

# やわらかな物質の物理 —液晶ディスプレイから生体構造まで—

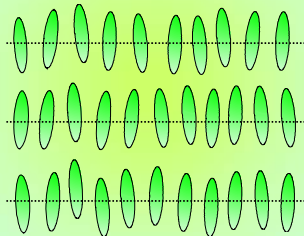
京都大学大学院理学研究科  
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野  
ソフトマター物理学  
山本 潤



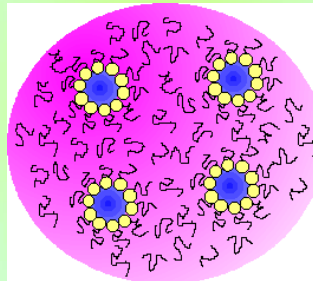
**ソフトマターから生体構造  
—時間・空間の協同的階層構造—**

# やわらかな物質 ソフトマター

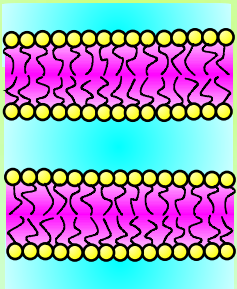
サーモトロピック液晶



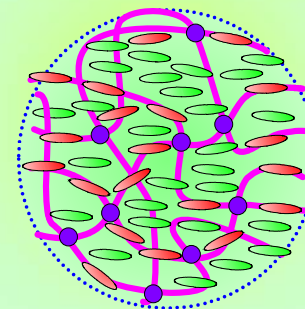
マイクロエマルジョン



界面活性剤  
リトロピック液晶

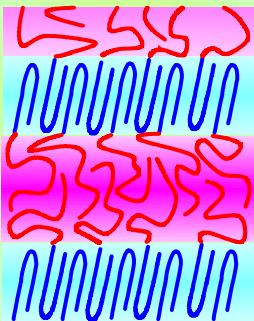


ゲル

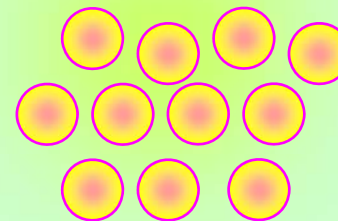


“液晶状態”

高分子



コロイド  
コロイド結晶



## ソフトマターと生体構造

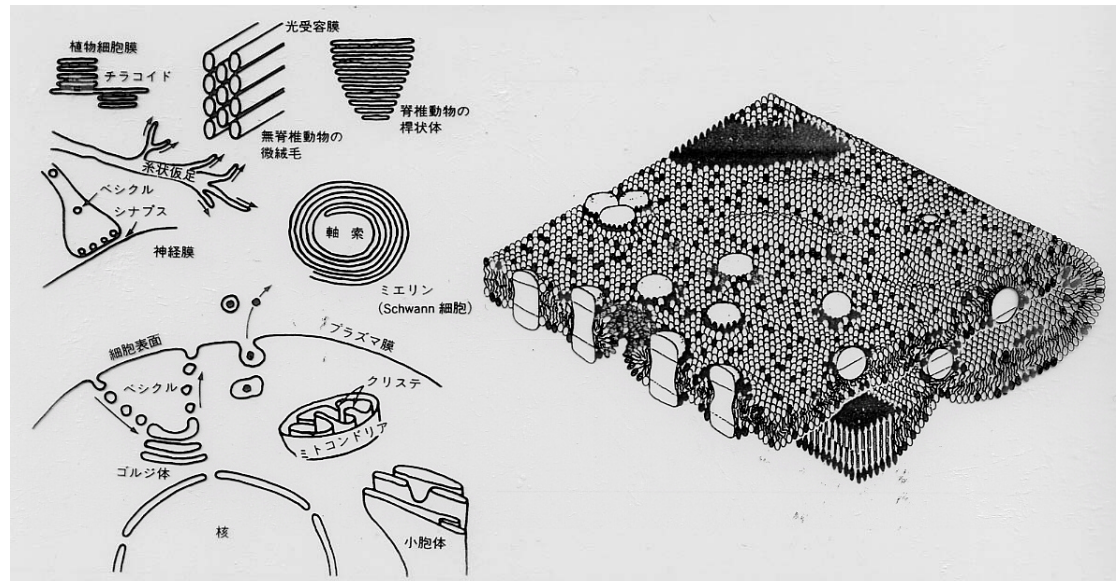


LC Displays

液晶ディスプレイ  
ネマティック相

純粋・一様な秩序状態  
を利用

● 生体構造の中には非常に多くの“液晶状態”を発見できる  
脳細胞・神経細胞は殆どが“液晶状態”、細胞内・皮膚 etc.



巨大でヘテロな  
階層構造

究極のソフトマター

● “液体”は無秩序で巨大構造を維持できない “固体”では硬く生命活動を担えない

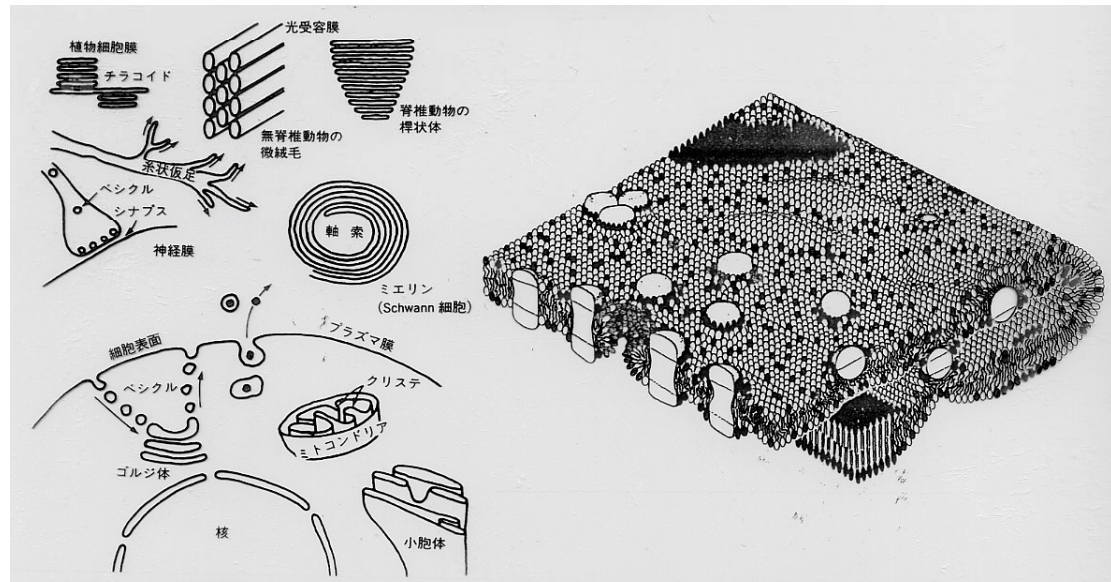
# 生体構造

●ソフトマター：ヘテロな自己組織的階層構造

Molecules    Supra-molecules    Cells    Tissue    Body

●生体構造：意思を持たない多種多様な分子が混合されている  
ヘテロな系が協同的・自発的に作る階層構造

## やわらかさとは？

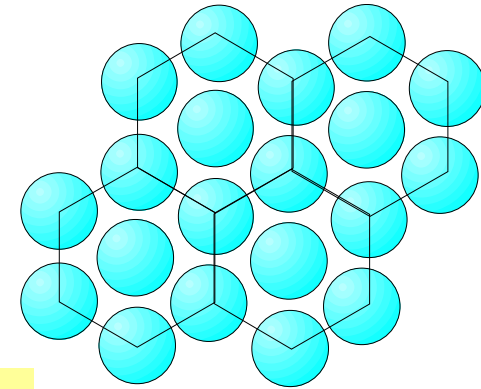
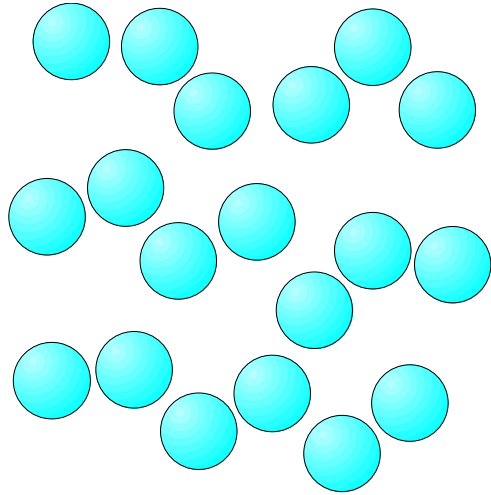


- **液晶状態** 固体と液体の中間状態
- **階層構造** ナノからマクロへ積み上げられた構造

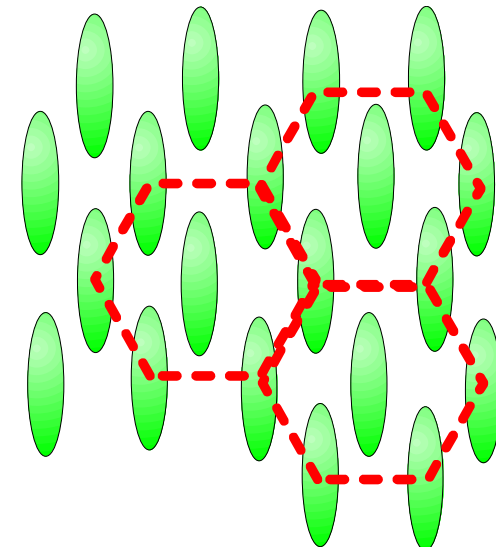
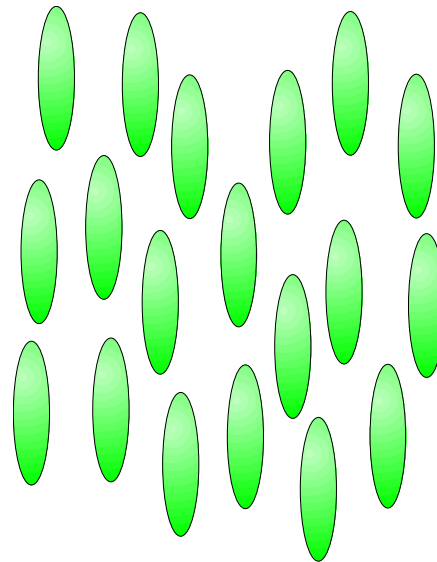
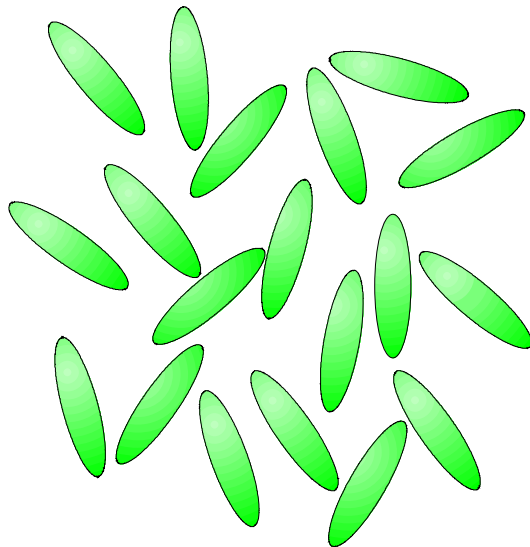
- 複数の異なる要素を含む**純粋でない**“ヘテロ”な系 = 多様性  
⇔ 純粋な系を扱ってきた物理学の普遍性

# 物質の3態と“液晶”状態

# 物質の3態と液晶状態

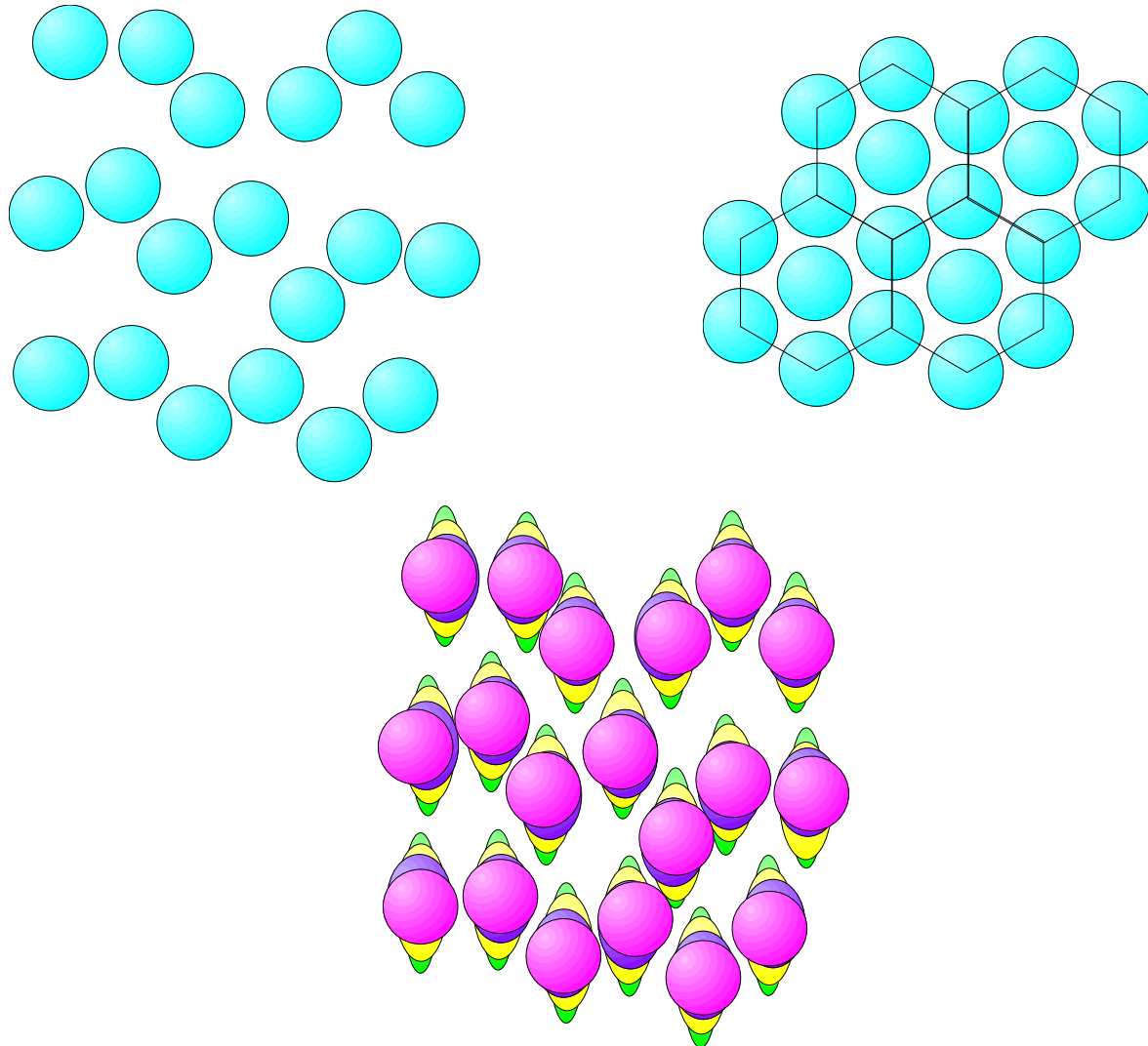


ネマティック相 配向秩序



●水：固体—液体—気体  
●液晶分子：固体—液晶(1)—液晶(2)—……—液体—気体

## 第4の状態としての液晶秩序



●分子の重心位置は完全に液体と同じ  
エントロピーが生む秩序 向きを揃えた方が動き易い  
分子は自由に熱運動(併進)しているが回転の自由度は失っている

## 液晶ディスプレイの原理



LC Displays



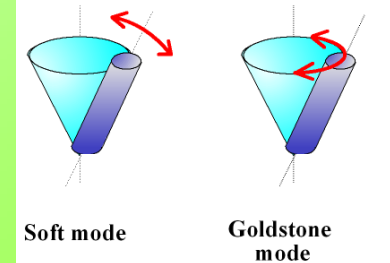
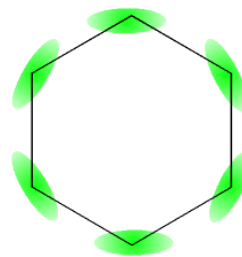
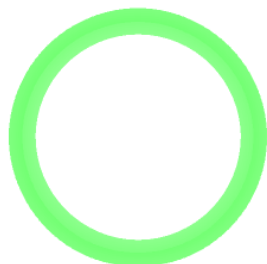
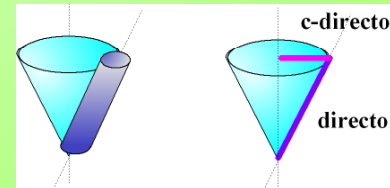
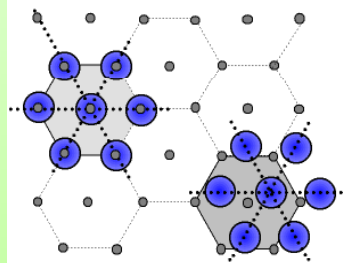
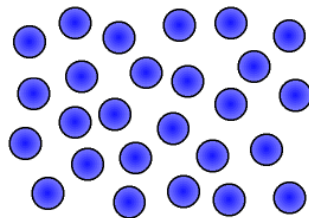
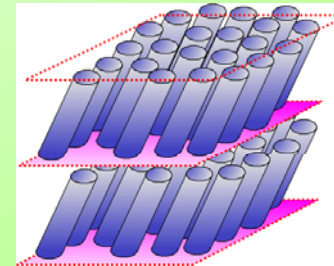
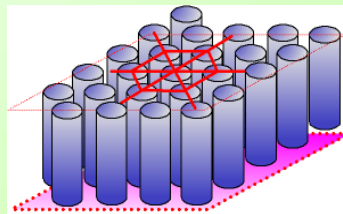
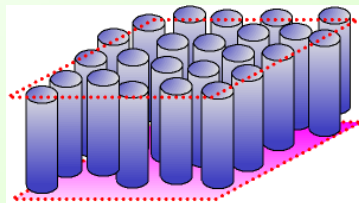
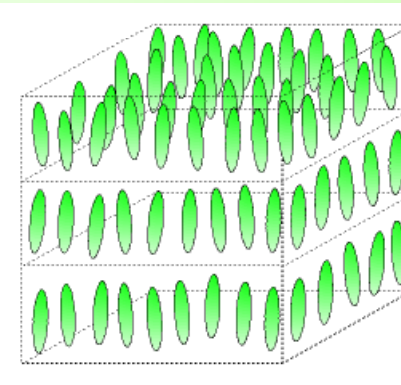
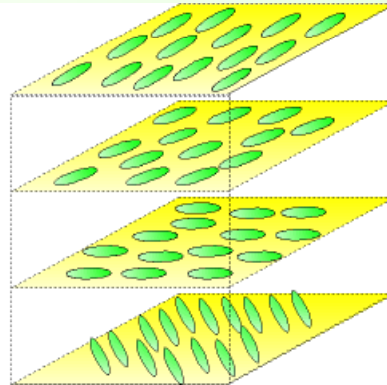
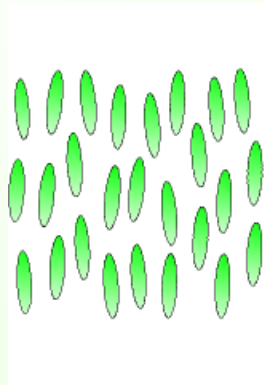
- 液体的な性質: 電場で可変
- 固体的な性質: 光の伝播特性(異方的)

## 液体相－ネマティック相の偏光顕微鏡観察



- 液体：流動性
- 固体：光の伝播特性

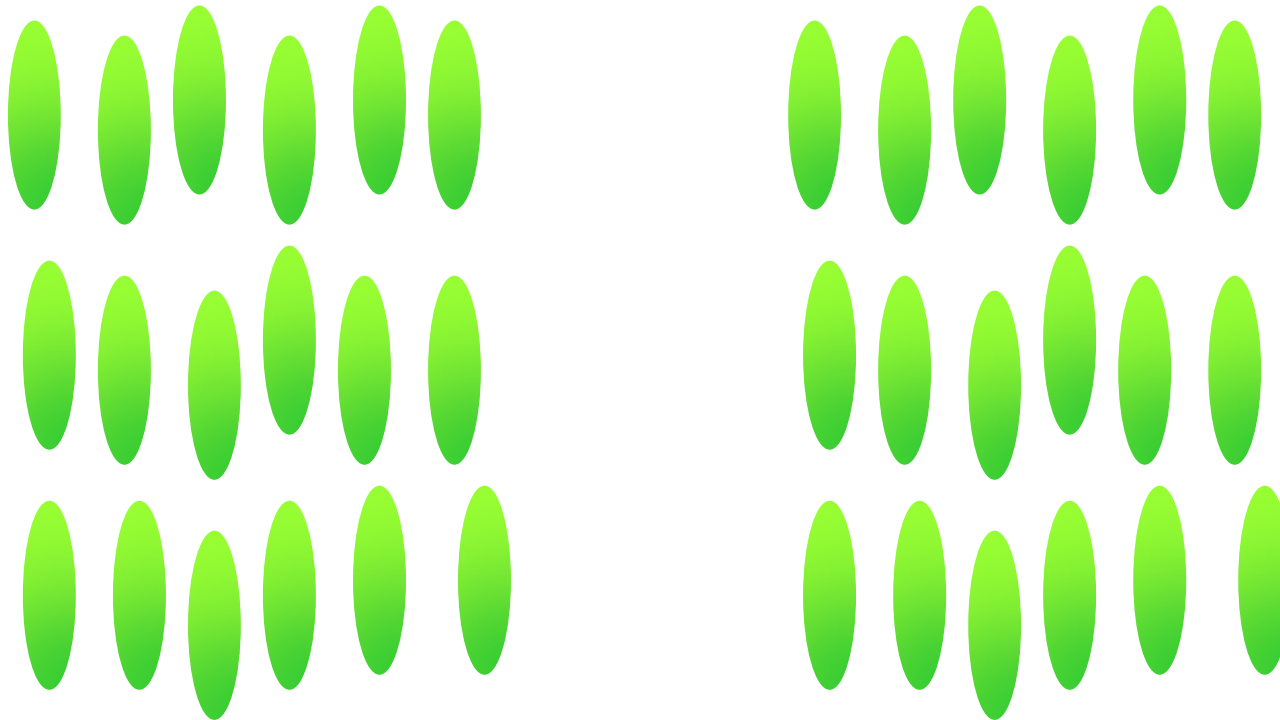
# 様々な液晶秩序



Soft mode

Goldstone mode

## エントロピーと揺らぎ



### ●固体と液晶

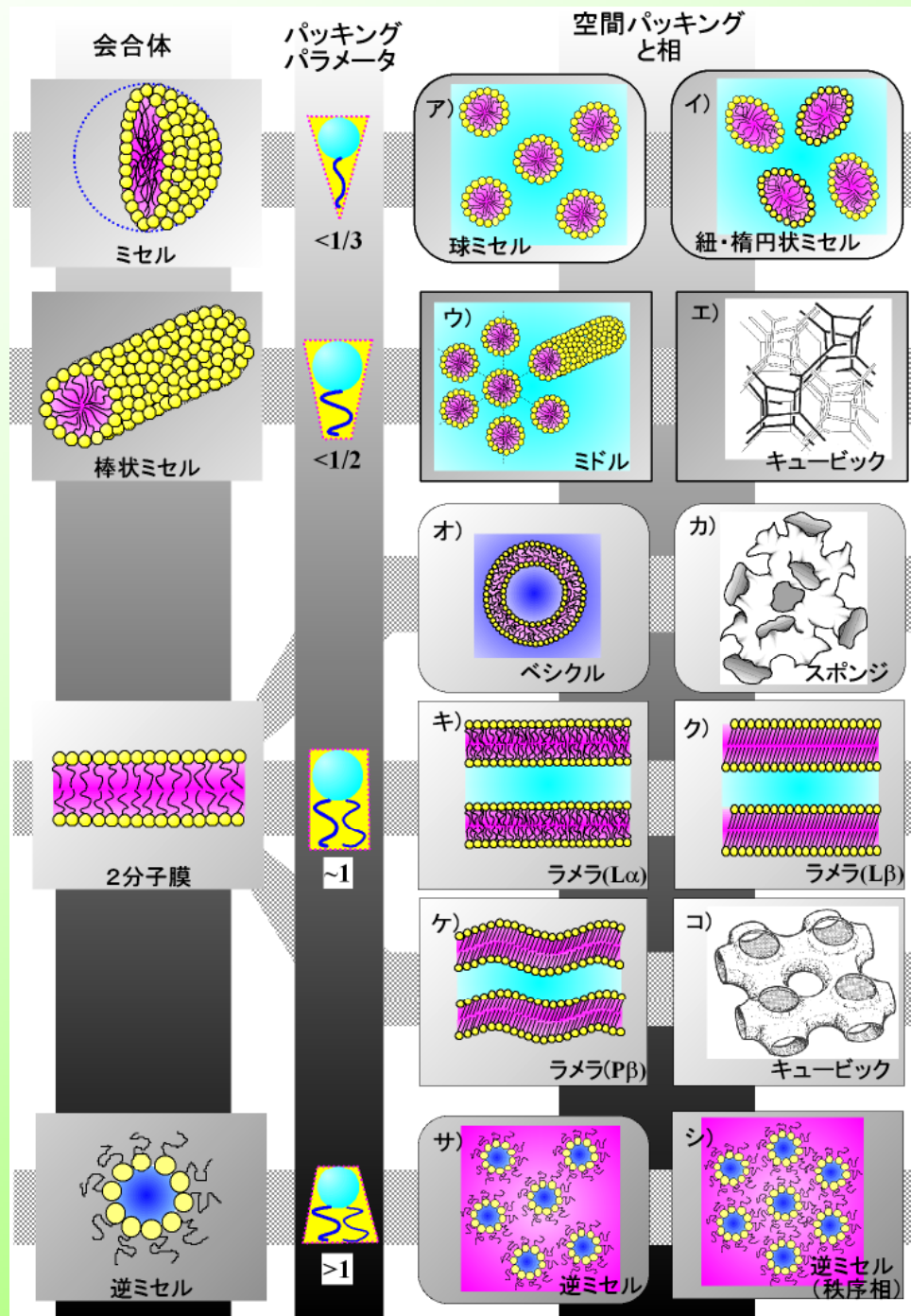
時間を止めたスナップショットでは区別できない分子運動性の相違

# **ナノ構造の安定化**

## **分子間力と協同的長距離相互作用**

界面活性剤水溶液  
(リン脂質・セッケン  
分子など)がつくる  
分子集合体と液晶相

生体内に見られる  
基本的な構造



## 分子間相互作用

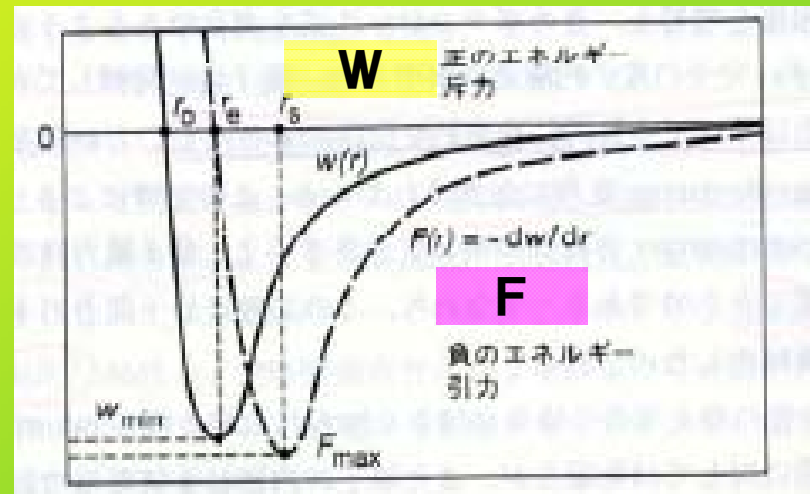
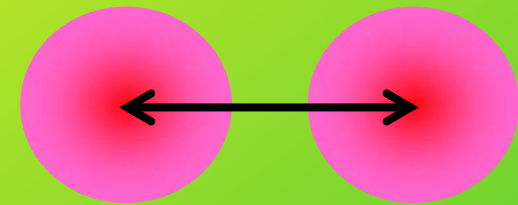
### ファンデルワールス状態方程式

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

### レナード・ジョーンズポテンシャル

$$w(r) = -\frac{A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}}$$

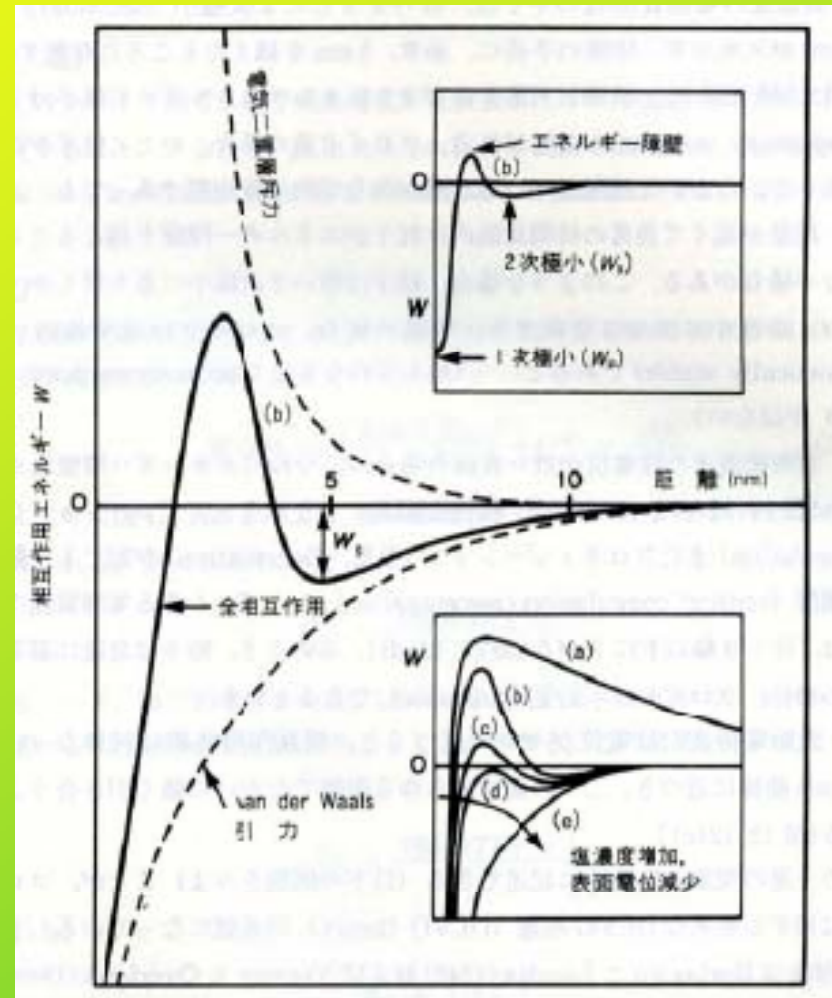
$$w(r) = \frac{A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}}$$



# DLVO理論 水溶液中のコロイド粒子間の相互作用

電気二重層:斥力 長距離  
ファンデルワールス力:引力 短距離  
(cf. 剛体斥力 超短距離)

コロイド結晶



## 長距離相互作用

●液晶“場”の  
弾性相互作用  
・液晶秩序の  
配向変形

エネルギー  
(秩序の弾性)

●枯渇相互作用  
・溶媒分子の  
並進エントロピー

●カシミール力  
・液晶秩序の  
揺らぎ  
(秩序変数・配向)

エントロピー  
自由度の運動・揺らぎ

●分子運動“凍結”  
・液晶分子  
の運動・揺らぎ

~~≠分子間力  
(短距離)~~

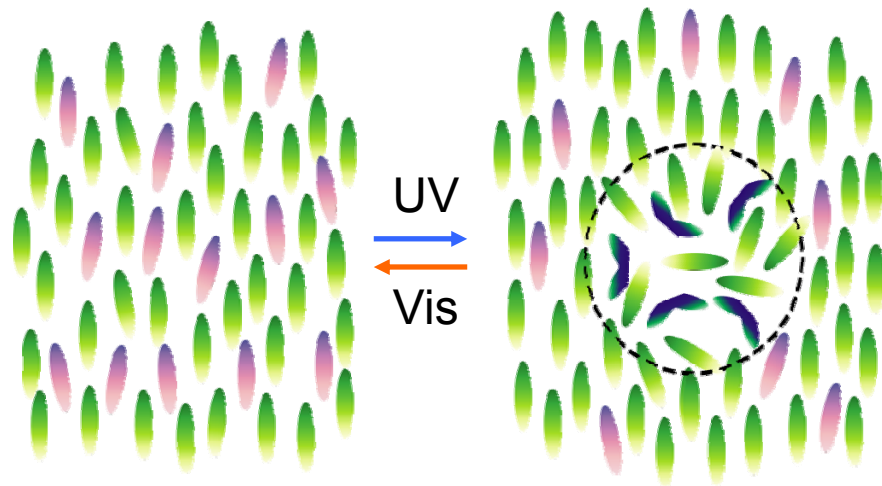
協同現象  
連続流体

●流体力学  
相互作用

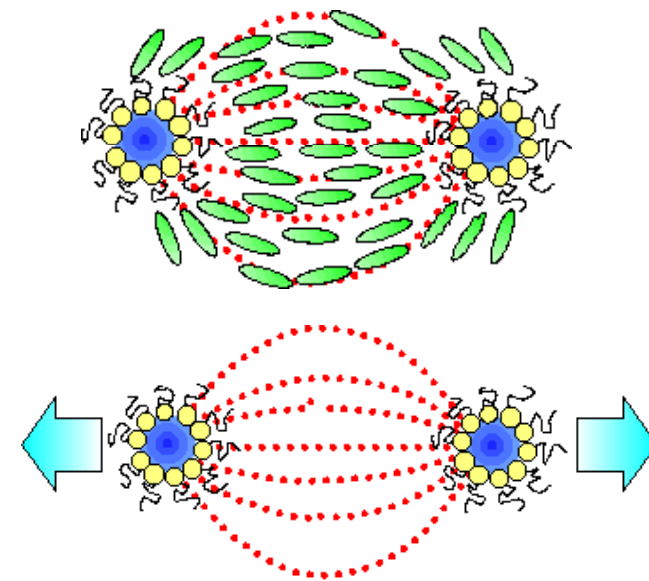
●界面張力

# 弾性長距離相互作用

秩序変数と結合  
分子マニピレータ  
数nm~



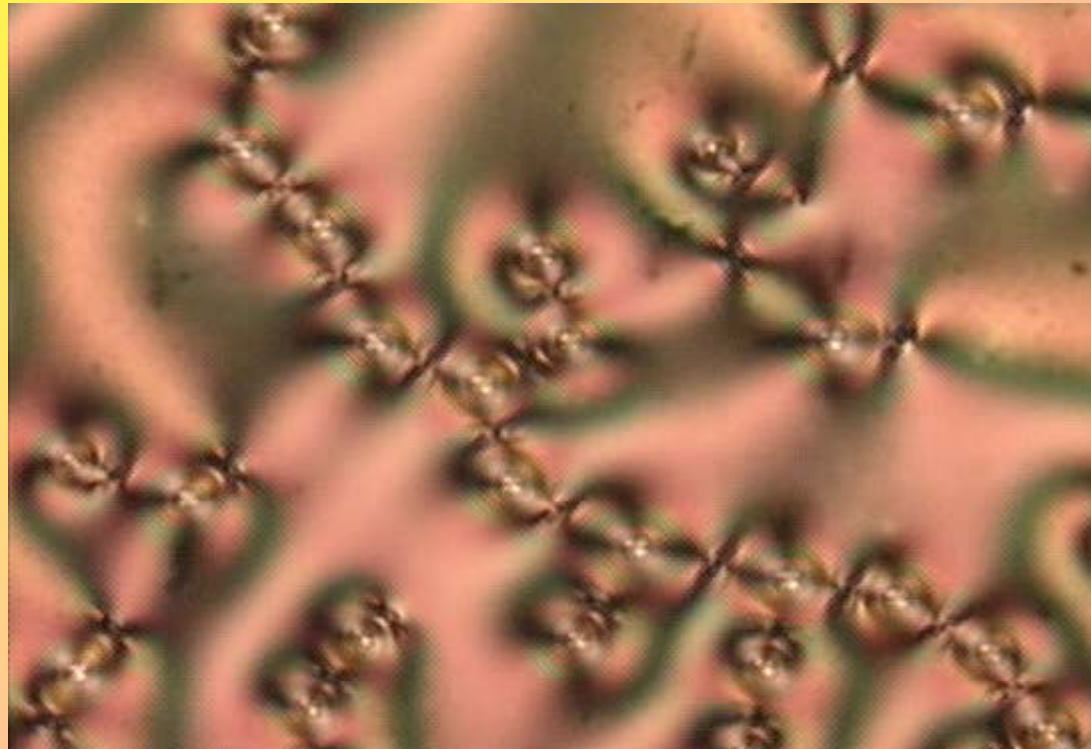
液晶配向歪と結合  
弾性長距離相互作用  
1 $\mu$ m~



分子間相互作用が及ばない長距離に有効

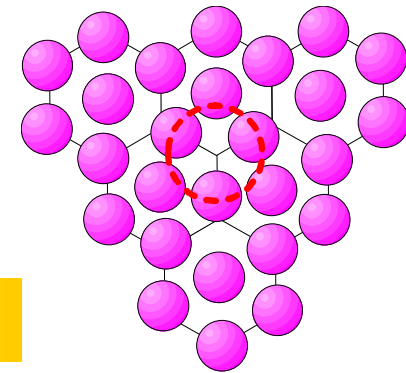
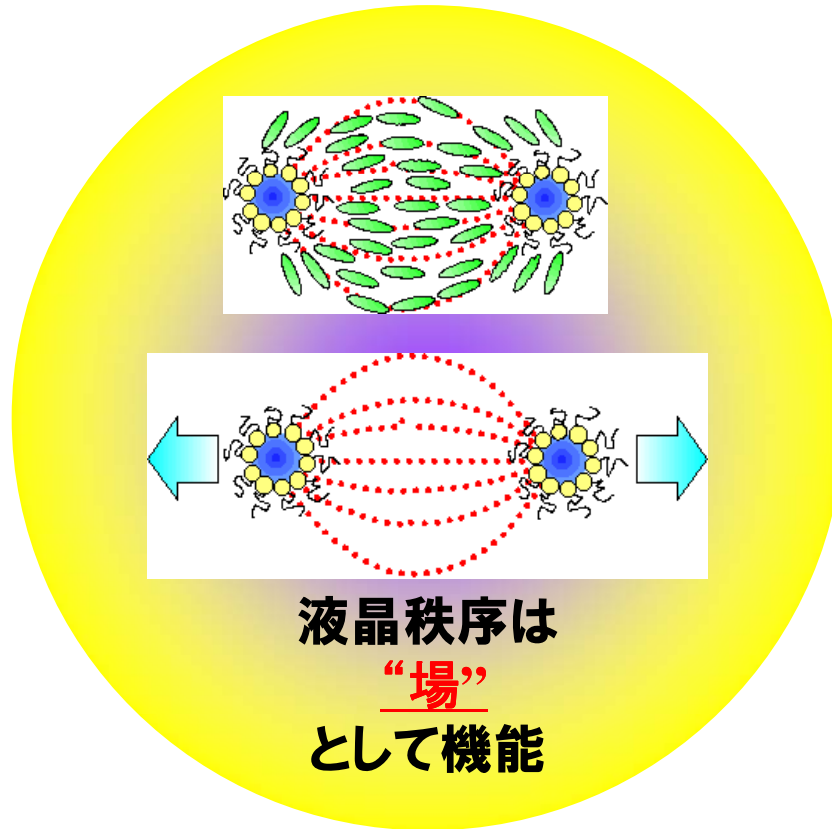
## フラストレーションと長距離弾性相互作用

液晶中に微粒子を混合  
微粒子は一様な液晶秩序を乱す(欠陥)



乱れの(弾性)エネルギーを小さくしようとして一列に整列  
~1mmの距離で2つの微粒子の間に力が働く

## 弾性長距離相互作用

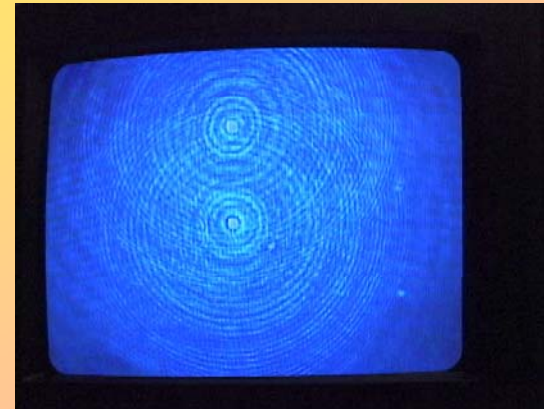


分子間相互作用が及ばない長距離に有効

液晶秩序の“ソフトネス”

- 欠陥の“可動性”
- 乱れの広がり “非局在性”

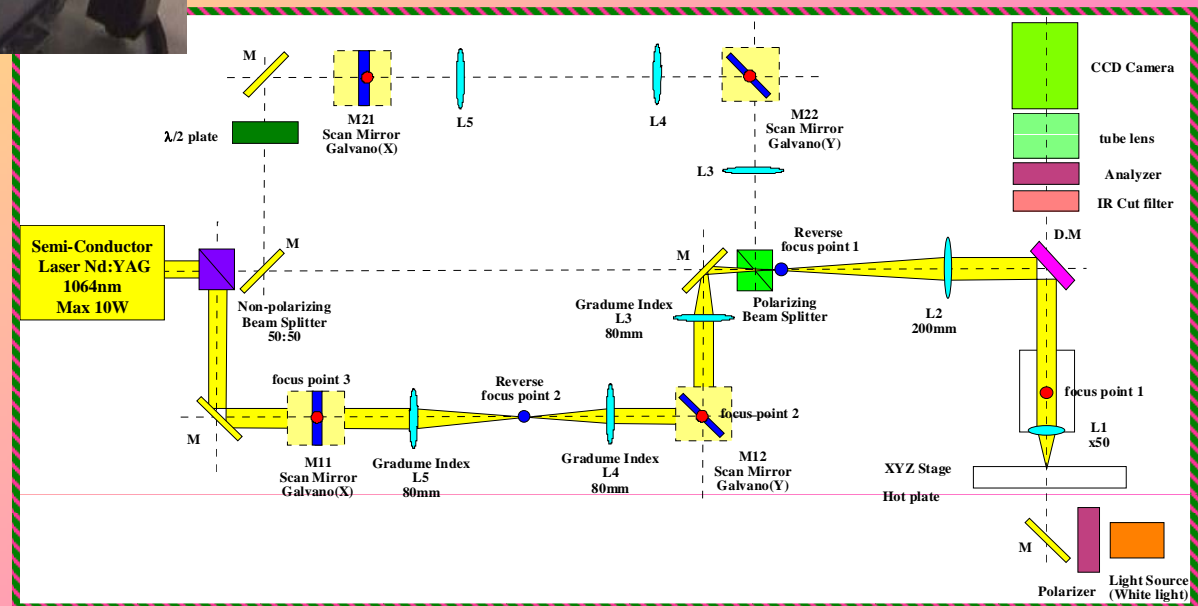
# レーザトラップ法による粒子間弾性相互作用の実測



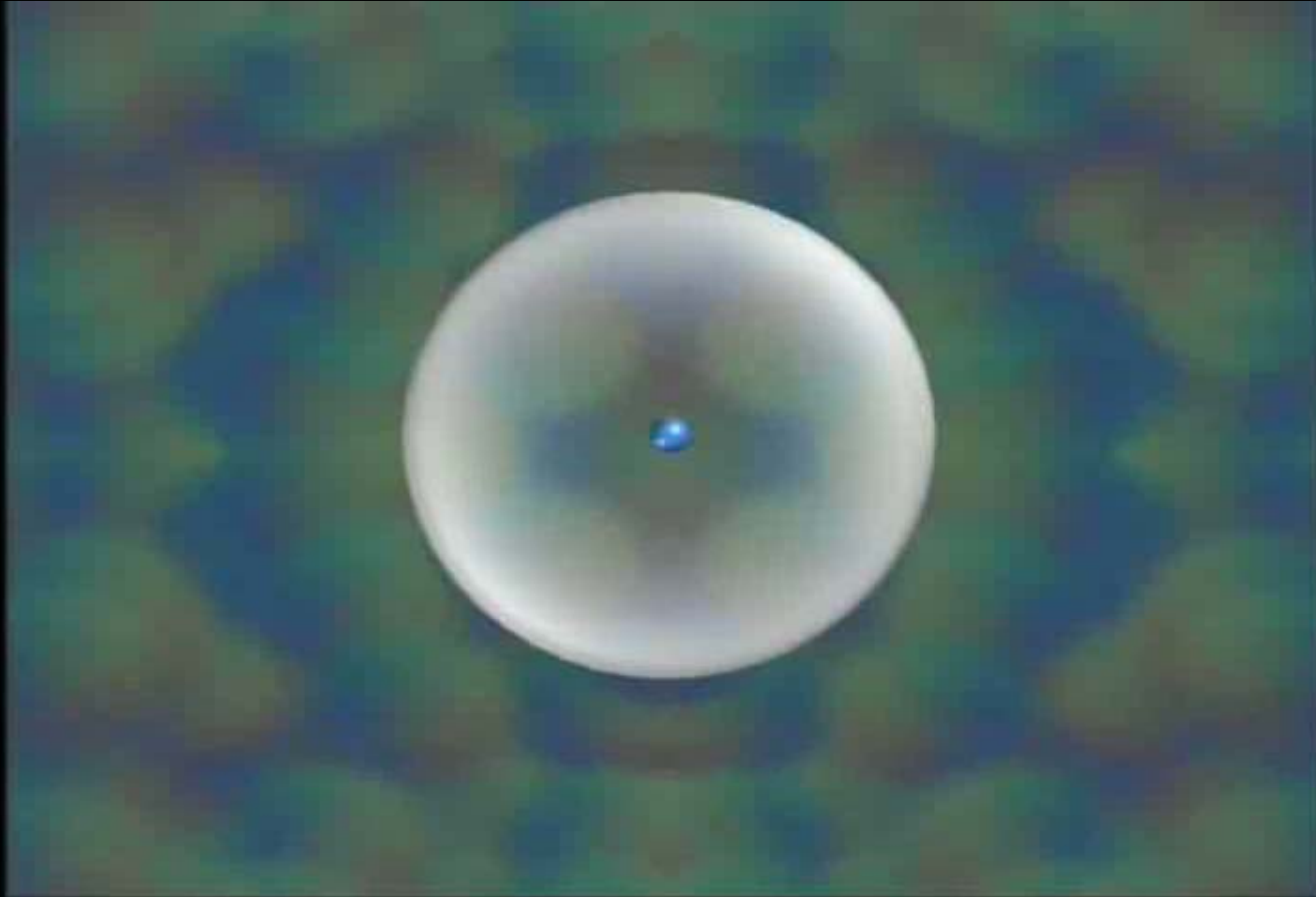
5W半導体励起IRレーザー

4基のガルバノミラー・  
2基NDフィルターを  
PC制御

2本の手(偏光面直交)  
とその強さ



# レーザトラップ



## レーザトラップ



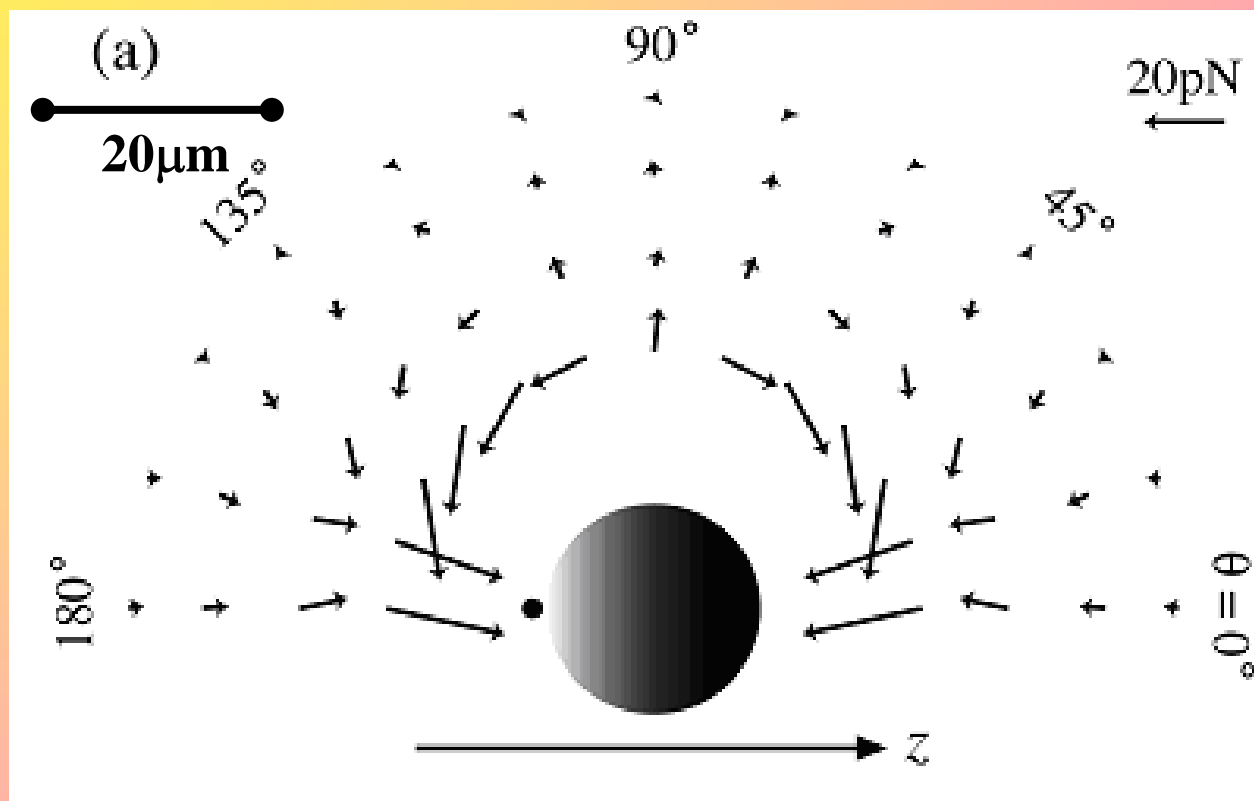
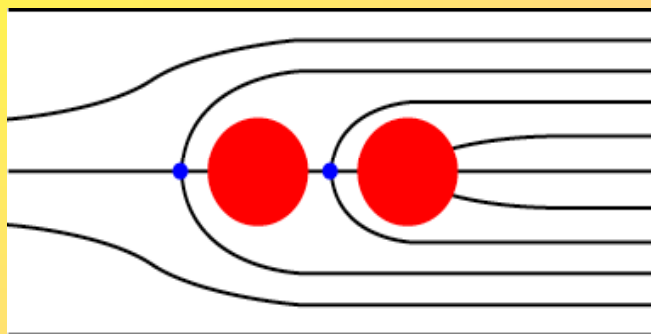
液晶場の歪が誘起する弾性相互作用  
欠陥の位置(平行・反平行・角度)に依存



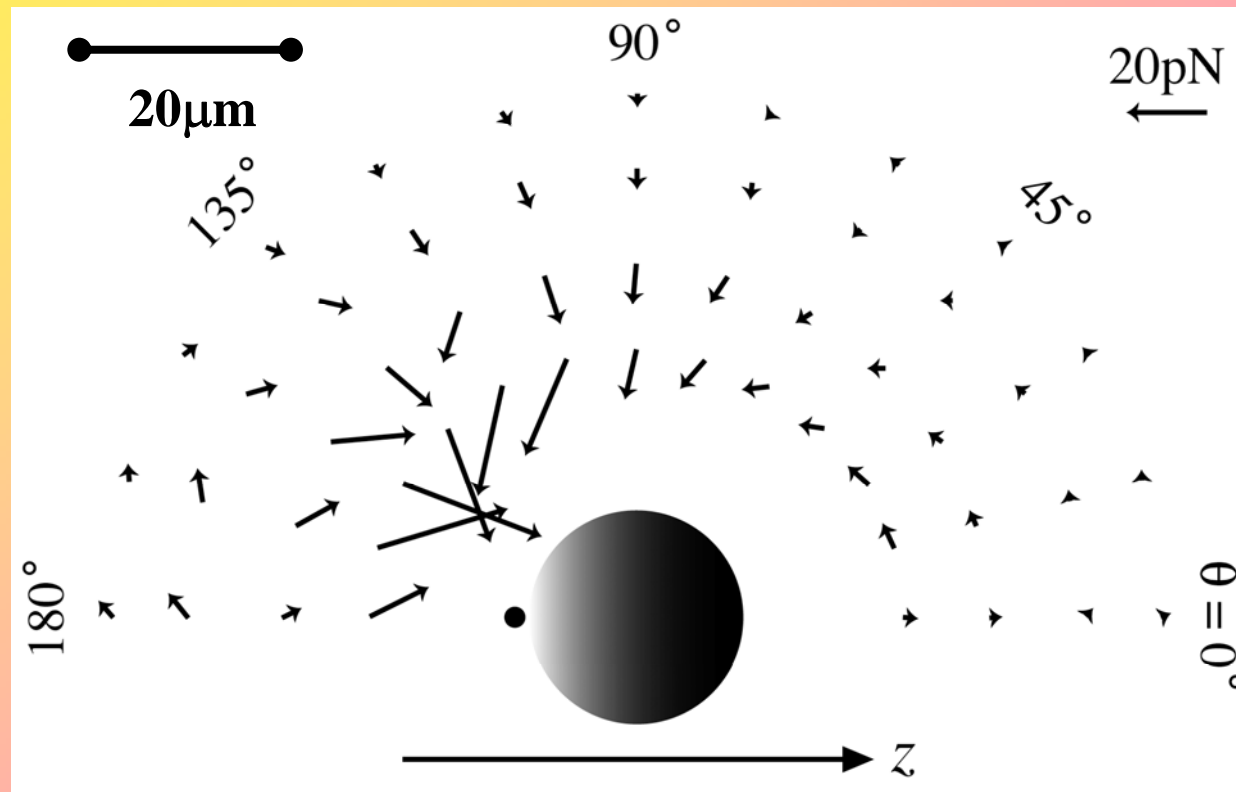
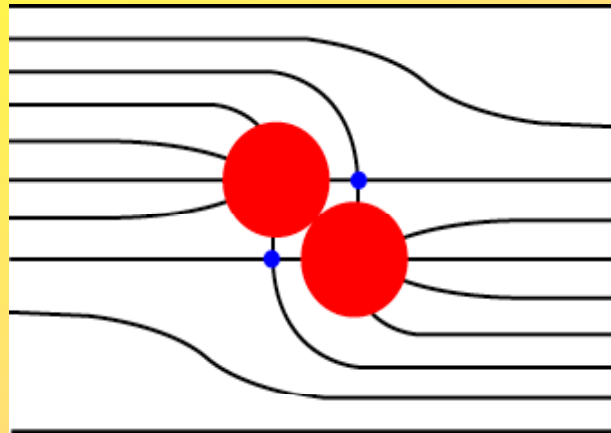
←→ 配向方向

—●—●—  
20μm

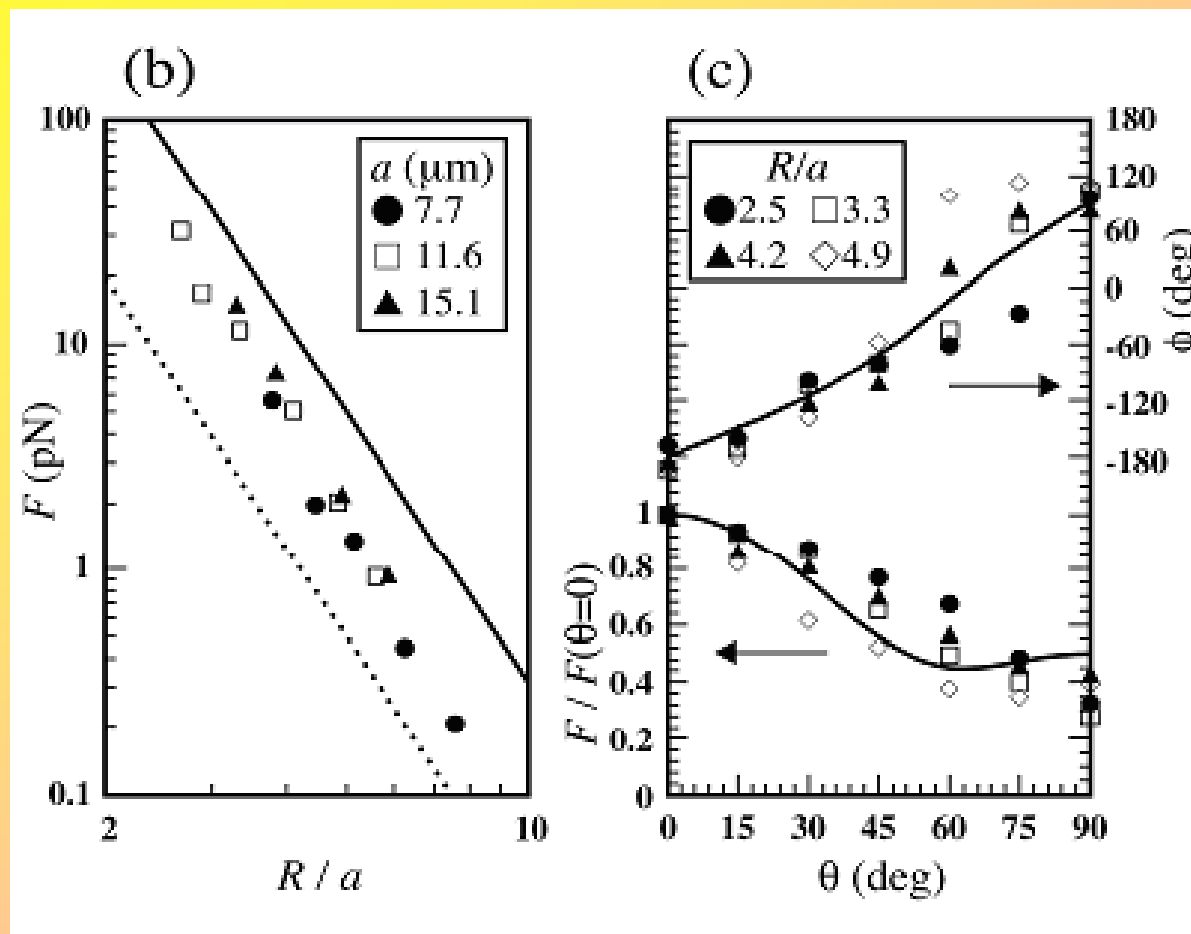
# レーザーラップ法による長距離相互作用の実測



# レーザトラップ法による長距離相互作用の実測



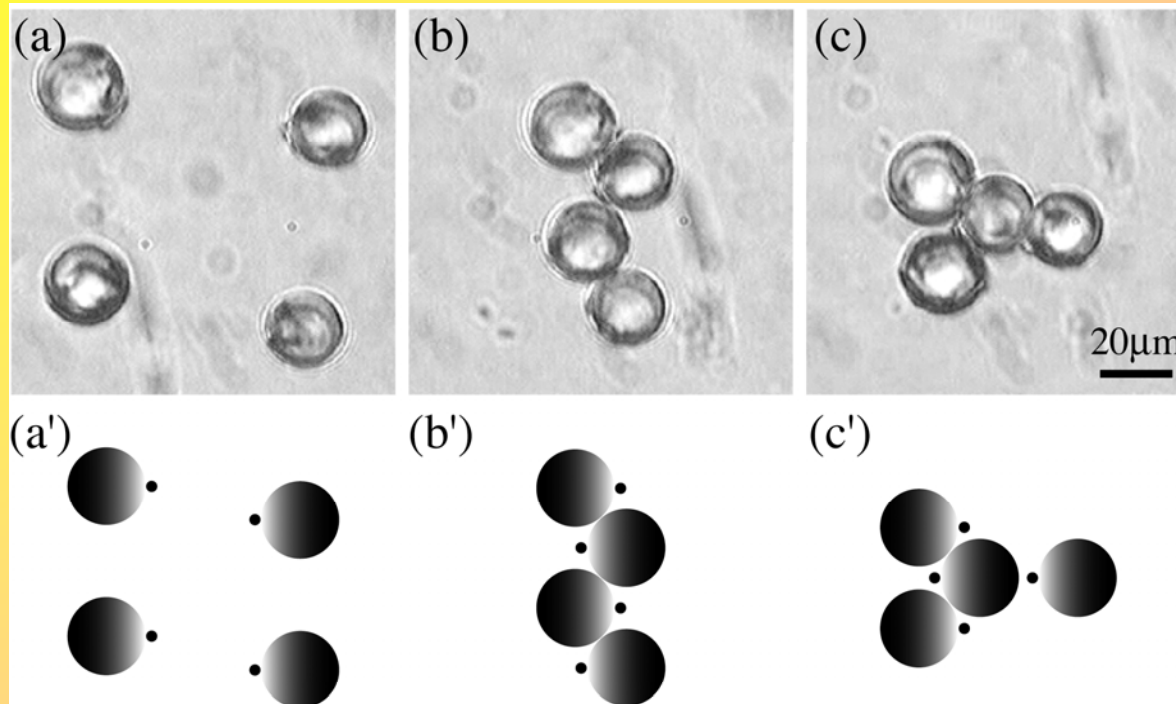
## 配向秩序の弾性変形による相互作用(理論)



$$\mathbf{F} = \frac{12\pi K p_z^2}{r^4} \left\{ (1 - 3 \cos^2 \theta) \mathbf{e}_r - 2 \cos \theta \sin \theta \mathbf{e}_\theta \right\}$$

T.C. Lubensky et.al.

## 多体欠陥(粒子)の作る構造



★相互作用の非加成性 多体効果で力場が複雑

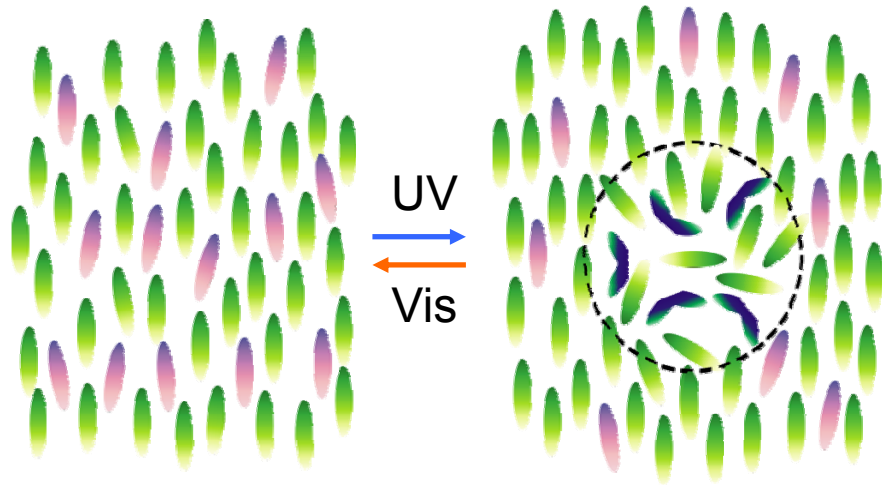
◎欠陥の配置に大きく依存した力場

◎履歴・経路に依存した安定構造存在

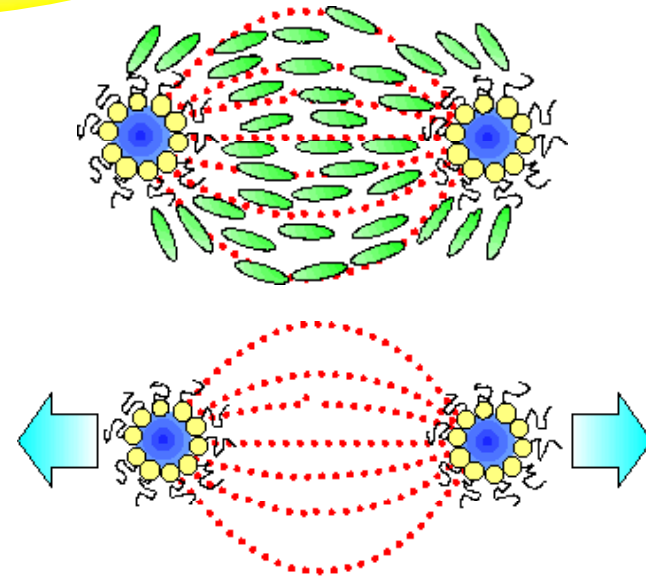
～生体の構造構築法

# 弾性長距離相互作用

協同的・間接的相互作用  
液晶秩序は  
“場”として機能



秩序変数と結合  
分子マニピレータ  
数nm~

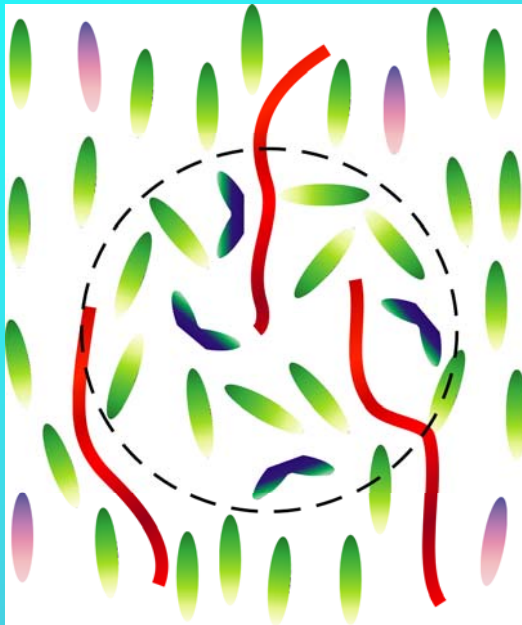


液晶配向歪と結合  
弾性長距離相互作用  
1 $\mu$ m~

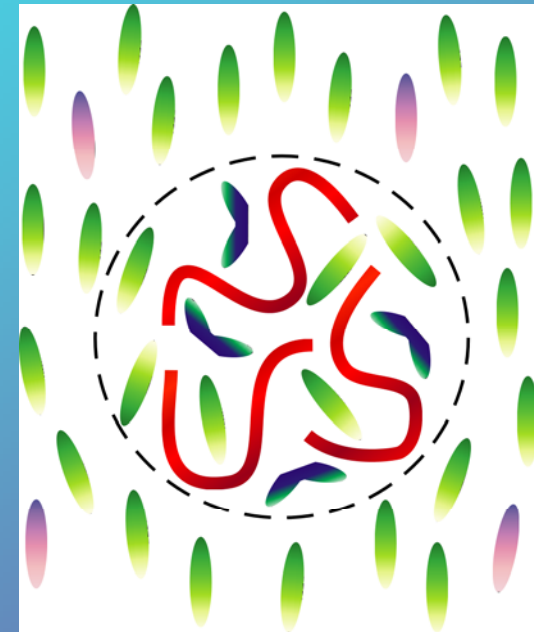
分子間相互作用が及ばない長距離に有効

## 分子マニピレータ

小さい(高分子など $<1\mu\text{m}$ )不純物では配向の  
弾性歪が大きなエネルギー(曲率が大)となり無効  
→秩序度そのものと結合



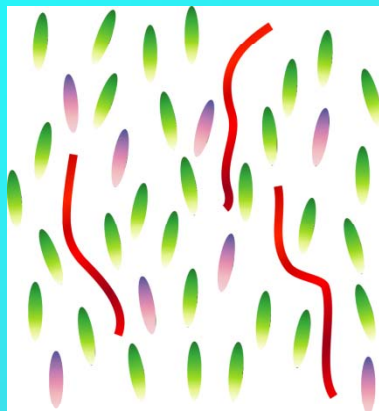
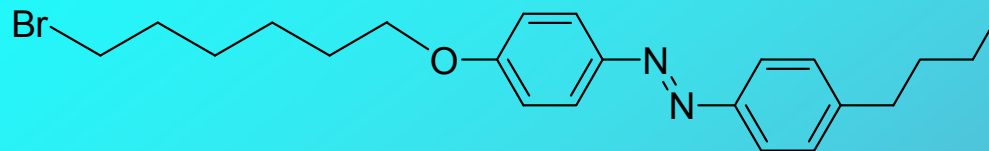
$dS/dx$



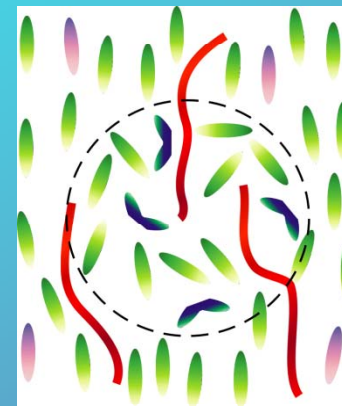
浸透圧

高分子やコロイド粒子は秩序度の低い動き易い空間を好む  
ある場所の秩序度を下げる( $dS/dx$ )と不純物が集まる

# 分子マニピレータの原理



UV光照射



Diffusion



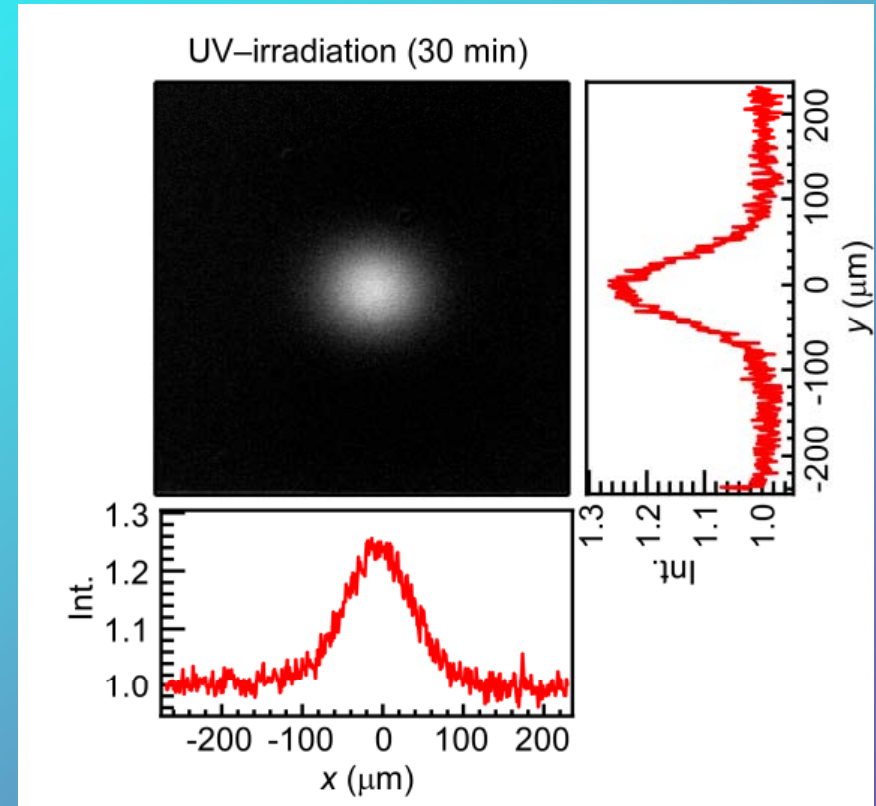
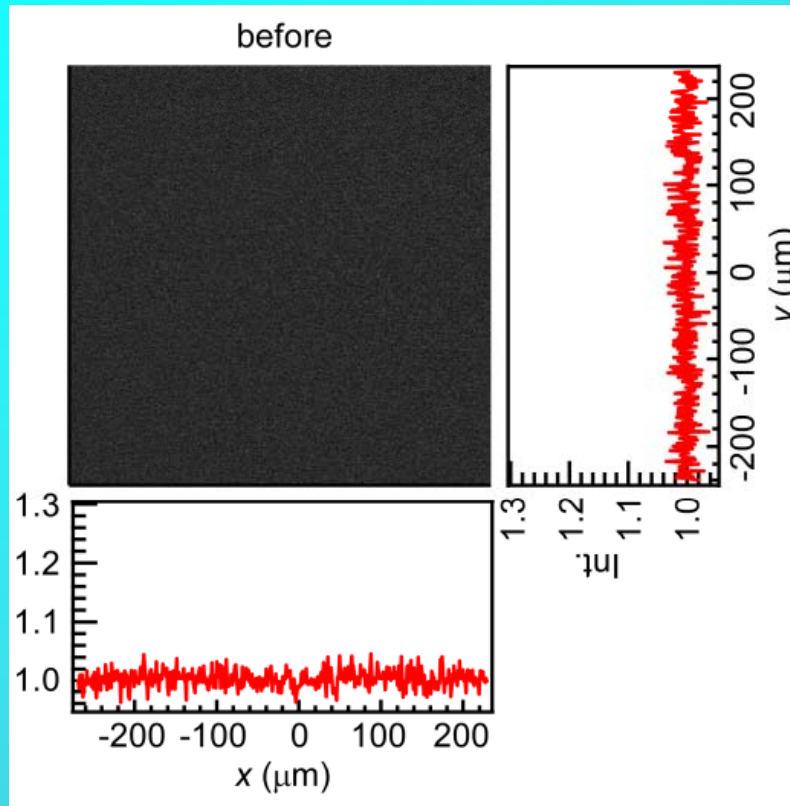
manipulation



可視光照射

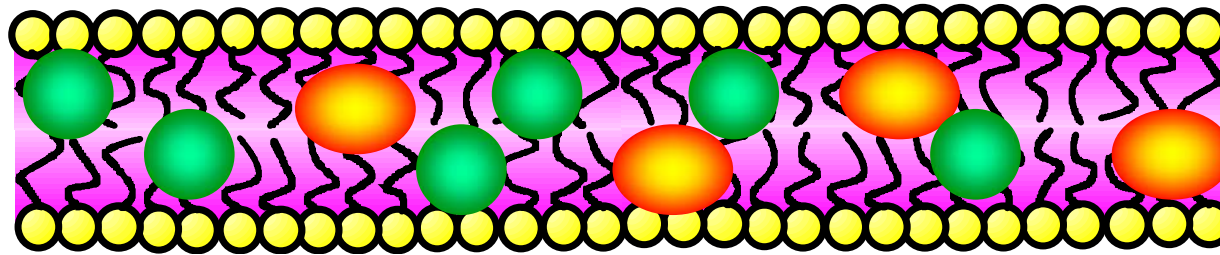


## 蛍光高分子のマニピレーション



- ★任意の分子濃度分布を空間に作成する
- ★特定の分子を特定の方向に輸送する

## 生体内の物質・情報の輸送

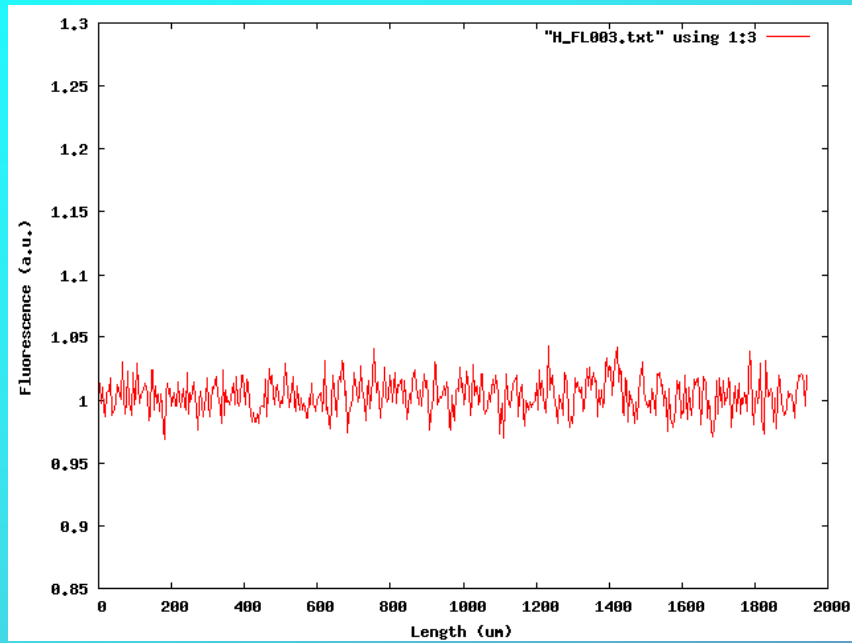


物質・情報輸送を液晶秩序が  
プラットフォームとして駆動・制御

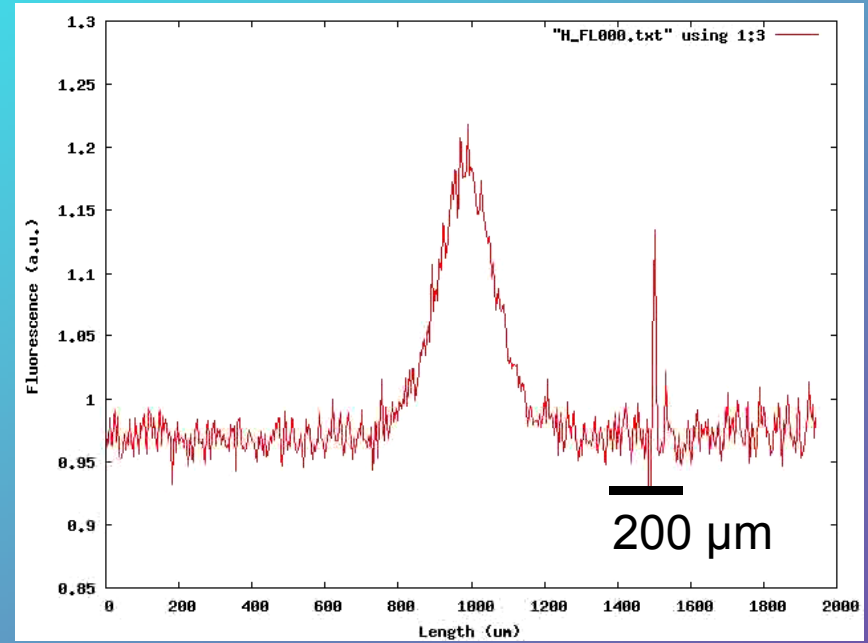
- ★特定の物質・物理量の選択輸送
- ★たんぱく質の集合・分散制御
- ★筋肉・生体物質輸送

# 液晶中での高分子の拡散現象

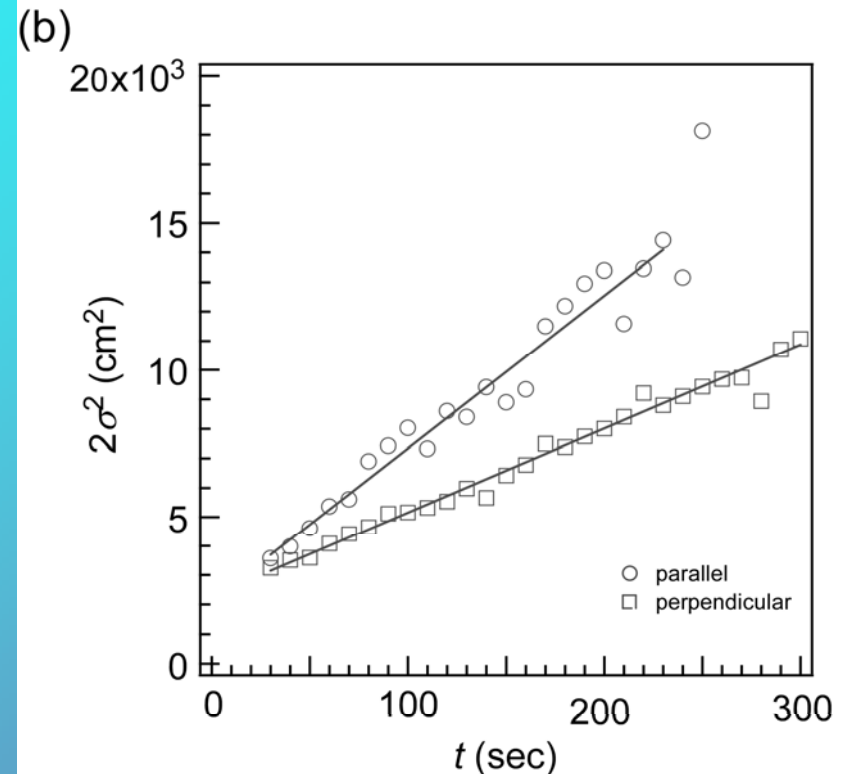
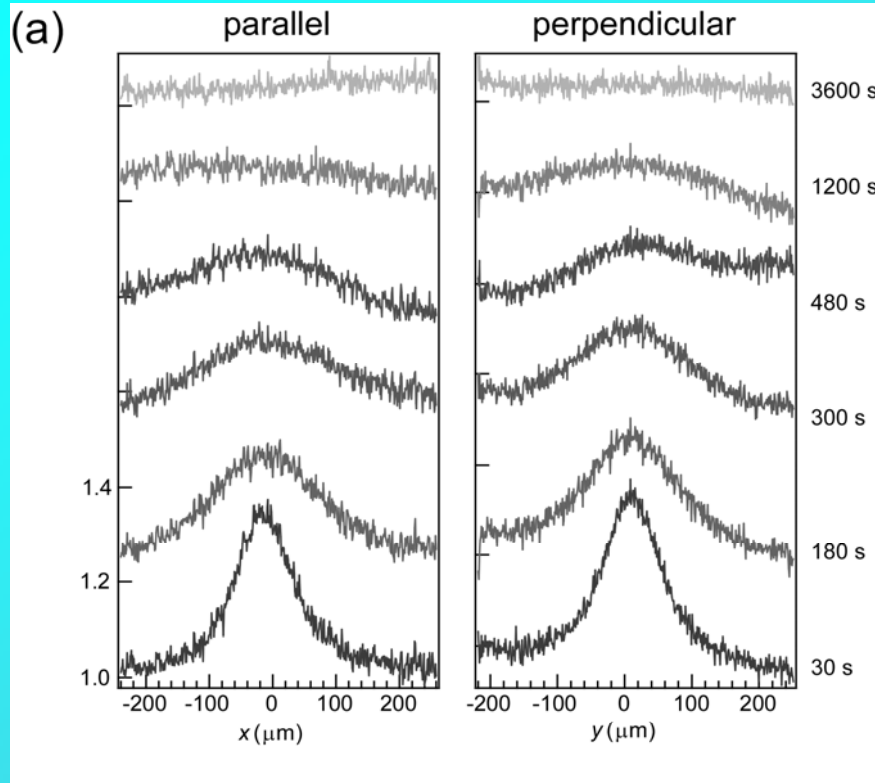
Before



After



## 拡散係数の異方性



★液晶分子に沿った方向と垂直な方向で  
高分子の動き易さが異なる

$$I(x, t) = \frac{I_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

ガウス分布の幅  $2\sigma^2 = 4Dt$

$$D_{\text{para}} = 1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{\text{perp}} = 6.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$$

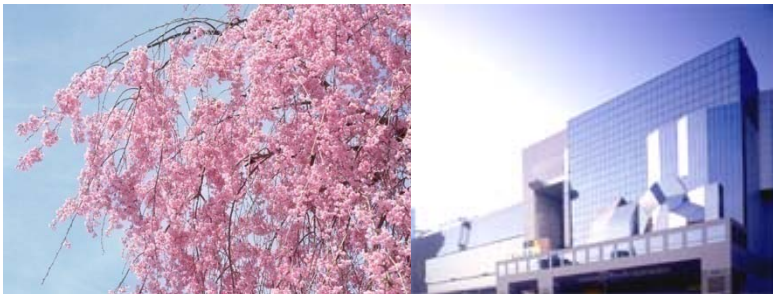
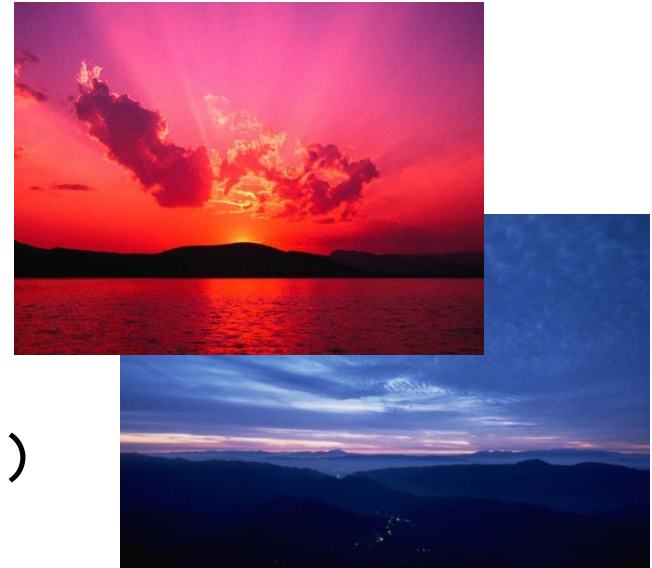
# やわらかな物質が自発的に作る巨大構造 —構造色—

色

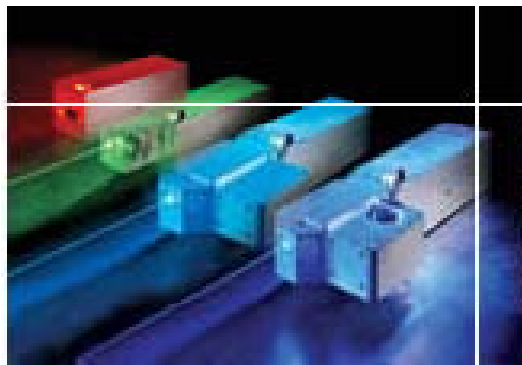


●昆虫の色  
(構造色)

●空の色(回折)



●葉緑体・花・  
ペイントの色(吸収)



●レーザー・光源の色(輻射・発光)



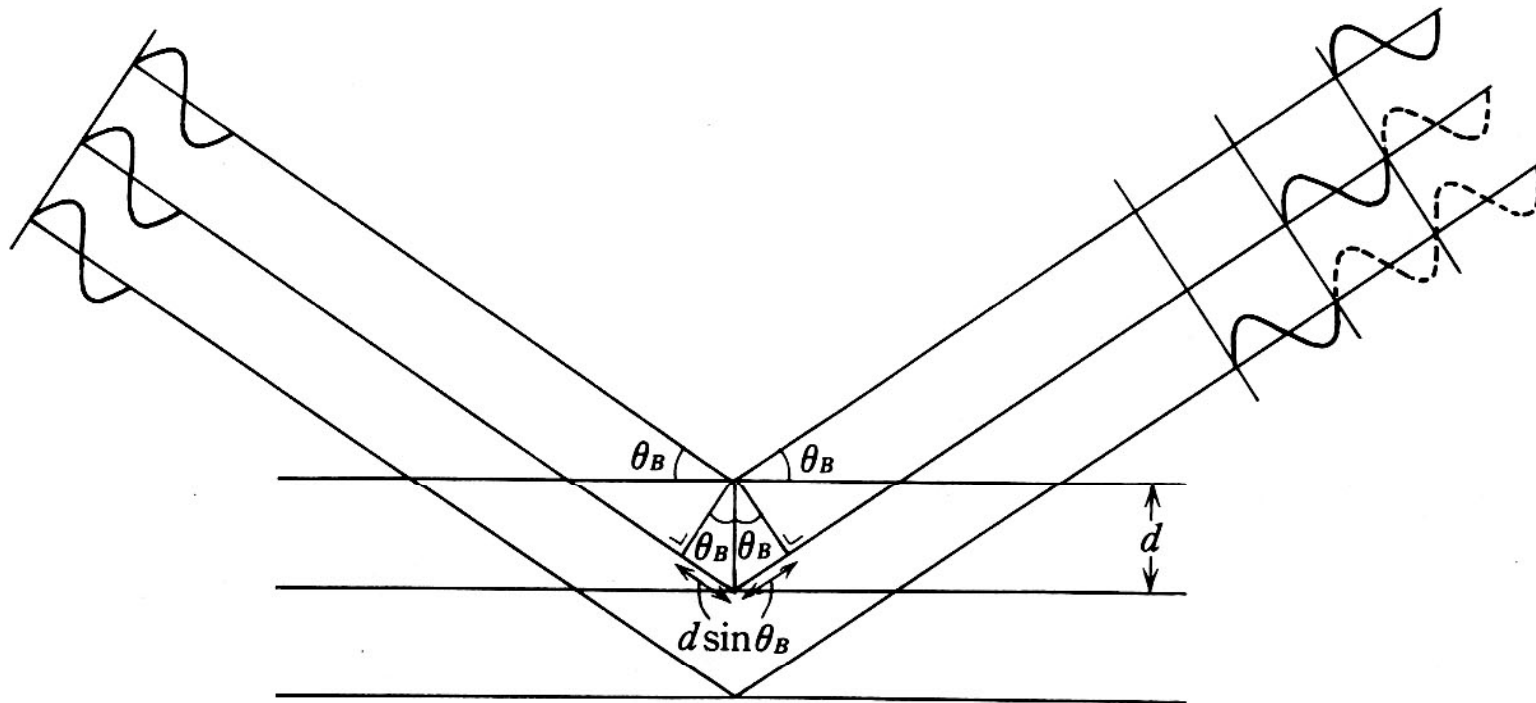
●シャボン玉・薄膜(干渉)

## 結晶格子とブラッグ散乱

● 散乱体の配置に規則性がある

結晶: 原子・分子の空間位置に3次元的な規則性

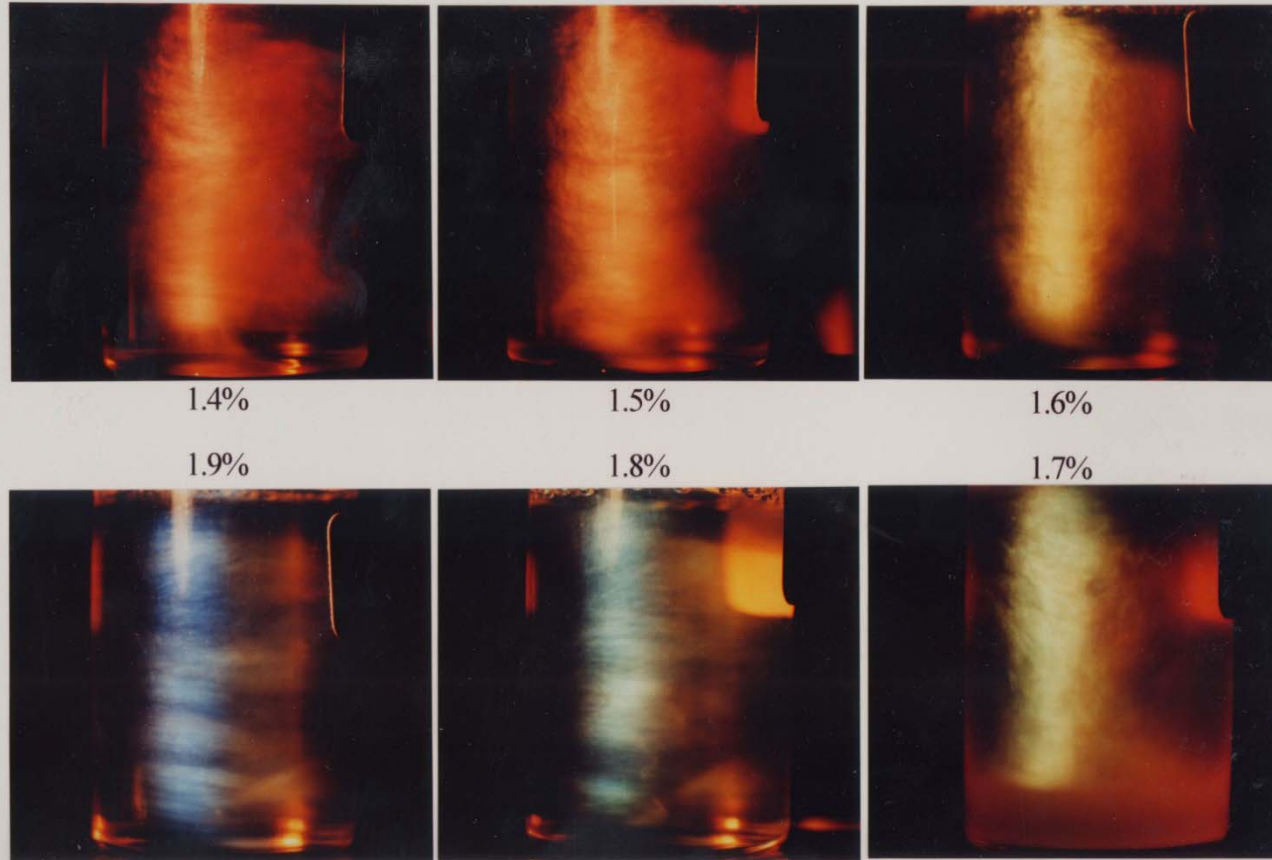
液晶: 低次元 (< 3次元) の規則性・揺らぎが大きい



$$2d \sin \theta = n\lambda$$

## 構造色（分子が自発的に創るフォトニック秩序）

● Concentration dependence of the Bragg reflection wave-length  
by illuminating with white light at fixed scattering angle near back scattering ( $2\theta=150\text{deg}$ )

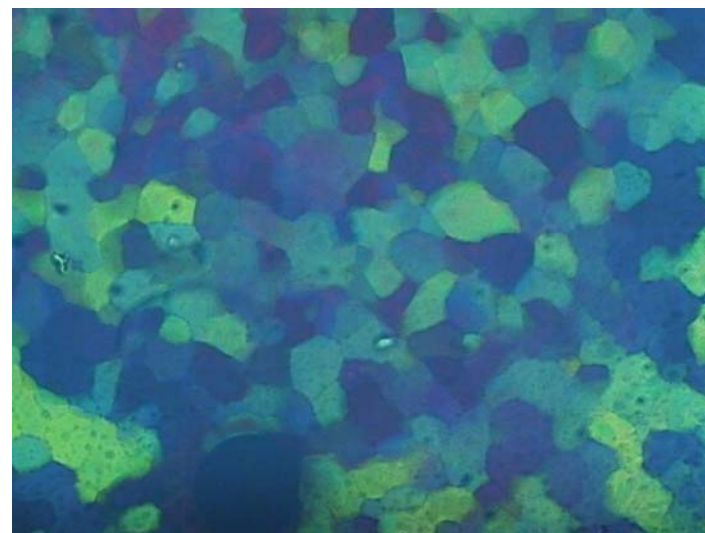
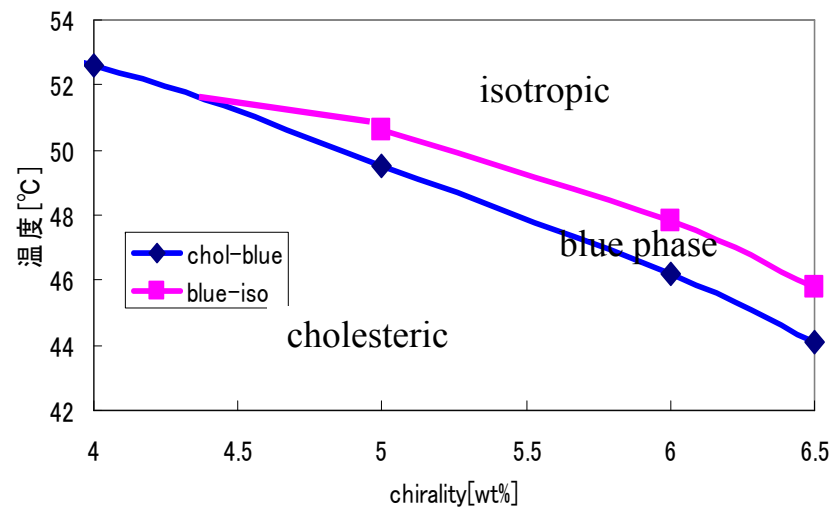
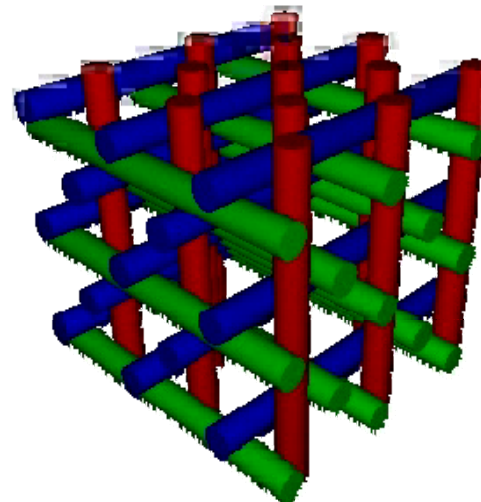
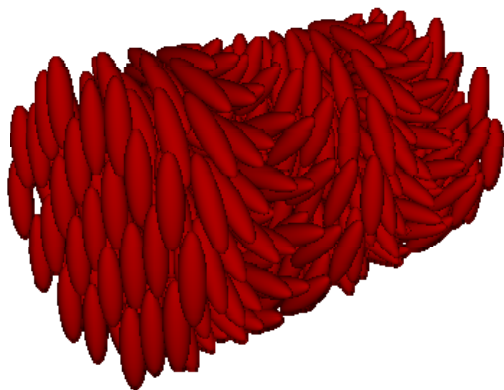


リオトロピック液晶（ブラッグ散乱・構造色）

- 水と変わらぬ粘性率(数cP)で流れるにも関わらず  
可視光波長スケールの規則構造を持つ

# コレステリックブルー相 格子定数=可視光波長

## コレステリック相



## 次世代の高速ブルー相ディスプレイの試作機

Samsung (May 14 2008 Akihabara News)



## 等方性スメクティックブルー相 球形な等方性を示す構造色

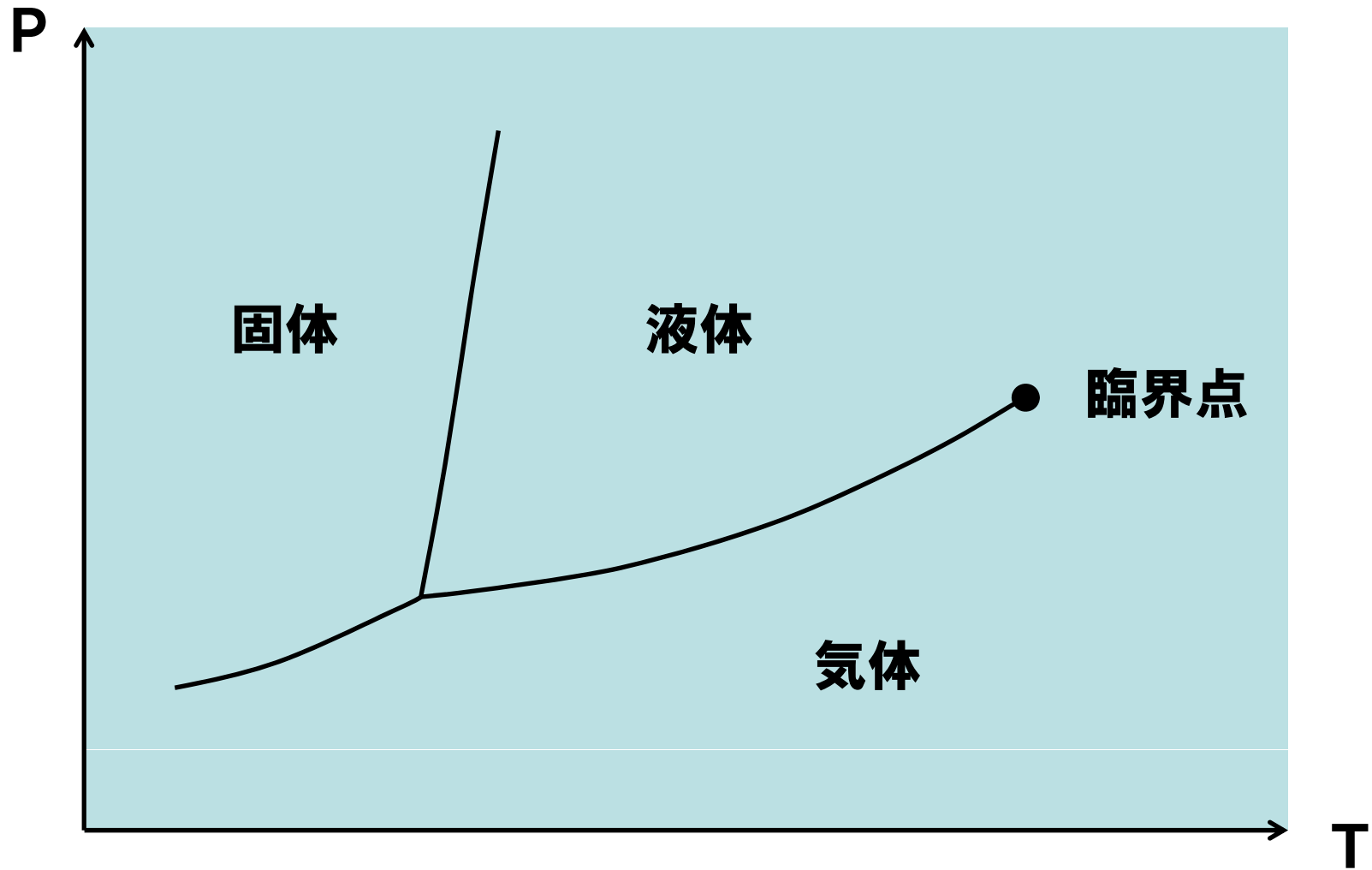
液体相から温度を徐々に冷却

温度に依存した色

試料をどのように  
回転にしても色は不変：  
完全に 光学的等方性

スムーズな一様構造

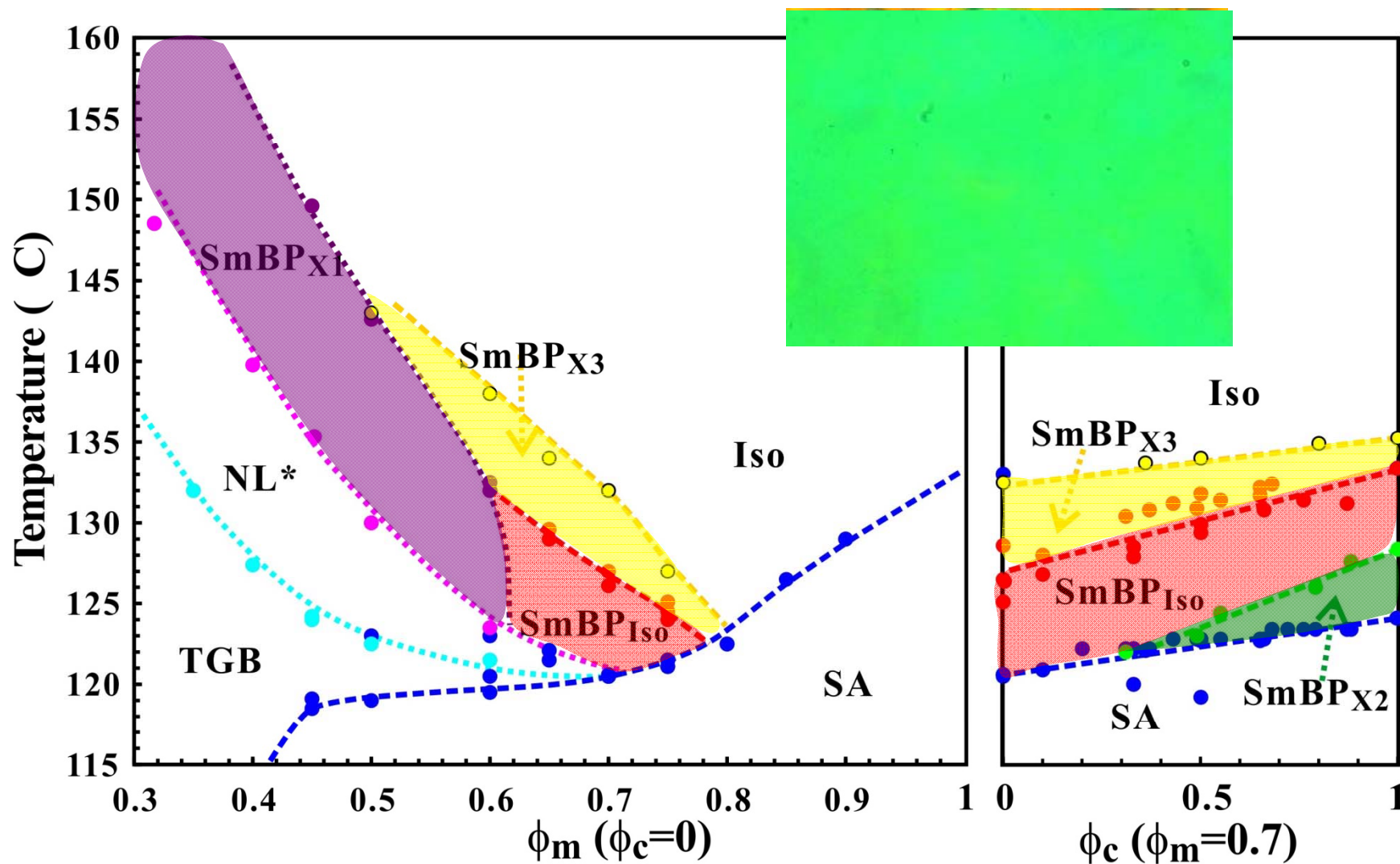
# 水の相図



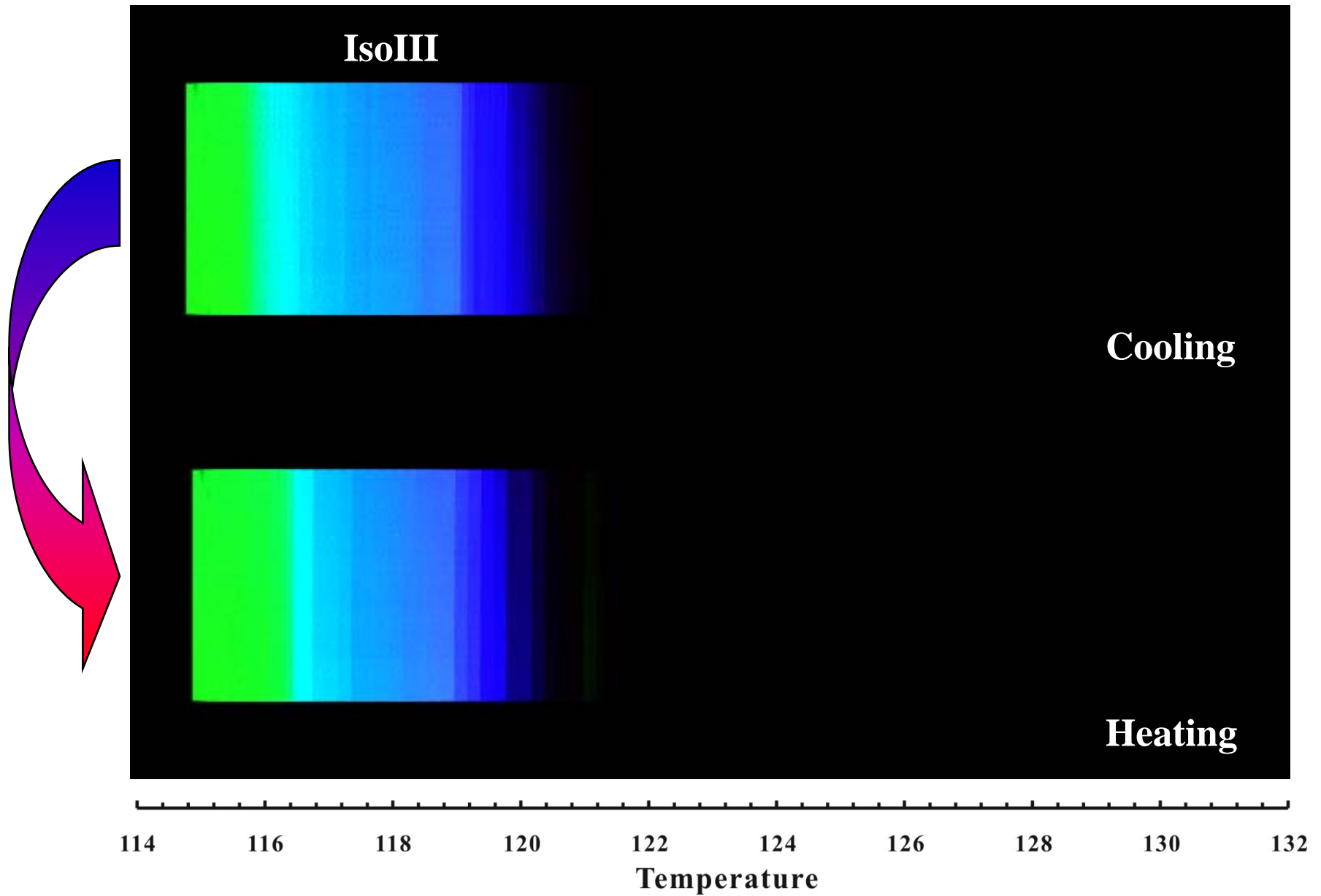
# 球形な等方性を示す構造色

球形な等方性

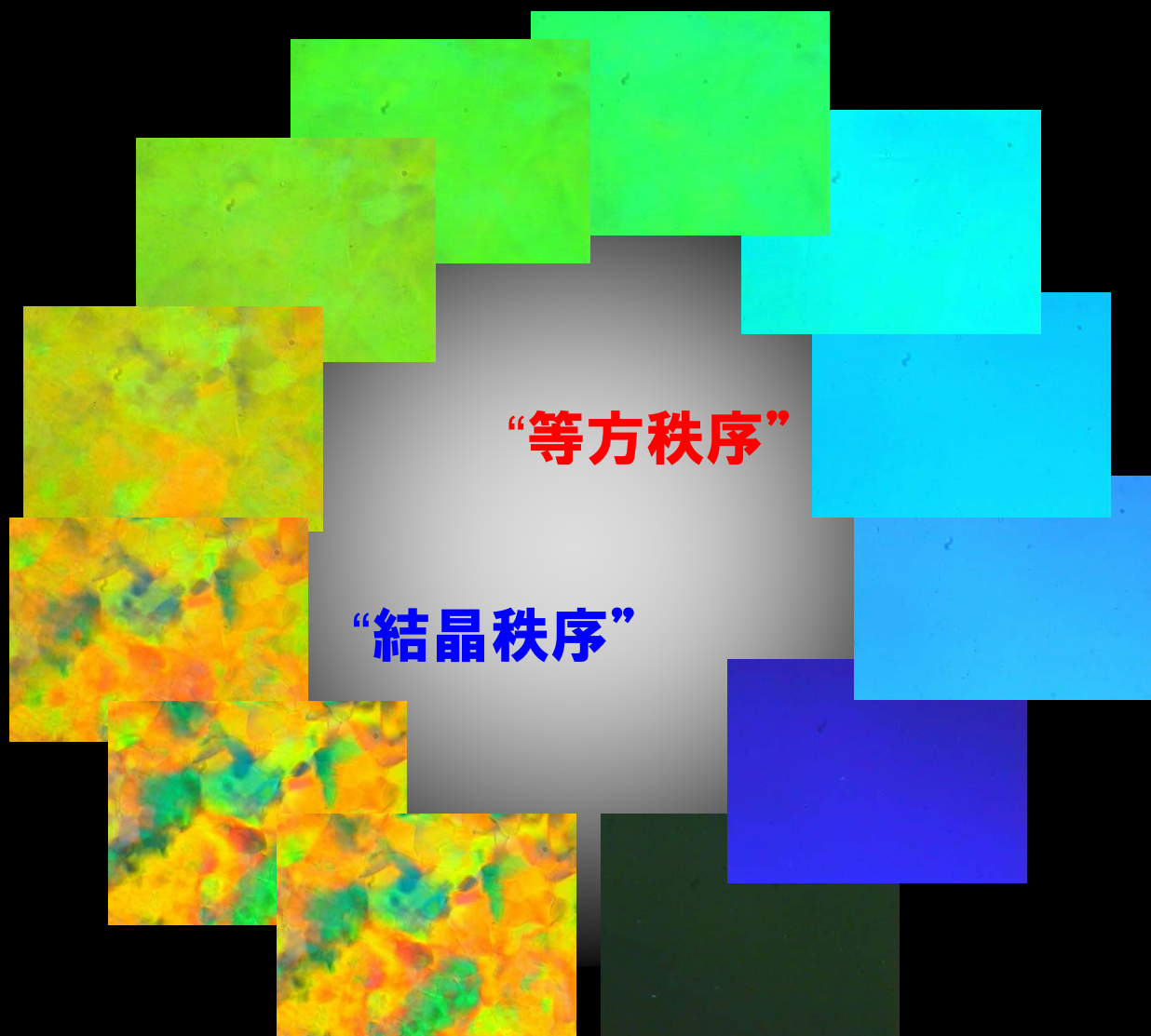
等方性スメクティックブルー相



**Iso III phase (A6S/3BS 70%) (Reversible)**



# 等方秩序と対称性

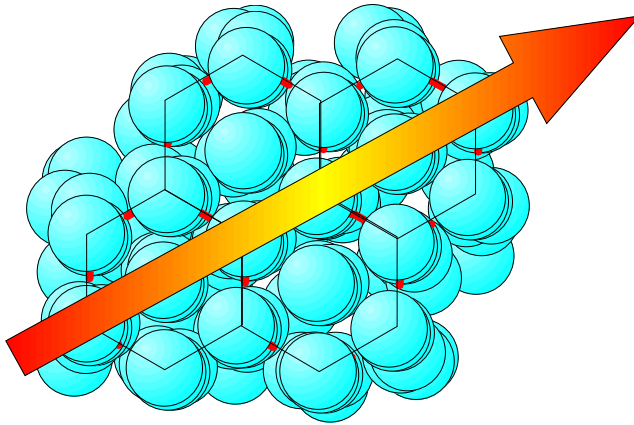


“等方秩序”

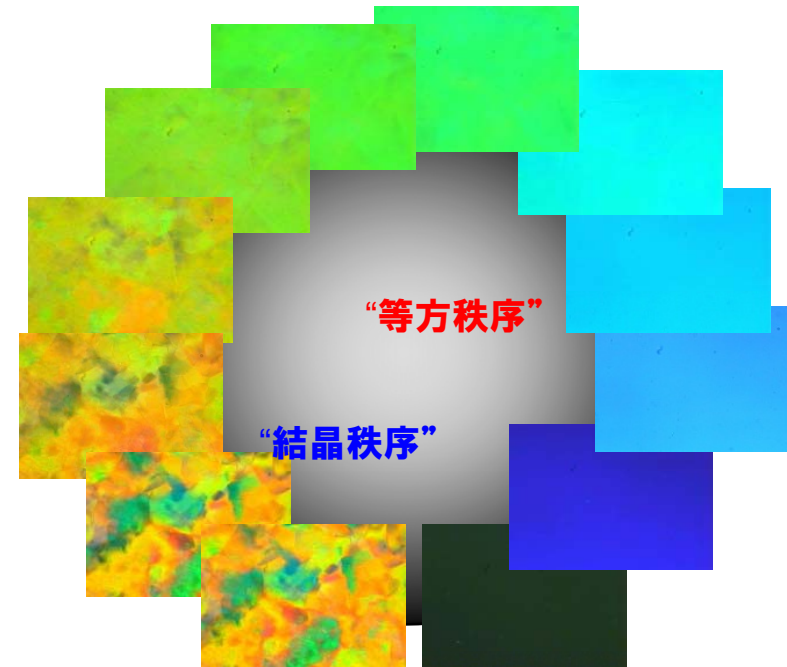
“结晶秩序”

## 秩序と対称性

秩序化 = 空間規則性の発生

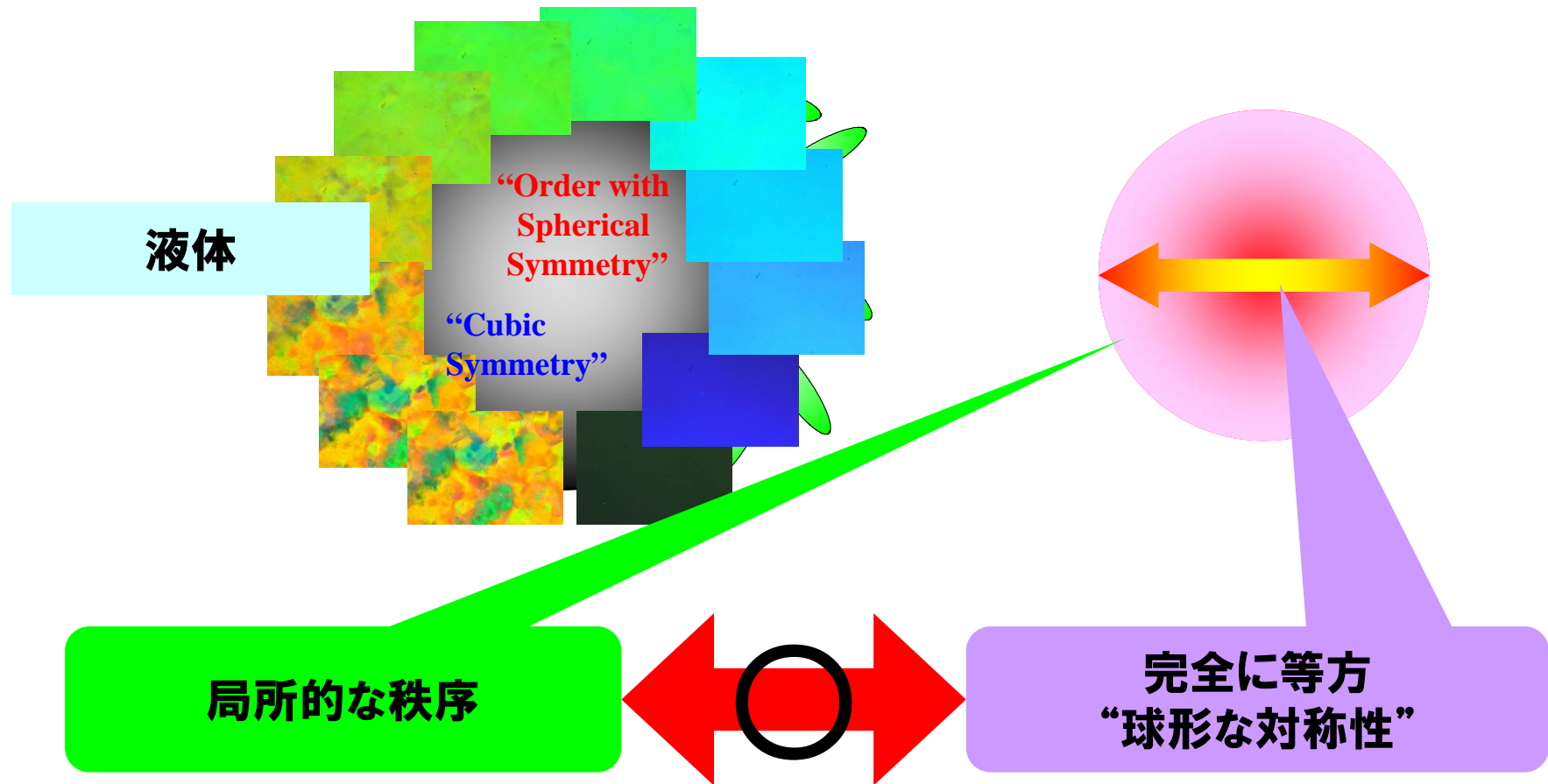


特定の方向に異方軸が発生  
“対称性の破れ”



等方性スメクティックブルー相  
構造色 = 可視光の波長程度の周期を持つ規則性(秩序)がある  
球形な等方性 = 液体と同じ高い対称性が保持されている

# Order & Symmetry



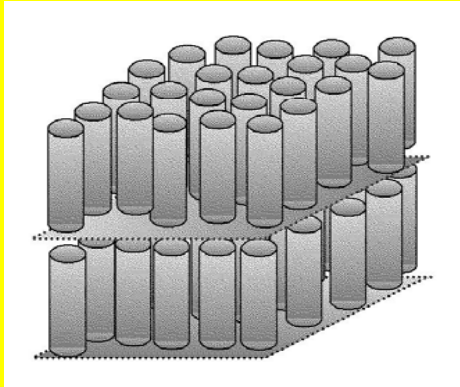
局所的な秩序

完全に等方  
"球形な対称性"

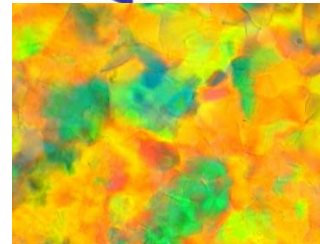
**"等方秩序"**  
連続的なランダム化

## 2つの液晶秩序

層状秩序



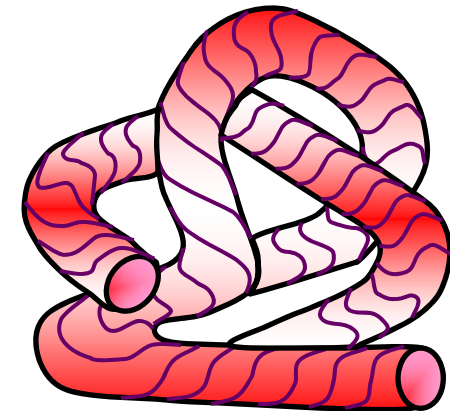
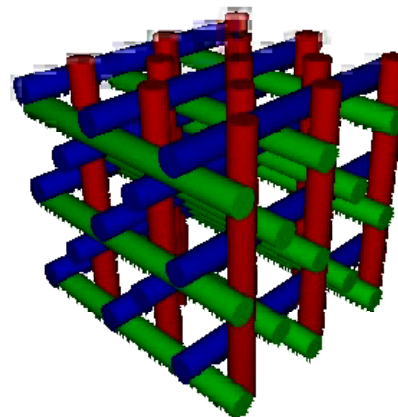
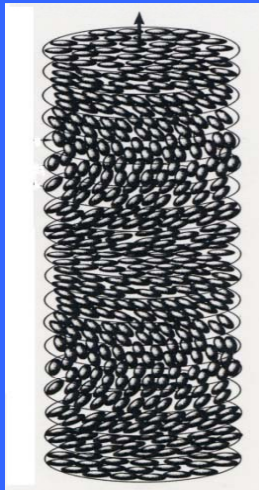
SmBP



SmBP<sub>Iso</sub>



らせん秩序



**やわらかい = 外場(力)による構造変化  
—チューナビリティ—**

## やわらかさ=チューナビリティ



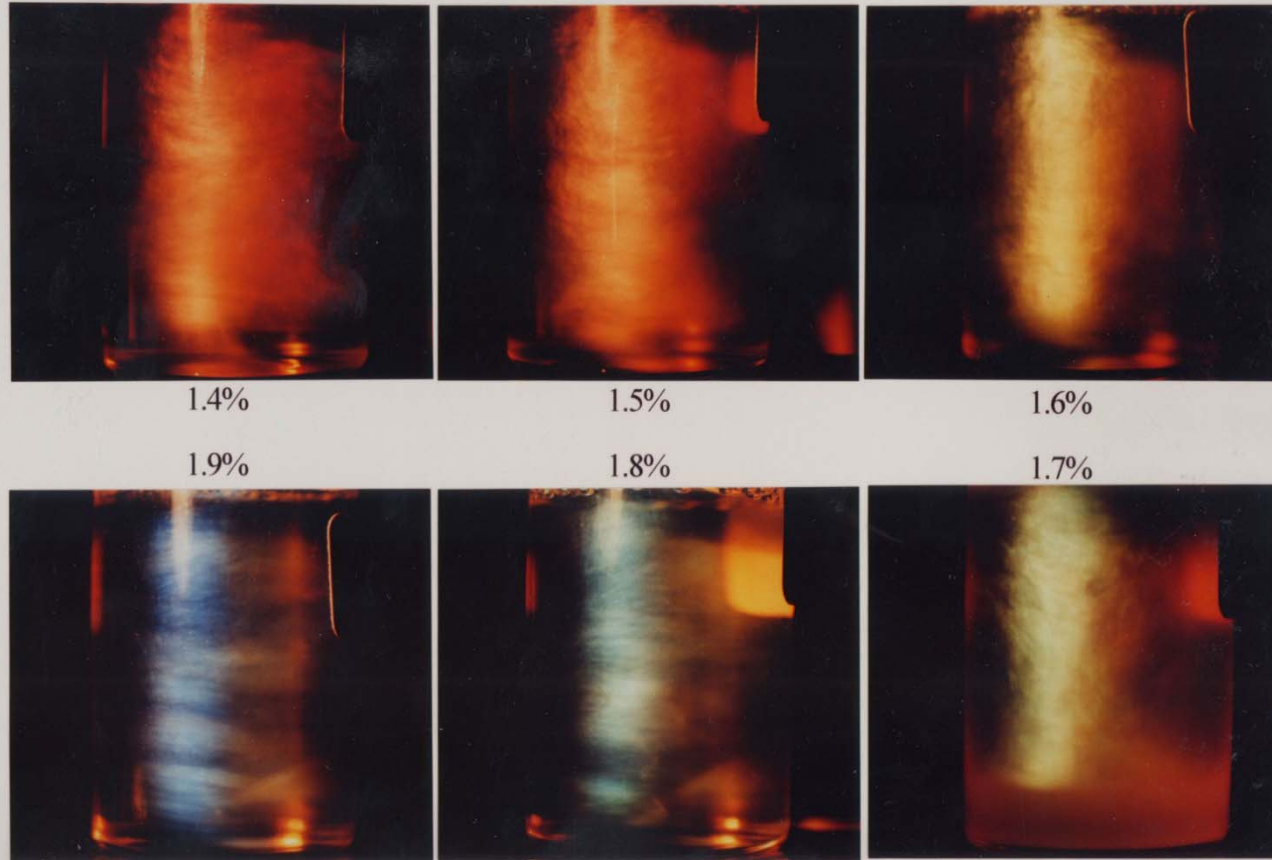
フェムト秒波長可変レーザーで励起

**光で自由に色を描画できる**

→空間に任意の色の分布をデザイン=フォトニック構造、非線形光学材料

## 構造色（分子が自発的に創るフォトニック秩序）

● Concentration dependence of the Bragg reflection wave-length  
by illuminating with white light at fixed scattering angle near back scattering ( $2\theta=150\text{deg}$ )

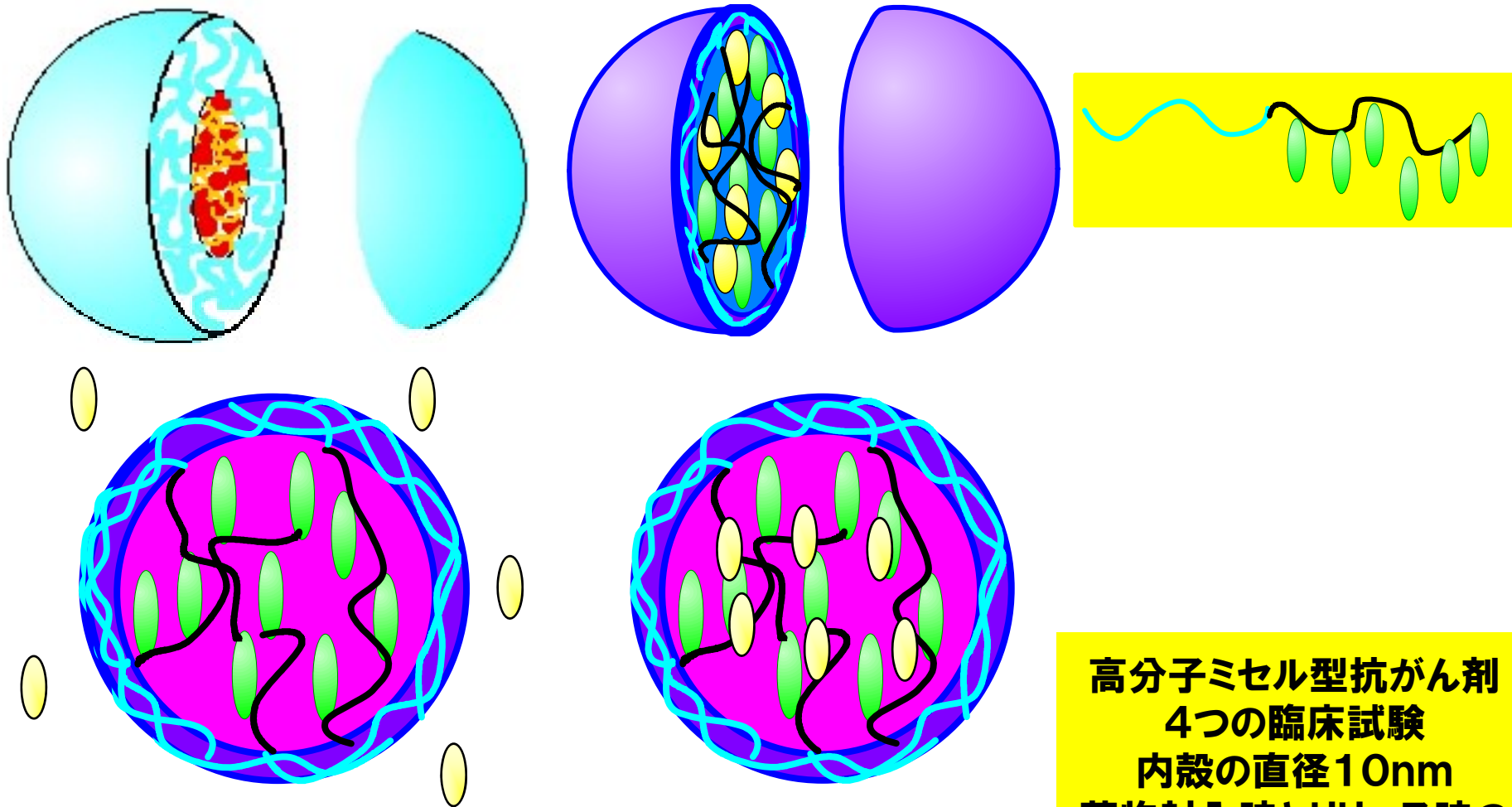


リオトロピック液晶（ブラッグ散乱・構造色）

- 水と変わらぬ粘性率(数cP)で流れるにも関わらず  
可視光波長スケールの規則構造を持つ

# ナノ構造と界面拡散 —ドラッグデリバリーシステム(DDS)—

## DDS(ドラッグデリバリーシステム)用液晶ナノミセル



高分子ミセル型抗がん剤  
4つの臨床試験  
内殻の直径10nm  
薬物封入時とリリース時の  
機能性の相違

● 界面間のマイクロな分子運動性を 界面の動的な状態で制御(空間形状は変化せず)

## 液晶ナノミセル中の液晶配向揺らぎ

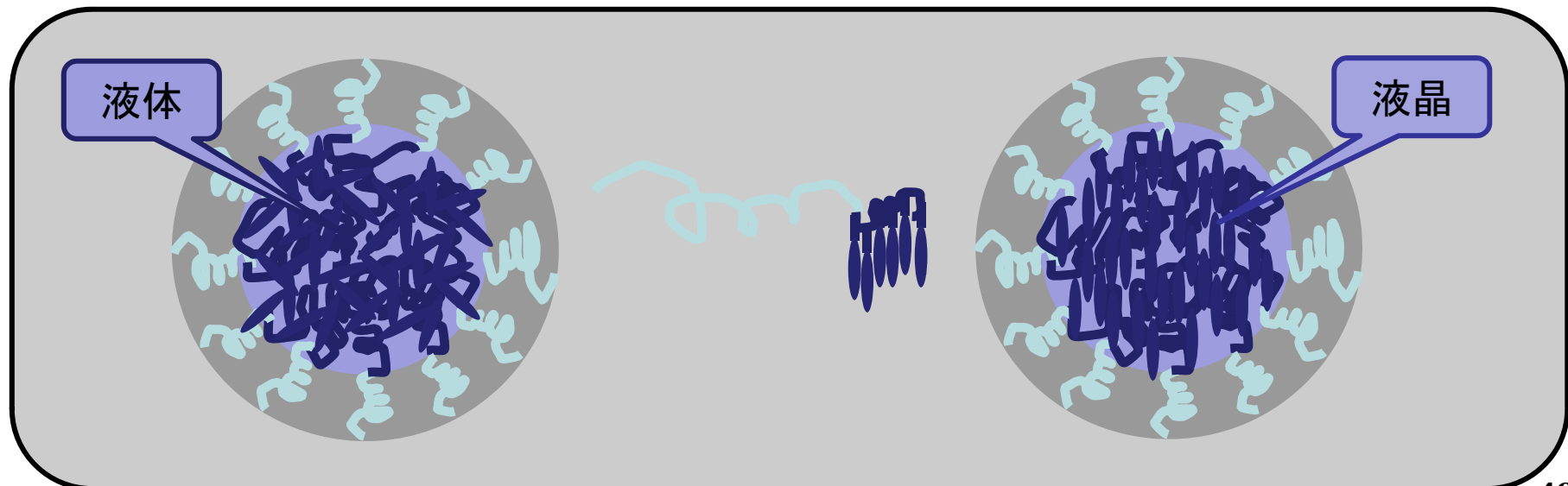
- 血管壁を通過してがん細胞へ到達する
- 体内の免疫からのステルス効果(EPS効果)

↓  
直径 < 100nm 液晶コア < 数10nm

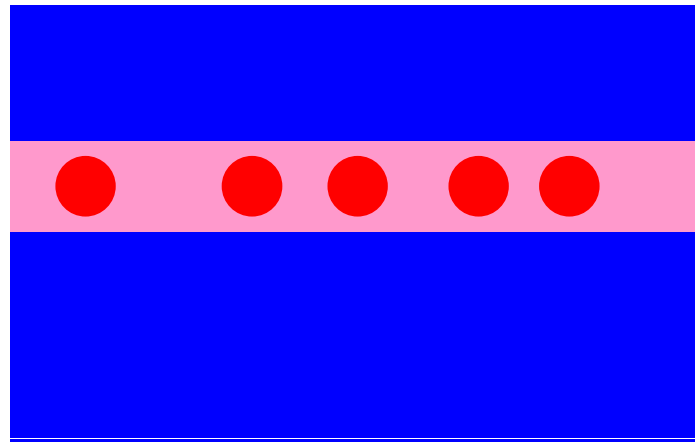
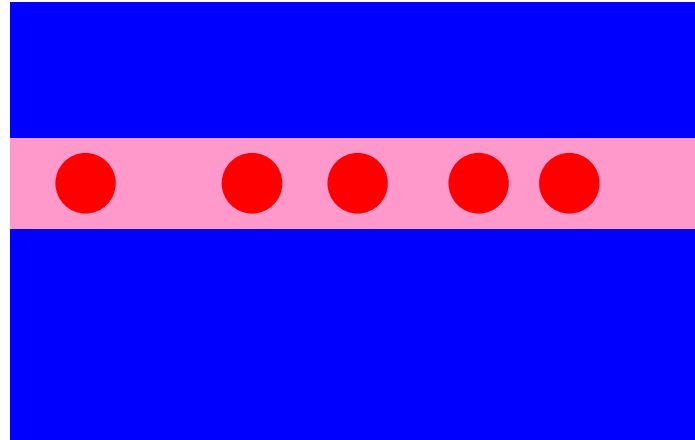
### ●液晶状態

●複数の分子が協同的に形成した“状態”  
1つの分子 = 長さ数nm、太さ < 1nm ~ 分子数10個程度

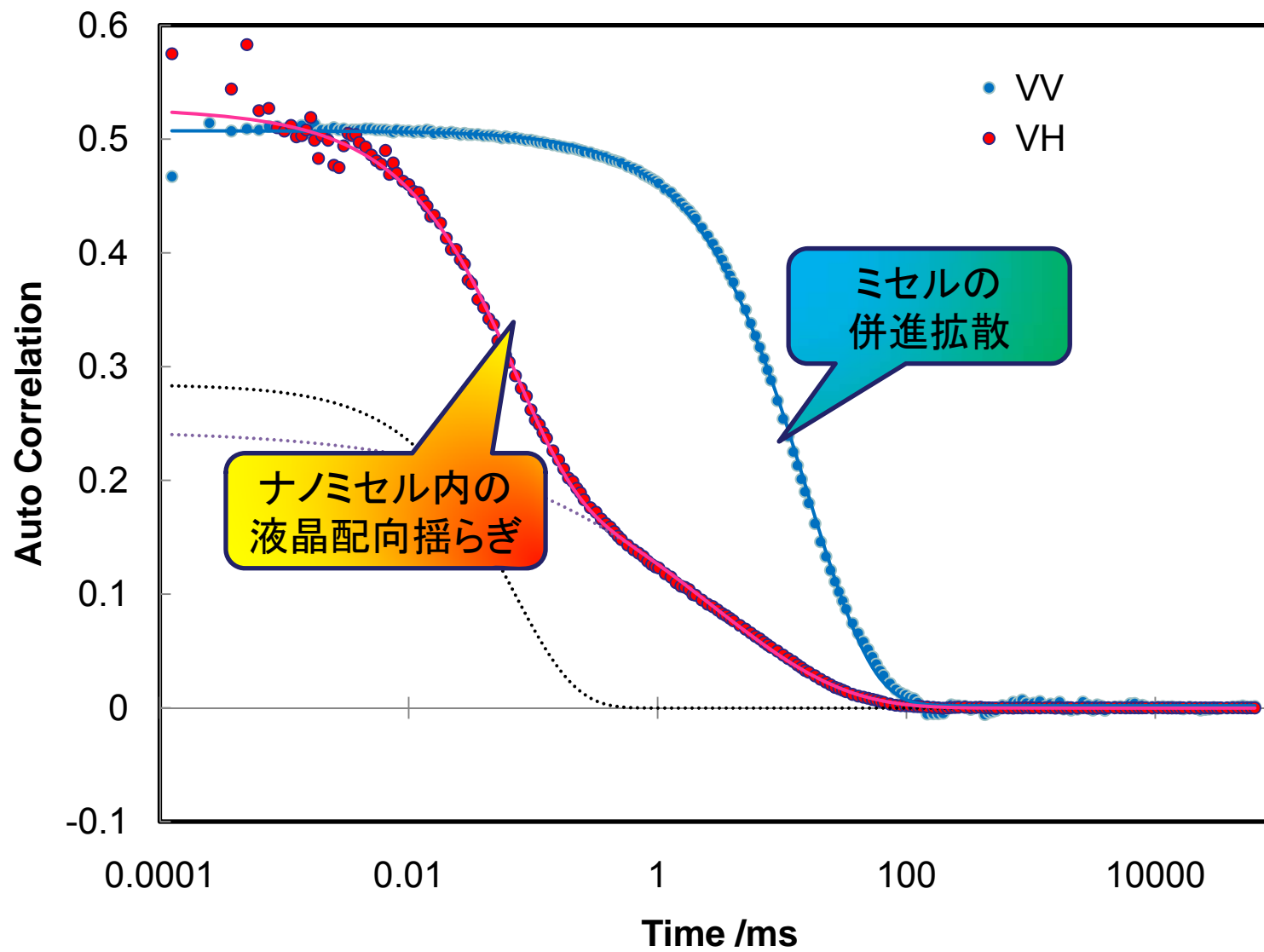
●コア壁面への分子吸着: 分子運動の低下



# チンダル現象



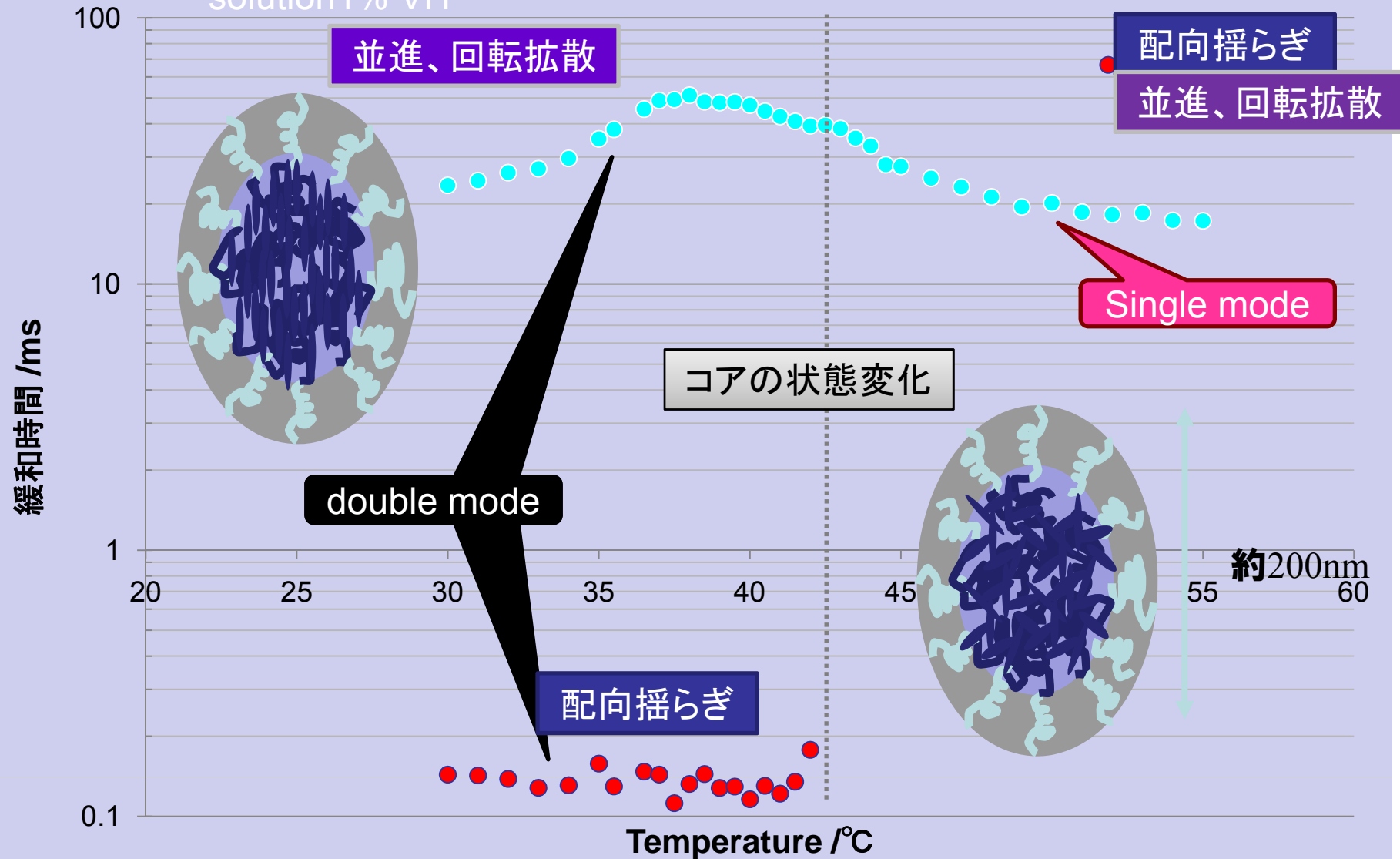
# 液晶ナノミセル中の液晶配向揺らぎ



# VH散乱の緩和時間 温度依存性

PEG-PAzPy<sub>9</sub>COOH complex

solution 1% VH

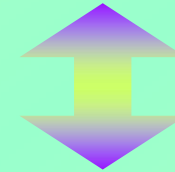
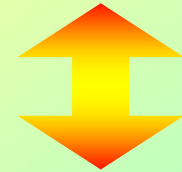


# ソフトマター

# ソフトマター:マルチスケールの階層構造

Frustration

Fluctuation



Structure

Motion

Space

Time

nm

$\mu\text{m}$

mm

m

ps

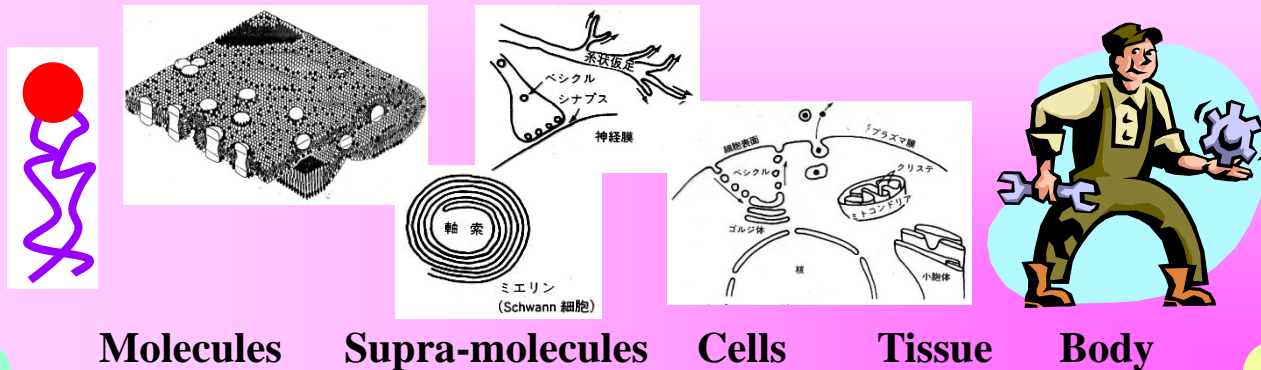
$\mu\text{s}$

sec

min  
hour

## ●時空間階層構造

### ●ソフトマター:ヘテロな自己組織的階層構造



## ●階層をまたいで広帯域に理解する 研究の視点

# ソフトマターと産業



出所<http://www.kanebo-cosmetics.co.jp/>



出所<http://www.kao.co.jp/asience/>



出所[http://www.koiwaimilk.com/product/m\\_makiba.html](http://www.koiwaimilk.com/product/m_makiba.html)



出所<http://www.meijibulgariayogurt.com/>

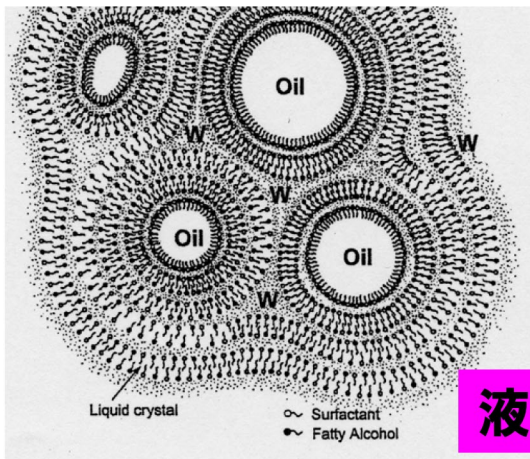


出所[http://www.daiichisankyo-hc.co.jp/products/details/lulu\\_a\\_gold/index.jsp](http://www.daiichisankyo-hc.co.jp/products/details/lulu_a_gold/index.jsp)

## 様々な加工品・プロセス技術と既に密着

## 経験則に基づいたものづくり

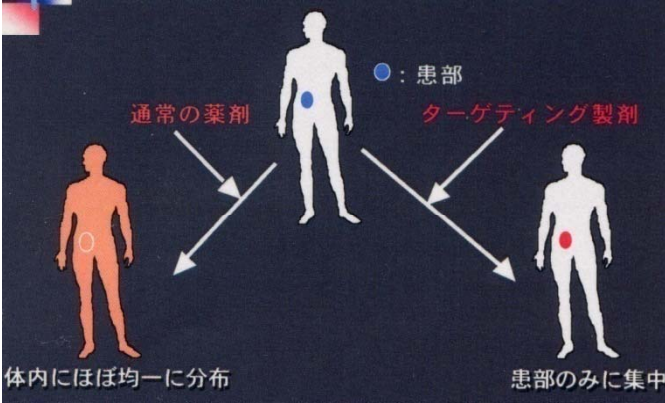
## ソフトマターの基礎的理解に基づいた階層構造の機能的なデザイン



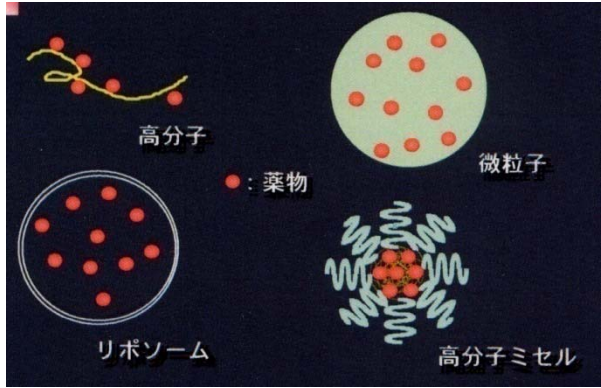
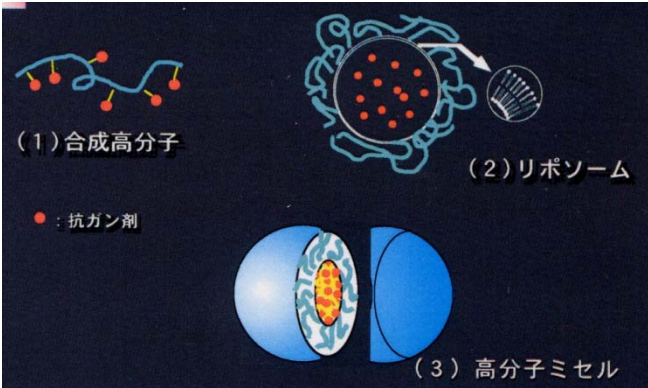
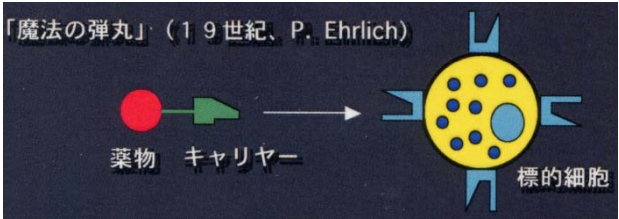
## 液晶乳化

## 高機能・高付加価値 エコロジー

# Drug Delivery

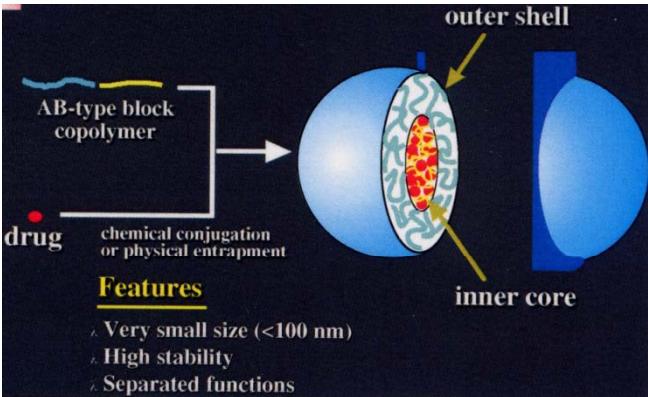


## 薬物の分子設計 リポゾーム・高分子ミセル ソフトマターのマイクロ 相分離構造

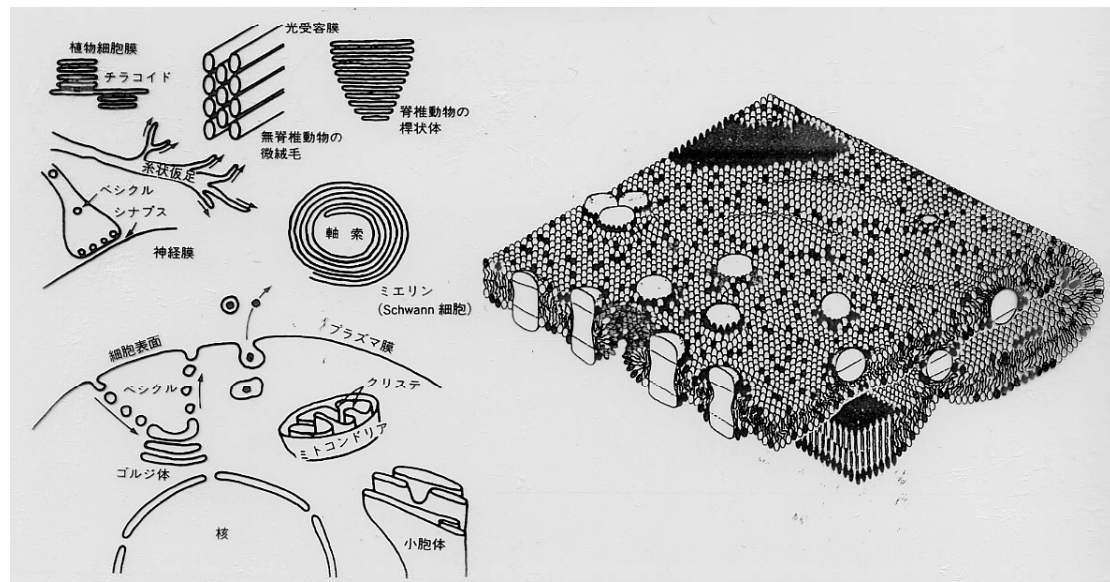


体内への薬の拡散  
細胞壁の浸透性  
生体との物理的相互作用

↓  
ソフトマターの物理現象



# Heterogeneous Hierarchical Structure



## 統計物理学の新しい基礎現象の宝庫

様々な工業製品・プロセス技術と既に密接に関係  
液晶ディスプレイ・光デバイス

医薬品・化粧品・シャンプー・食品・医療機器・高分子製品・その他

ソフトマター物理という学問領域はゲノム科学・生物物理と異なる  
アプローチで生体構造を物理学の上に理解する道につながる

# 謝辞

## 京都大学大学院理学研究科

21世紀COEプログラム 物理学の普遍性と多様性の研究拠点  
GCOEプログラム 普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野  
ソフトマター物理学分科

高西 陽一  
佐光 貞樹  
篠田 貴志

文部科学省科学研究費 特定領域研究 非平衡ソフトマター  
JST 液晶ナノシステムプロジェクト

