

スーパーコンピュータを用いた磁性体研究： フラストレーションと五角形格子

古内 理人

Rito Furuchi

兵庫県立大学大学院 理学研究科

略歴

- 1997年:大阪府出身 生まれた後は東京で過ごす
- 2015年3月:東京成徳大学高等学校 卒業
- 2019年3月:兵庫県立大学 卒業
- 2021年3月:兵庫県立大学博士前期課程 卒業
- 現在:兵庫県立大学博士後期課程 在学中

趣味など

- 読書、ゲーム、バスケなどの球技
- 学生時代のアルバイトとして農作業や図書館作業
- 自然に囲まれたキャンパスならではの様々な体験

自身の研究分野

- 分野としては物性理論物理学
- その中でも磁性に対して研究をしている
- 磁性の中でも「フラストレーション」という状況が対象
- その研究手法の中でスーパーコンピュータを用いている
- 自身の研究の特異性は五角形格子

本セミナーの主題

- まずは基本的な諸現象の取り扱いに関して簡単に振り返る
- 次に研究において必要な複数の前提知識を述べる
- 最後に実際の研究でのスパコンを用いた方法と成果を示す

本セミナーの概要

- 身近な物理現象とその理解について
- 相転移現象と普遍性
- 磁性体の科学とその準備
- 反強磁性体とフラストレーション
- 五角形格子とスーパーコンピュータの利用
- まとめ

本セミナーの概要

- 身近な物理現象とその理解について
- 相転移現象と普遍性
- 磁性体の科学とその準備
- 反強磁性体とフラストレーション
- 五角形格子とスーパーコンピュータの利用
- まとめ

水の三態

- そもそも物理学とは何か



“物の理の学問”

水の三態

- そもそも物理学とは何か

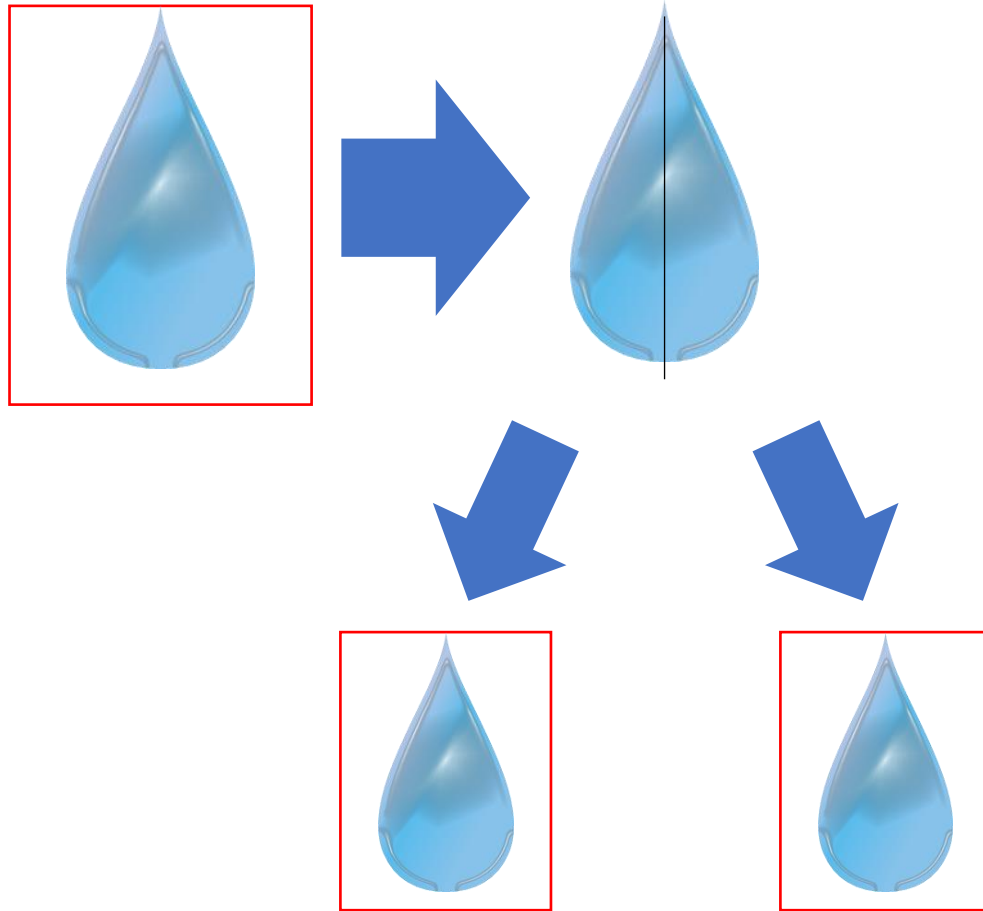


“物の理の学問”

- つまり見たり触ったりできるような”物”を理解するためのもの。
ここでは一先ずとても身近な物質”水”の理解を簡単に振り返る。



水の三態



分けられても
性質は変わらない

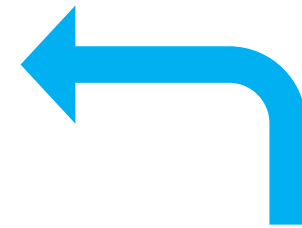
※実際にはごく僅かな不純物
によって観測できないほどの
違いはあるかもしれないが、
それは無視する。

水の三態

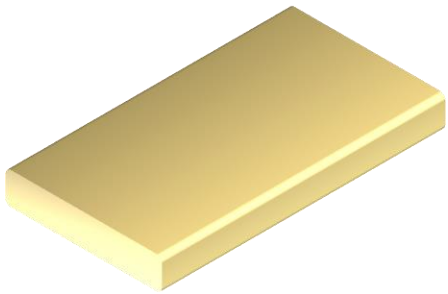
性質が違うとは？



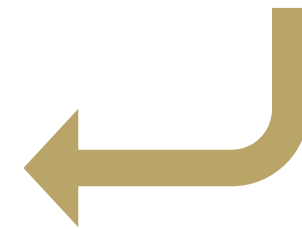
力を加えると簡単に形が変わる
奥にあるものが見えて色が薄い



構成分子が違うので性質が違う



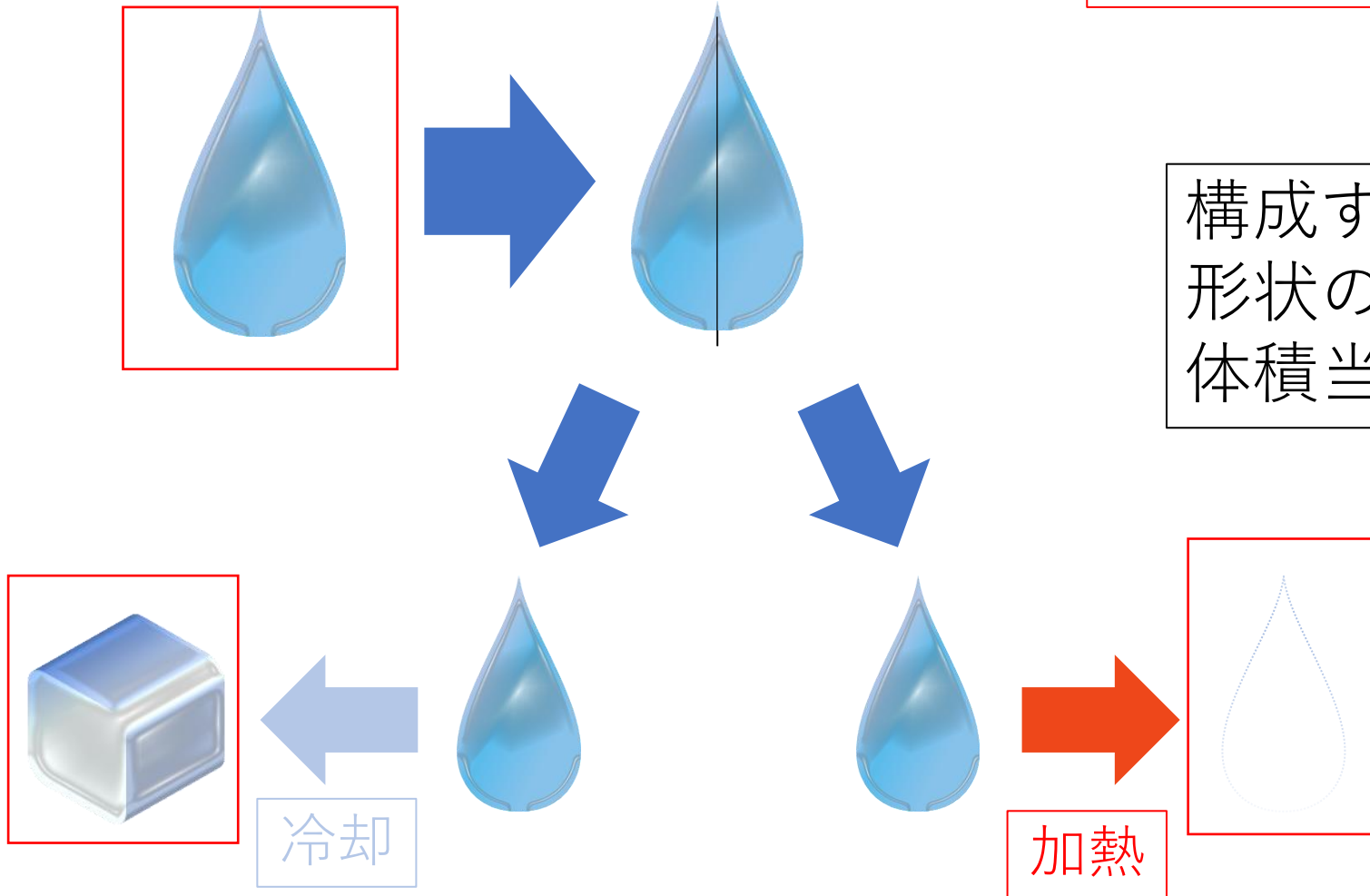
力を加えても形が変わりにくい
光沢があって独特の色がある



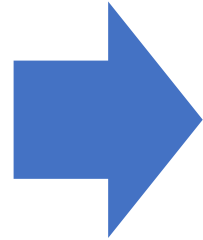
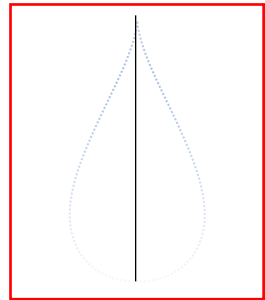
水の三態

同じ分子でも性質が異なる

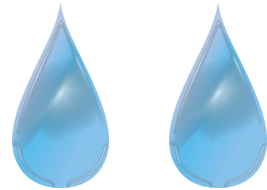
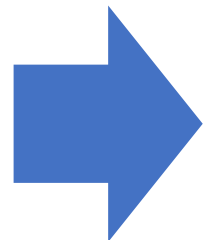
構成する分子は同じであるが
形状の変化のしやすさや
体積当たりの質量が異なる



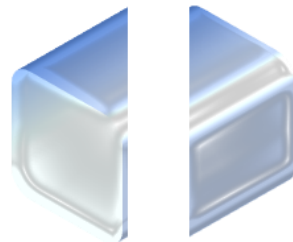
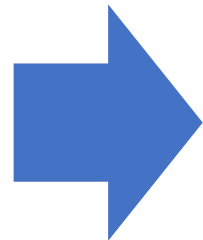
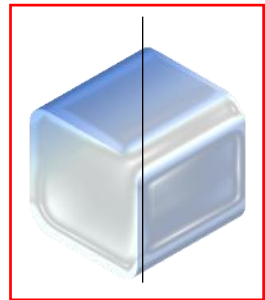
水の三態



気相



液相



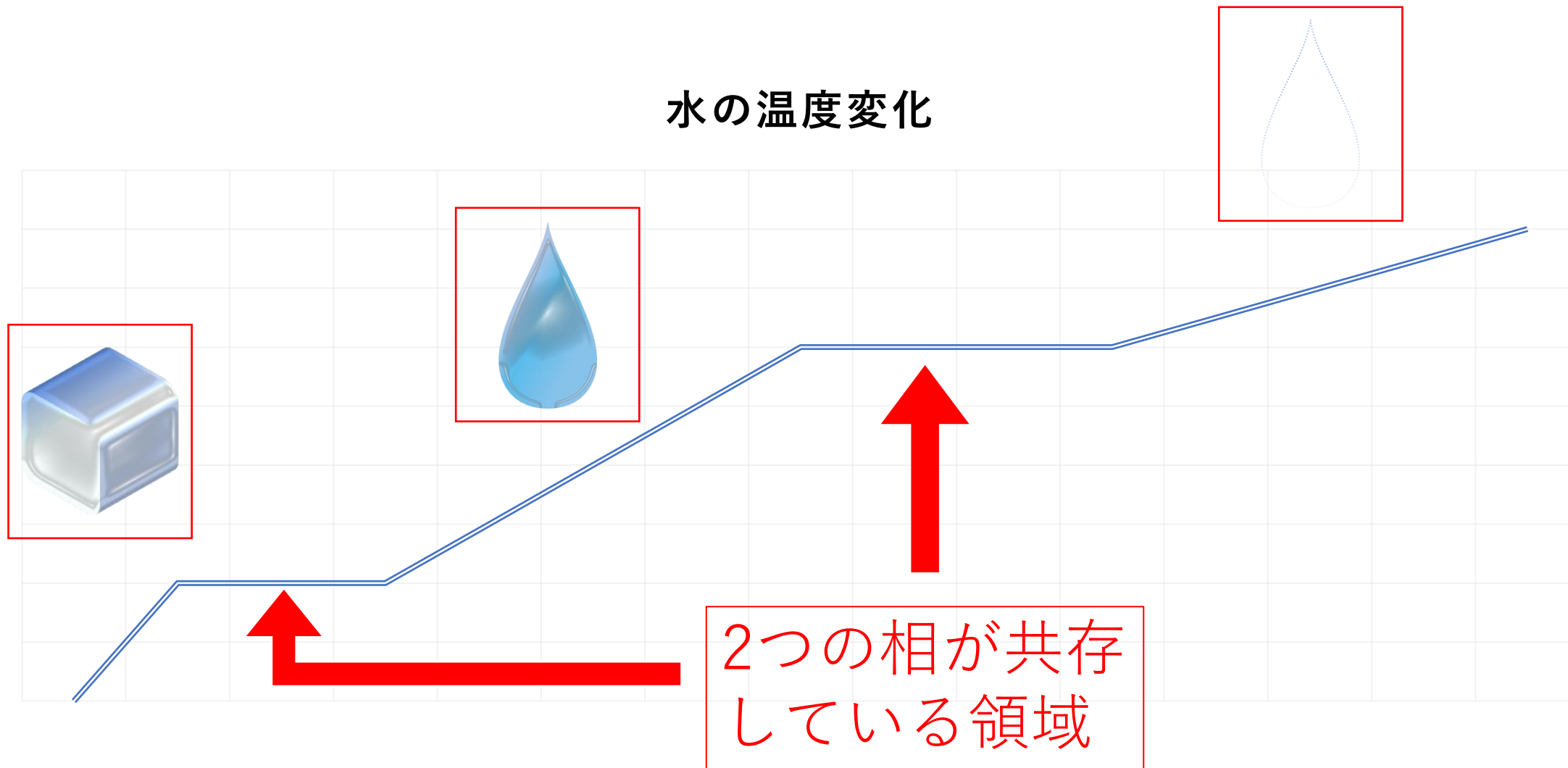
固相

それぞれを分割しても
それらの性質は同じ

各状態でこれらの物質は一つ
の相をなすと表現され、
それぞれに名前がある。

水の三態

水の温度変化

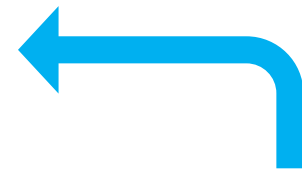


水の三態

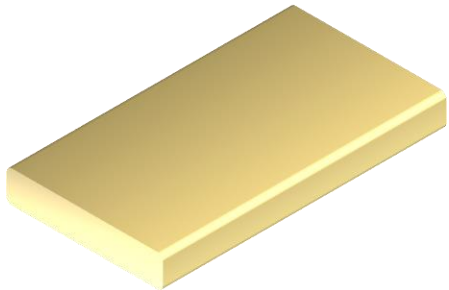
異なる物質間での
共通した性質



力を加えても形が変わりにくい
熱を加えると相転移して融解



構成分子が違うため原理は少し
異なるが、似た挙動を示す。



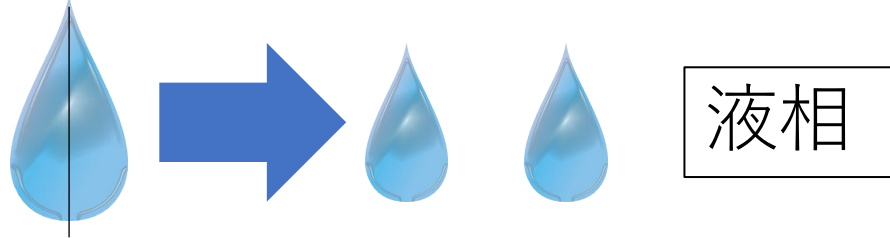
力を加えても形が変わりにくい
熱を加えると相転移して融解



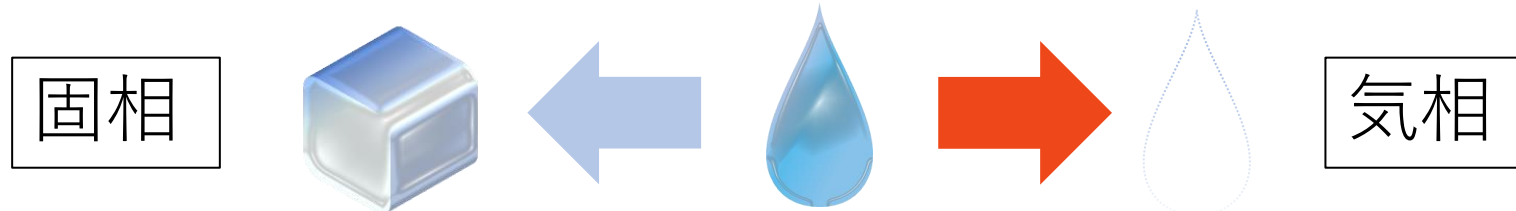
相転移現象は異なる物質間の共通点を抜き出す。

水の三態（まとめ）

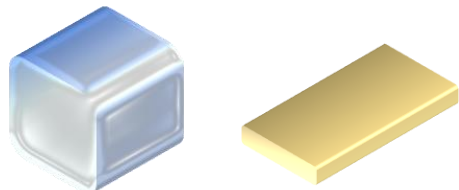
- 分割しても変わらない物質の状態を相と呼ぶ。



- 外部の要因で相が変わると物質は性質を変える（相転移）。



- 相転移は単一物質の異なる状態と異なる物質間での類似現象を確認することのできる重要な現象である。



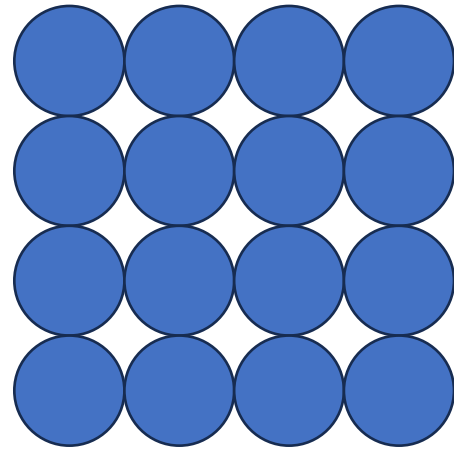
どちらも固相であり、熱を加えると融ける

本セミナーの概要

- 身近な物理現象とその理解について
- **相転移現象と普遍性**
- 磁性体の科学とその準備
- 反強磁性体とフラストレーション
- 五角形格子とスーパーコンピュータの利用
- まとめ

相転移現象

固相



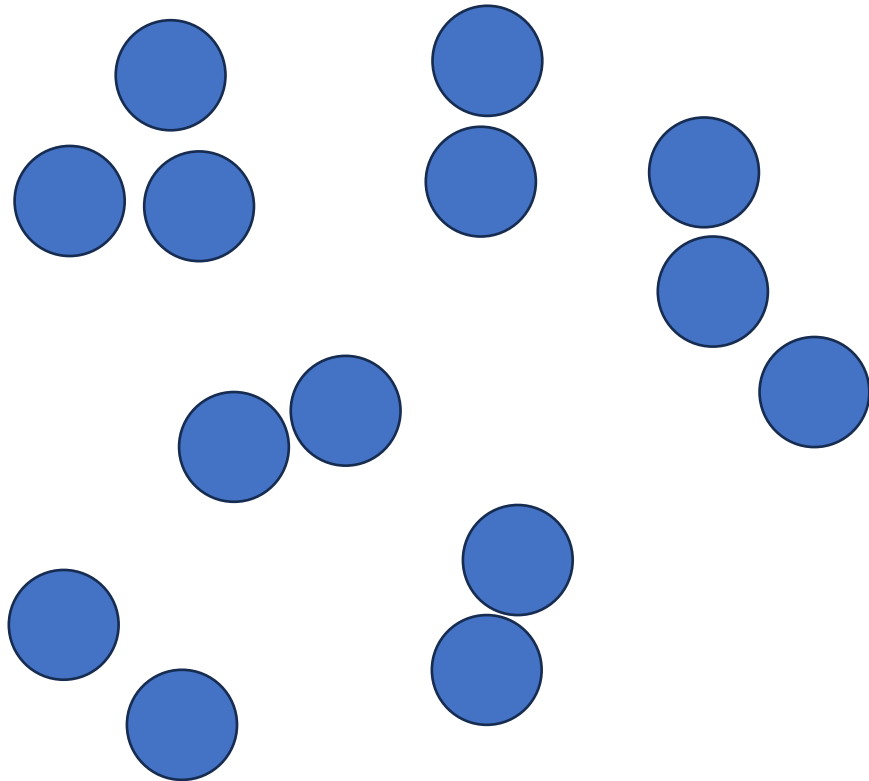
各物質を構成している分子同士が強く結びつき、互いが互いを離さない形でとどまっている。



分子が動こうとする度合、**自由度が高まらない**ので形が変化しにくく**固い**。

相転移現象

液相



互いを結び付ける力に対し、熱による分子の動きが激しくなっている

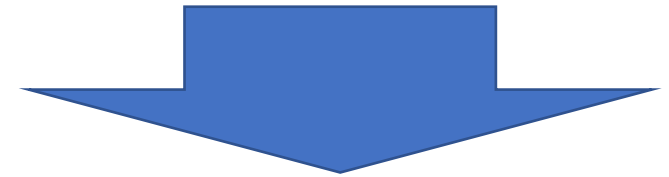


近い分子間で引きつけあうことができ、一応は形を保つことができている状態

相転移現象

気相

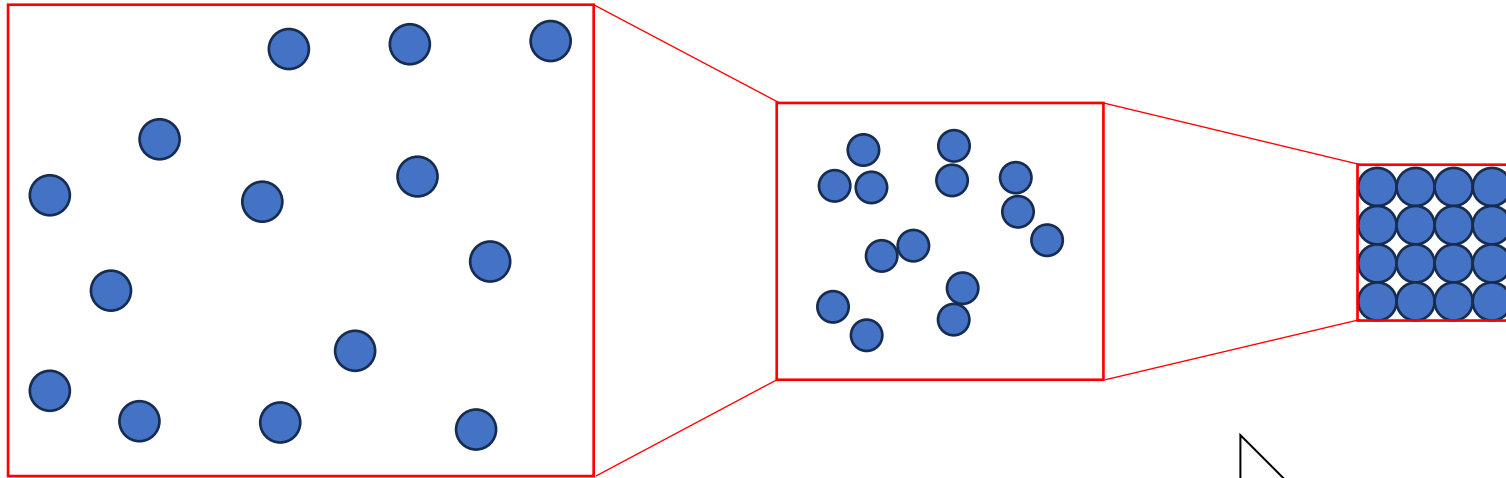
熱による分子間の運動が激しくなり、完全に互いの束縛から解き放たれる



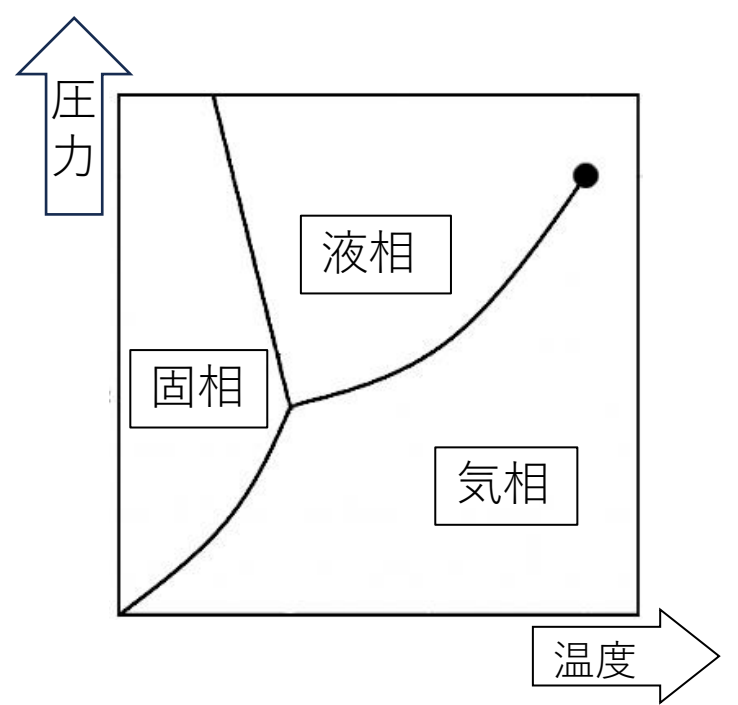
この時は物質が一つの形に凝縮することができず、形を持つことができない

相転移現象

圧力による相転移



圧力をかけていくと温度を下げる方向に対応して相転移が起こる

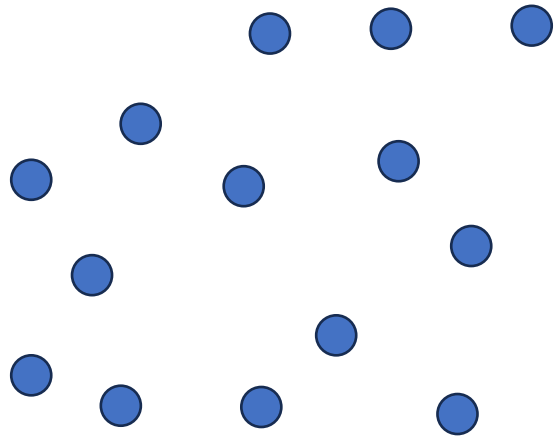


分子が小さくなった空間で動きが制限されることに対応

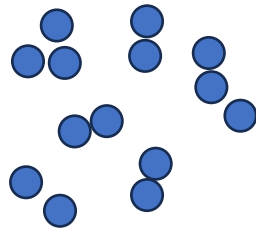
相転移現象

モデルの抽象化

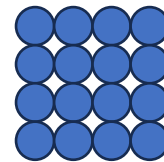
気相



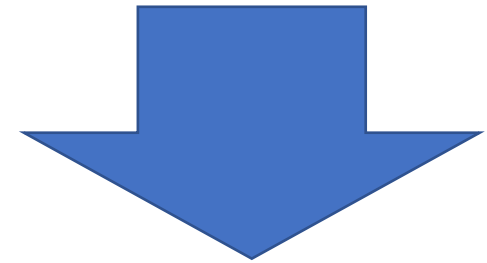
液相



固相



小さい粒のようなものが広い空間で運動するモデルに一般化

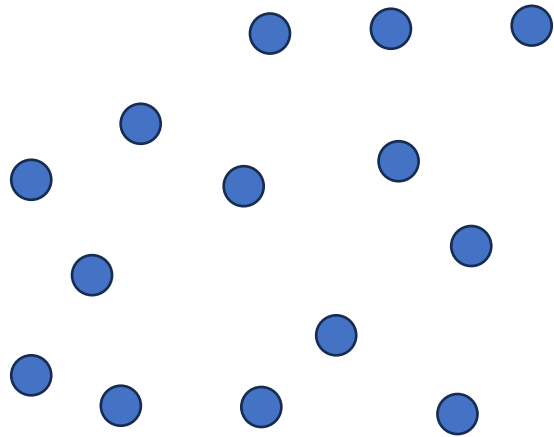


意味のある量になるかはわからないが粒を人、考える空間は広く考えて熱に対応する要因や、結果の相転移が起きるかを考えるのも面白い

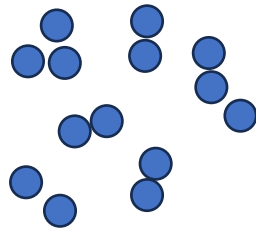
相転移現象

集合体特有の現象

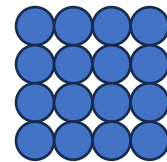
気相



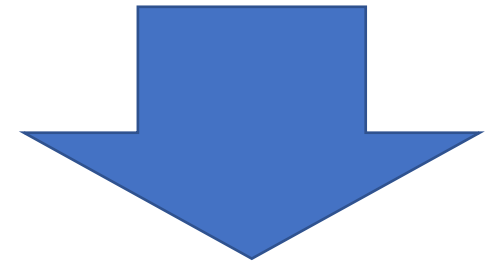
液相



固相



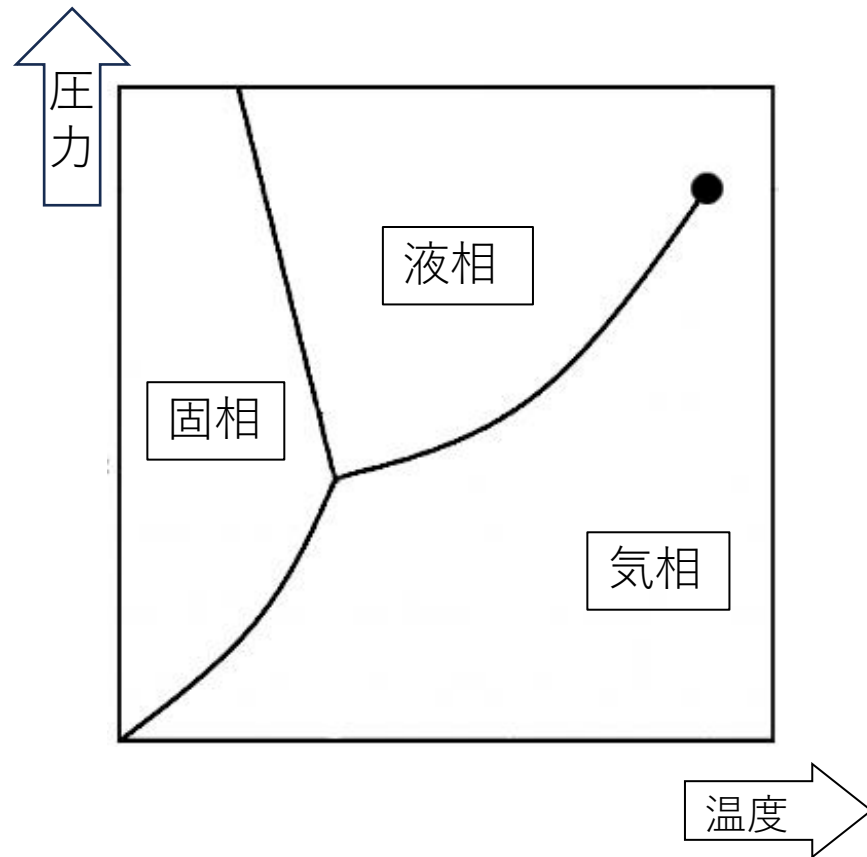
相転移現象は沢山の粒子の集合がなす物質で起きる現象であることが理解できる



相転移現象の本質は**集団での運動**の振る舞いが熱や圧力、他には磁場などの外的要因で変化していること

相転移現象

物質の安定状態



物質や系は平衡状態では
最小自由エネルギーの
状態が実現される



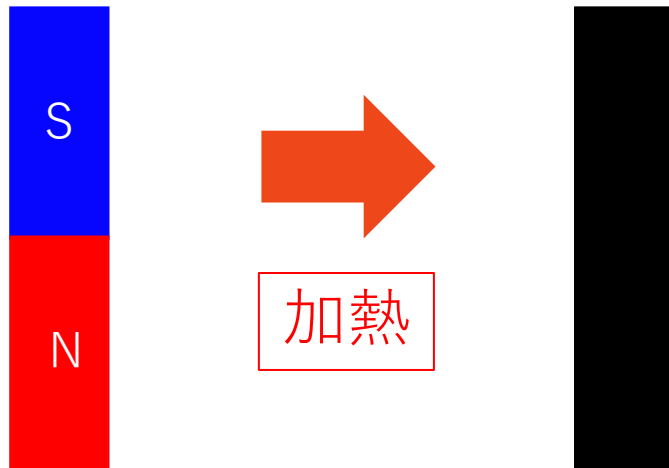
相転移が起きる状況では各状態の
自由エネルギーの大小が入れ替わる



その自由エネルギーの差の近づき方
などから相転移をさらに一般化して
相転移の分類をすることができる

相転移現象

磁性体の相転移



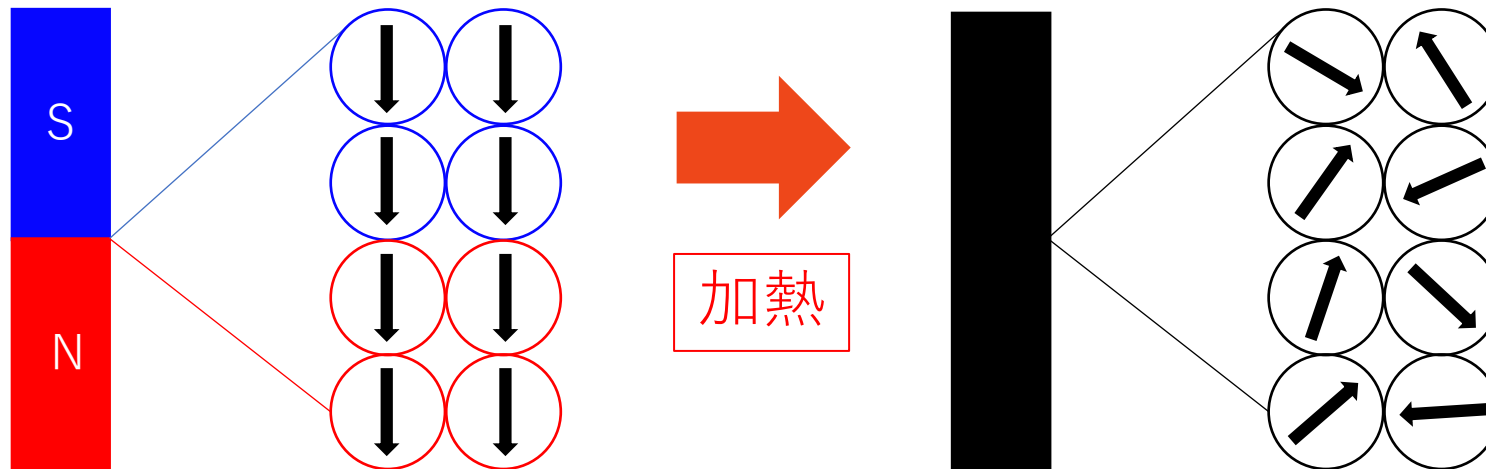
磁性体は
磁氣的性質（磁性）を持つ物体

身近にある磁性体としては永久磁石などが有名であるが、熱するとその磁性は消える。これも一種の相転移である。

相転移現象

磁性体の相転移

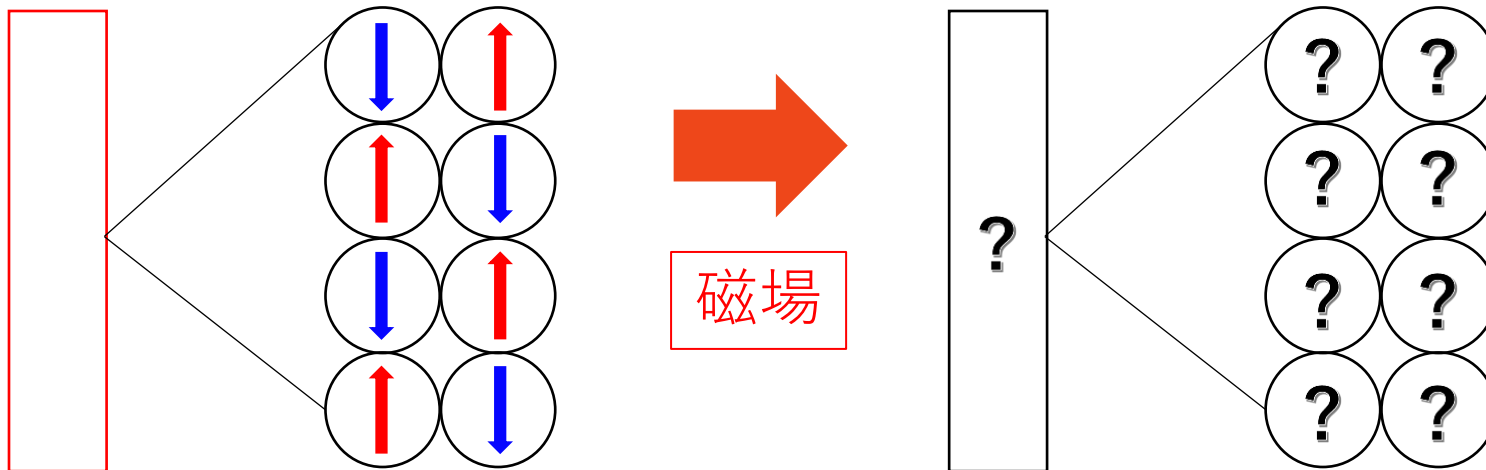
低温においてそろっていた磁力の最小単位（**電子のスピン**）が熱によって**バラバラ**になるため。



相転移現象

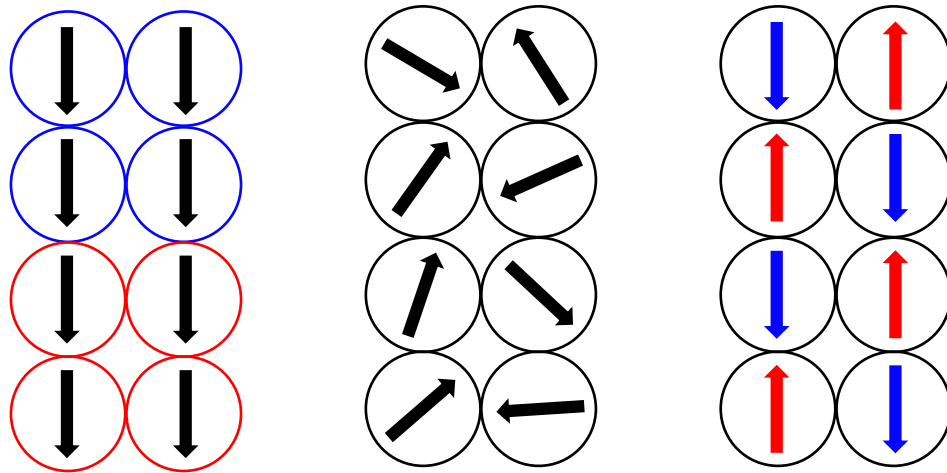
磁性体の相転移

世の中の磁性体には低温においてスピンの向きがバラバラになろうとする物質があるが、これに磁場をかけた場合の挙動も興味深い。

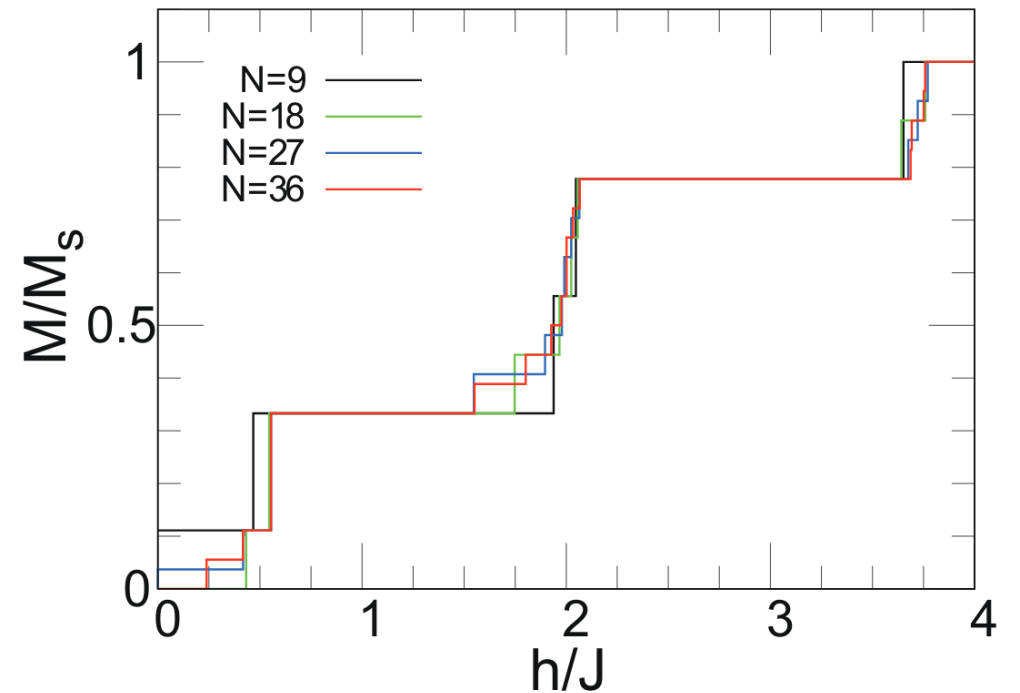


相転移現象

磁性体の相転移

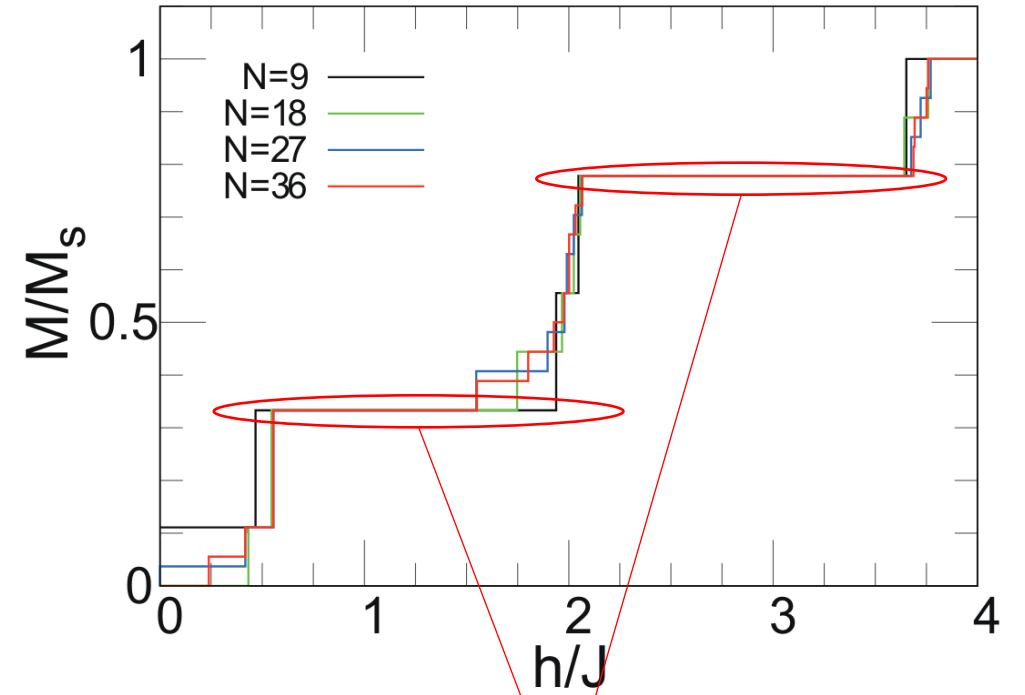
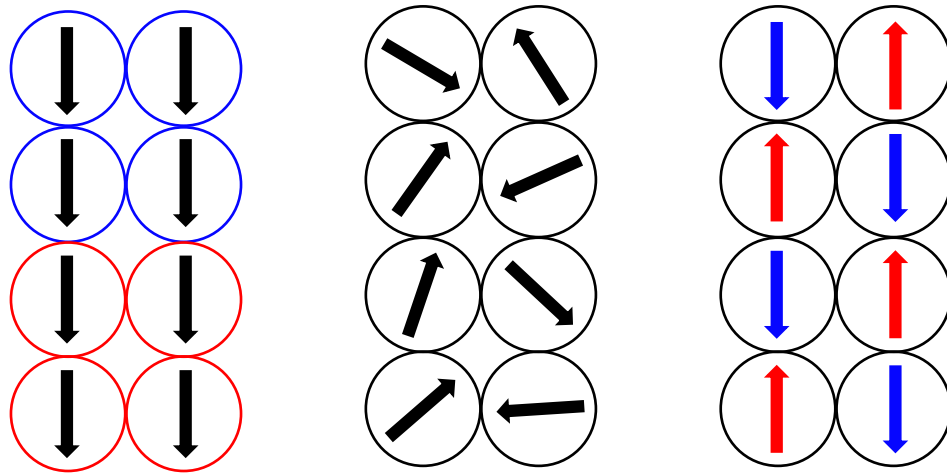


スピンの向き揃い具合を磁化と呼び、磁場をかけることでその磁化が変化していく様子を確認する曲線を磁化曲線という。



相転移現象

磁性体の相転移



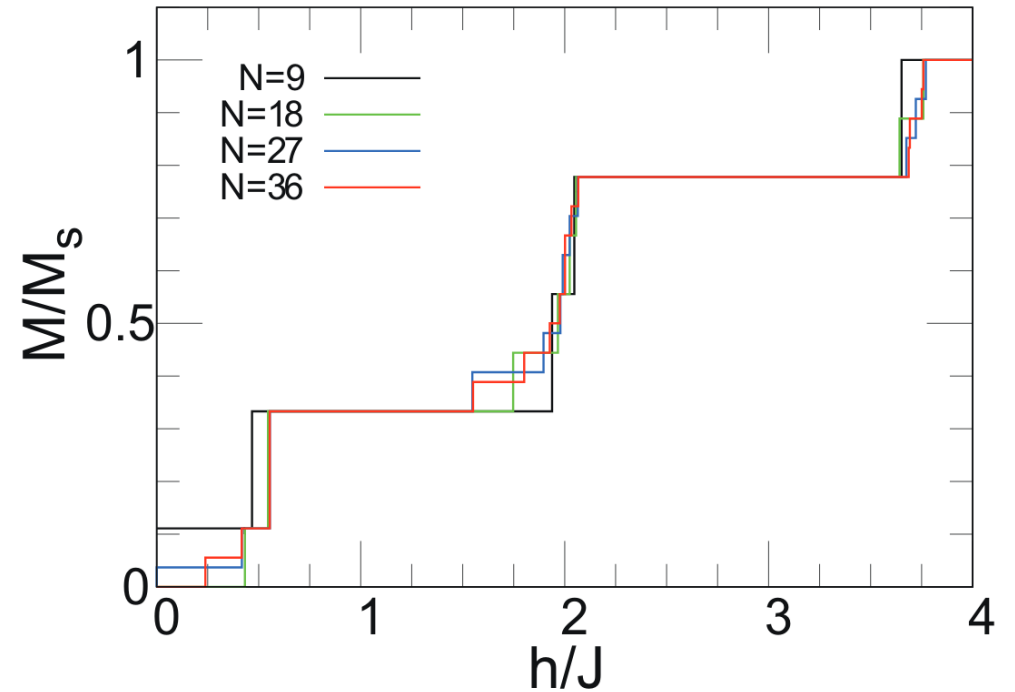
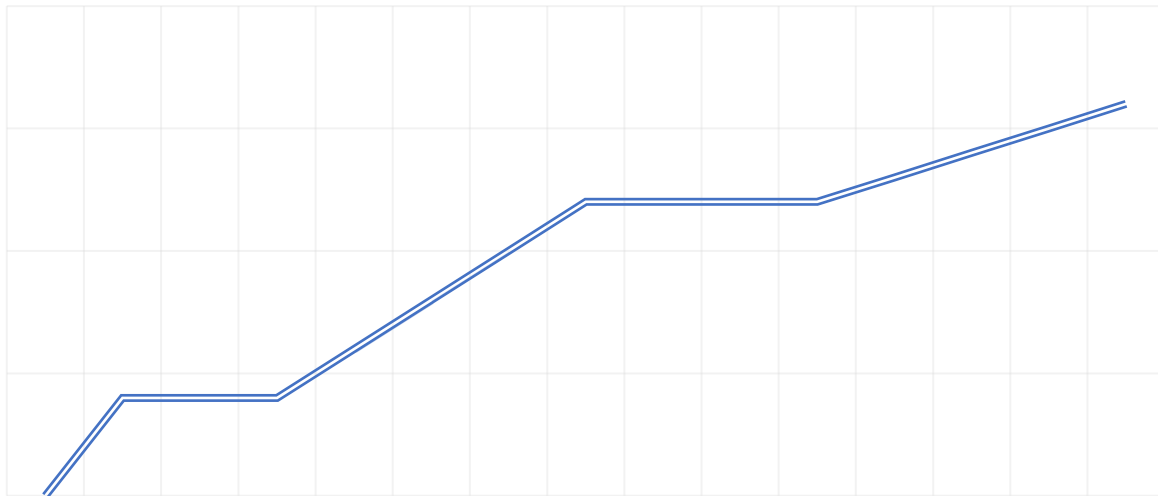
磁化曲線は物質によって異なり、その途中に水の温度変化で見たような平坦領域が発生する物質も確認されている。

相転移現象

様々な相転移

熱による水の状態変化と磁性体の磁場による変化が似た挙動を示すことは非常に興味深い

水の温度変化



相転移現象

- 世の中にありふれている様々な現象をそれぞれ別のものとして理解していくのは非常に難しい。
- しかし、このようにこのような現象を「たくさんの粒の運動の度合いで粒が集まった物の性質は変化する」という形で理解すれば多くの現象を一度に説明できる。
- このようにすることで諸現象をまとめて理解してしまおうというのが物理学においては非常に重要な考え方である。

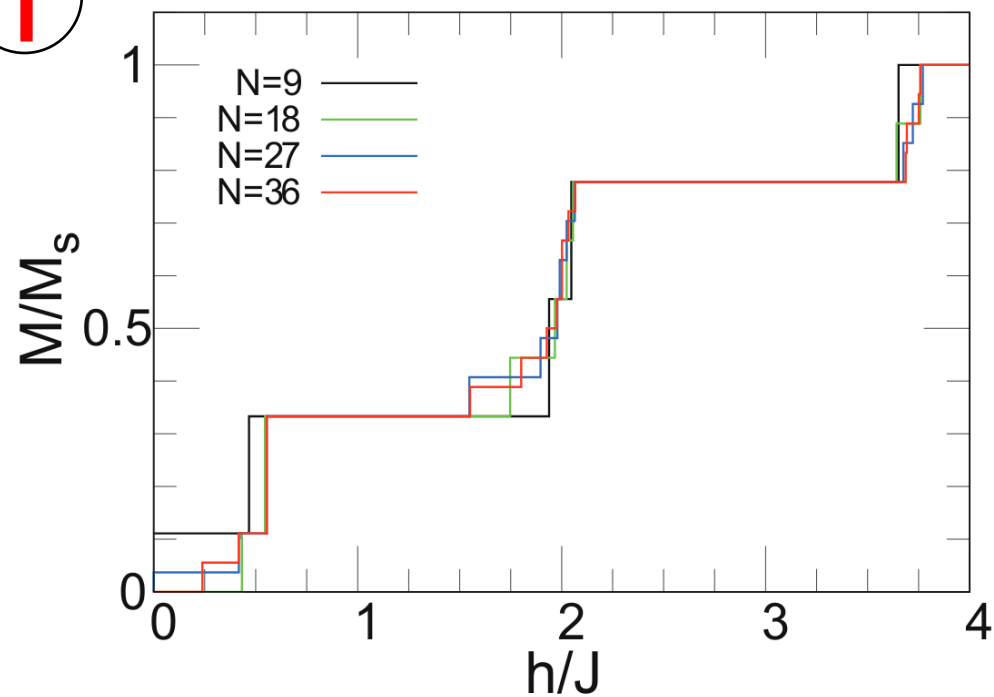
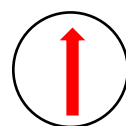
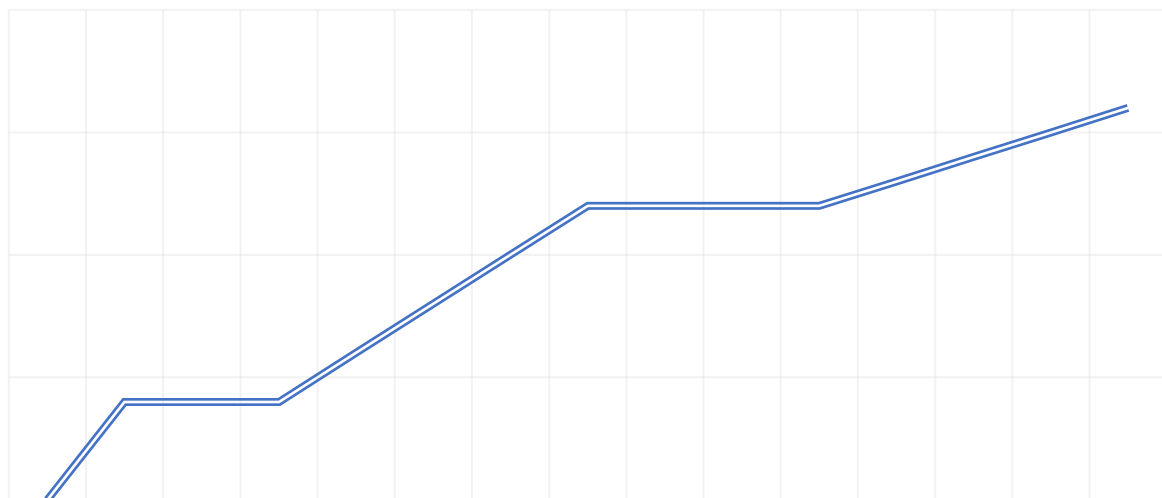
相転移現象

相転移現象と普遍性

複数の異なる現象などから同じ考え方によって似たような変化を見出した場合、その共通している性質を普遍性と呼ぶ

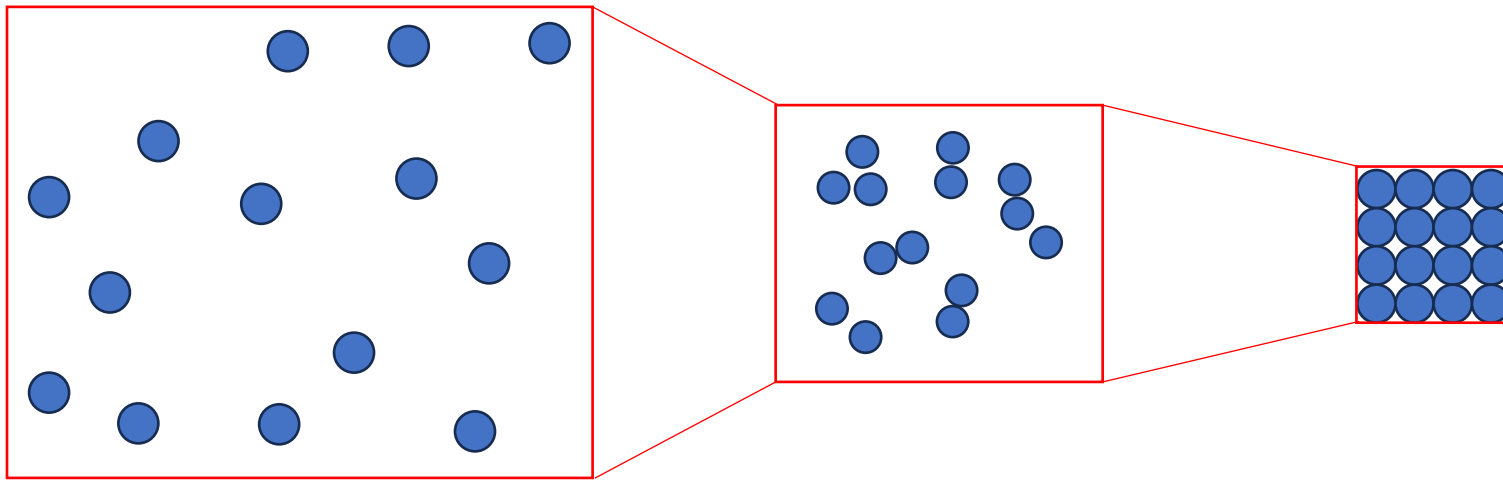


水の温度変化



相転移現象（まとめ）

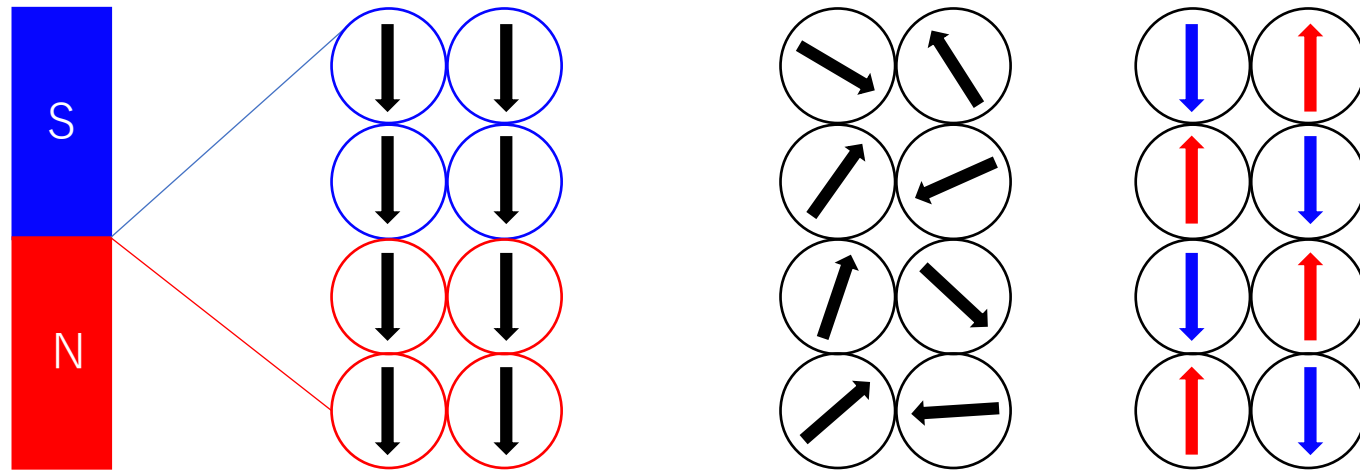
- 水の三相の相転移は水分子の運動が熱や圧力によってその振る舞いを変化させるという形で理解されている。



- この様になんかなり単純なモデルによってこの現象は説明ができる。

相転移現象（まとめ）

- 相転移現象が磁場によって引き起こされる例としては磁性体の磁化の変化があるが、これは水分子の代わりに小さな磁石、スピンの向きがたくさん集まっていることから説明できる。



- 相転移現象は非常に多くの現象にかかわっている、普遍性の高い研究対象である。

普遍性

世の中はわからないものであふれている

科学は難しいものを理解するためのもの



抽象化は簡単に理解するための科学における**武器**

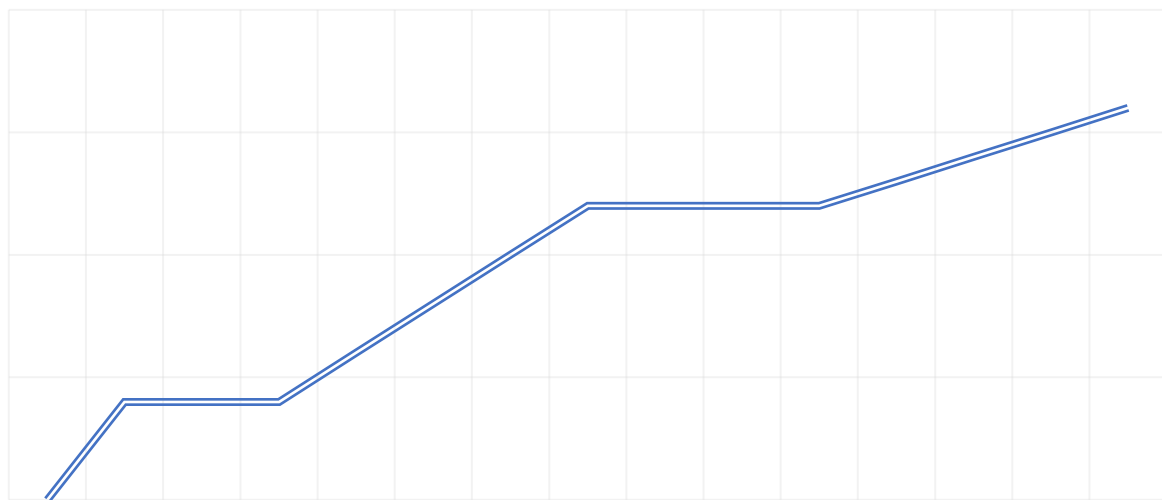


共通部分の抽象化により**普遍性**が明らかになる

普遍性

グラフという抽象化

水の温度変化



実際に水の温度が上がってくる実験そのものを保存することはできないが、その時の様子で重要と思われるもの（温度変化）を取り出して保存できる



物理学においては初めは物事の簡単なところから手を付ける。

普遍性

数学を用いた抽象化

物理学の基本言語は数学であり、数学はもとより抽象化された学問である

例としては比例関係の見える、異なる現象でも根底にある原理は同じである可能性がある



解析の手法としてである「微分」に関しては変化の様子を捉える高度に抽象化された手法であり、様々な解析で取り扱われている

普遍性

抽象的な物理学

諸物理学の異なる分野間においても、同じような考え方をするものがある

例としては重力（古典力学）とクーロン引力（電磁気）の逆二乗則がある

G

e

共通の普遍性を持つ複数の現象の解析時にはどれか一つの成果が利用できることがある。

普遍性

普遍性から新現象の発見へ

普遍的な原理の理解は「自分が望むような道具」がどのようにすれば実現するかの発見につながる。

例としては超伝導の原理の解明で高温超伝導の実現や、より有用な現象の発見につながる可能性がある。



既存の確認している現象の普遍性を理解することではあっても、これまでに無い未知の新現象・新物質作成に寄与する。

普遍性（まとめ）

- 物理学は難しすぎる世の中を簡単に理解するためのもの。
- そのためにはとにかく似たものを細かく数学的に解析してそれらの内側に潜んでいる共通した原理、「普遍性」を捉えることが現在では一番簡単で早い方法である。
- 普遍性の理解が進めば未知の望んだ物質、現象の開発に繋がる。

本セミナーの概要

- 身近な物理現象とその理解について
- 相転移現象と普遍性
- **磁性体の科学とその準備**
- 反強磁性体とフラストレーション
- 五角形格子とスーパーコンピュータの利用
- まとめ

準備としての諸分野

- 磁性体の話をするためにその準備としていくつかの分野の重要な考え方を簡単に述べる。
- 統計力学（多くのものの取り扱い）
- 電磁気学（電子の性質）
- 量子力学（電子の性質）

統計力学

- 元々は熱力学における気体の性質を、気体分子の運動から説明することを考えたことを発端とする。
- 現在では広く小さいものの集まりに対して、それらがとりうる状態を確率的に理解し、細かく見るのではない全体の性質を理解するために用いられる考え方になっている。

統計力学

- 一例：容器内気体の壁に対しての圧力
- その要因としての気体分子の衝突
- 分子の運動と時間当たりの衝突頻度

統計力学

- 一々気体分子を確認することは技術的に不可能。
- 対して、確率はそれよりは簡単に得られる。
- そこから期待値を求めることにより十分に大きな系の挙動は計算できる。

統計力学

- 物質は非常に巨大でたくさんの粒子の集合体(10^{23} 個で数グラム単位)。
- そのため物質の性質を取り扱うためにはこの手法が強力。
- 後述する量子力学の確率的な性質にも高相性。

統計力学（まとめ）

- 統計力学は元々は気体の性質のための学問。
- その本質は詳しく様子がわからない細かいものを直接捉えるのではなく、その確率に注目して全体としても性質を見るもの。
- 物質科学においては基本原理となる量子力学と相性が良く、物質が多数の分子の集合であるために相性の良い手法である。

電磁気学

- 電磁気学はその名の通り電気と磁気に関する性質を取り扱う学問である。
- 特にそのどちらもが持つ、「同じ極間での斥力」と「異なる極間での引力」という性質が非常に重要である。

電磁気学

- まず、磁性体を取り扱うためには磁気に対して説明が必要。
- 磁気は電気と非常に密接なものであり、これに関してはマクスウェル方程式からも現れており、現象としては電磁波や電磁石（モーター）などが理解され広く応用されている。

電磁気学

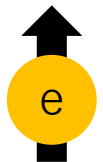
- 物質を構成する分子は複数の原子か単一の原子から構成されている。
- さらにその原子は中性子や陽子からなる原子核とその周りに存在する電子から構成される。

電磁気学

- 原子核も電子の運動においては非常に重要な役割を果たすが、ここでは軽くて動き回る電子に注目する。
- これは電子の性質が非常に多くの現象を説明できるためである。
- e.g. 電気伝導、金属光沢、結晶構造

電磁気学

- 電子は人類が電流の向きを定義した後に発見され、その向きが電流の正体である電子の流れと逆であったために負の電荷をもつと定義された。
- この電子自体が磁石としての性質、「スピン（角運動量）」を持つことが発見され、これが磁気的な性質の多くの起源を説明できるようになる。

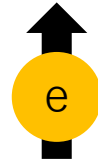


電磁気学

- また、物質の中では二つの電子間での反発力が重要になっているものもある。
- 特に今回説明する磁性体は電気を流さない。
- その理解のためにはこの反発力を考慮に入れねばならない。

電磁気学（まとめ）

- 磁性体においては電子が持つスピンという量が諸現象の要因として考えられている。



- 電子は電磁気学における基本的な方程式に従った振る舞いをするため、スピンを取り扱うためには電磁気学の考え方を導入する必要がある。
- 電氣的な反発も非常に重要で、考えている磁性体が電気を流さない要因として無くてはならない要素である。

量子力学

- 電子はその小ささゆえに人類が肉眼で観察できる物体の運動とは異なる「確率的な」挙動を示す。
- そのような挙動を今のところ説明できている学問が量子力学である。
- この集合体である物質を調べるために統計力学の考え方をを用いている。

量子力学

- 量子は元々は光の性質を取り扱う研究で生み出された考え方であり、光が波と粒子の性質を持つことが確かめられた。
- これにさらに電子と光が相互作用することから電子もまた同様の性質を持つのではないかという考え方から電子の性質を取り扱う量子力学が生まれた。

量子力学

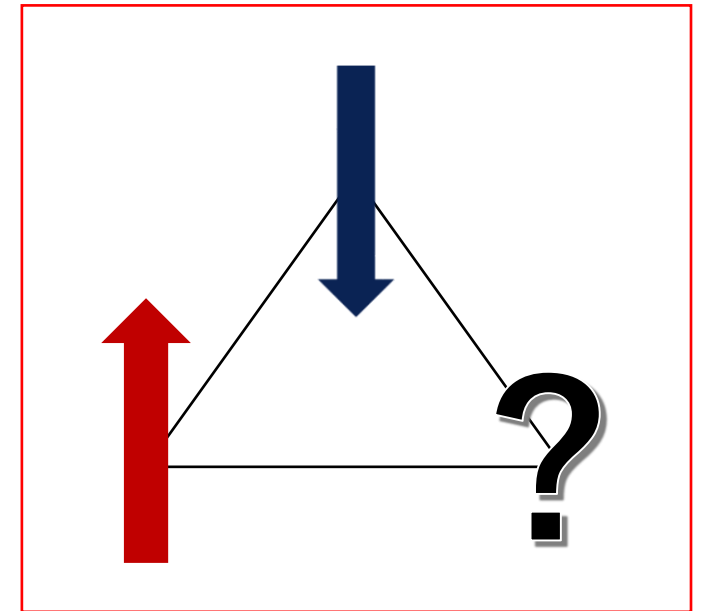
- 量子力学ではその波動性との対応から元々波の性質の理解のために用いられていた微分方程式によって電子などの運動やそのエネルギーを記述する。
- また、現在ではその微分方程式での表現と同等であることが証明されている「行列を用いた表現法」があり、本研究ではそれを基として系のエネルギーを行列の考え方から得ている。

量子力学

- 考えている電子がもし古典力学に従った振る舞いをするのであったなら、物質の示す状態はもっと簡単になったかもしれない。
- しかし、直感的に理解することが難しいと思われる量子的な性質を持つことが、現在までに観測されてきた様々な興味深い現象の起源であるのである意味では幸いである。

量子力学

- 本研究で取り扱う **フラストレーション** の効果は電子の持つその量子的な性質が、**電子のサイズより大きな範囲** で生き残っている例であり、理解や計算に困難が伴うが、これからの研究対象としては興味深い例でもある。



量子力学（まとめ）

- 光を取り扱うための考え方を電子に応用したものが量子力学である。
- 確率的なふるまいが出てきてしまうが、電子がたくさん含まれている物質に関しては統計力学と組み合わせることでその性質を調べられる。
- 研究でも使う計算方法は行列を用いた考え方を基としている。
- 研究対象のフラストレーションは量子的な性質がより大きな範囲で実現しているため、非常に興味深い。

本セミナーの概要

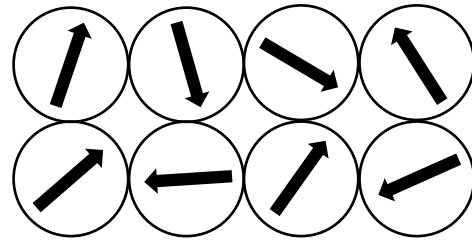
- 身近な物理現象とその理解について
- 相転移現象と普遍性
- 磁性体の科学とその準備
- **反強磁性体とフラストレーション**
- 五角形格子とスーパーコンピュータの利用
- まとめ

磁性体

- 磁性体は一般的には磁気に反応して、その物質自体が磁気的な性質を示すものである。
- 常磁性体
- 強磁性体
- 反磁性体
- 反強磁性体

常磁性体(Paramagnetism)

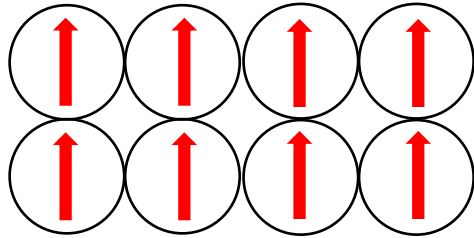
- 常磁性体は磁場が0の時は全く磁化を示さないが、磁場をかけていくと少しずつ向きがそろっていくような磁化が現れる物質である。



- これは熱によって電子のスピンがバラバラの向きを向いてしまい収拾がつかない状態に起因している。
- 後述する強磁性体や反強磁性体も温度が上がるとこの状態に相転移する。

強磁性体(Ferromagnetism)

- 強磁性体は磁場がかかると強力に磁化が生じる物質である。



- これは電子のスピンの中に何らかの向きをそろえるような相互作用が生じているとその性質が生じる。
- 電子がとりうるスピンにも上限があるので磁場をかけていくと最終的に飽和して一定の磁化を示す（飽和磁化）。

反磁性体(Diamagnetism)

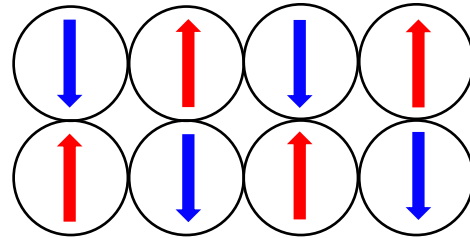
- 反磁性体は磁場をかけると反発する磁化が発生する物質である。
- 例えば水も反磁性を持ち、強い磁場をかけると水が離れていく。




- ただし反磁性自体は基本的にはそこまで強くないので強力な磁場をかけないとその様子は観察することができない。
- それに対し、超伝導体は完全反磁性と呼ばれる強力な反磁性を持ち、磁石の上に置くと浮くことがある。

反強磁性体(Antiferromagnetism)

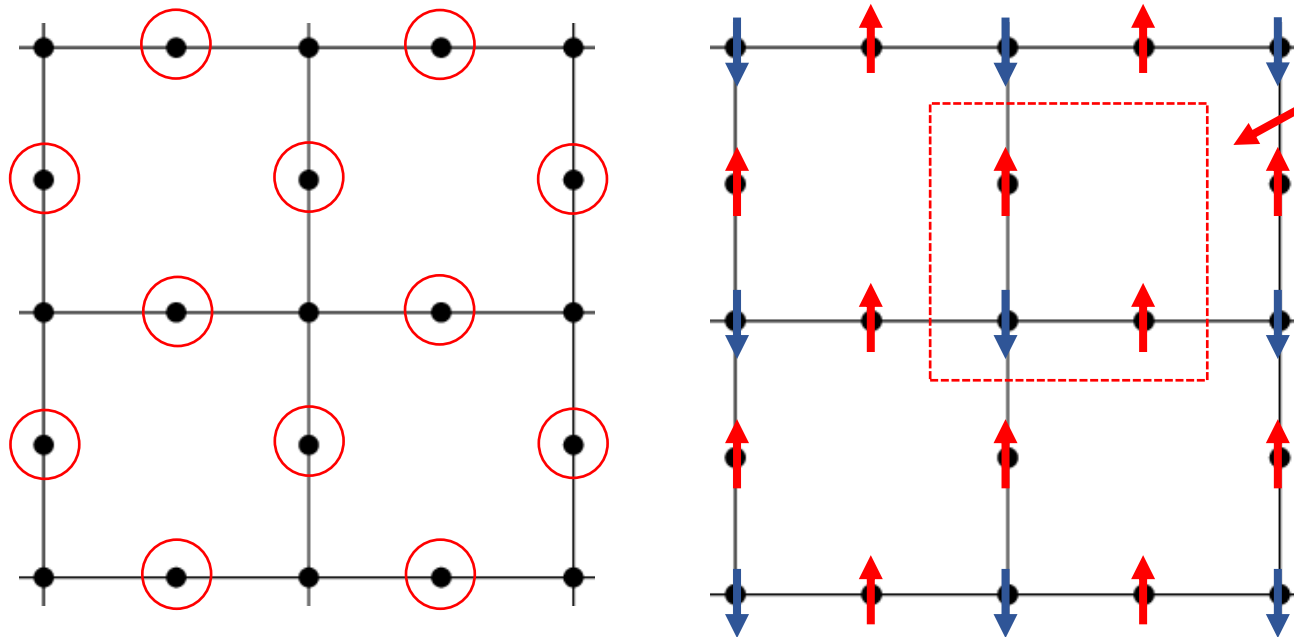
- 反強磁性体は物質の中でスピン同士が互いに逆を向こうとしている物質である。



- このような物質は弱い磁場をかけても磁化が生じない
- 反磁性とは全く異なるものなので注意 
- スピン同士の間働く相互作用が非常に重要で、その相互作用の組み方や大きさの違いによって多彩な性質を示す。

反強磁性体

リーブ格子上の
 $S=1/2$ ハイゼンベルク反強磁性体



基底状態のスピンの概念図
反強磁性によって自発磁化（フェリ磁性）
が誘起されている

基本単位格子 ($N = 3$)

飽和磁化: $\frac{1}{2} \times 3 = \frac{3}{2}$

$\uparrow : \frac{1}{2} \times 2$ $\downarrow : -\frac{1}{2} \times 1$

自発磁化:
 $\frac{1}{2} \times (2 - 1) = \frac{1}{2}$

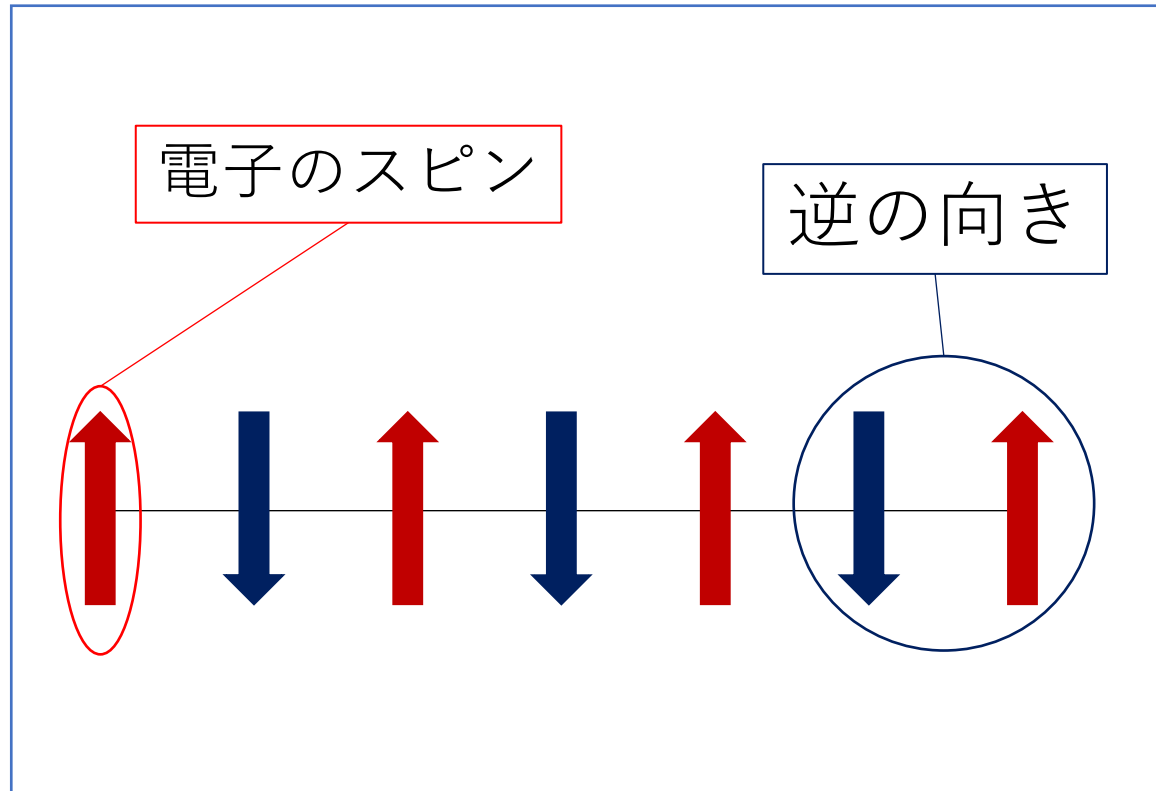
$\times \frac{1}{3}$

磁性体（まとめ）

- 磁性体には、常磁性体、強磁性体、反磁性体、反強磁性体と呼ばれるものがあり、それらは磁場をかけた時の挙動や、そのメカニズムが異なっている。
- それらの挙動の説明には電子のスピンの物質内でどのようにふるまっているかが重要である。
- 今回の主題である反強磁性体はスピン間の構造によって非常に多くの性質を見せる。
- その中の興味深い状況、フラストレーションについて次のページから説明する。

フラストレーション

反強磁性体



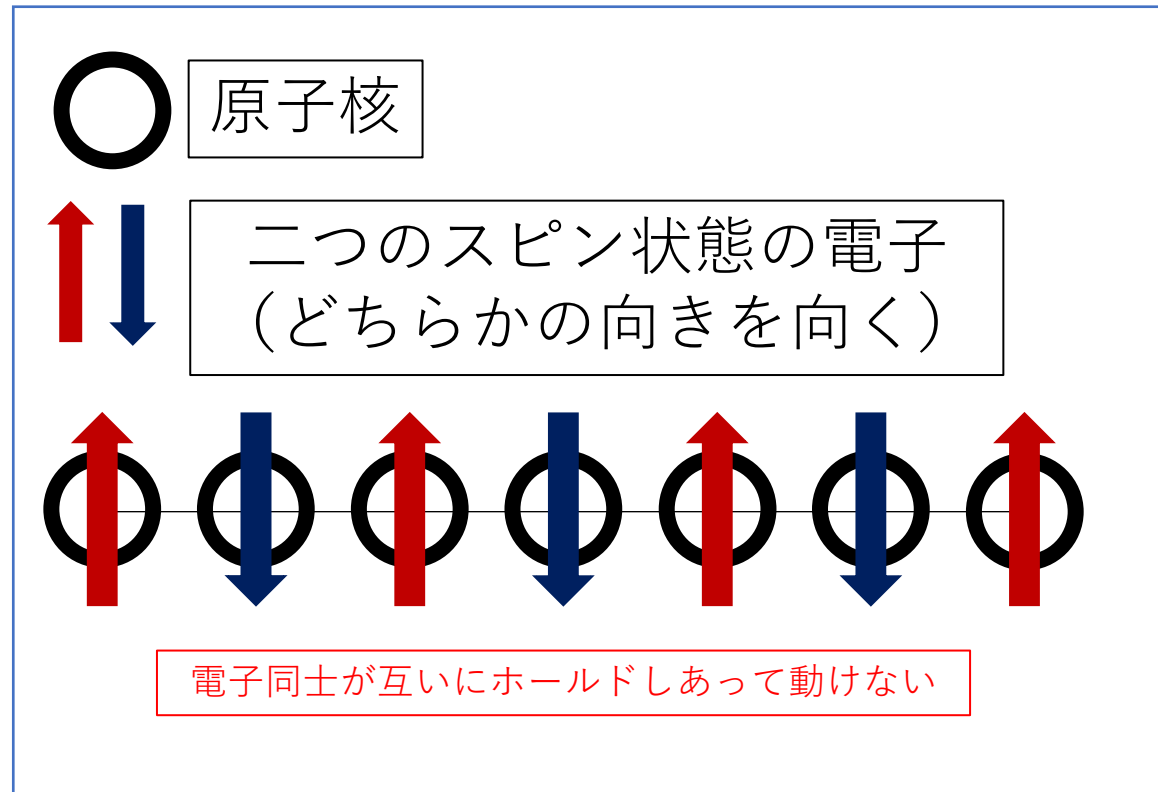
絶縁体（原子核周辺に電子が固定されている）

ネール秩序と呼ばれる安定に近い状況



フラストレーション

反強磁性体の絶縁性

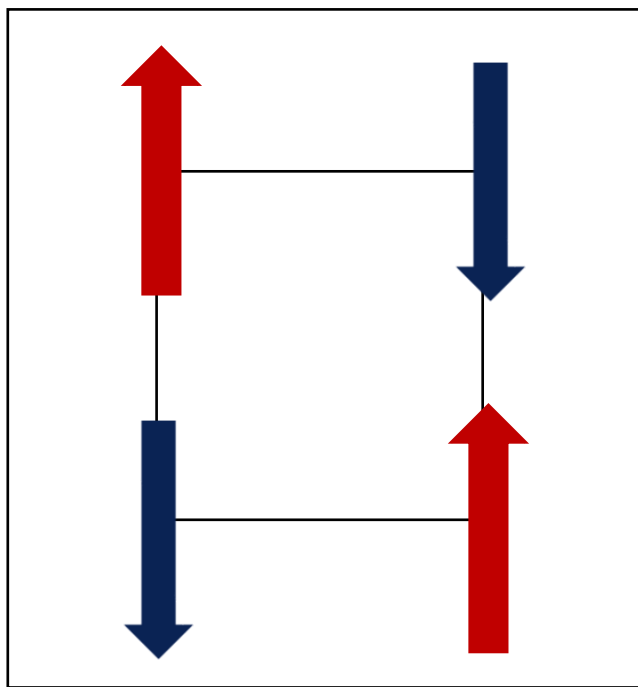


通常1個の原子核の周りには偶数個の電子が存在できる。しかし電子が入れる最大の個数の半分かつ、強い電子間の反発が生じる特殊な状況では、同じ原子核付近に電子があると反発によって他の電子が近づけない。これにより全体の電子が動けなくなっている（モット絶縁体）

フラストレーション

偶数角形

ネール秩序

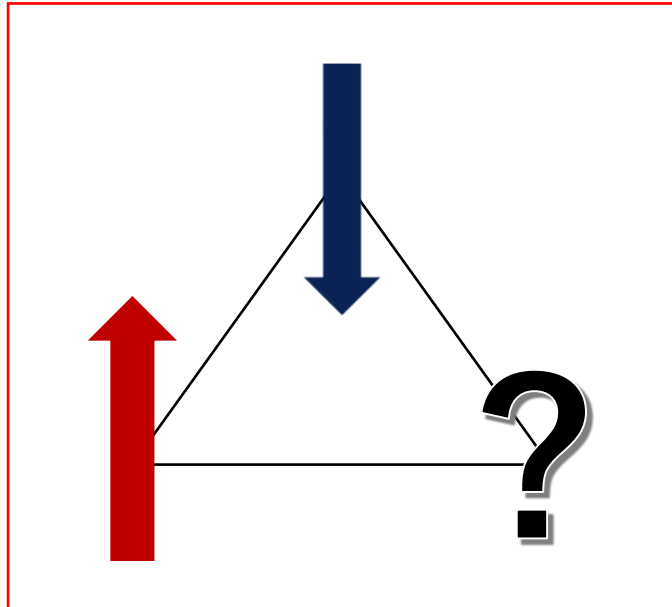


この場合は比較的簡単にその状態のエネルギーが計算できる。

フラストレーション

奇数角形

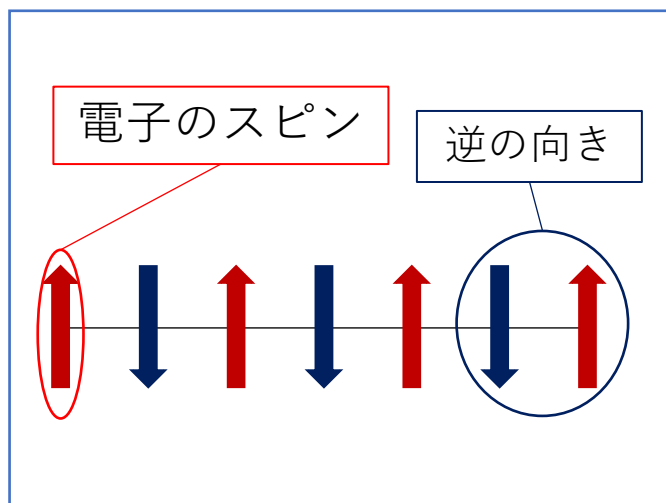
全ての組み合わせを互い違いにすることはできない



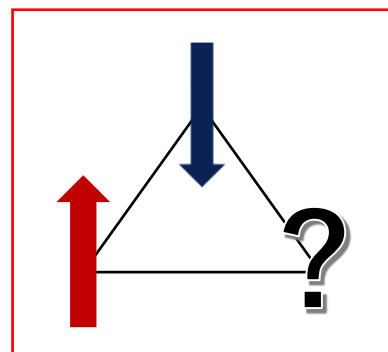
この場合はそもそもどのような状態が基底状態であるのか類推できない状況であり、スピン間の距離にまで量子効果が残っている。(フラストレーション)

フラストレーション（まとめ）

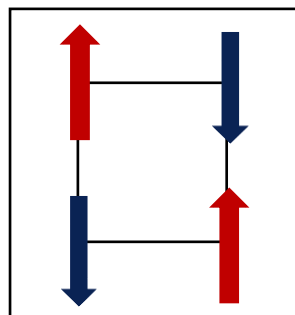
反強磁性体



奇数角形



偶数角形



フラストレーション



マクロに働く量子効果



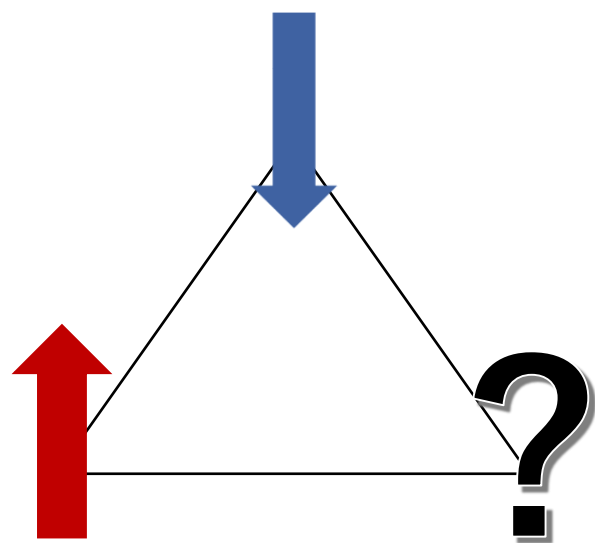
ブレークスルーとなる
新現象へとつながる

本セミナーの概要

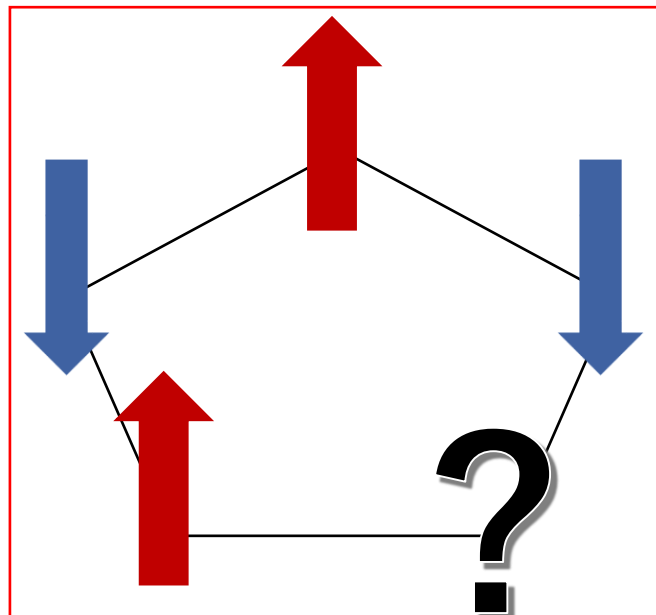
- 身近な物理現象とその理解について
- 相転移現象と普遍性
- 磁性体の科学とその準備
- 反強磁性体とフラストレーション
- **五角形格子とスーパーコンピュータの利用**
- まとめ

五角形格子

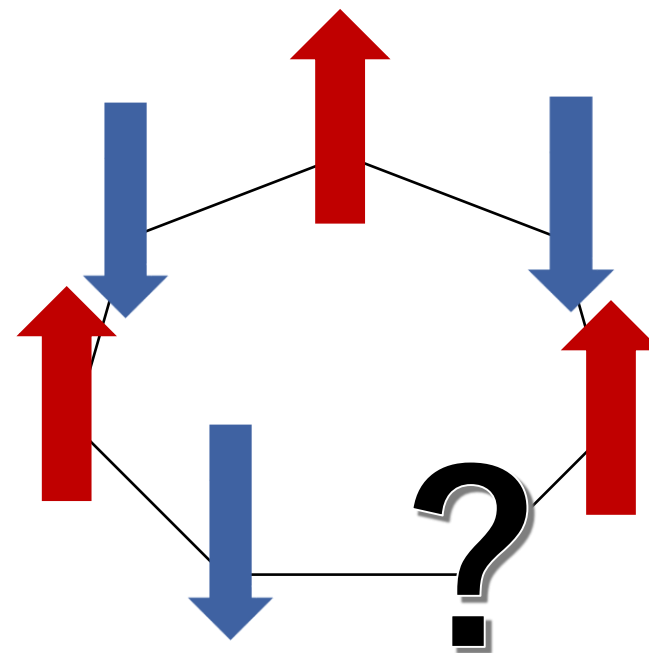
三角形



五角形



七角形



今回の対象

五角形格子

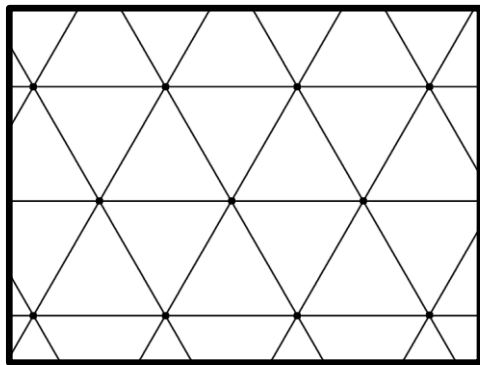
三角形格子

既存

構造の単純さ

対称性の良さ

現実の物質



三角格子

計算機の
性能の向上



合成化学の
技術の向上

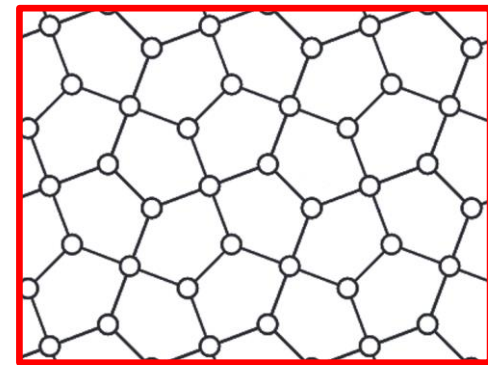
五角形格子

新規

計算が可能に

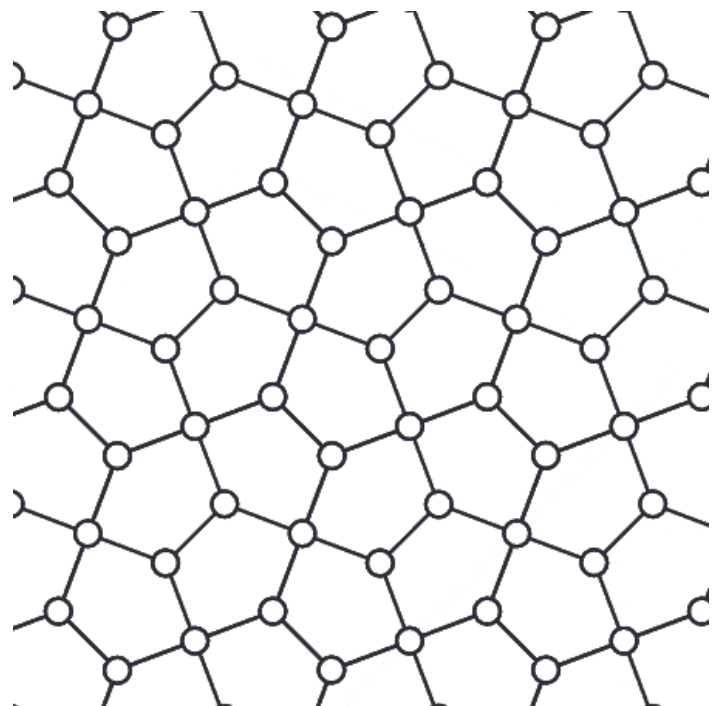
新奇的な対称性

合成可能に



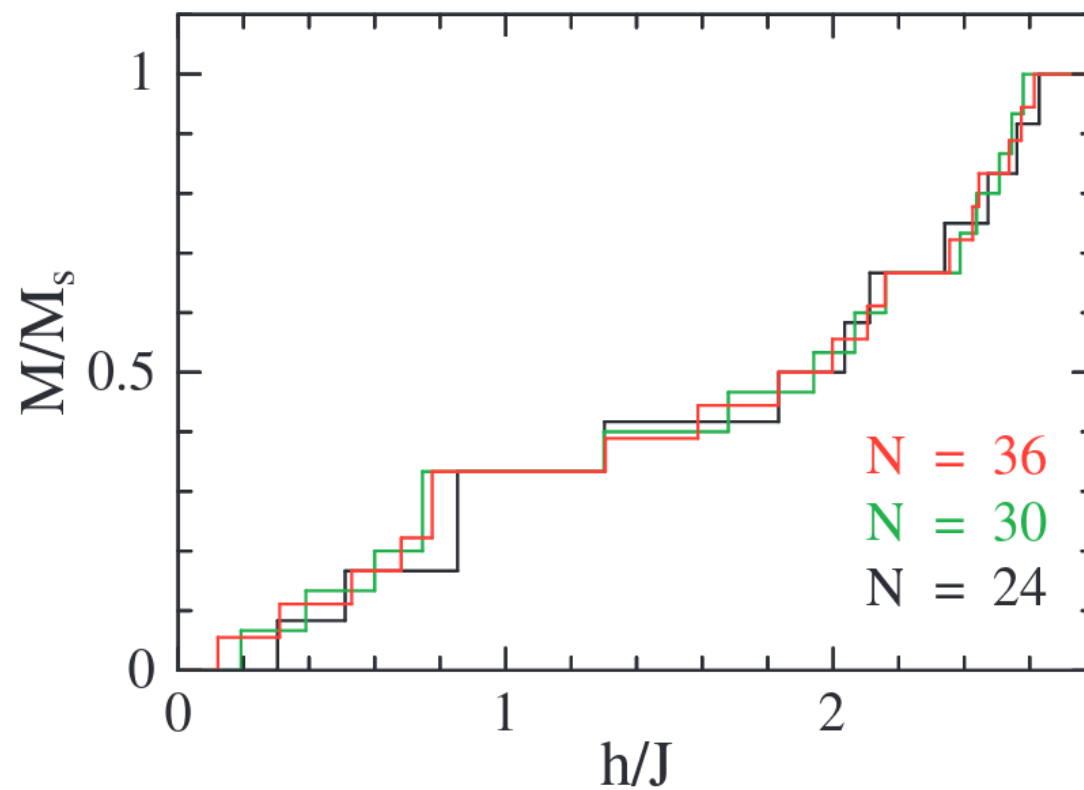
カイロペンタゴン格子

五角形格子

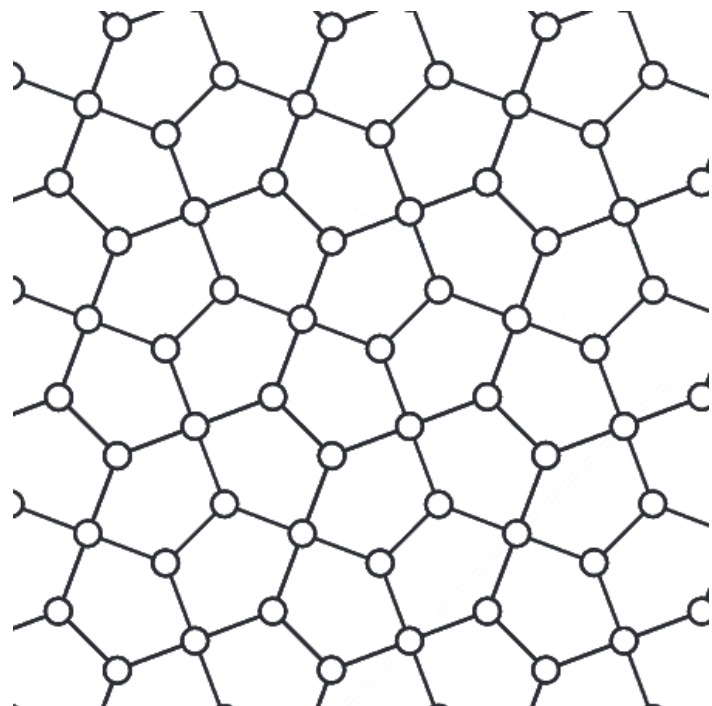


カイロ五角形格子

磁化過程

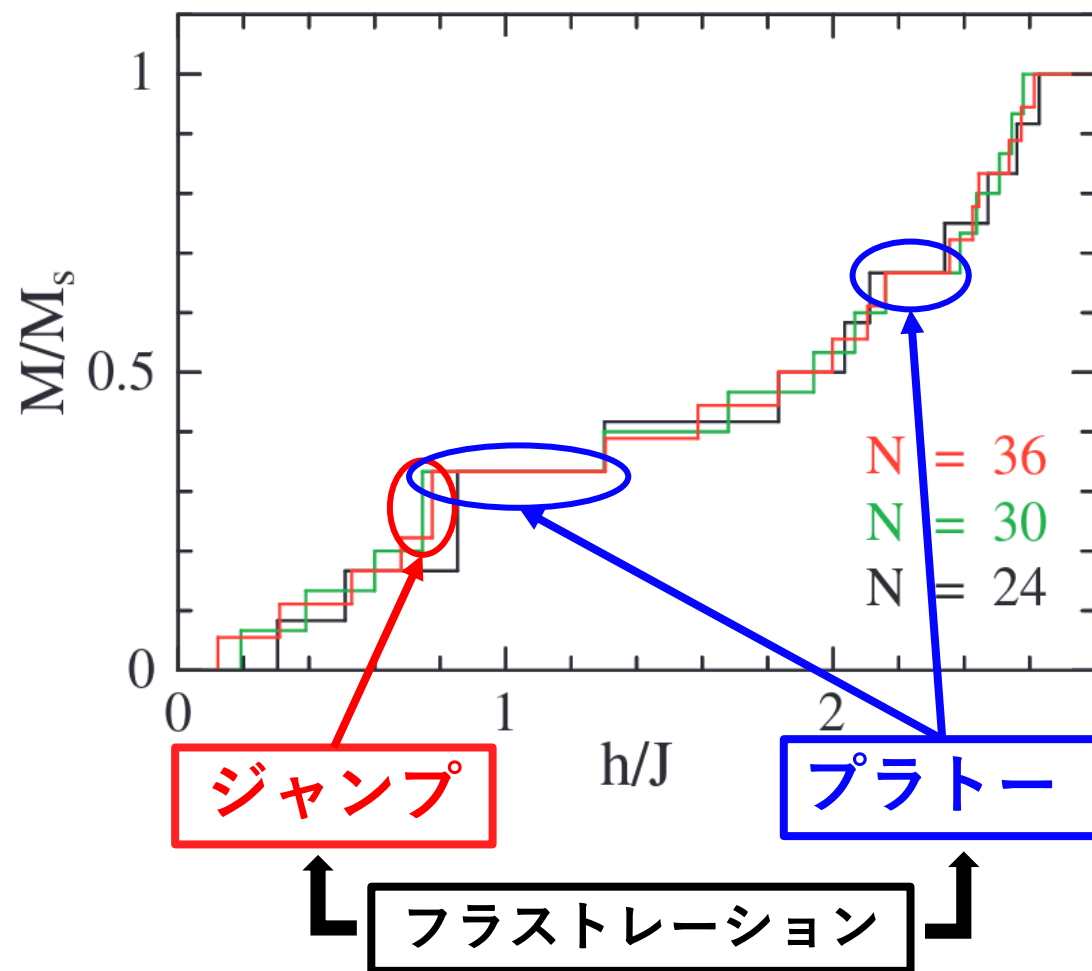


五角形格子



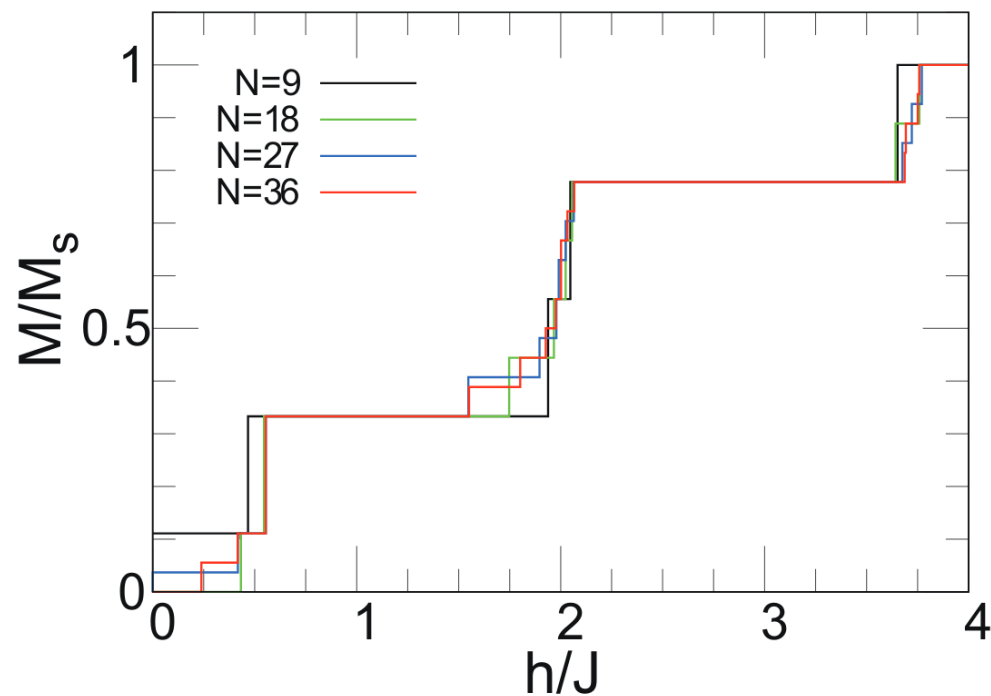
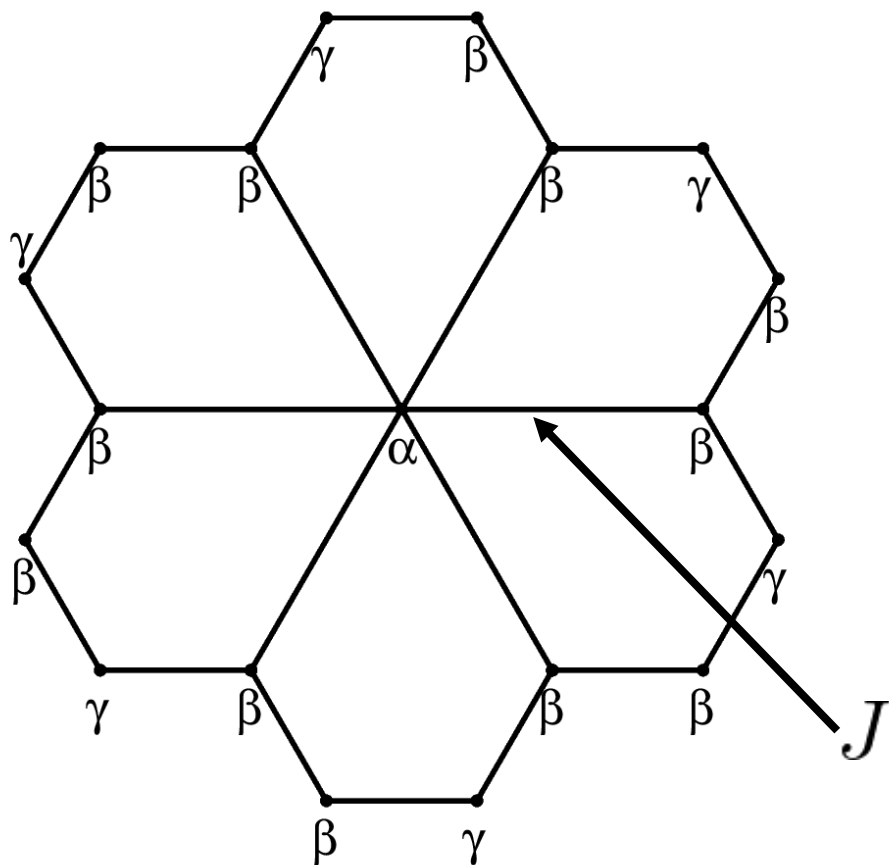
カイロ五角形格子

磁化過程



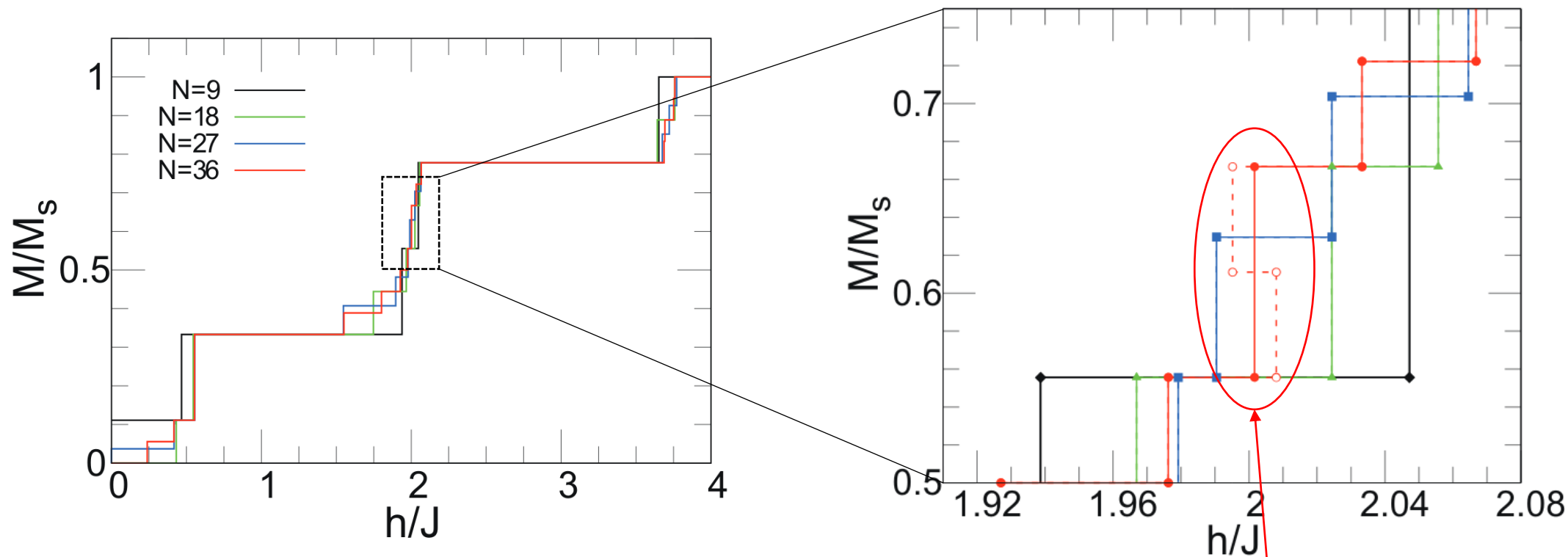
フローレット五角形格子

S=1/2 ハイゼンベルク反強磁性体



$$J = 1$$

フローレット五角形格子



全部のスピンの間の結びつきが同じ強さの時の磁化過程を計算によって確認した。

プラトーから離れた位置のジャンプ

このジャンプの挙動を追跡

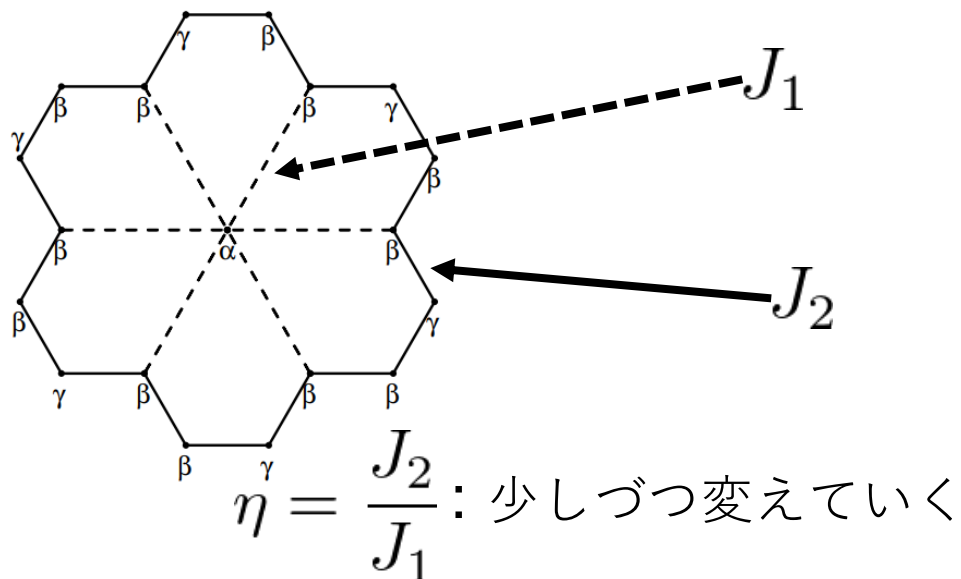
フローレット五角形格子

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{\text{zeeman}}$$

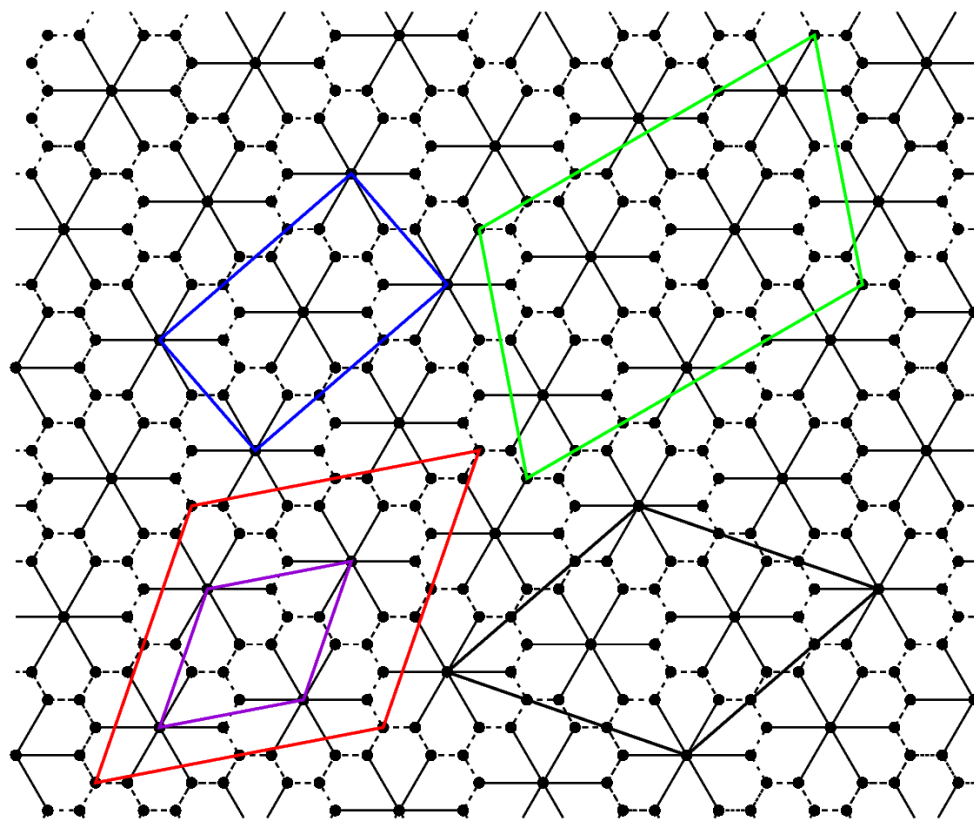
$$\mathcal{H}_0 = \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$

$$\mathcal{H}_{\text{zeeman}} = -h \sum_j S_j^z$$

基底状態のエネルギーの
導出には数値対角化を使用



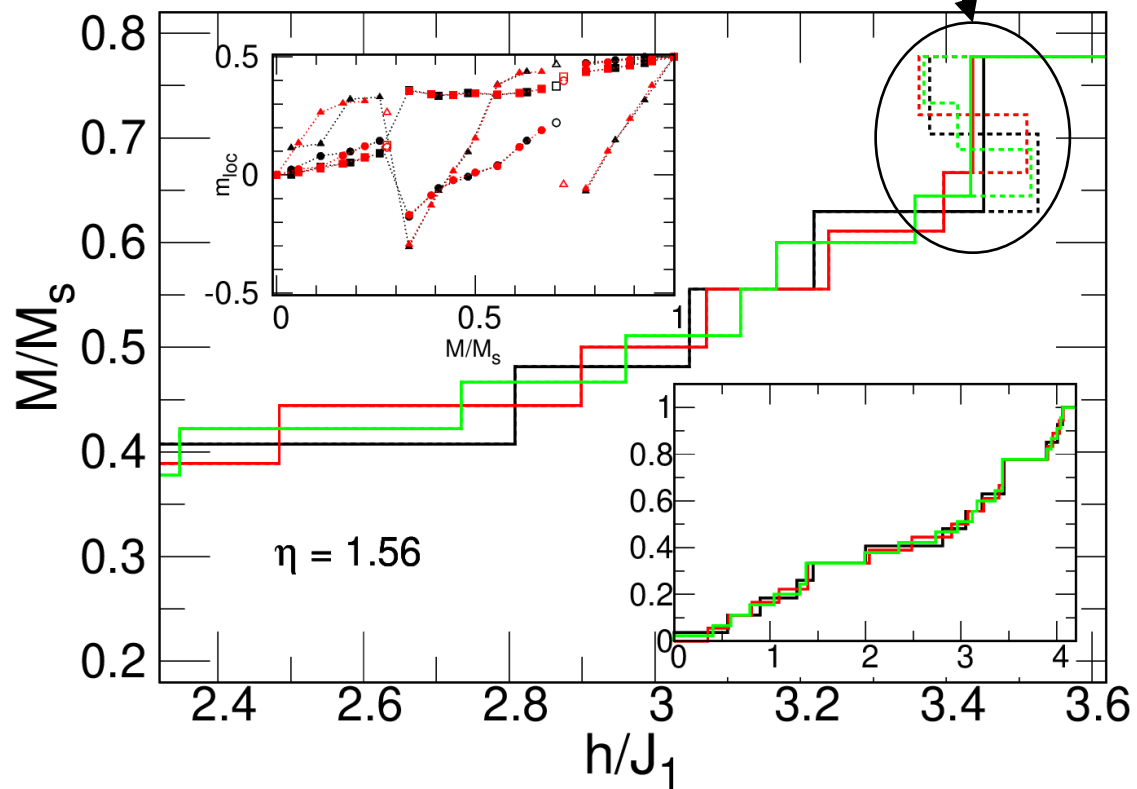
周期的境界条件を課した
有限サイズクラスター



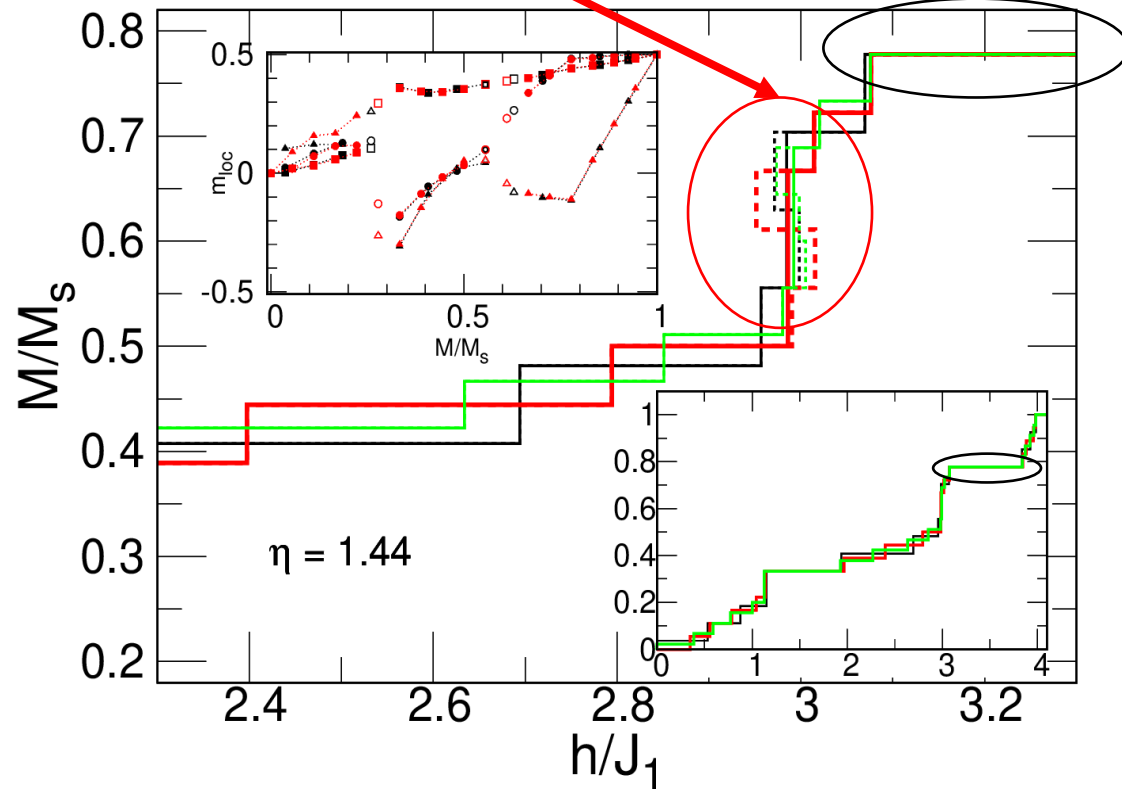
N=9,
18,
27,
36,
45

フローレット五角形格子

プラトーンに付随



プラトーンから離れる

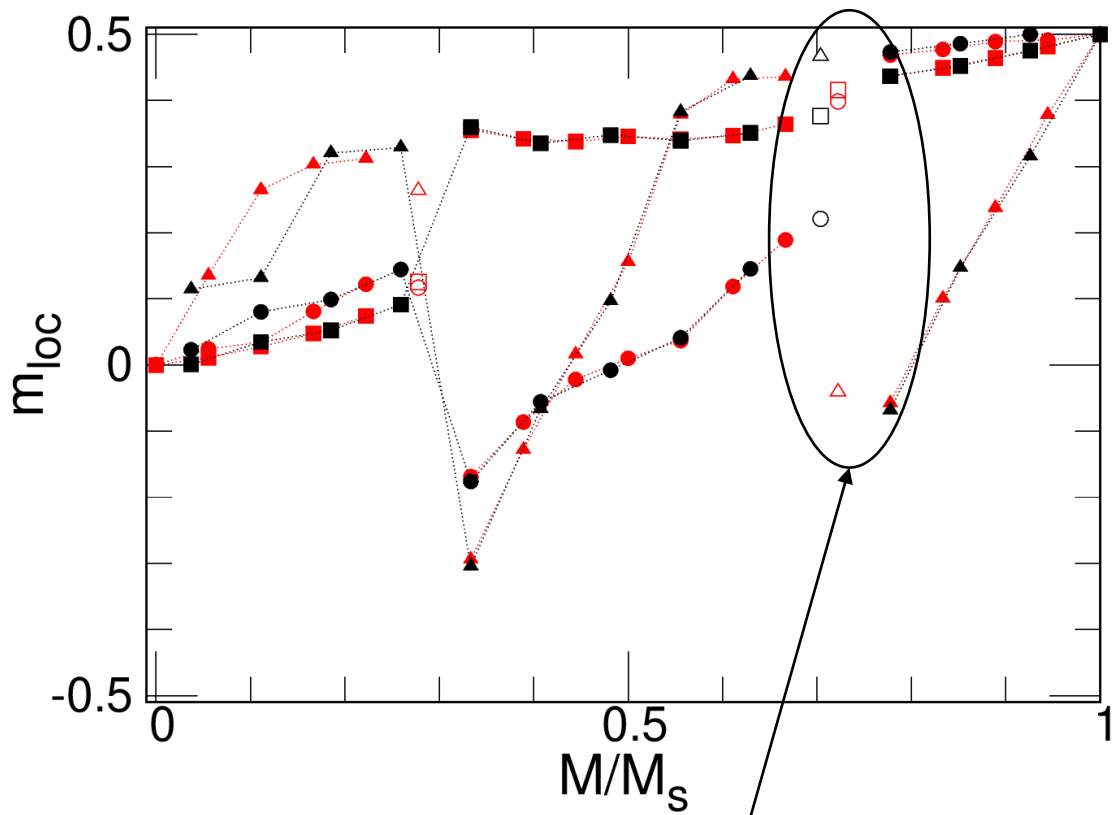


フローレット五角形格子

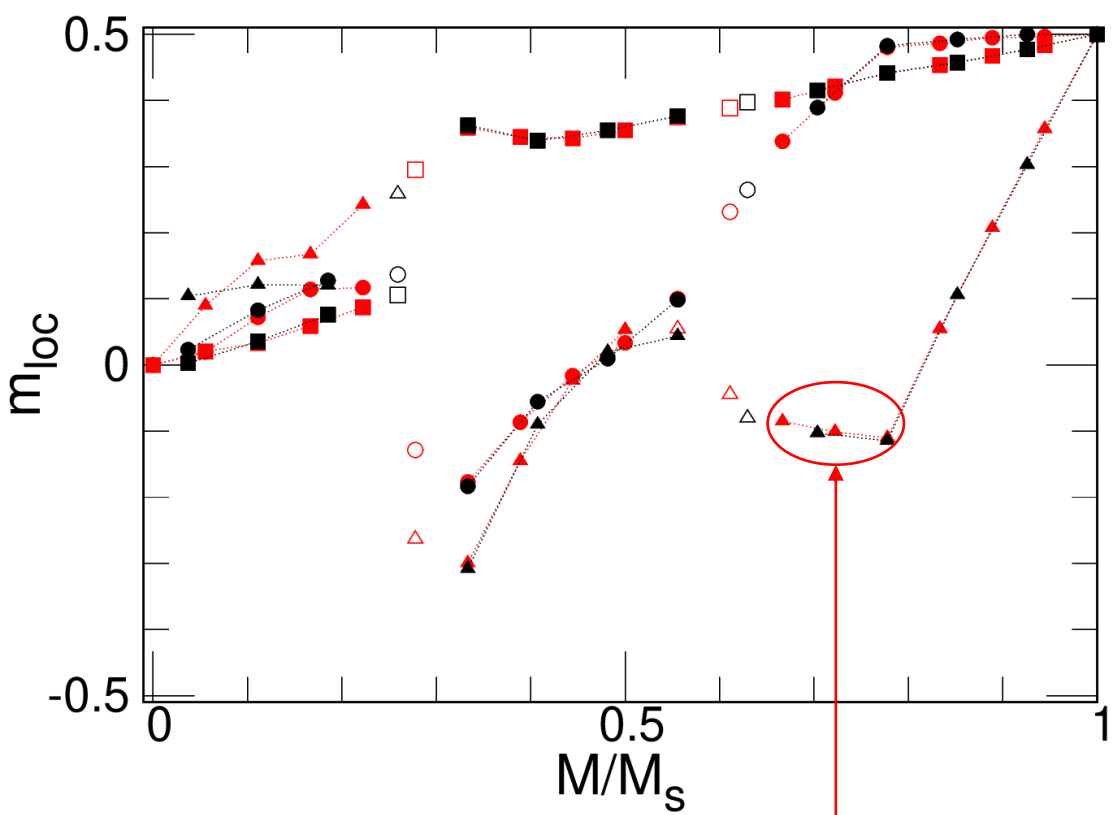
$N=36\alpha$ \blacktriangle $N=27\alpha$ \blacktriangle
 $N=36\beta$ \blacksquare $N=27\beta$ \blacksquare
 $N=36\gamma$ \bullet $N=27\gamma$ \bullet

$\eta = 1.56$

$\eta = 1.44$

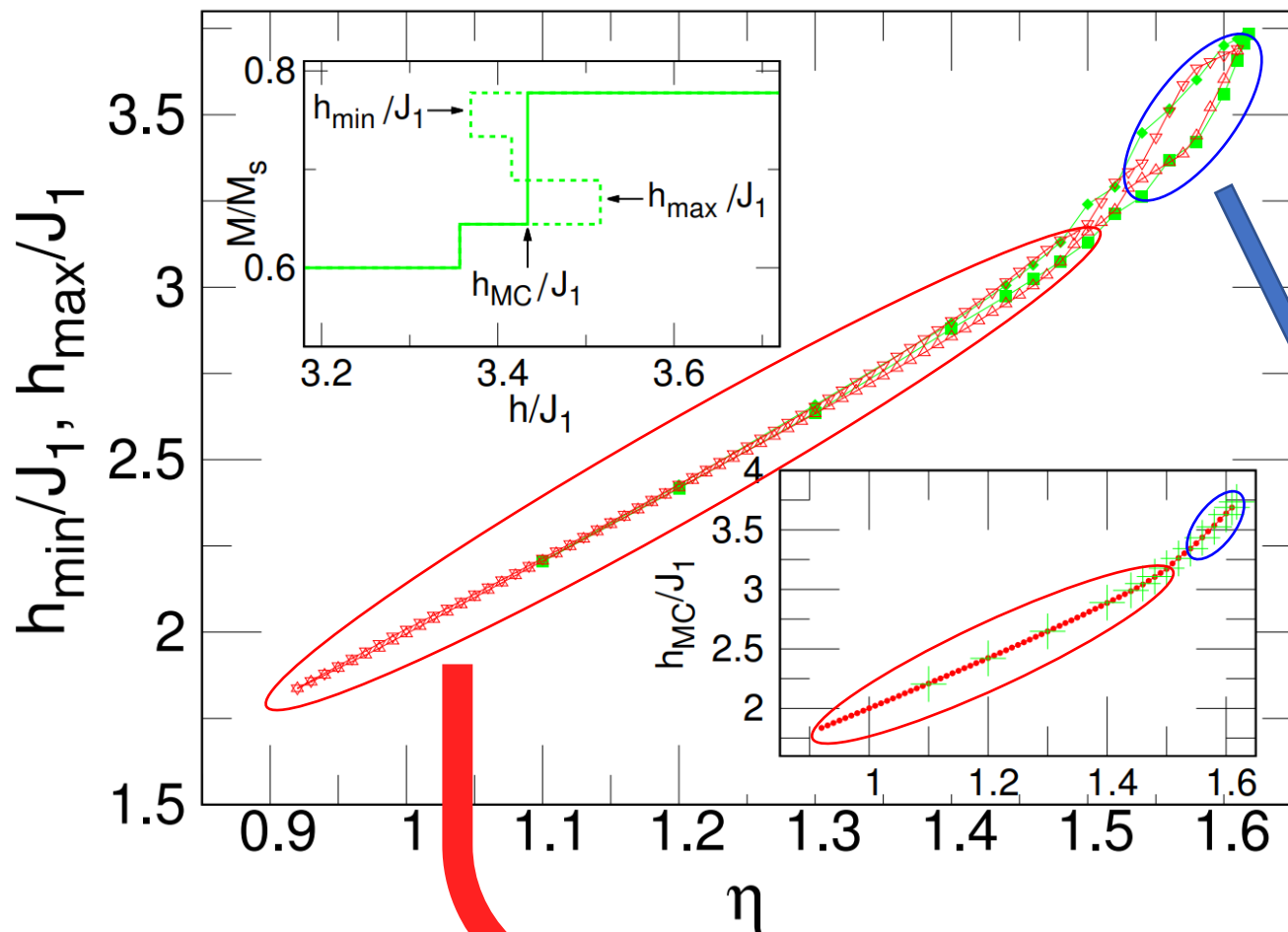


格子点 α での不連続な変化の確認



連続的な挙動

フローレット五角形格子



プラトールとジャンプ
がつかがる領域

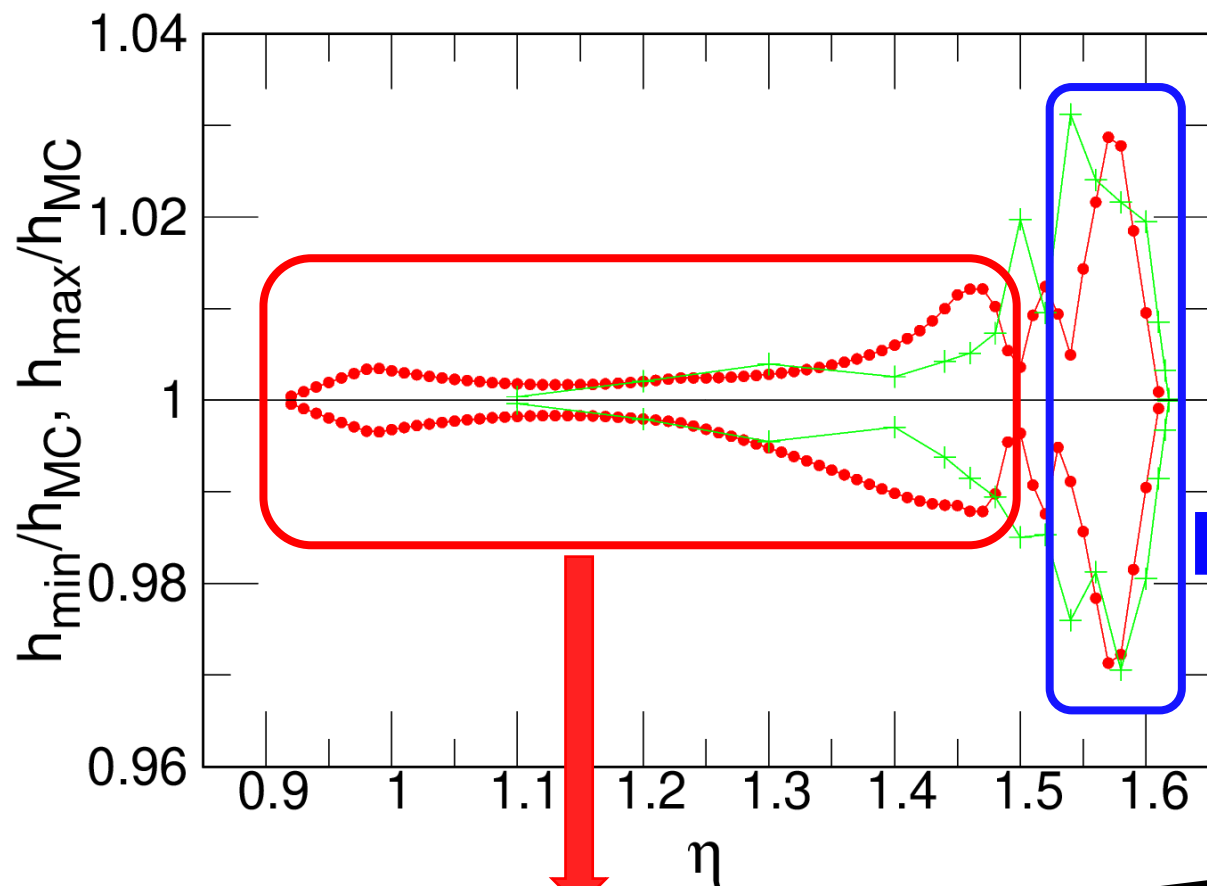
プラトールとジャンプ
が離れている領域

大きな η

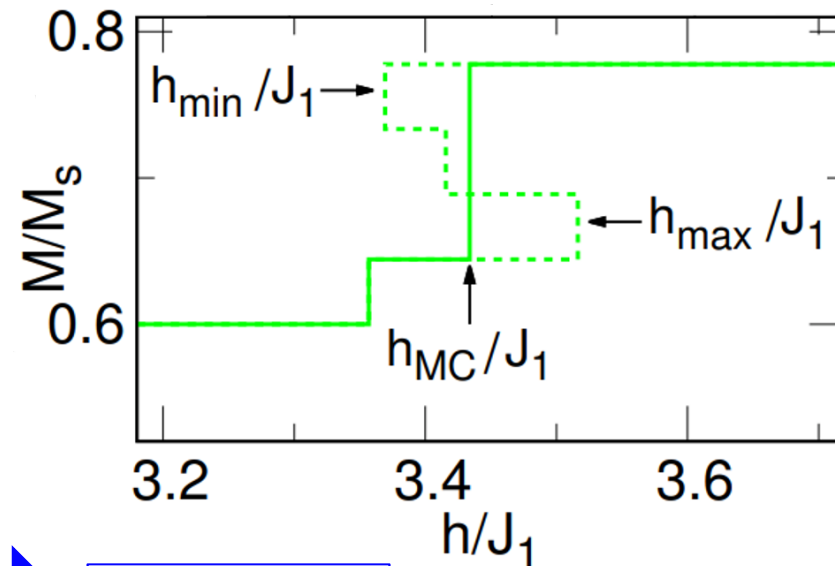
小さな η

$\eta \sim 1.5$ 付近での
傾きの変化を確認

フローレット五角形格子



小さな η

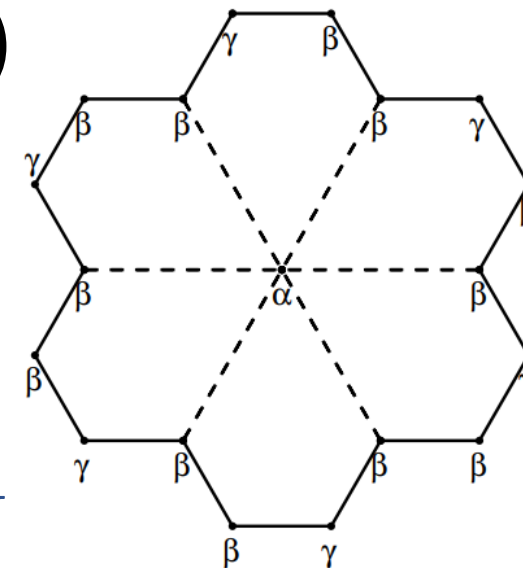


大きな η

やはり $\eta = 1.5$ 付近で
挙動が大きく変わる

フローレット五角形格子（まとめ）

フローレット五角形格子上の $S=1/2$ ハイゼンベルク反強磁性体の未知の磁化ジャンプ現象に対し相互作用の大きさを変えながらその様子を追跡した

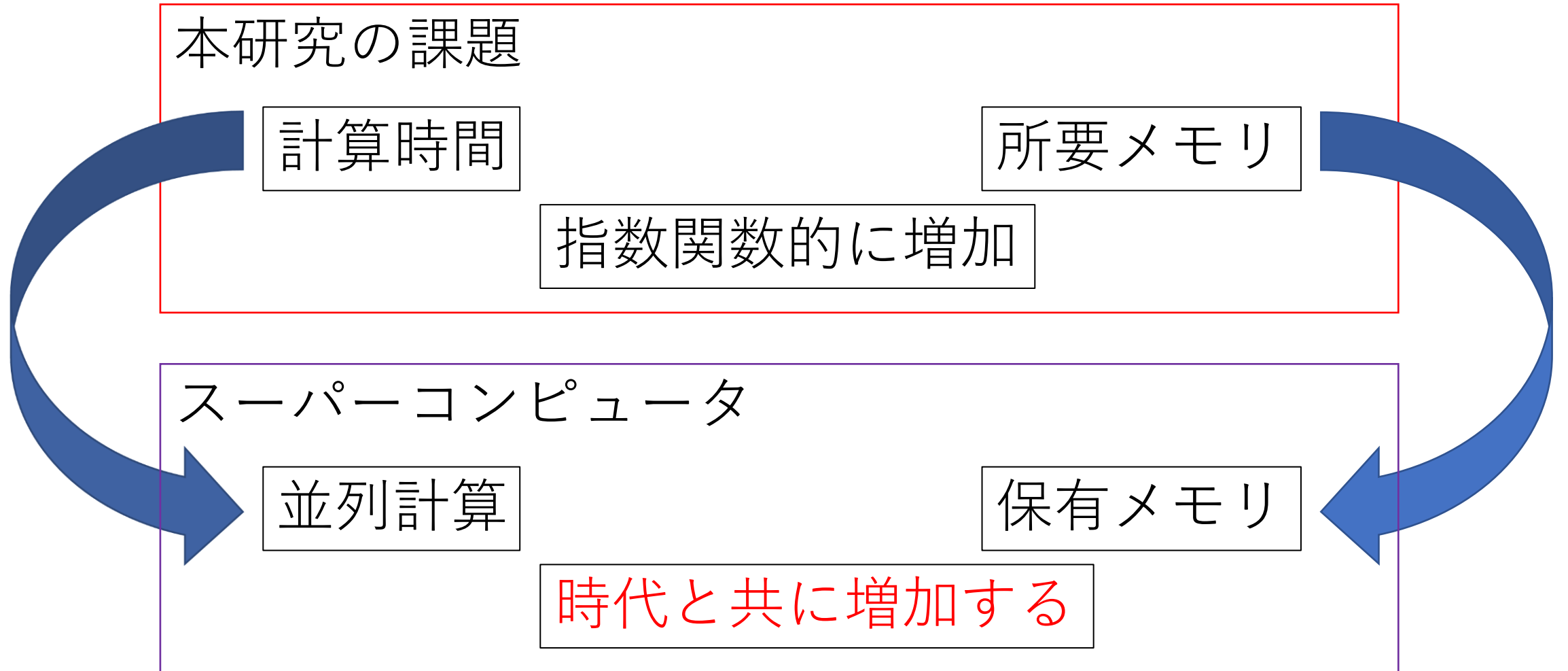


$\eta = 1.56$ まで変化させるとジャンプがプラトーに繋がる

局所磁化の振る舞いが $\eta = 1.5$ 付近で大きく変化する

元々 $m = 7/9$ 付近に存在するジャンプとプラトーの間に新しい状態が割り込むことでジャンプとプラトーが離れる

スーパーコンピュータの利用



スーパーコンピュータの利用

数値対角化法
(既存プログラムを改変)

系のスピンの数	所要メモリ(B)
15	205920
20	5912192
25	166409600
30	4963760640
35	1.452E+11
40	4.4111E+12
45	1.3173E+14

指数関数的な
増加

並列化

大きな系は
スーパーコンピュータ

独自開発の
プログラム併用



最小値探索

- メッシュ切り
- 反復法

スーパーコンピュータの利用

- 数値対角化は強力な手法ではあるが必要なメモリと計算時間が膨大になる課題がある。
- その対策として巨大なメモリを保有するスーパーコンピュータ上での並列計算（計算作業を分割して複数のCPUに同時に処理させる）を用いている。
- この手法はコンピュータの発展とともに改善され、今後は計算できなかった形でも計算が可能になることが期待される。

本セミナーの概要

- 身近な物理現象とその理解について
- 相転移現象と普遍性
- 磁性体の科学とその準備
- 反強磁性体とフラストレーション
- 五角形格子とスーパーコンピュータの利用
- **まとめ**

まとめ

- 身近な例として水の相転移を確認した。
- 物質科学における普遍性の重要性を相転移を例に振り返った。
- 磁性体の相転移について述べ、その取扱いに必要な統計力学、電磁気学、量子力学の概念を簡単に説明した。
- 磁性体の種類について述べ、その中でも現在興味を持っている反強磁性体及びフラストレーションに関して掘り下げた。
- フラストレーションの中でも研究の余地の残る五角形のうち、フローレット五角形格子に現れる異常な磁化ジャンプの研究成果を報告し、その研究方法と工夫に関して説明した。