arXiv:2601.06089v2 [physics.bio-ph] 20 Jan 2026

水合DNA中的极化霍尔效应

Mariusz Pietruszka[1], *

[1]西里西亚大学自然科学学院生物学、生物技术与环境保护研究所，波兰卡托维兹 *40-032*

（日期：2026年1月21日）

理解软物质系统（包括生物系统）如何在环境条件下受外场作用而产生集体电磁现象，仍是一项核心挑战，因为人们通常认为热涨落会抑制长程有序。在此，我们报告水合DNA会发生一种可重复的磁场诱导跃迁，其特征是出现尖锐的横向电压阈值，随后横向极化信号进入规则、相位稳定的振荡区间。这些特征仅在超过阈值后才会显现，并表现出显著的温度依赖性；这与DNA–水界面氢键网络中形成集体模相一致。受近期关于中性激发所携带的类霍尔响应研究启发（这类激发包括声子、磁振子和激子），我们将观测到的横向信号解释为局限在准二维水合层中的质子–质子空穴偶极子的相干极化动力学。在这一框架下，横向响应被归因于由外场组织的极化模；测得的横向电压源于集体偶极动力学，而非稳态载流子输运。这些结果表明，水合DNA是一种软物质系统，其中磁场和温度共同调控集体极化动力学，为研究氢键介质中的相干性与横向现象提供了一个具有生物学意义的平台。

I. 引言

水合DNA形成了结构有序却动态波动的氢键网络，其集体电动力学性质仍未得到充分理解。在分子尺度上，氢键沿线的质子转移、水合层有序化以及长程偶极相互作用已得到广泛研究，理论模型预测，柔性生物组装体中存在协同质子动力学和关联振动模 [1–5]。这些微观观点还得到了宏观框架的补充，这些框架旨在描述生物系统中的相干或协同组织 [6, 7], ，以及关于生物相干性和类量子行为的更广泛讨论 [8]。

一个核心的未解问题是：考虑到热涨落和退相干对生物环境施加的众所周知的限制，这种集体行为能否在环境条件下持续存在于介观尺度 [9]。关于DNA静电学的大多数实验和理论研究都聚焦于溶液中的离子传导，或沿 π堆叠碱基对的电荷迁移，因此，外场激发下DNA–水界面内是否会出现相干极化模，仍未有定论。此前对生物物质中协同质子与偶极动力学的分析，以及对受限水合层的原子级模拟 [5], 表明，结构化的水合壳层原则上可能支持相关的偶极涨落。然而，此类场诱导集体行为的直接宏观证据仍然有限。

过去数年来，针对水合DNA开展的磁场实验揭示出一种可重复的模式：在室温 [10–12]或接近室温时，出现突变的电压阈值、阶梯状平台和振荡特征。观测到的 $1/B$周期性振荡在形式上类似于电子量子输运中已知的舒布尼科夫–德哈斯效应 [13–15]。与此同时，其生物学背景以及缺乏持续电荷流的情况表明，这一现象的物理机制有着根本不同。对纯水、干燥DNA以及离子或金属基底进行的对照测量均未复现这些效应，这表明，决定其响应的是结构化 DNA 水合层，而非传统的电传导。

因此，这些特征的物理解释需要重新评估。早期研究将横向信号描述为“质子霍尔效应”，这隐含地假定存在可移动的质子载流子。随后，结合磁场扫描与高分辨率温度控制的实验表明，即使在不存在连续传导通路的情况下，横向响应仍然存在。这些观察促使研究者重新作出解释：测得的电压源于嵌入水合 DNA 界面氢键网络中的质子–质子空穴偶极子的集体极化动力学。近期，研究者通过独立的纵向测量，在相近实验条件下于水合DNA中发现了密切相关的欧姆–极化交叉转变 [16]。

重要的是，中性的偶极激发可以表现出霍尔型横向响应。在现代凝聚态物理中，现已确立，中性准粒子——包括声子、磁振子和激子——能够通过涉及贝里曲率、手性几何或反演对称性破缺的机制产生类似霍尔效应，

* mariusz.pietruszka@us.edu.pl

这些发展提供了一个自然的概念桥梁：水合DNA在本征手性的分子环境中承载着高度可极化的质子偶极子，因此，即使不存在巡游电荷载流子，磁场诱导的横向极化响应仍是合理的。 [17–24]

从这一角度来看，水合DNA可以被视为一种柔性的准二维偶极介质，其极化模由磁场和温度共同组织。这类偶极系综中出现宏观相干性的可能性，与早期对受驱动生物系统的预测 [1, 6]以及物理系统中关于相位相干和模凝聚的一般原理相一致，其中包括玻色–爱因斯坦凝聚体 [25, 26]。尽管DNA–水界面所处的状态与超冷原子气体截然不同，但其潜在概念——耦合自由度产生集体相位相干——仍然具有相关性。

在本研究中，水合 DNA 层实际上充当了一种准二维相干介质。其约为 $10\ \mu$m的特征厚度，加上由水合网络介导的强面内耦合，将质子极化模式限制在平面几何中。这种情形类似于二维激子、磁振子和声子系统，在这些系统中，磁场和降低的维度共同决定相干性。这种二维组织为本文报道的量子化振荡和平台结构提供了自然背景，表明DNA–水界面表现为一种由磁场组织的偶极系综，能够支持长程相位相干。

在此，我们采用磁场与温度控制相结合的策略，系统地绘制水合DNA中的相干区间。通过将磁场和温度视为相互独立的控制参数，并同时监测纵向和横向响应，我们分辨出非相干涨落、 $1/B$周期性振荡行为、类平台极化态以及低温弗洛利希型相干模之间的转变。总之，这些结果表明，水合DNA支持磁场稳定且温度门控的极化相干性，并将中性激发霍尔响应和相干偶极有序的物理学拓展至具有生物学意义的氢键软物质系统。

II. 结果

水合DNA中磁场稳定、温度门控的偶极相干性

在本研究中， V_{xy} 被视为一种横向极化电压，它源于随时间变化的集体偶极重取向（$\mathrm{d}P/\mathrm{d}t$），而非霍尔电压——后者由巡游电荷输运产生。

振荡和类量子化特征通常是在电荷输运的背景下讨论的。在此，我们展示了类似结构也可出现在柔软的水合偶极网络中，其中相关自由度是集体质子偶极子，而非巡游电荷。在水合DNA中，界面水和碱基对位点处的氢键网络支持质子–质子空穴偶极对，这些偶极对在磁场作用下排列并振荡。由此产生的宏观可观测量是横向极化电压（V_{xy}），与极化电流（$J = dP/dt$）成正比。

在中等磁场和环境条件下，我们在这一极化通道中观察到三个典型特征：(i) 在 V_{xy} 和 V_{xx}中均出现以 $1/B$ 为周期的极化振荡，这些振荡可视为偶极量子化的前兆（此处将其用作一种输运风格的形式体系，而非电子磁输运量子化的证据）；(ii) 一个尖锐的场驱动阈值，标志着偶极畴的重组；以及(iii) V_{xy}中的离散极化平台。

振荡周期性和平台间距均给出了有效相干密度 $n_{\mathrm{eff}} \approx 4.7 \times 10^{14}\mathrm{m}^{-2}$的收敛估计，表明单一的场组织偶极系综很可能支配着该响应。在 ~ 0.35 T附近发生的转变标志着体系从重复的场离散偶极量子化重组为一种类弗里希相，其特征是长程、相位锁定的偶极振荡以及简化的响应瓣。纯水中的对照测量缺乏这些特征，证实结构化DNA水合层至关重要。

在整个研究中，我们保留定量的输运式形式主义（例如， $1/B$ 周期性、填充因子式平台和张量求逆），但在极化响应框架内解释这些可观测量。在这一视角下，提取出的尺度（例如，根据周期性或平台间距推断出的密度）表征的是由场组织的偶极系综的集体动力学，而非巡游电荷输运。因此，水合 DNA 界面表现为一种准二维偶极介质，其中磁场将极化模离散化，并在室温下稳定宏观偶极相干性。

在各个数据集中，关键特征（阈值、平台间距和 $1/B$ 周期性）在不同实验方案下均以一致的尺度反复出现，支持这是一种由样品定义、可重复的响应，而非特定运行过程中的读出效应。

DNA–水基质中的场诱导极化响应

为探测场诱导相干性，我们测量了环境条件下垂直磁场作用于准二维水合 DNA 层时的横向极化电压 V_{xy} 。图 1 展示了本文采用的微观图景：

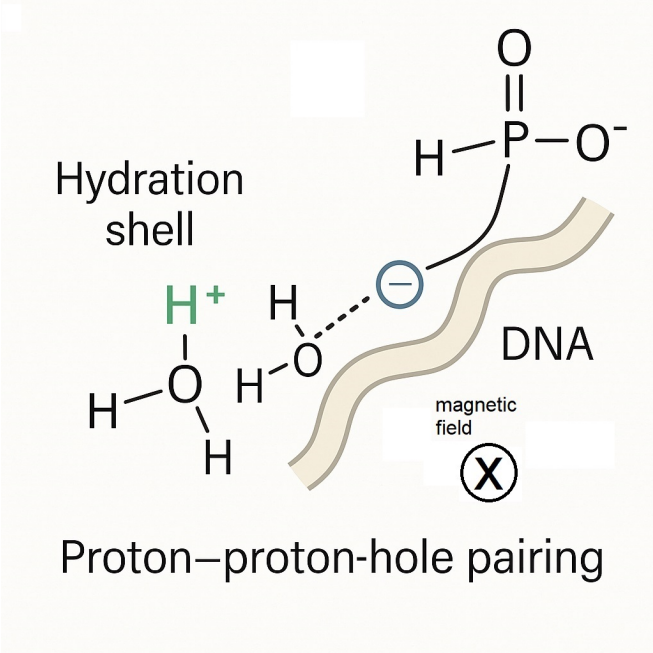


图1. DNA–水氢键沿线质子–质子空穴配对的概念示意图。磁场作用下，DNA–水界面处局部电中性的质子–质子空穴对示意图。沿氢键发生的瞬态质子接力（H^+）会在供体位点留下一个关联质子空穴；许多此类偶极子在氢键网络的稳定作用下排列并集体振荡。它们的同步动力学产生宏观极化 $P(t)$，其时间导数 $J_{\mathrm{pol}} = \mathrm{d}P/\mathrm{d}t$ 被检测为横向极化电压 V_{xy}。该示意图阐释了实验所依据的场诱导相干极化机制。

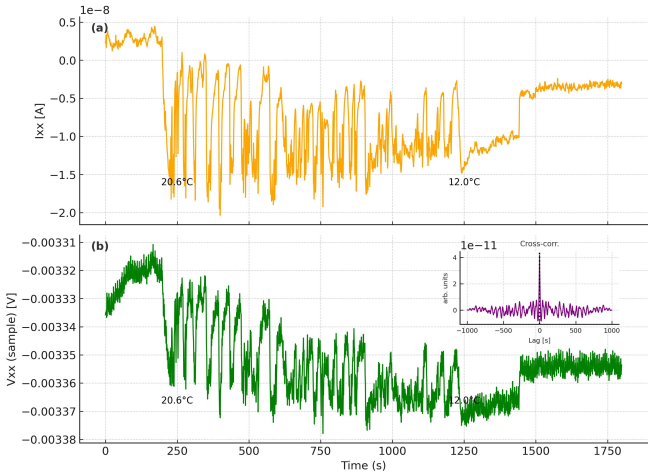


图2. 水合DNA中纵向响应随温度变化而发生的重组。将温度从高于 $20.6\,^{\circ}\mathrm{C}$ 连续降至低于 $12.0\,^{\circ}\mathrm{C}$，可在水合DNA–水基质（500 ng/μL， 5 μL，pH $\approx$ 8，$B = 500$ 1 mT）的纵向通道中观察到两个明显的转变点。(a) 纵向电流 $I_{xx} = V_{xx}/(\,\mathrm{k\Omega})$（分流器）显示，温度刚低于 $20.6\,^{\circ}\mathrm{C}$ 时，便开始出现大振幅、准周期性波动。随着温度进一步降低，系统在接近 $12.0\,^{\circ}\mathrm{C}$ 时发生第二次重组，此后波动消失，转为阶梯状的低温分支。(b) 纵向样品电压 V_{xx}(样品)也呈现类似的重构：温度低于 $20.6\,^{\circ}\mathrm{C}$ 后出现振荡特征，并在约 $12.0\,^{\circ}\mathrm{C}$ 时再次重组。插图显示了 I_{xx} 和 V_{xx}之间的零滞后互相关，其在滞后 $= 0$ 处呈现一个显著而尖锐的峰，表明在温度驱动的偶极重组过程中，两个纵向通道之间存在相干耦合，并可作为内部测量控制检查。所有数据均以1 Hz采样率同步记录。

氢键上的瞬态质子接力被认为会产生局部电中性的质子–质子空穴偶极子，这些偶极子可在水合层内排列并协同振荡。这些偶极子会受到类洛伦兹磁力矩的作用，其集体重新取向会产生可测量的极化电流$J_{\mathrm{pol}} = \mathrm{d}P/\mathrm{d}t$，在宏观上表现为横向电压 V_{xy}。在中等磁场（0.1– 0.65 T）和室温下，这一极化通道呈现出可重复的特征变化：(i)$1/B$周期性振荡同时出现在 V_{xy} 和 V_{xx}中，可作为偶极量子化的输运式类比；(ii) 明显的场驱动阈值；以及 (iii) V_{xy}中离散极化平台的出现。振荡周期性和这些平台的间距均得出趋于一致的相干密度，约为4.7×10^{14} m^{-2}，表明单一的、由磁场组织的偶极系综支配着这一响应。在其他条件完全相同的情况下，纯水中的对照测量未呈现任何特征，这证明结构化 DNA 水合层对于观测到的场诱导相干性至关重要。

温度驱动的起始与偶极相干性的重组

为了解析温度如何影响偶极网络的组织结构，我们在固定磁场下进行了连续降温扫描，并以 1 Hz 的采样频率监测纵向通道（I_{xx}和 V_{xx}）与横向极化通道（V_{xy}）。图2和图3总结了两项互为补充的实验，两次实验在连续两天进行，分别使用 500 ng/μL 和 100 ng/μL 的 DNA–水样品。在图2中，纵向通道显示出两次明显的温度驱动重组，分别发生在 20.6 ℃ 和 12.0 ℃，表现为I_{xx}和 V_{xx}的涨落幅度及关联结构发生剧烈变化。在图3中，在相同磁场条件（$B = 500$ mT）下进行的独立扫描显示，横向通道在约 12 ℃ 以上保持平静；但温度低于这一临界值后，系统便重组为一种大幅度、近乎周期性的 V_{xy}振荡状态，其振幅超过 150 mV。综合来看，这些测量结果确立了 12 ℃ 是一个稳健的温度

边界，在此温度下，偶极系综转变为强相干的振荡状态。

相干性的两阶段温度依赖性

综合图2和图3的表现可以清楚看出，水合DNA中的相干性具有两阶段温度依赖性。20.6 ℃时首次发生的重组仅见于纵向通道（图2），标志着偶极敏感性增强的开始；此时热扰动已充分减弱，相关的氢键重取向得以启动。然而，在 12 ℃以上，横向通道仍基本没有明显特征（图3），这表明这一初始转变尚未产生稳健的相位锁定极化模。

12.0 ℃时发生的第二次转变在性质上截然不同。低于这一温度后，两项实验都显示出显著的重组：在图2中，纵向涨落收敛至低温分支；而在图3中，横向通道突然出现大振幅、近乎周期性的振荡，并在继续降温数度后仍持续存在。纵向和横向响应同时发生变化，表明偶极网络在 12 ℃时经历了集体模选择过程，进入跨通道相干性增强的状态，此时横向极化模式主导宏观响应。

偶极组织的三个温度区间

这一两阶段的演变过程——先是在 20.6 ℃出现软化，随后在 12.0 ℃以下实现完全相干——支持这样一种解释：温度调节质子–质子空穴偶极系综的耦合强度和相位有序。在 20.6 ℃以上，偶极子基本独立地涨落；在 20.6 至 12.0 ℃之间，它们开始重新组织，但仍仅部分相关；而在 12.0 ℃以下，系统跨越相干边界，形成稳定的集体振荡极化模式。这些依赖温度的重组与文中其他部分观察到的磁场诱导转变相呼应，进一步支持这样的观点：当磁场取向与热抑制退相干共同作用、稳定集体偶极运动时，水合DNA中便会出现相干极化。

固定温度下的磁场依赖性

确定了相干性的温度边界（图 2 和图 3）后，我们接下来考察在固定且接近室温的条件下，横向极化如何响应磁场。在DNA浓度为500 ng μL^{-1} 时（图 4），V_{xy} 表现出明显的阈值，随后出现一系列量子化极化平台，呈阶梯状分布。尽管存在约 ± 0.1 mV的热噪声，平台中心仍保持规则间距（线性拟合 $R^2 > 0.99$），这表明偶极网络具有离散且由磁场稳定的构型。在其他条件完全相同的情况下，对纯水进行的对照测量未呈现任何特征，证实量子化需要由DNA模板形成的水合结构。平台间距与下文分析的振荡周期共同得出一致的相干密度，约为 $4.7 \times 10^{14}\mathrm{m}^{-2}$；这一数值可解释为相干活性偶极畴的面密度。在振荡区间的傅里叶分析以及收敛分析中，也分别独立地出现了这一数值，支持存在一个共同的相干系综。横向电压阶梯的一个显著特征是，相邻平台之间的边界处出现明显波动。这些波动并非均匀分布于整个信号中，而是主要出现在每个阶跃之前的狭窄区间内。尽管波动幅度较大，系统仍可重复地稳定在后续平台上，表明阶梯结构能够抵御这些波动。此类行为是受驱动系统在不同集体极化构型之间发生转变时的典型特征。在接近稳定性边界时，相互竞争的极化构型可能变得近乎简并，导致系统在探索多种构型时波动增强。一旦新的构型在能量上更有利，系统便会迅速弛豫至稳定态，从而形成下一个平台。如果观测到的阶跃主要由随机噪声或仪器伪影造成，那么波动理应模糊平台结构，或导致阶跃间距不规则。然而，波动仅局限于转变区域，平台本身仍清晰可辨。这一行为表明，波动并非掩盖潜在的连续响应，而是在离散态之间的转变过程中发挥主动作用。类似的波动辅助切换现象常见于非线性和自组织系统中；噪声或热扰动能够促使系统在相邻的稳定构型之间发生转变。

振荡区间与类朗道极化量子化

降低温度会增强偶极子之间的相位锁定，并揭示 $1/B$周期性特征，这些特征先于平台形成。对于浓度为 100 ng μL^{-1} 、温度为 5 ℃ 的 DNA（图 5），V_{xy} 和 V_{xx} 在 0.13–0.30 T 的磁场范围内均表现出稳健的振荡，且振荡周期为 $1/B$ 。两个通道的振荡频率相同（$F_{V_{xy}} \approx 6.31$ T 和 $F_{I_{xx}} \approx 6.27$T；$\Delta(1/B) = 0.159 \pm 0.002\,\mathrm{T}^{-1}$），表明其量子化源于共同机制；本文将其归因于相干极化态的离散重组，而非电荷或

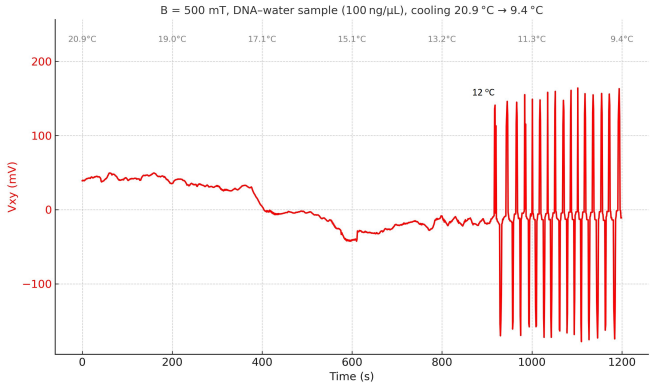


FIG.为振幅横向极化振荡的温度驱动起始。在固定磁场（$B = 500\,\mathrm{mT}$）下，将温度从 20.9 °C降至 9.4 °C，记录了100 ng/μL DNA–水样品中横向极化电压 V_{xy} 的演变。高于 $\sim 12\,^\circ$C时， V_{xy} 仅表现出微小波动和缓慢漂移。低于 $\sim 12\,^\circ$C时，响应突然重组为大振幅、近乎周期性振荡的状态，峰峰值变化超过150 mV。振荡在 12 °C至9.4 °C区间内持续存在，这与相干横向偶极模式的出现相符。曲线上方的温度标记显示了降温扫描的进程。数据以1 Hz的采样率记录。

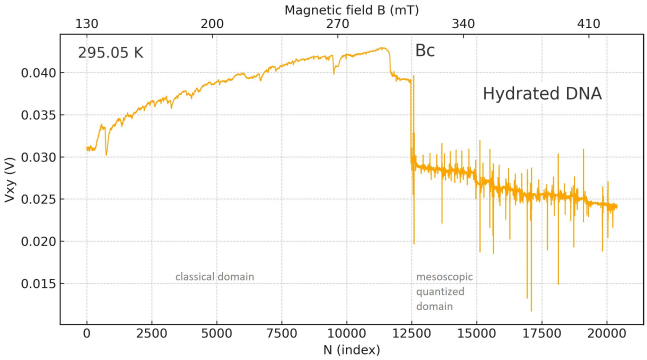


图 4. 水合DNA中的阈值行为和场诱导极化转变。磁场扫描过程中测得的横向极化电压V_{xy}，样品为浓度500 ng/μL的水合基因组DNA（pH $\approx$ 8, $T = 295.05$ K（21.9 °C））。下方横轴表示扫描索引N，上方横轴表示对应的磁场，其数值从$N = 0$ 时的130 mT近似线性增加至 $N \approx 20\,000$时的420 mT。在临界磁场 B_c处，信号出现明显突变，从约0.039 V降至0.029 V。此阈值标志着高磁场分支的起始，该分支与DNA–水基质中的场诱导极化动力学有关。越过此点后，曲线呈现缓慢下降的一系列离散阶梯状特征。间隔约0.8 mV的水平线展示了有效平台中心之间近乎规则的间距。存在两种不同的波动来源：(i) 沿曲线分布、幅度约为 $\pm$0.1 mV的宽带噪声；(ii) 仅在采集过程中手动调整磁铁位置时出现的局部阶跃同步瞬态；以及 (iii) 重要的是，每个阶跃处观察到的增强 波动并未中断阶梯的推进，而是先于下一个平台的形成。这些瞬态不会影响平台间距，后者在不同的独立扫描中保持不变。— Zenodo上的完整原始数据。

位。FFT推断参数（图 5 报告的 A_F 和 k_F）量化了水合层内相干图样的特征尺度。所有 5 °C 数据均在相同的测量几何构型下采集；作为参考，图 4 所示的平台化曲线是在 22.3 °C 下记录的。

在 6 °C、500 ng μL^{-1} 条件下（图6），背景扣除后的横向信号 ΔV_{xy} 呈现密集、近乎周期性的调制，平均间距约为0.83 T^{-1} ，并在 F ≈1。2 T处出现主导FFT峰。采用Onsager型几何估算器，在极化量子化形式框架下对其进行解释，可得有效相干密度为 $n_{\mathrm{eff}} \approx 5.8 \times 10^{14}\mathrm{m}^{-2}$，与室温附近获得的平台推导值一致。横向振荡的幅度比纵向响应大约高出四个数量级，并且与 ΔV_{xx}近似相差 π，这符合本征横向极化模式耗散较弱的预期。对于 $B \gtrsim 0.4$ T，振荡图样简化为较宽的波瓣，表明场驱动重组使系统转变为整体相干性更强的状态。

尽管阈值前的 $1/B$周期性振荡和横向 V_{xy} 振荡原则上可能被怀疑是与磁场变化有关的伪影，但实验结果不支持这种解释：在这些实验中，机械驱动完全关闭，磁场保持在其最大值不变，但当系统仅由

利用被动冷却（冰）缓慢改变温度。

极化响应张量及向相干相的交叉转变

将 V_{xx} 和 V_{xy} 转换为 $R_{xx}(B)$ 和 $R_{xy}(B)$，随后进行张量求逆，即可得到极化响应张量，该张量描述了施加磁场时纵向和横向通道如何共同变化（图7）。两个分量均沿平滑、连续的轨迹变化，而非呈现随机散布，这表明其动力学具有组织性，而不是由噪声主导。超过阈值场后，横向分量占据主导地位，响应演变为范围更广、变化更缓慢的波瓣，标志着系统交叉转变为整体相位锁定程度更高的偶极态。在等温条件和连续磁场扫描下，均可重复观察到这一交叉转变，这支持了将其解释为一种内在特征，

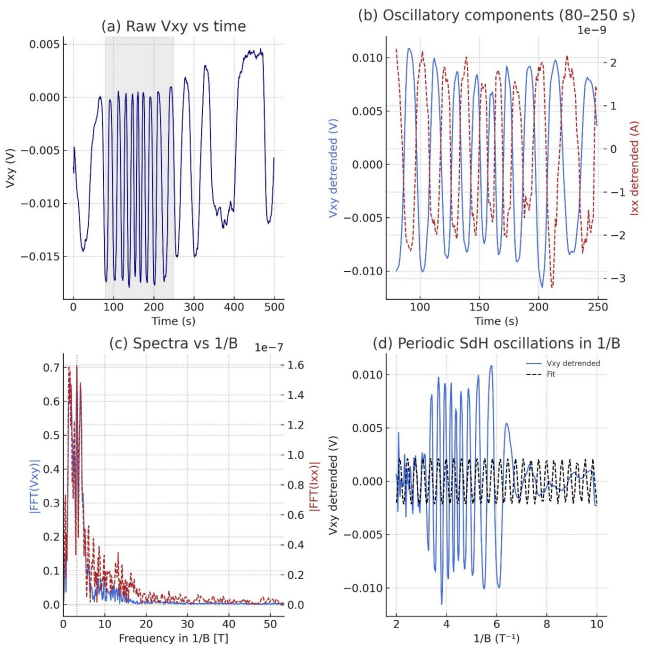


图 5. $1/B$阈值前的周期性极化振荡（100 ng/μL，5 ℃）。（a）在希腊十字几何结构中记录的横向极化电压 V_{xy}，对应于从 0.10 扫描至 0.50 T 的连续磁场扫描（0–500 s）。（b）同时测得的纵向电压 V_{xx}，其跨接于一个 1 kΩ 分流器两端（带有 $I_{xx} = V_{xx}/1$ kΩ）。在约 0.13 至 0.30 T 之间出现规则振荡。（c）FFT 随 $1/B$ 的变化显示，两个通道具有相同的振荡频率（$F_{V_{xy}} \approx 6.31$ T 和 $F_{I_{xx}} \approx 6.27$ T；$\Delta(1/B) = 0.159 \pm 0.002\,\mathrm{T}^{-1}$）。（d）振荡 V_{xx}（与 I_{xx} 成正比）随 $1/B$ 绘制，并通过正弦拟合得到 $A_F = (6.0 \pm 0.1) \times 10^{16}\,\mathrm{m}^{-2}$ 和 $k_F = (1.38 \pm 0.01) \times 10^{8}\,\mathrm{m}^{-1}$。$V_{xy}$ 和 V_{xx}（FFT）中相同的 $1/B$ 周期性证实了共同的极化相干性起源。（所有数据均在 5 ℃ 下记录；相比之下，图 4 的数据采集于 22.3 ℃。）

而非依赖实验方案的效应，这一特征属于DNA水合结构。

对照实验、制备条件与内在起源

对蒸馏水进行的对照测量（图 8a）未显示振荡、阈值或平台结构；而浓度为 1000 和 500 ng $\mu\mathrm{L}^{-1}$ 的 DNA溶液（图 8b 和图 8c）则呈现出特征性的双峰模式，随后出现离散的极化平台。这些特征在两个磁场扫描方向（箭头）下均可重复观测到，表明其与磁场扫描方向无关，且不存在滞后现象。综合这些对比结果可知，具有结构的 DNA 水合层是相干极化动力学出现的必要条件。

为评估离子贡献的作用，我们检测了直接溶解于蒸馏水中的未加缓冲液DNA（图9）。100和480 ng $\mu\mathrm{L}^{-1}$ 样品均

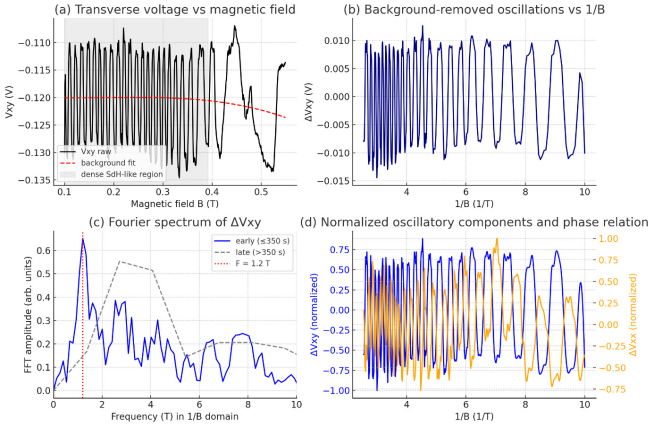


图 6. 低温下的 $1/B$ 周期性极化振荡（6 ℃，500 ng/μL）。（a）V_{xy} 在相对湿度（RH）为 29% 时，进行 540 s 磁场扫描，磁场从 0.10 T 扫至 0.55 T。图中显示原始数据（黑色）和多项式背景（红色虚线）。在 $B \leq 0.40$ T 下，密集振荡占主导。（b）去除背景后的ΔV_{xy} 随 $1/B$ 变化的曲线显示近周期性调制，平均间距约为 0.83 T^{-1}。（c）对早期（$t \leq 350$ s，蓝色）和后期（$t > 350$ s，灰色）时间区间内的 ΔV_{xy} 进行快速傅里叶变换，得到主导频率 $F \approx 1.2$ T，对应的有效相干密度为 $n_{\mathrm{eff}} \approx 5.8 \times 10^{14}\,\mathrm{m}^{-2}$（昂萨格估算式）。（d）归一化后的 ΔV_{xy}（蓝色）和 ΔV_{xx}（橙色）绘制在双纵轴上。ΔV_{xy} 比 ΔV_{xx} 大约高四个数量级，且与 ΔV_{xx} 的相位差约为 π，这与内禀横向极化模式相符。磁场高于约 0.40 T 后，响应重新组织为更宽、相干性更强的瓣状结构。

在 $B \approx 0.6$ T附近（电压降为 > 25 mV）呈现明显的阈值，随后在极化量子化形式体系中稳定于离散的类朗道极化能级。相邻能级之间的特征间距约为1 mV，与此前报道的 ≈0.8 mV高度吻合。这一吻合表明，观察到的量子化是水合DNA基质的内禀特性，不依赖于缓冲液离子。镀铜对照样品呈现符号相反的横向响应，与电子传导一致，进一步将其与DNA溶液中观察到的极化驱动响应区分开来。

干涉图样

除了量子化阶梯和 $1/B$周期性振荡之外，在图 10 所示的干涉重构中，还直接揭示了纵向极化通道与横向极化通道之间的相干耦合。通过在线性磁场扫描期间结合同时采集的信号 $V_{xx}(t)$和$V_{xy}(t+\tau)$，干涉图 $S(t,\ \Delta\phi)$ 呈现出交替分布的相长条带和相消条带；对于10 ℃ 下、100 ng $\mu\mathrm{L}^{-1}$ DNA 的样品，在整个 100–200 mT 区间内，其间距和对比度均保持稳定。条纹强度最大的区域

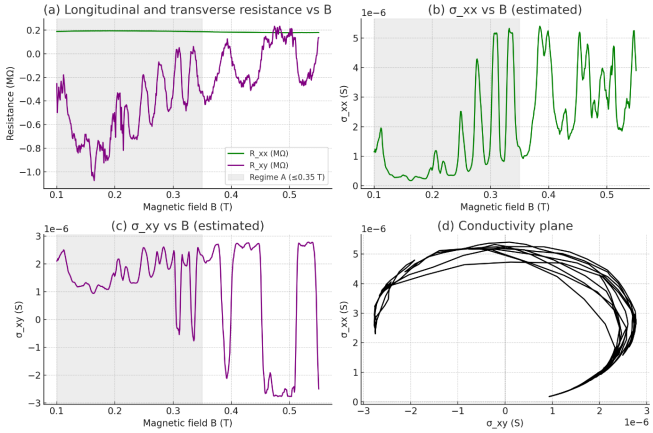


图 7. 场依赖电阻与极化响应张量。(a) 使用校准电流分布，由 V_{xx} 和 V_{xy} 得到的 R_{xx} 和 R_{xy}。在 $B \leq 0.35$ T 时，曲线呈现密集的 $1/B$ 周期调制。(b,c) 通过张量求逆推导出的 $\sigma_{xx}(B)$ 和 $\sigma_{xy}(B)$。低场结构在高于 $B_c \approx 0.35$ T 时消失，转变为简化的包络线，这与类弗勒利希相干极化模式相符。(d) 参数化的 σ_{xx}–σ_{xy} 轨迹呈现平滑、可重复的曲线，表明极化态发生了有序且由电场驱动的转变。

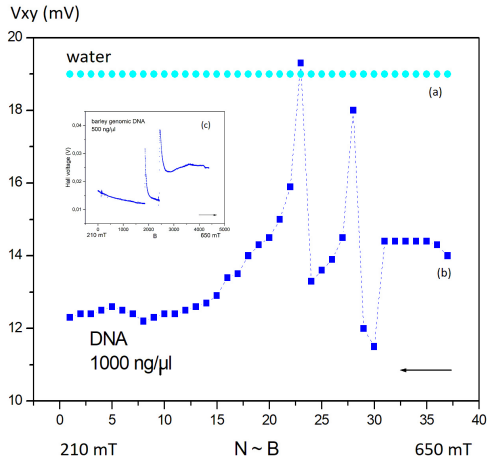


图 8. 对照实验与 DNA：相干极化需要 DNA–水结构。(a) 横向极化电压 V_{xy}：蒸馏水未显示振荡或量子化特征。(b,c) 浓度为 1000 ng/μL 和 500 ng/μL 的 DNA– 水呈现可重复的双峰模式，随后出现离散平台。在两个扫描方向上，峰的位置保持不变，排除了磁滞。因此，相干极化是水合DNA基质的固有特性。（完整数据集可在 Zenodo 上获取。）

出现在 $\Delta\phi \approx 200°$附近，这与独立测得的 V_{xx}–V_{xy}相位差以及在相同条件下获得的李萨如轨迹（未显示）一致。这些干涉条纹的持续存在及其清晰度表明，这两个通道共享一种相

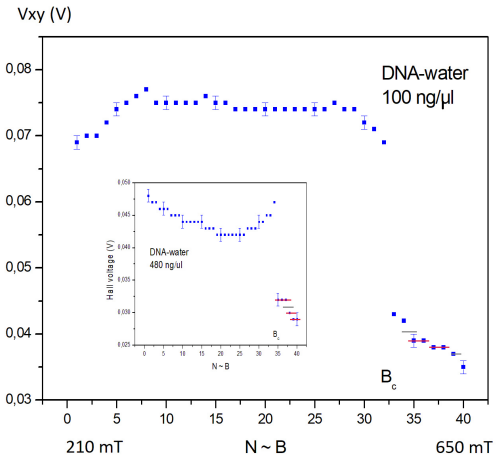


图9. 无缓冲液的DNA–水中由阈值驱动的离散极化能级特征。主图：直接溶解于蒸馏水中的100 ng/μL DNA的横向极化电压 V_{xy}。插图：在相同无缓冲液条件下测得的480 ng/μL样品。两种浓度均显示在 ≈ 0.6 T附近出现集体阈值，并伴随 > 25 mV的下降，随后出现分辨度较低、类似朗道能级的离散极化能级（典型间距为 ≈ 1 mV；先前估计为≈ 0.8 mV）。红线标示最清晰识别出的能级；灰色表示部分分辨出的能级。这些离散特征出现在无缓冲液样品中，表明该响应是水合DNA基质的内禀特性，并不需要缓冲液离子。

种相位相干极化模式。在此状态下，系统表现为一个耦合偶极振子，其纵向和横向分量之间具有明确的相位关系，这进一步支持了这样的解释：横向响应源于DNA–水氢键网络中的相干极化动力学。

在传统输运测量中，纵向 (V_{xx}) 和横向 (V_{xy}) 电压对应电阻率张量中彼此独立的分量，不会表现出相位相干耦合。相比之下，此处研究的水合DNA–水基质表现出截然不同的行为： V_{xx} 和 V_{xy} 演化为单一场驱动集体极化模式的两个正交分量。这种耦合反映了DNA周围水合环境的准二维结构，这种结构促成长程偶极排列，并在磁激发下支持相干振荡响应。 V_{xx} 和V_{xy}之间出现稳定且可重复的相位关系，并在多个振荡周期和实验条件下持续存在，这表明两个通道都源自统一的手性极化动力学，而非彼此独立的导电通路。在体相水溶液体系中观察不到纵向和横向极化分量之间的此类干涉，这种现象似乎源于低维性、DNA模板分子有序排列以及磁场诱导的对称性破缺共同作用。

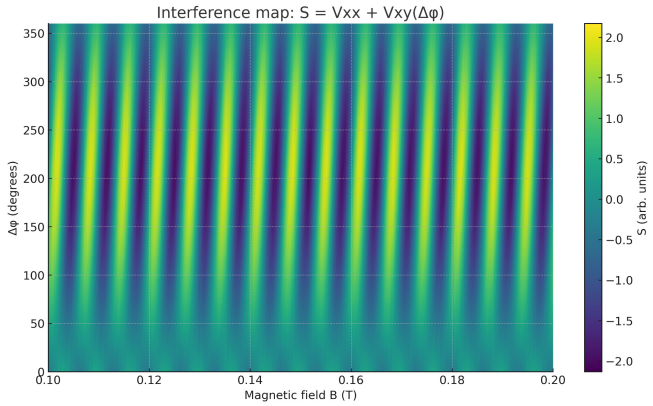


图10. 根据同时测得的V_{xx}和 V_{xy}信号构建的干涉图。在100 ng/μL DNA条件下，于 10 ℃进行线性磁场扫描时计算得到 $S(t,\Delta\phi) = V_{xx}(t) + V_{xy}(t+\tau)$。交替出现的相长和相消区域形成稳定的干涉条纹，在图中清晰可见的相位偏移 $\Delta\phi$ 处对比度达到最大。条纹的持续性和锐利程度表明，纵向与横向极化分量之间存在相干耦合。偏离完全 180° 反相关的现象，部分归因于 ∼0和 V_{xx} 之间0.25 s的顺序采样延迟。尽管这些条纹并非空间条纹（如杨氏双缝实验中的条纹），但它们源于相同的原理：两个振荡信号的相干叠加。因此，交替出现的相长和相消区域反映了 V_{xx} 与V_{xy}之间稳定的相位关系，这类似于光学或原子干涉测量中依赖于相位的干涉。

这些结果共同表明，水合DNA基质能够维持一种相干集体振动模式，其纵向和横向投影在测得的电压中呈现出类似干涉的图样，揭示了环境条件下出乎意料的有序极化响应。

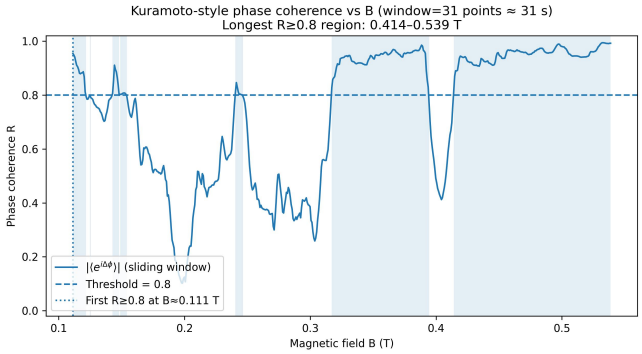


图11. 横向电压与光电压之间的相位同步。在相同的磁场和温度方案下记录的横向电压 V_{xy} 与同步测得的光电压信号（CH4）的相空间表示。环路结构和稳定轨迹表明，电学与光学观测量之间存在很强的相位锁定，在较长时间区间内相位一致性超过0.8。这种同步现象支持振荡横向信号源于集体极化动力学，而非仪器伪影。

磁场扫描过程中也观察到了相符的行为。图12展示了线性磁场扫描期间，与电学测量同步记录的横向光伏响应（CH4）。光电压在接近电学通道所确定的同一临界磁场处呈现出明显的转变，其特征是振荡从密集且振幅较大的状态定性地转变为振幅较小的状态。这一转变出现在一个物理上独立、且与传输接触端空间分离的检测通道中，表明磁场诱导的重组涉及整个 DNA–水系统。综上，这些观察结果进一步支持了如下解释：场驱动转变反映了系统层面的集体极化动力学。

横向电压与光电压之间的相位同步

为进一步评估横向电压振荡是否反映了集体动力学过程，我们在相同的磁场和温度方案下，同时记录了独立的光电压信号（CH4）。图 11 展示了横向电压 V_{xy} 与光电压的相空间表示，揭示出两个信号之间存在强烈的相位锁定。在较长的时间区间内，相位一致性超过 0.8，表明电学观测量与光子学观测量之间具有高度同步性。这种相关性支持了如下解释：横向响应反映了 DNA–水系统的集体极化动力学。

相干密度的趋同与统一图景

从振荡区间和平台计数中分别获得的有效相干密度估计值（n_{eff}）趋于一致。类似 Shubnikov–de Haas 的分析给出 $n_{\mathrm{eff}} \approx (4.8 \pm 0.5) \times 10^{14}\mathrm{m}^{-2}$，而平台间距得到 $n_{\mathrm{eff}} \approx (4.69 \pm 0.5) \times 10^{14}\mathrm{m}^{-2}$. 。在 ∼ 2% 的水平上达成一致，表明$1/B$周期性振荡和量子化极化平台源自同一个由磁场组织的偶极相干系综。临界磁场附近的转变标志着从反复的畴选择性量子化向更具全局相位锁定特征的类 Fröhlich 模式的交叉转变。对照实验和无缓冲液样品证实，该效应源于 DNA水合结构本身。

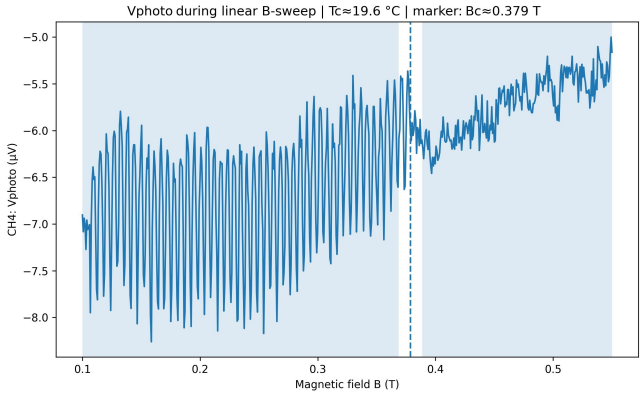


图1 2. 水合DNA中磁场扫描期间的光伏响应。磁场线性扫描期间（$B \approx 0.10$–0.55 T，持续600 s；采样间隔为1 s），记录了位于水合DNA样品（5 μL，500 ng μL^{-1}）上方的光伏板的横向光伏信号（CH4，V_{photo}）。实验在环境实验室条件下进行（$T \approx 19.6$ °C，相对湿度为≈ 23%），并在传输接触端施加了0.1 V偏置（同时记录CH1–CH3）。在约 $t \approx 371$ s处出现明显转变；按照线性扫描假设，该时刻对应 $B_c \approx 0.38$ T。此时，CH4信号从密集、高振幅振荡转变为低振幅状态。这表明，电学观测到的场驱动转变也反映在独立的光伏代理通道中，符合系统层面的重组，而非单一通道伪影。

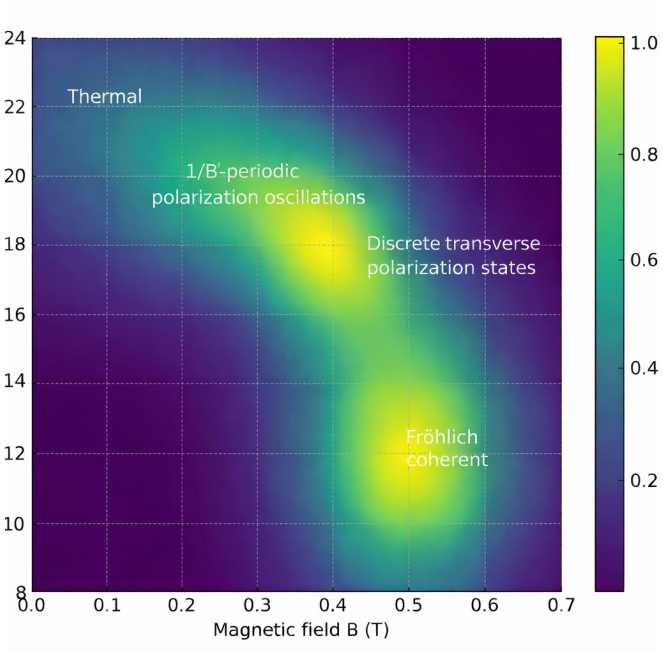


图13. 水合DNA中相干性的磁场–温度相图。该图总结了从磁场阈值（0.25–0.35 T）、 20.6 °C和 12.0 °C处的温度转变、平台形成、 $1/B$周期振荡带，以及低温弗勒利希类模式的出现中提取出的相干态。颜色表示定性的相干强度标度。边界特意设置为平滑，以反映在磁场和温度共同调控下氢键网络的连续演化。

相图

图 13 所示的近似磁场–温度（B–T）相图总结了迄今在所有测量中识别出的相干极化区间。该图纳入了磁场阈值（0.25–0.35 T）、在 20.6 °C 和 12.0 °C 处出现的两个可重复温度转变、极化阶梯、 $1/B$周期性振荡带，以及低温 Fröhlich 型振荡的出现。综合来看，这些观测 delineate 出三个主要区域：（i）无量子化的高温非相干区；（ii）离散极化平台与 $1/B$周期性振荡共存的中间区；以及（iii）以全局相位锁定极化模式为特征的低温高场区。在构建过程中应用了高斯模糊，以避免产生人为尖锐的边界，从而反映氢键网络固有的柔性和非均匀性。所得相图说明，磁场取向与热抑制退相干如何共同将 DNA–水基质组织成量子化并最终实现相干的极化态。

除了上文讨论的横向极化响应外，纵向传输通道也表现出明显的动力学交叉。在磁场固定的条件下并在逐渐冷却过程中，最初呈欧姆特性的纵向电流骤然崩塌，随后在零值附近波动，表明其偏离了稳态耗散传导。低于这一交叉点后，纵向信号主要表现为低振幅、不规则的波动，而非持续的直流分量。这一行为与极化主导区域的出现相符；在该区域中，集体场重组取代常规电荷输运，成为主导的电响应。在相近的实验条件下观测到的类似纵向交叉现象已见于文献 Ref. [16]。这些观察结果相吻合，支持了如下解释：本文分析的横向响应出现在纵向传导受到抑制、极化动力学占主导的区域。

III. 讨论

本文数据表明，水合DNA在环境条件下经受中等磁场时，会呈现出一种无法用常规电输运解释的量子化振荡响应。横向电压 V_{xy} 此前被解读为类霍尔信号，实际上反映的是由水合层内局部电中性的质子–质子空穴偶极子相干振荡所产生的极化电流。

这些发现表明，DNA–水界面能够维持由磁场诱导的相干极化动力学，其中磁场会将集体偶极模离散化并加以稳定，从而产生类似于朗道能级量子化的特征。

早期关于阶梯状结构和振荡的报告在定量上仍然成立；本研究在保留底层观测结果的同时，重新诠释了这些现象。这一观点与更广泛的看法一致：生物系统可能运行于这样一种状态，在其中，相干性或类量子振动组织发挥着功能性作用。根据这一框架，量子化平台的出现以及周期性振荡，自然源于水合 DNA 层内极化模受到的准二维限域。

从输运到极化相干性

将观测到的响应重新诠释为极化电流，能够化解电荷输运模型固有的概念难题。样品中没有可测量的稳恒电流流过，但其呈现出一种稳健的结构，且该结构随磁场变化而可重复地缩放。这种行为与一种宏观极化机制相符：嵌入受限氢键网络中的振荡偶极子产生随时间变化的电场，并被检测为相干性。在这一框架下，观测到的平台对应于相干偶极有序的稳定构型，其间距反映了磁力矩作用下偶极取向态的量子化。从动力学角度看，这些平台对应于受驱动极化相位场的亚稳态吸引子。相邻平台之间的跃迁反映了由磁场调谐引发、并在热涨落和环境涨落作用下促成的切换事件。

这种解释与图 1 所示的微观机制相一致。当质子沿氢键短暂跃迁时，会留下一个关联空位，形成一个局部电中性的质子–质子空穴对。尽管电中性，这类偶极子仍具有很强的极化能力，并可因轨道运动与氢键几何结构的共同作用而产生有效磁力矩。当许多偶极子通过水合网络同步时，所产生的集体动力学会形成宏观的、随时间变化的极化 $P(t)$，其时间导数 $J = \mathrm{d}P/\mathrm{d}t$会产生观测到的横向电压 V_{xy}。这种集体极化模自然符合类弗勒利希相干性的框架，对应于驱动耗散系统中的长程相位有序 [1–3]。

在这一图景中，磁场通过一种有效的磁电相互作用耦合到偶极系综。场诱导的力矩会偏置质子–质子–空穴偶极子的取向和相位，而它们的集体重新取向又会反馈到宏观极化响应中。此阶段无需详细的微观磁电张量；只需具备手性氢键几何结构和有限的回路面积，使磁通量能够影响相干偶极模的相位即可。这一机制为适度磁场重塑极化景观，并促使偶极系综发生离散、量子化重构，提供了一条自然途径。

偶极模式量子化

V_{xy} 中观察到的阶梯结构与 $1/B$ 中的周期性振荡，是同一底层量子化过程的两种互补表现。在较低磁场下，偶极系综会细分为多个畴；随着磁场增强，这些畴依次重新排列，在V_{xy} 和 V_{xx}中产生 $1/B$周期性振荡。相关频率反映了由结构化水合层所界定的特征相干面积。当磁场接近 0.35 T 附近的临界值时，这些畴会合并，系统随之急剧转变为类朗道区域，其特征是出现量子化极化平台；这是磁场锁定的偶极相干性的宏观标志。

在这一状态下，极化模可被视为集体偶极场的量子化角动量态。量子化源于磁通量与相干振荡偶极环有效面积之间的耦合，类似于电子系统中的昂萨格型关系。提取出的相干密度始终处于（4.7–5.8)$\times 10^{14}\,\mathrm{m}^{-2}$ across$1/B$周期性振荡、平台间距和张量反演所对应的范围内，这支持存在一个单一的底层相干系综。这些数值对应于氢键连接的界面水合理的表面覆盖率，意味着相干畴的尺度约为数百纳米，这与近期对受限水合层开展的结构研究一致 [5]。

向类弗勒利希相干相的转变

超过阈值磁场后，振荡结构塌缩为宽阔、缓慢变化的波瓣，表明偶极子系综发生了定性重组。离散的畴结构让位于全局相位锁定态，其中大量偶极子发生相干振荡。这种类弗里希相符合这样一种机制：磁场取向抑制了主要的退相干途径，使注入局域模式的能量得以累积，最终形成单一的集体振荡 [12]。与此同时，横向响应（V_{xy}）趋于平坦，且

阈值以上纵向分量（V_{xx}）平滑饱和，这些现象符合从畴态机制向全局相干极化模交叉转变的特征。

这种行为与经典弗洛利希系统中讨论的转变相呼应，并在定性上类似于玻色–爱因斯坦凝聚的某些特征 [25, 26], ，尽管这里的现象是在环境条件下的受驱耗散生物基质中实现的。即使 $k_{\mathrm{B}}T$ 显著高于估算的偶极耦合能，相干性仍然持续存在，这表明氢键网络中的非线性质子相互作用促进了一种非平凡的自组织机制。

温度依赖性与相干边界

极化振荡的温度依赖性揭示了位于 295 ± 5 K附近的相干边界，该温度接近具有生物学意义的温度 [10]。随着温度升高，热运动逐渐破坏偶极相位锁定，导致量子化特征受到抑制。降温则会逆转这一趋势，先恢复离散振荡，最终在较低温度下产生完全量子化的极化态。通过FFT分析提取的振荡分量振幅近似按$\exp(-1/T)$衰减，其活化能与氢键强度相当，这直接将相干性的出现与结构化水合网络联系起来。在生理温度附近出现相干性最大值，表明生物水合层可能自然处于一种由热扰动与集体有序化之间的平衡所优化的状态。

极化张量与相位结构

对 V_{xx} 和 V_{xy} 的同步测量表明，这两个分量的相位几乎相差 π 。这种相位关系表明，横向电压源于极化的正交旋转，而非电感耦合。通过极化响应张量表示时，V_{xx}–V_{xy} 轨迹描绘出平滑的李萨如曲线，展现了纵向和横向分量之间稳定的动态关系。这种行为是磁化电介质中旋光动力学的典型特征，进一步支持了极化电流解释。

图12所示的光伏响应为磁场驱动转变反映水合DNA 系统集体重组这一观点提供了更多证据。在这一独立的代理通道中也出现了定性上相似的转变，而该通道在空间上与电接触分离。电学特征与光伏特征之间的对应关系表明，场诱导转变涉及 DNA–水界面上的极化动力学重新分布，并能够与电学和电磁观测量耦合。尽管光伏响应的微观起源仍有待阐明，但它与电学转变同步，支持了系统层级相干极化模态这一解释。

对照实验与内禀起源

对照测量表明，相干极化需要完整的DNA–水结构。纯水和干燥DNA薄膜均未呈现量子化或振荡特征，而缓冲和未缓冲DNA溶液则表现出相同的平台间距和振荡频率，说明所观察到的响应不依赖于离子输运。金属对照样品产生了符号相反的横向信号，这与传统电荷传导而非极化旋转相符。总之，这些比较支持这样的结论：所观察到的横向响应源于水合DNA所固有的相干偶极动力学。

统一解释及与先前研究的联系

本文报告的研究结果为多年来在磁场下对水合DNA进行实验观测所得的若干现象提供了统一解释 [11, 12]。尽管早期分析将横向响应归因于质子传导，但所有定量特征——临界场、 $1/B$周期性、平台间距、阈值电压以及推断出的相干密度——在不同研究之间始终保持内在一致。本文将这些特征重新解释为磁场组织的偶极极化的标志，而非可移动电荷载流子传输的结果。有效相干密度 n_{eff} 在相互独立的数据集中的反复出现，包括*Physica B* 和*BioSystems*所报告的数据，凸显了这一潜在物理现象的稳健性。

作为相干性探针的干涉映射

图 10所示的干涉图样为纵向极化通道与横向极化通道之间的相干耦合提供了直接证据。通过将同时采集的信号 V_{xx} 和经过时间移位的信号V_{xy} 组合成干涉图 $S(t, \Delta\phi)$，我们观察到增强与抑制振幅交替出现的区域，而这些区域对其相对相位高度敏感。这些结构化条带源于两个锁相振荡分量的叠加，反映了纵向与横向极化动力学之间的瞬时相位关系。

最大条纹对比度所在的区域与独立测得的相位

差 V_{xx} 和 V_{xy}之间高度吻合。在整个磁场区间内，干涉条纹的稳定性、清晰度和持久性表明，这两个通道并非各自独立波动，而是始终锁定于同一动力学模式。在此状态下，水合DNA系统表现为一个耦合的偶极振子，其明确的相位结构将纵向和横向极化分量联系起来。因此，干涉重构可作为极化响应中宏观相位相干性的灵敏探针，进一步支持这样一种解释：横向电压源自集体且相干组织的极化模，而非无关联的涨落。

水合*DNA*中的极化霍尔效应

由中性激发携带的横向响应已成为现代凝聚态物理学的核心主题。近期对声子霍尔效应的演示，包括一篇最新的《物理评论快报》报告 [23]„，表明中性的振动激发能够在绝缘晶体中产生可测量的横向电压。这一不断发展的研究领域涵盖声子热霍尔效应 [17, 27–29], 、磁振子霍尔流 [18],以及激子霍尔响应 [19], ，确立了贝里曲率、手性几何和反演对称性破缺能够在不存在电荷输运的情况下产生类似霍尔效应的现象。

本文报告的观测结果自然契合这一由中性激发介导的横向响应新范式。早期解释将测得的横向电压 V_{xy} 视为质子霍尔效应的证据，隐含地援引了长程质子传导。本文采用一种更为保守且具有物理依据的解释：水合DNA支持一个高度可极化的质子涨落与氢键振动网络，在适当条件下，该网络能够组织成相干的极化模式。在这一框架下，DNA固有的手性及其结构化的水合环境，为磁场诱导的横向极化响应提供了一条合理途径，而无需援引巡游电荷输运。在约40–50 mV处可重复出现的电压阈值，被解释为进入增强集体相干性状态的交叉转变；超过该阈值后，具有稳定相位和振幅的横向振荡变得可观测。

手性、几何结构与集体响应

DNA固有的手性在塑造观测到的横向响应中起着核心作用。其螺旋几何结构为质子和振动激发施加了明确的几何相位关系，这与为手性声子和磁振子霍尔效应提出的机制类似——当与磁场耦合时，这种手性组织结构即使在不存在带电载流子的情况下，也能产生横向极化分量。这一框架消除了以往解释上的歧义，涵盖了观测到的全部特征，并将水合DNA纳入更广泛的一类软物质系统之中；这些系统表现出由中性激发介导的类霍尔响应。

质子极化模式

从这一视角来看，极化霍尔效应体现了一条更广泛的原理：柔软的氢键物质能够支持由相干极化波介导的磁场诱导横向响应。这一视角指向一个新兴研究领域——质子极化物理——其重点是研究水环境和生物环境中由质子介导的极化模式的相干性、几何结构及可控性。相关概念或可将水合DNA的动力学与光合复合体中观察到的相干能量转移现象 [30, 31]以及其他形式的水介导集体行为联系起来。

横向电压与独立测得的光电压之间观察到的相位锁定，为振荡响应背后存在集体极化动力学提供了进一步支持。这些发现共同构建了一个关于软物质中量子化极化相干性的框架，连接了分子生物学与量子凝聚态物理。未来的研究应探讨水合程度、磁场方向、外加偏置及时间分辨光谱的作用。分子几何结构、氢键拓扑结构与磁耦合之间的相互作用，可能揭示生物系统在室温下实现相干性的新途径。在此背景下，水合DNA成为一个具有代表性的平台，其中集体偶极有序可在生理相关条件下得到磁稳定。

IV. 最简理论描述

观测到的横向极化响应可在最简层面上描述为一种受驱动的耗散性集体相位模式，而非输运霍尔效应。我们用 $\theta(t)$ 表示表征准二维水合DNA层集体极化态的粗粒化相位（或取向角）。实验测得的横向电压 V_{xy} 在现象学上被视为与横向极化分量的时间导数成正比，

$$V_{xy}(t) \propto \frac{dP_{\perp}(t)}{dt}. \tag{1}$$

假设 θ 的动力学遵循一种过阻尼演化，发生在一个依赖场和温度的

势能景观中，

$$\gamma\,\dot{\theta} = -\frac{\partial U(\theta; B, T)}{\partial \theta} + \xi(t), \tag{2}$$

其中，γ 为阻尼系数，ξ（t）表示热涨落和环境涨落。离散的极化平台对应于系统被困在 U（θ；B，T）的稳定极小值附近的区间；而当磁场或温度的变化使某个极小值失稳、系统切换到相邻极小值时，就会发生阶梯跃迁。

在这一框架下，局限于平台边界的增强涨落反映的是稳定性阈值附近相邻极化构型之间的竞争，而非测量噪声。平台中心近乎规则的间距，以及平台形成前出现的 $1/B$周期性结构，可通过 U对磁场的依赖关系进行现象学描述，而无需引入巡游电荷载流子或电子朗道量子化。这一最简描述旨在捕捉实验中观察到的多稳态、切换和相干性的关键特征，同时不对微观细节作出假设。

V. 结论

本文报告的实验确立了水合DNA是一种由磁场稳定、受温度门控的相干偶极系统。适度的磁场和受控冷却会使水合层重组为离散且可重复的极化态，并在更低温度下形成稳健的振荡模态。观测到的阶梯状跃迁、分辨清晰的 $1/B$周期振荡以及大振幅横向响应，与传统离子或电子输运并不相符。相反，它们源于氢键网络中质子–质子空穴偶极子的集体动力学，其同步运动产生可测量的极化电流。

在所研究的所有磁场和温度范围内，有效相干密度（n_{eff}）始终保持惊人的一致，收敛于约（4.7– 5.8）$\times\,10^{14}\mathrm{m}^{-2}$，且不受DNA浓度、扫描协议或样品历史的影响。这种可重复性，以及纵向和横向通道之间特征性的 π 相位关系，表明量子化和振荡特征源自一个由结构决定的偶极系综。在20.6 ℃和12.0 ℃处可重复出现的温度阈值进一步表明，相干性可沿两个相互独立的控制轴进行调节：磁场取向和热诱导退相干抑制协同作用，从而稳定宏观极化有序。

这些发现表明，DNA–水界面是一种具有生物学意义的软物质系统，能够在接近环境条-件下维持相干偶极动力学。这些发现将当前观察结果与生物物理学中的更广泛主题联系起来，包括协同质子转移、水合层结构化，以及蛋白质、膜和光合复合物中的长程极化行为。水合DNA中量子化且相干的极化现象，为系统探索生物物质中的偶极模式开辟了途径，包括频率分辨光谱学、相干域的空间映射，以及利用温度、磁场和水合几何结构进行可控扰动。

总体而言，水合DNA展现出一种天然平台，在此平台上，磁场和温度共同促使氢键网络形成相干的量子化极化态。本研究为理解生命物质中的极化动力学提供了概念框架，并为未来研究软质及生物量子材料中的相干性奠定了基础。研究表明，在具有生理相关性的条件下，水合DNA能够支持磁场稳定且依赖温度的集体极化动力学。这些结果凸显了凝聚态物理学中的概念与生物物理学和量子生物学中新兴问题之间可能存在的联系，并表明相干极化可能在结构化软物质中发挥更广泛的组织作用。

方法

样品制备

大麦基因组DNA（双链，采用CTAB法分离，并根据Doyle和Doyle [32]的方法进行了改良）溶解于TE缓冲液中（pH 8，含Tris–HCl和EDTA）。工作浓度为100、500和1000 ng $\mu\mathrm{L}^{-1}$。制备好的DNA溶液在两次实验之间储存于 -20 ℃，以尽量减少降解。

对于所有测量，将一滴 5 μL液滴置于平面四触点镀铜基底上，该基底限定的有效区域约为 0.7×0.7 cm^2。表面张力与显微镜载玻片共同作用，将水合体积限制在准二维层内。所得水合薄膜的厚度约为10 ± 2 μm。样品在受控相对湿度（25–35%）下平衡，以确保可重复的半水合状态。对纯水、无缓冲液DNA溶液和金属镀铜基底进行了对照测量。

磁场生成与校准

使用安装在电机驱动直线平移台上的钕铁硼永磁体产生范围为 0.05–0.65 T 的磁场；该平移台用于控制磁体与样品间距（图 1 4）。系统以两种模式运行：电机扫描模式（0.1–

0.5 mT s^{-1}），用于高分辨率振荡和平台测量；手动模式用于阈值测量，以最大限度地减少电机可能产生的电磁干扰。每次测量前，均使用精度为 ±1mT 的霍尔探头高斯计对磁场值进行校准。所有磁场均垂直施加于样品平面。

温度控制

温度相关实验在配备两个冰储槽的冷藏箱中进行，以提供被动式热稳定。经过校准的Extech温度计（精度为 ±0.1 ℃）放置在距样品5 mm以内的位置。典型冷却速率为0.01–0.03 ℃ s^{-1}。在20.6 ℃和12.0 ℃附近，始终能够检测到两种可重复的温度驱动重组。相对湿度保持在 ±3%以内，以确保温度扫描期间水合条件稳定。

电学测量几何结构

通过1 kΩ分流电阻施加0.1 V直流电源，从而定义纵向电流通道。使用四个同步采集通道记录信号：

- CH1：纵向电压 V_{xx} 跨接在1 kΩ分流器两端（得到 $I_{xx} = V_{xx}/1\ \mathrm{k\Omega}$），
- CH2：纵向样品电压 V_{xx} （样品），
- CH3：横向电压 V_{xy} （样品），
- CH4：光电压（测量时）。

图 4 所示的磁场扫描实验以 740 Hz 的频率采样，每条迹线约有 10^5 个数据点。其余磁场扫描和温度扫描均以 1 Hz 的频率采样。所有测量电子设备均由电池供电并进行了磁屏蔽，以尽量减少电感耦合。

光电压测量

在部分选定的实验中，通过独立的光电压通道（CH4）与电学测量同步记录数据。一块光伏板水平放置在水合DNA样品后方，与样品的距离约为3 cm，且位于磁体与样品之间区域之外。该光伏板未与输运电路电连接。使用专用采集通道直接在板端子处测量光电压。该配置确保了光电压检测与输运触点之间在物理和电学上的分离，使光电压能够作为磁场诱导DNA–水系统动态重组的独立表征。

数据采集与信号处理

原始 V_{xy} 迹线采用低阶多项式相减法去趋势，以去除与水合动力学和热平衡相关的缓慢背景漂移。所得 ΔV_{xy} 信号在磁场域和时域中进行了分析。

快速傅里叶变换（FFT）分析采用了带振幅归一化的汉宁窗。通过比较正向和反向磁场扫描来验证周期性。在低温下，主导振荡频率通常出现在 $F \approx 1.2$ T 附近，而在室温附近则出现在 $F \approx 6.3$ T 附近。利用 I_{xx} 和 V_{xx} 之间的跨通道相关性，识别同步发生的纵向极化事件。

使用希尔伯特变换提取了 V_{xx} 和 V_{xy} 之间的相位关系，结果显示在振荡区间内，相移接近 π 。由于 V_{xx} 和 V_{xy} 通过多路复用器依次采集，因此产生了约 0.25 s 的采样偏移，并在相位分析中予以考虑。进一步使用希尔伯特相位分析估算相位相干长度，结果显示，室温下约为 55 nm，而在低于 15 ℃ 的温度下则超过 100 nm。这些数值与此前针对偶极系综的 Gross-Pitaevskii 模拟结果一致。

特征周期尺度提取

在横向和纵向极化通道中观察到的振荡结构具有周期性$1/B$。我们通过对 $1/B$ 域进行快速傅里叶变换（FFT）分析，提取主导频率尺度 F，以表征这一行为。该频率为磁场依赖的极化响应重组提供了简洁且可复现的描述。

为便于在不同数据集和实验方案之间进行比较，我们将 F 与一个逆面积尺度 A^* 相关联，该尺度在现象学上定义为

$$A^* \equiv C\,F, \tag{3}$$

其中， C 是一个固定的比例常数，仅用于以类面积单位表示 $1/B$ 周期性。在当前基于极化的解释中， A^* 并不代表费米面面积或任何电子载流子性质。相反，它是准二维水合层内特征相干图样尺度的一种便利度量。

定义一个相关的有效密度尺度 n^*_{eff}，它由A^* 确定，旨在将振荡周期与离散极化平台的间距进行比较。

这两个量都被视为对场组织的集体极化动力学的唯象描述。因此，正文中引用的数值仅用于展示独立测量之间的内在一致性，并不意味着存在巡游电荷输运或电子量子化。

对照实验

对照测量表明，纯水没有表现出振荡、阈值或平台结构。干燥DNA薄膜和金属薄膜均未显示出相干特征，而金属铜对照样品则产生了符号相反的横向信号，这是常规电子霍尔响应的典型特征。无缓冲液 DNA 样品呈现出与含缓冲液样品相同的平台结构和振荡周期性，表明离子传导并未对观测到的信号产生贡献。反转磁场扫描方向后，间距和频率均保持不变，表明该现象与磁场扫描方向无关。综合而言，这些对照实验证实，观测到的横向电压源自结构化 DNA 水合层的集体极化动力学。

相图构建

磁场–温度（B–T）相图是根据约 0.25–0.35T 附近的磁场阈值、20.6 ℃ 时的温度转变以及 12.0 ℃、极化平台结构、 $1/B$ 周期振荡带，以及低温弗洛利希型振荡的出现绘制而成。采用高斯模糊以避免边界显得过于锐利，从而连续呈现相干偶极状态。

数据可用性

支持本研究结论的所有数据均已公开。图4的完整横向电压数据集（约 100,000 个数据点）已存入 Zenodo，可通过数字对象标识符 10.5281/zenodo/1212_121326_8 获取。其他原始数据、处理后数据和绘图脚本可向通讯作者提出合理请求后获取。

致谢

作者感谢使用 Keithley DMM6500 万用表。该仪表最初是在与 Marek Marzec 合作开展的一项研究中获得的，相关研究发表于 Scientific Reports。本研究得到波兰国家科学中心资助（项目编号：2020/37/B/NZ3/03696）。作者还感谢 Katarzyna Konopka 提供 DNA–水样品。

参考文献

[1] H. Fröhlich, 《International Journal of Quantum Chemistry》**2**, 641（1968）。[2] H. Fröhlich, 《*Biological Coherence and Response to External Stimuli*》（Springer-Verlag, 柏林, 1988）。[3] A. S. Davydov, 《Journal of Theoretical Biology》**66**, 379（1979）。[4] S. Hammes-Schiffer, 《Chemical Reviews》**106**, 962（2006）。[5] D. Donadio 和 G. Galli, Nature Chemistry **17**（2025）, 即将刊出。[6] J. R. Reimers, Proceedings of the National Academy of Sciences **106**, 4219（2009）。[7] Á. R. Vasconcellos、G. Krein 和 M. P. de A. Mello, Information **3**, 601（2012）。[8] J. Al-Khalili 和 J. McFadden, *Life on the Edge: TheComing of Age of Quantum Biology*（Bantam Press, 伦敦, 2015）。[9] M. Tegmark, Physical Review E **61**, 4194（2000）。[10] M. Pietruszka 和 M. Marzec, Scientific Reports **14**, 18592（2024）。[11] M. Pietruszka, Physica B: Condensed Matter **716**, 417672（2025）。[12] M. Pietruszka, BioSystems **256**, 105564（2025）。[13] D. Shoenberg, *Magnetic Oscillations in Metals*（剑桥大学出版社, 剑桥, 1984）。[14] D. C. Tsui、H. L. Stormer 和 A. C. Gossard, 《物理评论快报》**48**, 1559（1982）。[15] K. von Klitzing、G. Dorda 和 M. Pepper, 《物理评论快报》**45**, 494（1980）。[16] M. Pietruszka, BioSystems **238**, 105708（2026）。[17] C. Strohm、G. L. J. A. Rikken 和 P. Wyder, 《物理评论快报》**95**, 155901（2005）。[18] Y. Onose 等, 《科学》**329**, 297（2010）。[19] K. F. Mak、D. Xiao 和 J. Shan, 《自然·光子学》**12**, 451（2018）。[20] T. Saito、H. Ochoa 和 M. S. Dresselhaus, 《物理评论快报》**123**, 065901（2019）。[21] X. Li、B. Fauqué、Z. Zhu 和 K. Behnia, 《自然·通讯》**14**, 1027（2023）。[22] X.-T. Zhang、Y. H. Gao 和 G. Chen, 《物理学报告》**1070**, 1（2024）。[23] X. Jin 等, 《物理评论快报》**135**, 196302（2025）。[24] S. A. Owerre, 《物理学杂志：凝聚态》**28**, 386001（2016）。[25] M. H. Anderson、J. R. Ensher、M. R. Matthews、C. E. Wieman 和 E. A. Cornell, 《科学》**269**, 198（1995）。[26] W. Ketterle 和 H.-J. Miesner, 《恩里科·费米国际物理学学校论文集》**140**, 67（1999）。[27] G. Grissonnanche 等, 《自然》**571**, 376（2019）。

[28] X. Zhang 等，《自然·物理》**19**，1517（2023）。[29] Q. Xiang、X. Li、X. Guo、K. Behnia 和 Z. Zhu，arXiv（2025），arXiv:2511.08932 [凝聚态物理—强关联电子系统]。[30] G. S. Engel、T. R. Calhoun、E. L. Read、T.-K. Ahn、T. Mančal、Y.-C. Cheng、R. E. Blankenship 和 G. R. Fleming，《自然》**446**，782（2007）。[31] G. Panitchayangkoon等，Proceedings of the National Academy of Sciences **107**，12766（2010）。[32] J. J. Doyle 和 J. L. Doyle，《植物化学通报》**19**，11（1987）。

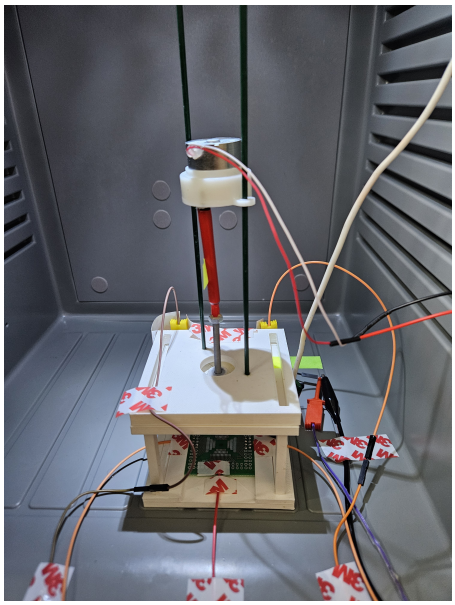


图14. 用于测量水合DNA中场诱导极化的定制探测器。将一份 $\sim 5\ \mu$L DNA–水样品置于单面印刷电路板（40.5 × 43 mm）的中央，并用玻璃盖板密封，采用范德堡型配置。由此形成的准二维水合层（厚度 $\approx 10\ \mu$m；见方法）通过内环铜尖端无锡欧姆接触（厚$\sim 0.1\ \mu$m）连接。黑色触点提供偏置电压（V_{bias}），洋红色触点监测纵向电势（V_{xx}），黄色触点记录由场诱导集体偶极振荡产生的横向极化响应（V_{xy}）。使用永久钕磁铁施加垂直磁场（B）。探测器组件置于冰箱内的绝热隔离法拉第笼中，以尽量减小热漂移和电磁干扰。磁场可连续调节（带离合器的电机驱动螺杆），也可逐步调节（手动或电子控制）；转数（索引 N）经过校准，以对应磁感应强度。

补充信息

N关于干扰和仪器伪影的注记 象

一个潜在的疑虑是，由纵向和横向通道重建的干涉结构是否可能源于测量电路中的感应串扰或其他电磁拾取。在本文采用的分析中，干涉图由同时记录的信号构建而成，具体如下：

$$S(t, \Delta\phi) = V_{xx}(t) + V_{xy}(t + \tau), \tag{4}$$

其中，τ是施加的时间延迟，$\Delta\phi$ 表示相应的有效相位偏移（对于角频率为 ω的窄带振荡，可以令 $\Delta\phi \approx \omega\tau$）。

在常规的感应情形下，预期杂散电压会随时间导数成比例变化

驱动电流的时间导数， $V_{\mathrm{ind}} \propto \mathrm{d}I/\mathrm{d}t$，其相位和振幅主要由布线几何和电路阻抗决定。相比之下，此处观测到的横向信号符合由集体偶极动力学产生的极化电流， $J_{\mathrm{pol}} = \mathrm{d}P/\mathrm{d}t$；其相关电场被检测为横向电压 V_{xy}。有几项观察结果可区分这两种情形。首先，在一系列磁场扫描速率和温度下，干涉条纹始终存在，且与 $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$无关；即使纵向电流变化很弱，条纹仍清晰可见。其次，重建得到的 $S(t,\ \Delta\phi)$ 在 $\Delta\phi \approx 200^\circ$ 附近呈现可重复的峰值，这与通过希尔伯特分析独立提取的 V_{xx} 和 V_{xy} 之间的相位差相符；固定的感应拾取反而会形成由布线决定的相位关系，不会随样品状态系统性变化。第三，将相同的布线和采集设置用于对照样品（纯水、干燥 DNA 和金属薄膜）时，并未产生类似的条纹结构，这表明该效应并非某种普遍属性

测量链路。第四，在振荡区间，横向响应比纵向调制大数个数量级，且与其相位相差约 π，这种行为难以用类似导数的感应拾取来解释，因为这类拾取通常较弱，且受电路耦合严格限制。最后，在独立的光电压通道中也观察到了相应的场驱动转变；该通道在空间上与电接触分离，因此不易受到输运引线中电串扰的影响。综合来看，这些观察结果支持这样的结论：干涉条纹反映的是水合 DNA–水系统固有的集体极化模中纵向和横向分量之间的相干耦合，而非感应或仪器伪影。此外，在独立记录的光电压 V_{photo} 中观察到伴随的场驱动转变，进一步加强了这一解释，因为这表明干涉图样反映的是系统层面的极化重组，而非局限于电测量电路中的伪影。