

2016年1月29日（よみうり大手町ホール）

スパコン「京」が開く科学と社会 シンポジウム

「スーパーコンピュータの今とこれから」

シミュレーションで探る量子の世界： 絶対零度での秩序と臨界現象

原田 健自

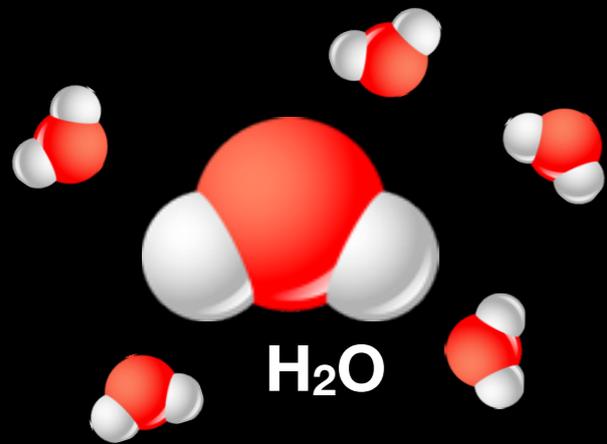
京都大学情報学研究科



More is different !



“All things are made of atoms” by R. P. Feynman



アボドガロ数 (10の23乗) 程度の水分子の集まり

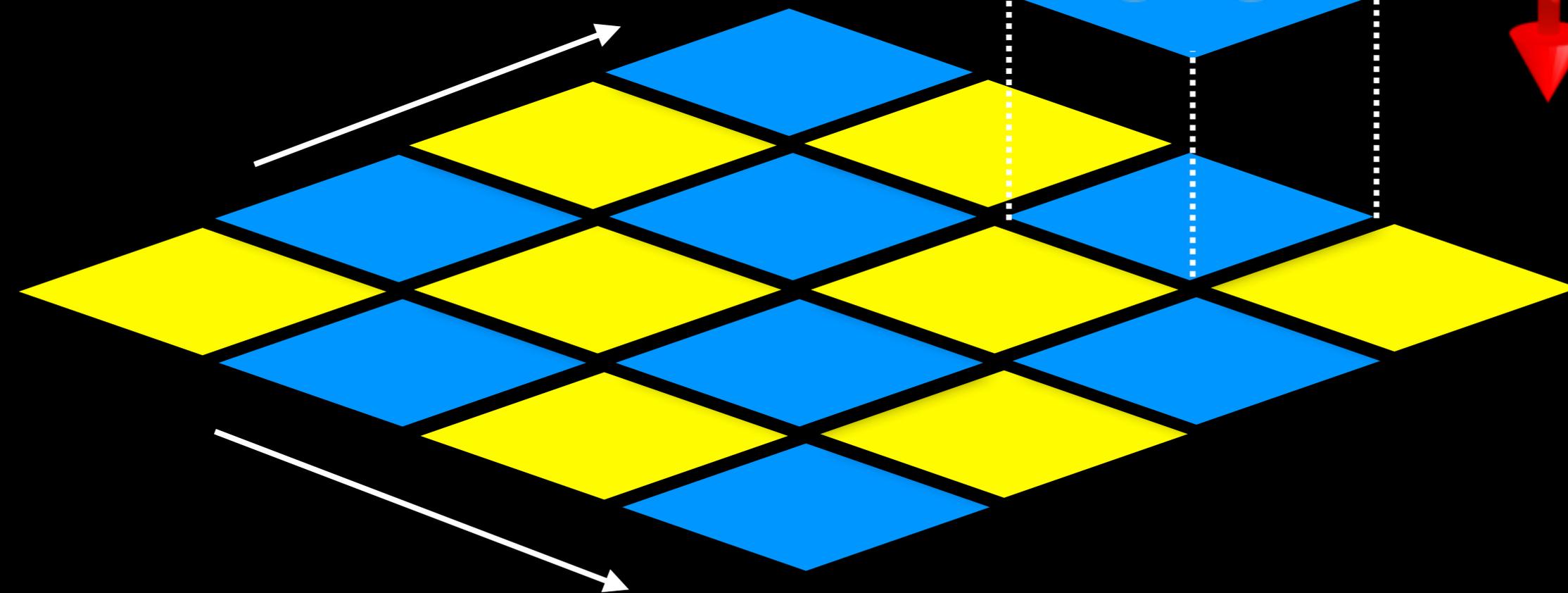
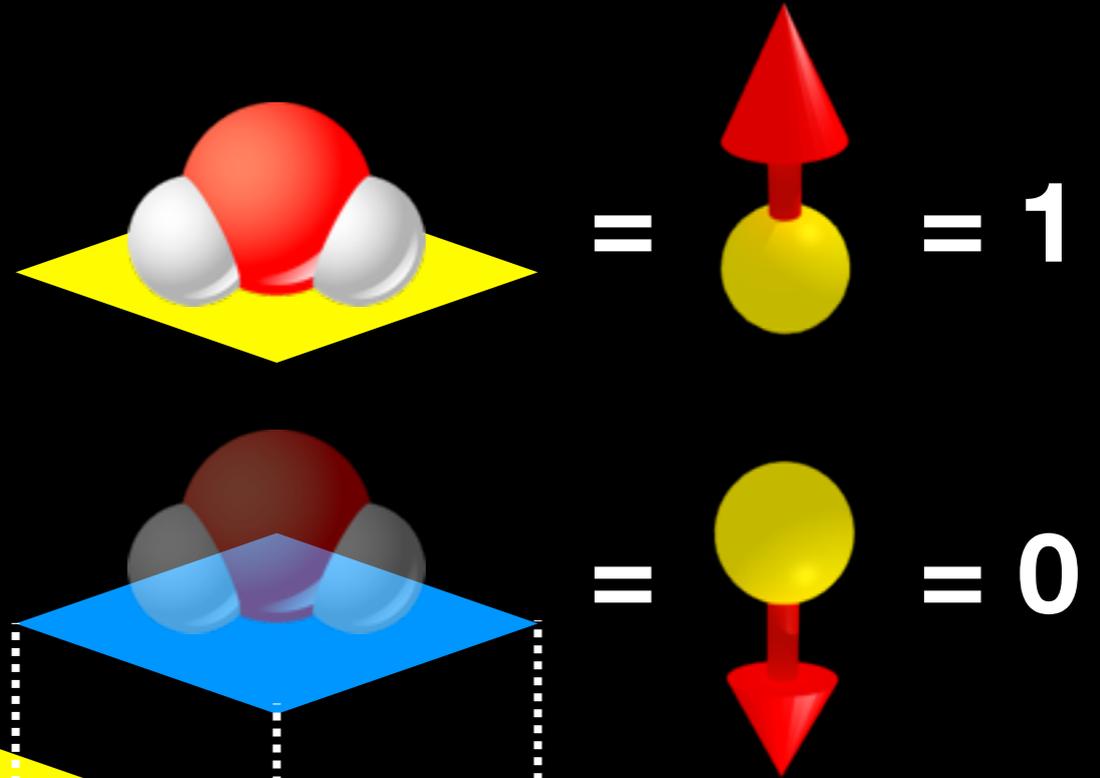
“More is different” by P. W. Anderson

多数の要素が集まると、基本的な法則からは自明でない新しい構造や性質が出現

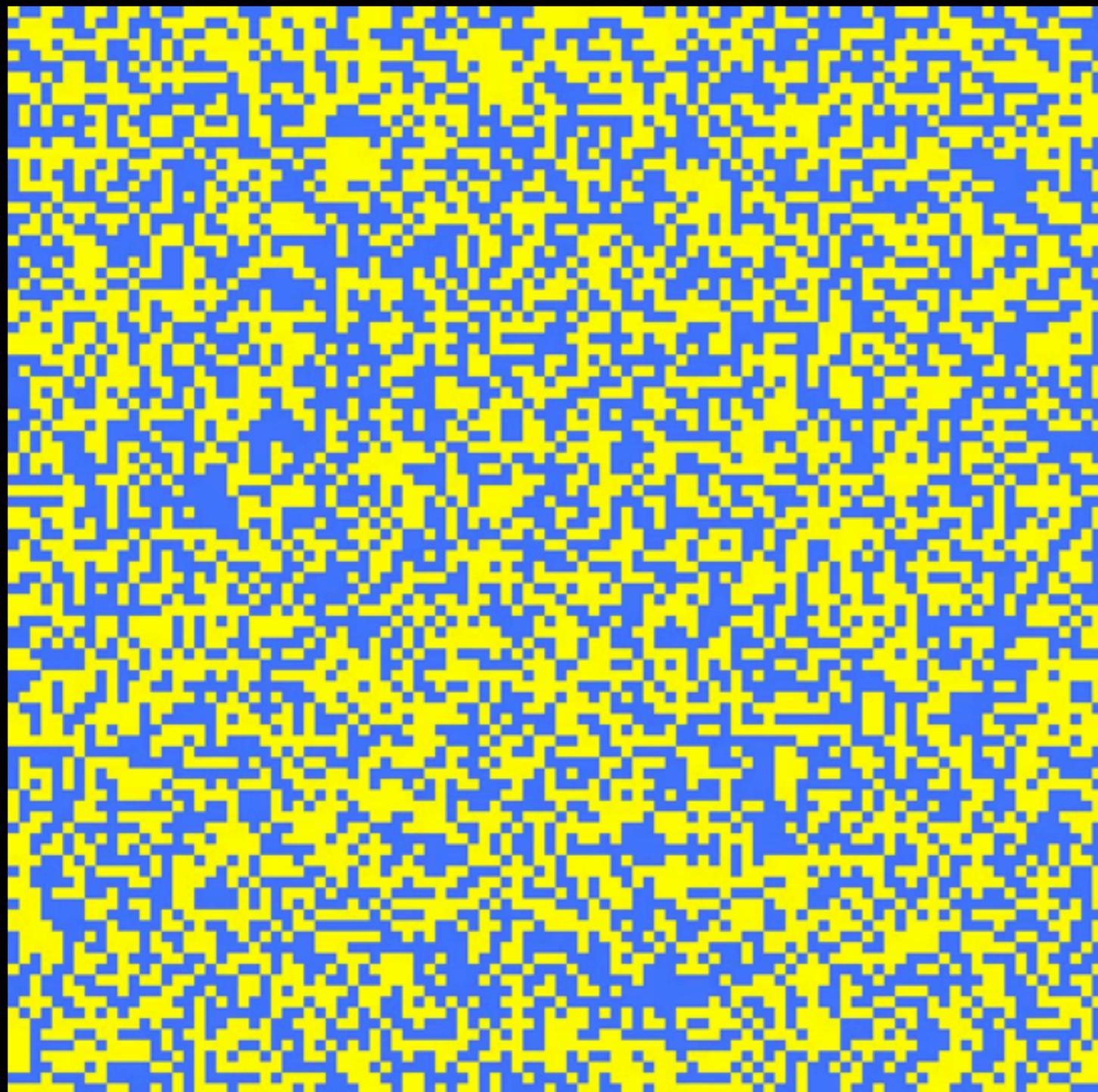
- 相互に影響し、気、液、固相等の巨視的秩序
- 環境の変化による相転移現象

新しい秩序の出現

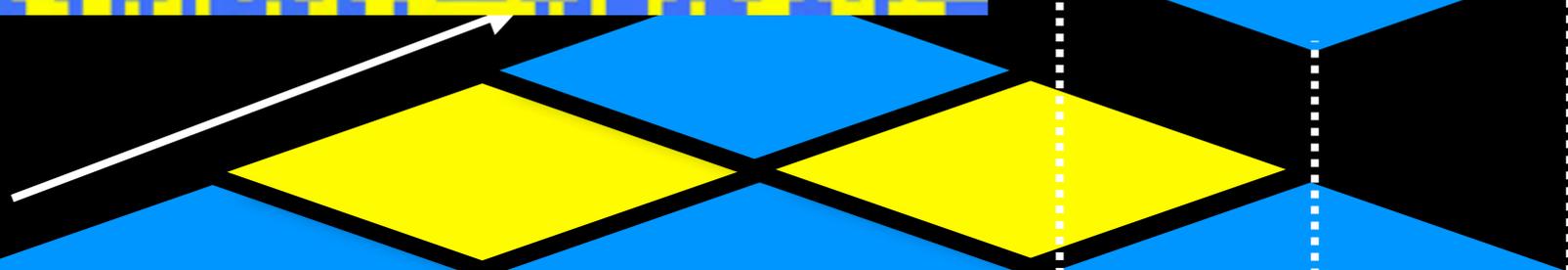
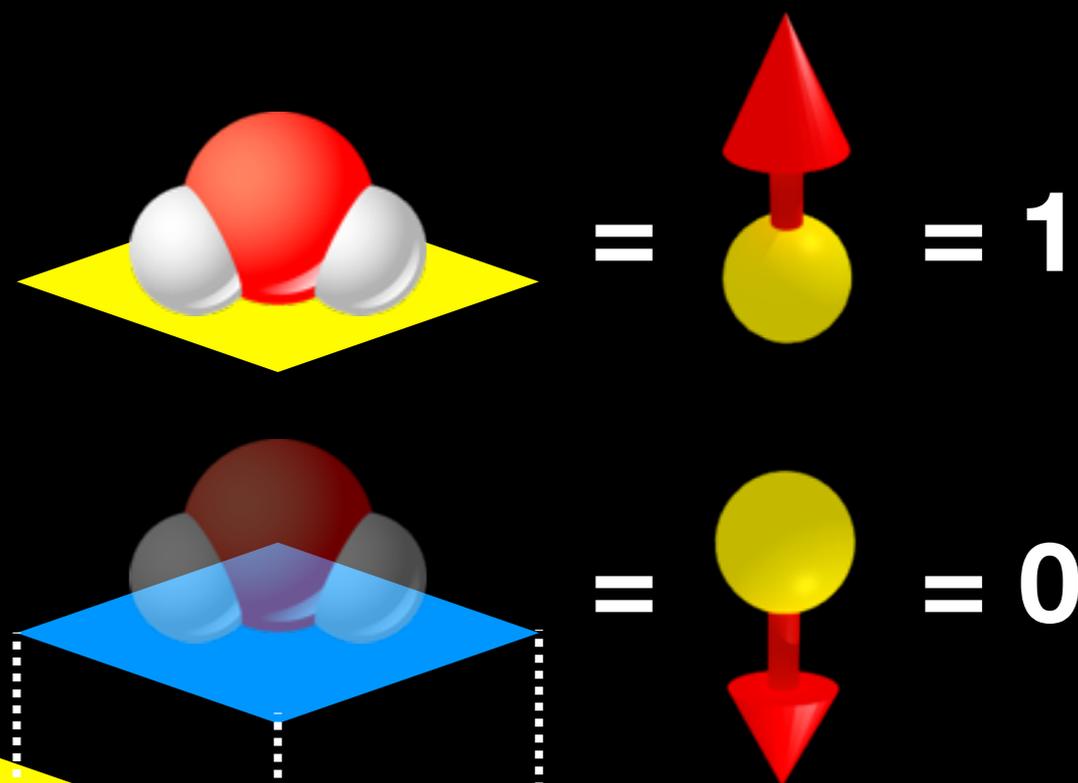
平面上のモデル



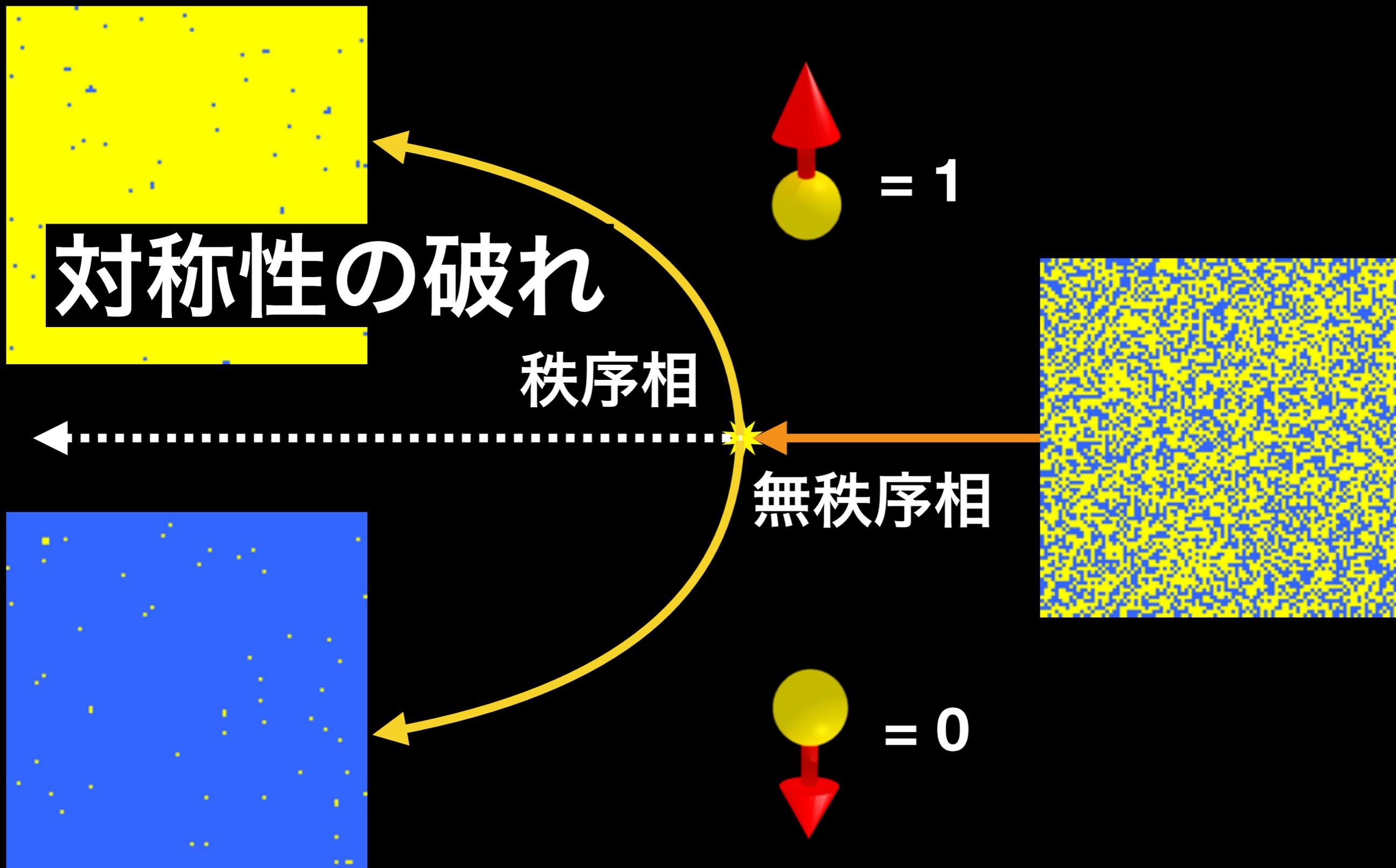
新しい秩序の出現



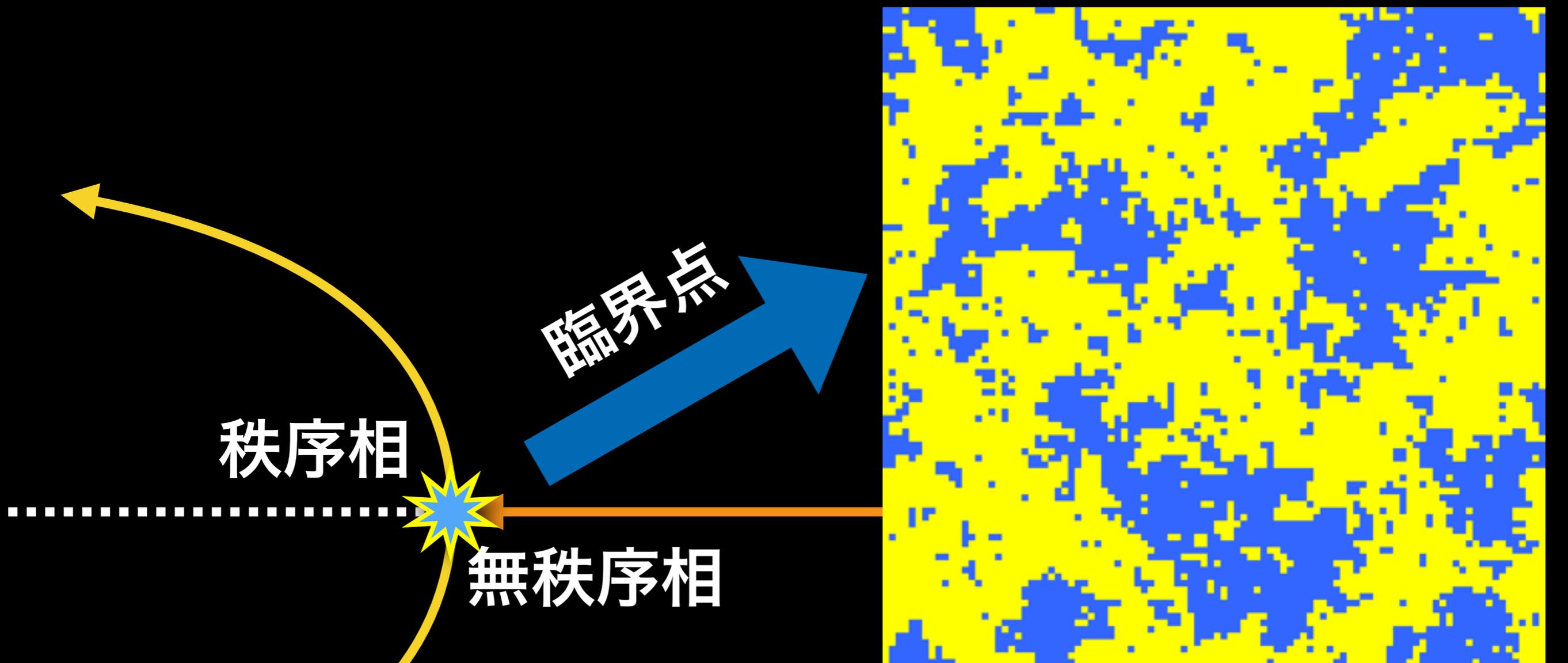
そろそろという秩序が
出現



秩序相と相転移現象



臨界点でのスケール不変性



フラクタル構造

階層を超えるスケールリング則の成立

例：クォーク $\sim 10^{-15}\text{m}$ 、電子 $\sim 10^{-10}\text{m}$

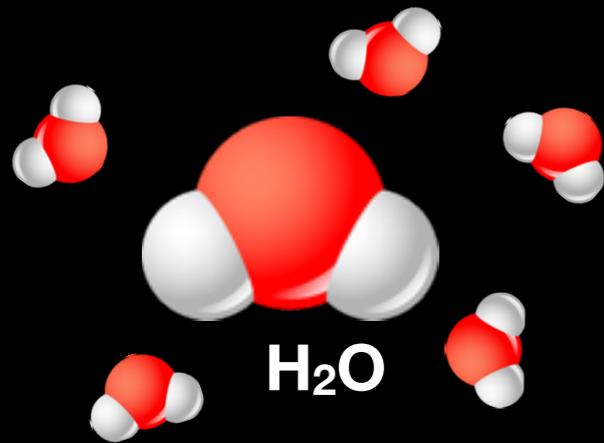
More is different!



“More is different” by P. W. Anderson

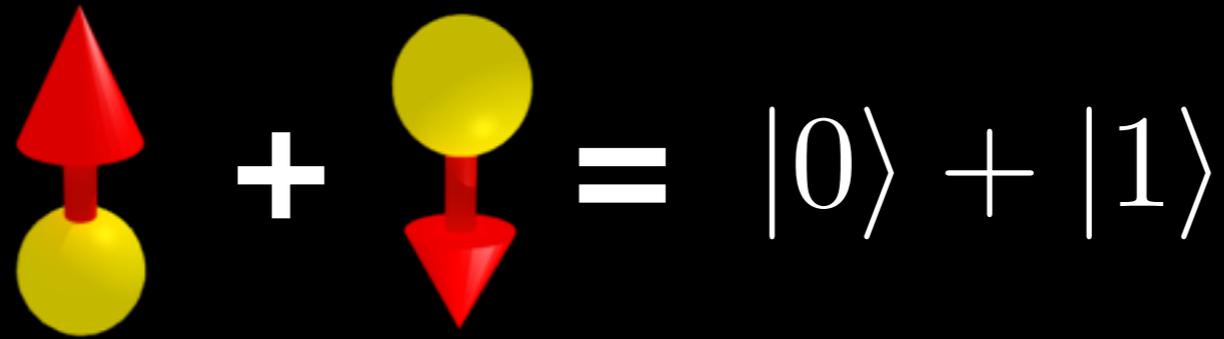
多数の要素が集まると、基本的な法則からは自明でない新しい構造や性質が出現する

- 多彩な秩序相：対称性の破れ
- 相転移現象：臨界点でのスケール不変性



アボドガロ数（10の23乗）程度の水分子の集まり

■ 重ね合わせ状態

A diagram illustrating the addition of two qubit states. On the left, a red upward-pointing cone is positioned above a yellow sphere. This is followed by a plus sign, then a yellow sphere positioned above a red downward-pointing cone. This is followed by an equals sign, and then the quantum states $|0\rangle + |1\rangle$.
$$\uparrow + \downarrow = |0\rangle + |1\rangle$$

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

■ 状態空間の大きさ

$$|\psi\rangle = c_{00\dots 0} \underbrace{|00\dots 0\rangle}_N + c_{10\dots 0}|10\dots 0\rangle + \dots + c_{1\dots 1}|11\dots 1\rangle$$

量子性

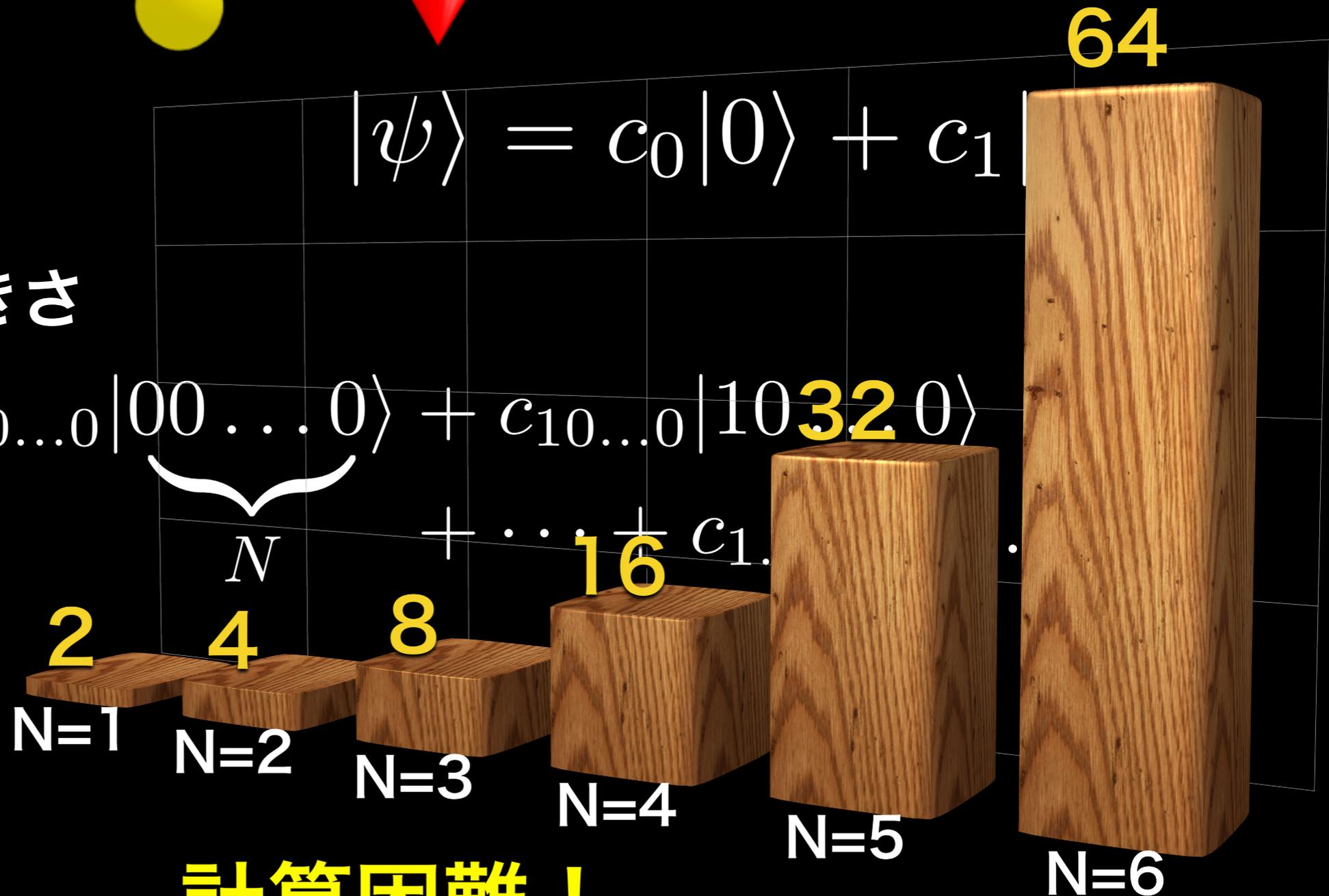


- 重ね合わせ状態

$$\begin{array}{c} \color{red}\blacktriangle \\ \color{yellow}\bullet \end{array} + \begin{array}{c} \color{yellow}\bullet \\ \color{red}\blacktriangledown \end{array} = |0\rangle + |1\rangle$$

- 状態空間の大きさ

$$|\psi\rangle = c_{00\dots 0} |00\dots 0\rangle + c_{10\dots 0} |10\dots 0\rangle + \dots + c_{1\dots 1} |1\dots 1\rangle$$



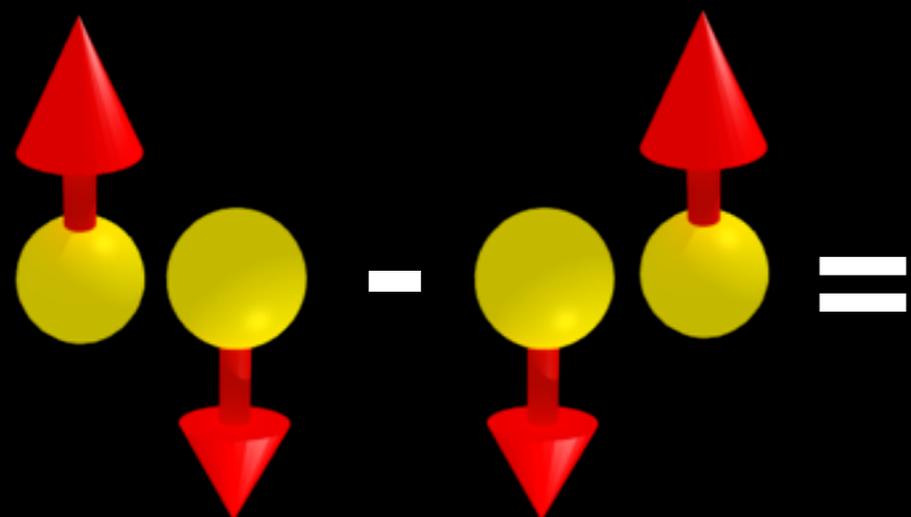
計算困難！

量子系を古典系のアンサンブルへ



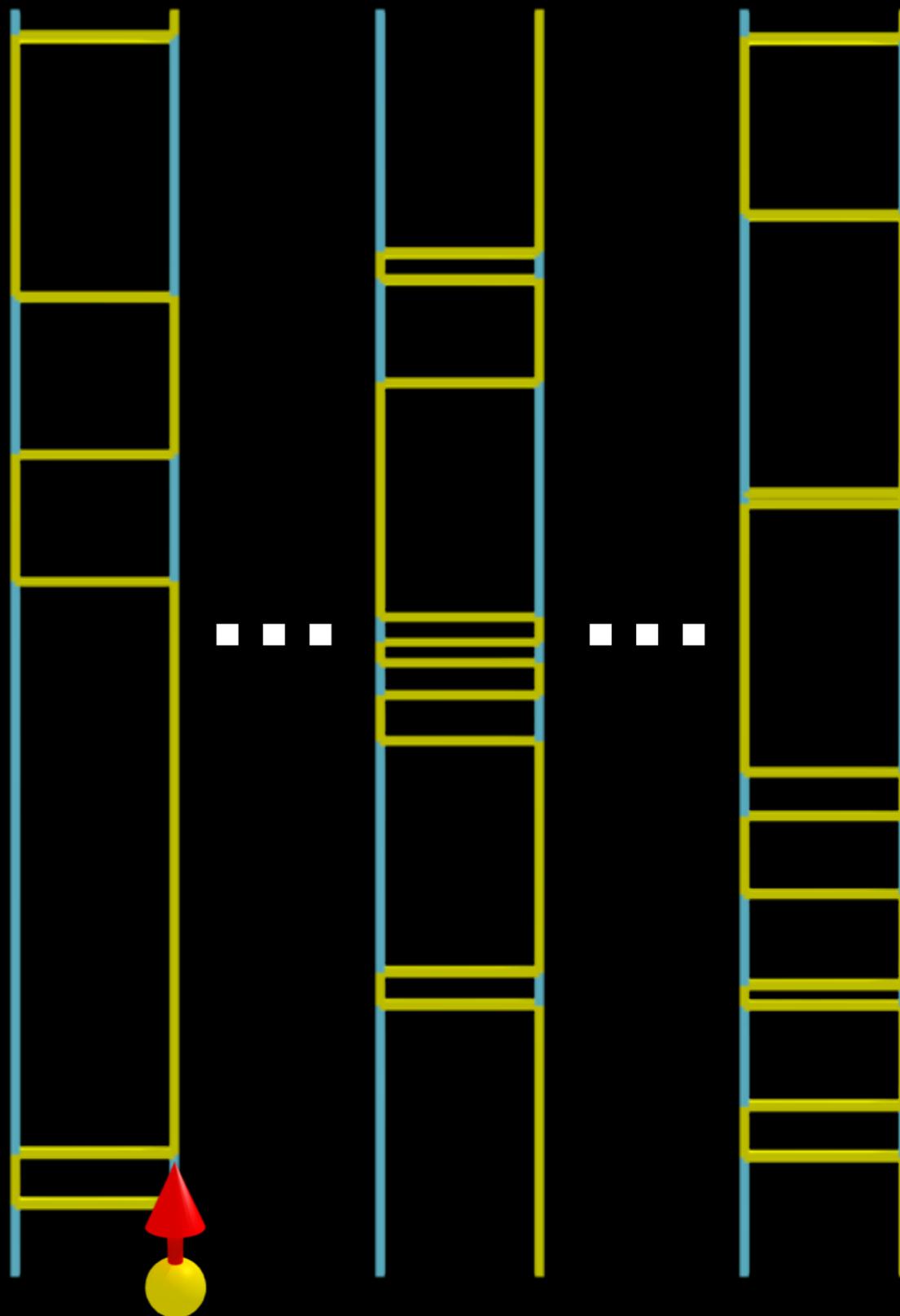
■ 虚数時間の導入

d次元系 \rightarrow (d+1)次元



$$it = \frac{1}{k_B T}$$

虚数時間



量子系を古典系のアンサンブルへ



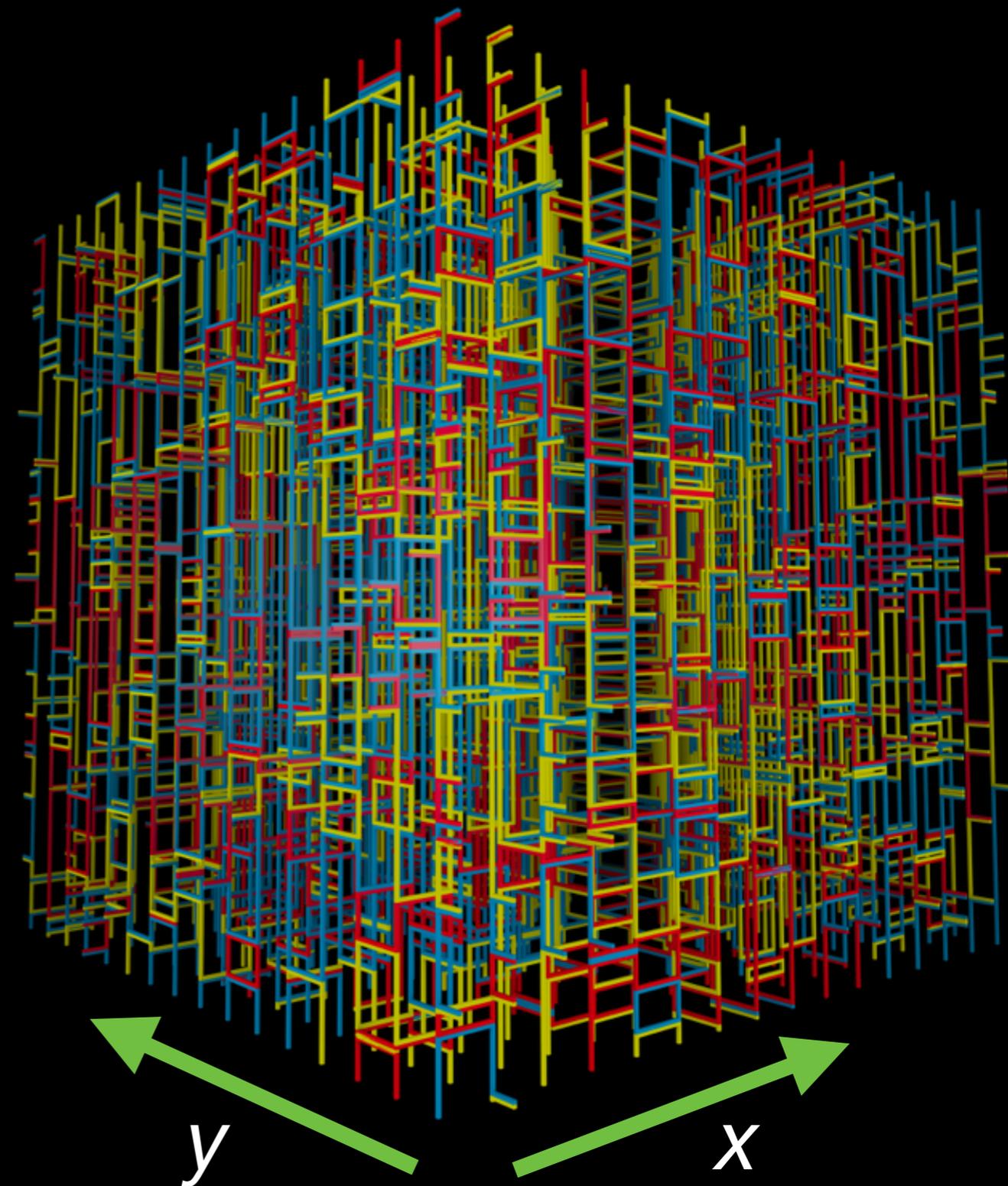
■ 虚数時間の導入

d次元系 \rightarrow (d+1)次元

■ 量子モンテカルロ法

サンプリング平均

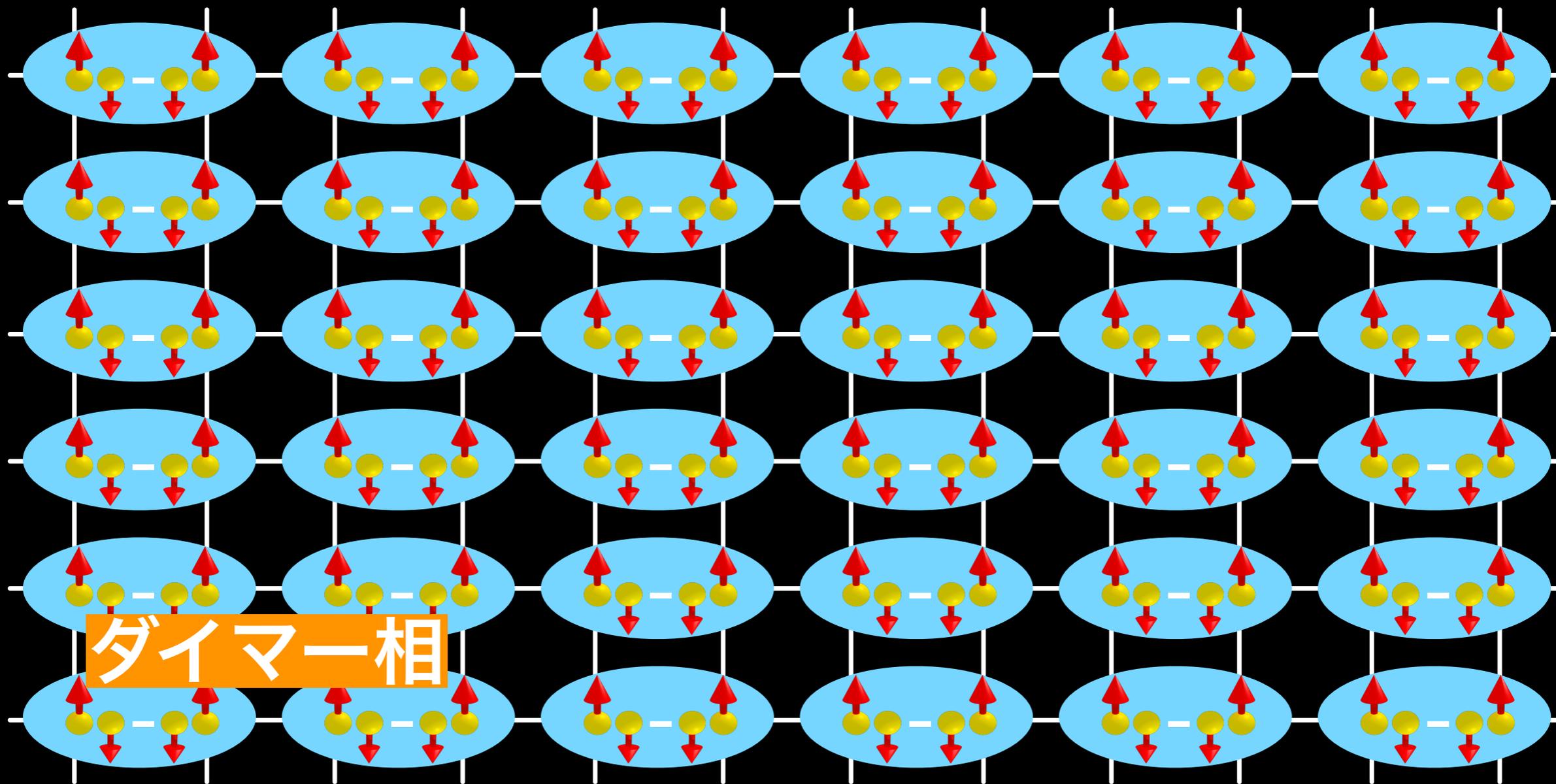
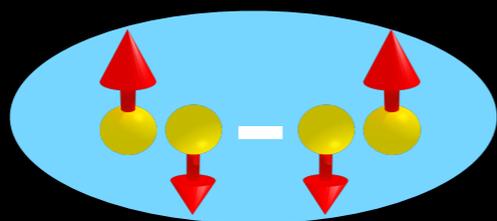
虚数時間



絶対零度における励起



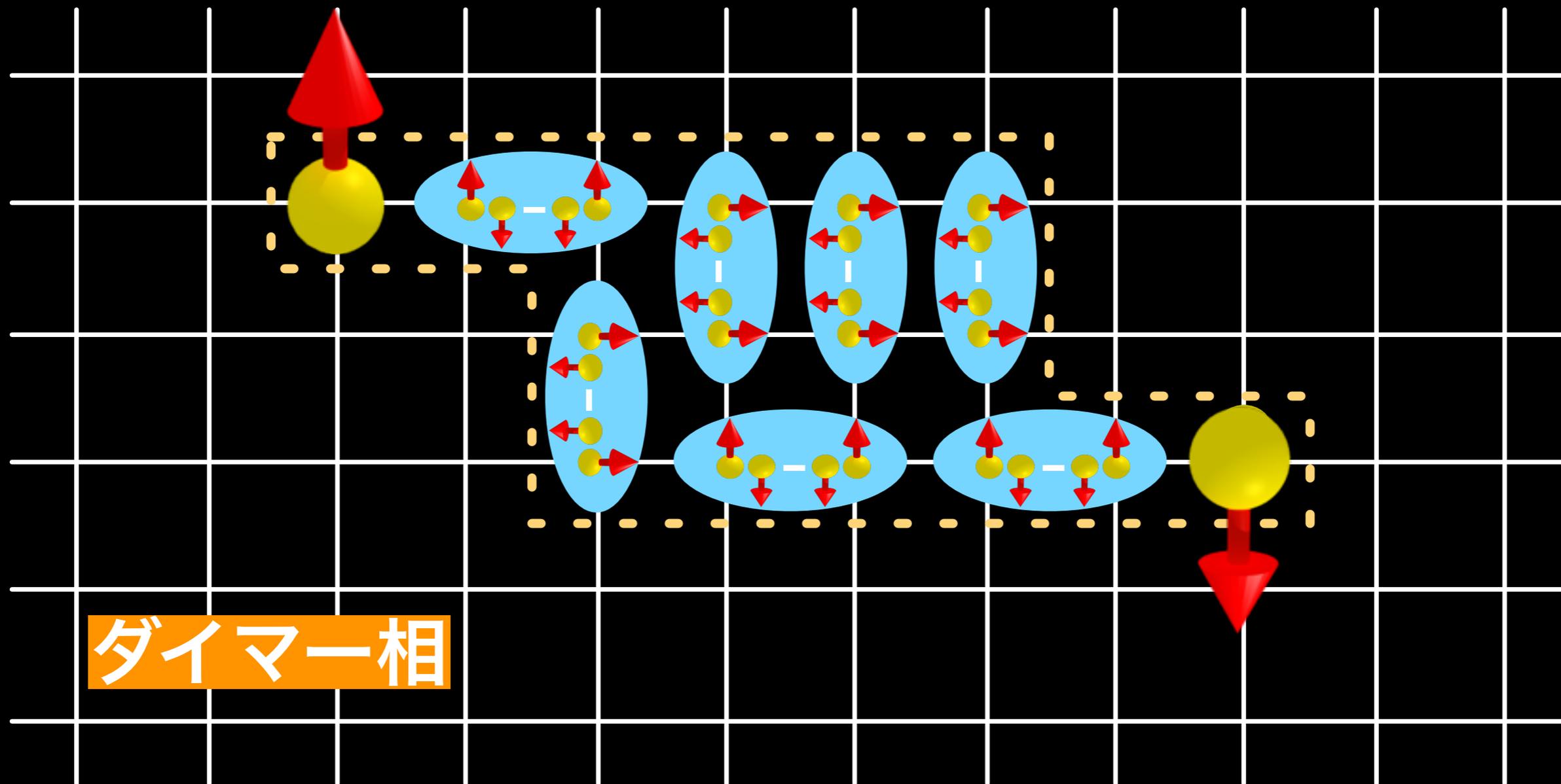
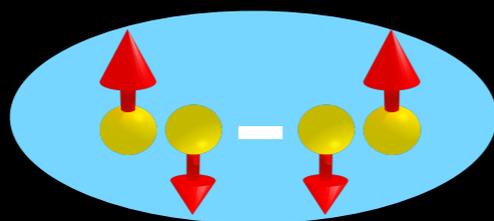
■ スピノン対



絶対零度における励起



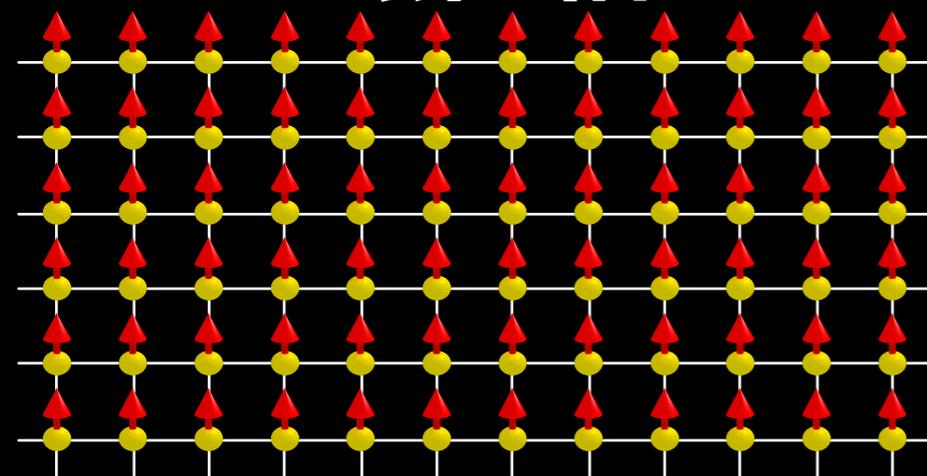
■ スピノン対



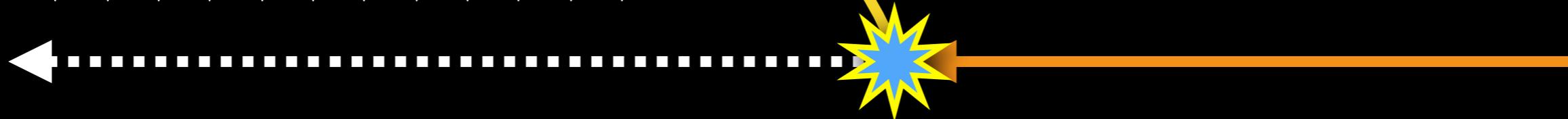
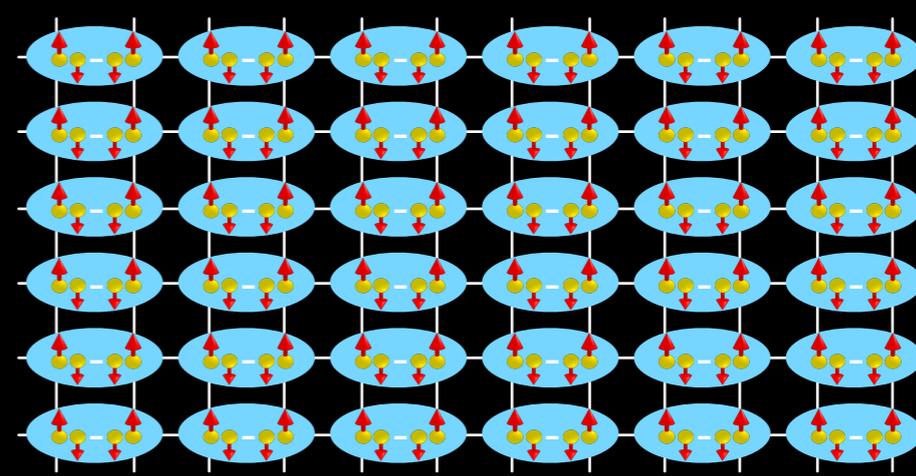
普通は対になっていて閉じ込められている

脱閉じ込め量子臨界現象

磁性相

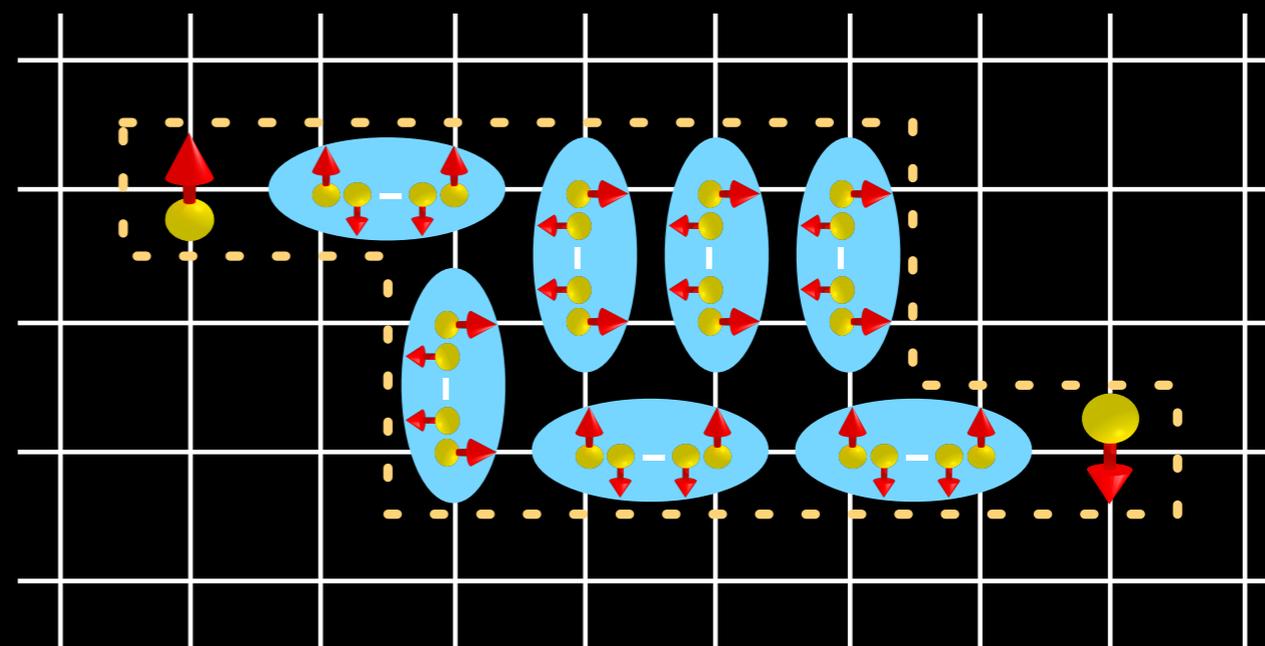


ダイマー相



■ 臨界点でのスピノンの脱閉じ込め

Senthil, *et al.*, Science 2004



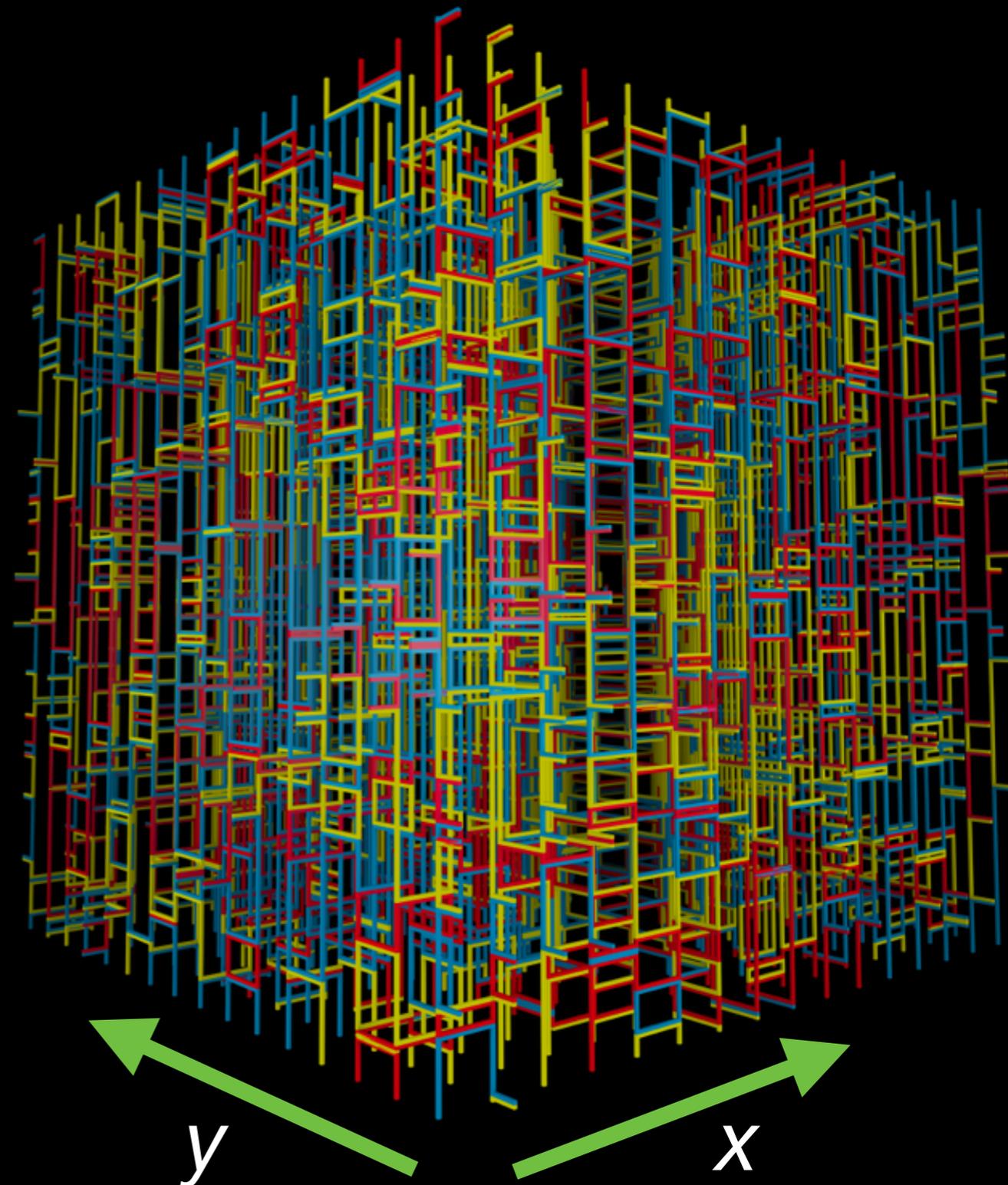
脱閉じ込め現象の再現



■ 量子MCシミュレーション

- 臨界点のスケール不変性

虚数時間



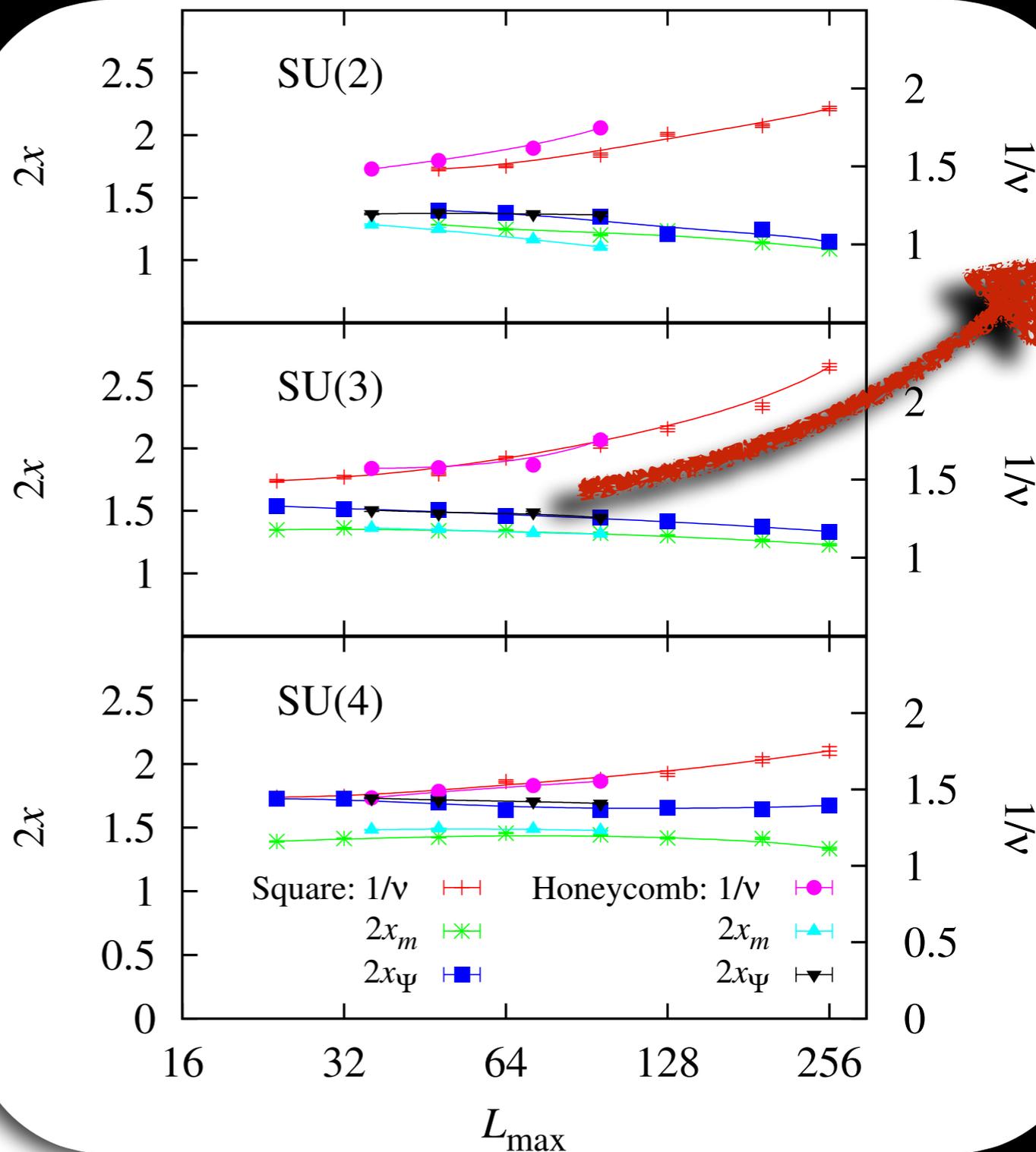
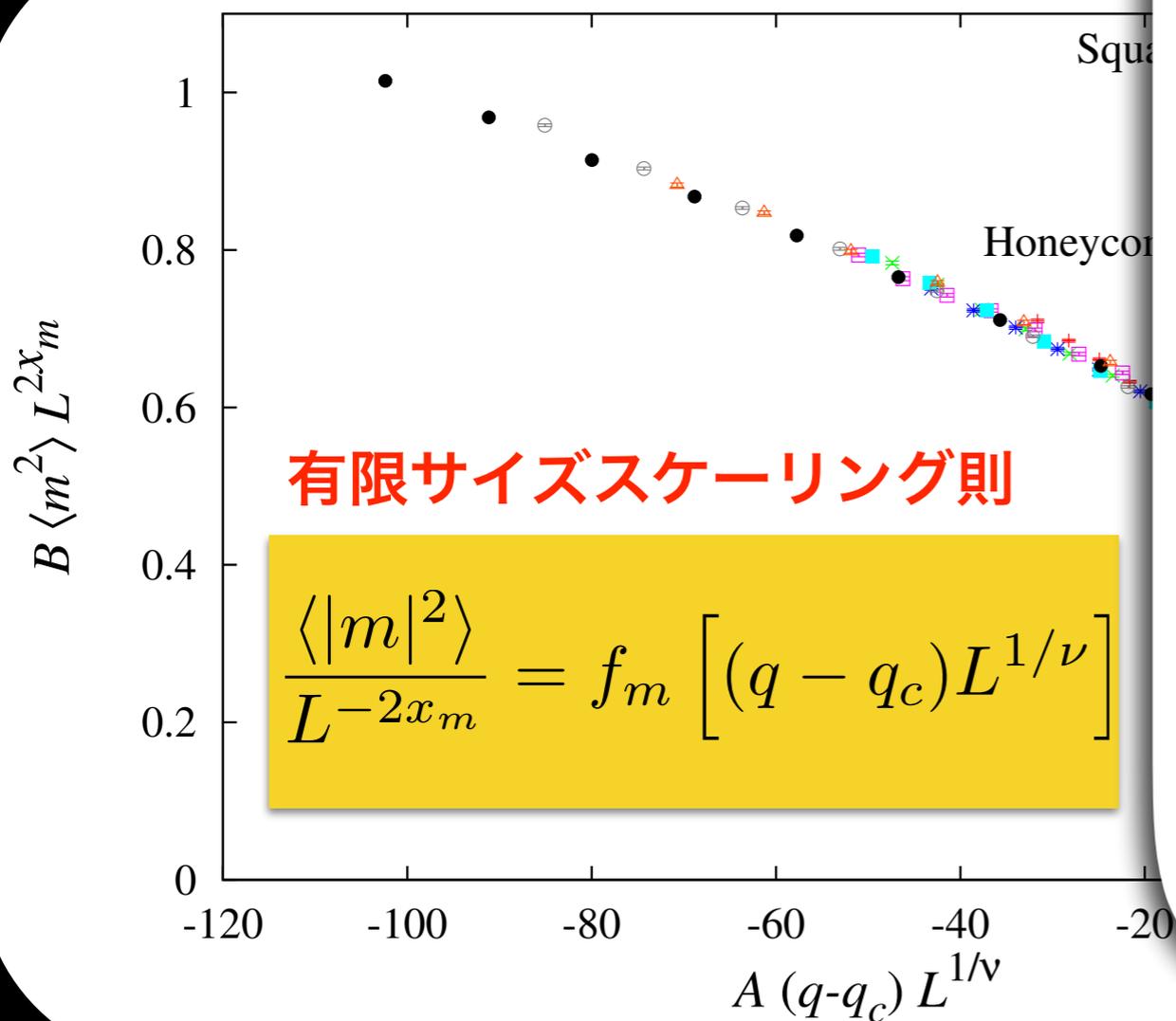
共同研究者：川島、藤堂、鈴木、大久保、渡辺、松尾

脱閉じ込め現象の再現



■ 量子MCシミュレーション

● 臨界点のスケール不変性



まとめと今後



■ ”More is different” by P. W. Anderson

● 量子系の物性

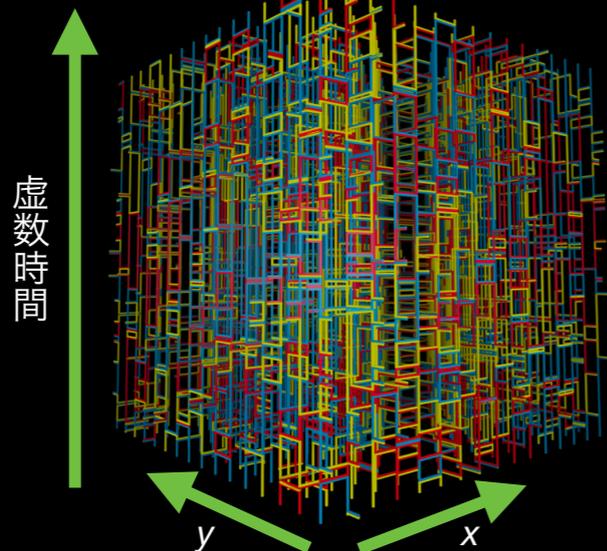
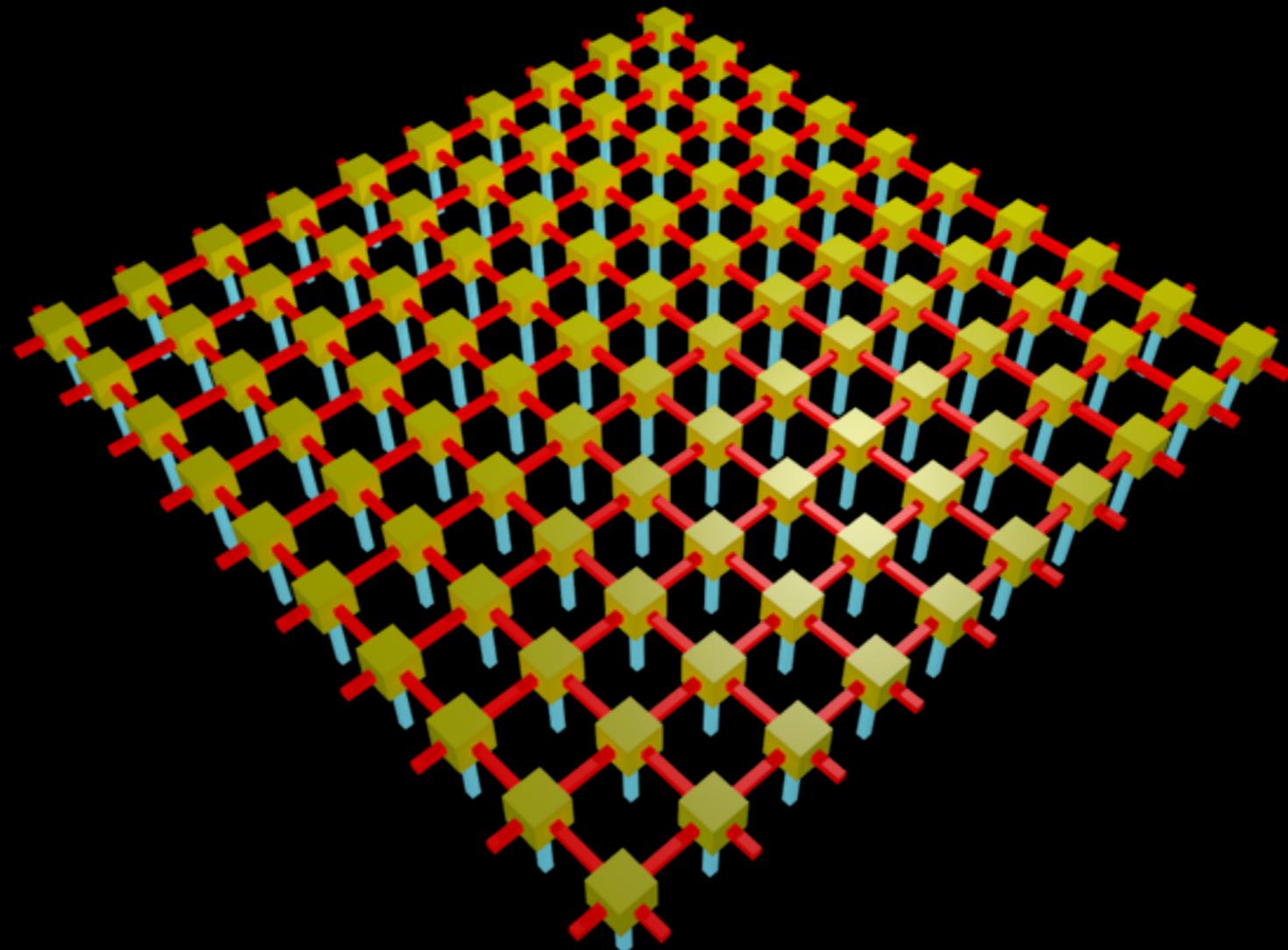
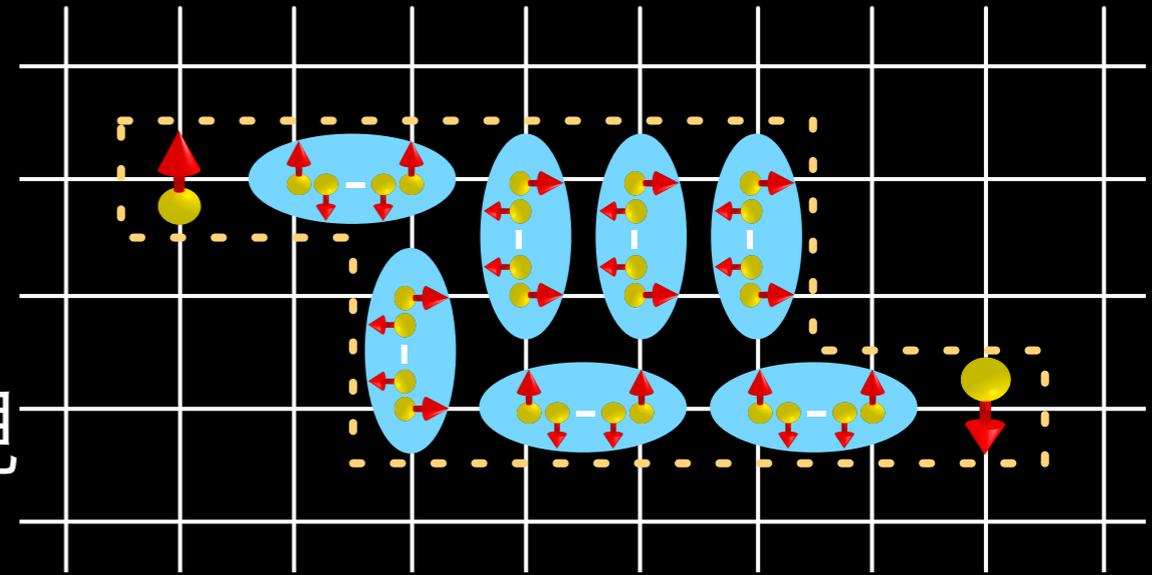
● 脱閉じ込め臨界現象の再現

■ 量子シミュレーター

● 量子モンテカルロ法

● 負符号問題

● テンソルネットワーク



共同研究者：川島、藤堂、森田、大久保、鈴木、...