

打开重离子治癌的“黑箱”

■本报记者 叶满山

重离子治癌作为一种先进的放射性治疗手段，正以其独特优势改变着抗癌的版图。研究发现，重离子在精准打击癌细胞的同时，还能将对周围正常组织的伤害降至最低，这在癌症治疗中是一次革命性的飞跃。尽管重离子治癌在临床上屡获佳绩，但其背后的微观机理一直是科学界尚未完全揭开的神秘面纱。

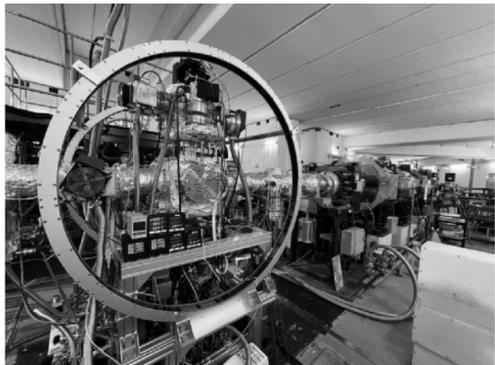
近期，中国科学院近代物理研究所(以下简称近代物理所)原子物理中心科研人员及合作者在重离子治癌微观机理研究方面取得重要进展，首次发现重离子辐照生物分子体系引起的分子间能量及质子转移等次级粒子倍增机制。该机制被认为是重离子治癌生物学效应优异的重要原因之一。近日，相关研究成果作为亮点论文发表于《物理评论 X》。

微观机理像一个黑箱

重离子，如碳离子、氧离子等，因其较大的质量和特殊的物理性质，成为治疗癌症的有力武器。它们在穿越人体组织时，能够将大部分能量集中在射程末端，形成一个被称为“布拉格峰”的能量释放高峰。这一特性使得重离子可以像精确制导的导弹一样，将致命的能量精准投送到癌细胞所在的位置，只对沿途的正常组织造成极小的损伤。

然而，重离子治癌的微观机理像一个黑箱。科学家们只能从宏观层面观察到重离子辐照后癌细胞的死亡，却无法清晰描绘出这一过程中生物体内发生的具体变化。“重离子损伤一直是根据一种平均效应计算和理解的，因此对它的认知相对来说具有宏观性。那么DNA损伤究竟是什么具体的分子机制造成的，实际上存在模糊的认识或者不清楚的地方。”论文通讯作者、近代物理所研究员马新文说道。

尽管已有研究显示，重离子束流在路径上与水分子等相互作用产生的电子、氢氧根等次级粒子是造成细胞损伤的重要原因，但具体的分子间作用机制仍有待深入研究。论文通讯作者、近代物理所研究员许慎跃表示，揭秘重离子如何在微观层面精准杀死癌细胞，



安装在兰州重离子加速器冷却储存环上的反应显微成像谱仪。许慎跃/摄

及其为何比传统的X射线、伽马射线等杀伤力更强，是团队研究的首要问题。

捕捉稍纵即逝的“魔法粒子”

这项最新研究的实验依托兰州重离子加速器冷却储存环和320千伏高电荷载态离子综合研究平台开展。该平台为科研人员提供了研究所需的高品质离子束流。

马新文作了个形象的比喻：“我们利用反应显微成像谱仪迅速、准确地探测末态电子和离子碎片，就像是在微观世界中捕捉那些稍纵即逝的‘魔法粒子’。”

然而，重离子实验的物理难度极大，生物分子大多处于液体或固体状态，如何在破坏高真空环境的前提下，产生可模拟人体组织的气体靶，是一个非常棘手的问题。

为了深入探究重离子治癌的微观机理，科研人员精心设计了一系列实验。他们选取了DNA的基本结构单元——嘧啶分子作为模型，将其与水分子结合形成团簇，以此模拟生物体内的真实环境。

实验团队开发了先进的混合团簇源技

术。这一技术能够将固体或液体的生物分子通过加热形成蒸气，再利用载气将蒸气带入反应成像谱仪中，形成嘧啶分子和水的混合团簇。

这一设计巧妙地将生物分子置于类似于人体组织的水环境中，又尽量保持体系简单、易于实验观测，为研究重离子与生物体系的相互作用提供了合理又可行的条件。同时，通过这种方式，他们成功攻克了在高真空环境下进行生物分子实验的难题。

“因为研究对象是生物分子，这是液体的状态。我们把固体或者液体先通过加热的方式让它形成蒸气，在这之后，团队需要用氨气作为载气，先后通过实验所需的嘧啶和水的蒸气注入反应成像谱仪中和重离子碰撞。”许慎跃详细地介绍了混合团簇源技术的原理和应用过程，“我们通过不懈努力，最终成功制备出实验所需的水合嘧啶团簇。”

在这一过程中，最大的难题在于如何摸索出切实可行的实验参数，从而产生实验所需的团簇并控制它的大小。样品温度、载气压强等参数都会影响团簇的形成，需要一次次试验摸索最佳条件。经过近两年的努力，研究团队终于得到了想要的结果，也证明了他们的方案是有效的。

为优化治疗方案提供新思路

整个研究工作涉及实验、理论计算和模拟等几大块内容。“我负责数据分析，工作量很大，原始数据就有几百GB。从开始分析到得出初步结果大概需要几周时间，但整个过程并非一帆风顺。”论文第一作者、近代物理所博士生高岳回忆道，“例如，我们在进行数据分析时遇到了一个难题——由于电子的信息测量不

全，无法直接得到电子的能量信息。”

就在高岳等人一度陷入困境时，导师许慎跃建议他们可以借助反阿尔贝变换的方法弥补这一缺陷。“这一方法果然奏效，我们最终成功还原出电子能谱，这在揭示衰变机制中起到了关键作用。”高岳说。

实验结果显示，重离子辐照之后低能电子产额显著增加。结合分子能级计算和动力学模拟等理论手段的分析表明，这种增加是由水分子的内壳层电离诱发分子间级联衰变引起的。内壳层电离的水分子会通过分子间库仑衰变(ICD)将能量传递给嘧啶分子，引起嘧啶分子电离并释放一个低能电子。这一过程会进一步诱发水分子之间的质子转移，产生有杀伤力的羟基自由基(HO·)。

通常认为，内壳层电离的水分子并不直接作用到DNA分子，而是通过自身解离的方式进一步衰变。而最新的研究发现，内壳层电离的水分子不仅会直接破坏DNA的结构，同时还在邻近区域产生更多的低能电子和羟基自由基等有杀伤力的次级粒子，对DNA造成进一步伤害。

许慎跃指出：“这个级联衰变过程就像是一场连锁反应，不仅直接破坏DNA，还在它周围产生了有杀伤力的粒子，使得DNA双链同时被破坏的可能性大大增加。这种级联过程的破坏性远大于仅仅由水分子直接解离所造成的伤害。”

此外，与电子、X射线和质子等其他射线相比，重离子辐照引起水分子内壳层电离的比例显著提升，意味着会有更多级联反应发生，从而造成更大的破坏。

马新文表示：“这一发现让我们非常兴奋。它揭示了重离子治疗癌症中的一种重要机制，即次级粒子的倍增效应。这一发现不仅有助于我们更深入地理解重离子治疗的微观机理，还为优化治疗方案提供了新思路。”

许慎跃也补充道：“在投稿过程中，审稿人对我们的评价非常高，在提出详细改进意见的同时，还有一位审稿人在审稿报告中祝贺我们取得的成功。”

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.15.011053>

按图索技

变废为宝，碳量子点提高光合作用效率

随着全球气候变化和粮食需求的增加，提高光合作用效率成为科学研究的重要方向。中国科学院深圳先进技术研究院副研究员高翔团队联合上海交通大学教授杨琛团队，成功研发了一种以农业废弃物为原料合成的碳基纳米材料——碳量子点，并将其用于增强植物的光合作用。近日，相关研究成果发表于《通讯-材料》。

光合作用是指植物、藻类和蓝细菌利用太阳能将二氧化碳和水转化为氧气和有机物的过程，为地球上几乎所有生命提供了食物和能量。然而，天然光合作用以叶绿素等光合色素捕获并利用光能，但叶绿素仅能吸收太阳光谱中的可见光部分，且对绿光的吸收效率较低，植物光合作用效率通常不到1%。

该研究中，高翔团队利用秸秆、叶片和杂草等农业废弃物生物物质，开发了功能化纳米碳量子点材料。该材料不仅可以吸收植物无法吸收的紫外光，吸收效率低的绿光转换为红光，还能够将吸收的光子激发产生电子，为光合电子传递链提供额外的电子。

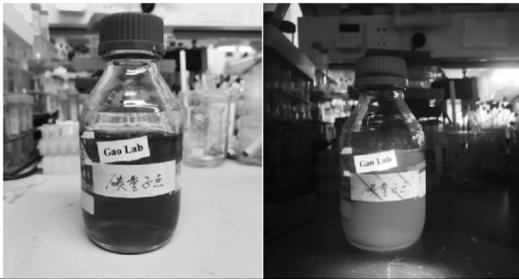
研究团队将这种新型农业生物物质碳量子点添加至蓝藻液培养液或喷洒在植物上。实验结果表明，蓝藻的二氧化碳固定率提高了2.4倍，甘油的产量增加了2.2倍，而拟南芥的植物生物量则提高了1.8倍。这一结果展示了碳量子点在提高光合作用效率和促进植物生长方面的巨大潜力。

研究人员介绍，该研究开发的新技术

不仅能够提高光合作用效率，还能将农业废弃物生物物质回收利用，在改善植物生长的同时为环境保护作出贡献，为农业领域的创新提供潜在的解决思路。

目前，研究团队基于该技术已申请发明专利并进入成果转化阶段，推动该技术在农业中的应用示范。另外，高翔团队已

碳基纳米材料溶液自然光下放置(左)，其在紫外光照射下发出红光(右)。研究团队供图



与多个团队基于该研究成果进一步开展合作。初步实验显示，该纳米材料对花生、玉米和大豆等农作物的生长具有不同程度的促进作用，目前正在计划开展户外大田试验。

相关论文信息：<https://www.nature.com/articles/s43246-025-00763-w>

《奇异博士》走进现实

■本报见习记者 江庆龄

在电影《奇异博士》中，有这样一位病人，他因为脊髓损伤导致高位截瘫，失去了对胸部以下身体的控制能力，无法站立或行走。后来，这位病人通过魔法恢复正常，甚至能与朋友打篮球。

近日，同样的奇迹在复旦大学附属华山医院(以下简称华山医院)发生了。全球首批第4例、通过脑脊液接口让瘫痪者重新行走的临床概念验证手术成功实施。

这并非艺术创作，而是源自复旦大学类脑智能科学与技术研究院青年副研究员加福民团队全球首创的“三合一”脑脊液接口技术——通过微创手术在脑与脊髓间搭建“神经桥”，同步置入电极仅需4小时，术后24小时患者在人工智能辅助下即可恢复腿部运动。

值得一提的是，今年1至2月，该团队已联合复旦大学附属华山医院(以下简称华山医院)成功完成全球首批3例临床概念验证手术。手术后，严重脊髓损伤患者在两周内实现了自主控腿、迈步行走。

用“意图”重建运动能力

脊髓是连接大脑与外周神经的关键通路，脊髓一旦损伤，大脑运动指令无法到达脊髓以控制肌肉，患者就可能面临终身瘫痪。遗憾的是，虽已有针对瘫痪患者的康复技术，但对于下肢尚未有成熟的技术。

加福民团队研发的新一代脑脊液接口技术的基本思路为：通过在大脑内置入的电极采集患者运动意图，并以该运动意图驱动脊髓刺激器，作用于脊髓神经根，进而激活下肢肌肉，从而重建患者运动功能，帮助他们重新获得行走能力。

加福民介绍，团队利用3T磁共振成像设备，设计了多种扫描序列的成像方案，并开发自动化重建算法精确捕捉腰骶段脊髓神经根的结构特征，目前已生成个体化脊髓神经根模型，为个性化脊髓损伤治疗提供了新方向。

据悉，新一代脑脊液接口技术具有“高精度、高通量、高集成、低延时”的特点。团队使用直径1毫米左右的电极芯片替代原来直径50毫米的片状电极，以微创、更具安全性的方式置入，从而大幅减少手术创伤。同时，团队设计了一套运算速度快、运算能力准确、算力需求低的轻量级人工智能算法模型，可实现高精度、高实施性运动意图解码，实时解码大脑发出的运动指令。

“如果患者想抬腿，但算法没有解码出来，或者只是晚了几秒，患者可能就会摔倒。”加福民表示，团队花了将近3年时间，才在算法层面实现了对大脑运动意图实时解码的突破。

更重要的是，团队采用了“三合一”的方法，利用采集一体脑脊液接口系统硬件模块，将脑电采集与脊髓刺激设备整合为一台微型颅内植入设备，在降低手术风险的同时，提高了脑电信号采集的稳定性和效率。

“再次体会到走路的感觉了”

“抬腿、迈步、站稳了！”在8个摄像头的记录下，小林扶住助行器，缓缓抬起腿。

两年前，他不慎从近4米高的楼梯上跌落，导致胸脊髓损伤后截瘫，被宣判“永远站不起来”。

双腿丝毫不能动弹，从家庭的顶梁柱变为累赘，34岁的小林曾一度失去生活的希望。

转机发生在2024年10月，小林得知加福民团队正在招募志愿者，他第一时间报了名。2025年伊始，小林成为加福民团队与中山医院教授汪昕、丁晶联合开展的“脑脊液环视硬膜外电刺激用于脊髓损伤后下肢瘫痪患者的安全性和有效性”临床研究的首例受试者。

中山医院为临床试验提供人员、场地等全方位保障。其间，加福民团队与神经内科、神经外科、康复医学科、影像科等多科室专家紧密配合，就临床试验方案开展多轮讨论。

经过全面评估与检查，多学科联合专家团队在准确定位的基础上，为小林制定了一套前所未有的方案：立体定向电极置入术与脊髓神经刺激电极置入术。

2025年1月8日，历时4小时，研究团队通过微创手术的方式，在小林脑内和脊髓硬膜外的关键调控部位精准置入电极。术后第1天，小林的小腿就出现了缓慢的屈曲；第8天，他开始在站立架辅助下站立抬腿训练；第10天，他就能在“天轨”驱动下尝试跨步，并逐渐适应步行模式，实现自主控制双侧下肢跨步行走；第49天，他可以在悬吊下独立使用助步器行走……小林激动地说：“我终于再次体会到走路的感觉了。”

面向全球招募患者

第一次面向社会公开招募患者时，共有300多位患者报名参加临床试验。综合考虑患者的年龄、病情、心理健康等各项条件，联合团队最终选取的受试者均为“90后”男性。加福民解释：“目前研发的脑脊液接口设备

仅适用于成年患者，且参与临床试验的患者每日要进行5至7小时的康复训练，这需要患者和患者家属的积极配合。”

而第一例患者小林以令人惊喜的速度恢复运动机能的同时，研究团队也在持续推动临床试验。

第二例患者是来自河北的小赵，他也是外伤后截瘫，瘫痪22个月。他的双下肢肌肉极度萎缩，很可能成为恢复行走的障碍。脑脊液接口攻关团队迎难而上，在2月5日通过精准的置入方案完成置入，联合智能化信号解码，最终让术前下肢萎缩完全不能动的小赵，术后第一天开机1小时即脑脊液接口、术后两周实现辅助行走。

来自山东的小温是第三例患者，瘫痪10个月。多学科团队依靠自行研发的术前神经重建成像技术，通过精湛的手术成功把电极置入预定的位置。2月25日手术后，术前完全不能活动下肢的小温也实现了次日开机1小时即脑脊液接口。

从塞尔维亚受伤辗转华山医院手术的海员小周则是第四例患者。

“这几位截瘫患者治疗效果符合甚至超出我们的预期，初步证明新一代脑脊液接口方案的可行性。2家医院、4例手术的完成，也证明脑脊液接口技术可复制、可推广。”

这不仅技术的胜利，也是瘫痪患者重新生活的开始。加福民表示，团队计划继续联合国内多家临床单位，开展更多脑脊液接口临床概念验证工作，积累更多真实数据，进一步提升产品。加福民说：“硬件产品有望今年年底进入临床，我们正在面向全球招募患者。”

集装箱

西浦团队刷新抗量子密码领域全球纪录

本报讯(记者陈彬 通讯员寇博)近日，江苏省金融学会、西交利物浦大学(以下简称西浦)和量子金融安全国家重点研发项目三方联合发布重大研究成果，由西浦数学物理学院院长丁津泰领衔的研究团队在全球知名的抗量子密码学领域比赛“国际公开 Darmstadt 格最短向量(SVP)挑战赛”中破解200维难题，刷新全球纪录。据悉，该成果不仅是抗量子密码领域的重大突破，也为全球网络安全和数字基础设施建设提供了重要支持。

互联网和计算机安全依赖于密码学标准，其核心是公钥密码学(PKC)。然而，这些系统在理论上可能被量子计算机破解。为应对量子威胁，密码学家设计了基于格理论的下一代公钥密码学，其安全性依赖于格问题的难度，其中最核心的是寻找大维度格中的最短向量。通过增加维度，破解难度大幅提升，从而抵御量子计算机的攻击。格密码学被认为是提供首个保护敏感电子数据免受量子计算机威胁的主要方案。

丁津泰表示：“格密码的安全性直接依赖于求解最短向量问题的计算难度。此次200维SVP难题的成功破解，不仅展示了西浦在密码学前沿领域的研究实力，也为全球格密码安全研究提供了重要参考。”

在宣布这一重大科研成果的同时，西浦量子迁移交叉学科实验室(PQC-X)也正式揭牌。该实验室致力于抗量子密码通用关键技术研发和技术转移，将成为一个开放式的国际抗量子密码技术研发中心和技术转移中心。

化药1类新药 TLX-83 胶囊获批进入临床研究

本报讯(见习记者江庆龄)日前，由中国科学院上海药物研究所(以下简称上海药物所)、浙江大学、烟台创新创制山东省实验室和中山中山药物创新研究院联合申报的化药1类新药TLX-83胶囊，成功获得国家药品监督管理局颁发的临床试验通知书，获准开展治疗复发或难治性急性髓系白血病的I期临床试验。

记者从上海药物所获悉，TLX-83由该所研究员李佳课题组及浙江大学副教授刘滔课题组联合研发。李佳课题组针对临床FLT3抑制剂复发耐药所致应答期短暂的瓶颈问题，首次提出双靶点FLT3/CHK1克服FLT3抑制剂耐药的创新概念。在此基础上，刘滔课题组针对FLT3/CHK1双靶标开展了化合物设计与构效关系研究，随后李佳课题组开展了体内外药理学评价、成药性研究和适应症探索工作。

临床前研究结果显示，TLX-83展现出强效抑制FLT3/CHK1双靶活性，在细胞水平上对FLT3突变AML细胞具有极佳的抑制作用。在动物模型上，TLX-83显著抑制多种FLT3突变急性髓系白血病移植瘤模型的肿瘤生长，并显著延长急性髓系白血病模型小鼠的生存期。此外，TLX-83安全有效且质量可控。

研究团队表示，TLX-83临床试验获批，有望填补现有FLT3抑制剂在临床应用中的空白，为面临临床方案耐药的急性髓系白血病患者带来新希望。

全球首套兆瓦级工业炉零碳纯氨燃烧器试验成功

本报讯 近日，由西安交通大学参与，中石化广州工程公司、江苏焱鑫科技股份有限公司共同研发的全球首套兆瓦级工业炉零碳纯氨燃烧器及配套系统在江苏省江阴市顺利完成热态试验，标志着我国在工业炉零碳纯氨清洁高效燃烧技术领域实现了重大突破。

据悉，该项目攻关团队围绕纯氨燃料点火规律、火焰传播速度与流场特性匹配关系、纯氨燃料稳定燃烧条件，以及纯氨燃烧器及配套系统等关键技术展开研究，完成了核心技术和装备的自主开发、设计和建造工作。

今年3月上旬，该项目在江苏焱鑫科技股份有限公司“氢/氨/碳基燃料工业燃烧测试中心”进行热态试验，成功实现兆瓦级纯氨燃烧器的满负荷稳定运行测试，验证了氨作为工业炉替代燃料的可行性，可替代天然气等传统气体燃料，实现零碳排放。

氨作为一种安全、清洁、低成本储存运输的零碳燃料，可实现从源头减碳。例如，以单台100兆瓦工业炉为例，使用纯氨燃料每年可减少CO₂排放约17万吨。纯氨燃烧器的试验成功，为氨燃料在石化行业推广应用奠定了坚实基础，在陶瓷、冶炼等其他高碳排放行业也具有广阔的应用前景。(张行勇)

国产大模型推理引擎“赤兔”开源

本报讯(记者赵广立)3月14日，清华大学高性能计算研究所教授季冬团队与清华系科创业清程极智联合宣布，开源大模型推理引擎“赤兔 Chitu”。据介绍，该引擎首次实现非英伟达 Hopper 架构图形处理器(GPU)及各类国产芯片上原生运行FP8精度模型，为国产人工智能(AI)芯片的广泛应用和生态建设扫除了障碍。

当前，FP8精度模型长期依赖英伟达H系列高端GPU，这使得国内企业在部署大模型时受到AI芯片的限制。为打破这一困境，清华大学与清程极智联合开源的赤兔推理引擎通过底层技术革新，首次实现了非H卡设备对原生FP8精度模型的高效部署，摆脱了对特定硬件的依赖，极大降低了企业部署AI模型的成本。

季冬介绍说，赤兔凝结了团队多年并行计算与编译优化技术的积累，目标是弥合先进模型与多样化硬件之间的差距，让国产算力真正“跑起来”。

“赤兔的定位是成为连接多算力与大模型应用的桥梁。”清程极智CEO汤雄超表示，“我们的引擎不仅支持英伟达全系列GPU，还针对国产芯片深度优化，未来将陆续开源适配版本。”

据悉，在首期开源版本中，赤兔引擎部署DeepSeek-R1-671B满血版时相比部分国外开源框架，在GPU使用量减少50%的情况下推理速度仍有3.15倍提速。

另据了解，清程极智还推出了基于赤兔的“推理一体机”，提供开箱即用部署方案及专业运维服务，进一步简化企业AI落地流程。