中国科大在氧化物界面超导研究中取得重大进展

本报讯 中国科大微尺度物质科学国家研究中心、物理学院、中科院强耦合量子材料物理重点实验室陈仙辉院士、项子霁教授研究团队在氧化物界面超导研究中取得重大进展。研究团队与清华大学、复旦大学的研究组合作，在铁磁性EuO和(110)取向的$KTaO_3$(KTO)构成的氧化物异质结当中发现由铁磁近邻效应导致的具有特殊空间变化的超导态，即一维结构的超导条纹。这一结果为探索磁性和超导电性共存的非常规超导体系及其物理研究提供了新的途径。相关研究成果3月11日发表在学术期刊《自然·物理》上。

近年来，陈仙辉院士团队应用分子束外延(MBE)技术成功生长了由铁磁绝缘氧化物EuO和绝缘氧化物$KTaO_3$构成的EuO/KTO(110)异质结，并在前期工作中发现了受电场调控的二维界面超导；在此基础上，研究团队进一步通过调节界面二维电子气载流子浓度对该体系的超导电性及其与铁磁近邻效应的关联进行了系统研究，并与清华大学、复旦大学的研究团队合作进行了第一性原理计算和基于扫描超导量子干涉仪的高精度磁测量。

电输运测量结果表明在低载流子浓度的样品中，界面超导表现出反常的面内各向异性：沿面内[001]方向施加电流时，超导转变温度和上临界场都明显高于沿面内垂直方向（[1−10]）施加电流的情况；这种超导态的各向异性行为在高载流子浓度的样品中消失。超导转变温度与电流方向相关的现象极为罕见，它表明异质结界面发生了超导态维度降低的效应，即在二维平面内形成了沿[001]方向的一维超导条纹。ScanningSQUID成像实验进一步支持了超导条纹相形成的结论。同时，正常态电输运测量发现只有低载流子浓度的样品表现出反常霍尔效应和磁阻回滞行为，表明界面传导电子与EuO铁磁性的耦合受到能带填充的显著影响；第一性原理计算结果表明Eu原子4f轨道与Ta原子5d轨道的杂化效应在特定的能量范围内导致能带产生自旋劈裂，与上述实验结果相符。因此，EuO/KTO(110)异质结中奇特的一维超导条纹的出现被证明源于超导电性与磁性的耦合效应。

合肥微尺度物质科学国家研究中心博士研究生华翔宇为论文第一作者，中国科大项子霁教授、陈仙辉教授为论文共同通讯作者。清华大学刘铮教授团队和翁征宇教授为本工作提供了第一性原理计算支持。复旦大学王熠华教授团队为本工作提供了ScanningSQUID表征。

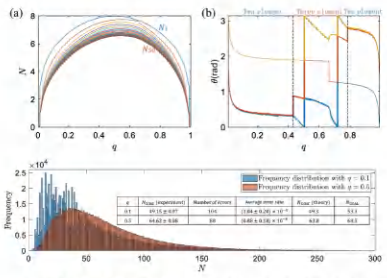
（合肥微尺度物质科学国家研究中心 物理学院）

中国科大实现最小资源消耗的量子态分辨

本报讯 中国科大郭光灿院士团队在量子态分辨研究中取得重要进展。该团队李传锋、项国勇、侯志博研究组在最小资源消耗的量子态分辨问题中首次提出了全局最优自适应策略，并发展了自适应集体测量实验技术，实验结果相比国际最好方法节省约30%资源。相关研究成果3月14日在线发表在学术期刊《物理评论快报》上。

量子信息任务中通常考虑最小消耗量子态分辨问题，即在给定分辨错误率要求下，如何设计最优测量策略使得平均消耗量子态拷贝数最少。当前国际上最好测量方法是最优固定测量，即对所有消耗资源采用相同测量。这种方法第一个局限性是固定测量，不能充分利用测量过程中得到的信息；第二个局限性是局域测量，不能全局提取量子态信息。

项国勇等人针对上述局限性首先提出全局最优自适应策略，既充分利用了测量过程得到的信息，也将局域测量拓展到集体测量。同时基于测量轮次平移对称性，他们给出了该自适应策略的快速收敛迭代算法。限制在局域测量时，平均消耗量子态拷贝数比国际当前最好方法节省16.6个拷贝（24%），称为局域界限。项国勇等人在近年着力发展的固定两拷贝集体测量技术基础上，进一步发展了自适应两拷贝集体测量技术，实验上实现了基于自适应量子集体测量技术的全局最优自适应量子态分辨策略。在错误率0.01%要求下，分辨二维量子混态消耗的拷贝数显著打破了局域界限，节省了3.9个拷贝（6.0%）。



全局最优自适应策略及其迭代求解算法，以及自适应集体测量用于量子态分辨的实验结果

该工作在理论上提出了适用于一切错误率要求和所有单向测量形式的全局最优自适应策略，该策略可以拓展到更为复杂的多个、高维量子态分辨情形，极大推进了最小消耗量子态分辨问题的理论研究。实验上也将集体测量技术从固定测量发展到自适应测量，首次展示了自适应集体测量技术的强大信息提取能力，这种测量能力有望应用于其他量子信息任务。

中国科大少年班学院本科生田博轩为论文第一作者，中国科大项国勇教授和侯志博教授共同为通讯作者。

（中国科学院量子信息重点实验室 中国科学院量子信息和量子科技创新研究院 物理学院）

中国科大实现开放光量子行走的高效机器学习

本报讯 中国科大郭光灿院士团队在光量子行走领域取得重要进展。该团队李传锋、许小冶、韩永建等人与合肥综合性国家科学中心董少钧以及南方科技大学翁文康等合作，利用人工神经网络作为开放系统中混合量子态的有效拟设，并通过改进自然梯度下降算法有效提高神经网络的训练效率，在具有内禀高维结构的开放光量子行走系统中，首次实现高保真度混合量子态重构。相关研究成果3月15日发表在学术期刊《科学·进展》上。

如何高效表征混合量子态是各个实验体系都面临的重大挑战。最近，基于人工神经网络学习开放量子系统的方法在理论上被提出。然而，随着系统规模不断增加，神经网络要保持对其混合量子态的高表达能力就需要更为复杂的网络结构，因此直接应用该方法重构大规模开放量子行走中的演化状态，将面临复杂的网络训练问题。

在本工作中，研究团队构建新型干涉测量装置以显著增加测量基数目，并通过建立开放量子行走系统与受限玻尔兹曼机网络模型之间的映射，同时开发新的梯度优化算法高效训练神经网络，最终完成对具有一定规模的开放量子行走系统中混合量子态的有效表征。相对于传统的态层析方法，这种有效的神经网络态层析仅利用部分所需的测量即可高保真度地重构混合量子态。为了增加神经网络训练数据，研究团队在前期构建的大尺度光量子行走实验系统基础上，进一步引入一个时间域上的不等臂干涉仪实现不同格点位置之间的干涉测量，从而显著地提高了测量基数目。结明，基于神经网络技术，仅利用相对于传统态层析方法50%的测量基数目，即可实现平均保真度高达97.5%的开放光量子行走的完整混合量子态表征。

此外，为提高复杂神经网络的训练效率，研究团队在自然梯度下降算法的基础上，找到合适的新度规，开发出更为有效的广义自然梯度下降算法。研究结果表明，相比于传统梯度下降算法，采用新算法的神经网络训练迭代次数可以减少一个数量级，并且可以高效规避局域极小值的影响，使损失函数到达更低取值，从而极大提高重构保真度。

这种高效的神经网络混合量子态层析方法为开放量子行走的广泛应用提供了新的可能性，并为进一步研究噪声辅助的量子计算和量子模拟奠定了基础。

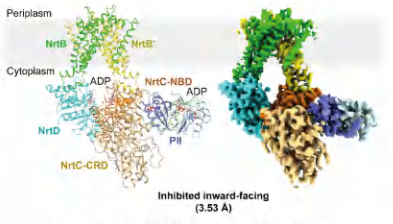
中国科学院量子信息重点实验室博士后王琴琴、合肥综合性国家科学中心副研究员董少钧为论文共同第一作者。

（中国科学院量子信息重点实验室 中国科学院量子信息和量子科技创新研究院 物理学院）

中国科大揭示信号蛋白PII调控蓝细菌碳氮平衡的新机制

本报讯 中国科大生命科学与医学部周丛照教授和陈宇星教授课题组，利用单颗粒冷冻电镜技术解析了三种不同状态的硝酸盐/亚硝酸盐ABC转运蛋白NrtABCD（缩写为NRT）的三维结构，包括结合底物硝酸根NO_3^-、结合Mg^{2+}−ATP以及结合信号蛋白PII的结构。基于结构和生化分析以及生理实验，作者阐明了一种新型ABC转运蛋白的底物识别模式和转运循环，以及PII如何通过响应不同的效应分子进而精细调控NRT转运活性的分子模型。相关研究成果3月8日在线发表在学术期刊《美国科学院院报》上。

作者解析了NrtBCD三种不同状态的三维结构。其中，结合底物硝酸根的NrtBCD−NO_3^-结构呈现向内开口（inward−facing）的构象，TMD中存在一个由结合硝酸根的疏水腔和富含精氨酸残基的亲水腔组成的连续的底物转运通道，负责底物的进入和释放。在结合Mg^{2+}−ATP的NrtBCD−ATP结构中，ATP的结合引发NBD相互靠近，导致TMD发生构象变化，底物转运通道被封闭，形成封闭的向外开口（outward−facing occluded）的构象。NrtBCD−PII复合物结构采用了一种完全不对称的抑制型构象（图1）。与以前报道的PII通过T−loop结合靶蛋白的方式不同，NrtBCD−PII中的PII通过核心结构域中的T−loop基部、B−loop和C−loop等元件同时结合NrtC的NBD和CRD结构域，代表了一种新的相互作用模式。



NrtBCD−PII复合物的三维结构

作者通过结构分析结合生化生理实验提出了PII通过调控NRT活性进而维持蓝细菌碳氮平衡的分子模型：在高N/C比时，PII通过与NrtC直接结合进而与NRT形成复合物，将NRT锁定为抑制型向内开口（inhibited inward−facing）的构象，同时跨膜区的底物转运通道收窄，抑制了NRT的硝酸盐/亚硝酸盐转运活性。而在低N/C比时，细胞内的α−酮戊二酸（2−OG）累积，此时2−OG结合PII并导致PII发生构象变化，使其从NrtC上解离下来，NRT转运活性得以恢复，向胞内转运硝酸盐/亚硝酸盐，维持碳氮平衡。

中国科大博士生李波为论文第一作者，中国科大周丛照教授、江永亮副教授和陈宇星教授为共同通讯作者。

（生命科学与医学部）

中国科大在锂电池高安全性电解液的研究中取得新进展

本报讯 中国科大化学与材料科学学院、合肥微尺度物质科学国家研究中心任晓迪教授团队联合火灾科学国家重点实验室王青松教授团队，研究发现利用分子间氢键的相互作用可以显著改善醚基电解液在电极界面的稳定性，并有效抑制锂金属电池热失控过程。相关研究成果3月6日发表在学术期刊《自然·通讯》上。

锂金属电池因其超高的能量密度被视为下一代电池技术的有力竞争者，但面临着电解液稳定性和安全性的双重挑战。对此，作者提出一种全新的分子锚定策略，有望同时解决醚基电解液的高压和安全难题。他们在乙二醇二甲醚(DME)中加入含强极性C−H基团的氟代醚溶剂(TTE)，发现DME和TTE之间可以通过氢键形成分子间的“锚定”作用，从而有效降低醚键上氧原子的电子云密度，大幅提高了溶剂的抗氧化能力。

基于分子锚定概念设计的电解液，展现出优异的高压性能。在Li+/溶剂摩尔比低至1:9的条件下，这种电解液即使在4.7V的高压下也没有明显的氧化分解。高电压锂金属电池的容量保持率和库仑效率均远超传统的高浓电解液。为了揭示其本质机制，研究人员开展了系统的表界面分析。光谱和理论计算的结果一致表明，在高浓电解液中，阴离子和溶剂分子形成配位结构，使电解液的氧化分解倾向大大增加。而在分子锚定电解液中，溶剂分子之间通过氢键形成稳定复合物，有利于提升电解液的热力学稳定性。此外，由于减少了活泼阴离子的使用，分子锚定电解液在高电压正极表面诱导形成的界面膜也更薄更稳定。

研究人员进一步考察了电解液的安全性能。在锂金属软包电池中，当温度升高到140C左右，高浓电解液与锂金属剧烈反应并放出大量热量，而分子锚定电解液与锂的相容性得到大幅提升。分子锚定电解液则可以将热失控开始的温度推迟到209C以上。这项工作证明，设计合理的分子间相互作用可以从根本上改变电解液的性能，为未来电池电解液的分子工程提供新的方向。

中国科大博士生崔壮壮为论文第一作者，中国科大任晓迪教授、王青松教授为通讯作者，合作者包括化学与材料科学学院焦淑红教授。

（化学与材料科学学院 合肥微尺度物质科学国家研究中心 火灾科学国家重点实验室）

中国科大在脑衰老和阿尔茨海默病的病理机制方面取得重要进展

本报讯 中国科大刘强团队揭示了在衰老和阿尔茨海默病的大脑中会产生大量的谷氨酸tRNA片段，并在线粒体内发生异常累积，导致线粒体蛋白的翻译发生损伤以及内嵴结构发生破坏，最终损伤谷氨酸的合成过程，加速大脑衰老和阿尔茨海默病的病理进程。相关研究成果3月7日发表在学术期刊《细胞代谢》上。

研究人员首先发现谷氨酸tRNA片段在大脑衰老进程中，其表达水平显著上升，并且这种增加具有物种保守性。除了衰老的大脑，在阿尔茨海默症病人的大脑中也同样检测到谷氨酸tRNA片段的增加。进一步的研究表明，谷氨酸tRNA片段的产生是依赖于angiogenin（ANG）：ANG在衰老过程中从细胞核异常定位到细胞质，并对谷氨酸tRNA进行切割。

研究人员利用分子杂交以及免疫荧光等技术发现谷氨酸tRNA片段主要在谷氨酸能神经元中的线粒体内发生异常积累。通过RNA−pull down和蛋白质谱的方法鉴定了谷氨酸tRNA片段的结合蛋白−线粒体亮氨酸氨酰化合成酶（LaRs2）。发现谷氨酸tRNA片段和线粒体亮氨酸tRNA竞争性结合LaRs2，破坏线粒体亮氨酸tRNA的氨酰化以及线粒体蛋白的翻译过程，进一步损伤线粒体内嵴结构以及谷氨酰胺酶依赖的谷氨酸的合成过程，进而加速大脑衰老的进程。

设计靶向该tRNA片段的反义寡核苷酸，并注射到衰老小鼠的大脑内，可以通过恢复谷氨酸能神经元中线粒体的蛋白翻译，内嵴结构，以及脑谷氨酸水平，显著减轻衰老小鼠学习记忆障碍。这些研究结果进一步支持谷氨酸tRNA片段是加速大脑衰老的重要风险因子，这也为减缓脑衰老相关的学习记忆功能障碍提供了新的治疗靶点。

综上，这项研究揭示了在脑衰老和阿尔茨海默病中异常积累的谷氨酸tRNA片段通过损伤线粒体的蛋白翻译过程和内嵴结构，抑制谷氨酸的合成，进而加速大脑衰老和阿尔茨海默病的病理进程。该项研究对理解大脑衰老与阿尔茨海默病的发病机制具有重要意义，揭示了tRNA片段在大脑衰老中的全新作用，并且提出了延缓认知衰退的治疗新思路。

中国科学技术大学特任副研究员李定丰为论文第一作者，刘强教授为论文的通讯作者。

（生命科学与医学部）