物理所等在二维量子磁体中的随机自旋单态研究中获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/13038.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

二维量子反铁磁体如何随掺杂而演化是当代凝聚态物理重要的主题之一，其中一个例子是通过在CuO_2
二维正方形格子上引入载流子而导致的高温超导电性。通常来说，在二维量子磁体的面内引入杂质，最终会摧毁任何长程序，并可能导致学界还不是完全了解的一些无序状态（如量子自旋玻璃、自旋液体、价键玻璃和随机自旋单态等）。其中，随机自旋单态首先在掺杂半导体（如Si:P）中被发现。在这些材料中，位于随机位置的磁矩之间具有分布较广的关联。理论指出，具有最强关联的自旋之间会首先形成自旋单态，然后那些具有较弱关联的自旋逐渐形成自旋单态，最终所有的自旋都会形成自旋单态，从而使整个体系进入随机自旋单态。理论上，在一维情况下，学界已经通过重整化群的分析证明该状态的存在。在更高维度上，学界也通过数值方法在某些情况下给出了验证。在实验上，一些二维顺磁体系的比热和磁化率在低温下存在幂律标度行为，被认为可能来源于随机自旋单态。但是，被广泛公认的自旋S=1/2二维随机自旋单态材料还未被发现。

近期，中国科学院物理研究所／北京凝聚态物理国家研究中心SC8研究组博士生洪文山与T06组博士后刘录，在物理所研究员李世亮和波士顿大学教授Anders W.
Sandvik的联合指导下，对$Sr_2CuTe_{1-x}W_xO_6$
体系进行了研究。在该研究中，研究人员通过弹性中子散射和缪子自旋弛豫（μSR）的方法，研究了Sr_2CuTeO_6
材
料中
的奈尔反
铁磁长程序如何被
W掺杂抑制，并认为其所导致的顺磁
态是随机自旋单态。Sr_2CuTeO_6
具有四方相的晶格结构，其中，Cu^{2+}
离子形成了S=1/2的二维正方格子。在最近邻的
Cu^{2+}离子之间的超交换作用J_1
很强，而其他的相互作用很弱（图1(a)），因此，其磁系统可用二维S=1/2的反铁磁海森堡模型进行描述，
其磁基态为长程的
奈尔反铁磁序。该材料的Te元素可被
W元素完全替代，此时J_1
变得很小，沿对角方向的次近邻相互作用J_2

则变得很强（图1(b)），从而导致了双共线型的柱状反铁磁长程序。研究人员把Te和W元素互掺时，$Sr_2CuTe_{1-x}W_xO_6$体系在中间掺杂区域\(0.1 \lesssim x \lesssim 0.6\)呈现出无序的磁基态。尽管当前已有针对该系统的研究结果，但W掺杂为什么对反铁磁奈尔序的破坏如此有效？中间掺杂的无序态是不是上述的二维随机自旋单态？

研究人员利用弹性中子散射，研究了长程反铁磁奈尔序到底是在什么掺杂消失的。图2给出了几个掺杂样品的低温反铁磁峰。在x=0和0.02样品中，反铁磁峰的宽度等于仪器分辨率，且(0.5,0.5,1)的峰强大于(0.5,0.5,0)的峰强，均与长程反铁磁奈尔序一致。在x=0.03样品中，反铁磁峰的峰宽开始大于仪器分辨率，且随着掺杂增加而越来越宽；(0.5,0.5,1)的峰强变得小于(0.5,0.5,0)的峰强。这说明仅仅3%的W的掺杂即已破坏了长程反铁磁奈尔序，但短程的奈尔型反铁磁关联仍然存在。研究人员进一步利用μSR，研究了欠掺杂样品（图3）。通过相关公式的拟合，研究人员可获得两个参数A_0
和λ，分别对应反推至零时的缪子自旋不对称值和缪子自旋弛豫率。在具有长程反铁磁序的x=0样品中，A_0在T_N
处迅速下降；在具有短程反铁磁
关联的x=0.05和x=0.1样品中，A_0在T^*
处逐渐下降（图3(c)）。缪子自旋弛豫率λ在T^*
之下呈现出对温度的幂律依赖关系，即$\lambda \propto T^{-\gamma}$
（图3(d)）。由于γ值和动态临界指数z直接相关，这说明z＞2且随掺杂逐渐增加。这和随机自旋单态的相关理论一致。根据实验结果和此前的研究结果，研究人员给出了该体系的最精确相图（图4(a)）。

为了从理论上理解这些实验结果，研究人员采用了海森堡模型，并通过蒙特卡洛方法研究了该体系的磁关联。该研究中，研究人员
假定面内的各超交换作用为$J_1=J_2=1$，\(J_{1}^{\prime}=J_{2}^{\prime}=0.1\)，而\(J_{1}^{\prime \prime}=0\)（图1）。对于面间超交换作用，研究人员设定其为$J_\perp=10^{-2}$和10^{-3}
。通过Binder累积量，可获得体系的相图（图4(b)）。理论与实验上的相图表现出惊人的相似性。为了进一步理解为什么长程奈尔区域这么狭小，研究人员在图5中给出了局域有序磁矩与整体值的差Δm随距离的变化。可看出，$\Delta m \propto 1/r^2$
，从而导致在对r积分时出现对数发散。这表明在纯二维系统中，任意浓度此类型的杂质都将破坏反铁磁长程序。然而，在存在面间耦合的情况下，奈尔序可在少量杂质存在时仍然保持。

结合实验和理论结果，研究人员可解答对该体系提出的两个问题。仅仅3%的W掺杂即可破坏长程反铁磁奈尔序，这是由于其所
引入的阻挫使Δm具有正比于$1/r^2$
的特殊形式。当长程反铁磁奈尔序被破坏时，体系进入了二维的随机自旋单态，其主要证据包括：短程自旋关联仍是奈尔形式的；动态临界指数z＞2且在远离长程奈尔序时逐渐增加。研究结果加深了学界对二维随机自旋单态这一重要磁基态的认识，对理解那些均匀自旋液体（如量子自旋液体）中的物理也可能带来帮助，后者往往不易分清楚杂质物理和理论所预言的干净系统的性质。

相关研究成果发表在*Phys. Rev. Lett.* 126, 037201
(2021)上。洪文山和刘录为论文的共同第一作者；李世亮和Anders W. Sandvik为论文的共同通讯作者，分别负责实验和理论部分。合作者还包括SC8组的研究生刘畅、副主任工程师马肖燕和副

研究员罗会仟，北京师范大学物理学系教授郭文安，以及中子散射和μSR实验的谱仪科学家。其中，中子散射实验在中国先进研究堆和绵阳反应堆相关谱仪上进行，μSR实验在日本J-Parc实验室进行。研究工作获得科学技术部、国家自然科学基金委和中科院、中科院青年创新促进会、北京市自然科学基金等的资助。

论文链接

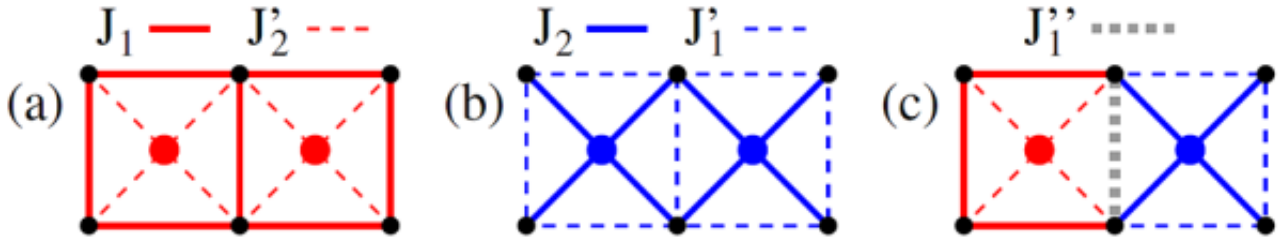


图1.$Sr_2CuTe_{1-x}W_xO_6$中各超交换作用示意图。其中正方形四角的黑色圆圈代表铜离子，而中心的红色和蓝色圆圈分别代表Te和W离子

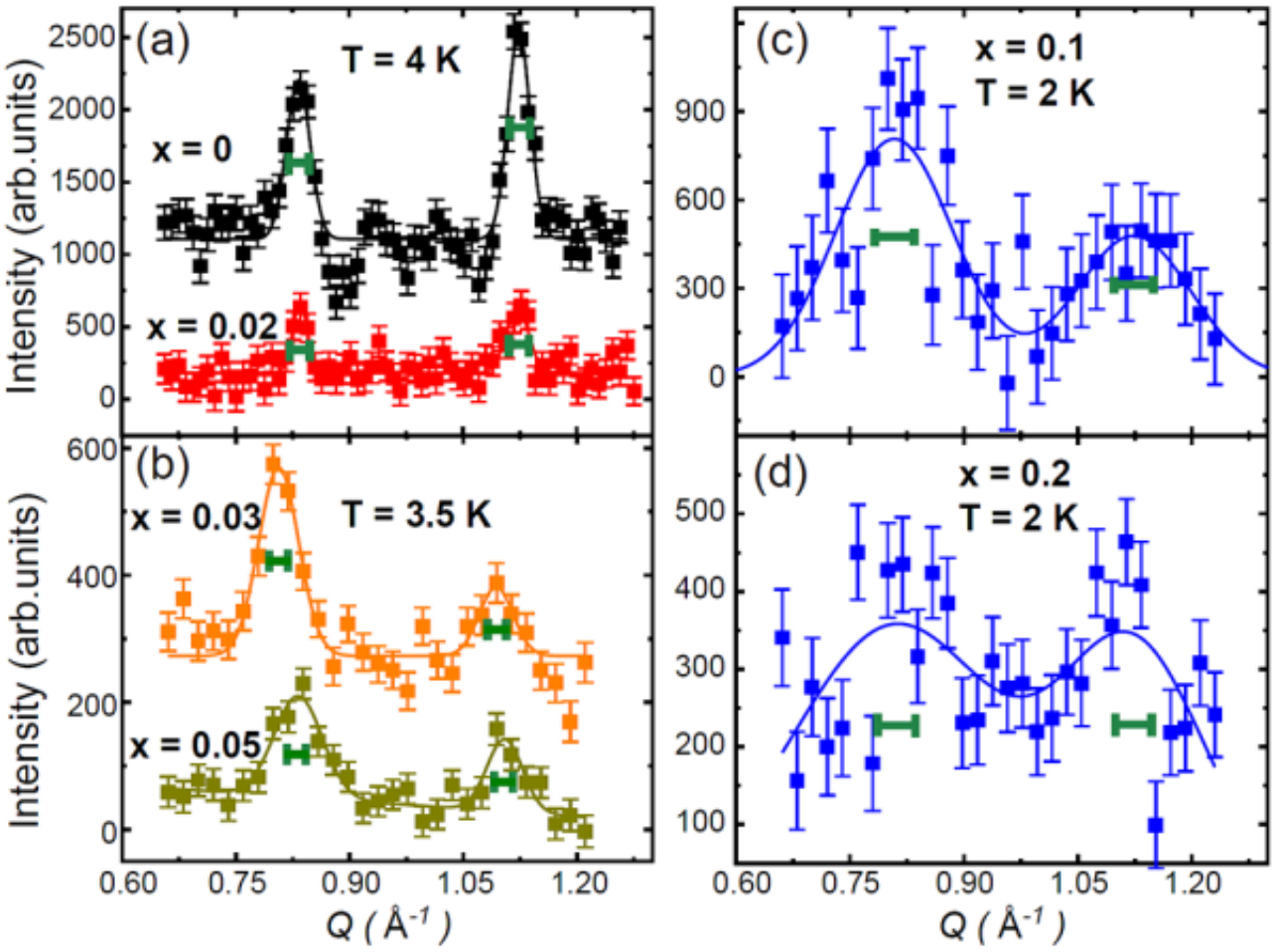


图2.弹性中子散射的结果。其中短横线为谱仪分辨率

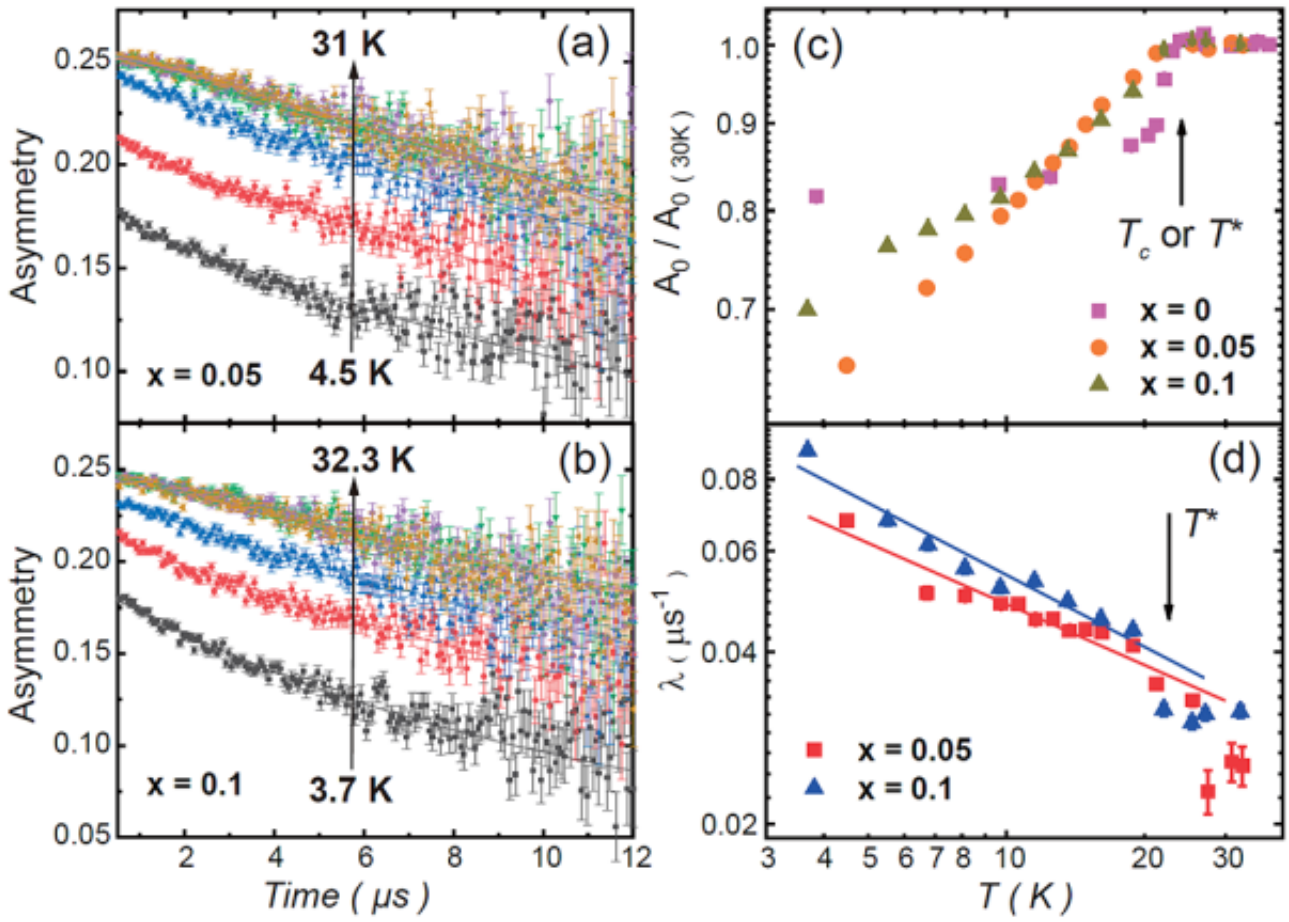


图3.(a)和(b)零场μSR谱随时间的变化。(c)和(d)拟合出的A_0和λ的温度依赖关系

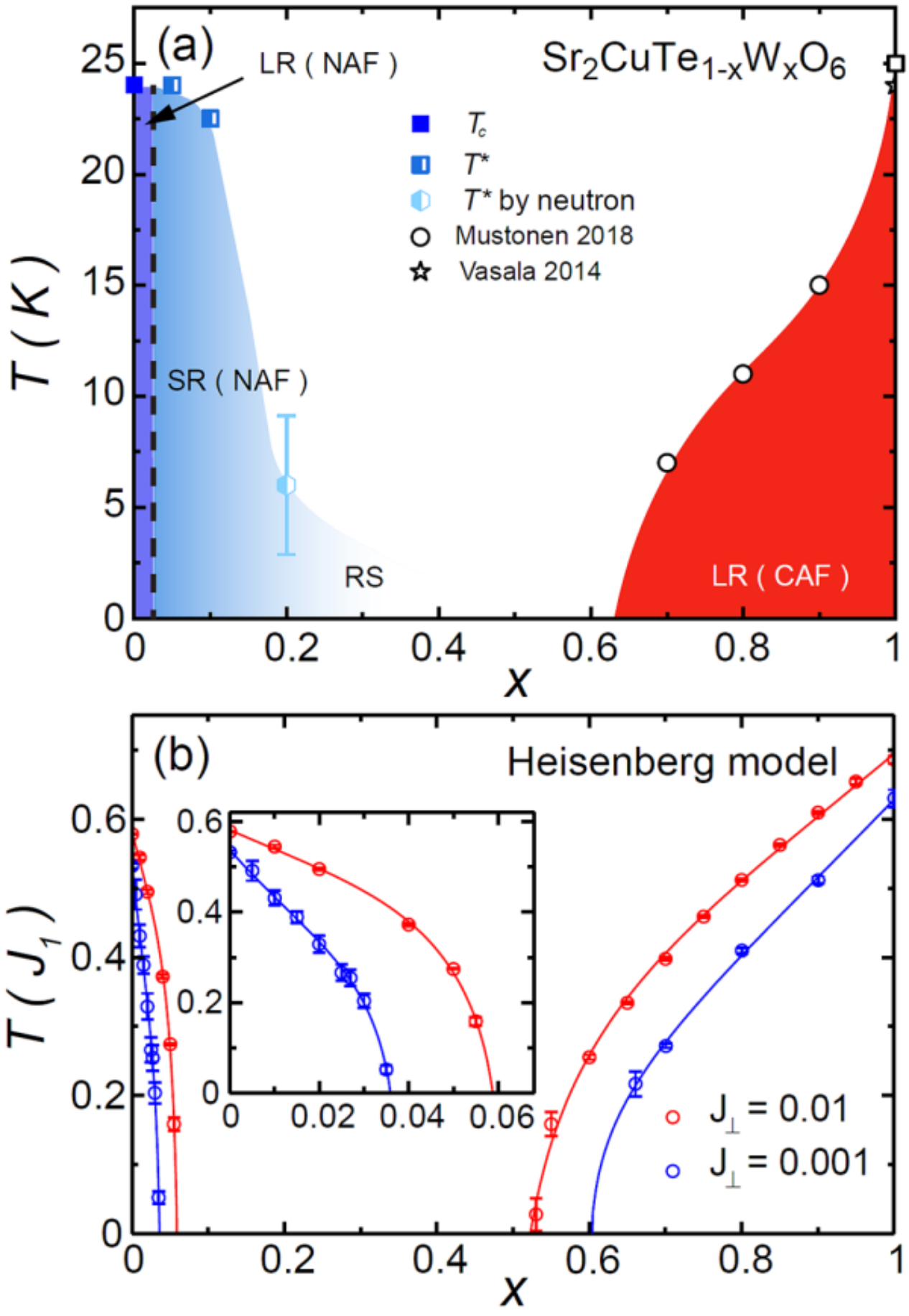

(a)
LR (NAF)
$Sr_2CuTe_{1-x}W_xO_6$
T_c
T^*
T^* by neutron
Mustonen 2018
Vasala 2014
SR (NAF)
RS
LR (CAF)
T (K)
x
(b)
Heisenberg model
$J_\perp$ = 0.01
$J_\perp$ = 0.001
T (J_1)
x

图4.(a)实验上和(b)理论上获得的相图。其中LR和SR代表长程和短程，NAF和CAF代表奈尔反铁磁和柱状反铁磁，RS代表随机自旋单态

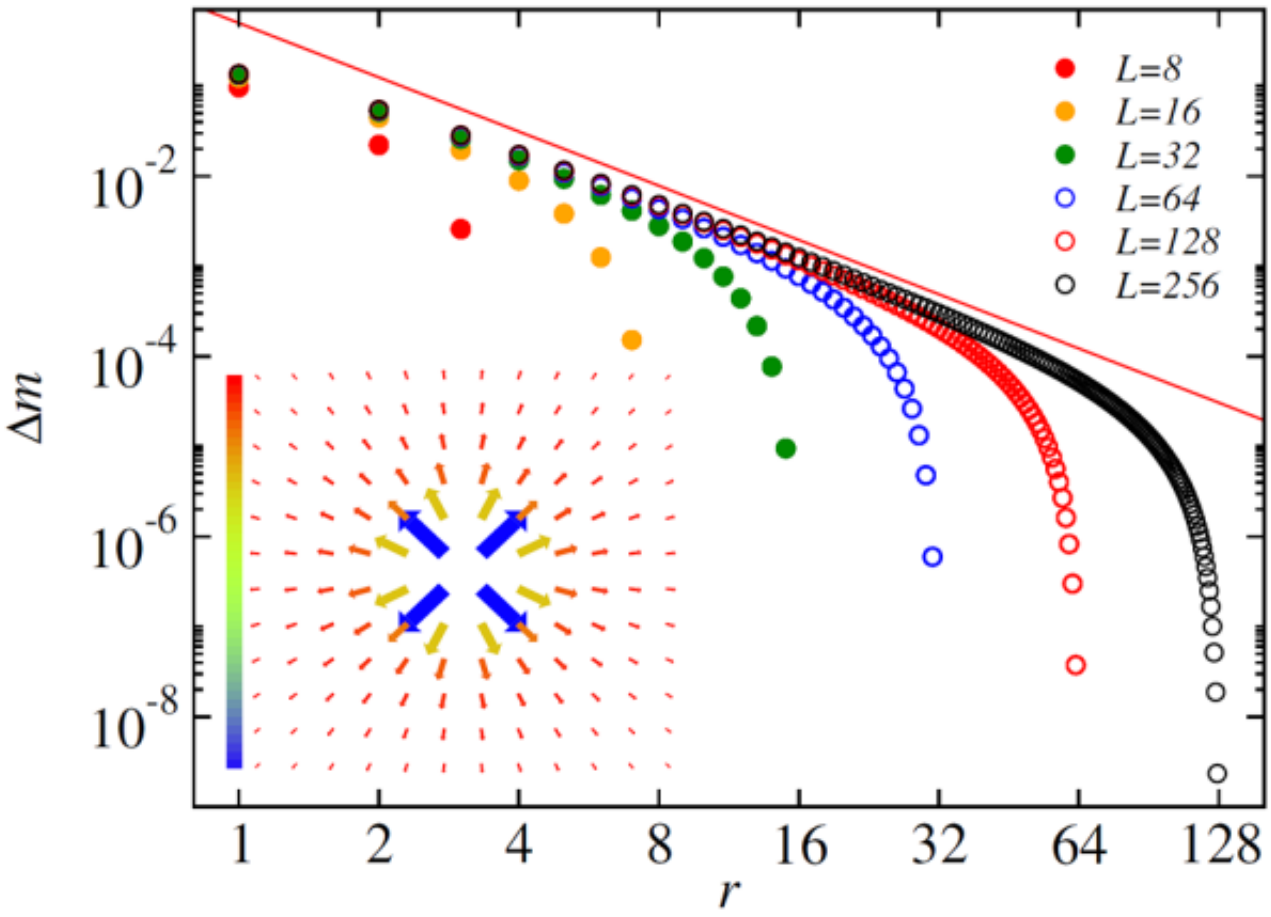


图5.单个W杂质所导致的序参量偏离值随距离的变化

研究团队单位：物理研究所

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发