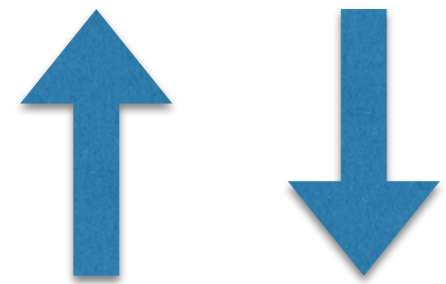


# 量子スピンとエンタングルメント

担当： 押川正毅、Han YAN (物性研究所)

[oshikawa@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:oshikawa@issp.u-tokyo.ac.jp)



量子スピン 例) スピン1/2

角運動量のz成分  $S^z = \pm \frac{\hbar}{2}$

一般的の量子状態： **重ね合わせ**  $|\psi\rangle = c_{\uparrow}|\uparrow\rangle + c_{\downarrow}|\downarrow\rangle$

2つのスピン1/2の量子状態：  $|\psi\rangle = c_{\uparrow\uparrow}|\uparrow\uparrow\rangle + c_{\uparrow\downarrow}|\uparrow\downarrow\rangle + c_{\downarrow\uparrow}|\downarrow\uparrow\rangle + c_{\downarrow\downarrow}|\downarrow\downarrow\rangle$

$|t_+\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle = |\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$  は積状態 (エンタングルメントなし)

反強磁性 (スピンの逆向きが安定になる) 相互作用下での基底状態

$$|s\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \neq |\alpha\rangle_1 |\beta\rangle_2$$

積状態でない

⇒エンタングルメント

(量子もつれ) あり

Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 相関

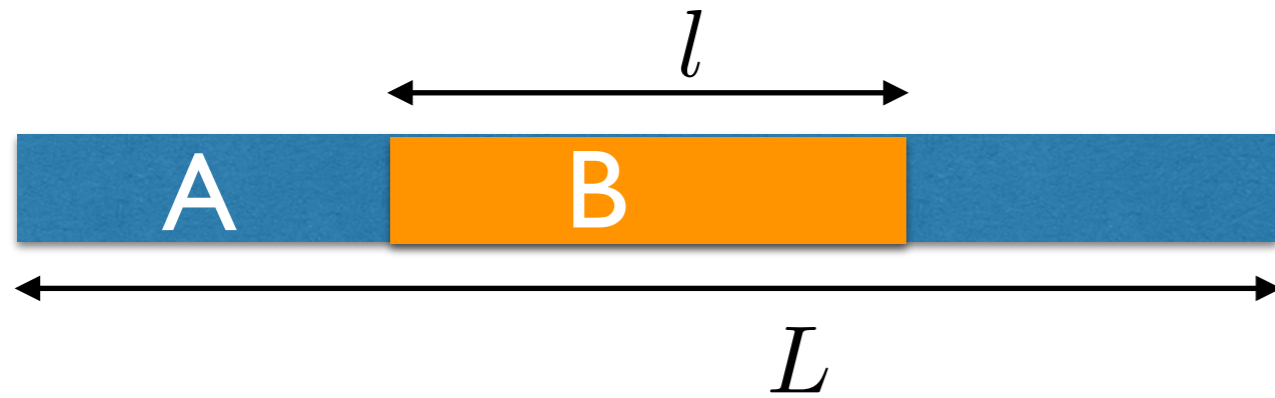
# エンタングルメント・エントロピー：エンタングルメントの定量化

「何個の量子ビットが完全にエンタングルしているのに相当する？」

スピン1/2 Heisenberg反強磁性鎖

$$\mathcal{H} = \sum_j \vec{S}_j \cdot \vec{S}_{j+1}$$

の基底状態のA, B部分間のエンタングルメント・エントロピー



自分でプログラムを動かして  
「体験」してもらいます

- 直接数値計算
- 共形場理論 (Conformal Field Theory)

Holzhey-Larsen-Wilczek 1994  
Calabrese-Cardy 2004

$$S \sim \frac{c}{3} \log \left( \frac{L}{\pi} \sin \frac{\pi l}{L} \right) + \text{const.}$$

