

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*

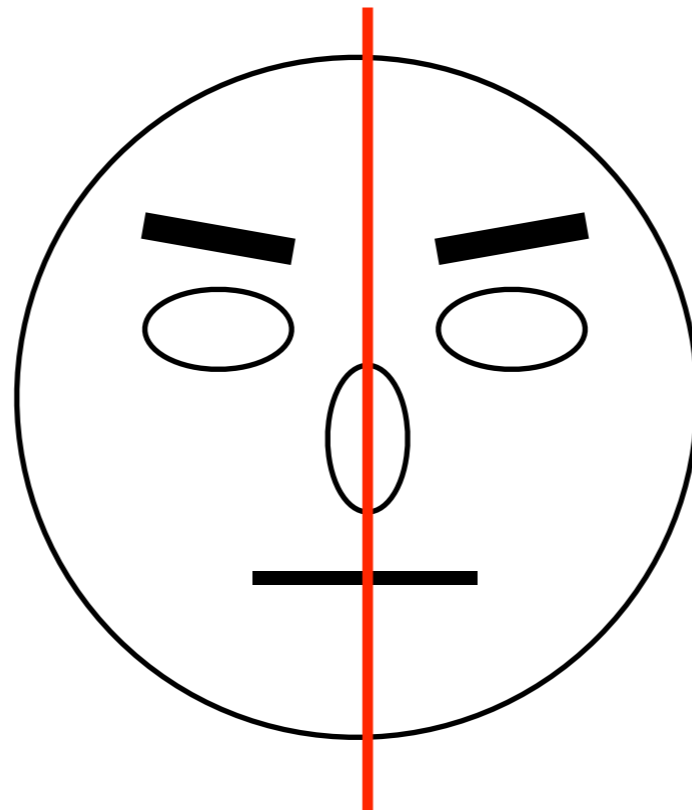
Use it for particle physics : Y. Nambu

*Universal & Basics
Concept
in the whole physics*

物理物理学における“対称性ウセイ”

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

美人は顔のつくりが左右対称 ？

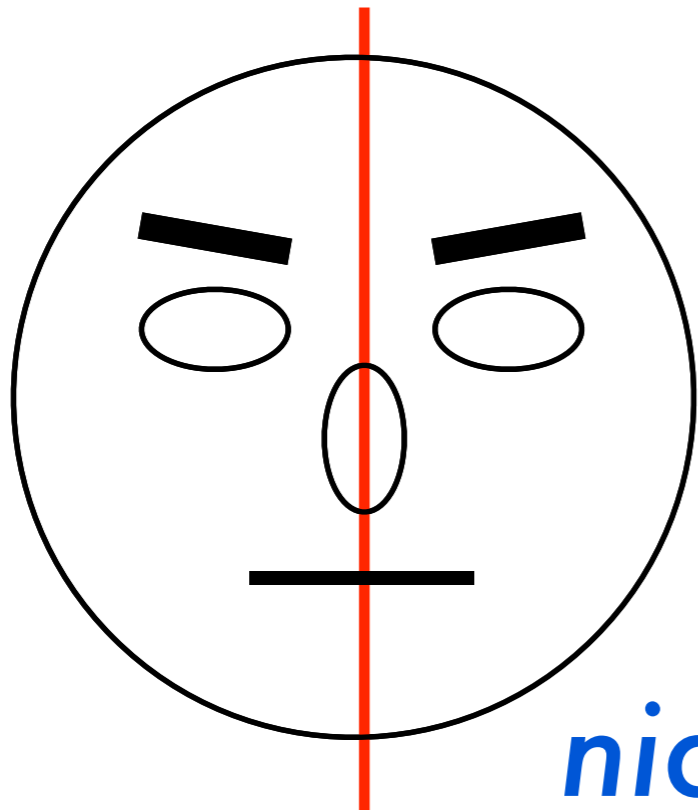


物理学における対称性

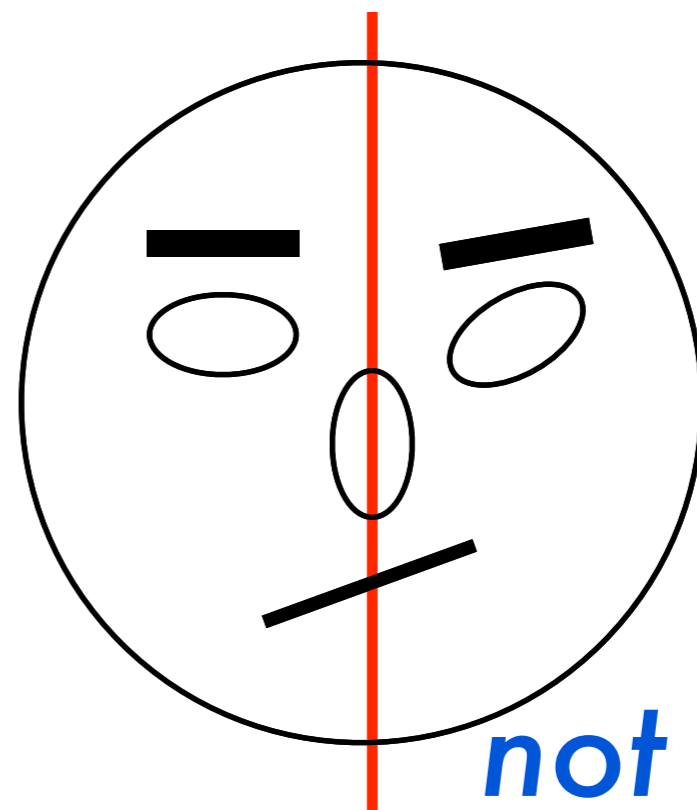
対称性 *Symmetry*

対称？

美人は顔のつくりが左右対称 ？



nice !



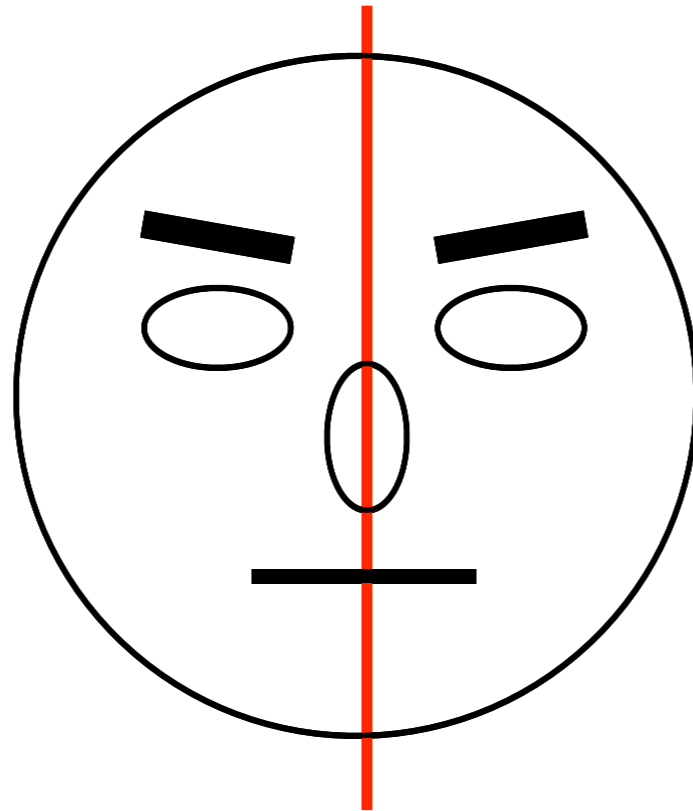
not so much

物理学における対称性

対称性

Symmetry

左右対称

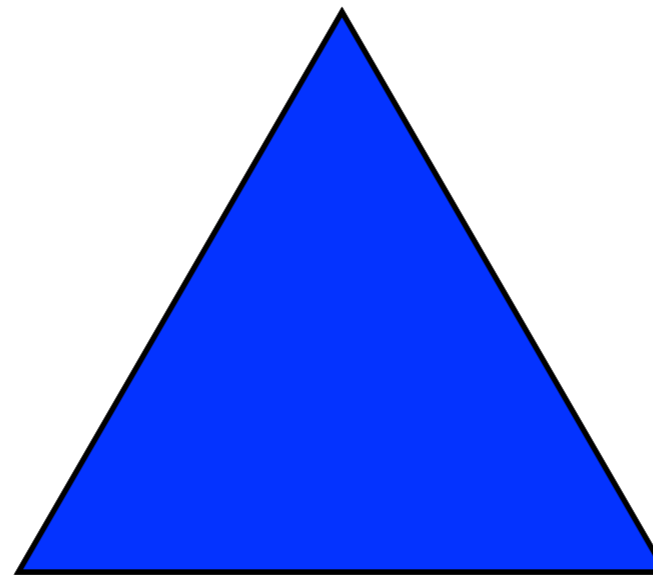


ひっくり返す

「対称操作」

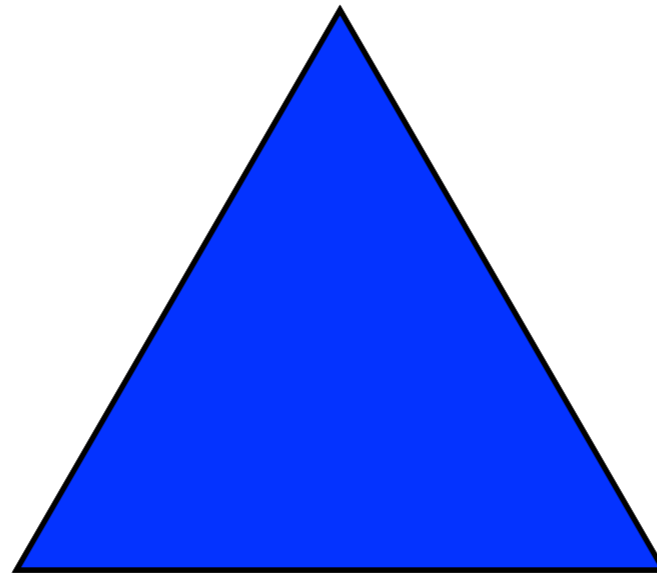
Symmetry

「いろいろな対称操作」



Symmetry

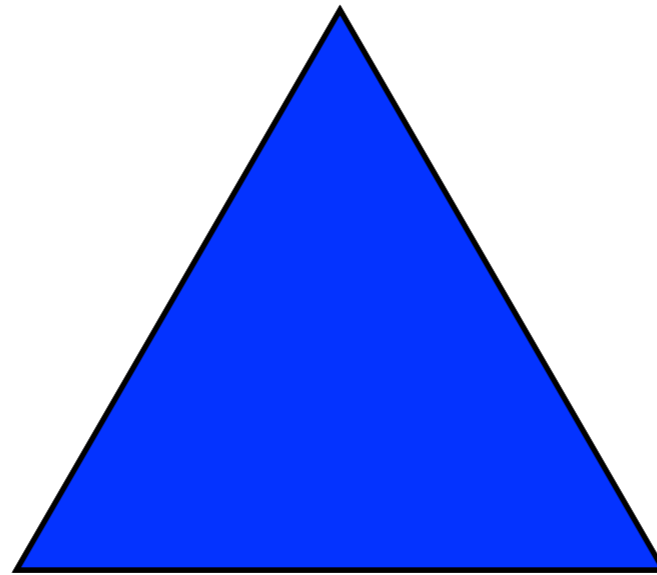
「いろいろな対称操作」



120度回転

Symmetry

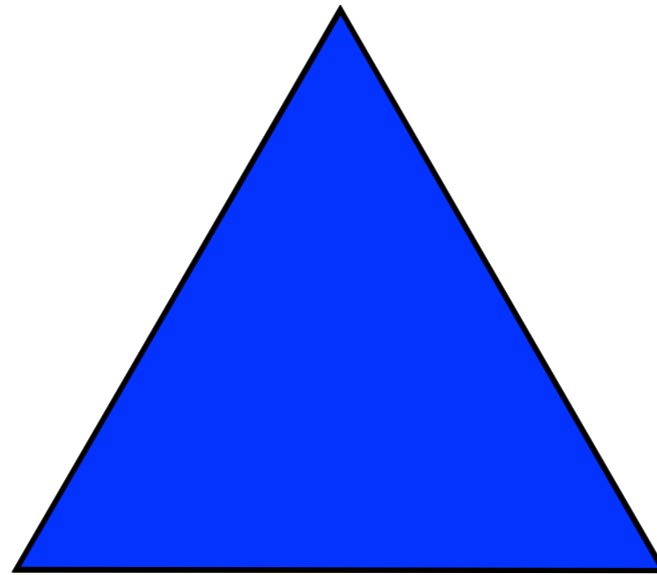
「いろいろな対称操作」



240度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

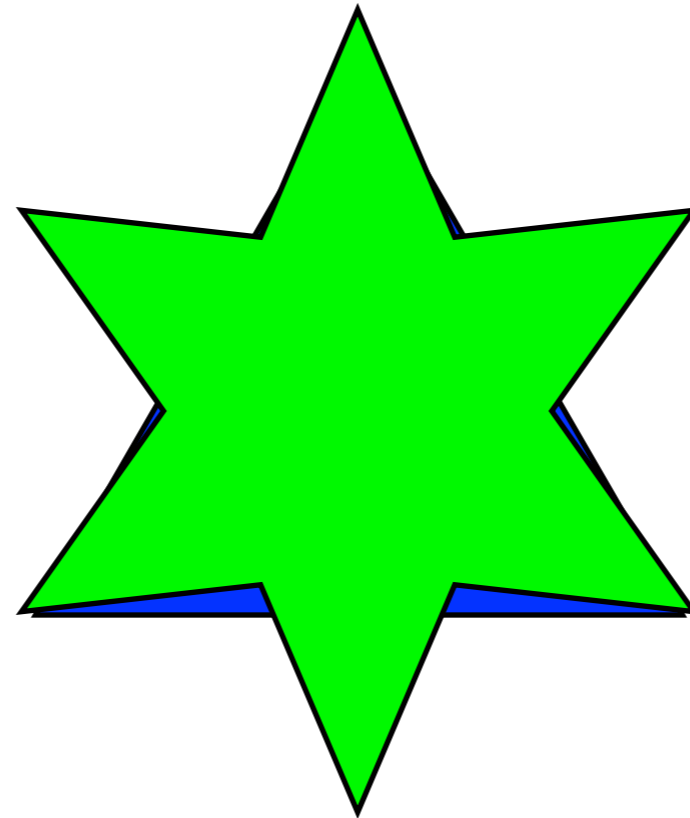
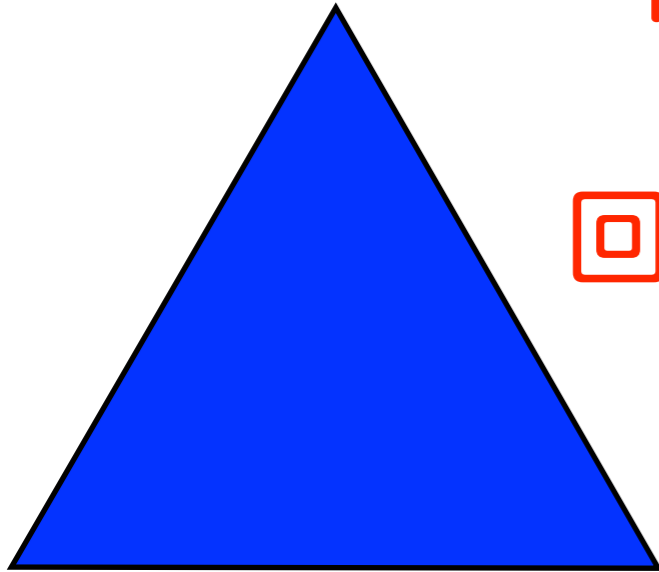


360度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

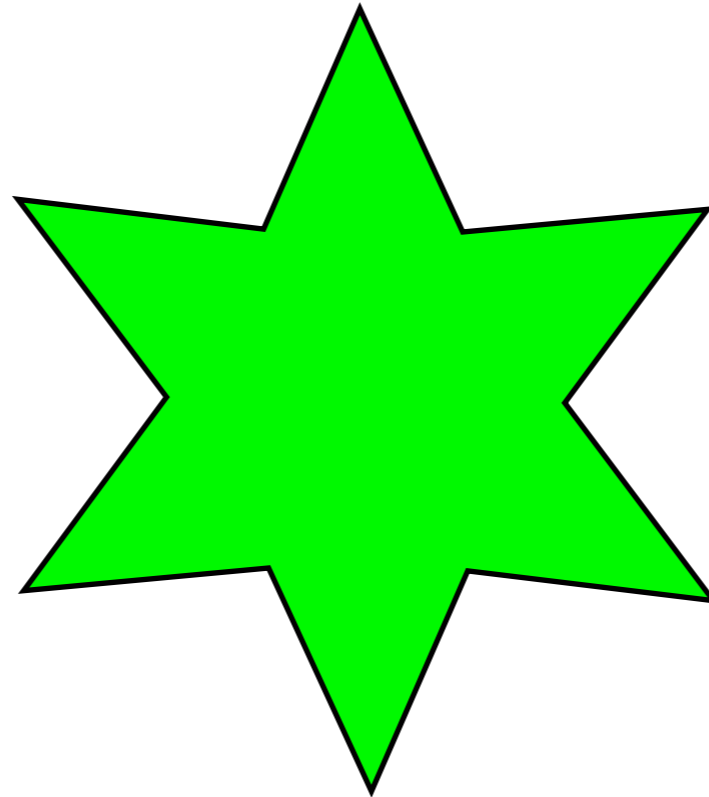
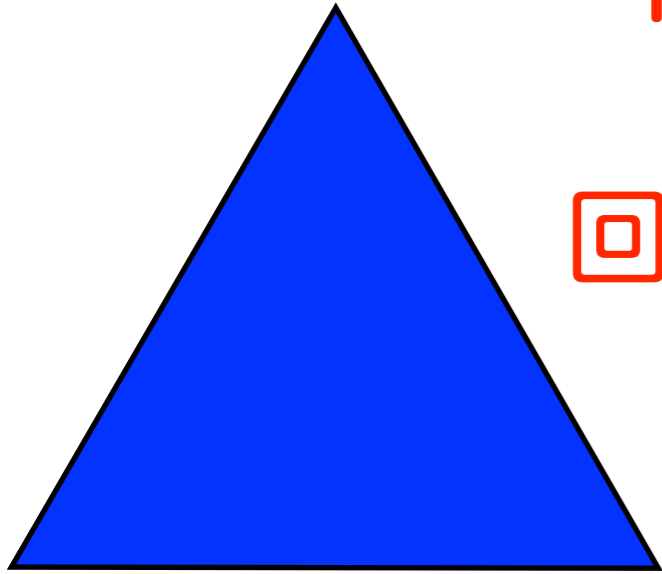
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

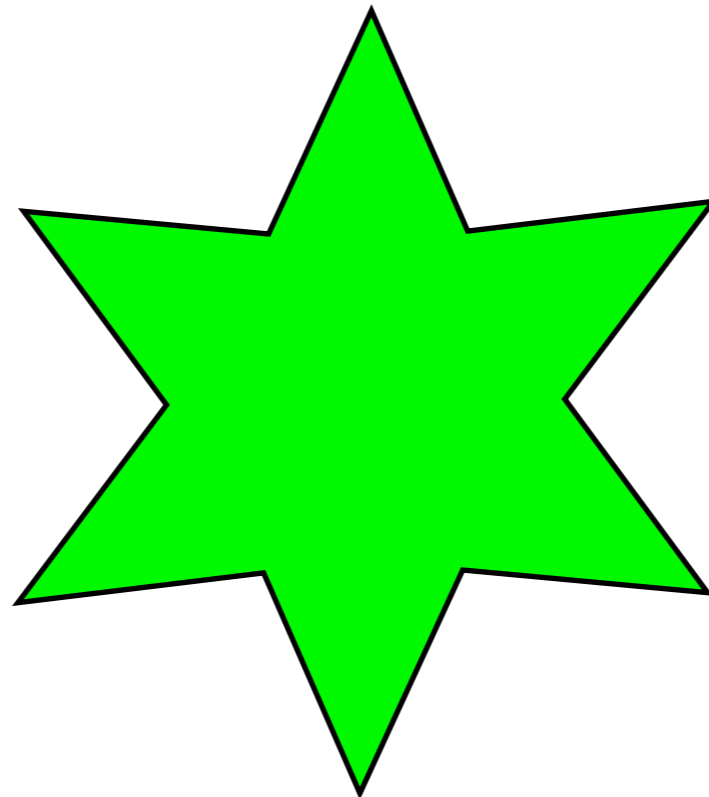
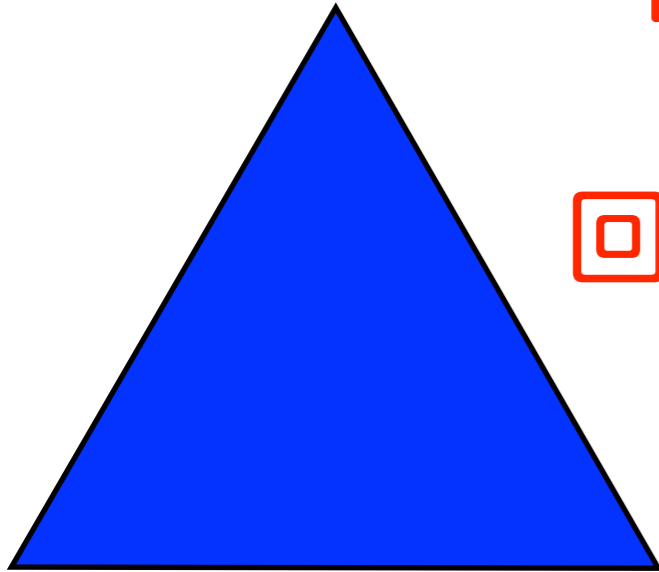


60度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

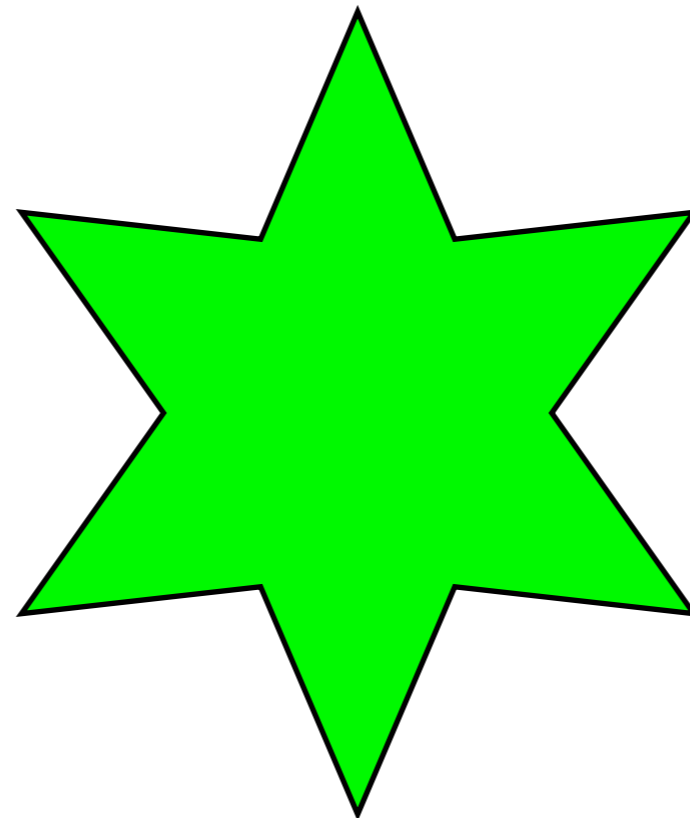
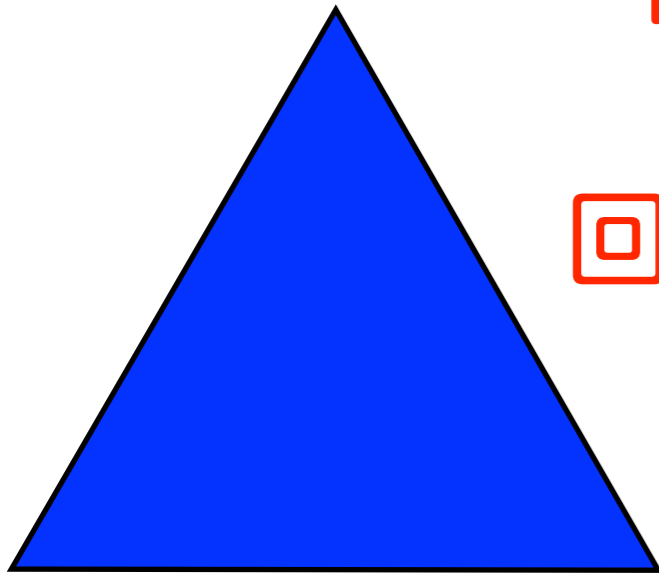


120度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

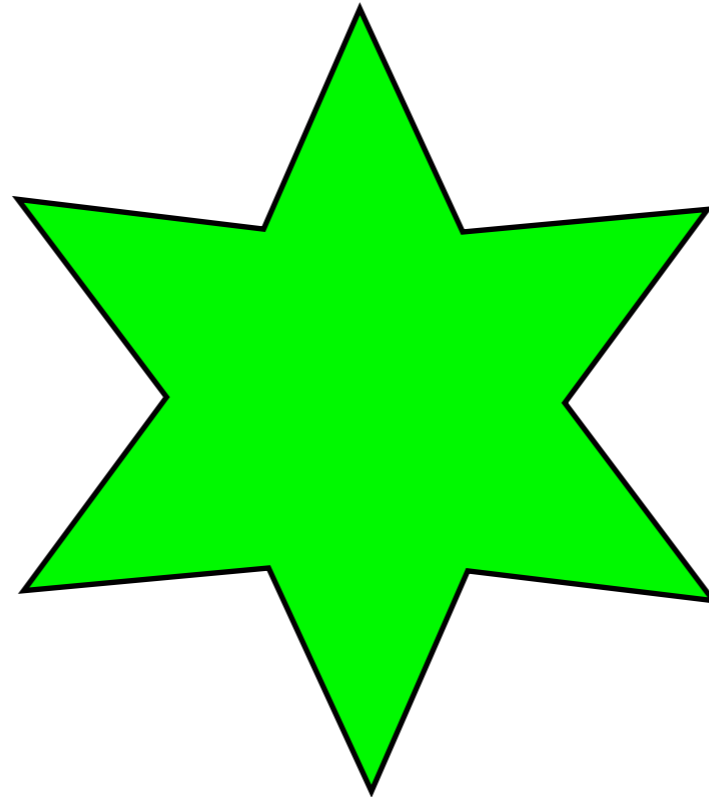
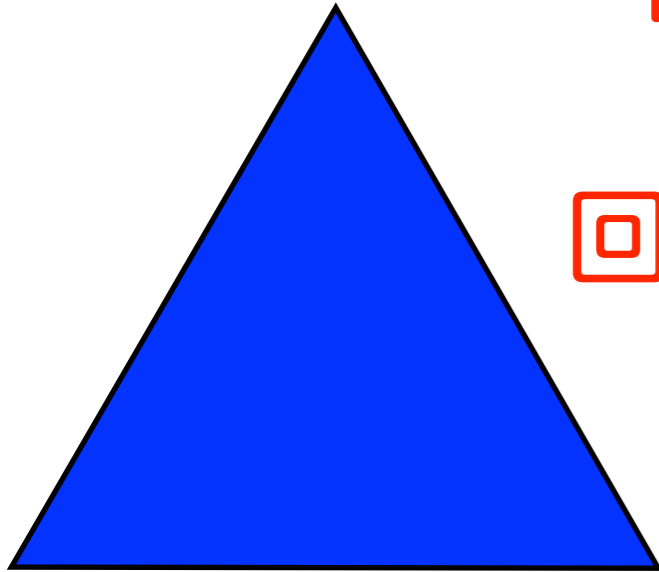


180度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

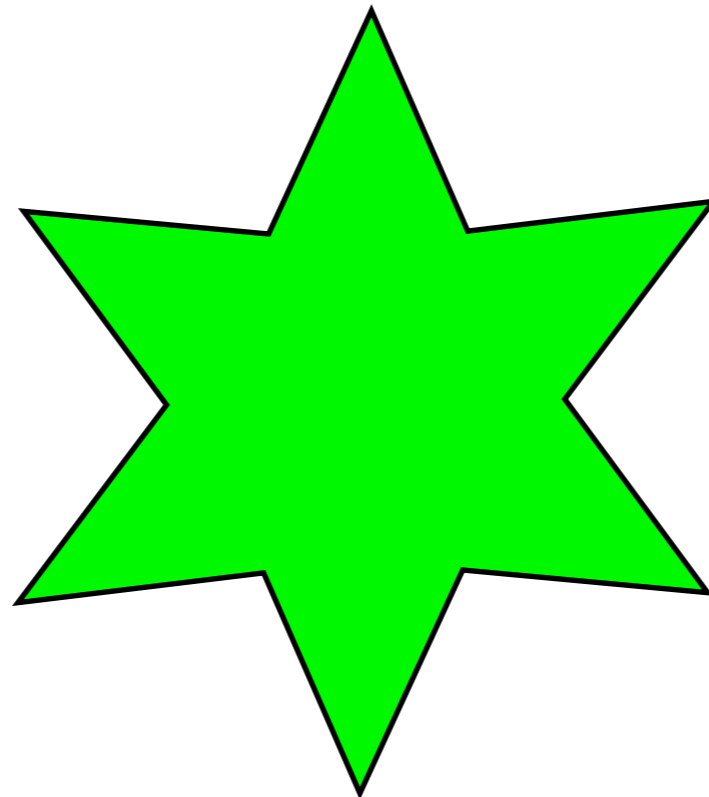
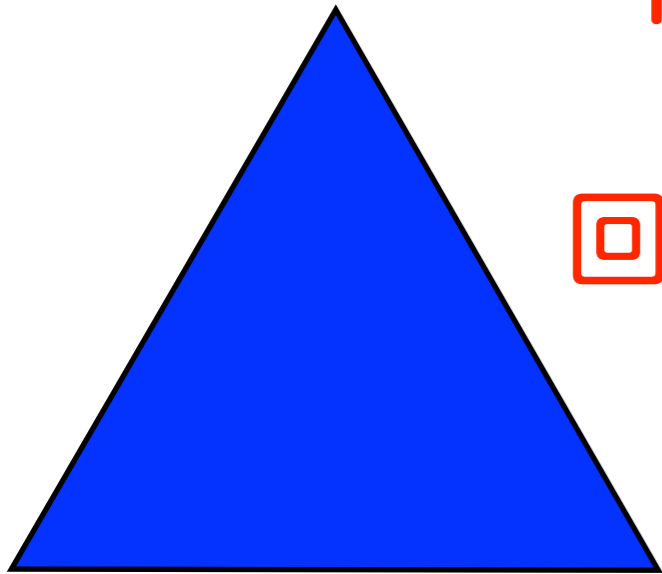


240度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

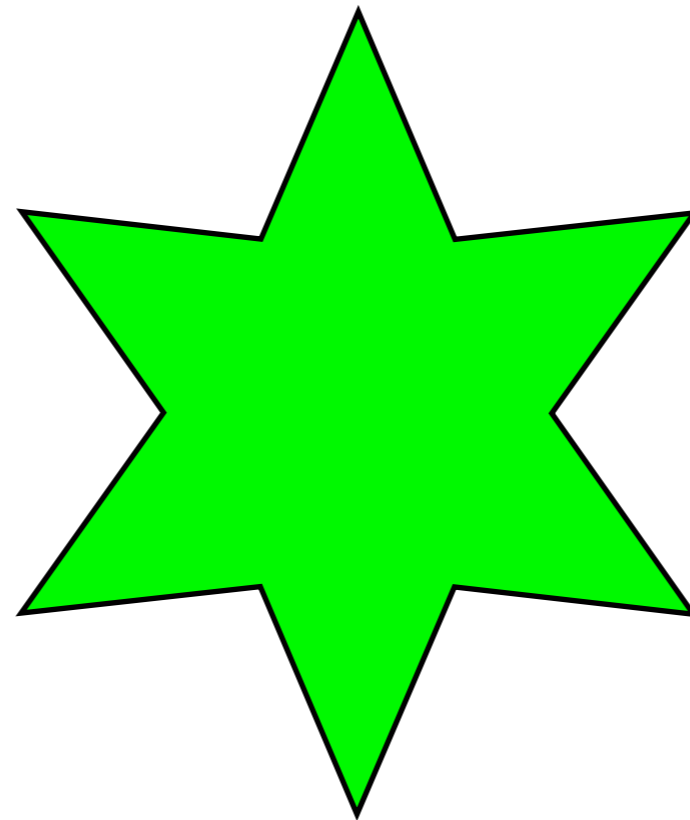
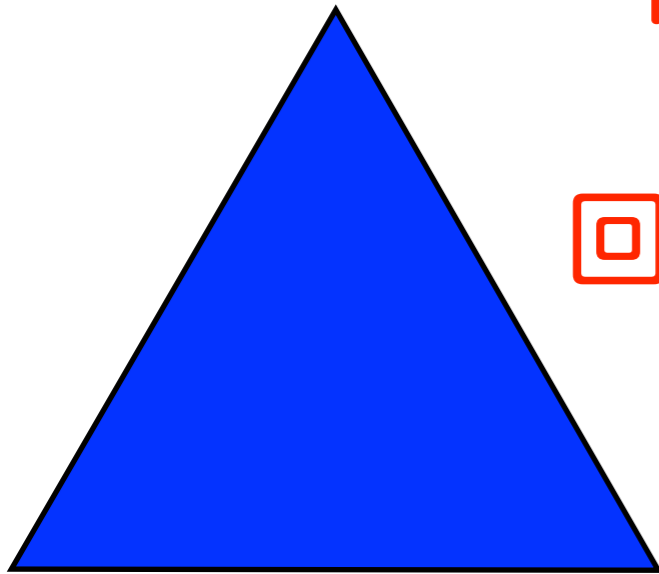


300度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

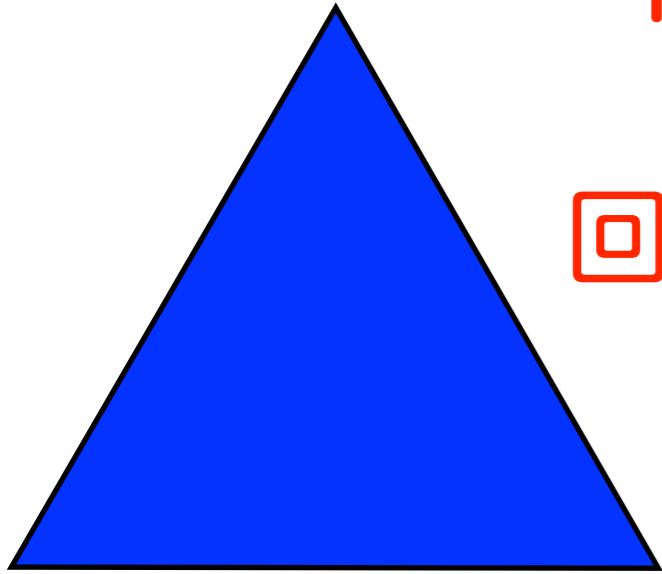


360度回転

Symmetry

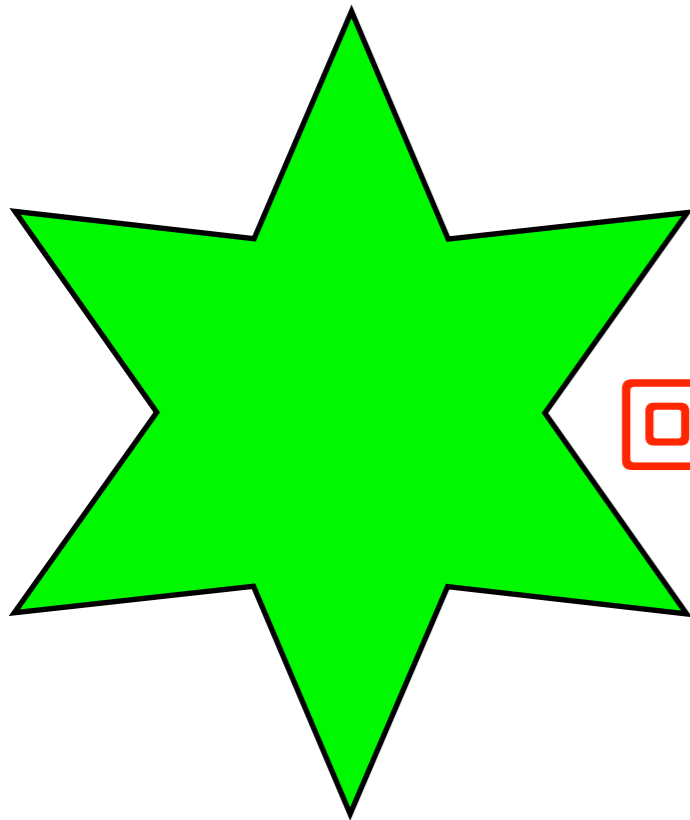
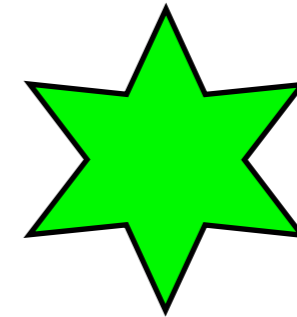
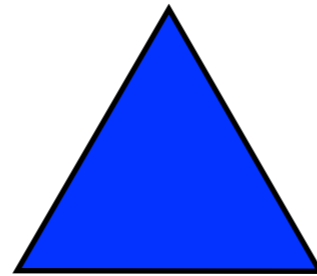
「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度



low symmetry

high symmetry



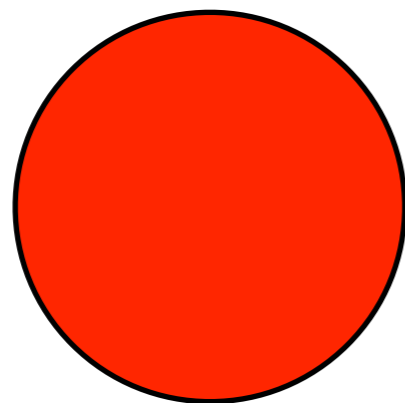
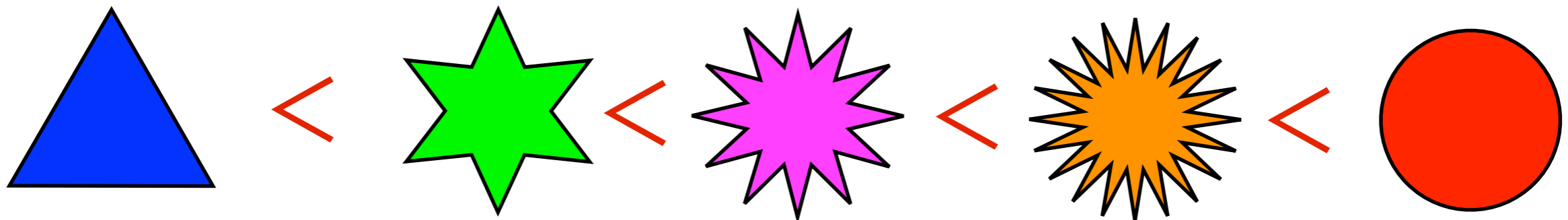
回転角：60度、120度、180度、
240度、300度、360度

対称性の定量化

「いろいろな対称操作」

low symmetry

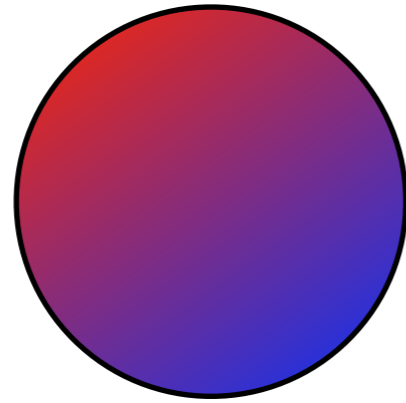
high symmetry



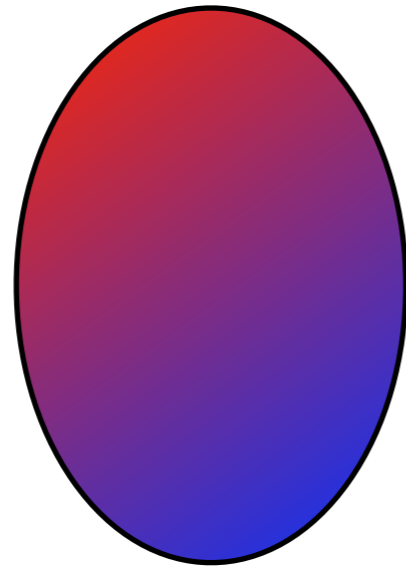
「連続対称性」

Nambu-Goldston Boson

対称性の低下と対称性の破れ



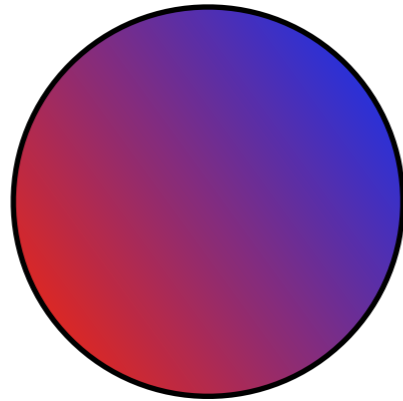
high symmetry



low symmetry

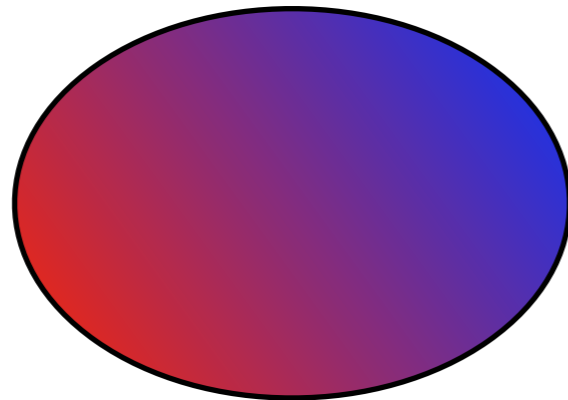
対称性の低下と対称性の破れ

OK!



high symmetry

No good!

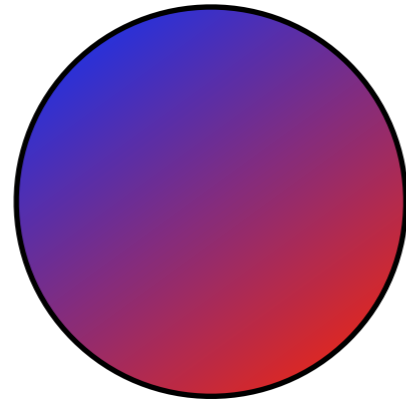


low symmetry

90度回転

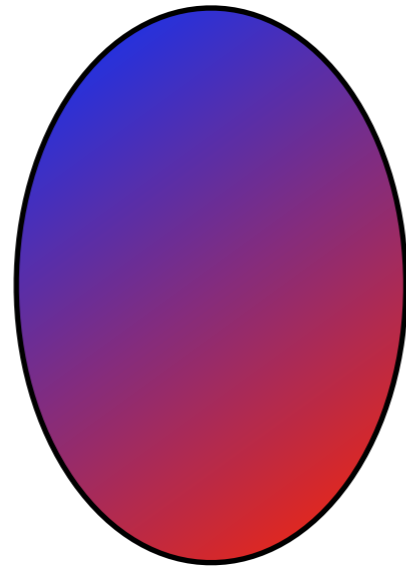
対称性の低下と対称性の破れ

OK!



high symmetry

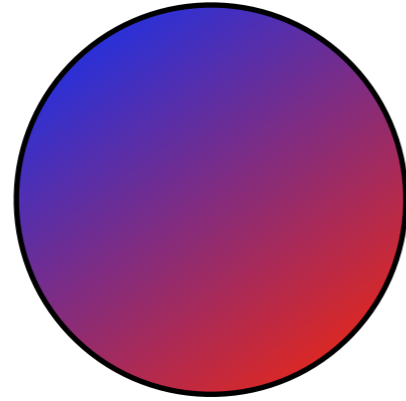
OK!



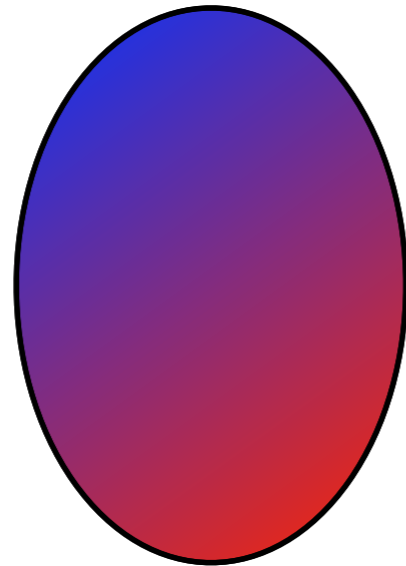
low symmetry

180度回転

対称性の低下と対称性の破れ



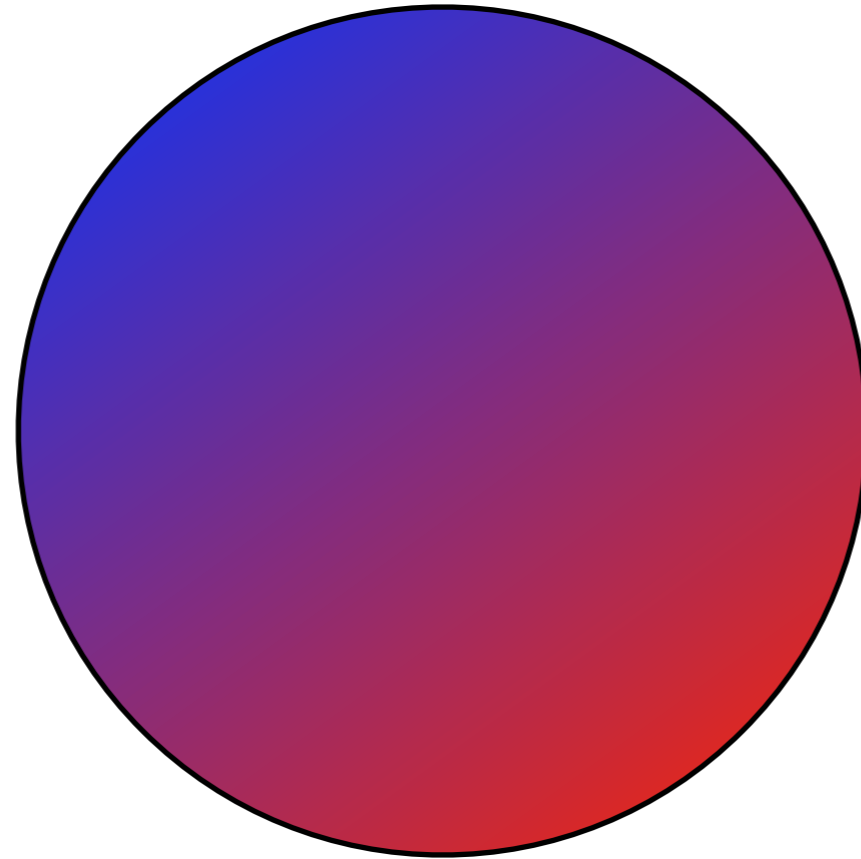
high symmetry



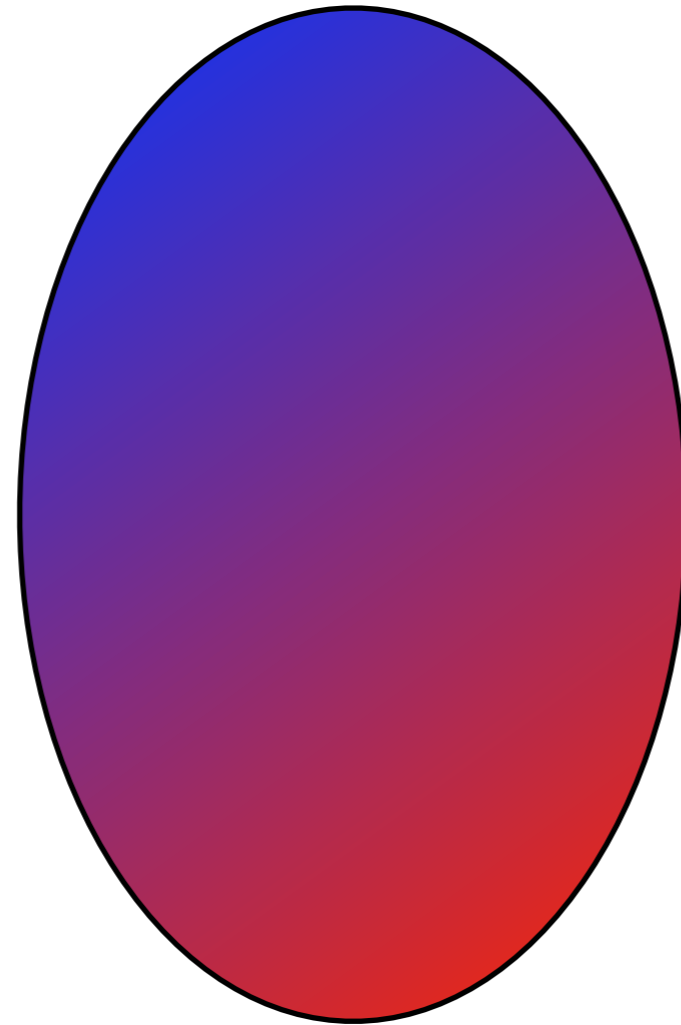
low symmetry

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)

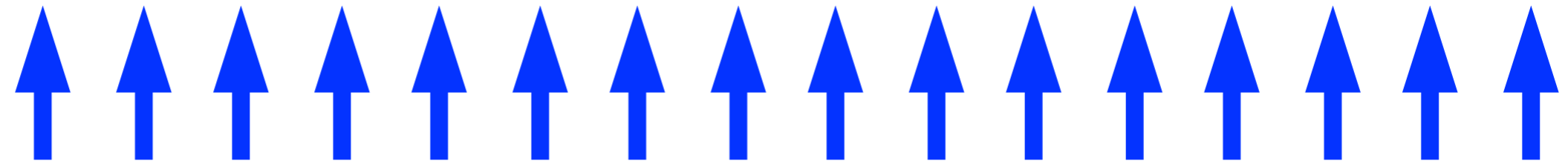
秩序と秩序変数

★ 磁気秩序 (磁石)

室温の磁石

(秩序正しい)

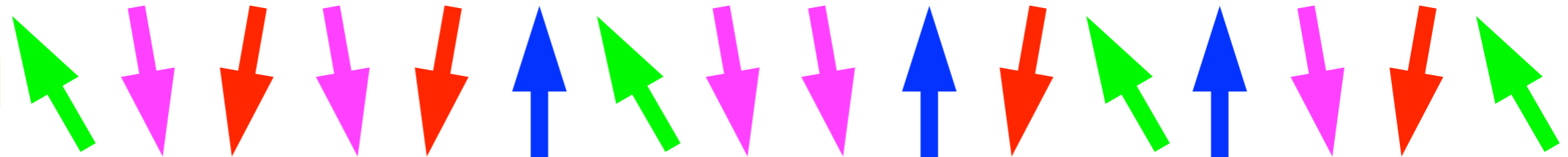
秩序相



磁石をバーナーで熱すると

(でたらめ)

無秩序相

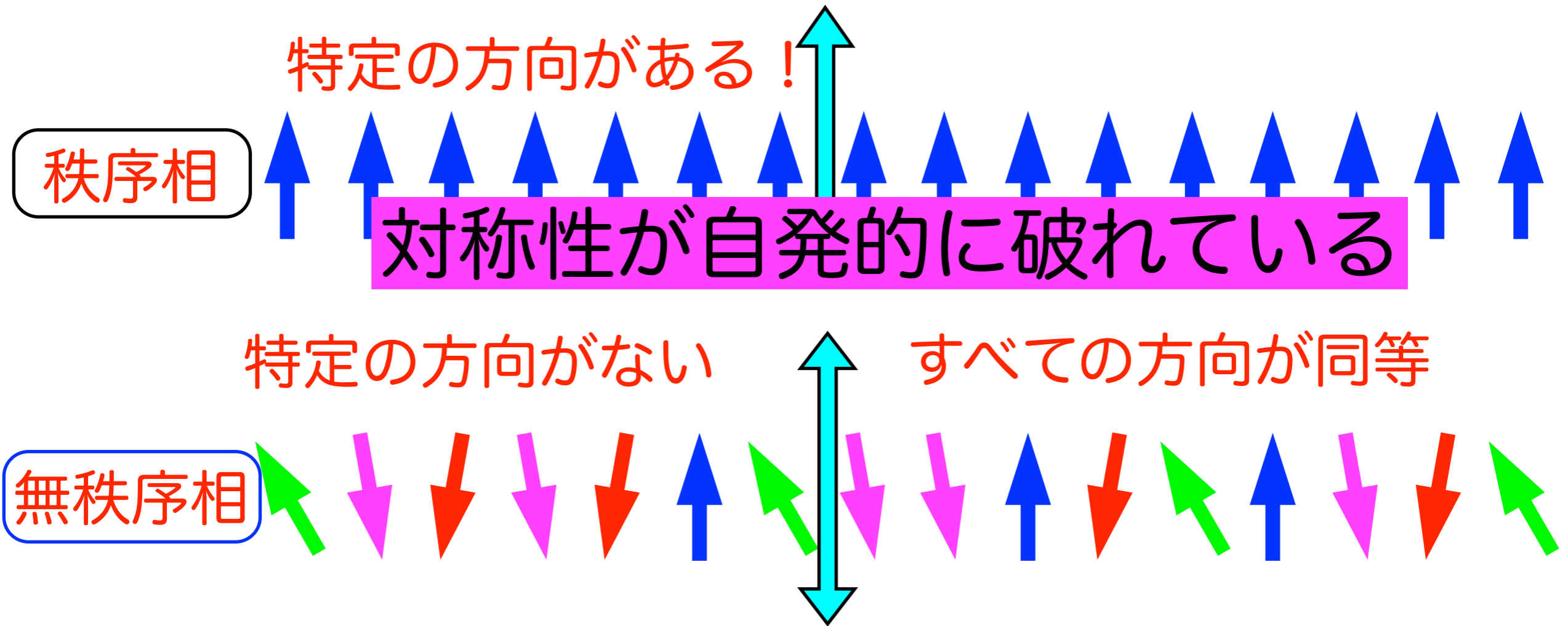


秩序変数：矢印！ “vector”

$\vec{m}(\vec{r})$ 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 |

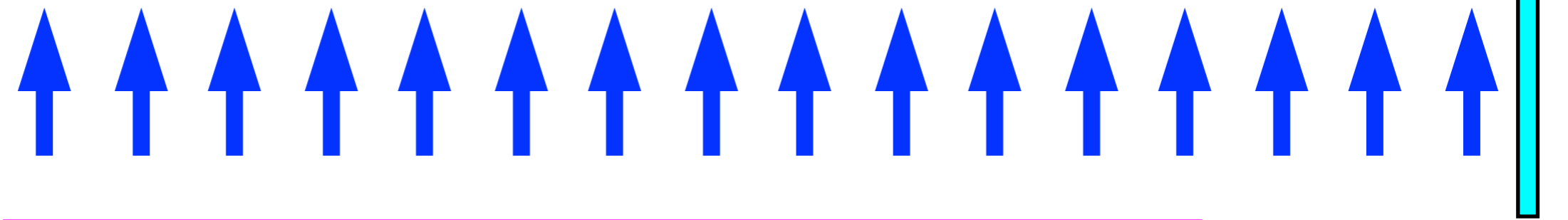
対称性の自発的破れ Spontaneous Symmetry Breaking

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



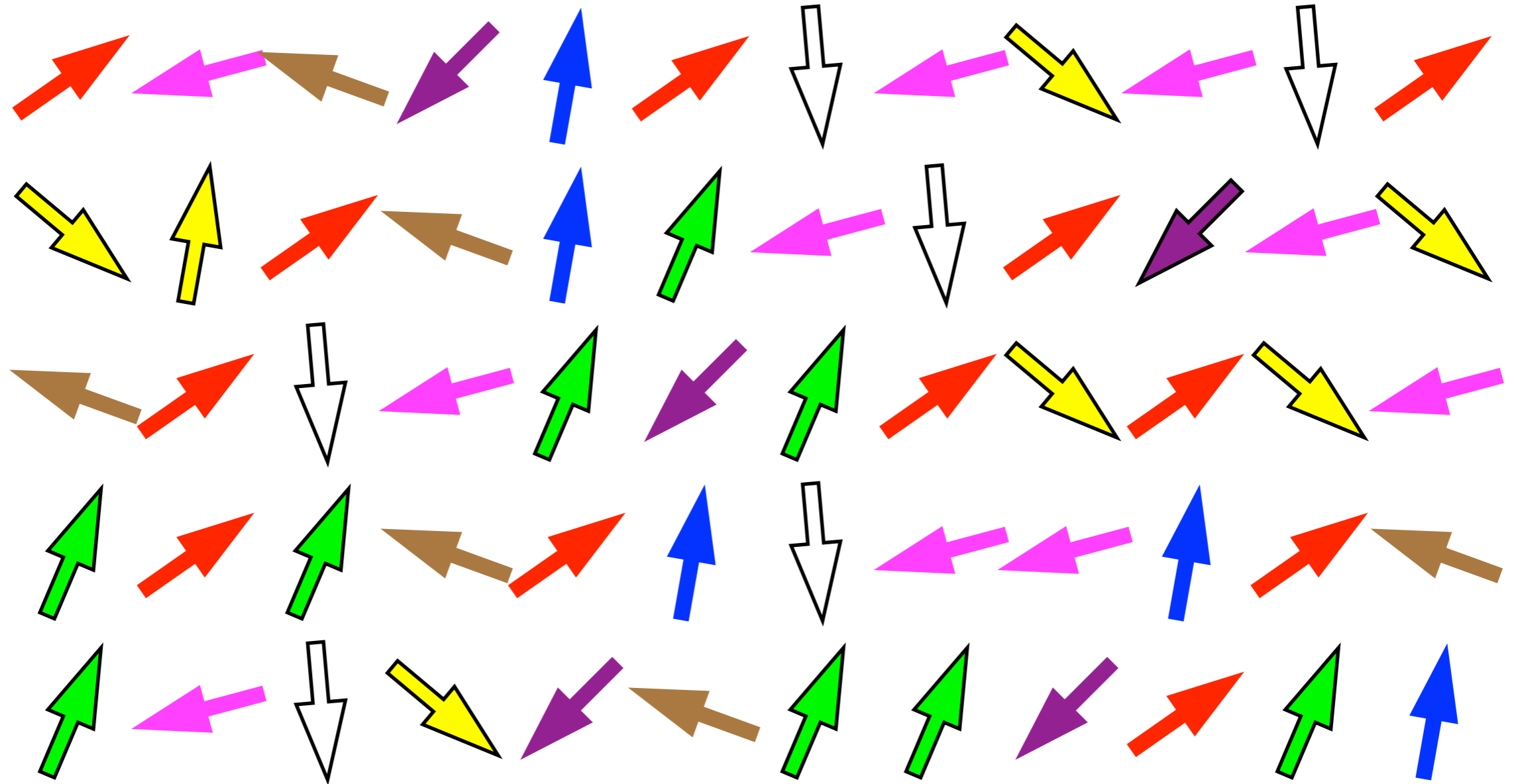
対称性が自発的に破れている

温度低下による自発的対称性の破れ

Disordered

高温相

Symmetric



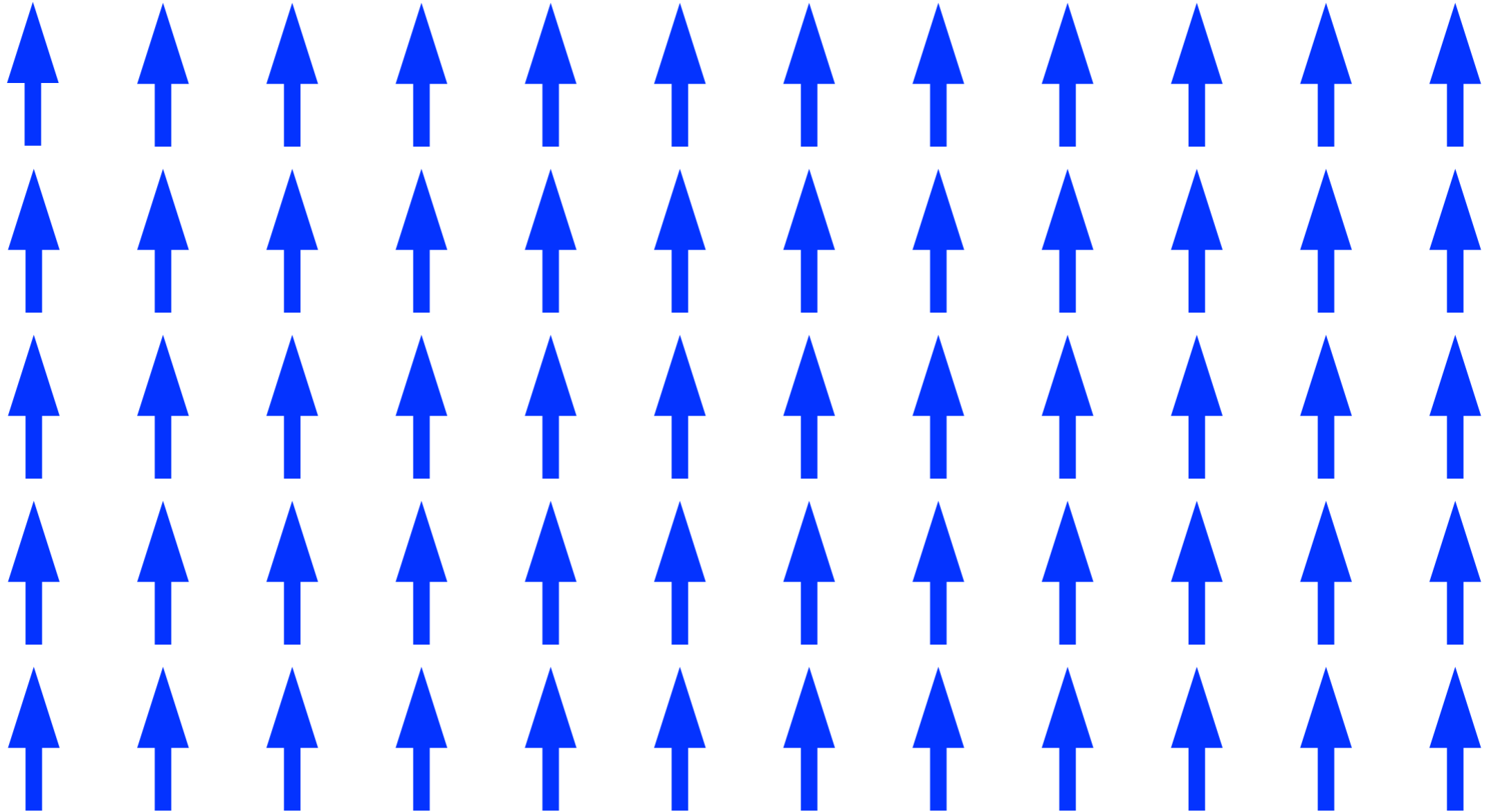
特定の方向が無い：平均的にすべての方向が同等

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



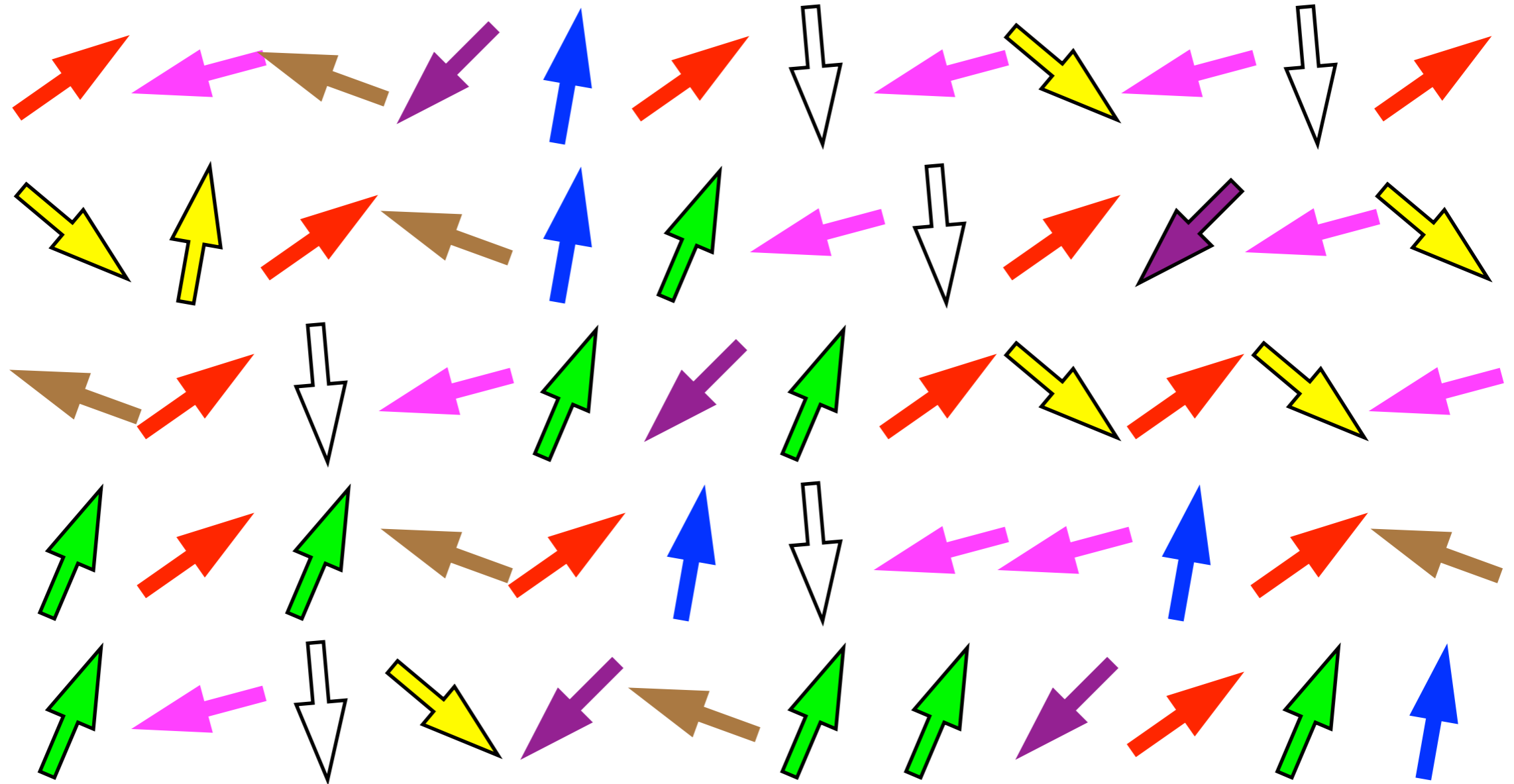
特定の方角を自発的に物質が選び出す！

温度低下による自発的対称性の破れ

Disordered

高温相

Symmetric



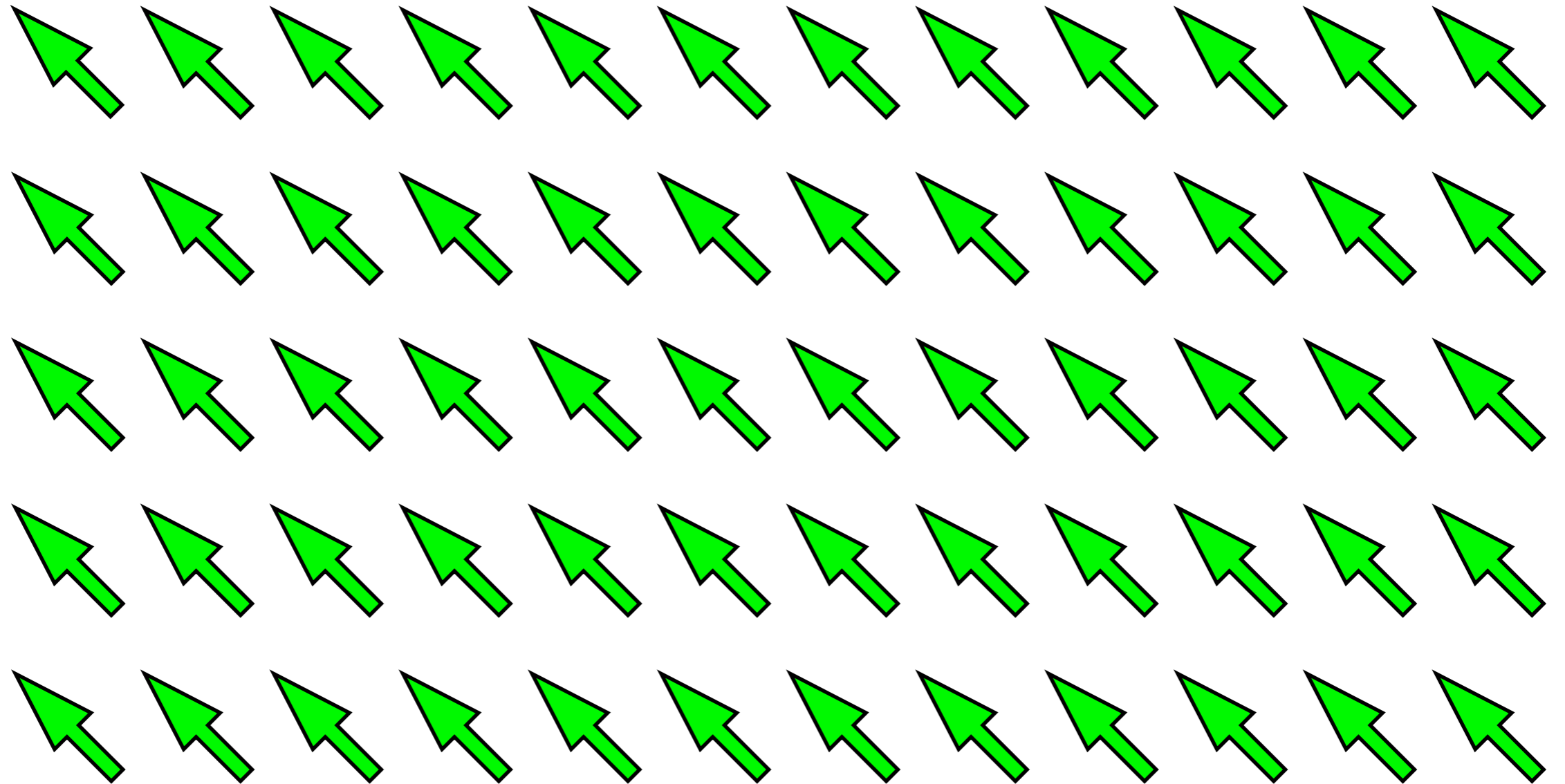
特定の方向が無い：平均的にすべての方向が同等

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



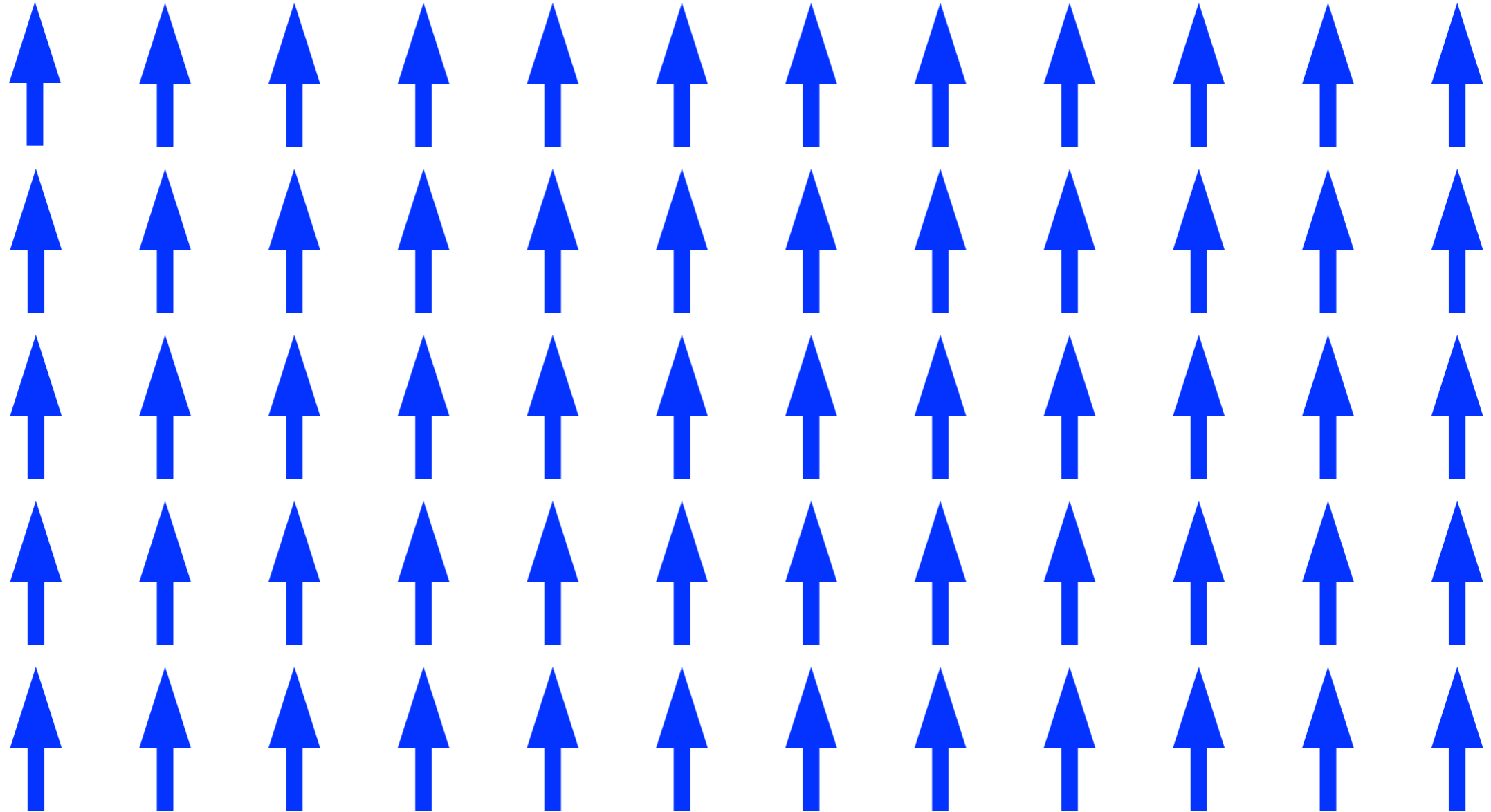
特定の方角を自発的に物質が選び出す！

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



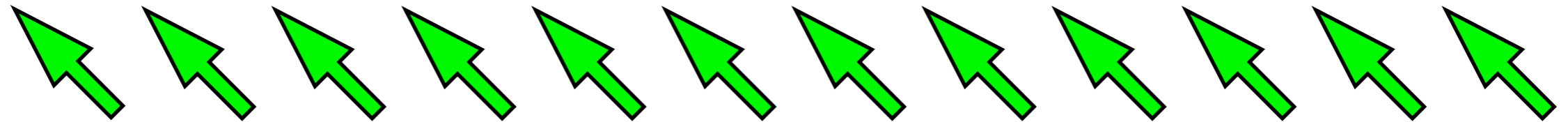
どの方向への対称性の破れ、秩序もやはり同等！！

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



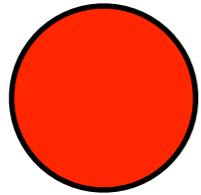
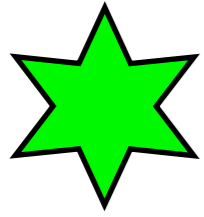
自発的対称性の破れは
自由度無限大になって初めて起こり得る
(無限大の系)

More is Different

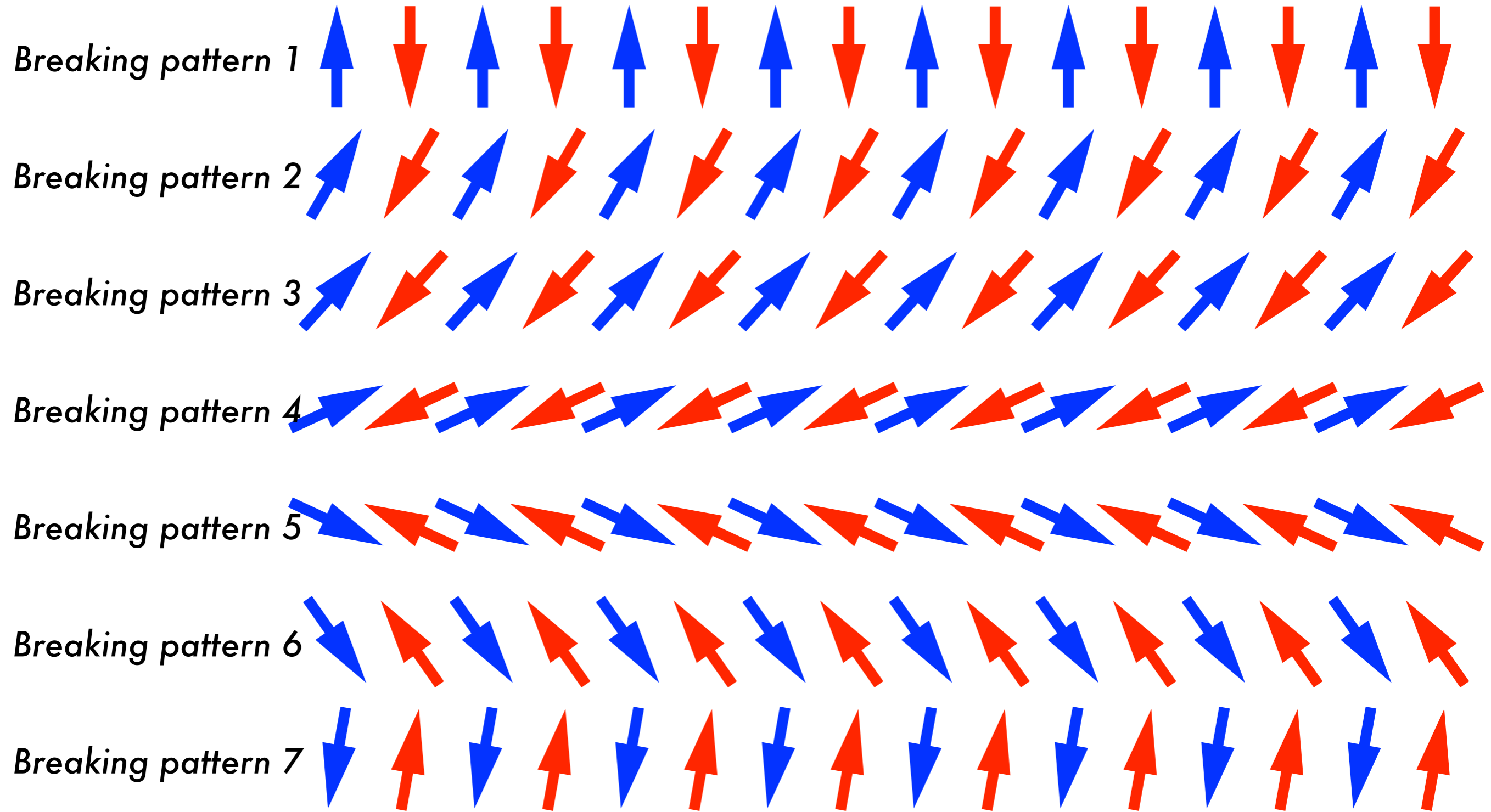
by P.W.Anderson

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*



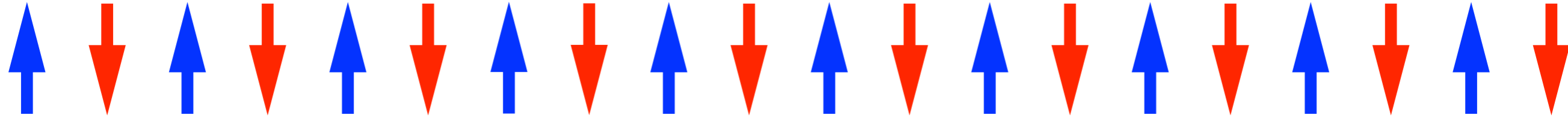
同等な方向が連続無限個ある！



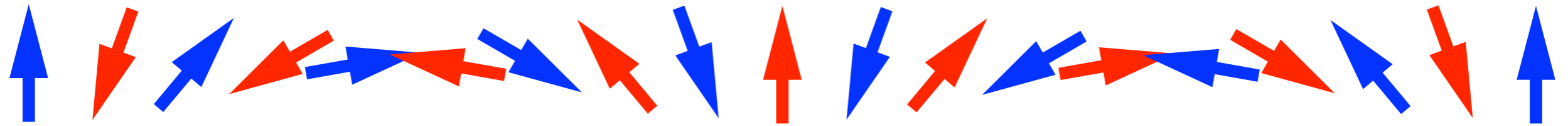
連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す

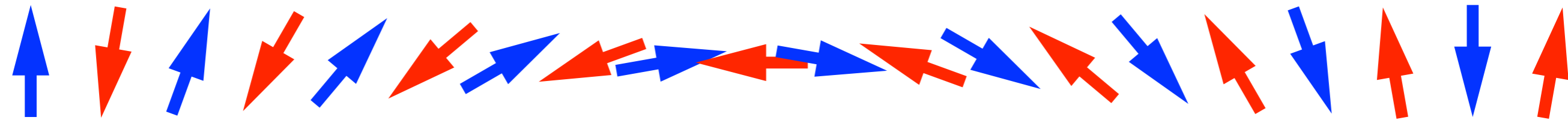
理想的な対称性の破れ



ゆっくりしたパターンの乱れ



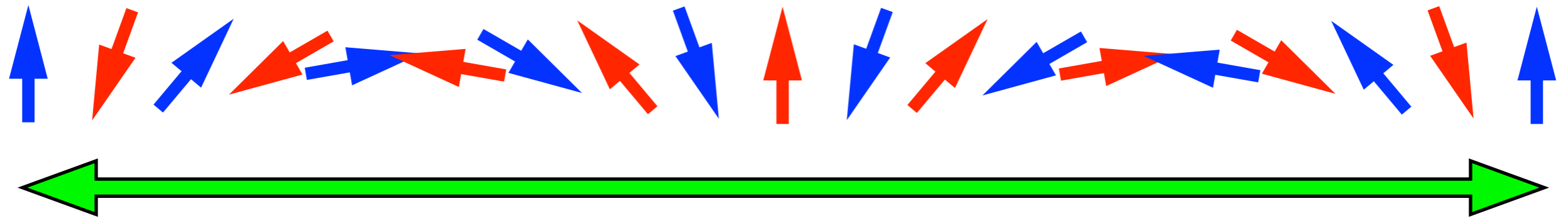
もっとゆっくりしたパターンの乱れ



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