

# 対称性の自発的破れと相転移

- ★ 物理学における対称性
- ★ 物質の相と対称性の破れ
- ★ 自発的対称性の破れ

*Spontaneous  
Broken  
Symmetry*

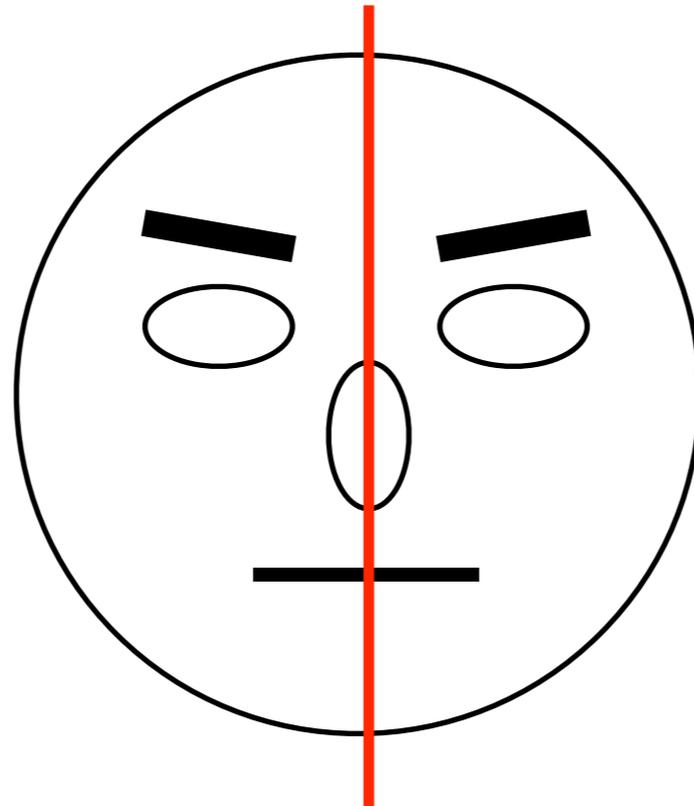
*Use it for particle physics : Y. Nambu*

*Universal & Basics  
Concept  
in the whole physics*

# 物理学における対称性”

~~対称性~~ ~~対照~~ **Symmetry** ~~対象~~  
対称？

美人は顔のつくりが左右対称 ？

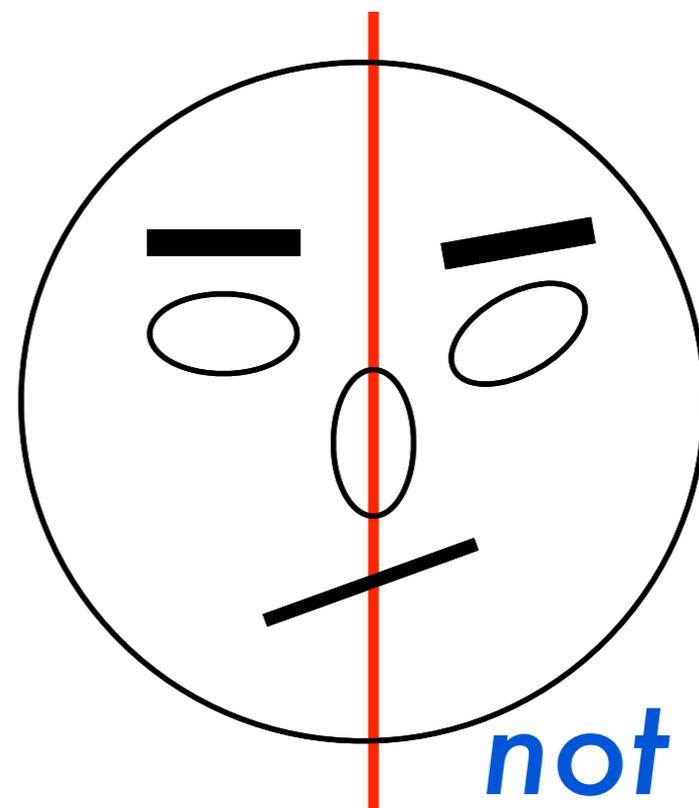
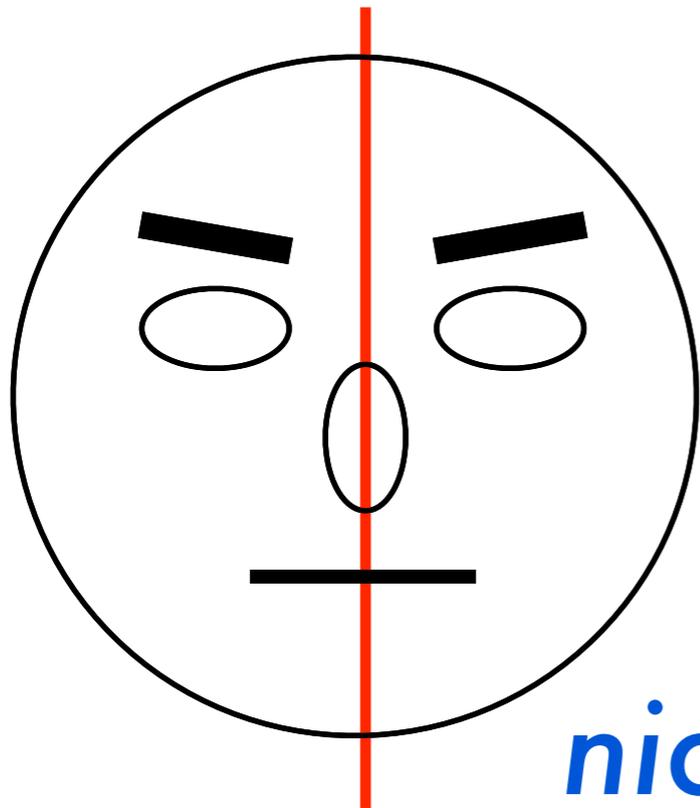


# 物理学における対称性

## 対称性 *Symmetry*

対称？

美人は顔のつくりが左右対称 ？

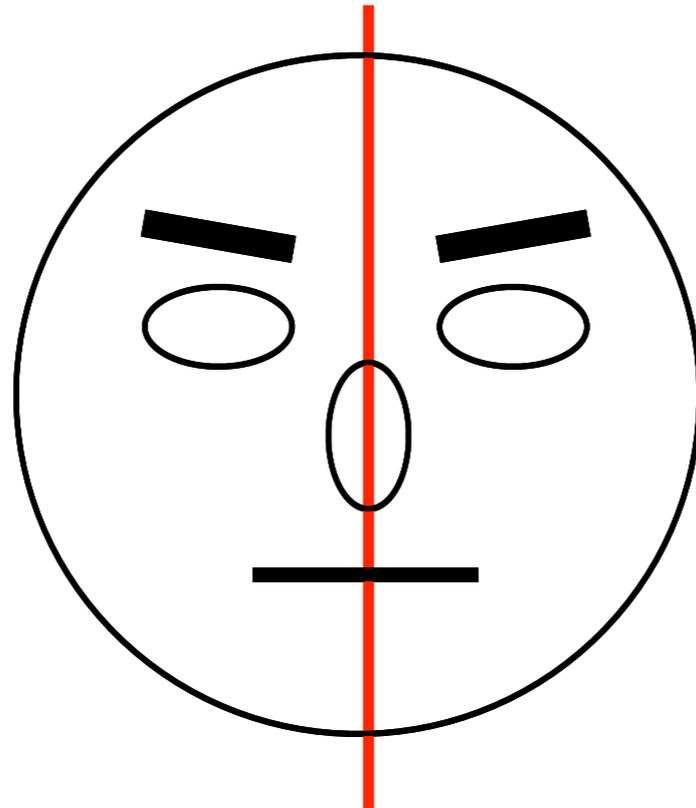


# 物理学における対称性

対称性

*Symmetry*

左右対称

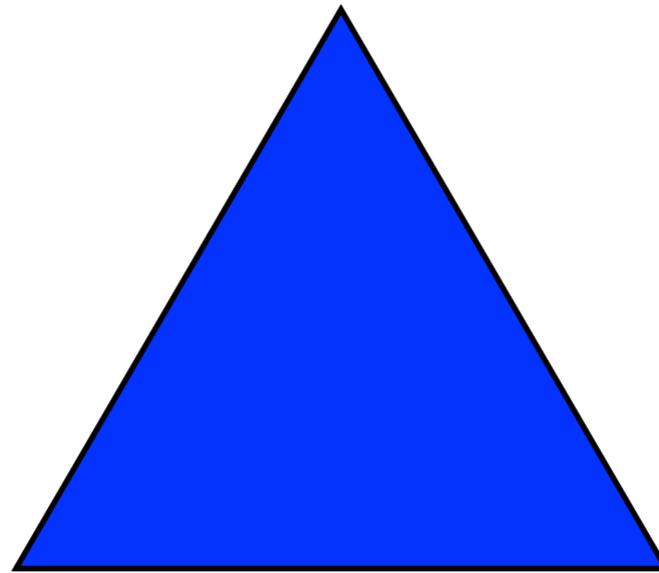


ひっくり返す

「対称操作」

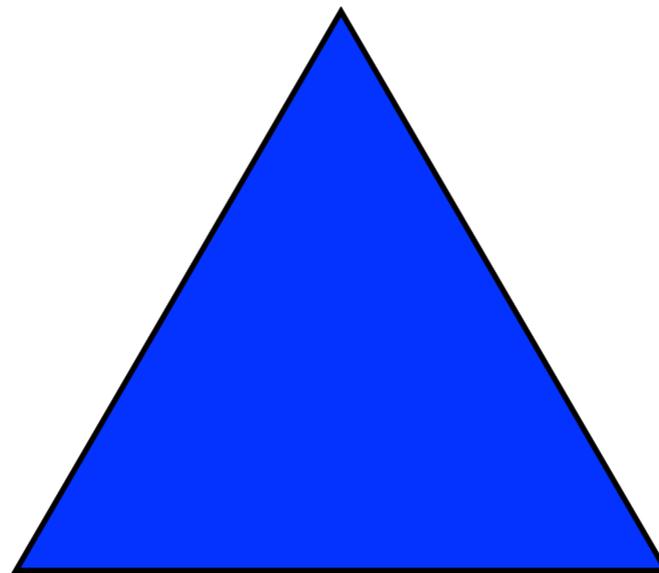
# Symmetry

「いろいろな対称操作」



# Symmetry

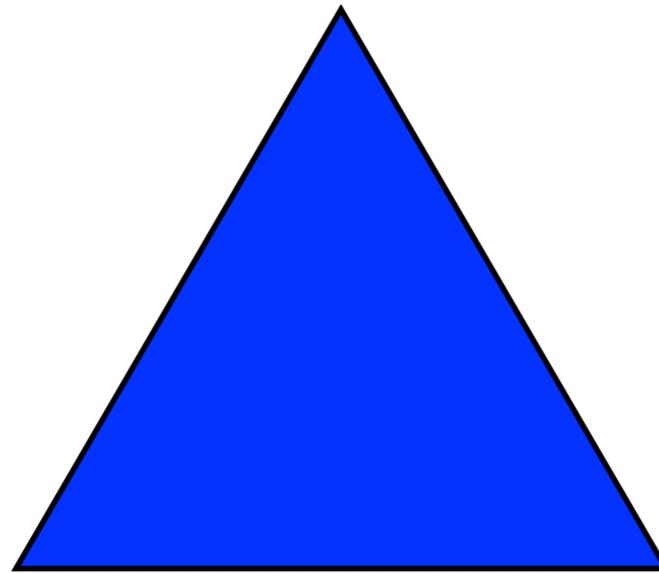
「いろいろな対称操作」



120度回転

# Symmetry

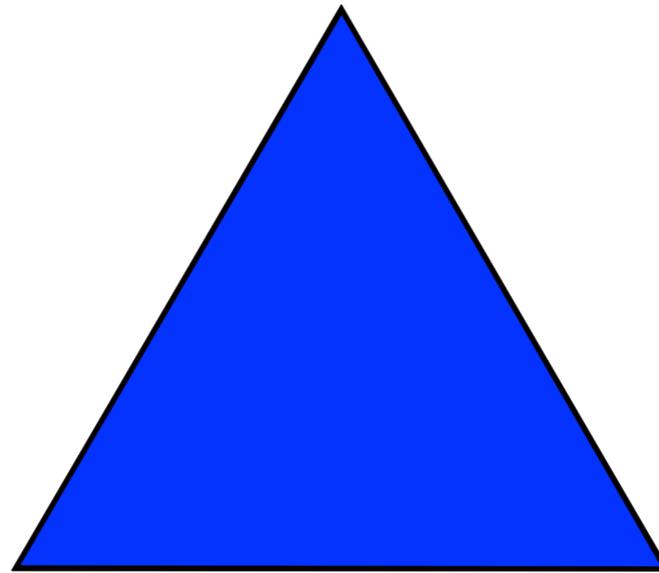
「いろいろな対称操作」



240度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

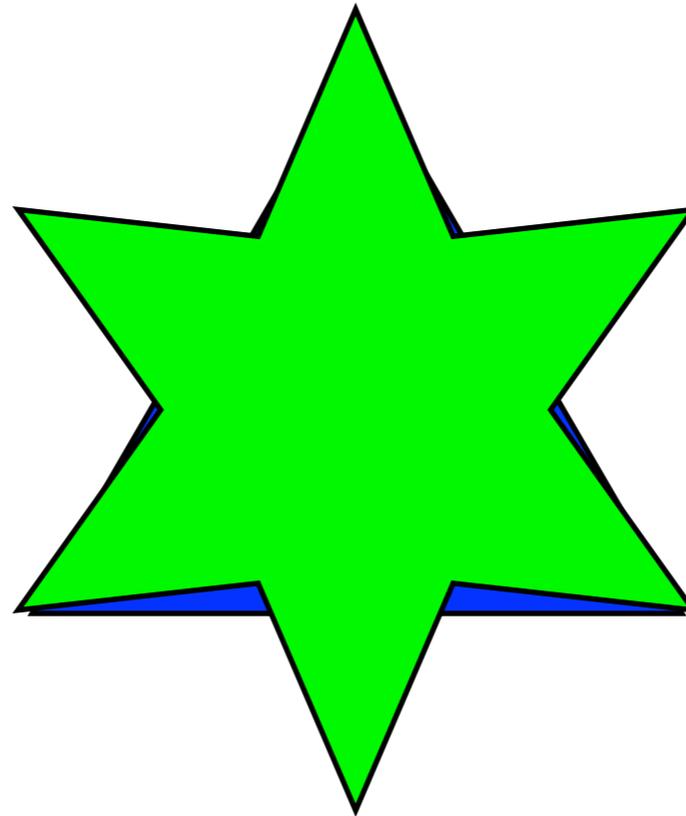
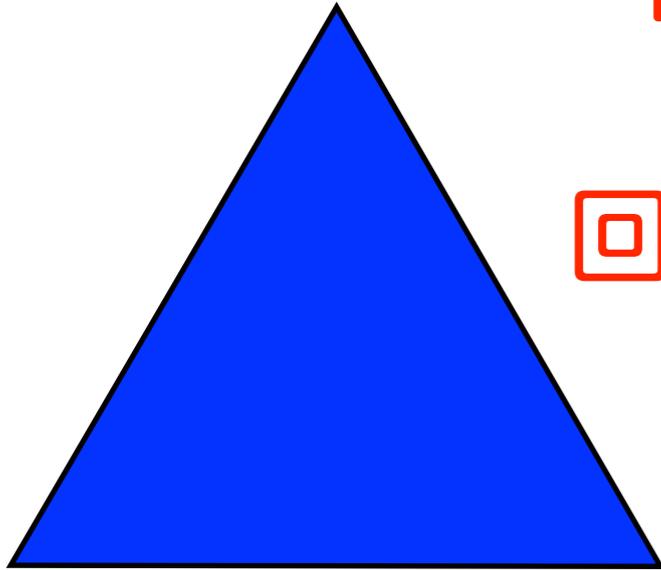


360度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

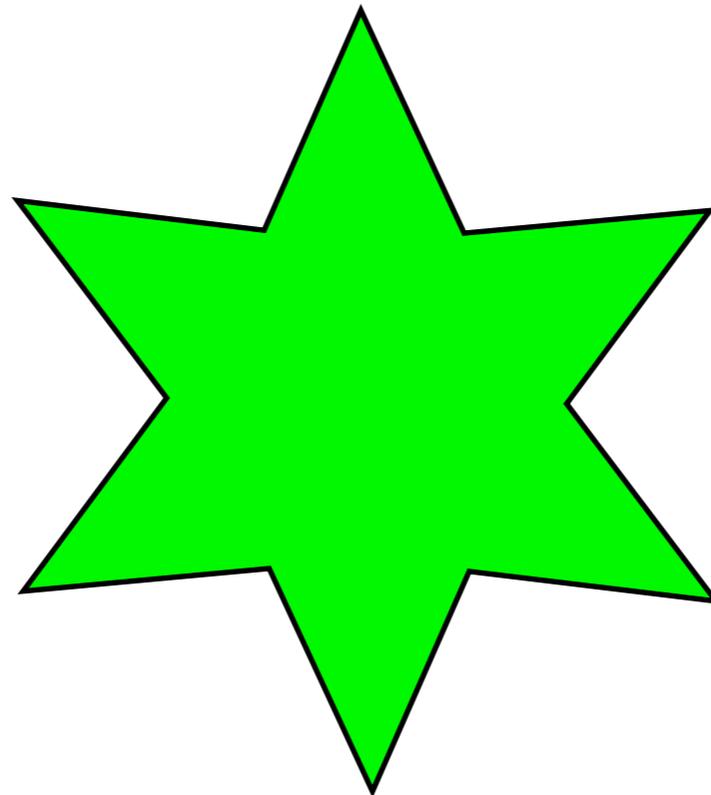
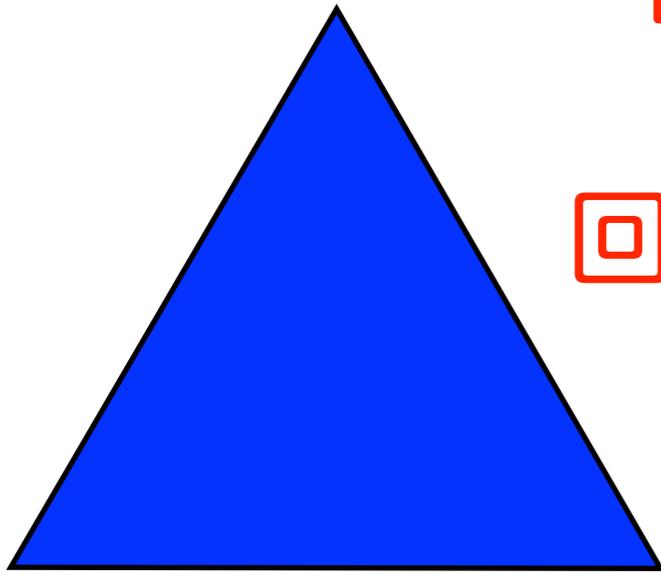
回転角：120度、240度、360度



# Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

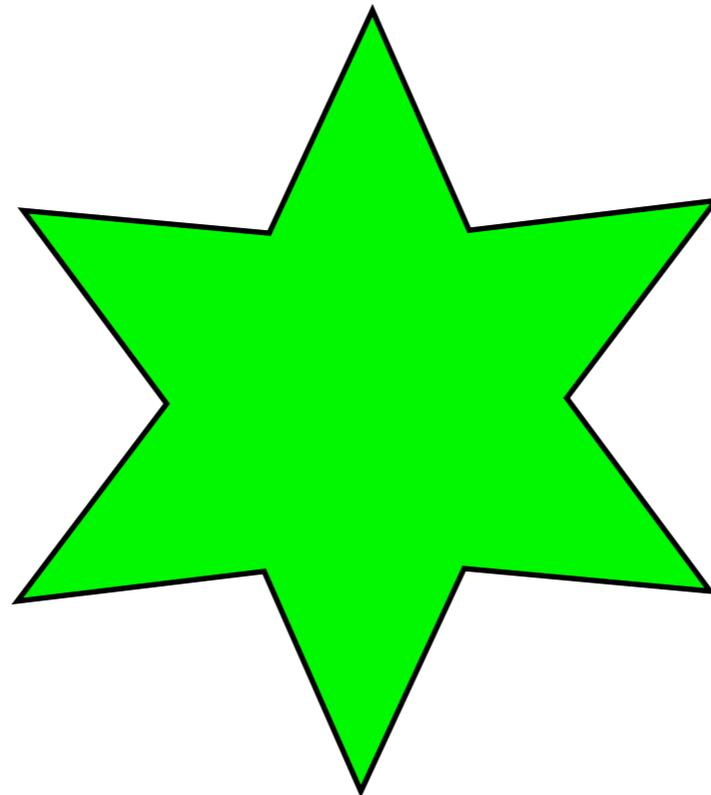
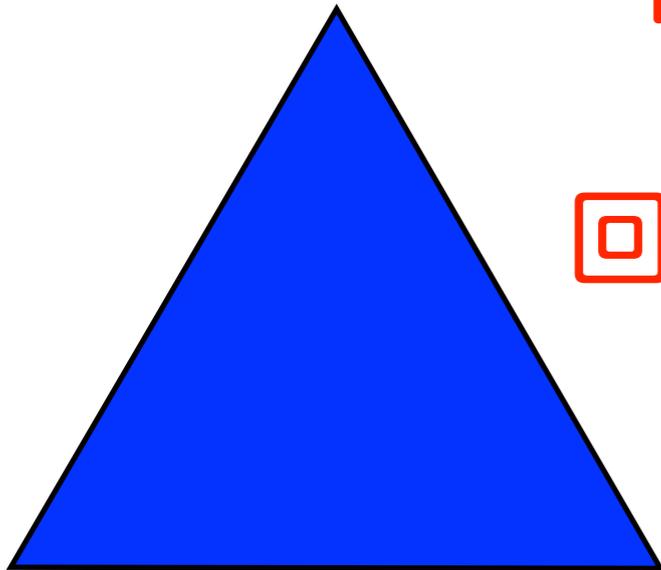


60度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

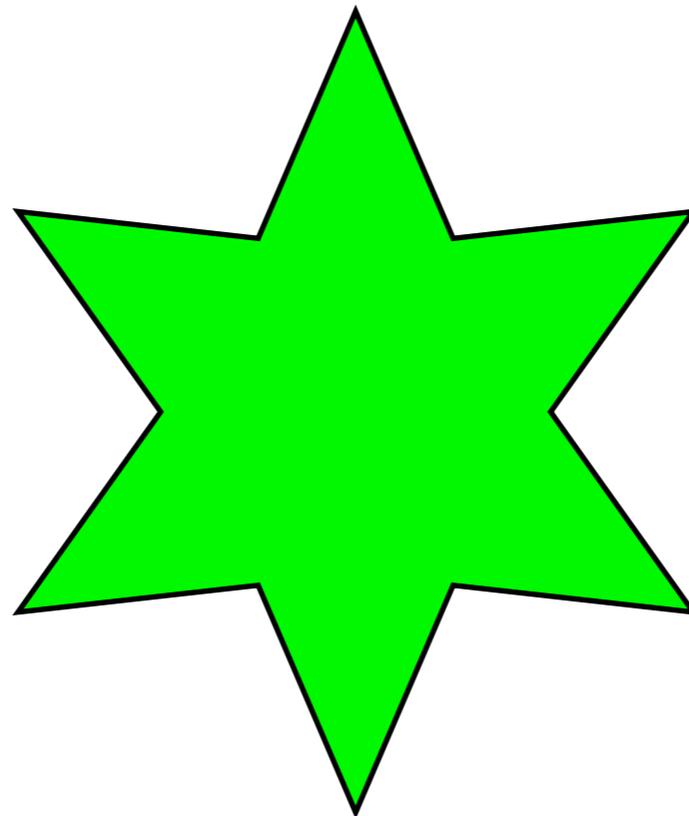
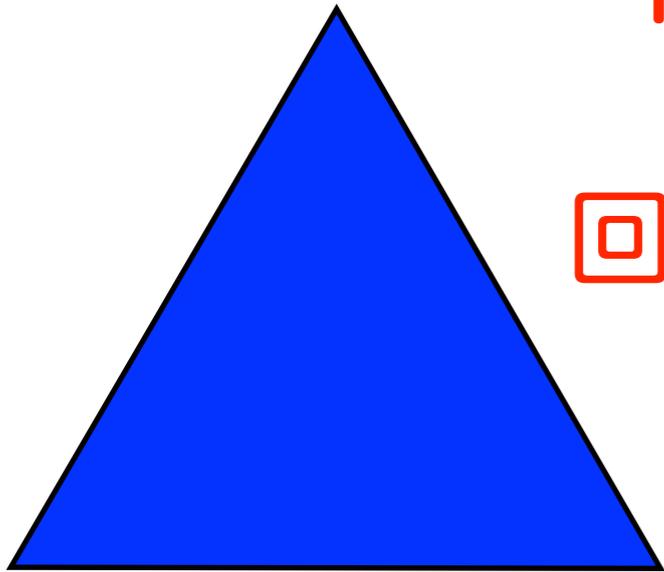


120度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

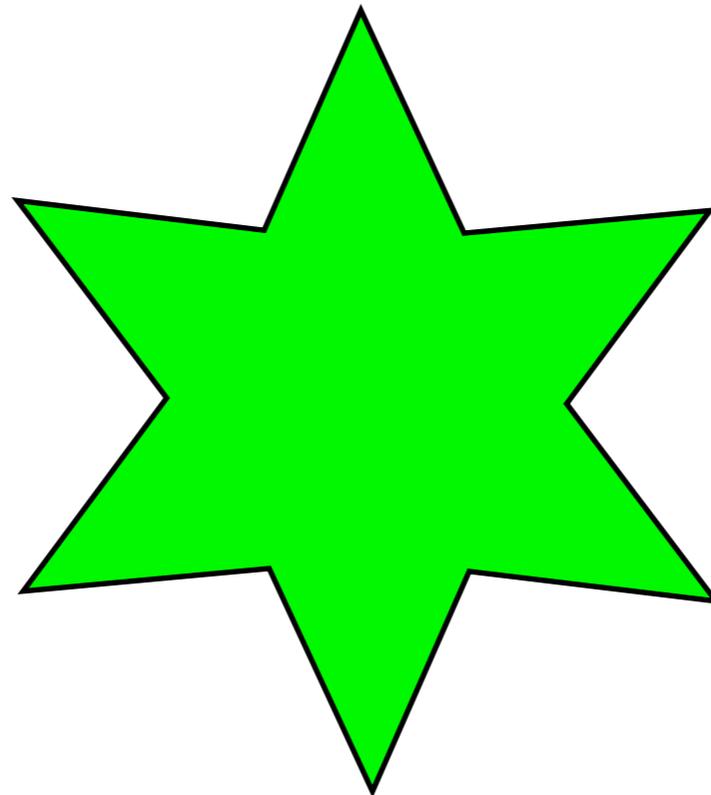
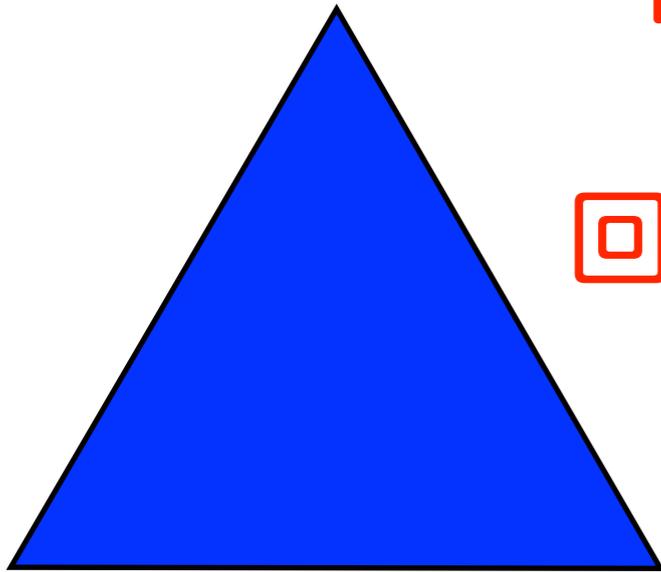


180度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

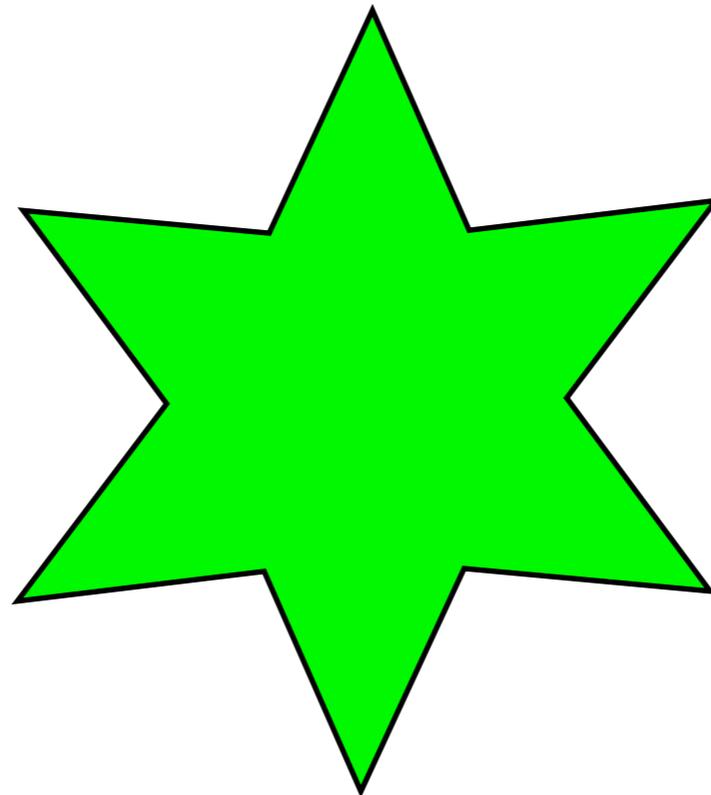
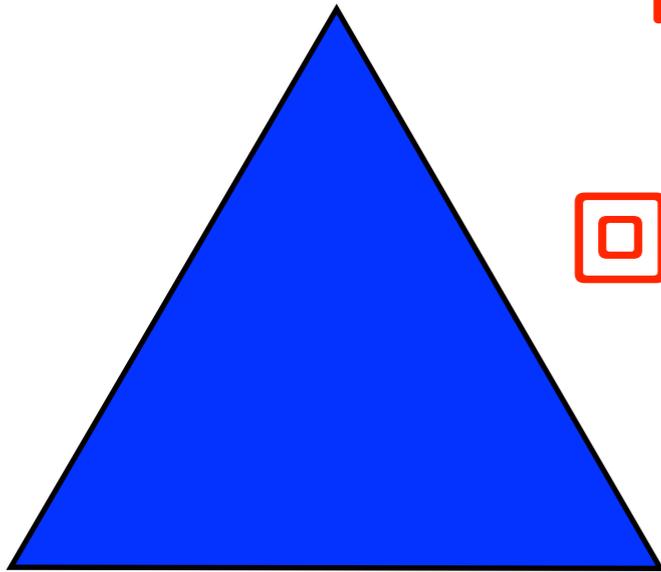


240度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

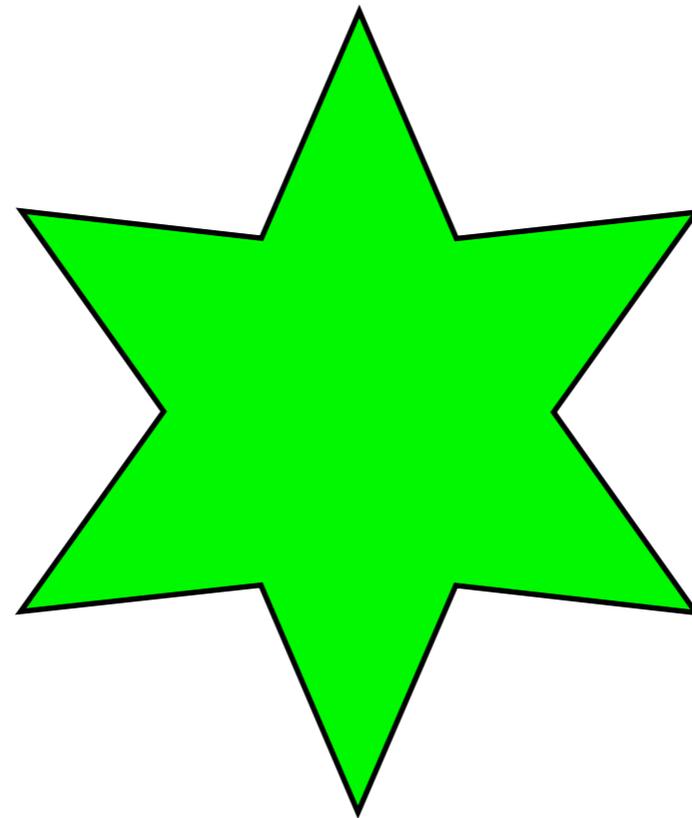
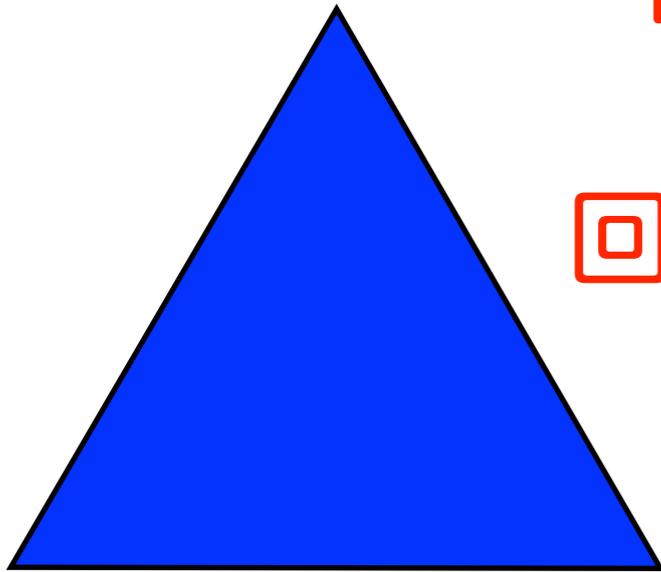


300度回転

# Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

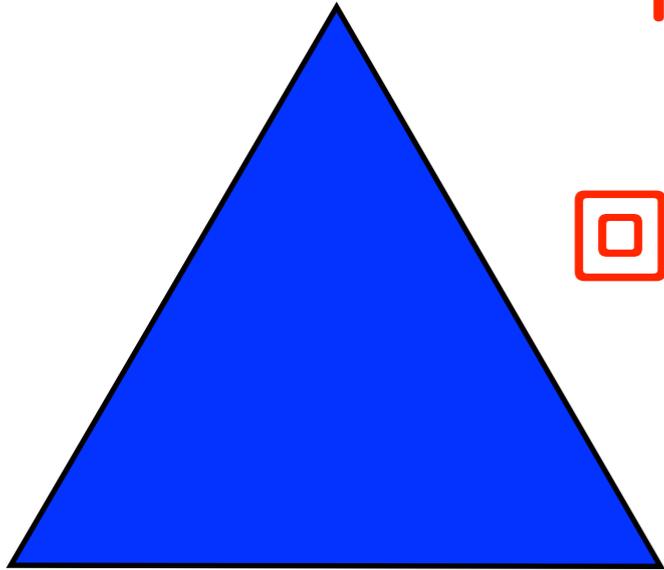


360度回転

# Symmetry

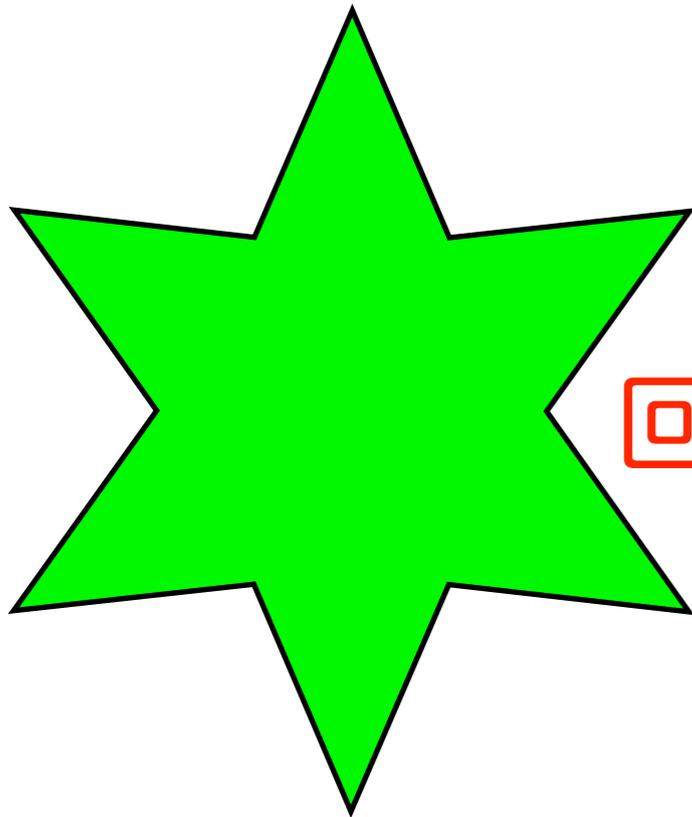
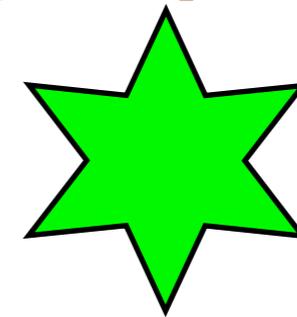
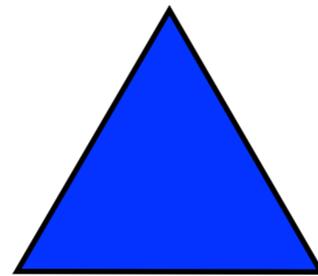
「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度



*low symmetry*

*high symmetry*



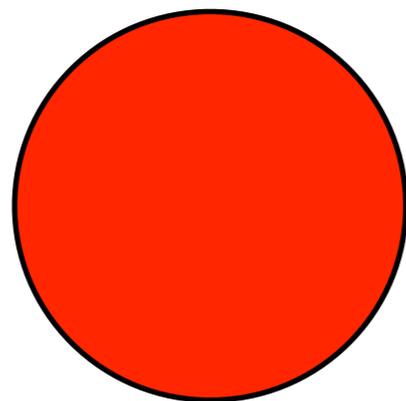
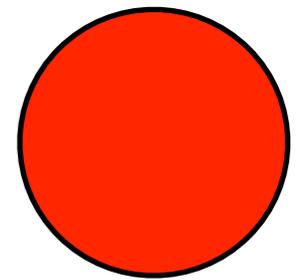
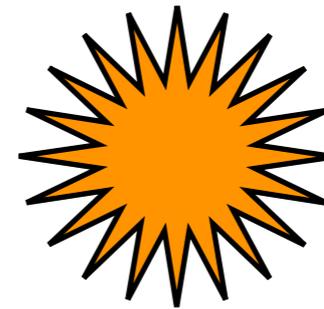
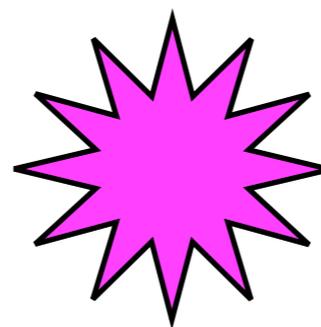
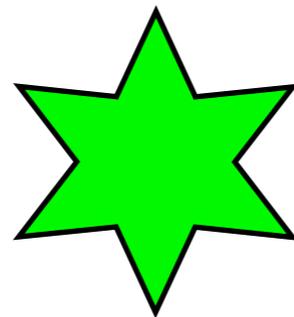
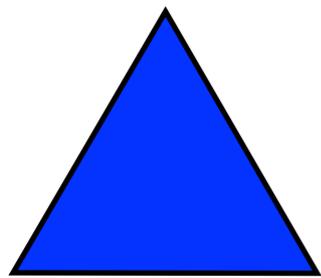
回転角：60度、120度、180度、  
240度、300度、360度

# 対称性の定量化

「いろいろな対称操作」

*low symmetry*

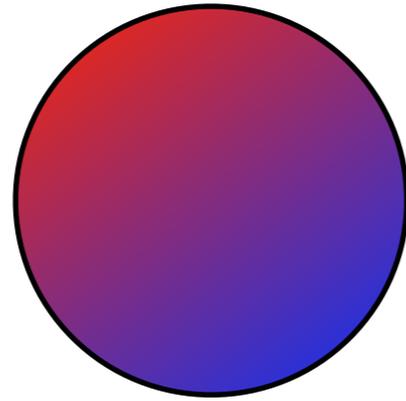
*high symmetry*



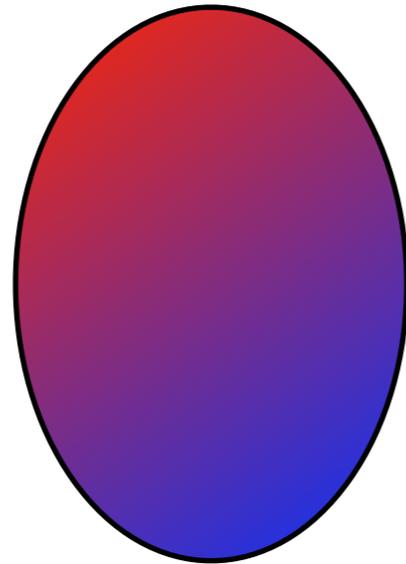
「連続対称性」

*Nambu-Goldston Boson*

# 対称性の低下と対称性の破れ



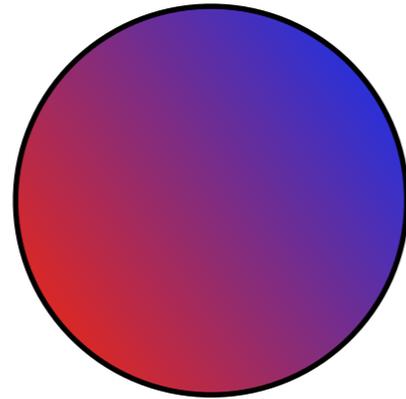
*high symmetry*



*low symmetry*

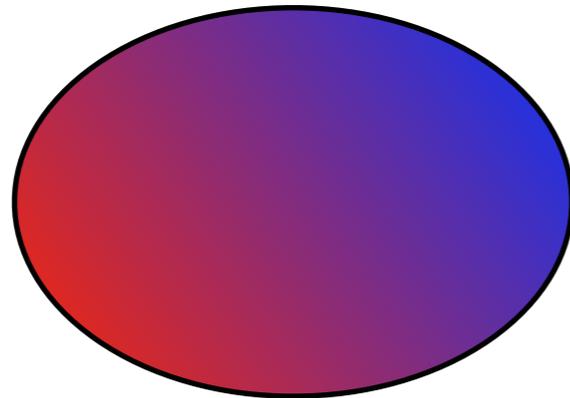
# 対称性の低下と対称性の破れ

OK!



*high symmetry*

No good!

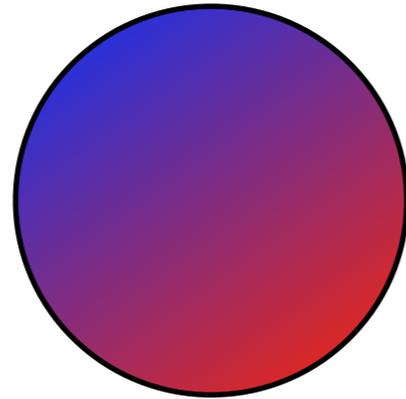


*low symmetry*

90度回転

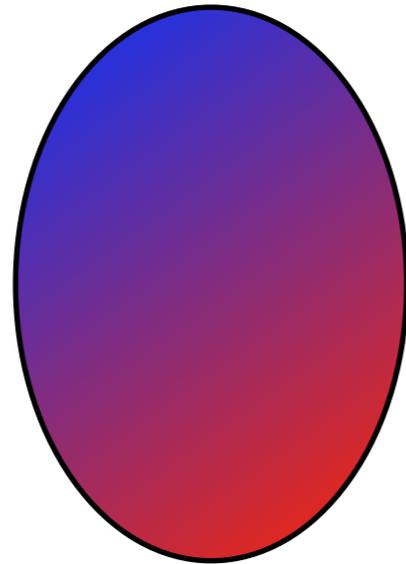
# 対称性の低下と対称性の破れ

OK!



*high symmetry*

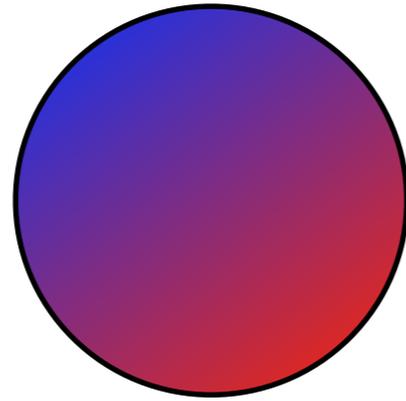
OK!



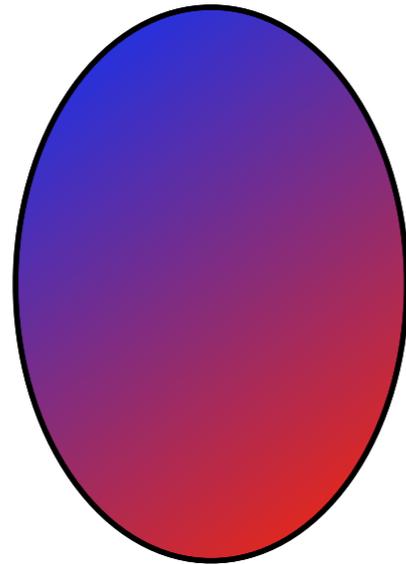
*low symmetry*

180度回転

# 対称性の低下と対称性の破れ



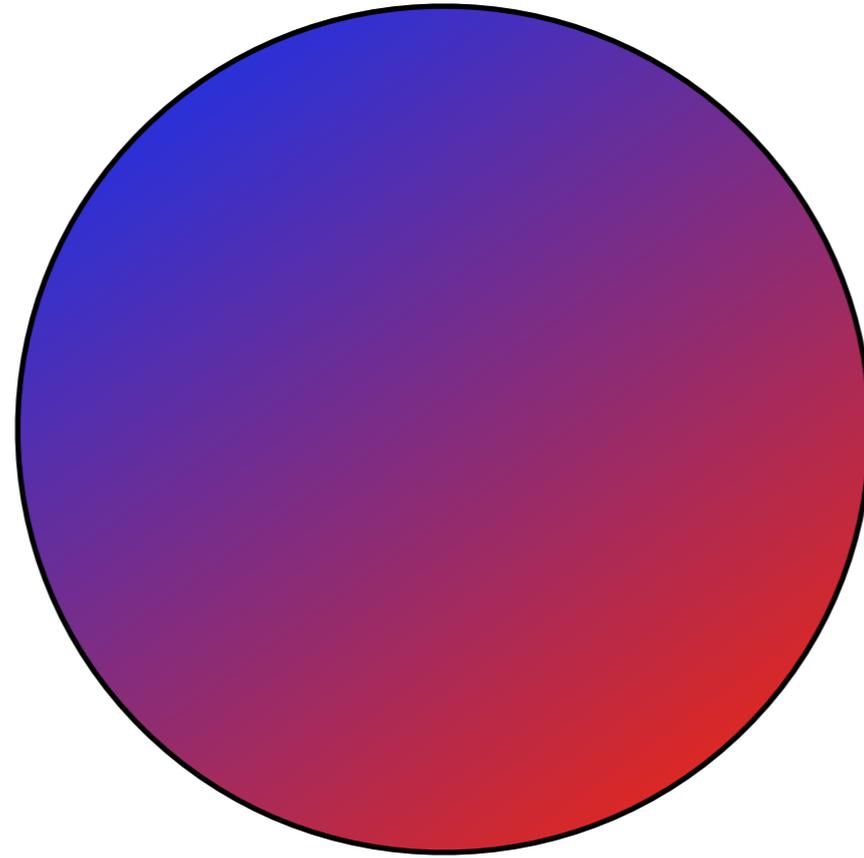
*high symmetry*



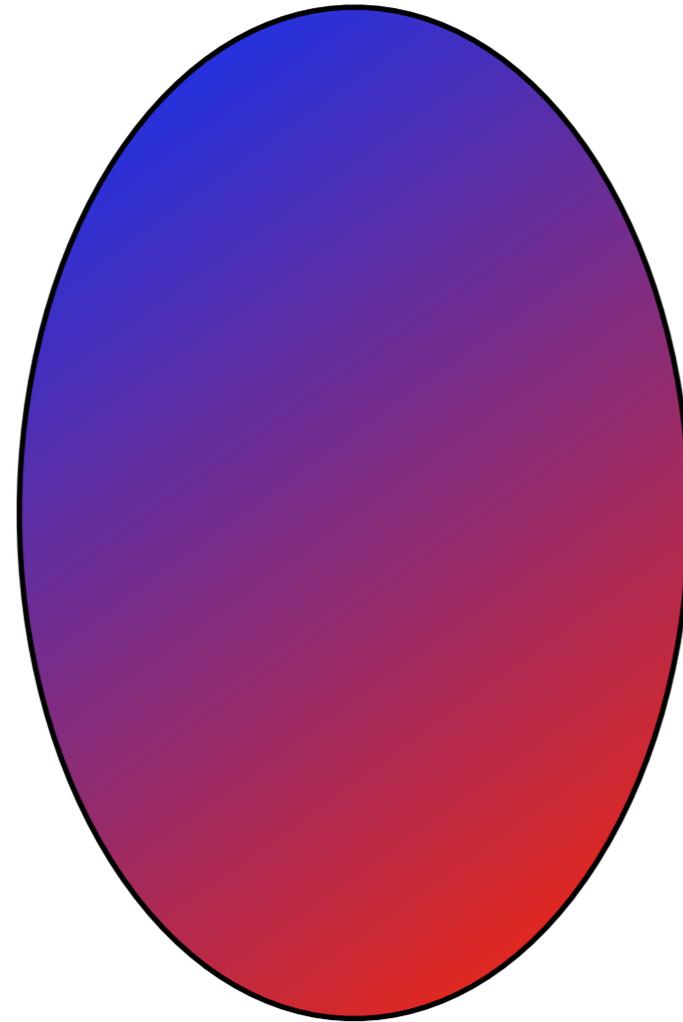
*low symmetry*

# 対称性の低下と対称性の破れ

対称性の自発的破れと相転移 初貝 安弘



# 対称性の低下と対称性の破れ



対称性の低下

対称性の破れ

*Broken Symmetry*

*Break down of Continuous Symmetry*

連続対称性の破れ

自発的? *Spontaneous?*

# 磁石：秩序形成＝対称性の破れの例

- ★ 電子は電荷の他に固有の角運動量を持つ（スピン）
- ★ スピン= $\hbar/2$ :  $\hbar$ と同程度：量子論による記述
- ★ 磁石：電子のスピンが一つの方にそろったもの
  - ★ スピンとは何だろうか (Dirac)
  - ★ なぜスピンのそろうのか？：
    - ★ 協同現象, 相互作用が必須の条件
  - ★ そろいかたにもいろいろある
    - ★ 多様な磁気秩序相
      - ★  $\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow$  (反強磁性：ネール状態)
      - ★  $\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$  (強磁性)

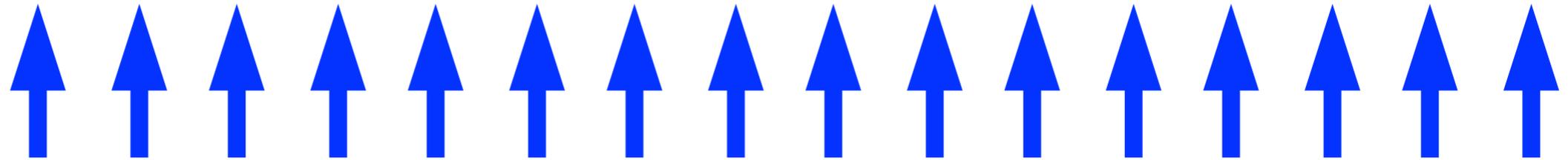
# 秩序と秩序変数

## ★ 磁気秩序 (磁石)

室温の磁石

(秩序正しい)

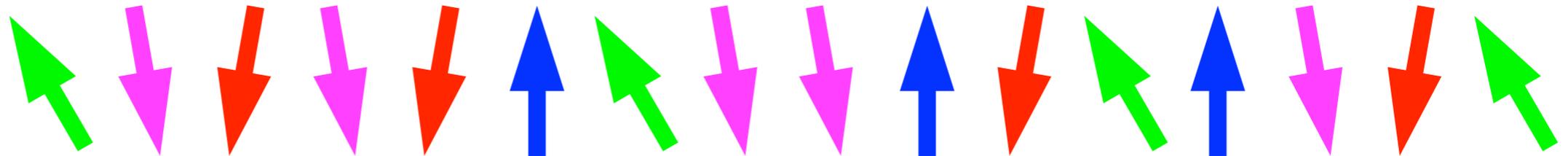
秩序相



磁石をバーナーで熱すると

(でたらめ)

無秩序相

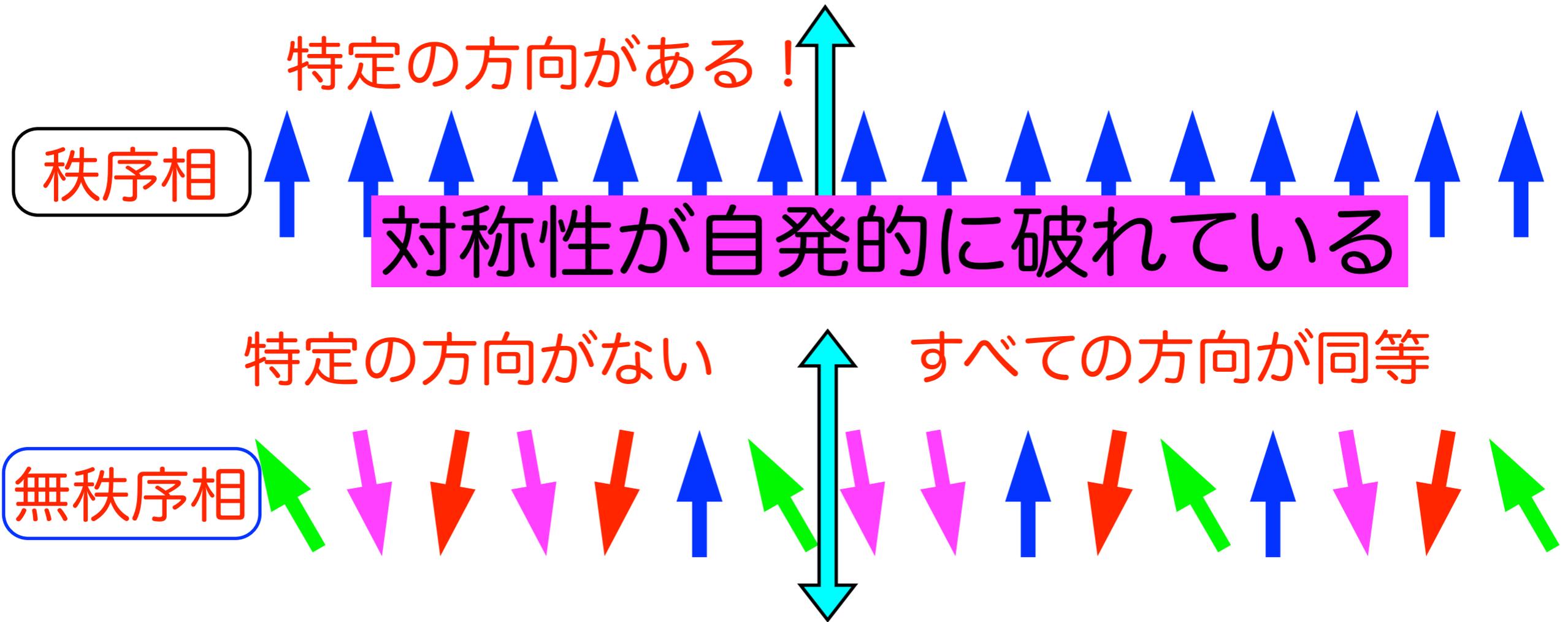


秩序変数：矢印！ “vector”

$\vec{m}(\vec{r})$  場所  $\vec{r}$  での平均の磁化の方向  $\vec{m}$

# 秩序変数と対称性の自発的破れ

★ 対称性の観点から区別しよう！！



秩序変数  $m(\vec{r})$  :

$\neq 0$	対称性が破れている
$= 0$	対称性が破れていない

# 対称性の自発的破れ *Spontaneous Symmetry Breaking*

物質はすべての方向は同等のはず！

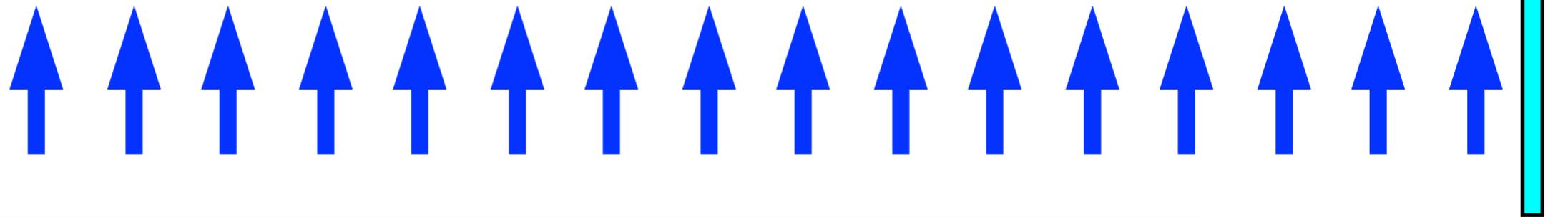
特定の方向はない

すべての方向が同等

物質の形態を定める法則  
は完全に等方的

実現した状態には特定の方向がある！

秩序相



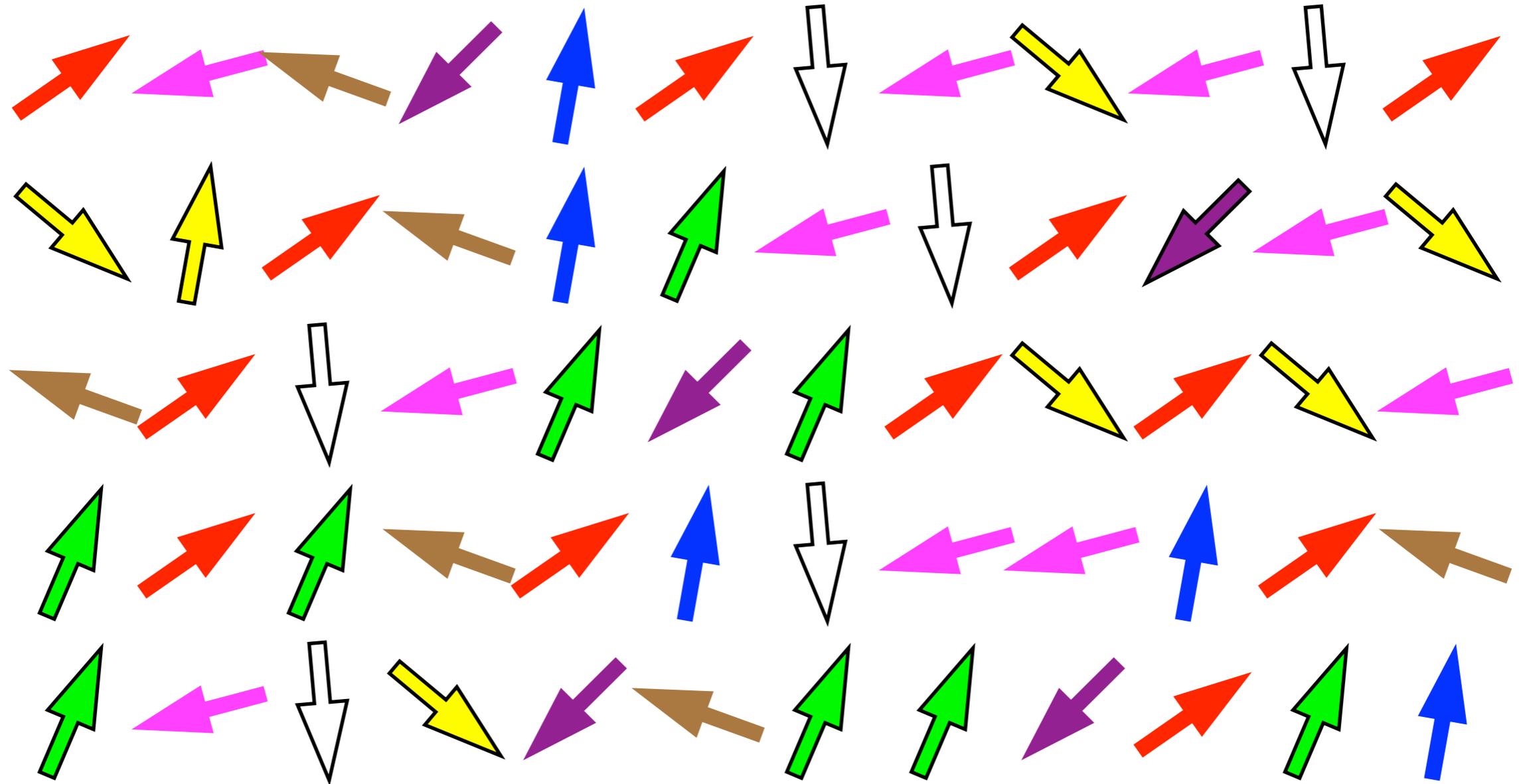
対称性が自発的に破れている

# 温度低下による自発的対称性の破れ

Disordered

高温相

Symmetric



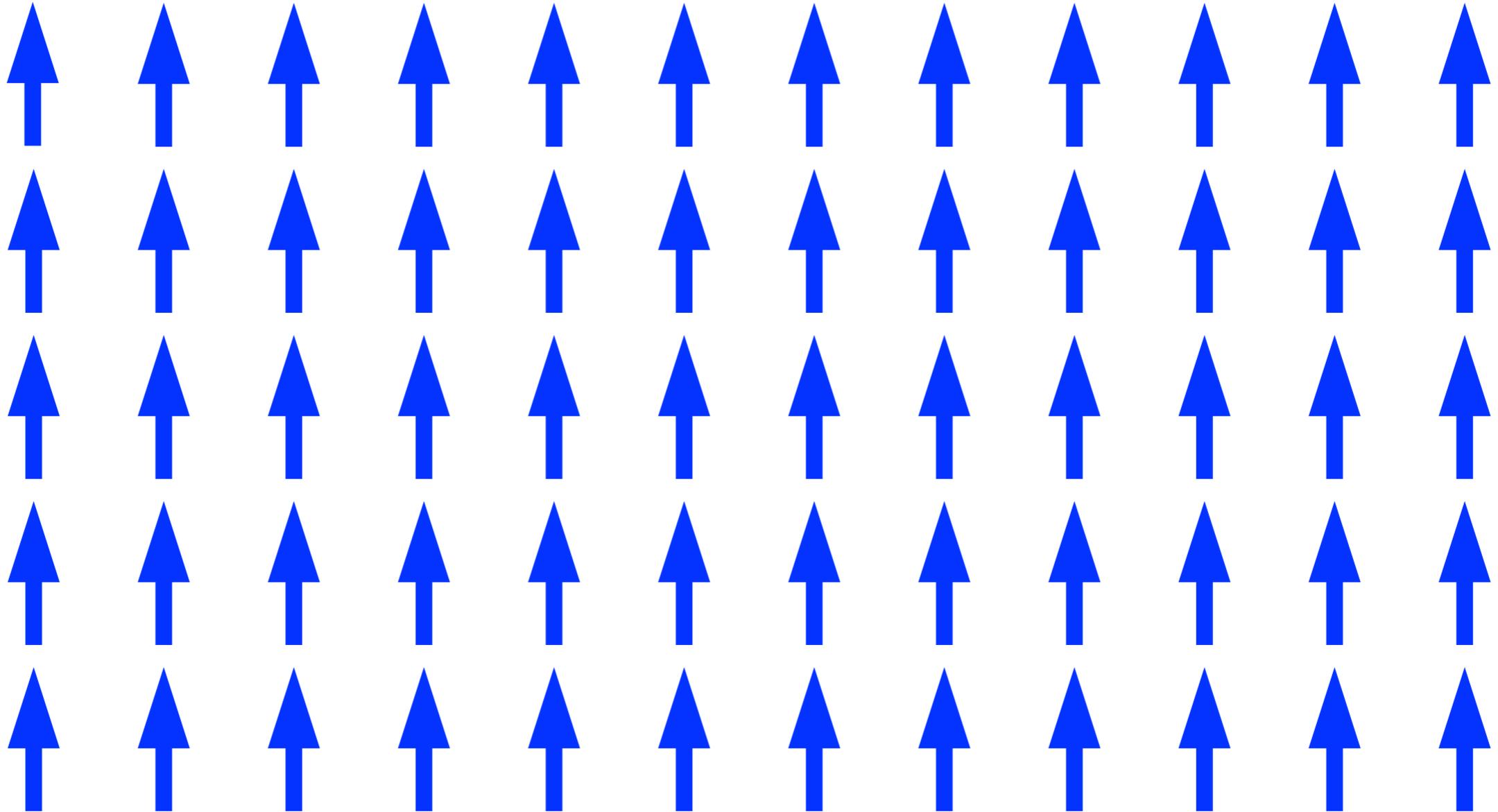
特定の方向が無い：平均的にすべての方向が同等

# 温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



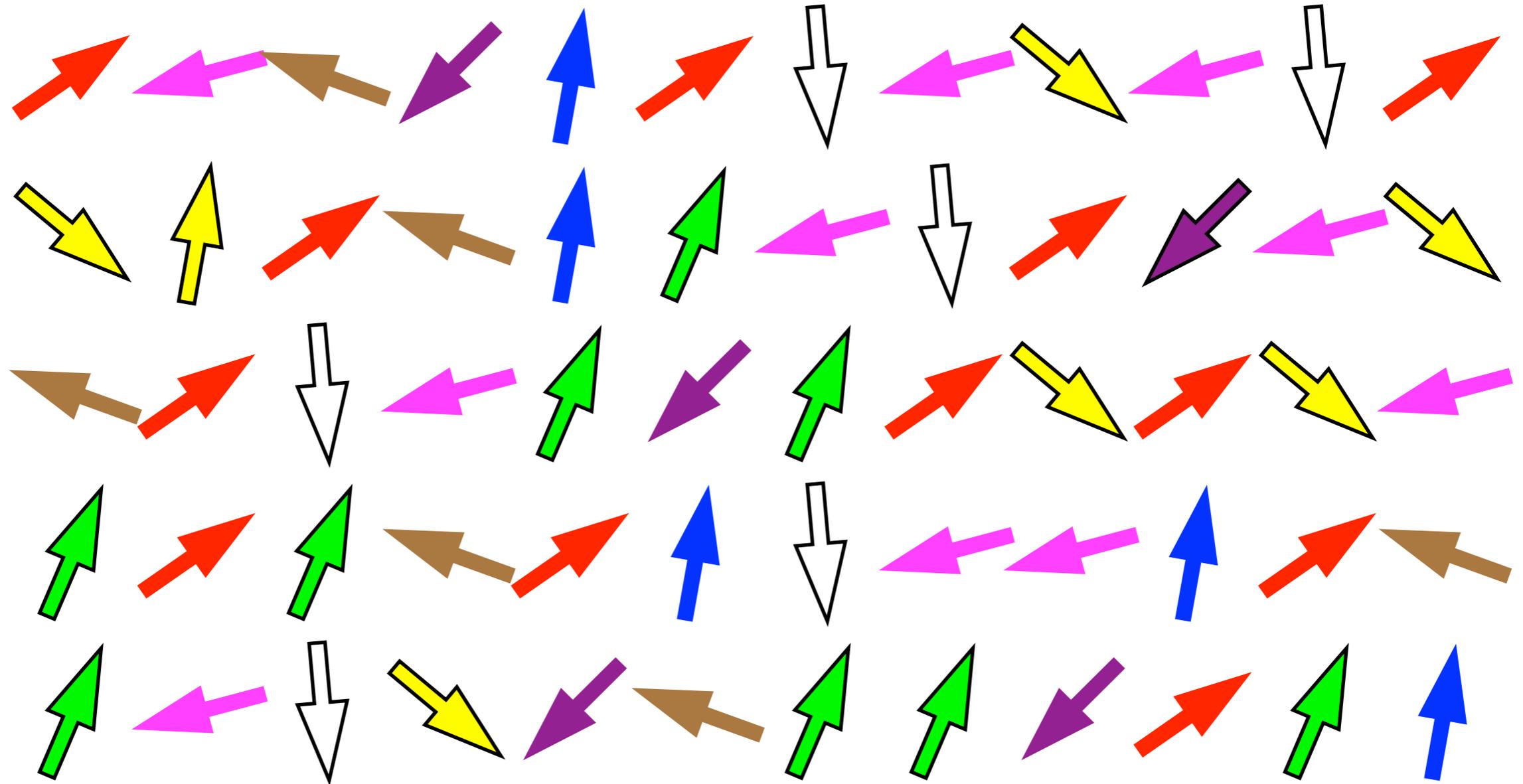
特定の方角を自発的に物質が選び出す！

# 温度低下による自発的対称性の破れ

Disordered

高温相

Symmetric



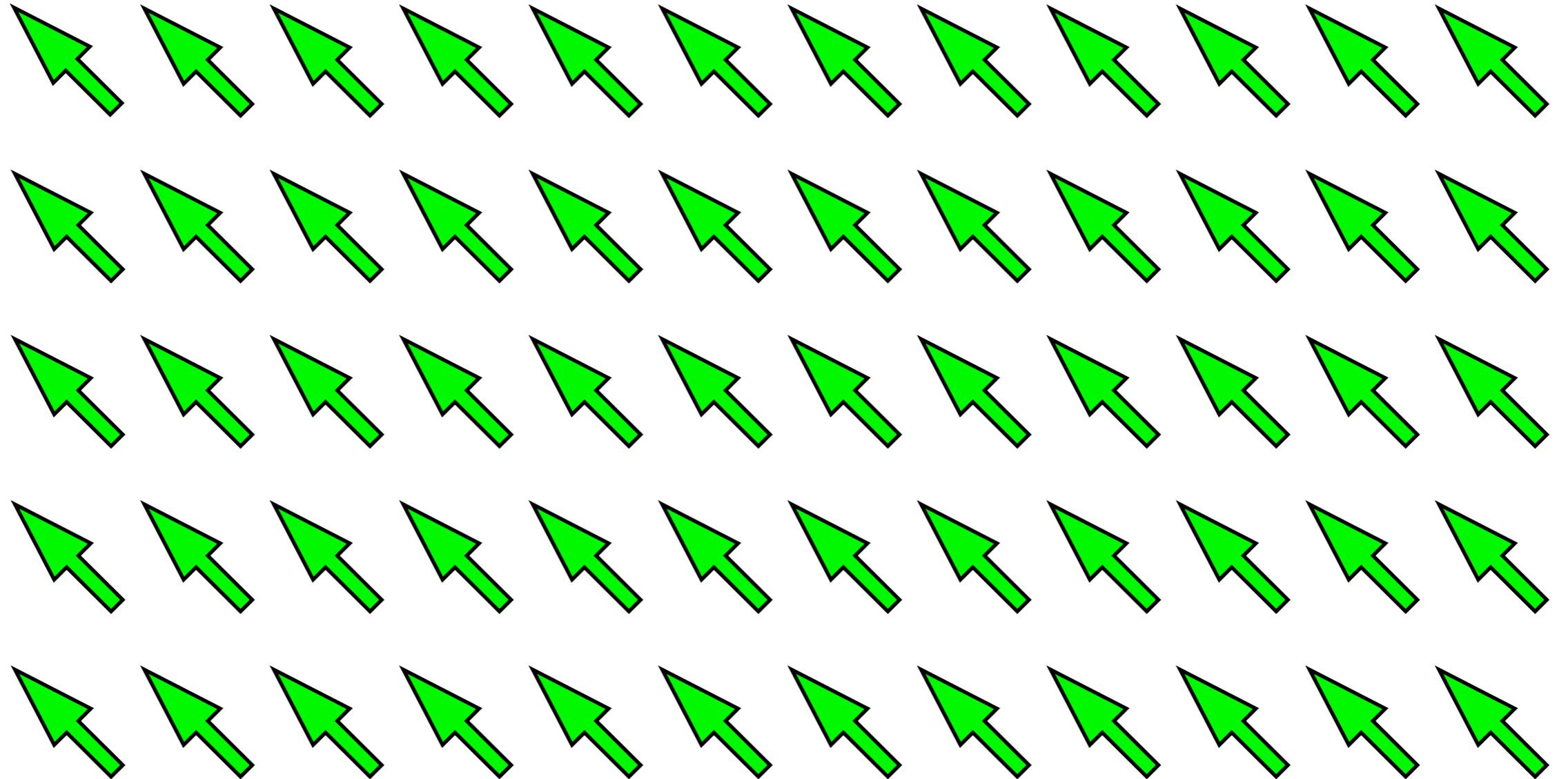
特定の方向が無い：平均的にすべての方向が同等

# 温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



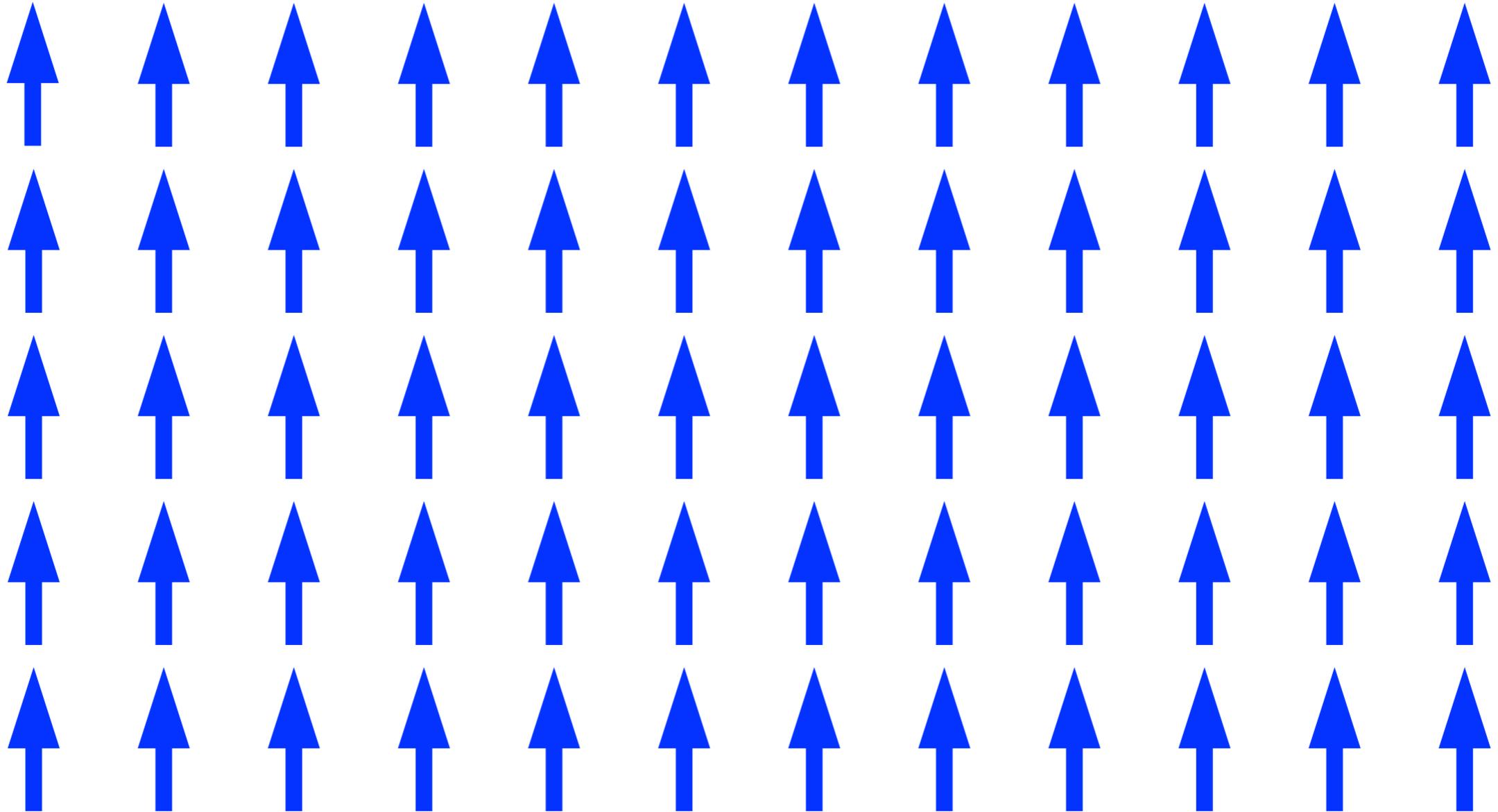
特定の方角を自発的に物質が選び出す！

# 温度低下による自発的対称性の破れ

*Ordered*

低温相

*Broken Symmetry*



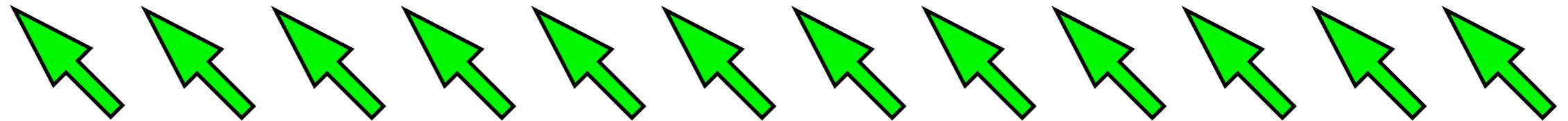
どの方向への対称性の破れ、秩序もやはり同等！！

# 温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



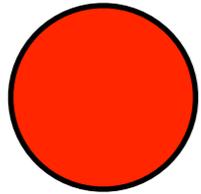
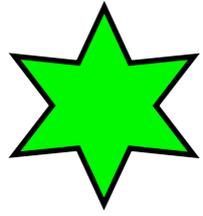
自発的対称性の破れは  
自由度無限大になって初めて起こり得る  
(無限大の系)

*More is Different*

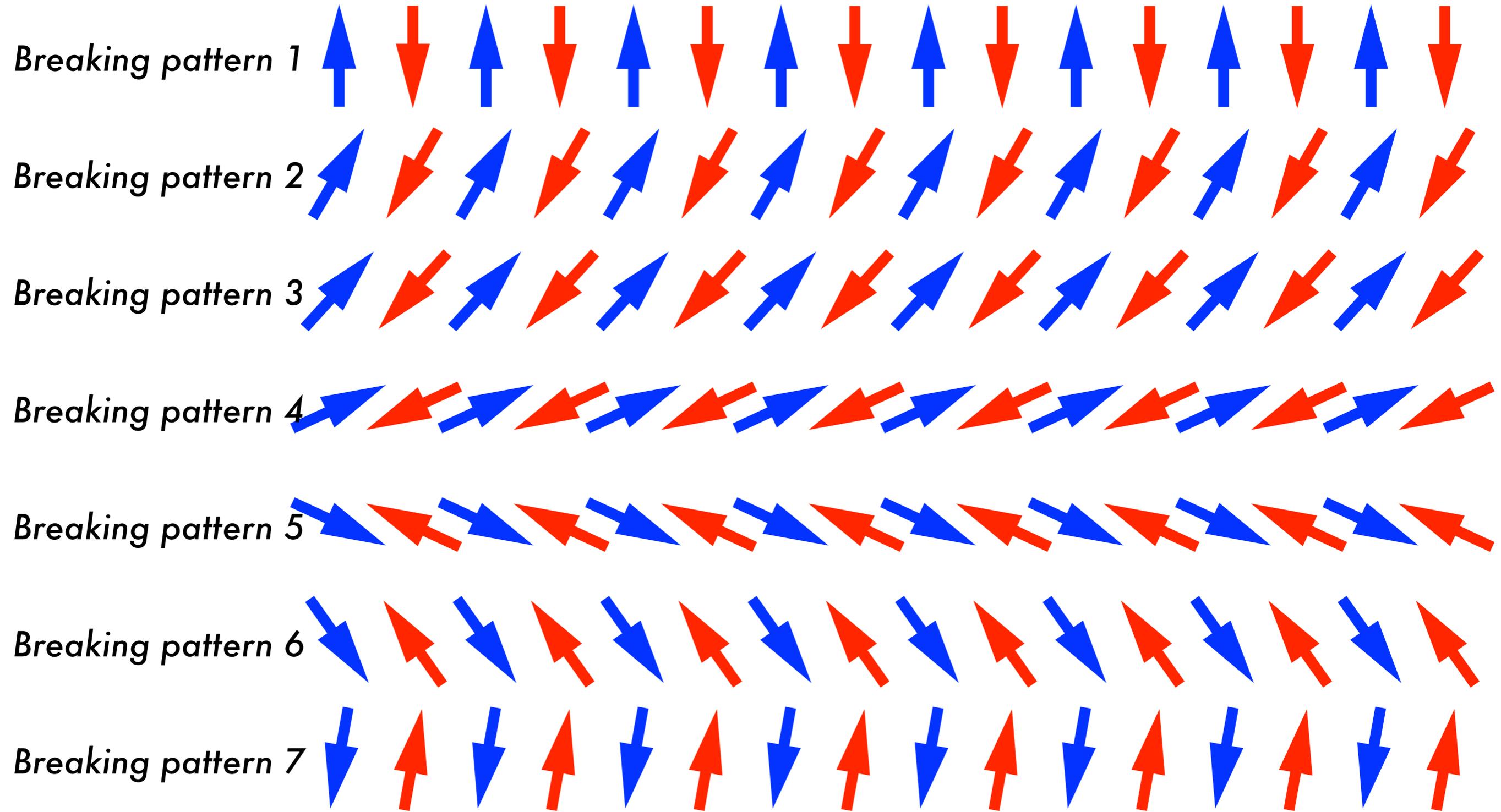
by P.W.Anderson

どの方向への対称性の破れ、秩序もやはり同等！！

# 連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



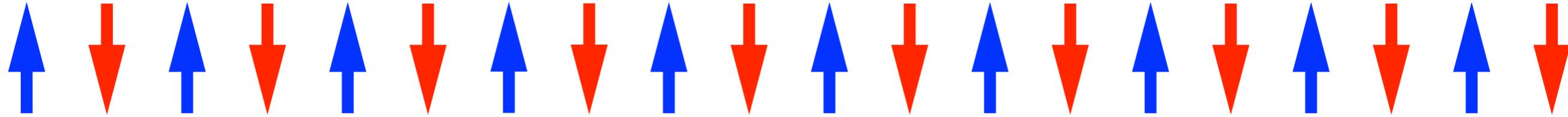
同等な方向が連続無限個ある！



# 連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す

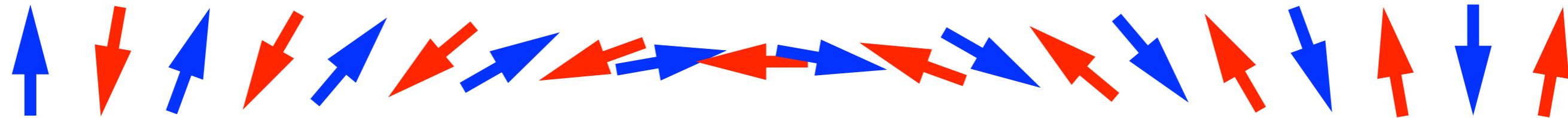
理想的な対称性の破れ



ゆっくりしたパターンの乱れ



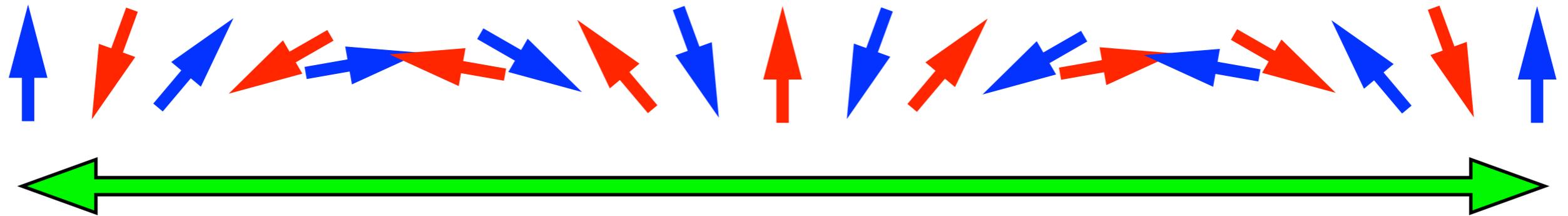
もっとゆっくりしたパターンの乱れ



パターンの乱れの波長

# 連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す



パターンの乱れの波長

長波長のゆっくりした乱れは殆どエネルギーのロスが無い

音波的振る舞い *magnon* (磁性波)

*phonon* (格子振動の波)

*Nambu-Goldston Boson*

Gapless excitation with  
Spontaneous Symmetry Breaking