

秩序創発への ミクロからの挑戦

京都大学理学研究科物理学宇宙物理学専攻
佐々真一

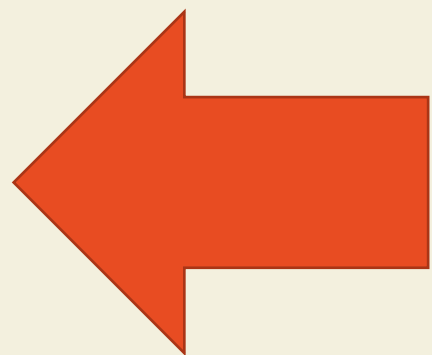
市民講座 「物理と宇宙」 第3回

2015年12月6日

京都大学百周年時計台記念館

階層

超弦	原子核	原子	人	地球	銀河	宇宙
10^{-35}m	10^{-15}m	10^{-10}m	10^0m	10^7m	10^{21}m	10^{27}m



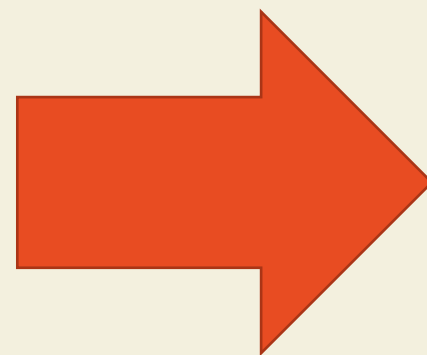
単純な法則

多様な自然現象

複雑

陳腐

(なれている)



単純な法則

2 けたの違い

パチンコ玉に四方八方から衝突される私



3桁の違い

10^3 cm



4 ケタの違い.....

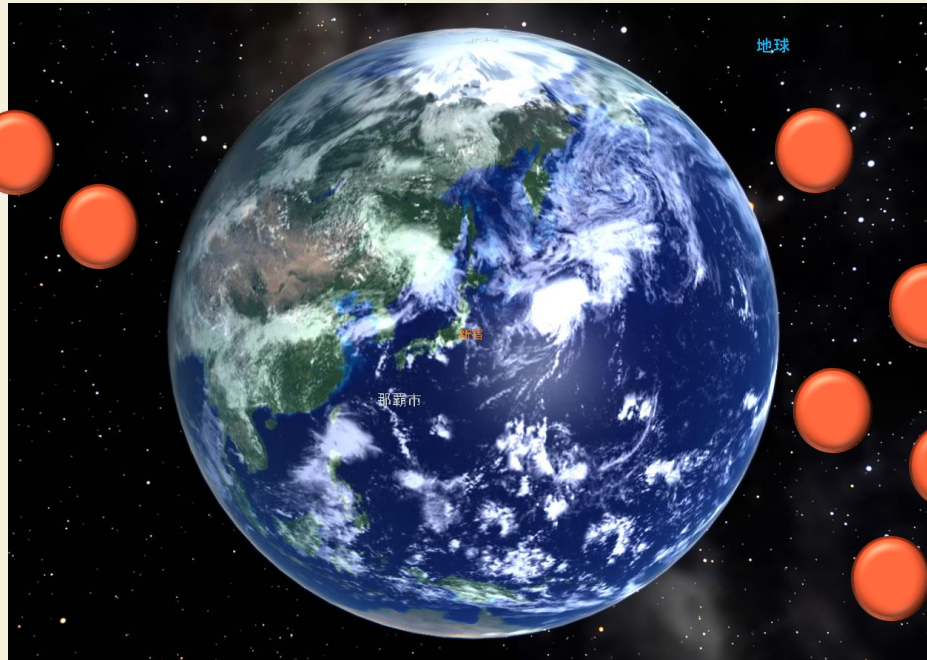
10^4 cm



9桁の違い

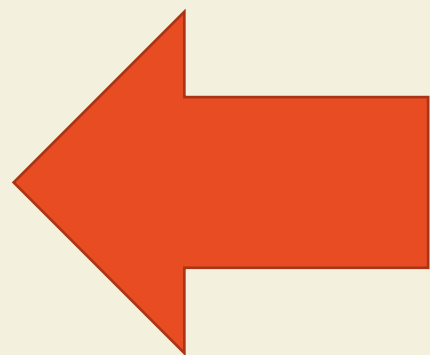
パチンコ玉に四方八方から衝突される地球

10^9 cm



階層

超弦	原子核	原子	人	地球	銀河	宇宙
10^{-35}m	10^{-15}m	10^{-10}m	10^0m	10^7m	10^{21}m	10^{27}m



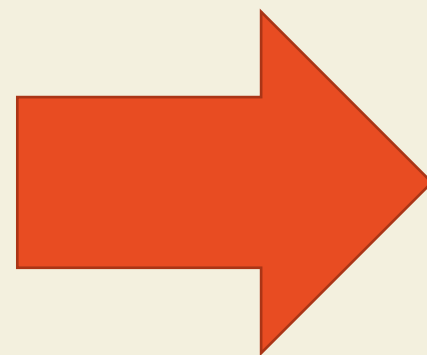
単純な法則

多様な自然現象

複雑

陳腐

(なれている)



単純な法則

気持ちわるさ

- 空気に囲まれた「我々」はすごく気持ちわるい。
- そもそも、「我々」も原子からなるのだから、強烈に気持ちわるい。

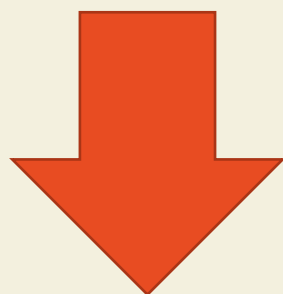
不気味さ、不思議さ

究極の目標

「我々」を物理法則の結果
として理解すること

秩序創発

例：私が話をするとき、 10^{28} 個の原子が協同して運動している



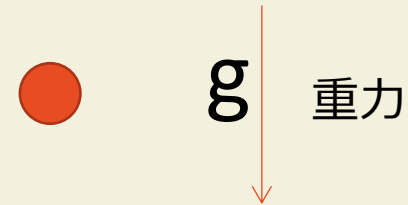
「多数の要素の協同的性質（秩序）」と
「個々の要素の性質」が異なるとき、
秩序創発 — という現象

最初に立ちはだかる壁

カオス：個々の要素の運動の典型

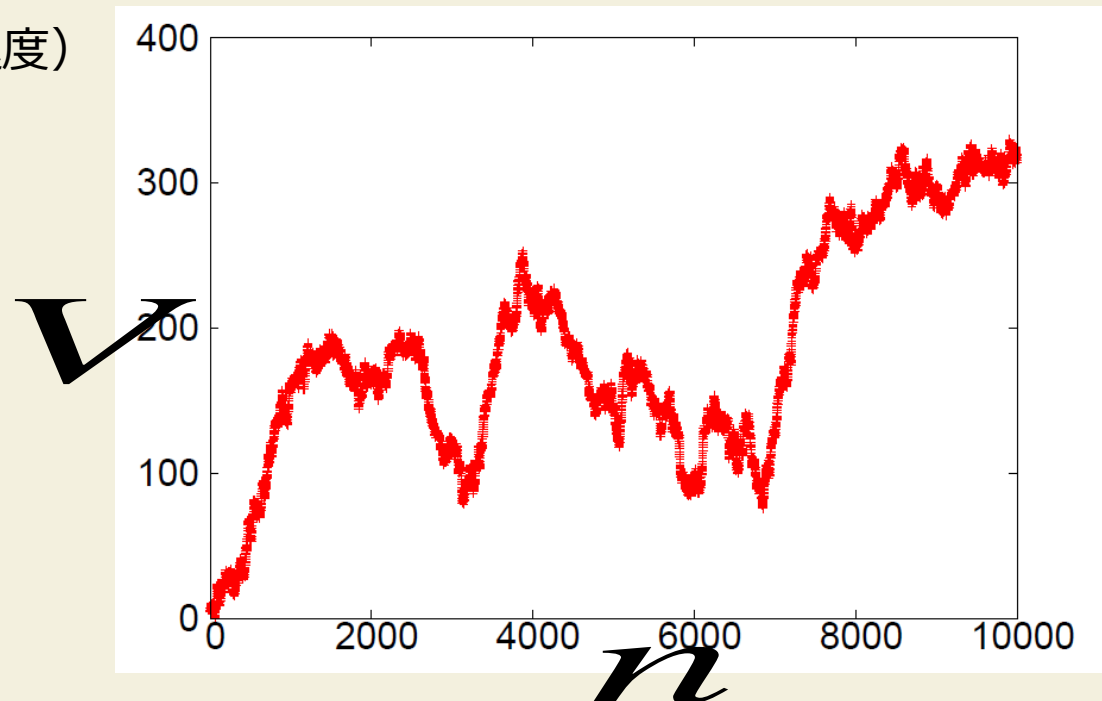
「単純な運動方程式」（運動に関する規則）の
「解」（状態の時間変化）は不規則で予測不可能

例：重力下で振動板と衝突する玉



振動する板 $A \sin \omega t$

不規則な時系列
(n 回目の衝突後の速度)



問題

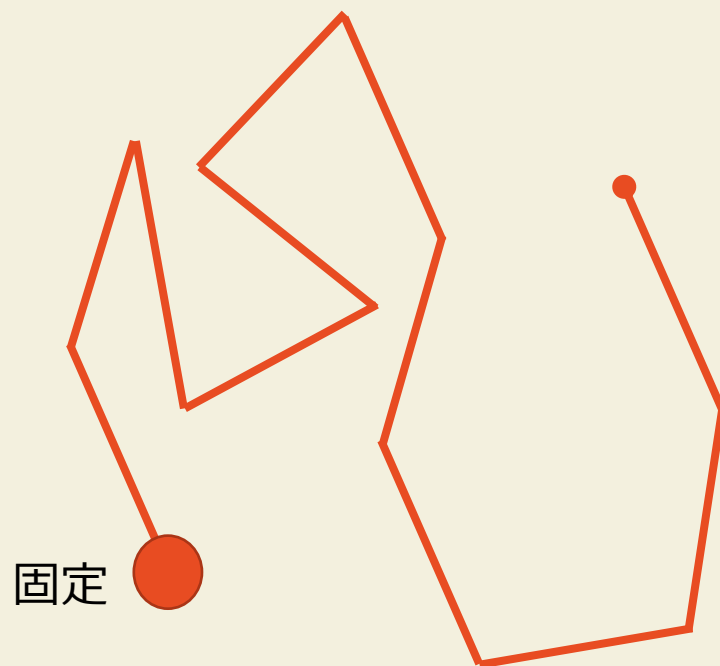
運動がカオスになるとき、多数の要素の状態は、ランダムと区別がつかなくなるのでは.....

1. 「秩序創発」は生じるのか？
2. 現在理解できている「秩序創発」の例？
3. これから理解したい「秩序創発」の例？

第1部

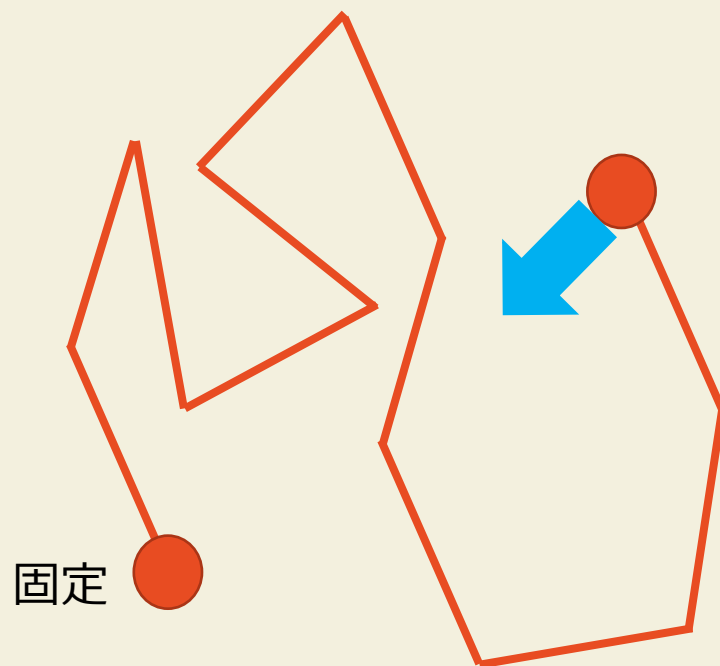
秩序創発 の 簡単な例

N重振り子（重力なし）



N個の回転できる剛体切片が連結されている
ニュートンの運動方程式に従う
不規則な運動を示す

秩序創発？(N が十分大きい)

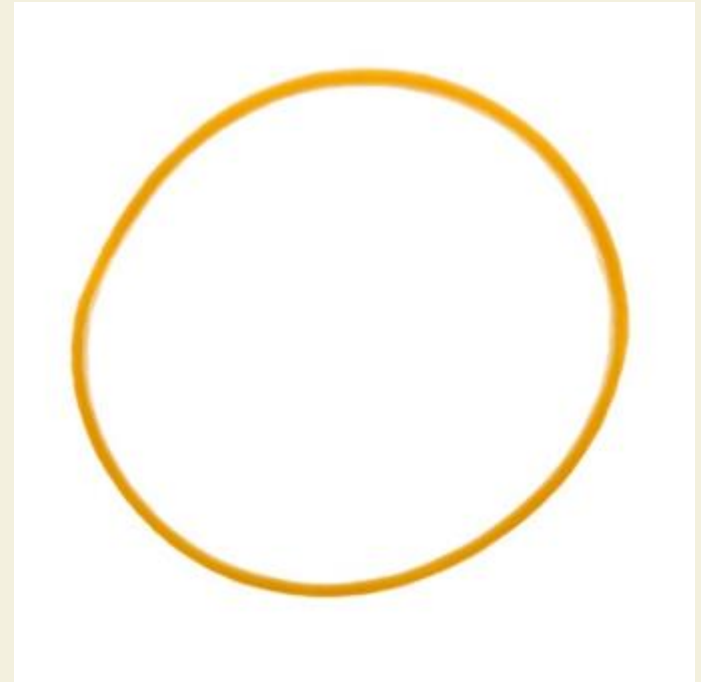
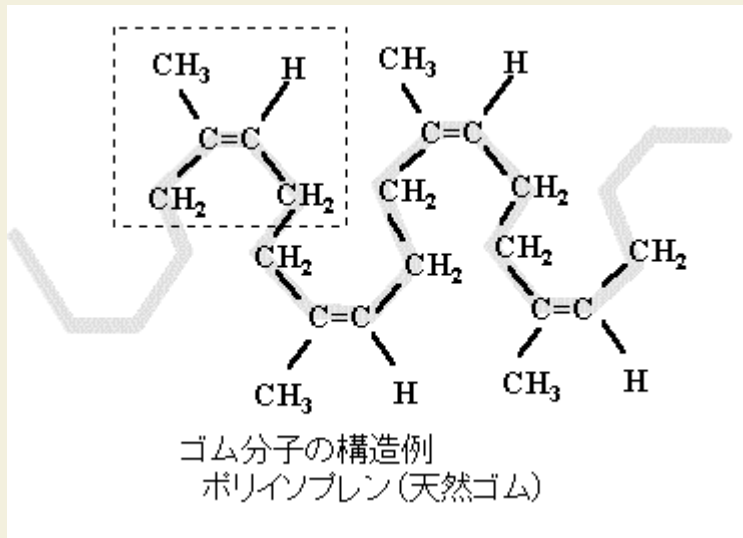


固定された端に向かって「力」が働く

この「力」は要素の性質ではなく
「多数の要素の協同的結果」として生じる

これは何？

ゴム



<http://wall.kabegami.com/detail/78809268/Round%20Rubber%20Band>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B4%E3%83%A0#/media/File:Gomust.png>

大学で学ぶゴムの姿

ゴムをのばすと元にもどろうとする力が働く
(誰でも知っている)

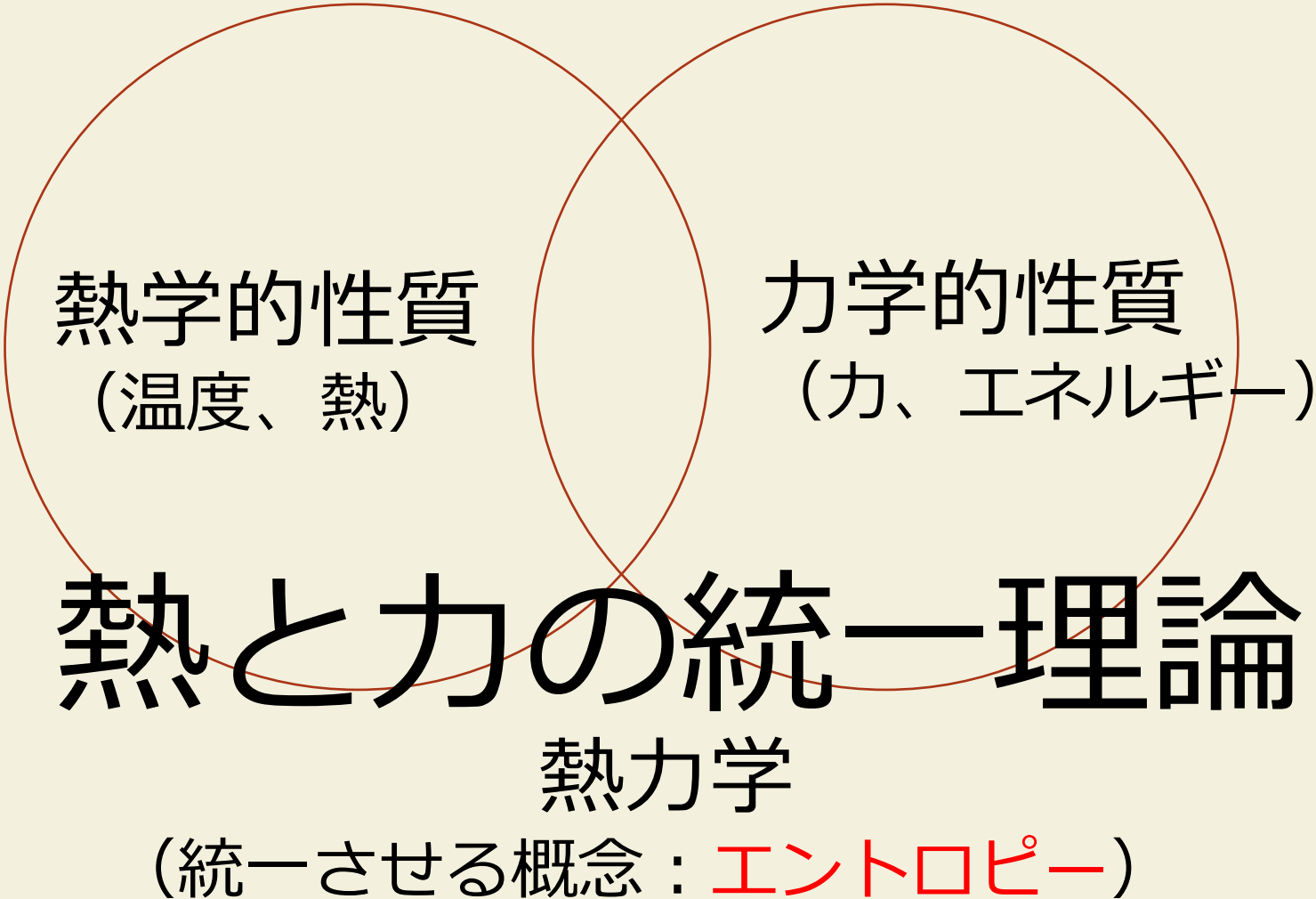
この復元力は、創発されたものである

ゴムを引っ張ると熱くなる

金属に対する復元力と質的に異なる

エントロピーカ！

エントロピーとは



熱学的性質
(温度、熱)

力学的性質
(力、エネルギー)

熱と力の統一理論

熱力学

(統一させる概念：エントロピー)

エントロピーの定義・特徴

運動や配置のバラバラ度合を「熱」によって測定可能にする量（クラウジウス）

$$S = S_0 + \int \frac{d'Q}{T}$$

マクロな状態に対して、「ミクロな状態の数」の対数をとったもの（ボルツマン）

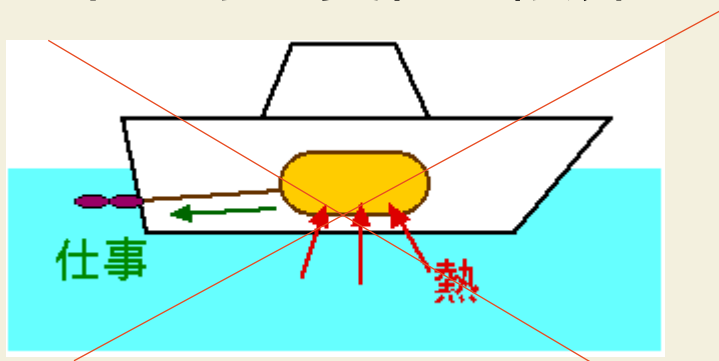
$$S = k_B \log W$$

エントロピーの定義・特徴 II

可能な操作の限界を表現する相加的量

全体（孤立）系のエントロピーを減らすことはできない。増やすことはできる。

エネルギー変化の限界



エントロピー力

目いっぱいランダムな状態になろうとする

その「方向性」が「力」を生む。

「力の創発」に特別な仕掛けを
用意するわけではない。

平衡状態における創発

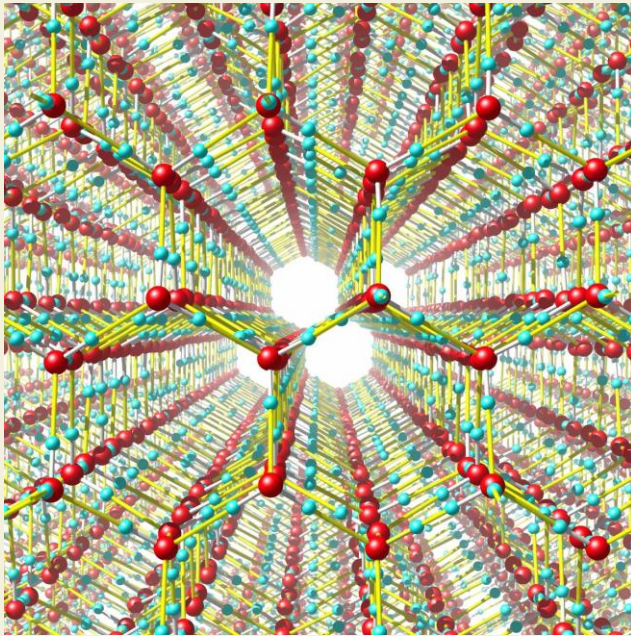
孤立化された多数の原子の集まりを放置する
(平衡状態)

多数の要素の状態は、与えられたマクロな拘束条件の下でランダムになっている状態と区別がつかない (等重率の原理)



平衡状態における
物質の巨視的性質のミクロからの理解へ
20世紀科学技術の発展の基礎

平衡状態における 秩序創発の顕著な例



磁性

超伝導

.....

氷の結晶

http://www.okayama-u.ac.jp/up_load_files/soumu-pdf/press25/press-130613-2.pdf

等重率の原理は万能か？

風が吹いて、鳥が鳴いて、私たちがしゃべる

与えられた拘束条件のもとでランダムに
なっている状態の結果　？　？

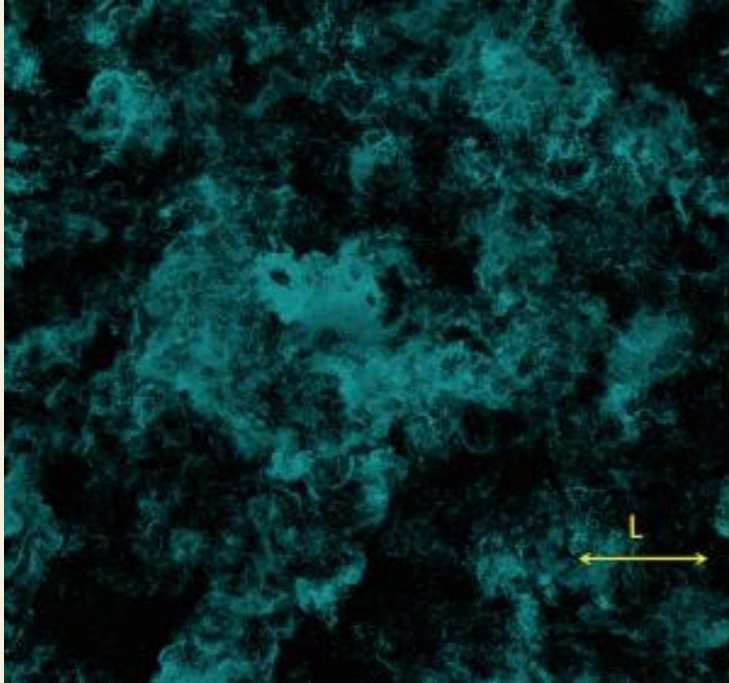
孤立化され放置されて実現する
平衡状態ではない。

非平衡状態における秩序創発へ

第2部

嵐が吹き荒れる

乱流



<http://www.math.sci.hokudai.ac.jp/crest/wpcms/wp-content/uploads/F001s1-300x281.png>

「激しい流れ」の性質は、
流体方程式（19世紀確立）
の解によって正確に記述される
ようだ（20世紀に確定） //

理論的には不十分だが...

「流れ場」が定義される時空の
一点では巨大数個の原子が
ほぼ同じ速度で動いている。

多数の要素の協同的性質（秩序）

様々な例

化学反応波

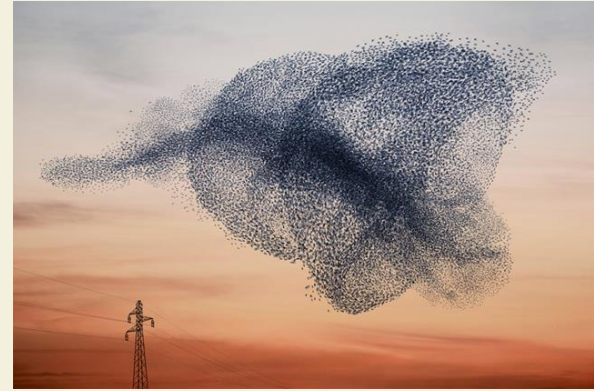


<http://www.chem.scphys.kyoto-u.ac.jp>

鳥取砂丘



ムクドリの大群



<http://matome.naver.jp/odai/2142320215201575301>

<http://para.sakyu.info/index.php?%E9%B3%A5%E5%8F%96%E7%A0%82%E4%B8%98>

秩序の創発 — 流れ

原子の不規則な運動 vs 激しい流れの運動
ミクロダイナミクス マクロダイナミクス


等重率の原理 → 「流れのない」 平衡状態

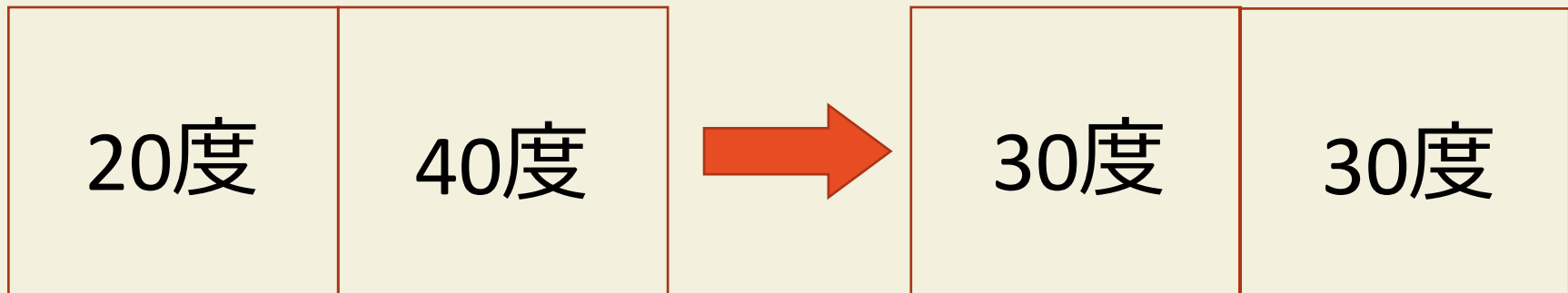
等重率の原理を超える必要

しかし、そもそも、

時間の矢の問題

原子の運動方程式は「時間反転対称」
で、流れの現象は「不可逆」なので
整合性を理解する問題

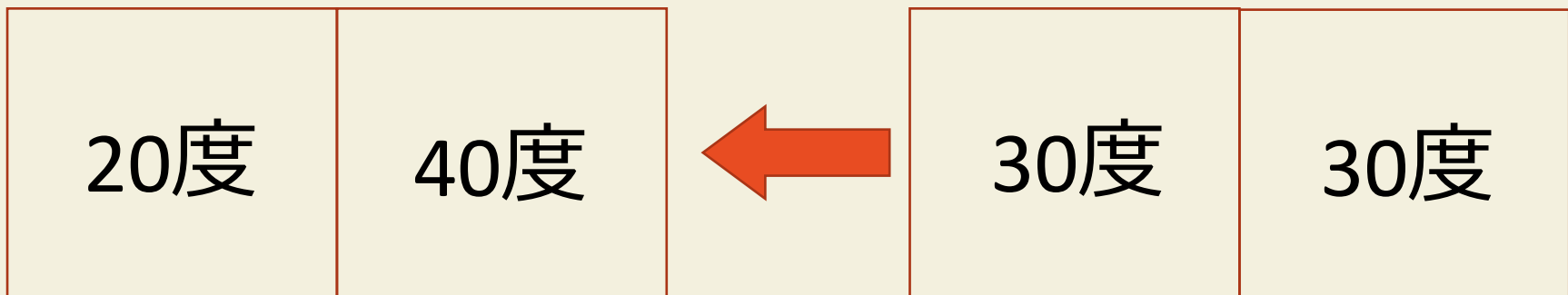
簡単な例題 



$t = 0$

$t = \tau$

という観察される現象（＝流体方程式の解）の対応する運動方程式の解があるなら



$t = \tau$

$t = 0$

という観察されない現象（＝流体方程式の解でない）の対応する運動方程式の解もある

整合性の（ひとつの）説明

等重率

等重率

20度

40度



30度

30度

$t = 0$

$t = \tau$

「過去」において（局所）平衡状態を仮定：

ミクロからの記述はマクロ現象と整合する

しかし、

等重率

等重率

20度

40度



30度

30度

$t = 0$

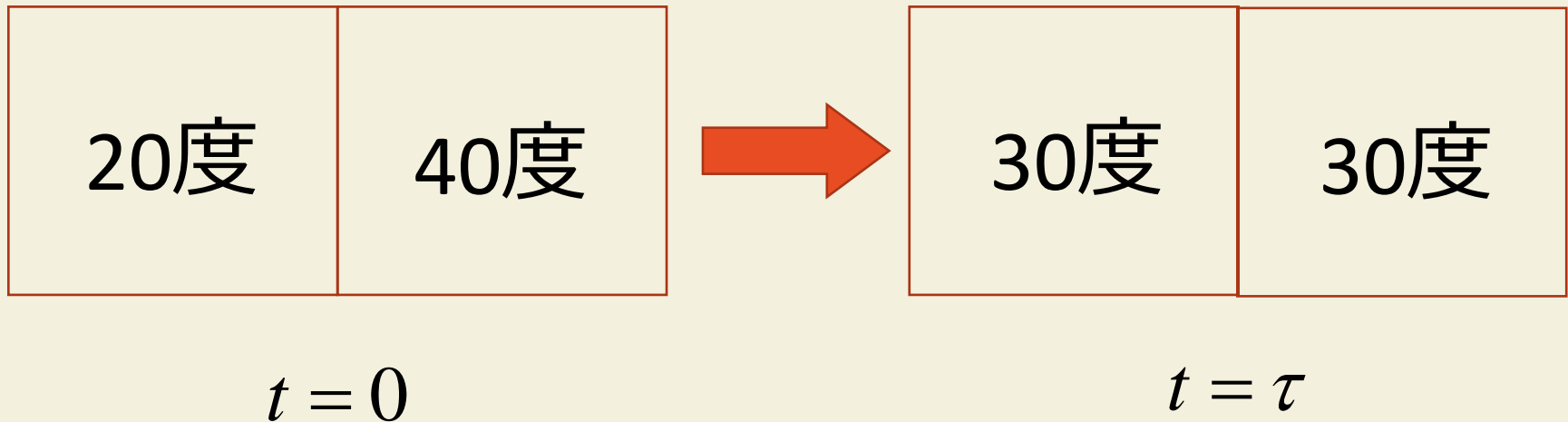
$t = \tau$

「過去」において（局所）平衡状態を仮定

「未来」において「等重率の原理」は成り立たない

もし、

等重率



「未来」において「等重率の原理」を仮定：
ミクロからの記述はマクロな現象と整合しない

それでも

「過去」において（局所）平衡状態（等重率の原理）を前提
時間反転対称性を破っている

ミクロな可逆性（対称性）が
マクロ現象にひっそりと伝搬

「ゆらぎの定理」とよばれるエントロピー生成
についての関係式が非平衡な世界にある
(Evans et al, 1993)

この20年の進展

熱力学法則のミクロな領域への展開

エントロピー等の概念の融合・一般化



ミクロ世界からマクロダイナミクスを
理解する準備が整った

例えば：流れの創発

過去において（局所）平衡状態を仮定したときの
流体方程式のミクロ力学からの形式的（一般的）
導出はやっとできるようになった：

"Derivation of Hydrodynamics from the Hamiltonian Description of Particle Systems"
Shin-ichi Sasa, Phys. Rev. Lett. 112, 100602 (2014) / arXiv:1306.4880

乱流状態も含む（平衡近くに限定されない）
一般的な物質（希薄気体に限定されない）

第3部

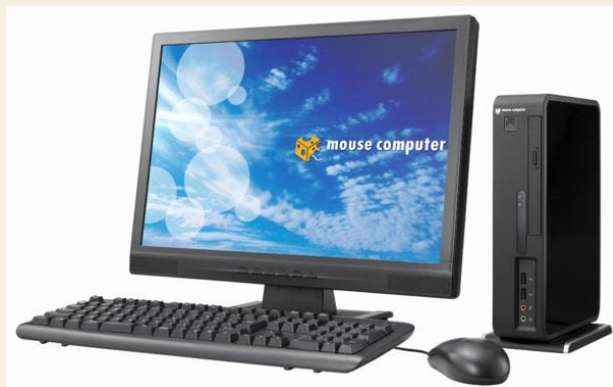
自然現象の結果としての「我々」の創発

..... に向けて

様々なレベルの創発

- 1) 計算・情報処理の創発
 - － 自然現象として認知と言語 －
- 2) 生体機能の創発
 - － 生死の概念 －
- 3) 生物種の創発（進化）
 - － 次の生物形態 －

計算機の作動 vs 自然現象



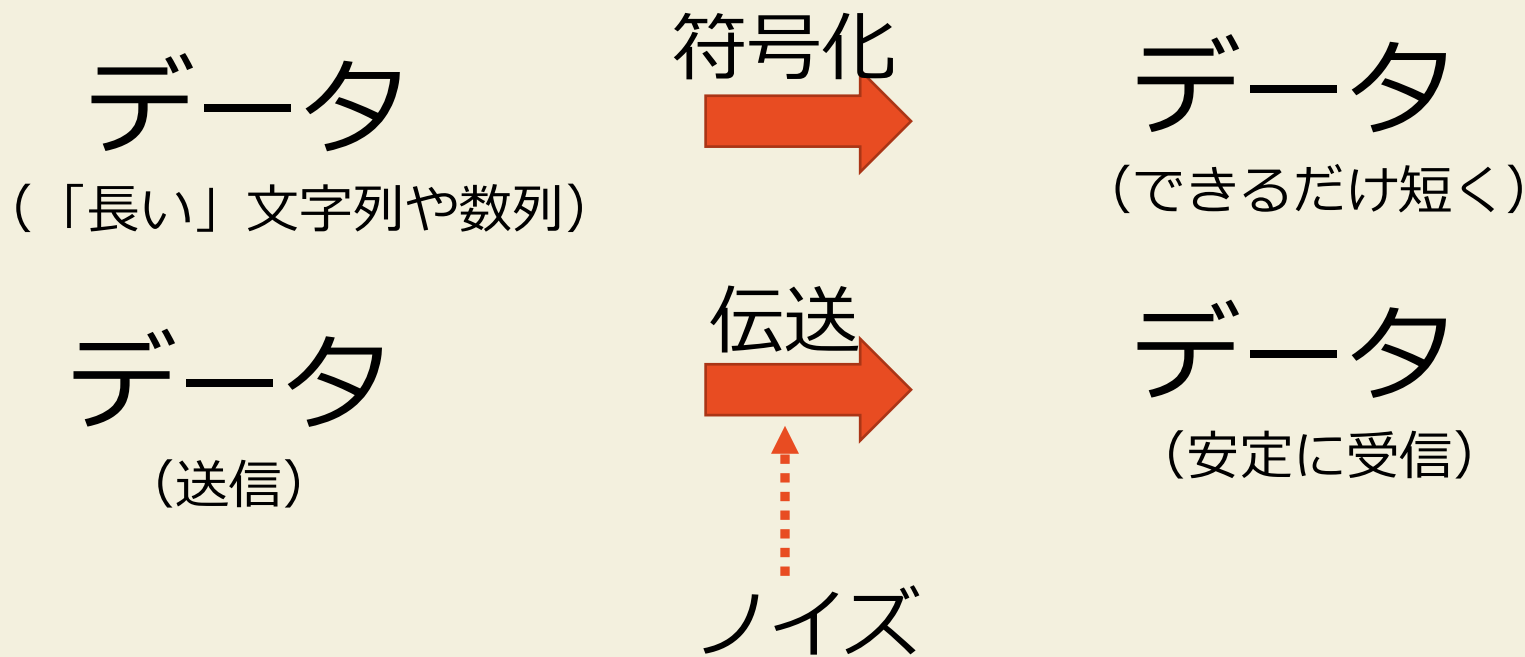
入力データ
プログラムと実行
出力データ

計算理論・情報理論



原子・分子に対する
(量子) 力学による
時間発展

情報に関する理論



「シャノンエントロピー」

データ列の情報量を定量化する

計算に関する理論

問題



解

アルゴリズム

解けるかどうか？

「アルゴリズムミックエントロピー」

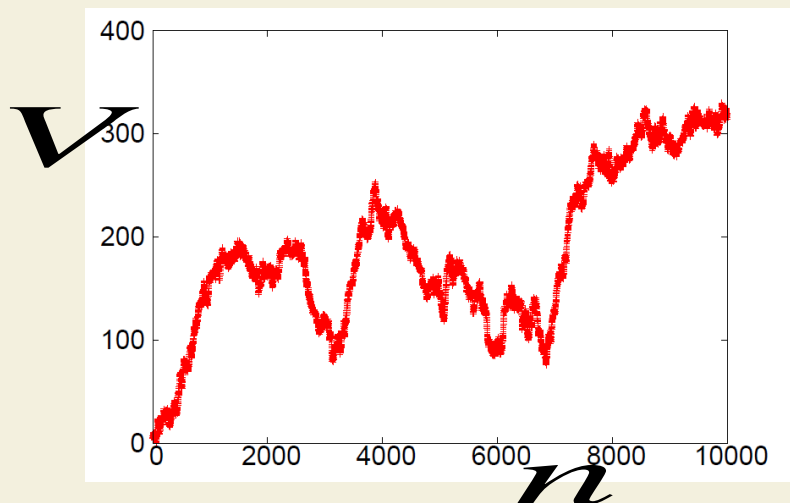
数列を生成する複雑さを定量化する

自然現象に対するアプローチ

情報論的量を用いて解析する

計算理論的概念を通して解析する

例：カオスにおける不規則な時系列の「複雑さ」の定量化



目標：情報と計算の創発

情報理論・計算理論

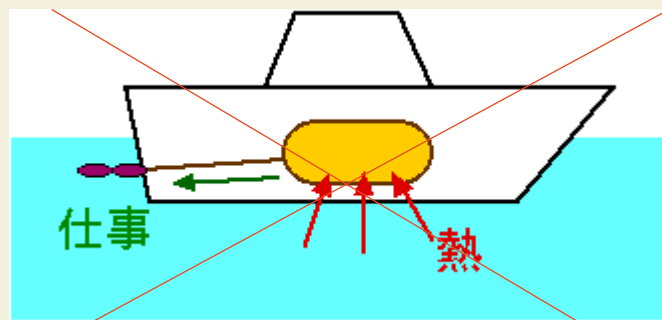


原子分子の古典力学・量子力学

ヒント? :

限界についての法則の統一

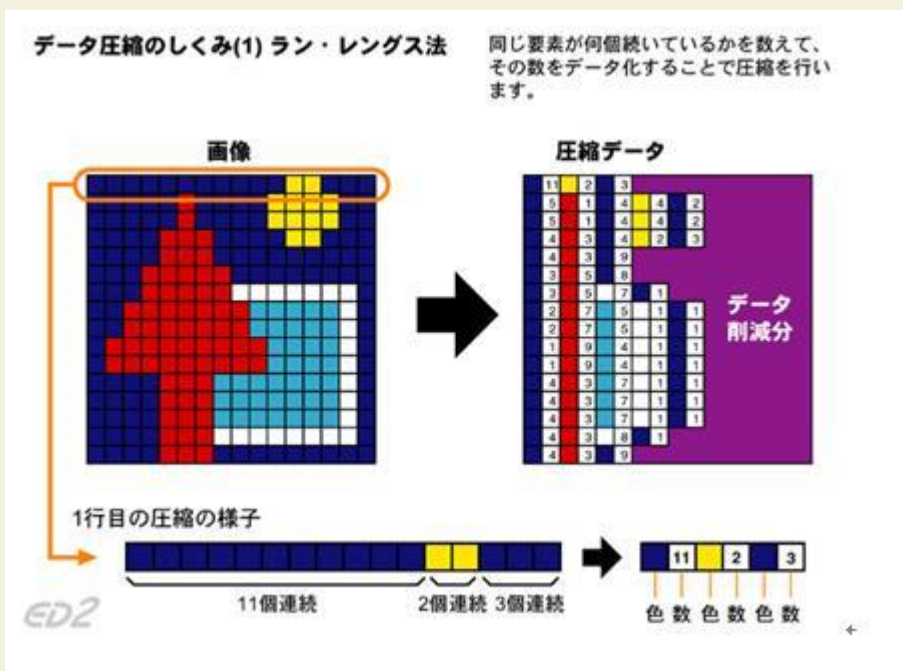
エネルギー変化の限界
(熱力学法則)



計算できない数が存在

$$\Omega_F = \sum_{p \in P_F} 2^{-|p|}$$

データ圧縮の限界



情報伝達速度の限界

生体機能・生物種の創発

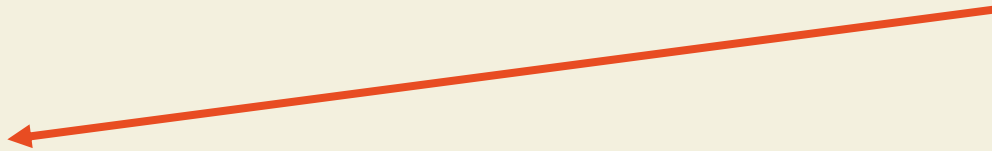
基本的概念

滅多に生じないが、ひとたび発生すれば多く「複製」される
「因子」は、次世代で「典型的」となる

その世代で、滅多に..... (以下同文)

まれなゆらぎ ➡ 「複製」 ➡ 典型的性質

まれなゆらぎ ➡ 「複製」 ➡ 典型的性質



本質的なこと

「滅多に生じないゆらぎ」の性質

測定しにくいから無意味？



平衡条件下におけるまれなゆらぎは「エントロピー」で特徴づけることができる (アインシュタイン)

まれなゆらぎを全部探索する = 熱力学関数

近い目標：

滅多に生じないゆらぎの性質を
体系化する理論の構築



生物機能・生物種の創発の理解につながる

第4部

まとめ

「要素のカオス」から「秩序創発」へ

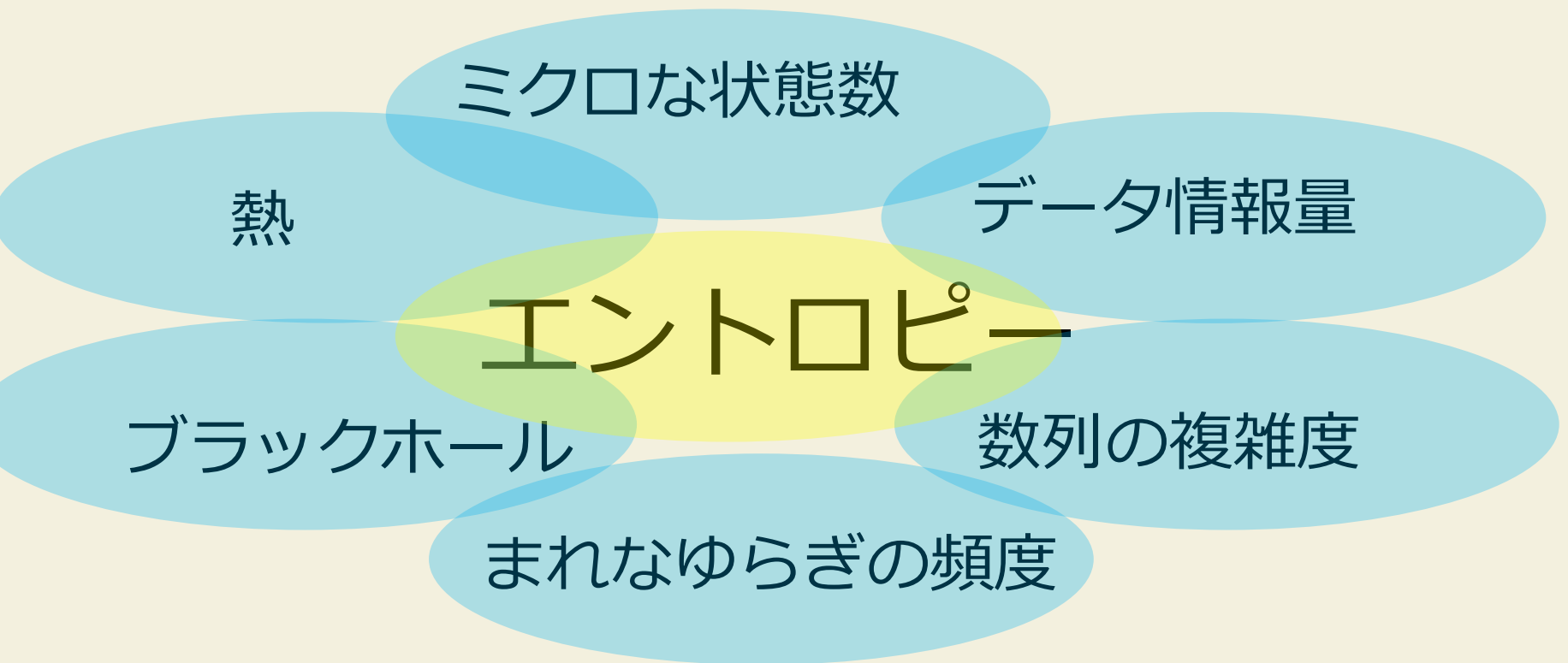
力の創発

流れ・不可逆現象の創発

計算・情報の創発

生命の創発

鍵はエントロピー



主役：Entropy

