

解读2019年度中国科学十大进展

编者按 科技部高技术研究中心(基础研究管理中心)2月27日公布“2019年度中国科学十大进展”,探测到月幔物质出露的初步证据、构架出面向人工通用智能的异构芯片等成果入选。

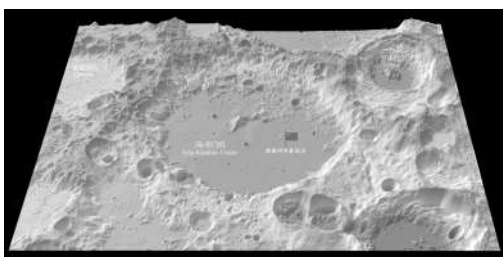
1 探测到月幔物质出露的初步证据

月亮和月幔都是在月球演化的最初阶段形成的,撞击增生过程产生的能量造就了熔融的岩浆洋,较轻的富钙的斜长石组上浮形成月壳,而诸如橄榄石、低钙辉石等较重的铁镁质矿物结晶下沉形成月幔。然而,从阿波罗(Apollo)和月神(Luna)探测任务返回的月球样品中没有发现与月幔准确物质组成有关的直接证据,关于月幔物质组成的推论至今没有被很好地证实。

直径非常大的撞击坑有可能穿透月壳,使月幔物质被挖掘出来并可能被探测及取样。位于月球背面的南极-艾特肯盆地(SPA)直径约为2500公里,是月球表面最古老、最大的撞击构造,最有可能撞穿月壳。然而,从现有月球轨道器获得的遥感数据表明,虽然SPA区域的铁镁质矿物含量偏高,但并没有橄榄石广泛出露的证据。这些物质是否可能来源于月幔还存在争议。

中国“嫦娥四号”探测器最近成功着陆在月球背面SPA区域的冯·卡门撞击坑内,并利用搭载的月球车——“玉兔2号”开展了巡视探测。中国科学院国家天文台李春来研究员与合作者报告了“玉兔2号”上配置的可见光和近红外光谱仪(VNIS)的初步光谱探测结果,分析发现了低钙(斜方)辉石和橄榄石的存在,这种矿物组合很可能代表了源于月幔的深部物质。进一步的地质背景分析表明,这些物质是由附近直径72公里的芬森撞击坑挖掘出来,并抛射到了“嫦娥四号”着陆地点的月幔物质。

这一工作的意义在于揭示了月幔的物质组成,为月球早期岩浆洋研究提供了新的约束条件,加深了对月球内部形成及演化的认识。“玉兔2号”将继续探索冯·卡门撞击坑底部的这些物质,以了解它们的地质背景、起源和组成,为未来开展月球样品采样返回任务提供依据。



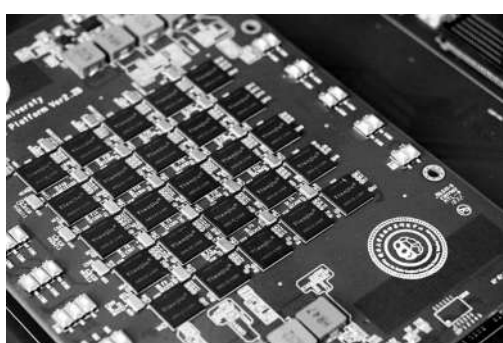
“嫦娥四号”着陆地点和抛射月幔物质的芬森坑

2 构架出面向人工通用智能的异构芯片

发展人工通用智能(AGI)的方法一般有两种:以计算机科学为导向和以神经科学为导向,将两者结合是目前公认的最佳发展AGI的路径。由于它们的构想和编码方案有着根本的不同,这两种方法依赖于截然不同的且互不兼容的计算平台,难以构建一个二者集成的计算平台,从而阻碍了AGI的发展。因此,发展一个能够同时支持流行的基于计算机科学的人工神经网络和受神经科学启发的模型和算法的通用平台非常重要。

清华大学施路平研究员与合作者提出了一种天机芯片架构,它高效集成了上面的两种方法,提供了一个异构集成的协同计算平台。该芯片采用多核结构,可重构构件和流线性数据流的混合编码方案,既能同时独立支持基于计算机科学的机器学习算法和神经科学主导的算法以及神经科学中的多种编码方案,还支持两者的异构联合建模,提供新的解决方案。

研究人员仅使用一个芯片,演示了无人驾驶自行车系统中通用算法和模型的同步处理,实现了实时目标检测、跟踪、语音控制、避障、过障和平衡控制。该项研究有望为更通用的硬件平台发展铺平道路并推动AGI的发展。



天机芯片

3 提出基于DNA检测酶调控的自身免疫疾病治疗方案

病毒的种类成千上万,其感染特点和致病方式也是千变万化,但是万变不离其宗的是,当病毒入侵时,其自身的遗传物质会不可避免地携带到宿主细胞

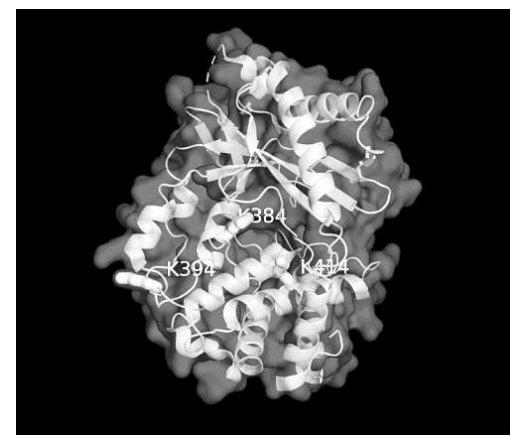
中。机体针对这些外源遗传物质(如DNA等)迅速做出反应,甚至不惜以伤及自身为代价,这是病毒感染导致致死性炎症的主要原因。

关于外源DNA诱发免疫反应的认识可以追溯到上百年前,然而其背后的机理并不清楚。2013年,这一领域国际上取得了重要突破,科学家鉴定发现蛋白质cGAS(环鸟苷酸-腺苷酸合成酶)是胞内DNA病毒感受器。随着cGAS被揭示,科学家发现在检测病毒入侵以外,cGAS的异常激活也直接导致一类自身免疫疾病。因此,寻找有效控制cGAS活性的手段并探究其调控机理,对抵抗病毒感染及自身免疫疾病的治疗都至关重要。

军事医学研究院(国家生物医学分析中心)张学敏和李涛研究组与合作者发现,乙酰化修饰是控制cGAS活性的关键分子事件,并揭示了其背后的调控规律。

研究人员鉴定了cGAS的3个关键乙酰化位点(K384、K394和K414),发现其中任何一个位点发生乙酰化修饰,都可以导致cGAS失去活性。进而,研究者发现乙酰水杨酸(阿司匹林)可以抑制cGAS在上述关键位点上发生乙酰化从而抑制其活性。此外,对cGAS调控机制的进一步探究发现,cGAS在胞内是以复合物形式存在并发挥功能的。研究人员利用蛋白质组学技术鉴定到了cGAS的关键调控因子——G3BP1。机制研究揭示G3BP1与cGAS结合,通过帮助cGAS形成多聚物确保其能更高效地识别DNA。在缺失G3BP1的情况下,细胞中cGAS的活性明显降低。重要的是,绿茶多酚的主要成分、天然小分子化合物EGCG是G3BP1的抑制剂。研究人员发现EGCG能够通过干扰G3BP1与cGAS的相互作用,抑制cGAS激活。

上述研究不但揭示了机体抗病毒感染的关键调控机制,还发现了有效的cGAS抑制剂,为AGS(艾卡迪综合征)等自身免疫疾病提供了潜在治疗策略。



cGAS结构及其3个关键乙酰化位点

4 破解藻类水下光合作用的蛋白结构和功能

光合作用利用太阳光把二氧化碳和水转换成有机物和氧气,为地球上几乎所有生物的生存提供了能源和氧气。为了适应不同的光环境,光合生物进化出了各种不同的色素分子和色素结合蛋白,由此最大程度地利用不同环境下的光能。

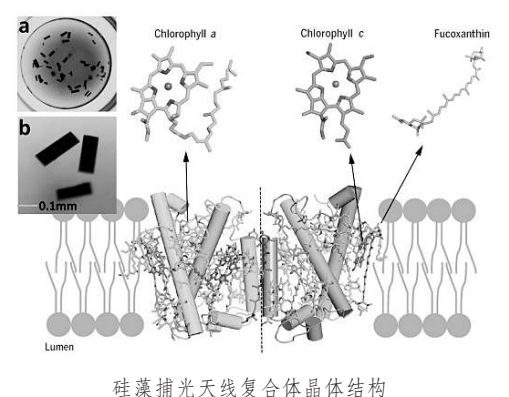
硅藻是一种丰富和重要的水生光合真核生物,占水生生物原初有机生产力的40%,或地球总原初生产力的20%,在全球的碳循环中发挥了重要作用。硅藻在水生环境下成功繁殖的重要因素之一是因为它含有岩藻黄素/叶绿素结合膜蛋白(FCPs),该色素蛋白使硅藻具有独特的光捕获和保护及快速适应光强度变化的能力。

中国科学院植物研究所沈建仁、匡廷云研究组报道了海洋硅藻——三角褐指藻FCP的高分辨率晶体结构,揭示了蛋白支架内的7个叶绿素a、2个叶绿素c、7个岩藻黄素以及可能的1个硅甲藻黄素的详细结合位点,从而揭示了叶绿素a和c之间的高效能量传递途径。该结构还显示了岩藻黄素与叶绿素之间的紧密相互作用,使能量通过岩藻黄素高效地传递和淬灭。该研究团队进一步与清华大学生命科学学院隋森芳研究组合作,解析了硅藻的光系统II(PSII)与FCPII超复合体的分辨率为3.0埃的冷冻电镜结构。该超复合体由两个PSII-FCPII单体组成,每个单体包含了1个具有24个亚基的PSII核心复合体和11个外周FCPII天线亚基,其中的FCPII天线以2个FCPII四聚体和3个FCPII单体存在。整个PSII-FCPII二聚体包含230个叶绿素a分子、58个叶绿素c分子、146个类胡萝卜素分子以及锰簇复合物、电子传递体和大量脂分子等。该结构揭示了硅藻PSII核心中特有亚基的特点及其与高等植物PSII-LHCII复合体明显不同的天线亚基排列方式,以及硅藻巨大的色素分布网络,为阐明硅藻高效的蓝绿光捕获、能量转移和耗散机制提供了坚实的结构基础。

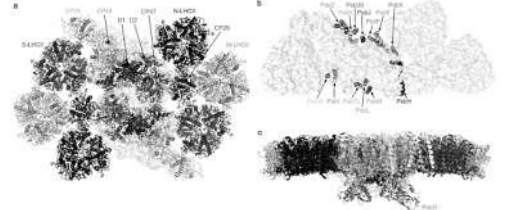
为了更进一步理解水下光合作用,研究人员还基于冷冻电镜技术解析了广泛存在的与高等植物具有相似光合作用的水生生物——绿藻(假根羽藻)光系统I(PSI)-捕光复合体(LHCI)超复合体的结构,分辨率为3.49埃。该结构揭示了包含有原核生物和真核生物亚基特性的13个PSI核心亚基,以及10个LHCI天线亚基的结构(其中8个形成一个双半环结构,其余2个形成一个额外的LHCI二聚体)。并与浙江大学医学院张兴研究组合作,解析了绿藻——莱茵藻完整的C₅S₂M₂N₂型PSII-LHCII超复合体的冷冻电镜结构,分辨率为3.37埃。该结构显示,绿藻C₅S₂M₂N₂型超复合体是一个二聚体,每个单体由位于中央的PSII核心复合体和环绕该核心的3个LHCII三聚体、1个CP26和1个CP29外周天线亚基所构成。该工作还揭示了多个与高等植物不同的绿藻PSII核心和捕光天线LHCII

的结构特征。以上研究为揭示绿藻中光能的高效吸收、传递和淬灭机制提供了坚实的结构基础,并为揭示PSI-LHCI和PSII-LHCII超分子复合体在进化过程中发生的变化提供了重要线索。

上述研究进展率先破解了硅藻、绿藻光合膜蛋白超分子结构和功能之谜,不仅对揭示自然界光合作用的光能高效转化机理具有重要意义,也为人工模拟光合作用、指导设计新型作物、打造智能化植物工厂提供了新思路和新策略。



硅藻捕光天线复合体晶体结构



绿藻光系统II和捕光天线超复合体结构

5 基于材料基因工程研制出高温块体金属玻璃

金属玻璃具有独特的无序原子结构,使其拥有优异的机械和物理化学特性,在能源、通信、航天、国防等高新技术领域有广泛应用,是现代合金材料的重要组成部分。

由于金属玻璃在接近玻璃转变温度时会发生塑性流动,导致机械强度显著降低,严重限制了它们的高温应用。虽然目前已开发出玻璃转变温度大于1000 K的金属玻璃,但由于其过冷液相区(介于玻璃转变温度和结晶温度之间的温度区间)很窄,导致其玻璃形成能力不足,难以形成大尺寸材料;且导致其热成型性能很差,难以进行零件加工。上述挑战的关键在于金属玻璃形成成分的合理设计,迄今为止发现的具有特定性能的高温金属玻璃还主要是反复试验和尝试的结果。

中国科学院物理研究所柳延辉研究组与合作者基于材料基因工程理念开发了具有高效性、无损性、易推广等特点的高通量实验方法,设计了一种Ir-Ni-Ta-(B)合金体系,获得了高温块体金属玻璃,其玻璃转变温度高达1162K。新研制的金属玻璃在高温下具有极高强度,1000K时的强度高达3.7千兆帕,远远超出此前报道的块体金属玻璃和传统的高温合金。该金属玻璃的过冷液相区达136K,宽于此前报道的大多数金属玻璃,其形成能力可达到3毫米,并使其可通过热成型获得在高温或恶劣环境中应用的小尺度部件。

该研究开发的高通量实验方法具有很强的实用性,颠覆了金属玻璃领域60年来“炒菜式”的材料研发模式,证实了材料基因工程在新材料研发中的有效性和高效率,为解决金属玻璃新材料高效探索的难题开辟了新的途径,也为新型高温、高性能合金材料的设计提供了新的思路。



基于材料基因工程研制的高温块体金属玻璃

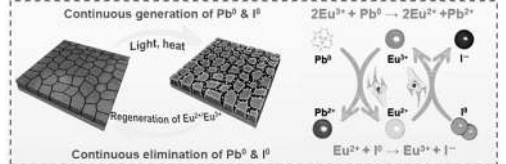
6 阐明钙离子对提升钙钛矿太阳能电池寿命的机理

钙钛矿太阳能电池是广受关注的新一代光伏技术,而其工作稳定性是目前产业化的主要障碍。传统研究主要通过组分优化、封装、界面改性和紫外光过滤等来有效抑制如氧气、水分和紫外光等因素导致的性能下降,从而提高器件的使用寿命。然而要进一步提高器件的寿命,需要发展一种长期有效的方法以抑制过程中材料的本征缺陷。

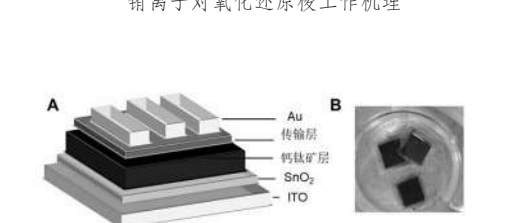
为提高本征稳定性,北京大学工学院周欢萍研究组、化学与分子工程学院严纯华/孙聆东研究组及其合作者提出,通过在钙钛矿活性层中引入钙离子对(Eu²⁺/Eu³⁺)作为“氧化还原梭”,可同时消除Pb²⁺和I⁻缺陷,进而大幅提升器件使用寿命。有趣的是,该离子对在器件使用过程中没有明显消耗,对应的器件的效率最高达到了21.52%(认证值为20.52%),并且没有明显的迟

滞现象。同时,引入钙离子对的薄膜器件表现出优异的热稳定性和光稳定性,在连续太阳光照或85℃加热1000小时后,器件仍可分别保持原有效率的91%和89%;在最大功率点连续工作500小时后保持原有效率的91%。

该方法解决了钙钛矿太阳能电池中限制其稳定性的一个重要的本质性因素,可以推广至其他钙钛矿光电器件,对于其他面临类似问题的无机半导体器件也具有参考意义。



钙离子对氧化还原梭工作机制



钙钛矿太阳能电池的结构(A)和实物(B)

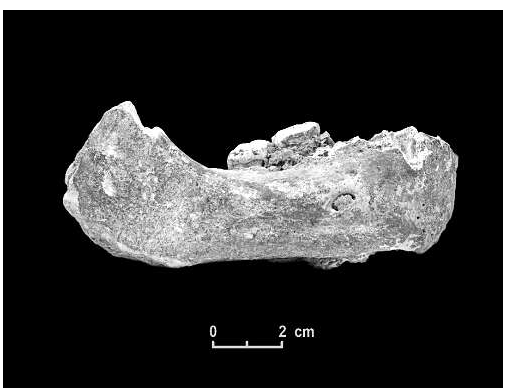
7 青藏高原发现丹尼索瓦人

丹尼索瓦人是一支已经消失的神秘古人类,过去对他们的了解主要基于仅出土于西伯利亚丹尼索瓦洞的少量化石碎片以及保存在其中的高质量的古基因信息。遗传学研究显示,丹尼索瓦人对一些现代低海拔东亚人群和海拔现代藏族人群有基因贡献,对现代藏族人群的高海拔环境适应有重要意义。

由于缺乏化石形态学信息,科学家很难评估丹尼索瓦人与分散在亚洲和其他地区的丰富的古人类化石之间的联系,也很难准确理解丹尼索瓦人与现代亚洲人群的关系。此外,现代藏族等青藏高原人群特有的高海拔环境适应基因来源,特别是其是否继承自丹尼索瓦人等,是非常重要的亟待解决的科学问题。

中国科学院青藏高原研究所陈发虎研究组、兰州大学张东菊研究组联合德国马普学会进化人类学研究所Jean-Jacques Hublin研究组等合作者,报道了一个利用古蛋白质分析方法鉴定为丹尼索瓦人的下颌骨,该下颌骨来自中国甘肃省夏河县的白石崖溶洞。研究人员通过对化石上附着的碳酸盐核进行铀系法测年,确定下颌骨至少有16万年的历史。该化石标本是丹尼索瓦洞以外发现的首件丹尼索瓦人化石证据,对标本的全面分析也为丹尼索瓦人研究提供了丰富的体质形态学信息,包括下颌和牙齿形态等信息。

该项研究表明,早在现代智人到来之前,丹尼索瓦人在中更新世晚期就已经生活在青藏高原高海拔地区,并成功地适应了高寒缺氧环境。



夏河下颌骨化石

8 实现对引力诱导量子退相干模型的卫星检验

量子力学和广义相对论是现代物理学的两大支柱。然而,任何试图将量子力学和广义相对论进行融合的理论工作都遇到极大困难。目前关于如何融合量子力学和引力理论的讨论,模型众多,但都普遍缺乏实验检验。



实现对引力诱导量子退相干模型的卫星检验

中国科学技术大学潘建伟及其同事彭承志、范靖云等与合作者,利用“墨子号”量子科学实验卫星,在国际上率先在太空中开展了引力诱导量子纠缠退相干的实验检验,对穿越地球引力场的量子纠缠光子退相干情况进行测试。根据“事件形式”理论模型预言,纠缠光子对在地球引力场中的传播,其关联性会概率性地损失;而依据现有的量子力学理论,所有纠缠光子对将保持纠缠特性。最终,卫星实验检验结果并不支持“事件形式”理论模型的预测,而与标准量子理论一致。

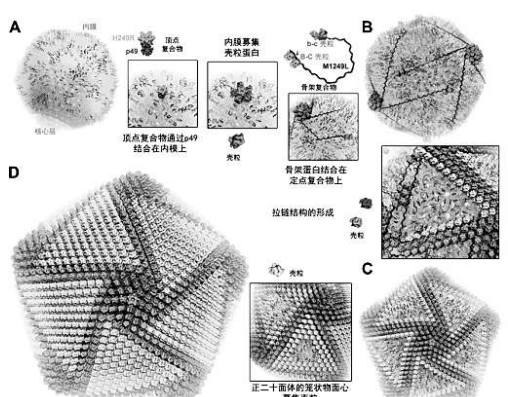
这是国际上首次利用量子卫星在地球引力场中对尝试融合量子力学与广义相对论的理论进行实验检验,将极大地推动相关物理学基础理论和实验研究。

9 揭示非洲猪瘟病毒结构及其组装机制

非洲猪瘟病毒(ASFV)是一个巨大而复杂的DNA病毒,能够引发野猪、猪患急性、热性、高度传染性疫病,发病率和死亡率高达100%,对生猪养殖产业造成巨大经济损失,目前尚未有可用的疫苗。

中国科学院生物物理研究所饶子和、王祥喜团队和中国农业科学院哈尔滨兽医研究所步志高团队联合上海科技大学等单位,在上海科技大学冷冻电镜中心连续收集了高质量数据,采用一种优化的图像重构策略,解析了非洲猪瘟病毒衣壳的三维结构,其分辨率达到4.1埃。该衣壳颗粒体型巨大且结构复杂,由17280个蛋白亚基组成,其中包括1种主要(p72)和4种次要衣壳蛋白(M1249L、p17、p49和H240R),它们组装成五重对称体和三重对称体的复合结构。主要衣壳蛋白p72原子分辨率结构展示出非洲猪瘟病毒潜在的构象型抗原表位,与其他的核膜质DNA病毒(NCLDV)显著不同。次要衣壳蛋白在衣壳内表面形成了一个复杂的蛋白相互作用网络,通过调控相邻的病毒壳微体之间的作用力介导衣壳的组装并稳定了衣壳的结构。作为核心的组织者,100纳米左右的M1249L蛋白沿着三重对称体的每个边缘桥接了两个结构的五重对称体,与其他衣壳蛋白形成了延伸的分子间网络,驱动了衣壳框架的形成。

这些结构细节揭示了衣壳稳定性和组装的分子基础,对非洲猪瘟疫苗的研发具有十分重要的理论指导意义。



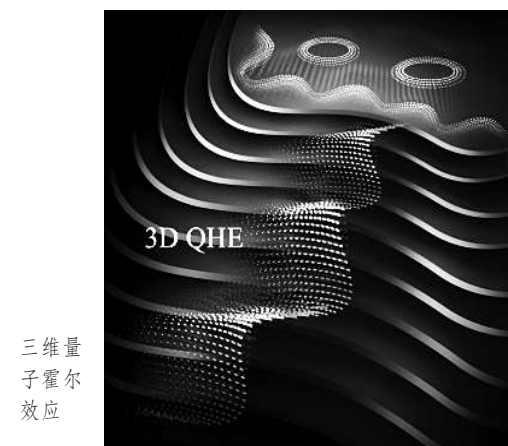
非洲猪瘟病毒衣壳蛋白结构及其组装

10 首次观测到三维量子霍尔效应

在二维电子体系中发现量子霍尔效应使得拓扑学在凝聚态物理学中发挥了核心作用。30多年前,Bertrand Halperin等人从理论上预言可能在三维电子气体系中产生量子霍尔效应,但迄今为止,还没有从实验上观测到“三维量子霍尔效应”。

南方科技大学物理学系张立源研究组、中国科学院大学物理学系乔振华研究组及新加坡科技设计大学杨声远等合作,在块体碲化铋(ZrTe₅)晶体中首次实验实现了“三维量子霍尔效应”。研究人员对碲化铋体单晶进行了磁场下的低温电子输运测量,在一个相对较低的磁场上达到了极量子极限状态(只有最低朗道能级被占据的)。在该状态下,研究人员观测到了一个接近于零的无耗散纵向电阻,并沿着磁场方向形成了一个正比于半个费米波长的很好的霍尔电阻平台,这些是三维霍尔效应出现的明确标志。

理论分析还表明,该效应源于在极量子极限下电子关联增强产生的电荷密度波驱动的费米面失稳。通过进一步提高磁场强度,纵向电阻和霍尔电阻都极具增加,呈现出金属-绝缘体转变。该研究进展提供了三维量子霍尔效应的实验证据,并提供了进一步探索三维电子体系中奇异量子相及其相变的很有前景的平台。



三维量子霍尔效应