

強相関電子系の世界

「量子多体論の最前線」

強相関電子系の世界

～ 量子多体論の最前線 ～

藤本聡

(物理学第一教室 凝縮系理論)



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、 etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、 etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

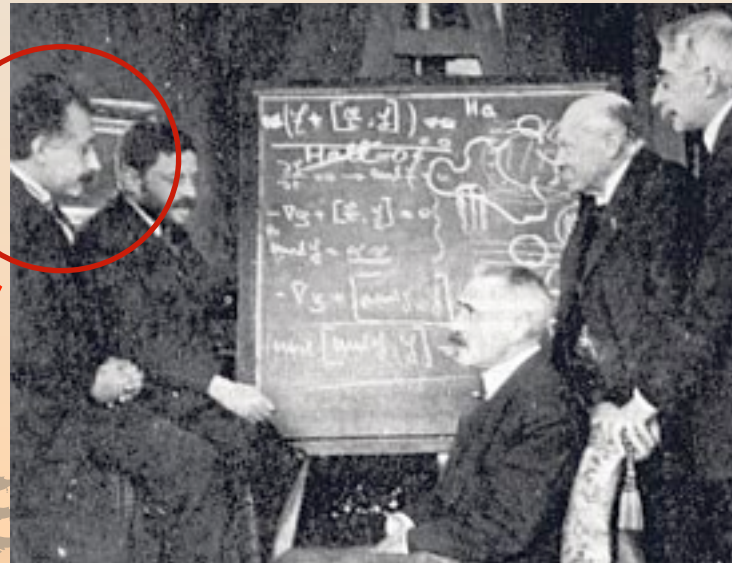
マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、 etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能

アインシュタイン



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

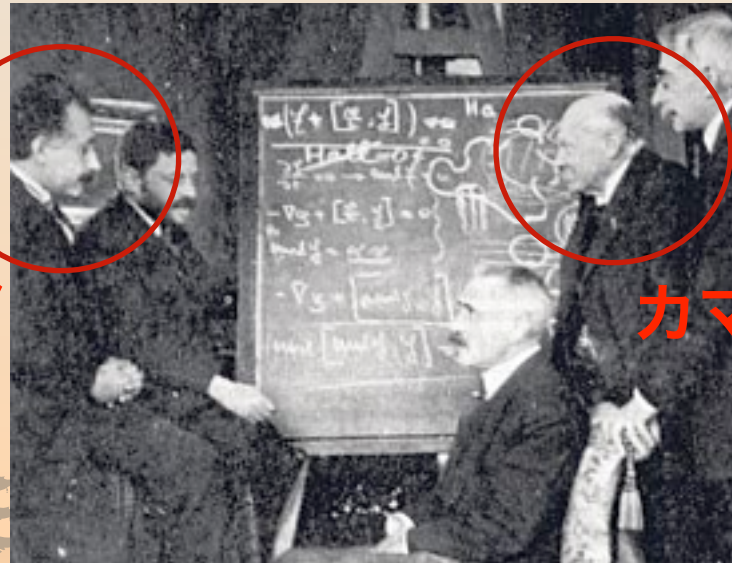
マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、 etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能

アインシュタイン



カマリンオンネス

(超伝導発見, 1911年)

物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

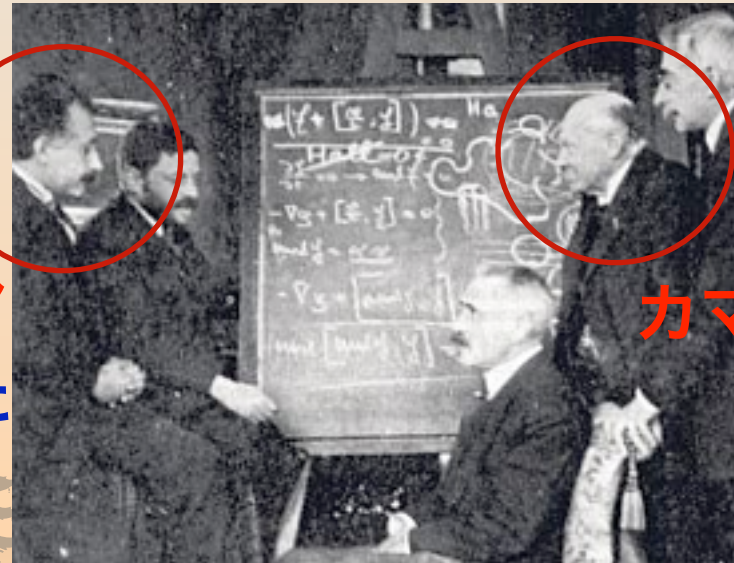
マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、 etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能

アインシュタイン
にも解けなかった
超伝導の謎



カマリンオンネス
(超伝導発見, 1911年)

物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、 etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能



物理学

物質の根源（ひも？）と
時空の起源、
それらを支配する基本法則

マクロな数の要素が集まり、
相互作用することによって
はじめて発現する現象の探求

物性物理学（凝縮系物理学）

超伝導、超流動、磁性、半導体、ナノ量子系、etc

個々の要素の基本法則だけでは理解不能

More is different !

多は異なり



P.W. Anderson
1977 ノーベル賞

多様性と普遍性、そして創発性

強相関の物理 (電子系に限らない)

エキゾチックな量子状態

- ◇ **固体電子** 超伝導、超流動、量子磁性、半導体
- ◇ **ナノ量子系** 量子ドット、カーボンナノチューブ、グラフェン
- ◇ **光格子** 冷却原子、BEC



強相関の物理 (電子系に限らない)

エキゾチックな量子状態

- ◇ **固体電子** 超伝導、超流動、量子磁性、半導体
- ◇ **ナノ量子系** 量子ドット、カーボンナノチューブ、グラフェン
- ◇ **光格子** 冷却原子、BEC

新奇現象
次々発見！



強相関の物理 (電子系に限らない)

エキゾチックな量子状態

- ◇ 固体電子 超伝導、超流動、量子磁性、半導体
- ◇ ナノ量子系 量子ドット、カーボンナノチューブ、グラフェン
- ◇ 光格子 冷却原子、BEC

分野の
大きな広がり！

物質合成技術

ナノテクノロジー

レーザー技術



強相関の物理 (電子系に限らない)

エキゾチックな量子状態

- ◇ 固体電子 超伝導、超流動、量子磁性、半導体
- ◇ ナノ量子系 量子ドット、カーボンナノチューブ、グラフェン
- ◇ 光格子 冷却原子、BEC

物質合成技術

ナノテクノロジー

レーザー技術

分野の
大きな広がり！

凝縮系の理論 = 量子系の統計物理学

量子力学と統計力学に基づき 解明、予言

凝縮系の理論：量子多体論の最前線

～ 強相関電子系の世界を中心として ～

1. フェルミ粒子とボース粒子
2. 固体中の電子たち：自由な電子
3. エキゾチックな量子凝縮相
 - 超伝導
 - トポロジカルな量子系
 - ナノ量子系-朝永ラッティンジャー液体
4. レーザー冷却原子：新たな研究舞台



強相関電子系の世界

「量子多体論の最前線」

多粒子系の量子論

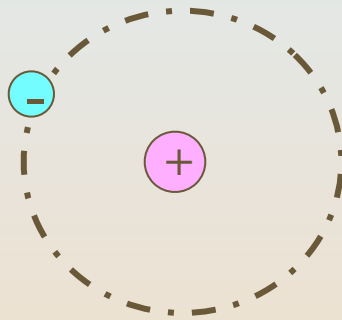
フェルミ粒子 & ボーズ粒子



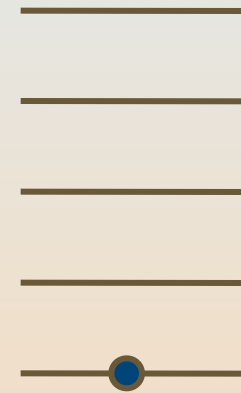
量子力学

粒子性と波動性

水素原子



量子化：とびとび



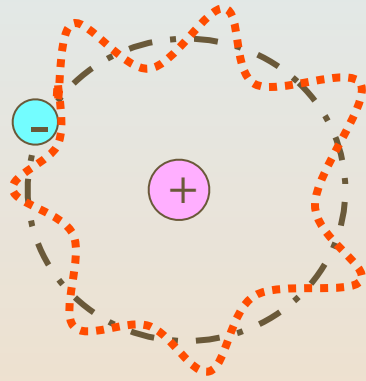
水素原子の
エネルギー準位



量子力学

粒子性と波動性

水素原子



量子化：とびとび



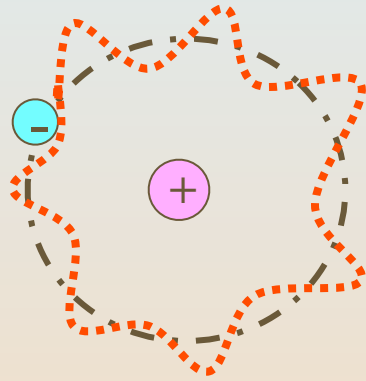
水素原子の
エネルギー準位



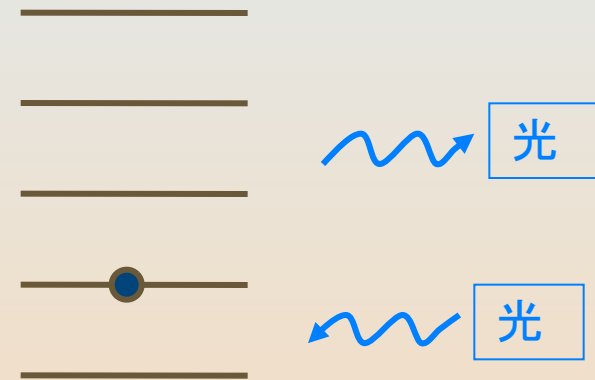
量子力学

粒子性と波動性

水素原子



量子化：とびとび



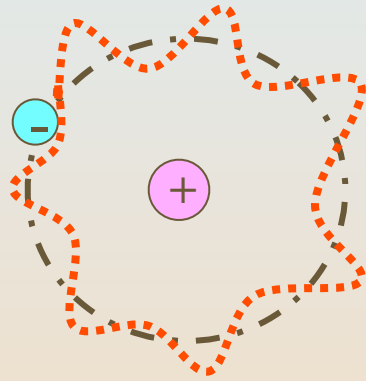
水素原子の
エネルギー準位



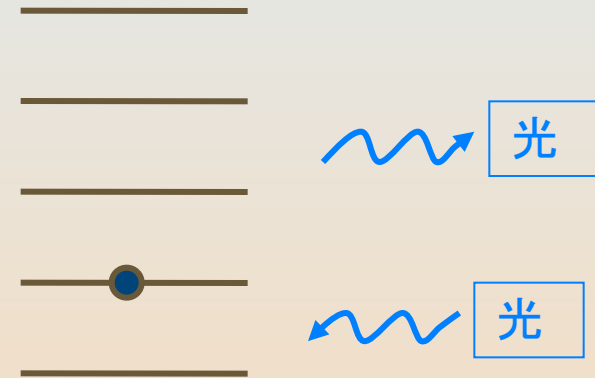
量子力学

粒子性と波動性

水素原子



量子化：とびとび



水素原子の
エネルギー準位

これは1個の粒子（波動）の性質

ギモン：多くの粒子が集まると???



京都

◇ ボーズ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = \psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

◇ フェルミ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = -\psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

E



ボーズ粒子



フェルミ準位

フェルミ粒子

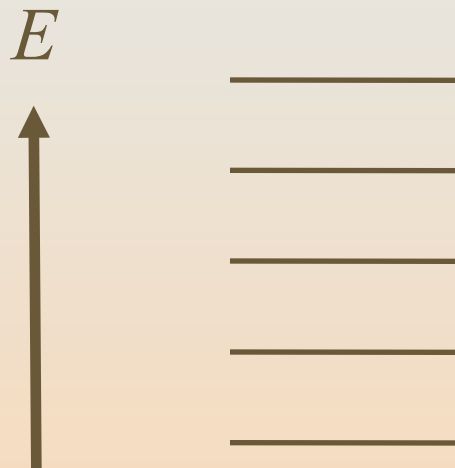


◇ ボーズ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = \psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

引き合う

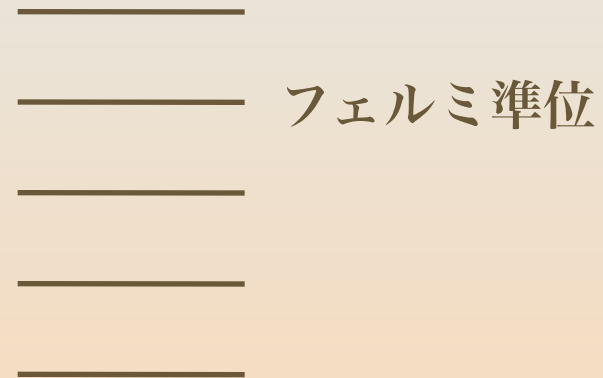
1 準位にいくらでも詰まる



ボーズ粒子

◇ フェルミ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = -\psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$



フェルミ粒子

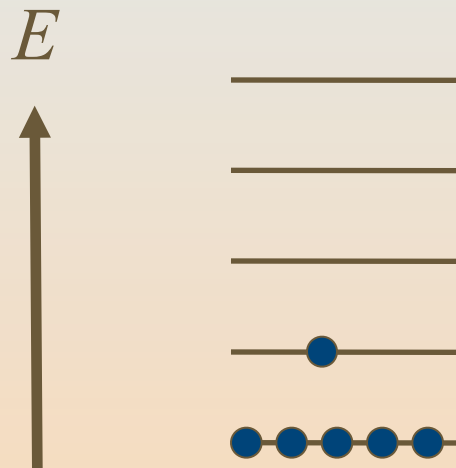


◇ ボーズ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = \psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

引き合う

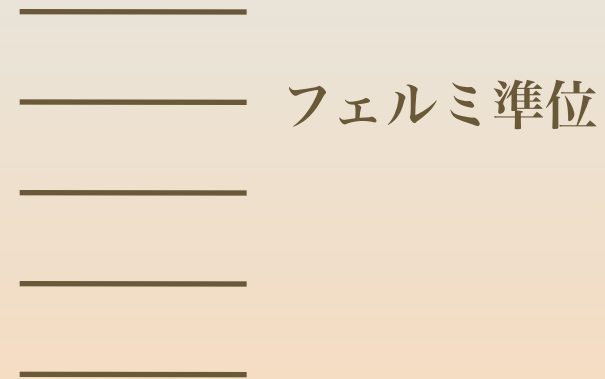
1 準位にいくらかでも詰まる



ボーズ粒子

◇ フェルミ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = -\psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$



フェルミ粒子

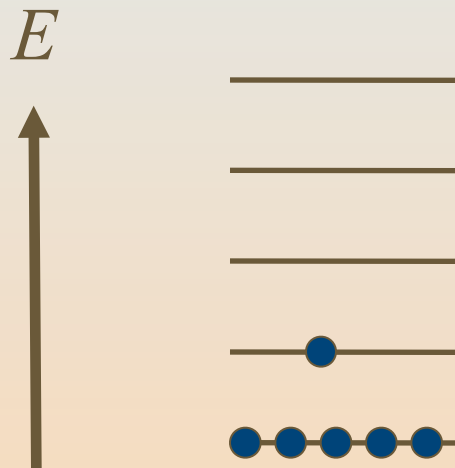


◇ ボーズ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = \psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

引き合う

1 準位にいくらかでも詰まる



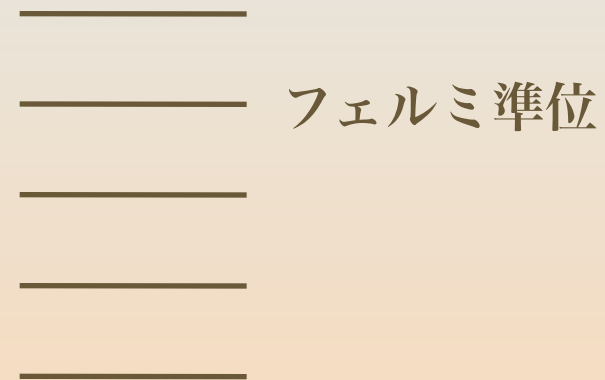
ボーズ粒子

◇ フェルミ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = -\psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

避けあう

1 つの準位に 1 個まで



フェルミ粒子

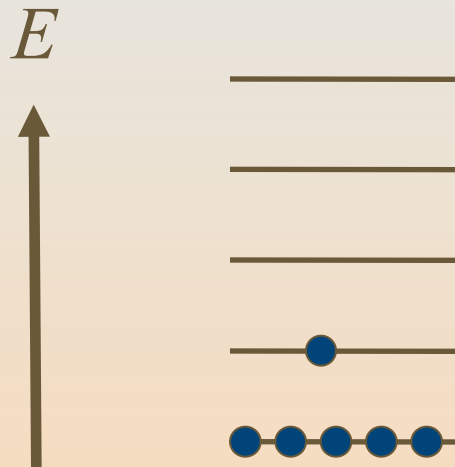


◇ ボーズ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = \psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

引き合う

1 準位にいくらかでも詰まる



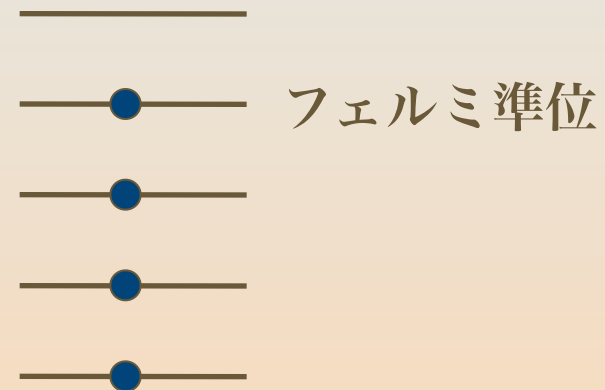
ボーズ粒子

◇ フェルミ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = -\psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

避けあう

1つの準位に1個まで



フェルミ粒子

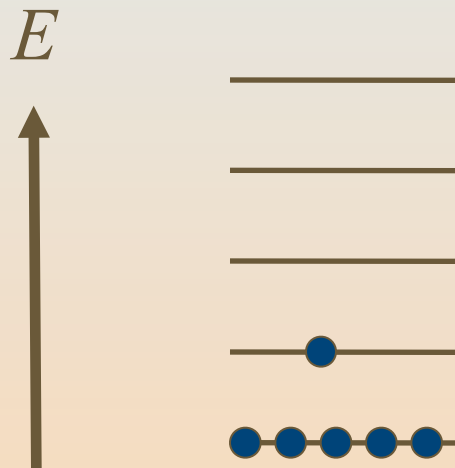


◇ ボーズ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = \psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

引き合う

1 準位にいくらかでも詰まる



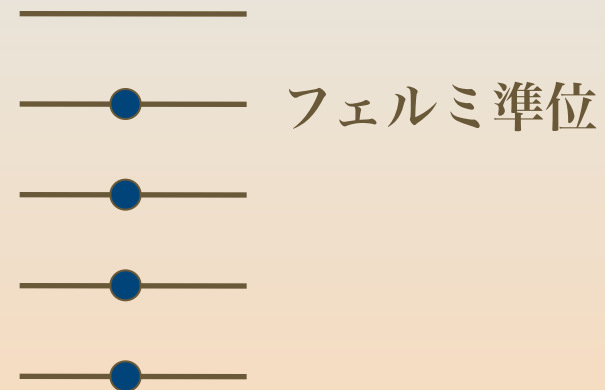
ボーズ粒子

◇ フェルミ粒子

$$\psi(\dots, x_i, \dots x_j, \dots) = -\psi(\dots, x_j, \dots x_i, \dots)$$

避けあう

1 つの準位に 1 個まで



フェルミ粒子

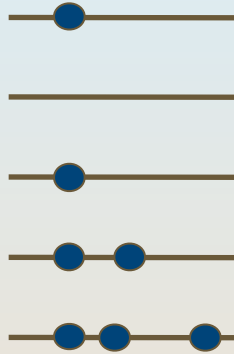
本質的な違い！

京都

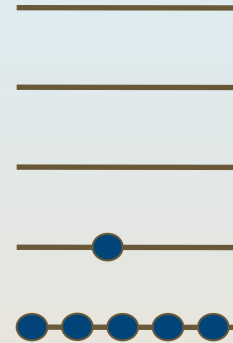


1. ボーズ粒子とボーズ・アインシュタイン凝縮

高温



低温



超流動

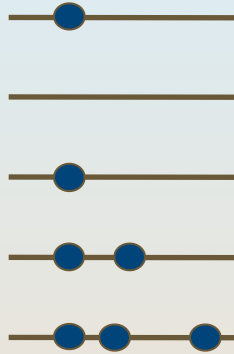
ヘリウム ^4He

2 Kで粘性ない流体

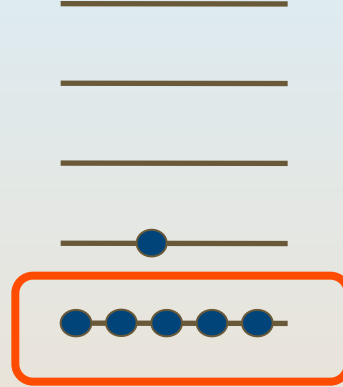


1. ボーズ粒子とボーズ・アインシュタイン凝縮

高温



低温



超流動

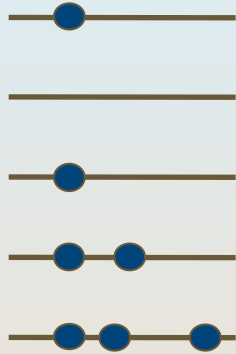
ヘリウム ^4He

2 Kで粘性ない流体

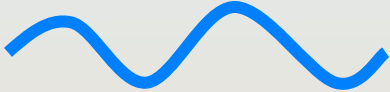
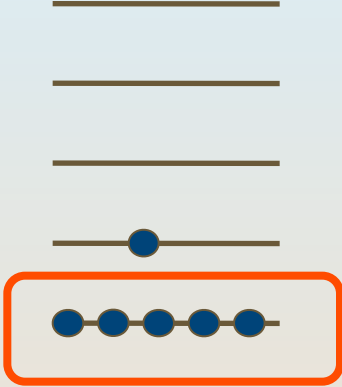


1. ボーズ粒子とボーズ・アインシュタイン凝縮

高温



低温



マクロな波動

マクロな量子現象

超流動

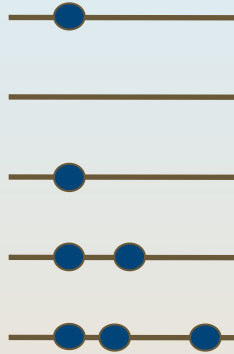
ヘリウム ^4He

2 Kで粘性ない流体

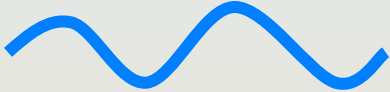
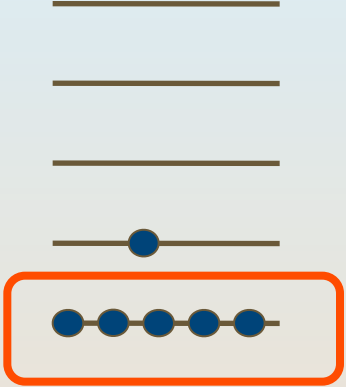


1. ボーズ粒子とボーズ・アインシュタイン凝縮

高温



低温



マクロな波動

マクロな量子現象

超流動

ヘリウム ^4He

2 Kで粘性ない流体



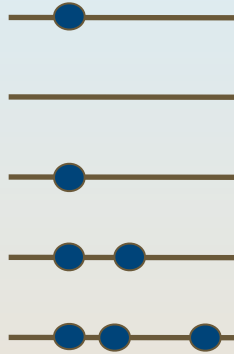
液体が壁をよじ登る



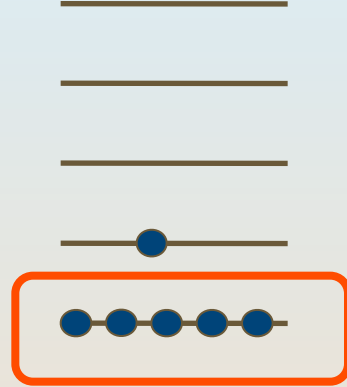
京都

1. ボーズ粒子とボーズ・アインシュタイン凝縮

高温



低温



マクロな波動

マクロな量子現象

超流動

ヘリウム ^4He

2 Kで粘性ない流体



冷却原子の
BE凝縮
Hot topics

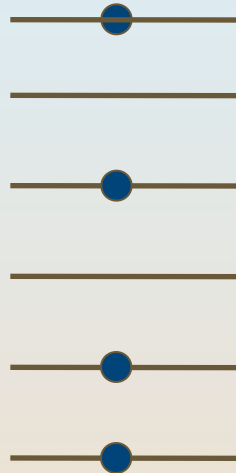


京都

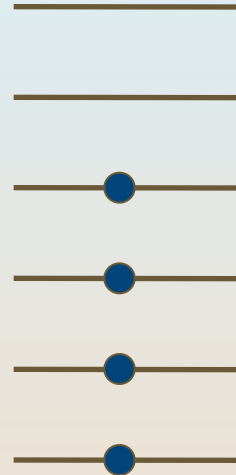
液体が壁をよじ登る

2. フェルミ粒子と凍結状態

高温



低温

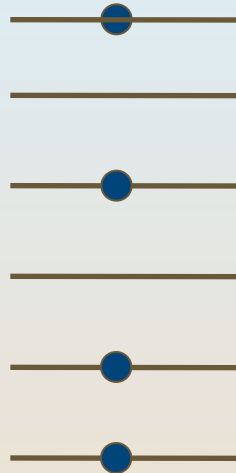


多様な物性

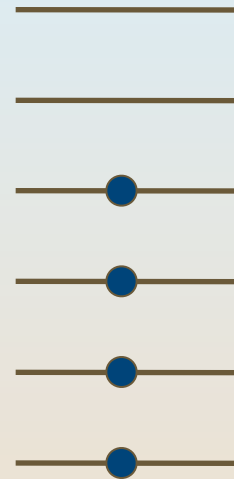


2. フェルミ粒子と凍結状態

高温



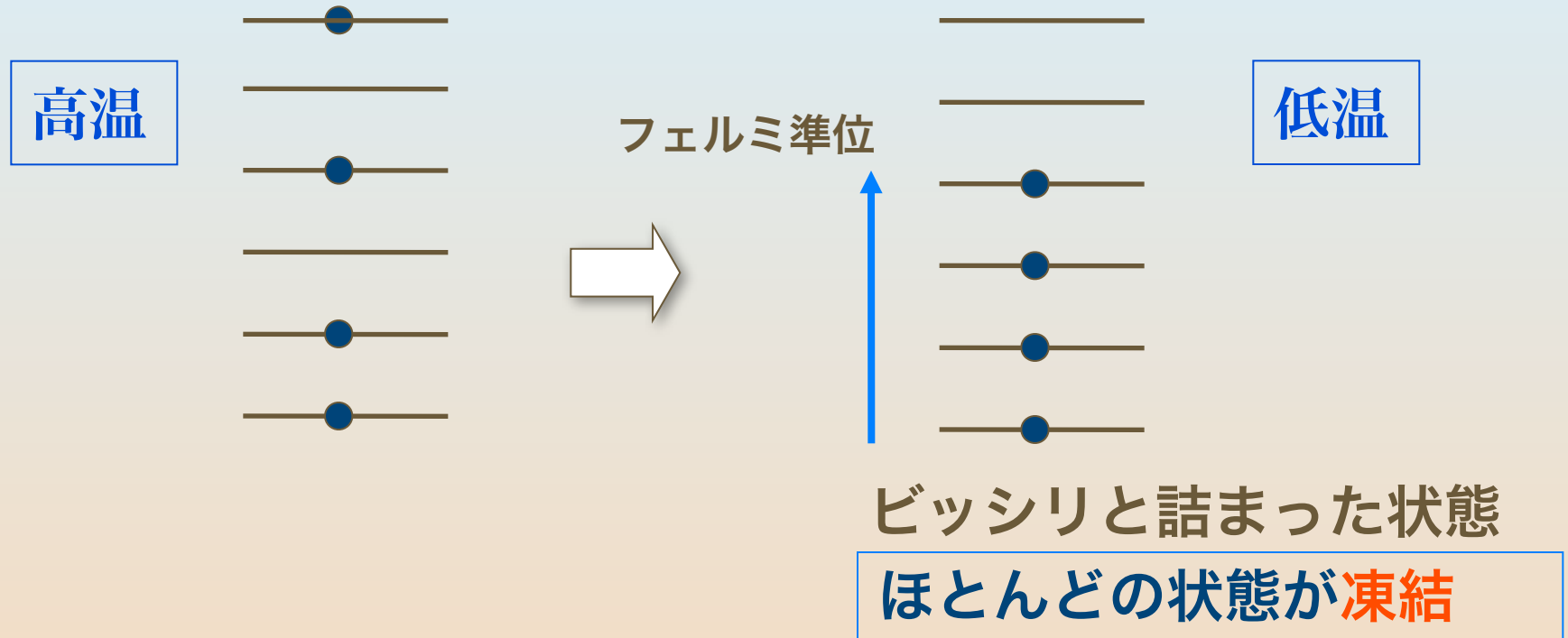
低温



多様な物性



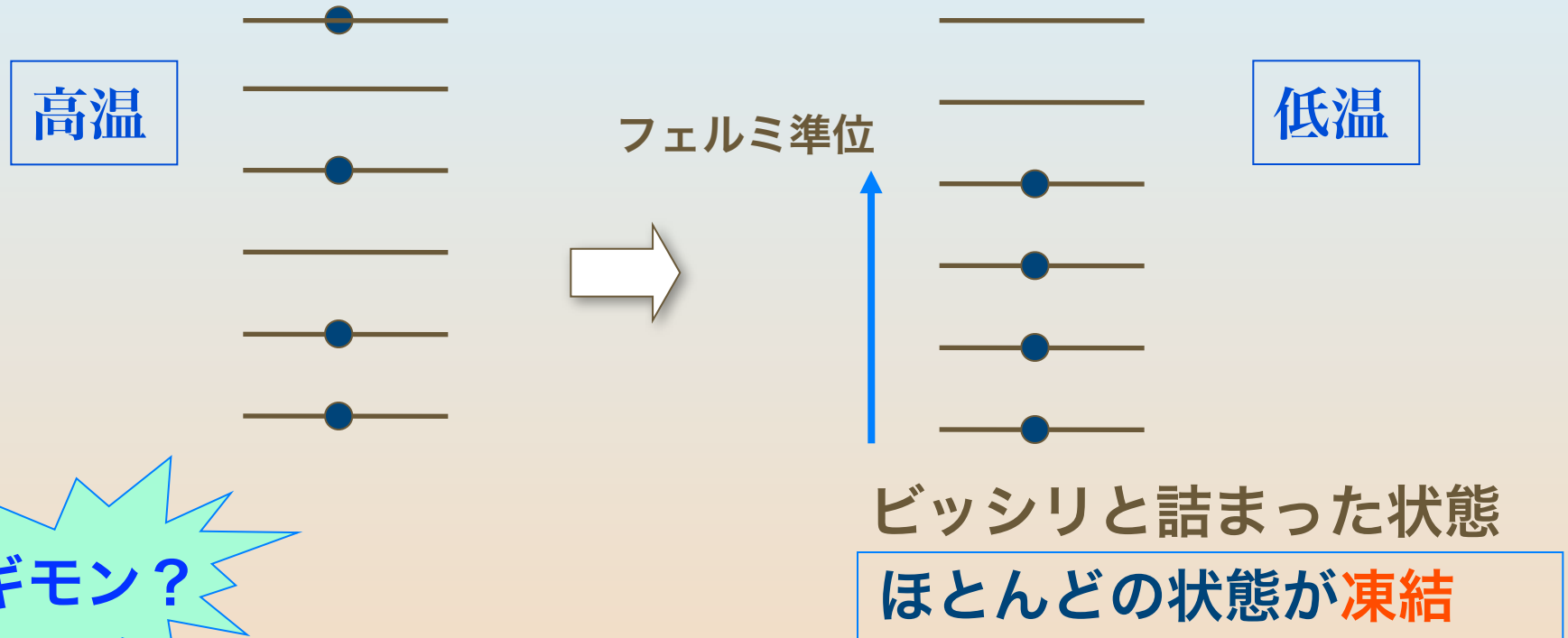
2. フェルミ粒子と凍結状態



多様な物性



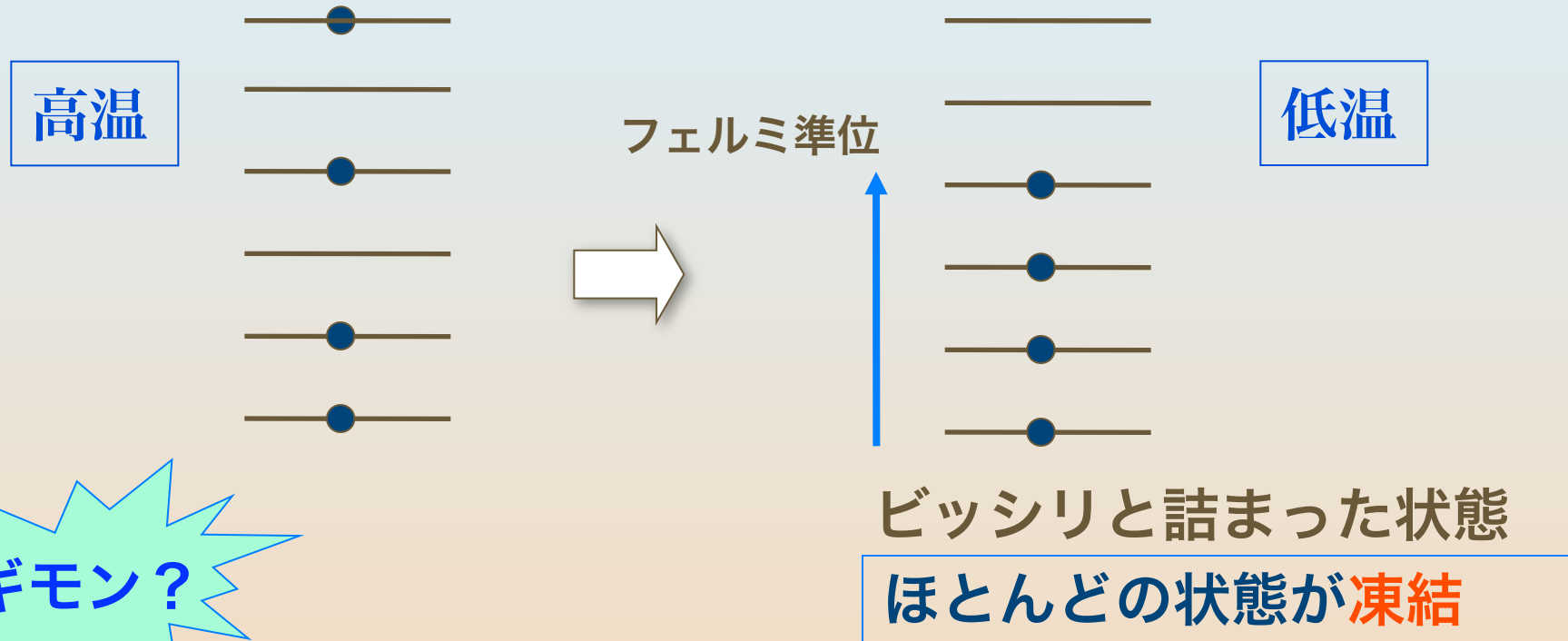
2. フェルミ粒子と凍結状態



多様な物性



2. フェルミ粒子と凍結状態



多様な物性

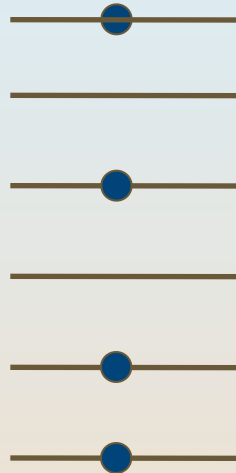
超伝導 半導体、ナノ量子系、磁性、誘電体

etc



2. フェルミ粒子と凍結状態

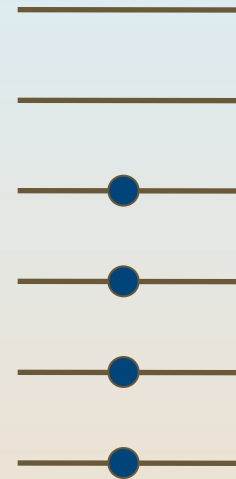
高温



フェルミ準位



低温



ビッシリと詰まった状態

ほとんどの状態が凍結

ギモン？

多様な物性

超伝導 半導体、ナノ量子系、磁性、誘電体

etc

フェルミ粒子としての電子？！

電子ガス（フェルミガス） 固体中の電子たち

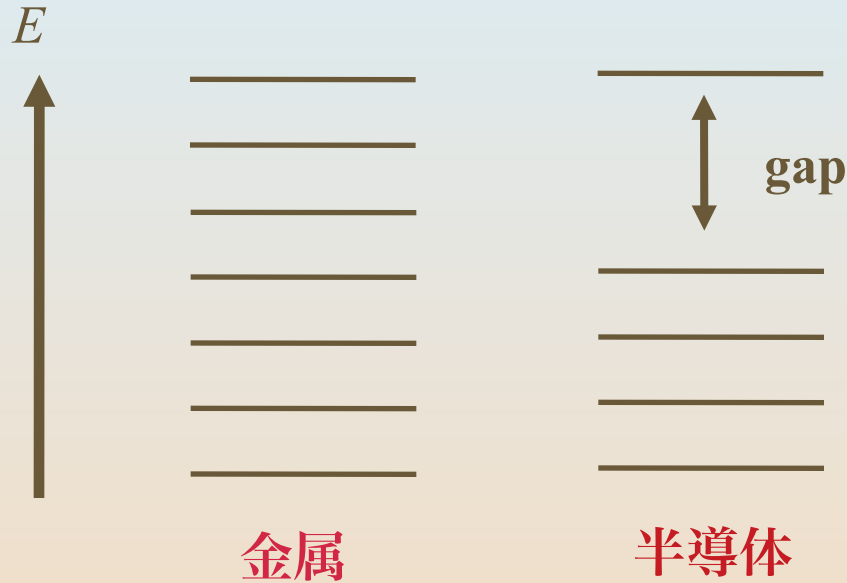
自由に動く、

でもフェルミ粒子なので...



固体中の電子たち

フェルミガス
(自由な電子たち)



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性

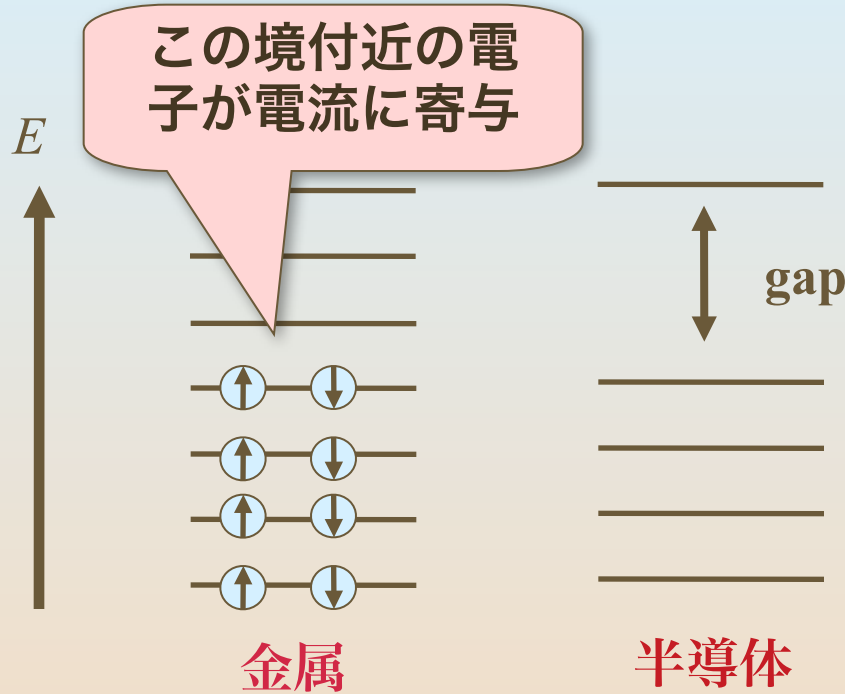


金属と半導体の区別



固体中の電子たち

フェルミガス
(自由な電子たち)



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性

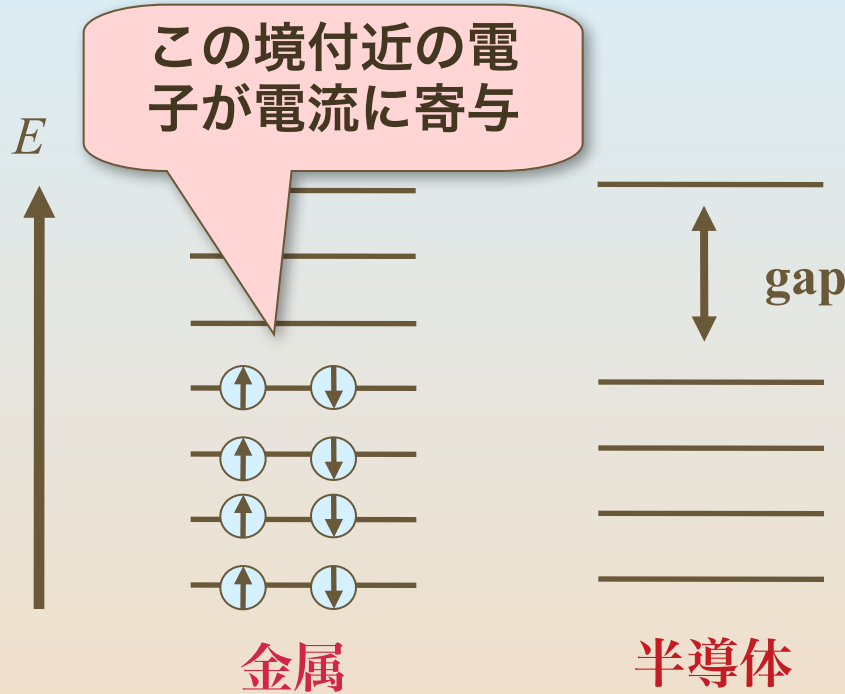


金属と半導体の区別

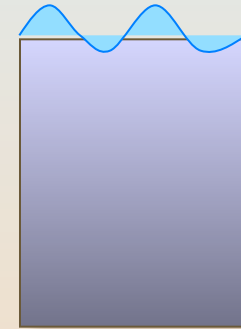


固体中の電子たち

フェルミガス
(自由な電子たち)



フェルミの海



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性

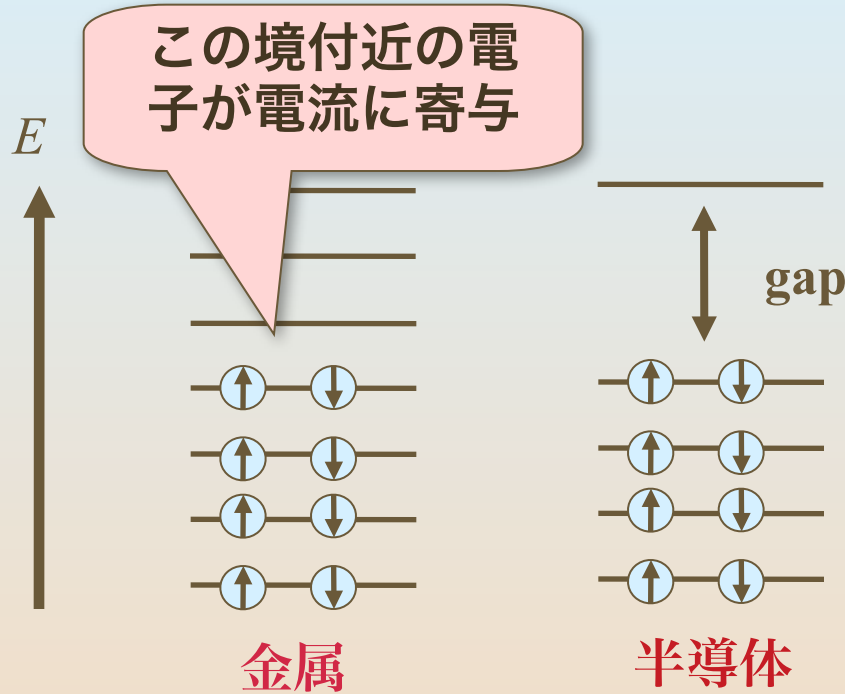


金属と半導体の区別

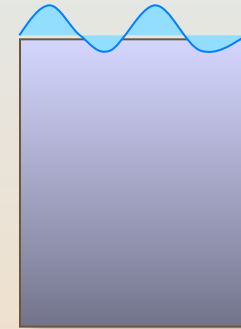


固体中の電子たち

フェルミガス
(自由な電子たち)



フェルミの海



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性

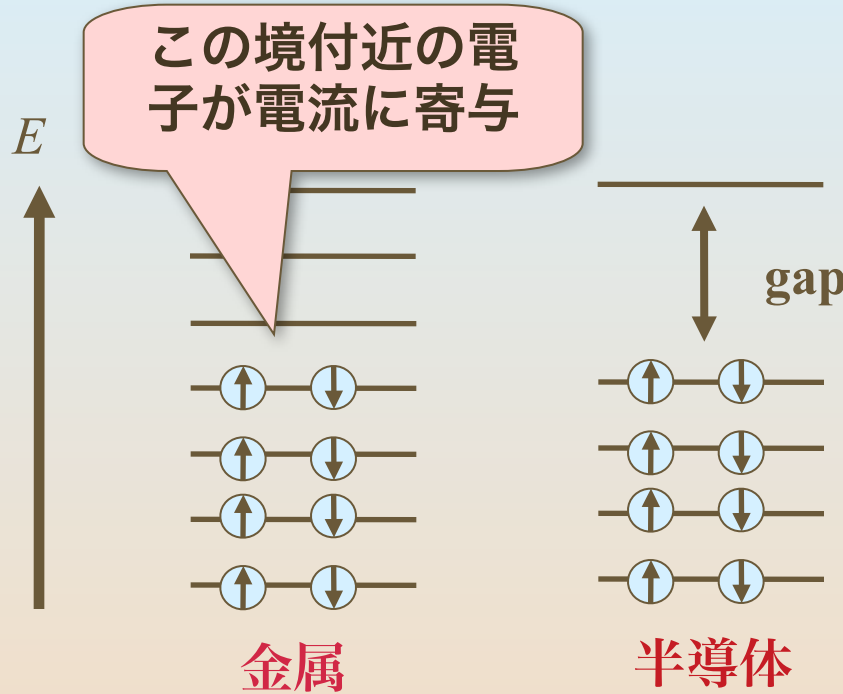


金属と半導体の区別

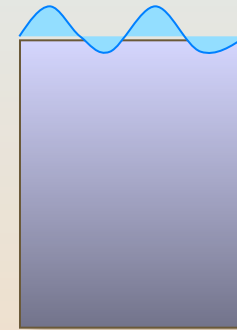


固体中の電子たち

フェルミガス
(自由な電子たち)



フェルミの海



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性



金属と半導体の区別

多様な物性？

ギチギチの電子で説明できるか？

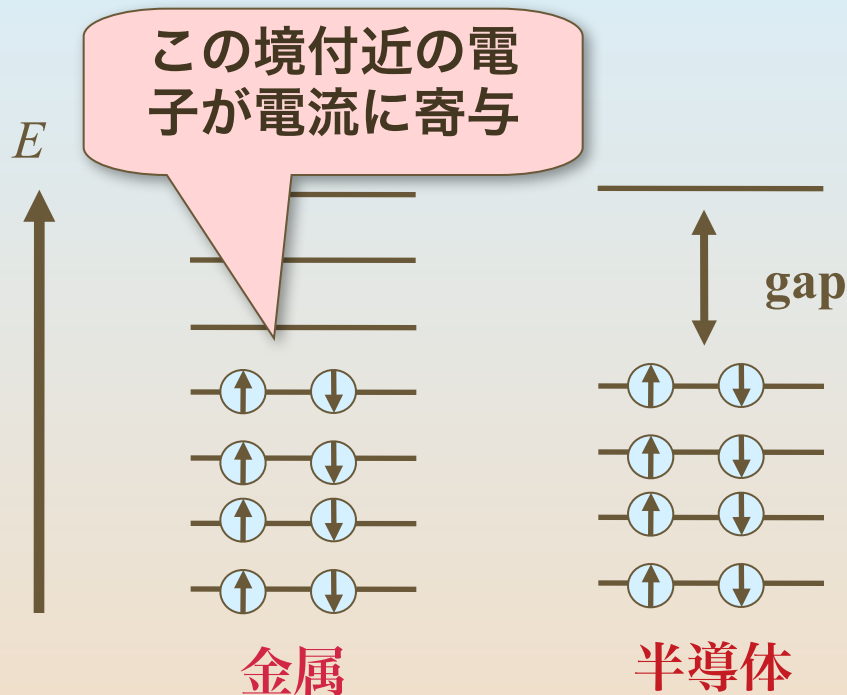
超伝導
磁性
その他



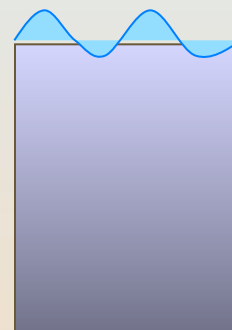
京都

固体中の電子たち

フェルミガス
(自由な電子たち)



フェルミの海



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性



金属と半導体の区別

多様な物性？

ギチギチの電子で説明できるか？

超伝導
磁性
その他

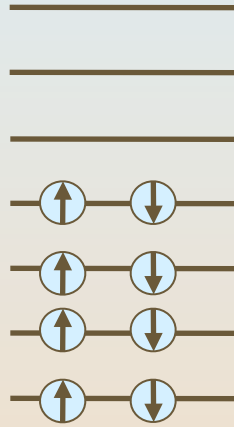
電子間の相互作用

電子相関

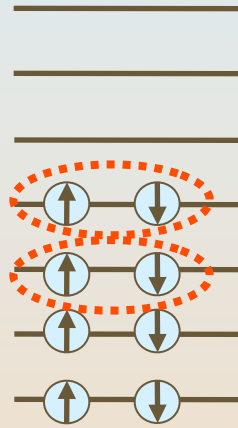
例：超伝導 電気抵抗なし



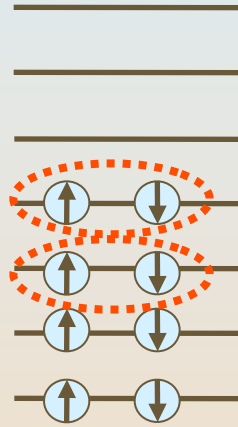
例：超伝導 電気抵抗なし



例：超伝導 電気抵抗なし



例：超伝導 電気抵抗なし



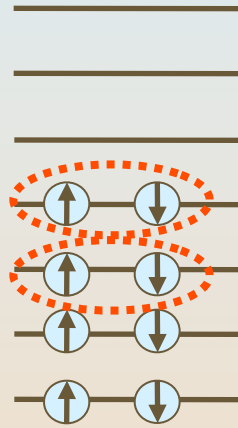
引力相互作用

電子ペア

ボーズ粒子



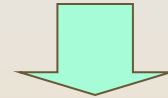
例：超伝導 電気抵抗なし



引力相互作用

電子ペア

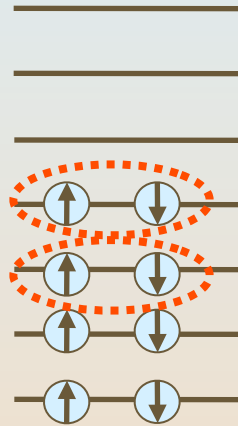
ボーズ粒子



ボーズアインシュタイン凝縮



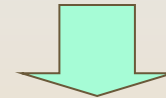
例：超伝導 電気抵抗なし



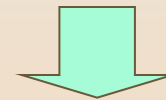
引力相互作用

電子ペア

ボーズ粒子



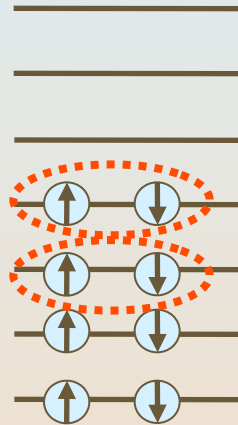
ボーズアインシュタイン凝縮



超伝導



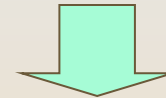
例：超伝導 電気抵抗なし



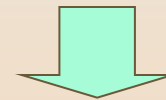
引力相互作用

電子ペア

ボース粒子



ボースアインシュタイン凝縮



超伝導

量子論とフェルミ統計性だけじゃダメ

相互作用の重要性！

多様な物性

磁性：スピン間の相互作用

構造転移：電子・格子の相互作用



超伝導、量子磁性、半導体、ナノ量子現象、etc

基礎物理
最先端テクノロジー

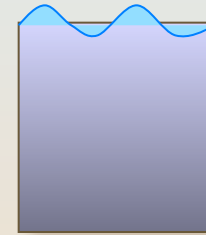
◇ 固体中の電子たち

フェルミレベル付近

◇ 多彩な現象

電子間の相互作用

他の粒子をにらみながら、量子力学的に運動

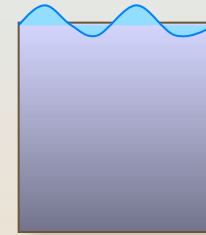


超伝導、量子磁性、半導体、ナノ量子現象、etc

基礎物理
最先端テクノロジー

◇ 固体中の電子たち

フェルミレベル付近



◇ 多彩な現象

電子間の相互作用

他の粒子をにらみながら、量子力学的に運動

電子相関

物性理論の中心課題

典型的な多体問題！



強相関電子系の世界

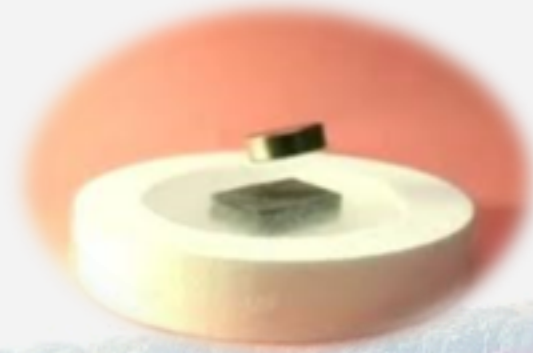
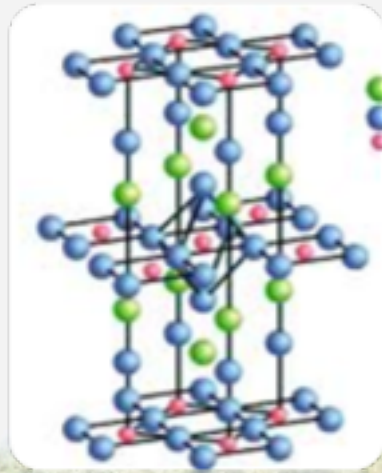
「量子多体論の最前線」

エキゾチックな量子凝縮相

量子多体効果の醍醐味



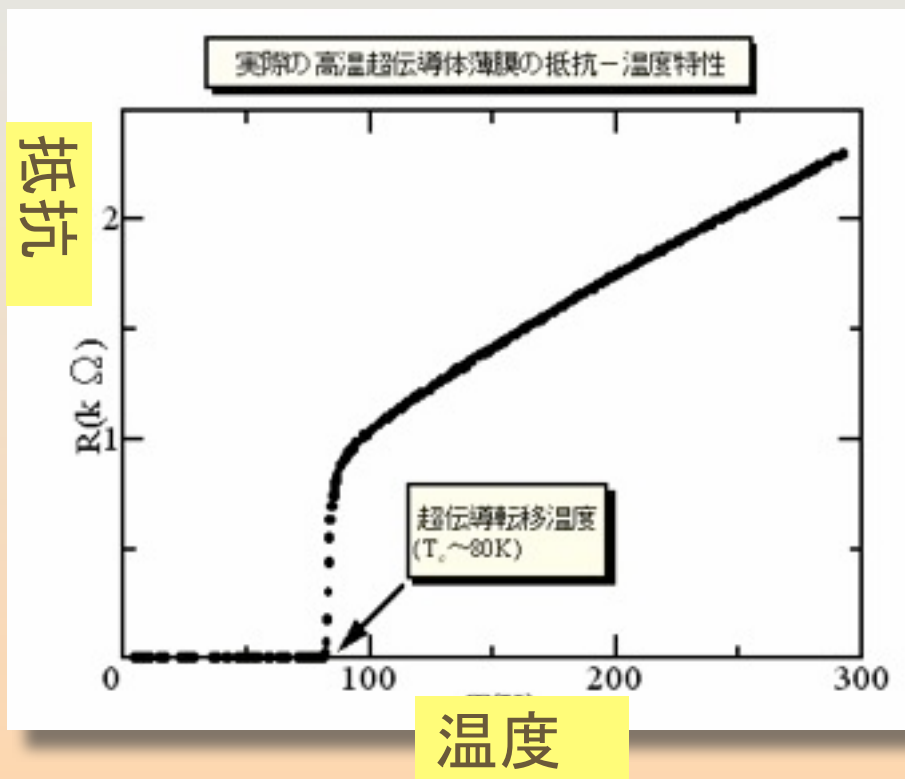
エキゾチックな超伝導



高温超伝導

❁ 1986年 La_2CuO_4 ホールドープ

銅酸化物セラミックを
金属にしたら
超伝導

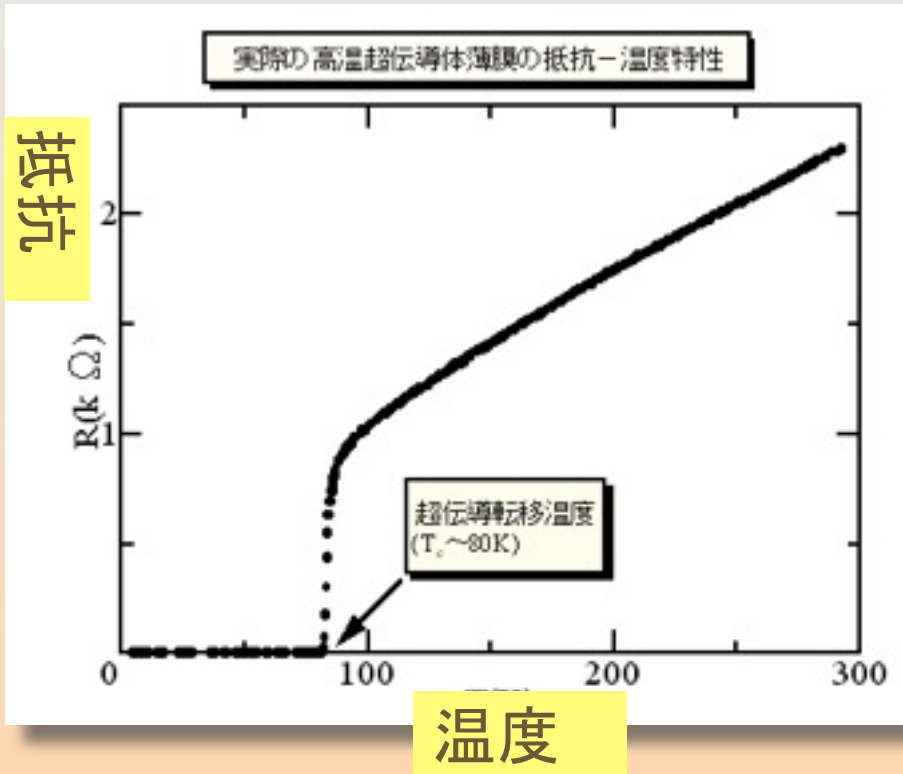


高温超伝導



❁ 1986年 La_2CuO_4 ホールドープ

銅酸化物セラミックを
金属にしたら
超伝導



高温超伝導

ノーベル賞
1987



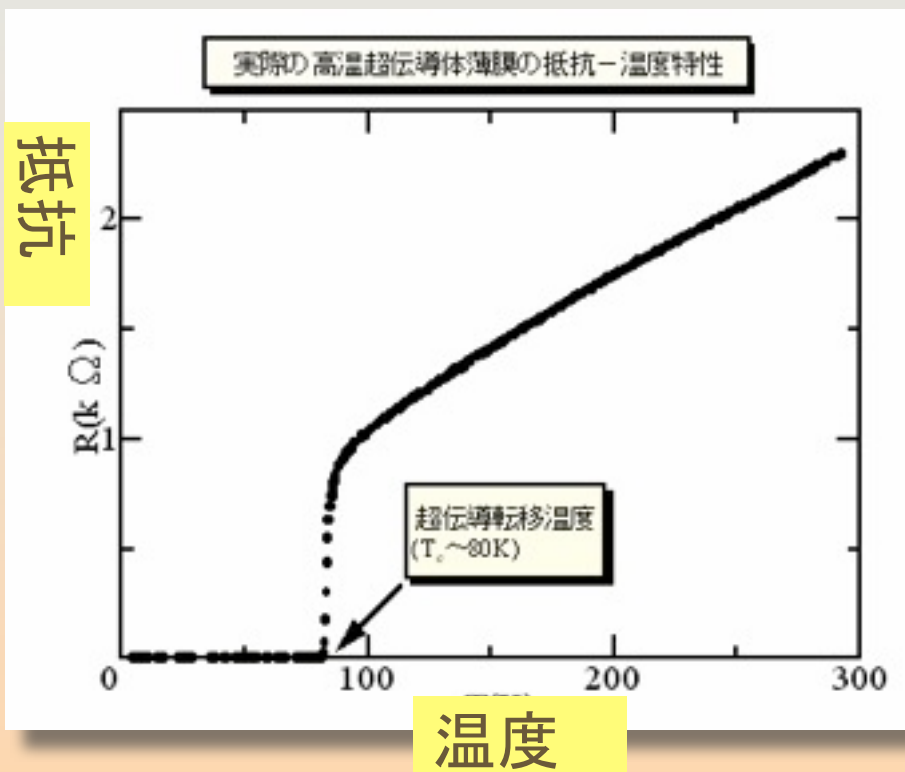
❁ 1986年 La_2CuO_4 ホールドープ

銅酸化物セラミックを
金属にしたら
超伝導

超伝導転移温度 **100K**

最高~**150K**

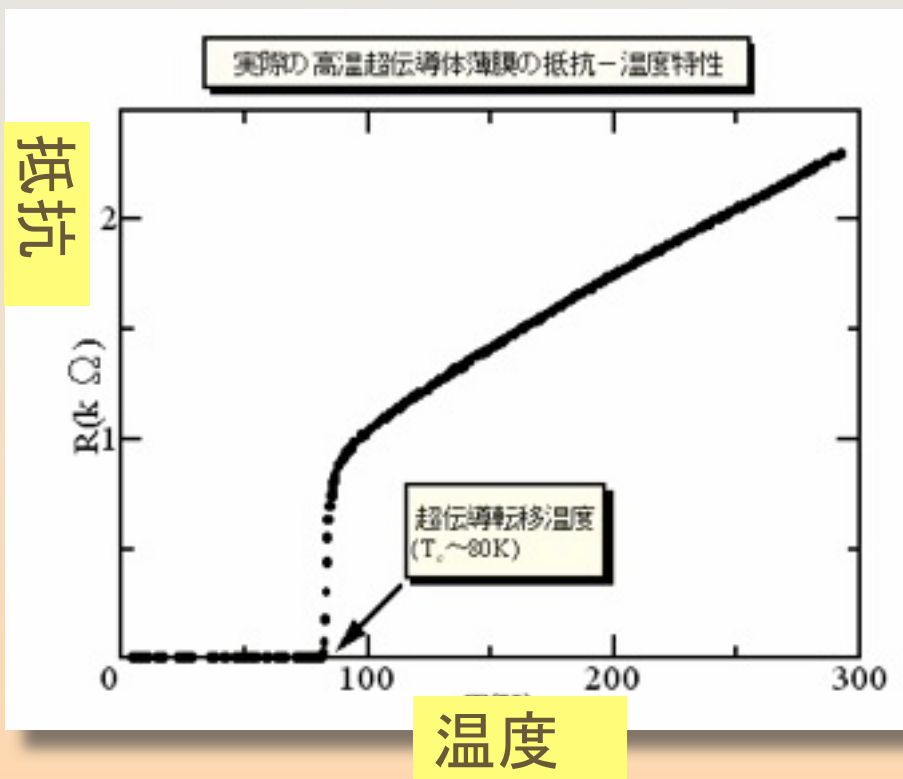
(それまで20Kくらい)



高温超伝導



❁ 1986年 La_2CuO_4 ホールドープ



銅酸化物セラミックを
金属にしたら
超伝導

超伝導転移温度 **100K**

最高~**150K**

(それまで20Kくらい)

実用化

液体窒素の沸点より高い
77K

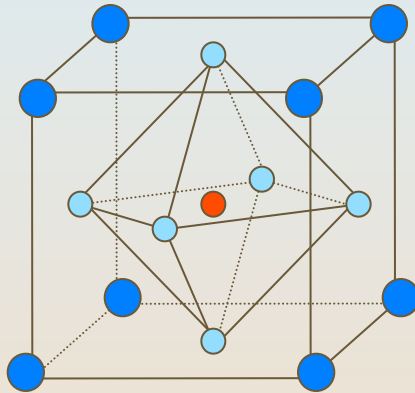
Why 銅酸化物？

層状の構造

● : Cu

○ : O

● : La, Ca



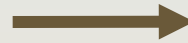
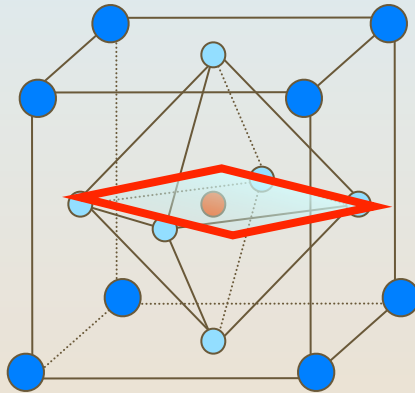
- ① Cu 中の d 電子 電子間の強い相互作用
- ② 2次元面内での電子の運動



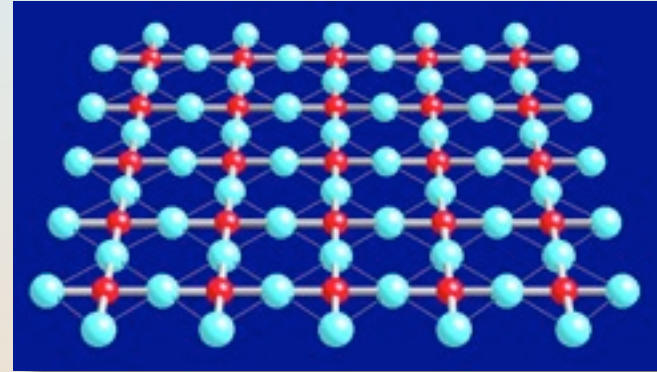
Why 銅酸化物？

層状の構造

- : Cu
- : O
- : La, Ca



CuO₂ 2次元ネットワーク



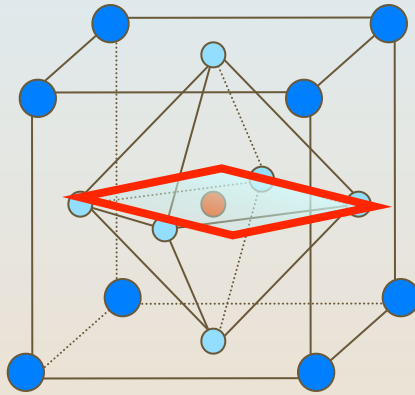
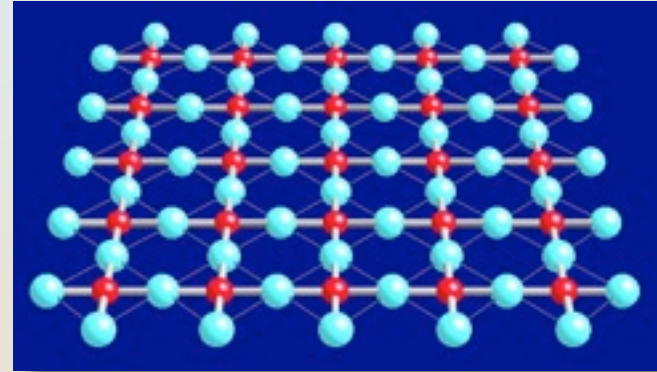
- ① **Cu** 中の **d**電子 電子間の**強い相互作用**
- ② **2次元**面内での電子の運動



Why 銅酸化物？ 電子間斥力が通常金属(Al, Pb等)より強いのに？

層状の構造

- : Cu
- : O
- : La, Ca

 CuO_2 2次元ネットワーク

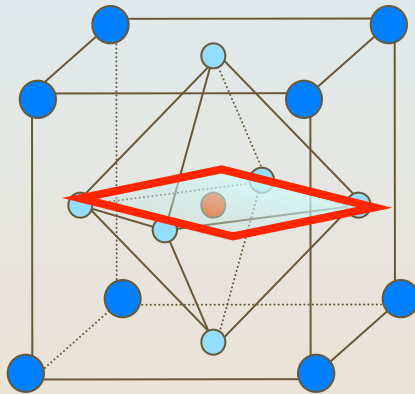
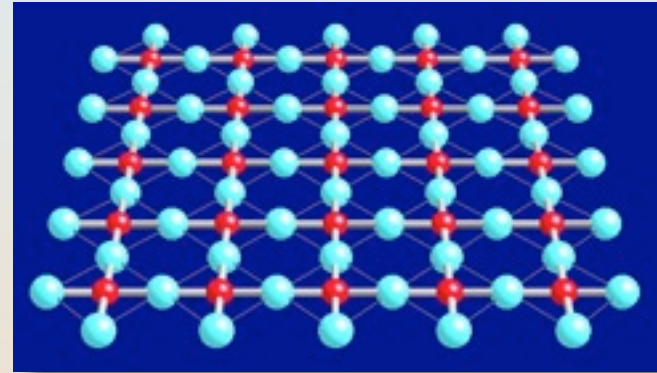
- ① **Cu** 中の **d**電子 電子間の**強い相互作用**
- ② **2次元**面内での電子の運動



Why 銅酸化物？ 電子間斥力が通常金属(Al, Pb等)より強いのに？

層状の構造

- : Cu
- : O
- : La, Ca

CuO₂ 2次元ネットワーク

- ① Cu 中の d電子 電子間の強い相互作用
- ② 2次元面内での電子の運動

謎解きの
鍵

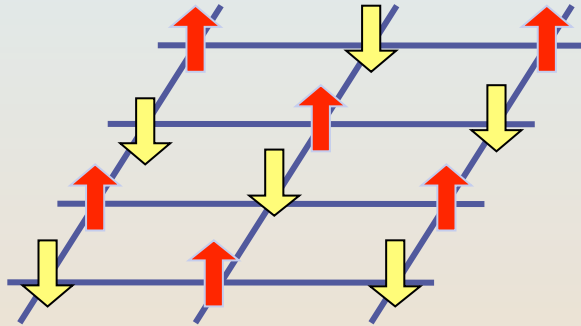
電子相関 + 低次元の量子揺らぎ

3次元と大いに異なる



超伝導メカニズム

① 強相関： 反強磁性

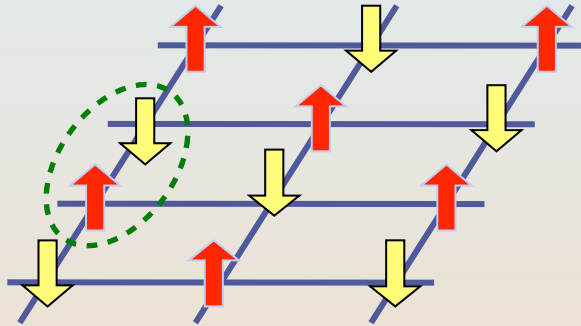


磁気相互作用を**超伝導**に使いたい。でも、磁石は壊れないし。。。



超伝導メカニズム

① 強相関： 反強磁性

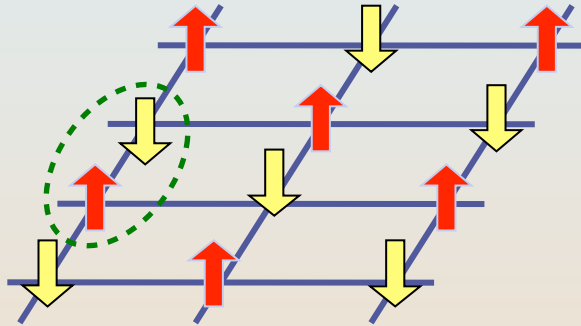


磁気相互作用を**超伝導**に使いたい。でも、磁石は壊れないし。。。。



超伝導メカニズム

① 強相関：反強磁性



② 低次元ゆらぎ

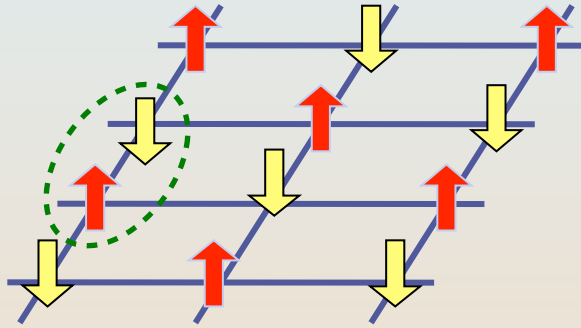
磁気相互作用を**超伝導**に使いたい。でも、磁石は壊れないし。。。

磁気相互作用：強いまま
磁石 → 不安定に



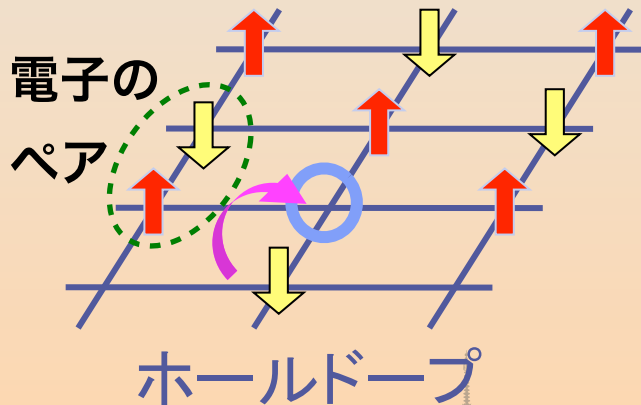
超伝導メカニズム

① 強相関：反強磁性



磁気相互作用を**超伝導**に使いたい。でも、磁石は壊れないし。。。

② 低次元ゆらぎ



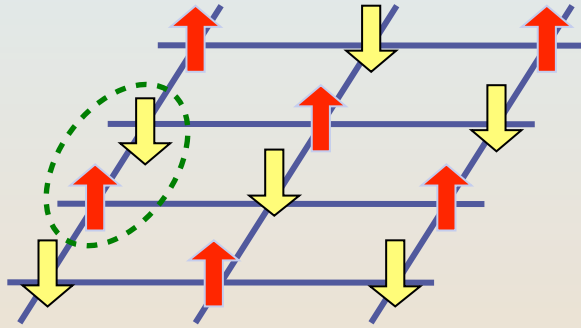
磁気相互作用：強いまま
磁石 → 不安定に

強い引力 & 高い転移温度

高温超伝導

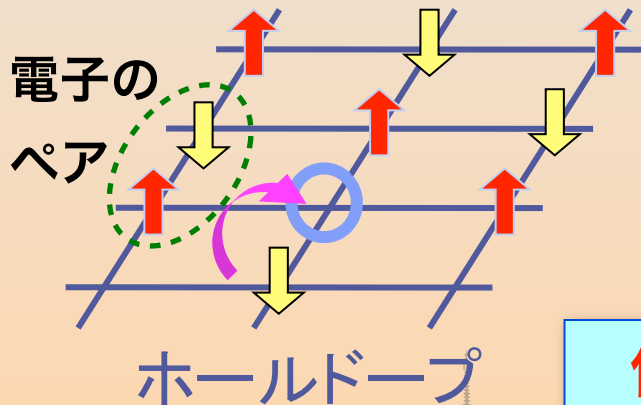
超伝導メカニズム

① 強相関： 反強磁性



磁気相互作用を**超伝導**に使いたい。でも、磁石は壊れないし。。。

② 低次元ゆらぎ



磁気相互作用：強いまま
磁石 \rightarrow 不安定に

強い引力 & 高い転移温度

高温超伝導

低次元ゆらぎ + 相関効果

物理の基本問題！！

最近の話題； 鉄化合物の超伝導

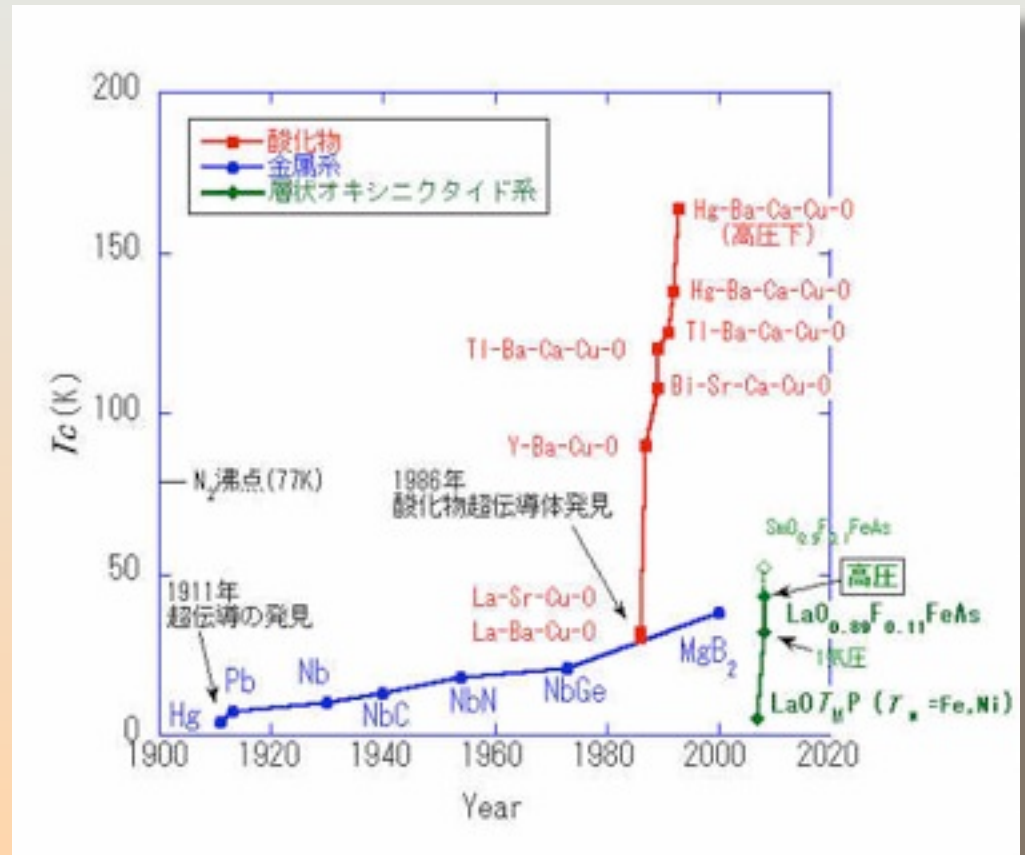
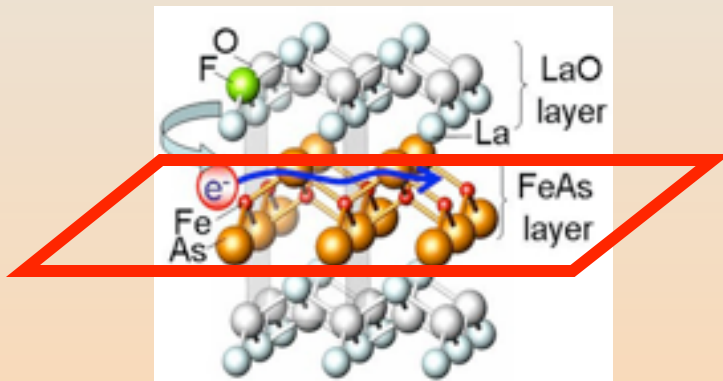
2008年2月



東工大 細野教授



鉄が超伝導？ メカニズム？ もっと高く？



現在なお、

最高のT_c ~ 55 K



トポロジカルな量子系

量子ホール効果

量子スピン・ホール効果

トポロジカル絶縁体, トポロジカル超伝導



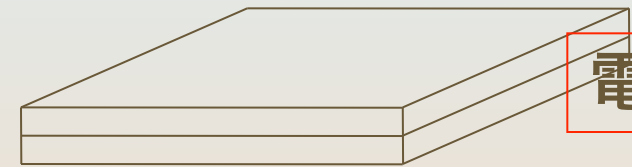
量子ホール効果

2次元，強磁場中の電子たち

強い磁場

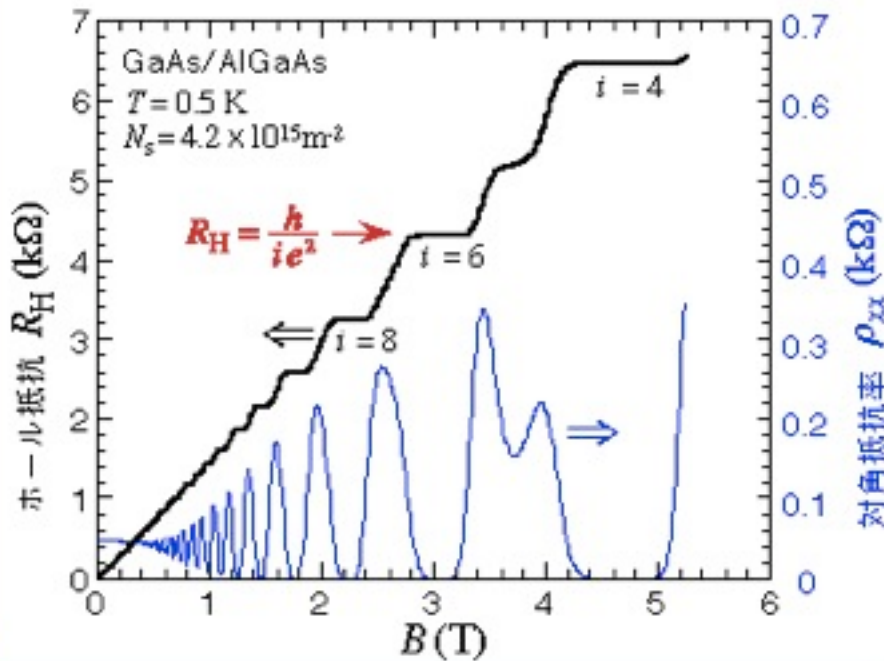
電圧

電流



GaAs/AlGaAs

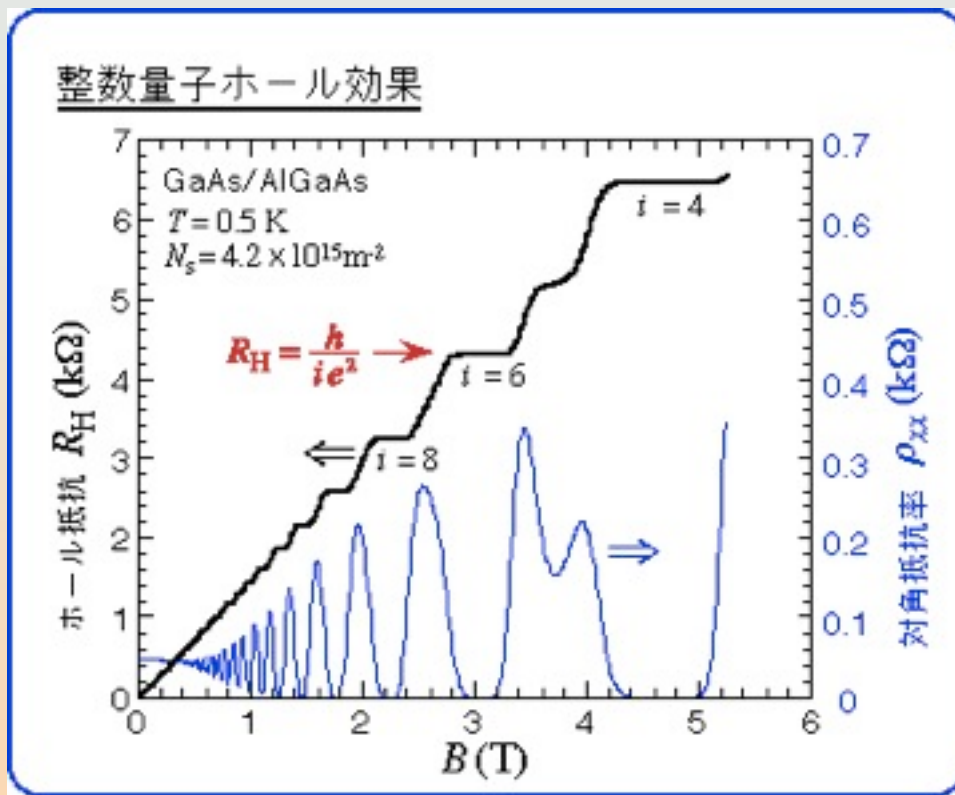
整数量子ホール効果



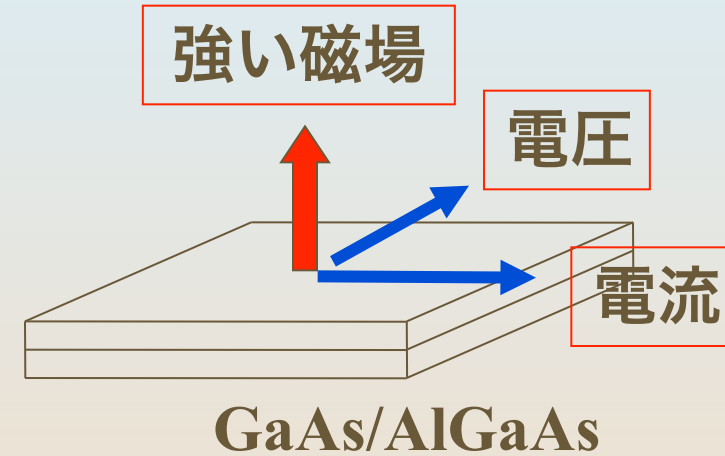
磁場

量子ホール効果

2次元，強磁場中の電子たち



磁場

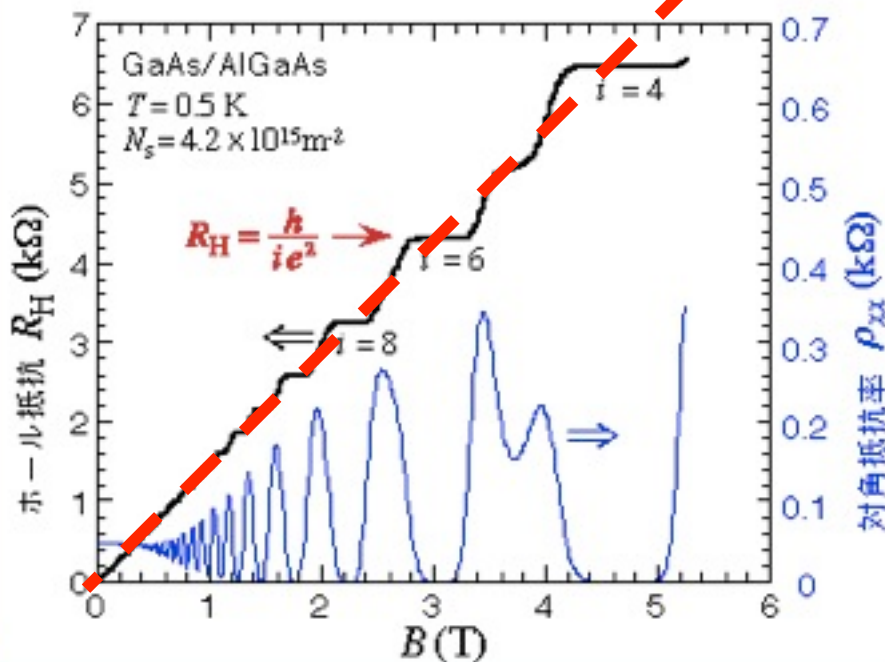


量子ホール効果

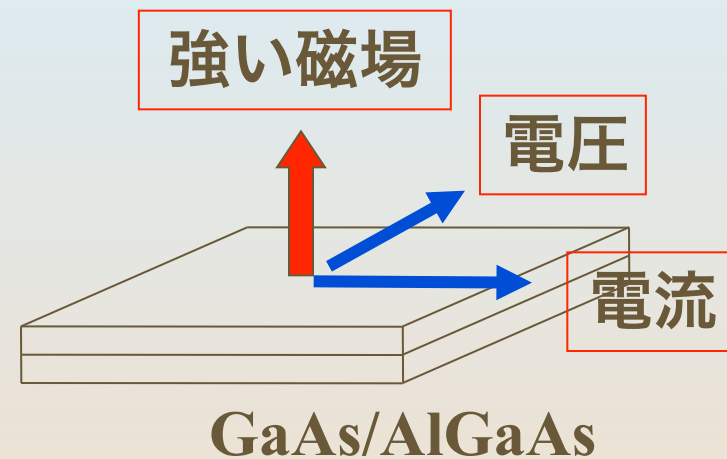
2次元，強磁場中の電子たち

古典論

整数量子ホール効果

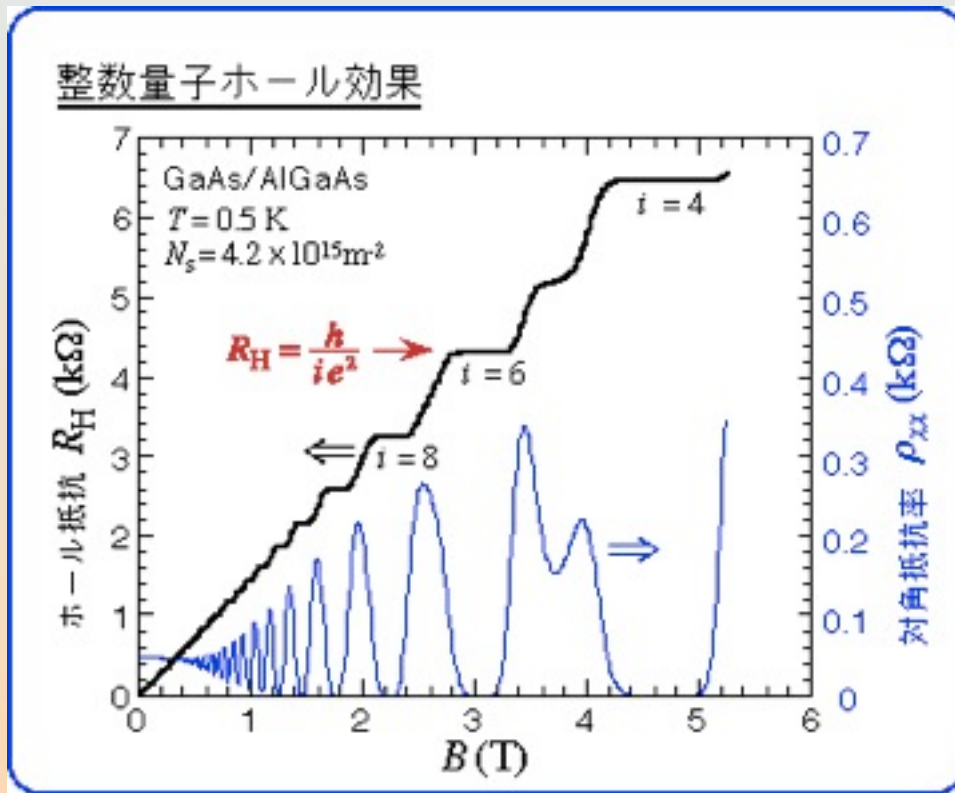


磁場

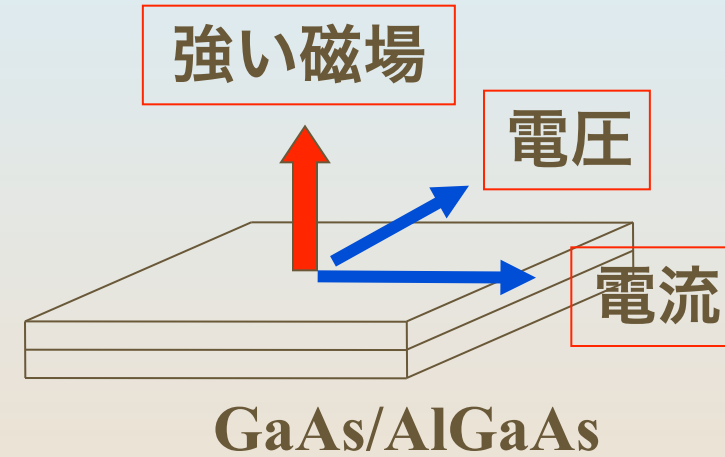


量子ホール効果

2次元，強磁場中の電子たち



磁場

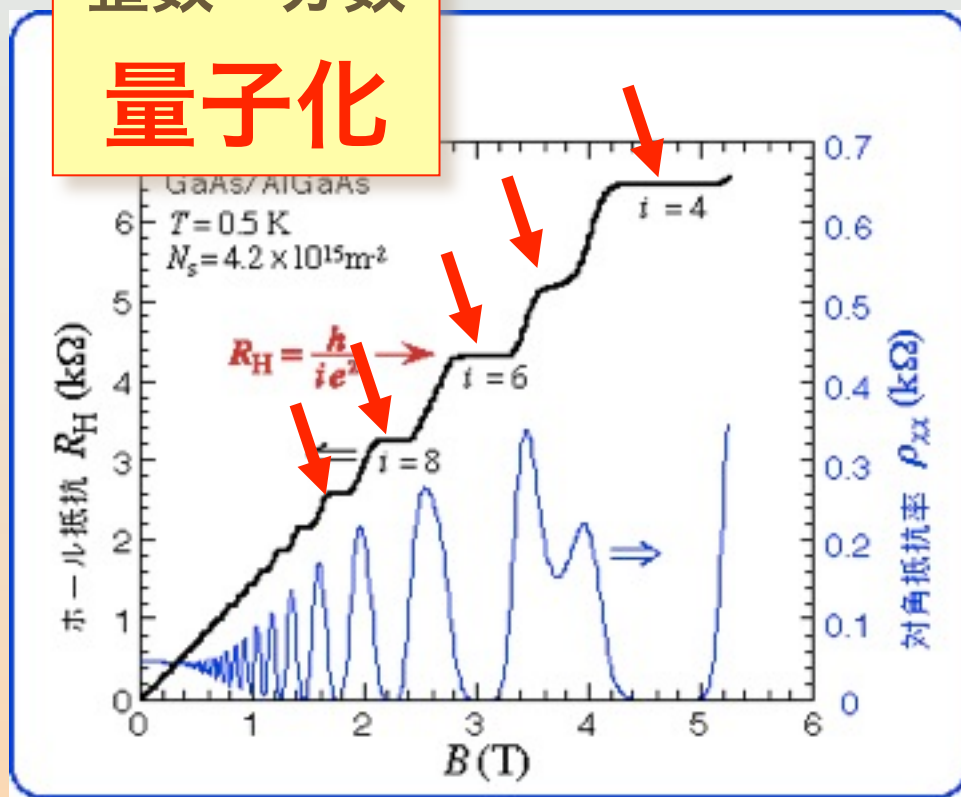


量子ホール効果

2次元，強磁場中の電子たち

整数・分数

量子化

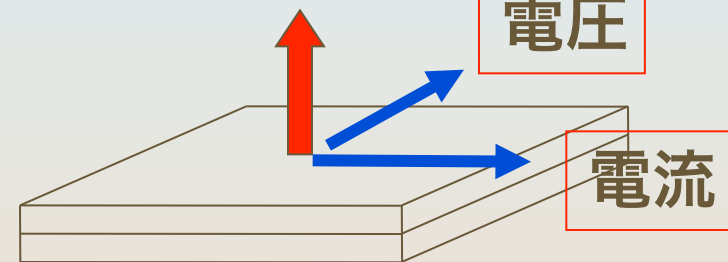


磁場

強い磁場

電圧

電流



GaAs/AlGaAs

10^{-8} の精度!

標準

ふつうじゃない

抵抗

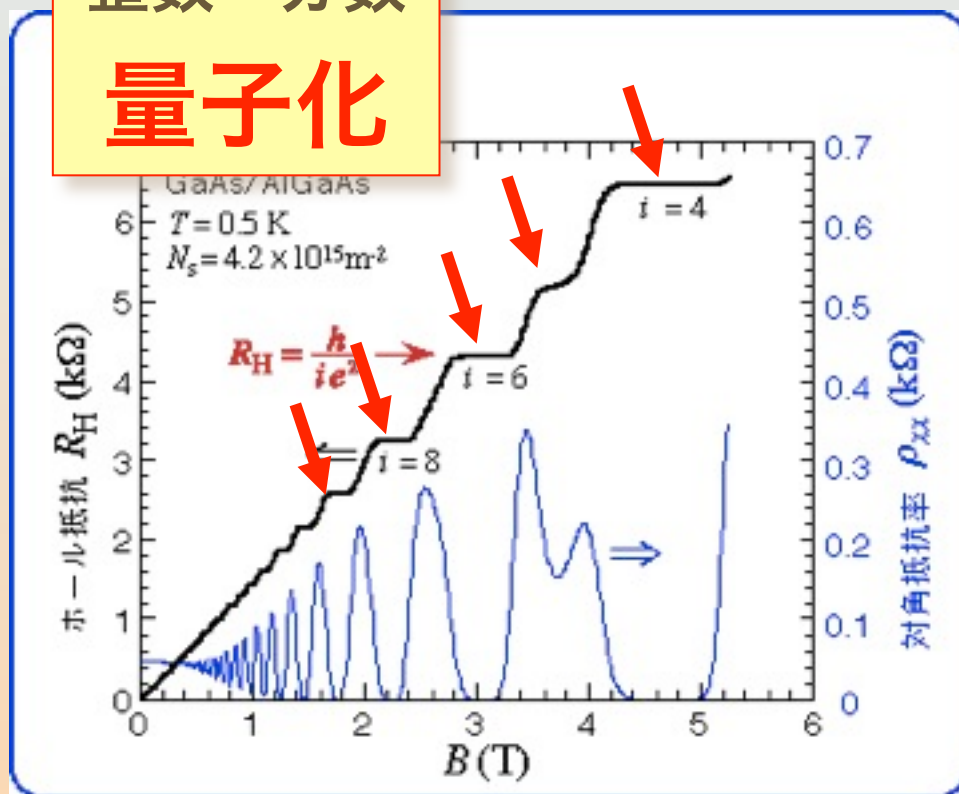
抵抗: 不純物

量子ホール効果

2次元，強磁場中の電子たち

整数・分数

量子化

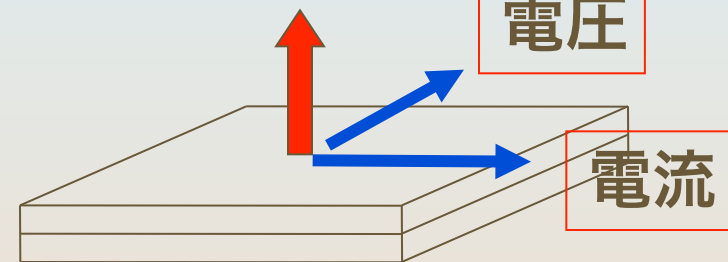


磁場

強い磁場

電圧

電流



GaAs/AlGaAs

10⁻⁸の精度!

ふつうじゃない

標準

抵抗

抵抗: 不純物

2次元世界の量子効果

電子たちの協力現象

1. 整数量子ホール効果

$$\nu = 1, 2, 3, \dots$$

標準抵抗

Hall伝導度

$$\sigma_{xy} = \nu e^2 / h$$

2. 分数量子ホール効果

$$\nu = 1/3, 1/5, 1/7, \dots$$

強磁場中での電子相関



1. 整数量子ホール効果

ノーベル賞
実験

$$\nu = 1, 2, 3, \dots$$

標準抵抗

Hall伝導度

$$\sigma_{xy} = \nu e^2 / h$$

2. 分数量子ホール効果

$$\nu = 1/3, 1/5, 1/7, \dots$$

強磁場中での電子相関



1. 整数量子ホール効果

ノーベル賞
実験

$$\nu = 1, 2, 3, \dots$$

標準抵抗

Hall伝導度

$$\sigma_{xy} = \nu e^2 / h$$

2. 分数量子ホール効果

ノーベル賞
理論の
アイデア

$$\nu = 1/3, 1/5, 1/7, \dots$$

強磁場中での電子相関

新しい量子液体 (Laughlin)

粒子の分数化 $e \rightarrow e/3 + e/3 + e/3$

エニオン

(フェルミでもボーズでもない)

分数統計



1. 整数量子ホール効果

ノーベル賞
実験

$$\nu = 1, 2, 3, \dots$$

標準抵抗

Hall伝導度

$$\sigma_{xy} = \nu e^2 / h$$

2. 分数量子ホール効果

ノーベル賞
理論の
アイデア

$$\nu = 1/3, 1/5, 1/7, \dots$$

強磁場中での電子相関

新しい量子液体 (Laughlin)

粒子の分数化 $e \rightarrow e/3 + e/2$

エニオン

(フェルミでもボーズでもない)

「トポロジー」

に守られた
量子状態多体系のヒルベルト空間が
ねじれている！

1. 整数量子ホール効果

ノーベル賞
実験

$$\nu = 1, 2, 3, \dots$$

標準抵抗

Hall伝導度

$$\sigma_{xy} = \nu e^2 / h$$

2. 分数量子ホール効果

ノーベル賞
理論の
アイデア

$$\nu = 1/3, 1/5, 1/7, \dots$$

強磁場中での電子相関

新しい量子液体 (Laughlin)

粒子の分数化 $e \rightarrow e/3 + e/3$

「トポロジー」

に守られた
量子状態

多体系のヒルベルト空間が
ねじれている！

エニオン (フェルミでもボーズでもない)

トポロジカル秩序

Hall 抵抗の量子化された値は
トポロジカル不変量



トポロジカル絶縁体

Hot!

ちょっと見、ふつうの絶縁体.... けど、ちがう

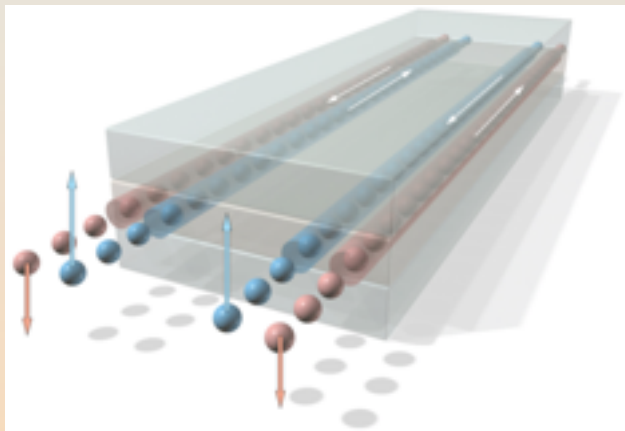
トポロジカルな性質!

2006

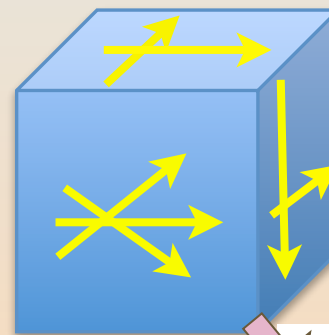
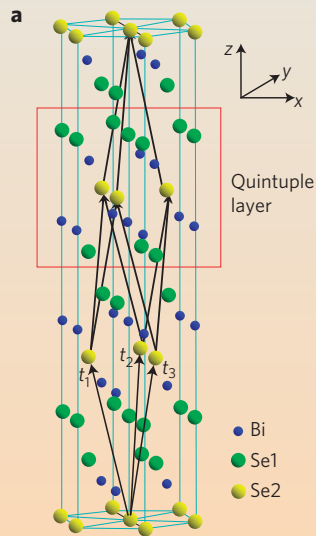
理論予言

2次元 HgTe 量子井戸

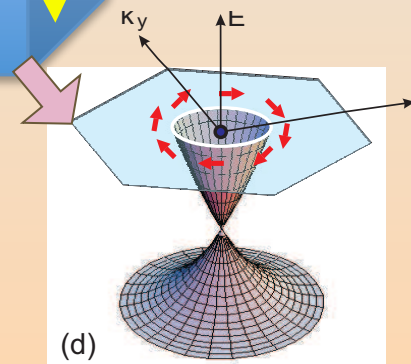
3次元 Bi_2Se_3 Bi_2Te_3



HgTe 量子井戸
(2007)



Bi_2Se_3
(2009)



トポロジカル絶縁体

Hot!

ちょっと見、ふつうの絶縁体.... けど、ちがう

トポロジカルな性質!

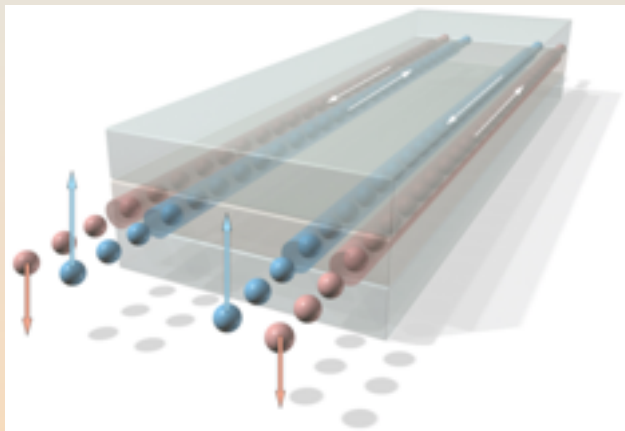
2006

理論予言

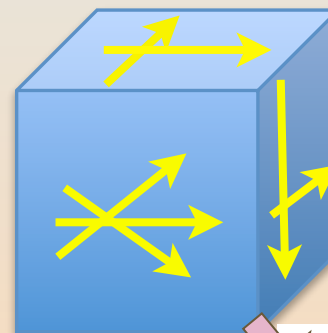
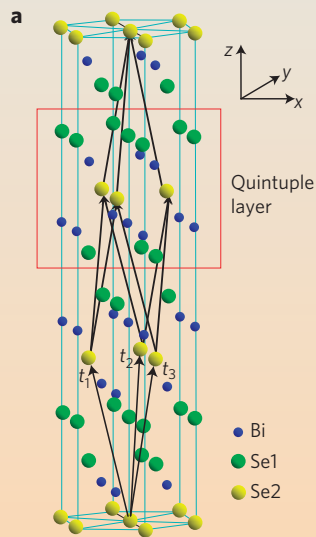
2次元 HgTe 量子井戸

3次元 Bi_2Se_3 Bi_2Te_3

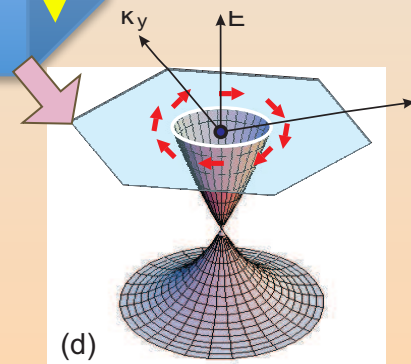
トポロジーで保護された表面金属状態



HgTe 量子井戸
(2007)



Bi_2Se_3
(2009)



トポロジカル絶縁体

Hot!

ちょっと見、ふつうの絶縁体.... けど、ちがう

トポロジカルな性質!

2006

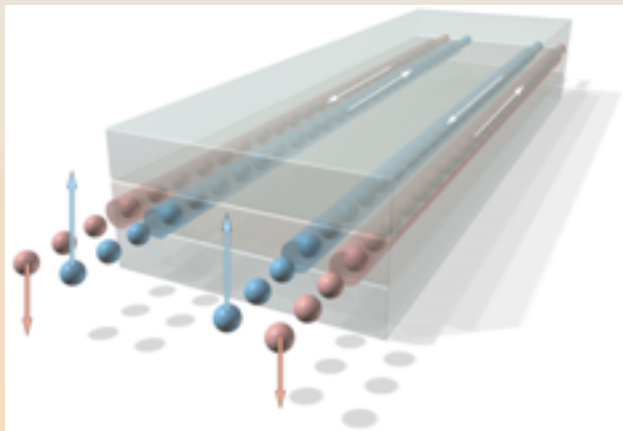
理論予言

2次元 HgTe 量子井戸

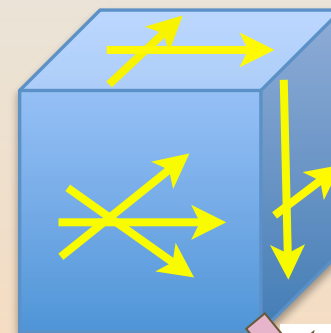
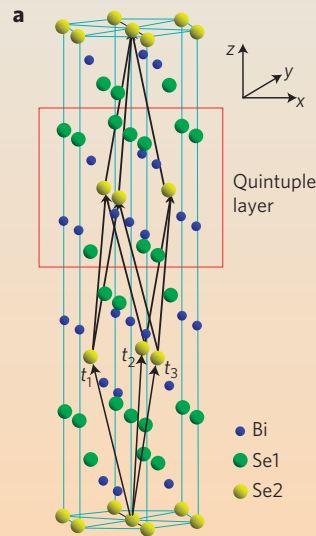
3次元 Bi₂Se₃ Bi₂Te₃

トポロジーで保護された表面金属状態

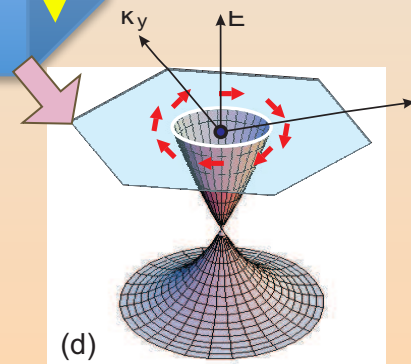
- ディラック・フェルミオン
- 不純物に散乱されない!



HgTe 量子井戸 (2007)



Bi₂Se₃ (2009)



トポロジカル絶縁体

Hot!

ちょっと見、ふつうの絶縁体.... けど、ちがう

トポロジカルな性質!

2006

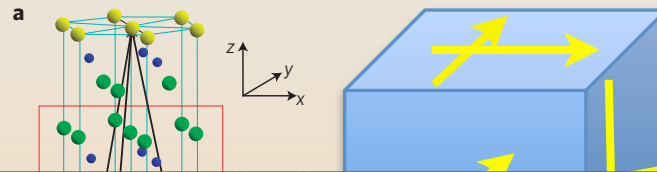
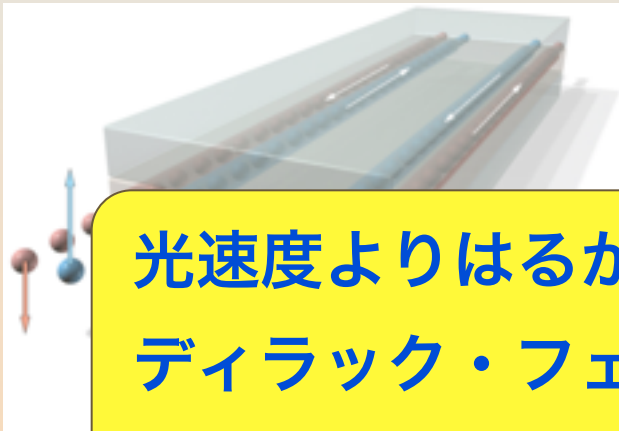
理論予言

2次元 HgTe 量子井戸

3次元 Bi₂Se₃ Bi₂Te₃

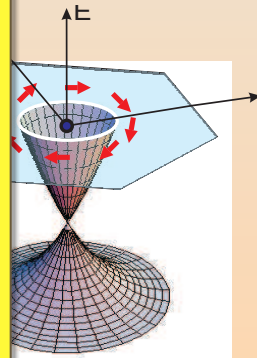
トポロジーで保護された表面金属状態

- ディラック・フェルミオン
- 不純物に散乱されない!



光速度よりはるかに遅い電子が
ディラック・フェルミオンのように振る舞う?

光速度の約300分の1



トポロジカル絶縁体

Hot!

ちょっと見、ふつうの絶縁体.... けど、ちがう

トポロジカルな性質!

2006

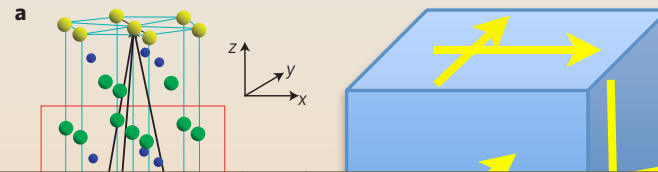
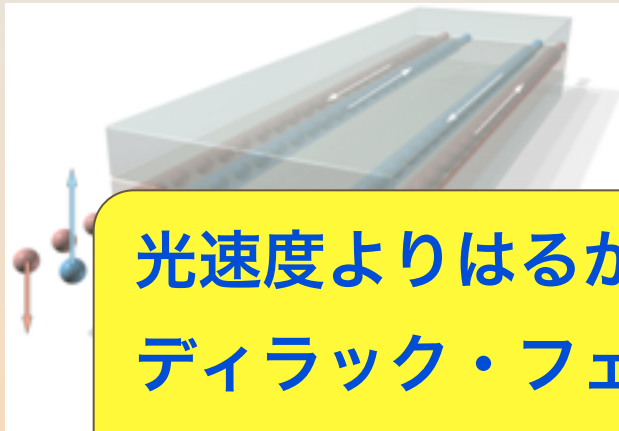
理論予言

2次元 HgTe 量子井戸

3次元 Bi_2Se_3 Bi_2Te_3

トポロジーで保護された表面金属状態

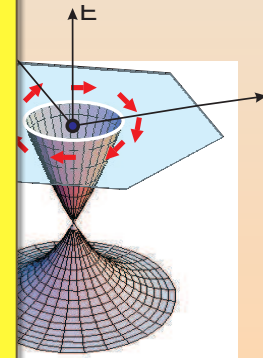
- ディラック・フェルミオン
- 不純物に散乱されない!



光速度よりはるかに遅い電子が
ディラック・フェルミオンのように振る舞う？

光速度の約300分の1

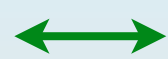
さまざまな応用：スピントロニクス，量子情報



量子スピン・ホール効果（トポロジカル絶縁体）

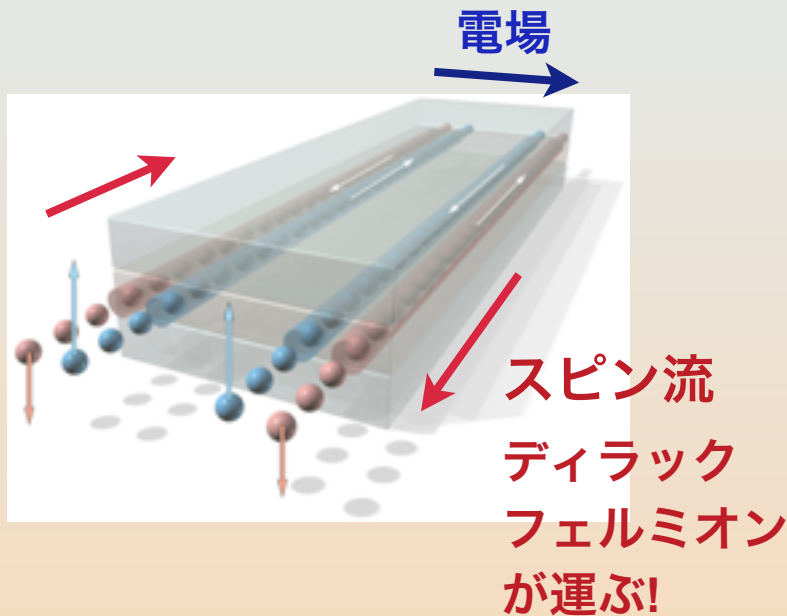
スピントロニクス

電子スピン $\uparrow\downarrow$ が情報になう



エレクトロニクス (20世紀のテクノロジー)

電流のon-offが情報になう
(ノイズの影響)



- 不純物、乱れで散乱されない
- ロス無く安定した情報伝達
- 元々量子されたスピンの担う情報量は甚大
- 強い磁場いらぬ



量子スピン・ホール効果（トポロジカル絶縁体）

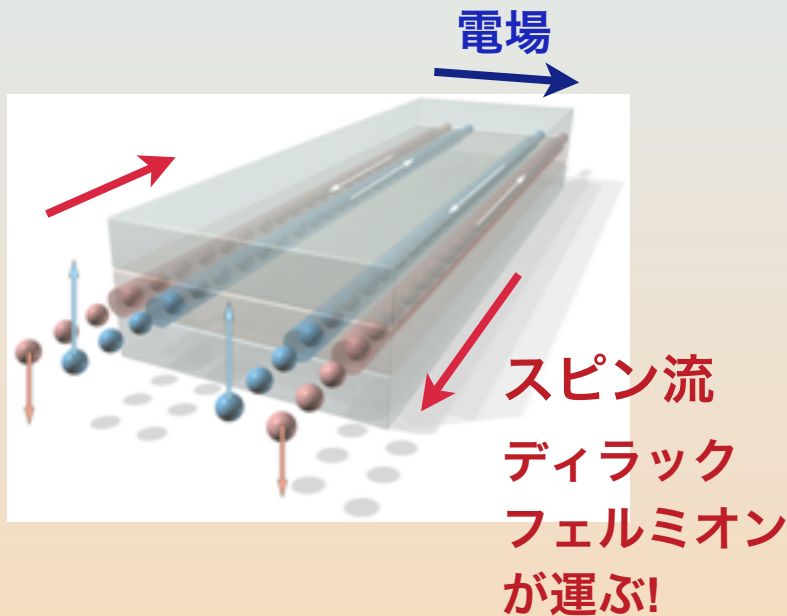
スピントロニクス

電子スピン $\uparrow\downarrow$ が情報になう



エレクトロニクス (20世紀の
テクノロジー)

電流のon-offが情報になう
(ノイズの影響)



- 不純物、乱れで散乱されない
- ロス無く安定した情報伝達
- 元々量子されたスピンの担う情報量は甚大
- 強い磁場いらぬ

21世紀の有望なテクノロジー !!



トポロジカル絶縁体

しかもテクノロジーだけではない！

トポロジカル絶縁体では電磁気学も変更される！

マックスウェル
方程式



Axion Electrodynamics

素粒子物理の未発見素粒子
(Wilczek)



マックスウェル

$$E \leftarrow \uparrow \frac{\partial B}{\partial t}$$



京都

トポロジカル絶縁体

しかもテクノロジーだけではない！

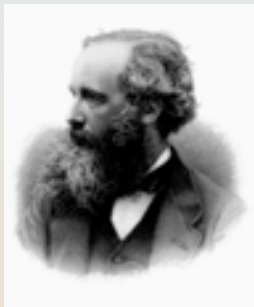
トポロジカル絶縁体では電磁気学も変更される！

マックスウエル
方程式



Axion Electrodynamics

素粒子物理の未発見素粒子
(Wilczek)



磁場と電場がAxion場を介して結合

マックスウエル

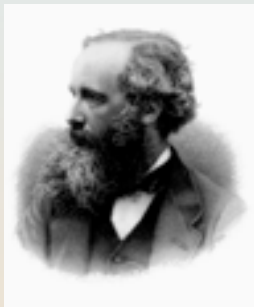
$$E \leftarrow \uparrow \frac{\partial B}{\partial t}$$



トポロジカル絶縁体

しかもテクノロジーだけではない！

トポロジカル絶縁体では電磁気学も変更される！

マックスウエル
方程式Axion Electrodynamics素粒子物理の未発見素粒子
(Wilczek)

磁場と電場がAxion場を介して結合

磁場（電場）が電場（磁場）を誘起

いわゆる電磁誘導ではない！

マックスウエル

$$E \leftarrow \uparrow \frac{\partial B}{\partial t}$$



トポロジカル絶縁体

しかもテクノロジーだけではない！

トポロジカル絶縁体では電磁気学も変更される！

マックスウエル
方程式Axion Electrodynamics素粒子物理の未発見素粒子
(Wilczek)

磁場と電場がAxion場を介して結合

磁場（電場）が電場（磁場）を誘起

いわゆる電磁誘導ではない！

Axion EM

 $E \uparrow \uparrow B$

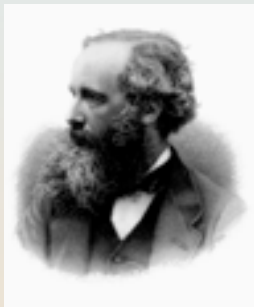
マックスウエル

 $E \leftarrow \uparrow \frac{\partial B}{\partial t}$ 

トポロジカル絶縁体

しかもテクノロジーだけではない！

トポロジカル絶縁体では電磁気学も変更される！

マックスウエル
方程式Axion Electrodynamics素粒子物理の未発見素粒子
(Wilczek)

磁場と電場がAxion場を介して結合

磁場（電場）が電場（磁場）を誘起

いわゆる電磁誘導ではない！

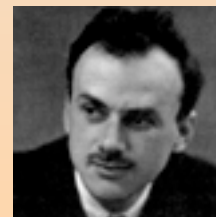
Axion EM

 $E \uparrow \uparrow B$

マックスウエル

 $E \leftarrow \uparrow \frac{\partial B}{\partial t}$

電荷がモノポールを誘起



京都

トポロジカルな量子系

トポロジカル超伝導

Hot!

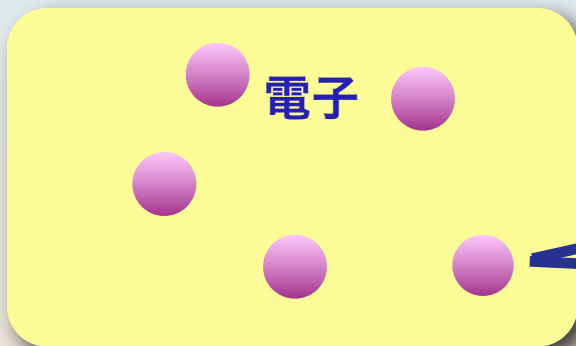


京都

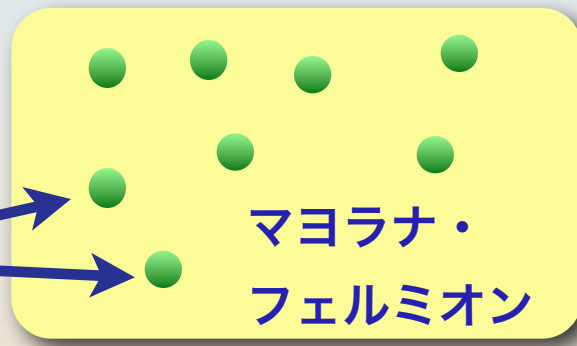
トポロジカル超伝導

Hot!

トポロジカルな超伝導内では1個の電子が2つに”分裂”したような”粒子”が発生。 → マヨラナ・フェルミオン c.f. 電子は本来、素粒子!



通常の金属, 通常の超伝導体



トポロジカルな超伝導

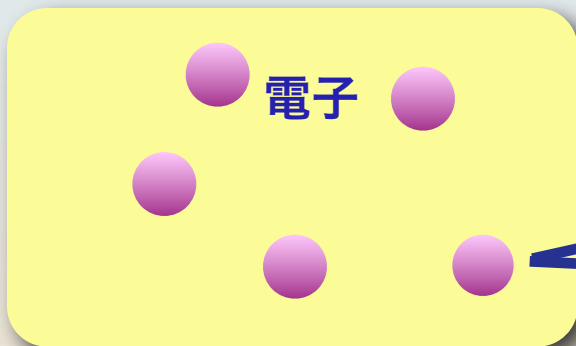
分数化!



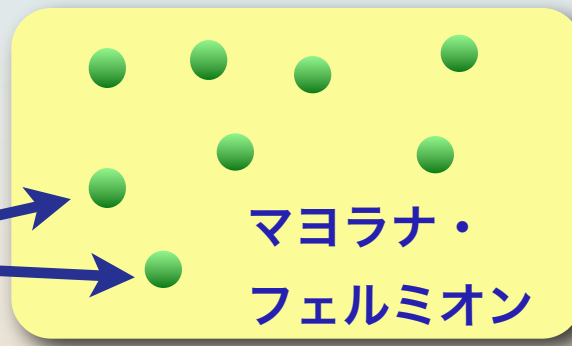
トポロジカル超伝導

Hot!

トポロジカルな超伝導内では1個の電子が2つに”分裂”したような”粒子”が発生。 → マヨラナ・フェルミオン c.f. 電子は本来、素粒子!



通常の金属, 通常の超伝導体



トポロジカルな超伝導

分数化!

しかも1個のマヨラナ・フェルミオンは存在しているとも、存在しないとも言えない奇妙な状態

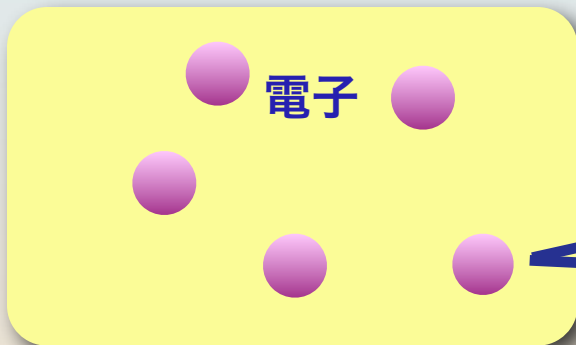
粒子=反粒子
素粒子物理
ニュートリノ?



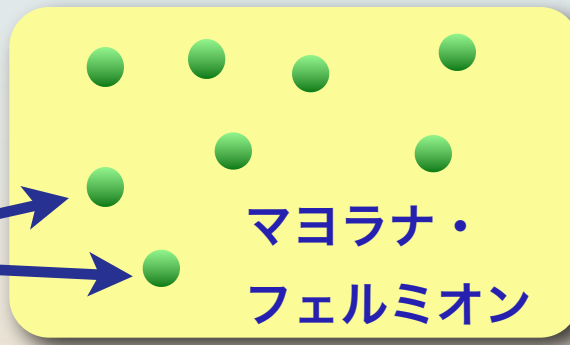
トポロジカル超伝導

Hot!

トポロジカルな超伝導内では1個の電子が2つに”分裂”したような”粒子”が発生。 → **マヨラナ・フェルミオン** c.f. 電子は本来、素粒子!



通常の金属, 通常の超伝導体



トポロジカルな超伝導

分数化!

しかも1個の**マヨラナ・フェルミオン**は存在しているとも、存在しないとも言えない奇妙な状態

粒子=反粒子

素粒子物理

ニュートリノ?

マヨラナ・フェルミオン = (1個電子有る状態)+(1個電子無い状態)
量子力学的重ね合わせ状態

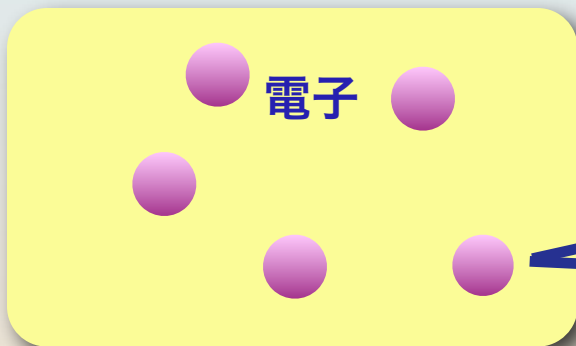
シュレーディンガーの猫



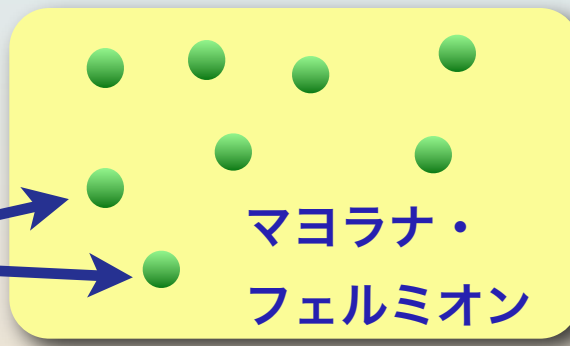
トポロジカル超伝導

Hot!

トポロジカルな超伝導内では1個の電子が2つに”分裂”したような”粒子”が発生。 **→ マヨラナ・フェルミオン** c.f. 電子は本来、素粒子!



通常の金属, 通常の超伝導体



トポロジカルな超伝導

分数化!

しかも1個のマヨラナ・フェルミオンは存在しているとも、存在しないとも言えない奇妙な状態

粒子=反粒子

素粒子物理

ニュートリノ?

マヨラナ・フェルミオン = (1個電子有る状態)+(1個電子無い状態)
量子力学的重ね合わせ状態

量子情報への応用!

トポロジカル量子計算, 最も有力! ?

シュレーディンガーの猫



トポロジカルな量子系

数理学からデバイス応用（21世紀のテクノロジー）まで

トポロジー

(ホモトピー, コホモロジー)

ディラック・フェルミオン

マヨラナ・フェルミオン

モノポール(磁気単極子)

アクシオン

(未発見の素粒子, 奇妙な電磁気学)

素粒子物理学とも関係

K-theory (超弦理論)

スピントロニクス

量子デバイス

量子情報, 量子コンピューター



トポロジカルな量子系

数理学からデバイス応用（21世紀のテクノロジー）まで

トポロジー

(ホモトピー, コホモロジー)

ディラック・フェルミオン

マヨラナ・フェルミオン

モノポール(磁気単極子)

アクシオン

(未発見の素粒子, 奇妙な電磁気学)

素粒子物理学とも関係

K-theory (超弦理論)

スピントロニクス

量子デバイス

量子情報, 量子コンピューター

とにかく

「トポロジカル」

やたら

あつい!





1次元電子系と 朝永・ラッティンジャー液体と 共形場理論

物性と素粒子が出会うとき

～ 多様性の中の普遍性 ～





1次元電子系と 朝永・ラッティンジャー液体と 共形場理論

物性と素粒子が出会うとき

～ 多様性の中の普遍性 ～



素粒子も物性も
境界ないでしょ。

凝縮系理論における朝永先生



フェルミ粒子系の集団運動

1950

Tomonaga-model



凝縮系理論における朝永先生



1次元量子多体論の父

フェルミ粒子系の集団運動

1950

Tomonaga-model



凝縮系理論における朝永先生



1次元量子多体論の父

フェルミ粒子系の集団運動

1950

Tomonaga-model

朝永の夢：実現



凝縮系理論における朝永先生



1次元量子多体論の父

フェルミ粒子系の集団運動

1950

Tomonaga-model

朝永の夢：実現

一大分野

朝永ラッティンジャー液体

凝縮系

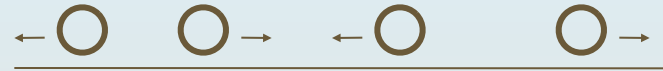
量子多体論

数理的な美しさ
多くの実験

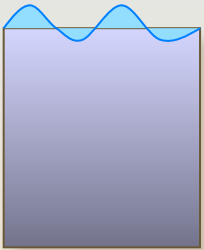
1次元電子系

温度をさげていくと？

ざわめき静まる。



静かな海



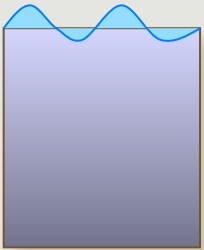
1次元電子系

温度をさげていくと？

ざわめき静まる。



静かな海



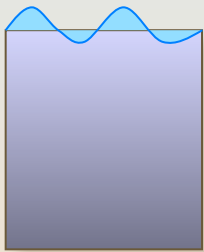
1次元電子系

温度をさげていくと？

ざわめき静まる。



静かな海



超低温では

相関距離は無限大 空間のスケールが消失

時空2次元で長さが消失

統計物理：量子臨界現象



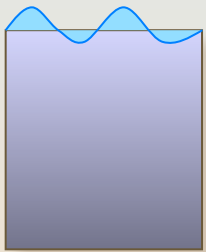
1次元電子系

温度をさげていくと？

ざわめき静まる。



静かな海



超低温では

相関距離は**無限大** 空間のスケールが消失

時空2次元で長さが消失

統計物理：量子臨界現象

個々の物質によらない普遍的な性質

Universality

多様性の中の普遍性



素粒子 弦理論

ひものふるえ

1980年代後半 超弦理論

Belavin-Polyakov-Zamolodchikov

2次元共形場の理論 (CFT)



素粒子 弦理論

ひものふるえ

1980年代後半 超弦理論

Belavin-Polyakov-Zamolodchikov

2次元共形場の理論 (CFT)



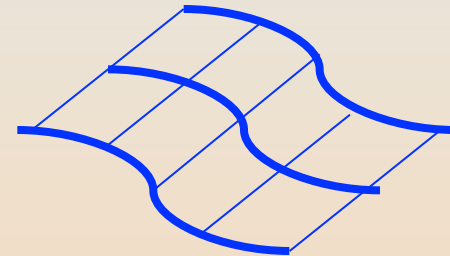
素粒子 弦理論

ひものふるえ

1980年代後半 超弦理論

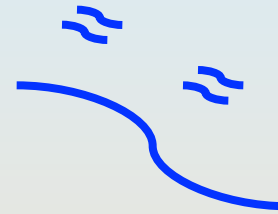
Belavin-Polyakov-Zamolodchikov

2次元共形場の理論 (CFT)



素粒子 弦理論

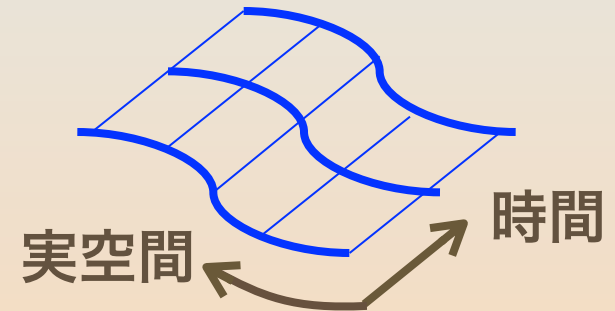
ひものふるえ



1980年代後半 超弦理論

Belavin-Polyakov-Zamolodchikov

2次元共形場の理論 (CFT)



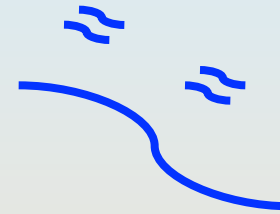
物性物理, 統計物理 臨界現象

1次元量子系：朝永・ラッティンジャー液体



素粒子 弦理論

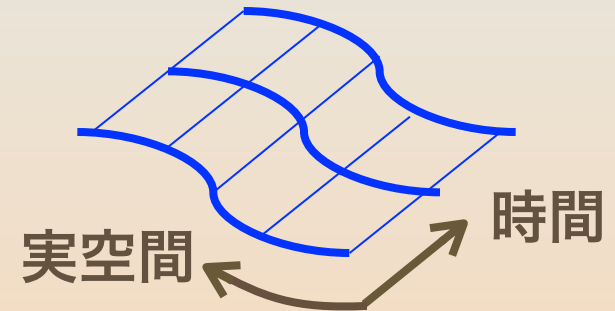
ひものふるえ



1980年代後半 超弦理論

Belavin-Polyakov-Zamolodchikov

2次元共形場の理論 (CFT)



物性物理, 統計物理 臨界現象

1次元量子系：朝永・ラッティンジャー液体

共形場の理論による解析

素粒子、統計物理、物性の協力

Bridge



朝永ラッティンジャー液体

1次元多体系の普遍概念



美しい理論体系

50年前の朝永の夢

場の理論による定式化



素粒子も物性も
境界ないでしょ。

京都

朝永ラッティンジャー液体

1次元多体系の普遍概念

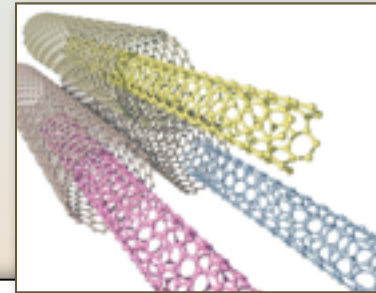
美しい理論体系



50年前の朝永の夢

場の理論による定式化

量子細線 カーボンナノチューブ

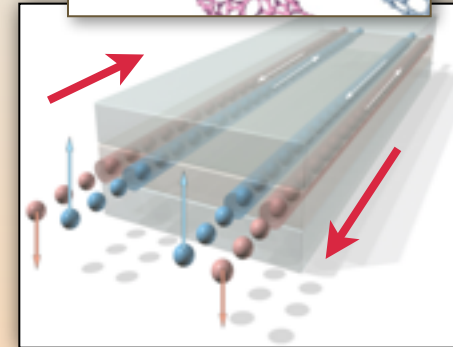


実現!!

量子Hall系, トポロジカル絶縁体のエッジ状態

遷移金属酸化物 有機伝導体

レーザートラップによる光格子



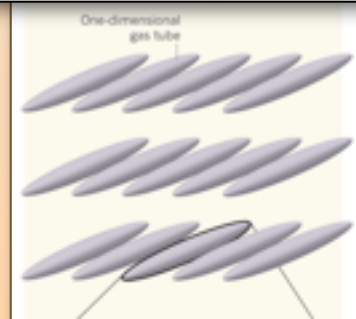
多様性の中の普遍性

基礎物理の研究舞台



素粒子も物性も
境界ないでしょ。

京都



Cold atoms

～ 凝縮系の新たな研究舞台 ～

物性物理、統計物理、レーザー物理
の紡ぐ新たな世界



Cold atoms

～ 凝縮系の新たな研究舞台 ～

物性物理、統計物理、レーザー物理
の紡ぐ新たな世界



やっぱり
境界
ないでしょ。

レーザー冷却

量子力学的効果とドップラー効果 原子気体の温度を下げる

6×10^{-8} K の低温まで到達可能

冷却された原子集団 **Rb, Na, Li, H, Yb** など

京大 高橋研



レーザー冷却

量子力学的効果とドップラー効果 原子気体の温度を下げる

6×10^{-8} K の低温まで到達可能

冷却された原子集団 Rb, Na, Li, H, Yb など



理想的な量子力学系

京大 高橋研

ボーズ・アインシュタイン
凝縮 (BEC)

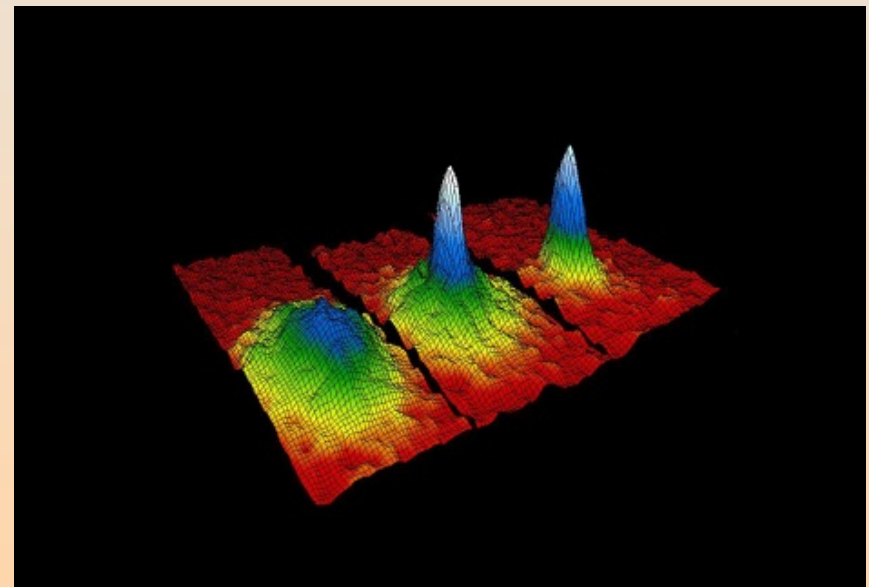


2001年

ノーベル賞



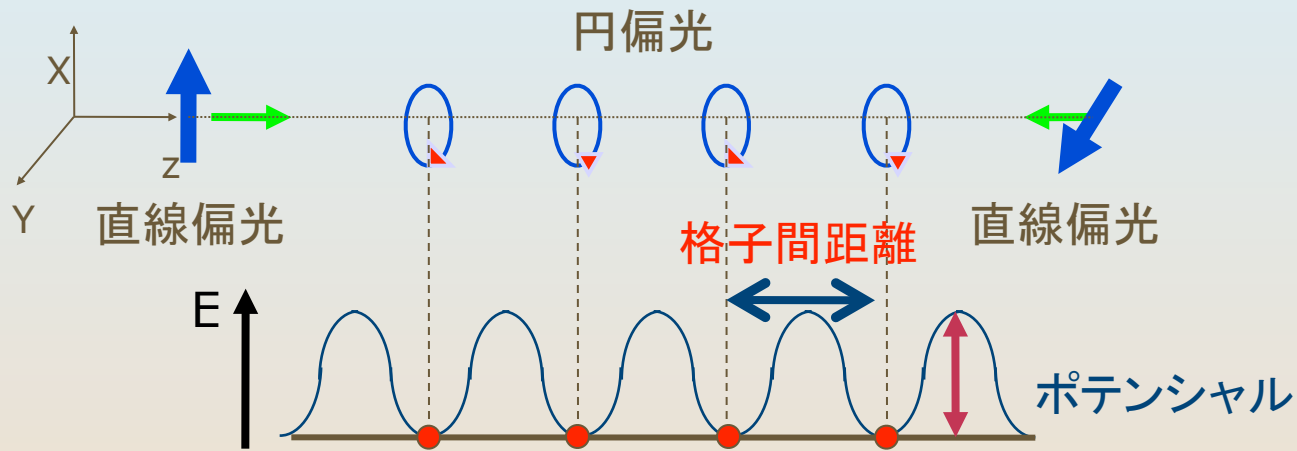
京都



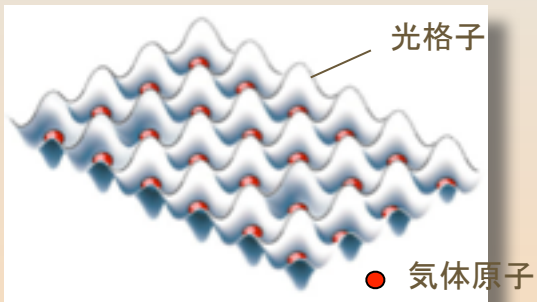
光格子(Optical Lattice)



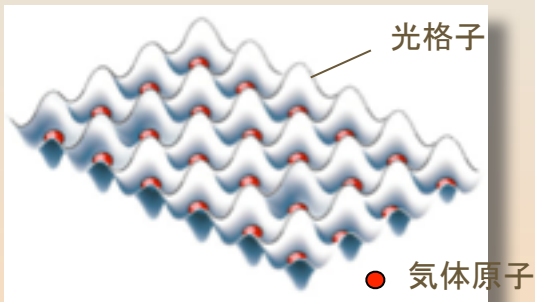
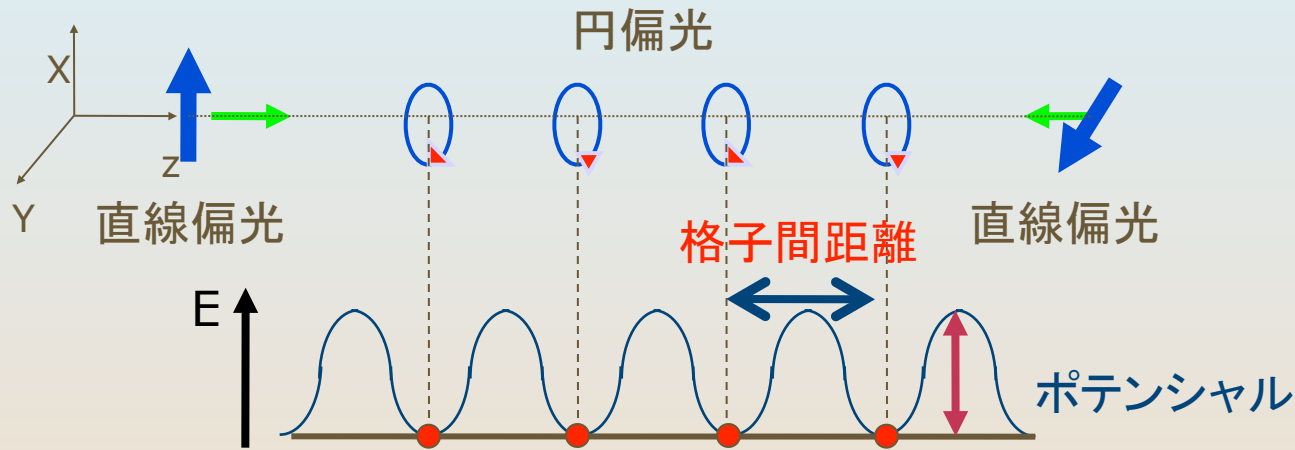
光格子(Optical Lattice)



光の作るポテンシャル



光格子(Optical Lattice)



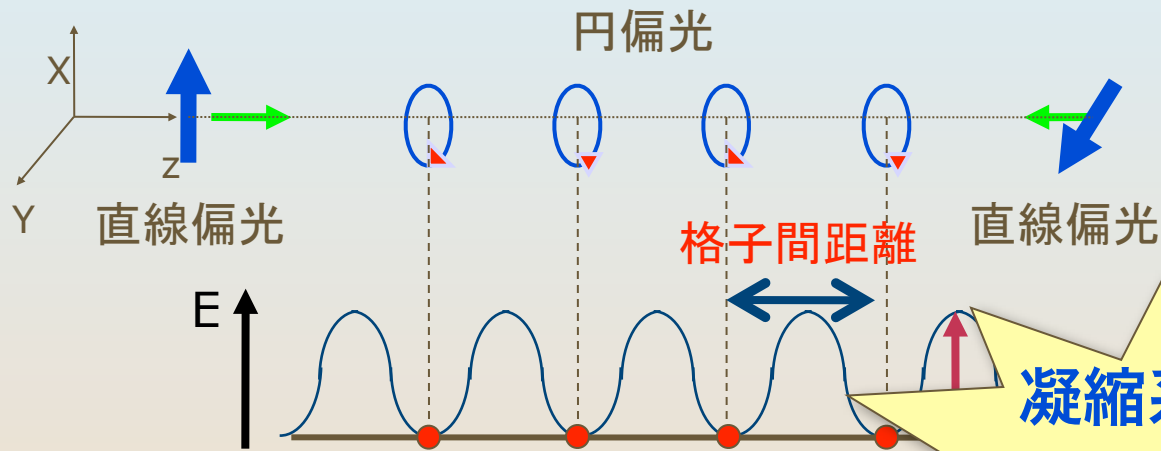
光の作るポテンシャル

- ◇ 超流動 - 絶縁体転移
- ◇ トポロジカルな量子相
- ◇ 人工的なゲージ場 (“電磁場, ”グルーオン場”) の生成
- ◇ 1次元、2次元の相関系

などなど

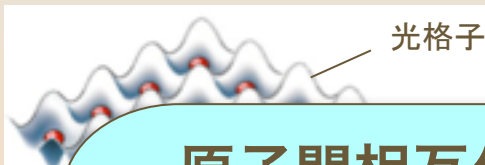


光格子(Optical Lattice)



凝縮系理論

New field !



光格子

光の作るポテンシャル

原子間相互作用や
空間次元も自在に操れる
不純物，乱れの影響ない
固体物理にはない状態
も可能

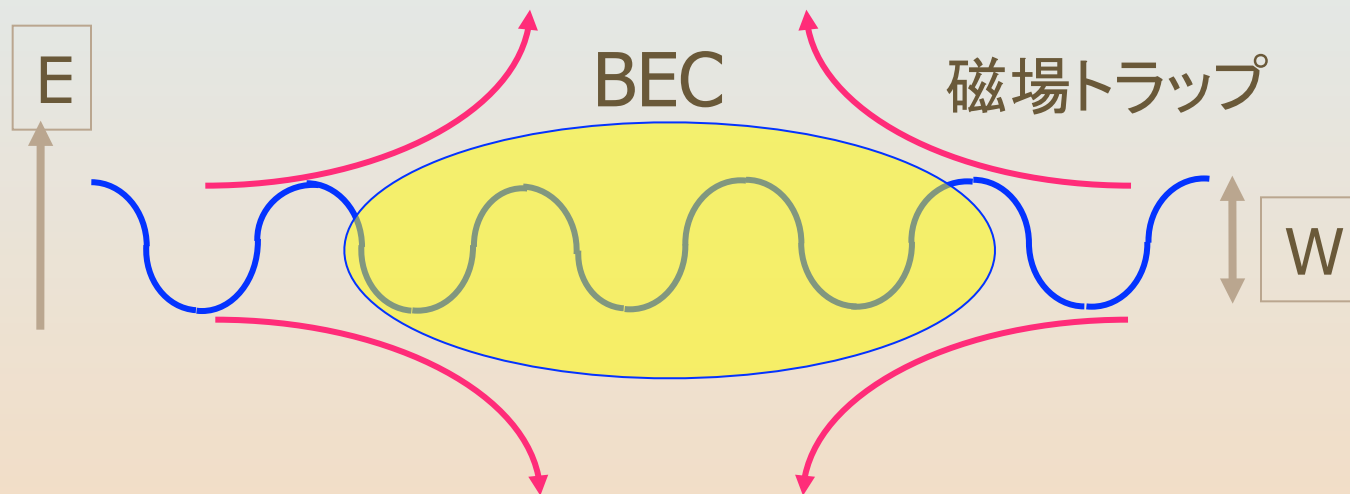
- ◇ 超流動 - 絶縁体転移
- ◇ トポロジカルな量子相
- ◇ 人工的なゲージ場 (“電磁場,
”グルーオン場”) の生成
- ◇ 1次元、2次元の相関系

などなど

光格子での実験

(Bloch et.al. 2002)

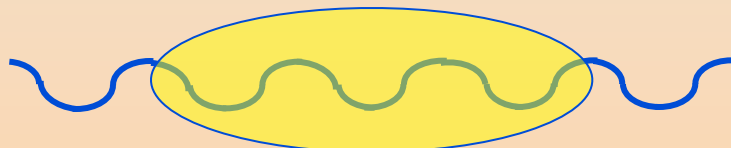
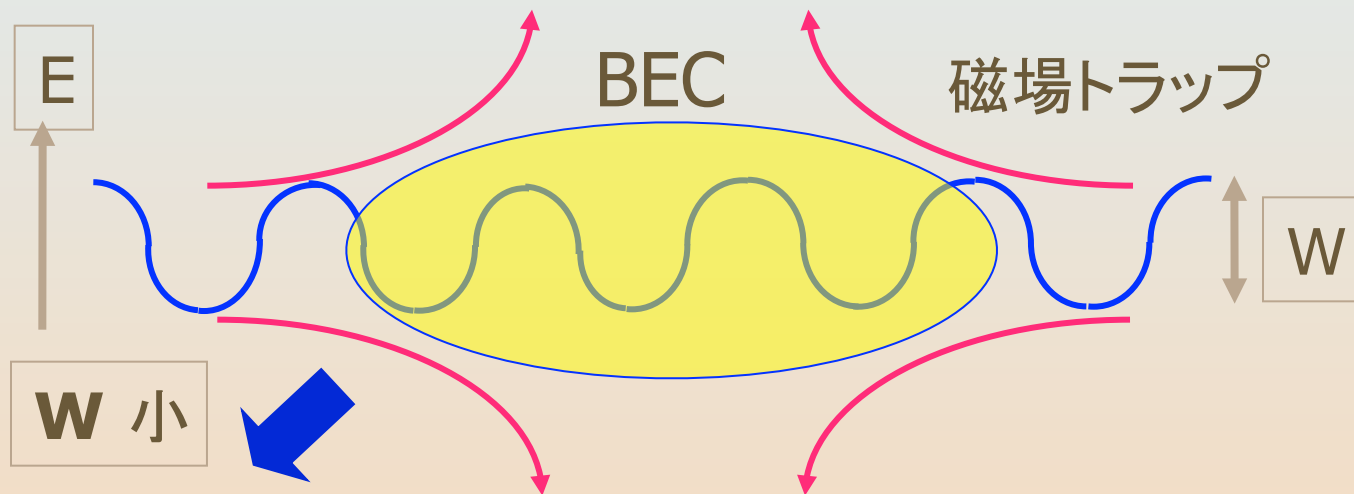
ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)



光格子での実験

(Bloch et.al. 2002)

ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)



超流動

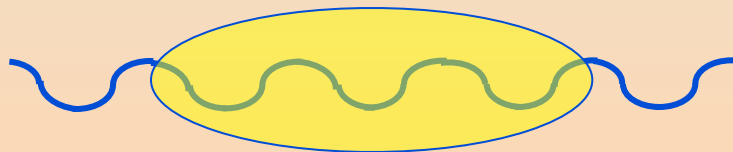
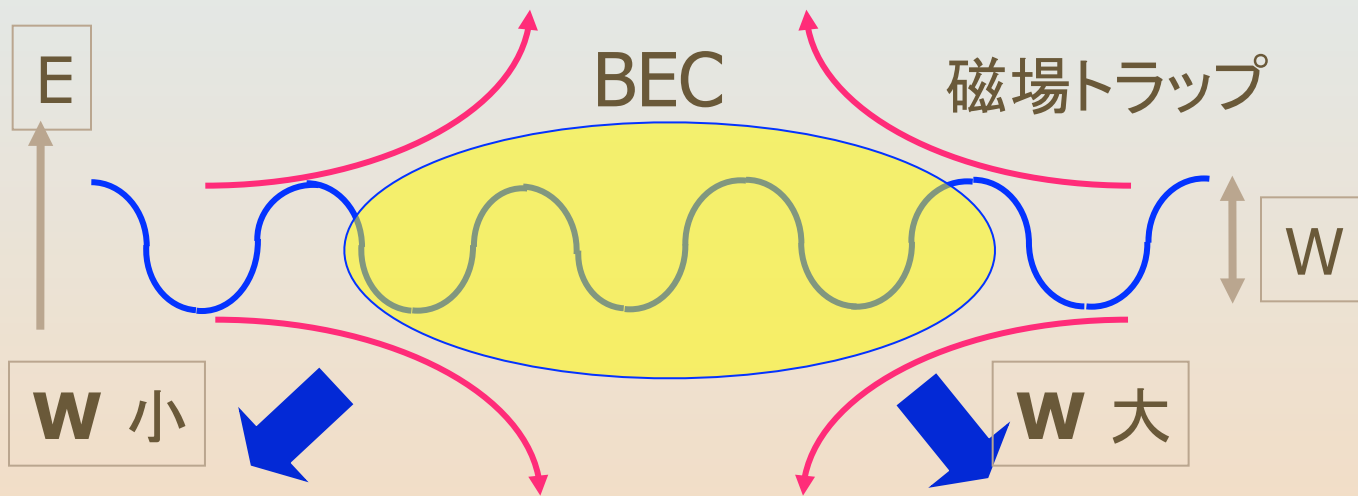


京都

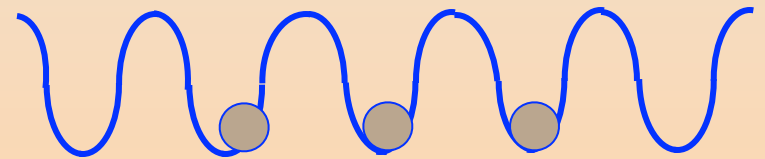
光格子での実験

(Bloch et.al. 2002)

ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)



超流動



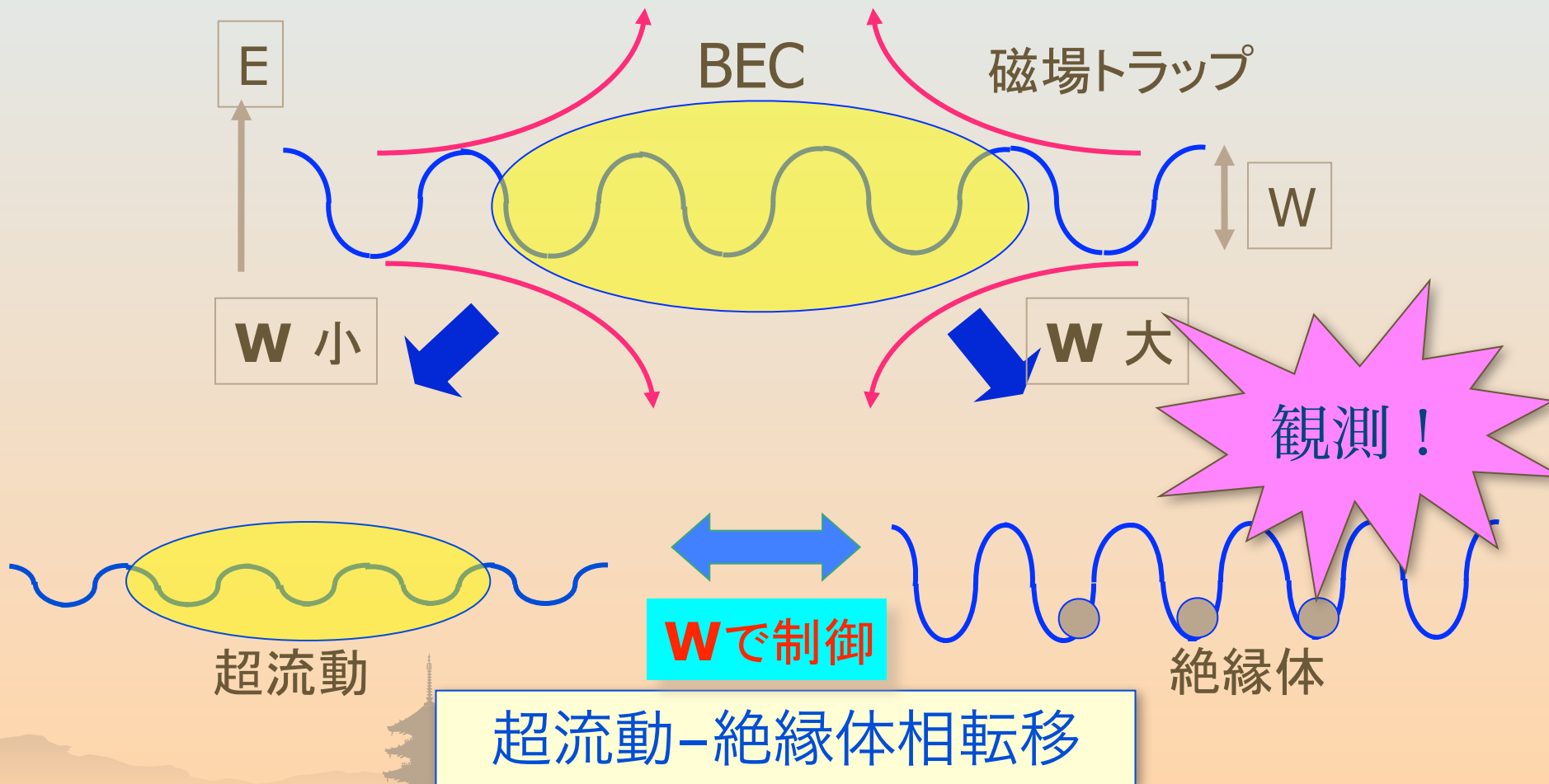
絶縁体



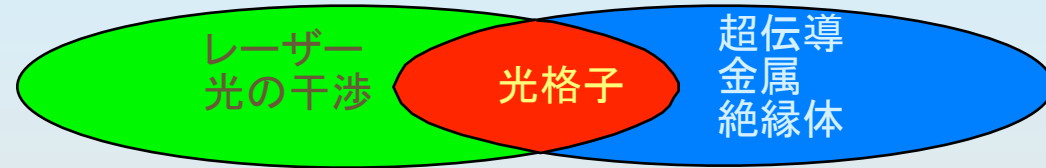
光格子での実験

(Bloch et.al. 2002)

ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)



冷却原子



◇中性原子のBEC

◇光格子： 量子パラメタ、自由に操れる

◇人工的なゲージ場(中性原子に働く“電磁場”,
“グルーオン場” (人工QCD)) の生成
などなど

固体物理には
ないような

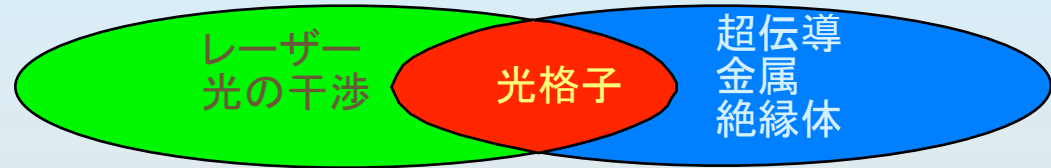
エキゾチック
量子状態

理想的な **New** 研究舞台

レーザー物理、統計物理、物性物理



冷却原子



◇中性原子のBEC

◇光格子： 量子パラメタ、自由に操れる

◇人工的なゲージ場(中性原子に働く“電磁場”, “グルーオン場” (人工QCD)) の生成
などなど

固体物理には
ないような

エキゾチック
量子状態

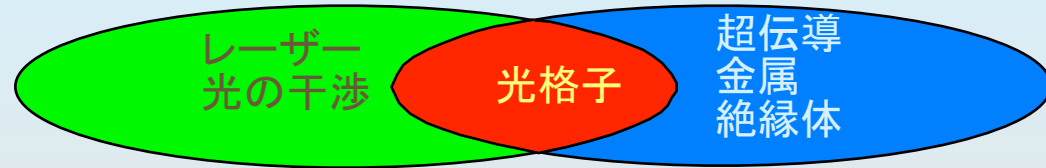
凝縮系理論として

理想的な **New** 研究舞台

レーザー物理、統計物理、物性物理



冷却原子



◇中性原子のBEC

◇光格子： 量子パラメタ、自由に操れる

◇人工的なゲージ場(中性原子に働く“電磁場”, “グルーオン場” (人工QCD)) の生成
などなど

固体物理には
ないような

エキゾチック
量子状態

凝縮系理論として

理想的な **New** 研究舞台

レーザー物理、統計物理、物性物理

Cold atoms are very hot !



まとめ

凝縮系物理学

量子論 多体物理

分野の広がり

超伝導・超流動 強相関電子系 量子相転移
光格子 ナノ量子系 量子スピン系 など

まとめ

凝縮系物理学

量子論 多体物理

分野の広がり

超伝導・超流動 強相関電子系 量子相転移
光格子 ナノ量子系 量子スピン系 など

- ◇豊富な実験、新奇な現象の発見
 - ◇量子物理、統計物理の活躍舞台
- 基礎物理学の手法

基礎物理の研究舞台

多様性、普遍性、そして創発性

キーワード

**Thank you
for your attention**

