到更精确或是更便捷的时钟，继而用在 GPS 或其他场景中。对于时间晶体时钟今后的发展，我充满了期待。

《环球科学》：除此之外，我们可以期待时间晶体在其他领域的应用吗？

维尔切克：一个我颇为感兴趣的问题是，当电子和光子被嵌在时间晶体中，它们的性质是怎样的？现在我们知道，在普通晶体中，电子的行为遵循能带理论，这是理解导体、绝缘体与半导体间区别的基础。这些理论从 20 世纪 30 年代慢慢发展起来，那时刚刚建立的量子力学为此提供了理论基础。从晶体的基础理论，到理解电子在晶体中的行为，再到这些行为的应用，这个过程经历了很长时间，甚至直到今天仍然在进行中。我相信，在研究电子、光子在时间晶体中的行为时，我们可以取得意外的发现。但目前，我们还处在探索的阶段——这是科学，还没有到工程的阶段。

《环球科学》：2004 年时，你因为量子色动力学与渐近自由理论获得诺贝尔物理学奖。现在，你仍然在参与该



因量子色动力学获得诺奖后，维尔切克仍在基础物理的最前沿探索宇宙本质。

理论的进一步发展吗？

维尔切克：我仍在关注的是色超导理论（color superconductivity）。色超导是指强相互作用的高密度物质的超导特性，因此有可能在研究中子星内部时有所帮助。（中子星内部由致密的中子构成。）我从量子色动力学起步，后来又研究了凝聚态物理，而色超导研究将两者结合起来。但除此之外，我有一段时间没有活跃在这个领域中了。我喜欢那些不成熟的课题，而量子色动力学已经有足够多的人去研究，并且研究量子色动力学需要非常专业的计算手段和工具，以及先进的超级计算机，而相关从业者的培养已经是一个非常专业化、细分的产业了。

当然，量子色动力学仍然面临着挑战。对我而言，最大的挑战就是通过该理论去计算中子星的性质。利用量子电动力学和初级的核物理理论，我们对普通的恒星有很好的理解，我希望我们对中子星的理解也能达到相当的水平。通过引力波等探测手段，天文学家对中子星会有更精确的了解，理论计算必须跟上。我现在对量子计算的研究极有可能回过头来推进量子色动力学的研究。

《环球科学》：从量子色动力学到时间晶体，可以说你的研究方向发生了转变吗？

维尔切克：我只是在延伸我的研究，改变研究的侧重点。例如，在我的研究早期，我就从量子色动力学延伸出去，考虑这个理论在宇宙学中的意义。随后，我对应用我们在量子场理论提出的概念产生了兴趣，因为它可以帮助理解物质在低温下的性质。这些不同的事物之间存在着紧密的联系。这也驱使我开始重视技术的发展，重新去思考量子力学最根本的问题，尝试完全揭开这个理论的潜力。

现代物理学很美妙的一点是，所有思想都是相关联的。对我来说，并不是说放弃了此前的研究方向，而是在其基础上，将这些理论用于解决其他问题。

《环球科学》：近些年来，你也参与了暗物质粒子的搜寻。在之前的一篇专栏文章中，你曾提到轴子是接下来值得期待的领域。可以介绍这方面的进展吗？

维尔切克：还没取得大的突破，我们预计轴子提供了暗物质背景，我们还没有观察到轴子。但是，我们已经有了一些阶段性的发现，为进一步突破提供了基础。我们设计了用于探测轴子信号的特殊天线，从设计角度可能非常强大，人们正在建造它们。达到目标灵敏度将是个挑战，但至少目前看来，没有理论概念上的障碍。就我个人而言，一个重要的突破是我和合作者设计了一种等离子体镜。这个装置使得我们可以在很有意义的参数区域探测空间背景中的轴子。

目前，为了寻找轴子，全球有超过 10 个研究机构正在开展合作，开展一些雄心勃勃的实验。这些实验的难度很大，因为轴子与普通物质的相互作用很微弱。但好在，理论已经对轴子的范围做出了限定，因此我们可以设计天线进行搜寻。这是当前非常热门的领域，每年都会举办大型学术会议，数百名研究者共同参与轴子的讨论。

《环球科学》：在最基本的层面上，可以说物理学的进步推动了人类文明的发展，比如相对论、量子理论，都极大改变了现代社会，你认为在未来还会出现这样伟大的基本理论吗？

维尔切克：对于社会生产中遇到的工程、经济等问题，我认为，现有的关于普通物质的基本物理定律是足以解决的。但我们也看到，距离上一次对技术产生重大影响的基本物理原理出现，已经过了很久。最近几十年，是什么驱动了新兴科技的发展？不是发现新的基本定律，而是对这些现有定律的全新处理与应用。我们看到，量子力学的应用领域非常活跃，从打造功能更强大的时钟，到现代生活中的计算机、手机……如果没有对量子力学以及光和物质的深入理解，这些突破都不可能出现。

今后是否会出现这样的基本理论，我认为这取决于对基本的定义。如果“基本”是指超越现有的标准模型预测的新定律，我认为这（即会带来技术革命的新基本理论）不会发生。但我认为，我们可以通过全新或是更加深入的方式理解现有的理论，并加以创造性的应用，这会带来更多新技术。这其实正在发生，是令人激动的探索。

摄影：贾斯廷·奈特



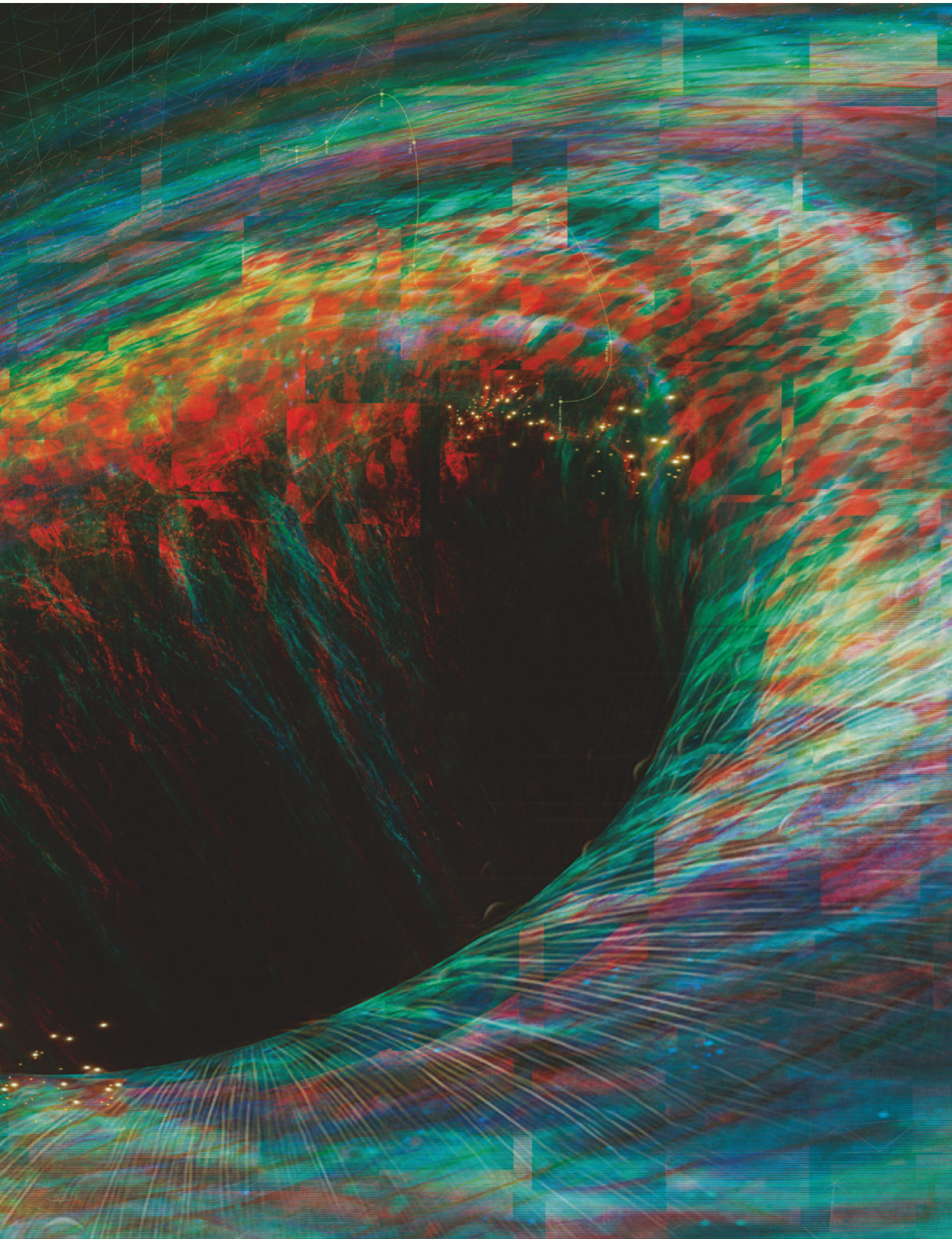
Escape from a Black Hole

黑洞违反量子力学

黑洞似乎违背了量子力学的准则，从而引发了一场物理学危机。为了解决这一矛盾，科学家们提出了一系列的新理论。

撰文 史蒂文·B·吉丁斯（Steven B. Giddings） 翻译 狄逸焕 审校 左文文

绘图：Mondolithic 工作室





史蒂文·B·吉丁斯是美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的量子物理学家，主要研究方向为高能理论、量子引力理论和量子黑洞。

2019年4月10日，人类第一次“看见”了黑洞。事件视界望远镜（Event Horizon Telescope，简称EHT）团队利用了一个遍布全球的射电观测网络，捕获了位于邻近星系M87中心、质量约为65亿倍太阳质量的黑洞图像。这是一个惊人的成就——我们首次看到了那个长期被预言存在但从未有人直接“见”过的神秘天体。更令人兴奋的是，这些图片和随之而来的观测，将为物理学中一个最深刻的谜题提供了新线索。

这个谜题就是黑洞中的信息“悖论”。通过对这个问题的研究，物理学家们发现，仅仅是黑洞存在这件事本身，就和迄今为止描述宇宙中其他一切现象的量子力学定律相矛盾。要解决这个矛盾，可能需要一次像量子力学取代经典物理一样意义深远的概念革命。

理论物理学家提出了很多理论，但几乎没有直接证据可以解决这个难题。不过，已获取的第一张黑洞照片，将为我们的理论提供实际数据。未来EHT的观测（特别是有关黑洞随时间演化的观测），以及近期科学家对黑洞碰撞所产生引力波的探测，或将有助于我们深入理解这个难题，为我们开启一个全新的物理时代。

黑洞信息悖论

尽管非常神秘，但黑洞似乎在宇宙中无处不在。EHT的观测和引力波的探测正是最新和最可靠的证据。它们表明黑洞虽然听起来很荒诞，但确实存在——而且极其普遍。然而，黑洞的存在已经威胁到了当今物理学的基础。物理学家认为量子力学的基本原理支配着自然界的所有其他定律，但当它们应用到黑洞时却出现了矛盾，这说明当前的这些定律可能存在缺陷。

这一矛盾的出现，源自我们对黑洞提出的一个简单问题：如果有东西落入黑洞，会出现什么结果？在这里我们需要一些详细的说明，才能更好地描述这个问题。首先，根据我们当前的量子力学定律，物质和能量可以转换成不同的形式：比如，粒子可以在各种类型之间相互转换。但有样东西是神圣而不可摧毁的，那就是量子信息的守恒。如果我们知道一个系统当前完整的量子描述，那么我们就能完完全全地确定这个系统或早或晚的量子描述，而不丢失其中任何信息。所以，更准确的问题描述是，如果量子信息落入黑洞，会出现什么结果？

我们对黑洞的理解基于爱因斯坦的广义相对论，他认为时间和空间的弯曲形成了引力。就像把重球放在床垫上会导致其周围出现凹陷一样，这种时空的弯曲导致了物体运动轨迹和光线的偏折，我们将此称为引力。如果质量能集中在一个足够小的空间里，以至于附近时空的形变大到连光都无法逃逸，那么我们就得到了一个黑洞，而黑洞周围光无法逃逸的区域被称为事件视界（event horizon）。如果没有任何东西能超过光速，那么包括信息在内的一切都将陷在这个边界之内。于是，黑洞就成了一个“宇宙天坑”，在捕获光和物质的同时也捕获了信息。

至此，这个故事开始变得陌生。1974年，霍金做出了一项重大预言：黑洞会蒸发。这一理论的提出同时也带来了一个惊人的想法：黑洞能摧毁量子信息。根据量子理论，成对的“虚粒子”（virtual particle）随时随地都有可

精彩速览

根据量子力学的要求，信息是不能被破坏的。但如果考虑到广义相对论，量子理论又表明黑洞可以摧毁信息。

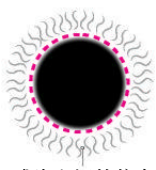
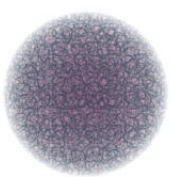
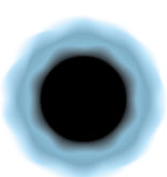
为了解决这个悖论，科学家们对经典的黑洞理论进行了一系列修正，但他们一直缺乏证据来对其进行检验。

最近，事件视界望远镜拍摄到了首张黑洞图像，科学家们也探测到了黑洞碰撞造成的引力波，这些观测将为悖论的解决提供重要信息。

黑洞信息悖论

广义相对论预言了黑洞，来自天体物理的证据也支持了它们的存在。但霍金于 1974 年提出，黑洞最终会蒸发。如果是这样，任何掉进黑洞的物质都会被完全摧毁，包括这些物质所含的信息。问题是，量子力学和能量守恒定律都禁止信息被破坏。

为了使黑洞的描述符合量子力学，物理学家们提出了各种修正黑洞理论的建议：

	假设	描述	问题
信息不守恒	**经典黑洞**  事件视界	黑洞周围存在事件视界；当黑洞蒸发时进入黑洞的信息会消失。	与量子力学和能量守恒定律中的信息不能被破坏的结论相矛盾。
信息守恒	**软毛**  成为印记的信息	信息并没有完全进入黑洞，而是成为了事件视界外的“印记”。	大多数专家认为这个假设无法令人信服。
	毛球 	一种用弦和高维几何结构替代黑洞视界的大质量残骸。	这三种假设情景都要求我们修改传统的定域性原理，即包括信息在内的任何东西的移动速度都不可能过光速。
	火墙  粒子之墙	一种将黑洞视界替换成高能粒子“墙”的大质量残骸；其中并没有黑洞。	
	量子晕 	一个与环境相互作用的量子黑洞，有可能通过微小的时空涨落允许信息的传出。	

插图：阿曼达·蒙塔涅斯（Amanda Montañez）

能出现。通常情况下，这样一对由正反粒子所组成的虚粒子对会迅速湮灭。但如果虚粒子对产生在黑洞视界附近，或许会导致一个粒子出现在视界内，另一个出现在视界外，而外面的那个粒子可以带着能量逃逸。能量守恒定律告诉我们，此时黑洞损失了能量。因此，虚粒子对的产生和粒子的逃逸，会让黑洞不断收缩直至彻底消失。这就是霍金提出的黑洞蒸发理论，而那些逃逸的粒子也被称作霍金辐射。问题是，霍金辐射本质上并没有携带那些进入黑洞的粒子的信息。因此，霍金的计算表明，落入黑洞的量子信息最终全部消失了——这与量子力学中的信息守恒定律相矛盾。

这个发现引发了一场深刻的物理学危机。不过，这样的危机往往能带来巨大的科学进步。例如在 20 世纪初期，经典物理预言，组成物质的原子具有不可避免的不稳定性，然而这一理论明显与自然界中物质稳定存在的事实相矛盾。这个问题最终在量子力学革命中发挥了关键作用。根据经典物理学理论，由于原子内的电子在绕核运动过程中不断改变方向，它们会持续地发出电磁波，从而失去能量并最终坠入原子核。但在 1913 年，尼尔斯·玻尔提出，电子只能在量子化的轨道上运动，并不会坠入原子核。于是量子力学在这个激进想法的基础上产生，并从根本上改写了自然定律。越来越多的证据表明，目前的黑洞危机也许会引发另一场物理学革命。

黑洞的替代模型

当霍金第一次预言黑洞蒸发的时候，他认为一定是量子力学出错了，信息可以被破坏。但物理学家很快就意识到，这一理论的成立将彻底打破能量守恒定律，并极大地动摇我们当前对宇宙的描述，其后果是灾难性的。显然，我们需要寻找其他的解决方案。

科学家提出的另一个构想是，黑洞并不会完全蒸发，而是到达某个非常小的尺度时就会停止收缩，留下的残骸则保留了全部的原始信息。但科学家们很快意识到，如果真是这样，量子力学的基本性质会预言一系列不稳定性的



在事件视界望远镜拍摄的这张意义重大的图像中，M87 星系中心黑洞周围的光线在引力作用下产生弯曲。

产生，使得普通物质也可能会爆炸生成这样的残骸，这也与日常经验相矛盾。

显然有些地方出错了，而且错得很离谱。很多人认为问题出在霍金最初的分析之中，并猜测信息应该是有办法通过霍金辐射离开黑洞的。但随之而来的挑战是，这种情况会和现代物理学的基本概念发生冲突。现代物理学中的定域性原理（principle of locality）禁止信息的超光速传播，但基于我们对黑洞的定义，逃离黑洞的唯一方式就是移动速度超过光速。所以如果信息能逃离黑洞，那么它一定是超光速的，这与定域性原理相矛盾。

自霍金发现这个问题以来的四十多年间，物理学家们一直试图在遵循传统物理学的情况下找到这一论述的漏洞，但至今没有结果。

霍金、马尔科姆·佩里（Malcolm Perry）和安德鲁·施特罗明格（Andrew Strominger）于 2016 年提出的观点似乎最接近正确答案。他们认为霍金最初的分析有误，其实信息并没有进入黑洞，而是成为了黑洞之外的一种被称为“软毛”（soft hair）的印记。然而，这一说法似乎经不起更加仔细的推敲，而且大多数物理学家并不相信这会是最后的答案。简而言之，这个问题的解决或许还需要更具有创新性的理论。

一个显然易见的想法是，存在某种未知的物理机制，能够避免真实黑洞的出现。传统的黑洞形成理论认为，大质量恒星燃烧殆尽并走向死亡后，会在引力的作用下坍缩成一个黑洞。但如果它们实际上到不了这个阶段，而是通过“更好”的方式转变成了另一种天体呢？我们知道，像太阳这样低质量的恒星燃尽和坍缩后不会形成黑洞，而会变成类似白矮星和中子星这样的致密天体。也许有某些未知的物理学定律能阻止更大质量的恒星形成黑洞，并把它们变成某种“大质量残骸”（massive remnant）——一种更像是中子星而不是黑洞的天体。

这个设想存在的问题是，我们无法解释这种天体如何

图片来源：EHT 合作组、欧洲南方天文台



能稳定存在——没有一种已知的物理能阻止它们的坍缩。而我们设想的任何能阻止这类坍缩的物理机制，都需要坍缩物质能从一边向另一边发出超光速信号。事实上，传统的大型黑洞也可以由密度极低的物质形成。举个例子，如果 M87 中心的 65 亿个太阳质量的黑洞是由一团尘埃云坍缩形成的（理论上这种可能性是存在的，但实际过程会复杂很多），那么当尘埃云的密度和珠穆朗玛峰上空气密度差不多的时候，这种坍缩就会发生。（珠穆朗玛峰上的空气没有变成黑洞，是因为它们的质量没有 65 亿个太阳质量那么大。）在这样的低密度状态下，需要有一些激烈的、超光速的新的物理过程，才能迅速将坍缩的分子云变成大质量残骸而不是黑洞。

还有一个类似的想法是，某些物理机制能促使黑洞在蒸发之前就变成大质量残骸，从而保留原始的信息。但这种理论也同样违反了定域性原理，要求信息从初始黑洞内部超光速转移到最终的残骸之中。

尽管有各种问题，物理学家还是基于以上两个设想探索了各种不同的情景。例如在 2003 年，萨米尔·马瑟（Samir Mathur）基于弦理论（string theory）提出了一项新的假说。他认为，黑洞会转变成一种被称为“毛球”（fuzzball）的大质量残骸，或者说一开始形成的就是毛球而不是黑洞。由于弦理论具有复杂的物理学特性，而且允许时空的维度超过传统观念中的四维，毛球很可能拥有复杂的高维几何结构。与传统定义中有着事件视界那样清晰边界的黑洞不同，毛球的边界更大也更模糊。

一个最新设想是，这些大质量残骸没有黑洞那样的事件视界，但在原来视界的位置形成了一面由高能粒子组成的“火墙”（firewall）。任何物质一旦接触到这面火墙，就会彻底燃烧转化成能量，并被火墙吸收。但无论是毛球还是火墙理论，都违反了定域性原理，而且会导致这些天体具有其他难以解释的特性。

修正定域性原理

上述有关大质量残骸的假设面临着一个相同的问题：要拯救量子力学就得违背定域性原理。但如果不小心行事，就会和修改量子力学一样带来灾难性的后果——通常会导致另外的悖论。一个具体的例子是，根据相对论原理，如果你在空旷的平坦空间中发出超光速信号，那么当一个观察者以足够高的速度经过你时，他就会看到信号随时间倒退。如果超光速信号存在，那你就可以向过去发送消息，比如找人在你母亲出生前就杀死你外祖母，但这样一来你也不会出生，于是悖论出现了。

虽然这些方案似乎都与基础的物理学原理相矛盾，但还是值得仔细研究。修改定域性原理听起来很疯狂，但我们目前尚未找到替代方案。这场黑洞危机的严重性强烈表明，对定域性原理进行一些巧妙的违背正是一种解决方案，并且不会引起类似的悖论。换句话说，量子力学要求信息不能被破坏，因此掉入黑洞的信息最终一定会通过某种微妙的“非定域性”方式逃逸。或许等我们找到了统一量子力学和引力的方法之后，一切都会清晰起来。而当前，这正是物理学上最深刻的问题之一。事实上，我们也有其他理由相信这种巧妙的解决方案确实存在。比起不考虑引力的情况，考虑引力会让定域化信息（某一时刻，它只能存在于唯一的某一处地方）显得更加棘手，因为引力场可以延伸至无穷远处，从而使定域性的概念更加复杂。

如果真的想让信息逃离黑洞，或许不需要把经典黑洞变为毛球、火墙或者其他有着明显不同特征的大质量残骸

也能做到。越来越多的黑洞观测证据表明，有些天体表现得和经典黑洞十分相似，与爱因斯坦的预测也没有太大的出入。广义相对论对黑洞的描述真的存在巨大错误吗？还是存在其他当前未知但无伤大雅的效应，能让信息“非定域化”（delocalize）并允许它离开黑洞，以避免当前整个时空图景的颠覆性灾难？

在我最近的理论工作中，我找到了该效应的两种对应情景。其中一种是，黑洞周围的时空几何结构改变了，它会根据黑洞中的信息而出现弯曲和波动。当然，这种变化很平缓，不会像传统意义上的视界一样摧毁坠入其中的物体。在这种“强且非破坏性”的情景下，时空的闪烁可以将信息传递出来。

显然有些地方出错了，而且错得很离谱。很多人认为问题出在霍金最初的分析之中，并猜测信息应该是有办法通过霍金辐射离开黑洞的。但随之而来的挑战是，这种情况会和现代物理学的基本概念发生冲突。

有趣的是，我还发现了一种更加微妙且量子化的方式能让信息逃离黑洞。这是一种“弱且非破坏性”的情景，即使黑洞周围的时空结构只发生了微小的量子涨落，也可以把信息传递给从黑洞逃逸的粒子。这种方式可以传递足够多的信息，能应对黑洞内部可能存储的大量信息的传递，足以拯救量子力学机制。在这两种情景下，黑洞周围都存在一个“量子晕”（quantum halo），能够将进入的信息返还回去。

值得注意的是，尽管这些情况似乎都需要信息的超光速传播，但不一定会产生之前提到的外祖母悖论。这些信息与黑洞的存在紧密相关，而黑洞的时空几何结构和平坦空间完全不同，所以之前有关与过去通信的论证也不复存在。从另一个角度看，这些可能性也同样令人兴奋：正是定域性原理阻止了我们的超光速旅行，而黑洞的量子力学似乎在告诉我们，这个原理目前的表述存在问题。

改写物理定律

到目前为止，还没有一个能够统一量子力学和引力的更完整的物理理论，预言过这种量子晕的存在。但解决问题的需要和基于经验的假设，都强烈地暗示着量子晕理论的合理性。如果这种理论是正确的，那么它很可能代表了对更深层次真相的近似描述。我们对时间和空间的概念奠定了科学其余部分的基础，而这些概念似乎需要进行重大修正。当前研究黑洞的工作，可能与玻尔等人在 20 世纪初建立现代原子物理模型的初次尝试非常相似。早期的原子模型也是比较粗略的，直到后来才导致量子力学这一深刻理论的产生。也许修改定域性原理看起来很疯狂，但对于过去饱受困扰的经典物理学家来说，量子力学定律的提出似乎也很疯狂。

由于寻找更完善的理论来描述量子黑洞是一个巨大的挑战，物理学家渴望获得更多实验和观测证据以指引相关工作。最新的进展令人振奋，为人类提供了直接观测黑洞活动的窗口。除了 EHT 的黑洞图片，激光干涉引力波天文台（Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory，简称 LIGO）及其配套设施也已开始探测黑洞碰撞产生的引力波。这些引力波具有极大的科学价值，能够在一定程度上反映黑洞的特性和行为。

如果只是简单地进行思考，那么 EHT 或 LIGO 能够探测到的任何现象似乎都不可能违背爱因斯坦理论对黑洞的描述。物理学家通常认为，只有当靠近黑洞中心，时空曲率变得非常大的时候，爱因斯坦的理论才需要修正。相反，在大质量黑洞的视界附近，时空曲率是很弱的。然而黑洞信息悖论引发的危机表明，情况并非如此。目前，大部分理论研究团队已经达成了共识：当前的物理定律需要被修改，才能描述黑洞内部以及穿过视界时发生的所有现象。我们似乎已经没有退路。就 M87 中心的黑洞而言，我们期望在距其几倍于太阳系直径的位置，观测到违背经典理论的现象。

目前，LIGO 和 EHT 已经为我们排除了一些可能的黑洞修正理论。确切地说，如果黑洞被一个直径超过原来两倍的大质量残骸代替，我们应该可以在 LIGO 和 EHT 的观测数据中看到一些迹象，但事实上并非如此。在 EHT 拍摄的黑洞图像中，光主要来源于大小约为 1.5 倍事件视界直径的区域。而 LIGO 探测到的引力波信号，也是当两个碰撞天体达到较近距离时产生的。虽然对这些信号的研究尚在早期阶段，但目前两种观测都表明，产生信号的那个

非常黑暗而且致密的天体，和未作修正的理论所预言的黑洞一样。

尽管如此，对这些信号的深入研究仍然非常重要。足够细致的分析也许会揭示有关黑洞量子力学的更多线索。哪怕无法观测到任何新的效应，我们也可以得到一些重要信息，从而有可能为描述黑洞量子行为的理论提供一些限制条件。

尺度过大的替代天体现在已经被排除了，但万一有些天体的性质只需要我们对黑洞视界附近区域的描述略作修改呢？虽然更完整的讨论要求对这些天体（例如前面提到的毛球或火墙）进行更全面的理论研究，但我们已经有了一些初步的答案。具体来说，如果这些天体的半径仅略大于相应黑洞视界的半径，那么 EHT 和 LIGO 就很可能无法揭示这种结构，因为只有极其少量的光和引力辐射能从视界附近的区域逃逸。

一个可能的例外是，我们或许能观测到引力波的“回声”。2016 年，里斯本大学的维托尔·卡尔多索（Vitor Cardoso）、巴塞罗那大学的埃德加多·弗兰津（Edgardo Franzin）和罗马大学的保罗·帕尼（Paolo Pani）提出，如果这样的两个天体并合后，产生了一个与它们具有相似性质的天体，那么引力波会从并合后的天体的表面反射出来，从而有可能被我们观测到。尽管大多数修改视界附近区域的设想很难通过观测被排除，但是这类天体为何能保持稳定而不是坍缩成黑洞，仍然很难解释。当然所有大质量残骸假设中都存在这个问题，不过并合情景下极端作用力的存在使其更加具有挑战性。

如果在某些理论中，对时空结构做出微小的调整，就会出现新的相互作用，而且这种相互作用还可以延伸到视界之外，那么这样的理论验证起来可能更容易一些。例如，在“强且非破坏性”的情景下，黑洞量子晕的波动可以扭曲黑洞附近的光，从而导致 EHT 观测到的图像随时间变化而产生畸变。

在我与 EHT 团队的科学家迪米特里奥斯·普萨尔蒂斯（Dimitrios Psaltis）合作的过程中，我们发现，对于银河系中心黑洞来说，这样的畸变大约只需要一个小时就会发生。因为 EHT 将多个小时的观测做了平均，所以畸变效应很难看到。但对于 M87 中的黑洞来说，相应的时间要增加 1000 多倍，大概是十几天。这个结果表明，项目最初设定的七天观测时限太短，我们应该通过更长期的 EHT 观测去寻找这种畸变。如果相关观测找到了这样的畸变，那将成为黑洞量子力学的惊人线索。如果这样的畸变不存在，那观测结果就会开始指向更微妙的弱量子晕情景甚至其他更奇异的情况。

因为“弱且非破坏性”情景下几何结构的变化相对较小，所以很难对其进行验证。但初步研究表明，这种情况会改变引力波的吸收和反射，我们或许能够观测到引力波信号的变化。

无论这两种情景哪一种是正确的，我们都将加深对量子黑洞和更深层次自然定律的了解。当前我们还不完全理解，应该如何去考虑引力场存在时信息的定域性问题。量子力学认为，时空本身并不是物理的基础部分，而只是更加基础的数学结构的近似。有关量子黑洞的证据将帮助我们将这些概念具体化。

要想了解更多，对 EHT 和引力波观测的改进和扩展至关重要。如果 EHT 能像我们期待的一样延长观测时间，并对其他目标（例如银河系中心黑洞）进行观测，那将大有裨益。而在引力波探测方面，美国和欧洲的现有设备已经投入使用，而日本和印度也将加入这一队列，届时我们将得到数量更多、灵敏度更高的观测资料。此外，为了更好地理解黑洞的起源和形成机制，以及更深入地评估它们对 EHT 观测结果和引力波信号的影响，我们还需要在理论方面做更多的补充和完善。

无论最后危机的解决方案是什么，黑洞都隐藏着揭示引力的量子性质以及时空本质的线索。就像对原子的研究带来了量子力学，对黑洞的更好理解或许会引发下一次的物理学概念革命。无论是排除量子黑洞的可能性，还是发现与它们有关的新现象，EHT 和引力波的观测都有望为我们提供一些关键信息。

本文译者　狄逸焕是中国科学院上海天文台博士研究生，主要研究方向为活动星系核反馈。

本文审校　左文文是中国科学院上海天文台副研究员，研究方向为类星体的光变、高红移类星体的黑洞质量测量、黑洞与寄主星系的共同演化、科学传播。

扩展阅读

Particle Creation by Black Holes. Stephen W. Hawking in Communications in Mathematical Physics, Vol. 43, No. 3, pages 199–220; August 1975.

Jerusalem Lectures on Black Holes and Quantum Information. Daniel Harlow in Reviews of Modern Physics, Vol. 88, Article No. 015002; February 2016.

Black Holes in the Quantum Universe. Steven B. Giddings in Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 377, Article No. 20190029; November 2019.

Burning Rings of Fire. Joseph Polchinski; April 2015.



X-RAY VISION

钱德拉望远镜的20年

在太空中飞行了 20 年之后，世界领先的钱德拉 X 射线天文望远镜仍在揭示着宇宙的秘密。

撰文 贝琳达·J·威尔克斯（Belinda J. Wilkes）　翻译 龚华杰　审校 吴健聘



爆炸景观

巨蟹座星云的中心深处镶嵌着一颗高度磁化且快速旋转的中子星。该中子星是由一颗大质量恒星经历超新星爆发后产生的（公元 1054 年在地球上被观测到）。这张多波段图片中有 5 种不同类型的光：X 射线（紫色）、紫外线（蓝色）、可见光（绿色）、红外线（黄色）和无线电波（红色）。该图像展示了这场爆炸的余辉。中子星最典型的信号是 X 射线，主要由因恒星旋转而加速到极高能的带电粒子所产生。

图片来源： NASA、CXC、SAO（X射线）；NASA、STScI（可见光）；NASA、JPL、CALTECH（红外线）；NSF、NRAO、VLA（无线电波）；ESA、XMM-NEWTON（紫外线）

美国航空航天局（NASA）于1999年发射了钱德拉X射线天文望远镜（后文简称钱德拉望远镜）。这台望远镜通过探测短波长X射线来研究宇宙，这是发现大质量黑洞、星系团以及超新星爆发残骸的最佳观测窗口。这台望远镜能捕获到达其探测器的每一个X射线光子的位置、能量和到达时间。它还具有独特的成像技术，并且能够观测多个波段的X射线。钱德拉望远镜改变了我们对暗物质、恒星诞生、太阳系中行星的性质等重大奥秘的理解，标志着X射线天文学进入了新时代。



贝琳达·J·威尔克斯是哈佛大学史密松天体物理中心的资深天体物理学家，也是钱德拉 X 射线中心主任。

钱德拉望远镜旨在解决 X 射线天文学中的一个关键问题：宇宙空间几乎各个方向都存在 X 射线（即 X 射线背景），这些 X 射线的来源是什么？为了帮助科学家们研究这个问题钱德拉望远镜被设计成一个“通用天文台”。每年，钱德拉望远镜会向从事不同研究项目的各国科学家征集观测申请，其大部分观测时间都提供给了这些通过申请的科学家。即使在运行了 20 年之后，钱德拉望远镜每年仍收到大约 500~650 份项目申请，这意味着科学家申请的观测时间比最终能够提供的多 5.5 倍。因此，这个竞争过程极其激烈。

钱德拉望远镜取得了丰富的成果，实现了最初的科学目标。它揭示了神秘的 X 射线背景来自其他星系中心的成千上万个超大质量黑洞，同时揭开了众多天体的新秘密：超大质量黑洞在吞噬物质的过程中，飞出的喷流发出强烈的 X 射线；木星大气中存在闪耀的极光现象；中子星碰撞产生的光也能通过引力波检测到；极其明亮、大小与恒星相当的微型黑洞（可称其为超高亮度 X 射线源）。基于钱德拉望远镜观测结果的论文数量超过 8000 篇，利用该望远镜开展研究的科学家超过了 4000 位。

作为钱德拉望远镜科学家用户支持中心的副主任，我在卫星发射前 3 年就加入了这项任务。我参与了网站的建设工作，为科学家提供信息，参与了首次观测方案的征集及评审，并为位于阿拉巴马州的马歇尔太空飞行中心的望远镜进行校准。

2019 年，钱德拉望远镜迎来了 20 周年纪念日。现在，更多强大的天文望远镜逐渐加入天文观测队伍中。如事件视界望远镜已经揭开了黑洞的神秘面纱，詹姆斯·韦伯太空望远镜也将于不久的将来发射升空。我们希望钱德拉望远镜继续开拓新的领域，并在未来几年进一步拓展我们对宇宙中最热、最极端的环境的认识。

精彩速览

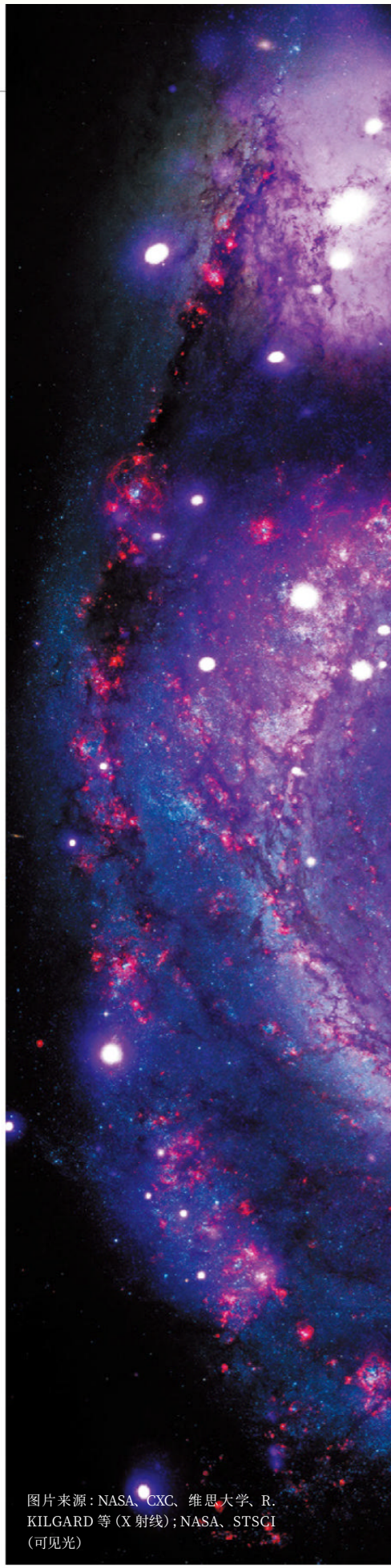
2019年是钱德拉X射线天文望远镜发射20周年。该天文望远镜自1999年发射以来，一直在绕地球飞行。

这台望远镜已经取得了多项关于超大质量黑洞、超新星爆炸遗骸等重大发现。

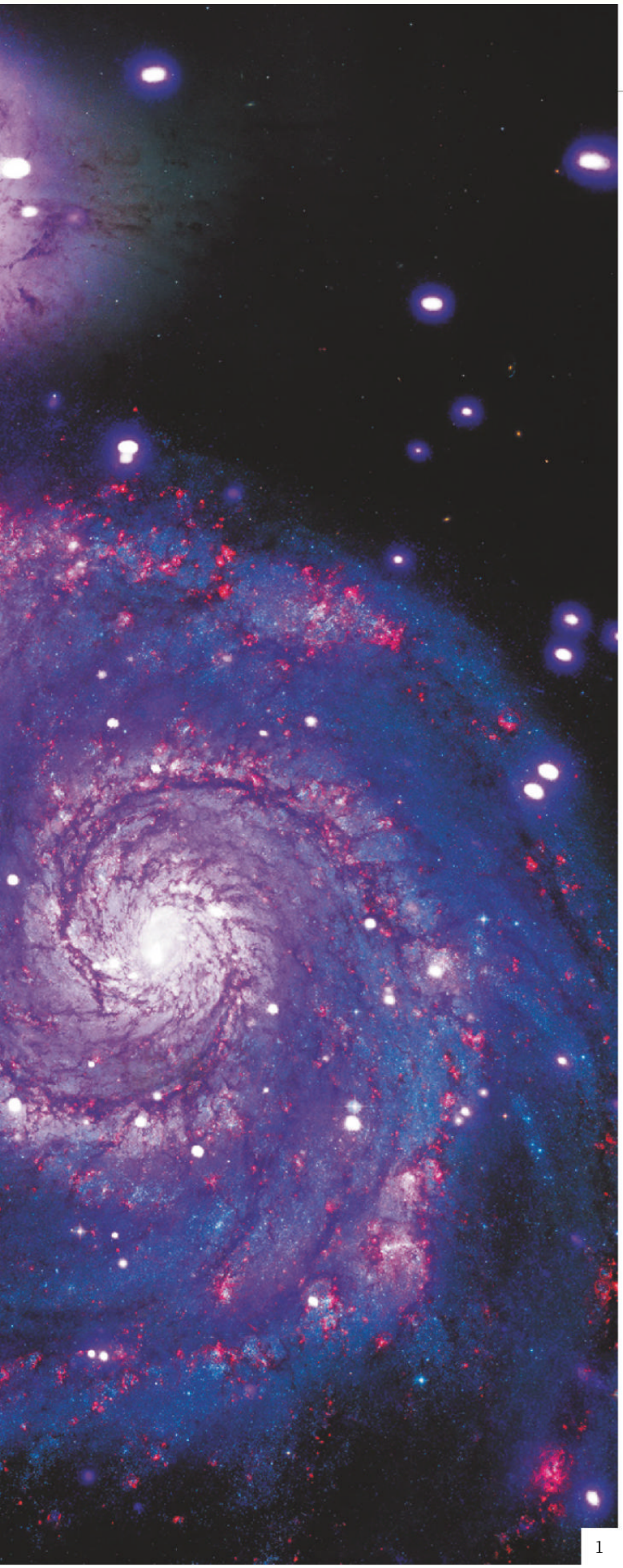
在接下来的第三个十年，钱德拉望远镜将继续服役，并与现有的天文台展开合作。

本文译者 龚华杰是扬州大学物理科学与技术学院研究生，研究方向为广义相对论。

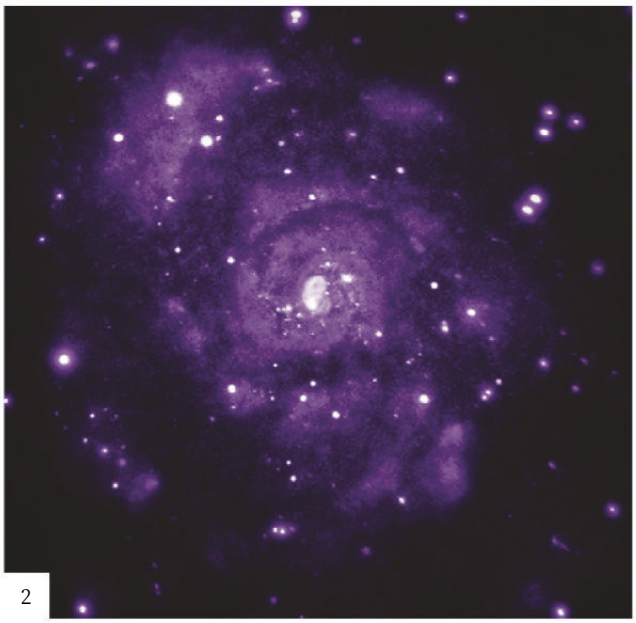
本文审校 吴健聘是扬州大学物理科学与技术学院教授，引力与宇宙学研究中心博士生导师，研究方向为广义相对论。



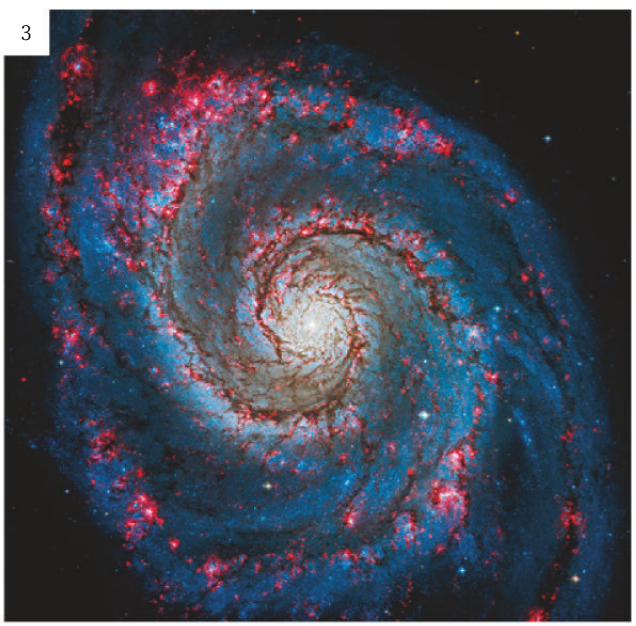
图片来源：NASA、CXC、维思大学、R. KILGARD 等（X 射线）；NASA、STSCI（可见光）



1



2

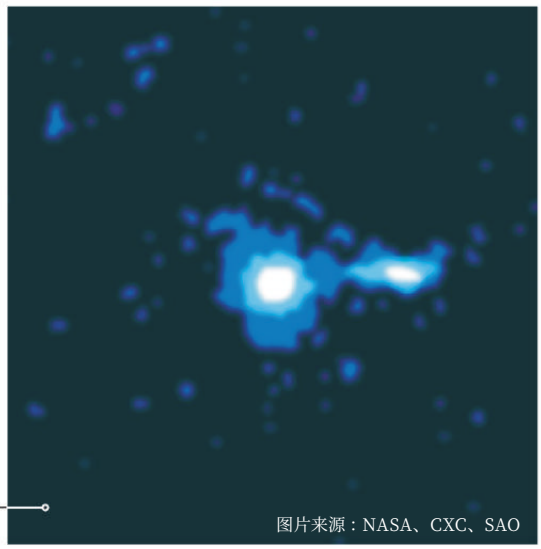


3

涡流螺旋

由两个星系并合形成的 M51 漩涡星系展现出了独有的美丽的漩涡臂。科学家在该星系中观察到了大约 400 个 X 射线源，其中大多数是双星系统并且位于恒星形成区域附近。科学家推测，两个星系之间的相互作用导致了大量新恒星的形成，进而导致该系统中出现大量 X 射线双星。X 射线双星发出的脉冲表明，这个致密的伴星是一颗中子星，必须从其伴星中吸积大量物质，才能产生异常高的亮度。

左图是由钱德拉 X 射线数据（图 2）和哈勃望远镜捕获的可见光数据（图 3）合成的图像。结合来自多个望远镜的数据，天文学家可以获得更完整的多波段星系图像，揭示在不同电磁频谱范围内的宇宙现象。



图片来源：NASA、CXC、SAO

喷射流

钱德拉望远镜观察到了类星体 PKS 0637-752。PKS 0637-752 是一个位于遥远星系核心的超大质量黑洞。10 年前，我利用 NASA 的爱因斯坦天文台的数据研究过该黑洞。这个黑洞正在从宿主星系中吸取大量物质。随着物质的吸积，黑洞变得异常炽热，以至于它比该星系的 1000 亿颗恒星更亮。

图片右侧的光线令人惊奇。钱德拉望远镜的工作人员起初以为是望远镜的光学系统出了问题。钱德拉望远镜从落入黑洞的物质发射出的喷流中发现了这种 X 射线。这类喷流曾经在无线电中也被观察到过，但在 X 射线中观察到这类喷流是出乎意料的。对这类喷流的观察有助于理解来自超大质量黑洞的喷流。

确凿证据

钱德拉望远镜最著名的科学成果之一，是这张子弹星系团的合成图像。子弹星系团是由两个星系团相互撞击粉碎后堆叠形成的，图像由钱德拉望远镜、麦哲伦和哈勃太空望远镜的数据合成。在这里，炽热的气体出现在 X 射线（粉红色）频段，而星系则可以从麦哲伦太空望远镜的可见光（白色）波段看到。在可见光图像中，科学家通过引力引起的星系图像的扭曲推断出了暗物质（蓝色）的分布。

炽热气体（粉红色）与暗物质的分离，首次为暗物质的存在提供了直接证据。出现这一现象是因为暗物质与星系一起移动，而其他物质并没有随着星系移动，相反，炽热气体还会在自身相互作用下减速，形成子弹状，这也是这个并合星系团名字的由来。



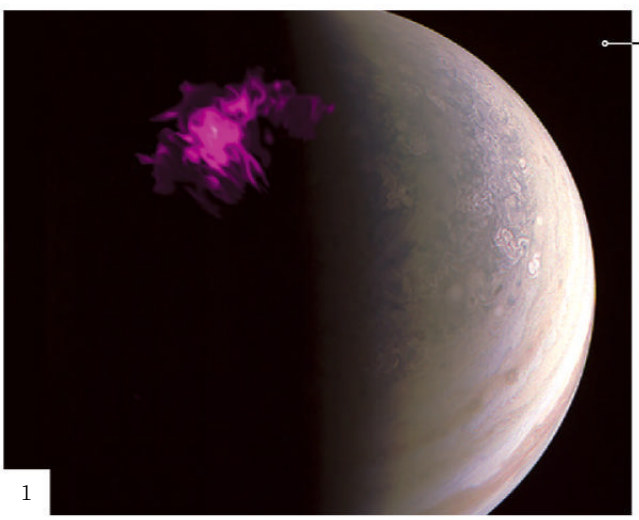
图片来源：NASA、CXC、维思大学、R. KILGARD 等（X射线）；NASA、STSCI（可见光）



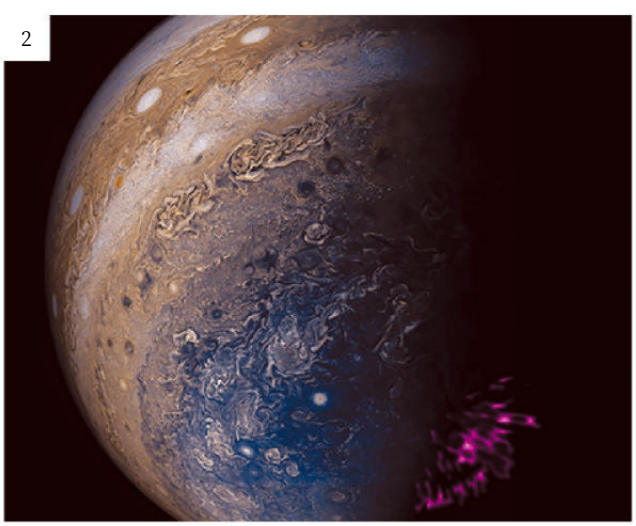
太阳系内的观测

在寻找遥远的超大质量黑洞和巨大的星系团的同时，钱德拉望远镜在太阳系内也取得了惊人的发现。这些木星的图像展示了来自木星北极（图 1）和南极（图 2）的极光所发出的 X 射线，这在太阳系中是独一无二的。这种 X 射线是由于磁场使围绕木星赤道环的粒子向两极汇集，最终进入木星的极地区域而产生。钱德拉望远镜在 2019 年的观测结果和目前绕木星运行的“朱诺”号（Juno）卫星的观测数据的结合，将有望为这一过程提供详细信息。

图片来源：NASA、CXC、UCL、W. DUNN等（X射线）；NASA、JPL-CALTECH、SWRI、MSSS、GERALD EICHSTÄDT、SEÁN DORAN（南极可见光）；NASA、JPL-CALTECH、SWRI、MSSS（北极可见光）



1



2

扩展阅读

Exploring the Extreme: 20 Years of Chandra. Chandra X-ray Center. https://chandra.si.edu/20th

Exploring Our Universe and Others. Martin Rees; December 1999.

All the Light There Ever Was. Alberto Domínguez, Joel R. Primack and Trudy E. Bell; ScientificAmerican.com, June 1, 2015.



绘图：哈里·坎贝尔（Harry Campbell）

GPS DOWN

脆弱的GPS系统

攻击 GPS 系统其实并不困难，
而美国缺乏对此的防范。
美国需要建立一个备份系统来
抵抗这种潜在的威胁。

撰文 保罗 · 塔利斯（Paul Tullis）
翻译 张文亮　审校 张宏宝

精彩速览

GPS在我们日常生活中发挥着重要作用，例如电网、股票交易等系统的定时依赖于GPS,飞机航行也时常出现因GPS信号受到干扰而不能安全降落的情况。GPS系统可被黑客截断或篡改，这使得GPS系统看起来很不安全。许多国家为此在地面上建立了备份系统。美国也试图建立类似的地面系统作为防范。



保罗·塔利斯是一名来自阿姆斯特丹的记者，主要报道关于科技与商业的交叉领域。他曾为《科学美国人》撰写了关于过多游客对加拉帕戈斯群岛造成环境破坏的文章。

2016年8月5日，一架民航飞机即将在菲律宾首都马尼拉的尼诺伊·阿基诺国际机场降落。此时，意想不到的情况发生了。飞行员向航空塔台报告说："我们的航班无法接收到GPS（全球定位系统）信号，现在我们距离右24跑道还有8海里（约15千米）。"塔台管理人员在惊讶之余不得不要求飞行员用肉眼控制这部巨大的波音777-300飞机下降。高度紧张的机组人员最终成功降落，避免了空难的发生。

事实上，这起事件并非孤例。国际民用航空组织在2016年7-8月收到了50多宗关于GPS信号受到干扰的报告。在某些案例中，飞机只能马上加速升空并在机场上空环绕，试图重新降落，这种突然爬空可能导致机组人员对飞机失去控制。有一家安全咨询公司曾指出，如今的航空需要无干扰的卫星定时定位导航系统。

近年来，美国四个主要机场发生的事故都是因为突然失去GPS导航信号引起的。根据美国航空航天局（NASA）航空安全委员会的报告，最近有一架在美国爱达荷州降落的客机差点撞上了山脉。一位警惕的航空管制员迅速介入才阻止了空难的发生。安全分析专家和航空工程师在研究类似事件的相关数据后指出，事件的起因是有人对GPS系统蓄意攻击。

马丁·劳思（Martin Lauth）曾是航空交通管理员，现任美国佛罗里达州安柏瑞德航空大学的航空交通管理副教授。他表示，即使是最好的情况，当GPS信号受到干扰时，飞行员也得重新规划剩下的降落航程，这将导致航班明显延误，让机场和旅客遭受损失，严重情况下甚至需要关闭整个机场。纽约机场的航班吞吐量相当大，若纽约机场的GPS信号以及地面导航系统被黑客攻击，那么会有相当多的飞机无处可去。跨海航班的情况将更严峻，因为降落前它们的燃油通常已经所剩无几。

尽管对于我们而言，GPS主要是帮助我们找到去吃饭或约会地点的路，但其实根据美国国土安全部（DHS）的报告，GPS卫星群的定时函数也有着举足轻重的作用，16个美国关键基础设施部门中至少有13个依赖于它。手机移动网络、股票交易、电网系统、应急服务等等都依赖于GPS定时系统。

相对于其重要性，GPS本身却过于脆弱。这是因为，卫星的电波需要在太空和地球表面近20 000千米的距离内传播，这导致了信号较弱且易被"截断"，就像那起在马尼拉发生的事件。

卫星信号也很容易被"篡改"：只要一个稍强的无线电信号就能把它变成假讯号，使接收者错以为自己是在另一个地方或另一个时刻，而这只需要用一个笔记本电脑发送无线电假信号。

然而某些关键基础设施则无法容忍几微秒的偏差，否则可能会引起整个系统的完全瘫痪，造成灾难性后果。美国得克萨斯大学奥斯汀分校的航空航天工程学副教授托德·汉弗莱斯（Todd Humphreys）与美国国家太空定位、导航与计时咨询委员会成员德纳·高厄德（Dana Goward），均表达了对恶意截断或篡改GPS信号的担忧。如果这种攻击得手，美国境内所有的电网、移动网络、证券交易、医院、机场等都会在无法预警的情况下同时遭到毁灭性打击！

但与美国相比，有些国家却不需要担心这一问题，因为这些国家会使用地面备份系统，从而可以切换到更难被干扰的系统。而美国则一直没有建成这种备份系统。目前的平安无事让美国国会议员们放松了警惕，当然了，如果出现了大规模的事故，他们自然会有所行动。这正如灾难学家所说，美国政府似乎总是去防范过去已经发生过的灾难，而无视未来可能出现的灾难。



1



2

GPS 卫星（2）为数据中心提供复杂的定时服务，比如位于美国新泽西州锡考克斯的这一所（1），这里负责协调证券交易所的业务。

过分依赖

目前的 GPS 系统是由 31 颗人造卫星组成的，由美国空军的第二空间作战中队构建。为了保持 GPS 的精确度，该中队通过 4 个从卡纳维拉尔角到夸贾林环礁的天线网络给卫星提供协调时间（UTC），每当卫星经过上空时，天线网络就会向它发送信号，一天最多 3 次。结合卫星上放置的原子钟，并根据狭义相对论和广义相对论的修正，卫星的时间误差可以控制在每天 40 纳秒内。

每颗卫星会通过两个不同频率，不停地向地面发出二进制数，其中一个频率供美国军方使用，需要密钥才能破解；另一个频率则是民用频道，并没有经过加密。两种信号传输的都是数据包，里面包含时间、传输时的卫星位置以及其他卫星的轨道与状态。我们手机里的 GPS 接收器则利用这些数据包内的数据，计算出各卫星与手机的距离，进而得知自己所在的位置。为了得到准确的位置，每个 GPS 接收器都至少要同时接收到 4 个卫星的信号，这也是当你在曼哈顿较矮的大楼里或威尼斯的狭窄小巷时会无法使用 GPS 定位的原因——因为你不能同时接收到 4 颗卫星的信号。

在这一工作机制下，黑客可以通过大量噪音来淹没 GPS 信号，从而实现对 GPS 接收器的信号截断，或者通过给予 GPS 接收器一个错误的坐标与时间来篡改信号。对于某些情况来说，只要其中一个 GPS 接收器搞错了信息，它就会将这个错误信息传遍整个系统，造成整个系统的所有接收器的滞后甚至瘫痪。

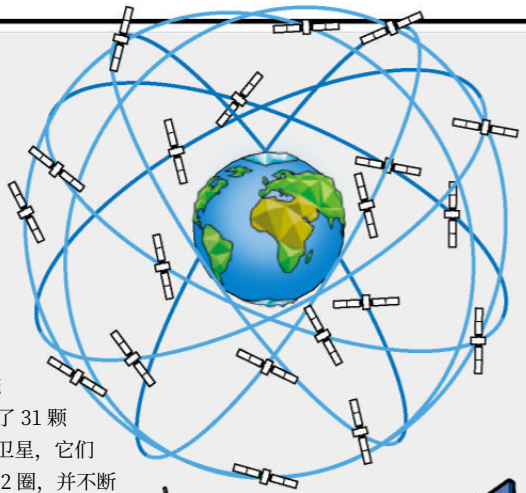
现代社会对 GPS 非常依赖，因为它是全球最精确同时免费的定时方法。在 GPS 构建出来之前，电网的操作员们只能大致估计传输线上的负荷，非常低效；而现在，他们可以用 GPS 定时系统，及时对当前的线路负荷需求做出最优的响应。最开始，证券交易所为了对时，必须挂一个钟在墙上。进入电脑时代后，美国的证券交易所开始使用美国国家标准技术研究院（NIST）的定时系统，但也并不精确。而今天的金融系统，从街角的 ATM 机到股票交易所，都用 GPS 信号给每一笔交易盖上一个时间戳从而验证转账，这让零售商不再需要每天等到业务结束后才开始传输自己的销售数据。GPS 的广泛使用使得全球性的超高速交易变得非常普遍。

移动手机网路也使用 GPS 完成数据打包、传输、解压信号包，并可以做到在使用者边打电话边走动时不中断信号，因为手机可以切换信号来源，从一个信号塔切换到另一个信号塔。在医学上，GPS 用来给电子医疗纪录加时间戳。电视网络也会用 GPS 来保证广告商们的广告播放在了正确的时间段。事实上，全球有超过 20 亿的 GPS 设备正在使用。

图片来源：CHANG W. LEE New York Times and Redux Pictures (2); LOCKHEED MARTIN (2)

现代社会高度依赖GPS

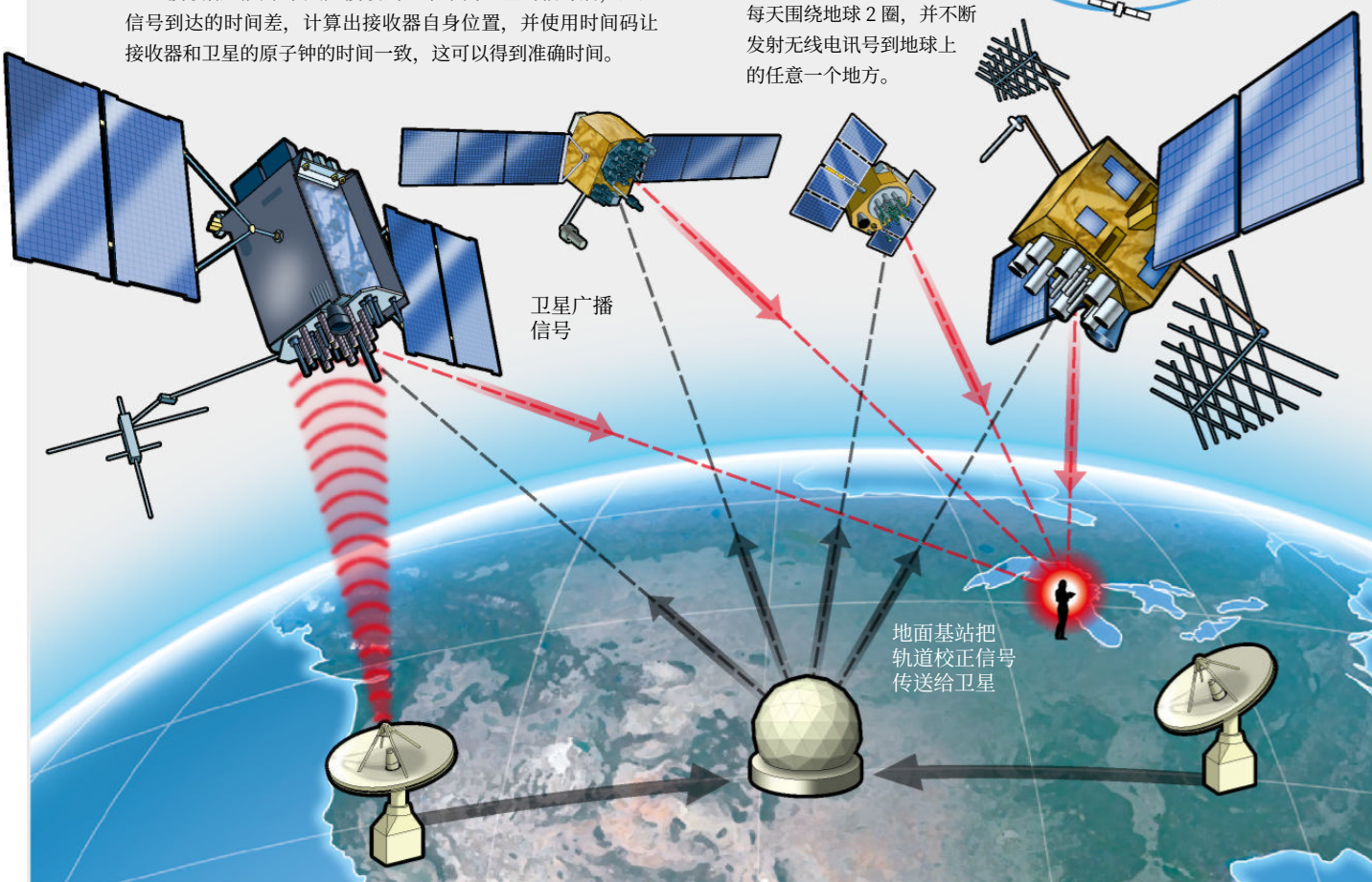
电网系统、证券交易所、银行、客机、手机网络都依赖卫星发出的 GPS 信号，从而为它们的复杂操作提供准确的定时。然而黑客可以简单地破解并干扰其定时功能，这将造成许多潜在的危害。许多国家已经建造了地面的备份系统以防范攻击，但美国仍未建造类似的地面系统。



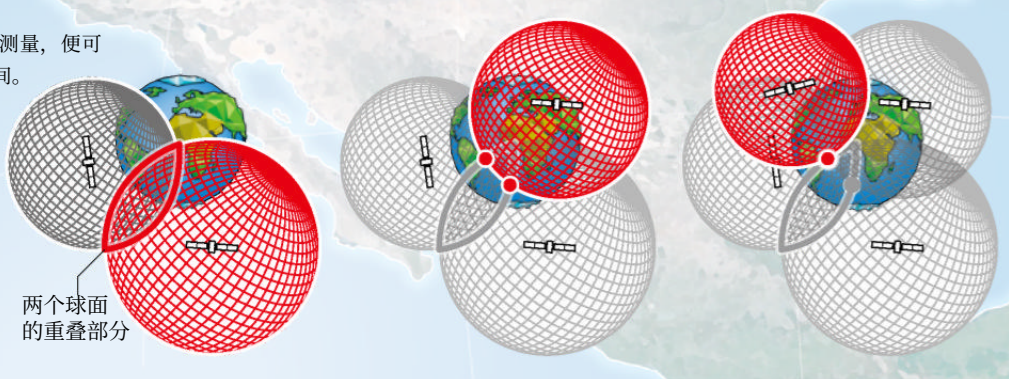
GPS 卫星系统
美国空军发射了 31 颗 Navstar 人造卫星，它们每天围绕地球 2 圈，并不断发射无线电讯号到地球上的任意一个地方。

GPS 的工作原理

GPS 卫星持续发射出包含它们自身位置与时间的同步信号。GPS 接收器（图中小人）接收到 4 个不同卫星的信号后，通过信号到达的时间差，计算出接收器自身位置，并使用时间码让接收器和卫星的原子钟的时间一致，这可以得到准确时间。



精准的位置与时间
利用 4 颗卫星的信号进行三边测量，便可得出接收器所在的位置与时间。当接收到一颗卫星的信号，则说明接收者在以该卫星为中心的球面上的某一点。第二颗卫星的信号说明接收器在这两个卫星的球面的交叉部分：一个圆上。第三颗信号确定接收器在球面上的哪两个点。最后用第四个信号锁定接收器究竟在何处以及其时间。



绘图：本·吉利兰（Ben Gilliland）

两种攻击方式

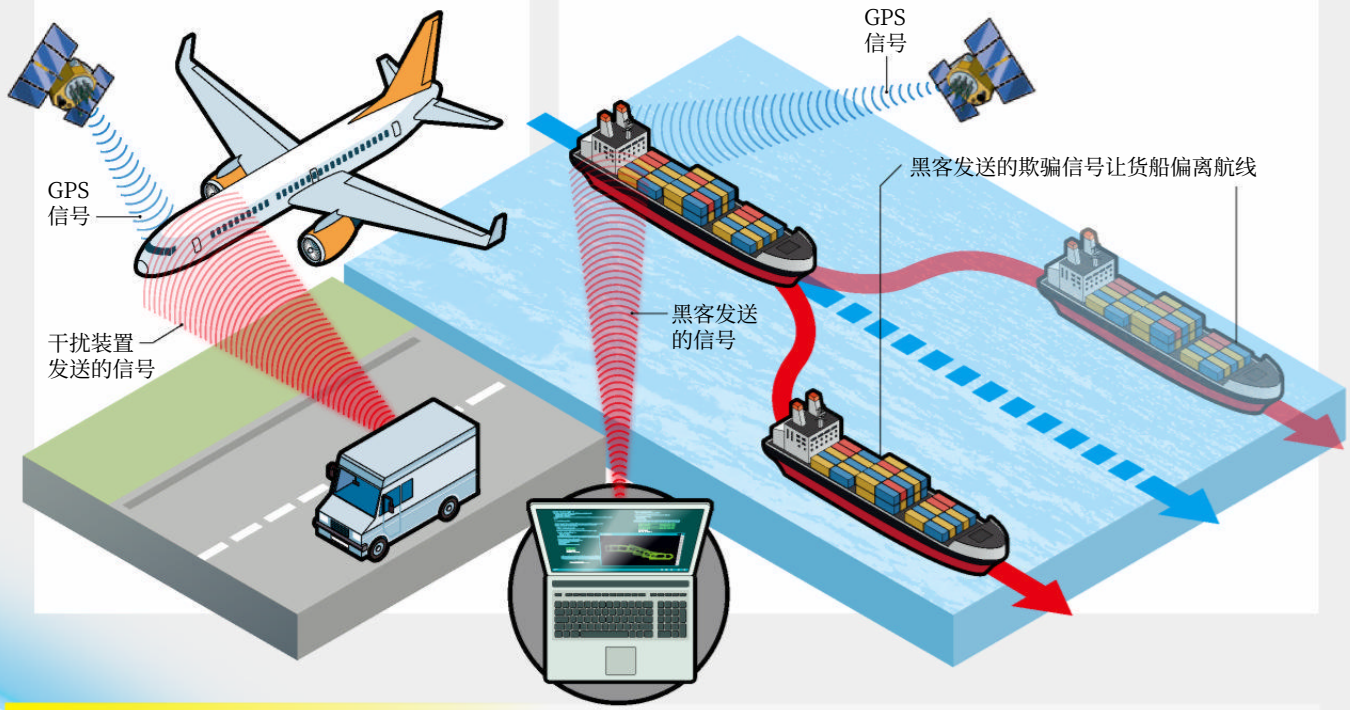
干扰 GPS 的定时功能能导致电网瘫痪、股市崩盘以及让飞机降落过程失去导航信号指引。黑客可以截断 GPS 卫星的无线电信号或篡改接收器收到的信号来实现攻击。

截断

GPS 无线电信号的功率非常低，因此在接收器附近的黑客可以用同频率的无线电噪音淹没原信号，这使得接收器难以锁定与 GPS 卫星的连接。

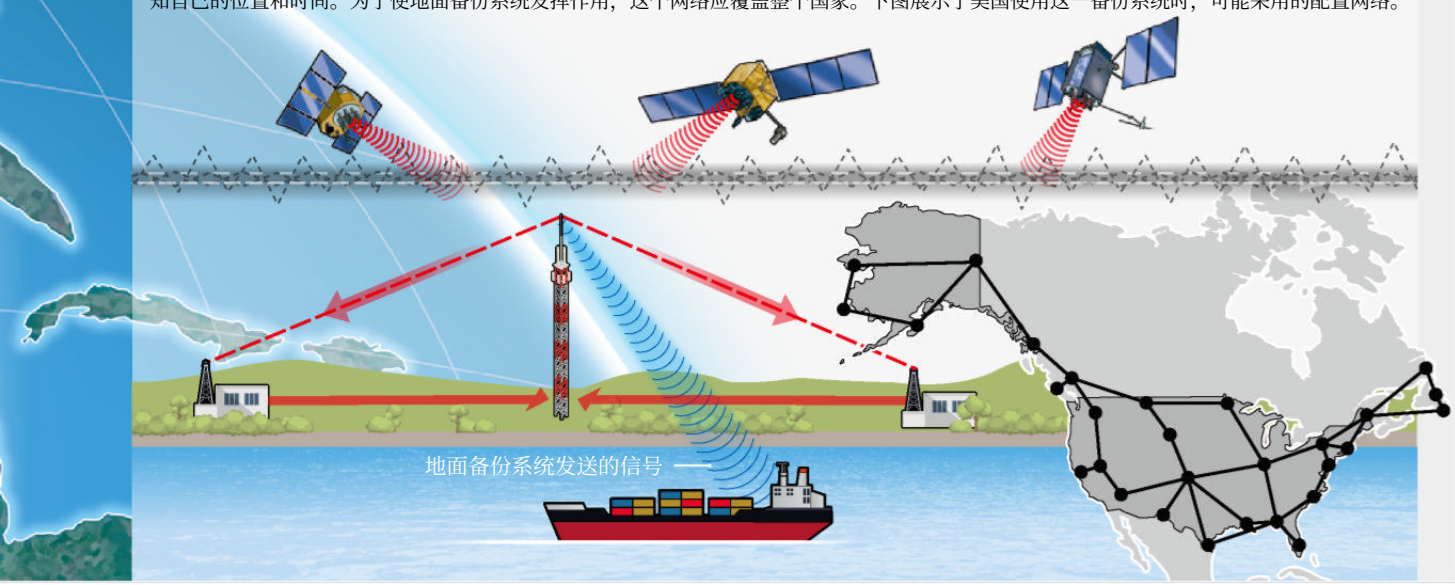
篡改

每一个 GPS 卫星都会发送独特的代码，因此在接收器附近的黑客可以捕获到 GPS 信号并重新传输。黑客通过逐渐增强发射的功率，可以让接收器转而接收黑客的信号。那么黑客就可以传输新的信号误导接收器。这种篡改方式可以让飞机飞行员误以为航线偏离，让他们修改到以为“正确”而实则错误的方向。



用备份系统抵御攻击

许多国家使用了备用系统，当接收器发现 GPS 信号被篡改或消失时，能切换到备用系统。大型地面基站和天线将发射出低频的高功率无线电信号，对这种无线电信号的截断或篡改异常困难。尽管这种备份系统在精度上会稍逊于 GPS 系统，但接收器可以通过接收来自不同发射器的信号而得知自己的位置和时间。为了使地面备份系统发挥作用，这个网络应覆盖整个国家。下图展示了美国使用这一备份系统时，可能采用的配置网络。



人类社会对 GPS 的依赖，也使得它成为了一个充满诱惑的攻击对象。正如上文所述，GPS 信号的脆弱性使其容易被破坏。一位美国官员认为，对 GPS 系统实现“截断 - 篡改”攻击其实很简单，成本也很低，并且破坏效果强烈。高厄德也表示，“这种攻击可以产生很有针对性的显著的破坏效果。”事实上，一个篡改装置只需要 5000 美元，还能通过网络遥控操作。反过来，这种攻击非常难于防御。格哈德 · 伯兹（Gerhard Berz）在欧洲空中航行安全组织负责导航基建部分，他在导航卫星行业杂志 Inside GNSS 上写道：“就算是防御最简单的攻击，也远远说不上是容易的。”

现代社会对GPS非常依赖，因为它是全球最精确的定时方法。在GPS构建出来之前，电网的操作员们只能大致估计传输线上的负荷，非常低效；而现在，他们可以用GPS定时系统，及时对当前的线路负荷需求做出最优的响应。

分散攻击

如果有 10 到 12 个操作人员分散在美国的各个重要地点，并且他们拥有良好的设备，那么就能实现一次大规模的、整体性的 GPS 攻击。

如果在 2001 年 9 月 11 日，基地组织用 19 名特工潜伏在美国国内并使用 GPS 干扰攻击，他们就不需要采用自杀式的攻击方式，也不需要会驾驶飞机了。

从影响上考虑，虽然 GPS 干扰攻击不会导致如 911 事件的巨大人命伤亡，但其破坏能力其实不容忽视。设想下面这个情景：一个黑客首先在附近的建筑打开一个无线电，然后伪造一个交通灯正在使用的 GPS 卫星。为了让交通灯锁定这个错误的信号，黑客会干扰交通灯本来的信号追踪程序，使得它们尝试追踪新信号。只要假信号的功率更强，那么交通灯的系统就会锁定它。现在黑客只要给它传递一个错误的时间信号，就可使得四个方向的绿灯都同时亮起。这种攻击既可单人完成，亦可由多个黑客协同，在不同的城市实施。

当我把以上这个潜在危险告诉给旧金山的交通信号监督员时，他从未想过原来每个人都有方法干扰 GPS，从而修改交通灯信号。而旧金山的交通信号灯使用的 GPS 模块并没有防篡改保护，而这款设备本应能防御各种可能预见的无线电干扰，而避免产生混乱。

当然，并不是每一个城市都使用 GPS 作为交通灯的定时器，但其他方案并没有好到哪里去。比如美国得克萨斯州圣安东尼奥市，该市的每个交通灯都不使用单独的 GPS 接收器，而是用一个整体的网络来接收时间。不过，这种系统同样可能被篡改。

全球金融系统是一个更大的攻击目标。在新泽西州大都会体育场两三千米外，价值数万亿美元的金融交易每天都在以数据的形式进行处理，这里有包括纽约证券交易所在内的 49 个交易所。纽约证券交易所的前任全球网络服务主管安德鲁 · 巴赫（Andrew Bach）表示，只要有任何一个为交易提供时间戳的 GPS 接收器损坏，“这将给整个金融业的运作带来混乱”。市场交易量百分之六十以上的投资者（据摩根大通的数据）发现了这里的风险，决定持观望态度。麻省理工学院斯隆管理学院的金融学教授安德鲁 · 罗（Andrew Lo）指出：“当太多投资者选择离开时，这才是真正的麻烦。这将引起股票市场的闪崩或其他更严重的后果。”印第安纳大学凯莱商学院的金融学副教授诺亚 · 斯托夫曼（Noah Stoffma）说：“我很容易想象出当 GPS 信号被干扰后发生的金融灾难。”

攻击者亦可以用同样的方法同时攻击每一个变电站，这可以让美国重要地区的电网系统瘫痪。就在我家附近的普拉特河电力管理局所属的福特汉姆变电站的设施就非常传统，非常容易被攻击。在一个假日酒店旁，一片约 4 米高的墙后面，露天的输电设施能将很远的燃气发电站的电力分流到高压传输线上，供附近 4 个城市的 324 000 个家庭使用。整个供电设施都在用相量测量设备（PMU）监控电网。相量测量设备能够测量电力系统枢纽点的电压相位、电流相位等相量数据，通过通信网络把数据传到监测主站。监测主站根据不同点的相位幅度，在遭到系统扰动时可以采取措施应对相关情况，这可以防止事故的进一步扩大甚至电网崩溃。相量测量设备的定时系统也使用了 GPS。

美国西北太平洋国家实验室的电气工程师的杰夫 · 戴格尔（Jeff Dagle）是电网专家，他坚持认为相量测量设备并不影响电网安全，因此对 GPS 信号的篡改并不会引起瘫痪。但事实上，美国国家标准局早在 2017 年 9 月的

报告中就曾指出，对相量测量设备的篡改攻击会造成发电机掉线。大量的发电机掉线“将会导致突然的供需失衡以及电网的不安定”。研究人员曾经在实验室环境下演示过类似的定时错误。实验显示，尽管相量测量设备一般都在高墙之后，但它们的 GPS 接收器仍然能被从附近发射的无线电截断和篡改。

美国有 55 000 个变电站。对于上述威胁，高厄德和汉弗莱斯一直在提醒公共设施管理人员，但只有极少数人真的认识到了这种危险。高厄德指出，很多操作员高估了电网的安全性，“认为 GPS 不会造成威胁”。他补充道：“攻击者可以有很长一段时间来伪装自己的攻击。”

电网瘫痪代价十分高昂，但后果最严重的攻击则是愚弄一架飞机。汉弗莱斯认为这种攻击是可能的。与军用飞机不同，民用飞机并没有安装能自行选择信号的防篡改模块，这种模块的安装也受到严格限制。专门训练航空交通管理员的专家曾告诉我，其实机师有其他的降落辅助系统可以选择，并不是只能使用 GPS 导航，但首要的下降辅助系统是机场的降落系统，能为飞机提供水平与垂直制导以及报告下落点距离。这一系统是用无线电运作的，但其安全性却缺乏防护。这个下降系统并未加密，这意味着在理论上，人们能够让飞机的接收器锁定假信号，而达成干扰目的。

提升 GPS 系统可靠性

当今社会对 GPS 越来越依赖，例如使用 5G 网络的物联网将高度依赖 GPS 提供的精确定时功能，才能和其他部件联合运作。人工智能和增强现实的技术发展也需要使用 GPS 信息。

美国国家安全部精密导航与计时办公室主任詹姆斯·普拉特（James Platt）表示，他们正在与美国国家标准局（NIST）合作，试图为不同的 GPS 接收器型号标记相应的安全系数。美国国家安全部也准备实施每年一度的测试，让 GPS 设备制造商能测试其产品的防御能力。

当前，GPS 防篡改机制的研究发展地如火如荼，过去数年这一方向已有几百篇论文发表。例如，研究人员发现当 GPS 接收器被篡改时，专业的 GPS 接收器中可以显示出这种失真。利用这一点，专业接收器将可以检测到这种失真并提前发出警告，但黑客也可以对这种失真信号进行修饰，令其难以被发现。正如汉弗莱斯所说，“并没有简易的防范措施，我们为了把对手从比赛台上赶出去，必须不断提升防篡改保护的能力。”我们可能已经用了很好的防范措施，但黑客总能找到漏洞。

然而，如果像其他国家一样搭建备份的定时系统，美国就可以从这种不安全感中解脱出来。2018 年 12 月，美国总统特朗普签署了《国家时间安全法》，要求美国在 2020 年之前构建一个“位于地面的、可靠的替代定时系统”。但该法案签署后，美国政府还没有投入任何资金。

批评家们如高厄德表示，这也不是美国政府第一次对这一问题表示关注了。2001 年，美国国家安全部就发布了一篇关于 GPS 脆弱性的报告，时任总统乔治·布什（George Bush）于 2004 年也指示美国国家安全部等部门构建一个备份系统。美国国防部副部长等人在 2015 年向国会报告称他们可以构建一个新系统，这个新系统被称为 eLoran（增强型远程导航），这正是特朗普总统所需要的。多年前，美国国会对基于 eLoran 的导航系统进行了投资调研，但至今一美分都没有下拨。

这个新的 eLoran 系统将使用比 GPS 更低频率、输出更强的无线电信号，使得外界难以覆盖这种信号，截断、篡改攻击也就无从谈起。新系统的建设将采用政府与社会资本合作的形式，届时 24 个巨型地面天线将建设在全美各地。

除此之外，美国空军和五角大楼也在调研其他有潜力的备份系统，因为 eLoran 系统的维护比较困难。而且就算马上开始开工，eLoran 系统的建设也需要花费多年。算上新接收器、新发射器的设计以及向社会的配给，这会花费更长的时间，乐观考虑的话也需要 4 年时间。

另一个大型的替代方案则是将 GPS 卫星发送的所有信号都用数字信号密钥进行连接，即对所有 GPS 信号加密，但目前所用的卫星群无法做到这一点。

尽管目前的情况不容乐观，普拉特仍然对提高 GPS 的可靠性有信心：“我们已经提醒业界就目前的状况采取改进措施了。”

本文译者　张文亮是北京师范大学物理学系硕士在读研究生，研究方向是广义相对论。

本文审校　张宏宝是北京师范大学物理学系副教授，研究方向是广义相对论。

扩展阅读

Above Us Only Stars: Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria. C4ADS; March 26, 2019.

Dual-Antenna GNSS Spoofing Detection Method Based on Doppler Frequency Difference of Arrival. Li He et al. in GPS Solutions, Vol. 23, Article No. 78; July 2019.

The Global Positioning System. Thomas A. Herring; February 1996.



The Road to Fusion

聚变核电站：2060 年接入电网？

目前，世界上最大的热核聚变实验型设备——国际热核聚变实验反应堆的建设已经完成了 60%。

撰文 朱莉娅 · 帕基奥尼 (Giulia Pacchioni)　翻译 庞玮

责任编辑：石云雷　editors@huanqiukexue.com



圣保罗勒杜兰是法国南部一个宁静的小镇，通往该地区的道路已被拓宽和加固，以便能承载重型机械的运输。为了不扰乱小镇白天的交通，大型运输卡车会在夜晚前往这里。这里也是世界上最大的热核聚变反应堆——国际热核聚变实验反应堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）的所在地。

热核聚变让太阳持续不断地燃烧，其中的基本原理并不复杂：两个轻核结合形成一个重核时，会释放出能量。氢的两种同位素氘和氚，就可以实现最简单的聚变反应。海水中氘的含量十分丰富，氚可以由锂制备，这保证了热核聚变发电站的燃料供应。

不仅如此，热核聚变不会产生污染物和放射性废料，不会产生链式反应，本质上绝对安全。总之，热核聚变是一种真正清洁的可持续能源。托克马克装置和仿星器已经证明了热核聚变产能的可行性，但已有的两种设计都只是小型的实验堆，耗能比产能还高。下一步要验证热核聚变输出的能量是否能达到电站级别，而这需要依靠 ITER。

ITER 采用了托克马克设计，可作为一个研究平台使用。在完成建造后，ITER 输出的能量将是输入能量的 10 倍，但暂时不会用于发电。那时，ITER 将具有举足轻重的作用，但它对于热核聚变能源的意义不止于此。它还将作为工业电站原型，为后期热核聚变试验电站的建造提供基础，而后者将利用热核聚变发电并输送到电网。“目前，我们还不知道如何在工业层面应用热核聚变，但我很想了解，”ITER 项目的主管伯纳德·比戈（Bernard Bigot）说，“我期望在本世纪后半叶，能看到并网发电的热核聚变发电站”。

加热等离子体

热核聚变的触发首先需要克服原子核间的静电排斥，使它们相互接近至强吸引力开始发挥作用。这需要极高的温度才能实现：等离子体的温度需达到 1.5 亿摄氏度，比太阳的温度还要高 10 倍。

当氘和氚被注入高真空度的反应腔中，整个过程就开始了。接下来，原子核和电子会被电流分离，形成一团低密度的等离子体。最关键的是，ITER 强磁场需要将等离子体约束在反应腔中间，因为一旦等离子体接触到了反应腔壁，就会与电子重新结合，回到气态。磁场还能和无线电波、微波一起，通过激发离子对等离子体进行加热。接着，高速的中性氘粒子束被注入反应腔中，等离子体会被进一步加热。

氘氚热核聚变产生的氦和中子的动能，比原来的粒子更高。其中，氦能将一部分动能传递给继续注入到反应腔的氘和氚粒子，使等离子体持续产生。而不带电荷的中子由于不受磁场的约束，会撞击腔体，其动能会被腔体吸收，转换成热能。在 ITER 中这部分热能会用来加热水，但是在以 ITER 为基础的原型核聚变电站中，热能将被转换为电能。

2060 年并入电网

目前，ITER 的搭建工作已经完成 60%。在运行前期，ITER 需经过非常精细的测试后，才能进入满负荷的工作状态。这意味着，如果 ITER 能按预期在 2025 年产生第一团离子体，到 2035 年时，它才能实现热核聚变供能。而原型核聚变电站将在 2040 年左右开始投入建造，预计大约在 2060 年并入电网。在此之后，研究机构会退居幕后，商业公司将有望成为热核聚变电站建设的主力。

比戈表示，“从第一口油井开采到实现石油的工业化，我们共花费了一个世纪的时间。而在技术上，热核聚变比石油要难得多。因此，我们还需要做很多事情，需要朝夕必争。”

ITER 作为一项国际合作项目，主要由七个成员（中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国）共同投资建立。项目一共涉及到了 35 个国家，其中，欧盟承担了 ITER 近一半的建设工作。在建成后，ITER 将成为世界上所有热核聚变项目的标杆。另外，ITER 并不是孤立的项目，另外有一个庞大的研究项目将为 ITER 和原型核聚变电站提供技术支持并且排除风险。比如，建设核聚变电站所需材料的研发和测试是国际热核聚变材料辐照设施项目（IFMIF）的一部分，而这个项目的工程验证正依据欧盟与日本间的广泛合作协议在日本进行。项目的成果之一——IFMIF-DONES（定向中子源）辐照设施可能会于 2030 年开始在欧洲运行。此外，位于英国的欧共体联合聚变中心（JET），也将成为 ITER 的重要材料和技术测试基地。JET



工人正在组装用于 ITER 的超导磁铁。

从 1983 年起开始产生等离子体，是目前最大的、处于运行状态的热核聚变托克马克装置。

与此同时，另一种热核聚变堆设计：仿星器（stellarator），也获得了技术支持。2016 年，德国的实验型仿星器“维德斯坦 7-X”（Wendelstein 7-X），首次产生了等离子体。热核聚变能源组织（主要管理欧洲国家对 ITER 的投入）的副主任朱昂 · 克纳斯特（Juan Knaster）认为，“最终，仿星器或许会在竞争中胜出，虽然目前它比托克马克装置落后了一代，但具有非常好的前景。将来的热核聚变反应堆可能会采用这种设计。”

极端材料

反应腔的建造材料是热核聚变研发计划的重点之一。在现在的背景下，还有许多挑战亟待解决。首先，ITER 腔体内的材料需对中子进行减速，将中子的动能转变为热能，因此必须具有极强的耐高温性能。其次，由于磁场并不能完美地约束等离子体，等离子体可能会与腔体接触，其中的高能中子会侵蚀材料，使等离子体被杂质污染，破坏热核聚变的持续反应。第三，材料会吸收放射性氚，从而也具有放射性。最后，等离子体的温度极高，可能会使周围的材料融化。

因此，找到合适的建造 ITER 的材料并非易事。科学家正在利用 JET 对这些材料在运行条件下的状态进行相关测试。最初在建造时，JET 的内壁使用的是碳纤维复合材料，但碳能与氚形成粉末，需要被不断清除。2011 年，科学家更换了 JET 内壁的材料，用金属铍制造了接触等离子体的内壁，并用金属钨制造了腔体底部排气系统上的偏滤器（一系列用来收集处于外壳层内的带电离子、保持等离子体纯度的滤盒）。

铍不仅具有优良的热学和机械性能，而且不会吸收氚。但在偏滤器中，一部分等离子体会接触到腔壁，耐高温的铍也会被融化。因此，物理学家选用了熔点最高的金属钨，用来抵抗等离子体的高温侵蚀。不过，金属钨在自然状态下很脆，因此需通过一些力学处理来增加其强度，并加入其它材料制成合金，防止钨在辐射的侵蚀下脆化。相关的研究都还在进行中。

大量的资源也被投入到 ITER 所用的磁铁的研究和设计中，它可能是世界上最大、技术最为复杂的磁铁之一。ITER 有三个不同磁力水平的主磁场：由围绕在反应腔周围的环形磁铁形成的，约束等离子体的磁场；环路之外的极磁铁产生的控制和维持等离子体的形状的磁场；真空室中央放置的螺线圈产生的磁场，用来产生强电流和加热等离子体。最后，还有一些矫正线圈，用来弥补磁铁在制造和安装时产生的微小瑕疵。由于需要产生极高的磁场（最高可达 13T），ITER 里的所有磁铁都由超导材料铌钛（NbTi）或铌三锡（Nb_3Sn）制成，在液氦条件下运行。

大量的挑战

许多工业和科研组织，正在参与制造 ITER 的成千上万部件。这一过程将能促进创新和各种技术的进步，在将来也许能应用在热核聚变之外的领域。

35 个参与国都参与了 ITER 部件的建造。当热核聚变能源被普遍应用时，这些国家将具有足够的技术储备。“一个极大的挑战是，一些通常在造船厂见到的巨型组件，需要在亚毫米级的精度下组装，”比戈评论道，“另一项挑战是集成化，我们需要将多种技术，如真空、磁场及传热等集合在一个装置中。最后的一个难题是 35 个参与国之间的工作协调。对此，我们正在采用透明的决策过程、深度的工作整合和缜密的日程计划等措施。”

目前，ITER 的 1000 多万个组件已经就位，等待着被组装。第一个 310 吨的环形轨道磁铁（来自日本）和第一个 440 吨的真空室（来自韩国），正在专门的运输中，预计今年可以到达圣保罗勒杜兰。一旦组装完成，ITER 将成为目前世界上最大的核裂变装置。

克里斯托夫·科赫是美国艾伦脑科学研究所所长、首席科学家。他还是《科学美国人》的顾问。



机器意识终会诞生？

有生之年，我们很有可能见证计算机达到人类的智能水平，但这是否意味着计算机将拥有意识？

撰文 克里斯托夫·科赫（Christof Koch） 翻译 程馨乐

计算机拥有接近人类的思维能力，这样的场景正逐渐走向现实。我们能真切地感受到机器学习算法愈发强大。在未来几十年，高速发展的科技将催生出与人类的语言和推理能力相媲美的机器，进而引发经济、政治及军事领域的重大变革。而强人工智能（true artificial intelligence）的出现将深刻影响人类的未来，关乎人类存亡。

以下两段文字就是典型的例子：

“自从人工智能取得重大的突破性进展之后，全世界的科学家一直期待着利用这种‘人工智能’推动技术的进步。但时至今日，即使是最复杂的人工智能程序，依然无法实现当时设定的目标。

“即便是现在，我们依然在今天的智能范畴内，探究新的人工智能程序能胜任哪些任务。目前，大部分人工智能程序还只能基于相对少量的数据，完成一些简单的决策和操作。”

以上两段文字是由语言机器人 GPT-2 写下的。其研发公司 OpenAI 位于旧金山，致力于研究那些能推动社会进步的人工智能技术。GPT-2 要完成的任务看起来很简单：根据提供的任意文本，预测后续的文本信息。在训练阶段，GPT-2 通过调节它模拟的神经网络的内部连接，实现对下一个词的最佳预测。经过 800 万个网页的训练，最终 GPT-2 内部的神经网络形成了超过十亿个连接神经元的突触。当我输入这篇文章开头的第一段文字，GPT-2 输出了接下来那两段话。GPT-2 输出的单词和语法都是正确的，而当我再次输入同样的文本时，它还能给出不一样的下文。

这种机器人继续进化后，可以生成引发社会热议的虚假文章和新闻报道。这会是继实时策略游戏（如星际争霸）、文本翻译、电影和图书的个性化推荐、图像和视频中的人脸识别之后，机器人可以胜任的又一个任务，而这些任务在之前被认为只有人类才能够胜任。

虽然机器学习算法一时半会还写不出像马塞尔·普鲁斯特（Marcel Proust）的《追忆似水年华》（*In Search of Lost Time*）那样的著作，但回想一下，最初应用在电子游戏、翻译和语音识别领域的机器算法明显缺乏专业技巧和润色技能，在早期表现欠佳。但随着深度神经网络的出现以及科技公司计算基础设施的逐渐强大，计算算法不断得到优化，它们的表现也不再显得滑稽可笑。如今，机器算法已经在围棋、国际象棋以及扑克等项目中击败人类选手，而我们对这些机器的看法已经由最初的嘲笑变成惊愕。

人工意识

尽管，专家还无法在“智能是由自然因素还是其他因素构成的”等基本问题上达成共识，但他们大都认同计算机早晚会具有通用人工智能（artificial general intelligence）。但只关注机器智能，就容易忽视两个问题：通用人工智能会有感知吗？可编程的计算机有意识吗？

“意识”或“主观感受”是指在任何一种体验中识别固有属性的能力，例如，能感受巧克力酱的美味，牙齿感



制图：热拉尔·迪布瓦（Gerard Dubois）

染时难以忍受的疼痛，无聊时度日如年的感觉，以及比赛前的昂扬斗志和焦虑。如哲学家托马斯·内格尔（Thomas Nagel）所言，如果一个系统能够感受到某件事物，我们就会认为该系统是有意识的。想象一下，当你意识到自己开的玩笑冒犯到别人时，你会感到尴尬，但计算机能够体验这种情绪吗？

毫无疑问，人类的智能和体验是大脑运行产生的必然结果，而非某种超自然力。这正是人类在过往几个世纪不断取得科学突破的前提。大脑只有 3 磅重，像豆腐一样柔软，却是目前宇宙中最为复杂的组织。但是大脑同自然界中的狗、树木、恒星等其他事物一样，遵循着相同的物理定律。虽然我们还没能完全理解大脑的运行机制，但我们每天都能感受到它。当我们观察颜色时，有一组神经元是活跃的；当我们感觉不舒服时，大脑皮层中有另一处细胞在放电。当神经外科医生用电极刺激患者的这些神经元时，他们会看到颜色或感觉开心。而当患者被麻醉时，他们大脑的这些功能都会关闭，所有的体验都将消失。基于这些已经被广泛接受的前提，随着强人工智能的进化，人工意识是否有可能出现？

机器是否能够拥有感知能力，还是重大的伦理问题。如果计算机能通过自己的感官体验生活，它们就不再是一种完全由人类掌控命运的物体，它们将能决定自己的命运。

目前对于这个问题，出现了两种截然不同的答案。《银翼杀手》（*Blade Runner*）、《机械姬》（*Ex Machina*）等小说和影视作品的思想是，真正的智能机器是有感知能力的：它们能够开口说话，进行思维推理、自我监控和反省，它们理所当然拥有意识。

我将这个方向称作“功能论”，它是全局神经元工作空间理论（global neuronal workspace，GNW）的典型代表。全局神经元工作空间理论是关于意识的两个主流理论之一，它从大脑出发，推测意识来源于大脑某些特有的构造特征。

这一理论的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代计算机科学的“黑板模式”。在这种模式中，特定的程序可以访问共享的信息库，即黑板或中央工作区。心理学家认为，大脑中存在这样一个处理信息的工作区，它构成了人类认知的核心。这个工作区的容量很小，因此在任何时候，都只能容纳一种感知、想法或记忆。新的信息会与旧信息竞争，并取代后者。法国法兰西公学院的认知神经科学家斯坦尼斯拉斯·德阿纳（Stanislas Dehaene）和分子生物学家让 - 皮埃尔·尚热（Jean-Pierre Changeux）都曾将这些机制对应于人类大脑最外层的灰质结构（大脑皮层）。大脑皮层是位于颅骨内左右两侧高度折叠的皮质区域，大小和厚度均相当于 14 英寸（35.56 厘米）的比萨。德阿纳和尚热提出假设：这种工作空间实际上是一个由海马锥体神经元构成的网络，连接了多个皮质区域，特别是前额叶、顶颞叶和扣带回的相关区域。

大量大脑活动是局部的，因而也是无意识的。例如，对于控制眼睛往哪里看、调节躯干和四肢姿势的大脑模块，我们无法觉察到它们的活动。但当我们看到一罐巧克力酱时，就像触发了开关一样，一个或多个区域的活动强度超过特定的阈值，产生能传遍整个神经工作区的神经兴奋。这种兴奋会主导一系列附带效应，如语言、行为规划、奖励回路、唤起长时记忆及存储短时记忆。这时，这种全局性的信息传播就会产生意识。当锥体神经元的信号传递至大脑运动规划区域，最终促使人们舀出一勺巧克力酱，这就构成了关于巧克力酱独特体验的前提。与此同时，其他模块会传递高脂高糖的巧克力酱引发的奖赏信息（多巴胺激增）。工作区的算法处理着相关的感官输入，运动输出以及与记忆、动机和期望相关的内部变量，在这样的全局处理过程中，意识诞生了。

机器的内秉因果力

另一种思路是集成信息论（integrated information theory，IIT），它采用更基本的方法来诠释意识。美国威斯康星大学麦迪逊分校的精神病学家和神经学家朱利奥·

精彩速览

不久之后，机器或将到达人类的智能水平，但它们可能不具有意识。

对人脑复杂的模拟，不会产生类似于人类对经历的感受，也将不会产生真正的意识。

机器要创造意识，它的内秉因果力不可或缺，并且这种力不能被模拟。

托诺尼（Giulio Tononi）是该理论的主要创始人，我和其他一些学者也做出了贡献。这个理论从体验出发，认为突触回路的激活决定了体验的“感觉”。集成信息是评价某种机制拥有多少“内秉因果力”的数学度量。神经元触发动作电位，通过突触影响到相连的下游细胞，就是其中一种机制。这就如同由晶体管、电容、电阻和导线组成的电路。

内秉因果力并不是虚无缥缈的概念，它能精确地评估任何系统。当前状态的特定起因（输入）与响应（输出）越明确，内秉因果力就越强。

集成信息论认为，任何具有内秉因果力的机制都具有意识，因为这类机制的状态既承接了过去，又会产生未来。一个系统的集成信息能力以非负值 Φ 表示，Φ 越大，则系统的意识越强。不存在内秉因果力的系统 Φ 取值为 0，它们不能感知任何事物。

由于大脑皮层神经元的异质性，以及输入和输出连接的密集重叠，大脑皮层内的集成信息值（Φ）非常高。目前用于临床的意识测量仪就受到这一理论启发。意识测量仪用于诊断患者是处于永久性植物人状态，最低意识水平状态还是具有意识但无法与人交流。而集成信息论检测到，对于可编程的数字计算机，其金属部件（即晶体管、导线及二极管这些实现计算的物理组件）层面上的内秉因果力及 Φ 的值都很小。

此外，无论处理器是在计算、缴税还是模拟大脑，Φ 值与处理器的运行软件无关。事实上，该理论证明两个执行相同输入和输出操作的计算机网络，由于采用不同线路配置，可具有不同的 Φ 值：其中一个可能为 0，而另一个为正数。尽管从外部看，它们可能一样，但其中一个网络能够感受到一些事物，另一个却可能如僵尸般没有任何感受。这种差异与计算机内部的线路有关。简言之，意识能感知存在，而非执行某些行为。全局神经元工作空间理论和信息集成论的区别在于，前者强调大脑在解释意识中发挥的功能，而后者认为大脑的内秉因果力才是意识存在的关键。从根本上说，前者关乎行为，而后者则关乎存在。

当我们观察大脑的神经连接组（即整个神经系统完整、精确的突触连接）时，这些区别就会自动显现出来。目前，解剖学家已经绘制了一些蠕虫的神经连接组。他们正在进行果蝇的神经连接组研究，并计划在未来十年内开展对小鼠的研究。将来，我们或许可以对拥有 10^{12} 个神经元和 10^{15} 个突触的人类死者大脑进行完整的超微结构扫描，从而在量子计算机等先进的计算机上成果模拟人的大脑。如果模型足够可靠，模拟出的大脑可以成为替代逝者的数字虚拟影像，能够说话、回忆，拥有渴望和恐惧等情绪。如果像全局神经元工作空间理论所认为的，模拟大脑的功能就能创造意识，虚拟人将拥有意识并在计算机中再生。

实际上，科幻小说中经常出现这样的场景：死者的神经连接组被上传到云端，他们能继续生活在数字化的来世中。但集成信息论对此的解读截然不同：虚拟人感受不到任何东西。它只是表现得像人类，但其实没有任何内在的感觉，是“深度伪造”（deepfake）的人类终极版。

要创造意识，大脑的内秉因果力是不可或缺的，并且这种力无法模拟，必须是基础物理机制的一部分。

为什么模拟不足以产生意识？要理解这一点，我们可以思考这些例子：气象学家可以在电脑上模拟出暴风雨，但它不会淋湿任何东西；天体物理学家可以模拟出黑洞巨大的引力，但他们无需担心自己被电脑模拟的扭曲时空吞噬。答案就是：模拟不具备因果力，不会导致大气中的水蒸气凝结成水，也不能导致时空扭曲。理论上，如果能基于人类神经系统结构的扫描图像构建出超越数字模拟的神经形态硬件，将有可能产生人类水平的意识。

除了关于模拟的争论之外，这两种理论还存在着其他差异。全局神经元工作空间理论认为，人类的感受依赖于拥有全局神经元工作空间结构的复杂大脑。而一些脑结构相对简单的动物缺少产生意识所需的特性。对于信息集成论而言，感受是集成系统的基本属性，即使是再简单的系统（如细菌），也可能会有感受。

机器是否能够拥有感知能力，还是重大的伦理问题。如果计算机能通过自己的感官体验生活，它们就不再是一种完全由人类掌控命运的物体，它们将能决定自己的命运。

扣人心弦的电视剧《黑镜》（*Black Mirror*）和《西方世界》（*Westworld*）就描述了机器人拥有意识后出现的困局。一旦计算机的认知能力达到人类的水平，它们势必会推动立法，谋求政治权利，比如不被抹除记忆、免于痛苦和退化的权利。另一种可能是，计算机依旧只是超级精巧的机械，像幽灵一样的躯壳内却没有人类最珍视的东西：有关生命本身的感受。

扩展阅读

What Is Consciousness, and Could Machines Have It? Stanislas Dehaene, Hakwan Lau and Sid Kouider in Science, Vol. 358, pages 486–492; October 27, 2017.
The Feeling of Life Itself: Why Consciousness Is Widespread but Can’t Be Computed. Christof Koch. MIT Press, 2019.
Is the Brain’s Mind a Computer Program? John R. Searle; January 1990.



精神疾病能够预测吗

神经退行性疾病或精神疾病已经严重影响了很多人的生活。如果能够提前预知，我们是否能够如愿阻止病情的发展？在《科学美国人》法国版的这篇文章中，作者试图讨论预测医学的前景和阻碍。

撰文　鲍里斯·肖梅特（Boris Chaumette）　翻译　邓艺杭

当爱丽丝（Alice）的孩子们得知50岁的母亲患上了早发型阿尔茨海默病时，精神遭到了极大的打击。一方面，他们得知母亲将很快失去记忆；另一方面，他们自己也需要面对一个艰难的抉择：是否要做相关测试，预判自己有多大概率面临同样的风险。

这段场景源自一部叫做《依然爱丽丝》（*Still Alice*）的电影，爱丽丝的三个孩子中只有两个做了测试。其中，安娜（Anna）也携带致病基因，她特别害怕自己的孩子以后也跟她一样，继承这种讨人厌的基因。

其实，给患者提供适应期也是预测医学的目标之一：当我们知道基因中携带定时炸弹时，我们会对家庭生活的投入，以及对子女的养育做出不同的选择。有时候，我们希望除去这个炸弹。DIAN（Dominantly Inherited Alzheimer Network，显性遗传性阿尔茨海默病组织）是一家国际性组织，他们正在推进相关试验，希望开发针对早发型阿尔茨海默病的预防性治疗方案。他们致力于减缓β- 淀粉样蛋白的积累，因为科学家一直怀疑正是这种物质引发了阿尔茨海默病。而在患者出现病症前，这种物质就已经在大脑中持续积累了。

与很多其他疾病相比，和遗传相关的疾病还是有明显的不同。在很多情况下，即便个体自身携带了一些会使他



鲍里斯·肖梅特是加拿大麦吉尔大学的研究人员，同时也是精神疾病和神经类疾病的医生。

们更易患上某种疾病的基因（我们称之为致病基因），要想避免发展出潜在的疾病，也不是完全没有可能。预测医学的目标就在于推迟病症出现的时间，减轻甚至完全避免疾病爆发。

预测疾病

近年来，得益于强大的基因测序技术，预测医学迎来了黄金时期。我们知道，具有遗传易感性的疾病数量众多，其中与载脂蛋白 E（apoE）相关基因的突变会引发很多病症。这个基因发生突变，不仅会增加迟发型阿尔茨海默病的风险，还与很多种精神疾病的产生有关（诸如精神分裂症、抑郁症、双相情感障碍、成瘾等）。针对双胞胎的研究显示，遗传因素在很多疾病中都表现出了强大的影响力。例如，当家庭中有一个孩子患有精神分裂症时，他的同卵双胞胎（基因完全相同）兄弟或姐妹会有 50% 的概率患病；如果是异卵双胞胎，则仅有 10% 的概率患病。

但是，精神疾病的发作机制非常复杂且难以预测，因为这也关系到我们的生活环境，关系到多种基因之间的相互作用。因此，在大多数情况下，我们并不确定一个易致病基因是否会真的导致疾病。这就是法国儿科学和遗传学家阿诺尔德·明尼希（Arnold Munnich）在他撰写的书籍《被编码却自由》（*Programmé mais libre*）中提道的。书中表示，“公众高估了遗传的作用，认为我们的命运是被记录在基因里的。其实不是这样的，我们的基因并不能完全控制我们的未来。”

当我们确定了一个风险因子时，我们应该做些什么？首先，我们要明确它不应该被用于精神疾病的产前筛查。就像之前提到的，这些疾病并没有全面地出现在所有存在风险的个体上。此外，这些疾病发作于不同的年龄，患者一生中很多时间都不会受到疾病困扰。而且，我们还可以通过许多手段来控制病情，例如心理治疗、抗抑郁药、抗精神病药……

从另一方面出发，就很多疾病的预防而言，识别风险因素具有十分积极的意义。因为有很多研究表明，我们的一些行为和生活习惯会改变患病的风险。例如，在青春期使用大麻会增加精神疾病发作的可能性。相反，在 2013 年发表的一篇综述文章中，加拿大心理学家乔治·马曼（George Mammen）和盖伊·福克纳（Guy Faulkner）指出，体育锻炼可以减少抑郁症的风险，即使每天做一些不那么剧烈的运动（步行 20 分钟之类），也能发挥很好的作用。

这一现象不仅存在于精神疾病中，对于延缓认知能力下降的现象，也有很多方法可以带来积极的作用。在 2015 年发表的一项研究中，瑞典卡罗林斯卡学院的米娅·基维佩尔托（Miia Kivipelto）及其团队设计了一个为期 2 年的项目，专门针对有患病风险的老年人（主要为携带载脂蛋白 E 突变基因的受试者，他们更易患上阿尔茨海默病）。该项目中包括健康饮食、体育锻炼以及多种电脑辅助的认知刺激训练。在训练结束后，受试者在几种能力（规划任务、记忆和执行速度等）的测试中，都比对照组表现好 40% ~ 150%。尽管我们还未证明这些训练对阿尔茨海默病的治疗是否有用，但患者已经可以从中看到减缓认知能力下降的希望了。

当我们可以通过家族既往病史和血液检查确定易患疾病，就能为每个人定制相应的预防计划，从而抵消基因带来的风险。即便疾病真的会发作，预测医学也能带来很多帮助，因为我们可以检测日常行为中的预警信号。在精神疾病中这一点尤为重要，因为越早治疗效果越好。2018 年 1 月，在《大脑》（*L'Encéphale*）杂志举办的大会上，法国卫生部长阿涅丝·比赞（Agnès Buzyn）也明确表示，希望发展这一领域中的早期治疗方案。

重视预警信号

2005 年，英国曼彻斯特大学的马克斯·马歇尔（Max Marshall）及同事指出，对于精神分裂症来说，发病后药物治疗介入的时间越晚，遗留症状就会越严重。现在，我们可以持续关注有患病风险的青少年，通过一些信号（想法奇怪、语言或思想混乱、回避社交等）检测他们的健康

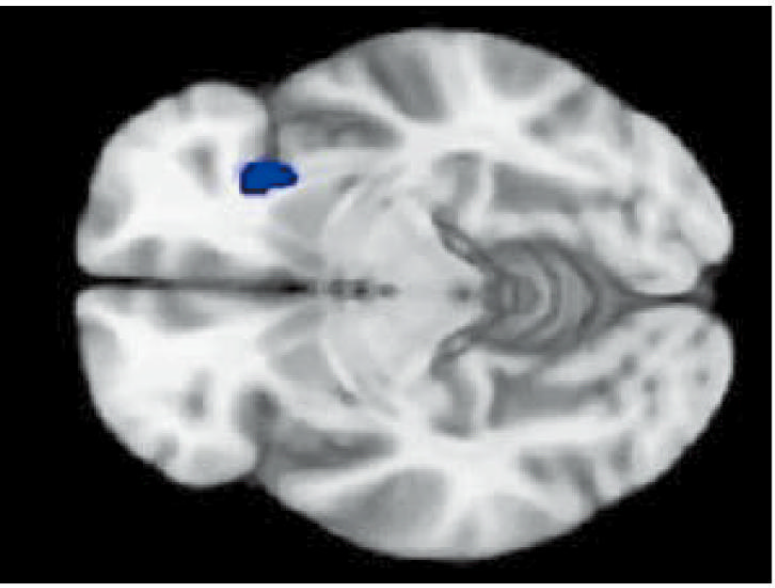
精彩速览

得益于DNA测序技术的发展，预测医学将能够预测我们是否会受到某些病症的困扰，比如早发性阿尔茨海默病。

不仅如此，预测医学还能够检测基因中某些疾病（尤其是精神疾病）的风险因子。

我们希望能让预测医学在不违反伦理的前提下，为患者提供个性化的疾病预防和早期治疗。

目前预测医学还处于研究阶段，我们还需要进一步研究清楚它对特定个体的治疗的效果和副作用。



根据脑岛区域（蓝色）的活动情况，我们能够预测出哪种治疗方法对抑郁症患者最有效。根据最近的一项研究，如果活动较弱，那么“认知－行为”疗法会更有效；如果活动较强，那么使用抗抑郁药会更有效。

状况，无需等到他们出现明确的症状（如谵妄、幻觉）后才介入。据科学家估计，有患病风险的个体中，三分之一会发展出精神疾病。预测医学的目标是建立专门的中心，为易患病青少年提供相关信息，以及心理和药物方面的治疗。在法国，一家位于巴黎圣安妮医院的青少年评估中心已经开始运营了。中心引入了很多用于早期精神症状研究的方法，包括“认知 - 行为”疗法，压力管理疗法等心理治疗手段。

有时我们也能在社交网络上发现一些预警信号。从 2017 年 3 月以来，脸书公司在美国测试了一个基于人工智能的自杀预警程序。程序会利用算法扫描用户发表的内容，检测可能预示着自杀的迹象，这些迹象也可能是其他联系人在评论中表现出来的。例如，出于担忧问候他“你还好吗？”如果有较高的自杀风险，程序会向脸书员工报警，员工会立即分析示警的内容。此时，员工可以向用户提供专业心理服务的电话，也可以联系用户的亲友或是当地政府，要求他们进行干预。

预测医学真的有用吗？

我们知道，治疗手段的效果因人而异，有时也可能存在严重的副作用。因此，我们希望预测患者对治疗的反应。具体方法包括通过提前分析患者的个体基因，在细胞培养的基础上测试药物敏感度，以及利用大脑成像的信息。

2015 年，美国索尔克生物研究所（Salk Institute for Biological Studies，位于加利福尼亚州，是一家独立的非营利科学研究机构）的杰罗姆·默滕斯（Jerome Mertens）和同事做了一项研究，分析了在治疗双相情感障碍时，为什么锂盐类药物并不总是有效。首先，他们从患者身上取下了皮肤细胞，将其转变为诱导多能干细胞，再将这些干细胞诱导为神经细胞。他们发现，这些神经细胞特别容易兴奋，而只有在患者的细胞对锂盐有响应时，锂盐类药物才能减缓这种过度兴奋。这也意味着，通过诱导患者的皮肤细胞，测试它们对药物的反应，就能确定这种药物是否对患者有效。

海伦·迈贝格（Helen Mayberg）是美国埃默里大学的教授，她所在的团队对大脑成像很感兴趣。研究过抑郁症患者的大脑图像后，他们发现，或许可以预测哪种疗法（“行为－认知”疗法或者是抗抑郁药治疗）对个体的效果更好。在静息状态下，当脑岛区域（大脑的岛叶，位于外侧深沟面）的活动较弱时，抗抑郁药效果不佳，“认知－行为”疗法更有效；当这一区域活动较强时，治疗效果则相反。

我们是否正在见证神经疾病的一场革命呢？就像肿瘤疾病中发生过的那样：医生可以对患者的肿瘤细胞进行 DNA 测序，从而判断哪种疗法更好。这很有可能就是正在发生的事。

但我们必须在伦理层面上监督这场革命。别忘了，曾经有研究试图从幼儿期的行为预测青春期的攻击性行为，而这引发了很大的争论。从科学角度来看，这种预测也是毫无根据的。人类在成长的过程中会经历叛逆和暴躁的时期，但是这些状况会在成熟后消失。此外，同一种性格特点可能以不同的方式表现出来，所以很难预测性格特点的具体社会影响：一个好斗的孩子并不一定会变成罪犯，其中一些可能在运动项目中找到自己的出路。因此，无论如何我们都不应该预先给人打上“罪犯”的标签。

尽管预测医学可以为易患病的个体服务，提供个性化的帮助，但是如果有人用这种方法控制社会，就会带来难以预估的危险。

扩展阅读

A. Sale, A systematic look at environmental modulation and its impact in brain development, Trends in Neuroscience, vol. 41,pp. 4-17, 2018.
B. Chaumette et al.,Génétique et épigénétique de la schizophrénie et des psychoses, Biologie aujourd’hui, vol. 211,pp. 69-82, 2017.
A. Munnich, Programmé mais libre, Plon, 2016.
D. H. Geschwind et J. Flint, Genetics and genomics of psychiatric disease, Science, vol. 349,pp. 1489-1494, 2015.



The truth of dreams

我们为什么会做梦

在长达五年的实验中，科学家探究了睡眠期间的大脑活动，从而确定了负责产生梦境的大脑区域。

撰文 弗兰切斯卡·西克拉里（Francesca Siclari） 翻译 冯盈哲



图片来源：Pixabay



弗兰切斯卡·西克拉里是瑞士洛桑大学医院的神经学家及睡眠医学专家。她领导的研究团队正在试图弄清，正常人的大脑以及睡眠障碍（失眠症）患者的大脑如何产生梦境。

梦从哪里来？为何我们的大脑能够每夜毫不费力地生成故事和图片？利用现有的技术，我们能够实实在在地记录下这些转瞬即逝的梦境吗？

当美国芝加哥大学的欧赫内·阿瑟林斯基（Eugene Aserinsky）与纳塔涅尔·克莱特曼（Nathaniel Kleitman）于上世纪 50 年代发现快速眼动（REM）睡眠之后，这些问题的答案似乎变得触手可及。当时，两位科学家通过在头皮、眼球附近和肌肉上放置电极（即通过脑电图、眼电图和肌电图）来记录大脑活动，首次观察到了一种特殊的睡眠阶段。在这一阶段，大脑神经元十分活跃，与清醒状态极为相似，因此这种睡眠也被称为“异相睡眠”。

另外，他们观察到，在大脑高度活跃的同时，眼球也会出现持续的快速移动。根据这种特征，他们决定用“快速眼动”（rapid eye movement）的英文首字母缩写 REM 来指代这一睡眠阶段。

这些发现激发了两位科学家的好奇心，他们叫醒了实验中处于 REM 睡眠阶段的自愿者，并询问他们在醒来之前是否做了梦。结果表明，有 74% 的自愿者记得自己做了梦。而在其他睡眠阶段（也被称为非快速眼动睡眠，或 NREM 睡眠），这一比例则降至 17%。因此我们也不难理解，为何研究人员在最初发表这些结果的时候，声称他们找到了“能够确定梦是否会出现以及出现频率的方法”。

谜点重重

这一非同寻常的发现使得许多科学家开始重复这项实验。他们意识到，与其询问自愿者们是否做了梦，不如问问他们“苏醒之前脑海中出现了什么”。这样一来，即使处于其他睡眠阶段，在 70% 的情况下他们也能得到有关梦境的答复。但如今我们已经知道，发生在 NREM 睡眠与 REM 睡眠中的梦境常常难以区分。

这一发现给睡梦研究领域带来了更多的谜团。与 REM 睡眠相反，NREM 睡眠中大脑的活跃度很低，在脑电图中显示的主要是平缓的波浪线，即低频的慢波。那么，大脑为何在活跃度如此不同的两个睡眠阶段都能产生梦境呢？

相关的解释层出不穷——有些研究者总结，大脑活跃度与做梦并无关联；有些人坚称梦并不发生在睡眠中，而是刚苏醒时思绪混乱导致的虚假记忆；还有一些人则怀疑 NREM 睡眠中产生的梦境由 REM 睡眠的入侵造成。

睡了还是醒着

由于这些不确定性，梦在科学世界被视作是一个模糊、有争议、难以甚至无法探究的话题。的确，探索梦的本质时会遇到种种阻碍，因为梦转瞬即逝，很快就会被人们遗忘，而且梦境的内容总是出人意料，难以用语言描述。由于以上原因，研究人员需要在夜晚唤醒自愿者，以便收集与梦有关的证据，但这对于自愿者和研究人员双方来说都不是什么愉快的经历。此外，还有技术层面的困难需要攻克。为了正确描述与梦有关的大脑活动特征，需要毫秒级的时间分辨率和精确的空间分辨率，来识别大脑不同区域的电活动。幸运的是，近年来取得的一些技术进步提高了我们研究睡眠的可能性。

高密度脑电图（high-density EEG）技术相较于传统的脑电图有了明显的改善，科学家能在一顶脑电帽上装配

精彩速览

梦的内在本质（转瞬即逝，且难以用言语表达）及技术问题（需要毫秒级的时间分辨率和精确的空间分辨率）都导致对梦的科学探索充满阻碍。

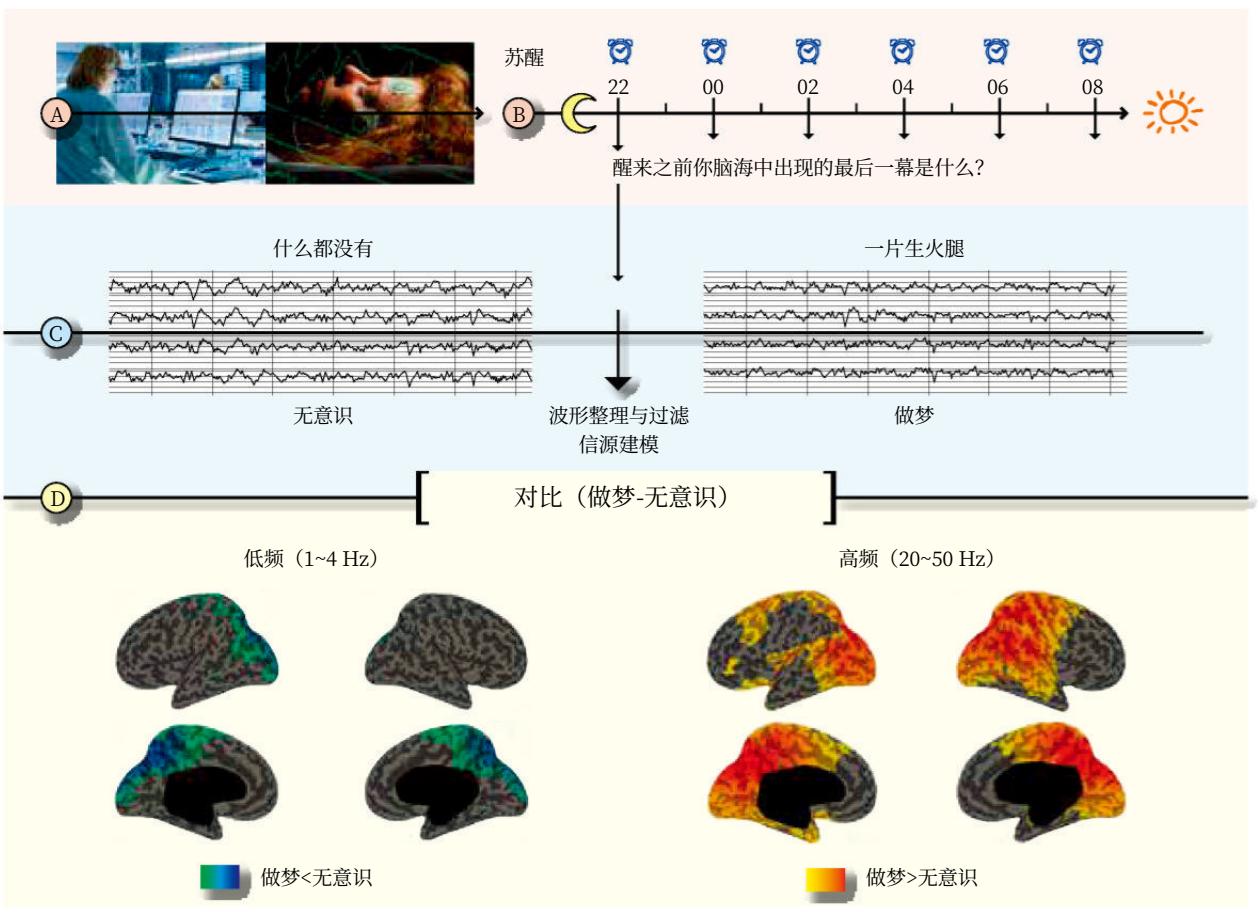
然而近年来，科学技术的发展提高了开展研究的可能性。本文作者与合作者通过实验，确定了一个与梦境是否产生有着重大关联的大脑神经区域。

除了阐明梦的本质，这项发现还为意识的研究及其临床领域提供了突破口。

解密梦的世界

在实验中，自愿者戴着脑电帽睡在床上，而研究人员在另一个房间观察脑电图的波形（图 A）。夜间，研究人员会利用警报器在不同的时刻唤醒这些参与者（图 B），然后通过对讲机询问他们：“醒来之前你脑海中出现的最后一幕是什么？”自愿者或者报告他们没有任何意识，或者对他们的梦境（梦中图像）进行描述。如果自愿者记得自己做过梦但想不起内容，那么这样的梦会被区别记录（也就是所谓的“空白梦”）。对波形进行过滤与整理后，紧接着的是一个叫做“信源建模”的过程（图 C），即对信息源头进行重建，旨在以图像的形式将大脑活动可视化。

图 D 显示了 NREM 睡眠状态下，做梦状态和无意识状态之间的对比。（图中为所有自愿者脑电图波形的平均值。上方图像是大脑的外侧图，下方是大脑的内侧图，左侧显示的是左脑，右侧显示的是右脑。）相较于无意识状态，做梦时后皮质热区表征睡眠的低频慢波（以赫兹或 Hz 为单位，蓝色）较少，大脑活动频率较高（黄色）。



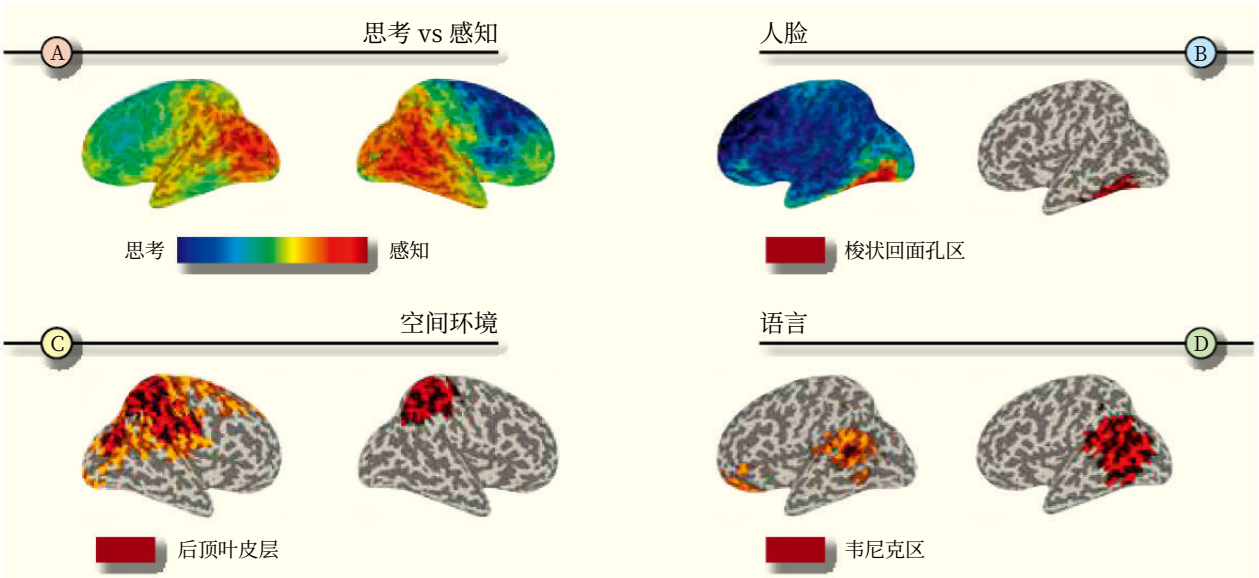
图片来源：Danilo Sossi; gorodenkoff/iStock; SPL/AGF; Siclari, F. et al. The neural correlates of dreaming. Nature Neuroscience 20, 872-878 (2017)

多达 256 个电极。除了能够达到出色的时间分辨率（毫秒级），该技术还能通过“信源模型”（source modeling），即利用数学算法计算出产生大脑活动的源头，实现大脑不同区域的电活动的高精度可视化。因此，在任何给定时刻，研究人员都能够通过高密度脑电图了解到，大脑皮层的哪些区域正处于活动状态。此外，脑电帽具有较高的舒适度，戴着它也可以在床上不受干扰地入睡。

近年来各种研究表明，同一时刻大脑各区域的睡眠状态并不一致，这引起了科学家极大的兴趣。尽管我们早就知道海豚大脑的两个半球是交替入睡的，但是人类的“局部睡眠”现象却是最近才发现的。利用诸如高密度脑电图和颅内记录等技术来近距离观察神经元之后，科学家发现，通常用于表征睡眠的慢波并不会在大脑的所有区域同时产生，而是局限于部分区域，而其余区域则观察不到。换句话说，在某些时刻，大脑的部分区域可以被认作是“清醒的”，而与此同时，其他区域却在“睡觉”。梦游就是一个“半

梦的内容

这些图像来自我们的实验结果，它们展示了在 REM 睡眠阶段与特定梦境内容相关的大脑活动（20~50 Hz 的高频活动）。和清醒时一样，在梦中我们思考时激活的是大脑前侧，感知事物时则会激活大脑后侧（图 A）。对比没有出现人脸的梦境，当梦里出现人脸时，清醒状态下负责人脸感知的梭状回面孔区会出现更多的高频活动（图 B）。梦里出现空间环境时（此时做梦者能够明确梦境发生在某环境内部或是外部），对视觉空间注意力有重要作用的右侧后顶叶皮层被激活（图 C）。如果做梦者在梦中听见他人讲话，这会激活大脑的语言感知区域，即韦尼克区（图 D）。



睡半醒”状态的极端例子，它发生在深睡阶段，梦游者虽然能够活动，但大脑并不完全清醒。

人类自身的生理条件也能让睡眠和清醒两种状态混合在一起。比如，当一夜的睡眠即将结束时，大脑的某些区域已经醒了，而其他区域仍表现为睡眠状态才有的慢波。这种差异性是否多多少少反映了梦的存在及其特质？

长达五年的实验

为了回答这个问题，在美国威斯康星大学麦迪逊分校的威斯康星睡眠与意识研究中心，中心主任朱利奥 · 托农（Giulio Tonon）和我们一起开展了一项宏伟的研究。我们招募了一批健康的自愿者，他们愿意分享自己的梦境，并同意睡在实验室里。研究的第一阶段，我们让自愿者回家睡觉，并要求他们记录下每次睡醒前脑海里的最后片段。一开始，他们发现很难回忆起最后一场梦境；但两周之后，由于不断重复深夜的任务，这些自愿者已经足够专业。于是，他们顺利进入了第二阶段的任务——在实验室里过夜。

实验是这样进行的：到了晚上，自愿者戴上高密度脑电图的专用脑电帽，然后进入一间没有窗户的隔音房间睡觉。这样一来，自愿者的睡眠不会被打扰，而且能保证实验始终在相同的条件下进行。研究人员在另一个房间里，观察计算机屏幕上自愿者大脑活动的波形变化。每隔 15~30 分钟，一名研究人员就会利用计算机发出声音以唤醒自愿者，并通过对讲机询问他们最近一次做梦的内容。

在长达五年的实验中，我们重复了近一千次唤醒过程，并记录下了数百条与梦有关的信息。自愿者描述的梦境五花八门，令人惊叹——与朋友的对话、一个抽象的想法、佛祖腹部的清晰图像、某人面孔的模糊记忆、电影般复杂的长篇故事的最后一幕……但有时，自愿者报告他们没有做任何梦，就好像从完全无意识的状态中醒来。并且，这种情况不单单发生在深睡阶段，也会发生在 REM 睡眠阶段。

这些观察为我们研究与意识相关的大脑活动提供了独特的机会。梦可以被视作意识的一种特殊表现形式，会在我们与外界失去联系时出现。做梦时，大脑可以在不受环境刺激的情况下创造一系列画面。尽管梦境是虚构的，但梦中的经历与我们白天清醒时的经历有诸多相似之处——

图片来源：Danilo Sossi; Siclari, F. et al. The neural correlates of dreaming. Nature Neuroscience 20, 872-878 (2017)

梦中我们也会看见图像、听见声音，也会思考和感受情绪。在睡眠过程中，有时大脑会陷入无意识状态，因此我们可以参照意识活动进一步了解大脑是如何在睡眠中运作的。换句话说，我们能够研究与意识相关的大脑神经元。

关键的大脑区域

对比做梦时的大脑活动和从无意识状态醒来前的大脑活动，我们可以发现做梦的时候，大脑低频活动少，高频活动多。这种差别并不是普遍存在，而仅仅出现在被称为“后皮质热区”（posterior cortical hot zone）的大脑后侧区域。它包含视觉区及其他区域（如楔前叶和后扣带回），能够将不同形式的感官体验整合到一起。实验结果显示，要在睡眠时产生意识，并不需要激活整个大脑皮层。产生梦中意识的后皮质热区实际上是一个相对狭窄的区域。

另一大惊人之处在于，无论是在 NREM 睡眠中，还是在 REM 睡眠期间，做梦都与后皮质热区的激活有关。这一现象首次向我们解释了，为什么在大脑活动特点十分不同的两个阶段我们都有可能做梦。换而言之，梦的形成不需要全脑的参与，而仅需要激活后皮质热区这一特定区域即可。当自愿者明确记得自己做过梦时，即便他们想不起梦的内容，后皮质热区内的低频活动也比高频活动少。这似乎表明，后皮质热区中慢波的变化决定了梦是否存在，但无法决定我们能否记住梦的内容。我们观察到，与被遗忘的梦不同，当大脑多个区域被激活时，梦才会被记住。

除此之外，我们还观察到，在 REM 睡眠阶段，某些梦的内容与大脑特定区域的激活紧密相关。与之相似的是，如果大脑在清醒阶段感知相同的内容，这些区域也会被激活。举个例子，当自愿者梦到人脸的时候，梭状回面孔区会被激活，而在清醒状态下感知人脸时也是如此。尽管这一切看起来似乎理所当然，但却是科学界迈出的重要一步：它表明梦境反映了睡眠中产生的种种经历，因此梦并不像许多学者所认为的那样，只是苏醒时产生的虚假记忆。

在最近的一次实验中，我们想弄明白是否有可能实时预测自愿者的梦境。在监测自愿者后皮质热区的活动时，只要 NREM 睡眠阶段中高低频活动的比例超过一定数值，我们就会把他们叫醒。如果高频活动远超低频活动，我们就会猜测自愿者正在做梦。通过这种方法，我们在预测自愿者是否做梦时，能够达到 87% 的正确率。

梦境重现

我们的研究成果解开了睡梦研究领域内的许多谜团，但却也引发了其他问题：是否有一天，后皮质热区能帮助我们预测，一个人在睡眠状态或其他非清醒状态下（例如昏迷或全身麻醉时）是否具有意识？后皮质热区是如何被激活的？出现在梦境中的图像是如何被决定的，其功能又是什么？我们有可能预测梦的大部分内容，甚至是整个梦境吗？

曾有科学实验尝试回答这些问题。日本奈良先端科学技术大学的神谷之康（Yukiyasu Kamitani）等人于 2013 年在《科学》（*Science*）上发表的一项研究表明，也许我们很快就能实时查看梦的内容。通过激活视觉区域（也包括后皮质热区）和运用机器学习技术，神谷的研究团队在自愿者入睡后利用核磁共振成像（MRI）成功破译了他们的梦境，并以视频的形式进行了重建。

其中一段视频展现了一系列与信件、数字和书法有关的图像，然后自愿者解释了自己的梦境：“我记得自己看到了一些字。梦里出现了一个类似于信纸的东西，可以在上面写字。我看了信纸上的字，是黑白的，并且除了这张信纸周围什么都没有。在那之前我还观看了一场电影，电影里有一个人，但我记不清楚了。”这个例子表明，基于人工智能的发展，我们或许可以预见睡着后梦境的大致内容。

随着数据分析技术的进步，也许在不远的将来，我们能更容易地获取不同的睡眠阶段甚至清醒状态下的类似视频资料。这样的进步不仅可以满足我们想解读梦境与思想的好奇心，而且有更重要的临床意义：比如将经历过脑部创伤、无法对刺激做出反应的病人脑中发生的事情可视化，或许有助于医生判断病人是具有意识、还是处于昏迷状态，从而制定更好的治疗方案。这些数据还有助于我们理解大脑是如何生成自己的现实世界的：与清醒状态下的外部现实世界相比，脑海中的现实（如梦境）有什么不同？当脑海中的现实与我们感知到的外部世界发生冲突时（如患有幻觉症的精神病患者），又会发生什么？或许与梦有关的科学研究能够提供一个新的出发点，尽管目前的发现仍不足以回答此类问题。

扩展阅读

The Neural Correlates of Dreaming. Siclari F., Tononi G. e altri, in «Nature Neuroscience», Vol. 20, n. 6, pp. 872-878, giugno 2017.
Local Aspects of Sleep and Wakefulness. Siclari F., Tononi G., in «Current Opinion in Neurobiology», Vol. 44, pp. 222-227, giugno 2017.
Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. Horikawa T., Kamitani Y. e altri, in «Science», Vol. 340, n. 6132, pp. 639-642, 3 maggio 2013.
La decifrazione dei sogni in tempo reale: **http://is-edge.naist.jp/Edge/2014/02/neural-decoding-of-visual-imagery-during-sleep.**

fire tornadoes

燃烧的龙卷风

龙卷风的破坏力已经十分惊人，燃着熊熊大火的火龙卷更让人惧怕，它的最高温度可以达到 1482° C，持续时长也经常在 1 个小时左右。

撰文 杰森 · M · 佛瑟夫（Jason M. Forthofer）　翻译 杨玉洁　审校 吴子牛



图片来源：斯潘塞·洛厄尔（Spencer Lowell）



杰森 · M · 佛瑟夫是美国林务局密苏拉火科学实验室的消防员和机械工程师。他主要关注野火相关的传热和流体动力学过程，研究方法包括现场观测，实验室模拟以及计算模拟。

随着飞机缓缓降落在美国西部的梅德福地区，我们被一团烟雾包围了，这片烟雾覆盖了俄勒冈州西南部和加利福尼亚州北部。当时是2018年7月下旬，整个地区发生了多起重大火灾。我正要加入加利福尼亚州林业和消防局的一个小组，调查两天前的一起致命事故。组长在电话里提起的那件事，让我倒吸了一口凉气："一名消防员在火龙卷中丧生，他的消防车被甩到了上百米外。"

或许我比任何人都清楚，这一天会总会来临。10 年前，我第一次见识到了火龙卷的威力。这个直径约 300 米的庞然大物从加利福尼亚印第安区的一场大火中窜了出来，掠过了一群前去灭火的消防人员。一位幸存者告诉我：风大得好像在齐胸深的水中奔跑。幸运的是，这些队员站在一条双车道公路上，这让他们幸免于难。假如他们在 3 米外的树林和草地之间，可能当时就已经遇难了。当我抵达现场时，四周铺满了大量橡树的残枝，碎石子也满地都是。

这一幕让我印象深刻，同时也让我忧心忡忡。显然，即便消防员在通常认为是安全的地区避难，火龙卷也会伤害到他们，这次他们只是幸运地逃过了一劫。在美国，有很多消防员都见过火旋风，那是一种像尘卷风一般大的旋转火柱，大家一般不会认为它有多危险。但是，火焰与龙卷风结合在一起的火龙卷则十分少见，这种破坏力惊人的现象几乎是一种传说。即使像我这样从 1996 年起就加入消防队伍，研究火灾行为长达 8 年的人，也只是在之前听说过一次，还是一位消防老手告诉我的。

一回到蒙大拿州的密苏拉火科学实验室（Missoula Fire Sciences Laboratory），我就赶紧做了一次文献检索。结果我只发现了一些粗略的报告，记录了全世界范围内为数不多的几次火龙卷。关于这个主题的信息太少了，以至于科学家还没有对"火龙卷"的定义达成一致。大型森林火灾会在高海拔地区产生所谓的高温积雨云（pyroCb）。这些电闪雷鸣的云层是由植物在大火中燃烧时释放的水分、大气中的水汽以及燃烧本身的副产物凝结而成的。有研究人员提出，只有那些向上连接到高温云层的火焰旋涡才是火龙卷。如果根据这个定义，就只有一次火龙卷记录在案。2003 年，澳大利亚堪培拉附近曾发生过这样一起火龙卷，它的破坏路径长达 24 千米。

然而，这条定义限制太多，对消防员没什么用。我和同事布雷特 · 巴特勒（Bret Butler）把火龙卷定义为具有龙卷风般风速的火旋风。随后，我们用这条定义整理了能够找到的所有记录，并将其纳入了消防员培训手册和课程。现在，我正驱车南下，前往加利福尼亚州的火灾现场，调查一名消防员在火龙卷中遇难的事件——这也是我一直试图阻止发生的悲剧。

卡尔火龙卷

现场看起来就像战区。不管是著名的龙卷风专家乔什·沃尔曼（Josh Wurman，受我聘请，前来参与调查的）还是我，都没有见过这么惨烈的现场。整栋房屋都被掀起或者被夷为平地，只剩下地基；屋顶和其他碎片散落各地，车辆在地面上不知道翻滚过多少次；树木被折断或者连根拔起，飞扬的沙石剥落了它们的树皮；三座高约 30 米的

精彩速览

火龙卷是一种相当罕见而又十分危险的气象现象，它同时拥有龙卷风一样的速度和正在燃烧的火焰。发生在美国雷丁市附近的卡尔火龙卷就造成了4人死亡。

除了火本身，火龙卷的形成还需要大气中的旋转源。火可以把涡量集中到旋转的空气流中，使其"站"起来。

科学家非常清楚火龙卷的物理机制，但他们还不能预测它将于何时何地出现。



蒙大拿州密苏拉火科学实验室内，旋转空气流入一片燃烧酒精的地面，形成了一个火旋涡。

金属电线塔都被吹倒了，其中一座甚至被抬离基座，飞出300 多米远；12 米高的一座集装箱被吹开；一根钢管缠绕着已经倒塌的电线杆……

我们估计，当时的风速可能已经达到每小时 260 千米。这一速度属于增强藤田级别（Enhanced Fujita scale，将龙卷风分为 0 到 5 级，其中 5 表示速度最快和破坏性最强的龙卷风）中的 3 级龙卷风。在加利福利亚州，只有 2 次记录在案的常规龙卷风达到了这一强度。根据雷达成像，这次的火龙卷底部宽约 300 米，高约 4800 米。在火龙卷内，燃烧的最高温度可以达到 1482° C。这场龙卷风至少持续了 40 分钟，在这段时间里，它在地面上缓慢移动，留下一条近 1600 米长的毁灭之路。

我们的团队不仅采访了目击者，还收集了视频证据，希望能从事件中吸取教训。火龙卷是在 2018 年 7 月 26 日的晚上发生的，诞生于雷丁西北部数平方千米的森林火灾中。此前，大火范围如此之广，强度如此之大，以至于在 5 千米以上的高空产生了高温云团。下午 5 点 30 分左右，大火突然向东蔓延，杀死了消防推土机司机唐 · 史密斯（Don Smith），以及一位被迫在家躲避的平民。

当野火接近雷丁市郊时，它产生了许多火旋风，并将余烬抛撒到了萨克拉门托河对岸 2 千米左右的地方。这些小火苗在两条死胡同的尽头引发了几起小型或者说孤立的火灾。当消防员试图疏散附近的居民并拯救房屋时，他们自己的逃生路线却被切断了。当时场面一片混乱，人们真的是在逃命。

大约晚上 7 点 30 分，前往现场帮忙的消防员杰瑞米·斯托克（Jeremy Stoke）刚到现场。很明显，火龙卷已经在路上形成了，而斯托克刚好撞上了这个把居民和消防员都困在各个小区的庞然大物。在强风把他的卡车卷起之前，他用无线电发送了求救信号。然而，他的车被甩到了近百米外的一颗树上。救援人员在几小时后发现了斯托克，但他已经死于严重的外伤。

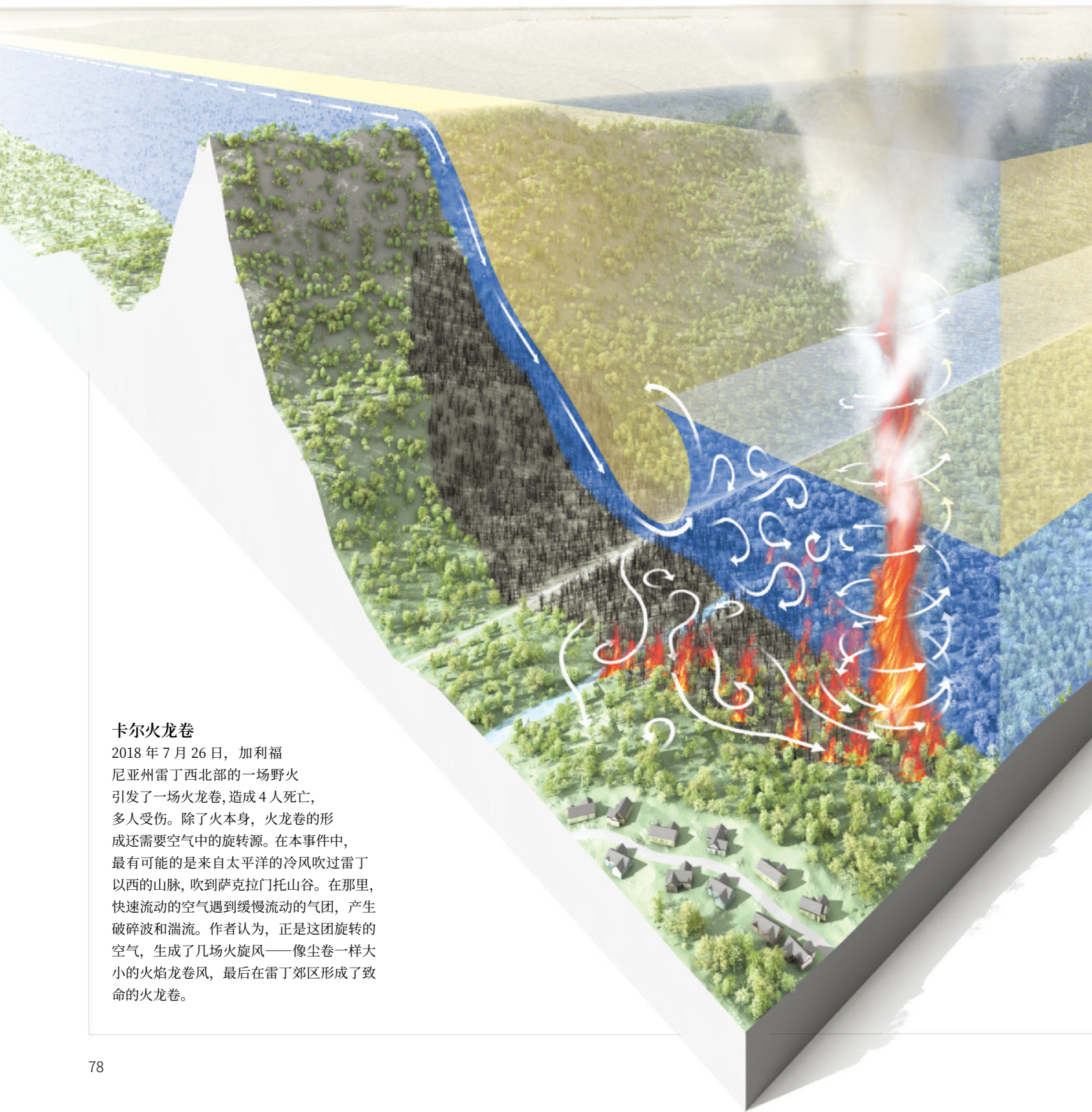
有两辆加利福尼亚消防局的消防车在公路上行驶时，被飞来的碎石片砸中了，车窗大部分被砸碎。奇怪的是，尽管两辆车相距仅 50 米，朝着同一个方向行驶，但其中一辆卡车主要是驾驶员侧受损，而另一辆则是乘客一侧受损。这暗示了气流正在不断旋转。当时，居民们挤在地板上，以防被碎片击中。附近三台推土机的车窗也被砸碎，一位操作员眼里扎了好多玻璃碎片，另一名操作员的手已经被严重烧伤。那时，还有一位已经退休的警官正在开车，当他意识到底盘着火后，就把车停了下来。他幸免于难，但呼吸道被烧伤了。最让人心痛的，是在旋转烈焰的边缘有一座房子被烧毁了，里面有两位孩子和他们的曾祖母。

重建现场

从这些悲惨的案例中，我们能学到什么？我们能否预测火龙卷的发生时间和地点，以便及时疏散居民和消防员？到底是什么引发了火龙卷？

野火龙卷风

火龙卷是一种极其罕见但又极具破坏性的气象现象，它拥有旋转的火柱和烟雾，同时还有与龙卷风相当的风速。火龙卷的持续时间非常长，甚至可以从主火场中旋移出来，这让消防员和很多人都大吃一惊。它们可以吞吸地面正在燃烧的木头碎片，并将其抛撒到很远的地方,引发难以预测的新火点。尽管研究人员很清楚火龙卷的物理机制,但仍然无法预测它将于何时何地出现。



卡尔火龙卷
2018 年 7 月 26 日，加利福尼亚州雷丁西北部的一场野火引发了一场火龙卷，造成 4 人死亡，多人受伤。除了火本身，火龙卷的形成还需要空气中的旋转源。在本事件中，最有可能的是来自太平洋的冷风吹过雷丁以西的山脉，吹到萨克拉门托山谷。在那里，快速流动的空气遇到缓慢流动的气团，产生破碎波和湍流。作者认为，正是这团旋转的空气，生成了几场火旋风——像尘卷一样大小的火焰龙卷风，最后在雷丁郊区形成了致命的火龙卷。



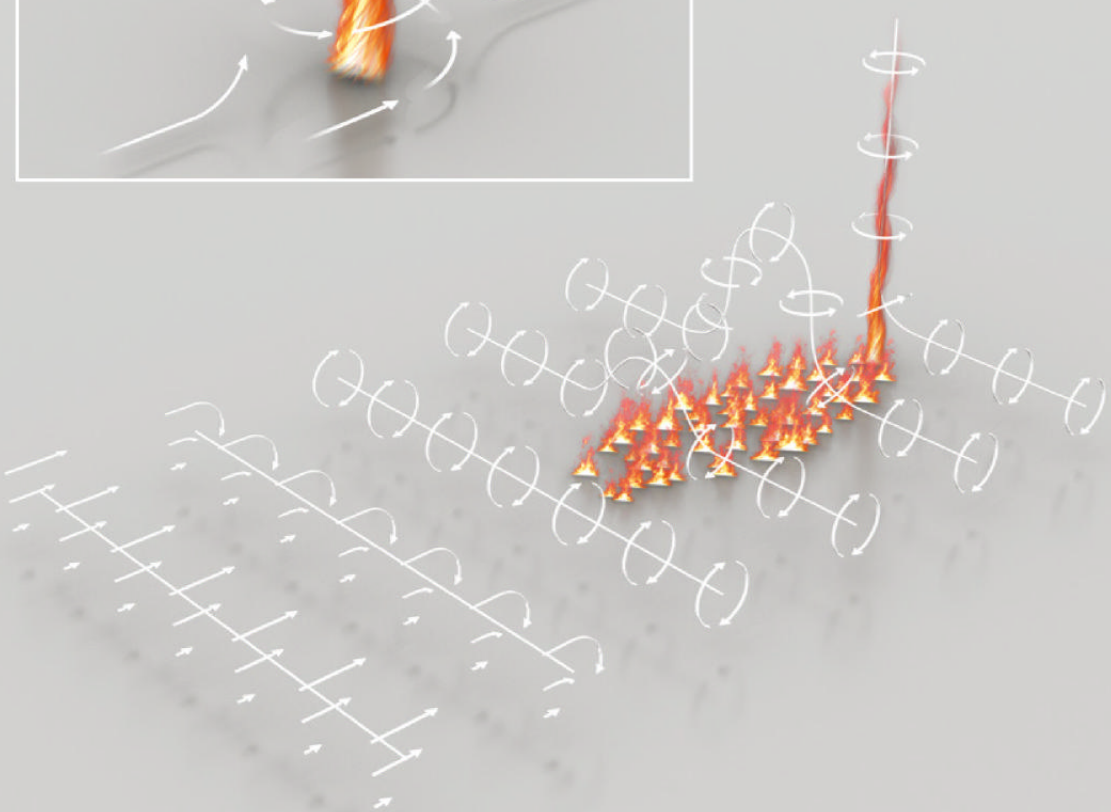


实验室内的火旋涡

实验室内生成的小尺度火焰旋涡揭示了火龙卷的物理机制。例如，其中燃料燃烧的速度比不旋转的火焰快几倍，并且它们非常擅长保存能量，这使得它们相当持久。

加速

形成火龙卷所需的旋转动量可能有不同的来源，包括风在地面上拖曳。由此产生的旋涡是水平的，但是野火生成的热空气会向上流动，拉动一个（或多个）气流向上。火焰中的燃烧气体加热空气，使其加速向上，并将火旋风拉伸成为一根细长的管子，就像滑冰者收起他的手臂，而当旋涡变细长时，旋转便会加速，直到形成一条高高的、紧密旋转的火柱。



制图：Bryan Christie Design

要回答这些问题，首先需要回顾历史。1871 年，美国威斯康星州的一个城镇被毁，从散落各地的碎片（包括房屋）来看，很有可能就是毁于火龙卷。在 1964 年时，加利福尼亚州的波罗大火引发了一场火龙卷，造成 4 人受伤，2 栋房屋、1 座谷仓、3 辆汽车和 1 个牛油果园被毁。最可怕的一次发生在二战期间，当时德国汉堡的燃烧弹爆炸事件引发了火龙卷：根据美国地理学家查尔斯 · 艾伯特（Charles Ebert）的说法，由此产生的火龙卷达 3 千米宽，5 千米高，4 万多平民在大火中丧生。

1923 年，日本东京发生了一场大地震，破坏了城市电网线路，同时引发了一场火灾。随着火势从一栋建筑蔓延向另一栋建筑，居民们被迫疏散到建筑物之间的空地上。恰恰就在这个地方，形成了一场火龙卷。短短 15 分钟内，38 000 人失去了生命。半个世纪以来，人们只能接受这样一种解释：一场普通的龙卷风恰好与大火发生在相同的时间和地点。但是，20 世纪 80 年代和 90 年代，美国肯塔基大学的工程师 S·相马（S. Soma）和 K·斋藤（K. Saito）利用历史记录构建了火灾现场的小型模型，再现了当时火灾所处的立体环境和周围的风势。在实验中，他们确实重现了火灾现场的旋涡。实验证明，当初的火龙卷并不是一个巧合，而是由火灾本身引起的。

20 年前，美国林务局南方研究站的乔治·拜伦（George Byram）和罗伯特 · 马丁（Robert Martin）在位于佐治亚州梅肯的实验室中制造了小型的火旋风。相马和斋藤的工作就建立在这项开创性的工作的基础上。当时拜伦和马丁的设备非常简易，由一个小圆形酒精池组成，墙壁都是圆柱形的，上面有竖直的裂缝强迫气流以旋转的方式进入酒精池中。结果十分明显，与不旋转的火焰相比，由此产生的火旋风使燃料燃烧和能量释放的速度快了 3 倍。旋转的气流通过将火焰推向酒精的表面，使整体升温，从而加快了燃烧速度。随后的研究发现，在这样的火灾中，能量释放率可以提高 7 倍。

野火中的旋涡和火龙卷也表现出了一些相似的特征。一块加热的木头会产生数百种不同的可燃气体，气体燃烧又会产生火焰。火龙卷中强烈的水平旋转气流会迫使火焰向周围的植被蔓延，使火势更加迅猛。

1967 年，哈佛大学的霍华德 · 埃蒙斯（Howard Emmons）和英舒静（Shuh-Jing Ying，音译）设计了一种实验，用一个以不同速度旋转的圆柱形金属网包住了一个固定的火源。旋转金属网就可以使火源上的火焰也跟着旋转，使得内部的气流旋转起来。研究人员测量了火旋风的速度和温度分布，了解内部的运行机制。他们发现，除了火焰本身，要形成这种旋涡，还需要一个旋转源和一种强化机制。



2018 年 11 月，加利福尼亚州约巴林达县的科罗拉大火产生了一个危险的带火焰的旋涡，甚至可能是火龙卷。

火龙卷的流体力学性质应该与这项实验表现出的一样。无论是绕山旋转还是沿着地面拖拽的气流，或是由密度和压力变化引起的气流，常常会在大气中引起强烈的旋涡。而火焰本身还有另外两个重要的功能：它会将旋转效应集中在一处，使自身向上竖直起来，因此形成紧密的空气柱，围绕竖直的轴不断旋转。

首先，火焰上方的热空气不断向上升腾，这需要在底部吸入周围旋转的空气填补空缺。原本周围的部分漩涡可能是以水平轴方向旋转运动的，一旦被吸入火流，上升的热流就会快速将旋转轴扭转到竖直方向。第二，虽然上升的空气在地面附近启动旋转时速度相对缓慢，但随着其中的气体不断燃烧，整个节奏也会快起来。旋涡附近的气压迫使核心内更热更轻的空气向上流动。不断加速的旋转过程会竖直拉伸火旋风（或者说已经是火龙卷），让火旋风的直径变得越来越小。整个过程就像将面团拉开，形成了一道细长的柱状体。在角动量保持不变的情况下，直径减小了，因此空气柱的旋转速度就会越来越快。这就像滑冰场上正在旋转的选手，当选手将手臂收回来时，旋转就会加速。

看起来，当火旋风（或者火龙卷）在燃烧区域上方移动时，它会延伸到相当高的高度，并变得更紧致，旋转速度也更快；如果它在已经燃烧殆尽的区域上方移动时，就会扩散并且减速，成为弥漫的烟柱。有时，旋转体又宽又慢，消防员可能都无法察觉内部的情况。火龙卷在地面上的运

动方向可能取决于周围的风势和地形变化，但具体是怎么影响的，我们还不太清楚。

埃蒙斯和英舒静还发现，火旋风非常擅于保存旋转能量，使它们可以持续得更久（这对人类而言，非常不幸）。例如，印第安火龙卷持续了大约 1 小时。当火龙卷旋转起来时，径向的两个相反方向的作用力加强了：离心力将旋转的空气往外扯，但内核的低压却将空气往里拉。由此产生的平衡限制了空气在径向上的运动，从而避免了涡流能量的损失。与此相反，如果火焰没有旋转起来，它与周围大气的能量交换就会达到旋转火焰的 10 倍左右。这一机制也使火旋风比不旋转的火焰更细长更高，因为除了底部，火焰接触不到空气，所以必须窜得更高，才能接触到足够燃烧的氧气。

同样危险的，是高耸的低密度热气体会使火旋风的底部的气压降低。靠近地面的阻力减缓了旋转，减少了向外推动空气的离心力。然而，在低压环境下，向内挤压的压力依然保持不变，因此靠近地面的空气会被吸入火龙卷。最终，火龙卷就变成了一个巨大的“真空吸尘器”，不断吸入空气，燃烧各种碎片，促使燃烧着的碎片迅速上升，然后在高处向四周喷射火苗——显然，这可能会引发难以预测的起火点。

实地勘探

尽管我们已经知道了与火龙卷相关的很多物理机制，但我们仍然无法预测它会在何时何地发生。当然，有一件事是明确的：尽管一个体积巨大、燃烧剧烈的火焰可以聚集和旋转，但火龙卷依旧十分罕见，因为它能够出现的关键因素还是取决于一个强大的旋转源。

从我们研究的案例中可以发现，最有可能形成火龙卷的地点之一是山的背风坡。从山上吹来的风会在背风坡引发旋转运动，就像河流中的一块大石头会在周围引发漩涡一样。在那里，燃烧的火焰最有可能聚集，拉伸成火龙卷。但事实却复杂得多：炙热的旋涡也会出现在平坦的地面和平静的风中。比如，美国堪萨斯州曾发生过一场火龙卷，当时的大火遭遇了一场过境的冷锋，而冷锋与周围的暖空气碰撞时，恰好产生了火龙卷。2007 年，清华大学的周睿和吴子牛的一项研究表明，多个火焰呈特定形态时，会在火焰狭缝中诱发平行于地面的切向气流，从而引发旋转。这种多火焰形态还可以在大火中将余烬抛撒到前方，产生新的火种。

那么，卡尔（Karr）火龙卷的旋转是如何形成的？鉴于火龙卷之前发生过几场火旋风，因此该地区明显存在异常高的旋转气流。出于直觉，我让密苏拉火科学实验室的同事娜塔莉 · 瓦格布伦纳（Natalie Wagenbrenner）对当地的气象条件做了几次计算机模拟。她的研究结果表明，来自太平洋的空气会越过雷丁以西一座山脉的顶部。这股空气凉爽而稠密，比萨克拉门托山谷的热空气要重得多。我们调取了雷丁机场当天的最高气温，当时已经达到了创纪录的 45° C。因此，重力会使冷空气向山下加速流动，就像水流下山一样。奇怪的是，这些强烈的地面风突然停在了火龙卷形成的地方。

发生了什么？最后，我意识到大气中发生了水跃（hydraulic jump），就是水从大坝下面的溢洪道流下时发生的情况。当快速流动的水冲到下方的低速水池时，表层水会向上跳跃，形成一个破碎波（breaking wave），破碎波会停留在原地并成为两个水流之间的边界。这个区域内含有强烈的旋转运动。与之相似，寒冷而稠密的空气从山坡上飞驰而下时，会撞击萨克拉门托山谷内缓慢移动的空气团，从而产生强烈的旋转，形成卡尔火龙卷（见图示）。内华达大学的 N · P · 拉鲁（N. P. Lareau）和同事在 2018 年的一份报告中推测，即便火龙卷已经形成，10 千米上空的高温云层还是有助于将旋涡拉伸到更高的地方，从而使漩涡变拉伸得更细长，旋转也更剧烈。

如果加利福尼亚州的野火愈发频繁，我们很有可能在未来更频繁地经历这种致命的气象现象。好消息是，从研究中吸取的教训或许有助于在未来预防悲剧再次发生。我希望，在进一步研究火龙卷的同时，天气预报和计算机模拟的技术也在不断进步，这让我们有机会在不远的未来提前发布火龙卷预警，从而拯救更多的生命。

本文审校　吴子牛是清华大学航天航空学院博士生导师，研究方向主要为流体力学。

扩展阅读

Fire Whirls, Fire Tornadoes and Firestorms: Physical and Numerical Modeling. Robert N. Meroney in Proceedings of PHYSMOD 2003: International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena. Edited by Giampaolo Manfrida and Daniele Contini. Firenze University Press, 2003.

Vortices and Wildland Fire. Jason M. Forthofer and Scott L. Goodrick in Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Volume 1 for Fire Managers. Paul A. Werth et al. U.S. Forest Service Pacific Northwest Research Station, November 2011.

Predicting Wildfires. Patricia Andrews, Mark Finney and Mark Fischetti; August 2007.



动物毒素：从杀人到救人

过去，动物毒素一直威胁着人类的生命，但到了今天，这些致命毒素正在变成药物的来源。

撰文 克丽丝蒂·威尔科克斯（Christie Wilcox）　翻译 阳曦

死亡是促使我们关注有毒动物的第一驱动力。只要一想到没有四肢的蛇和脆弱的蜘蛛竟然能够战胜聪明强壮的灵长目动物，我们就会觉得既荒谬又可怕。不过，事情开始发生转变了。有毒动物也许会成为生命的守护者。

说到置人于死地，有毒动物远远比不上那些杀人如麻的疾病。每年死于心血管问题、糖尿病、癌症和慢性呼吸道问题的人，已经远远超过其他原因致死人数的总和。要想真正降低全球早亡率，我们需要想点办法来对付那些残酷的疾病。尽管这有些反直觉，但科学家逐渐意识到，未来的医学奇迹或许就藏在最致命的毒素中，要治愈那些棘手的疾病，我们需要了解那些危害过人体的各种毒素，以及它们摆弄身体的分子机制。

发现百泌达

20 世纪 90 年代，约翰·恩格（John Eng）首次订购了一份吉拉毒蜥（Gila monster）的毒素样品。当时恩格还不太了解这种蜥蜴，因为他并不是专业的爬行动物研究者，而是纽约布朗克斯退伍军人医疗中心（Veterans Affairs Medical Center in the Bronx）的一位内分泌学家。对于大多数人来说，吉拉毒蜥真没什么好看的，这种蜥蜴体长近 60 厘米，原产于美国西南部沙漠，一直以恐怖著称。传言中，吉拉毒蜥咬住东西就不松口，只要被它们咬一下，就必死无疑。

事实上，吉拉毒蜥如今已被列入受威胁物种名录，是一种性情羞涩、行动缓慢的动物。确切地说，它们更喜欢待在地下洞穴里，因为白天洞里更凉爽潮湿。至于吉拉毒蜥的毒素，其实并不致命。和其他有毒物种相比，吉拉毒蜥可以说对人类基本无害，它们的毒性至少比那些著名的杀手弱 100 倍。当然，它们的毒素可能会让你剧痛难忍，但绝对无法轻松夺走任何人的性命。而恩格的发现，彻底改变了医生治疗糖尿病的方式：这种蜥蜴的毒素中含有一种名叫艾塞那汀（exendin）的化合物。

订购这种蜥蜴时，恩格就已经想到了一些点子，他想鉴别对人体产生医学效果的未知激素。就在那时候，他读到了一篇报道，里面提到美国国立卫生研究院（NIH）的科学家发现了一些来自有毒蜥蜴的激素会使实验动物的胰腺膨大，也就是说这种毒素或许能深度刺激胰腺，而胰腺是分泌胰岛素和其他关键激素的重要器官。恩格想方设法找到了吉拉毒蜥中造成上述效果的激素。在做了进一步检验后，他确认发现了一种全新的多肽激素。随后，恩格将这种分子命名为“艾塞那汀”。

最终，恩格研发出了人造版的吉拉毒蜥毒素化合物，

即“艾塞那汀 -4”，他将这种化合物的制备方法卖给了礼来制药公司。2006 年，基于艾塞那汀的药物百泌达正式登陆美国市场。短短几年间，这款药为礼来公司创造了数十亿美元的收入。为了将百泌达与天然艾塞那汀区分开来，人造“艾塞那汀 -4”又有了新的名字：艾塞那肽（exenatide）。艾塞那肽的作用类似胰高血糖素样肽 -1（缩写为 GLP-1），能促进胰岛素的分泌，帮助消化。艾塞那肽只有在高血糖的环境下才会刺激胰岛素的分泌，所以和定期注射的胰岛素不同，这种激素不会造成意外的低血糖或“胰岛素昏迷”。更重要的是，GLP-1 在人体内只能存在几分钟的时间，很快就会被分解掉。如果用它来做药，等不到起效就已经消失了，但艾塞那肽却能持续存在好几个小时。

对艾塞那肽的深入研究表明，这种肽的“魔力”可能超乎我们的想象。20 世纪 90 年代，美国衰老研究所（National Institute on Aging）的科学家在为艾塞那汀 -4 做临床前试验的时候发现，这种分子不仅能作用于胰腺，还会刺激神经细胞生长，延长成熟神经细胞的寿命。

基于上述发现，美国衰老研究所在 2010 年启动了一项人体临床试验，研究这种药物是否能帮助已经出现阿尔茨海默病早期症状或轻微认知损伤的患者，预防神经退行性疾病。根据国际阿尔茨海默病协会的估计，全球用于治疗失智（其中很大一部分是由阿尔茨海默病引起的）的花费超过 8000 亿美元，到 2030 年，这个数字将增加到 2 万亿美元。如果后续进展一切顺利，除了糖尿病以外，百泌达或许还能用于治疗神经退行性疾病，这无疑极大地拓展了它的潜在市场。

以毒入药

事实上，百泌达并不是“以毒入药”的第一个例子，作为有史以来最成功的药物，卡托普利（captopril）远远走在了它的前面。1981 年，卡托普利获得了 FDA 的上市批准。这种提取自美洲矛头蝮蛇毒素的药物能够关闭一种重要的血管收缩通路，从而降低血压；另外两种来自蛇毒的抗凝药物依替巴肽（Integrilin）和替罗菲班（Aggrastat）也利用了蛇的血毒特性。如今，市面上共有 6 种提取自毒素的药物，而且我们对毒素入药的研究还很零散，几乎完全出于偶然。

“我认为毒素的潜力绝不仅仅是目前这几种新药。”澳大利亚昆士兰大学的格伦 · 金（Glenn King）表示。金教授最初是一位结构生物学家，他会利用核磁共振光谱法之



吉拉毒蜥如今已被列入受威胁物种名录，是一种性情羞涩、行动缓慢的动物。

类的复杂工具，借助原子的特性判断分子的形状和组成。某一天，一位朋友打来电话，请金教授帮忙破译他在悉尼漏斗网蜘蛛毒素中发现的一种肽的结构。金教授对此很感兴趣，他问朋友要了一份样品。蜘蛛毒素庞杂的成分令他深感震撼。“我当时只有一个念头：这真是一座无人过问的药学金矿。”从那以后，金教授一直在研究毒素，并从中寻找有用的化合物，无论是用来做杀虫剂，还是给人治病的药物。

几百年来，我们从未认真考虑过用毒素来制药的想法。古代的中国、希腊和埃及都曾采用蜂针疗法，但在大部分情况下，这些历史记载被认为是完全不了解人体运作机制的古人误打误撞做出的正确选择。哪怕往最好的方向猜想，这些疗法也不过是民间偏方而已，它们常常和其他可疑的“疗法”一起被主流医学界嗤之以鼻。

19 世纪结束时，一部分医生和科学家意识到，早期探索毒素的行动似乎蒙对了一些东西，于是他们开始重新审视毒素的医学价值。此后，现代的其他毒素实验进展顺利。除了前面我们提到的研究，还有一些研究发现，蜂螫能改善多发性硬化的症状，蛇毒或许可以用来治疗关节炎。

例如，莱姆病是由一种螺旋形细菌引起的，病原体可能通过鹿蜱（肩突硬蜱）的毒吻进入人体。如果发现得早，大部分患者可以通过抗生素治疗轻松康复，但在某些情况下，出于我们尚不清楚的一些原因，顽固的细菌始终无法

消除，最终会引发神经退行性病变。一位名叫埃莉·洛贝尔（Ellie Lobel）的女性就得了莱姆病，奄奄一息。洛贝尔拥有物理学背景，也是一位聪明的科学家，她告诉我，那时她已经病得动弹不得，几乎完全站不起来，脑子里也是一团糨糊，根本没法正常生活。她试了所有办法，但无论换多少医生，用哪种疗法，病魔总会卷土重来。

最后洛贝尔死心了，决定搬去加利福尼亚州等死。刚到这里没几天，埃莉就在出门散心时被一群非洲化蜜蜂（Africanized bee）蜇了。洛贝尔小时候被蜂螫过，当时差点因为过敏丧命，所以她认为这是命运在继续捉弄她。

此后，洛贝尔拒绝治疗蜂螫，在接下来的几天里经历了超乎想象的疼痛。但是，她并没有死。埃莉的疼痛终于开始消退的时候，她觉得自己的未来似乎又有了希望。谁也说不清是不是这些蜜蜂救了埃莉。但这个案例表明，“毒素救人”似乎不全是天方夜谭。很快她发现，蜜蜂毒素中最常见的成分蜂毒肽是一种强效抗生素，高剂量的蜂毒肽能撕裂细菌细胞并杀死它们。

导致莱姆病的细菌十分狡猾，其他抗生素很难将它们彻底根除，但蜂毒肽对付它们却不费吹灰之力。如果将足量的蜂毒肽送到正确的地方，这种化合物的确有可能彻底清除那些阴险毒辣的螺旋状细菌。另外，有证据表明，蜜蜂和胡蜂毒素中的某些成分能逆转神经退行性病变，抑制炎症，这二者都是令慢性莱姆病患者深受其害的症状。埃莉相信蜂毒救了自己一命，非但如此，她还决心从事对蜂毒和蜂毒肽的研究。

更多的可能

与盲目使用毒素治疗疾病的的年代相比，我们已经对毒素有了更深入更详细的了解。我们不仅知道是谁分泌了这些毒素，它们有什么效果，还知道它们是如何演化的，哪些成分最关键，以及让毒质得以大展神威的成千上万个活性部件。每一种毒素都包含着多种的成分，每一种成分都有专门的分子级目标，正是这样的特征让毒素成了制药学的宝库。

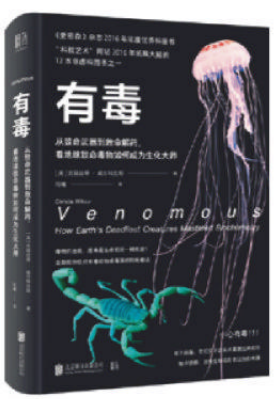
刚开始，科学家研究的只是那些毒素分泌量相对较大的动物，比如蛇。分泌量少一点的物种有蝎子和蜘蛛。这样的选择完全是出于实际需求，因为在几十年前，分子级的测试需要消耗大量原材料。“过去十年来，技术飞速进步，”金教授表示，“现在我们可以用极微量的毒素完成筛查，这在过去根本做不到。”更让他欣喜的是，遗传学领域的进步创造了更多可能性。“现在我们可以从基因组学的角度审视这些动物的毒素，甚至不必真的去提纯毒素。”尤为重要的是，毒素拥有无与伦比的制药潜力。

可以说，癌症是天生的靶子，毒素已经瞄准了它。治疗癌症的良药可能就隐藏在蜜蜂、蛇、螺类、蝎子甚至哺乳动物的毒素中。2015 年，抗癌新药 SOR-C13 完成了 I 期临床试验，离上市又近了一步。这是一种从鼩鼱身上提取的化合物。某些鼩鼱的牙齿上有特殊的沟槽，可以将这种强效的毒质送入猎物体内。与此同时，来自蝎毒的“肿瘤染色物质”BLZ-100 刚刚开始 I 期临床试验。医生可以利用这种化合物鉴别癌症组织。医生希望，这种“染色物质”可以帮助他们更好地完成儿童脑瘤手术。

某些最致命的感染也在毒素中找到了棋逢对手的敌人。最近，科学家发现，蜂毒的一种主要成分会攻击并杀死 HIV，这种病毒每年都会在世界范围内导致 150 万人死亡。现在，科学家正在继续努力，希望由此为找到有效治疗艾滋病的疗法。与此类似，蛇毒中的一些化合物能有效对抗疟疾，这也是现代医学久攻而不克的一座顽固堡垒。如果这些发现真的能转化为新药，也许每年都能拯救上亿人的生命，缓解大量疾病患者的痛苦。

除此以外，毒素也许还能解决一些没那么要命的小病。巴西漫游蜘蛛（Brazilian wandering spider）毒素中的一种特殊的化合物，或许能够治疗男性的勃起功能障碍；蜂毒的效果说不定比肉毒素还强，能够解决眼角的鱼尾纹；黑寡妇蜘蛛毒素中甚至还有一种潜在的杀精剂。

现在，除了其他几种有潜力的新药，金教授还在研究提取自蜈蚣毒素的一种止痛药，以及一种抗癫痫药。“我们之所以青睐节肢动物的毒素，比如蜘蛛、蝎子、蜈蚣，是因为这些化合物都是神经毒素，”他解释说，“这个庞大的分子库中充斥着可调节离子通道的各种化合物，我们需要的正是这样的东西。”



本文节选自克丽丝蒂·威尔科克斯的《有毒》。数千年来，人类对毒液深深着迷，那些看似不起眼的昆虫和爬行动物，曾给人类留下挥之不去的惨痛记忆，因为它可以以极小的量致人死地。如今，科学家又把目光集中到了这些原本让人望而生畏的毒液上，因为它们或许可以从致命武器转变为救命的毒药。

扫描二维码，可直接购买



米格尔（左）和同事正在调试外骨骼装备。

让瘫痪患者再次行走

在科幻电影中，身着奇异装甲的人类能够获得极其强大的功能。
而在现实中，也有一批身负外骨骼装置的人，相反的是，这些人都是瘫痪患者。
这些病患正借助这种科幻式的技术重新站立，再次行走。

本刊记者 杨心舟

在盛行足球文化的巴西，几乎每一个少年都拥有着自己的足球梦想，而茹利亚诺·平托（Juliano Pinto）也是万千巴西足球少年之一。平托每天都会与朋友在没有绿草的“露天球场”奋力拼搏，每当他带球突破防线，将球踢进对方大门时，他都幻想着自己成了聚光灯下众多观众的焦点。不过，他的梦想因为一场意外车祸而破灭，尽管平托幸运地从车祸中存活了下来，但他胸部以下的肢体完全失去了知觉，也就是常说的高位截瘫。在数年轮椅生涯中，他大脑与下肢的控制神经完全被切断，平托不仅无法控制下肢，连获得触碰足球的感觉也成为了奢望。

但平托的人生在 2013 年出现了转机，他当年被选入了“再次行走计划”（Walk Again Project）。这是一项由美国杜克大学的神经科学家米格尔·尼科莱利斯（Miguel Nicolelis）主导的国际联合项目，项目汇聚了来自世界各地的神经科学家、机械工程师、神经康复专家等各类专业人士。米格尔创立该项目的终极目标就是想利用科技改变瘫痪者的生活质量，而研究团队制造的外骨骼装置就是帮助他们实现这一愿望的最佳设备。2013 年的寒冬，平托和 7 位同时加入计划的瘫痪患者开始了超越常人所见的外骨骼装置训练，这 7 名患者的症状与平托基本一样，都是因脊椎受损，下肢瘫痪而失去了行走能力。

机械外骨骼装置的本质其实也就是常说的脑机接口技术（Brain Machine Interface，BMI），患者头部连接有收集大脑电信号的装置，这些信号会通过无线设备传输到他们背上携带的电脑中。在这里，来自大脑的电信号（外骨骼装置中为运动信号）会被电脑转换成运动指令，接收到指令后，外骨骼装置就能稳定住患者的躯体，并根据信号来让机械肢体前进或者后退。从患者大脑发出信号，到控制外骨骼运动，整个过程大约只需要 300 毫秒就能完成。

通过意念控制机械设备来让瘫痪患者完成动作，这不是脑机接口唯一的目标。大脑想要完成一个标准的动作，需要不断进行调整，哪怕是简单地握着水杯喝水，各种输出和输入信号都会在大脑的各个脑区之间驰骋。这些信号能够告诉你从何种角度握住杯子不容易手滑，用多大的力能够握紧杯子，杯子中的水是凉的还是热的。这意味着患者不能只是单纯地输出信号来控制机械装置，他们的大脑同样需要接收到反馈。因此，在米格尔的外骨骼装置中，每一只机械下肢的顶端都配置了一块可以感受温度、压力和距离的感受器，研究团队将其称作人造皮肤。通过这块感受器，包括平托在内的患者就能够感受到来自脚部的感觉，他们不仅能够利用机械外骨骼做一些想做的动作，还能够知道自己走路的状态。

平托在使用外骨骼训练一年后，登上了巴西世界杯的开幕式，在万人瞩目的圣保罗科林蒂安球场上，他身负外骨骼轻轻踢动了巴西世界杯的第一球。他在开球成功后说的第一句话就是，“我感受到足球了！”这一刻实属来之不易，从瘫痪到再次感觉到这种丢失已久的感受，平托等待了 8 年。米格尔同样被这一幕所震撼，连他自己一开始都不确定病患离开实验室，走到绿茵场上时是不是还能成功。因为尽管他在制造机械外骨骼之前，已经在小鼠和猴子中进行了非常多的尝试，而上升到人体试验，平托他们还是第一批。

在平托之前，动物实验最早于上世纪 90 年代就开展起来了，而猴子中的脑机接口实验也是整个外骨骼灵感和设计的来源。猴子在脑机接口训练的第一阶段，会面对一个充满许多亮点的屏幕，它们需要控制一个操纵杆来跟踪亮点，每当它们触碰到亮点时就能获得一罐橙汁奖励。当猴子熟悉了奖励机制后，米格尔就开始了第二阶段的训练。

在这一阶段，操纵杆被取消了。取而代之的是猴子头脑上佩戴的脑机接口装置，这一次猴子需要直接利用脑电信号控制机械手臂来追踪亮点，结果猴子都能够通过反复学习完成这一任务，它们最终同样能获得橙汁奖励。这种脑电信号控制不局限于实体的接口设备，即使机械手臂换成屏幕上的虚拟手臂，猴子们同样能够快速、精准地用大脑直接控制虚拟手臂触碰亮点。

当猴子进行这一系列操作时，实验室中总是会传出嗞嗞的声音。普通人听起来会觉得像噪声，但米格尔却认为这是最动听的音乐，这些声音代表着猴子的大脑神经元正在放电，电信号正传输到另一端的设备中。

信号成功输出到外界，仍然需要有信号返回，这样才能使得大脑得到完整的体验。为了探索信号反馈的功能，米格尔设计了一组具有不同纹理的虚拟物品，物体表面有粗糙和光滑之分。猴子在看不见这些物体的情况下，利用虚拟手臂触碰这些物品表面时，会受到一系列不同的电信号反馈刺激。猴子的大脑在接受到信号后，就能够知道物体表面是光滑的还是粗糙的。在训练后，它们同样可以通

图片来源：Ricardo Stuckert/Instituto Lula

过触摸特定纹理的物品获得奖励，这说明脑机接口不仅可以接收信息，还可以反馈信息，建立一种大脑与机械的交流机制。

随着脑机接口技术的不断成熟，米格尔决定把这些研究扩展到人类身上。这就是后来他创立“再次行走计划”，研发外骨骼装置的起因，而平托的世界杯奇迹也证明了米格尔脑机接口的设想并不只是科幻，而是能够成为现实的东西。

1970 年，当巴西夺得了墨西哥世界杯的冠军时，巴西举国欢腾。那时，米格尔还只有 9 岁，从小在巴西长大的他也许下了每一个当地少年都会拥有的梦想，那就是走向世界杯，在世界观众注目下登上绿茵场踢球。四十多年后，米格尔以另外一种方式实现了自己的梦想。与此同时，他也正将无数患者的梦想变为现实，而外骨骼式的脑机接口就成为了米格尔与平托，科学家与患者，数代人足球梦想交织的地方。未来，也一定会有更多像平托一样的人从外骨骼装置中受益，再次站立，再次行走。

带着对这一科幻式的奇特装置的惊叹与憧憬，《环球科学》在 2019 年中国科幻大会上，对米格尔进行了一次专访。经过对话，或许我们能够更加了解脑机接口给病患生活带来的改变，一种科幻转变成现实的神奇魅力。

《环球科学》：距离平托在巴西世界杯上亮相已经 5 年了，他现在情况怎么样？

米格尔：我们在巴西世界杯后的第二年，也就是 2016 年发表了有关外骨骼训练的第一项临床报告，其中就包括了对平托在内的 8 名病人病情改善的介绍，所有病人在接受外骨骼训练后，都恢复了部分被切断的神经功能。

平托在那之后已经恢复了自主运动腿部肌肉的能力，并且瘫痪的肢体部分也能够重新感受到触觉和痛觉。而还有些病人在很大程度上恢复了控制膀胱的能力，心血管功能也得到了改善，这对于病患的生存质量有了很大的提升。

平托和另外两名病人现在已经可以脱离外骨骼装置了，他们只需借助一些身体支持工具，以及超轻量的行走辅助装置就能步行一段距离，这一过程他完全不需要依赖外骨骼装置。病患的这些功能改善情况，其实已经大大地超过了原本的预期。

《环球科学》：你的研究灵感是从哪来的？在外骨骼诞生之前，你似乎用猴子做了非常多的实验。

米格尔：在巴西世界杯前，为了研究出可用的外骨骼装置，我做了长达 25 年的动物实验。整个研究的灵感，或者说动力来自于我在医学院的一些工作，当时我见到了许多脑损伤的患者，他们很难从病情中恢复，因此我想做一些事情来帮助改善这些病人的生活质量。脑机接口看起来是一个非常不错的选择，因为病人大脑不能直接控制躯体的情况下，脑机接口可以直接收集脑电信号再经电脑转成机器指令。通过这一过程，病人可以控制机械装置来完成瘫痪后做不到的动作。



平托身穿外骨骼踏上了巴西世界杯赛场。

我们在猴子中进行了非常多的脑机接口测试，不只是虚拟手臂，猴子同样可以用脑机接口操纵机器手臂，还可以控制车辆行驶，甚至使用外骨骼装置。我们觉得脑机接口同样适用于人类，在技术成熟后我们就在人体上测试了外骨骼装置，结果实际使用效果非常好。

《环球科学》：猴子和平托大概要花多长的时间才能学会操控外骨骼装置？

米格尔：平托大概经过一小时的学习和训练，就能够自如地操控外骨骼装置。猴子学习得相对慢一些，因为我们不能和猴子直接对话来告诉它们怎么操控，只能给予一些奖励来激励它们。

但人就不一样了，我们可以直接告诉他们使用技巧，当然大脑本身也能很快接受脑机接口。这说明大脑能够很好地适应脑机接口装置，所有人都可以快速地学会使用它，这也是我们对脑机接口痴迷不已的原因。

图片来源：Walk Again Project

《环球科学》：类似于外骨骼的脑机接口装置能被应用在瘫痪病患的日常生活中吗？

米格尔：目前我们正朝着这一方向努力，也有越来越多的脑机接口应用涌现出来。但是，这种供日常使用的装备一定是要非侵入性的，也就是说不能够进行手术植入设备。但如果使用非侵入性设备，就必须要克服很多困难，因为它不能直接从大脑皮层接收信号。

我们可以类比一下现在使用的脑电图（EEG）。EEG 可以直接观测对象的脑电信号，但是 EEG 能够展示的信息量很有限，因为它会收集很多背景信号，这对于脑机接口操控是不利的。我们正在设计一些更精准的工具，来排除这些干扰性的信号。在未来，脑机接口技术肯定能够出现一些病人的日常应用中，并且我认为这个时刻很快就会来到。

《环球科学》：还有一种被称作 BCI 的脑机接口技术，它与你研究的 BMI 有什么不同吗？

米格尔：脑机接口技术其实是一个非常大的领域，你可以利用脑电活动来控制许多设备，那么其中有一种设备就是计算机，这种脑机接口技术被称作 Brain-Computer Interface，也就是常说的 BCI 技术。可能这里会有一些误区，认为这是不同的技术，其实 BCI 和 BMI 都属于脑机接口技术，只是根据它们控制对象的不同使用了不同的名字。

BCI 主要利用的是 EEG 技术，也就是通过在患者头皮置放电极来收集脑电信号，这一过程是非侵入性的。而 BMI 需要进行手术，直接在大脑表面置放电极采集脑电活动。BCI 是在 BMI 之后兴起的一种新方式，但本质上和 BMI 是一种技术。

《环球科学》：“再次行走计划”中的其他患者也会使用外骨骼装置进行训练吗？

米格尔：是的，在第一期计划中我们总共招募了 20 名巴西瘫痪患者，他们都使用了相同的技术也就是外骨骼装置来进行神经功能恢复，并且都获得了不同程度的恢复效果，现在我们还在全世界范围内招募新的病患加入这个计划。

《环球科学》：一些科幻电影也曾描述过类似外骨骼装置的设备，主角可以使用这些工具完成普通人做不到的事情，在未来脑机接口也会尝试增强普通人的能力吗？

米格尔：科学家创造脑机接口技术的本意从来都不是去改造人类或者创造出一个“超人”，也许在未来会有这方面的应用，但我现在也无法判断这会不会在现实中发生。当下，BMI 技术最主要的目的就是用来帮助那些神经受损的病人恢复自身的基本功能。

但是我们在动物中有一些增强改造尝试，比如在大鼠中，我们可以利用 BMI 技术给它创立一种全新的感觉功能，比如“看见”红外光的存在，这一过程大鼠不是直接用眼睛看见红外光，而是利用脑机接口传输的信号感受到红外光的存在。我们试图用这些实验探究大脑的可塑性究竟有多强，大脑和 BMI 技术能够配合到何种程度，这对于整个研究领域的推进都是有很大作用的。

《环球科学》：你怎么判断大鼠看到了红外光，而不是别的东西？

米格尔：在实验中，大鼠是处于一个完全黑暗的环境中，它们只能根据红外光来寻找水源。我们利用 BMI 将红外光的信号转换成大脑的电信号，并且将这些信号传输到大鼠的大脑中。很快，它们的大脑就能破解这些信号，开始根据红外光的信号去喝水。当然，理论上来说，人类也是能够利用 BMI 具备这种能力的，只是我们在人类研究中的侧重点不在此处，而更多的是关注病人的生存质量。

《环球科学》：你现在的研究目标是什么，未来有哪些研究计划？

米格尔：我现在的目标就是将近 30 年的研究转换成真正能应用的临床工具，比如用脑机接口治疗那些因脊柱受损而瘫痪的患者，当然我们还希望能够利用脑机接口治疗帕金森病，还有类似抑郁症在内的其他神经性疾病。在未来，我的计划都是让 BMI 技术走出实验室，真正用于改善各类疾病患者的生活质量。

《环球科学》：除了脑机接口，你认为在大脑的研究领域中还有哪些方向值得期待？

米格尔：我认为人类的全脑研究是非常值得期待的一个方向——我说的全脑研究不仅仅局限于一个脑区、一个神经元或者一个突触。我认为传统的神经科学在大脑全局方向的研究还做得不够，我们必须将大脑作为一个整体来看待，就像计算机只有硬盘和软件是无法运行一样，大脑只有一个整体才可以完成高效运转。我个人也喜欢将大脑称作“有机计算机”，因此神经科学家在未来必然要展开全脑研究。

科学评论



凯特·王是《科学美国人》演化与生态学领域的资深编辑，曾撰写过大量与古生物和古人类有关的文章。

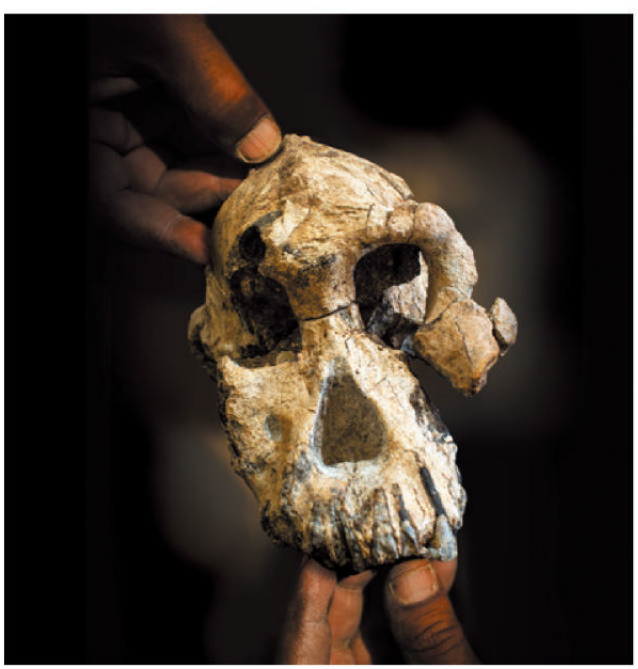
重绘人类谱系树?

一枚新发现的颅骨化石让科学家必须重新梳理古人类的发展史。

撰文 凯特·王（Kate Wong）　翻译 程孙雪子

大约25年前，研究人员首次描述了湖畔南方古猿（*Australopithecus anamensis*）的化石。如今，这种一直被忽视的人类祖先终于迎来了自己的高光时刻。在埃塞俄比亚工作的研究人员发现了一颗几乎完整的颅骨化石，恰好属于这种已经消失很久的人科成员。在人科中，除了智人（*Homo sapiens*），还包括一些已经灭绝的近亲，它们共同组成了人类谱系树。过去，湖畔南方古猿的化石主要来自下颌、牙齿及头部以下的骨骼碎片。而这枚来自380万年前的化石非常完整，可以帮助科学家揭开湖畔南方古猿从未展示在人们面前的面容。不过，根据标本上的某些显著特征，人类演化的谱系树或许又要重绘了。

从一些方面来看，湖畔南方古猿是我们能够明确的最古老的人科物种，有些化石甚至可追溯到420万年前。多年以来，它一直占据着人类谱系树的关键位置，因为它是阿法南方古猿（*Australopithecus afarensis*）的直系祖先，而阿法南方古猿已经公认是人属（*Homo*）的祖先了。根据已有化石的年龄和特征，科学家认为，湖畔南方古猿通过前进演化（anagenesis，从一个物种逐渐转变成了另一个物种）的方式变成了阿法南方古猿。然而，新的化石却极有可能改写这种理论。



约翰尼斯·海勒-塞拉西（Yohannes Haile-Selassie）就职于美国克利夫兰自然历史博物馆（Cleveland Museum of Natural History），他和同事在埃塞俄比亚东北部阿法地区（Afar）的沃伦索-米勒（Woranso-Mille）地区发现了这颗颅骨化石。此前，湖畔南方古猿只留下了一些骨骼碎片，而这颗颅骨上牙齿和颌部的特征，恰好将它与曾经确立的湖畔南方古猿联系在了一起。这枚化石特征明显，面部前突、犬齿巨大、颧骨醒目。它的头顶长有一个脊，能够固定强劲的颌部肌肉。颅腔狭长，可容下和黑猩猩差不多大小的脑部。研究团队认为，它很有可能来自一只雄性的湖畔南方古猿。

至于如何颠覆传统观念，科学家提出了他们的证据和猜想。新发现的颅骨清晰完整地展示出了湖畔南方古猿的解剖结构。海勒-塞拉西和同事指出，在埃塞俄比亚阿法地区的贝洛德利（Belohdelie，另一个化石出产点）曾经发现过一枚属于阿法南方古猿的额骨化石，可能来自390万年前。以目前的化石记录来看，湖畔南方古猿生活在420到380万年前，而阿法南方古猿显然生活在390到300万年前。

如果海勒-塞拉西的推测是正确的，那么在阿法地区，这两个物种至少共同存在了10万年的时间。这种重叠意义重大，这说明湖畔南方古猿可能不是通过前进演化的方式转变为阿法南方古猿的。相反，是湖畔南方古猿的一个分支发展成了阿法南方古猿，而湖畔南方古猿继续与它的子物种共存了一段时间。当一个物种的部分种群和其他种群隔离后，就可能向不同的方向演化，这也就是所谓的分支演化（cladogenesis）。

不过，这种观点（用分支演化取代前进演化）完全建立在贝洛德利发现的额骨确实属于阿法南方古猿的基础上，但目前还没有发现其他可以追溯到这个年代的阿法南方古猿遗骸。那么问题来了，当我们只有一枚湖畔南方古猿的额骨（就是新发现的那枚）可以进行对比时，我们就无法排除这样的一种可能性：万一其他湖畔南方古猿的额骨恰好类似于贝洛德利的那一枚额骨呢？要解决这个问题，只有等科学家发现更多的化石证据。

图片来源：DALE OMORI AND LIZ RUSSELL; COMPOSITE IMAGE OF HANDS HOLDING "MRD" BY JENNIFER TAYLOR and CLEVELAND MUSEUM OF NATURAL HISTORY

科技投资



韦德·劳什是播客 Soonish 的主持人和制作人，是播客 Hub & Spoke 的联合创始人，还是《麻省理工学院技术评论》、Xconom、WBUR 和 WHYY 等纸刊、网页和广播机构的自由撰稿人。

塑料能缓解气候变暖？

从某些角度来看，塑料也可以对环境有益，比如起到固碳作用。

撰文 韦德·劳什 (Wade Roush)　翻译 赵剑琳



制图：杰伊·本特（Jay Bendt）

可“生物降解”的塑料可能并不如我们所想的那样对环境很有益。将塑料吸管换为纸吸管或是钢吸管，只能减少微不足道的塑料垃圾。除非你真能把代表“环保”的布质购物袋反复利用上千次，否则它们对环境的危害甚至比塑料袋更大。换句话说，我们很多对塑料和环境的观点都存在谬误，而这可能阻碍我们缓解全球变暖。

英国媒体《旁观者》（*The Spectator*）前瞻性地且正确地将围绕一次性塑料袋和吸管的争议称为“道德恐慌”。这种“恐慌”促使餐厅采用可生物降解材料制成的餐具。这些可生物降解的材料，如聚乳酸（PLA），由玉米或甘蔗的淀粉糊制成。公众认为就算把这些东西扔在森林或海洋中也是十分安全的，因为微生物会将它们分解为使雏菊或海马生长的养分。

但事实并非如此。在欧美地区，生物降解的技术标准主要依据工业堆肥法。在这个方法中，塑料袋或塑料瓶会被丢进堆肥罐内，在其中放入一些微生物，将温度提升到50~60℃。如果在180天内，超过90%的材料被分解为二氧化碳等产物，那这种材料将能被称为“可生物降解材料”或“堆肥材料”。

换句话说，可生物降解材料是一些特意设计的材料，可以在寿命周期结束后，将其中的碳释放到大气中。更糟糕的是，如果可降解材料被缺氧填埋，而不是堆肥处理，它们会被厌氧菌分解成甲烷，造成的温室效应是二氧化碳的34~86倍。而如果它们被丢入海洋中，在充分降解为微小碎片之前，它们也会导致很多海洋生物窒息。

在全球范围内，我们生产了数量巨大（年产量3.8亿吨）的塑料，而且几乎全部使用石油化工原料。因此，可以理解为什么很多消费者仍坚持着上世纪80年代的观点，坚持塑料经过工程改造后可以回归自然。而现实是，有大约60%的塑料制品被堆积在填埋场地下，或是作为垃圾污染环境。

根据气象学家的观点，这未必不是好事。当然，如此多的塑料垃圾会对陆地和海洋生态，带来很大的危害。但不能忽视的是，我们对于塑料的需求愈发庞大。例如，塑料可以替代组成汽车和飞机的沉重材料，降低油耗。而最关键的是，塑料可以作为一种人造的碳沉降器。如果最终，我们不可避免地会将所有的碳释放到空气中，与其通过汽车的发动机排放，还不如保存在寿命长达400年的可乐瓶中。

如果我们想缓解地球危机，就应该停止对塑料生物降解的研究，而转为投资生物基塑料的研发。植物利用光合作用将水和二氧化碳转化糖分、淀粉和纤维素，而这些都可以用来制造塑料。聚乳酸就是其中之一，它可以通过堆肥降解，但只能算是实现了碳中和。在这一领域中，最令人激动的是聚焦于非生物降解塑料，如聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）的研究。可口可乐公司利用这种材料来制造植物环保瓶，其最新版本于2009年推出，其中含有30%植物来源的PET。另外，可口可乐公司和百事公司都发布了由100%的植物原料制成的的PET环保瓶，但都还没有推出商品化的版本。

联合国气候变化政府间专家委员会（IPCC）指出，为了将全球变暖带来的升温控制在高于前工业时代1.5℃的范围之内，在2050年之前，我们必须从大气中除去上千亿吨的二氧化碳。如果从2020年起，全世界能使用不能生物降解的生物基塑料，在随后30年里，被固化的碳可能会超过100亿吨，这会是一个良好的开端。因此，如何看待塑料，我们还需要更加灵活的思考。

健康科学



对付阿尔茨海默病的新靶点

经历了一系列药物研发失败之后，是时候绕过淀粉样蛋白这个靶点了。

撰文 克劳迪娅·沃利斯（Claudia Wallis） 翻译 贾明月

过去25年来，科学界对阿尔茨海默病的看法一直被“淀粉样蛋白级联假说”统治。假说认为，阿尔茨海默病是由脑内异常的β淀粉样蛋白质堆积造成的，这种现象最终会破坏神经细胞和突触，造成痴呆的后果。有相当多的证据支持这一假说。首先，含有淀粉样蛋白的“斑块”是阿尔茨海默病的经典标志（另一个标志是tau蛋白缠结）。1906年，阿洛伊斯·阿尔茨海默（Alois Alzheimer，阿尔茨海默病的发现者）在第零号病人的大脑切片中发现的正是这种蛋白。其次，如果因为遗传因素，导致淀粉样蛋白前体蛋白（APP）存在缺陷，整个家族都会深受早发型阿尔茨海默病的困扰。第三，如果通过基因工程改造，使小鼠产生大量淀粉样蛋白，它们就会表现出记忆问题；而当淀粉样蛋白堆积停止后，记忆表现会变好。

除此以外，还有很多其他证据。这让各种科研基金和制药公司投入了数十亿美金，希望研发出针对淀粉样蛋白的疗法。然而，十几种候选药物的研究接连失败。最近一次失败是在2019年4月，在极早期阿尔茨海默病的试验中，原本十分有前景的淀粉样蛋白抗体（aducanumab）并不比安慰剂表现得更好。

克劳迪娅·沃利斯是《科学美国人·精神》前主编。



与此同时，研究非淀粉样蛋白的研究人员却备受冷落，很难拿到经费，也很难发表论文。科学记者莎伦·贝格利（Sharon Begley）花了超过一年时间报道这些错失的机会，她提到，目前对淀粉样蛋白假说的支持已经堵死了探索其他方向的路。

遗传证据和其他证据指出，炎症和免疫调节异常对阿尔茨海默病的影响同样巨大，这两种致病因素也有可能成为药物治疗的目标。血管组织的情况也类似。其他有可能的致病因素包括：脑部脂质处理过程的改变、葡萄糖水平的变动、蛋白质折叠的方式异常，以及大脑与肠道细菌通讯的受阻。病毒也可能会有影响。这一系列令人眼花缭乱的路径是否存在相互作用、如何作用，都不得而知。美国西奈山伊坎医学院认知健康中心主任萨姆·甘迪（Sam Gandy）说：“我想，可能根本没有办法把这些致病机理线性整合在一起，理出其中的因果和先后关系。”

每一条路径都可能成为疾病干预的目标。“我们可能无法只选择一套系统，”同在西奈山伊坎医学院工作的玛丽·萨诺（Mary Sano）说，“需要尝试尽可能多的干预方法。”

甘迪和同事正在追踪很多目标。在2018年发表的一篇文章中，他们证明，在受阿尔茨海默病影响的大脑中，来自单纯疱疹病毒的基因有过量表达的现象，这可能影响了痴呆相关的人类基因。甘迪表示，“我们依然在努力理解这个结果”。他们还试验了另一种被称为“BCI-838”的分子，这种分子能够促进海马中突触的形成。在阿尔茨海默病的啮齿类动物模型中，“BCI-838”已经被证明可以改善大脑功能。而保护突触很有可能是击败阿尔茨海默病的关键点。

根据2019年的一项分析，进入临床试验的药物中，针对阿尔茨海默病的共有96种。其中60%的目标路径已经不是淀粉样蛋白。“现在，这种多样性显得非常重要，”美国衰老研究所（NIA）负责人理查德·霍兹（Richard Hodes）说。NIA是阿尔茨海默病研究最主要的公共经费提供方。2019年10月，NIA宣布新增7300万美元用于药物开发，提升药物的多样性。

不过，NIA还并没有放弃抗淀粉样蛋白类的药物。霍兹认为，这类药物在早发阿尔茨海默高风险的年轻人（存在遗传突变的人或是唐氏综合征患者）中，很有可能会被证明能够延缓痴呆；而对患有更常见类型阿尔茨海默病的人来说，抗击淀粉样蛋白可能并没有那么重要。这些人往往脑中除了斑块和缠结，还存在血管损伤，同时还可能伴有其他与年龄相关的改变。

插图：西莉亚·克兰普门（Celia Krampien）

反重力思考



史蒂夫·米尔斯基开始撰写反重力思考专栏时，一块典型的构造板块距离现在位置大约还有 0.9 米。他也是《科学美国人》播客 Science Talk 的主持人。

月球上的垃圾

人类到处扔垃圾，就连月亮都不放过。

撰文 史蒂夫·米尔斯基（Steve Mirsky）　翻译 红猪

浏览推特可以学到许多知识。比如2019年10月初，我就知道了这样几件事：一、判断一种肺癌疗法（PD-1/PD-L1抗体疗法）是否有效，还可以看病人灰白的头发是否恢复了年轻时的颜色；二、研究者发现，即便加利福尼亚的莫诺湖里含有大量的砷，但那里依然存在8种蛔虫；三、这个厉害了，美国总统发推特说民主党人“正继续干扰2016年大选”，这不是捕风捉影，而是在捕捉超光速粒子了。

我还读了查尔斯·菲什曼（Charles Fishman）的一条推特，他是《人类的一大步：将我们送上月球的不可能任务》（*One Giant Leap : The Impossible Mission That Flew Us to the Moon*）一书的作者。菲什曼写道，美国航空航天局在2012年公布了“人类留在月球上的物品的完整目录”——也就是太空垃圾目录。

下面出一个测试，主题是“阿波罗”计划留在月球上的物品。在数百件零碎中，我给每次任务挑选了4件。我还在这4件之外添加了一件东西，它并不不是月球垃圾，各位的任务就是找出那一件没有被留在月球上的东西。答案将在文章最后揭晓。回答正确的话，你就会获得深深的满足感。



插图：马特·科林斯（Matt Collins）

“阿波罗”11号：粪便收集装置、月球鞋、锤子、钳子、巴兹·奥尔德林的欢乐蜂鸣器

“阿波罗”12号：粪便收集装置、电视变焦镜头、彩色电视摄像机、电视转接线、1953年经典科幻电影《月球猫女》的录像（里面居然有奥斯卡得奖作曲家埃尔默·伯恩斯坦的配乐）

“阿波罗”14号：粪便收集装置、毛巾、登月舱上升段、日晷、樽铭

“阿波罗”15号：被动地震试验水平凳、湿巾、月尘刷、沙滩车式的车辆、喷瓶（就是2004年的电影《终极贱靶》里的那种东西）

“阿波罗”16号：粪便收集装置、卫生纸架、高增益天线组件、老虎钳、米饭调料

“阿波罗”17号：粪便收集装置、抗细菌及真菌药膏、手腕镜、指甲钳、只吃脚指甲就能存活的水熊虫

附加问题：为什么“阿波罗”15号的宇航员没有在月球上留下粪便收集装置?

下面是答案：

“阿波罗”11号：巴兹·奥尔德林的欢乐蜂鸣器。我和奥尔德林握过手，并没受到电击。但你要是宣称登月是作假、惹得他火大，他还是会给你的脸上来一拳的，就像2002年时他对一个特别嚣张的挑衅者做的那样，那人说他是骗子和懦夫。

“阿波罗”12号：《月球猫女》的录像。1969年的录像带技术还太原始，带子和播放机器都粗大笨重，如果带上月球就会增加许多质量，并需要额外携带许多燃料。

“阿波罗”14号：并没有一种叫作“樽铭”的东西，不过美国许多机构、行业和总统内阁里倒是充斥着只会说“遵命”的人。

“阿波罗”15号：喷瓶是一种虚构的粪便清洁产品，对于这次任务绝无必要（这也是附加问题的答案），因为根据美国航空航天局1971年的一份新闻稿，“固态的人体排泄物都收集在塑料粪便袋中……袋子使用后会密封，储存在空的食物容器中，等待飞行后分析”，多半是带到地球上分析吧。

“阿波罗”16号：米饭调料。米饭并不需要特定的调料，虽然大家很喜欢用小豆蔻搭配米饭。

“阿波罗”17号：水熊虫。虽然我们也不能断言月球上就一定没有它们。

十字路口



富豪们为什么向往太空

这背后或许是那一份关于社会发展的意识。

撰文 柴内普·图菲克奇（Zeynep Tufekci） 翻译 红猪

运营着特斯拉和太空探索（Space X）两家公司的技术大亨埃隆·马斯克（Elon Musk）正准备买下美国得克萨斯州博卡奇卡（Boca Chica）地区的所有房屋，那是一个微型住宅区，只有几十位居民。马斯克买下这片区域，是为了在上面发射他的火星飞船。他表示，用不了10年时间，或许就能把人类送上那颗红色的行星。

亚马逊公司的CEO杰夫·贝佐斯（Jeff Bezos）也拥有一家航天公司蓝色起源（Blue Origin），他将这项业务看作未来殖民太空的跳板。贝佐斯认为，未来将有一万亿或者更多的人生活在太阳系内的其他地方，地球则会成为一座公园。已故的微软公司创始人之一保罗·艾伦（Paul Allen）也曾发起“平流层发射”计划（Stratolaunch），目标同样包括太空旅行。另外还有维珍银河公司的理查·布兰森（Richard Branson），他不是搞技术的，但也有钱……这些男人未必只关注太空，但为什么他们要花几十亿美元把人类送上去呢？一个原因是，地球正受到气候变化的威胁，而太空可以作为地球的后备基地。然而将人送上火星同样充满风险，最明显的问题是，以我们现有的手段还无法保护人类免受经年累月的深空辐射带来的不良影响。就算我们到了火星，那里稀薄的磁场和大气也无法保护人类。另外，拉着只够生存的物资前往火星，殖民计划是否会像预计的那样顺利实施（甚至有没有实施的可能），也是未知数。

柴内普·图菲克奇是北卡罗来纳大学副教授，专门研究技术、科学和社会的互动。



但话说回来，梦想有什么错呢？从一方面看，一点错都没有。但从另一方面看，有很多钱的人到底在做什么梦，还是得搞清楚。艾伦、贝佐斯、马斯克都表示，对科幻的爱好是激励他们投资太空的一部分原因。贝佐斯曾用一个个夏天阅读阿西莫夫和海因莱因的作品。艾伦对于少年时代的科幻收藏感情至深，在发现母亲卖掉了那些旧书之后，他又重新凑齐了全部藏品。

作为曾经的科幻迷，我对他们的情怀感同身受。但我认为，科幻作品最好的功能不是探索遥远的将来或是科学上难以置信的事物，而是探索科学、技术和社会之间的互动关系。它们揭示的可能场景可以使我们更好地理解身边的社会，要做到这一点，有时需要抛开科学上的合理性。比如厄休拉·勒奎恩（Ursula LeGuin）的优秀作品《黑暗的左手》。书中设定特拉星（即我们的地球）派了一名使节到格森星访问，那是一颗两性之间没有严格分别的行星。我们一边阅读主人公和这个“性别模糊”的物种的相遇，一边拷问自身关于男性和女性的文化陈规。对于一本在1969年出版的书而言，可以说很有开创性意义了。

有人诋毁科幻小说是逃避现实的文学，但最好的科幻小说正好与此相反。在我看来，科幻中最有趣的部分不是那些在科学上不可置信的描写，而是它们广阔的想象力，这使我们可以进一步审视自己和所处的社会——然后改善自己，改良社会。

向来，富人都会因为自己古怪的兴趣而资助科学和艺术，具体方式也是五花八门的。现在的亿万富翁可能也面对同样的场景。想必，会有不少人会鼓励他们花钱追逐太空歌剧，虽然这么做要么会因为科学限制无法实现，要么就是以灾难收场。

但更重要的是，技术大亨们可以借助他们公司的运营，改造我们当下的生活：或者因为他们巨额的财富献出的税金回报社会（眼下数目还很少），或者是他们通过投资帮忙解决那些威胁人类的问题。做到这一点是需要想象力的。但这并不是我们在孩童时期绘在科幻书封面上的那种想像力。这是一种将我们带往广阔宇宙，从而引起我们深思的想象力，能使我们重新审视茫茫宇宙中的这一处居所，这个脆弱的浅蓝色小点，并思索怎样才能将它建设成更美好的家园。

插图：卡塔里娜·莫塔（Catarina Mouta）

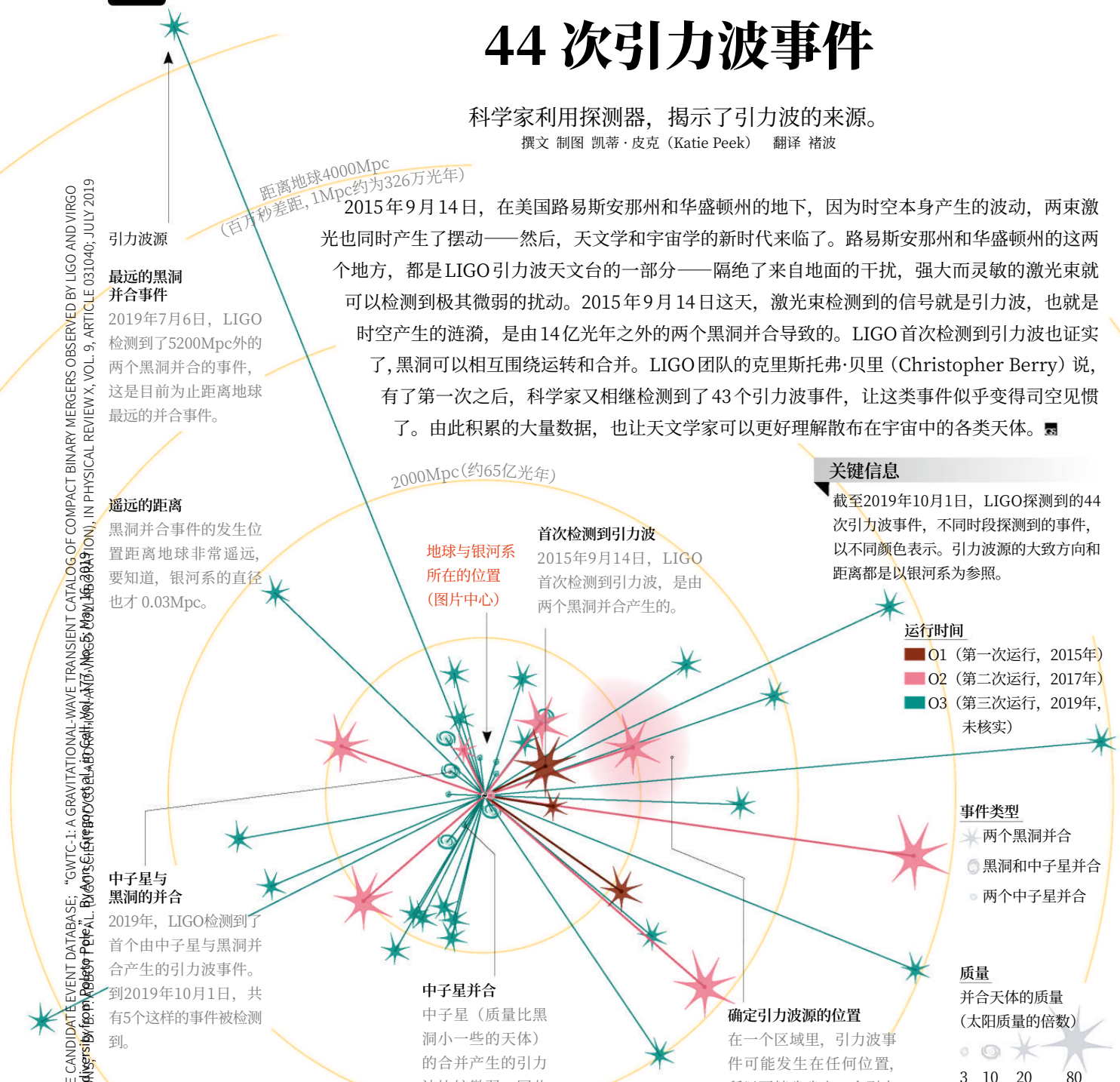
数据

44 次引力波事件

科学家利用探测器，揭示了引力波的来源。

撰文 制图 凯蒂·皮克（Katie Peek） 翻译 褚波

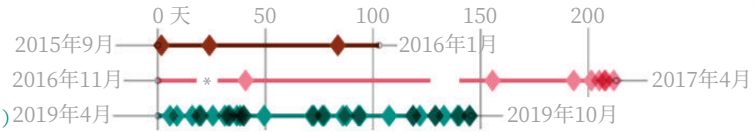
2015年9月14日，在美国路易斯安那州和华盛顿州的地下，因为时空本身产生的波动，两束激光也同时产生了摆动——然后，天文学和宇宙学的新时代来临了。路易斯安那州和华盛顿州的这两个地方，都是LIGO引力波天文台的一部分——隔绝了来自地面的干扰，强大而灵敏的激光束就可以检测到极其微弱的扰动。2015年9月14日这天，激光束检测到的信号就是引力波，也就是时空产生的涟漪，是由14亿光年之外的两个黑洞并合导致的。LIGO首次检测到引力波也证实了，黑洞可以相互围绕运转和合并。LIGO团队的克里斯托弗·贝里（Christopher Berry）说，有了第一次之后，科学家又相继检测到了43个引力波事件，让这类事件似乎变得司空见惯了。由此积累的大量数据，也让天文学家可以更好理解散布在宇宙中的各类天体。



新发现越来越多

2015年，在第一次运行的4个月期间，LIGO检测到了3个确定的引力波事件。但在第三次运行期间，检测到的引力波事件数量是之前的10倍以上（有些事件可能还没有经过严格审查）。

O1：检测到3次
O2：检测到8次
O3：检测到33次
（截止到2019年10月1日）



* 横线中间的空白代表LIGO的运行中断了一周或更长时间。

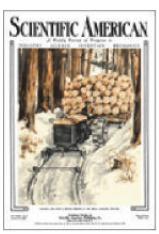
资料来源：GRACEDB—LIGO GRAVITATIONAL-WAVE CANDIDATE EVENT DATABASE; "GWTC-1: A GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG OF COMPACT BINARY MERGERS OBSERVED BY LIGO AND VIRGO (PRELIMINARY VERSION)," IN PHYSICAL REVIEW X, VOL. 9, ARTICLE 031040; JULY 2019 (DISCOVERY PAPER); "Binary Black Hole Population Properties Inferred from the First and Second Observing Runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo," by B.P. Abbott et al., in The Astrophysical Journal Letters, Vol. 882, No. 2, August 2019; "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger," by B.P. Abbott et al., in Physical Review Letters, Vol. 116, No. 6, February 2016; "Observation of Gravitational Waves from a 70-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.8," by R. Abbott et al., May 14, 2019; "Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star–Black Hole Coalescences," by R. Abbott et al., in The Astrophysical Journal Letters, Vol. 915, No. 1, June 2021; "Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral," by B.P. Abbott et al., in Physical Review Letters, Vol. 119, No. 16, October 2017; "Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a 2.5–4.5 $M_\odot$ Compact Object and a Neutron Star," by R. Abbott et al., in The Astrophysical Journal Letters, Vol. 970, No. 2, August 2024; "Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a 2.5–4.5 $M_\odot$ Compact Object and a Neutron Star," by R. Abbott et al.,



1970年

销毁生化武器

美国总统尼克松发表了一则关于化学和生物武器的声明，宣布放弃细菌战，并承诺不首先使用致命及“使人失去生活能力”的化学武器。不过这则声明并没有改变美国对越南部署的化学武器：催泪弹和化学落叶剂。至于生物战，这则放弃声明就是单边而明确的了。尼克松总统指出，对生化武器的研究将仅限于防御措施，美国还会销毁先有的细菌武器。



1920年

可能来自邮票的感染

1919年10月号的《医学时报》（*Medical Times*）对《邮票可能导致感染》一文做了讨论。实验室里的检测表明，没有一张邮票上是没有细菌的。这些细菌包括大肠杆菌、葡萄球菌、链球菌、肺炎双球菌和类白喉杆菌。但是，这些生物到底有多大的危险却很难说清，因为这些细菌的致病性尚未得到试验确认。在评论这项研究结果时，《美国医学》（*American Medicine*）杂志表示，虽然不鼓励用舌头沾湿邮票的做法，但是，如果邮票真是细菌感染的重要源头，那很大一部分人早就因此感染了。



1870年

阅读技术

我们将展示一种十分让人享受的阅读支架。只要体验过它，不管是患病的人还是健康的人，绝大多数都会爱不释手。无论你是坐着或者是躺着，这种装置都能将印刷物直接摆到你的眼前，方便阅读。从此阅读者不必用双手捧起书本，也不必让身体摆出特定的姿势。这项发明已取得了专利，专利持有人为美国俄亥俄州辛辛那提市的爱德华·康利（Edward Conley）。

石油火炉

受法国科学院的指示，亨利·圣—克莱尔·德维尔（Henri St.-Claire Deville）就一个重要的课题开展一系列实验。最后他成功发明了一种火炉，圆满完成了任务。我们完全可以将这看作本年度最重要的发明之一。



1870年：一副取得专利的阅读架，但在大多时候，这种装置并无必要。

娱乐技术

19世纪晚期，因为小说不断进步、纸张更加便宜、印刷术大规模出现，以及更多的闲暇时光，消遣阅读开始流行。另一项技术上的飞跃是留声机（过去的一种唱片机）的出现。随着它的风靡，听音乐的方式发生了巨大的转变。著名发明家托马斯·爱迪生（Thomas Edison）在本刊1878年5月18日号上撰文表示，他认为留声机很适合在办公室里记录口述内容，但他也承认留声机可以“大量用于音乐”。1906年，娱乐性的广播节目开始出现。1925年7月，本刊建议读者带着收音机去露营，“远离尘嚣”。

在1939年4月号上，本刊又宣布“电视时代来临了！”而“娱乐”正是电视的首要功能。新发明往往需要其他实际的投入来改造社会：借助电脑、网络和智能手机的力量，再加上新的途径提供了可以在这些设备上观看或播放的内容，现代娱乐业就产生了。到2000年11月，我们已经知道了“所有视听内容的数字化，将瓦解娱乐行业原有的秩序。”

绿色印刷
保护环境　爱护健康

亲爱的读者朋友：

本书已入选“北京市绿色印刷工程——优秀出版物绿色印刷示范项目”。它采用绿色印刷标准印制，在封底印有“绿色印刷产品”标志。

按照国家环境标准（HJ2503-2011）《环境标志产品技术要求 印刷 第一部分：平版印刷》，本书选用环保型纸张、油墨、胶水等原辅材料，生产过程注重节能减排，印刷产品符合人体健康要求。

选择绿色印刷图书，畅享环保健康阅读！

北京市绿色印刷工程

数字化科普传播平台
交互式科普互动方式
让科学无界

www.hudongkepu.com

热点话题 | 在线课堂 | 专家问答 | 视频音频

汇集海内外优质科普资源　构建多元化立体传播



互动科普
hudongkepu.com