



Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe カプリ数物連携宇宙研究機構

World Premier International Research Center Initiative wpi 世界トップレベル研究拠点プログラム

The University of Tokyo Institutes for Advanced Study 東京大学国際高等研究所



## エンタングルメント・エントロピー

## 高柳 匡 京都大学基礎物理学研究所教授、Kavli IPMU客員上級科学研究員

ミクロな物理法則を記述する量子力学では粒子を波と解釈するので物理的状態の重ね合わ せを考えることができます。例えば2つの電子のスピンからなる系を考えます。まず、片 方(A)のスピンが上向きで、もう片方(B)が下向きである状態を考えることができます(下 図の|Ψ₁⟩)。このように直積で書かれている状態は、古典的状態です。一方、その状態とス ピンが逆の状態を均等に重ね合わせた状態(下図の $|\Psi_2\rangle$ )は量子的状態(EPRペアと呼ぶ) で、このように直積で書けない状態ではAのスピンとBのスピンに相関があり、量子エンタ ングルメントを有すと言います。全体の状態は一意に決まっていますが、一部を抜き出す と実現される状態に不確定性があります。量子エンタングルメントの強さを測る量がエン タングルメント・エントロピー S。で、下のようにAに制限された密度行列に対するフォン・ ノイマン・エントロピーと定義されます。 AB間から何個分のEPRペアが取り出せるか見積 もる量です。

$$S_{A} = -T_{r} \left[ P_{A} \log P_{A} \right]$$
(i)  $|\Psi_{r}\rangle = |\uparrow\rangle_{A} |\downarrow\rangle_{B} \sim \left[ \hat{\Phi} \hat{\Phi} \right]$ 

$$S_{A} = 0$$
(ii)  $|\Psi_{z}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_{A} |\downarrow\rangle_{B} + |\downarrow\rangle_{A} |\uparrow\rangle_{A})$ 

$$S_{A} = 0$$

$$S_{A} = 0$$
(ii)  $|\Psi_{z}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_{A} |\downarrow\rangle_{B} + |\downarrow\rangle_{A} |\uparrow\rangle_{A})$ 

$$S_{A} = \log 2 \sim \left[ \hat{\Phi} \hat{\Phi} \text{ or } \hat{\Phi} \hat{\Phi} \right]$$

Kavli IPMU News No. 31 October 2015

©Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, 2015 All rights reserved

発行

Published by Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe The University of Tokyo Institutes for Advanced Study 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba pref., 277-8583, Japan phone: +81-4-7136-4940 fax: +81-4-7136-4941 東京大学国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構

千葉県柏市柏の葉5-1-5 〒277-8583

電話:04-7136-4940 ファックス:04-7136-4941

http://www.ipmu.jp/ press@ipmu.jp

Chief Editor Kenzo Nakamura Production Cooperation Matsueda Printing Inc.