

卓上量子重力実験に向けた 時空創発リングの探索

竹田 大地(京都大学 素粒子論 D1)

橋本幸士氏、田中耕一郎氏、米澤進吾氏との共同研究に基づく

arXiv: 2211.13863

2023/3/24

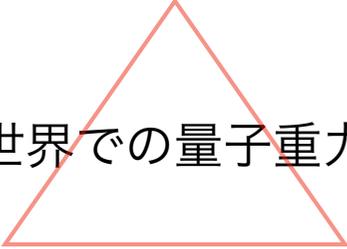
日本物理学会 2023年春季大会

量子重力を実験室で探る

量子重力の定式化は未解明

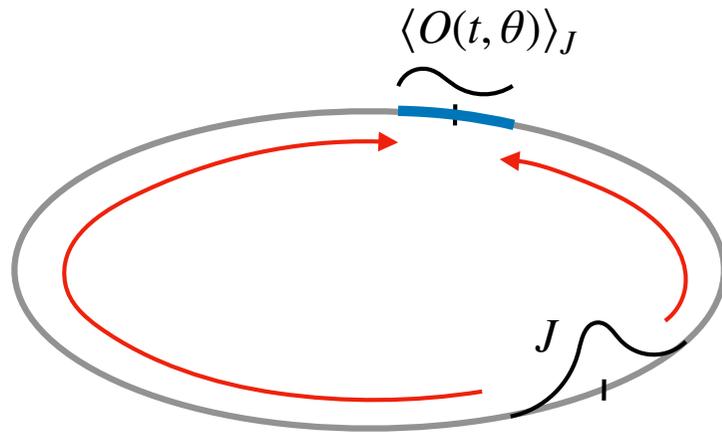
理論の候補は知られている： 超弦理論、ループ量子重力....

この世界での量子重力検証



AdS/CFTに従う物質を探す

イメージングで時空が創発しているか区別



リング上の量子臨界現象 + 刺激 J

リング上を伝わる

$\langle O(t, \theta) \rangle_J$ を光学イメージング

$$\psi(t, k) \propto \int_{-d}^d dy \langle O(t, \theta) \rangle_J e^{-i\omega k \theta}$$

これを見れば時空が創発しているか否か判別可能

時空創発物質を探すなら光学イメージング

1. 時空創発リングのモデル = 3Dの重力
2. 光学イメージングに時空創発のシグナル
3. 時空創発リングの探索実験はできそう

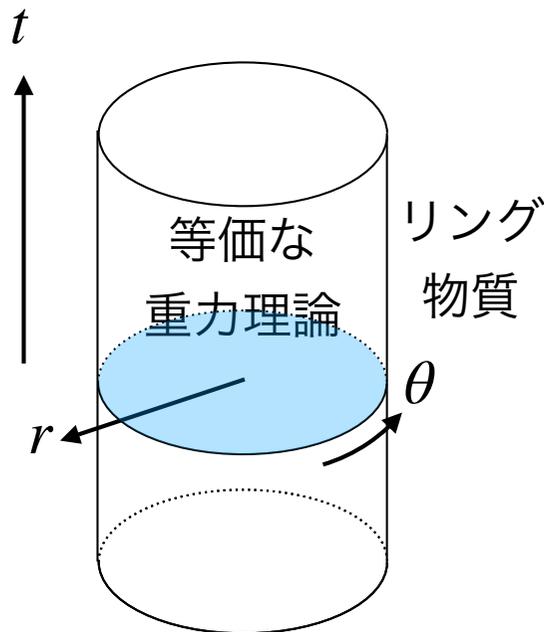
時空創発物質を探すなら光学イメージング

1. 時空創発リングのモデル = 3Dの重力
2. 光学イメージングに時空創発のシグナル
3. 時空創発リングの探索実験はできそう

モデル：3次元AdS上の自由スカラー

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^3x \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) + \int d^3x \sqrt{-g} \left(-\frac{1}{2} \partial_M \Phi \partial^M \Phi \right)$$

リングの理論 = バルクの理論 + AdS/CFTの辞書



円筒内部にスカラー場を定義

$$\theta \sim \theta + a$$

Φ を g_{MN} を固定して解く：

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_M (\sqrt{-g} g^{MN} \partial_N \Phi(x)) = 0$$

AdS/CFTの辞書

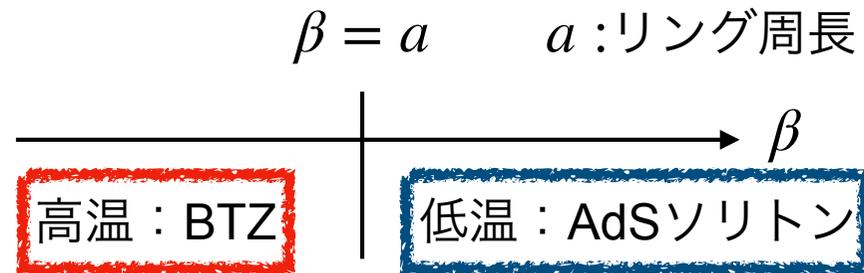
$$\Phi(x) \sim \underline{J(t, \theta)} + \frac{O(t, \theta)}{r^2} \quad (r \rightarrow \infty)$$

前と同じソース

応答

「ブラックホールあり/なし」の相転移

自由エネルギーの比較

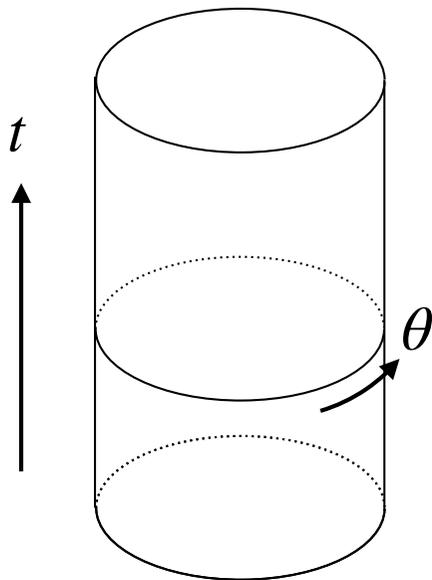


$$\text{BTZ : } ds^2 = -\frac{r^2 - r_h^2}{L^2} dt^2 + \frac{L^2}{r^2 - r_h^2} dr^2 + r^2 d\theta^2 \quad r_h = \frac{2\pi L^2}{\beta}$$

$$\text{AdSソリトン : } ds^2 = -r^2 dt^2 + \frac{L^2}{r^2 - r_s^2} dr^2 + \frac{r^2 - r_s^2}{L^2} d\theta^2 \quad r_s = \frac{2\pi L^2}{a}$$

比較対象：AdS/CFTに従わない例

$$S = \int d^2x \left(-\frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{m^2}{2} \phi^2 + J\phi \right)$$



$\mathbb{R} \times S^1$ 上にスカラー場を定義

$$\theta \sim \theta + a$$

EOM

$$(\partial^2 - m^2)\phi = J$$

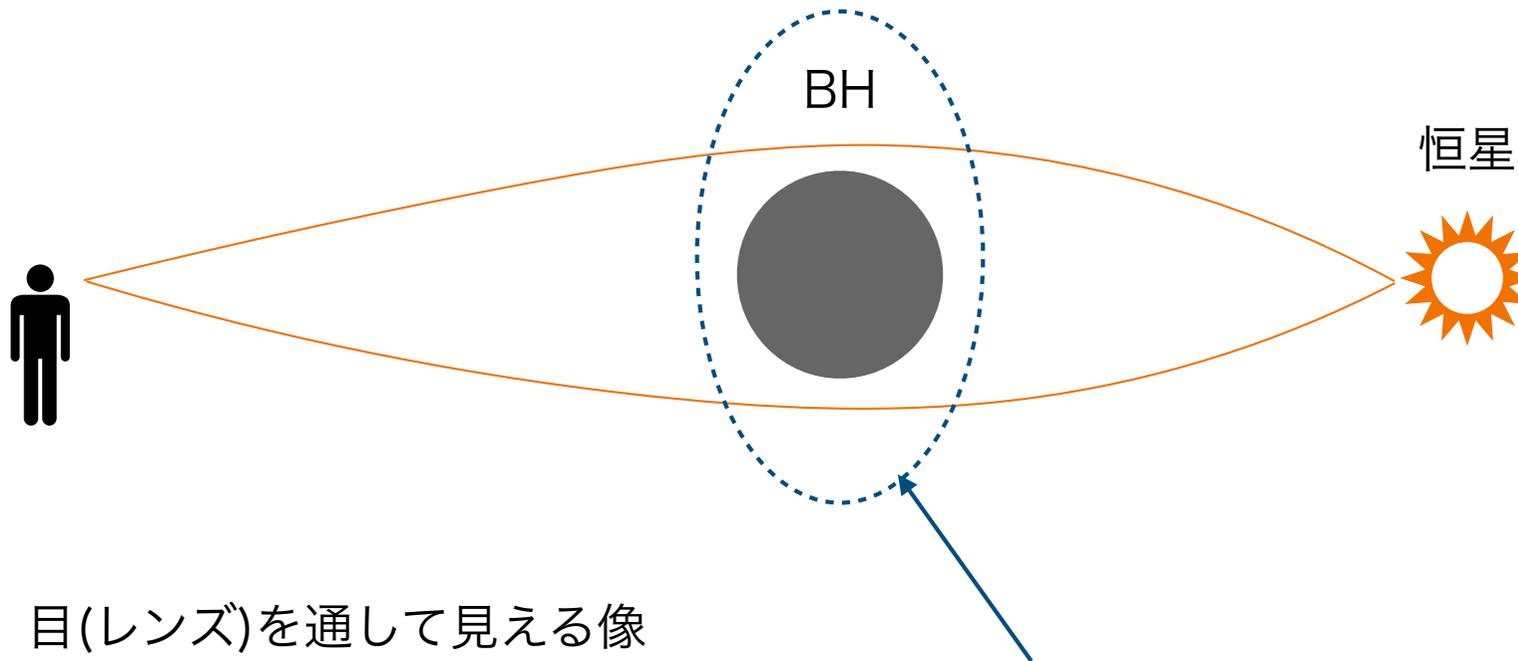
$$J \propto \underbrace{e^{-i\omega t}}_{\text{振動数は}\omega} \sum_n \underbrace{\exp\left(-\frac{(\theta - na)^2}{2\sigma^2 a^2}\right)}_{\theta \sim 0 \text{ に局在}}$$

時空創発物質を探すなら光学イメージング

1. 時空創発リングのモデル = 3Dの重力
2. 光学イメージングに時空創発のシグナル
3. 時空創発リングの探索実験はできそう

イメージングの役割は目

例：Einsteinリング



目(レンズ)を通して見える像

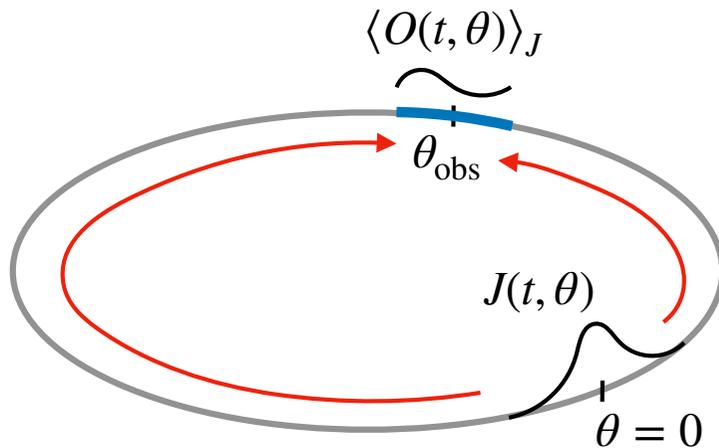


重力レンズで見かけの光源を作る

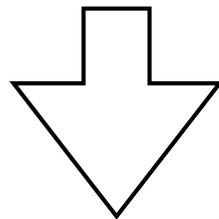
目は見かけの光源の形を復元

レンズで曲がった時空の情報を読む

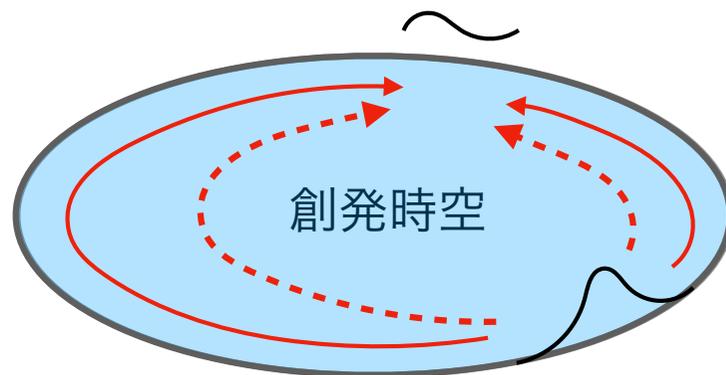
創発時空を通る



ソースは本当はリング上を伝播する



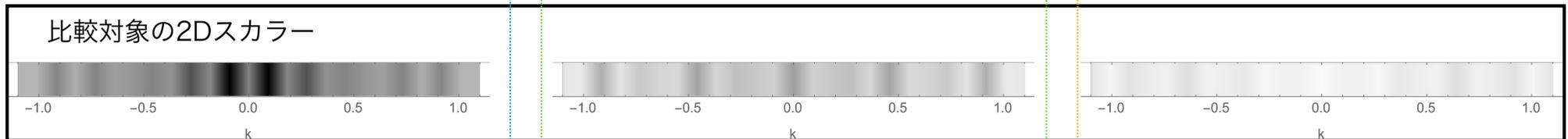
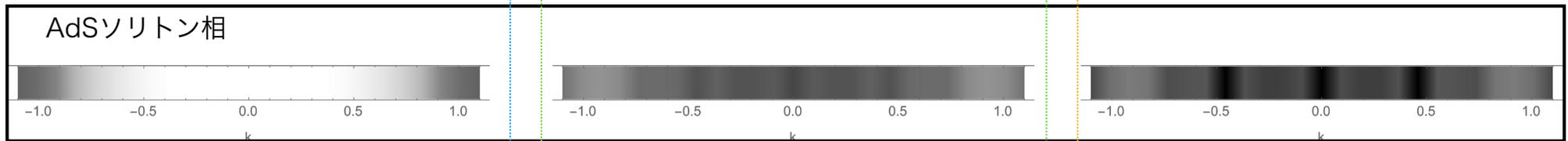
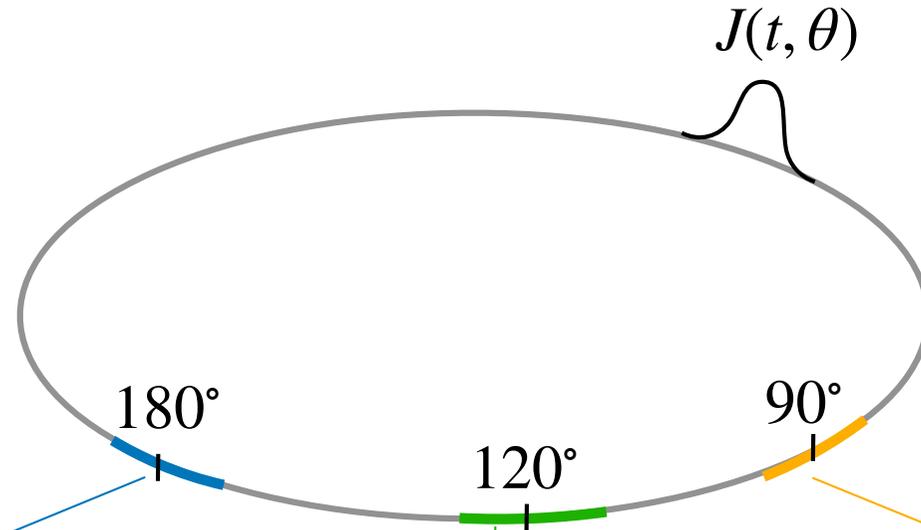
時空創発物質なら...



ソースがあたかも創発時空上を伝播

イメージングはこの特徴を拾う

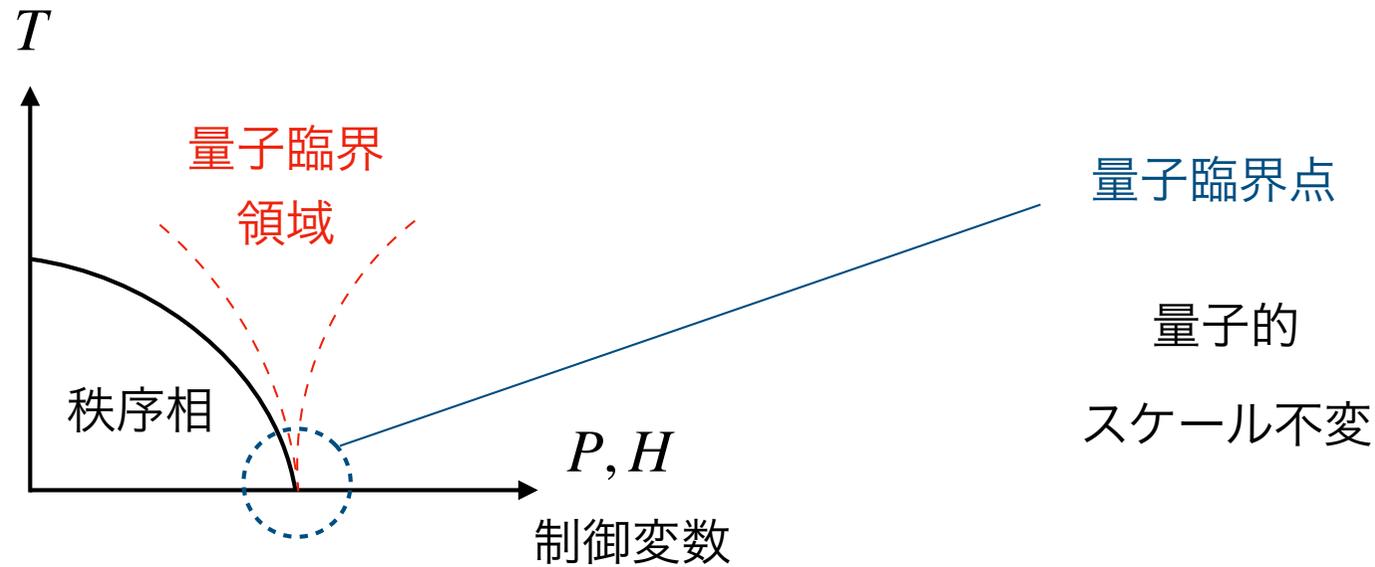
低温相で対蹠点が光ると時空創発



時空創発物質を探すなら光学イメージング

1. 時空創発リングのモデル = 3Dの重力
2. 光学イメージングに時空創発のシグナル
3. 時空創発リングの探索実験はできそう

実験：TlCuCl₃のマグノン



TlCuCl₃のマグノンを電磁場で励起

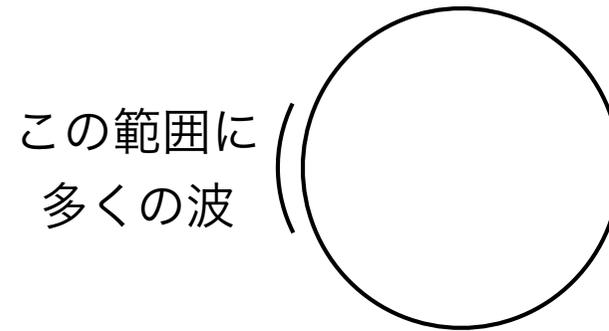
絶縁体

量子臨界点付近まで到達可

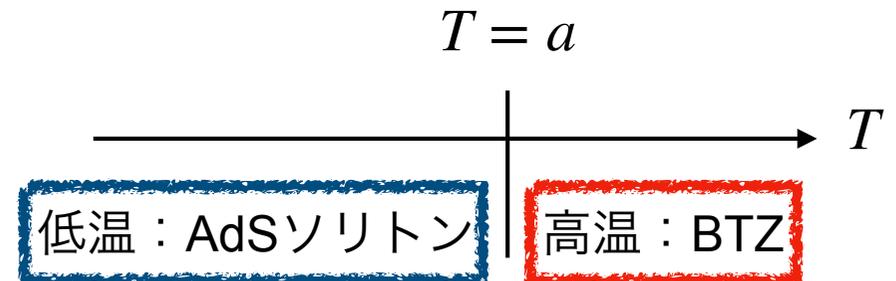
マグノンはリングから漏れない

実験パラメータ、到達可能

解像度の条件： $\omega \gg \frac{2\pi v}{a}$



AdSソリトン相に到達： $\frac{v\hbar}{a} > k_B T$



連続近似が良い： $a \gg 1 \text{ nm}$

$T_c \sim 0.1 \text{ K}, \quad a \sim 10 \text{ nm}$

時空創発物質を探すなら光学イメージング

1. 時空創発リングのモデル = 3Dの重力
2. 光学イメージングに時空創発のシグナル
3. 時空創発リングの探索実験はできそう