

旋转胶子等离子体的非均匀相

Phys.Rev.D 107 (2023) 11, 114502, e-Print: 2209.15534 [hep-lat]

Phys.Lett.B 855 (2024) 138783, e-Print: 2312.13994 [hep-lat]

JHEP 09 (2025) 079, e-Print: 2411.15085 [hep-lat]

陈亦点

2026 年 3 月 6 日

1. Tolman-Ehrenfest (TE) 效应

- **基本概念**: 在处于全局热平衡的静态引力场中, 系统的局部温度 $T(\vec{x})$ 并非空间均匀。
- **核心公式**: 由广义相对论的几何性质决定:

$$T(\vec{x})\sqrt{g_{00}(\vec{x})} = T_0$$

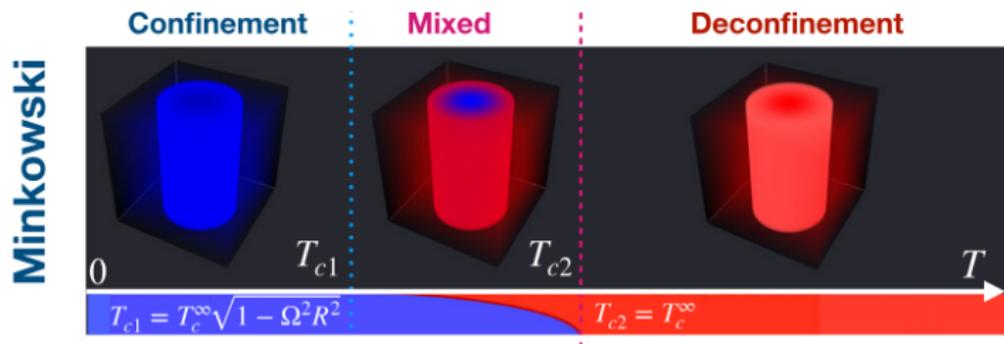
其中 g_{00} 是度规的时间分量, T_0 是参考温度。

- **应用于刚性旋转**: 在 Minkowski 时空中, 以角速度 Ω 旋转的共动参考系度规为 $g_{00} = 1 - \Omega^2\rho^2$ 。
- **动力学结论**: 局部温度随距旋转轴的距离 ρ 增加而升高:

$$T_{TE}(\rho) = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \Omega^2\rho^2}}$$

2. 真实旋转下的非均匀相 (Minkowski 时空)

- **逆向强子化 (Inverse hadronization)**: 由于边缘温度高于中心, 冷却过程 (强子化) 首先在旋转轴中心发生。
- **混合非均匀相 (Mixed Phase)**: 缓慢加热系统时, 边缘率先达到临界温度 T_{c1} 发生解禁闭。
- **相空间结构**: 在温度区间 $T_{c1} < T < T_{c2}$ 内, 系统分裂为“中心禁闭, 外围解禁闭”的混合相。

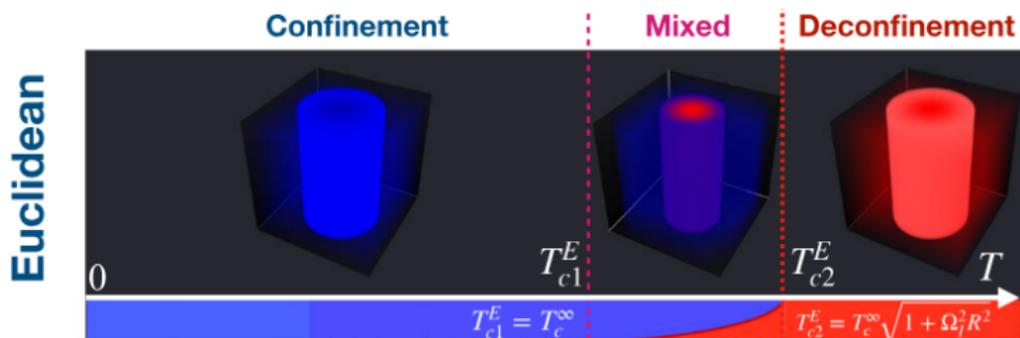


3. 虚旋转下的 TE 效应与反转相图 (Euclidean 时空)

- Wick 变换与虚角速度：为了在格点上进行热力学模拟，引入解析延拓 $\Omega_I = -i\Omega$ 。
- 欧几里得度规：度规的时间分量反转为 $g_{00}^E = 1 + \Omega_I^2 \rho^2$ 。
- 欧几里得 TE 定律：局部温度表现为随半径 ρ 衰减：

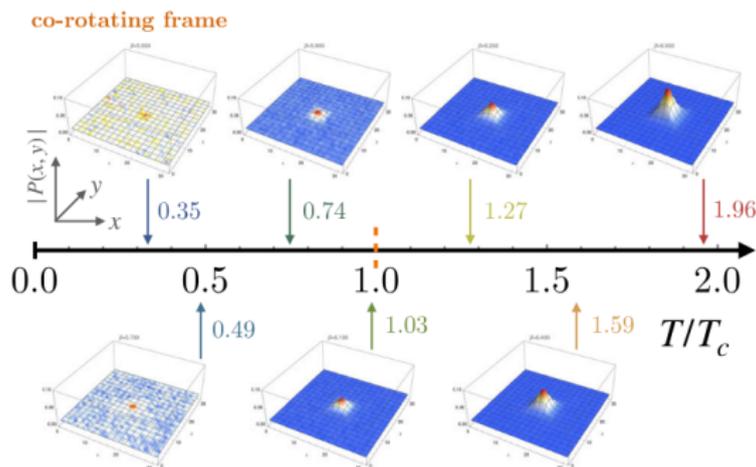
$$T_{TE}^E(\rho) = \frac{T_0}{\sqrt{1 + \rho^2 \Omega_I^2}}$$

- 非均匀相结构反转：在虚旋转下，相结构变为“中心解禁闭（高温），外围禁闭（低温）”。



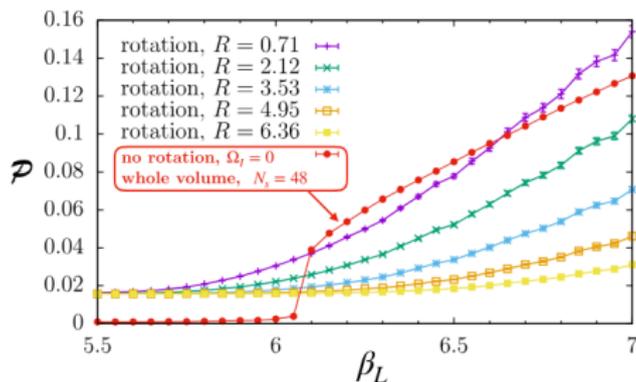
4. 格点模拟：Rotwisted 边界条件与共动 Polyakov 环

- **格点实现**：利用超立方格点对称性，在紧致虚时间方向引入 $\Omega_I = \pi T/2$ 的“rotwisted”边界条件（每次跨越时间边界空间旋转 $\pi/2$ ）。
- **观测结果**：数值结果清晰显示出非均匀的相空间分布：高温等离子体聚集在旋转中心，被外围的冷禁闭相包裹。
- **物理意义**：格点结果直接验证了欧几里得 TE 定律的纯运动学预言。



5. 轴心解禁闭相变软化为 Crossover

- 纯胶子体系背景：常规的无旋转 SU(3) 纯规范理论表现出弱的一级相变。
- 极速虚旋转下的观测：在旋转轴中心，随温度降低，共动 Polyakov 环 \mathcal{P} 缓慢而平滑地下降，未出现尖锐突变。
- 排除有限体积效应：在相同的极小空间体积 ($1 \times 1 \times N_s$) 内计算无旋转格点，依然观测到清晰的相变信号，从而排除了平滑曲线是由计算体积过小造成的可能。
- 结论：极速虚旋转 ($\Omega_I = \pi T/2$) 改变了相变性质，使靠近旋转轴区域的一级相变软化为平滑的交叉型 (crossover-type) 相变。



6. 总结与讨论

- **理论闭环：**

- ① 格点 QCD 证实了虚旋转欧几里得空间中存在“中心解禁闭、外围禁闭”的非均匀相。
- ② 通过解析延拓映射回真实 Minkowski 时空，暗示真实的极速旋转会导致夸克胶子等离子体出现“外围解禁闭、内核禁闭”的奇特混合相。

- **物理机制：**这种非均匀相结构具有纯粹的运动学/几何起源，根植于时空的 Tolman-Ehrenfest 效应。

1. 2023 年研究：‘rotwisted’ 边界

- **物理出发点**：假设胶子等离子体作为一种流体，其宏观热力学受控于广义相对论的 Tolman-Ehrenfest (TE) 效应： $T(\vec{x})\sqrt{g_{00}(\vec{x})} = T_0$ 。
- **rotwisted 边界条件**：在虚时间方向跨越边界 $\beta = 1/T$ 时，强制要求空间坐标绕轴额外旋转 $\pi/2$ 。
- **本质**：这是一种“纯运动学/几何”的强制约束，相当于将系统放入一个预设好引力势的几何背景中。

2. 2024 年研究：将弯曲度规写入作用量

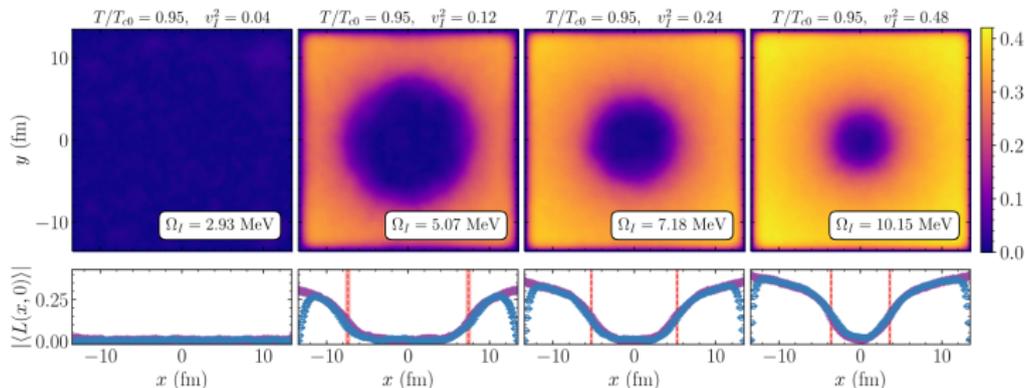
- **硬核动力学转向**：放弃 ‘rotwisted’ 边界技巧，直接从连续的杨-米尔斯场论出发，将共动参考系的弯曲度规 $g_{\mu\nu}$ 显式代入作用量 S_E 中。

$$S_G = \frac{1}{4g_{YM}^2} \int d^4x \sqrt{g_E} g_E^{\mu\nu} g_E^{\alpha\beta} F_{\mu\alpha}^a F_{\nu\beta}^a$$

- **格点设置**：系统扫描一系列虚角速度 Ω_l 以避免符号问题；并在横向平面采用**开放边界条件 (OBC)** 以最大程度消除边界效应。
- **物理意义**：旋转直接参与每个格点上胶子场的局域微观演化，唤醒了强相互作用的非微扰响应。

3. TE 定律的破灭与相图反转

- **轴心临界温度恒定**：格点发现，无论角速度多大，旋转轴心处的局域相变温度 $T_c(0)$ 几乎保持不变。
- **惊人的反转**：将虚转动数据通过严格的解析延拓推演至实转动后，相图完全颠覆了 2023 年的结论：**真实旋转下，中心区域优先解禁闭，外围区域保持禁闭！**
- **物理推测**：纯粹基于几何红移的 TE 定律在真实的强相互作用系统中失效。极有可能与弯曲时空背景下非阿贝尔规范场的**共形反常 (Conformal Anomaly)** 有关。



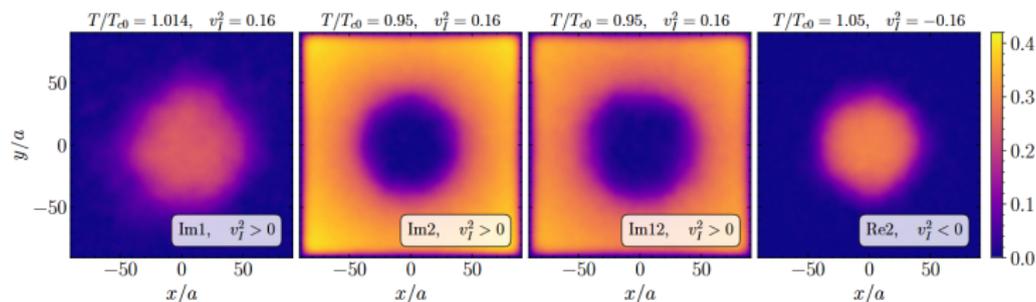
1. 2025 年研究：拆解旋转杨-米尔斯作用量

- **动力学剥离**：为了寻找击败 TE 效应的微观机制，作者将旋转带来的作用量修正严格展开为两项： $S(\Omega_I) = S_0 + S_1\Omega_I + S_2\Omega_I^2$ 。
- **线性项 S_1 (机械耦合)**：正比于角速度，代表宏观旋转与胶子机械角动量 J_G 的线性耦合。
- **二次项 S_2 (磁涡旋耦合)**：正比于 Ω_I^2 ，代表旋转与胶子场色磁分量 (Chromomagnetic field) 平方的直接耦合。

$$S_{magn} \propto r^2 [(F_{\varphi z}^a)^2 + (F_{r\hat{\varphi}}^a)^2]$$

2. 2025 年结果：色磁凝聚的绝对主导

- **对照实验**：在格点上通过开关参数 λ_1, λ_2 分别独立测试 S_1 和 S_2 的效应。
- **线性项遵循直觉**：仅保留 S_1 时，系统的行为顺应了经典流体力学和 TE 定律的预测。
- **二次项主导全局**：当仅保留 S_2 时，系统展现出与全作用量一致的“反常”混合相。这证明了**磁涡旋耦合完全压倒**了线性的机械耦合。
- **避开符号问题的实旋转**：由于 $S_2 \propto \Omega^2$ ，无论角速度是实是虚，该项始终为实数。作者直接关闭 S_1 ，在格点上成功进行了无符号问题的真实旋转模拟，完美验证了此前解析延拓的正确性！



3. 总结与物理启示

- **方法论的演进**：从边界条件的几何模拟 ('rotwisted', 2023)，到连续作用量的动力学重构 (2024, 2025)，揭示了唯象运动学与非微扰动力学之间的深刻差异。
- **核心物理结论**：
 - ① QGP 不是简单的宏观理想流体。
 - ② 在真实的极速旋转下，非阿贝尔规范场的色磁分量会产生强烈的动力学响应（磁涡旋耦合）。
 - ③ 这种底层非微扰效应击败了纯几何的 TE 红移定律，最终导致旋转等离子体呈现“**中心解禁闭 (热核) - 外围禁闭 (冷壳)**”的奇异空间结构。