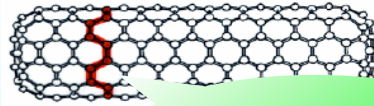
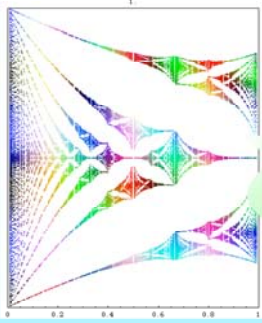


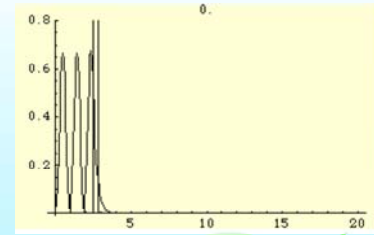
2007年12月20日

筑波大学数理物質科学研究科コロキウム



カーボンナノチューブ

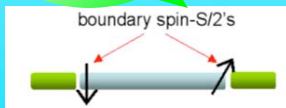
Hofstadterの蝶



トンネル効果

ものの区別から トポロジカルな量子相転移へ 現代的な凝縮系物理学を学ぼう！

量子もつれ



筑波大学大学院数理物質科学研究科

物理学系

初貝 安弘

$$\gamma_C = \int_C A_\psi = \int_C \langle \psi | d\psi \rangle$$

ベリー位相



筑波大学
University of Tsukuba

本日の講義

- ★ 凝縮系物理学とはなにか
 - ★ 物質の「相」と「相転移」(ものの区別とは?)
- ★ 量子論とはなにか
 - ★ 粒子性と波動性
- ★ 量子論的凝縮系物理学の対象とする物質相と現象
 - ★ トンネル効果
 - ★ ナノ物理、メゾスコピック系の物理
 - ★ カーボンナノチューブ、グラフェン
- ★ 対称性のやぶれと相転移
- ★ トポロジカルな量子相転移
 - ★ ベリー位相、エンタングルメント

凝縮系物理学とはなにか？

- ★ 凝縮系物理学 = 物性物理学 = 物の性質と特性
 - ★ Condensed Matter Physics
- ★ 物質の多様な形態（相）を研究する
 - ★ 水の三態（液体、気体、固体）
 - ★ 金属はなぜ電気を通す
 - ★ 磁石はなぜ磁力ももつのか？
 - ★ 陶器はなぜ絶縁体なのか？
 - ★ なぜ水は透明か？
 - ★ 金、銀はなぜキラキラするのか？
 - ★ ルビーはなぜ赤い？
 - ★ ダイヤモンドと鉛筆の違いは？
 - ★ ...
- ★ 物質における種々多様な現象する
 - ★ 蛍光灯はなぜ光る。信号機の赤青黄はどうやってつくられる？
 - ★ どうやってCDに書きこむのか
 - ★ トランジスタってなに？？（パソコンはどうしてお利口??）
 - ★ ...

凝縮系物理学とはなにか（続き）？

- ★ （量子）統計力学をその基礎とする
 - ★ 多数の粒子が集まったときの物理的振る舞いの理解
 - ★ 温度とはなにか？
 - ★ 「相」とはなにか？
 - ★ 物質相の変化としての相転移
- ★ 凝縮系物理学は物質科学の基盤
 - ★ 化学、材料科学、工学、生物学の物質的基礎
- ★ 凝縮系物理学は現代の科学文明の基礎
 - ★ 現代社会の物質的基礎
 - ★ 環境問題、生命科学、すべての物質的基礎

現代の凝縮系物理学

- ☆ 「量子論的凝縮系物理学」
- ☆ 量子力学的物質相
 - ☆ 「量子相」「量子相転移」
 - ☆ 量子液体相、スピン液体相
 - ☆ ナノワールドにおける現象はすべて量子力学による記述を要求
- ☆ 実験室で実験可能な量子力学的現象
 - ☆ 超伝導、超流動、レーザー、ボーズ凝縮、量子ホール効果
 - ☆ 磁石、スピンの存在
 - ☆ アハロノフ・ボーム効果、ベリー位相
- ☆ 量子計算機の物質的基礎。
 - ☆ スピンによる量子ビット
 - ☆ 量子ホール系を用いた量子干渉デバイス

物理学の中の凝縮系物理学

☆ ノーベル物理学賞 (凝縮系物理学)

年	受賞者	受賞理由
2006	ジョンC.マザー ジョージF.スムート	光の量子論
2005	ロイJ.グラウバー ジョンL.ホール テオドールW.ヘンシュ	レーザー冷却
2004	デヴィッドJ.グロス H.デヴィッドポリツァー フランクウィルチ	異方的超伝導と超流動
2003	アレクセイA.アブリコソフ ヴィタリーL.ギンツブルグ アンソニーJ.レグgett	ヘリウムの超流動
2002	小柴昌俊 レイモンドデイヴィッド リカルドJ.レイティ	原子のボーズ凝縮
2001	エリックA.コ ルフボングケターレ カールE.ライマ	半導体ヘテロ構造
2000	ジャックキ ハーバートクロ ジョレスアルフォロフ	高分子の統計力学
1999	ヘラルドドゥスヘットホーフト E.マルティネスフェルトマン	磁性と乱れた系の局在

1998	ホルストL.シュ ダニエルC. ロバートB.ラフリン	量子ホール効果 における分数電荷
1997	ステイブ クロードコー ウィリアムD	量子ホール効果
1996	デビッドM.リー	ヘリウム3の超流動の発見
1994	C.G.シャール B.N.プロックハウス R.A.ハルス	高密度物質研究のための中性子散乱技術の開発 連発レーザーの発見
1991	P.G.ドジャンヌ R.E.テイラー	素粒子実験用の多線式比例計数管の開発 より複雑な高分子、液晶、超伝導性材料の相転移現象の数学的研究
1989	H.G.デーメルト W.バウル N.F.ラムゼー	中性子散乱技術の開発

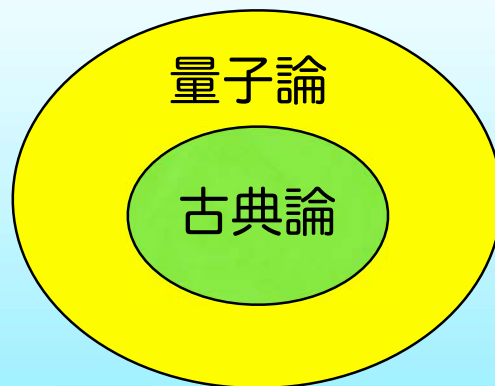
1988	J.S.	高温超伝導体
1987	K.A.ミューラー	STM
1986	A.フェルスカ	電子顕微鏡に関する基礎研究と開発
1985	S.ファン S.チャン	量子ホール効果の発見と物理定数の測定技術の開発
1983	ジャン ファン	物質の相転移に関連した臨界現象に関する理解
1980	A.L. K.M. J.W.クロニン V.L.フィッチ	臨界現象と 繰り込み群
1979	S.ワインバーグ S.L.グラショウ	中性カレントの予言、電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論への寄与
1977	A.サラマ P.L. P.W.アンダーソン N.F.モット J.H.ヴァンヴレック	磁性と乱れた系の局在

量子論??

- ★ 古典論から量子論へ
- ★ 光の波動性と粒子性
- ★ 物質の粒子性と波動性
- ★ 「小さいものほど基本的？」 NO!!
 - ★ 階層的な物理的認識
- ★ 量子論的物質科学へ：現代の物性科学

古典論から量子論へ

★ 古典論と量子論



★ プランク定数：唯一の量子論固有の定数

$$\hbar = 6.626068 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$$

$$[\text{J} \cdot \text{s}] = (\text{エネルギー}) \times (\text{時間}) = (\text{運動量}) \times (\text{長さ}) = (\text{角運動量}) \\ = [\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}] = [\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s} \cdot \text{m}]$$

(エネルギー) × (時間)

(運動量) × (長さ)

(角運動量)

}

>> \hbar : 古典的

\approx \hbar : 量子的

磁石は巨視的な量子的現象である

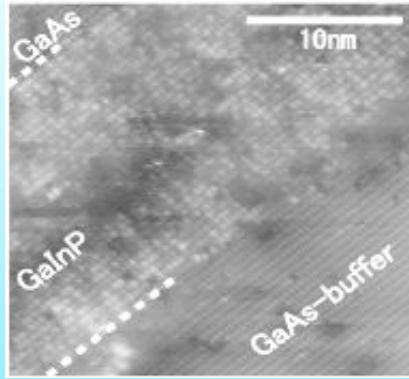
- ☆ 電子は電荷の他に固有の角運動量を持つ (スピン)
- ☆ スピン = $\hbar/2$: \hbar と同程度 : 量子論による記述
- ☆ 磁石 : 電子のスピンが一つの方向にそろったもの
 - ☆ スピンとは何だろうか (Dirac)
 - ☆ なぜスピンの方向がそろったのか?
 - ☆ そろいかたにもいろいろある
 - ☆ 多様な磁気秩序相
 - ☆ $\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow$ (反強磁性 : ネール状態)
 - ☆ $\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$ (強磁性)
 - ☆ どうやって磁気秩序を区別するか?

光の波動性と粒子性

- ☆ 回折格子において光は回折する (波動性)
- ☆ 微弱な光は1つ、2つと数えることができる (粒子性)
- ☆ 発光現象
 - ☆ 発光ダイオード、蛍光灯
 - ☆ 液晶
- ☆ 光の吸収

物質の波動性と粒子性

- ☆ 原子は1つ、2つと数えることができる (STM) (粒子性)



- ☆ 原子スケールの回折格子において物質波は回折する (波動性)

- ☆ 原子線ホログラフィー

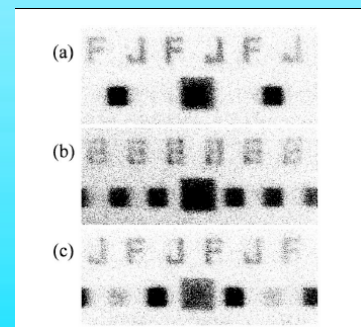
VOLUME 84, NUMBER 18

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1 MAY 2000

Interferometric Modulation of an Atomic Beam by an Electric Field: A Phase Hologram for Atoms

J. Fujita,¹ S. Mitake,² and F. Shimizu²

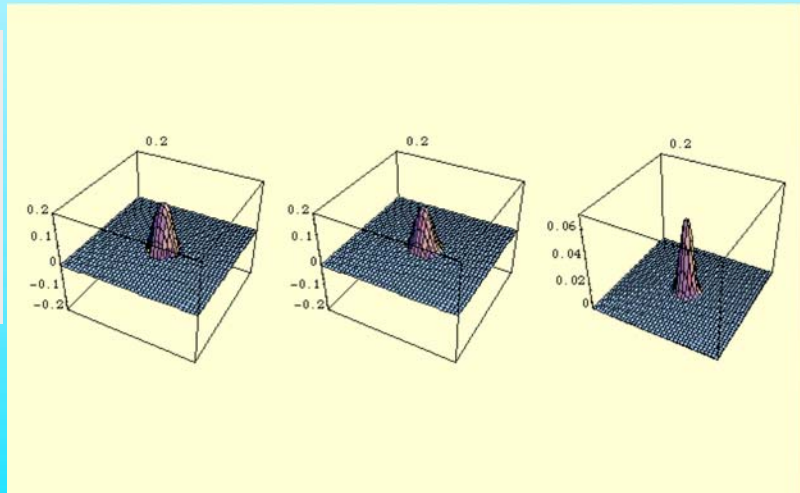
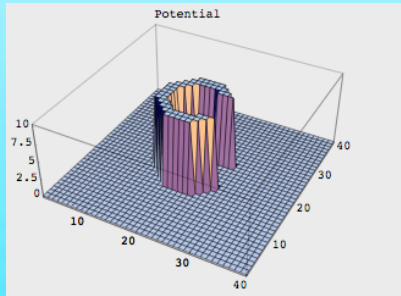
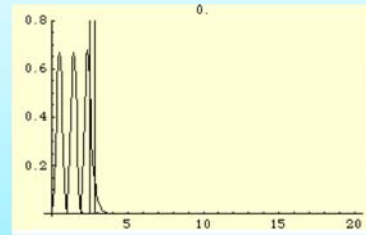
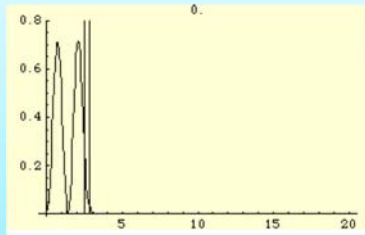


ナノ物理学、メゾスコピック系の物理

- ☆ ナノ = 10^{-9} 倍
- ☆ メゾスコピック？
 - ☆ マクロスコピック：巨視的
 - ☆ ミクロスコピック：微視的
- ☆ 量子効果が主要な役割を果たす

凝縮系物理における量子効果の例

☆ トンネル効果

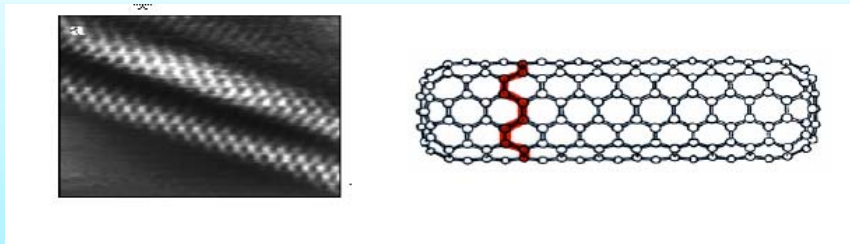


量子相と量子相転移

- ☆ カーボンナノチューブとグラフェン
- ☆ 固体中の磁場効果:Hofstadterのバタフライ
- ☆ 超伝導と異方的超伝導体の量子相転移
- ☆ 量子ホール効果と量子相転移

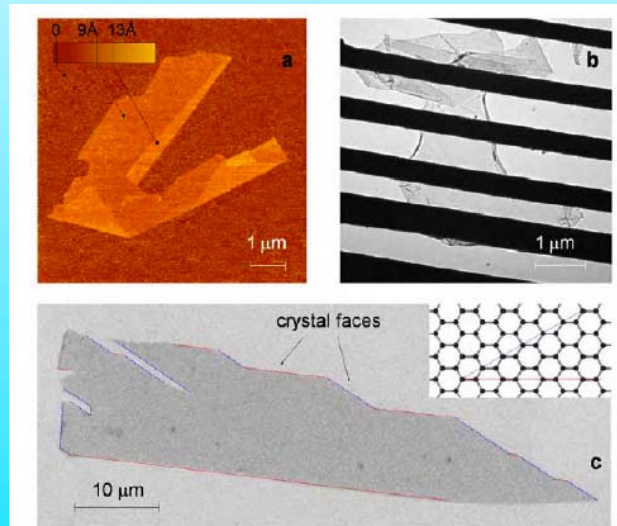
カーボンナノチューブとグラフェン

★ カーボンナノチューブ



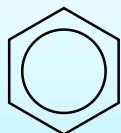
★ グラフェン

★ 鉛筆の中の相対論的粒子

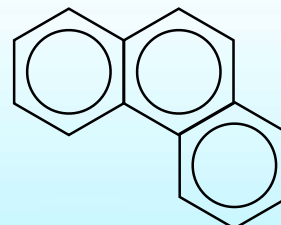


Graphene??

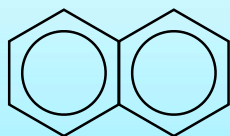
★ π -electron systems



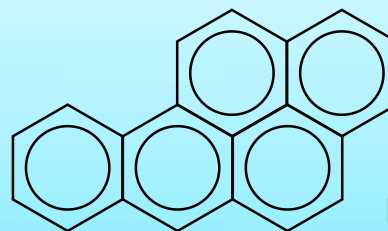
benzene



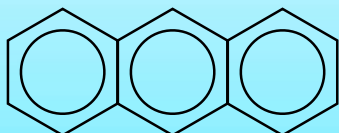
phenanthrene



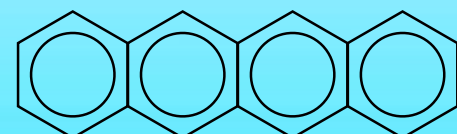
naphthalene



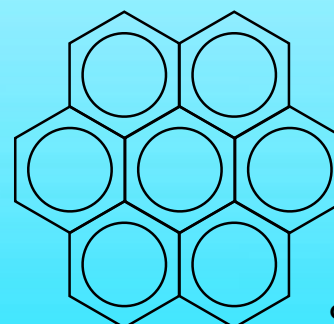
benzopyrene



anthracene



tetracene



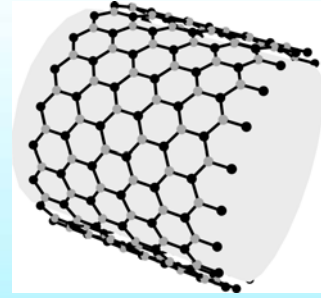
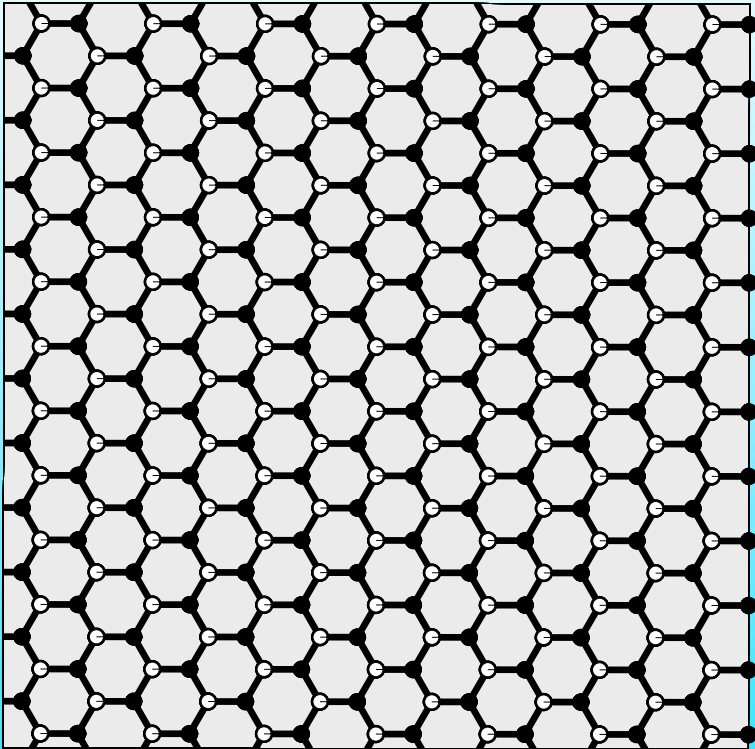
coronene



pentacene

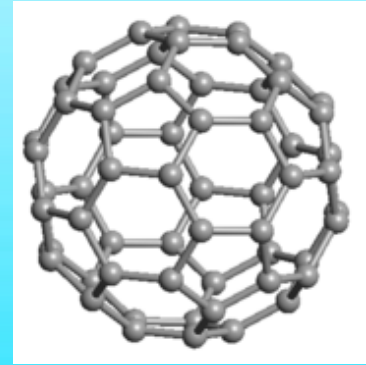
Graphene??

Graphene



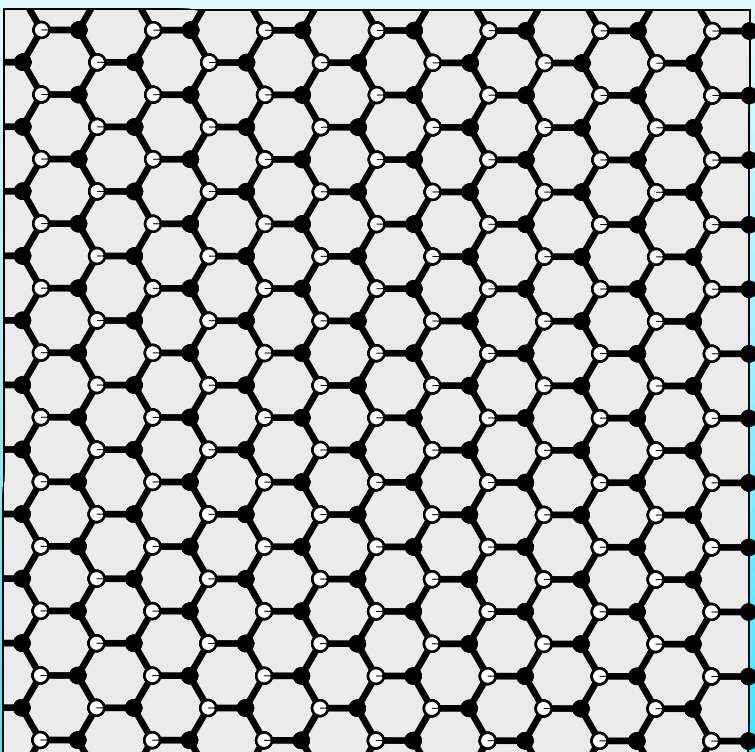
Carbon Nano-Tube

Fulerene



Graphene

Graphene



物質中の相対論的粒子

Effective Theory:

massless Dirac Equation

$$H\psi = E\psi$$

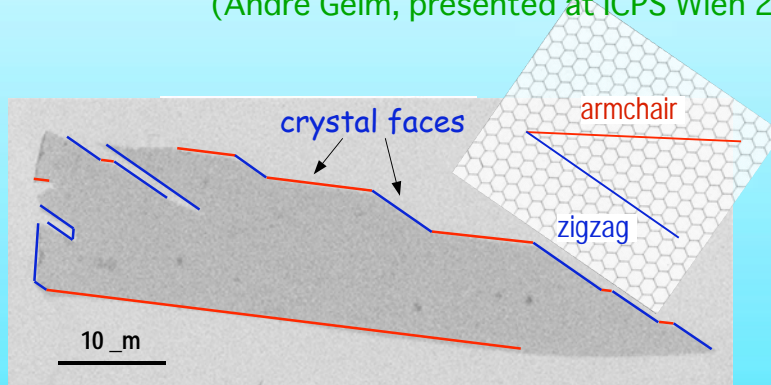
$$H = c\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} = c(\sigma_x p_x + \sigma_y p_y)$$

$$= c \begin{pmatrix} 0 & p_x - ip_y \\ p_x + ip_y & 0 \end{pmatrix}$$

Graphene

Graphene Crystallites

(Andre Geim, presented at ICPS Wien 2006)

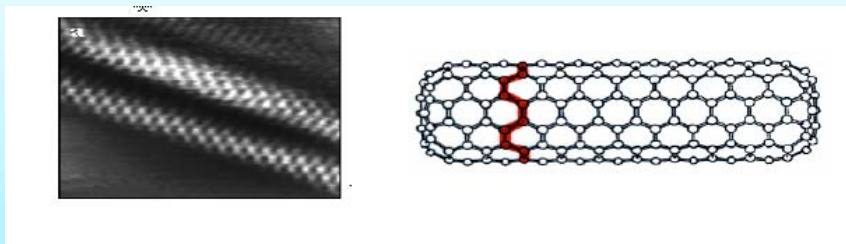


QED in a pencil

鉛筆のなかの量子電磁気学

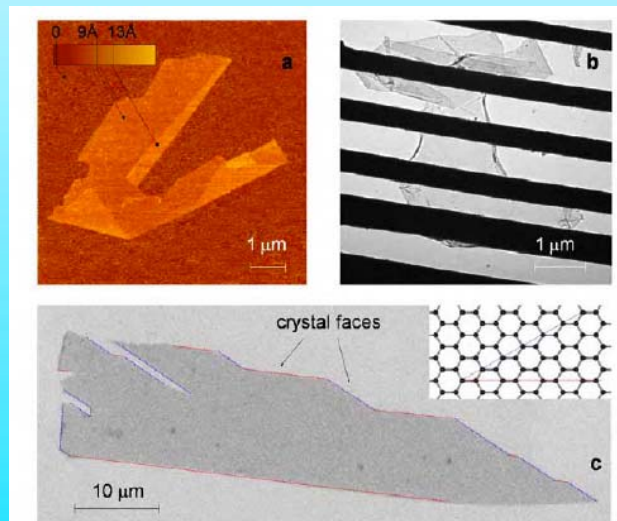
凝縮系物理学の多様性と普遍性！

★ カーボンナノチューブ

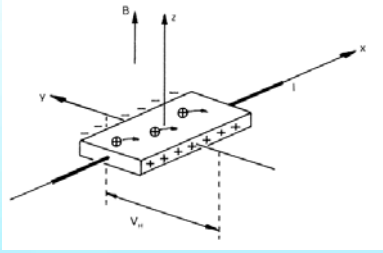


★ グラフェン

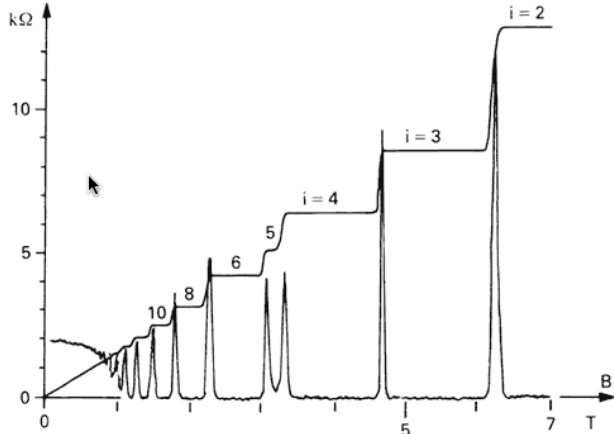
★ 鉛筆の中の相対論的粒子



量子ホール効果：固体中の量子磁気効果



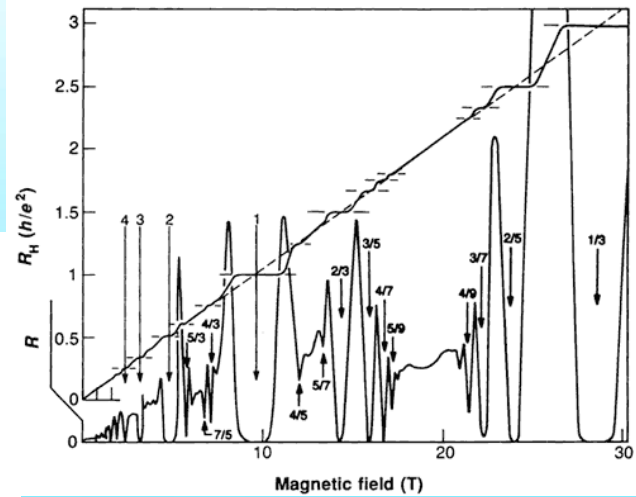
$$V = R_H I$$



Klaus von Klitzing : Nobel prize 1985



The Nobel Prize in Physics 1985



Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer, Daniel C. Tsui : Nobel prize 1998



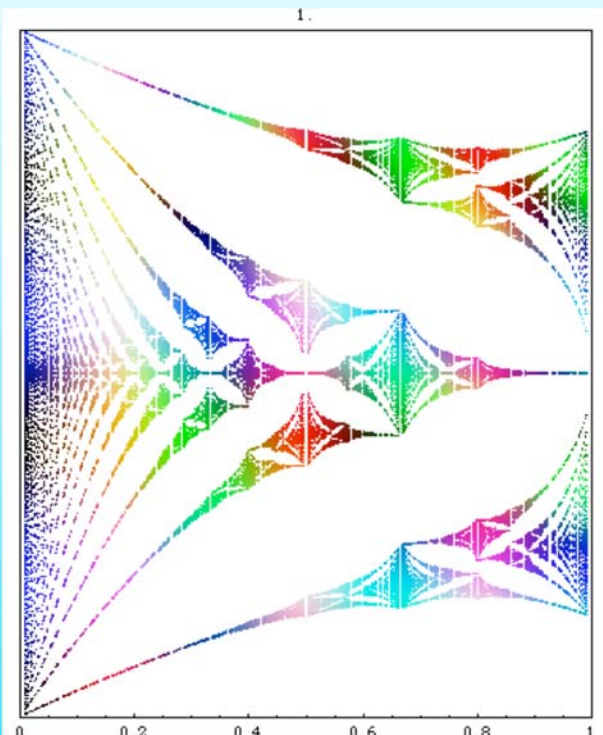
The Nobel Prize in Physics 1998



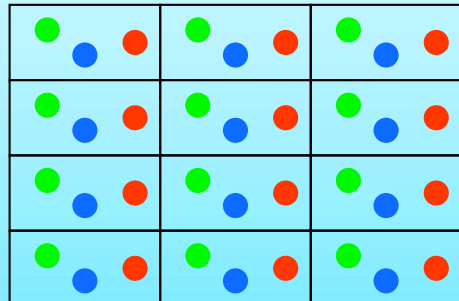
KUNGL. VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Hofstadterの蝶

周期的ポテンシャル中での磁場中の電子のエネルギー準位

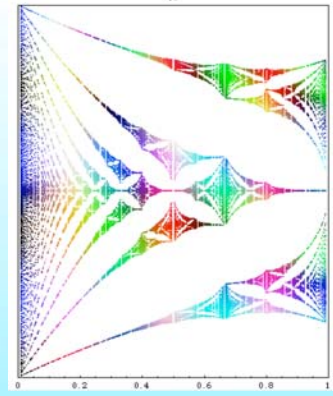
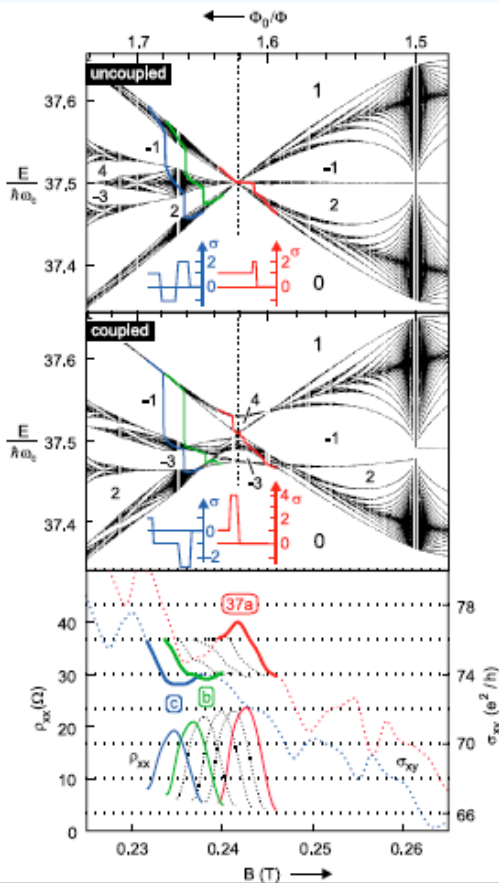


結晶格子は周期的ポテンシャルをつくる



典型的なフラクタル構造

Hofstadterの蝶



ナノテクノロジーにて 実現

M. C. Geisler, J. H. Smet, V. Umansky, K. von Klitzing, B. Naundorf, R. Ketzmerick and H. Schweizer
Phys. Rev. Lett. 92, 256801 (2004)

超伝導と超流動：相転移と量子相転移

BCS理論

Bardeen, Cooper and Schrieffer



The Nobel Prize in Physics 1972

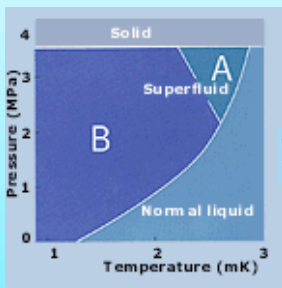
超伝導にもいろいろある：量子相転移

高温超伝導体の発見

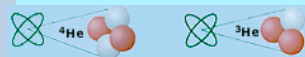
J. Georg Bednorz K. Alexander Müller



The Nobel Prize in Physics 1987



量子相転移



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



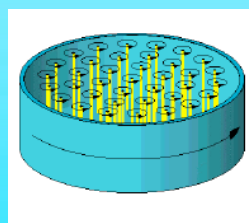
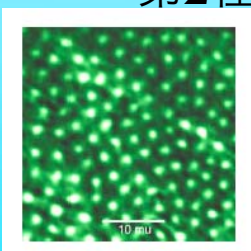
The Nobel Prize in Physics 1996

第2種超伝導

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



The Nobel Prize in Physics 2003



ものの区別からトポロジカルな量子相転移へ

☆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

秩序と秩序変数

☆磁気秩序（磁石）

室温の磁石

(秩序正しい)



磁石をバーナーで熱すると

(でたらめ)

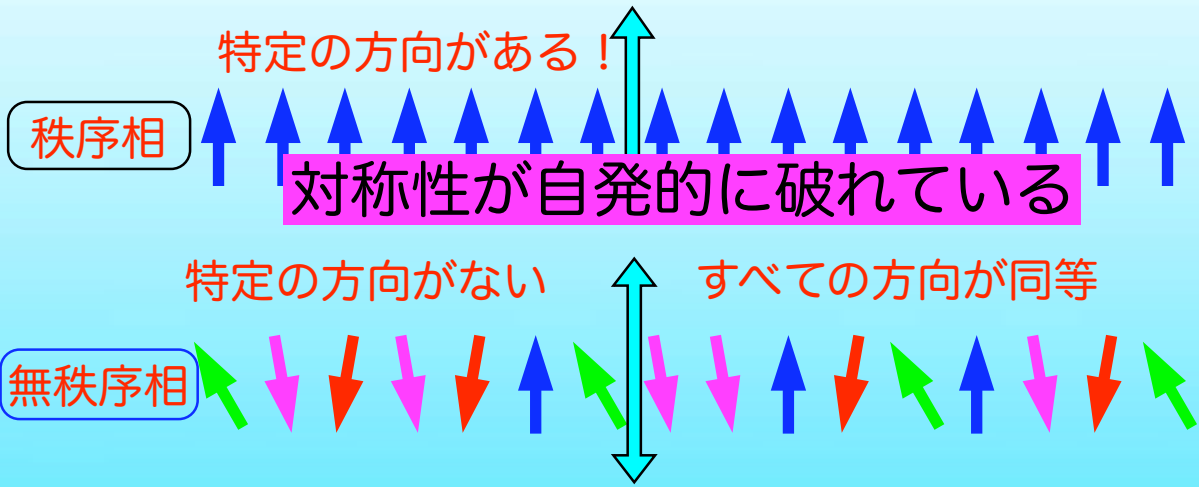


秩序変数：矢印！ “vector”

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

☆ 対称性の観点から区別しよう！！



秩序変数 $m(\vec{r})$: $\begin{cases} \neq 0 & \text{対称性が破れている} \\ = 0 & \text{対称性が破れていない} \end{cases}$

「対称性の破れ」で物質相の記述に十分か

- ☆ 古典物理学では十分
- ☆ 量子的な物理学では？
- ☆ 絶対零度での相転移へ拡張することが必要

90年代

量子相転移: 絶対零度の量子相の転移

秩序変数

基本的で極めて重要

対称性の破れ

超伝導

超流動

電荷密度波

量子磁性

スピン密度波

「対称性の破れ」で物質相の記述に十分か

☆ 真に量子的な相

☆ いかなる対称性の破れもない

☆ 古典的な秩序変数が存在しない

☆ 多種多様な物質相が存在する！！

量子液体相、スピン液体相

秩序変数

対称性の破れ

トポロジカル秩序

量子秩序

トポロジカルな量子相転移

量子液体相、スピン液体相とは??

☆ 整数量子ホール相、分数量子ホール相

☆ ダイマー系

☆ RVB状態、VBS状態

☆ 近藤格子

☆ グラフェン

トポロジカルな量子相転移

トポロジカルな量子的秩序変数

幾何学的位相

ベリー位相

チャーン数

エンタングルメント

トポロジカルな量子的秩序変数

トポロジカルな量子相転移

幾何学的位相

ベリー位相

チャーン数

21世紀

The work is now under progress

終わりに

★Condensed
Matter
Physics
を学ぼう！

筑波大学大学院数理物質科学研究科 物理学系

初貝 安弘 居室：B319

hatsugai@sakura.cc.tsukuba.ac.jp