

バルクエッジ対応の物理：背景 1

background 1

対称性の破れと低エネルギー励起

symmetry breaking & low energy excitations

Before bulk-edge correspondence

筑波大学大学院数理物質科学研究科

物理学専攻

初貝 安弘

Yasuhiro Hatsugai



The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Makoto Kobayashi



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Toshihide Maskawa



The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Makoto Kobayashi



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Toshihide Maskawa

Spontaneous Broken Symmetry



The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Makoto Kobayashi



© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

Toshihide Maskawa

Before “bulk-edge correspondence”

- ★ 物理学における対称性
 - ★ 対称性とはなにか
 - ★ 対称性の”大きさ”。そして破れ
- ★ 物質の相と対称性の破れ
 - ★ 対称性の破れと秩序変数
- ★ 自発的対称性の破れと南部ゴールドストーンボゾン
 - ★ 磁気秩序と磁性体
 - ★ *Nambu-Goldstone Boson*

*Spontaneous
Broken
Symmetry*

Use it for particle physics : Y. Nambu

Universal & Basics

Concept

in the whole physics

物理学における”タイショウセイ”

物理学における”タイショウセイ”

対称

物理学における”タイショウセイ”

対照

物理学における”タイショウセイ”

対象

物理学における”タイショウセイ”

~~対照~~

対称

~~対象~~

物理学における対称性

対称性

物理学における対称性

対称性 *Symmetry*

物理学における対称性

対称性 *Symmetry*

対称？

物理学における対称性

対称性 *Symmetry*

対称？

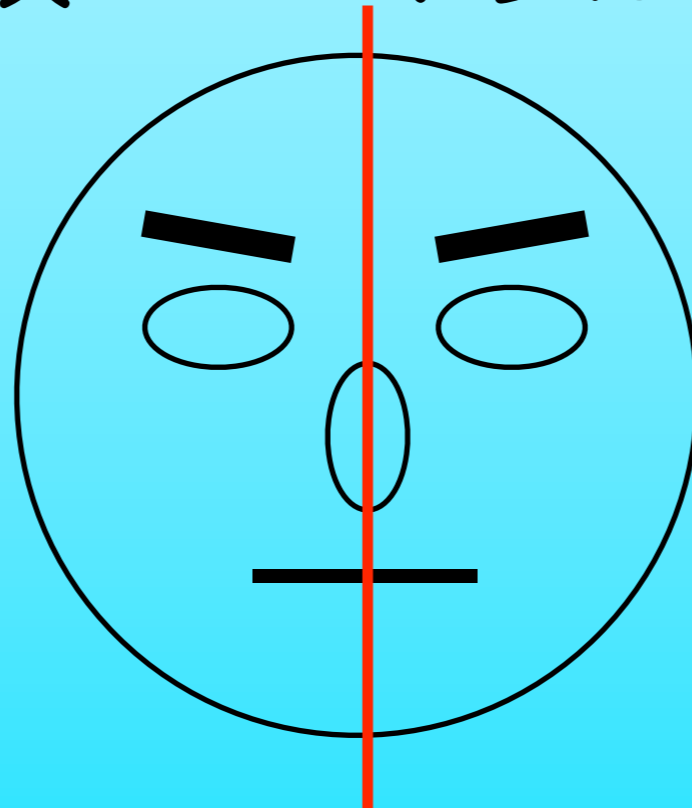
美人は顔のつくりが左右対称 ？

物理学における対称性

対称性 *Symmetry*

対称？

美人は顔のつくりが左右対称 ？

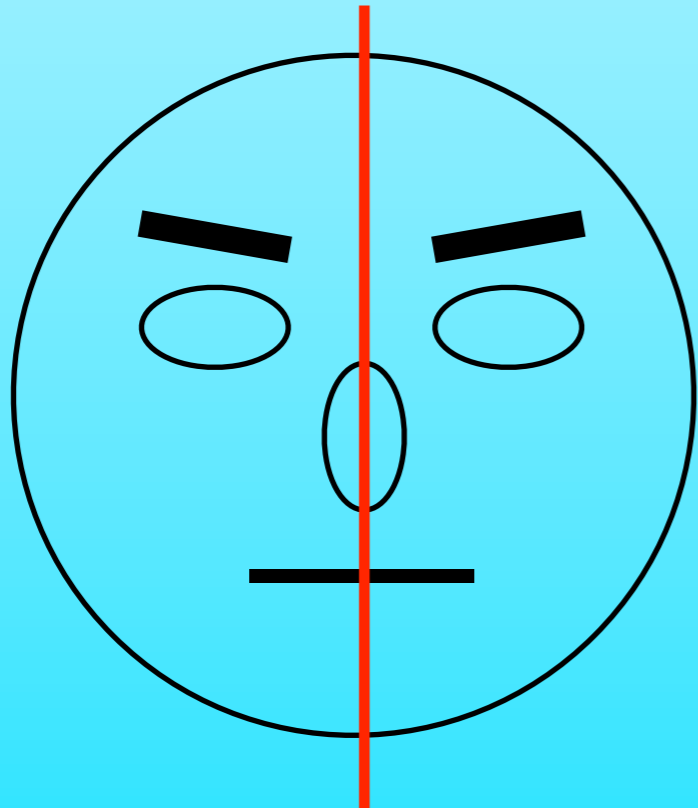


物理学における対称性

対称性 *Symmetry*

対称？

美人は顔のつくりが左右対称 ？

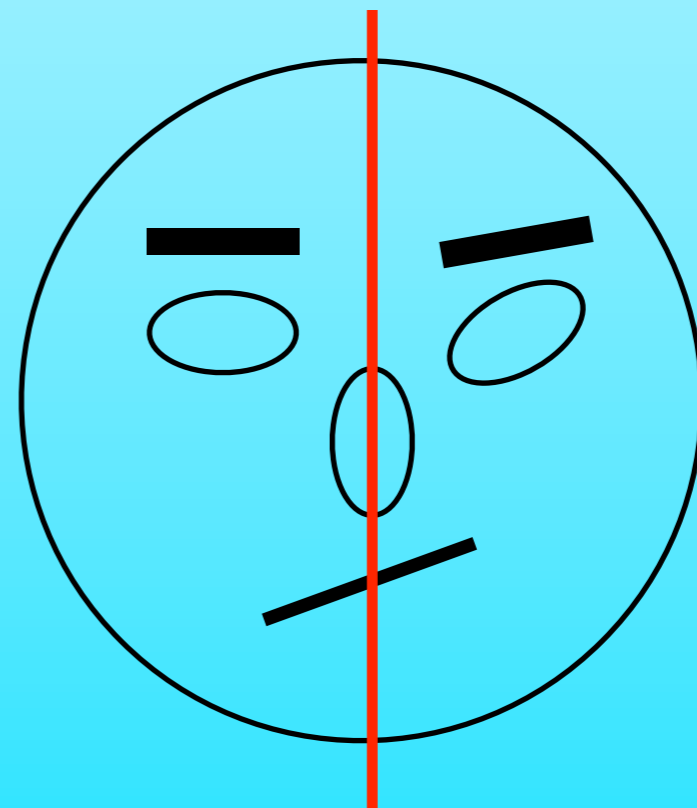
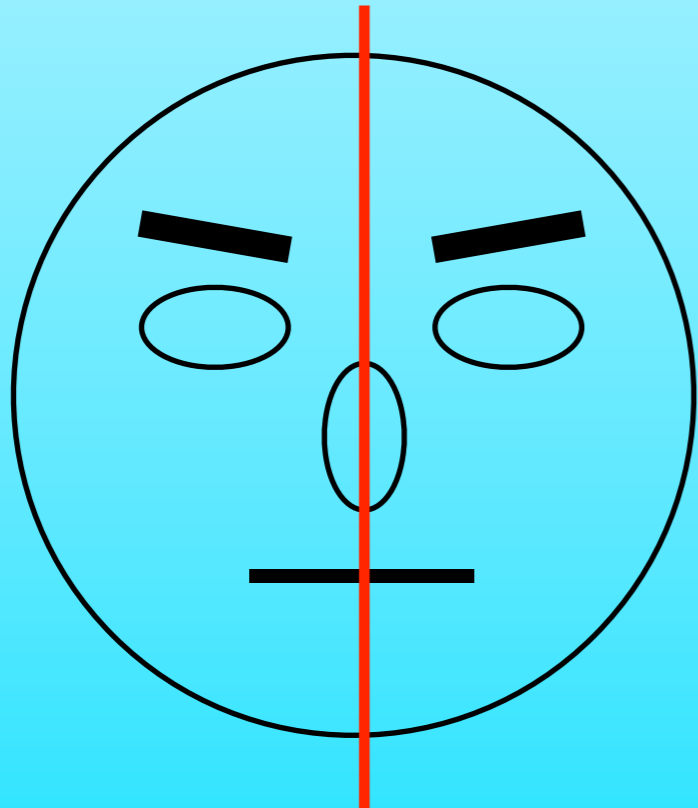


物理学における対称性

対称性 *Symmetry*

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 !



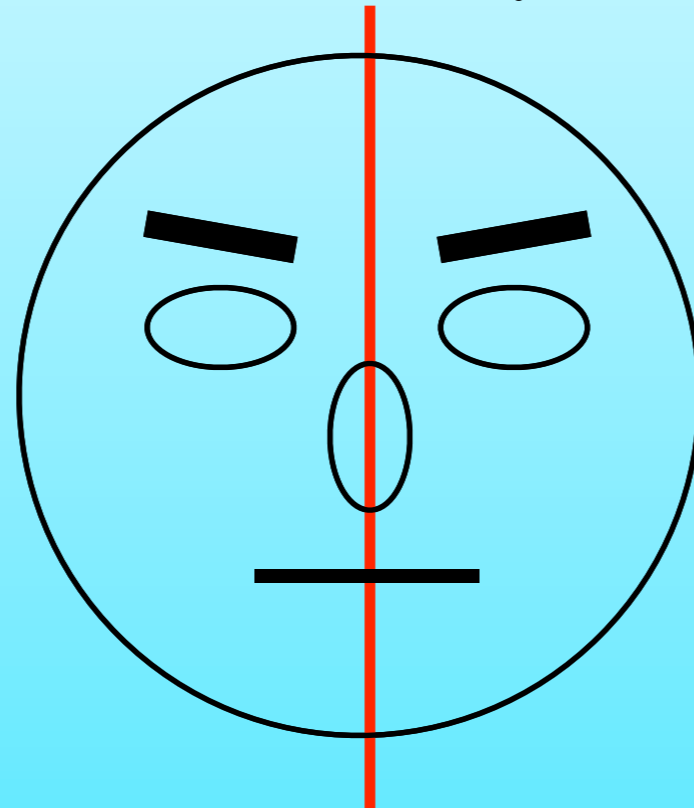
not so much

物理学における対称性

対称性

Symmetry

左右対称

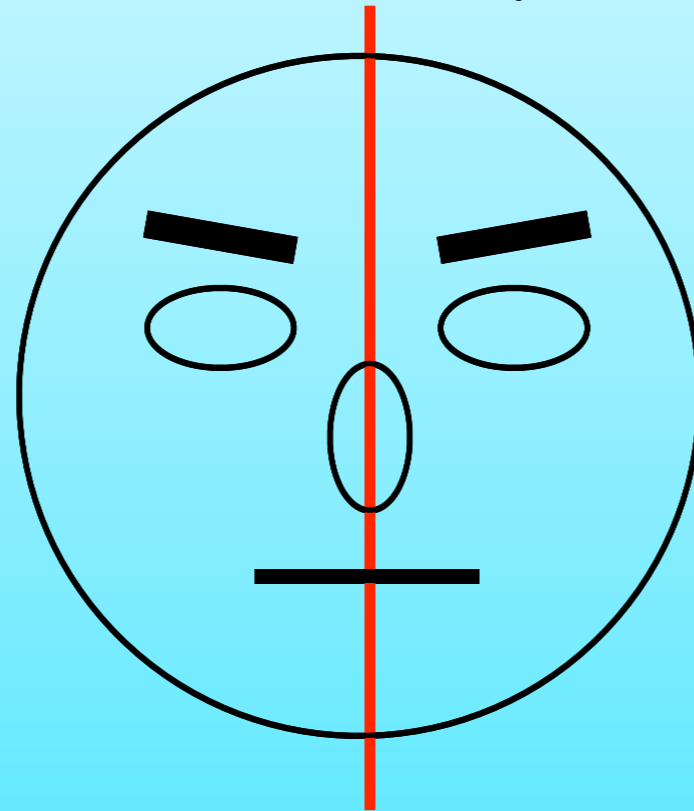


物理学における対称性

対称性

Symmetry

左右対称

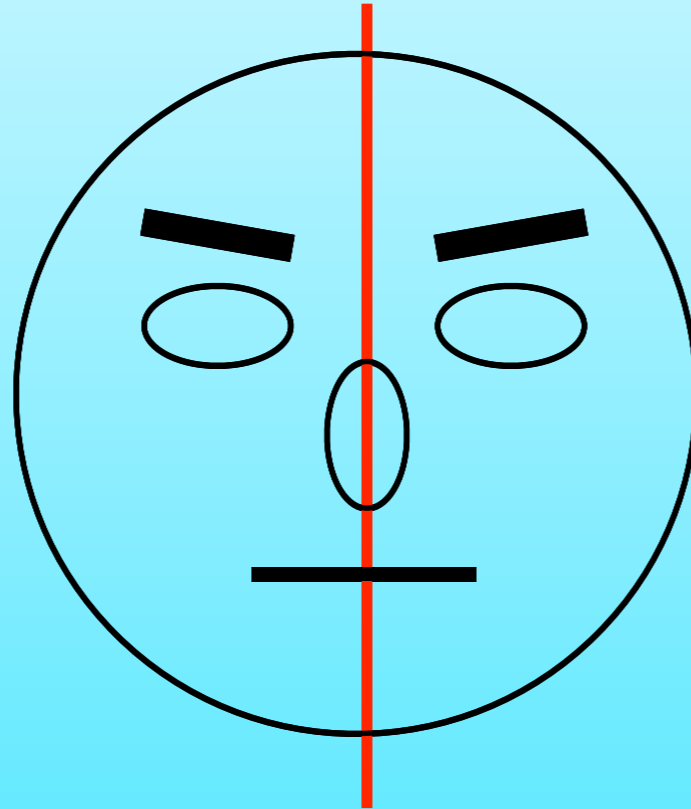


物理学における対称性

対称性

Symmetry

左右対称



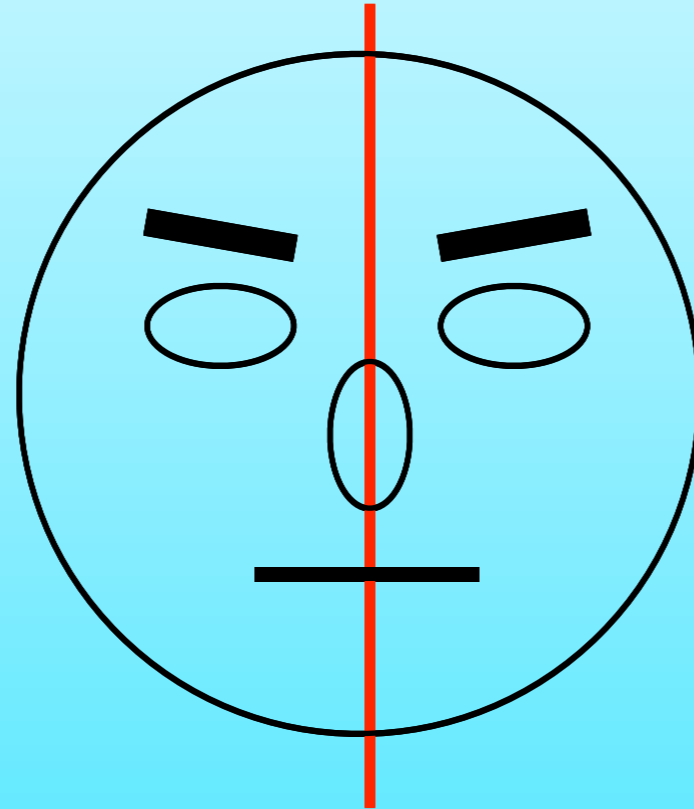
ひっくり返す

物理学における対称性

対称性

Symmetry

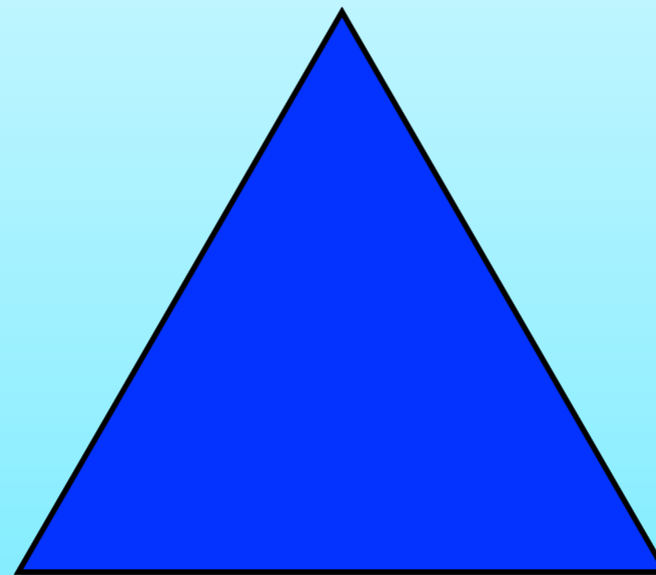
左右対称



ひっくり返す

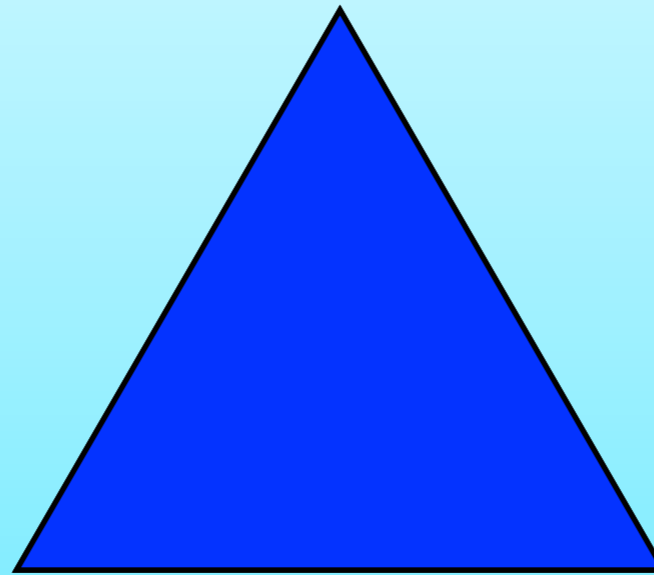
「対称操作」

Symmetry



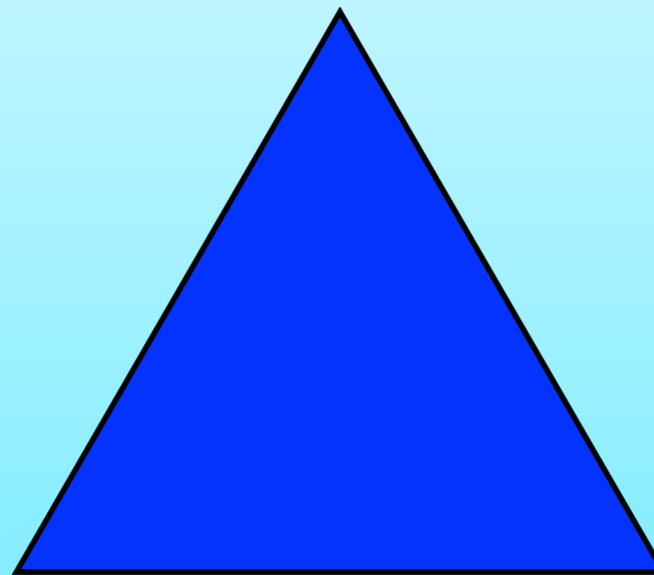
Symmetry

「いろいろな対称操作」



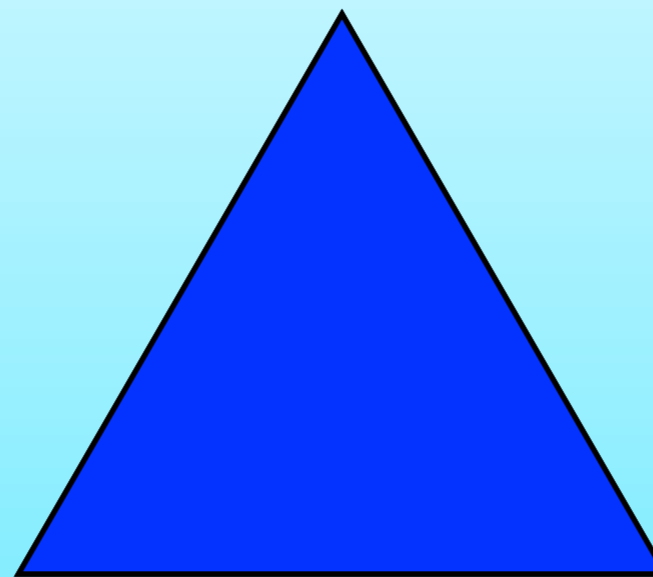
Symmetry

「いろいろな対称操作」



Symmetry

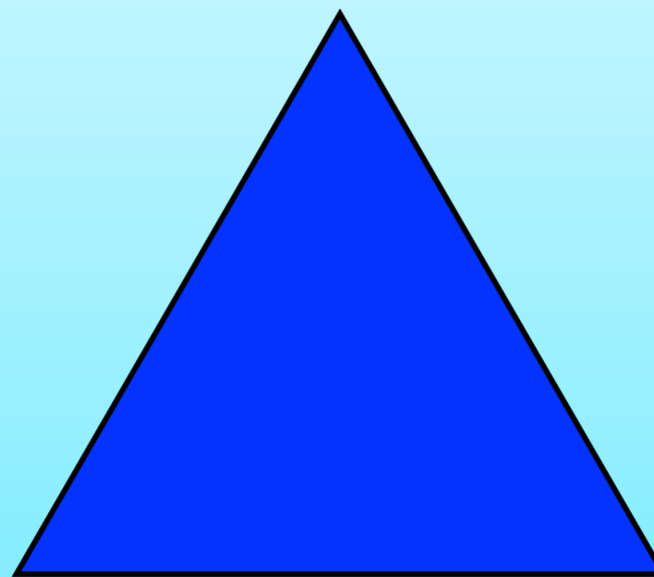
「いろいろな対称操作」



120度回転

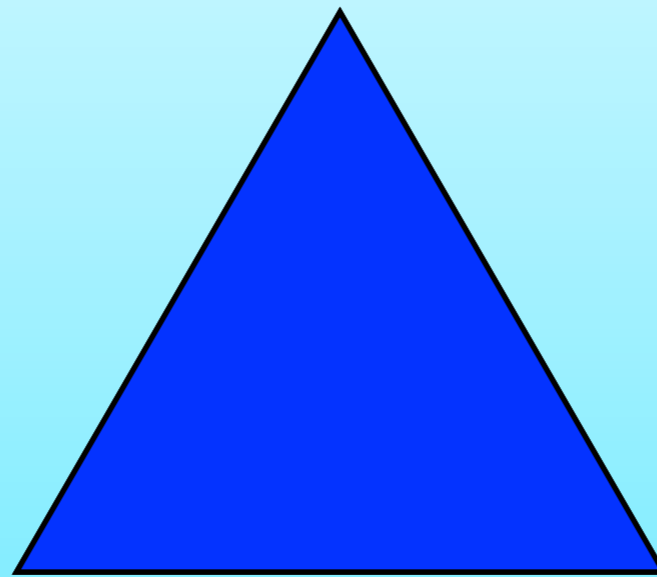
Symmetry

「いろいろな対称操作」



Symmetry

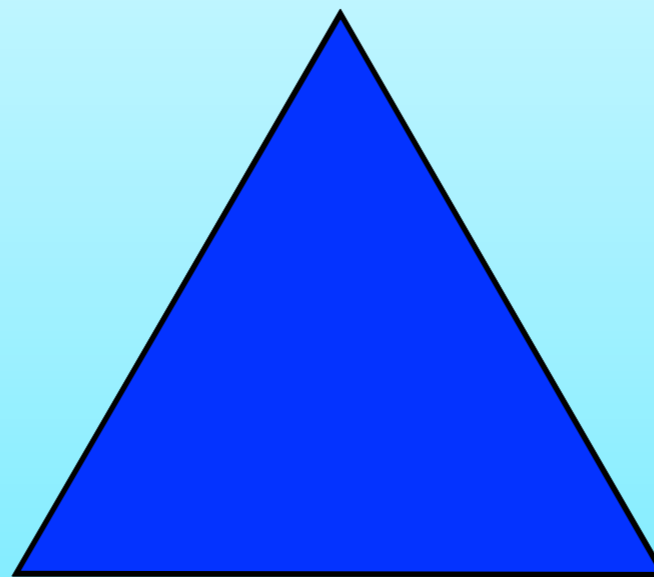
「いろいろな対称操作」



240度回転

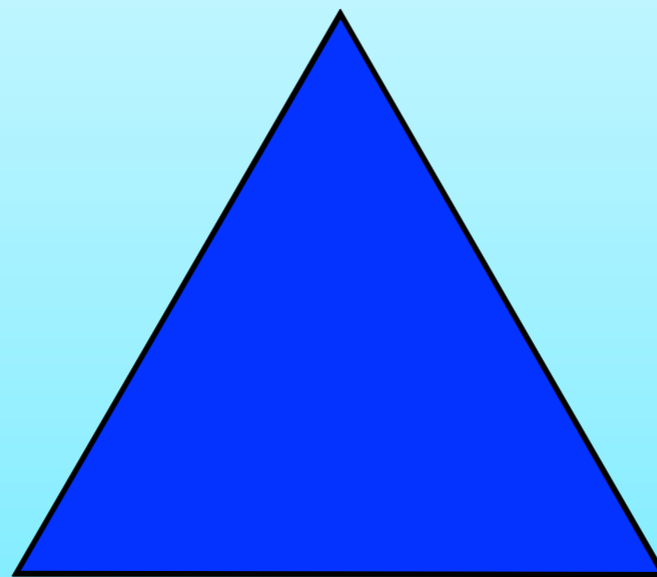
Symmetry

「いろいろな対称操作」



Symmetry

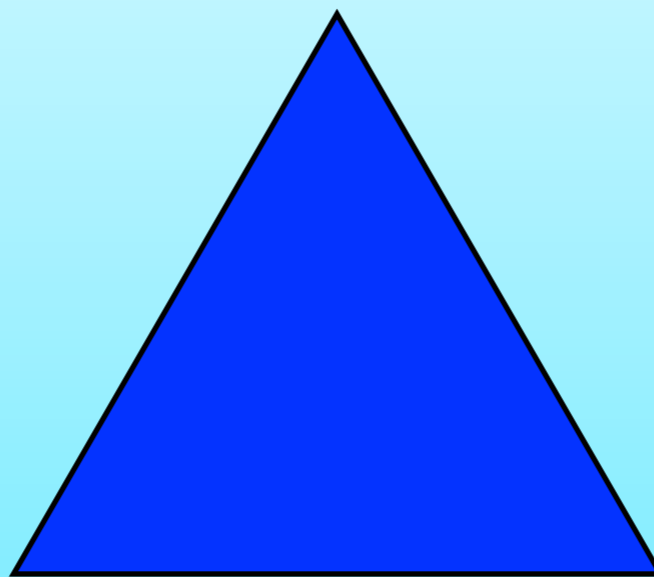
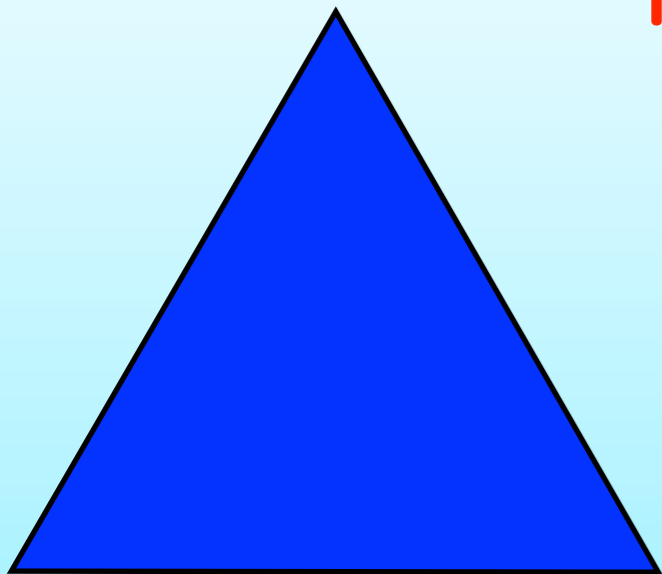
「いろいろな対称操作」



360度回転

Symmetry

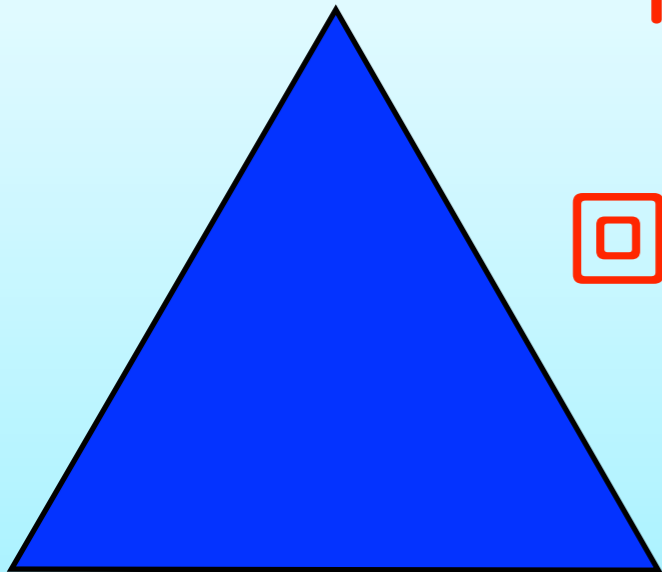
「いろいろな対称操作」



Symmetry

「いろいろな対称操作」

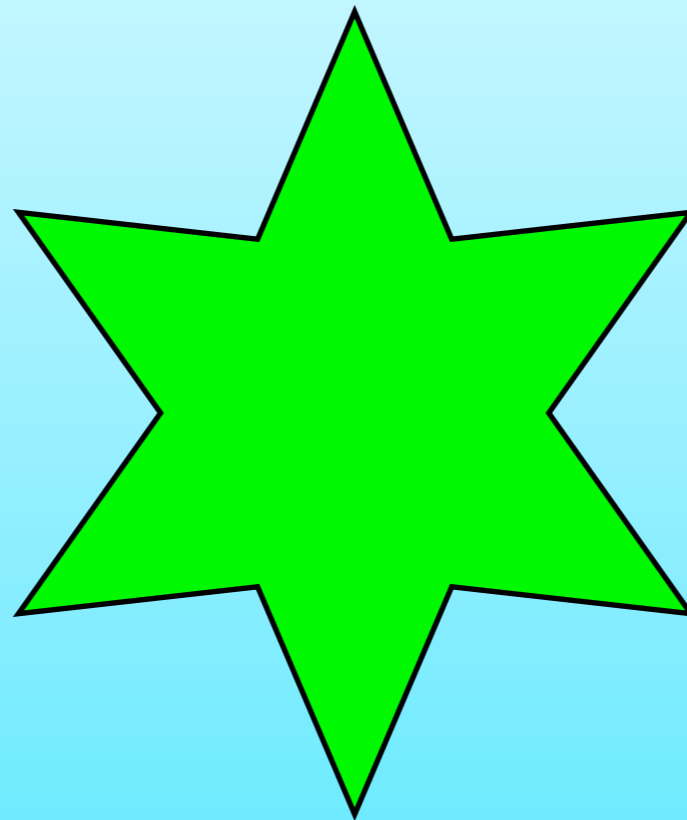
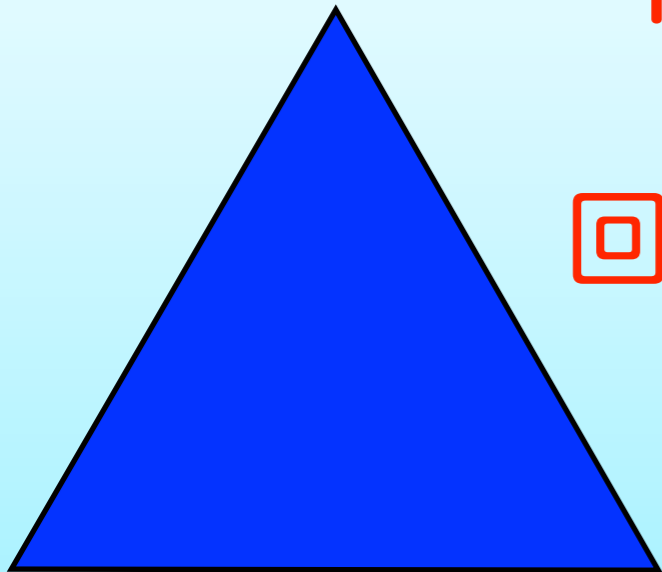
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

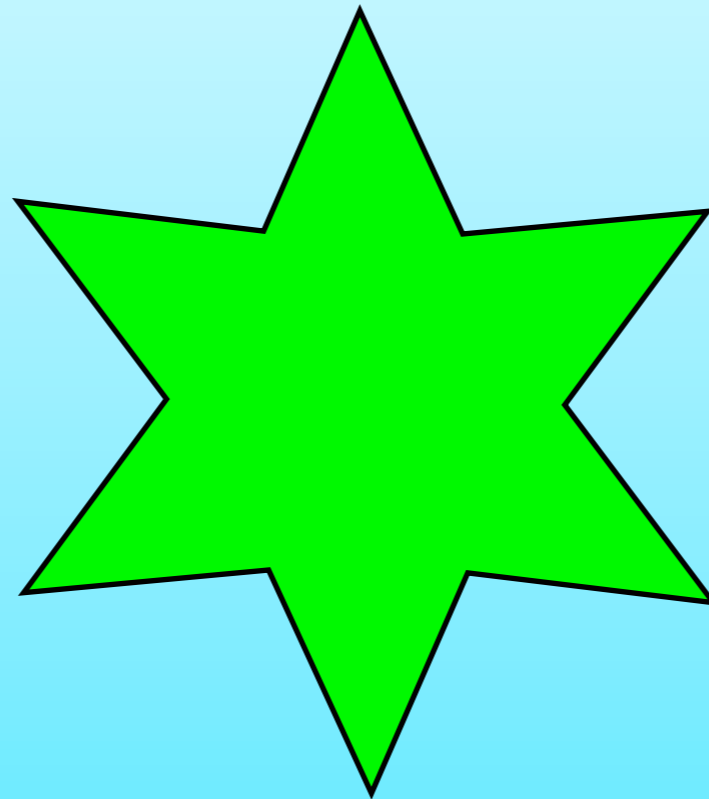
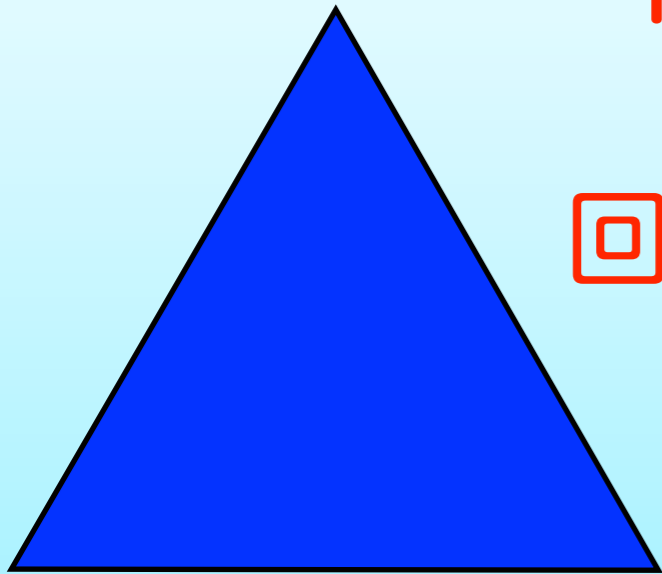
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

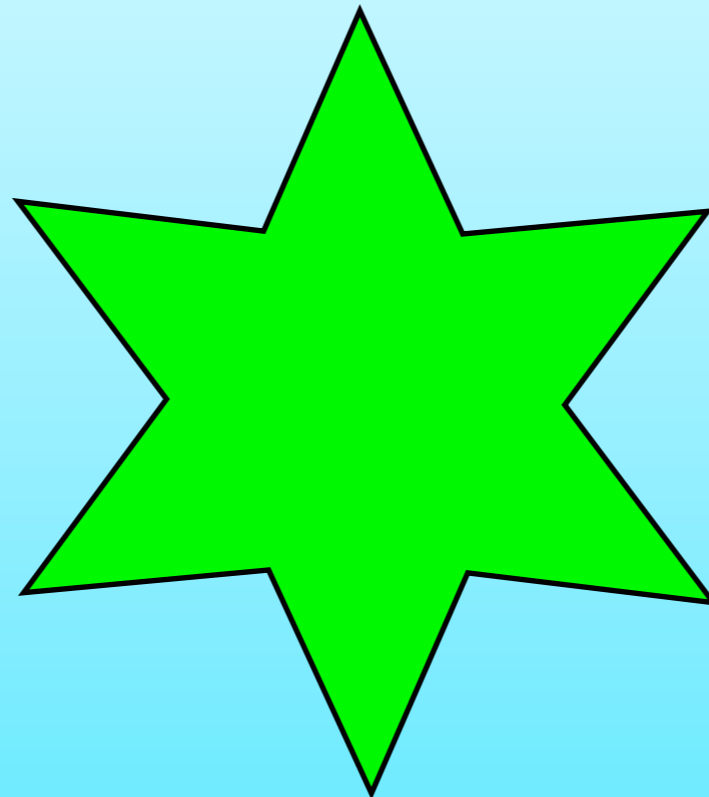
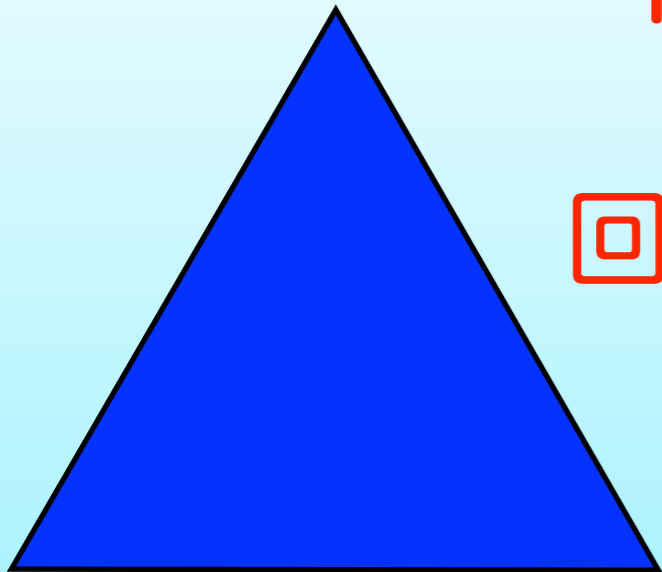
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

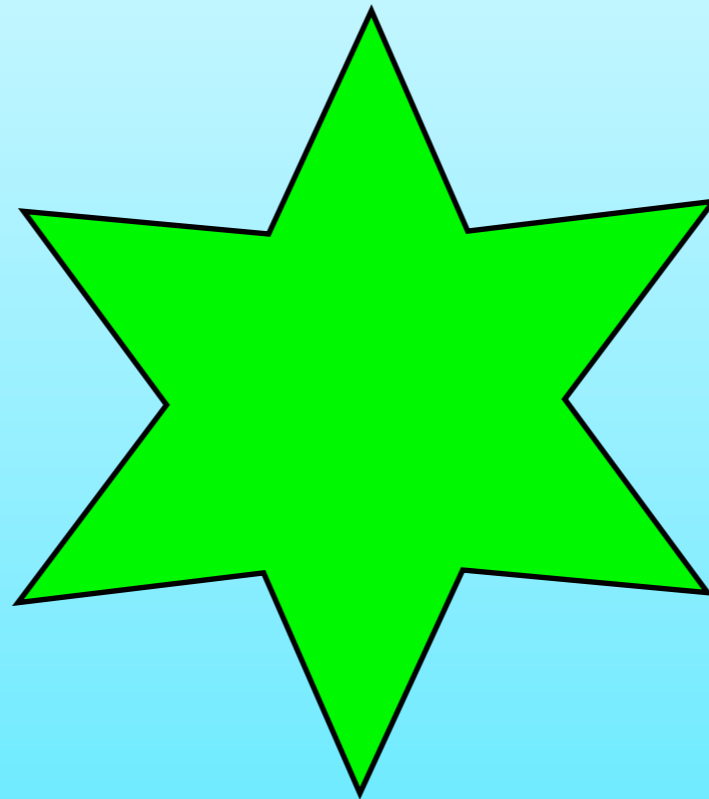
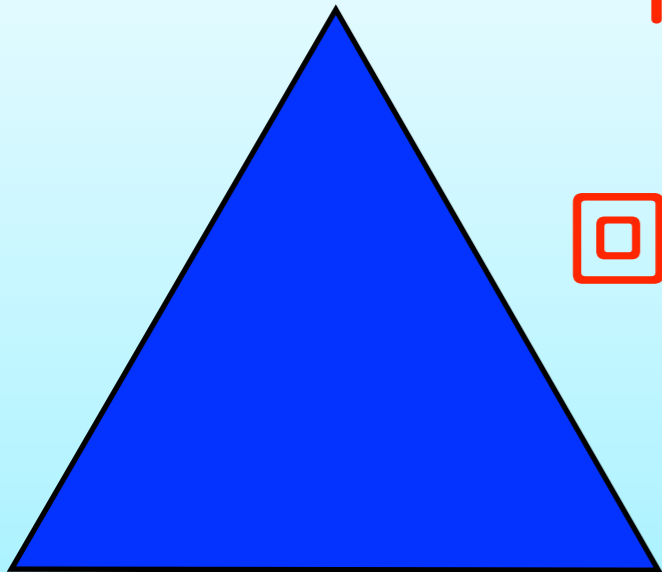


60度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

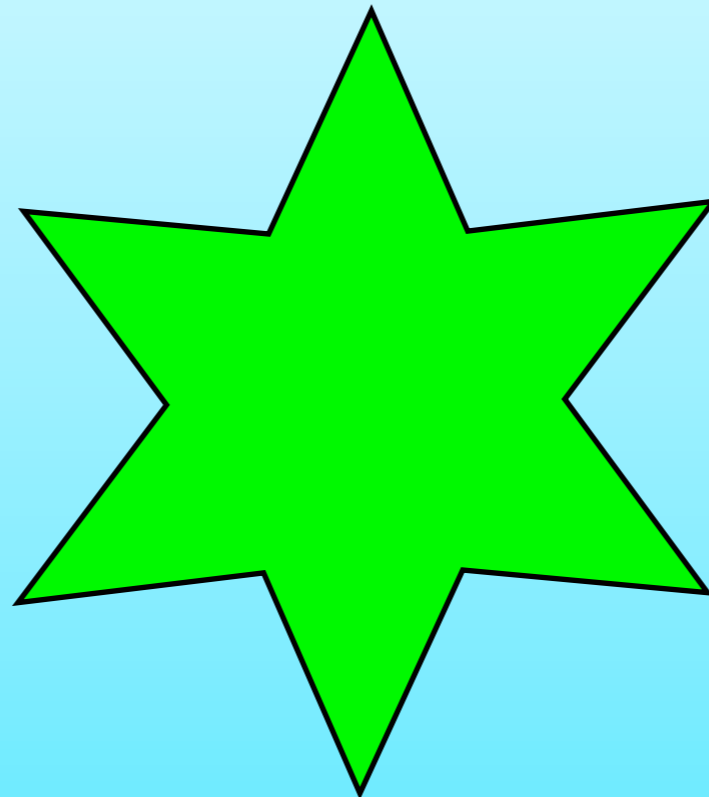
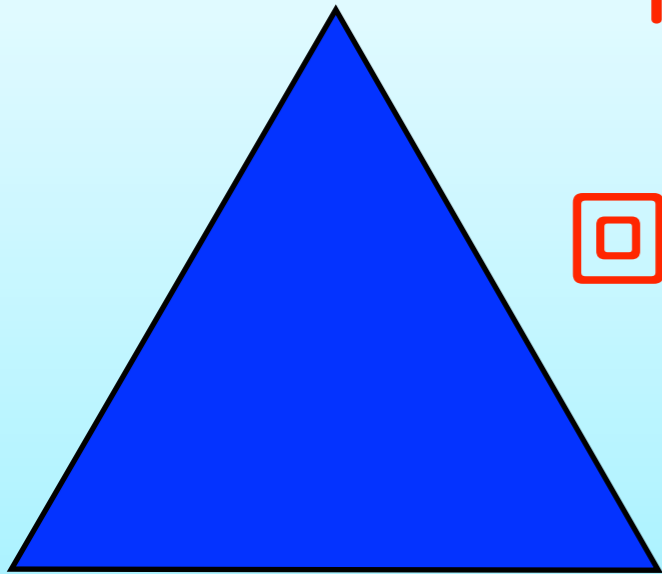
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

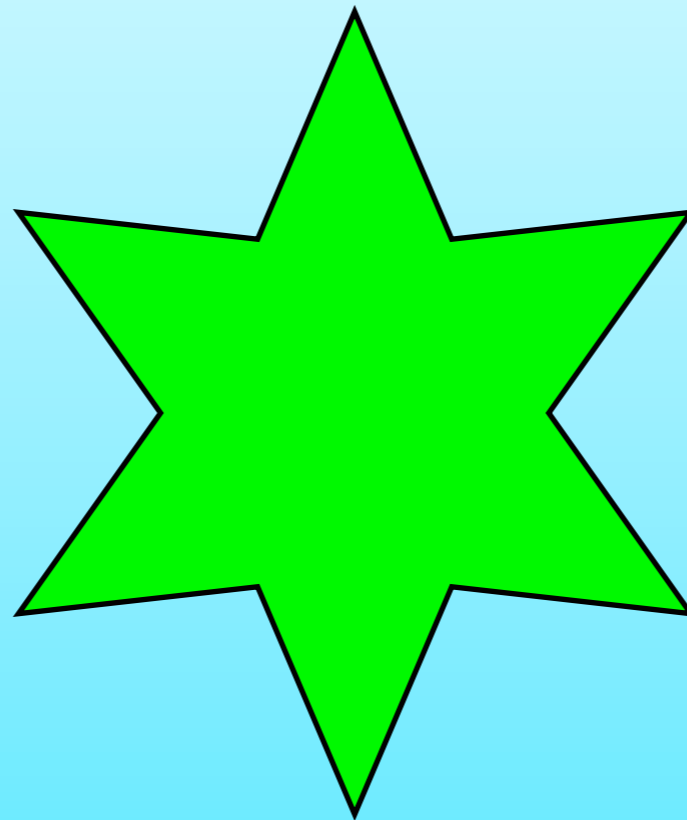
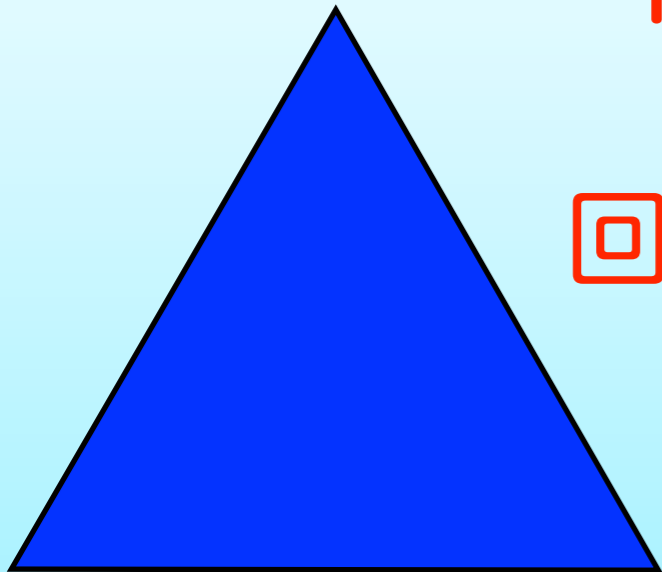


120度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

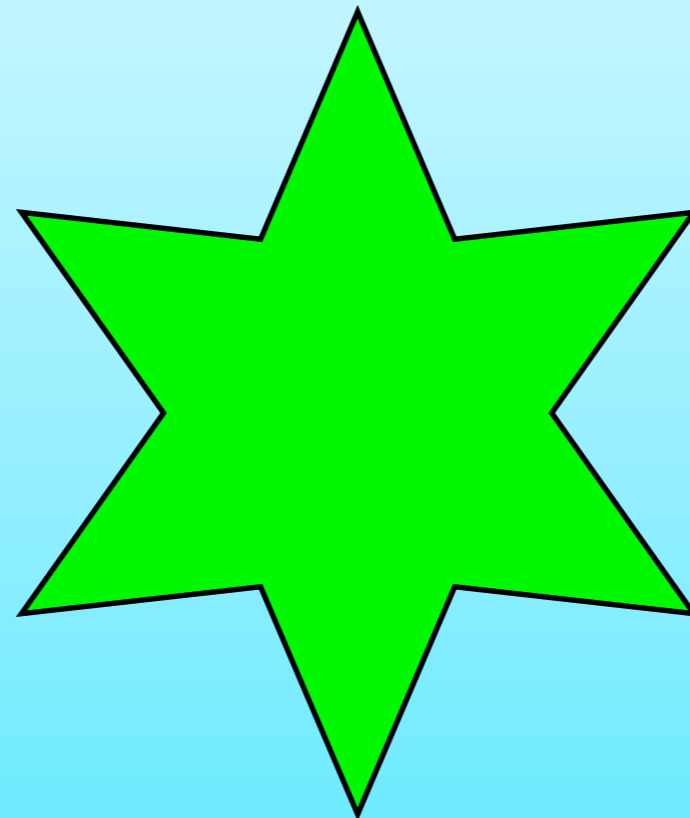
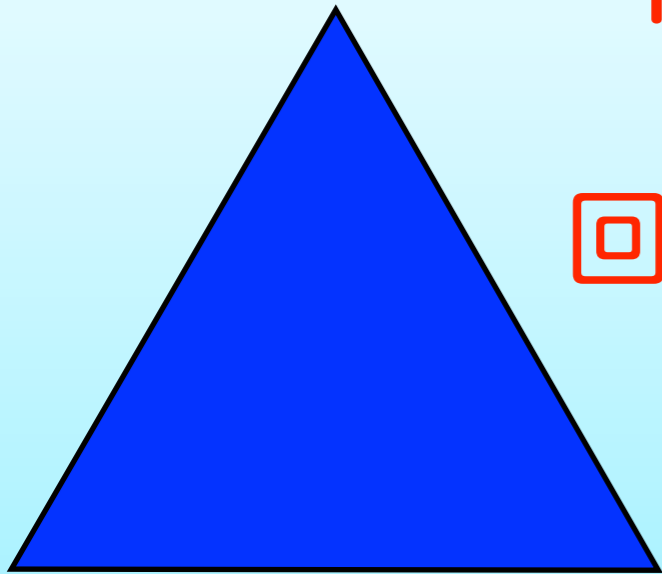
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

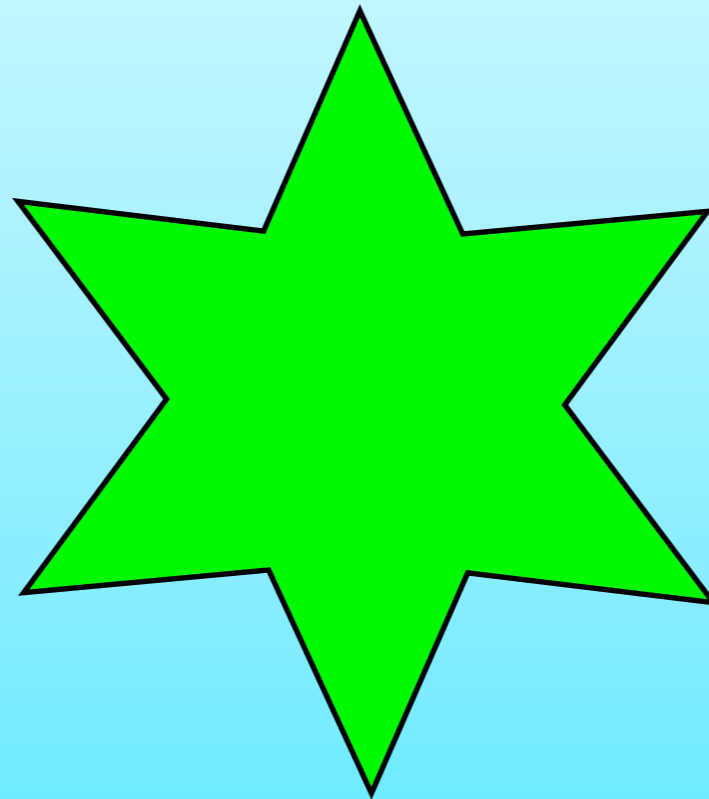
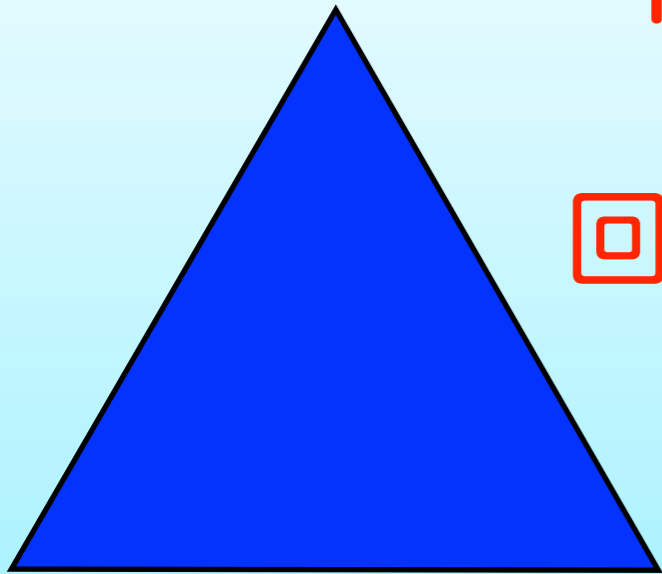


180度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

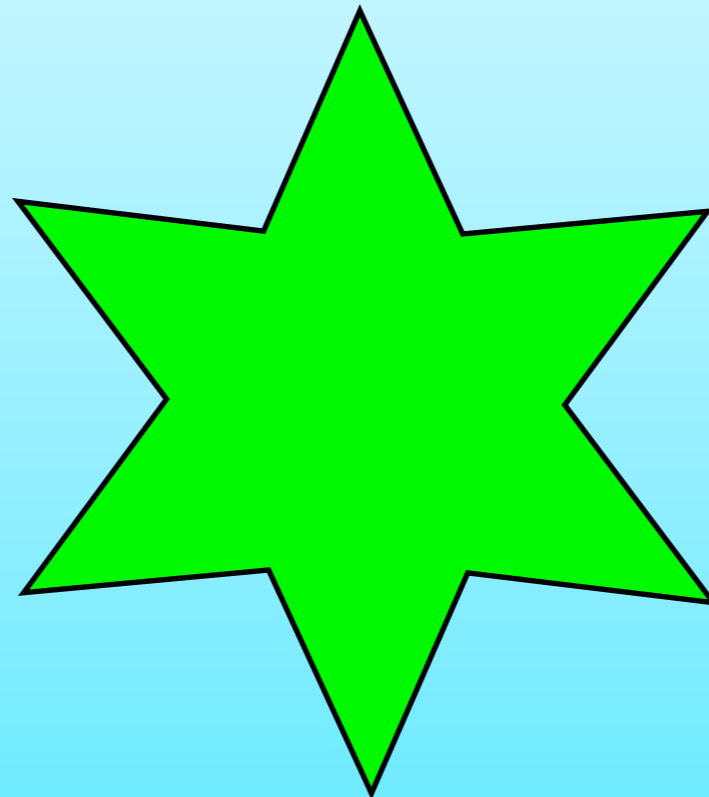
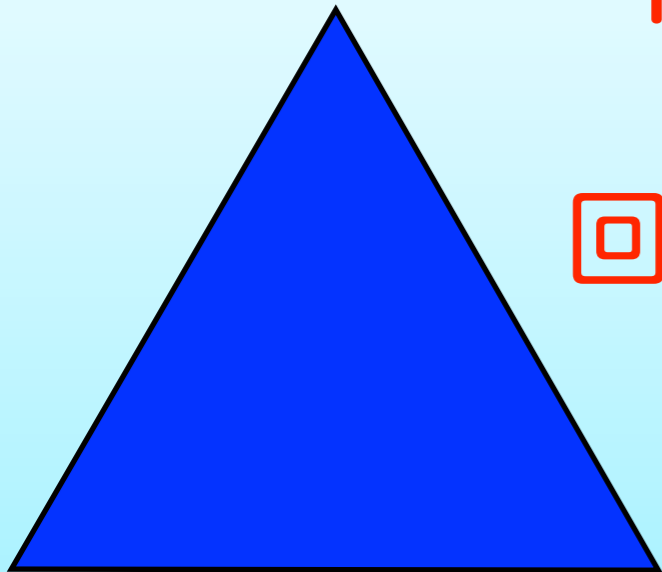
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

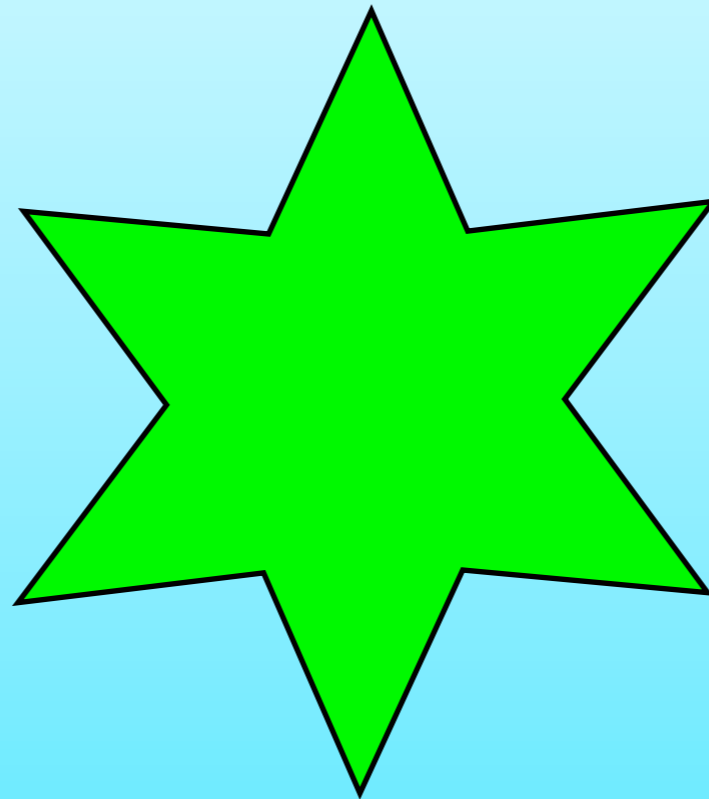
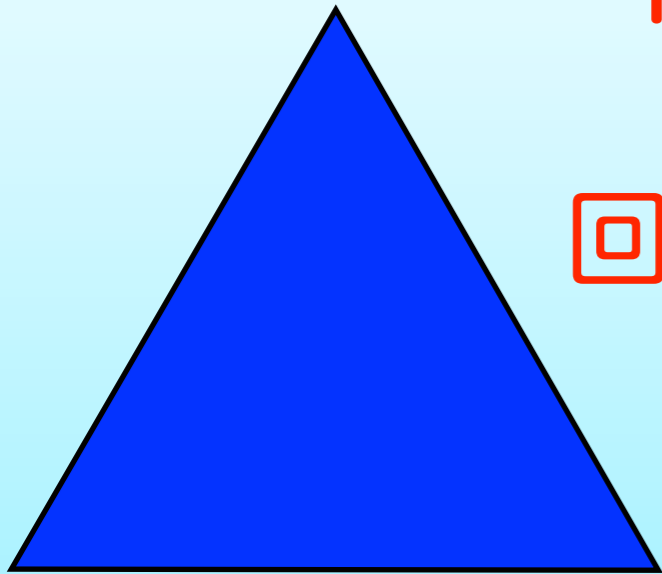


240度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

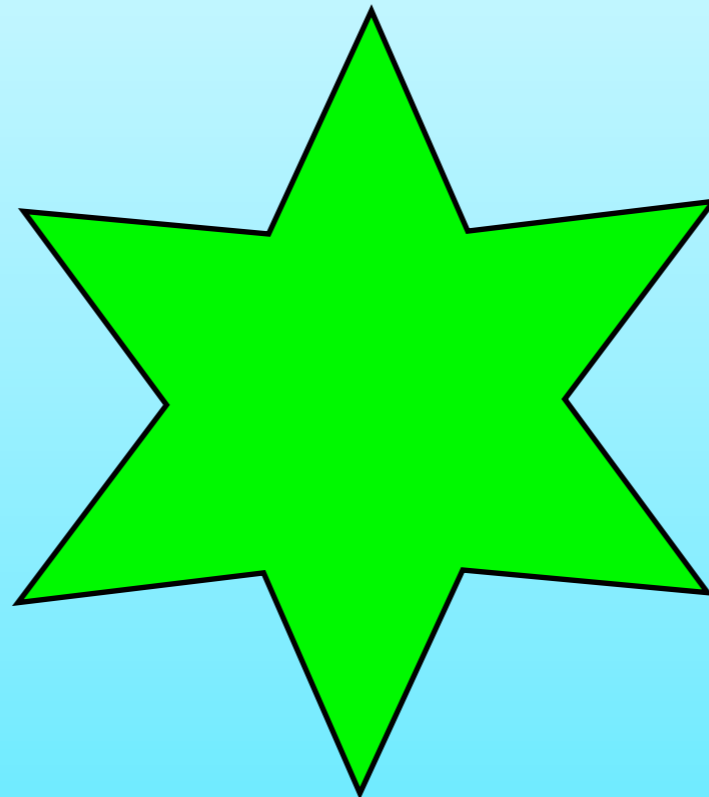
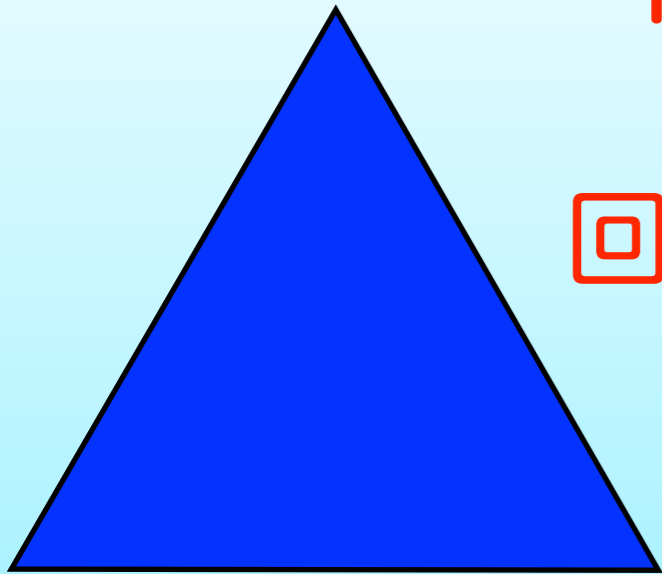
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

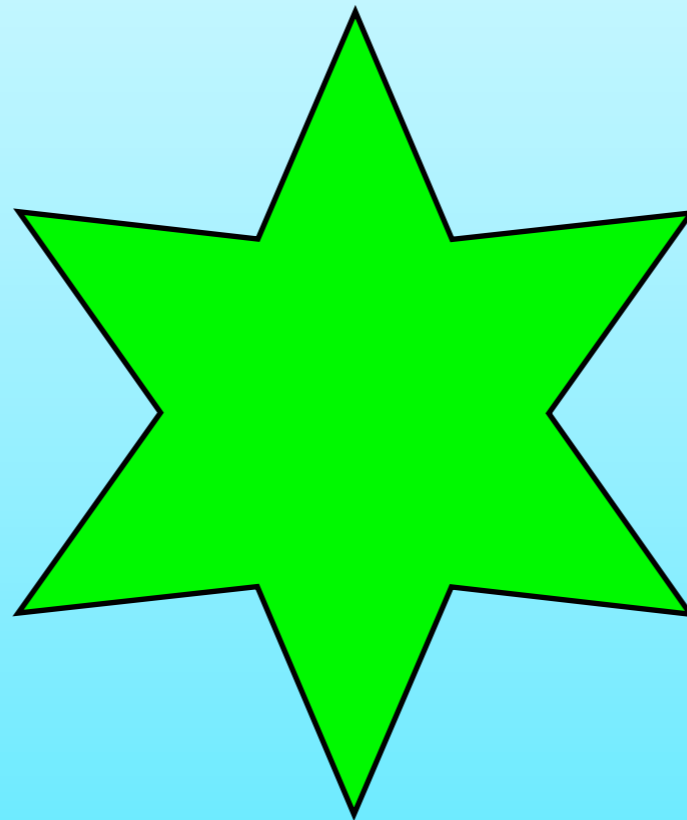
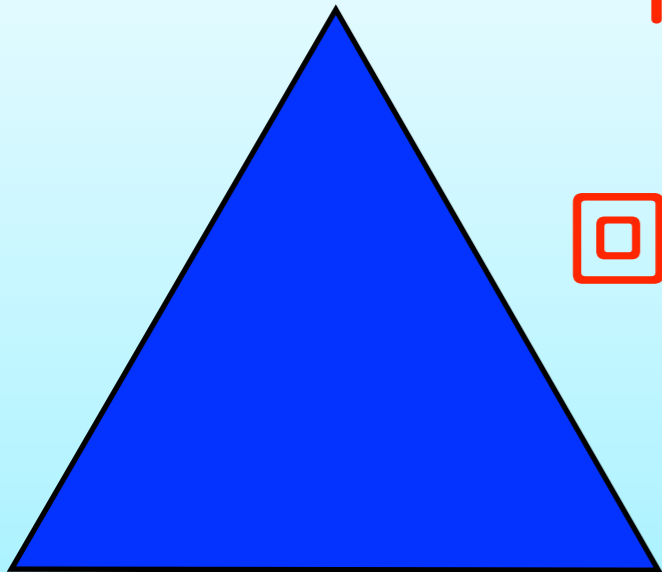


300度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

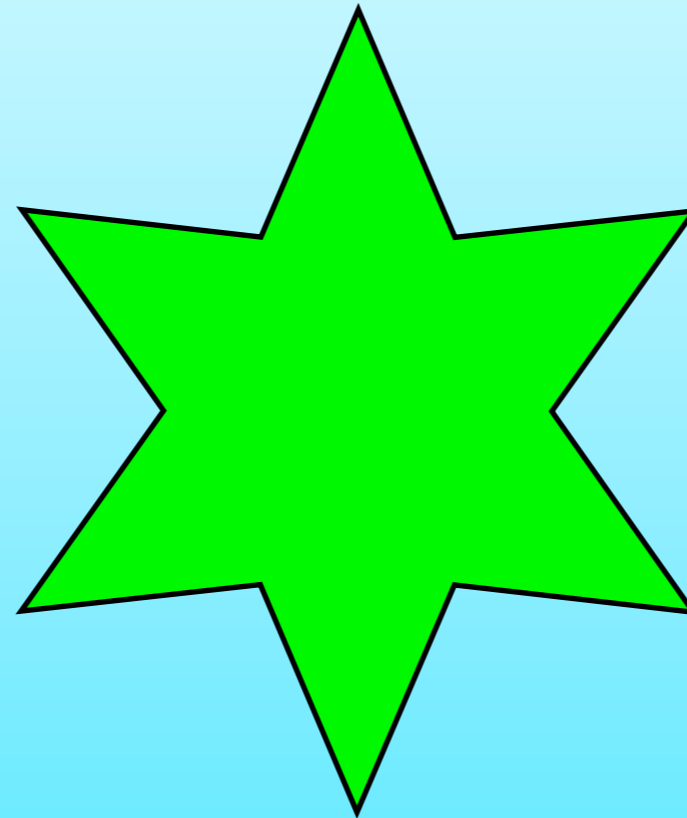
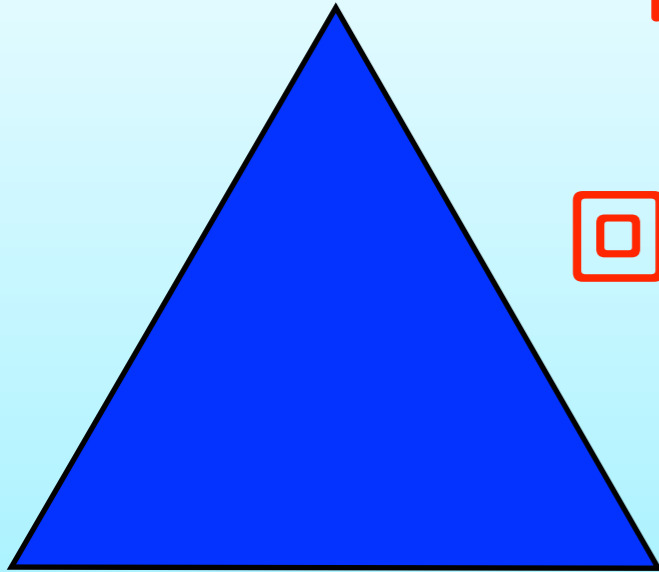
回転角：120度、240度、360度



Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

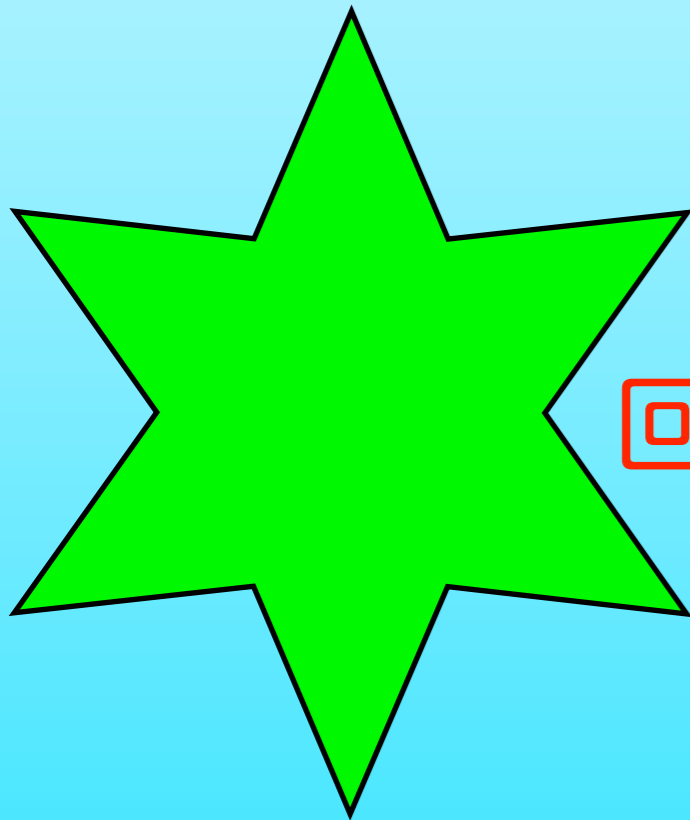
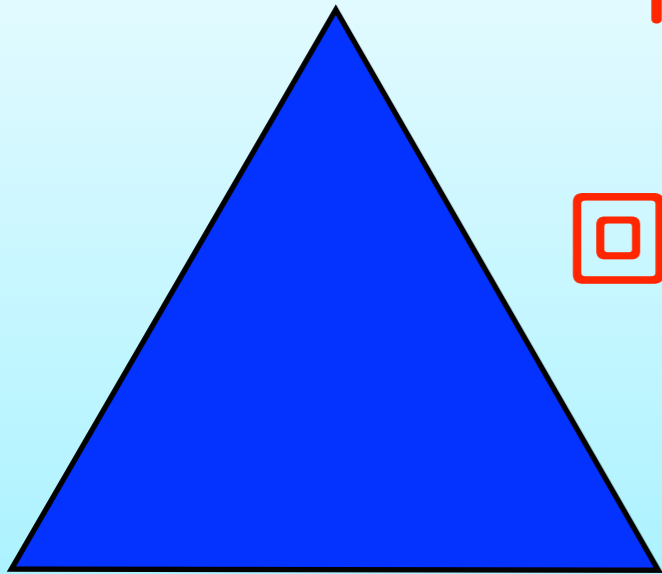


360度回転

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

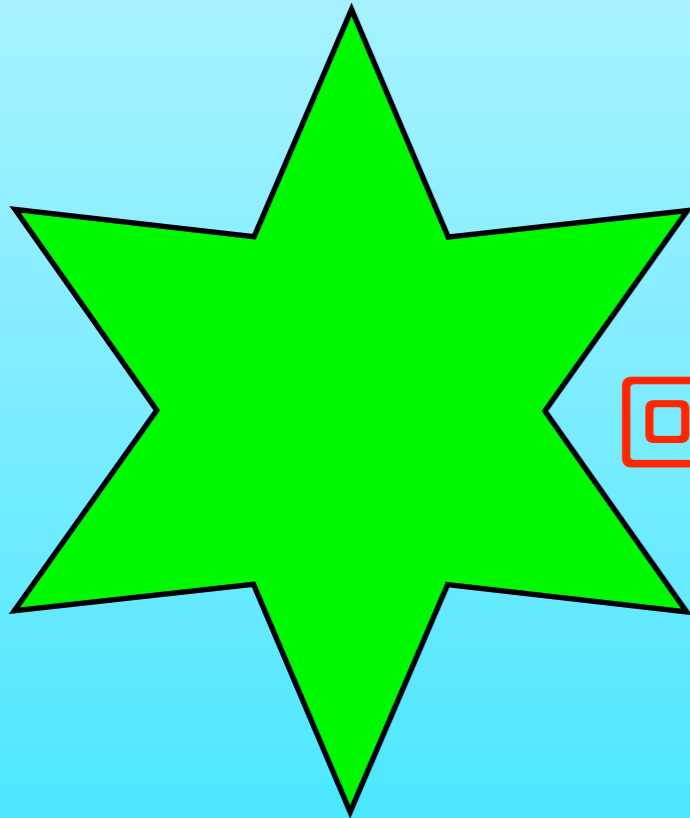
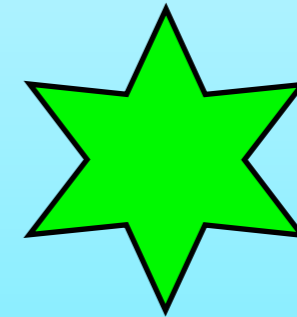
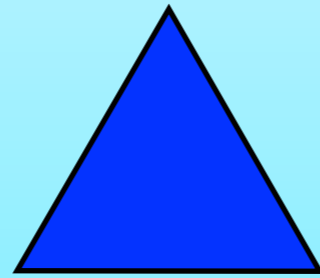
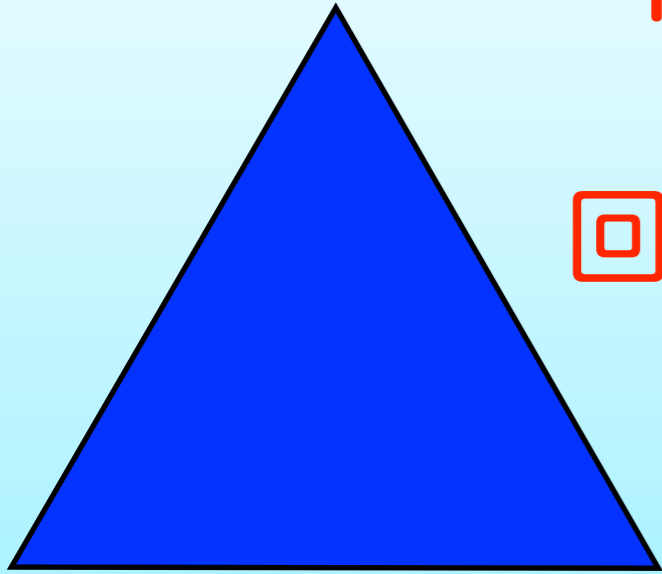


回転角：60度、120度、180度、
240度、300度、360度

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

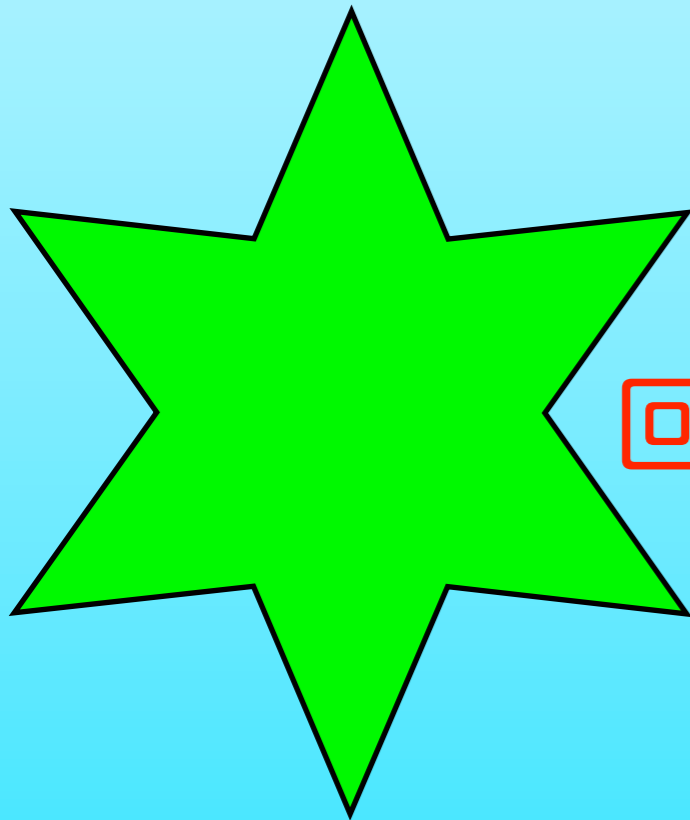
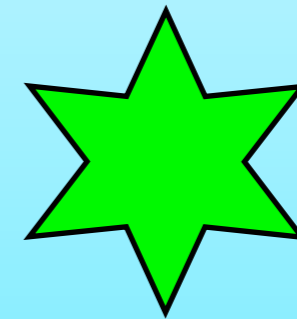
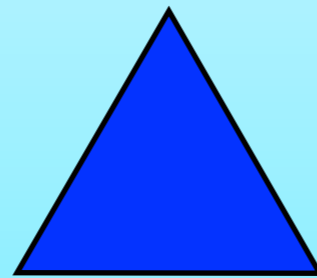
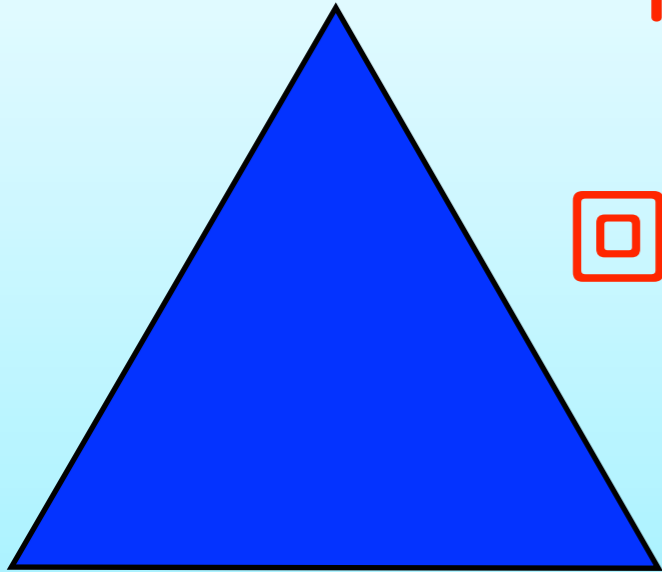


回転角：60度、120度、180度、
240度、300度、360度

Symmetry

「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度

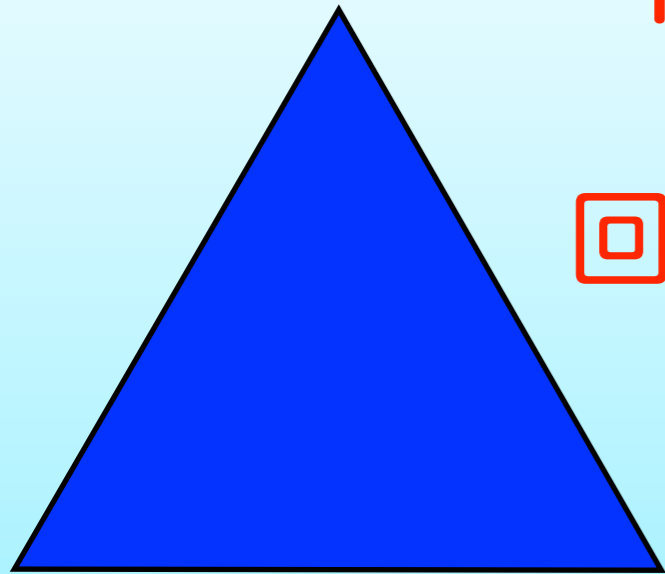


回転角：60度、120度、180度、
240度、300度、360度

Symmetry

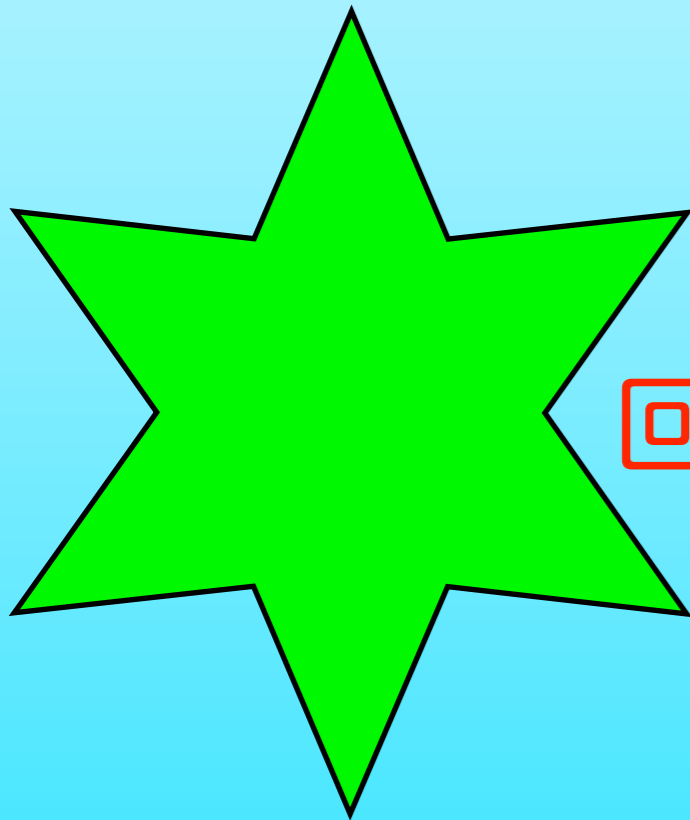
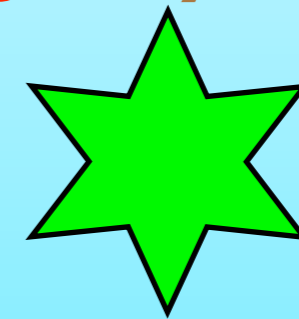
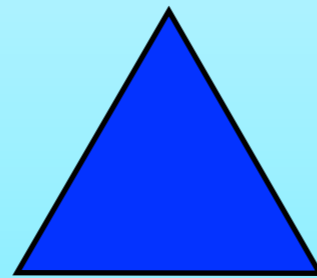
「いろいろな対称操作」

回転角：120度、240度、360度



low symmetry

high symmetry



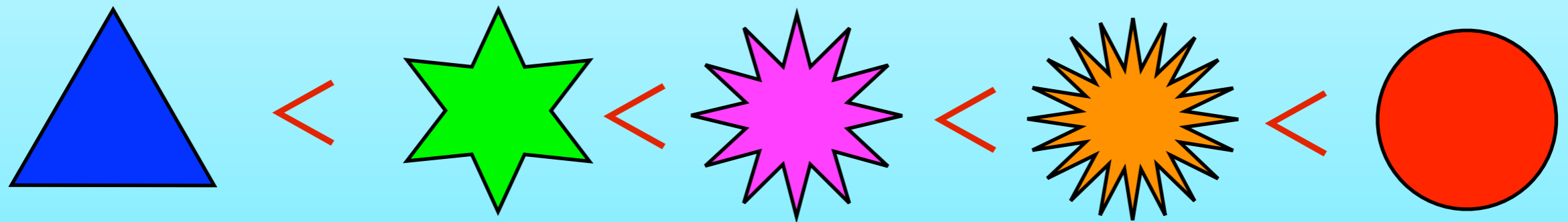
回転角：60度、120度、180度、
240度、300度、360度

対称性の定量化

「いろいろな対称操作」

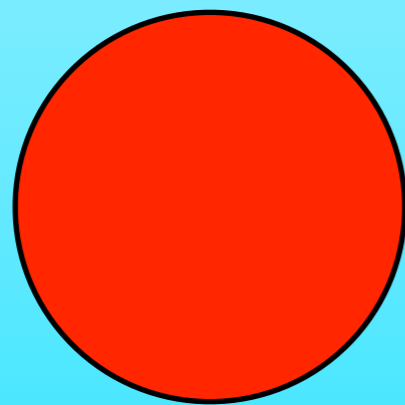
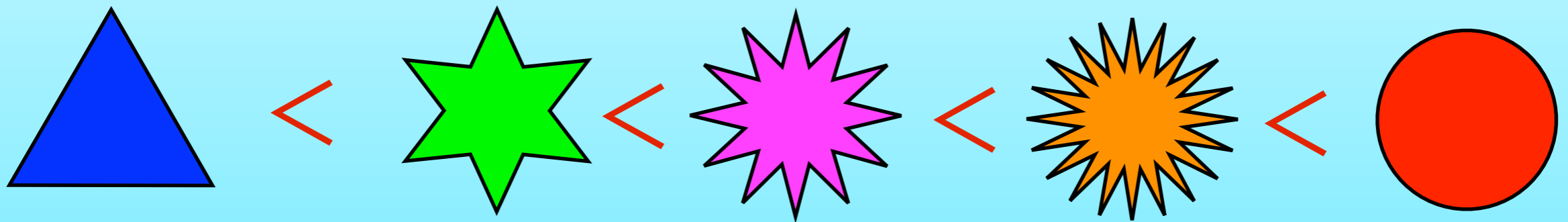
対称性の定量化

「いろいろな対称操作」



対称性の定量化

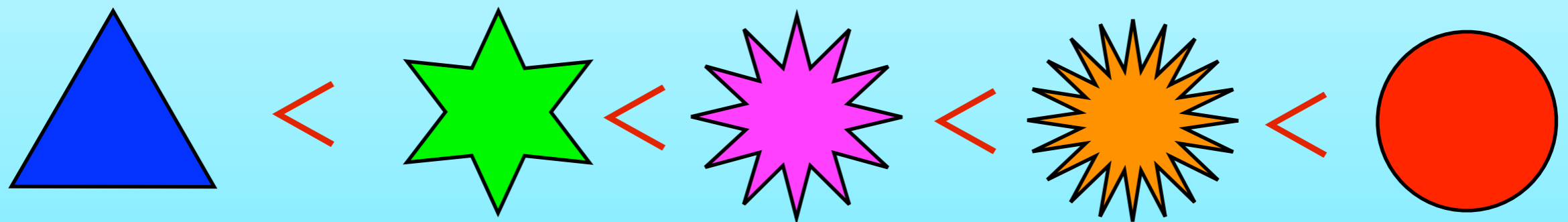
「いろいろな対称操作」



「連続対称性」

対称性の定量化

「いろいろな対称操作」



「連続対称性」

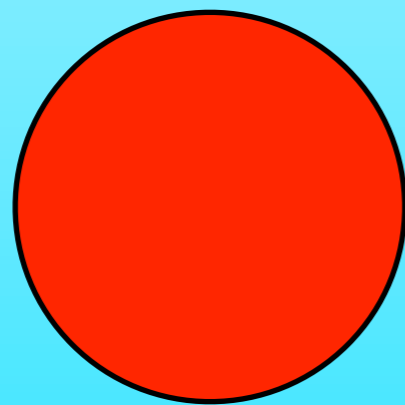
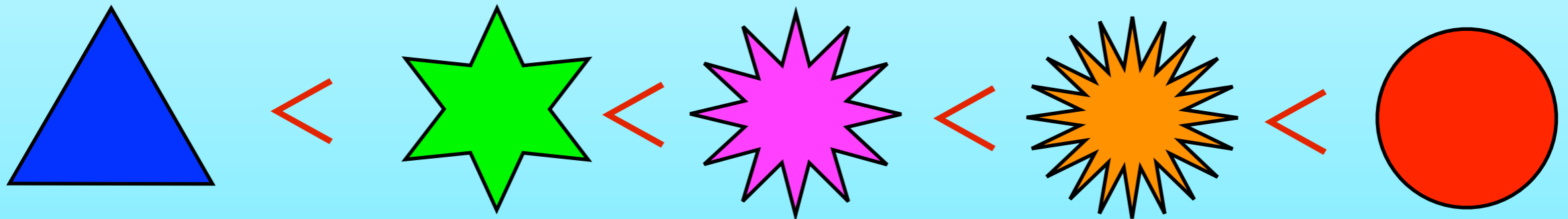
Nambu-Goldstone Boson

対称性の定量化

「いろいろな対称操作」

low symmetry

high symmetry



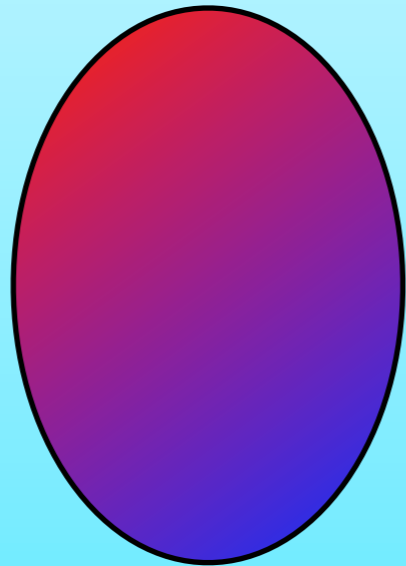
「連続対称性」

Nambu-Goldstone Boson

対称性の低下と対称性の破れ



high symmetry



low symmetry

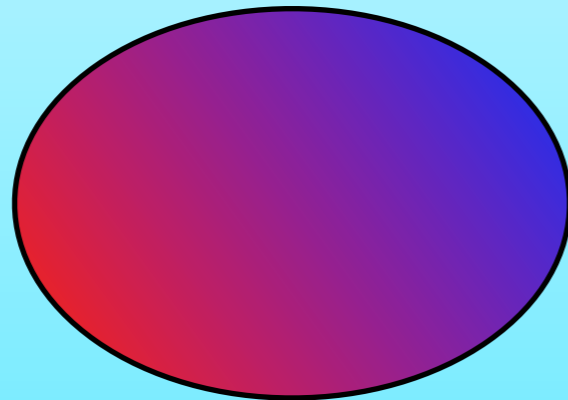
対称性の低下と対称性の破れ

OK!



high symmetry

No good!



low symmetry

90度回転

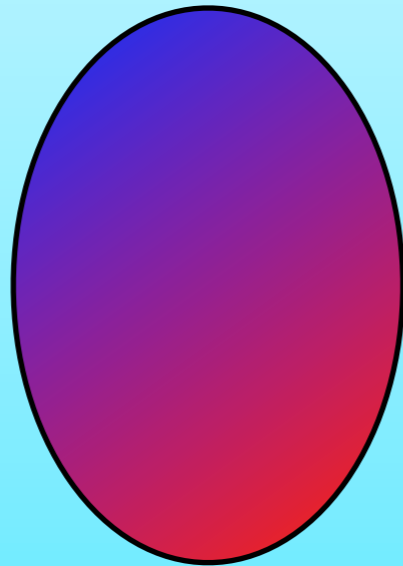
対称性の低下と対称性の破れ

OK!



high symmetry

OK!



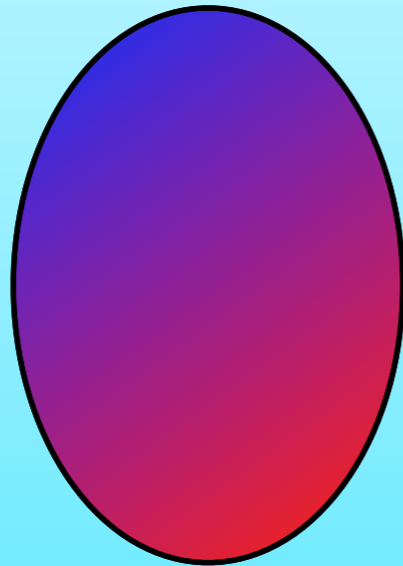
low symmetry

180度回転

対称性の低下と対称性の破れ



high symmetry

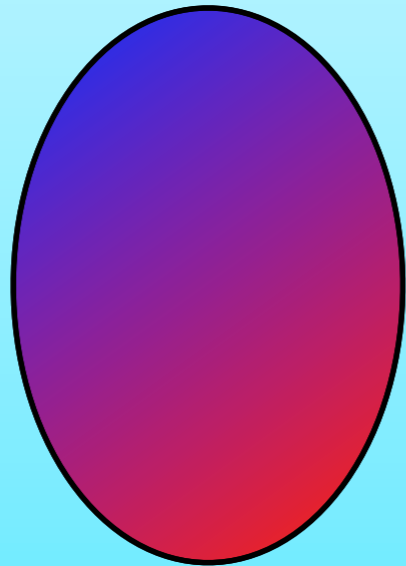


low symmetry

対称性の低下と対称性の破れ



high symmetry

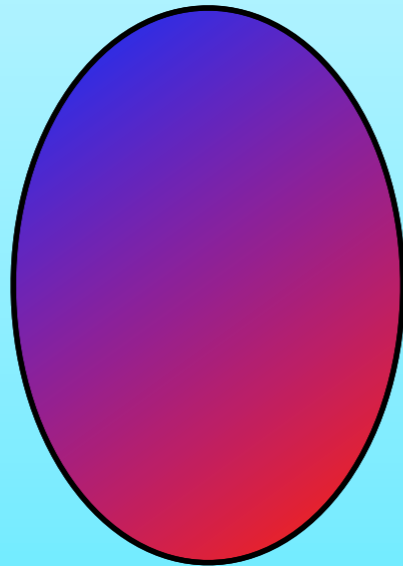


low symmetry

対称性の低下と対称性の破れ

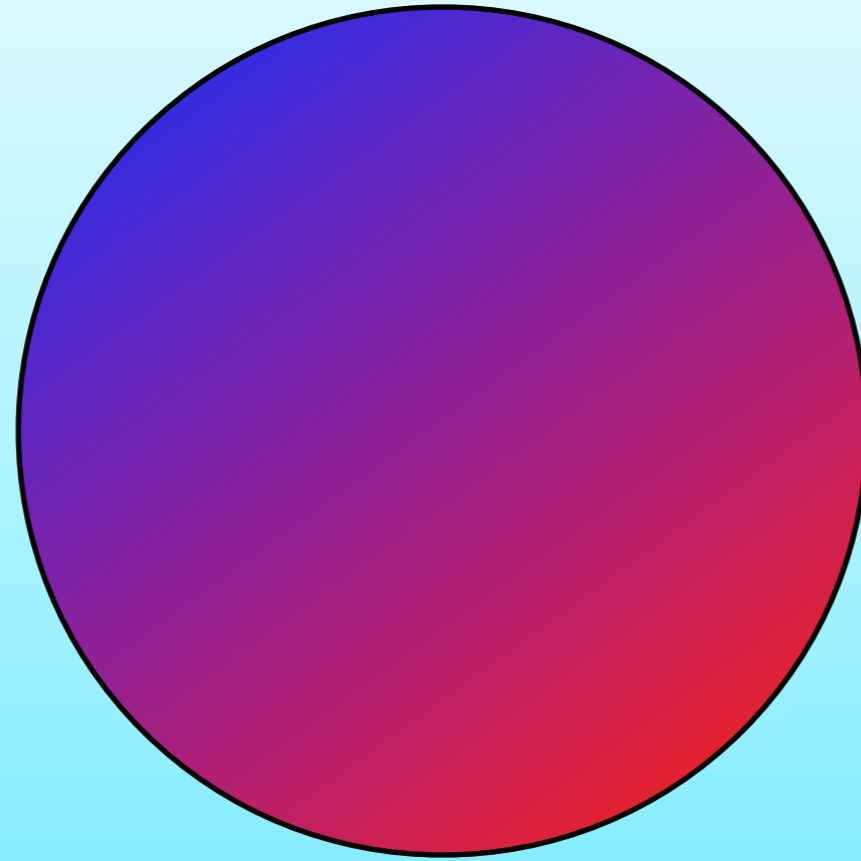


high symmetry

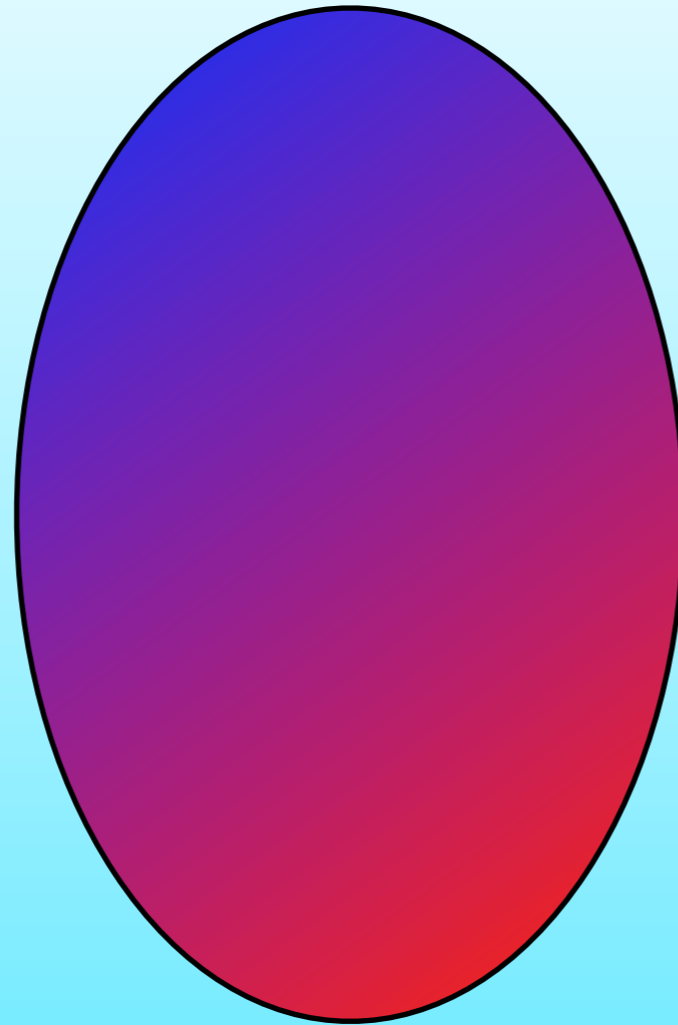


low symmetry

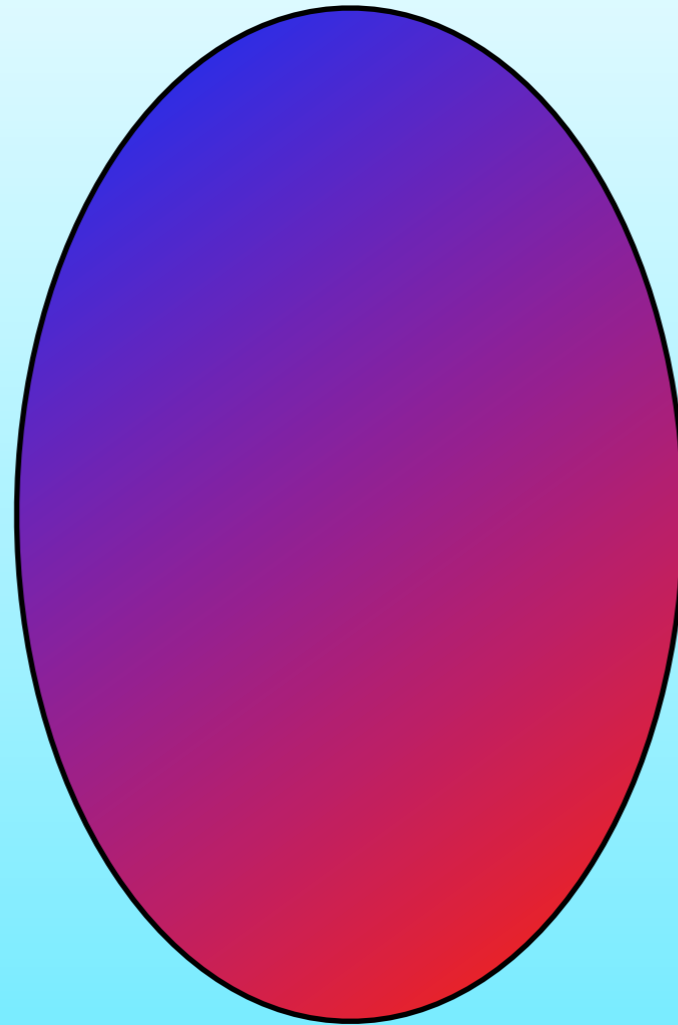
対称性の低下と対称性の破れ



対称性の低下と対称性の破れ

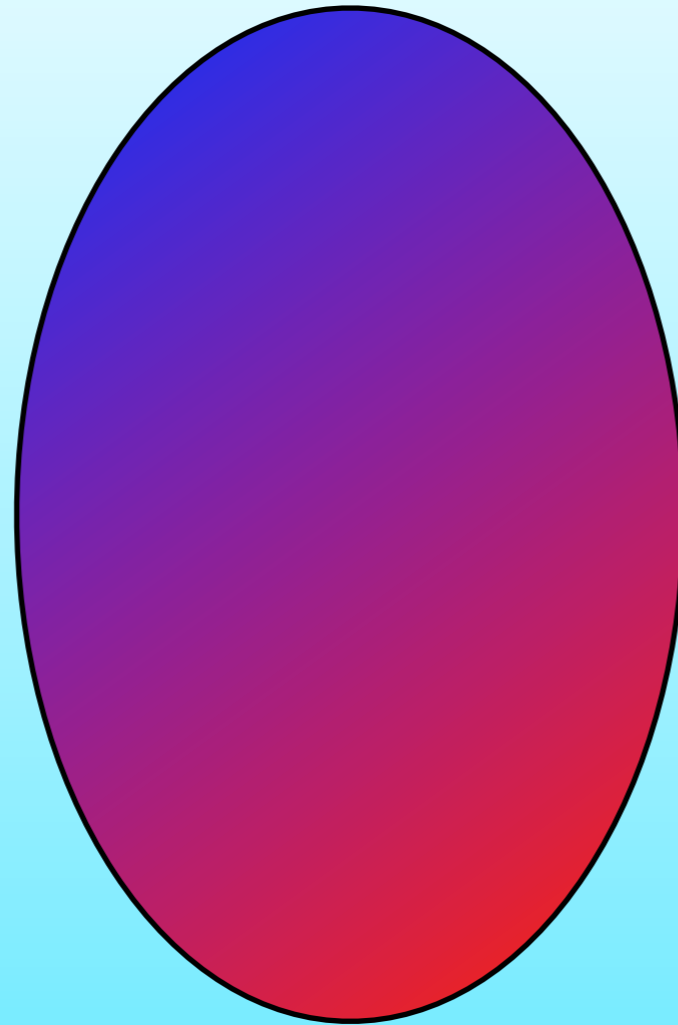


対称性の低下と対称性の破れ



対称性の低下

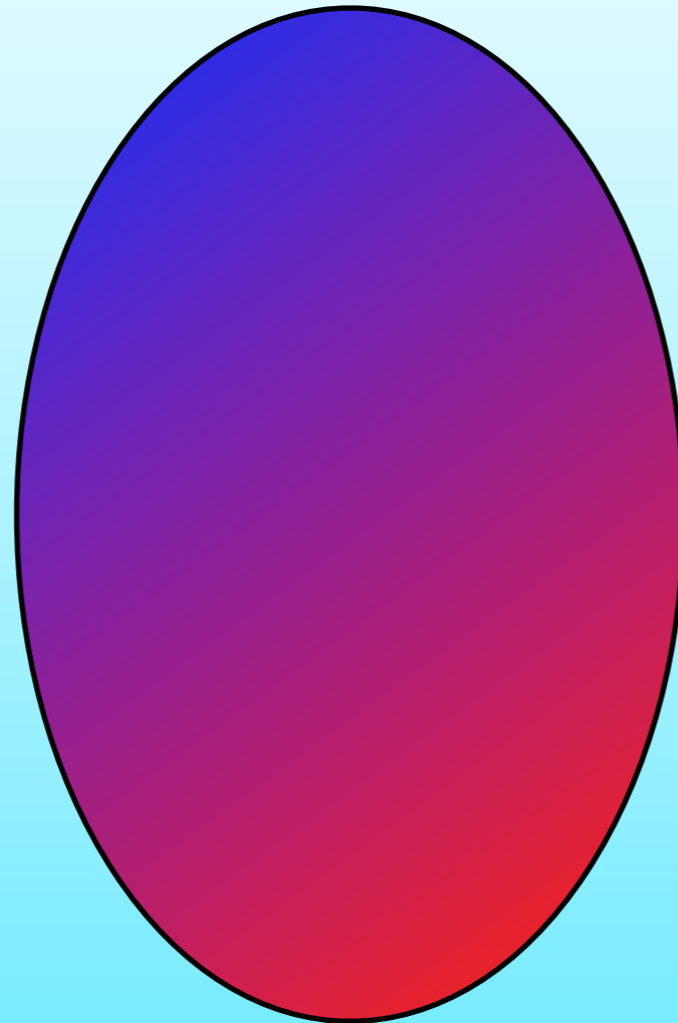
対称性の低下と対称性の破れ



対称性の低下

対称性の破れ

対称性の低下と対称性の破れ

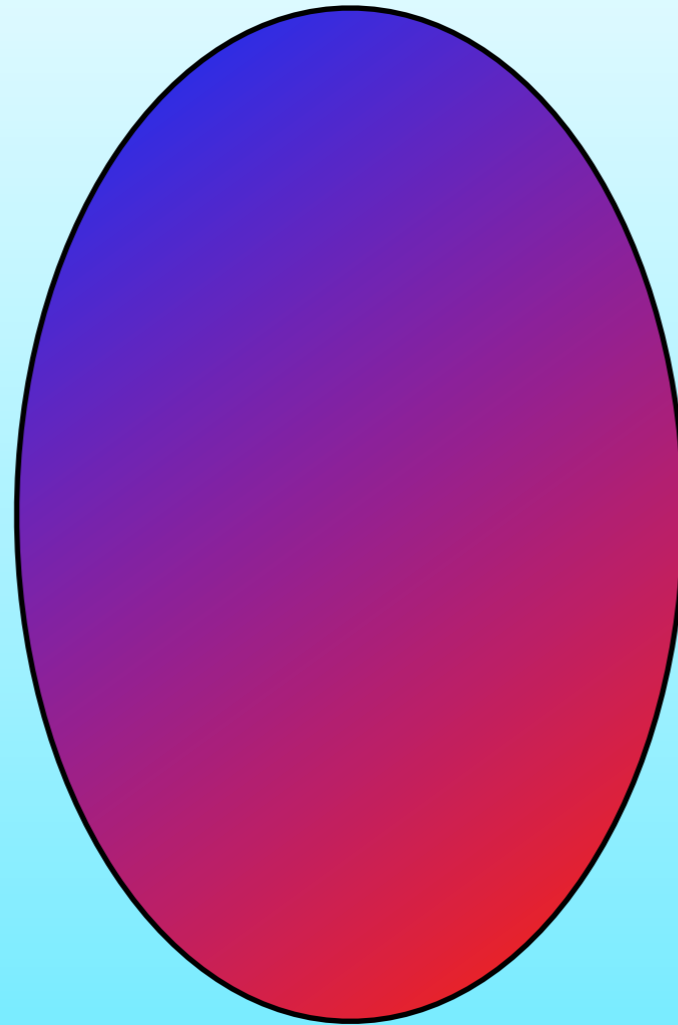


対称性の低下

対称性の破れ

Broken Symmetry

対称性の低下と対称性の破れ



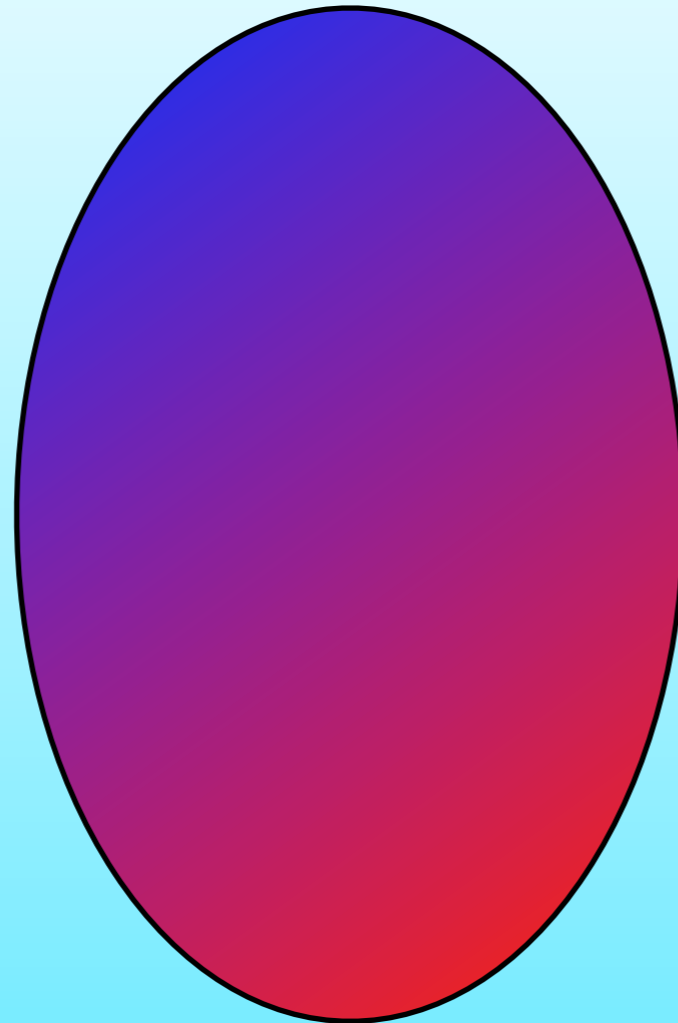
対称性の低下

対称性の破れ

Broken Symmetry

Break down of Continuous Symmetry

対称性の低下と対称性の破れ



対称性の低下

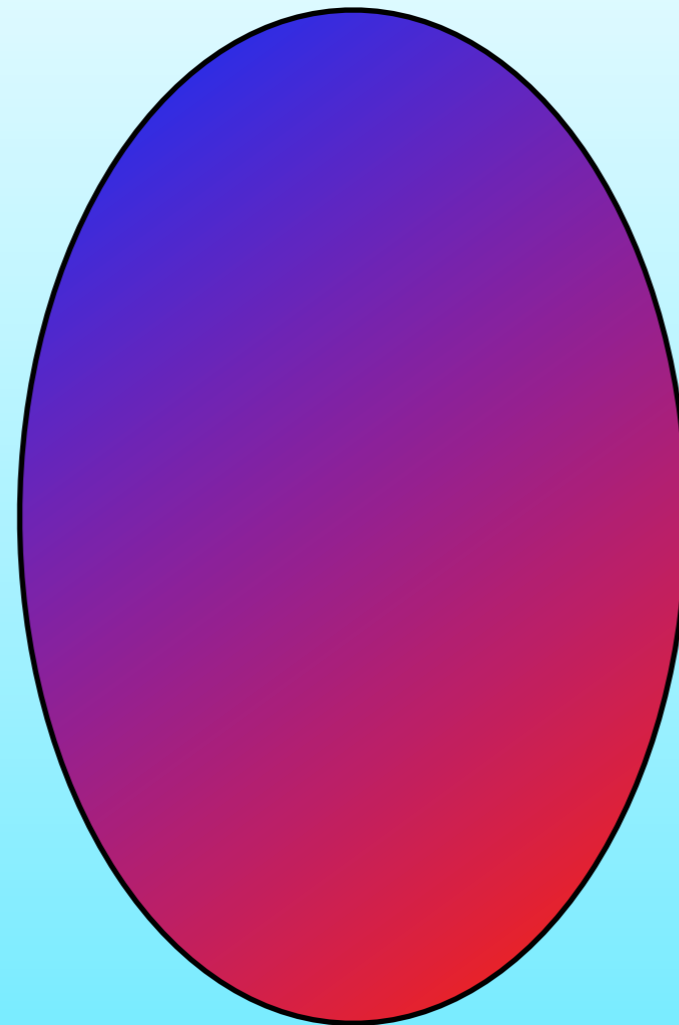
対称性の破れ

Broken Symmetry

Break down of Continuous Symmetry

連続対称性の破れ

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?*

超伝導と超流動：対称性の破れと相転移

BCS 理論

Bardeen, Cooper and Schrieffer



The Nobel Prize in Physics 1972

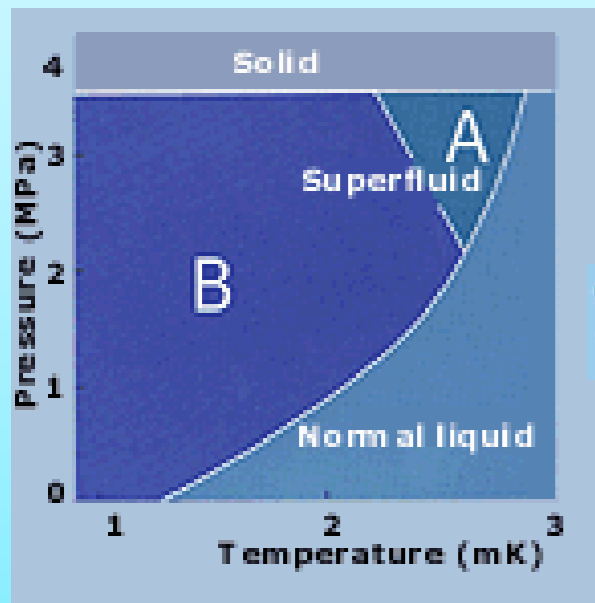
超伝導にもいろいろある：量子相転移

高温超伝導体の発見

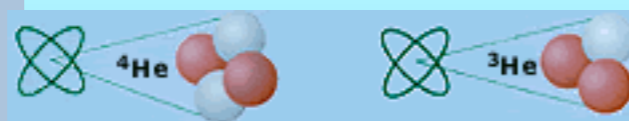
J. Georg Bednorz K. Alexander Müller



The Nobel Prize in Physics 1987



量子相転移



David M. Lee, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson



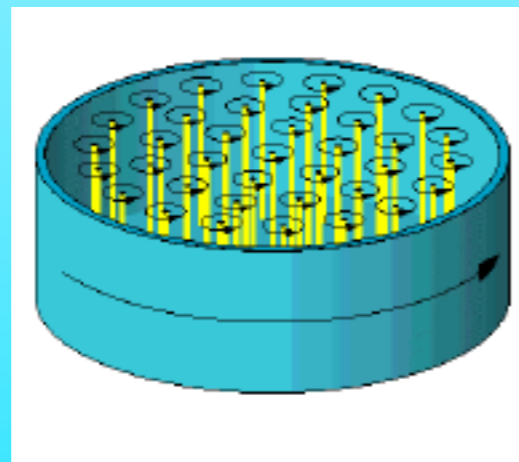
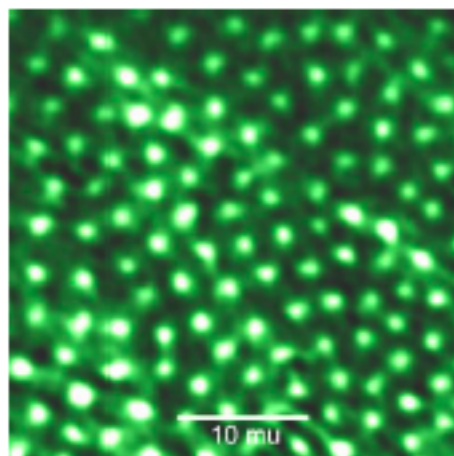
The Nobel Prize in Physics 1996

第2種超伝導

Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett



The Nobel Prize in Physics 2003



磁石：秩序形成＝対称性の破れの例

★磁気秩序（磁石）

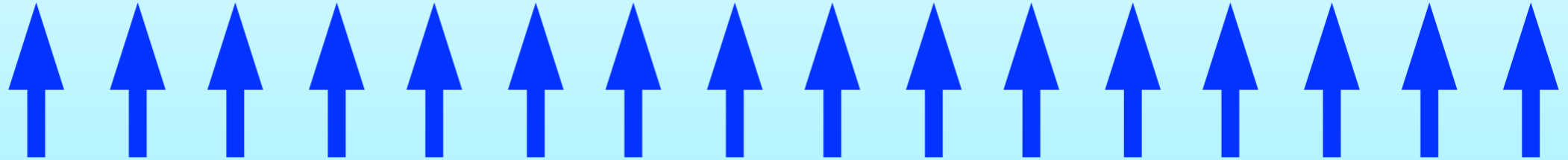
磁石：秩序形成＝対称性の破れの例

★磁気秩序（磁石）

室温の磁石

(秩序正しい)

秩序相



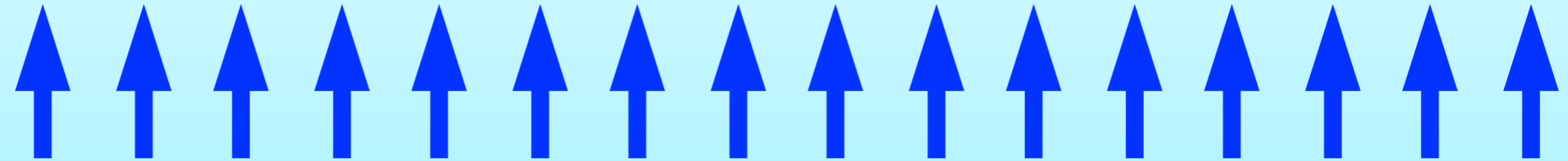
磁石：秩序形成＝対称性の破れの例

★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



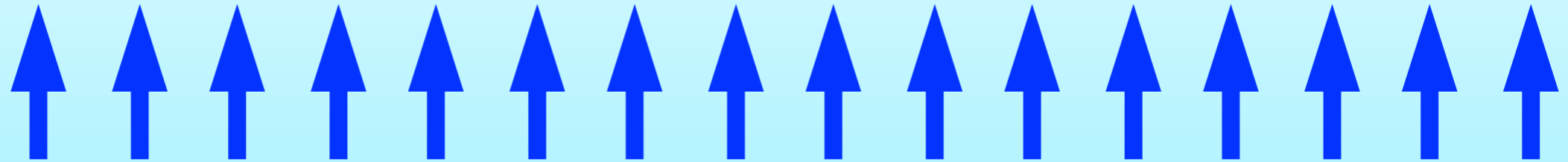
磁石：秩序形成＝対称性の破れの例

★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破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★多様な形態を「相」として特徴づける

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★ 物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★ 多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★ 物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★ 多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？  秩序の概念をつかって！

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？  秩序の概念をつかって！

どのように？

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？ → 秩序の概念をつかって！

どのように？ → 対称性の破れによって

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？  秩序の概念をつかって！

どのように？  対称性の破れによって

何を使って？

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？  秩序の概念をつかって！

どのように？  対称性の破れによって

何を使って？  秩序変数を用いて

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

- ★ 水の三態（液体、気体、固体）
- ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
- ★ なぜ水は透明か？
- ★ ルビーはなぜ赤い？
- ★ ...
- ★ 金属はなぜ電気を通す
- ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか
- ★ 金、銀はなぜキラキラするの？
- ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？  秩序の概念をつかって！

どのように？  対称性の破れによって

何を使って？  秩序変数を用いて

秩序変数を用いた対称性の自発的破れによる相分類

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

Landau-Ginzburg-Wilson theory

★ ルビーはなぜ赤い？

★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？

★ ...

★多様な形態を「相」として特徴づける

どうやって？ → 秩序の概念をつかって！

どのように？ → 対称性の破れによって

何を使って？ → 秩序変数を用いて

秩序変数を用いた対称性の自発的破れによる相分類

秩序変数と対称性の破れによる物質相

★物質の多様な形態を区別、理解する

Landau-Ginzburg-Wilson theory

★ レジ はたがまいつ

★ ダイカエ、レジと鉛筆の境いは?

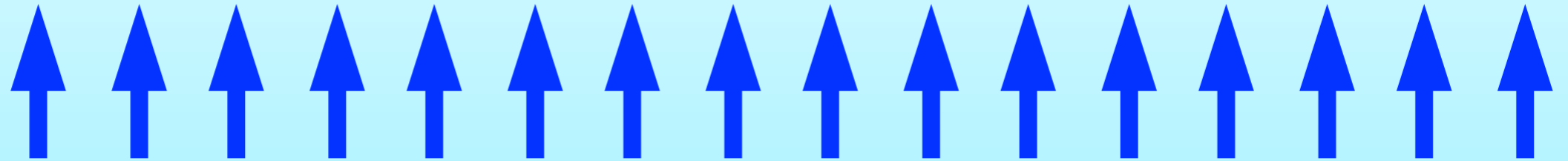
*All over the physics
From the strings to the Universe
& Condensed matter*

秩序変数を用いた対称性の自発的破れによる相分類

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！！

秩序相

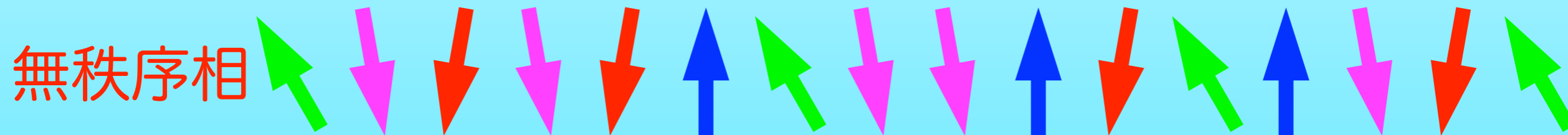
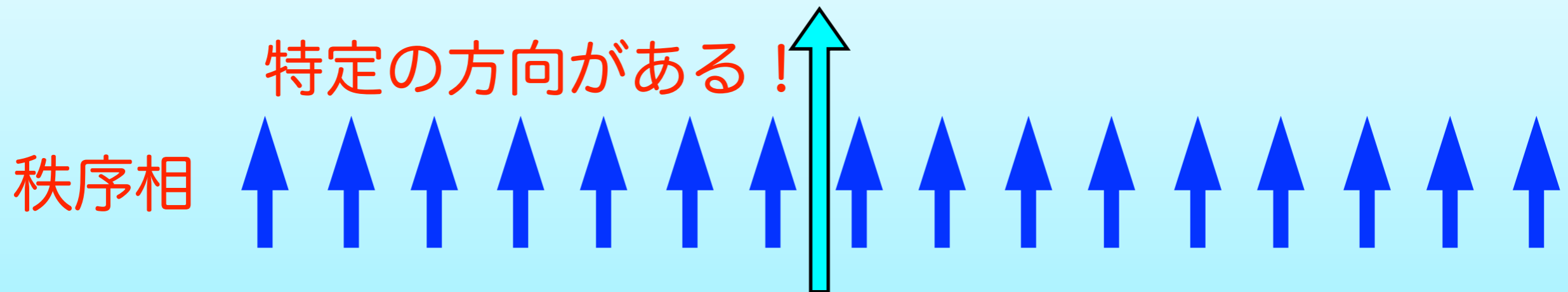


無秩序相



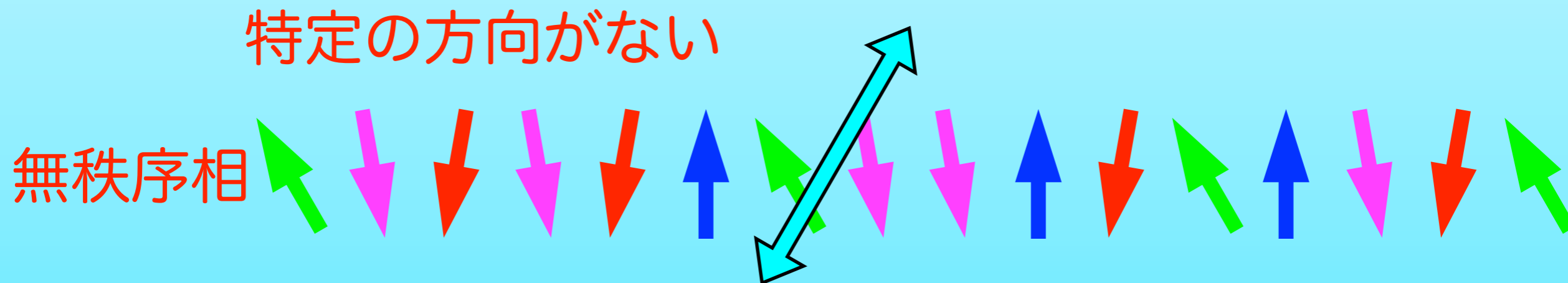
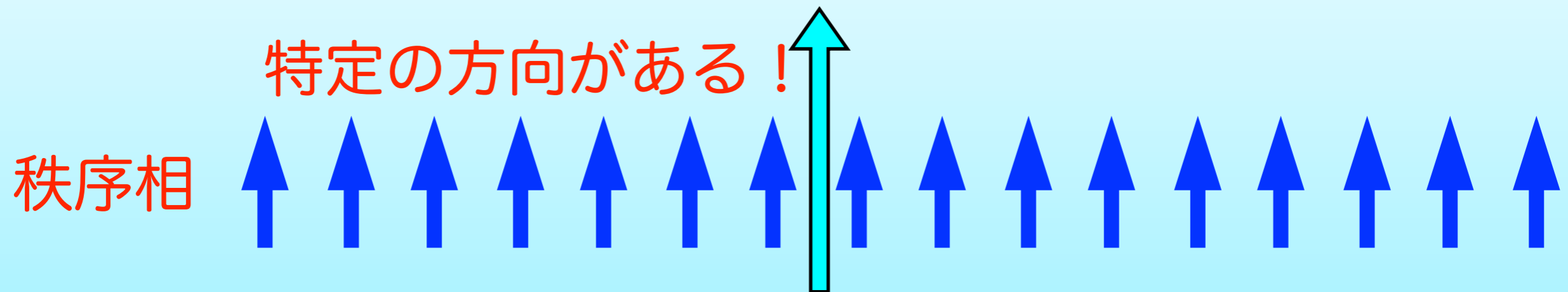
秩序変数と対称性の自発的破れ

★ 対称性の観点から区別しよう！！



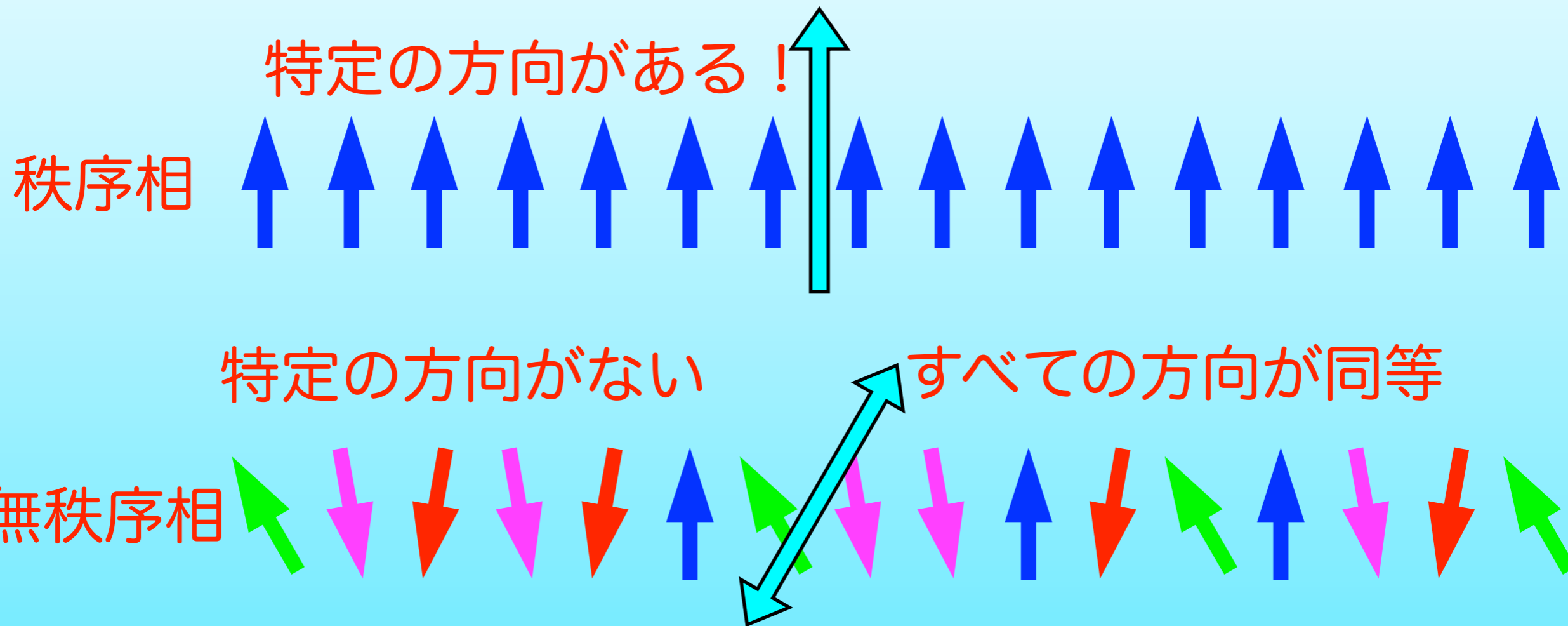
秩序変数と対称性の自発的破れ

★ 対称性の観点から区別しよう！！



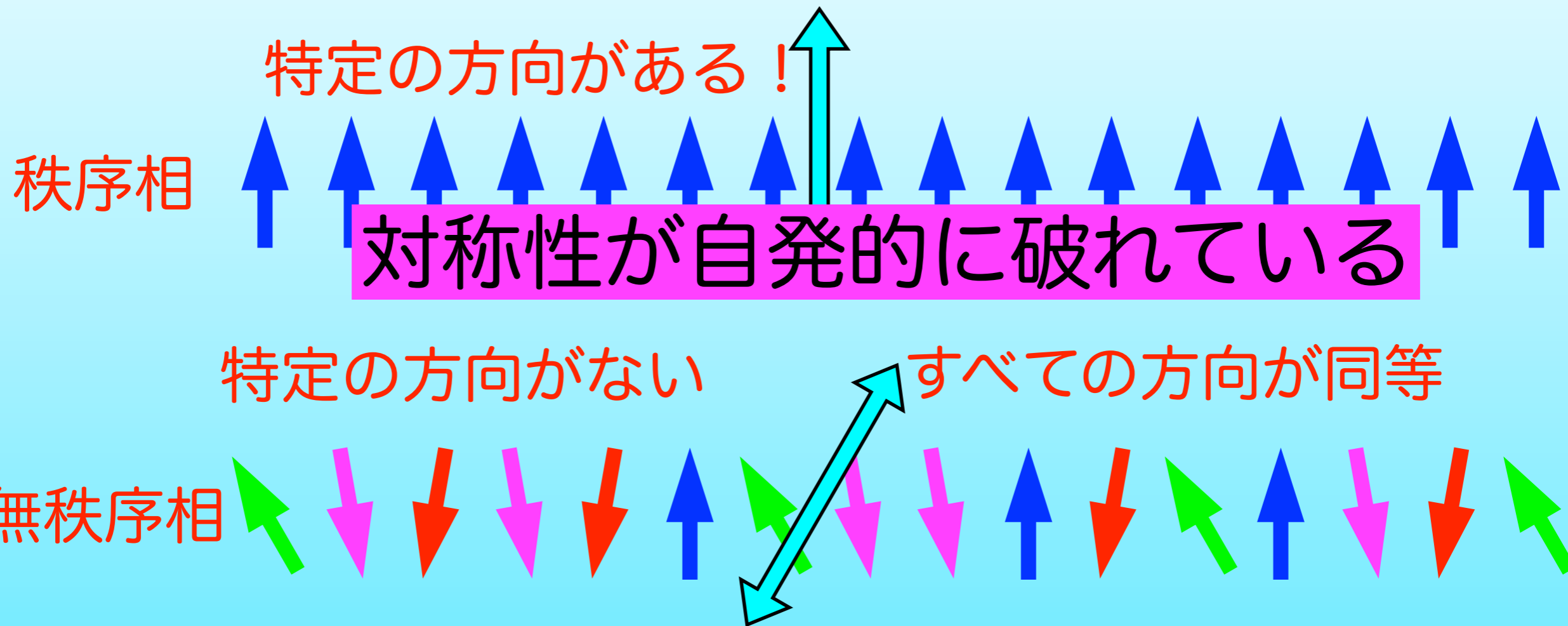
秩序変数と対称性の自発的破れ

★ 対称性の観点から区別しよう！！



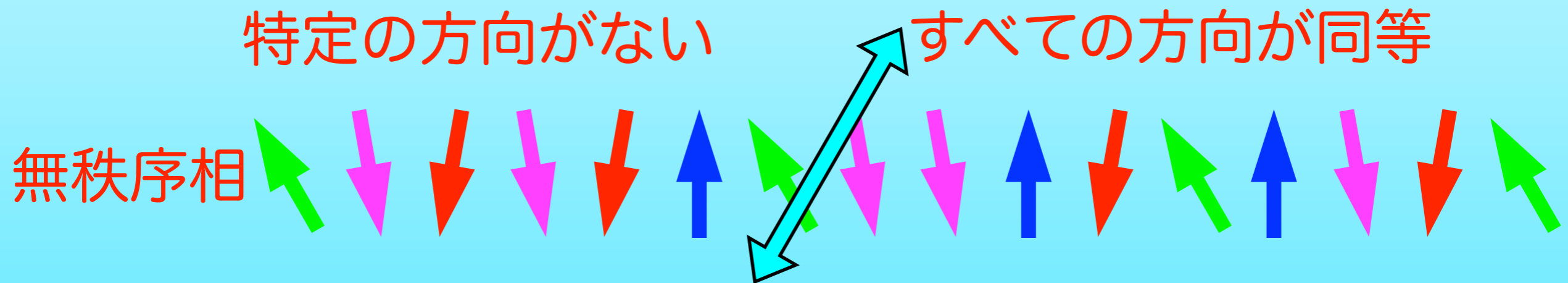
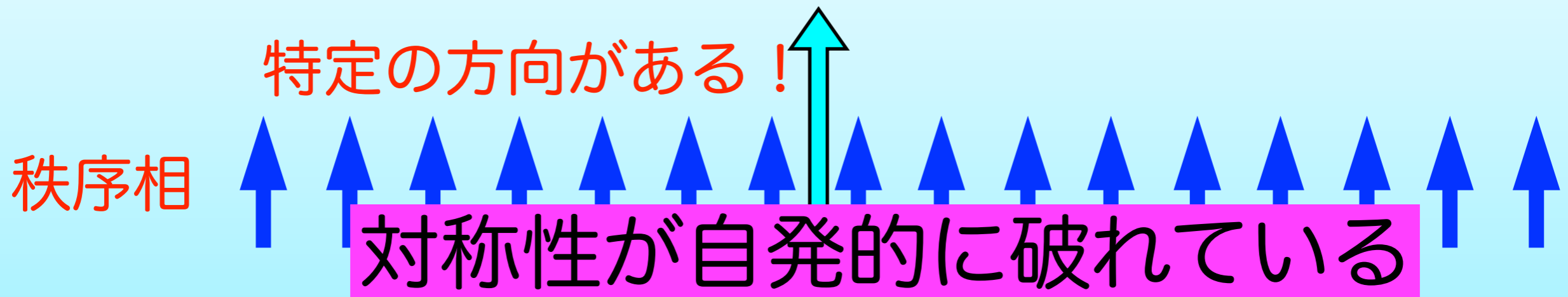
秩序変数と対称性の自発的破れ

★ 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！！

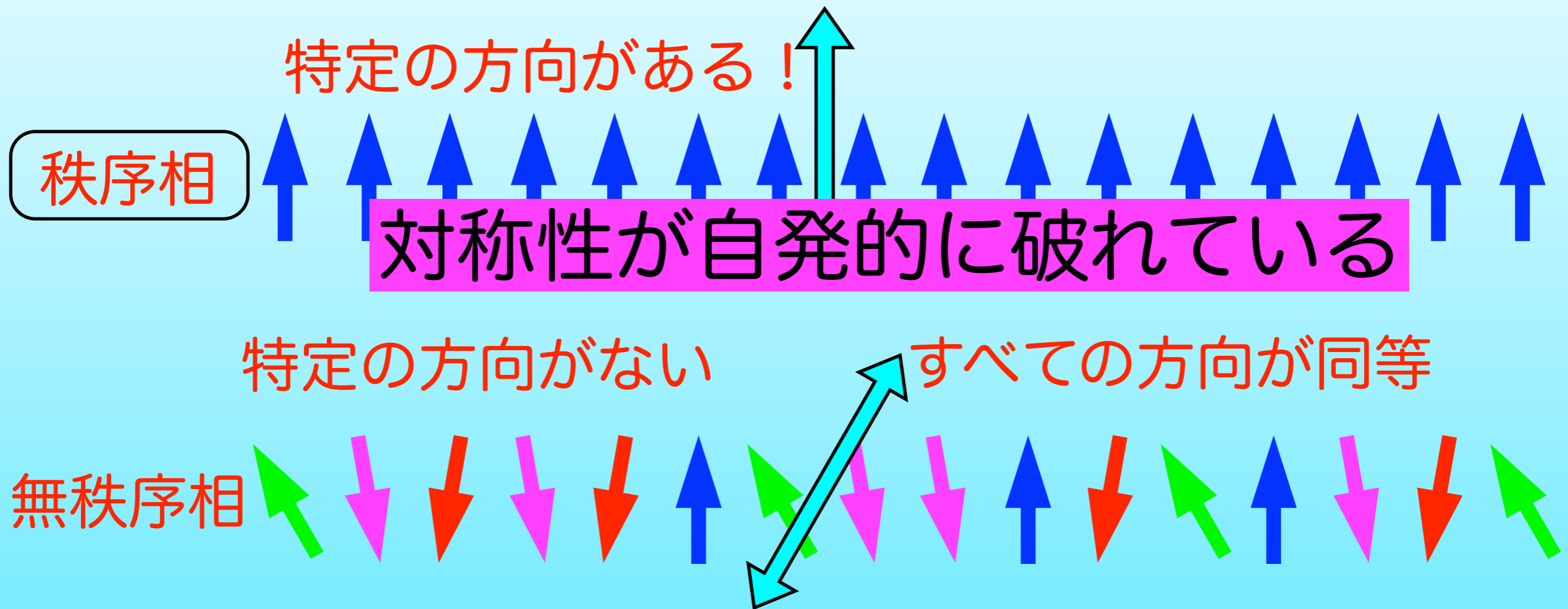


秩序変数 $m(\vec{r})$:

$$\begin{cases} \neq 0 & \text{対称性が破れている} \\ = 0 & \text{対称性が破れていない} \end{cases}$$

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！！

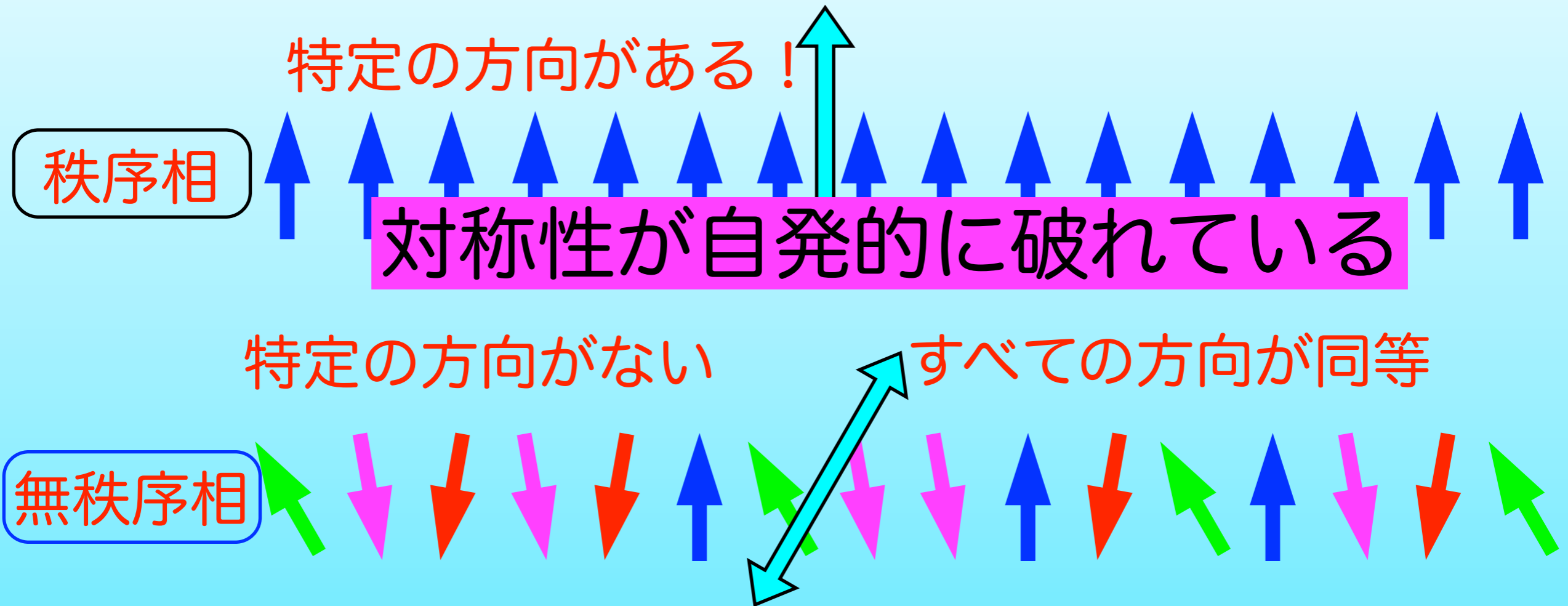


秩序変数 $m(\vec{r})$:

$\neq 0$	対称性が破れている
$= 0$	対称性が破れていない

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

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

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

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！

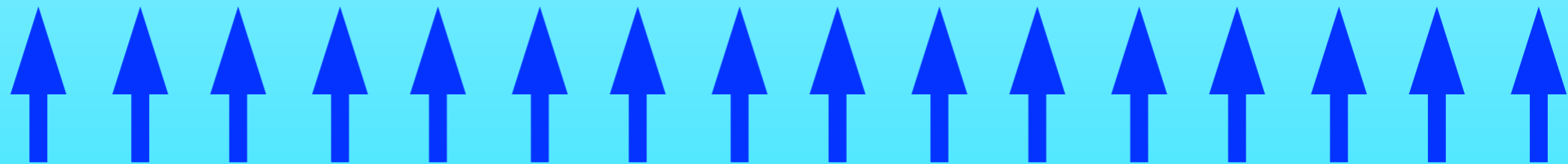
特定の方向はない

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！

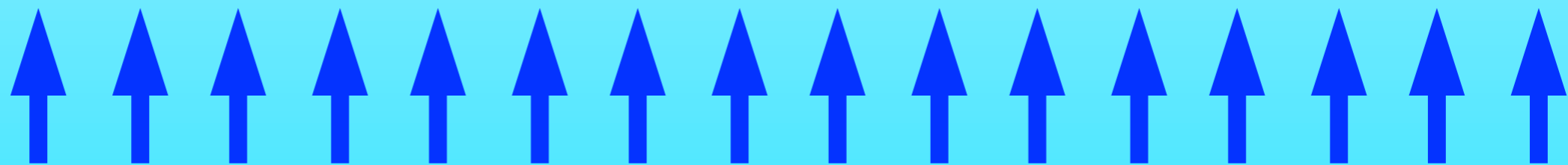
特定の方向はない

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



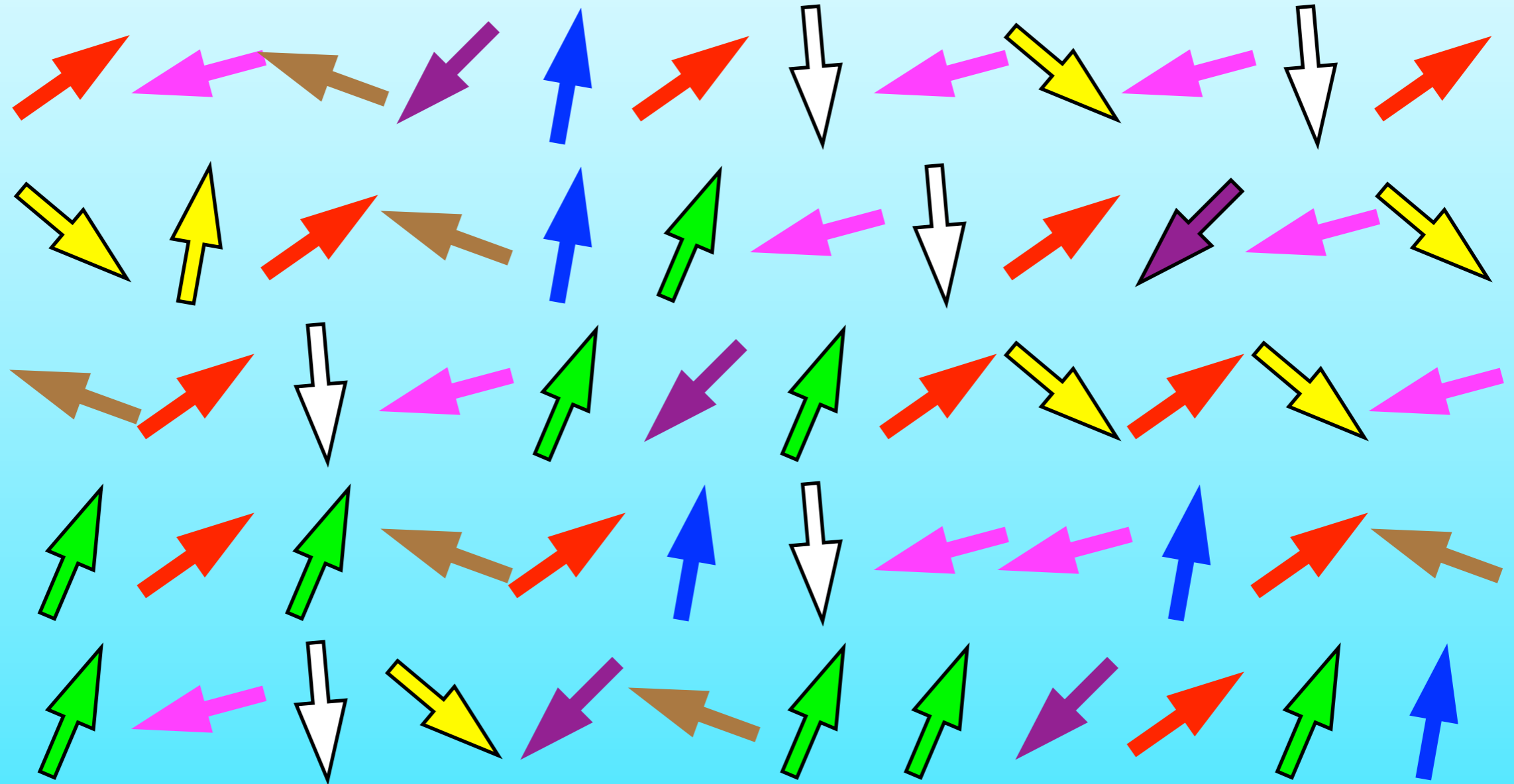
対称性が自発的に破れている

温度低下による自発的対称性の破れ

Disordered

高温相

Symmetric



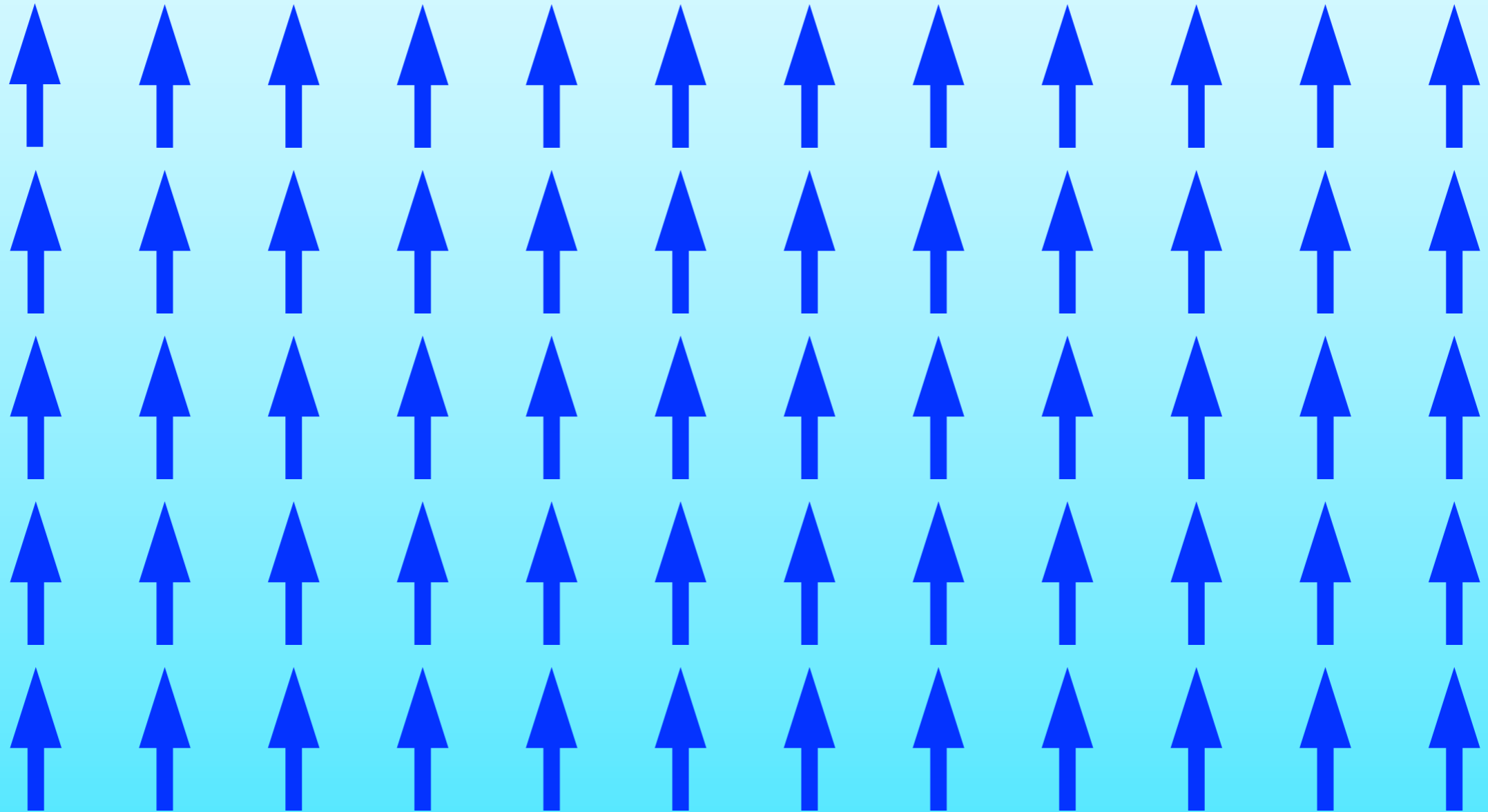
特定の方向が無い：平均的にすべての方向が同等

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



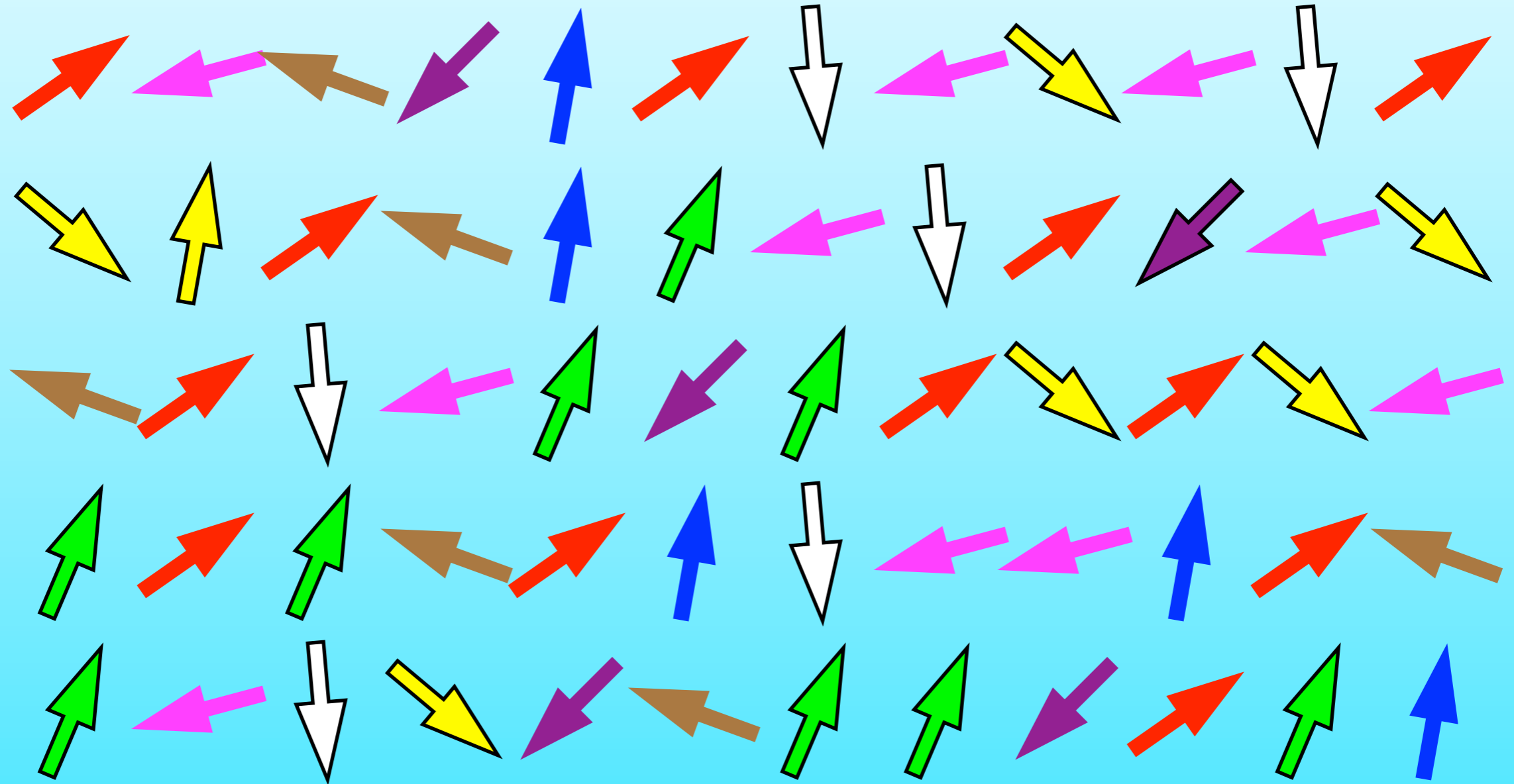
特定の方角を自発的に物質が選び出す！

温度低下による自発的対称性の破れ

Disordered

高温相

Symmetric



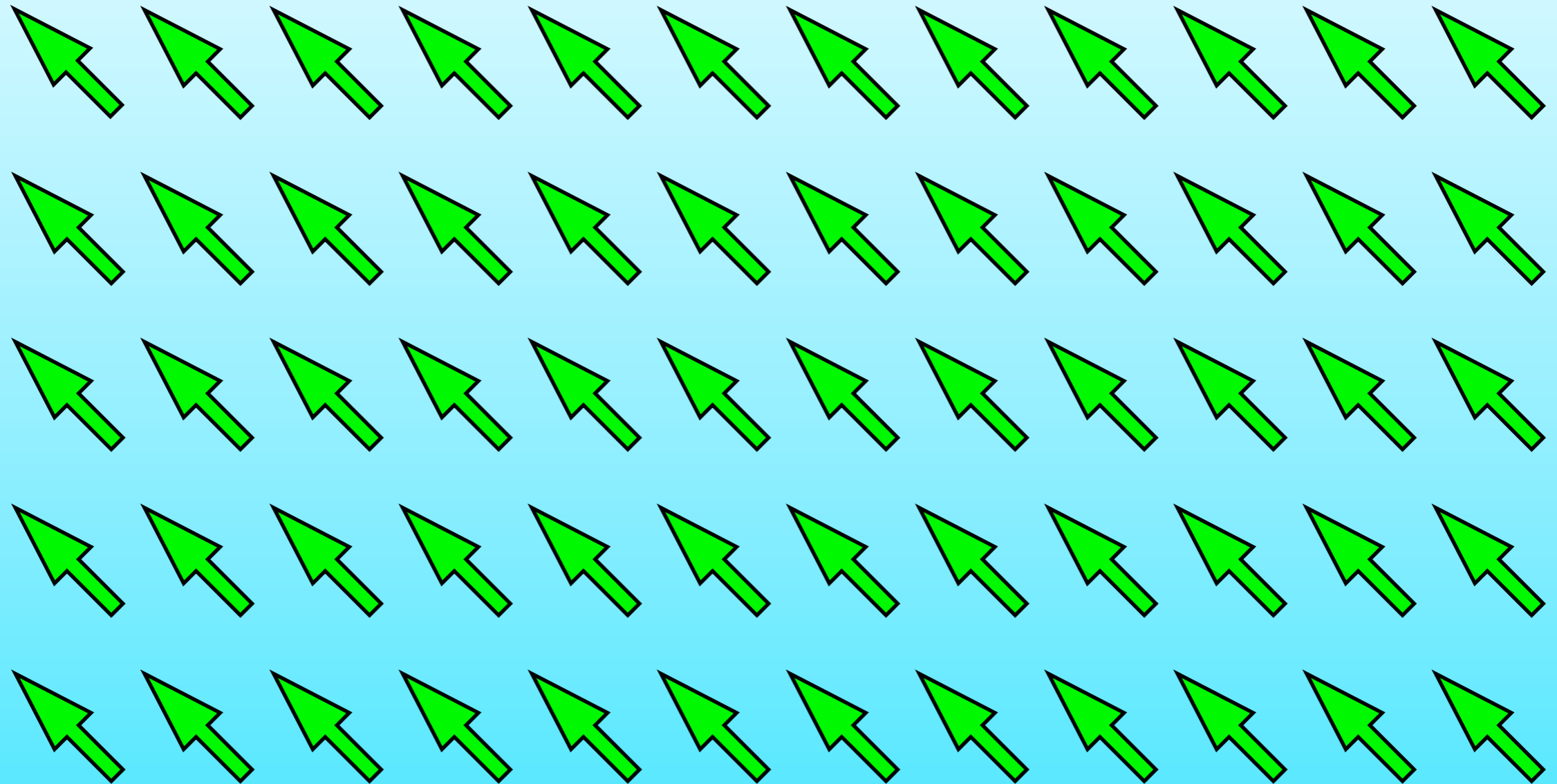
特定の方向が無い：平均的にすべての方向が同等

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



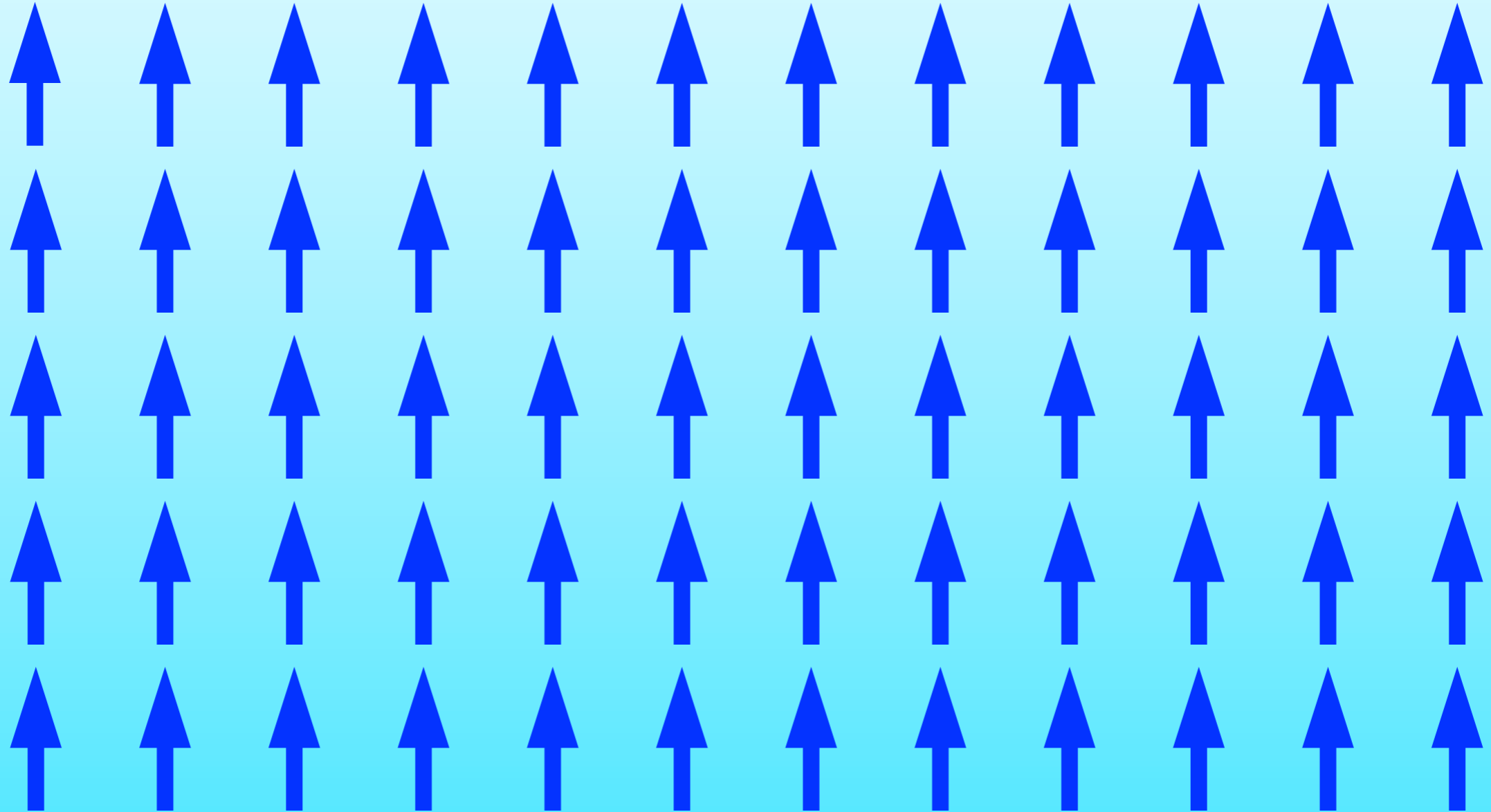
特定の方角を自発的に物質が選び出す！

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



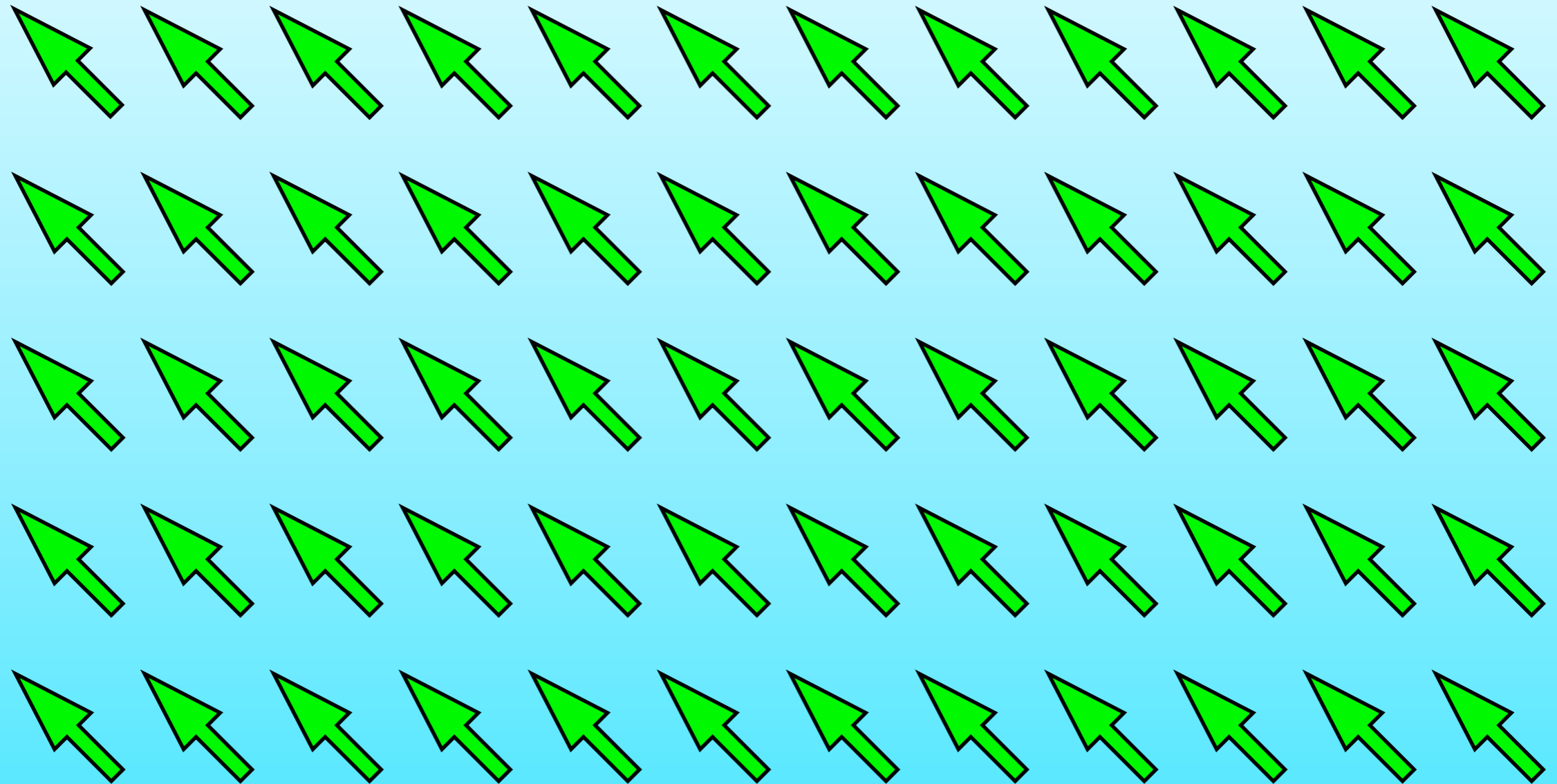
どの方向への対称性の破れ、秩序もやはり同等！！

温度低下による自発的対称性の破れ

Ordered

低温相

Broken Symmetry



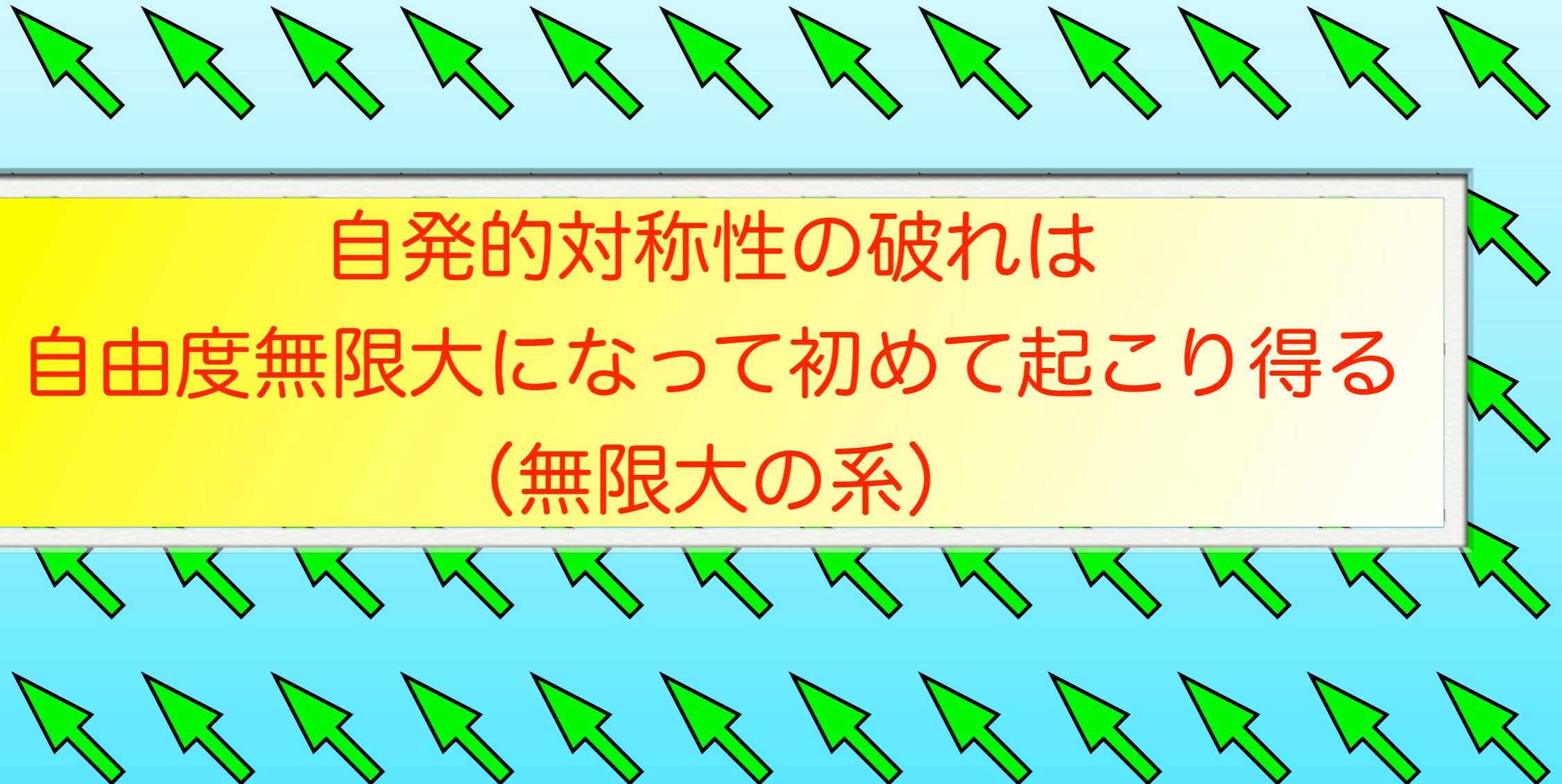
どの方向への対称性の破れ、秩序もやはり同等！！

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)

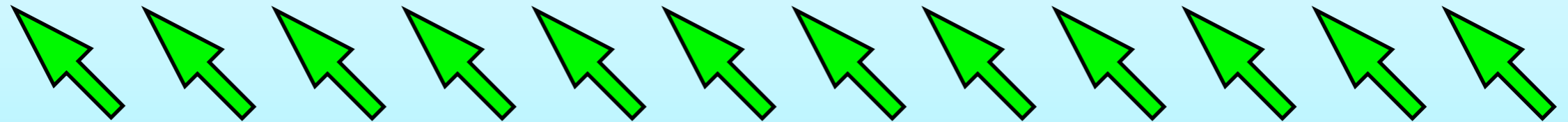
どの方向への対称性の破れ、秩序もやはり同等！！

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

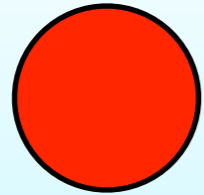
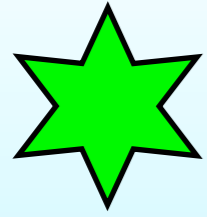
by P.W.Anderson

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*

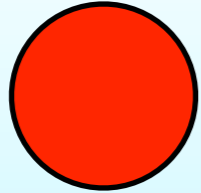
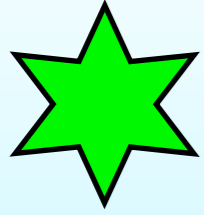
同等な方向が連続無限個ある！

連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



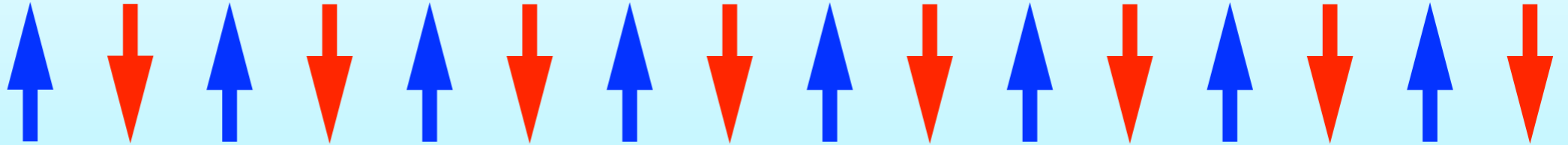
同等な方向が連続無限個ある！

連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*

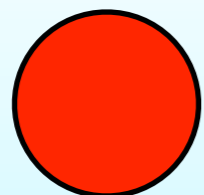
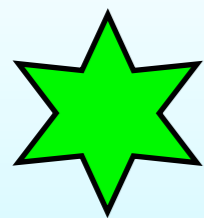


同等な方向が連続無限個ある！

Breaking pattern 1

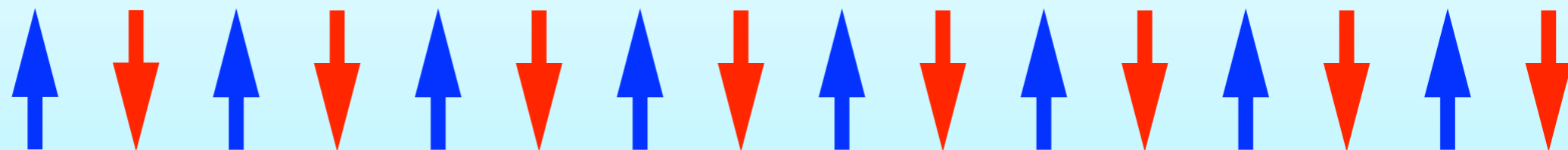


連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



同等な方向が連続無限個ある！

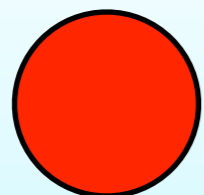
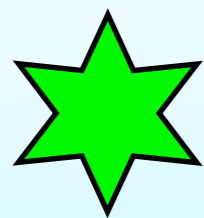
Breaking pattern 1



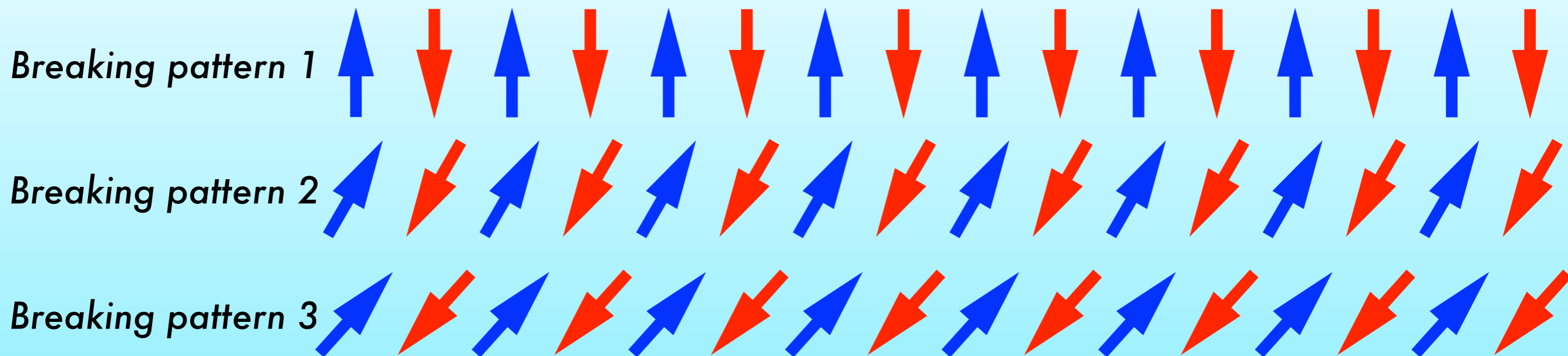
Breaking pattern 2



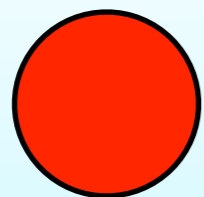
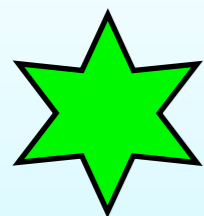
連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



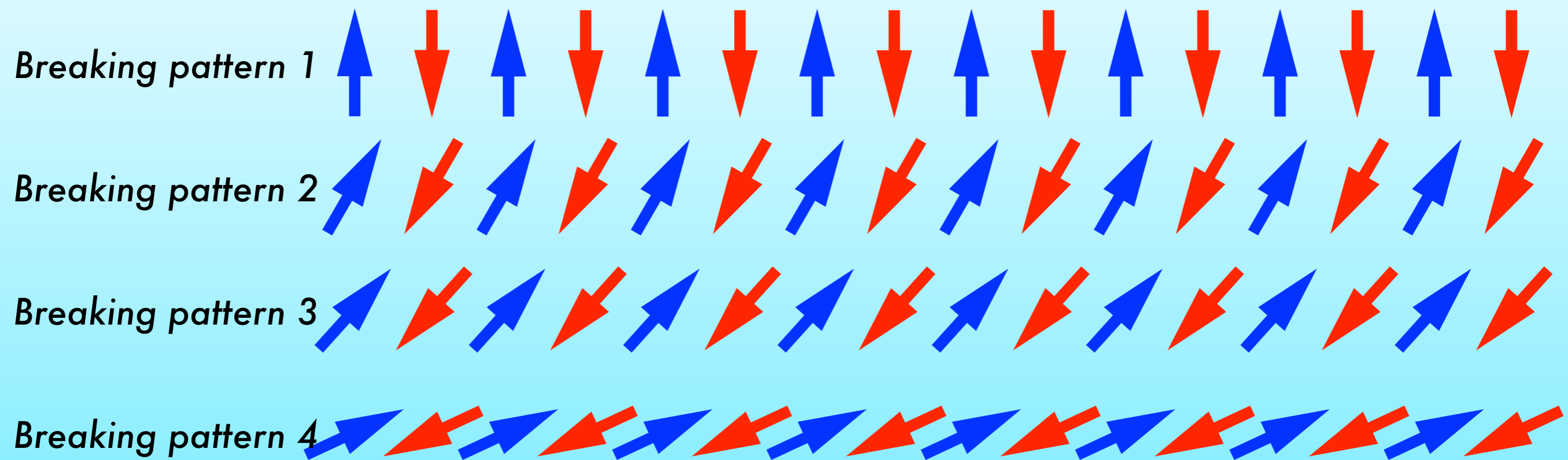
同等な方向が連続無限個ある！



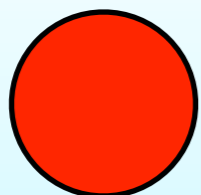
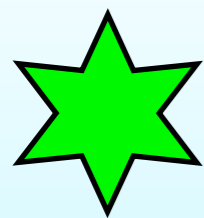
連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



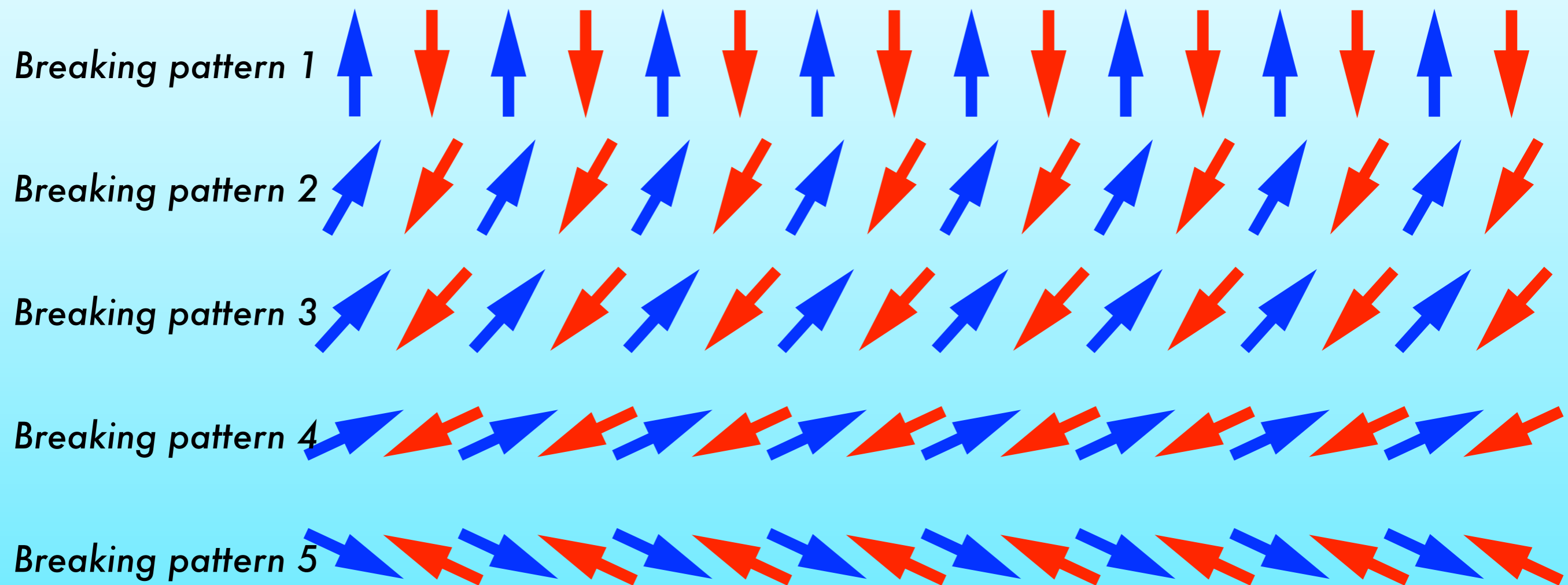
同等な方向が連続無限個ある！



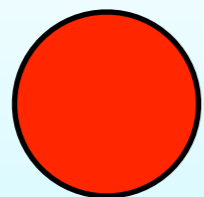
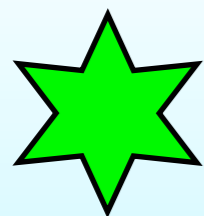
連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



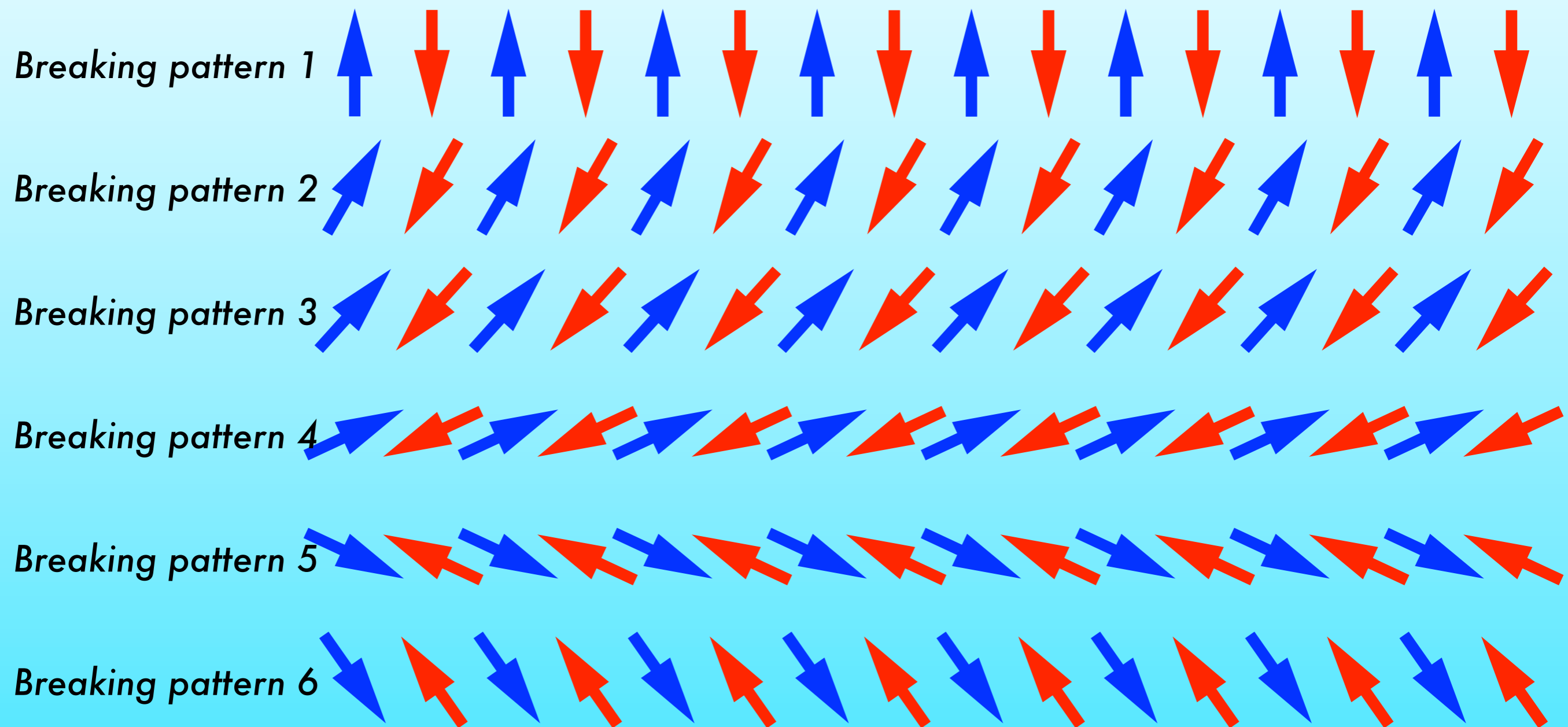
同等な方向が連続無限個ある！



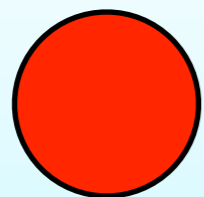
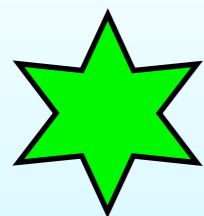
連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



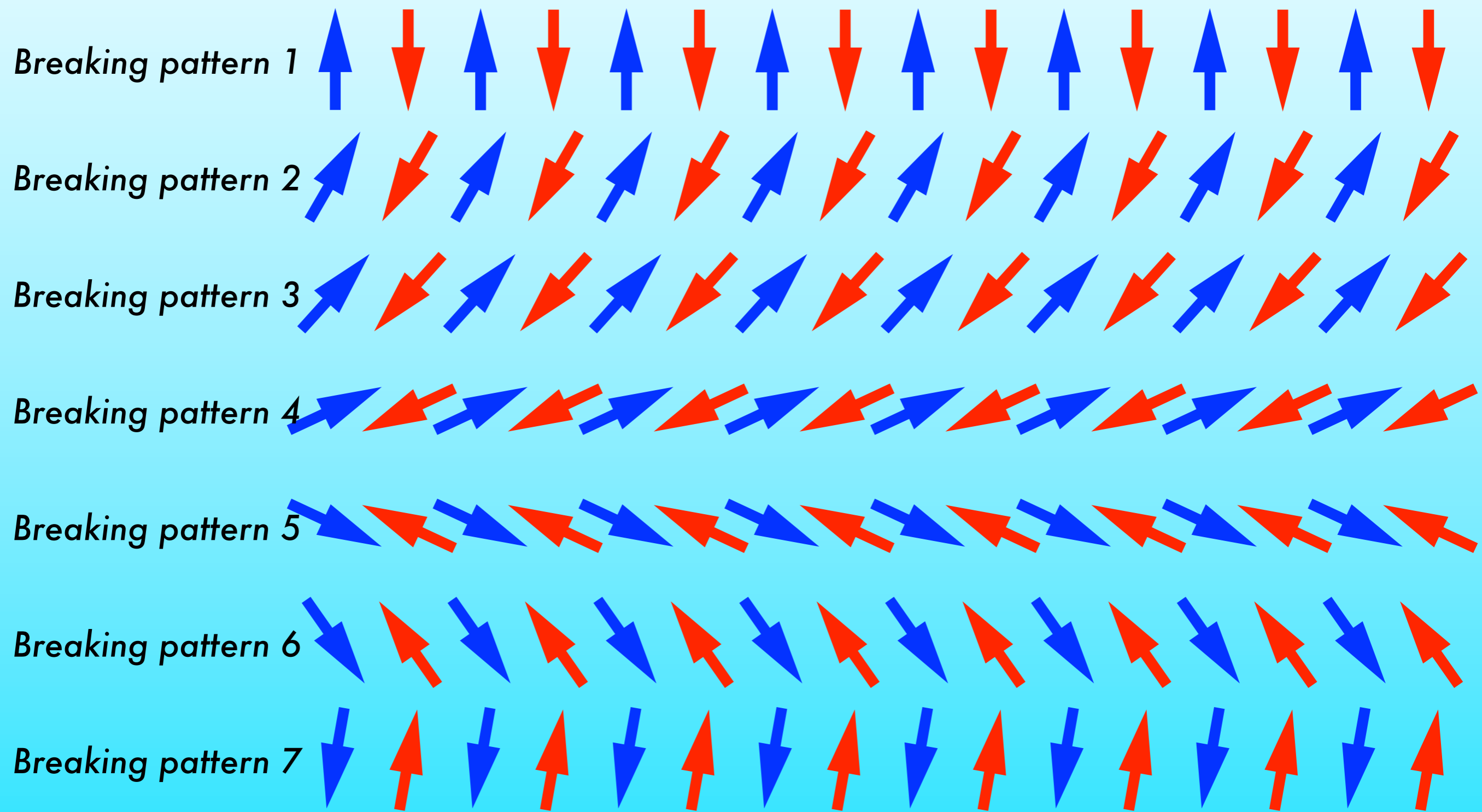
同等な方向が連続無限個ある！



連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldston Boson*



同等な方向が連続無限個ある！



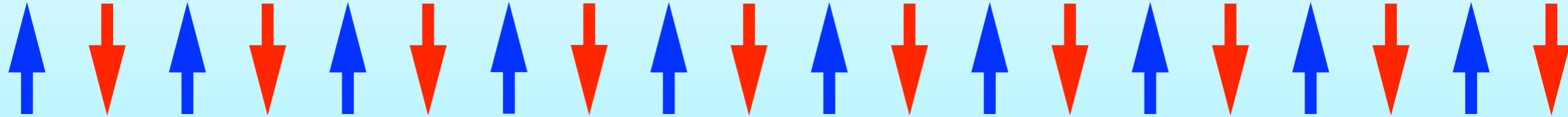
連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す

連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone 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



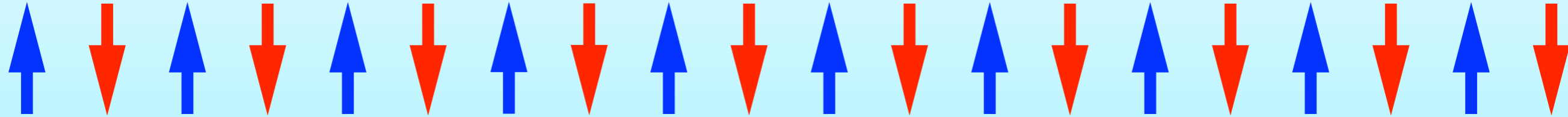
ゆっくりしたパターンの乱れ



連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す

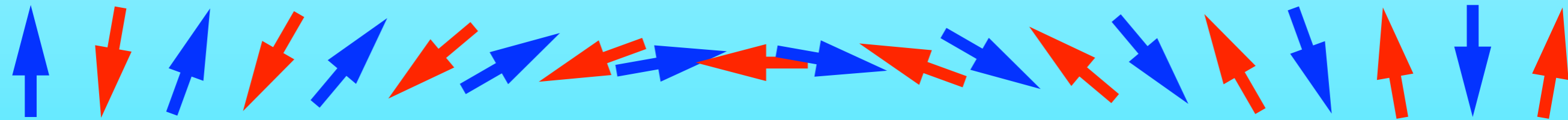
理想的な対称性の破れ



ゆっくりしたパターンの乱れ



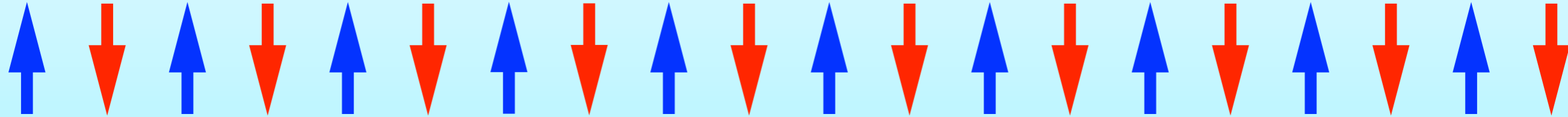
もっとゆっくりしたパターンの乱れ



連続対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す

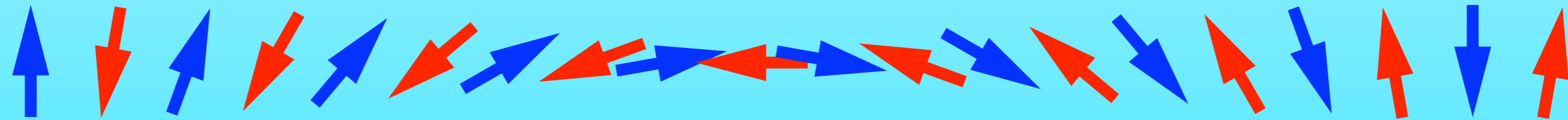
理想的な対称性の破れ



ゆっくりしたパターンの乱れ



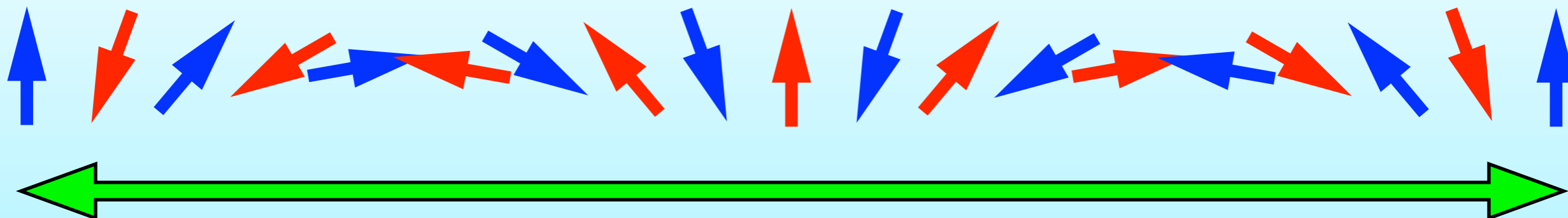
もっとゆっくりしたパターンの乱れ



パターンの乱れの波長

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

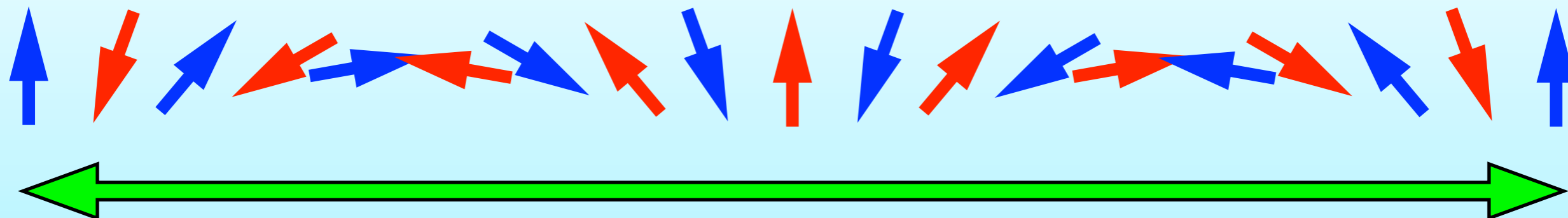
対称性の破れのパターンをゆっくり乱す



パターンの乱れの波長

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す

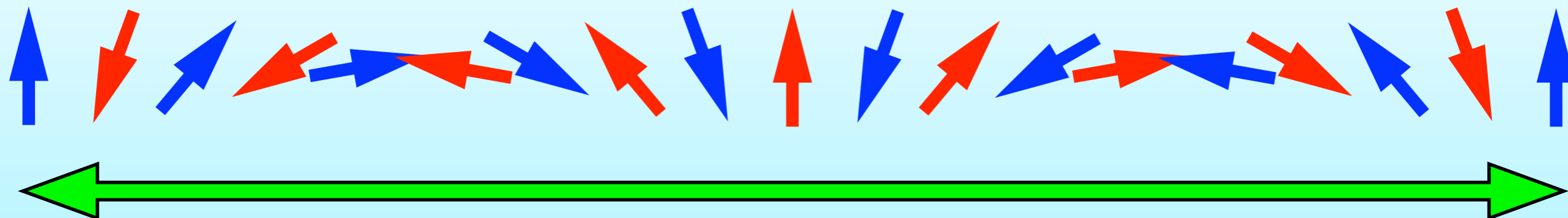


パターンの乱れの波長

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

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す



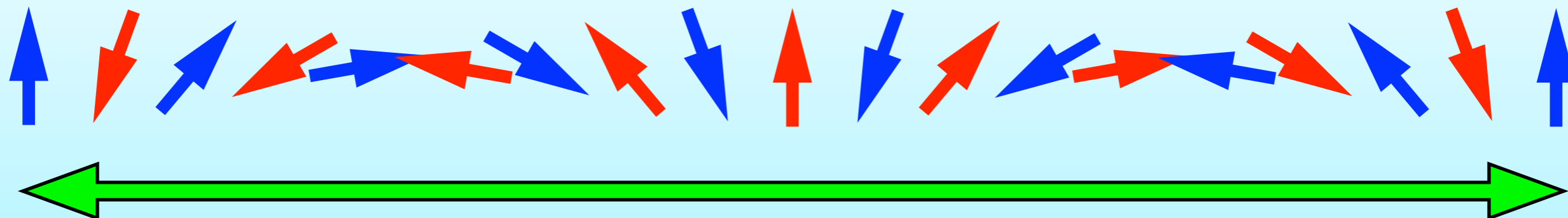
パターンの乱れの波長

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

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す



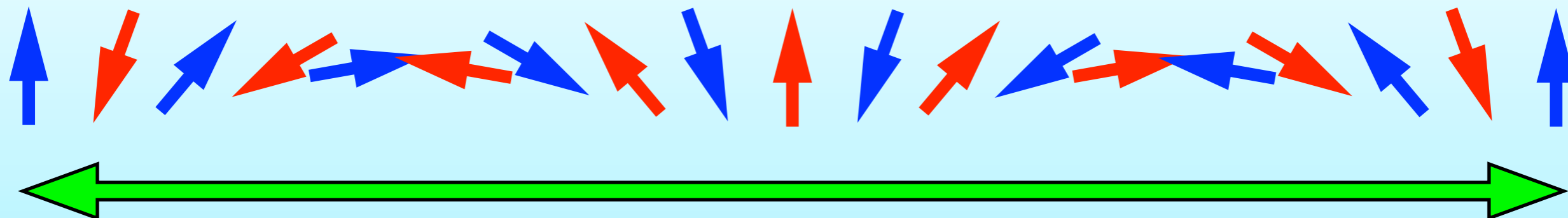
パターンの乱れの波長

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*

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone Boson*

対称性の破れのパターンをゆっくり乱す



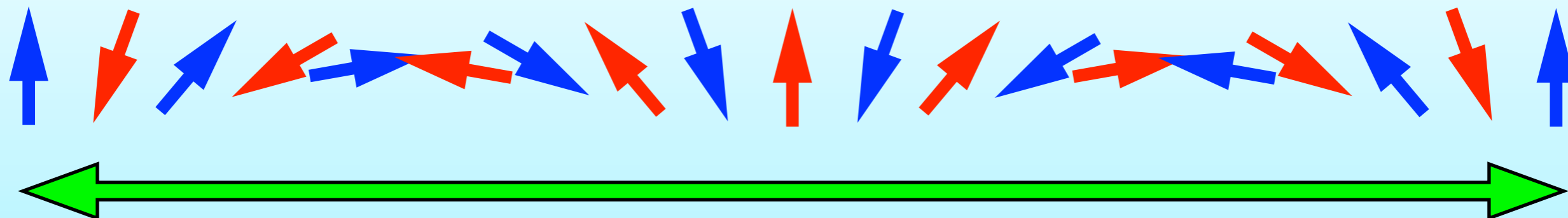
パターンの乱れの波長

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* *phonon*

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone 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

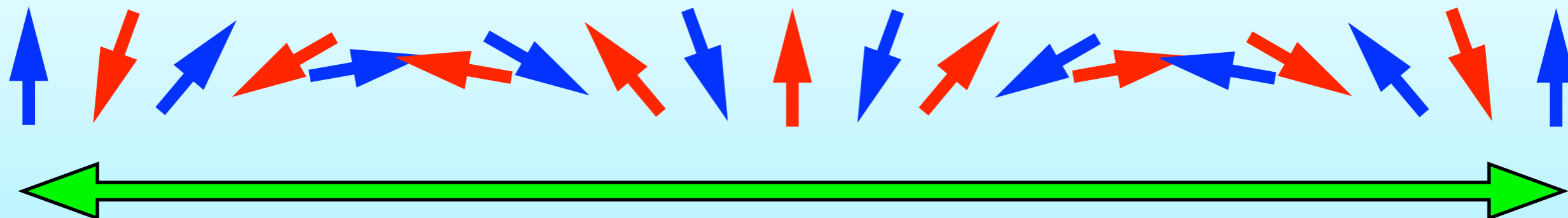
音波的振る舞い *magnon* *phonon*

Nambu-Goldstone Boson

**Gapless excitation with
Spontaneous Symmetry Breaking**

対称性の自発的破れと *Nambu-Goldstone 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* *phonon*

Nambu-Goldstone Boson

Gapless excitation with
Spontaneous Symmetry Breaking

Lieb-Schultz-Mattis, Affleck-Lieb

Too much success

*Nambu-Goldstone
&
Landau-Ginzburg-Wilson ~ 1980*

Too much success

Nambu-Goldstone
&
Landau-Ginzburg-Wilson ~1980

The Munich physics professor [Philipp von Jolly](#) advised Planck against going into physics, saying, "in this field, almost everything is already discovered, and all that remains is to fill a few holes."

M. Planck ~1900



Too much success

Nambu-Goldstone
&
Landau-Ginzburg-Wilson ~ 1980

The Munich physics professor [Philipp von Jolly](#) advised Planck against going into physics, saying, "in this field, almost everything is already discovered, and all that remains is to fill a few holes."

M. Planck ~ 1900



Quantum phases **without** symmetry breaking
Quantum/spin liquids

Too much success

Nambu-Goldstone
&
Landau-Ginzburg-Wilson ~ 1980

The Munich physics professor [Philipp von Jolly](#) advised Planck against going into physics, saying, "in this field, almost everything is already discovered, and all that remains is to fill a few holes."

M. Planck ~ 1900



Quantum phases **without** symmetry breaking

Quantum/spin liquids

Topological phases/order

END