

Entanglement Entropy of Two Black Holes and Entanglement Entropic Force

大阪大学理学研究科物理学専攻 芝 暢郎

E-mail: shiba@het.phys.sci.osaka-u.ac.jp

場の理論におけるエンタングルメントエントロピー (EE) は元々ブラックホール (BH) のエントロピーを説明するために研究された。EE は一般に部分系 A に対して A の密度行列 ρ_A の von Neumann エントロピー $S_A = -\text{Tr}\rho_A \ln \rho_A$ として定義される。 $(d+1)$ 次元の場の理論においては、ある時刻 $t = t_0$ における空間的 d 次元領域 A 内の場を部分系とする。BH の外側の観測者は BH 内部の情報を得られないので、外側の観測者にとっては BH の外側の領域の EE を考えるのが自然である。実際、場の理論の真空においては多くの場合、領域 A の EE はその境界 ∂A の面積に比例し、これは BH のエントロピーと類似している [1,2]。

本研究 [3] ではホライズンの半径がそれぞれ R_1, R_2 の 2 つの BH (A と B) の外側の領域 C の massless free スカラー場の $EE(S_C)$ を調べ、特に BH 間の距離 $r (\gg R_1, R_2)$ への依存性を調べる。もし、「 S_C を熱力学的エントロピーとみなせる」と仮定するならば、 S_C の r への依存性からスカラー場が 2 つの BH に及ぼす entropic force を知ることができる。本研究ではこの仮定のもとで、この entropic force の性質を調べる。ここで場の状態としては「真空状態」を考える。但し「真空状態」は時間座標の選び方に依存するので、これを指定しなければならない。ここでは BH の内部も含む全時空を覆いホライズン上で特異性のない座標系を選ぶ。

本研究では、BH があるときの計算の準備として、まず BH がない $(d+1)$ 次元 Minkowski 時空 ($d \geq 2$) における S_C を考える。このときスカラー場は全時空において真空状態で、2 つの BH を 2 つの仮想的な球に置き換え仮想的な球の内部の自由度について部分トレースする。EE の計算法としては Bombelli 達の方法 [1] を発展させて用いる。そして S_C の $1/r$ についての主要項を求めた。場の理論の EE の計算は一般に困難で、2 つの離れた有限領域の外側の EE は $d \geq 2$ では自由場に対しても今まで求められておらず、今回 Bombelli 達の方法 [1] を発展させることにより初めて得られた結果である。BH の場合は Minkowski 時空における計算にいくつか修正を加えることで S_C の r 依存性を推定でき、結果は Minkowski 時空の場合と同じ形になる。最後に、こうして推定した BH の場合の S_C の r 依存性から予想される entropic force の効果について議論した。そして、この entropic force の効果を観測により検証する方法を述べる。「 S_C を熱力学的エントロピーとみなせる」という仮定が正しいかどうか、この観測方法により検証できる。

本講演では特に Minkowski 時空における EE の計算と、entropic force の物理的効果についての議論に焦点を当てた。

[1] L. Bombelli, R. K. Koul, J. Lee, and R. D. Sorkin, Phys. Rev. D34, 373 (1986)

[2] M. Srednicki, Phys. Rev. Lett. 71, 666 (1993), arXiv:hep-th/9303048

[3] N. Shiba, Phys. Rev. D 83, 065002 (2011), arXiv:1011.3760v3 [hep-th]